

東京都市大学大学院 総合理工学研究科

建築・都市専攻 博士論文

通行車輛の繰返し荷重が
プレキャストL型擁壁の破壊に及ぼす影響

2022年3月

小友 行峰

— 要旨 —

現在のL型擁壁の設計では、車輛による載荷重として等分布荷重 10kN/m^2 を考慮するケースが多い。しかし、道路に使用するプレキャストL型擁壁は、以下に示す様に現場打ちL型擁壁や宅地で使用されるL型擁壁とは異なる考え方が必要である。一つ目は、車輛が停車した時にたて壁に作用する水平応力は、載荷点の正面をピークとした山なりであり、たて壁と車輛の距離が近いほど、浅い深さの値が大きくなる。二つ目は、プレキャストL型擁壁の構造が挙げられる。現場打ちL型擁壁の天端に水平方向に部分分布荷重が載荷された場合、荷重を受け持つ有効幅はたて壁高さの2倍に荷重の分布幅を加算したものになる。しかしながら、プレキャストL型擁壁は高さに関係なく製品延長2mが有効幅になる。また、国外では擁壁に作用する土圧はたて壁の曲げ剛性に影響を受けるとされているが、国内では考慮されていない。曲げ剛性が現場打ちL型擁壁より小さいプレキャストL型擁壁が、通行車輛の繰返し荷重により破壊するのであれば維持管理上のリスクになる。本研究では、相似性を考慮したときプレキャストL型擁壁と曲げ剛性がほぼ同じ高さ20cmの疑似L型擁壁と、約3倍である高さ20cmの軽量形鋼の壁を作製して、繰返し載荷実験を行った。

二つの壁に共通する一つ目の結果として、裏込め土表面に載荷を繰返すと、応力の振幅は徐々に残留応力に置き換わり縮小した。二つ目の結果として、たて壁から試験輪までの距離が4cmの場合、鉛直方向における繰返し載荷時の残留応力および応力の振幅の分布は、地表面近くが大きく深さが増すほど急激に減少した。また、同じ深さ方向においては、残留応力は延長方向に同じ大きさで作用し、応力の振幅は載荷点の正面を最大値とした山なりになった。その結果、等分布荷重 10kN/m^2 の載荷重が作用した場合よりも、大きな断面力が作用する場合があります。

二つの壁の違いは、軽量形鋼の壁面がある水平応力値に達すると、それ以後は載荷し続けても残留応力および応力の振幅が減少に転じたのに対し、疑似L型擁壁は浅い深さにおいて、同様に減少に転じた後再び増加する傾向があった。このことから、たて壁に作用する背面からの水平応力はたて壁の曲げ剛性により異なり、曲げ剛性が低いと繰返し荷重による背面からの水平応力にたて壁の水平変位による背面からの水平応力が加算される。疑似L型擁壁の場合、裏込め材の塑性変形がたて壁の水平変位を増加させ、今度はたて壁の水平変位が裏込め材の塑性変形を促した。それが残留応力および応力の振幅の増加を誘引し、たて壁の破壊を早めた。

— 目次 —

第1章 序論

1. 1	本研究の背景	1
1. 1. 1	プレキャストL型擁壁の普及	1
1. 1. 2	プレキャストL型擁壁の変状および損傷状況	2
(1)	たて壁のひび割れ	2
(2)	たて壁の傾斜	2
(3)	L型擁壁の転倒および沈下	3
(4)	L型擁壁の滑動	4
(5)	裏込め土の転圧不足	4
(6)	裏込め土の流出	4
(7)	まとめ	5
1. 1. 3	L型擁壁のたて壁の設計で考慮している水平荷重	5
(1)	裏込め土による土圧	5
(2)	車輛通行により裏込め土を介してたて壁に作用する水平土圧	6
(3)	水圧	6
(4)	地震の影響による水平荷重	6
(5)	風荷重	6
(6)	自動車の衝突荷重	6
1. 1. 4	等分布荷重を載荷したときのたて壁に作用する断面力	7
1. 1. 5	プレキャストL型擁壁のたて壁に実際に作用する断面力	7
1. 2	コンクリート擁壁に関する既往の研究	9
1. 2. 1	コンクリート壁に作用する輪荷重を原因とした水平応力	9
1. 2. 2	裏込め土の凍結融解によるL型擁壁のたて壁の疲労破壊	10
1. 2. 3	微小変位の繰返しに伴い変形が進行したU型擁壁の挙動	11
1. 3	本研究の目的	12
1. 4	本論文の構成	15
	参考文献	16

第2章 裏込め土を介して軽量形鋼の壁面に作用する水平応力の測定

2. 1	まえがき	17
2. 2	疑似L型擁壁のたて壁の推定降伏曲げモーメント	17
2. 2. 1	疑似L型擁壁に使用するプレキャスト製品	17
2. 2. 2	改良桝 30cm×30cm を使用した場合の推定降伏曲げモーメント	19

2. 7	まとめ	55
	参考文献	55
第3章 Boussinesq 式による壁面に作用した水平応力の近似		
3. 1	まえがき	57
3. 2	残留応力最大値および水平応力最大値の値	58
3. 3	鉛直方向の応力分布と近似曲線	59
3. 3. 1	Boussinesq 式に乗じる係数 α の値	59
3. 3. 2	鉛直方向の応力分布と近似曲線	60
3. 4	まとめ	64
	参考文献	64
第4章 曲げ剛性が高い擁壁に作用する断面力		
4. 1	まえがき	66
4. 2	裏込め材および等分布荷重による土圧	66
4. 3	曲げ剛性がプレキャスト L 型擁壁の約 3 倍の擁壁に作用する断面力	67
4. 3. 1	比較する載荷重	67
4. 3. 2	残留応力最大値による断面力	67
4. 3. 3	応力の振幅最大値による断面力	70
	(1) 水平応力	70
	(2) 断面力	72
4. 3. 4	曲げ剛性が高い擁壁の天端から 20cm 下方の断面力	75
4. 3. 5	曲げ剛性が高い擁壁のたて壁に作用する断面力の式	76
4. 4	まとめ	77
	参考文献	77
第5章 疑似 L 型擁壁の終局曲げモーメント		
5. 1	まえがき	78
5. 2	疑似 L 型擁壁の仕様	78
5. 3	疑似 L 型擁壁の終局曲げモーメント	79
5. 4	疑似 L 型擁壁の破壊形態	80
5. 5	疑似 L 型擁壁が破壊する繰返し載荷重の推定	81
5. 6	まとめ	82
	参考文献	82

第6章 疑似L型擁壁を用いた繰返し載荷実験

6. 1	まえがき	83
6. 2	繰返し載荷実験装置	83
6. 2. 1	疑似L型擁壁の配置および載荷装置	83
6. 2. 2	水平応力の計測と繰返し載荷重の載荷方法	85
6. 3	繰返し載荷実験結果	86
6. 3. 1	たて壁の破壊形状	86
6. 3. 2	鉛直方向の水平応力と天端水平変位	88
(1)	タンパ転圧時	88
(2)	載荷重 1692N	89
(3)	載荷重 1757N	92
(4)	載荷重 1809N	95
(5)	載荷重 1855N	98
(6)	載荷重 1911N	101
(7)	載荷重 1967N	104
(8)	載荷重 2019N	107
(9)	載荷重 2073N	110
6. 3. 3	まとめ	113
(1)	天端水平変位	113
(2)	各深さにおける背面からの水平応力	113
(3)	天端水平変位と水平応力の関係	114
	参考文献	115

第7章 疑似L型擁壁の破壊過程

7. 1	まえがき	116
7. 2	疑似L型擁壁の破壊時に作用した鉛直断面の応力の分布と近似曲線	116
7. 2. 1	Boussinesq 式に係数 α を乗じた近似式の作成	116
7. 2. 2	疑似L型擁壁に作用した鉛直断面の応力の分布と近似曲線	117
7. 2. 3	壁体の曲げ剛性の相違による天端水平変位と水平応力の変化	120
7. 3	疑似L型擁壁における繰返し載荷重の大きさと破壊回数との関係	121
7. 3. 1	普通鉄線の有効高さの影響	121
7. 3. 2	本研究とコンクリートの疲労との関係性	121
7. 3. 3	繰返し載荷重の大きさと破壊回数との関係	121
7. 4	まとめ	122
	参考文献	123

第 8 章 本論文の擁壁構造物に対する考察	
8. 1 まえがき	124
8. 2 Boussinesq 式を用いた水平応力の設計法の導入	124
8. 3 たて壁に作用する水平応力におけるたて壁の曲げ剛性の考慮	127
8. 4 プレキャスト L 型擁壁の変状・損傷に対する繰返し載荷重の評価と対策	128
参考文献	129
第 9 章 結論と今後の課題	
9. 1 結論	130
9. 2 今後の課題	132
付録	
1. 軽量形鋼の壁面に作用した残留応力最大値および水平応力最大値の値	134
2. Boussinesq 式に乗じる係数 α の値	138
本論文に関する著者の発表論文	146
謝辞	147

第1章 序論

1. 1 本研究の背景

1. 1. 1 プレキャストL型擁壁の普及

近年，建設業就労者の高齢化や建設作業における技能者不足が問題になっている．建設現場においては，生産性向上を目指して i-construction の取り組みが活発であり，プレキャストコンクリート製品の活用が進められている．市街地を通らない国道，県道および市道においても，盛土区間で道路敷地幅が確保できない区間においては，プレキャストL型擁壁等の土留め構造物が設置されている(写真-1.1)．

プレキャストL型擁壁については，国内で高さ1m～5mの製品が作られており，現場打ちL型擁壁と比べて，工場生産での安定した品質，耐久性の向上，設計の効率化，施工期間の短縮が図れる．そのほか，現場における施工管理の軽減，高齢化対策，省人化対策，安全性の向上，容易な補修，産業廃棄物の抑制，コスト縮減等を図ることができる¹⁾．そのため，比較的小型のL型擁壁は，プレキャスト製品の使用が一般化している．また，大型のL型擁壁についても，車両制限令による運搬時の高さ制限および車両総重量制限を考慮して，擁壁設置後にかかと版を現場打ちで継足す方法などがとられ，プレキャスト化が進んでいる．

しかしながら，道路に設置されたプレキャストL型擁壁の中で，歩道が無い区間に設置された擁壁は，車両がたて壁に接近して通行することができるため，現在の擁壁工指針で規定されている載荷重 $q=10\text{kN/m}^2$ の等分布荷重とは，異なる載荷重の考え方も必要である．



a. 県道(千葉県)



b. 国道(長野県)



c. 市道(千葉県)



d. 県道(千葉県)

写真-1.1 歩道が無い道路に設置されたプレキャストL型擁壁

1. 1. 2 プレキャストL型擁壁の変状および損傷状況

歩道が無い道路に設置されたプレキャストL型擁壁を調査した結果、以下のような不具合が見受けられた。

(1) たて壁のひび割れ

写真-1.2のように擁壁間の連結金具あたりからほぼ45度で斜め上方に向かってたて壁にひび割れが発生していることがあった。**写真 a**は外側線中央からたて壁までの距離が80cmであり、**写真 b**は外側線中央からたて壁までの距離が100cm～105cmである。ひび割れが発生した区間では、連結部のコンクリートおよび目地の剥離も見受けられた。これらは「道路土工-擁壁工指針」に準拠して、載荷重として10kN/m²の等分布荷重を考慮しているのであるから、等分布荷重以上の断面力が作用した可能性がある。



a. 千葉県，市道，左の写真で赤枠はひび割れの位置，右の写真は擁壁前面



b. 長野県，国道，左の写真で赤枠はひび割れの位置，右の写真は擁壁前面

写真-1.2 プレキャストL型擁壁のひび割れ

(2) たて壁の傾斜

写真-1.3のようにたて壁が傾斜していることがあった。**写真 a**では地上高1.1mのプレキャストL型擁壁において、ひび割れのほか、たて壁の天端付近で4cmの傾斜が確認された。この付近の擁壁は外側線からたて壁までの距離が100cmから105cmである。**写真 b**の地上高1.7mのL型擁壁でも同じような傾斜が確認された。舗装面にかかと版端部の上方に沿ってひび割れ等が見られなかったことや、たて壁の変位は下にいくほどゼロに近いことから、擁壁全体の滑動及び転倒、支持地盤の支持力不足が原因ではなく、たて壁のみの傾斜と思われる。これらも載荷重として10kN/m²の等分布荷重を考慮しているのであるから、等分布荷重10kN/m²以上の断面力が作用して、たて壁が傾斜したものと推測される。



a. 長野県，国道，左の写真で赤枠は傾斜位置，青枠はひび割れ位置，右の写真は擁壁前面



b. 千葉県，県道，左の写真は道路現況，右の写真は擁壁前面

写真-1.3 プレキャストL型擁壁のたて壁の傾斜

(3) L型擁壁の転倒および沈下

プレキャスト擁壁の地上高が約1.0mで、たて壁背面から約0.9mの路面にひび割れが発生し、車輛用防護柵基礎の沈下、プレキャストL型擁壁の転倒が発生していた例を**写真-1.4**に示す。



a. 舗装面のひび割れ



b. L型擁壁の沈下



c. L型擁壁の転倒



写真-1.4 プレキャストL型擁壁の転倒，沈下(県道 千葉県)

写真は同一箇所である。この場合、土中式の車輛用防護柵では支柱の根入れ部分が擁壁のかかと版にあたるため、車輛用防護柵の基礎をコンクリート基礎にしたものと考えられる。L型擁壁のみ動いていることから、擁壁基礎地盤の支持力不足による転倒および沈下と思われる。

(4) L型擁壁の滑動

写真-1.5はプレキャストL型擁壁どうしおよび均しコンとずれが発生している例である。擁壁の天端にずれは無く、前面の埋戻し土は無い状態であることから、裏込め施工中にL型擁壁が滑動したものと思われる。



a. 道路現況



b. 擁壁側面

写真-1.5 プレキャストL型擁壁の滑動(県道 千葉県)

(5) 裏込め土の転圧不足

写真-1.6にL型擁壁背面の舗装に発生したクラックを示す。L型擁壁たて壁の傾斜が見受けられないことから、現道を広げるのにL型擁壁を施工した際、掘削・埋戻しをした部分と従来からの道路部分とで境界面が生じ、大型の転圧機械で締固めができなかったことから、埋戻しの境界面上の舗装にクラックが発生したと思われる。



a. 擁壁前面



b. 擁壁舗装面

写真-1.6 プレキャストL型擁壁の裏込め土の転圧不足(県道 千葉県)

(6) 裏込め土の流出

写真-1.7に擁壁の水抜き孔からの裏込め土流出による、L型擁壁背面の沈下の様子を示す。この原因として吸出し防止材の未設置、または孔径より大きめの割栗石や砕石の未設置が考えられる。



a. 裏込め土の流失



b. 擁壁背面の沈下

写真-1.7 水抜き孔からの裏込め土流出(県道 千葉県)

(7) まとめ

例として挙げたプレキャストL型擁壁の変状および損傷において、L型擁壁の転倒および沈下、L型擁壁の滑動は、擁壁の安定性の問題で、作用する荷重の増加、事前の支持地盤の調査不足または施工不良が原因である。また、裏込め土の転圧不足、裏込め土の流出は施工不良に由来するものである。それに対し、たて壁のひび割れおよび傾斜は、部材の安全性の問題で、L型擁壁の安定した品質を考えれば、設計で想定している以上の荷重がたて壁に作用した可能性がある。そこで、L型擁壁のたて壁において、現在の「道路土工-擁壁工指針」で考慮している水平荷重を以下に記す。

1. 1. 3 L型擁壁のたて壁の設計で考慮している水平荷重

プレキャストL型擁壁が道路盛土で使用され始めたのは、年号が平成にかわって間もなくであり、当時は「道路土工-擁壁・カルバート・仮設構造物工指針」(昭和62年5月)(社団法人日本道路協会発行)に基づいて設計が行われていた。現在の「道路土工-擁壁工指針」(平成24年度版)(社団法人日本道路協会発行)²⁾では擁壁のたて壁の設計に当たって、以下の水平荷重を考慮している。

(1) 裏込め土による土圧

「道路土工-擁壁工指針」において、擁壁は主働土圧をもとに試行くさび法にて設計が行われている。主働土圧は壁が前方に移動し、それに伴って背面土が崩れかかるときの土圧である。また、裏込め土が礫質土、砂質土および粘性土の場合の単位体積重量、内部摩擦角及び粘着力は異なり、同じたて壁高さであっても、裏込め土の種類が異なれば、土圧は同一にはならない。裏込め土は道路の路体および路床も兼ねているため、多くの二次製品の製造メーカーは、プレキャストL型擁壁のたて壁に作用する土圧を計算する場合、砂質土で計算を行っている場合が多い。歩道が無い道路では、L型擁壁背面の盛土形状はほぼ平らであり、裏込め土が砂質土であれば、たて壁に作用する土圧はクーロンの主働土圧と一致する。

(2) 車輛通行により裏込め土を介してたて壁に作用する水平土圧

一般的に道路の盛土部に設置された擁壁において、擁壁背面の地表面に作用する載荷重は、(社)日本道路協会が1987年に発行した「道路土工－擁壁・カルバート・仮設構造物指針」以降、現在の「道路土工－擁壁工指針」まで $q=10\text{kN/m}^2$ と規定されている。載荷重 10kN/m^2 の根拠は、1987年当時の設計にてT-20活荷重を対象にしていたことから、車輛総重量20tonを車輛占有面積 $7\text{m}\times 2.75\text{m}$ で割ったものである³⁾。それから後、1993年の車輛制限令および道路構造令の改正に伴い、橋の設計に用いる自動車荷重は245kNに変更された。T-245kN車は三軸構造で、後ろ二軸の軸重の和が200kNであり、後輪の一輪荷重は50kNになる。この場合、車両制限令に規定されている車輛寸法を用いれば、 $q=245/(11.0\text{m}\times 2.5\text{m})=8.9\text{kN/m}^2$ となり、安全側に丸めて 10kN/m^2 と決めたのだと思われる³⁾。そのため、自動車荷重が245kNに見直されてからも、現在に至るまで「道路土工－擁壁工指針」には載荷重を等分布荷重 10kN/m^2 とすることが明記されている。

現在では、多くのプレキャスト製品製造メーカーがこの 10kN/m^2 を用いて、プレキャストL型擁壁の構造計算を行っている。このとき、載荷重 $q(\text{kN/m}^2)$ により裏込め土を介してたて壁に作用する土圧 p は、主動土圧係数 K_A を乗じて、深さに関係なく $p = q \cdot K_A$ で表される。

(3) 水圧

「道路土工－擁壁工指針」において、擁壁では水抜き等の排水工を適切に設置することにより、水圧の影響を軽減することが基本とされている。そのため、一般的な擁壁では、水圧の影響を考慮しなくても良いとされている。

(4) 地震の影響による水平荷重

高さ5m以下のプレキャストL型擁壁は、国土交通省の各地方整備局の標準図集および設計施工マニュアルにおいて、地震の影響は考慮しなくてもよいことになっている。ただし、擁壁の重要度および復旧の難易度を考慮し、必要に応じて地震時の擁壁の慣性力および地震時土圧を考慮して安定検討を行うとされている。「道路土工－擁壁工指針」²⁾では高さ8m以下のコンクリート擁壁において、地震動の作用に対する照査を行わなくてもレベル1地震動に対して性能2を、レベル2地震動に対して性能3を満足するとしている。

(5) 風荷重

擁壁天端に車両用防護柵または遮音壁を設置する場合、擁壁の高さに応じて風荷重に対し、プレキャストL型擁壁の安定性照査、部材の安全性照査が必要となる。

(6) 自動車の衝突荷重

擁壁天端に車両用防護柵を設置する場合は、自動車の衝突荷重に対してプレキャストL型擁壁の安定性照査および部材の安全性照査が必要となる。プレキャストL型擁壁においては、擁壁高さ2.0m以上で車両用防護柵の設置を可能としている場合がある⁴⁾。

1. 1. 4 等分布荷重を載荷したときのたて壁に作用する断面力

「道路土工-擁壁工指針」の設計方法によれば、歩道がなく擁壁背面の盛土形状が一様で裏込め土の粘着力がない場合、擁壁のたて壁に常時作用する水平土圧は、裏込め土による水平土圧と載荷重 10kN/m^2 により裏込め土を介して作用する水平土圧の和となり、**図-1.1** のようになる。

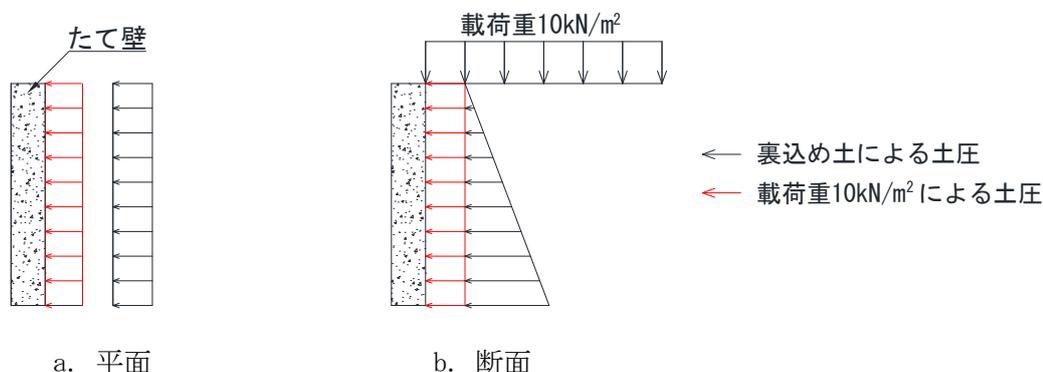


図-1.1 道路土工擁壁工指針で考慮している水平土圧

たて壁背面が鉛直なL型擁壁を想定した場合、裏込め土による水平土圧および載荷重 10kN/m^2 により裏込め土を介してたて壁に作用する水平土圧を基に、たて壁に作用する断面力を計算すると**表-1.1** のようになる。せん断力および曲げモーメントの比率より、たて壁高さが小さいほど全体の断面力に占める載荷重の割合は大きくなることが分かる。

表-1.1 L型擁壁のたて壁に作用する断面力 ($\gamma=19\text{kN/m}^3$, $\Phi=30^\circ$, $\delta=20^\circ$)

たて壁 高さ (m)	せん断力 (kN)				曲げモーメント (kN・m)			
	裏込め土 A	等分布荷重 B	合計 C=A+B	比率 B/C	裏込め土 A	等分布荷重 B	合計 C=A+B	比率 B/C
1.0	2.655	2.793	5.448	0.51	0.884	0.930	1.814	0.51
1.5	5.972	4.191	10.163	0.41	2.986	2.096	5.082	0.41
2.0	10.617	5.587	16.204	0.34	7.082	3.726	10.808	0.34
2.5	16.588	6.985	23.573	0.30	13.818	5.818	19.636	0.30
3.0	23.887	8.381	32.268	0.26	23.887	8.381	32.268	0.26
3.5	32.513	9.779	42.292	0.23	37.943	11.412	49.355	0.23
4.0	42.467	11.174	53.641	0.21	56.609	14.894	71.503	0.21
4.5	53.747	12.572	66.319	0.19	80.620	18.859	99.479	0.19
5.0	66.354	13.969	80.323	0.17	110.612	23.286	133.898	0.17

1. 1. 5 プレキャストL型擁壁のたて壁に実際に作用する断面力

前項では、等分布荷重 10kN/m^2 が載荷されたときの、たて壁高さごとの断面力を示した。しかしながら、道路に使用するプレキャストL型擁壁では、以下に示す様に現場打ちL型擁壁や宅地で使用されるL型擁壁とは、異なる載荷重の考え方が必要である。

一つ目は、載荷重による背面からの水平応力が挙げられる。現在の擁壁設計においては、国

内外を問わず擁壁の上部に道路を設ける場合には、車輛による載荷重として等分布荷重を考慮することが多い。しかし、車輛通行時にたて壁に作用する背面からの水平応力は、**図-1.2a**のように平面では載荷点の正面をピークに山なりである^{5),6)}。したがって、プレキャストL型擁壁に接近して車輛が通行する場合、延長2mの擁壁1個で後輪2~4輪分の荷重を受けることがあり得る。また、輪荷重により裏込め土を介してたて壁に背面から作用する水平応力は、たて壁と通行車輛の距離が近いほど、地表面近くの値が大きいことである(**図-1.2b**)⁵⁾⁻⁹⁾。**写真-1.1**で示したように、道路幅員が狭く車両用防護柵がL型擁壁から数十cmしか離れていない場合や設置されていない場合、車輛は容易にL型擁壁に接近できる。したがって、プレキャストL型擁壁においては、車輛の走行位置がたて壁に近いとき、たて壁の浅い位置ほど等分布荷重の載荷以上に輪荷重による断面力を重視しなければならない。

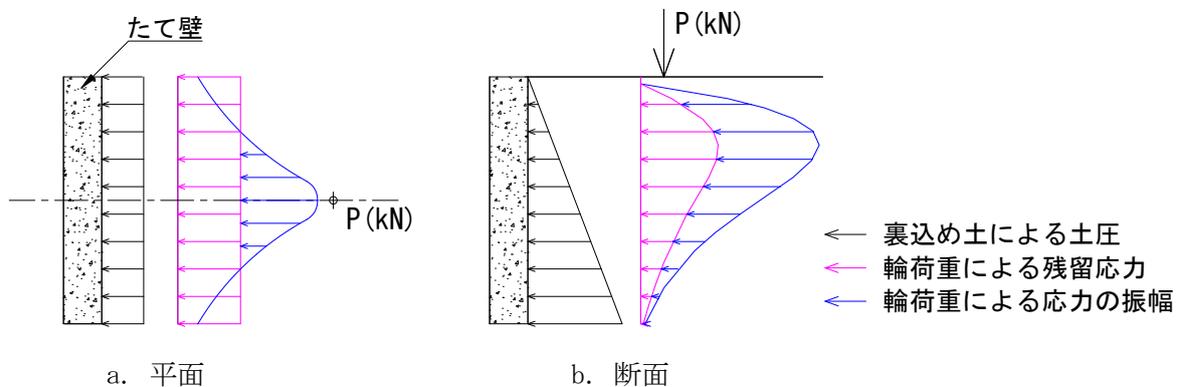


図-1.2 車輛通行時にたて壁に作用する水平応力

たて壁に作用する裏込め土自体の土圧は、土の粒度や含水状態、応力履歴や境界条件等によって複雑な挙動を示すとされ、擁壁の変形特性を考慮して主動土圧を適用している²⁾。同様に、通行車輛により裏込め土を介してたて壁に作用する土圧も、諸条件により複雑な挙動を示す。

二つ目は、プレキャストL型擁壁の構造が挙げられる。実際の車輛荷重は車輪部分から伝わる集中荷重であり、地表面に等分布には作用していない。車輪から荷重が伝達されたとき、現場打ちL型擁壁であれば天端に水平方向に部分分布荷重が載荷されると、荷重を受け持つ有効幅はたて壁高さの2倍に荷重の分布幅を加算したものになる¹⁰⁾。しかしながら、プレキャストL型擁壁は製品延長が2m以下で、継手がボルトボックス方式または接続プレート方式であり、擁壁相互が剛結合で無いため、高さに関係なく製品延長2mが有効幅になる。荷重が分散しないのであれば、たて壁の単位延長当りに作用する断面力は大きくなる。

さらに、車輛の輪荷重はたて壁に静的に作用するのではなく、載荷、除荷が不規則に繰返されることである。この点について現在の「道路土工-擁壁工指針」では、通行車輛によるたて壁の疲労が考慮されていない。輪荷重以外のプレキャストL型擁壁の疲労破壊については、寒冷地において裏込め土の凍結融解による日周期レベルの繰返し荷重により、たて壁が変位をしながら鉄筋の降伏点以下で破壊することが報告されている^{11),12)}。また、コンクリートの繰返し載荷 10^7 回における疲労強度は、静的強度の50~60%とされており、静的破壊荷重の80~90%以上

の持続荷重を加えておくと、しだいにひずみが増大し、ついにはクリープ破壊するとされている¹³⁾。通行車輛によりたて壁が疲労するのであれば、維持管理上のリスクとなり得る。

以上、プレキャストL型擁壁のたて壁に実際に作用する断面力は、「道路土工-擁壁工指針」の計算方法から得られた断面力とは異なること。L型擁壁では疲労を考慮していないことを述べた。次節では本項の根拠となった既往の研究について記す。

1.2 コンクリート擁壁に関する既往の研究

1.2.1 コンクリート壁に作用する輪荷重を原因とした水平応力

長い間、車輛の輪荷重により裏込め土を介してたて壁背面に作用する水平応力は、わが国のみならず世界的にみても、実際の輪荷重を等分布荷重に置き換えて、それをランキン土圧またはクーロン土圧を用いて計算されてきた。これを裏付ける唯一の文献は、Peck 他(1974)からの以下の発表である⁶⁾。「通常、輪荷重はH-10 高速道路積載の場合、240psf (11.5kPa)の等分布荷重相当としてしばしば想定される」。この発表は単に工学的判断と経験に基づいていた。しかし、その後多くの研究者(例えば Barber, 1956; Richard and Linger, 1965)が、活荷重載荷により壁に作用する土圧は、表面付近で大きく、壁の高さ全体にわたって非直線的に減少することを明らかにしている。

Spangler and Mickle⁷⁾は載荷重を擁壁背面から作用する水平応力に換算するアプローチの方法には、いくつかの短所と欠点があるとした。第一に、実際の荷重に対して等分布荷重の大きさを決定するための論理的または科学的根拠がないことである。第二に、置換による壁背面に作用する水平応力は、構造体の高さ全体にわたって均一な強度であるのに対して、実際の荷重による応力の強度は、壁の高さ全体にわたってかなり変化する可能性があることである。Spangler and Mickle による実験は、自重以外作用していない裏込め土に、集中荷重が静的載荷された場合の、たて壁背面に作用する水平応力分布を、ポアソン比 0.5 を用いて Boussinesq の式で計算したとき、背面からの水平応力は Boussinesq の式の 2 倍になることが示されている。実験で使用した壁は厚さ 15cm、高さ 183cm で比較的剛性があり、壁面水平変位は比較的小さいものである。この実験において、同じ裏込め土に 2 つ以上の載荷重が時間をおいて載荷された場合、最初の載荷重を取り除いた後の壁面への土圧は、上載荷重を載荷する前よりもしばしば大きく残留応力が確認されている。

Liu Ze(刘泽)⁸⁾らは、道路拡幅部分に新設された高さ 4m、かかと版幅 3m、目地間隔 10m の現場打ち L 型擁壁のたて壁およびかかと版に作用する土圧を測定した。まず、土圧ボックスを一直線に配置して裏込め土に転圧を加えて埋戻し表面を舗装した。次に、30ton のダンプトラックの後輪が土圧ボックスの位置にくるように駐車した。このとき、裏込め土にはスラグ土を使用し、後輪位置は壁から 1m~5m とした。実験結果として測定された水平土圧は Boussinesq 解析解とよく一致しており、たて壁からの距離が増加するほど土圧は減少し、等分布荷重を使用した計算結果とは異なることを報告している。また、同論文において等分布荷重の載荷重と

Boussinesq 解析解とで、壁面に作用する断面力を理論解と比較した。比較に用いた等分布荷重は擁壁高さ 2m 以下で 20kN/m^2 、10m 以上で 10kN/m^2 としており、実験で用いた高さ 4m の場合 17.5kN/m^2 となる。Boussinesq 解析解に用いた計算モデルは、試験に用いた車輛の諸元より、前輪荷重 30kN が 2 箇所、後輪荷重 60kN が 4 箇所、後輪の隣接軸距 1.4m、輪距 1.8m である。その結果、等分布荷重を用いて車輛通行により裏込め土を介してたて壁に作用する水平土圧を決定すると、水平土圧に起因する曲げモーメントが過小評価される可能性があり、これによりたて壁の曲げ防止および転倒防止能力が要件を満たさない可能性があるとしている。また、たて壁の天端に向かって壁断面サイズが小さくなる場合は、たて壁の中央部と上部のせん断強度が不足して、せん断破壊が発生する可能性があるとしている。

坂根と貝通丸⁵⁾の水路壁の応力計算法によれば、輪荷重により水路壁背面に作用する水平応力 σ_{r-h} については、土のポアソンの決定が難しいことから、Boussinesq 式で求めた鉛直方向の垂直応力 σ_z に土圧係数を乗じて求められるとしている。

MISRA⁹⁾はたて壁の水平応力最大値を、裏込め土の状態を考慮して弾性係数 E とせん断弾性係数 G の比 (E/G) をパラメーターとした方法で表す方法を提案した。この場合、裏込め材料が柔らかくまたは緩くなると (高い E/G 値で表される)、水平方向の応力伝達が低下することが観察され、その結果、擁壁に作用する背面からの水平応力が全体的に減少するとしている。

いずれの研究にしても、応力分布の形状は図-1.2 のように水平方向だと載荷点の正面を頂点に山なりになり、たて壁と通行車輛の距離が近いと鉛直方向は地表面近くで最大となって、深さとともに急激に減少することを示している。結果的に背面からの水平応力は、等分布荷重のような四角形分布にはならないとしている。さらに付け加えるべきことは、現道のプレキャスト L 型擁壁では輪荷重が壁と平行に繰返し載荷されているため、たて壁に生じる背面からの水平応力は変化することが考えられた。

1. 2. 2 裏込め土の凍結融解による L 型擁壁のたて壁の疲労破壊

長谷川ら^{11), 12)}は、寒冷地において裏込め土の凍結融解により発生する日周期レベルの繰返し荷重により、擁壁が疲労破壊する様子を、図-1.3 のような底版幅 1.2m×擁壁高 1.5m×延長 2.0m のプレキャスト L 型擁壁を用いて実験を行った。天端から 15cm 下の位置に約 1.4tf (13.72kN) の荷重を静的載荷したとき、たて壁取付け部背面において、擁壁全幅に渡ってひび割れが発生した。さらに載荷を続けて破壊荷重が 1.95tf (19.11kN) であることを確認している。

また、長谷川らは同一仕様のプレキャスト L 型擁壁にて、繰返し載荷実験も行っている。実験では荷重の上限および下限をそれぞれ 1.7tf-0.5tf, 1.8tf-0.6tf, 1.9tf-0.7tf とし、荷重振り幅をいずれも 1.2tf とした。降伏するまでの繰返し載荷回数は、それぞれ 82 回, 22 回, 12 回であり、繰返す荷重の上限値が小さいほど破壊するまでの載荷回数は増加している。結果として寒冷地においては、裏込め土が凍結融解作用を受けるとき、設計荷重より小さい荷重で擁壁のたて壁が破壊する可能性があるとしている。

長谷川らの実験結果を基に、使用したプレキャスト L 型擁壁に生じた応力度を計算した。L 型擁壁のコンクリートの設計基準強度を 30N/mm^2 、配筋は D13 (SD295A) が 178mm 間隔、鉄筋の有効

高4cm, たて壁取付け部の部材幅を10cmとしたとき, たて壁取付け部に生じた応力度は**表-1.2**のようになる.

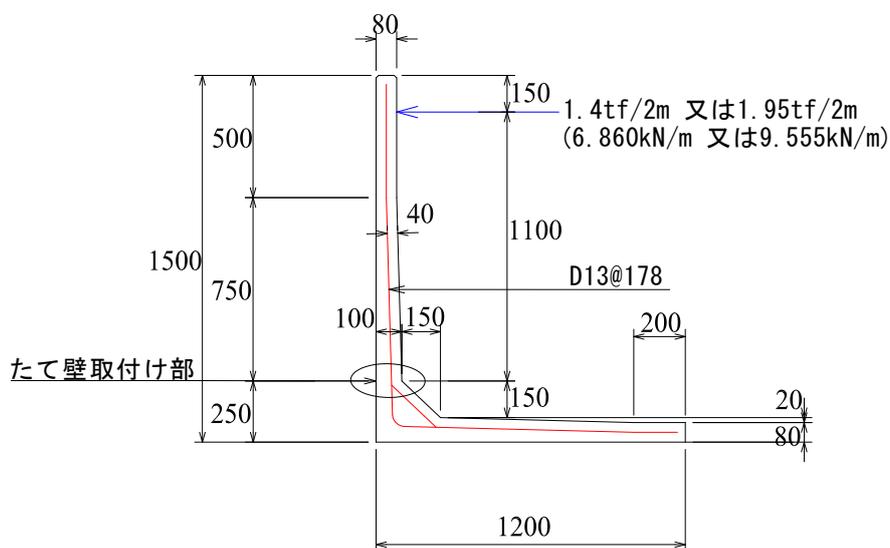


図-1.3 プレキャストL型擁壁の断面

表-1.2 プレキャストL型擁壁のひび割れ強度および降伏強度

荷重ケース	曲げモーメント (kN・m)	せん断力 (kN)	圧縮応力度 σ_c (N/mm ²)	引張応力度 σ_s (N/mm ²)	せん断応力度 τ (N/mm ²)
1.4tfの場合	7.546	6.860	11.07 > 10	207.3 > 180	0.11 < 0.52
1.95tfの場合	10.511	9.555	15.42 > 10	288.8 > 180	0.16 < 0.52

表中の各応力度で, 右の値は「道路土工-擁壁工指針」(平成24年度版)で示している許容応力度である. **表-1.2**のとおり, たて壁取付け部に1.4tfの荷重が加わり, 曲げモーメントによりコンクリートの圧縮応力度および鉄筋の引張応力度が許容応力度を越えたとき, ひび割れが発生した. 1.95tfの荷重が加わると, コンクリートの圧縮応力度は設計基準強度30N/mm²に対して余裕があるのに対し, 鉄筋(SD295A)に生じる引張応力度が降伏強度295N/mm²近くに達したため, たて壁は破壊したと思われる. したがって, たて壁の破壊は鉄筋の降伏で決まると考えられる.

さらに, このプレキャストL型擁壁の繰返し載荷実験でわかることは, たて壁と平行に車輛が通行した場合, たて壁内の鉄筋の引張応力度が降伏強度に達する前に, たて壁が破壊することが有り得ることを示唆している.

1.2.3 微小変位の繰返しに伴い変形が進行したU型擁壁の挙動

長谷川らの実験装置は, 水平載荷にジャッキを使用し, 鉄筋の降伏点までは荷重制御で載荷速度0.02tf/sec, 鉄筋の降伏後は変位制御で載荷速度0.1mm/secとしている. しかしながら, 実際のL型擁壁には裏込め土が存在し, 荷重は裏込め土を介して伝達される.

住吉ら^{14), 15)}は高さ11mの半地下道路のU型擁壁において、側壁の主働方向への変形の進行を、高さ約50cmの模型擁壁を使用した室内実験にて理由づけた。実験において、壁面部は土槽底面に台座を設置し、その上面にヒンジで高さ510mm×幅390mmの模型擁壁を設置しており、擁壁の前面にアームを介してモータジャッキを設置し、擁壁に前面側と背面側の水平変位を与えている。室内模型実験により分かったことは、以下の通りであった。

- ① 繰返し数が多いが、繰返し水平変位の振幅が小さい(日変動相当)ケースでは、土圧は増加しなかった。
- ② 繰返し数が少ないが、繰返し水平変位の振幅が大きい(季節変動相当)ケースでは、土圧が増加した。
- ③ 土圧が増加したケースでは、背面土が大きく沈下した。

U型擁壁の側壁は、季節を通じた温度変化に伴って、複数年にわたり主働方向および受働方向への微小変位を繰返した結果、側壁の主働方向への変形が進行しながら、背面土圧が増加したとしている。住吉らの報告からすれば、通行車輛の輪荷重により、プレキャストL型擁壁に大きな水平変位が生じた場合も、擁壁が主働方向に変位しながら、裏込め土の土圧が増加することが想像できる。

1.3 本研究の目的

(1) 輪荷重が繰返し載荷された場合の壁面に作用する水平応力の解明

1.1.3(2)で述べた通り、「道路土工-擁壁工指針」で考慮している載荷重は等分布荷重であり、車輛通行により裏込め土を介してL型擁壁のたて壁に作用する背面からの水平応力は、深さに関係なく一定で $p=q \cdot K_A$ で表わされる。これは等分布荷重の大きさこそ違えども国内外を問わず同じ傾向にある。しかし、1.1.5で記した通り、実際の載荷重は車輪から伝達される集中荷重であることは明らかである。1.2.1の既往の研究で記した通り、多くの研究者は車輛通行および裏込め土のローラによる締固め作業において、擁壁のたて壁に作用する背面からの水平応力は、たて壁と通行車輛の距離が近いほど、表面付近で大きく壁の高さ全体にわたって非直線的に減少することを実験より明らかにし、Boussinesq式を引用して説明している。その一つのSpangler and Mickleの実験は、自重以外作用していない裏込め土への載荷であったことから背面からの水平応力がBoussinesq式の2倍になったと思われ、他方Liu Ze(刘泽)らの実験は供用中の現道拡幅部での実験であり、締固められた裏込め土の上に舗装が施されて、その表面への載荷であるため現実に近い。

Liu Ze(刘泽)らが報告したように、停車した状態でたて壁背面に作用する水平応力がBoussinesq式とよく一致するのであれば、「道路土工-擁壁工指針」に則って、等分布荷重を用いて車輛通行により裏込め土を介してたて壁に作用する水平土圧を決定すると、水平土圧に起因する曲げモーメントが過小評価される可能性がある。これにより、たて壁の曲げ防止および転倒防止能力が要件を満たさない可能性がある。

我が国の車輛制限令では**表-1.3**のとおり定めている。また、道路橋示方書などでは後輪の軸重をT荷重の場合は200kNとし、輪荷重を100kNとしている。そこで、**図-1.4**のように後輪の隣接軸距1.3m、軸重9.5t(93kN)、輪荷重46.5kNの場合と、後輪の隣接軸距1.8m、軸重10t(98kN)、輪荷重49kNの場合と、輪荷重100kNの場合とで、作用する合計の曲げモーメントおよびせん断を Boussinesq 式にて計算すると、**表-1.4**および**表-1.5**のようになる。参考値として等分布荷重 10kN/m²による断面力も併せて表記した。それぞれの計算値には、裏込め土自体の土圧による曲げモーメントおよびせん断力を加算している。計算結果を見ると、T 荷重の場合は非常に大きな断面力が作用することがわかるが、実際の载荷と異なるため、参考程度とする。残りの2パターンの断面力を見ると、車輛がたて壁から1mの位置を走行したときに作用する曲げモーメントおよびせん断力は、隣接軸距が1.3mの方が大きく、曲げモーメントはたて壁の深さ1.4mで最大1.39倍に、せん断力はたて壁の深さ0.9mで1.49倍になり、たて壁の鉄筋およびコンクリートに作用する応力度が、鉄筋の許容引張応力度およびコンクリートの許容圧縮応力度、許容せん断応力度を超える可能性がある。**写真-1.1**で示したように歩道がなく、車輛用防護柵がL型擁壁と近接している場合や無い道路では、車輛がたて壁に接近して通行できるため、等分布荷重10kN/m²による断面力を上回ることは十分あり得る。

以上は輪荷重が静的载荷された場合の検討であり、車輛が繰返し走行するときに発生する残留応力(**図-1.2**参照)を考慮していないので、これも含めてたて壁に作用する背面からの水平応力を評価すると、等分布荷重による背面からの水平応力とさらに差が開くことになる。

表-1.3 車輛制限令

車輛の諸元	一般的制限値
軸重	10.0t (98kN)
隣接軸重	18.0t : 隣り合う車軸の軸距が1.8m未満 19.0t : 隣り合う車軸の軸距が1.3m以上かつ隣り合う車軸の軸重がいずれも9.5t以下 20.0t : 隣り合う車軸の軸距が1.8m以上
輪荷重	5.0t (49kN)

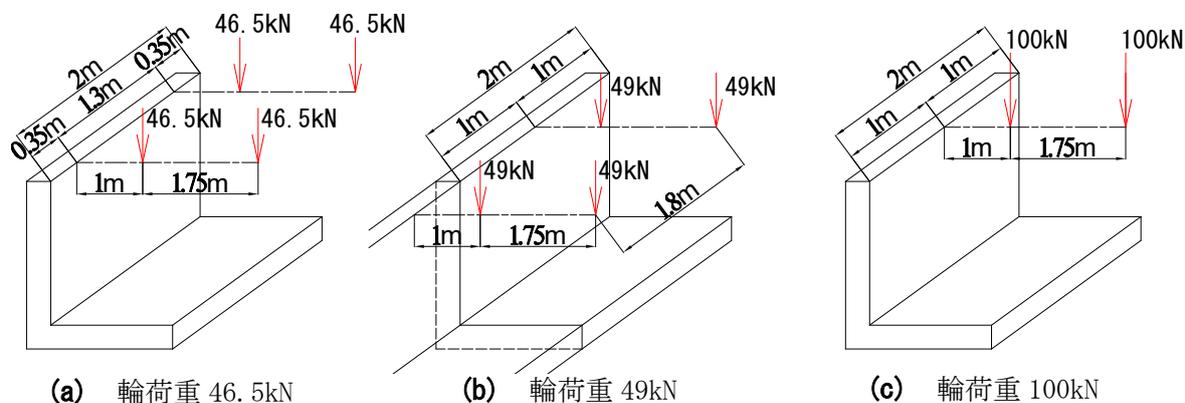


図-1.4 Boussinesq 式に用いる後輪荷重の载荷モデル

表-1.4 たて壁に作用する曲げモーメントの違い(壁側の車輛通行位置 1.0m)

(単位 kN・m)

たて壁深さ	1.0m	1.2m	1.4m	1.6m	1.8m	2.1m	2.4m	2.7m	3.0m
等分布荷重 A	3.64	5.65	8.2	11.5	15.4	22.9	32.3	43.9	58.0
輪荷重 46.5kN B	4.80	7.74	11.4	15.8	21.0	30.3	41.4	54.6	70.1
比率 B/A	1.32	1.37	1.39	1.38	1.36	1.32	1.28	1.24	1.21
輪荷重 49kN C	4.00	6.50	9.6	13.6	18.1	26.5	36.7	48.9	63.4
比率 C/A	1.10	1.15	1.17	1.18	1.18	1.16	1.14	1.11	1.09
輪荷重 100kN D	5.75	9.23	13.5	18.6	24.5	34.9	47.3	61.8	78.5
比率 D/A	1.58	1.63	1.64	1.62	1.59	1.53	1.47	1.41	1.35

表-1.5 たて壁に作用するせん断力の違い(壁側の車輛通行位置 1.0m)

(単位 kN)

たて壁深さ	0.8m	0.9m	1.0m	1.2m	1.4m	1.6m	1.8m	2.1m	2.4m
等分布荷重 A	6.28	7.44	8.69	11.43	14.5	17.9	21.7	27.9	35.0
輪荷重 46.5kN B	9.23	11.06	12.89	16.55	20.2	24.0	27.8	34.0	40.6
比率 B/A	1.47	1.49	1.48	1.45	1.39	1.34	1.28	1.22	1.16
輪荷重 49kN C	7.69	9.27	10.88	14.19	17.6	21.2	24.9	30.8	37.3
比率 C/A	1.22	1.25	1.25	1.24	1.21	1.18	1.15	1.10	1.07
輪荷重 100kN D	11.08	13.22	15.33	19.46	23.5	27.5	31.6	38.0	44.7
比率 D/A	1.77	1.78	1.76	1.70	1.62	1.54	1.46	1.36	1.28

(2) 壁体の曲げ剛性が異なる場合に壁体に作用する水平応力の解明

二つ目は、プレキャストL型擁壁において、繰返し載荷重により裏込め土を介してたて壁背面に作用する水平応力の推定である。載荷重により裏込め土を介してたて壁背面に作用する水平応力は、British Standardsにおいて壁体の曲げ剛性EI(弾性係数×断面二次モーメント)を考慮する必要があるとされている¹⁰⁾。これについては、1.2.3のU型擁壁に関する模型を使用した室内実験において、壁の天端に対し強制的に繰返し水平変位を与えたとき、繰返し水平変位が大きいと土圧が増加することが報告されていることから言える。一般的に、たて壁の水平変位はたて壁の曲げ剛性に影響されると考えられるので、繰返し載荷の場合はどうなるかを確認する必要がある。そこで、相似性を考慮したとき、曲げ剛性EIが実物のプレキャストL型擁壁の約3倍となる軽量形鋼の壁面と、曲げ剛性が約1.25倍の疑似L型擁壁のたて壁とで、壁面に作用する背面からの水平応力を比較した。

(3) 繰返し載荷重によるプレキャストL型擁壁の破壊過程の把握

三つめは、繰返し載荷によるプレキャストL型擁壁の破壊過程を調べることである。コンクリート構造物において、通行車輛の繰返し載荷重による劣化の機構を明らかにしたものは、コ

ンクリート道路橋の床版を除きほとんどないうえに、損傷の診断法が確立されていないのが現状である¹⁷⁾。1.2.2の長谷川らの実物大のプレキャストL型擁壁を使用した実験では、水平方向に繰返し載荷を受けると、設計荷重より小さい荷重でたて壁が破壊する可能性があるとしている。通行する車輛の繰返し荷重により、プレキャストL型擁壁が設計で考慮している載荷重以下で破壊するのであれば、維持管理上のリスクになる。本研究では、プレキャストL型擁壁を模擬した疑似L型擁壁を用いて、裏込め材上を走行する輪荷重の大きさを変えて、破壊に至るまでの過程を実験した。

1.4 本論文の構成

第1章では、本研究の背景、コンクリートL型擁壁のたて壁に作用する水平土圧に関する既往の研究、本研究の目的、本論文の構成について述べた。

第2章では、軽量形鋼等からなる延長50cm、幅25cm、深さ20cmの箱を作成して曲げ剛性が実物のプレキャストL型擁壁の約3倍となる壁面を模擬し、繰返し載荷重ごとの壁面に作用する背面からの水平応力および天端水平変位を測定した。この実験では、箱に詰める裏込め材には粒度調整砕石の5.6mmふるい通過分を使用し、載荷装置として低温水浸式ホイールトラッキング試験機を用いて、裏込め材の表面に繰返し載荷を行った。結果として、壁面には輪荷重通過時に作用する応力の振幅のほか、残留応力が作用することが判明した。

第3章では、**第2章**で測定した残留応力および輪荷重による応力の振幅を、Boussinesq式に係数を乗じた近似式で表現することを試みた。係数の算出には最小二乗法を用いている。

第4章では、**第3章**で求めた近似式を用いて、軽量形鋼の箱の壁面に作用したせん断力および曲げモーメントを、数値積分を用いて算出した。また、現在の「道路土工-擁壁工指針」で規定されている載荷重 10kN/m^2 とせん断力および曲げモーメントを比較した。

第5章では、内寸法 $30\text{cm}\times 30\text{cm}$ の改良桝を加工して、たて壁高さ20cmの疑似L型擁壁を作製し、たて壁取り付け部から185~190mmの位置に重りを載せていき、たて壁が静的破壊したときの荷重を測定した。次に、静的破壊したときに作用した曲げモーメントおよび**第4章**で得られた各繰返し載荷重で作用した曲げモーメントを用いて、疑似L型擁壁が破壊する繰返し載荷重の大きさを推定した。

第6章では、**第5章**で決定した疑似L型擁壁が静的破壊すると想定した繰返し載荷重を中心に、載荷重を約50Nずつ変えて繰返し載荷実験を行い、たて壁に作用した背面からの水平応力を時系列で測定するとともに破壊した載荷回数を数えた。

第7章では、疑似L型擁壁のたて壁に作用した背面からの水平応力とたて壁の天端水平変位を、軽量形鋼の壁面と比較して、壁体の曲げ剛性の違いによる影響を検証した。また、繰返し載荷重の値が小さいほど、破壊までに要する載荷回数が増加することを確認した。

第8章では、実験結果を踏まえ、本論文の擁壁構造物に対する考察を示した。

第9章では、以上の結果をまとめ、本研究から得られた結論を示した。

参考文献

- 1) 北陸地方整備局 企画部 技術管理課：北陸地方のプレキャストコンクリート製品活用事例，2016.
- 2) 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針(平成24年度版)，pp. 52-63, pp. 89-90, 丸善，2012.
- 3) 右城猛：誰も教えてくれなかった疑問に答える擁壁設計 Q&A -105 問答-理工図書，pp. 11-12, 2005.
- 4) 国土交通省 四国地方整備局：プレキャストL型擁壁設計施工マニュアル(案)，2001
- 5) 坂根勇，貝通丸明：水路の応力計算法，農業土木学会誌，第37巻，第11号，pp. 22-27, 1970.
- 6) Kim, J. S. and Barker, R. M.：Effect of live load surcharge on retaining wall and abutments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.128 (10), pp. 803-813, 2002.
- 7) Spangler, M. G. and Mickle, J. L.：Lateral pressures on retaining walls due to backfill surface loads, *Highway Research Board Bulletin*, Vol.141, pp.1-15, 1956.
- 8) Liu Ze(刘泽), He Fan(何矾), Huang Tian-qi (黄天棋), Jiang Mei-dong(蒋梅东)：Additional Earth Pressure of Retaining Wall Caused by Vehicle Load, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, Vol.13, No.1, pp.16-23, March 2019.
- 9) Misra, B.：Lateral pressures on retaining walls due to loads on surface of granular backfill, *Soils and Foundations*, Vol.20, No.2, pp.31-44, June 1980.
- 10) 公益社団法人土木学会：コンクリート標準示方書設計編，pp. 129-131, 丸善，2017.
- 11) 松田秀高，名久井保，王海軍，塩井幸武，長谷川明：L型プレキャスト擁壁の繰り返し載荷による実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，第53回，第5部門，pp. 640-641, 1998.
- 12) 王海軍，長谷川明，塩井幸武，庄谷征美：繰り返し水平力を受けるL型擁壁の低サイクル疲労実験，八戸工業大学構造工学研究所紀要，第6巻，1999.
- 13) 國府勝郎，辻幸和，下山善秀：わかり易い土木講座10 土木学会編集 新訂第七版 コンクリート工学(I)施工，pp. 129-130, 彰国社，2010.
- 14) 住吉卓，山村博孝，藤本慎也，内村太郎，龍岡文夫：擁壁の繰り返し微小変位と背面土圧，土木学会第59回年次学術講演会，第3部門，pp. 246-247, 2004.
- 15) 住吉卓：繰り返し微小変位に伴い変形が進行したU型擁壁の挙動，平17，都土木技研年報，pp. 69-78, 2005.
- 16) British Standards Institution: *British Standards, Eurocode 7. Geotechnical design-Part1. General rules*, pp.102-103, British Standards Institution, 2004.
- 17) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'13 [基礎編]，pp. 57-60, pp. 213-219, 報光社，2013.

第2章 裏込め土を介して軽量形鋼の壁面に作用する水平応力の測定

2.1 まえがき

車輛による裏込め土への繰返し載荷により、裏込め土を介してプレキャストL型擁壁のたて壁に作用する背面からの水平応力を、実物大で測定するのは困難であった。そこで、載荷装置に凍結抑制舗装の評価法に使用される低温水浸式ホイールトラッキング試験機を使用し、室内試験を実施することにした。低温水浸式ホイールトラッキング試験機の車輪走行下の空間の広さを基に、軽量形鋼の箱を作製し、その中に裏込め材を詰めて、軽量形鋼の壁面に作用する背面からの水平応力を測定することにした。

本研究の最終形は、実物のプレキャストL型擁壁を模擬した、疑似L型擁壁の破壊実験である。疑似L型擁壁になり得るプレキャストコンクリート製品は、肉厚が薄く、L字型に加工が容易で、製品延長をホイールトラッキング試験機で載荷可能な長さ加工できるものを選択する必要があった。後の実験において、疑似L型擁壁には内空30cm四方、肉厚3cmの改良柵を選択した。先に述べたように、裏込め土に粒度調整砕石を使用して、転圧された状態で繰返し載荷を行う実験は前例がなく、たて壁にどの程度の背面からの水平応力が作用するかは不明であった。過去に報告されている模型実験においては、乾燥した標準砂が多く使用されているが、これは輪荷重による繰返し載荷実験において、容易に側方へ移動することが予想されたため、なるべく粒径が大きい材料を使用する必要があった。しかし、粒径が大き過ぎると、圧力計の無反応や、圧力計の面に対する石の当たり方によっては、測定値のばらつきが大きくなるという問題が発生する。そこで、粒度調整砕石を篩って粒度を調整することを行った。

また、輪荷重が作用したとき、裏込め土を介して壁体に作用する背面からの水平応力は、壁体の曲げ剛性の影響を大きく受け、曲げ剛性が低い壁体は背面からの水平応力が大きくなるとされている¹⁾。そのため、載荷実験の始めの供試体はプレキャスト製品を避け、曲げ剛性が高い軽量形鋼の壁面とした。

2.2 疑似L型擁壁のたて壁の推定降伏曲げモーメント

2.2.1 疑似L型擁壁に使用するプレキャスト製品

第1章の1.2.2において、プレキャストL型擁壁のたて壁の降伏は、鉄筋の降伏で決まると述べた。実験において、小さなタンパを使用した手作業による締固め程度では、載荷重が大きいほど裏込め材への繰返し載荷初期における試験輪の沈み込みが大きくなるため、載荷重をなるべく小さくする必要があった。その場合、プレキャスト製品の中で、部材厚さが薄くL型擁壁によく似たL字構造を形成できるものは、U型側溝、柵渠笠石、改良柵が考えられた。プレキャスト製品を使用した破壊実験は、実験の凡庸性の高さを考慮すれば、通常のホイールトラッキング試験機を使用するのが良いと考えた。そこで、通常のホイールトラッキング試験機の載

荷延長 23cm に収まる製品で、肉厚が薄く加工しやすい、内寸法 30cm×30cm および 36cm×36cm の改良柵を、繰返し載荷実験の供試体として比較検討することにした。これらの改良柵を L 字に加工し、たて壁高さ 20 cm で、延長 15 cm の疑似 L 型擁壁を作製した。

疑似 L 型擁壁の仕様を表-2.1 に、形状および配筋を図-2.1 に示す。材料の仕様は改良柵の材料承認願いによる値である。コンクリート標準示方書設計編 5.4 鋼材²⁾より、疑似 L 型擁壁に配筋されている普通鉄線 SWM-B φ2.6~φ3.2mm の引張降伏強度の特性値 f_{yk} および引張強度の特性値 f_{uk} は、JIS G3532 で決められた引張強さ 540~1130N/mm² の下限値をとって、540N/mm² とした。コンクリートの圧縮強度の特性値 f'_{ck} は、コンクリート標準示方書設計編 5.3 コンクリートより設計基準強度とした。

表-2.1 疑似 L 型擁壁の仕様

改良柵の規格	部材厚さ	粗骨材最大寸法	コンクリートの f'_{ck}	配筋	鉄線の f_{yk}
内寸法 30cm	30mm	20mm	30N/mm ²	SWM-B φ2.6mm, 1本	540N/mm ²
内寸法 36cm	35mm	20mm	27N/mm ²	SWM-B φ3.2mm, 2本	540N/mm ²

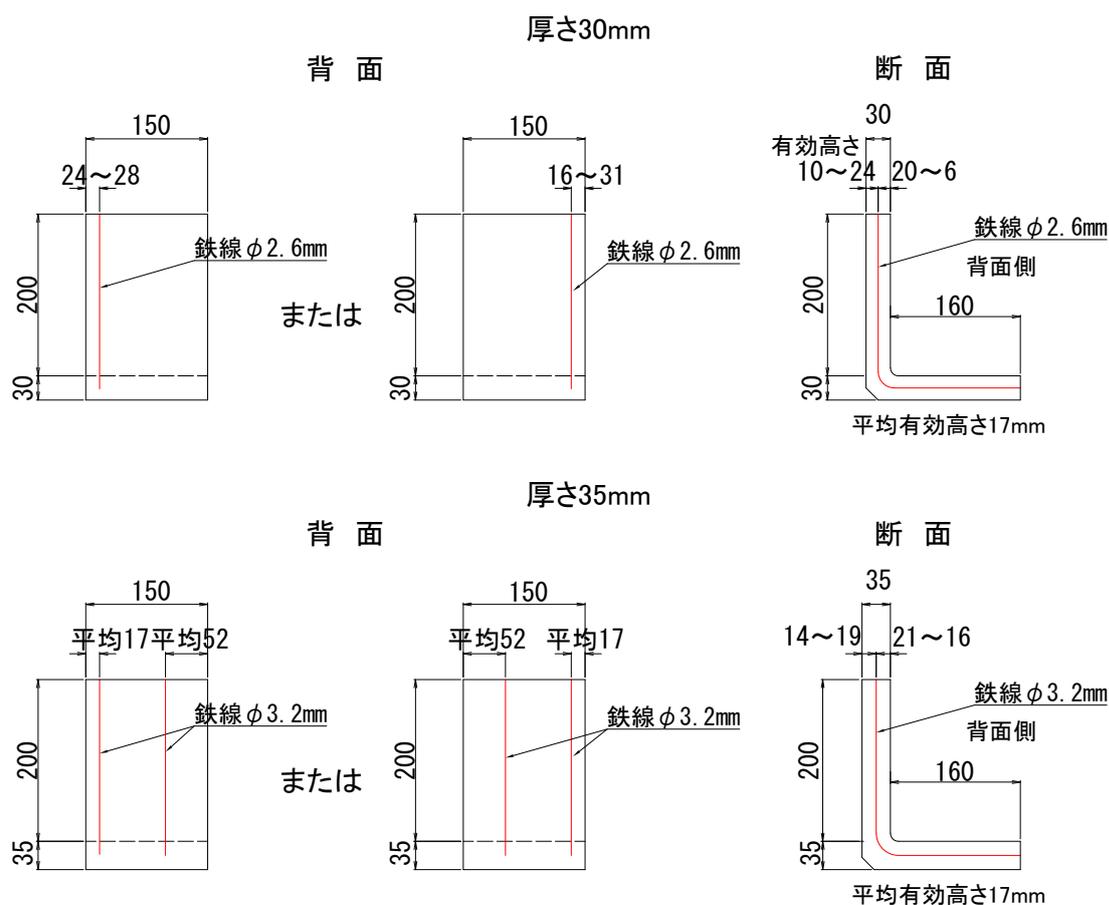


図-2.1 疑似 L 型擁壁の形状および配筋

2. 2. 2 改良柵 30cm×30cm を使用した場合の推定降伏曲げモーメント

内寸法 30cm×30cm, 肉厚 3cm の改良柵を加工して疑似 L 型擁壁を作製した場合, 疑似 L 型擁壁の降伏曲げモーメントは, コンクリートの圧縮応力度, 鉄線の引張応力度, コンクリートのせん断応力度の内, 鉄線の引張応力度で決まる. 降伏曲げモーメントを許容応力度法にて計算すると, 以下の通り値は 0.045kN・m となる.

疑似L型擁壁 1個の引張主鉄筋は実測より φ 2.6が1本, 有効高さは17mmとする

$$\text{鉄筋1本の断面積 普通鉄線 } A = 5.309 \text{ mm}^2$$

$$\text{鉄筋の断面積 } A_s = 5.309 \times 1 \text{ 本/個} = 5.31 \text{ mm}^2$$

$$p = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{5.31}{150 \times 17} = 0.00208$$

$$\begin{aligned} \kappa &= \sqrt{2 \cdot n \cdot p + (n \cdot p)^2} - n \cdot p = \sqrt{2 \times 0.0312 + 0.0312^2} - 0.0312 \\ &= 0.2205 \end{aligned}$$

$$n \cdot p = 15 \times 0.00208 = 0.0312$$

$$j = 1 - \kappa / 3 = 1 - 0.2205 / 3 = 0.9265$$

$$\text{幅 } b = 150 \text{ mm}$$

$$\text{有効高さ } d = 17 \text{ mm}$$

コンクリートの圧縮応力度から降伏曲げモーメントを求めると

$$\begin{aligned} M &= \frac{f'_{ck} \cdot \kappa \cdot j \cdot b \cdot d^2}{2} \\ &= \frac{30.0 \times 0.2205 \times 0.9265 \times 150 \times 17.0^2}{2 \times 1000000} = 0.133 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

鉄線の引張応力度から降伏曲げモーメントを求めると

$$\begin{aligned} M &= f_{yk} \cdot A_s \cdot j \cdot d \\ &= 540 \times 5.31 \times 0.9265 \times 17 / 1000000 = 0.045 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

2. 2. 3 改良柵 36cm×36cm を使用した場合の推定降伏曲げモーメント

内寸法 36cm×36cm, 肉厚 3.5cm の改良柵を加工して疑似 L 型擁壁を作製した場合も, 疑似 L 型擁壁の降伏曲げモーメントは, 鉄線の引張応力度で決まる. 降伏曲げモーメントを許容応力度法にて計算すると, 以下の通り値は 0.130kN・m となる.

疑似L型擁壁 1個の引張主鉄筋は実測よりφ3.2が2本、有効高さは17mmとする

$$\text{鉄筋1本の断面積 普通鉄線 } A = 8.042 \text{ mm}^2$$

$$\text{鉄筋の断面積 } A_s = 8.042 \times 2 \text{ 本/個} = 16.08 \text{ mm}^2$$

$$p = \frac{A_s}{b \cdot d} = \frac{16.08}{150 \times 17} = 0.00631$$

$$\begin{aligned} \kappa &= \sqrt{2 \cdot n \cdot p + (n \cdot p)^2} - n \cdot p = \sqrt{2 \times 0.0947 + 0.0947^2} - 0.0947 \\ &= 0.3507 \end{aligned}$$

$$n \cdot p = 15 \times 0.00631 = 0.0947$$

$$j = 1 - \kappa / 3 = 1 - 0.3507 / 3 = 0.8831$$

$$\text{幅 } b = 150 \text{ mm}$$

$$\text{有効高さ } d = 17 \text{ mm}$$

コンクリートの圧縮応力度から降伏曲げモーメントを求めると

$$\begin{aligned} M &= \frac{f'_{ck} \cdot \kappa \cdot j \cdot b \cdot d^2}{2} \\ &= \frac{27.0 \times 0.3507 \times 0.8831 \times 150 \times 17.0^2}{2 \times 1000000} = 0.181 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

鉄線の引張応力度から降伏曲げモーメントを求めると

$$\begin{aligned} M &= f_y k \cdot A_s \cdot j \cdot d \\ &= 540 \times 16.08 \times 0.8831 \times 17 / 1000000 = 0.130 \text{ kN}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

2. 2. 4 破壊実験に使用するプレキャスト製品

計算結果より、ホイールトラッキング試験機にかかる負荷および裏込め材への試験輪の沈み込みを考慮して、降伏曲げモーメントが低い方の内寸法 30cm×30cm の改良柵を、疑似L型擁壁として破壊実験に使用することにした。

2.3 軽量形鋼の壁面を用いた実験

2.3.1 载荷装置

繰返し载荷実験に使用した、低温水浸式ホイールトラッキング試験機の全景を**写真 2-1**に示す。重りを載せないときの载荷重は687N(70kg)であり、载荷重を変える場合は、1枚98.1N(10kg)の重りを試験輪上方の平板上に積み重ねて調整した。载荷できる重量は最大で1960Nまでである。走行距離は、コンロッドを固定するクランク円板にあけた孔の位置により150, 160, 180, 200, 230, 350mmで調整可能で、本実験では試験輪が横方向に配置した圧力計の前を通過しきれるよう350mmとした。試験機は自動および手動操作が可能で、通常のホイールトラッキング試験では21往復/minであるものを、速度を落として実験した。その他の仕様を**表-2.2**に示す。



正面



側面

写真-2.1 低温水浸式ホイールトラッキング試験機

表-2.2 低温水浸式ホイールトラッキング試験機の仕様

項目	緒 元
メーカー名	(株) ナカジマ技販
駆動方式	クランク駆動水平直進往復方式
走行速度	1~15 往復/min(手動)
試験輪	直径φ200mm, 幅50mm, ゴム厚15mmのソリッドタイヤ

2.3.2 供試体

現場打ちL型擁壁の天端に、水平方向に部分分布荷重が载荷された場合の部材の有効幅は、たて壁高さの2倍に荷重の分布幅を加えたものとなる²⁾。例えば、通行車輛の接地幅を0.2mとすると、たて壁背面高さが0.9mを超えた場合、有効幅は2mを超えることになる。また、車輛用防護柵に衝突荷重が作用した場合におけるたて壁の設計に当たっては、衝突荷重が45度の角度でたて壁内を荷重分散するものとして、部材の有効幅を考えている³⁾。

プレキャストL型擁壁の場合は、製品間が接続金具で連結または擁壁高さが異なる場合は連結されていないため、たて壁背面高さが0.9mを超えた場合、輪荷重が载荷されると製品延長2mが有効幅になり、現場打ちL型擁壁とは大きな違いがある。

本実験においては、主働土圧が作用する壁面を再現するのに、**写真-2.2**のような軽量形鋼等

からなる幅 50cm, 奥行き 25cm, 深さ 20cm の箱を作製した. 荷重を分散させないことを考慮して, 剛接はせず軽量形鋼の部材間および幅 50cm の壁面と底版とは M10 ボルトで固定した. 深さについては, 壁面からの載荷距離が 4cm の場合, Boussinesq 解析解で背面からの水平応力が発生する深さが 17cm 程度なので, 3cm ほど余裕をみて 20cm に決定した. 幅については, ソリッドタイヤの接地幅は 3cm 程度であり, 壁面からソリッドタイヤ端までの距離 1.5cm は仮に地盤内を 45 度で荷重分散すると考えると, 軽量形鋼の箱は深さ 20cm なので, 壁の荷重分散の有効幅は $3+1.5 \times 2+20 \times 2=46\text{cm}$ になる. これに L 字金具の幅を加算し 50cm に決定した. この幅は試験輪が走行したとき, 試験輪が裏込め材に沈み込んでも箱に当たらない幅でもある.



a. 長辺方向(幅 50cm)



b. 短辺方向(奥行き 25cm)

写真-2.2 軽量形鋼の箱

隅角部を有する擁壁は, たて壁が土圧の作用に対し互いに控え壁の機能を有し, 軸力が生じるとされているが, たて壁に生じる軸力および水平変位は擁壁設計への影響が小さいため考慮していない⁴⁾. 本実験においても, 軽量形鋼の箱では軸力を考慮しないことにした.

ここで, 軽量形鋼の壁面の曲げ剛性について, プレキャスト L 型擁壁との相似性を確認する. まず壁面を形成する 2 本の軽量形鋼の弾性係数は $E=2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ とし, 弱軸回りの断面二次モーメントは $I=2 \times 190,000 = 380,000 \text{mm}^4$ なので, 曲げ剛性は $EI=76.0 \text{kN} \cdot \text{m}^2$ になる. 底版となるアルミ板厚さ 12mm の弾性係数を $E=6.80 \times 10^4 \text{N/mm}^2$, 幅を 50cm とすると曲げ剛性は $EI=4.9 \text{kN} \cdot \text{m}^2$ となる.

表-2.3 に擁壁高 1.0m~2.25m のプレキャスト L 型擁壁のたて壁高さ h , たて壁およびかかと版の部材厚さ t , 断面二次モーメント I , 曲げ剛性 EI を示す⁵⁾. 部材幅は軽量形鋼の箱と同じ $b=0.5\text{m}$ とし, L 型擁壁の設計基準強度が 30N/mm^2 なので, 弾性係数 E は $2.80 \times 10^7 \text{kN/m}^2$ とした.

表-2.3 プレキャスト L 型擁壁の規格

擁壁高 (m)	壁高 h (m)	部材厚 t (m)	$I=bt^3/12$ (m^4)	弾性係数 (kN/m^2)	曲げ剛性 ($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)
2.25	2.06	0.19	2.86E-04	2.800E+07	8,002
2.00	1.83	0.17	2.05E-04	2.800E+07	5,732
1.75	1.60	0.15	1.41E-04	2.800E+07	3,937
1.50	1.37	0.13	9.15E-05	2.800E+07	2,562
1.25	1.14	0.11	5.55E-05	2.800E+07	1,554
1.00	0.91	0.09	3.04E-05	2.800E+07	851

たて壁の高さと曲げ剛性 EI の関係を図-2.2 に示す。規格値を 2 次式と 3 次式で近似した結果、2 次式ではたて壁高さ 0.65m 付近で曲げ剛性が最小となる。そこで、近似式には 3 次式を用いることにした。3 次式よりたて壁高さ 0.2m のときの曲げ剛性は 25.4kN・m² と推定した。したがって、軽量形鋼の壁面は実物との相似性を考慮したとき 76.0/25.4≒3 倍の曲げ剛性になり、アルミ製の底版は 4.9 / 25.4≒0.2 倍の曲げ剛性と考えられる。

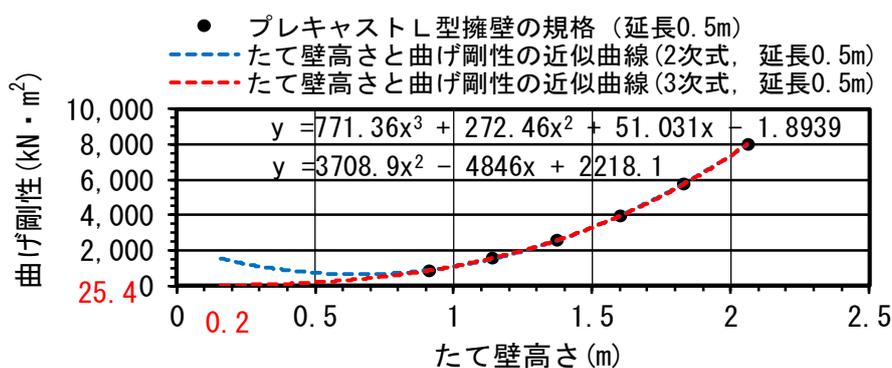


図-2.2 たて壁高さと曲げ剛性の関係(延長 0.5m)

2. 3. 3 圧力計

圧力計を設置する壁面には、アクリル板厚さ 5mm を接着した。圧力計の仕様を写真-2.3 および表-2.4 に示す。圧力計を金属板に貼り付けた後、写真-2.4 のように圧力計が鉛直方向の応力で動かないように周囲にワッシャー を配置し、ワッシャーと金属板とを接着して固定した。圧力計の配線は写真-2.5 のように養生テープで固定した。



写真-2.3 圧力計(東京測器 PDA3MPB)

表-2.4 圧力計の仕様

項目	緒元
受圧面	直径7.6mm
厚さ	2mm
容量	3MPa
定格出力	約1mV/V (2000×10 ⁻⁶ ひずみ)
個数	9個



写真-2.4 圧力計の固定



写真-2.5 配線の固定

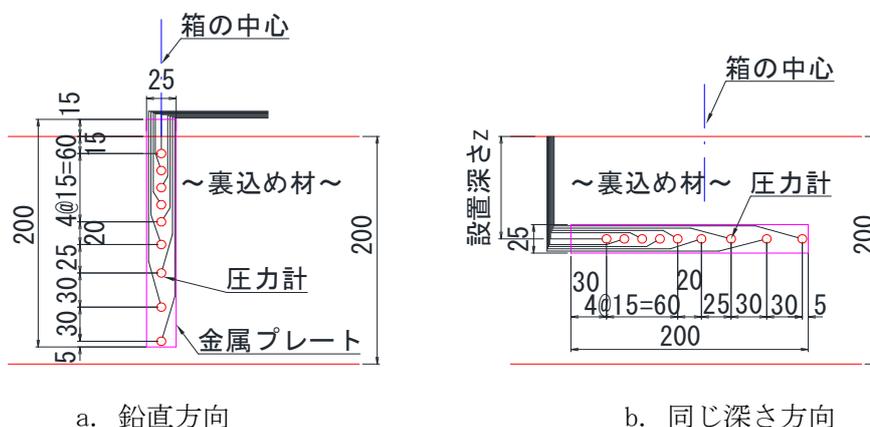
次に、金属板を箱の中心の圧力測定位置に**写真-2.6**のように貼り付けた。圧力計の配置例を**図-2.3**に示す。このとき、圧力計と配線の前面は、**写真-2.7**のようにNR スポンジゴム厚さ5mmで養生した。



写真-2.6 圧力計の設置



写真-2.7 圧力計の養生



a. 鉛直方向

b. 同じ深さ方向

図-2.3 圧力計の配置

本実験では、粒度調整砕石 M-30 のうち 5.6mm ふり通過分を正規の裏込め材に使用した。鉛直応力による金属プレートのずれや配線の損傷を防ぐため、iteck 社製スポンジゴム KSNR-305、厚さ 5mm を使用して、圧力計およびその配線の養生を行った。また、圧力計に対する水平方向および鉛直方向の石の当たり方によっては、偏圧が生じて圧力が過度に大きく測定されたり負圧となることがある。それに対しても、スポンジゴムによる養生で測定値は安定した。

スポンジゴムの有無による測定圧力の変化は、コンクリートの圧縮試験機を使用して確認することにした(**写真-2.8**)。供試体型枠の底に圧力計を二つ並べて(**同写真 a, b**)、片方にスポンジゴムをかぶせ(**同写真 c, d**)、その上に 2 枚重ねのビニール袋に入った水 600ml (**同写真 e**)と重りを載せ(**同写真 f**)、ゆっくり载荷した(**同写真 g, h**)。

荷重の測定は 1 秒に 1 回とし、4 回の測定で 2 回測定し終わった後、スポンジゴムをかぶせる圧力計を変えた。スポンジゴムの有無による圧力と時間の関係を**図-2.4(a)~(d)**に示す。1 回目測定値から 4 回目測定値のいずれも、重りを載せた段階でスポンジゴムの有無による圧力差がはっきりと表れ、圧縮試験機で荷重を加えても、圧力差はほぼ一定となった。



(a) 圧力計配置



(b) 測定機器接続



(c) スポンジゴム設置



(d) 型枠設置



(e) 600ml の水袋



(f) 重り



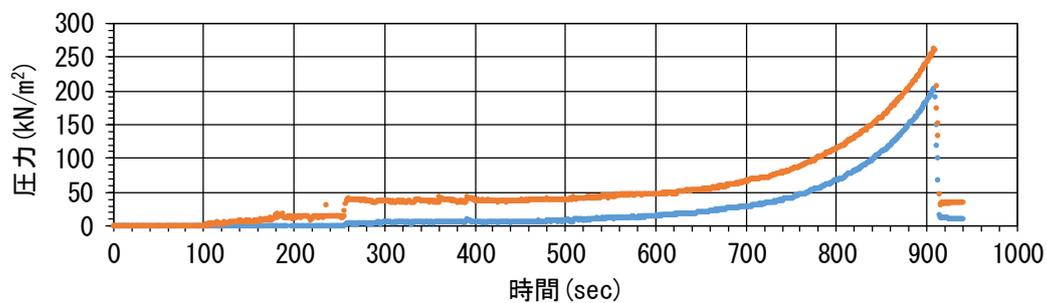
(g) 载荷状況



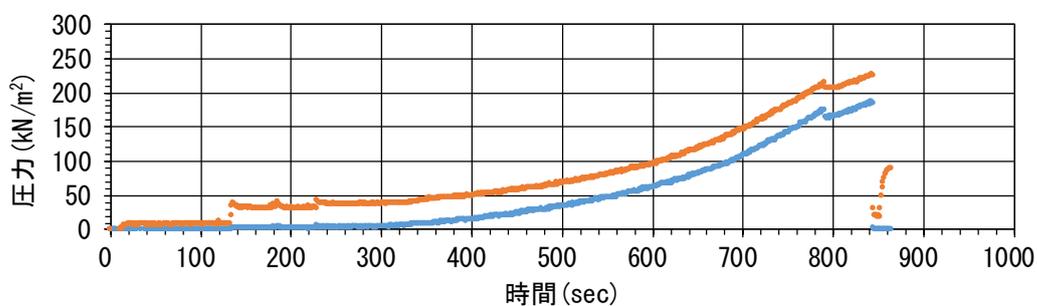
(h) 試験全景

写真-2.8 スポンジゴムの有無による圧力の測定

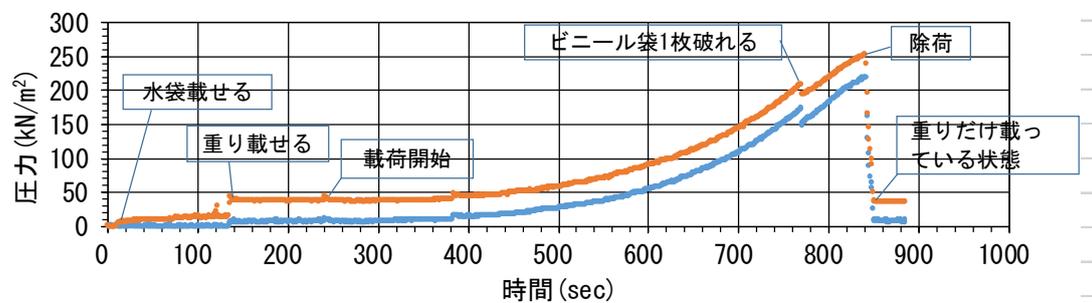
● スポンジゴムあり ● スポンジゴムなし



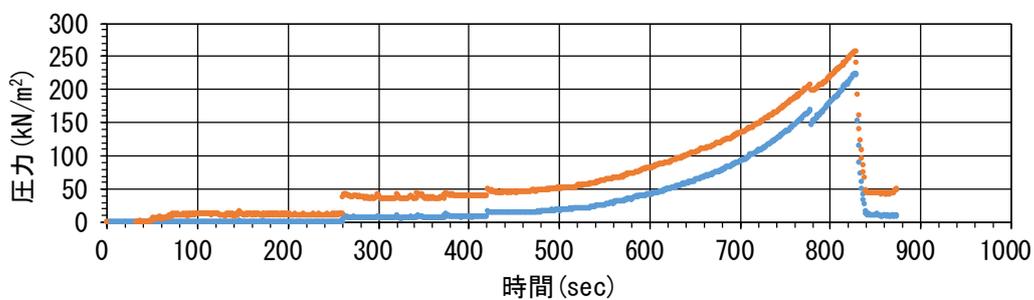
(a) 1回目測定値



(b) 2回目測定値



(c) 3回目測定値



(d) 4回目測定値

図-2.4 スポンジゴムの有無による圧力と時間の関係

図-2.5 は測定回数1回～4回の、スポンジゴムの有無による圧力の測定値を表している。スポンジゴムの位置を変えても、測定値は同じような傾向を示した。

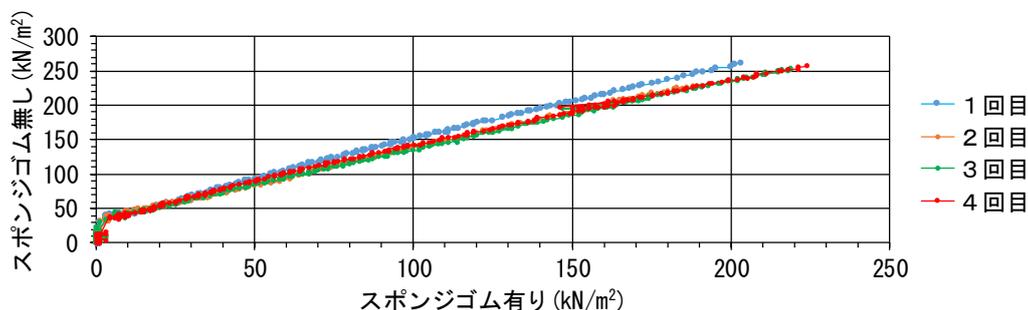


図-2.5 スポンジゴムの有無による圧力

図-2.6 は、圧力差がはっきりと表れた重りを載せた後のデータを表している。スポンジゴムがあると 34.3kN/m²以下の圧力は表示されないことがわかる。計測した圧力 x (kN/m²)は、スポンジゴム無しの圧力 y(kN/m²)に図中の直線式を用いて変換した。

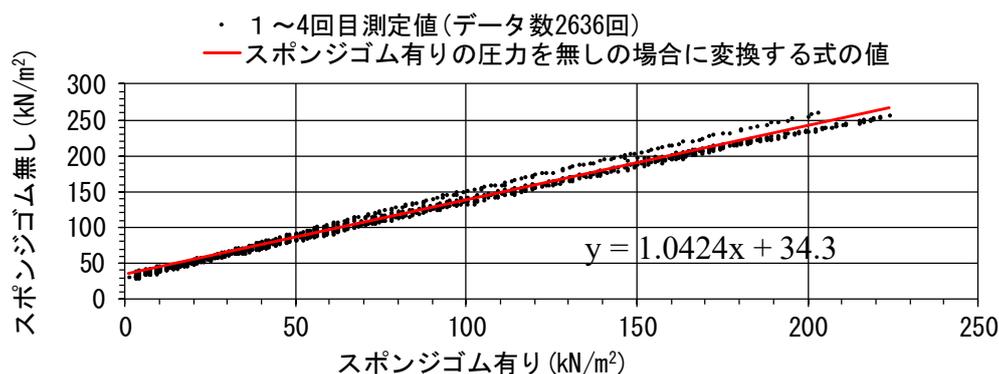


図-2.6 スポンジゴムの有無による圧力の近似式

2. 3. 4 変位計とメモリーレコーダ

天端水平変位を計測する変位計は、(株)共和電業製 DT-30F を使用した(写真-2.9)。天端水平変位および9か所の圧力の測定・記録は、(株)共和電業製 EDX-1500A を使用した(写真-2.10)。測定回数は、繰返し载荷の場合 20 回/秒～2 回/秒、静的载荷の場合 10 回/秒～5 回/秒、圧力の減衰を測定するときは 1 回/秒とした。圧力計をスポンジゴムで養生した後、圧力計および変位計の値をリセットして、それぞれ 0kN/m²および 0mm とした。



写真-2.9 変位計



写真-2.10 メモリーレコーダ



2. 3. 5 裏込め材

裏込め材は、市販の粒度調整砕石(写真-2.11)をフルイ目 9.5mm または 5.6mm にかけた通過試料を使用した。繰返し载荷実験であるため、粒径を小さくすると繰返し载荷中に裏込め材が側方へ移動してしまう恐れがあった。また、粒径が大きいと圧力計の無反応や偏圧が出る恐れがあった。そこで、最初にフルイ目 9.5mm 通過分で実験をして様子を伺った。9.5mm 通過分の裏込め材は、軽量形鋼の壁面に作用する概略の背面からの水平応力を測定するためのもので、土質試験は省略している。フルイ目 5.6mm にかけた通過試料の粒度分布を図-2.7 に示す。裏込め材は粒度分布から礫質土であり、「道路土工-擁壁工指針」³⁾によればせん断抵抗角は 35° になる。主動土圧が発生するときのすべり面の方向は、モール・クーロンの破壊基準より $45^\circ + \phi/2$ であるから、深さ 20cm のたて壁に作用する土圧範囲は、天端幅で $20 / \tan(45+35/2)=10.4\text{cm}$ になる。そこで、裏込め材の天端幅は写真-2.12 のように 10.5cm にし、残りの幅員は裏込め材が側方へ移動するのを軽減するために角材を配置した。

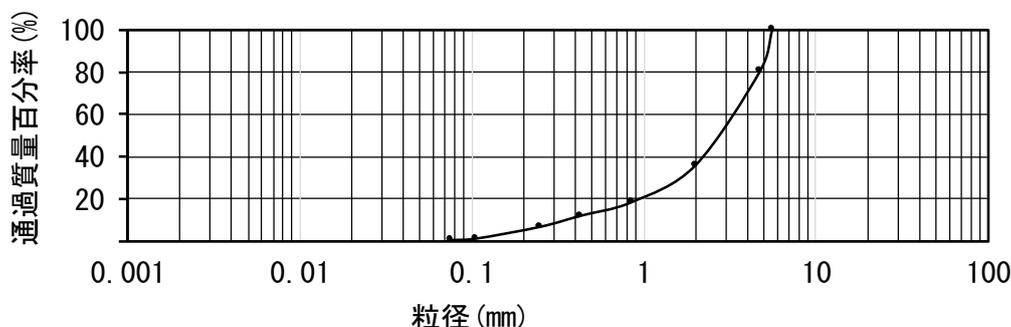


図-2.7 粒径加積曲線



写真-2.11 裏込め材



写真-2.12 裏込め材の天端幅

突固めによる土の締固め試験(A-b法)および土粒子の密度試験を実施した結果、最大乾燥密度 $2.153\text{g}/\text{cm}^3$ 、最適含水比 7.9%、土粒子の密度 $2.685\text{g}/\text{cm}^3$ であった(図-2.8)。

一般的に、乾燥密度が最大になる最適含水比と粒子間結合力(強度・剛性)が最大になる含水比は異なり、強度が最大になるのは最適含水比よりも乾燥側である⁶⁾。また、裏込め材は最適含水比より乾燥側の含水比で締固めた場合に締固め方法の影響を受けないが、湿潤側の含水比で締固めた場合には、締固め方法によって強度特性が異なるため⁷⁾、含水比を 6%にした。これにより、裏込め材の試験輪への付着も回避した。

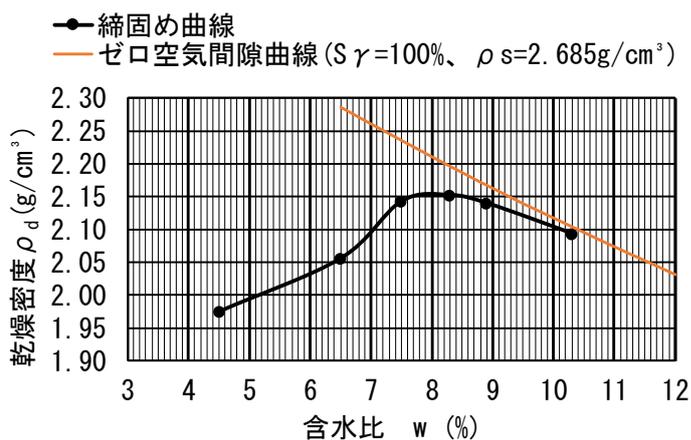


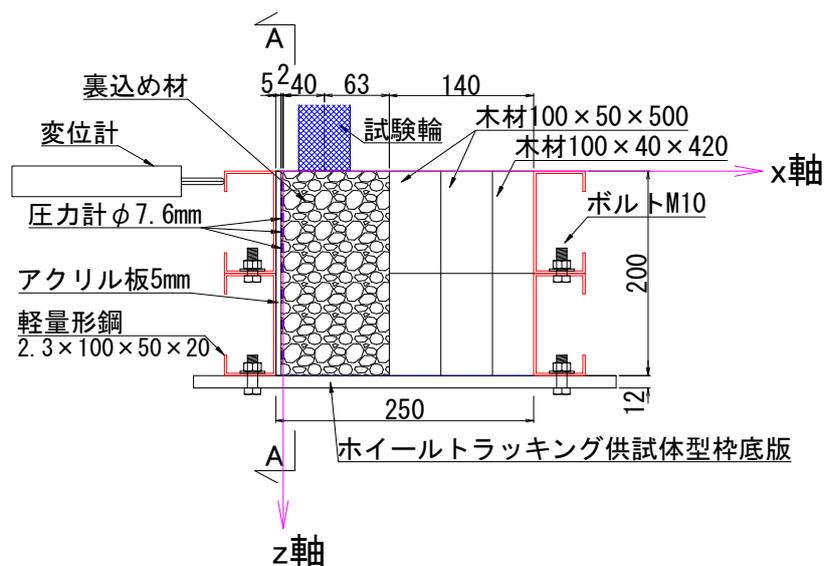
写真-2.13 タンパ転圧

図-2.8 締固め曲線 (A-b 法)

裏込め材 1 層の転圧厚さは 5cm 以下とし、写真-2.13 のようにタンパ転圧を行った。5cm 以下の転圧は、巻き出し厚 30cm で転圧した場合のような転圧層内の鉛直方向の圧力減衰⁶⁾⁸⁾が少なく、転圧むらが少ない。さらに、締固め度が低く、繰返し载荷初期の試験輪の裏込め材への沈み込みが大きいと、試験輪の走行停止、試験機の損傷に繋がるため、本実験は試験輪の沈み込みを考慮し、試験輪が連続走行可能な転圧厚さとした。タンパ転圧後の湿潤密度は 18.7kN/m³、締固め度 83%である。

2.3.6 実験断面

図-2.9(a), (b)のように、受圧面から試験輪中央までの最短距離が 4cm になるように、また、試験輪の走行距離の中心が、箱の中心と一致するように軽量形鋼の箱を固定した。



(a) 奥行き方向

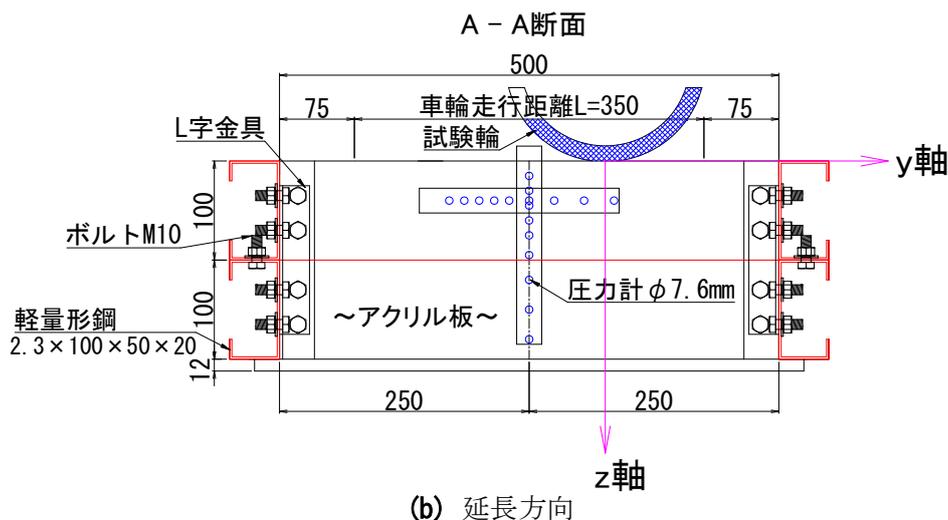


図-2.9 実験装置概要図

2.4 水平応力の計測と繰返し載荷重の載荷方法

試験輪の走行は原則手動とし、裏込め材上を壁に平行に繰返し走行させた(写真-2.11)。1275Nの同じ深さ方向において、載荷1090回と載荷721回のみ自動走行とした。繰返し載荷の初期段階において、試験輪の走行で裏込め材が沈み込んだ場合は、凹んだ箇所に裏込め材を補充して表面を平らにした。写真2-12のように、試験輪の走行速度が一定で、試験輪の折り返しが滑らかにいく場合は、走行幅の両端のわだち掘れがなく、表面は数百回載荷後も平らであった。



写真-2.11 載荷状況



写真-2.12 載荷後の表面(1472N, 深さ3cm)

試験輪の載荷重は、フルイ目9.5mm通過分を裏込め材とするときは、1472N、1275N、1079Nの3パターンとした。フルイ目5.6mm通過分を裏込め材とするときの載荷回数は、載荷回数と背面からの水平応力の変動が詳細にわかるように、鉛直方向の場合1472Nで800回、883Nで600回とした。同じ深さ方向では、1472Nで80回、1275Nで80回~1090回、1079Nで80回~120回、883Nで80回とした。

背面からの水平応力の計測は裏込め材を投入する前から始め、タンパ転圧時も水平応力の測定を行った。規定の回数を載荷して試験輪を上昇させた後、背面からの水平応力および天端水平変位の計測を終了した。

2.5 フルイ目 9.5mm 通過分を使用した場合の水平応力の測定

疑似L型擁壁の破壊実験を行うのに際し、たて壁に降伏曲げモーメントが作用する繰返し載荷重の大きさを決める必要があった。そこで、フルイ目 9.5mm 通過分の裏込め材を使用して、軽量形鋼の壁面に作用する概略の背面からの水平応力を測定し、せん断力および曲げモーメントを求めることにした。これを基に、フルイ目 5.6mm 通過分の裏込め材を使用するときの繰返し載荷重を決定した。

2.5.1 壁面に作用する水平応力の測定

鉛直方向は、1472N の載荷重で繰返し回数 18 回、1275N の載荷重で繰返し回数 30 回、1079N の載荷重で繰返し回数 30 回である。同じ深さ方向は、1472N の載荷重で繰返し回数 300 回である。実験回数は各 1 回とした。軽量形鋼の壁面に作用した、鉛直方向の背面からの水平応力を **図-2.10**～**図-2.12** に示す。図中の凡例は地表からの深さを表している。測定開始から約 9.2～12.3 分までは、裏込め材の埋戻しおよび転圧に時間を要している。また、同じ深さ方向の背面からの水平応力を **図-2.13** に示す。図上の凡例は端部圧力計からの距離を表しており、図中の数字は載荷回数を表している。

高さ 20cm の壁面では、水平応力全体に占める裏込め材の土圧の割合は小さい。本実験において、鉛直方向および同じ深さ方向の壁面に作用する背面からの水平応力は、裏込め材の土圧を考慮しても、ほとんどが同じ深さと同じ大きさで作用する残留応力である。したがって、本実験では曲げモーメントのほとんどが、残留応力に起因すると考えられた。

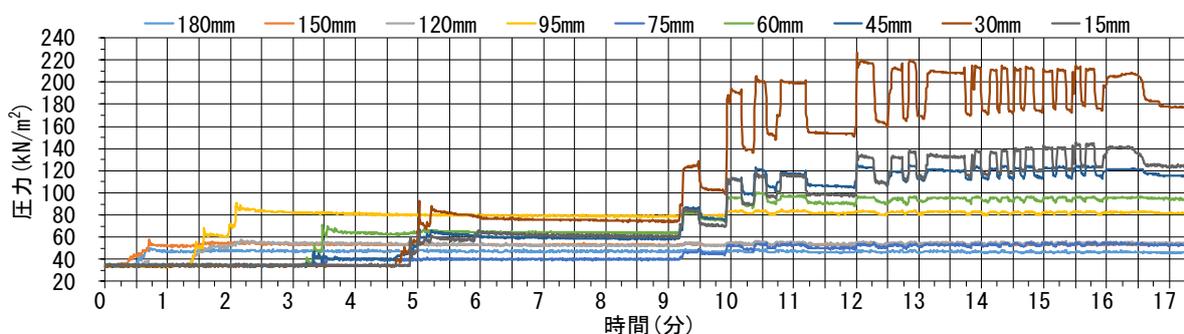


図-2.10 鉛直方向の水平応力(1472N, 18 回載荷, 9.5mm, 実験 No. 281)

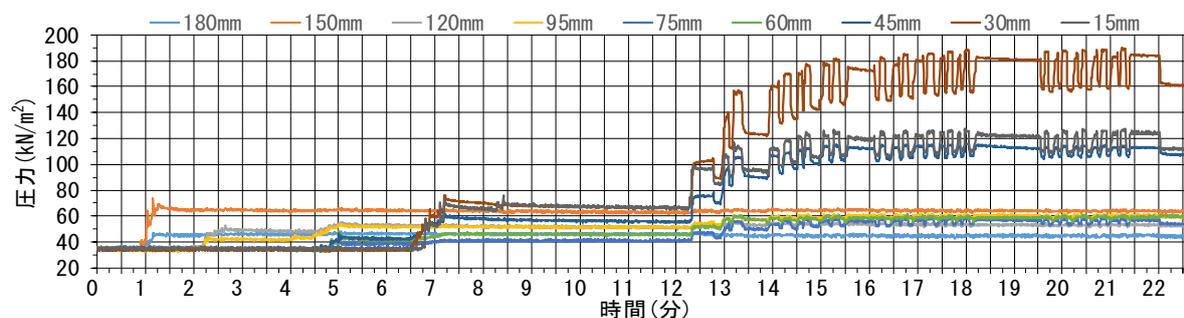


図-2.11 鉛直方向の水平応力(1275N, 30 回載荷, 9.5mm, 実験 No. 282)

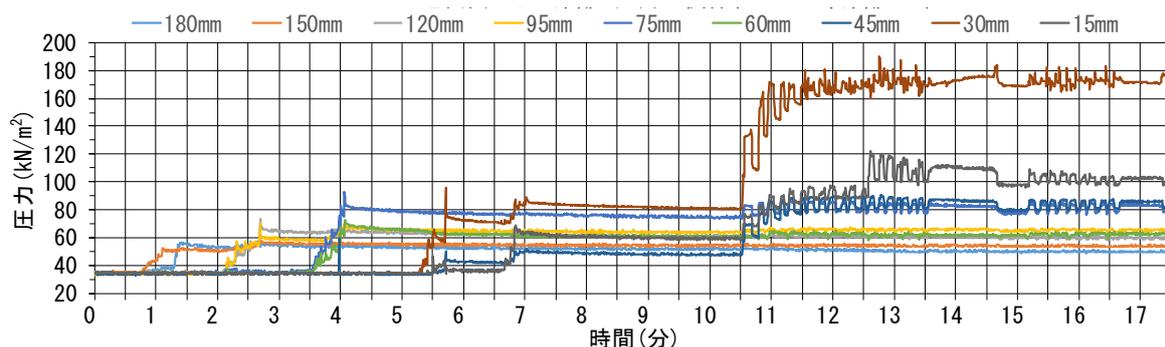


図-2.12 鉛直方向の水平応力(1079N, 30回載荷, 9.5mm, 実験 No. 283)

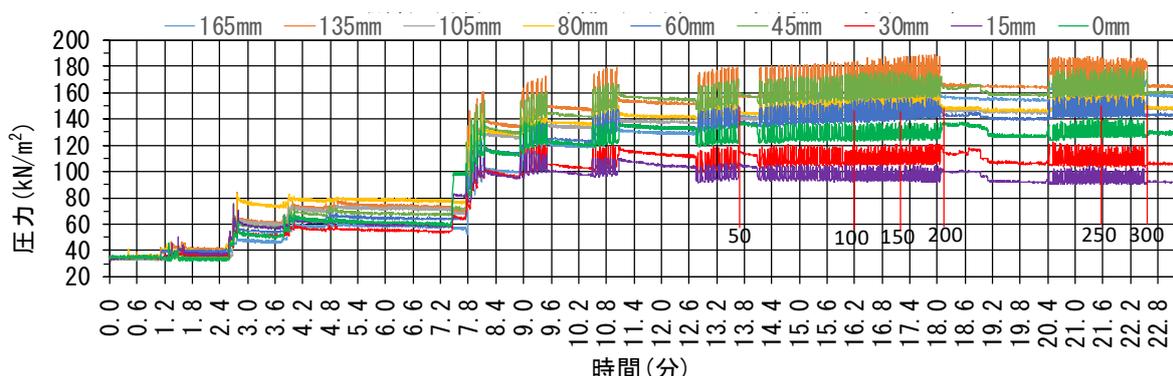


図-2.13 同じ深さ方向の水平応力(1472N, 深さ 3cm, 300回載荷, 9.5mm, 実験 No. 296)

2. 5. 2 残留応力の大きさと残留応力による断面力

概略のせん断力及び曲げモーメントは、図中で残留応力が最大になる時点で求めることにした。図-2.10～図-2.12では、載荷回数18回または30回終了直後の各深さにおける残留応力を採用した。図-2.13は、9個の圧力計の多くがピーク値となる載荷回数200回直後の19.2分の残留応力を採用した。ただし、各測定値でタンパ転圧による残留応力分は除外した。タンパ転圧による残留応力は、繰返し載荷直前の測定値50回の平均値とした。1472Nの深さ3cmにおける残留応力は、図-2.10および図-2.13の測定値を表-2.5のように平均した。

表-2.5 1472Nにおける深さ3cmの残留応力

	載荷後残留応力	タンパ転圧残留応力	摘 要
	(kN/m ²)	(kN/m ²)	
鉛直方向	183.42	75.99	載荷18回
同じ深さ方向	126.77	59.83	載荷200回, 端部から0mm
〃	93.71	58.65	載荷200回, 端部から15mm
〃	107.88	54.48	載荷200回, 端部から30mm
〃	159.11	67.17	載荷200回, 端部から45mm
〃	141.22	63.75	載荷200回, 端部から60mm
〃	147.16	77.54	載荷200回, 端部から80mm
〃	146.10	71.18	載荷200回, 端部から105mm
〃	165.48	73.05	載荷200回, 端部から135mm
〃	155.89	58.45	載荷200回, 端部から165mm
平均	142.67	66.01	

各繰返し载荷重における延長 0.15m 当たりの残留応力、せん断力および曲げモーメントを表-2.6 に示す。ここで、延長 0.15m は疑似 L 型擁壁の延長である。

表-2.6 壁面に作用するせん断力と曲げモーメントの概算値

(a) 1472N, 鉛直方向および同じ深さ方向, $x=4\text{cm}$,

深さ Z (m)	深さの 差 ΔZ (m)	延長 L (m)	载荷30回後 残留応力 A (kN/m^2)	タンバ転圧 残留応力 B (kN/m^2)	輪荷重 残留応力 $\sigma_{x=A-B}$ (kN/m^2)	輪荷重残留 応力平均 $\sigma_{x'} = (\sigma_{xi} + \sigma_{xi+1})/2$ (kN/m^2)	ΔZ 当りせん断力 $\Delta S = \Delta Z \times L \times \sigma_{x'}$ (kN)	たて壁取付部 からの距離 $H_i = 0.2 - (Z_i + Z_{i+1})/2$ (m)	ΔZ 当り曲げ モーメント $\Delta M = \Delta S \times H_i$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	
0.000			0.00	0.00	0.00					
0.015	0.015	0.15	125.54	61.81	63.73	31.87	0.072	0.193	0.0139	
0.030	0.015	0.15	142.67	66.01	76.66	70.2	0.158	0.178	0.0281	
0.045	0.015	0.15	116.83	59.44	57.39	67.03	0.151	0.163	0.0246	
0.060	0.015	0.15	94.87	64.25	30.62	44.01	0.099	0.148	0.0147	
0.075	0.015	0.15	53.00	40.26	12.74	21.68	0.049	0.133	0.0065	
0.095	0.020	0.15	82.55	78.74	3.81	8.28	0.025	0.115	0.0029	
0.120	0.025	0.15	55.03	52.71	2.32	3.07	0.012	0.093	0.0011	
0.150	0.030	0.15	53.84	53.07	0.77	1.55	0.007	0.065	0.0005	
0.180	0.030	0.15	47.31	47.31	0.00	0.39	0.002	0.035	0.0001	
タンバ平均				58.18			計	0.575	計	0.0924

(b) 1275N, 鉛直方向, $x=4\text{cm}$

深さ Z (m)	深さの 差 ΔZ (m)	延長 L (m)	载荷30回後 残留応力 A (kN/m^2)	タンバ転圧 残留応力 B (kN/m^2)	輪荷重 残留応力 $\sigma_{x=A-B}$ (kN/m^2)	輪荷重残留 応力平均 $\sigma_{x'} = (\sigma_{xi} + \sigma_{xi+1})/2$ (kN/m^2)	ΔZ 当りせん断力 $\Delta S = \Delta Z \times L \times \sigma_{x'}$ (kN)	たて壁取付部 からの距離 $H_i = 0.2 - (Z_i + Z_{i+1})/2$ (m)	ΔZ 当り曲げ モーメント $\Delta M = \Delta S \times H_i$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	
0.000			0.00	0.00	0.00					
0.015	0.015	0.15	112.45	66.12	46.33	23.17	0.052	0.193	0.0100	
0.030	0.015	0.15	161.09	66.04	95.05	70.69	0.159	0.178	0.0283	
0.045	0.015	0.15	107.48	55.61	51.87	73.46	0.165	0.163	0.0269	
0.060	0.015	0.15	59.91	45.59	14.32	33.10	0.074	0.148	0.0110	
0.075	0.015	0.15	53.81	41.29	12.52	13.42	0.030	0.133	0.0040	
0.095	0.020	0.15	59.47	51.34	8.13	10.33	0.031	0.115	0.0036	
0.120	0.025	0.15	52.19	51.10	1.09	4.61	0.017	0.093	0.0016	
0.150	0.030	0.15	63.01	62.81	0.20	0.64	0.003	0.065	0.0002	
0.180	0.030	0.15	46.17	46.17	0.00	0.10	0.000	0.035	0.0000	
タンバ平均				54.01			計	0.531	計	0.0856

(c) 1079N, 鉛直方向, $x=4\text{cm}$

深さ Z (m)	深さの 差 ΔZ (m)	延長 L (m)	载荷30回後 残留応力 A (kN/m^2)	タンバ転圧 残留応力 B (kN/m^2)	輪荷重 残留応力 $\sigma_{x=A-B}$ (kN/m^2)	輪荷重残留 応力平均 $\sigma_{x'} = (\sigma_{xi} + \sigma_{xi+1})/2$ (kN/m^2)	ΔZ 当りせん断力 $\Delta S = \Delta Z \times L \times \sigma_{x'}$ (kN)	たて壁取付部 からの距離 $H_i = 0.2 - (Z_i + Z_{i+1})/2$ (m)	ΔZ 当り曲げ モーメント $\Delta M = \Delta S \times H_i$ ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	
0.000			0.00	0.00	0.00					
0.015	0.015	0.15	97.31	59.26	38.05	19.03	0.043	0.193	0.0083	
0.030	0.015	0.15	171.06	80.63	90.43	64.24	0.145	0.178	0.0258	
0.045	0.015	0.15	81.46	47.68	33.78	62.11	0.140	0.163	0.0228	
0.060	0.015	0.15	61.94	60.41	1.53	17.66	0.040	0.148	0.0059	
0.075	0.015	0.15	78.61	74.44	4.17	2.85	0.006	0.133	0.0008	
0.095	0.020	0.15	64.51	63.78	0.73	2.45	0.007	0.115	0.0008	
0.120	0.025	0.15	59.10	59.10	0.00	0.37	0.001	0.093	0.0001	
0.150	0.030	0.15	53.04	53.04	0.00	0.00	0.000	0.065	0.0000	
0.180	0.030	0.15	50.05	50.05	0.00	0.00	0.000	0.035	0.0000	
タンバ平均				60.93			計	0.382	計	0.0645

繰返し载荷重における残留応力の分布を図-2.14に示す。残留応力は、地表面近くが大きく深くなるほど急激に減少するのが解る。深さ3cmにおける値や深さ6cm以深で測定値の形状に乱れがあるのは、最大粒径が9.5mmであるために、圧力計にうまく石が当たらないためと思われる。これは、最大粒径を5.6mmにすることで幾分緩和できると考えた。

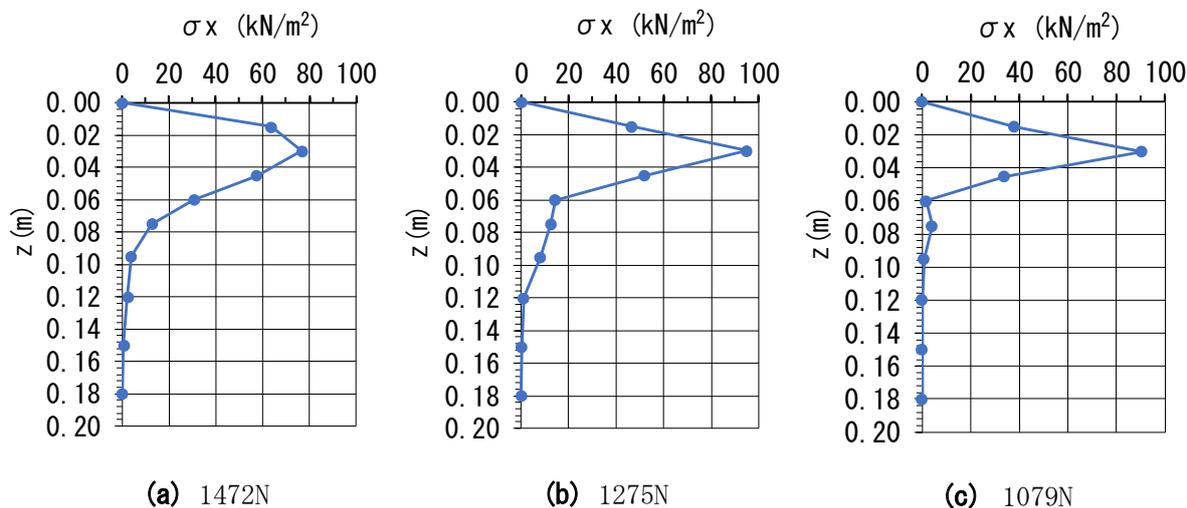


図-2.14 残留応力による水平応力 (9.5mm, x=4cm)

2. 5. 3 フルイ目 5.6mm 通過分使用時の繰返し载荷重の決定

表-2.6より、フルイ目9.5mm通過分を使用したときの壁面に作用した曲げモーメントは、繰返し载荷重1472Nのとき0.092kN・m、1275Nのとき0.086kN・m、1079Nのとき0.065kN・mであった。この結果を受けて、内寸法30cm×30cmおよび36cm×36cmの改良桝の材料承認願を取り寄せ、コンクリートの設計基準強度、鉄線の本数および径を承認図等で確認したところ、内寸法30cm×30cmの改良桝の配筋はΦ2.6mmが2本であった。前出2.2.2では、内寸法30cm×30cmの改良桝を加工して疑似L型擁壁にした後、配筋がφ2.6mmで1本と判明したので、降伏曲げモーメントを0.045kN・mとしたが、改良桝を加工したのは軽量形鋼の壁面に作用する水平応力を測定し終えてからである。それまでは疑似L型擁壁の配筋はΦ2.6mmが2本と解釈し、2.2.2のように許容応力度法で計算した結果、降伏曲げモーメントは0.077kN・mと推定していた。

降伏曲げモーメントが0.077kN・mの場合、フルイ目9.5mm通過分を使用した繰返し载荷実験結果からすると、疑似L型擁壁は1079N以上1275N以下の繰返し载荷重で破壊することになる。したがって、裏込め材にフルイ目5.6mm通過分を使用した場合の繰返し载荷重は、破壊する繰返し载荷重を中央にとり、20kg(196N)ずつ幅を持たせて、1472N、1275N、1079N、883Nの4パターンとした。

2.6 フルイ目 5.6mm 通過分を使用した場合の水平応力の測定

2.6.1 繰返し载荷による鉛直方向の水平応力

図-2.15 に、裏込め材に転圧を加えて埋め戻し、輪荷重 1472N を手動にて 800 回繰返し载荷したときの、時間と各深さの圧力計に作用した背面からの水平応力の推移を示す。測定回数は 10 回/秒で、図上の凡例は深さを表している。測定開始から約 34 分までは、裏込め材の埋戻しおよび転圧に時間を要している。タンパ転圧中の各圧力計に作用した背面からの水平応力は、圧力計前面の土層が初めて転圧されたとき急上昇し、上部の土層が巻きだされるにしたがってタンパ転圧の影響は減少した。また、一度上昇した背面からの水平応力は残留応力として残り、時間とともに漸減した。

繰返し载荷を始めると、輪荷重による背面からの水平応力は、初めのうち応力の振幅のみで徐々に残留応力に置き換わった。輪荷重による背面からの水平応力とタンパ転圧による背面からの水平応力の合算値は、残留応力を見ると深さ 30mm の値が一番大きく、30mm から深さが増すごとに残留応力は減少していく傾向が見られた。残留応力のピークは深さ 30~45mm で载荷 32 回(図-2.15 の A 点)、深さ 60~120mm で载荷 4 回、深さ 150~180mm で载荷 1 回であった。残留応力および試験輪が通過するたびに生じる背面からの水平応力と残留応力の差(以下、応力の振幅と称す)は、ピークを迎えた後徐々に縮小する傾向があり、初期の残留応力の値が大きいほど、縮小する傾向は顕著であった。

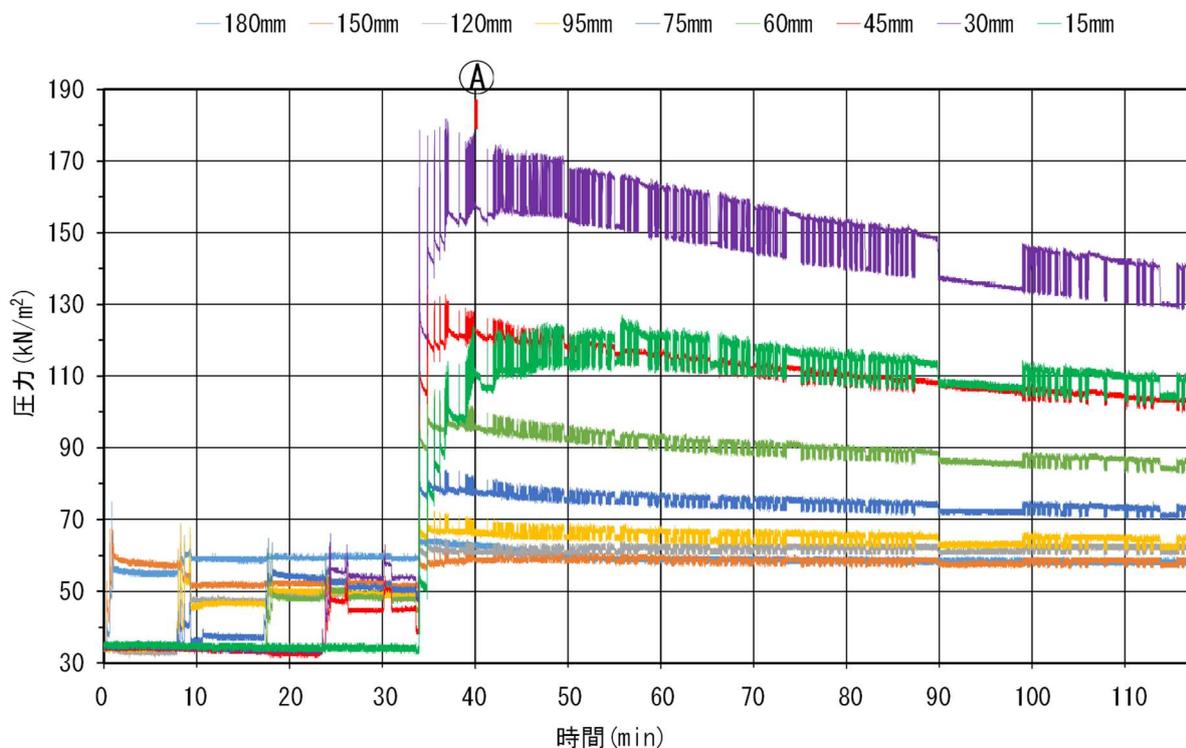


図-2.15 鉛直方向の水平応力(1472N, 800 回载荷, 5.6mm, 実験 No. 299)

図-2.16 に、裏込め材に転圧を加えて埋め戻し、輪荷重 883N を手動にて 600 回繰返し载荷したときの、時間と各深さの圧力計に作用した背面からの水平応力の推移を示す。測定回数は 10 回/秒で、図上の凡例は深さを表している。測定開始から約 19.3 分までは、裏込め材の埋戻しおよび転圧に時間を要している。

繰返し载荷を始めると、1472N の場合と同様に、輪荷重による背面からの水平応力は、初めのうち応力の振幅のみで徐々に残留応力に置き換わった。輪荷重による背面からの水平応力とタンパ転圧による背面からの水平応力の合算値は、残留応力の最大値を見ると深さ 15mm の値が一番大きく、120mm と 150mm の測定値が逆転していることを除けば、深さが増すごとに残留応力は減少していく傾向が見られた。残留応力のピークは深さ 15~30mm で载荷 60 回(図-2.16 の A 点)、深さ 45~60mm で载荷 40 回(図-2.16 の B 点)、深さ 75mm で载荷 6 回、深さ 95~150mm で载荷 20 回であった。深さ 180mm については残留応力の増加は見られなかった。883N についても、残留応力および応力の振幅は、ピークを迎えた後徐々に縮小する傾向があり、初期の残留応力の値が大きいほど、縮小する傾向は顕著であった。

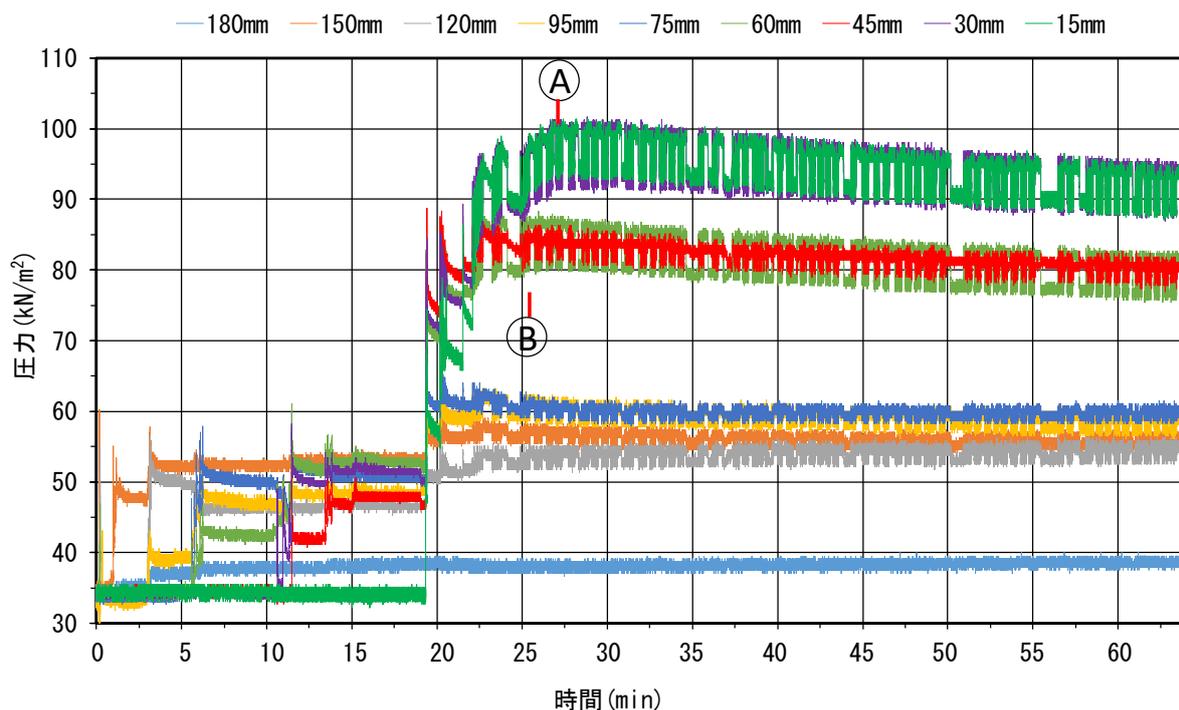


図-2.16 鉛直方向の水平応力(883N, 600 回载荷, 5.6mm, 実験 No. 300)

図-2.17 は、図-2.16 に示した実験の後 13 日放置して、再び 60 回繰返し載荷を加えたときの、時間と各深さの圧力計に作用した背面からの水平応力の推移を示している。測定回数は 10 回/秒である。各深さととも放置する前より背面からの水平応力は減少しており、深さ 60mm 以深においては、2 回目の繰返し載荷前における背面からの水平応力が、タンパ転圧完了時よりも低下している。また、883N を繰返し載荷しても背面からの残留応力は増加せず、応力の振幅は 13 日放置前よりも減少した。

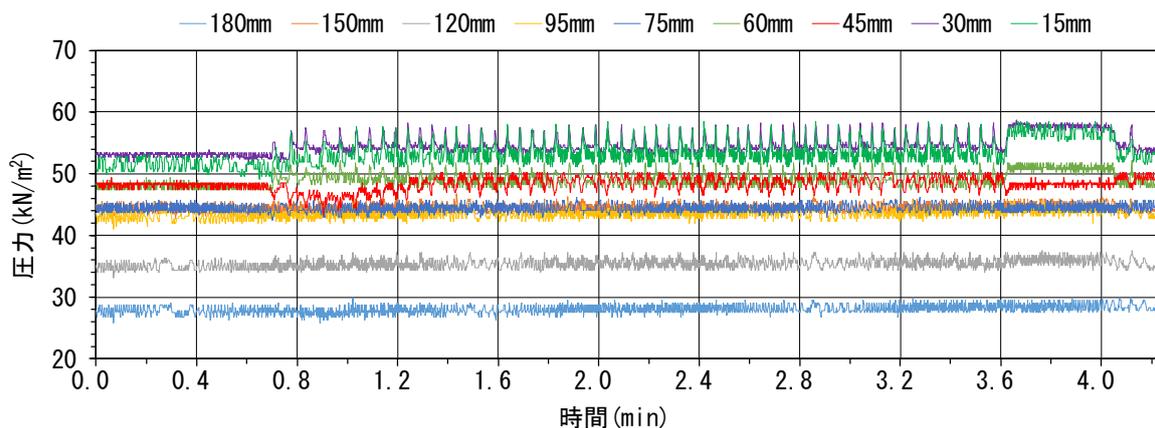


図-2.17 13日放置後の再載荷による水平応力(883N, 60回載荷, 5.6mm, 実験 No. 301)

擁壁の裏込め土に、静的に上載荷重が載荷された場合、上載荷重を取り除いた後のたて壁に作用する背面からの水平応力は、上載荷重を載荷する前の水平応力よりしばしば大きく、残留応力が残ることが Spangler と Mickle によって報告されている⁹⁾。本繰返し載荷試験においても、各深さに設置された圧力計のすべてにおいて、残留応力の上昇、最大値となった後の漸減が確認されたが、初期の残留応力の値が大きいほど、載荷回数が増えるにしたがって残留応力の減少が顕著であった。また、応力の振幅は、載荷を重ねるごとに漸減していく傾向があった。

既往の研究では、粒状土は繰返し載荷することによって、はじめてその載荷重に対応した粒子構造となり、土中の応力の増加とともに、内部構造の変化に起因する塑性変形が生じるとされている¹⁰⁾。本実験では、繰返し載荷により塑性変形が生じ、深さごとに土中の応力に対応した粒子構造になったとき塑性変形が収束し、残留応力が最大になったと考えられる。塑性変形が収束した後は、残留応力および応力の振幅は、載荷している以上の荷重が載荷されない限り、または載荷位置が変わらない限り、自然に減衰していくものと思われる。

2. 6. 2 繰返し载荷による同じ深さ方向の水平応力

(1) 载荷重 1472N

図-2.18～図-2.22 に、深さ 2cm～8cm に圧力計を配置して、裏込め材に転圧を加えて埋め戻し、輪荷重 1472N を手動にて 80 回繰返し载荷したときの、時間と各圧力計に作用した背面からの水平応力の推移を示す。図上の凡例は端部の圧力計からの距離を表している。背面からの水平応力の測定頻度は 10 回/秒である。図-2.20 の深さ 4cm を例にとれば、測定開始から約 8.4 分間は、裏込め材の埋戻しおよび転圧に時間を要している。繰返し载荷開始時は応力の振幅だけであった背面からの水平応力は、载荷を重ねるごとに残留応力の割合が増加した。残留応力は载荷を始めると急上昇し、その後は漸増して各圧力計とも载荷約 35 回で最大値となった。そのほかの深さにおいても、同じような残留応力および応力の振幅の増加傾向が見られ、残留応力が最大になる载荷回数があることが伺える。また、鉛直方向と同じように地表面近くで背面からの水平応力が大きくなり、深くなるほど背面からの水平応力が減少することが分かる。

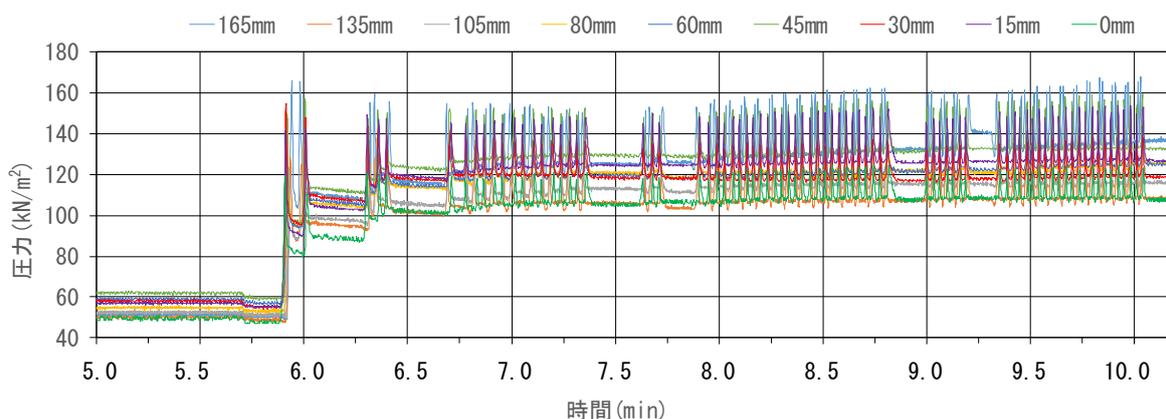


図-2.18 同じ深さ方向の水平応力(1472N, 深さ 2cm, 80 回载荷, 5.6mm, 実験 No. 317)

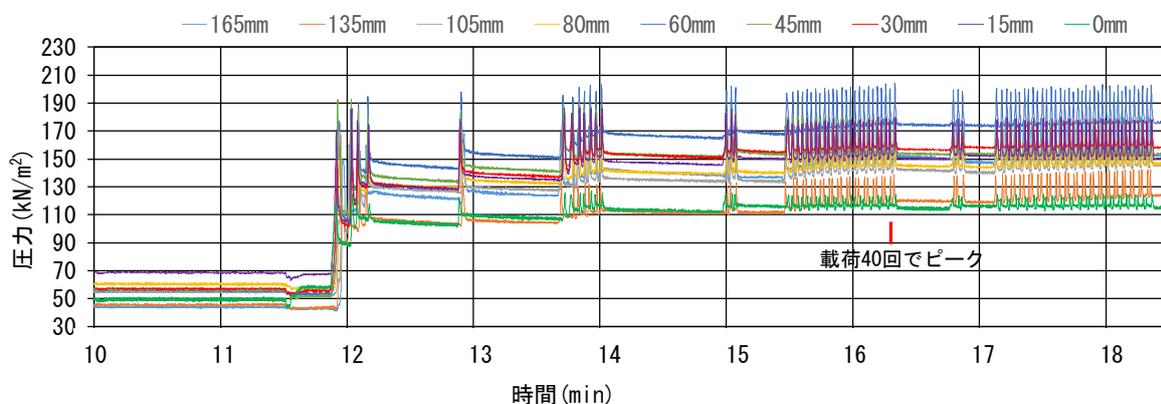


図-2.19 同じ深さ方向の水平応力(1472N, 深さ 3cm, 80 回载荷, 5.6mm, 実験 No. 310)

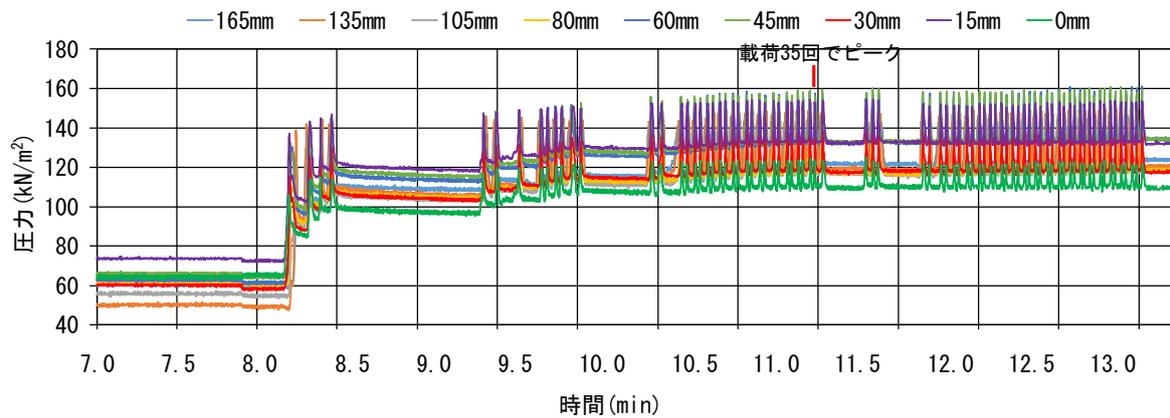


図-2.20 同じ深さ方向の水平応力(1472N, 深さ 4cm, 80 回载荷, 5.6mm, 実験 No. 309)

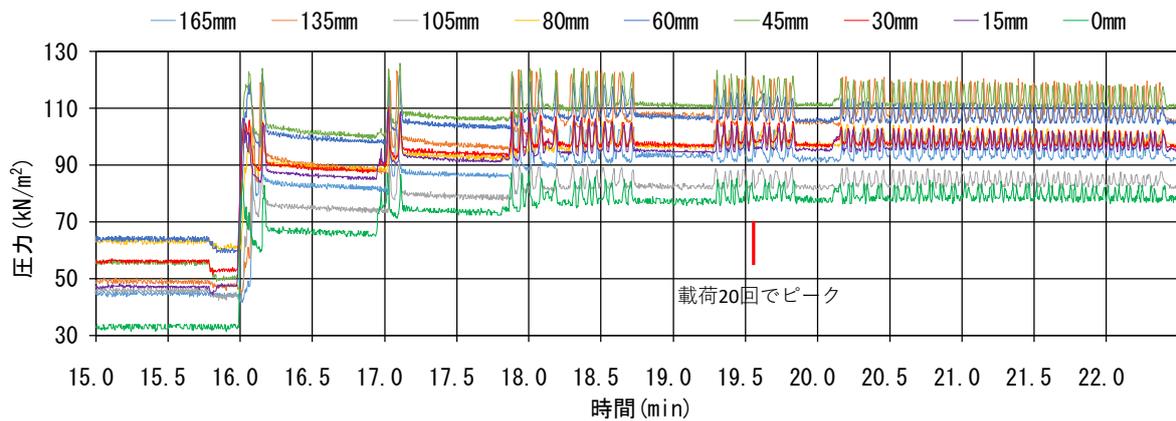


図-2.21 同じ深さ方向の水平応力(1472N, 深さ 6cm, 80 回载荷, 5.6mm, 実験 No. 304)

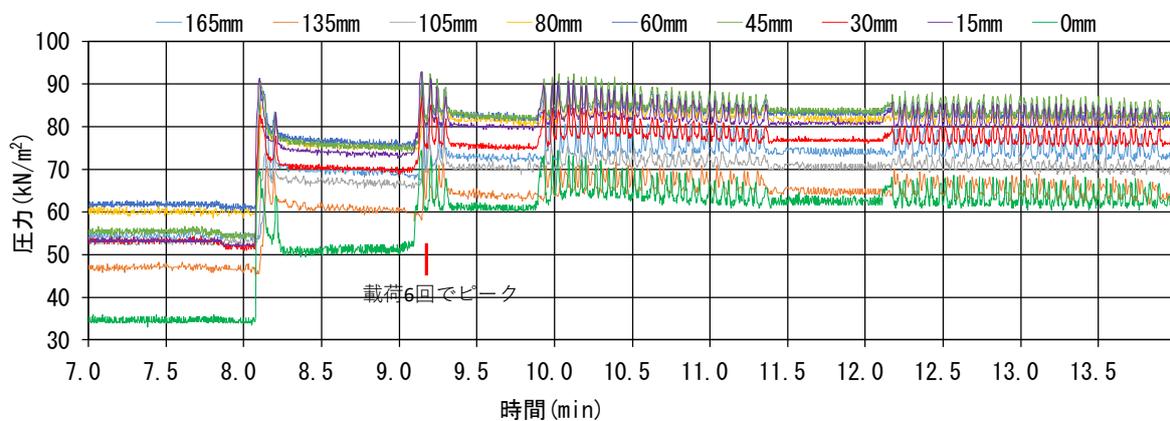


図-2.22 同じ深さ方向の水平応力(1472N, 深さ 8cm, 80 回载荷, 5.6mm, 実験 No. 303)

(2) 載荷重 1275N

図-2.23～図-2.28 に、深さ 2cm～8cm に圧力計を配置して、裏込め材に転圧を加えて埋め戻し、輪荷重 1275N を手動にて 80～120 回繰返し載荷したときの、時間と各圧力計に作用した背面からの水平応力の推移を示す。図上の凡例は端部の圧力計からの距離を表している。背面からの水平応力の測定頻度は 10 回/秒である。図-2.25 を例にとれば、残留応力および応力の振幅は載荷 37 回(同図の A 点)から増加がほとんど無く、載荷 69 回(同図の B 点)以後漸減した。

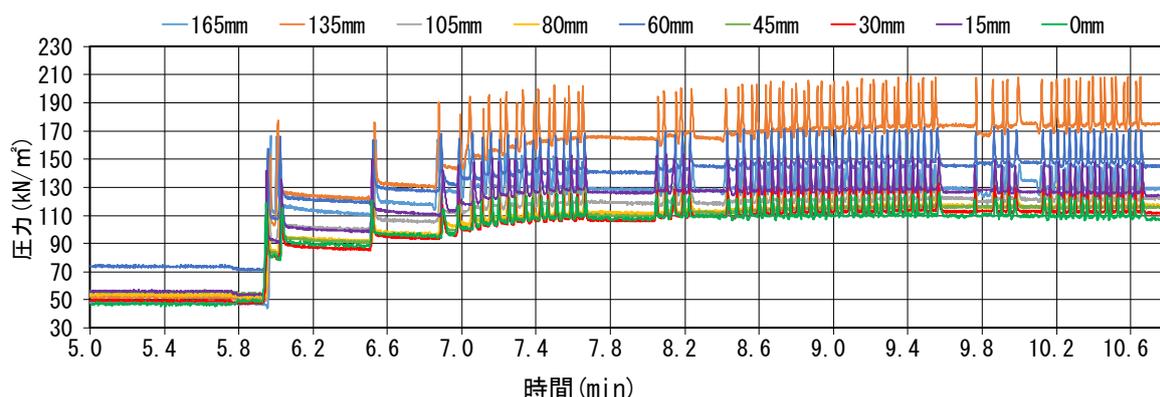


図-2.23 同じ深さ方向の水平応力(1275N, 深さ 2cm, 80 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 316)

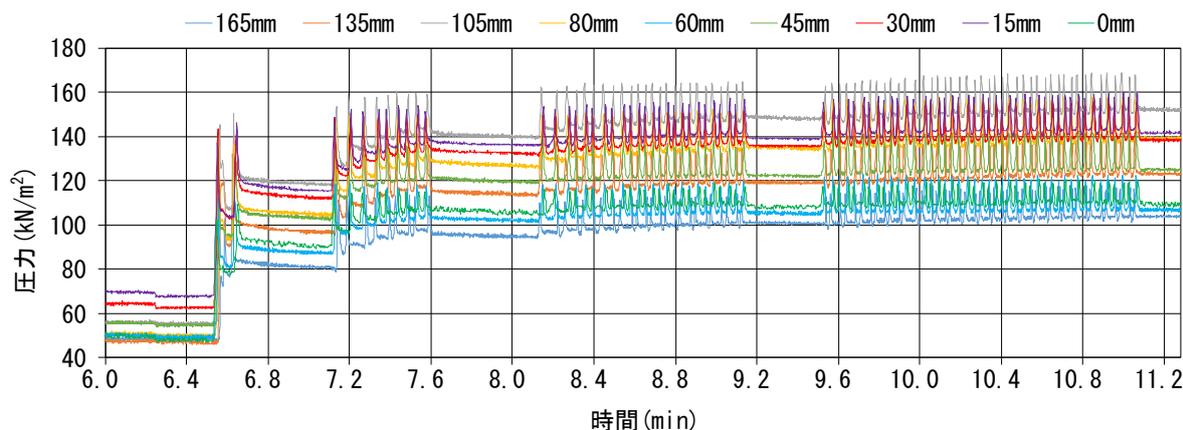


図-2.24 同じ深さ方向の水平応力(1275N, 深さ 3cm, 80 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 311)

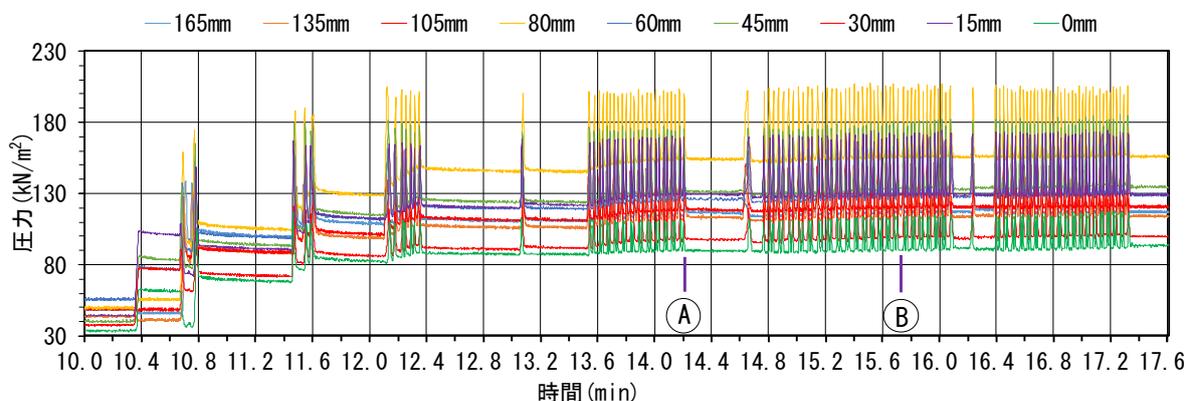


図-2.25 同じ深さ方向の水平応力(1275N, 深さ 4cm, 120 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 329)

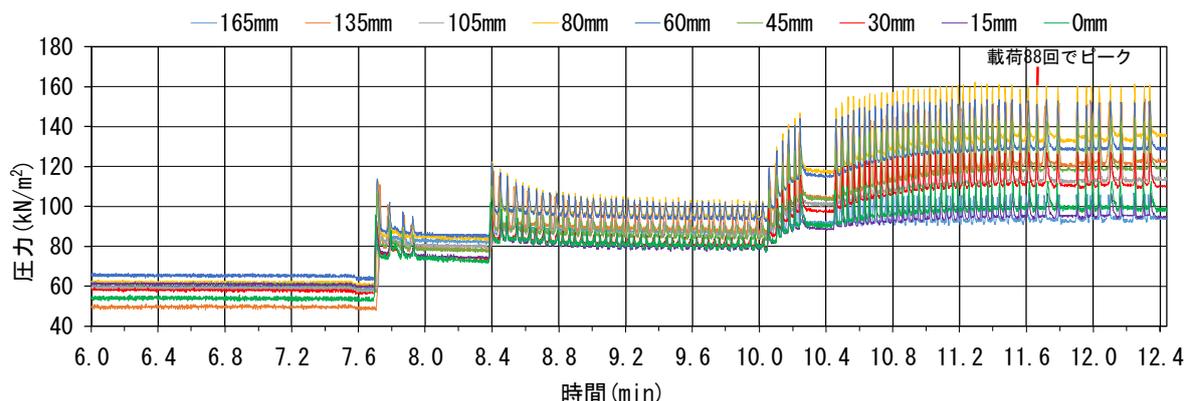


図-2.26 同じ深さ方向の水平応力(1275N, 深さ 4cm, 100 回载荷, 5.6mm, 実験 No. 308)

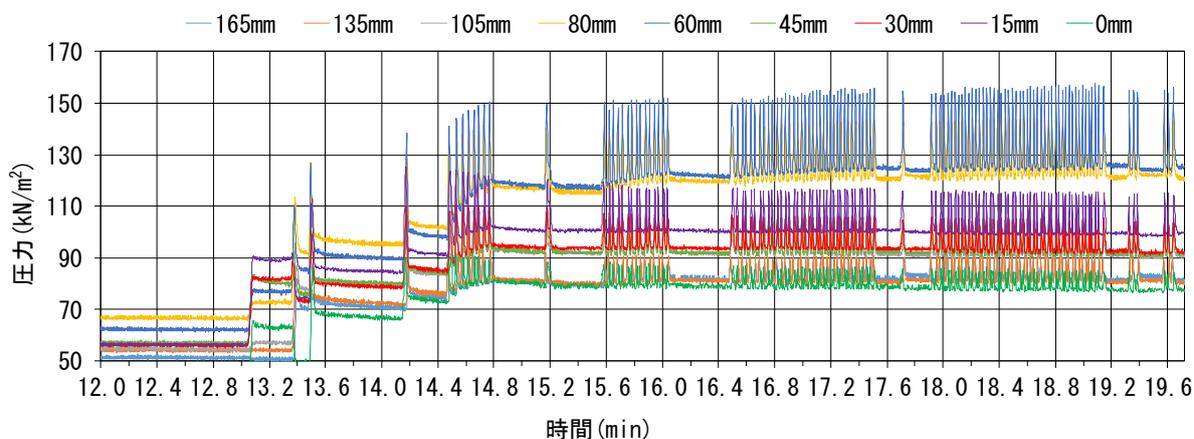


図-2.27 同じ深さ方向の水平応力(1275N, 深さ 6cm, 120 回载荷, 5.6mm, 実験 No. 327)

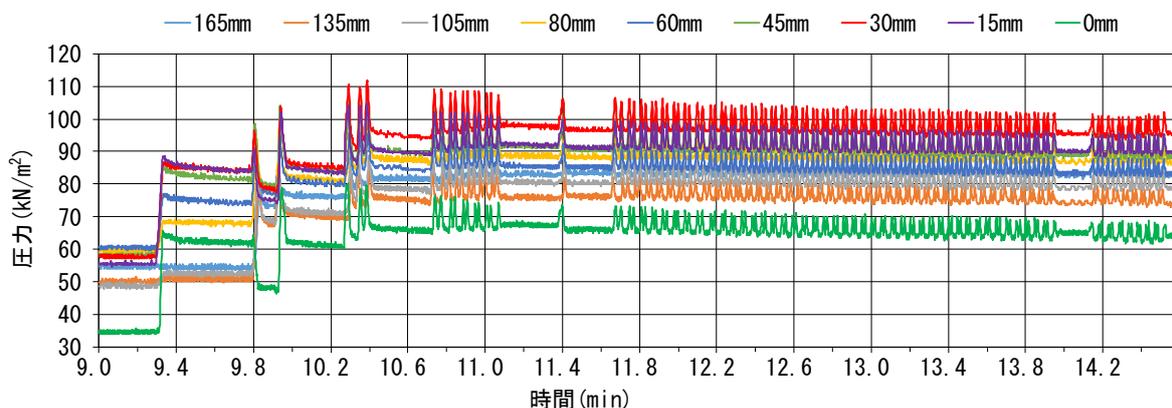


図-2.28 同じ深さ方向の水平応力(1275N, 深さ 8cm, 120 回载荷, 5.6mm, 実験 No. 326)

次に、自動载荷に切り替えて、载荷回数を大幅に増加させてみた。図-2.29 に、深さ 3cm に圧力計 9 個を配置した測定値の内、端部の圧力計から 105mm の位置にある圧力計に作用した、背面からの水平応力の時間推移を示す。輪荷重 1275N を始めの 4 回は手動で载荷し、5 回以降は 1 往復/min の自動载荷として、合計 1090 回繰返し载荷した。背面からの水平応力の測定頻度は 2 回/秒である。測定開始から約 15 分までは、裏込め材の埋戻しおよび転圧に時間を要し

ている。残留応力は載荷 40 回(図中の C 点)まで緩やかに上昇し、載荷 100 回(図中の D 点)まで漸増した後減少に転じた。応力の振幅についても、載荷 100 回以後は載荷を繰返し続けると縮小する傾向があった。

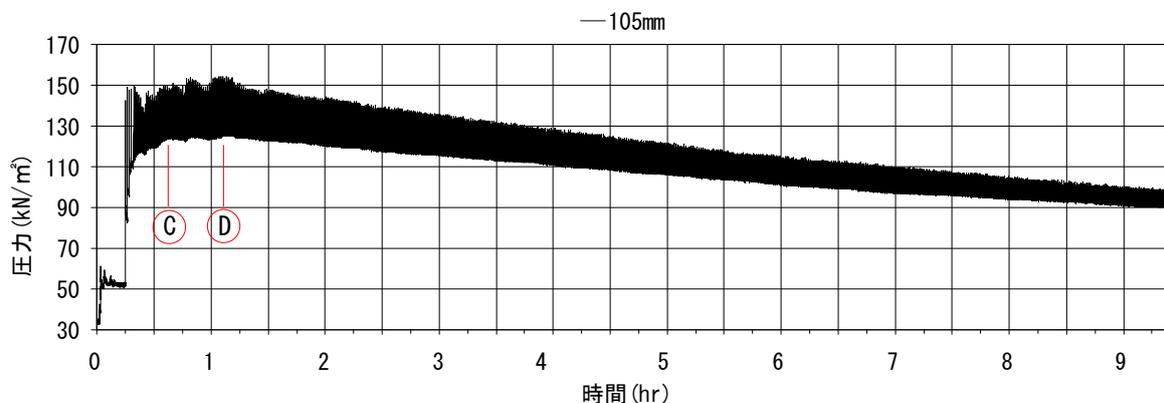


図-2.29 同じ深さ方向の水平応力(1275N, 深さ 3cm, 1090 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 331)

さらに、自動載荷速度を変えて、かつ繰返し載荷の途中で 15 分~25 分の放置時間を取ったとき、水平応力が元に戻るかどうかを確認した。図-2.30 に、深さ 3cm に圧力計 9 個を配置した測定値の内、端部の圧力計から 60mm の位置にある圧力計に作用した、背面からの水平応力の時間推移を示す。背面からの水平応力の測定頻度は 2 回/秒である。輪荷重 1275N の繰返し載荷は以下の通りである。

- ① 1 回目は手動にて 21 回載荷
- ② 2 回目は 10 往復/min の載荷速度で、経過時間 23.6~33.6 分の間を 200 回自動載荷
- ③ 3 回目は 5 往復/min の載荷速度で、経過時間 52.5~62.5 分の間を 100 回自動載荷
- ④ 4 回目は 15 往復/min の載荷速度で、経過時間 81.4~88.1 分の間を 200 回自動載荷
- ⑤ 5 回目は 5 往復/min の載荷速度で、経過時間 111~121 分の間を 100 回自動載荷
- ⑥ 6 回目は 5 往復/min の載荷速度で、経過時間 147~157 分の間を 100 回自動載荷

結果として、載荷速度が 15 往復/min のときに若干の残留応力の増加が見られたものの、それ以外は載荷中の残留応力が維持される程度であり、経過時間 30 分前後の最大値に戻るようなことはなかった。また、載荷速度を変えても、応力の振幅が増すようなことは無かった。

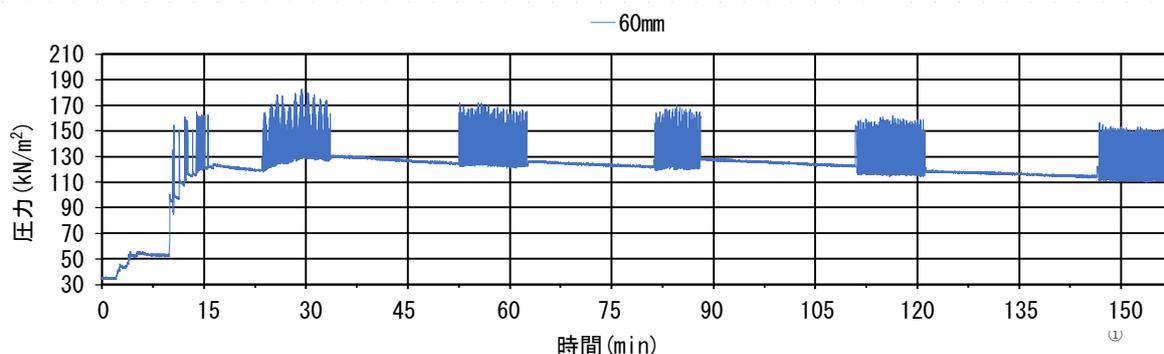


図-2.30 同じ深さ方向の水平応力(1275N, 深さ 3cm, 721 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 330)

(3) 載荷重 1079N

図-2.31～図-2.35 に、深さ 2cm～8cm に圧力計を配置して、裏込め材に転圧を加えて埋戻し、輪荷重 1079N を手動にて 80 回または 120 回繰返し載荷したときの、時間と各圧力計に作用した背面からの水平応力の推移を示す。図上の凡例は端部圧力計からの距離を表している。背面からの水平応力の測定頻度は 10 回/秒である。ここでも、残留応力および応力の振幅の最大値は違うものの、載荷重 1472N および載荷重 1275N と同じような圧力増加傾向を示した。

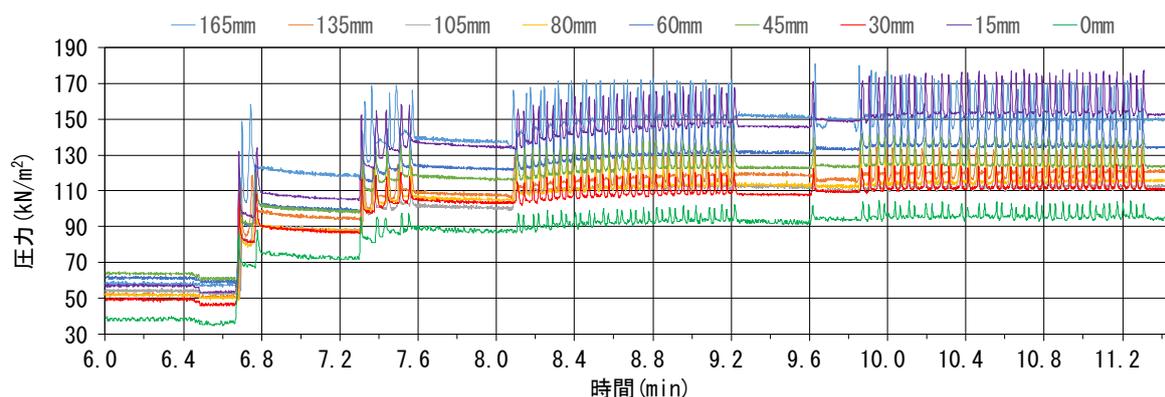


図-2.31 同じ深さ方向の水平応力(1079N, 深さ 2cm, 80 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 315)

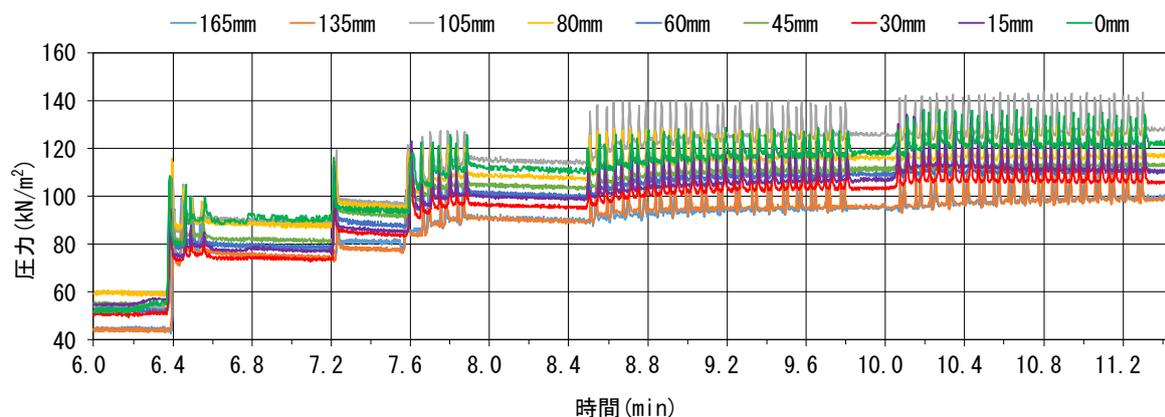


図-2.32 同じ深さ方向の水平応力(1079N, 深さ 3cm, 80 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 312)

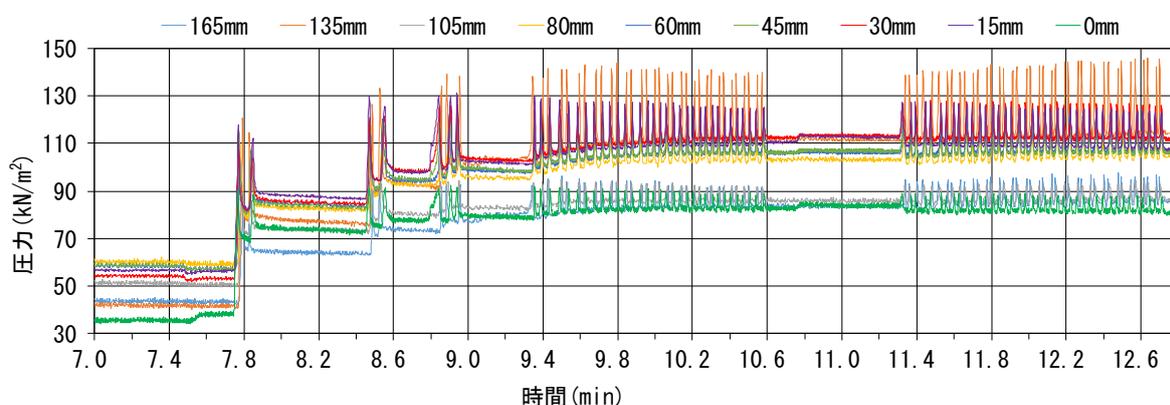


図-2.33 同じ深さ方向の水平応力(1079N, 深さ 4cm, 80 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 307)

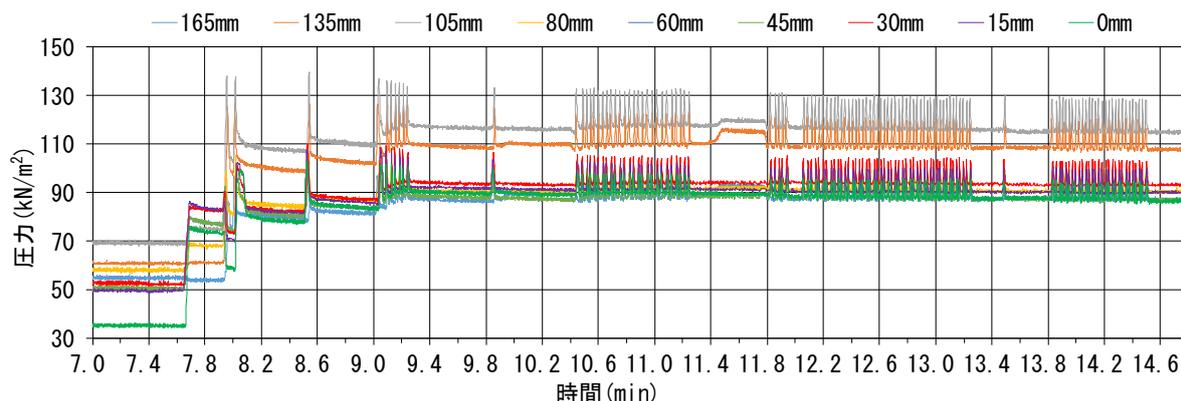


図-2.34 同じ深さ方向の水平応力(1079N, 深さ 6cm, 120 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 328)

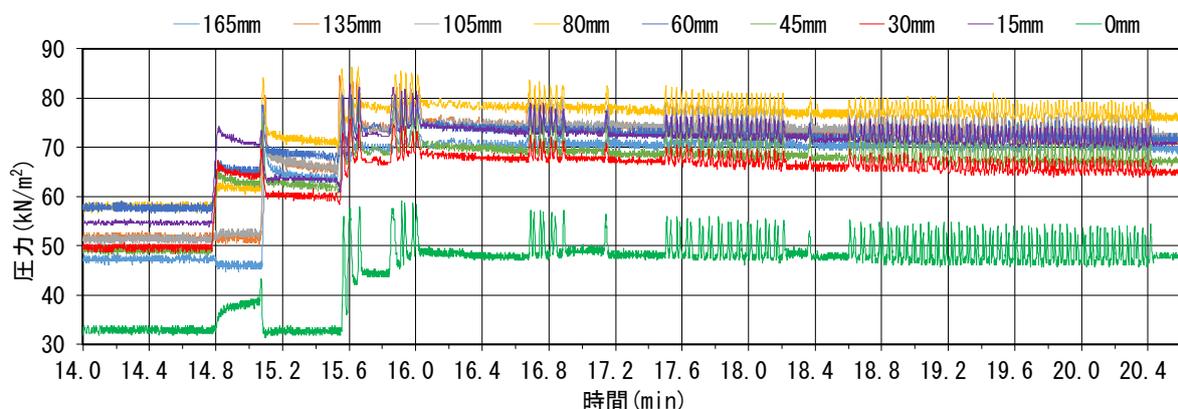


図-2.35 同じ深さ方向の水平応力(1079N, 深さ 8cm, 120 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 325)

(4) 載荷重 883N

図-2.36～図-2.40 に、深さ 2cm～8cm に圧力計を配置して、裏込め材に転圧を加えて埋戻し、輪荷重 883N を手動にて 80 回繰返し載荷したときの、時間と各圧力計に作用した背面からの水平応力の推移を示す。図上の凡例は端部圧力計からの距離を表している。背面からの水平応力の測定頻度は 10 回/秒である。ここでも、残留応力および応力の振幅の最大値は違うものの、載荷重 1472N～載荷重 1079N と同じような圧力増加傾向を示した。

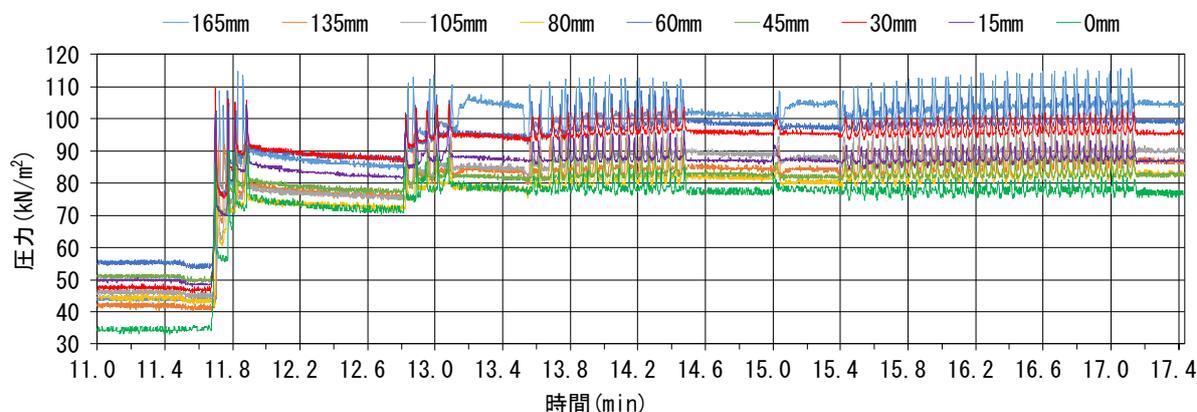


図-2.36 同じ深さ方向の水平応力(883N, 深さ 2cm, 80 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 314)

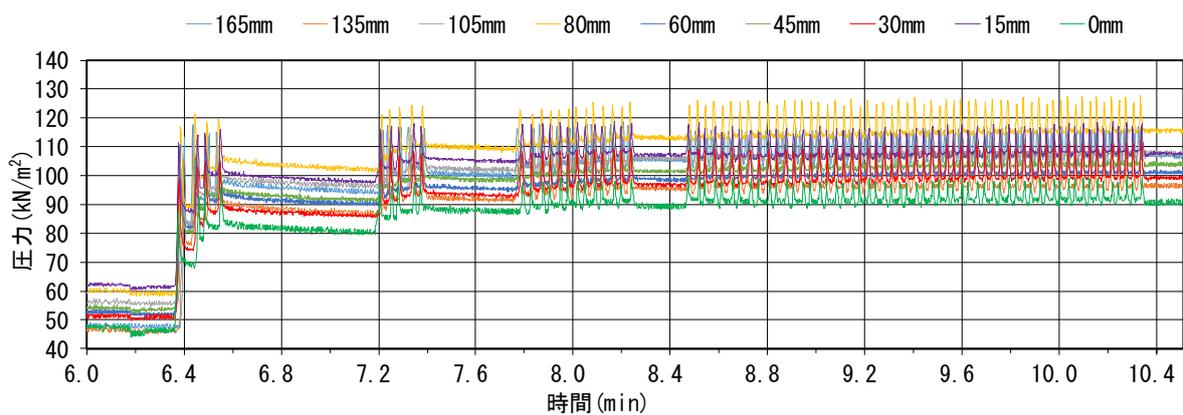


図-2.37 同じ深さ方向の水平応力(883N, 深さ 3cm, 80 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 313)

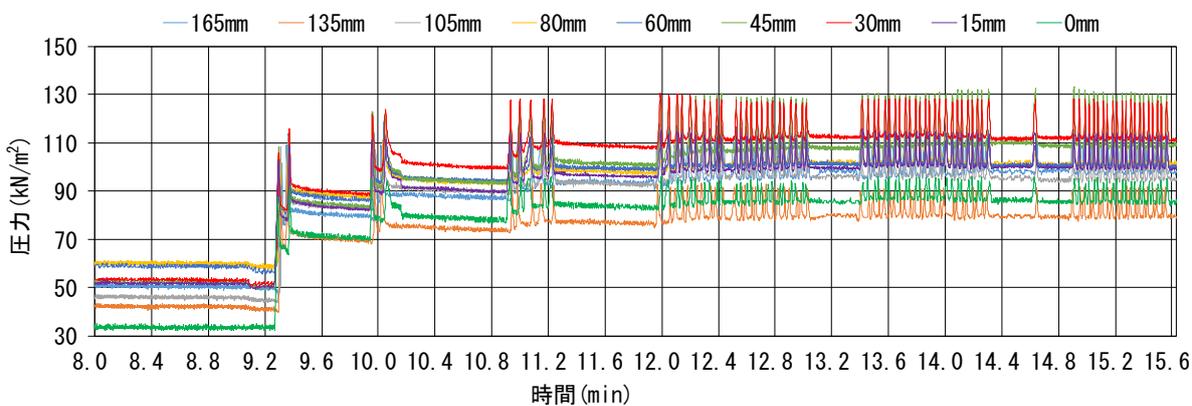


図-2.38 同じ深さ方向の水平応力(883N, 深さ 4cm, 80 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 306)

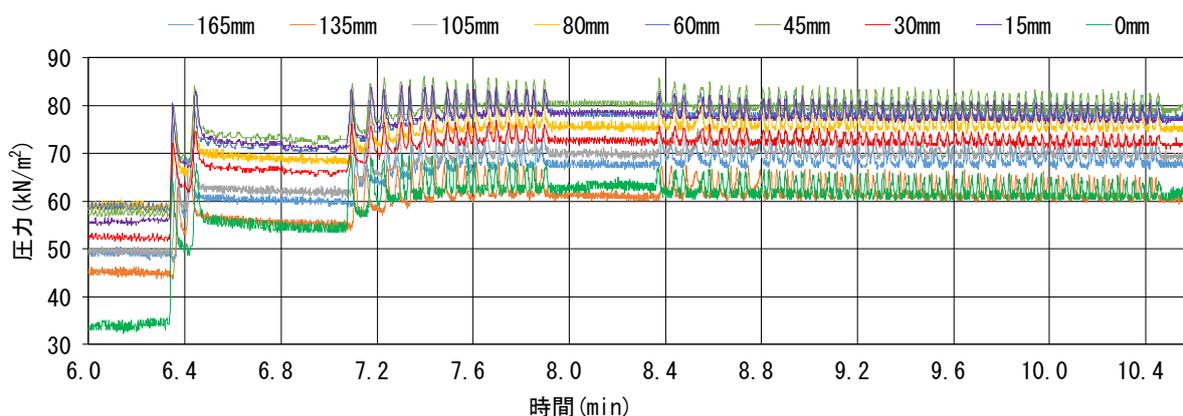


図-2.39 同じ深さ方向の水平応力(883N, 深さ 6cm, 80 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 305)

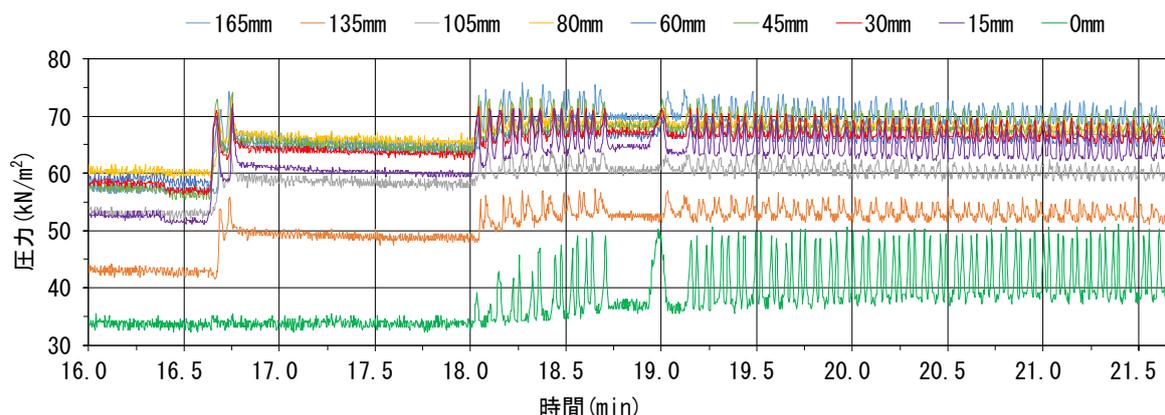


図-2.40 同じ深さ方向の水平応力(883N, 深さ 8cm, 80 回載荷, 5.6mm, 実験 No. 302)

2. 6. 3 締固めによる水平応力の評価

現道におけるプレキャストL型擁壁設置後の裏込め土の転圧状態が、本実験で再現されていることを示さなければ、繰返し載荷実験の妥当性が疑われる。そこで、タンパ転圧時に得られた背面からの水平応力で妥当性を検証する。実物のプレキャストL型擁壁の裏込め土の締固めは、たて壁の水平変位抑制のために、ハンドガイドローラ等の小型転圧機械が使用されている。小型転圧機械による締固めで、裏込め土を介してたて壁に作用する背面からの水平応力の算出方法には、マニュアルを使用した計算、弾性理論の使用、カナダ方式の使用がある^{1), 11)}。以下では、プレートコンパクタとハンドガイドローラで検討する。

(1) マニュアル計算による振動プレートの水平土圧

はじめに、マニュアル計算を用いて、プレートコンパクタによる締固めで、壁面に作用する背面からの水平応力の大きさを求めた。小型平板式締固め機械による水平土圧の算定は、Broms(1971), NAVFAC DM-7.2(US Navy 1982), Duncan and Seed(1986), Peck and Mesri(1987), Duncanら(1991)といった何人かの研究者によって簡単な計算方法が示されている¹²⁾。Chen and Fang は、文献12のFig.9.においてこれらの実験結果と自らの実験結果を比較している。この図において、単位体積重量 $\gamma=16.6\text{kN/m}^3$, 相対密度 $Dr=75\%$, 内部摩擦角 $\Phi=40.8^\circ$, 壁面摩擦角 $\delta=13.6^\circ$, 繰返し締固め応力 34.9kN/m^2 の条件で計算した場合の背面からの水平応力をみると、深さ 20cm のとき各研究における水平土圧 σ_h の値は $5.5\sim 9.0\text{kN/m}^2$ である。また、Fig.9.において 0.3 m 未満の深さでは、締め固められた最上部の層の背面からの水平応力は、受働ランキン土圧と同じか、わずかに小さくなるとしている。

国内で使用されている重量 66kg, 起振力 10.1kN, 接地幅 0.35m×接地長 0.2m のプレートコンパクタの場合、繰返し荷重は $0.066\times 9.81+10.1=10.75\text{kN}^{\text{B}}$ となり、繰返し圧縮応力は $10.75 / (0.35\times 0.20) =154\text{kN/m}^2$ である。文献12のFig.9.で使用されている繰返し締固め応力 34.9kN/m^2 との比は、 $154/34.9=4.4$ 倍になる。すなわちプレートコンパクタ(三笠産業 MVC-F60)の場合、各研究の水平土圧 σ_h の値 $5.5\sim 9.0\text{kN/m}^2$ を 4.4 倍にして、 $24.2\sim 39.6\text{kN/m}^2$ の

土圧が作用すると考えられる。

(2) 弾性理論によるハンドガイドローラの水平土圧計算

次に、弾性理論を用いて、ハンドガイドローラによる締固めで、壁面に作用する背面からの水平応力の大きさを求めた。計算には、Canadian Foundation Engineering Manual 4th edition (Canadian Geotechnical Society 2006)の、385頁のFigure24.8¹³⁾を引用した。計算式を**式(1)**、**式(2)**に、図を**図-2.41**に示す。Figure24.8の式は、水平土圧 σ_h を求めるにあたり、壁のy軸方向の延長は考慮しておらず、たて壁高さHのみを考慮している。繰返し載荷前に測定したタンパ転圧による背面からの水平応力との比較計算では、比較するハンドガイドローラの仕様を、酒井重工業のHS67ST、全長247.5cm、全幅68.5cm、締固め幅63.5cm、機械質量710kg、起振力11.80kNとした。集中荷重 Q_p は、ローラの静的質量に起振力を加算すると、 $Q_p=0.71 \times 9.81+11.80=18.77\text{kN}$ になる。ローラが壁面に近接して走行する場合を考え、壁から載荷点までの距離は締固め幅の半分として32cmとした。

$$\sigma_h = \frac{0.28 \times \left[\frac{z}{H}\right]^2}{\left[0.16 + \left[\frac{z}{H}\right]^2\right]^3} \times \frac{Q_p}{H^2} \quad \frac{x}{H} \leq 0.4 \quad (1)$$

$$\sigma_h = \frac{1.77 \times \left[\frac{x}{H}\right]^2 \times \left[\frac{z}{H}\right]^2}{\left[\left[\frac{x}{H}\right]^2 + \left[\frac{z}{H}\right]^2\right]^3} \times \frac{Q_p}{H^2} \quad \frac{x}{H} > 0.4 \quad (2)$$

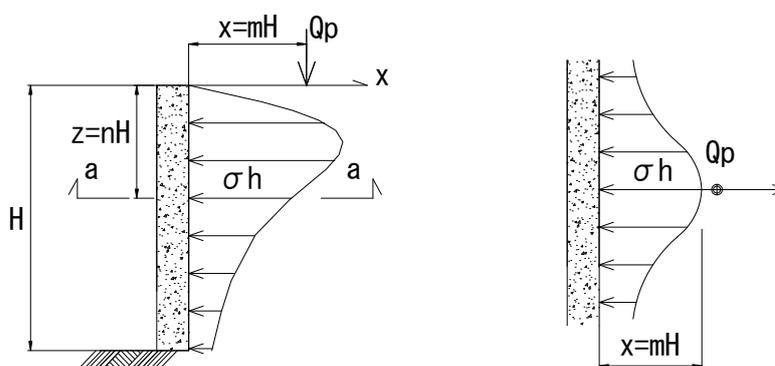


図-2.41 転圧により誘引される水平応力

上式において、壁背面からの距離 $x=0.32\text{m}$ 、壁高さ $H=0.2\text{m}$ および 0.79m の場合の背面からの水平応力を**表-2.7**に示す。軽量形鋼の壁高さと同じ $H=0.2\text{m}$ で、 $x=0.32\text{m}$ のとき、 $m=x/H=1.6 > 0.4$ であり、 $Q_p=18.77\text{kN}$ とすると、背面からの水平応力は**表-2.7(a)**のように深さとともに増加し、 $z=0.2\text{m}$ のとき $n=z/H=1.0$ となり、 $\sigma_h=47.13\text{kN/m}^2$ となる。また、 $z=0.2\text{m}$ の σ_h は、 H が $x/H > 0.4$ の範囲では、**表-2.7(b)**のようにほとんど同じ値となる。

表-2.7 壁面に作用する水平応力 $\sigma_h(x=0.32m, x/H>0.4$ の場合)

(a) H=0.20m の場合

H (m)	x (m)	z (m)	m= x/H	Qp (kN)	n= z/H	σ_h kN/m ²
0.20	0.32	0.000	1.6	18.77	0.000	0
0.20	0.32	0.015	1.6	18.77	0.075	0.71
0.20	0.32	0.030	1.6	18.77	0.150	2.78
0.20	0.32	0.045	1.6	18.77	0.225	6.05
0.20	0.32	0.060	1.6	18.77	0.300	10.28
0.20	0.32	0.075	1.6	18.77	0.375	15.18
0.20	0.32	0.095	1.6	18.77	0.475	22.19
0.20	0.32	0.120	1.6	18.77	0.600	30.74
0.20	0.32	0.150	1.6	18.77	0.750	39.29
0.20	0.32	0.180	1.6	18.77	0.900	45.00
0.20	0.32	0.200	1.6	18.77	1.000	47.13

(b) H=0.79m の場合

H (m)	x (m)	z (m)	m= x/H	Qp (kN)	n= z/H	σ_h kN/m ²
0.79	0.32	0.000	0.41	18.77	0.000	0
0.79	0.32	0.015	0.41	18.77	0.019	0.71
0.79	0.32	0.030	0.41	18.77	0.038	2.78
0.79	0.32	0.045	0.41	18.77	0.057	6.06
0.79	0.32	0.060	0.41	18.77	0.076	10.30
0.79	0.32	0.075	0.41	18.77	0.095	15.20
0.79	0.32	0.095	0.41	18.77	0.120	22.12
0.79	0.32	0.120	0.41	18.77	0.152	30.77
0.79	0.32	0.150	0.41	18.77	0.190	39.31
0.79	0.32	0.180	0.41	18.77	0.228	45.02
0.79	0.32	0.200	0.41	18.77	0.253	47.12
0.79	0.32	0.300	0.41	18.77	0.380	42.97
0.79	0.32	0.400	0.41	18.77	0.506	30.16
0.79	0.32	0.500	0.41	18.77	0.633	19.43
0.79	0.32	0.600	0.41	18.77	0.759	12.41
0.79	0.32	0.700	0.41	18.77	0.886	8.02

(3) タンパ転圧による水平応力の評価

表-2.8に、図-2.15～図-2.40におけるタンパ転圧による残留応力を、繰返し载荷重ごとに示す。タンパ転圧による残留応力は、繰返し载荷直前の測定値50回の平均値とした。図-2.15～図-2.40において、タンパ転圧後の残留応力の値が34.3kN/m²を下回る測定値は、スポンジゴムの性質上実際の測定値が0kN/m²～34.3kN/m²の間になるので棄却した。表中のタンパ転圧による残留応力平均値に示す通り、本実験では50.68kN/m²～53.57kN/m²の残留応力が得られている。このことから、タンパ転圧により壁面に作用した背面からの水平応力は、質量66kgのプレートコンパクトによる転圧以上であり、かつ質量710kgのハンドガイドローラによる転圧以上と考えられる。

表-2.8 タンパ転圧による残留応力

繰返し载荷重	1472N	1275N	1079N	883N
残留応力最大値(kN/m ²)	72.58	71.39	69.09	61.44
残留応力平均値(kN/m ²)	53.57	53.29	52.74	50.68
残留応力最小値(kN/m ²)	37.98	36.48	36.24	34.81

2. 6. 4 曲げ剛性が高い壁面における水平応力と天端水平変位の関係

(1) 深さ 6cm における水平応力と天端水平変位

図-2.42(a), (b)に、深さ 6cm に圧力計を同じ深さ方向に配置して、裏込め材に転圧を加えて埋戻し、輪荷重 1275N を手動にて 120 回繰返し载荷したときの、時間と端部の圧力計から 135mm 離れた位置の圧力計に作用した、背面からの水平応力および天端水平変位を示す。背面からの水平応力は、図-2.27 を抜粋したものである。測定開始から約 13.35 分間は、裏込め材の埋戻しおよび転圧に時間を要している。同図(a)の測定値上の数値は、载荷回数を表している。残留応力および応力の振幅は载荷 11 回までゆるやかに上昇し、その後漸減に転じた。

同図(b)をみると、天端水平変位は繰返し载荷前に 8.12mm であり、载荷 11 回の変位は 8.37mm で 0.25mm 増加し、载荷 30 回程度で最大水平変位 8.40mm となり、その後漸減した。図より天端水平変位と残留応力および応力の振幅が密接に関係していることが分かる。

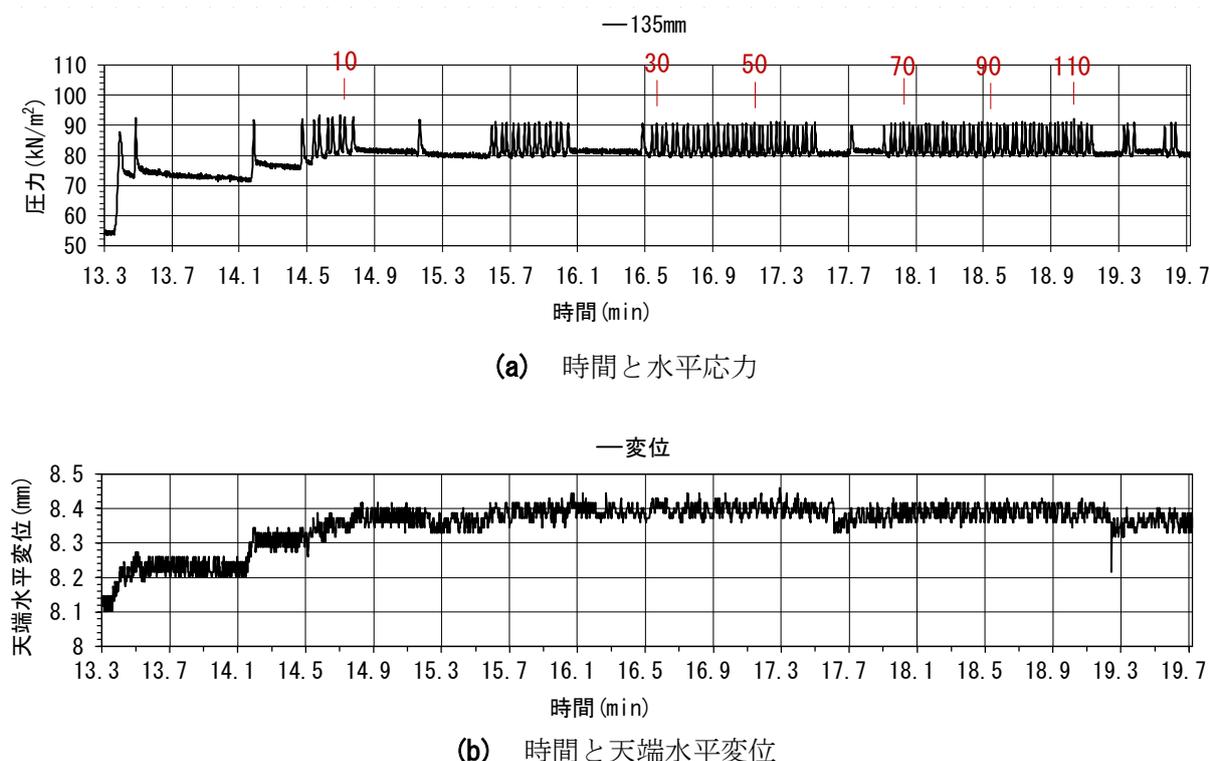


図-2.42 水平応力と天端水平変位の変化(1275N, 深さ 6cm, 120 回载荷, 実験 No. 327)

図-2.43 は、図-2.42(a), (b)の測定値を基に、背面からの水平応力と天端水平変位の関係を示したものである。測定値は 2 次式で近似した。载荷開始から残留応力が 78kN/m² になるまでに存在する、変位幅が約 0.05mm の 3 箇所の測定値の塊は、载荷間隔が開いたためにできたものである。残留応力最大値 81.75kN/m² を超えてからは、試験輪が通過するたびに、一瞬ではあるが応力の振幅分の水平応力の増加と天端水平変位の増加が生じ、すぐに戻る様子が確認された。

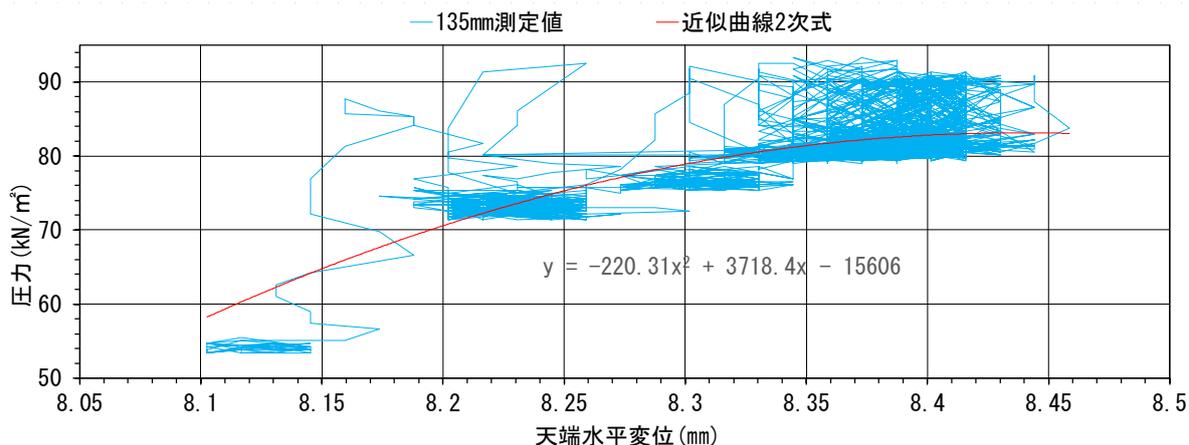
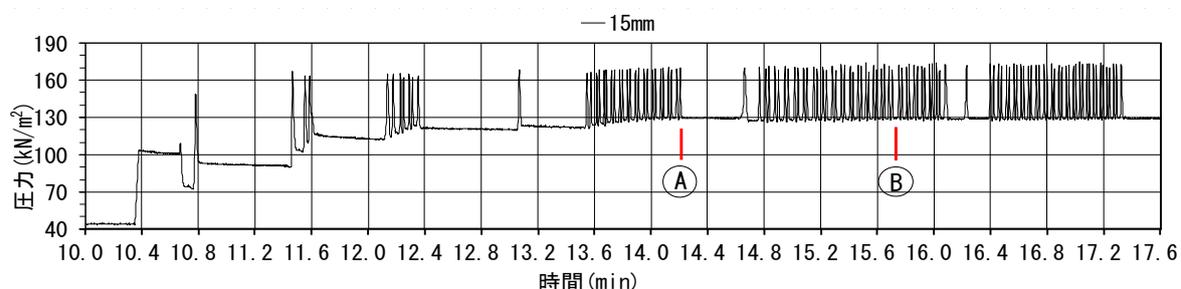


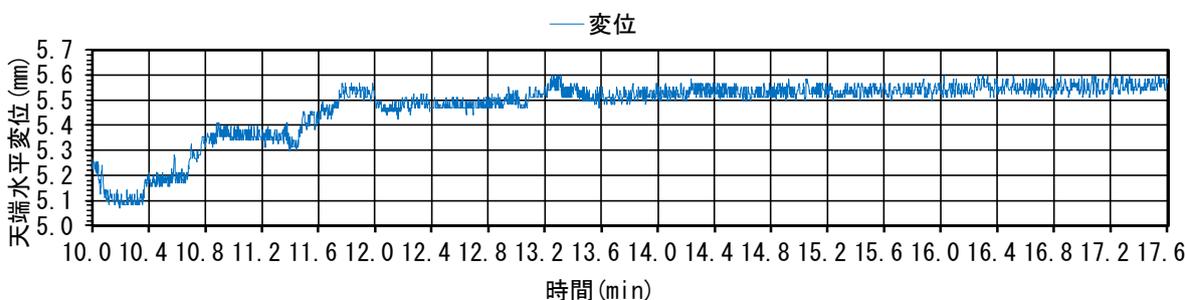
図-2.43 水平応力と天端水平変位の関係(1275N, 深さ 6cm, 120 回載荷, 実験 No. 327)

(2) 深さ 4cm における水平応力と天端水平変位

図-2.44(a), (b)に, 深さ 40mm に圧力計を同じ深さ方向に配置して, 裏込め材に転圧を加えて埋戻し, 輪荷重 1275N を手動にて 120 回繰返し載荷したときの, 時間と端部の圧力計から 15mm 離れた位置の圧力計に作用した, 背面からの水平応力および天端水平変位を示す. 背面からの水平応力は, 図-2.25 を抜粋したものである. 測定開始から約 10.35 分間は, 裏込め材の埋戻しおよび転圧に時間を要している. 残留応力および応力の振幅は載荷 37 回(同図(a)の A 点)から増加がほとんど無く, 載荷 69 回(同図(a)の B 点)以後漸減した.



(a) 水平応力



(b) 天端水平変位

図-2.44 水平応力と天端水平変位の変化(1275N, 深さ 4cm, 120 回載荷, 実験 No. 329)

同図(b)をみると、天端水平変位は繰返し载荷前に5.11mmであり、载荷37回の変位は5.53mmで0.42mm増加し、载荷69回まで同じような値で推移してその後漸増した。ここでも深さ6cmと同様に、天端水平変位と残留応力および応力の振幅が密接に関係していることが分かる。

図-2.45は、図-2.44(a),(b)の測定値を基に、水平応力と天端水平変位の関係を示したものである。測定値は2次式で近似した。水平応力が変わらないのに変位のみ生じている箇所は、载荷間隔が開いたためである。深さ6cmのときと同じように、残留応力最大値130.29kN/m²を超えてからは、試験輪が通過するたびに、一瞬ではあるが応力の振幅分の水平応力の増加と天端水平変位の増加が生じ、すぐに戻る様子が確認された。

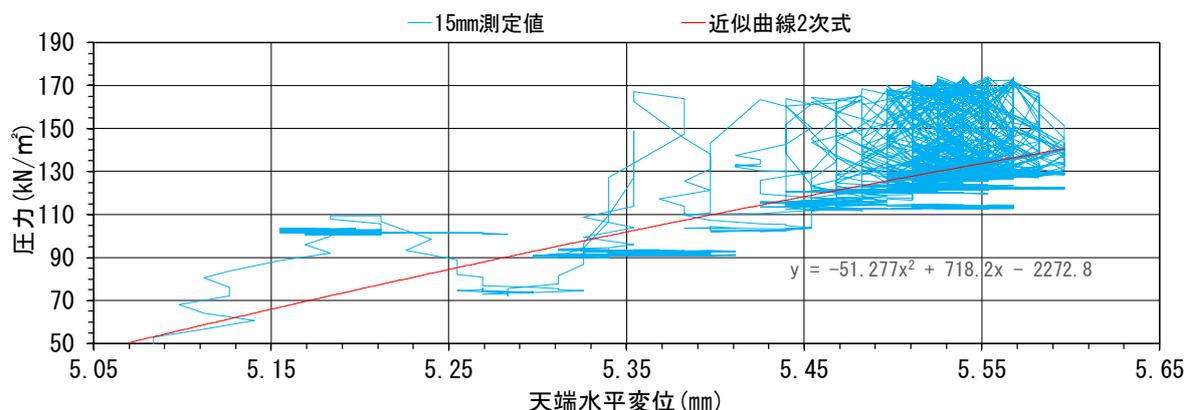


図-2.45 水平応力と天端水平変位の関係 (1275N, 深さ4cm, 120回载荷, 実験 No. 329)

(3) 曲げ剛性が高い壁面における水平応力と天端水平変位の関係

図-2.42および図-2.44より、天端水平変位の増加割合によって、残留応力および応力の振幅の増加割合が決まると考えられる。深さ6cmでは、天端水平変位の増加がほぼ収まった载荷11回程度で、塑性変形が収束して残留応力は最大になった。深さ4cmでは、天端水平変位の増加が収まった载荷69回程度で、塑性変形が収束して残留応力は最大になった。残留応力はその後载荷を繰返しても漸減に転じており、塑性変形収束後は、裏込め材を弾性体として考えられる。つまり、曲げ剛性が高い壁面においては、背面からの水平応力にピーク値が存在し、ピーク値を超えた後は、载荷回数が増加するほど背面からの水平応力は減少する。

しかしながら、転圧時に擁壁のたて壁に作用する曲げモーメントは、たて壁の曲げ剛性が低いほど大きくなると言われている¹⁾。プレキャストL型擁壁のたて壁は、現場打ちL型擁壁と比較して部材厚さが薄く、相似性を考慮すると曲げ剛性が軽量形鋼の壁面の3の1程度なので、背面からの水平応力が増加することも考えられる。そこで、第5章以後では、相似性を考慮したとき、実物のプレキャストL型擁壁の曲げ剛性に対して1.25倍を有する疑似L型擁壁を製作して、検証することにした。

2. 6. 5 残留応力の減衰

(1) タンパ転圧完了後

図-2.46 に、深さ 3cm で端部圧力計からの距離 60mm における、タンパ転圧後の残留応力と時間の関係を示す。測定回数は 1 回/秒であり、測定時間は 19.5 時間である。残留応力の減衰は初期に大きく、その後漸減していくのが伺える。締固め密度からタンパ転圧後の段階は弾性領域と思われ、一定時間で背面からの水平応力は消滅し、変位も 0 に戻ると思われる。

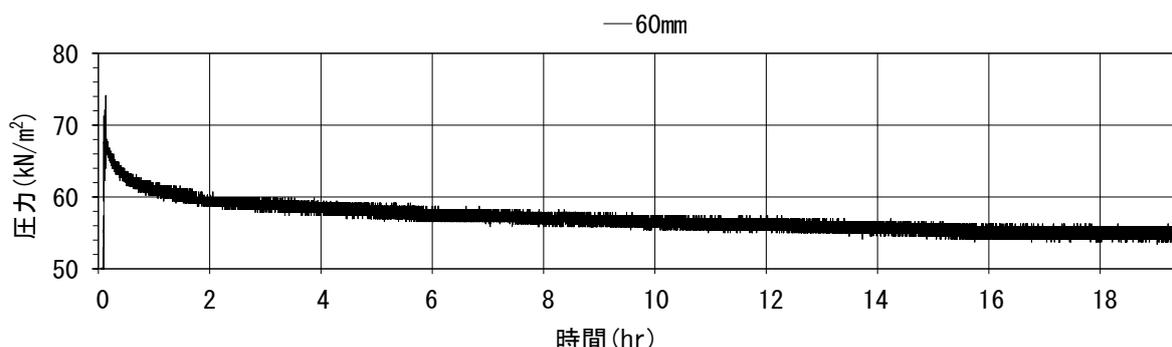


図-2.46 タンパ転圧による残留応力の減衰(深さ 3cm, 実験 No. 334)

(2) 繰返し载荷終了後

図-2.47 に、深さ 2cm に圧力計を 9 個配置して、裏込め材に転圧を加えて埋戻し、载荷重 1472N を 80 回手動载荷した後 11.5 時間放置したときの、背面からの水平応力と時間の関係を示す。測定回数は 1 回/秒である。残留応力の減衰は载荷停止直後に大きく、徐々に緩やかになった。この段階の裏込め材は塑性変形を経由していることから、残留応力が最終的に 0 kN/m² になっても、変位は残留すると推定される。

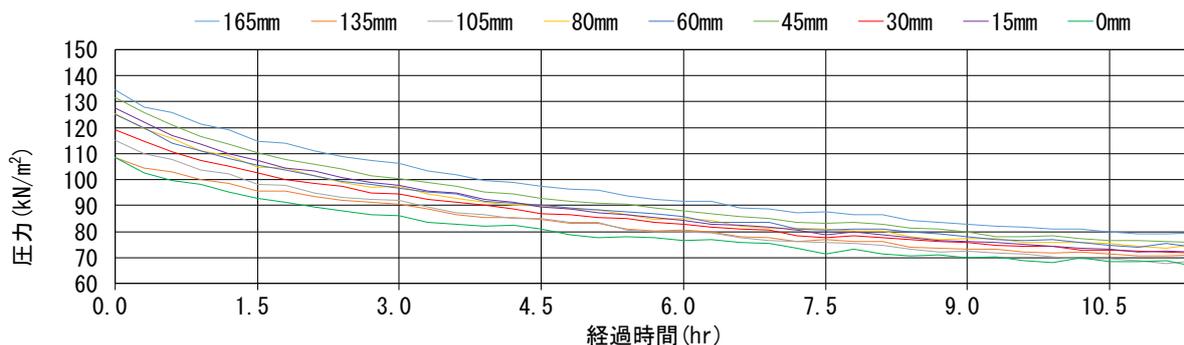


図-2.47 繰返し载荷後の残留応力の減衰(1472N, 深さ 2cm, 80 回载荷, 実験 No. 318)

図-2.48 は、深さ 3cm に圧力計を 9 個配置して、裏込め材に転圧を加えて埋戻し、载荷重 1275N を 1090 回自動载荷した後 11.94 時間放置したときの、背面からの水平応力と時間の関係を示す。測定回数は 1 回/秒である。载荷重の大きさおよび载荷回数が異なっても、残留応力の減衰は载荷停止直後に大きく、徐々に緩やかになった。

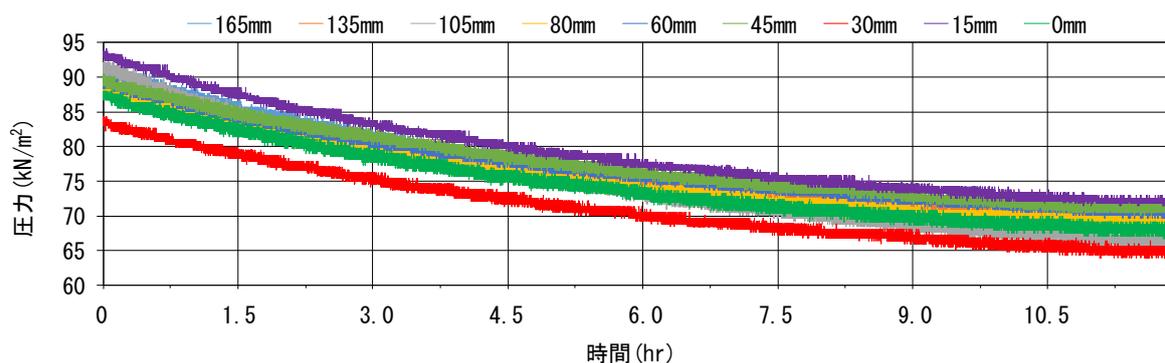


図-2.48 繰返し載荷後の残留応力の減衰(1275N, 深さ 3cm, 1090 回載荷, 実験 No. 332)

2. 6. 6 静的載荷による水平応力

(1) タンパ転圧をしない場合の水平応力

図-2.49 に、深さ 3cm に圧力計を 9 個配置し、裏込め材に転圧を加えないで埋戻し、輪荷重 1275N を端部圧力計から 15mm の位置にある圧力計の前方 4cm に静的載荷したときの、同じ深さ方向の水平応力分布を示す。図上の凡例は端部圧力計からの距離を表している。載荷は一度試験輪を下降させていき、1cm 凹んだところ(図の 4.3min)で試験輪を一度上昇させ、凹んだ箇所に裏込め材を多めに充填して、再び試験輪を下降させた(図の 5.5min)。そして、8.5 分経過後に試験輪を上昇させた。載荷後のくぼみは 4mm であった。スポンジゴムは 34.3kN/m^2 を超えるまで圧力が計測されないため、経過時間 0~4.3min の実際の圧力は 0~ 34.3kN/m^2 の間になる。165mm の測定値は終始 34.3kN/m^2 を超えなかったため、測定データから除外した。図より水平応力最大値は経過時間約 5.5min のときの 167kN/m^2 であり、載荷位置に近いほど背面からの水平応力が大きくなった。また、経過時間約 8.5min の除荷後に、残留応力が生じているのが分かる。

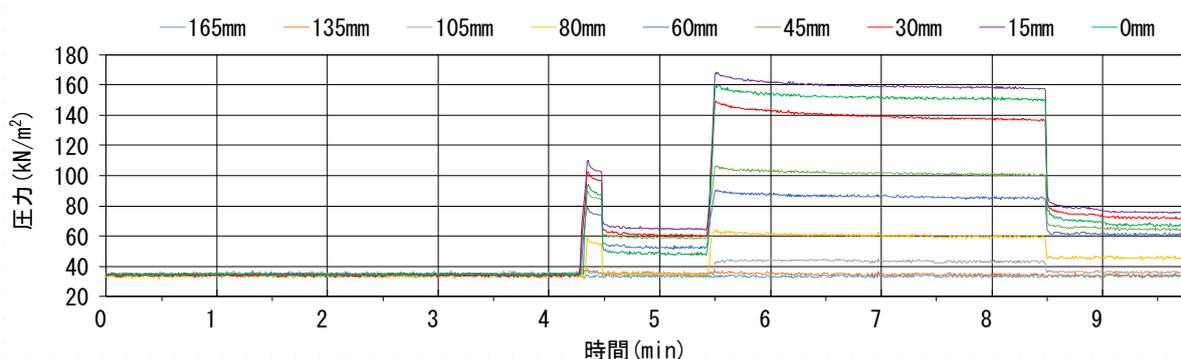


図-2.49 静的載荷実験(タンパ転圧なし, 1275N, 距離 4cm, 深さ 3cm, 実験 No. 335)

(2) タンパ転圧を行った場合の水平応力

図-2.50 に、深さ 3cm に圧力計を 9 個配置し、裏込め材に転圧を加えて埋戻し、輪荷重 1275N を端部圧力計から 15mm の位置にある圧力計の前方 4cm に静的載荷したときの、同じ深さ方向の

水平応力分布を示す。はじめに転圧後の地表面が下がるのを見込んで載荷面を5mmほど上げた。試験輪を下降させていき、図の6.6min~10minまで載荷した。載荷後の載荷面の盛り上がりは3mmであり、端部圧力計から15mmの位置にある圧力計の6.7minにおける水平応力は120kN/m²であった。この値からタンパ転圧分の残留応力57kN/m²を引くと、輪荷重による水平応力最大値は63kN/m²となった。

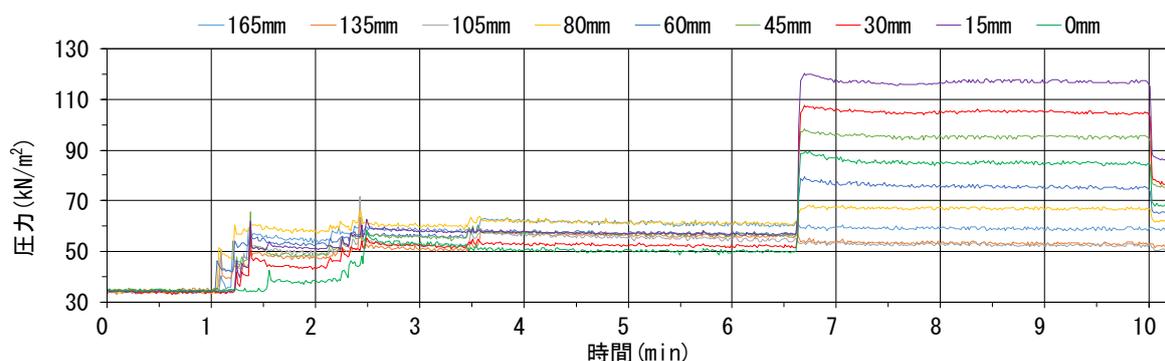


図-2.50 静的載荷実験(タンパ転圧あり, 1275N, 距離4cm, 深さ3cm, 実験No.338)

図-2.49と図-2.50を用いて、輪荷重1275Nで深さ3cmの条件における、静的載荷したときの転圧の有無による水平応力分布を示すと図-2.51のようになる。Boussinesq解析解はポアソン比0.35で計算した。転圧なしのときに167kN/m²であった水平応力最大値は、転圧することで63kN/m²まで減少した。また、転圧をしない場合の水平応力最大値は、Spangler and Mickleの示した通り、Boussinesq解析解の2倍に近い値となった。いずれの実験結果も、載荷点正面の背面からの水平応力を頂点として、応力分布が山なりであることが解る。したがって、繰返し載荷の場合には、延長方向に同じ値の残留応力が作用し、応力の振幅は載荷点の正面を頂点とする山なりになる。

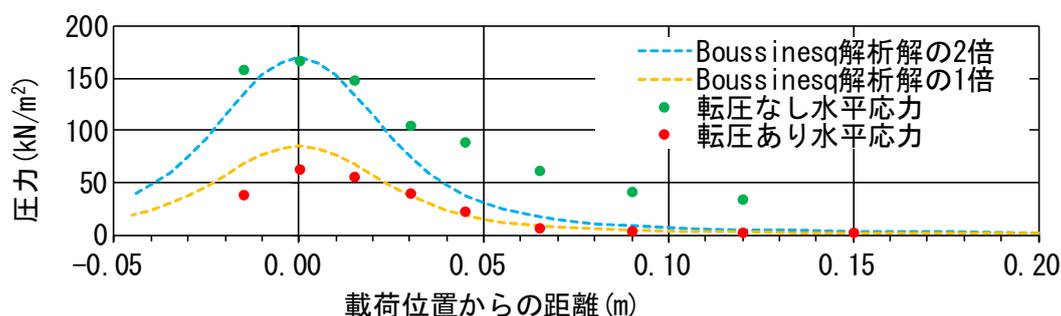


図-2.51 タンパ転圧の有無による水平応力(1275N, 距離4cm, 深さ3cm, 5.6mm)

既往の研究では、粒状土の場合は圧縮変形に及ぼす影響として、初期密度が重要な要素になる^{10),14)}ことが報告されている。本実験のタンパ転圧による締固めは、粒子構造を変化させる域には至っているものと思われ、タンパ転圧による締固めにより、裏込め材中の応力分布と圧縮

ひずみの関係が変化したと推測される。

2.7 まとめ

プレキャスト L 型擁壁を模擬した模型を使用して破壊実験を行うのに際し、内寸法 30cm×30cm の改良柵を加工して、たて壁高さ 20cm の疑似 L 型擁壁を作製することにした。疑似 L 型擁壁のたて壁が破壊する繰返し載荷重は、許容応力度法を用いて推定し、実験を行う繰返し載荷重の大きさを 1472N, 1275N, 1079N, 883N と決めた。この載荷重を裏込め材上に繰返し載荷させたときと静的に載荷させたとき、軽量形鋼の壁面に作用した水平応力から以下の知見を得た。

- 1) 裏込め土に載荷を繰返すと、はじめは応力の振幅のみで、徐々に残留応力に置き換わり、応力の振幅は縮小していく。このとき、裏込め材の転圧を行うことで、水平応力最大値は下がる。
- 2) 繰返し載荷時の鉛直方向の水平応力分布は、残留応力および応力の振幅とも地表面近くが大きく、深さが増すほど急激に減少する。繰返し載荷時の同じ深さ方向の水平応力分布は、延長方向に同じ値の残留応力が作用し、応力の振幅は載荷点の正面を頂点とする山なりになる。
- 3) 裏込め材が同一の粒度、含水比、締固め度であれば、壁面に作用する残留応力および応力の振幅は、繰返し載荷重の大きさおよび載荷位置、地表面からの深さにより大きさが決まる。曲げ剛性が高い壁面の場合は、繰返し載荷によりある水平応力値に達すると、それ以後は載荷し続けても、残留応力および応力の振幅は減少に転じる。残留応力および応力の振幅の最大値を越えてからの減少率は、最大値の応力が大きいほど大きくなる。
- 4) 繰返し荷重およびタンパ転圧による残留応力は、放置していると時間の経過とともに減少する。

参考文献

- 1) I. CHMIELEWSKA, M. WYSOCKA. : Pressure on Retaining Walls from Compaction Effort, Architecture civil engineering environment journal, the Silesian University of Technology, Vol.5, No. 4, pp.55-60, 2012.
- 2) 公益社団法人土木学会：コンクリート標準示方書設計編, pp.38-50, pp.129-131, 丸善, 2017.
- 3) 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針(平成 24 年度版), pp.61-66, 丸善, 2012.

- 4) 金田一男, 伊良波繁雄, 高嶺哲夫, 山城建樹: コンクリート隅角部擁壁のたて壁の設計について, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.2, 2006.
- 5) 国土交通省四国地方整備局: プレキャストL型擁壁設計施工マニュアル(案)改訂版, pp.31-37, 2001.
- 6) 公益社団法人地盤工学会: 地盤工学・実務シリーズ30 土の締固め, pp.7-17, 丸善, 2012.
- 7) 川尻峻三, 川口貴之, 澁谷啓, 高橋正和: 締固めた地盤材料の変形・強度特性に及ぼす締固め時の含水比および締固め方法の影響, 土木学会論文集C, Vol.67, No.4, pp.532-543, 2011.
- 8) 橋本毅, 藤野健一, 建山和由: 小型締固め機械の締固め能力指標の提案とその利用に関する研究, 土木学会論文集C Vol.70, No.4, pp.340-352, 2014.
- 9) Spangler, M. G. and Mickle, J. L.: Lateral pressures on retaining walls due to backfill surface loads, *Highway Research Board Bulletin*, Vol.141, pp.1-15, 1956.
- 10) 落合英俊: 粒状土の圧縮変形に及ぼす初期密度の影響, 土質工学会論文報告集, Vol.15, No.2, pp.89-95, 1975.
- 11) Moamen E. Abd El Raouf. : The residual lateral earth pressure on retaining wall due to vibratory rollers, *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, Vol.14, No.50, January, pp.37-46, 2019.
- 12) Tsang - Jiang Chen and Yung- Show Fang. : Earth Pressure due to Vibratory Compaction, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 134(4), pp.437-444, 2008.
- 13) Canadian Geotechnical Society : Canadian Foundation Engineering Manual 4th edition, pp.384-386, 2006.
- 14) 河上房義, 小川正二: くり返し応力を受けた締固め土の力学的性質, 土木学会論文集 第96号, pp.8-14, 1963.

第3章 Boussinesq 式による壁面に作用した水平応力の近似

3.1 まえがき

第2章の実験結果から、輪荷重による背面からの水平応力には、残留応力と試験輪が通過するときに作用する応力の振幅があることが分かった。壁面からの距離が4cmの場合には、残留応力は地表面近くで最大となって、深さが増すごとに急激に減少し、延長方向に同じように作用することが確認できた。残留応力がピークとなった後を弾性状態と仮定するならば、弾性状態にある地盤では、地表面に複数の局部荷重が作用した場合、地盤内に発生する応力増分および変位は、重ね合せの原理を用いて各荷重による応力増分などを単純に加算して求められる¹⁾。計測された残留応力は、試験輪の移動に伴う背面からの水平応力を重ね合わせたものと想定される。壁面からの距離が4cmの場合、応力の振幅は同じ深さ方向だと載荷点の正面を頂点に山なりになり、鉛直方向は地表面近くで最大となって、深さが増すごとに急激に減少する傾向を示すことも確認した。

ここで、軽量形鋼の壁面に作用する曲げモーメントおよびせん断力を求めるには、作用する背面からの水平応力を数式で表す必要があった。第2章の実験結果で、残留応力および応力の振幅の分布をみると、Boussinesq 解析解と類似しているように見えたので、この式を応用することにした。

既往の研究では、裏込め土上の集中荷重により壁面に作用する土圧の推定には、Boussinesq(1876)によって開発された弾性解法が、一般的に用いられている^{2),3)}。これは、Boussinesq の応力分布理論が、均質、弾性、等方性、半無限の媒体であると考えられている固体への載荷で、最も単純な方法だからである。そこで、繰返し載荷による背面からの水平応力は、Boussinesq 式を応用して近似することにした。既往の研究においては、図-3.1のように載荷点の真正面から距離 y 離れた位置の水平応力は、Boussinesq 式で載荷点の真正面の水平応力 $\sigma_{x, \max}$ を求めて、式(3-1) (U. S. Army 1989)から簡便に求めることができるとしている^{2),4),5)}。

$$\sigma_x = \sigma_{x, \max} \cdot \cos^2(1.1\alpha) \quad (3-1)$$

ここで、 $\alpha = \tan^{-1}(y/x)$

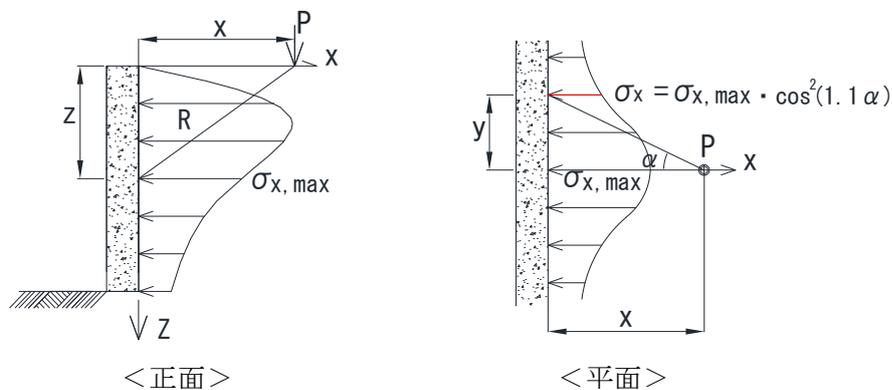


図-3.1 Boussinesq 解法の簡略式

また、単位壁高さあたりの総水平応力は、曲線以下の面積で表すことができ、式(3-2)で得られるとしている²⁾。

$$\sigma_{x,tot} = \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_x dy = 1.43\sigma_{x,max} \quad (3-2)$$

本章では、繰返し载荷による背面からの水平応力が、裏込め材の弾性係数 E およびせん断弾性係数 G に深く関係している³⁾と思われることから、ポアソン比を使用した Boussinesq 式(式(3-3))¹⁾に係数 α を乗じて、残留応力および応力の振幅を近似することにした。裏込め材のポアソン比 ν の値は、解析で一般的に用いられる粒状材料の数値 0.35 とした⁶⁾。

$$\sigma_x = \frac{3P}{2\pi} \left[\frac{zx^2}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left\{ \frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{(2R+z)x^2}{R^3(R+z)^2} \right\} \right] \quad (3-3)$$

ここに、 σ_x : 壁面に作用する背面からの水平応力 (kN/m²)

P : 輪荷重 (kN)

ν : 裏込め材のポアソン比 $\nu = 0.35$

x : 壁面からの距離 (m)

y : x の起点から壁面に沿った距離 (m)

z : 地表からの深さ (m)

R : $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$

3. 2 残留応力最大値および水平応力最大値の値

2.6 の背面からの水平応力の測定結果より、曲げ剛性が高い壁面の場合は、ある水平応力値に達すると、それ以後は载荷し続けても残留応力および応力の振幅は減少に転じる。そこで、曲げモーメントおよびせん断力は、残留応力が最大になる時点で求めることにした。残留応力が最大となった時に応力の振幅もほぼ最大になるので、この時点の水平応力を、残留応力最大値および応力の振幅最大値として使用することにした(図-3.2)。ただし、タンパ転圧による残留応力分は除外した。その理由として、第一に図-2.46 よりタンパ転圧の段階は弾性領域と思われる、一定時間で背面からの水平応力は消滅すると思われること。第二に、剛性が高い壁の背面にある砂地盤を小型の振動タンパで締固めた場合、層厚 30cm の転圧層近傍における背面からの水平応力のみ増加し、それより下方の層の背面からの水平応力は、静止土圧の応力状態に収束することが報告されていること⁷⁾。第三に、実物の L 型擁壁において、曲げモーメントに対する裏込め土の転圧効果は一瞬であり、国内外を問わずほとんどの国で無視する傾向にあること^{4), 5)}である。除外するタンパ転圧による残留応力の大きさは、繰返し载荷直前の測定値 50 回の平均値とした。残留応力最大値および応力の振幅最大値を合算したものを、水平応

力最大値と呼ぶことにする。

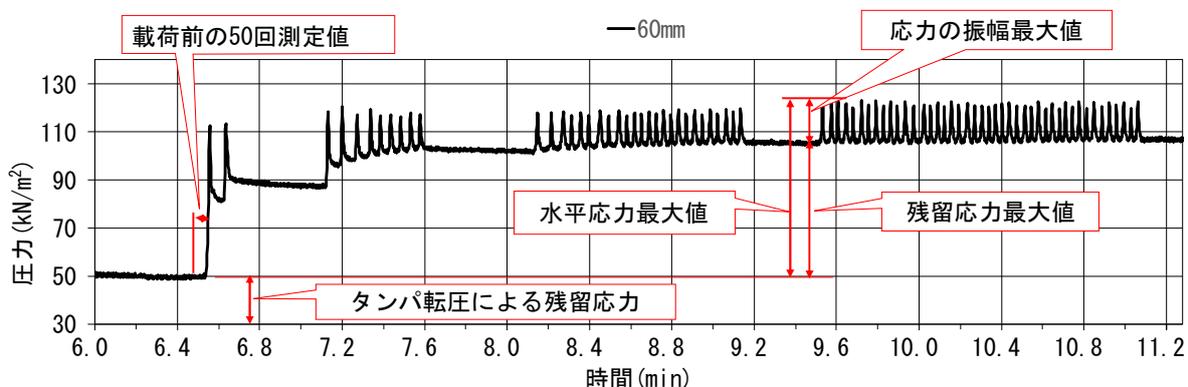


図-3.2 曲げモーメントおよびせん断力算定に用いる水平応力

3.3 鉛直方向の応力分布と近似曲線

3.3.1 Boussinesq 式に乗じる係数 α の値

残留応力最大値および水平応力最大値を、Boussinesq 式に係数 α を乗じて近似するとき、各測定値と Boussinesq 式に任意の係数に乗じた値との差を求め、差の二乗和が最小となる係数を係数 α とした。測定値は手動载荷のもののみ使用し、鉛直方向および同じ深さ方向の深さ 2cm, 3cm, 4cm, 6cm, 8cm のものをすべて等価に扱った。Boussinesq 解析解の値は式(3-3)において、壁面からの距離 $x=0.04\text{m}$ 、 x の起点から壁面に沿った距離 $y=0\text{m}$ 、ポアソン比 $\nu=0.35$ で計算を行った。

計算結果をまとめると、背面からの水平応力の分布の近似式を作成するにあたり、Boussinesq 式に乗じる係数 α の値は表-3.1 の通りである。残留応力最大値の場合、各载荷重の α の値は 0.91~0.99 倍となり平均は 0.95 倍であった。水平応力最大値の場合、各载荷重の α の値が 1.12~1.38 倍となり平均は 1.23 倍となった。

表-3.1 近似式に使用する係数 α

	残留応力最大値		水平応力最大値		応力の振幅	
	係数 α	データ数	係数 α	データ数	係数 α	データ数
1472N	0.92	51	1.17	51	0.25	51
1275N	0.99	69	1.38	69	0.39	69
1079N	0.99	43	1.26	43	0.27	43
883N	0.91	50	1.12	50	0.21	50
平均	0.95		1.23		0.28	

3.3.2 鉛直方向の応力分布と近似曲線

鉛直方向における 1472N, 1275N, 1079N, 883N の繰返し荷重による、残留応力最大値の分布および分布データの近似曲線を図-3.3(a)～(d)に示す。図の凡例で黒色の実線は分布データの近似式であり、Boussinesq式に表-3.1の係数 α を乗じている。凡例で横方向の距離は、一番端の圧力計の位置を 0mm として、そこからの距離を表している。残留応力最大値の実験値は、深さ 2cm では Boussinesq 解析解より小さく、深さ 6cm 以深では大きくなる傾向を示した。

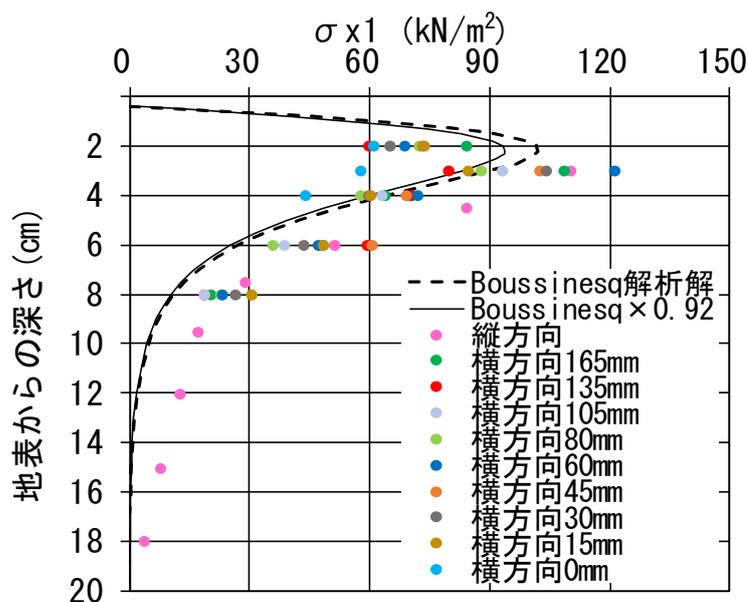


図-3.3(a) 繰返し荷重の残留応力最大値(1472N, 距離 4cm, $\nu=0.35$)

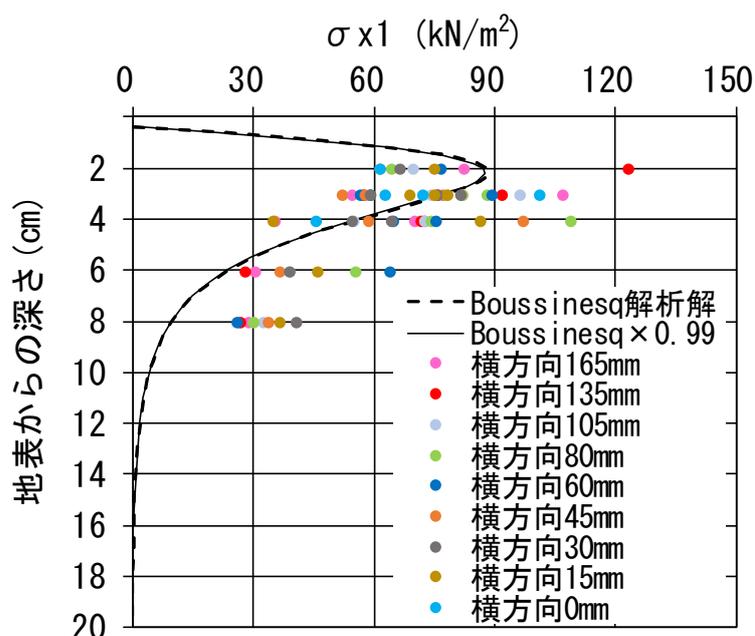


図-3.3(b) 繰返し荷重の残留応力最大値(1275N, 距離 4cm, $\nu=0.35$)

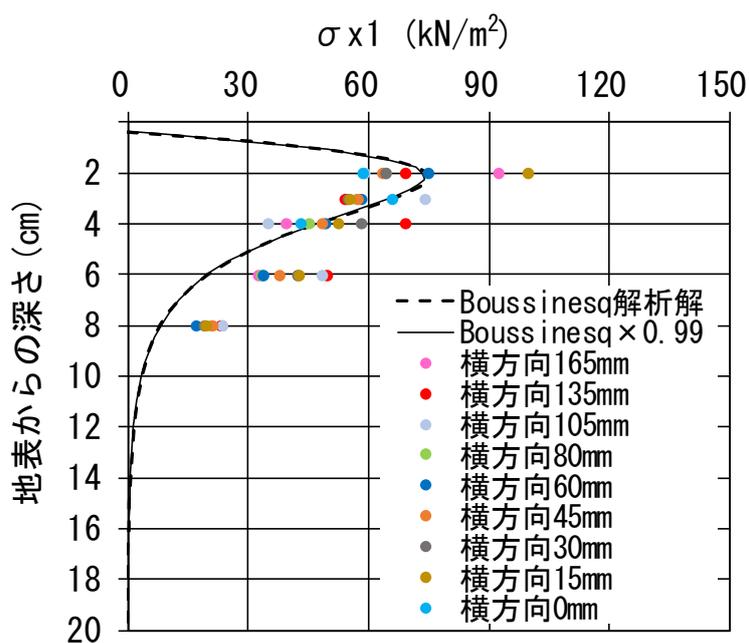


図-3.3(c) 繰返し荷重の残留応力最大値(1079N, 距離 4cm, $\nu=0.35$)

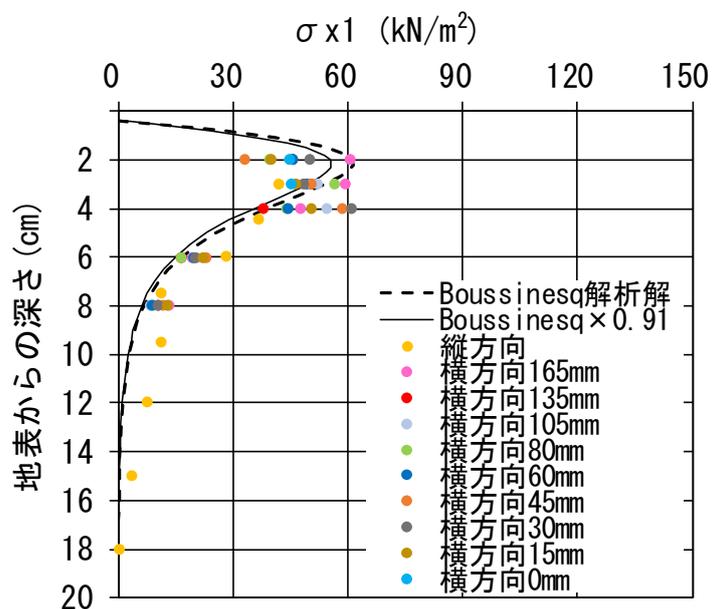


図-3.3(d) 繰返し荷重の残留応力最大値(883N, 距離 4cm, $\nu=0.35$)

同様に水平応力最大値の分布および分布データの近似曲線を図-3.4(a)～(d)に示す。水平応力最大値も深さ2cmではBoussinesq解析解より小さく、深さ6cm以深では大きくなる傾向を示した。

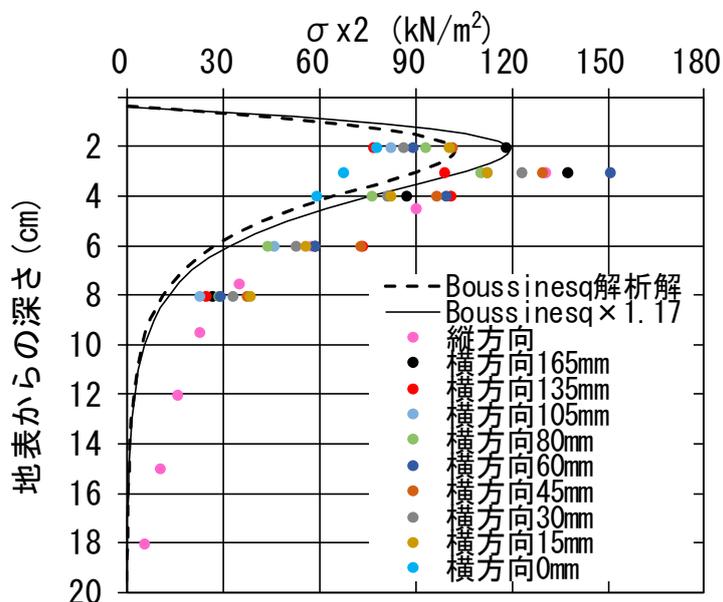


図-3.4(a) 繰返し荷重の水平応力最大値(1472N, 距離 4cm, $\nu=0.35$)

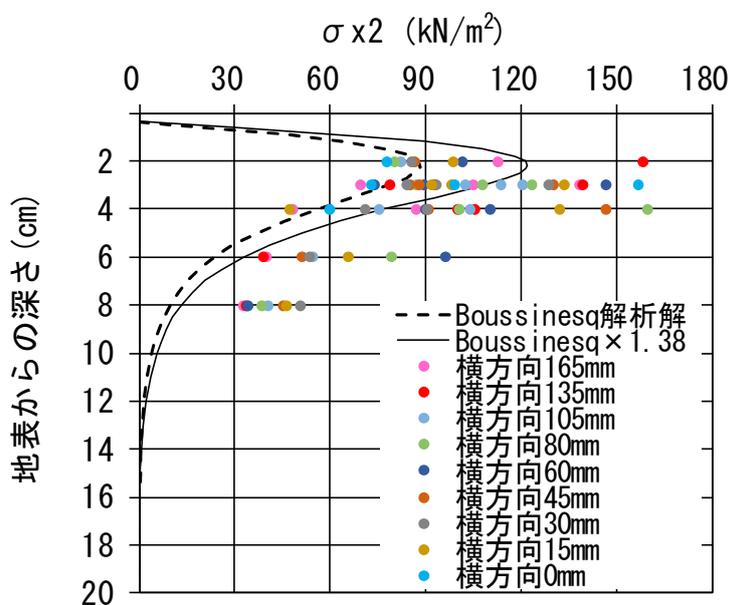


図-3.4(b) 繰返し荷重の水平応力最大値(1275N, 距離 4cm, $\nu=0.35$)

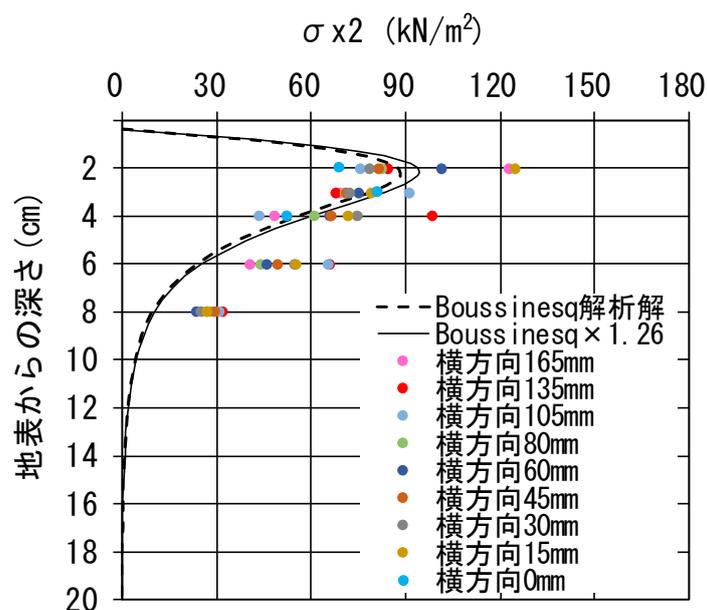


図-3.4(c) 繰返し荷重の水平応力最大値(1079N, 距離 4cm, $\nu=0.35$)

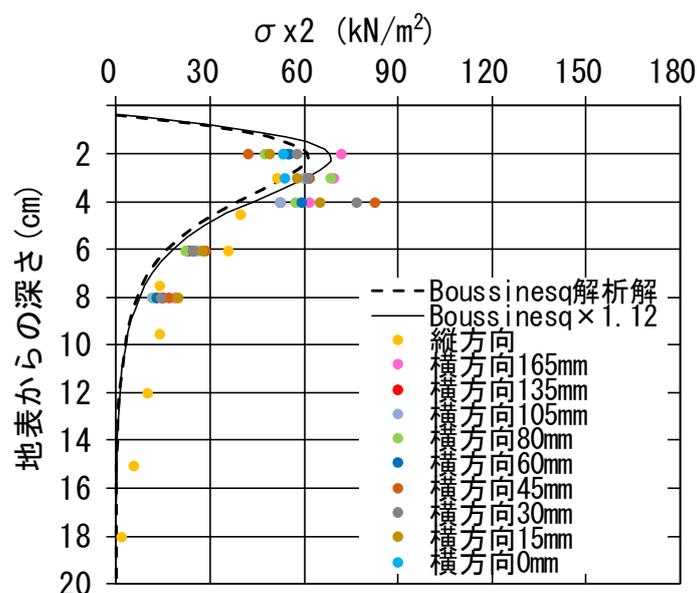


図-3.4(d) 繰返し荷重の水平応力最大値(883N, 距離 4cm, $\nu=0.35$)

残留応力最大値および水平応力最大値の測定値は、いずれも Boussinesq 解析解と比較するとピーク値の位置が深くなっており、応力分布全体を見ても Boussinesq 解析解を全体的に下げたような分布形状になっている。これについて、舗装上から載荷した Liu Ze(刘泽)⁹⁾らの現場打ちL型擁壁を使用した実験においても同じような傾向が表れており、Liu Ze(刘泽)らはこの現象を以下のように説明している。

一つ目は、Boussinesq 解析解において、裏込め材は均質で連続的な弾性材料として考えられているが、実験での裏込め土は舗装とスラグ土から成り、典型的な弾塑性材料の性質を持った摩擦材料であったこと。そのため、材料の間で荷重伝達効果に違いが存在したことを挙げている。

二つ目は、土圧の作用によって擁壁は外向きの水平変形が生じ、擁壁の上の部分は大きな変形が発生する。一方、低い部分は変形が小さいことから、壁上部において壁と土の分離が発生し、上部の土圧が低下することを挙げている。

三つ目は、裏込め土の粒径の大きさの違いが大きいと、均質性が乏しくなることを挙げている。大きいサイズの裏込め土は骨組みの役割を果たすので、土中の応力分布は等しくならない。

四つ目に、実験に使用した土圧計の数は限られているので、測定された土圧のピーク値は異なるとしている。

今回行った軽量形鋼の壁面を使用した実験では、裏込め材は1種類にしているので一つ目は該当しない。二つ目は天端水平変位が僅かながら測定されているので該当する。三つ目は最大粒径 9.5mm と 5.6mm の違いを **図-2.14** と **図-3.3** で比較すると、**図-2.14** ではピーク値となった深さ 3cm の測定値を見ても、載荷重が大きくなれば測定値も大きくなるとは限らない。それに対して **図-3.3** では、ピーク値となった深さ 2~4cm の測定値を見ると、載荷重が大きくなれば測定値も大きくなっている。したがって、裏込め土の粒径の大きさの違いは該当する。四つ目についても、圧力計の最小間隔が 15mm あるので十分考えられる。以上のことから、軽量形鋼の壁面に作用した背面からの水平応力は、実物の L 型擁壁において、たて壁に作用する背面からの水平応力を模擬している。

Liu Ze(刘泽)らの実験より、プレキャスト L 型擁壁の設置場所では、擁壁たて壁に作用する背面からの水平応力が、Boussinesq 解析解を下方にやや下げた応力分布になる可能性が大きい。

3.4 まとめ

実験結果より、軽量形鋼の壁面に作用する鉛直方向における背面からの水平応力は、Boussinesq 式に係数 α を乗じて近似できる。同じ深さ方向についても、**図-2.51** より同様に Boussinesq 式に係数 α を乗じて近似できる。壁面から試験輪中央まで 4cm という条件下では、繰返し載荷重による残留応力最大値および水平応力最大値は浅い深さで大きくなる。輪荷重が載荷されていない時も残留応力が作用し続けていることを考えると、載荷時間間隔、土質条件や壁体構造にもよるが、残留応力はプレキャスト L 型擁壁の破壊に大きく影響する。

参考文献

- 1) 常田賢一, 澁谷啓, 片岡沙都紀, 河井克之, 鳥居宜之, 新納格, 秦吉弥: 基礎からの土質力学, 理工図書, pp.162-165, 2017.
- 2) Kim, J. S. and Barker, R. M.: Effect of Live Load Surcharge on Retaining Wall and

- Abutments, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 128 (10) : pp.803-813, 2002.
- 3) Banabihari Misra : lateral pressures on retaining Walls Due to loads on surface of granular backfill, *soils and foundations*, Vol.20, No.2, pp.31-44, June 1980.
 - 4) I. CHMIELEWSKA, M. WYSOCKA. : Pressure on Retaining Walls from Compaction Effort, *Architecture civil engineering environment journal*, the Silesian University of Technology, Vol.5, No.4, pp.55-60, 2012.
 - 5) Moamen E. Abd El Raouf. : The residual lateral earth pressure on retaining wall due to vibratory rollers, *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, Vol.14, No.50, January, pp.37-46, 2019.
 - 6) 社団法人 日本道路協会 : 舗装設計便覧, pp.109-144, 丸善, 2006.
 - 7) Tsang - Jiang Chen and Yung - Show Fang. : Earth Pressure due to Vibratory Compaction, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 134(4), pp.437-444, 2008.
 - 8) Liu Ze(刘泽), He Fan(何矾), Huang Tian-qi(黄天棋), Jiang Mei-dong(蒋梅东) : Additional Earth Pressure of Retaining Wall Caused by Vehicle Load, *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, Vol.13, No.1, pp.16-23, March 2019.

第4章 曲げ剛性が高い擁壁に作用する断面力

4.1 まえがき

第3章において、相似性を考慮したとき、実物のプレキャストL型擁壁の約3倍の曲げ剛性を有する軽量形鋼の壁面に作用した残留応力最大値および水平応力最大値を、Boussinesq 解析解に係数 α を乗じて表した。本章では相似性を考慮したとき、実物のプレキャストL型擁壁の約3倍の曲げ剛性を有するL型擁壁を想定して、等分布荷重 10kN/m^2 (1N/cm^2)と $x=4\text{cm}$ の位置に載荷重 $1472\text{N}\sim 883\text{N}$ を繰返し載荷した場合とで、擁壁に作用する断面力を比較する。繰返し載荷においては、図-3.2に示す残留応力最大値による断面力と応力の振幅最大値による断面力を分けて求め、最後に合算することにした。断面力の計算においては、Boussinesq 式を積分する過程が煩雑なので、数値積分を用いることにした。残留応力が作用する延長は製品延長の2mであり、車輛から伝達される輪荷重は製品1個当り1箇所とした。また、曲げ剛性が高い場合なので、擁壁の天端水平変位による背面からの水平応力の増加は考慮しないものとする。

4.2 裏込め材および等分布荷重による土圧

L型擁壁に作用する断面力を、載荷重が等分布荷重の場合と輪荷重の場合とで比較検討する上で、裏込め土による土圧および等分布荷重による土圧を決める必要がある。擁壁の裏込め土による水平土圧については、実物大の擁壁を用いた裏込め土の主働土圧の測定実験が行われており、裏込め完了時に土圧が最大になることが報告されている¹⁾。また、L型擁壁の構造耐力が十分大きい場合、等分布荷重による増加水平土圧は、地表面から中央にかけて増大し、中央から下部にかけてはほぼ同じ値を示すことが報告されている²⁾。

本章では断面力の計算において、裏込め材の土圧はCoulombの主働土圧を使用し、等分布荷重および繰返し荷重による背面からの水平応力に加算することにした。L型擁壁の製品延長である2m当たりの裏込め材によるせん断力 $S1$ を式(4-1)に、等分布荷重によるせん断力 $S2$ を式(4-2)に、裏込め材による曲げモーメント $M1$ を式(4-3)に、等分布荷重による曲げモーメント $M2$ を式(4-4)に記す。深さ20cmの場合、 $S1=168\text{N}$ 、 $S2=898\text{N}$ 、 $M1=11.2\text{N}\cdot\text{m}$ 、 $M2=89.8\text{N}\cdot\text{m}$ となる。

$$S1=1/2 \cdot K_A \cdot \gamma \cdot h^2 \cdot \cos(\theta + \delta) \cdot L \quad (4-1)$$

$$S2= K_A \cdot q \cdot h \cdot \cos(\theta + \delta) \cdot L \quad (4-2)$$

$$M1=1/6 \cdot K_A \cdot \gamma \cdot h^3 \cdot \cos(\theta + \delta) \cdot L \quad (4-3)$$

$$M2=1/2 \cdot K_A \cdot q \cdot h^2 \cdot \cos(\theta + \delta) \cdot L \quad (4-4)$$

ここで、

- K_A : 主働土圧係数 $K_A=0.2444$ ($\phi=35^\circ$) γ : 裏込め土の単位体積重量 $\gamma=0.0187\text{N/cm}^3$
 h : 土圧作用高さ $h=20\text{cm}$ θ : 壁背面と鉛直面のなす角 $\theta=0^\circ$
 δ : 壁面摩擦角 $\delta=2/3 \phi=23.3^\circ$ q : 等分布荷重 $q=10\text{kN/m}^2=1\text{N/cm}^2$
 β : 地表面が水平面となす角 $\beta=0^\circ$ L : プレキャストL型擁壁の製品延長 $L=200\text{cm}$

4.3 曲げ剛性がプレキャストL型擁壁の約3倍の擁壁に作用する断面力

4.3.1 比較する載荷重

等分布荷重 10kN/m^2 (1N/cm^2) と、壁から 4cm の位置に載荷重 $1472\text{N}\sim 883\text{N}$ を繰返し載荷した場合とで、擁壁に作用する断面力を比較する。図-4.1のように、任意の高さで延長 2m のL型擁壁における、擁壁天端から 20cm 下方の位置に作用する断面力を算出する。裏込め材には本実験で使用した材料および状態の裏込め材があり、繰返し荷重による背面からの水平応力は、Boussinesq 解析解に係数 α を乗じた、残留応力最大値および水平応力最大値の近似式を用いることにする。ここで、等分布荷重 10kN/m^2 は「道路土工 擁壁工指針」³⁾ で決められている載荷重であり、車輛総重量 20ton を車輛占有面積 $7\text{m}\times 2.75\text{m}$ で割ったものである⁴⁾。走行車両が T-245kN 車に見直されてからも、等分布荷重の大きさは同じである。

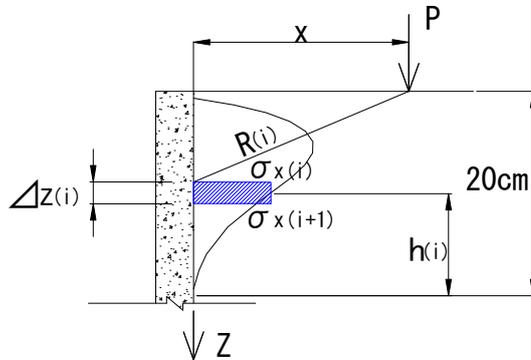


図-4.1 残留応力最大値の断面力算出方法

4.3.2 残留応力最大値による断面力

載荷重 $1472\text{N}\sim 883\text{N}$ を繰返し載荷した場合の断面力を数値積分で求めるため、図-4.1のように Boussinesq 式に係数 α を乗じた近似式において、深さ $\Delta z=0.7\sim 10\text{mm}$ ごとに残留応力 $\sigma_x(i)$ を算出した。深さ 20cm の断面に作用する延長 1cm 当たりのせん断力 S は、 z 軸と近似曲線で囲まれる面積となり式(4-5)で近似できる。また、延長 1cm 当たりの曲げモーメント M は、高さ $\Delta z(i)$ 区間のせん断力に深さ 20cm からの距離 $h(i)$ を乗じ、 z 軸方向に積分して式(4-6)で近似できる。擁壁に作用する残留応力最大値による断面力は、延長 1cm 当たりの断面力にプレキャストL型擁壁の製品延長 2m 分を乗じて表-4.1(a)～(d)のように計算した。表-4.1において、①は Boussinesq 解析解で式(3-3)の値、②は近似式(Boussinesq 解析解×係数 α)の値、③は σ_x の平均値で $\overline{\sigma_x}=\{\sigma_x(i+1)+\sigma_x(i)\}/2$ 、④は $\Delta z=z(i+1)-z(i)$ 、⑥は断面力を求める深さからの距離で $h(i)=20-\{z(i+1)+z(i)\}/2$ である。

$$S = \sum_{i=1}^n \{\sigma_x(i) + \sigma_x(i+1)\} \times \frac{1}{2} \times \Delta z(i) \quad (4-5)$$

$$M = \sum_{i=1}^n \{\sigma_x(i) + \sigma_x(i+1)\} \times \frac{1}{2} \times \Delta z(i) \times h(i) \quad (4-6)$$

表-4.1 数値積分による残留応力最大値の断面力の算出

(a) 載荷重 1472N

壁からの距離 x(cm)	原点までの距離 y(cm)	地表からの深さ z(cm)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(cm)	輪荷重 P(N)	ポアソン比 ν	① Boussinesq 解析解 (N/cm ²)	② 近似式 ①×0.92 (N/cm ²)	③ σ_x の平均 (N/cm ²)	④高さ Δz (cm)	Δz 当りせん断力 ⑤= ③×④ (N/cm)	⑥ 断面力を求める深さからの距離 hi(cm)	Δz 当り曲げモーメント ⑤×⑥ (N・cm/cm)
4.00	0.00	0.3709	4.01716	1472	0.35	0.000	0.000					
4.00	0.00	0.6	4.04475	1472	0.35	2.491	2.292	1.146	0.229	0.263	19.515	5.132
4.00	0.00	0.9	4.10000	1472	0.35	5.307	4.882	3.587	0.3	1.076	19.250	20.713
4.00	0.00	1.2	4.17612	1472	0.35	7.493	6.894	5.888	0.3	1.766	18.950	33.466
4.00	0.00	1.6	4.30813	1472	0.35	9.363	8.614	7.754	0.4	3.102	18.600	57.697
4.00	0.00	2.0	4.47214	1472	0.35	10.144	9.332	8.973	0.4	3.589	18.200	65.320
4.00	0.00	2.5	4.71699	1472	0.35	9.974	9.176	9.254	0.5	4.627	17.750	82.129
4.00	0.00	3.0	5.00000	1472	0.35	9.038	8.315	8.746	0.5	4.373	17.250	75.434
4.00	0.00	3.5	5.31507	1472	0.35	7.779	7.157	7.736	0.5	3.868	16.750	64.789
4.00	0.00	4.0	5.65685	1472	0.35	6.479	5.961	6.559	0.5	3.280	16.250	53.300
4.00	0.00	4.5	6.02080	1472	0.35	5.286	4.863	5.412	0.5	2.706	15.750	42.620
4.00	0.00	5.0	6.40312	1472	0.35	4.261	3.920	4.392	0.5	2.196	15.250	33.489
4.00	0.00	6.0	7.21110	1472	0.35	2.723	2.505	3.213	1.0	3.213	14.500	46.589
4.00	0.00	7.0	8.06226	1472	0.35	1.732	1.593	2.049	1.0	2.049	13.500	27.662
4.00	0.00	8.0	8.94427	1472	0.35	1.108	1.019	1.306	1.0	1.306	12.500	16.325
4.00	0.00	9.0	9.84886	1472	0.35	0.714	0.657	0.838	1.0	0.838	11.500	9.637
4.00	0.00	10.0	10.77033	1472	0.35	0.462	0.425	0.541	1.0	0.541	10.500	5.681
4.00	0.00	11.0	11.70470	1472	0.35	0.299	0.275	0.350	1.0	0.350	9.500	3.325
4.00	0.00	12.0	12.64911	1472	0.35	0.191	0.176	0.225	1.0	0.225	8.500	1.913
4.00	0.00	13.0	13.60147	1472	0.35	0.120	0.110	0.143	1.0	0.143	7.500	1.073
4.00	0.00	14.0	14.56022	1472	0.35	0.072	0.066	0.088	1.0	0.088	6.500	0.572
4.00	0.00	15.0	15.52417	1472	0.35	0.039	0.036	0.051	1.0	0.051	5.500	0.281
4.00	0.00	16.0	16.49242	1472	0.35	0.016	0.015	0.025	1.0	0.025	4.500	0.113
4.00	0.00	17.0	17.46425	1472	0.35	0.001	0.001	0.008	1.0	0.008	3.500	0.028
4.00	0.00	17.07	17.53240	1472	0.35	0.000	0.000	0.000	0.07	0.000	2.965	0.000
延長1cm当たりの断面力										39.683		647.288
幅200cm当たりの断面力										7,937 N		129,458 N・cm

(b) 載荷重 1275N

壁からの距離 x(cm)	原点までの距離 y(cm)	地表からの深さ z(cm)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(cm)	輪荷重 P(N)	ポアソン比 ν	① Boussinesq 解析解 (N/cm ²)	② 近似式 ①×0.99 (N/cm ²)	③ σ_x の平均 (N/cm ²)	④高さ Δz (cm)	Δz 当りせん断力 ⑤= ③×④ (N/cm)	⑥ 断面力を求める深さからの距離 hi(cm)	Δz 当り曲げモーメント ⑤×⑥ (N・cm/cm)
4.00	0.00	0.3709	4.01716	1275	0.35	0.000	0.000					
4.00	0.00	0.6	4.04475	1275	0.35	2.158	2.136	1.068	0.229	0.245	19.515	4.781
4.00	0.00	0.9	4.10000	1275	0.35	4.597	4.551	3.344	0.3	1.003	19.250	19.308
4.00	0.00	1.2	4.17612	1275	0.35	6.491	6.426	5.489	0.3	1.647	18.950	31.211
4.00	0.00	1.6	4.30813	1275	0.35	8.110	8.029	7.227	0.4	2.891	18.600	53.773
4.00	0.00	2.0	4.47214	1275	0.35	8.787	8.699	8.364	0.4	3.346	18.200	60.897
4.00	0.00	2.5	4.71699	1275	0.35	8.639	8.553	8.626	0.5	4.313	17.750	76.556
4.00	0.00	3.0	5.00000	1275	0.35	7.829	7.751	8.152	0.5	4.076	17.250	70.311
4.00	0.00	3.5	5.31507	1275	0.35	6.738	6.671	7.211	0.5	3.606	16.750	60.401
4.00	0.00	4.0	5.65685	1275	0.35	5.612	5.556	6.113	0.5	3.057	16.250	49.676
4.00	0.00	4.5	6.02080	1275	0.35	4.579	4.533	5.045	0.5	2.523	15.750	39.737
4.00	0.00	5.0	6.40312	1275	0.35	3.691	3.654	4.094	0.5	2.047	15.250	31.217
4.00	0.00	6.0	7.21110	1275	0.35	2.358	2.334	2.994	1.0	2.994	14.500	43.413
4.00	0.00	7.0	8.06226	1275	0.35	1.500	1.485	1.910	1.0	1.910	13.500	25.785
4.00	0.00	8.0	8.94427	1275	0.35	0.960	0.950	1.218	1.0	1.218	12.500	15.225
4.00	0.00	9.0	9.84886	1275	0.35	0.618	0.612	0.781	1.0	0.781	11.500	8.982
4.00	0.00	10.0	10.77033	1275	0.35	0.400	0.396	0.504	1.0	0.504	10.500	5.292
4.00	0.00	11.0	11.70470	1275	0.35	0.259	0.256	0.326	1.0	0.326	9.500	3.097
4.00	0.00	12.0	12.64911	1275	0.35	0.166	0.164	0.210	1.0	0.210	8.500	1.785
4.00	0.00	13.0	13.60147	1275	0.35	0.104	0.103	0.134	1.0	0.134	7.500	1.005
4.00	0.00	14.0	14.56022	1275	0.35	0.062	0.061	0.082	1.0	0.082	6.500	0.533
4.00	0.00	15.0	15.52417	1275	0.35	0.034	0.034	0.048	1.0	0.048	5.500	0.264
4.00	0.00	16.0	16.49242	1275	0.35	0.014	0.014	0.024	1.0	0.024	4.500	0.108
4.00	0.00	17.0	17.46425	1275	0.35	0.001	0.001	0.007	1.0	0.007	3.500	0.025
4.00	0.00	17.07	17.53240	1275	0.35	0.000	0.000	0.000	0.07	0.000	2.965	0.000
延長1cm当たりの断面力										36.992		603.382
幅200cm当たりの断面力										7,398 N		120,676 N・cm

第4章 曲げ剛性が高い擁壁に作用する断面力

(c) 載荷重 1079N

壁からの距離 x(cm)	原点までの距離 y(cm)	地表からの深さ z(cm)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(cm)	輪荷重 P(N)	ポアソン比 ν	① Boussinesq 解析解 (N/cm ²)	② 近似式 ①×0.99 (N/cm ²)	③ σ_x の平均 (N/cm ²)	④高さ Δz (cm)	Δz 当りせん断力 ⑤= ③×④ (N/cm)	⑥ 断面力を求める深さからの距離 hi(cm)	Δz 当り曲げモーメント ⑤×⑥ (N・cm/cm)
4.00	0.00	0.3709	4.01716	1079	0.35	0.000	0.000					
4.00	0.00	0.6	4.04475	1079	0.35	1.826	1.808	0.904	0.229	0.207	19.515	4.040
4.00	0.00	0.9	4.10000	1079	0.35	3.890	3.851	2.829	0.3	0.849	19.250	16.343
4.00	0.00	1.2	4.17612	1079	0.35	5.493	5.438	4.645	0.3	1.394	18.950	26.416
4.00	0.00	1.6	4.30813	1079	0.35	6.863	6.794	6.116	0.4	2.446	18.600	45.496
4.00	0.00	2.0	4.47214	1079	0.35	7.436	7.362	7.078	0.4	2.831	18.200	51.524
4.00	0.00	2.5	4.71699	1079	0.35	7.311	7.238	7.300	0.5	3.650	17.750	64.788
4.00	0.00	3.0	5.00000	1079	0.35	6.625	6.559	6.898	0.5	3.449	17.250	59.495
4.00	0.00	3.5	5.31507	1079	0.35	5.702	5.645	6.102	0.5	3.051	16.750	51.104
4.00	0.00	4.0	5.65685	1079	0.35	4.749	4.702	5.173	0.5	2.587	16.250	42.039
4.00	0.00	4.5	6.02080	1079	0.35	3.875	3.836	4.269	0.5	2.135	15.750	33.626
4.00	0.00	5.0	6.40312	1079	0.35	3.123	3.092	3.464	0.5	1.732	15.250	26.413
4.00	0.00	6.0	7.21110	1079	0.35	1.996	1.976	2.534	1.0	2.534	14.500	36.743
4.00	0.00	7.0	8.06226	1079	0.35	1.270	1.257	1.617	1.0	1.617	13.500	21.830
4.00	0.00	8.0	8.94427	1079	0.35	0.812	0.804	1.031	1.0	1.031	12.500	12.888
4.00	0.00	9.0	9.84886	1079	0.35	0.523	0.518	0.661	1.0	0.661	11.500	7.602
4.00	0.00	10.0	10.77033	1079	0.35	0.338	0.335	0.426	1.0	0.426	10.500	4.473
4.00	0.00	11.0	11.70470	1079	0.35	0.219	0.217	0.276	1.0	0.276	9.500	2.622
4.00	0.00	12.0	12.64911	1079	0.35	0.140	0.139	0.178	1.0	0.178	8.500	1.513
4.00	0.00	13.0	13.60147	1079	0.35	0.088	0.087	0.113	1.0	0.113	7.500	0.848
4.00	0.00	14.0	14.56022	1079	0.35	0.052	0.051	0.069	1.0	0.069	6.500	0.449
4.00	0.00	15.0	15.52417	1079	0.35	0.028	0.028	0.040	1.0	0.040	5.500	0.220
4.00	0.00	16.0	16.49242	1079	0.35	0.012	0.012	0.020	1.0	0.020	4.500	0.090
4.00	0.00	17.0	17.46425	1079	0.35	0.001	0.001	0.006	1.0	0.006	3.500	0.021
4.00	0.00	17.07	17.53240	1079	0.35	0.000	0.000	0.000	0.07	0.000	2.965	0.000
延長1cm当たりの断面力										31.302		510.583
幅200cm当たりの断面力										6,260 N		102,117 N・cm

(d) 載荷重 883N

壁からの距離 x(cm)	原点までの距離 y(cm)	地表からの深さ z(cm)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(cm)	輪荷重 P(N)	ポアソン比 ν	① Boussinesq 解析解 (N/cm ²)	② 近似式 ①×0.91 (N/cm ²)	③ σ_x の平均 (N/cm ²)	④高さ Δz (cm)	Δz 当りせん断力 ⑤= ③×④ (N/cm)	⑥ 断面力を求める深さからの距離 hi(cm)	Δz 当り曲げモーメント ⑤×⑥ (N・cm/cm)
4.00	0.00	0.3709	4.01716	883	0.35	0.000	0.000					
4.00	0.00	0.6	4.04475	883	0.35	1.495	1.360	0.680	0.229	0.156	19.515	3.044
4.00	0.00	0.9	4.10000	883	0.35	3.184	2.897	2.129	0.3	0.639	19.250	12.301
4.00	0.00	1.2	4.17612	883	0.35	4.495	4.090	3.494	0.3	1.048	18.950	19.860
4.00	0.00	1.6	4.30813	883	0.35	5.616	5.111	4.601	0.4	1.840	18.600	34.224
4.00	0.00	2.0	4.47214	883	0.35	6.085	5.537	5.324	0.4	2.130	18.200	38.766
4.00	0.00	2.5	4.71699	883	0.35	5.983	5.445	5.491	0.5	2.746	17.750	48.742
4.00	0.00	3.0	5.00000	883	0.35	5.422	4.934	5.190	0.5	2.595	17.250	44.764
4.00	0.00	3.5	5.31507	883	0.35	4.666	4.246	4.590	0.5	2.295	16.750	38.441
4.00	0.00	4.0	5.65685	883	0.35	3.886	3.536	3.891	0.5	1.946	16.250	31.623
4.00	0.00	4.5	6.02080	883	0.35	3.171	2.886	3.211	0.5	1.606	15.750	25.295
4.00	0.00	5.0	6.40312	883	0.35	2.556	2.326	2.606	0.5	1.303	15.250	19.871
4.00	0.00	6.0	7.21110	883	0.35	1.633	1.486	1.906	1.0	1.906	14.500	27.637
4.00	0.00	7.0	8.06226	883	0.35	1.039	0.945	1.216	1.0	1.216	13.500	16.416
4.00	0.00	8.0	8.94427	883	0.35	0.665	0.605	0.775	1.0	0.775	12.500	9.688
4.00	0.00	9.0	9.84886	883	0.35	0.428	0.389	0.497	1.0	0.497	11.500	5.716
4.00	0.00	10.0	10.77033	883	0.35	0.277	0.252	0.321	1.0	0.321	10.500	3.371
4.00	0.00	11.0	11.70470	883	0.35	0.179	0.163	0.208	1.0	0.208	9.500	1.976
4.00	0.00	12.0	12.64911	883	0.35	0.115	0.105	0.134	1.0	0.134	8.500	1.139
4.00	0.00	13.0	13.60147	883	0.35	0.072	0.066	0.086	1.0	0.086	7.500	0.645
4.00	0.00	14.0	14.56022	883	0.35	0.043	0.039	0.053	1.0	0.053	6.500	0.345
4.00	0.00	15.0	15.52417	883	0.35	0.023	0.021	0.030	1.0	0.030	5.500	0.165
4.00	0.00	16.0	16.49242	883	0.35	0.010	0.009	0.015	1.0	0.015	4.500	0.068
4.00	0.00	17.0	17.46425	883	0.35	0.001	0.001	0.005	1.0	0.005	3.500	0.018
4.00	0.00	17.07	17.53240	883	0.35	0.000	0.000	0.001	0.07	0.000	2.965	0.000
延長1cm当たりの断面力										23.550		384.115
幅200cm当たりの断面力										4,710 N		76,823 N・cm

4. 3. 3 応力の振幅最大値による断面力

(1) 水平応力

壁背面から4cmの位置に1472Nを繰返し載荷したときの、深さ4cmにおける背面からの水平応力を図-4.2に示す。載荷開始時は応力の振幅のみが作用し、形状は山なりである。そして、載荷回数が増すにしたがって、残留応力は延長2mに渡り一様に5.96N/cm²が壁面に作用する。さらに輪荷重が通過するごとに、青色部分の背面からの水平応力を壁面が受けることになる。このとき、輪荷重の載荷は図-1.4(b)に示す車輛の隣接軸距を考慮して、延長2mあたり1箇所とした。深さごとの応力の振幅最大値の水平応力 $\Sigma \sigma_x(i)$ は、青色部分の水平応力を延長方向に距離 $\Delta y=2\text{mm}$ ごとに分割して、分割位置の壁面に作用する背面からの水平応力を算出し、 Δy 間の水平応力の平均値を求め、その平均値に $\Delta y(\text{cm})$ を乗じ、y軸方向に式(4-7)を用いて積分して求めた。

$$\Sigma \sigma_x(i) = \sum_{i=1}^n \{ \sigma_x(i) + \sigma_x(i+1) \} \times \frac{1}{2} \times \Delta y(i) \quad (4-7)$$

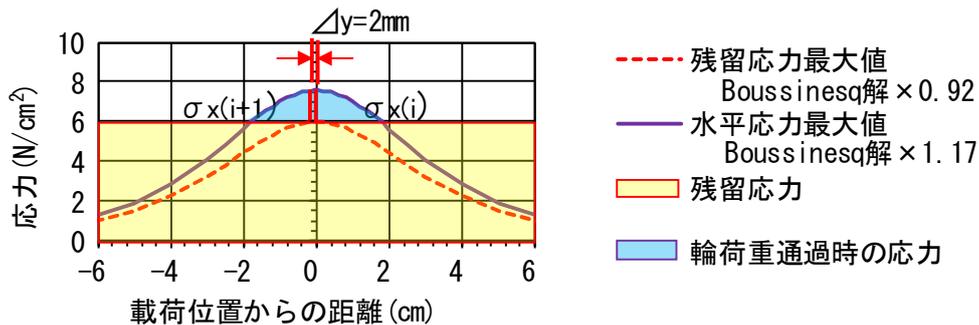


図-4.2 応力の振幅最大値による水平応力(P=1472N, x=4cm, z=4cm)

例として、深さ3cmおよび4cmの応力の振幅分の水平応力 $\Sigma \sigma_x(3.0)$ および $\Sigma \sigma_x(4.0)$ を、表-4.2(a)および(b)に示す。表-4.2において、

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$\Sigma \sigma_x(i)$ は任意深さ*i*(cm)における応力の振幅最大値による水平応力である。

- ①は Boussinesq 解析解で式(3-3)の値(N/cm²)
- ②は残留応力最大値(Boussinesq 解析解×係数 α)のピーク値の値(N/cm²)
- ③は水平応力最大値(Boussinesq 解析解×係数 α)の値(N/cm²)
- ④は単位面積当たりの応力の振幅最大値の値で、水平応力最大値から残留応力最大値のピーク値を引いた値(N/cm²)
- ⑤は分割した距離で $\Delta y=0.2\text{cm}$ を標準とする
- ⑥は延長 Δy 当たりの水平応力(N/cm)で $\sigma_x = \{ \sigma_x(i+1) + \sigma_x(i) \} / 2 \times \Delta y$

である。

表-4.2 応力の振幅最大値による水平応力の算出(P=1472N, x=4cm)

(a) z=3cm

輪荷重 P(N)	壁からの 距離 x(cm)	原点 までの 距離 y(cm)	地表から の深さ z(cm)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(cm)	ポアソン 比 ν	① Boussinesq 解析解 (N/cm ²)	② =①×0.92 の最大値 (N/cm ²)	③ =①×1.17 (N/cm ²)	④= ③-② (N/cm ²)	⑤ Δy (cm)	⑥ Δy 当たりの 水平応力 (N/cm)
1472	4.0	4.0	3.0	6.40312	0.35	2.733	8.315	3.197			
1472	4.0	3.5	3.0	6.10328	0.35	3.414	8.315	3.994			
1472	4.0	3.0	3.0	5.83095	0.35	4.240	8.315	4.961			
1472	4.0	2.5	3.0	5.59017	0.35	5.199	8.315	6.083			
1472	4.0	2.0	3.0	5.38516	0.35	6.245	8.315	7.307			
1472	4.0	1.589	3.0	5.24642	0.35	7.107	8.315	8.315	0.000		
1472	4.0	1.4	3.0	5.19230	0.35	7.483	8.315	8.755	0.440	0.189	0.042
1472	4.0	1.2	3.0	5.14198	0.35	7.856	8.315	9.191	0.876	0.200	0.132
1472	4.0	1.0	3.0	5.09902	0.35	8.192	8.315	9.585	1.270	0.200	0.215
1472	4.0	0.8	3.0	5.06360	0.35	8.483	8.315	9.925	1.610	0.200	0.288
1472	4.0	0.6	3.0	5.03587	0.35	8.720	8.315	10.202	1.887	0.200	0.350
1472	4.0	0.4	3.0	5.01597	0.35	8.895	8.315	10.407	2.092	0.200	0.398
1472	4.0	0.2	3.0	5.00400	0.35	9.002	8.315	10.532	2.217	0.200	0.431
1472	4.0	0.0	3.0	5.00000	0.35	9.038	8.315	10.575	2.260	0.200	0.448
1472	4.0	-0.2	3.0	5.00400	0.35	9.002	8.315	10.532	2.217	0.200	0.448
1472	4.0	-0.4	3.0	5.01597	0.35	8.895	8.315	10.407	2.092	0.200	0.431
1472	4.0	-0.6	3.0	5.03587	0.35	8.720	8.315	10.202	1.887	0.200	0.398
1472	4.0	-0.8	3.0	5.06360	0.35	8.483	8.315	9.925	1.610	0.200	0.350
1472	4.0	-1.0	3.0	5.09902	0.35	8.192	8.315	9.585	1.270	0.200	0.288
1472	4.0	-1.2	3.0	5.14198	0.35	7.856	8.315	9.191	0.876	0.200	0.215
1472	4.0	-1.4	3.0	5.19230	0.35	7.483	8.315	8.755	0.440	0.200	0.132
1472	4.0	-1.589	3.0	5.24642	0.35	7.107	8.315	8.315	0.000	0.189	0.042
1472	4.0	-2.0	3.0	5.38516	0.35	6.245	8.315	7.307			
1472	4.0	-2.5	3.0	5.59017	0.35	5.199	8.315	6.083			
1472	4.0	-3.0	3.0	5.83095	0.35	4.240	8.315	4.961			
1472	4.0	-3.5	3.0	6.10328	0.35	3.414	8.315	3.994			
1472	4.0	-4.0	3.0	6.40312	0.35	2.733	8.315	3.197			
$\Sigma \sigma \times 3.0 =$											4.608

(b) z=4cm

輪荷重 P(N)	壁からの 距離 x(cm)	原点 までの 距離 y(cm)	地表から の深さ z(cm)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(cm)	ポアソン 比 ν	① Boussinesq 解析解 (N/cm ²)	② =①×0.92 の最大値 (N/cm ²)	③ =①×1.17 (N/cm ²)	④= ③-② (N/cm ²)	⑤ Δy (cm)	⑥ Δy 当たりの 水平応力 (N/cm)
1472	4.0	4.0	4.0	6.92820	0.35	2.395	5.960	2.802			
1472	4.0	3.5	4.0	6.65207	0.35	2.908	5.960	3.402			
1472	4.0	3.0	4.0	6.40312	0.35	3.498	5.960	4.093			
1472	4.0	2.5	4.0	6.18466	0.35	4.148	5.960	4.854			
1472	4.0	2.0	4.0	6.00000	0.35	4.821	5.960	5.641			
1472	4.0	1.7933	4.0	5.93430	0.35	5.094	5.960	5.960	0.000		
1472	4.0	1.6	4.0	5.87878	0.35	5.339	5.960	6.246	0.286	0.19	0.028
1472	4.0	1.4	4.0	5.82752	0.35	5.578	5.960	6.527	0.567	0.20	0.085
1472	4.0	1.2	4.0	5.78273	0.35	5.799	5.960	6.785	0.825	0.20	0.139
1472	4.0	1.0	4.0	5.74456	0.35	5.995	5.960	7.014	1.054	0.20	0.188
1472	4.0	0.8	4.0	5.71314	0.35	6.163	5.960	7.211	1.251	0.20	0.231
1472	4.0	0.6	4.0	5.68859	0.35	6.298	5.960	7.369	1.409	0.20	0.266
1472	4.0	0.4	4.0	5.67098	0.35	6.398	5.960	7.485	1.525	0.20	0.293
1472	4.0	0.2	4.0	5.66039	0.35	6.458	5.960	7.556	1.596	0.20	0.312
1472	4.0	0.0	4.0	5.65685	0.35	6.479	5.960	7.580	1.620	0.20	0.322
1472	4.0	-0.2	4.0	5.66039	0.35	6.458	5.960	7.556	1.596	0.20	0.322
1472	4.0	-0.4	4.0	5.67098	0.35	6.398	5.960	7.485	1.525	0.20	0.312
1472	4.0	-0.6	4.0	5.68859	0.35	6.298	5.960	7.369	1.409	0.20	0.293
1472	4.0	-0.8	4.0	5.71314	0.35	6.163	5.960	7.211	1.251	0.20	0.266
1472	4.0	-1.0	4.0	5.74456	0.35	5.995	5.960	7.014	1.054	0.20	0.231
1472	4.0	-1.2	4.0	5.78273	0.35	5.799	5.960	6.785	0.825	0.20	0.188
1472	4.0	-1.4	4.0	5.82752	0.35	5.578	5.960	6.527	0.567	0.20	0.139
1472	4.0	-1.6	4.0	5.87878	0.35	5.339	5.960	6.246	0.286	0.20	0.085
1472	4.0	-1.7933	4.0	5.93430	0.35	5.094	5.960	5.960	0.000	0.19	0.028
1472	4.0	-2.0	4.0	6.00000	0.35	4.821	5.960	5.641			
1472	4.0	-2.5	4.0	6.18466	0.35	4.148	5.960	4.854			
1472	4.0	-3.0	4.0	6.40312	0.35	3.498	5.960	4.093			
1472	4.0	-3.5	4.0	6.65207	0.35	2.908	5.960	3.402			
1472	4.0	-4.0	4.0	6.92820	0.35	2.395	5.960	2.802			
$\Sigma \sigma \times 4.0 =$											3.728

(2) 断面力

断面力の算出には、残留応力最大値と同様に数値積分を使用した。せん断力は図-4.3のように深さごとの $\Sigma \sigma_x(i)$ を使用して、 $\Delta z(i)$ 間の $\Sigma \sigma_x$ の平均値を求め、その平均値に $\Delta z(i)$ (cm) を乗じ、 z 軸方向に式(4-6)のように積分して求められる。また、 $\Delta z(i)$ 間の $\Sigma \sigma_x$ の平均値に $\Delta z(i)$ (cm) を乗じ、さらに深さ 20cm からの距離 $h(i)$ (cm) を乗じて、式(4-7)のように z 軸方向に積分すれば、曲げモーメントが求められる。

$$S = \sum_{i=1}^n \{ \Sigma \sigma_x(i) + \Sigma \sigma_x(i+1) \} \times \frac{1}{2} \times \Delta z(i) \quad (4-6)$$

$$M = \sum_{i=1}^n \{ \Sigma \sigma_x(i) + \Sigma \sigma_x(i+1) \} \times \frac{1}{2} \times \Delta z(i) \times h(i) \quad (4-7)$$

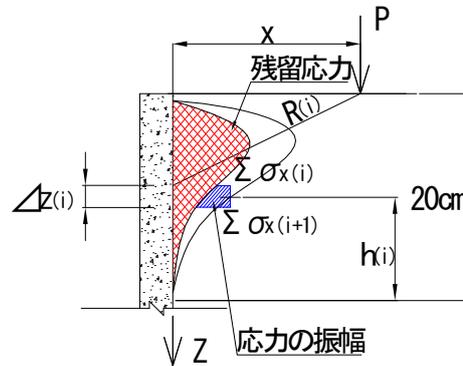


図-4.3 応力の振幅最大値の断面力算出方法

L型擁壁に作用する応力の振幅最大値による断面力の算出は、表-4.3(a)～(d)のように計算した。表-4.3において、

- ① は地表面からの深さ z (cm)
- ② は $\Delta z = z(i+1) - z(i)$ (cm)
- ③ は各深さ $z(i)$ における応力の振幅最大値による水平応力(表-4.2 参照)
- ④ は $\Sigma \sigma_x$ の平均値 $\overline{\Sigma \sigma_x} = \{ \Sigma \sigma_x(i+1) + \Sigma \sigma_x(i) \} / 2$ (N/cm)
- ⑤ は Δz 当たりのせん断力 S (N)
- ⑥ は断面力を求める深さからの距離(cm) $h(i) = 20 - \{ z(i+1) + z(i) \} / 2$
- ⑦ は Δz 当たりの曲げモーメント M (N・cm)

表-4.3(a)を例にとれば、載荷重 1472N が繰返し載荷されたとき、深さ 20cm における延長 2m あたりのせん断力は 25N、曲げモーメントは 388N・cm である。

表-4.3 数値積分による応力の振幅最大値の断面力の算出

(a) 載荷重 1472N

① z (cm)	② Δz (cm)	③ $\Sigma \sigma x(i)$ (N/cm)	④ ③の平均 (N/cm)	⑤= ②×④ S(N)	⑥ h(i) (cm)	⑦= ⑤×⑥ M(N・cm)	
0.3709		0.000					
0.60	0.229	1.168	0.5840	0.134	19.51	2.614	
0.90	0.30	2.304	1.7360	0.521	19.25	10.029	
1.20	0.30	3.248	2.7760	0.833	18.95	15.785	
1.60	0.40	4.142	3.6950	1.478	18.60	27.491	
2.00	0.40	4.636	4.3890	1.756	18.20	31.959	
2.50	0.50	4.800	4.7180	2.359	17.75	41.872	
3.00	0.50	4.608	4.7040	2.352	17.25	40.572	
3.50	0.50	4.210	4.4090	2.205	16.75	36.934	
4.00	0.50	3.728	3.9690	1.985	16.25	32.256	
4.50	0.50	3.232	3.4800	1.740	15.75	27.405	
5.00	0.50	2.770	3.0010	1.501	15.25	22.890	
6.00	1.00	1.986	2.3780	2.378	14.50	34.481	
7.00	1.00	1.412	1.6990	1.699	13.50	22.937	
8.00	1.00	1.002	1.2070	1.207	12.50	15.088	
9.00	1.00	0.708	0.8550	0.855	11.50	9.833	
10.00	1.00	0.496	0.6020	0.602	10.50	6.321	
11.00	1.00	0.346	0.4210	0.421	9.50	4.000	
12.00	1.00	0.232	0.2890	0.289	8.50	2.457	
13.00	1.00	0.162	0.1970	0.197	7.50	1.478	
14.00	1.00	0.100	0.1310	0.131	6.50	0.852	
15.00	1.00	0.052	0.0760	0.076	5.50	0.418	
16.00	1.00	0.022	0.0370	0.037	4.50	0.167	
17.00	1.00	0.000	0.0110	0.011	3.50	0.039	
輪荷重1個あたり				Σ	24.767	Σ	387.878

(b) 載荷重 1275N

① z (cm)	② Δz (cm)	③ $\Sigma \sigma x(i)$ (N/cm)	④ ③の平均 (N/cm)	⑤= ②×④ S(N)	⑥ h(i) (cm)	⑦= ⑤×⑥ M(N・cm)	
0.3709		0.000					
0.60	0.229	1.874	0.9370	0.215	19.51	4.195	
0.90	0.30	3.660	2.7670	0.830	19.25	15.978	
1.20	0.30	5.150	4.4050	1.322	18.95	25.052	
1.60	0.40	6.568	5.8590	2.344	18.60	43.598	
2.00	0.40	7.352	6.9600	2.784	18.20	50.669	
2.50	0.50	7.604	7.4780	3.739	17.75	66.367	
3.00	0.50	7.286	7.4450	3.723	17.25	64.222	
3.50	0.50	6.662	6.9740	3.487	16.75	58.407	
4.00	0.50	5.898	6.2800	3.140	16.25	51.025	
4.50	0.50	5.118	5.5080	2.754	15.75	43.376	
5.00	0.50	4.386	4.7520	2.376	15.25	36.234	
6.00	1.00	3.142	3.7640	3.764	14.50	54.578	
7.00	1.00	2.238	2.6900	2.690	13.50	36.315	
8.00	1.00	1.584	1.9110	1.911	12.50	23.888	
9.00	1.00	1.114	1.3490	1.349	11.50	15.514	
10.00	1.00	0.788	0.9510	0.951	10.50	9.986	
11.00	1.00	0.546	0.6670	0.667	9.50	6.337	
12.00	1.00	0.378	0.4620	0.462	8.50	3.927	
13.00	1.00	0.246	0.3120	0.312	7.50	2.340	
14.00	1.00	0.158	0.2020	0.202	6.50	1.313	
15.00	1.00	0.092	0.1250	0.125	5.50	0.688	
16.00	1.00	0.032	0.0620	0.062	4.50	0.279	
17.00	1.00	0.000	0.0160	0.016	3.50	0.056	
車輪1個あたり				Σ	39.225	Σ	614.344

(c) 載荷重 1079N

① z (cm)	② Δz (cm)	③ $\Sigma \sigma x(i)$ (N/cm)	④ ③の平均 (N/cm)	⑤= ②×④ S(N)	⑥ h(i) (cm)	⑦= ⑤×⑥ M(N・cm)	
0.3709		0.000					
0.60	0.229	0.924	0.4620	0.106	19.51	2.068	
0.90	0.30	1.830	1.3770	0.413	19.25	7.950	
1.20	0.30	2.574	2.2020	0.661	18.95	12.526	
1.60	0.40	3.288	2.9310	1.172	18.60	21.799	
2.00	0.40	3.676	3.4820	1.393	18.20	25.353	
2.50	0.50	3.808	3.7420	1.871	17.75	33.210	
3.00	0.50	3.648	3.7280	1.864	17.25	32.154	
3.50	0.50	3.332	3.4900	1.745	16.75	29.229	
4.00	0.50	2.958	3.1450	1.573	16.25	25.561	
4.50	0.50	2.566	2.7620	1.381	15.75	21.751	
5.00	0.50	2.196	2.3810	1.191	15.25	18.163	
6.00	1.00	1.572	1.8840	1.884	14.50	27.318	
7.00	1.00	1.114	1.3430	1.343	13.50	18.131	
8.00	1.00	0.790	0.9520	0.952	12.50	11.900	
9.00	1.00	0.556	0.6730	0.673	11.50	7.740	
10.00	1.00	0.394	0.4750	0.475	10.50	4.988	
11.00	1.00	0.274	0.3340	0.334	9.50	3.173	
12.00	1.00	0.188	0.2310	0.231	8.50	1.964	
13.00	1.00	0.126	0.1570	0.157	7.50	1.178	
14.00	1.00	0.080	0.1030	0.103	6.50	0.670	
15.00	1.00	0.046	0.0630	0.063	5.50	0.347	
16.00	1.00	0.022	0.0340	0.034	4.50	0.153	
17.00	1.00	0.000	0.0110	0.011	3.50	0.039	
車輪1個あたり				Σ		Σ	307.365

(d) 載荷重 883N

① z (cm)	② Δz (cm)	③ $\Sigma \sigma x(i)$ (N/cm)	④ ③の平均 (N/cm)	⑤= ②×④ S(N)	⑥ h(i) (cm)	⑦= ⑤×⑥ M(N・cm)	
0.3709		0.000					
0.60	0.229	0.544	0.2720	0.062	19.51	1.210	
0.90	0.30	1.080	0.8120	0.244	19.25	4.697	
1.20	0.30	1.518	1.2990	0.390	18.95	7.391	
1.60	0.40	1.940	1.7290	0.692	18.60	12.871	
2.00	0.40	2.174	2.0570	0.823	18.20	14.979	
2.50	0.50	2.246	2.2100	1.105	17.75	19.614	
3.00	0.50	2.158	2.2020	1.101	17.25	18.992	
3.50	0.50	1.974	2.0660	1.033	16.75	17.303	
4.00	0.50	1.748	1.8610	0.931	16.25	15.129	
4.50	0.50	1.514	1.6310	0.816	15.75	12.852	
5.00	0.50	1.298	1.4060	0.703	15.25	10.721	
6.00	1.00	0.934	1.1160	1.116	14.50	16.182	
7.00	1.00	0.658	0.7960	0.796	13.50	10.746	
8.00	1.00	0.466	0.5620	0.562	12.50	7.025	
9.00	1.00	0.330	0.3980	0.398	11.50	4.577	
10.00	1.00	0.236	0.2830	0.283	10.50	2.972	
11.00	1.00	0.160	0.1980	0.198	9.50	1.881	
12.00	1.00	0.116	0.1380	0.138	8.50	1.173	
13.00	1.00	0.078	0.0970	0.097	7.50	0.728	
14.00	1.00	0.052	0.0650	0.065	6.50	0.423	
15.00	1.00	0.028	0.0400	0.040	5.50	0.220	
16.00	1.00	0.006	0.0170	0.017	4.50	0.077	
17.00	1.00	0.000	0.0030	0.003	3.50	0.011	
車輪1個あたり				Σ		Σ	181.774

4. 3. 4 曲げ剛性が高い擁壁の天端から 20cm 下方の断面力

擁壁が設置されている場所が重さ指定道路では無い場合には、T-20 荷重の後輪荷重 80kN⁵⁾を設計荷重として考慮する必要がある。重さ指定道路であれば、T-25 荷重の後輪荷重 100kN を設計荷重として考慮する必要がある。後輪荷重 80kN により側溝壁面に作用する断面力については、輪荷重が 45° に分散したものに土圧係数を乗じて、深さ方向に積分したものが示されている⁶⁾。本研究においては、Boussinesq 式に係数 α を乗じた近似式を用いて、80kN の 1/54~1/91 の 1472N~883N で等分布荷重 10kN/m² の断面力と比較する。

表-4.4 に、壁背面からの距離 4cm に輪荷重 1472N~883N が繰返し載荷された場合と、等分布荷重 10kN/m² を載荷した場合の、壁天端から 20cm 下方に作用する延長 2m 当たりのせん断力の計算結果を示す。繰返し載荷重により裏込め材を介して擁壁のたて壁に伝達されるせん断力は、残留応力によるものがほとんどを占め、等分布荷重 10kN/m² の 4.6~7.6 倍となった。

表 4.5 に、壁背面からの距離 4cm に輪荷重 1472N~883N が繰返し載荷された場合と、等分布荷重 10kN/m² を載荷した場合の、壁天端から 20cm 下方に作用する延長 2m 当たりの曲げモーメントの計算結果を示す。せん断力と同様に曲げモーメントは残留応力によるものがほとんどを占め、等分布荷重 10kN/m² の 7.7~13.0 倍となった。計算結果から、小さな輪荷重でも擁壁に近い位置で繰返し載荷されれば、等分布荷重による断面力を上回ることがある。

表-4.4 曲げ剛性が高い擁壁の天端から 20cm 下方に作用するせん断力(延長 2m 当たり)

載荷重10kN/m ²			繰返し荷重					比率 ⑦÷③	差 ⑦-③ (N)
① 裏込め土 (N)	② 等分布荷重 (N)	③= ①+② (N)	輪荷重 (N)	④ 裏込め土 (N)	⑤ 残留応力 (N)	⑥ 応力の振幅 (N)	⑦= ④+⑤+⑥ (N)		
168	898	1,066	1,472	168	7,937	25	8,130	7.63	7,064
168	898	1,066	1,275	168	7,398	39	7,605	7.13	6,539
168	898	1,066	1,079	168	6,260	20	6,448	6.05	5,382
168	898	1,066	883	168	4,710	12	4,890	4.59	3,824

表-4.5 曲げ剛性が高い擁壁の天端から 20cm 下方に作用する曲げモーメント(延長 2m 当たり)

載荷重10kN/m ²			繰返し荷重					比率 ⑦÷③	差 ⑦-③ (N・m)
① 裏込め土 (N・m)	② 等分布荷重 (N・m)	③= ①+② (N・m)	輪荷重 (N)	④ 裏込め土 (N・m)	⑤ 残留応力 (N・m)	⑥ 応力の振幅 (N・m)	⑦= ④+⑤+⑥ (N・m)		
11.2	89.8	101.0	1,472	11.2	1294.6	3.9	1309.7	12.97	1208.7
11.2	89.8	101.0	1,275	11.2	1206.8	6.1	1224.1	12.12	1123.1
11.2	89.8	101.0	1,079	11.2	1021.2	3.1	1035.5	10.25	934.5
11.2	89.8	101.0	883	11.2	768.2	1.8	781.2	7.73	680.2

4.3.5 曲げ剛性が高い擁壁のたて壁に作用する断面力の式

図-4.4 および図-4.5 に、擁壁からの距離 4cm に輪荷重 1472N~883N が繰返し載荷された場合と、等分布荷重 10 kN/m² を載荷した場合の、延長 2m 当たり作用するせん断力および曲げモーメントの計算結果を示す。その近似式を表-4.6 および表-4.7 に示す。それぞれの図表において、L 型擁壁の天端水平変位による背面からの水平応力の増加は考慮していない。曲げモーメントが擁壁損壊の主要因とすると、図-4.5 において、壁天端からの深さ 2.1m 付近で、ようやく等分布荷重による曲げモーメントが、883N の繰返し載荷重による曲げモーメントを上回るのわかる。

重さ指定道路では無い場合、T-20 荷重の左右の後輪荷重 80kN を 1 輪ごとに分割して、輪荷重 40kN が隣接軸距 1.3m、輪距 1.75m で 4 箇所から繰返し載荷した場合を想定すると、車両の走行位置が L 型擁壁に近いほど、たて壁上部に作用する応力度は許容応力度を超える可能性が高まる。これが重さ指定道路になると、表-1.3 の車両制限令からすれば、後輪荷重 9.5ton (93kN) を 1 輪ごとに分割して、輪荷重 46.5kN が隣接軸距 1.3m、輪距 1.75m で 4 箇所から繰返し載荷した場合が、延長 2m の擁壁に対し最も厳しい載荷条件となる。そして、車両走行位置が L 型擁壁に近いほど、たて壁上部に作用する応力度は、重さ指定道路で無い場合よりも許容応力度を超える可能性が高まる。

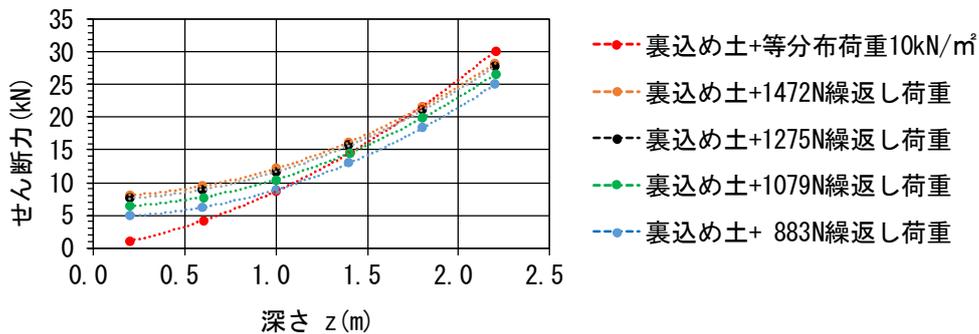


図-4.4 繰返し荷重によりたて壁に作用するせん断力(x=4cm)

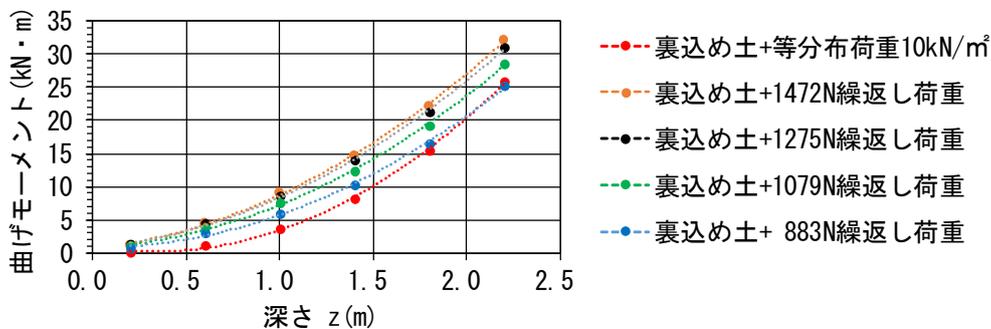


図-4.5 繰返し荷重によりたて壁に作用する曲げモーメント(x=4cm)

表-4.6 たて壁に作用するせん断力の近似式

荷重条件	計算式
等分布荷重10kN/m ²	$S = 4.1975z^2 + 4.4885z + 0.0002$
P=1472N, x=4cm	$S = 4.1974z^2 - 0.0003z + 7.9621$
P=1275N, x=4cm	$S = 4.1974z^2 - 0.0002z + 7.4371$
P=1079N, x=4cm	$S = 4.1974z^2 - 0.0003z + 6.2801$
P= 883N, x=4cm	$S = 4.1974z^2 - 0.0003z + 4.7221$

S : せん断力 (kN) Z : 深さ (m)

表-4.7 たて壁に作用する曲げモーメントの近似式

荷重条件	計算式
等分布荷重10kN/m ²	$M = 7.2814z^2 - 4.9137z + 1.0611$
P=1472N, x=4cm	$M = 5.0706z^2 + 3.0314z + 0.6717$
P=1275N, x=4cm	$M = 5.0368z^2 + 2.5239z + 0.7865$
P=1079N, x=4cm	$M = 5.0368z^2 + 1.3663z + 0.8293$
P= 883N, x=4cm	$M = 5.0368z^2 - 0.1921z + 0.8868$

M : 曲げモーメント (kN・m) Z : 深さ (m)

4.4 まとめ

繰返し載荷重により裏込め土を介してL型擁壁のたて壁に作用する水平方向の断面力は、輪荷重が通過する時に作用する断面力に、残留応力による断面力を加えたものになる。この断面力は、輪荷重の大きさ、車輛の走行位置、車輛の輪距および隣接軸距、断面力を求める地表面からの深さによっては、等分布荷重 10kN/m²による断面力を上回ることがある。

参考文献

- 1) 嶋津晃臣：実大擁壁土圧実験と起動内部摩擦角の評価，土木学会論文集 C， Vol. 66, No. 4, pp. 706-717, 2010.
- 2) 和田昇三，及川裕章，国府田誠，佐藤秀人，田村昌仁：地表面に等分布荷重を載荷した場合のL型擁壁およびもたれ式擁壁の構造性能に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集 第548号，pp. 73-80, 2001.
- 3) 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針(平成24年度版)，pp. 52-53, 丸善，2012.
- 4) 右城猛：誰も教えてくれなかった疑問に答える擁壁設計Q&A -105問答-，理工図書，pp. 11-12, 2005.
- 5) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，丸善，pp. 10-20, 1990.
- 6) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：用排水構造物標準設計図集，NEXCO 総研，2016.

第5章 疑似L型擁壁の終局曲げモーメント

5.1 まえがき

「道路土工-擁壁工指針」において、常時の擁壁に対する要求性能は、擁壁の重要度に関係なく性能1である。この性能1の水準は、想定する作用によって擁壁としての健全性を損なわない性能とされている。さらに性能1に対する擁壁を構成する部材の限界状態は、力学特性が弾性域を超えない限界の状態とされている¹⁾。第4章では、剛性の高いL型擁壁でも、通行車輛の輪荷重により、常時において想定する作用以上の背面からの水平応力が作用し、設計で考慮しているよりも大きな断面力が働くことが分かった。本章では、輪荷重の繰返し载荷による裏込め材を介した疑似L型擁壁のたて壁の破壊実験を行う前に、背面からの水平方向の集中荷重による疑似L型擁壁のたて壁の静的破壊実験を行い、基準となる静的载荷時の終局曲げモーメントを求めた。さらに、静的载荷時の終局曲げモーメントと、各繰返し载荷重により裏込め材を介して軽量形鋼の壁面に作用した曲げモーメントの関係から、疑似L型擁壁が破壊する繰返し载荷重を求めた。

5.2 疑似L型擁壁の仕様

写真-5.1のような内寸法30cm×30cmで厚さ3cm、深さ15cmのプレキャスト改良柵を、高さ23cm、たて壁高さ20cm、底版幅19cm、かかと版幅16cm、延長15cmになるように加工して、図-5.1に示す疑似L型擁壁の供試体を作製した。改良柵の材料承認図より、疑似L型擁壁のコンクリートの設計基準強度は30N/mm²、骨材最大寸法は20mmである。加工したときにΦ2.6mmの普通鉄線(SWM-B)1本が配置されているのを確認した。配筋の有効高さは供試体ごとに異なり10～24mmで、供試体d(写真-5.2)の場合は15mmであった。



写真-5.1 プレキャスト改良柵 30cm×30cm



写真-5.2 配筋の有効高さ (供試体 d, 15mm)

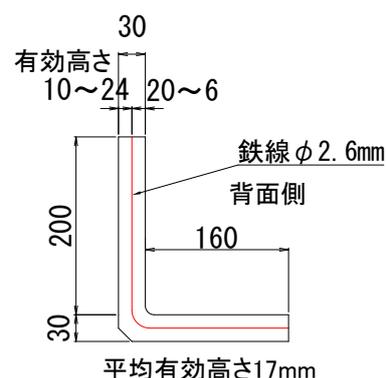


図-5.1 疑似L型擁壁断面図

ここで、疑似L型擁壁と実物のプレキャストL型擁壁の相似性を確認する。疑似L型擁壁の弾性係数は $E=28000\text{N/mm}^2$ であり、延長15cm、厚さ3cmのたて壁およびかかと版の断面二次モー

メント I は 33.75cm^4 、曲げ剛性 EI は $9.5\text{kN}\cdot\text{m}^2$ になる。延長 15cm のプレキャスト L 型擁壁の曲げ剛性は、**表-2.3** における延長 $b=0.5\text{m}$ を $b=0.15\text{m}$ に置き換えれば良い。その場合にたて壁高さ 0.2m のときの曲げ剛性は、**図-2.2** からすると $25.4\times 0.15/0.50=7.6\text{kN}\cdot\text{m}^2$ と推定できる。したがって、疑似 L 型擁壁は実物との相似性を考慮したとき、 $9.5/7.6=1.25$ 倍の曲げ剛性になると考えられる。

序章 1.2.2 において、プレキャスト L 型擁壁のたて壁の破壊は、たて壁に作用する曲げモーメントの大きさで決まることを述べた。そのとき用いたのは許容応力度設計法であるが、プレキャストコンクリート製品においては、許容応力度設計法から限界状態設計法への移行が必要であり、様々な検討がされている²⁾。特に部材厚さ 20cm 以下の薄肉鉄筋コンクリート部材の場合、コンクリート標準示方書による曲げひび割れ強度算定や耐力算定の適用範囲外であり、断面高さが薄いほど曲げひび割れ強度は高くなる傾向がある^{3),4)}。

また、部材厚 7cm 以下の薄肉鉄筋コンクリート部材では、曲げ応力を受けたとき鉄筋がほとんど機能せず、ひび割れ発生と同時に終局に至るといふ、無筋コンクリートと類似した耐荷挙動を示すことが報告されている^{5),6)}。本供試体は骨材の最大寸法に対する部材高さの比 (h/d_{max}) が $30\text{mm}/20\text{mm}=1.5$ であり、文献 6 で扱われている部材厚さ 40mm より薄いので、実際に破壊実験をして終局曲げモーメントを求めることにした。

5.3 疑似L型擁壁の終局曲げモーメント

疑似 L 型擁壁の底版を固定し、たて壁取り付け部から $185\sim 190\text{mm}$ の位置(**写真-5.3(a)**)に、始めは重量のある重りを載せていき、終盤に 1kg の重りを 1 枚ずつ载荷して(**写真-5.3(b)**)、破壊した荷重を測定した。



(a) 载荷位置(取付部より $185\sim 190\text{mm}$)



(b) 終盤の载荷状況(板重量 1kg)

写真-5.3 疑似 L 型擁壁の静的破壊実験(たて壁高さ 20cm 、延長 15cm 、肉厚 30mm)

表-5.1 に破壊実験結果を示す。**表-5.1** において、たて壁の自重は $0.15\text{m}\times 0.2\text{m}\times 0.03\text{m}\times 23\text{kN}/\text{m}^3=0.0207\text{kN}$ であり、たて壁自重の曲げモーメントは $20.7\text{N}\times 0.1\text{m}=2.1\text{N}\cdot\text{m}$ である。平均値より、疑似 L 型擁壁のたて壁の終局曲げモーメントは、 $133.3+2.1=135.4\text{N}\cdot\text{m}$ と決定した。ま

た、せん断力の平均値は $706.5 + 20.7 = 727.2\text{N}$ であった。

表-5.1 疑似L型擁壁の静的破壊実験結果(たて壁高さ 20cm, 延長 15cm, 肉厚 30mm)

	載荷重			たて壁自重		
	荷重 (N)	載荷位置 (m)	曲げモーメント (N・m)	自重 (N)	載荷位置 (m)	曲げモーメント (N・m)
No.1	756.3	0.185	139.9	20.7	0.100	2.1
No.2	713.0	0.190	135.5	20.7	0.100	2.1
No.3	722.8	0.190	137.3	20.7	0.100	2.1
No.4	633.9	0.190	120.4	20.7	0.100	2.1
平均	706.5		133.3	20.7		2.1

5.4 疑似L型擁壁の破壊形態

静的破壊実験後の疑似L型擁壁の破壊形状を写真-5.4に示す。たて壁背面のひび割れはNo.3の右側を除いて、たて壁取り付け部のハンチ部分からハンチの始まり部分で全幅にわたって発生し、ハンチ部分で発生したひび割れはたて壁前面の面取り部分に向かって、ハンチの始まり部分で発生したひび割れは前面に向かって最短距離で横断していた。ひび割れ箇所からたて壁を取壊して、配筋は普通鉄線(SWM-B) $\Phi 2.6\text{mm}$ が1本であることを確認した(写真-5.5)。

135.4N・mの曲げモーメントが作用した場合に、鉄線の有効高さを17mmとして許容応力度法で計算すると、たて壁に生じるコンクリートの圧縮応力度は 32.4N/mm^2 でコンクリートの設計基準強度 30N/mm^2 を超え、鉄線の引張応力度は 1611N/mm^2 で普通鉄線の引張強さ 540N/mm^2 をはるかに超えた。また、727.2Nのせん断力が作用した場合のコンクリートのせん断応力度は、 0.29N/mm^2 となり許容応力度 0.52N/mm^2 に収まった。この結果は、薄肉部材では許容応力度法が適合できないことを改めて示した。

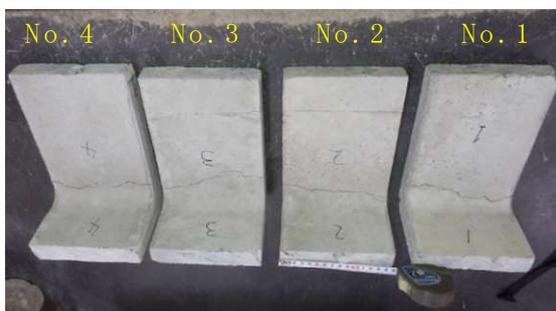


写真-5.4 実験後のひび割れ状況

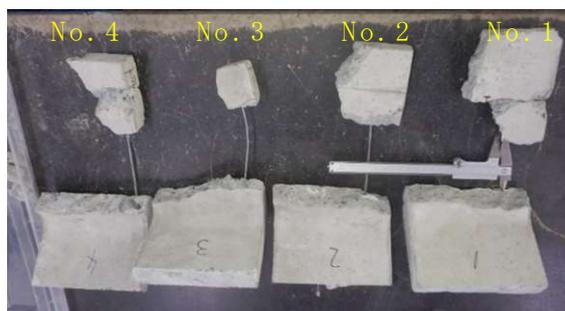


写真-5.5 配筋の確認

5.5 疑似L型擁壁が破壊する繰返し載荷重の推定

表-4.4 および表-4.5 では、載荷重 883N~1472N の繰返しにより、延長 2m 当りに作用するせん断力および曲げモーメントを示した。疑似L型擁壁においては、応力の振幅による断面力は延長 15cm あたり 1箇所とした。応力の振幅以外の値は、表-4.4 および表-4.5 の値を 15cm 分に換算して $15/200=0.075$ 倍にした。延長 15cm に修正した、疑似L型擁壁のたて壁に作用するせん断力および曲げモーメントを表-5.2 に示す。

表-5.2 疑似L型擁壁のたて壁に作用する断面力(延長 15cm)

荷重 (N)	曲げモーメント(N・m)				せん断力(N)			
	残留応力	応力の振幅	裏込め材	計	残留応力	応力の振幅	裏込め材	計
1,472	97.1	3.9	0.8	101.8	595	25	13	633
1,275	90.5	6.1	0.8	97.5	555	39	13	606
1,079	76.6	3.1	0.8	80.5	470	20	13	502
883	57.6	1.8	0.8	60.3	353	12	13	378

疑似L型擁壁が破壊する繰返し載荷重は、表-5.2 に示す各載荷重を繰返し載荷したときに、作用した曲げモーメントを用いて推定した。5.3 で求めた疑似L型擁壁のたて壁の終局曲げモーメント $135.4\text{N}\cdot\text{m}$ が作用する繰返し載荷重は、図-5.2 より 1875N となる。また、第2章の図2.15, 2.16, 2.19, 2.20, 2.25, 2.26, 2.29 などより、残留応力最大値が生じる載荷回数は 32~88 回程度で、この載荷回数の間は残留応力がほぼ一定なので、たて壁が破壊するまでに要する載荷回数は、多くの実験でたて壁に作用する曲げモーメントおよびせん断力がはじめに最大となった、載荷 30~40 回程度と推定した。

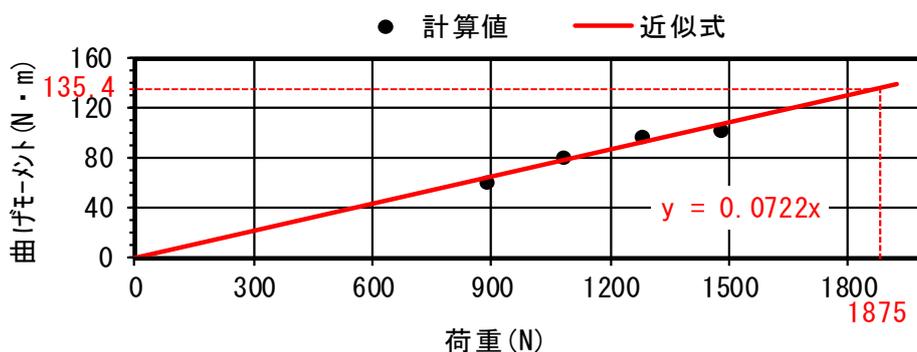


図-5.2 疑似L型擁壁が破壊する繰返し載荷重の推定

5.6 まとめ

プレキャストL型擁壁の破壊過程を確認するために疑似L型擁壁を作製して、静的破壊実験にて基準となる静的載荷時の終局曲げモーメントを求めた。実験で得られた終局曲げモーメントは想定より大きく、薄肉鉄筋コンクリート部材では許容応力度設計法が成り立たないことを検証できた。軽量形鋼の壁面に作用した残留応力最大値および応力の振幅最大値、さらに疑似L型擁壁の静的破壊実験結果より、たて壁高さ20cm、壁厚3cm、延長15cmの疑似L型擁壁は、裏込め材上に載荷重1875Nを30～40回程度繰返し載荷すれば、たて壁が破壊すると推定した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針(平成24年度版)，pp.39-49，丸善，2012.
- 2) 久田真，中田善久，川上洵，石川雅美，松山哲也，小野里憲一，伊藤始：委員会報告 プレキャストコンクリート製品の性能設計と利用技術研究委員会，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.20-25，2011.
- 3) 湯浅憲人，國府勝郎，森田秀明，宇治公隆：薄肉鉄筋コンクリート製品の曲げひび割れ耐力，土木学会第63回年次学術講演会概要集，pp.1183-1184，2008.9
- 4) 公益社団法人土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，pp.38-49，丸善，2017.
- 5) 田所雄治，國府勝郎，森田秀明，宇治公隆：薄肉鉄筋コンクリート製品の終局曲げ耐力，土木学会第63回年次学術講演会概要集，pp.1181-1182，2008.9
- 6) 宇治公隆，大野健太郎，中嶋彩乃，國府勝郎，清水和久：薄肉鉄筋コンクリート部材の終局曲げ耐力評価手法の提案，土木学会論文集E2，Vol.67，No.3，pp.361-373，2011.

第6章 疑似L型擁壁を用いた繰返し載荷実験

6.1 まえがき

軽量形鋼の壁面に作用した背面からの水平応力を基に、**第5章**において疑似L型擁壁は1875Nを30～40回程度繰返し載荷すれば、たて壁が破壊すると推定した。ここで、軽量形鋼の壁面と疑似L型擁壁のたて壁とでは曲げ剛性EI(弾性係数×断面二次モーメント)が異なるため、疑似L型擁壁のたて壁に作用する背面からの水平応力は、曲げ剛性が小さいことを考慮すると、大きく作用することが予想された。また、疑似L型擁壁が輪荷重により裏込め材を介して疲労するのであれば、1875Nより小さい繰返し載荷重で破壊するはずである。本章では軽量形鋼の箱の中に疑似L型擁壁を設置して、裏込め材に転圧を加えて埋戻した後、載荷重の大きさを変えて疑似L型擁壁のたて壁が破壊するまで繰返し載荷を続けた。実験中に、破壊するまでの背面からの水平応力および天端水平変位を測定し、最後に破壊時の載荷回数を記録した。

6.2 繰返し載荷実験装置

6.2.1 疑似L型擁壁の配置および載荷装置

まず、**第2章**の実験で使用した軽量形鋼の箱の中に、角パイプ75mm×75mm×3.2mmを2本と角パイプ19mm×19mm×1.6mmを、**写真-6.1**のように疑似L型擁壁の両側に6mmの隙間が空くように事前に配置した。たて壁背面と角パイプ75mm×75mm×3.2mmとは面が合うように配置されており、角パイプの中には裏込め材を充填した。軽量形鋼の箱の下部には、繰返し載荷時にかかと版が前面に移動しないように角パイプ30mm×30mm×2.3mmを設置し、軽量形鋼の箱の上部にはたて壁が破壊したときに転倒を支える角材を設置した。次に疑似L型擁壁をがたつかないように配置した後、軽量型鋼の壁面で使用した圧力計9個を配置した金属板を**写真-6.2**のように貼り付けた。このとき、圧力計の位置はたて壁天端から15mm, 30mm, 45mm, 60mm, 75mm, 95mm, 115mm, 135mm, 155mmとした。圧力計受圧面から試験輪中央までの最短水平距離は4cmであり、圧力計と配線の前面および疑似L型擁壁の両脇の隙間は、**写真-6.3**のように厚さ5mmのNRスポンジゴムで養生した。最後に、変位計を擁壁天端に設置した後、軽量形鋼の壁面で使用した



写真-6.1 角パイプの設置



写真-6.2 疑似L型擁壁と圧力計の設置

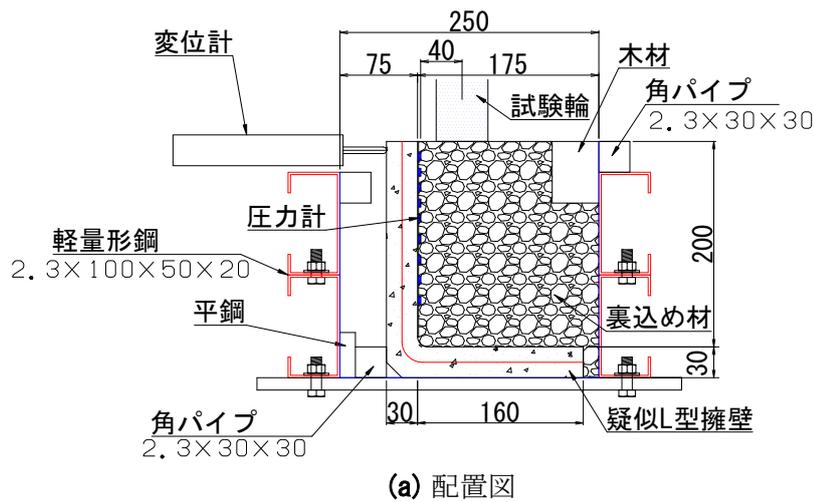
粒度調整碎石をフルイ目 5.6mm にかけた通過試料で、含水比 6%の裏込め材を使用して、写真-6.4のようにタンパにて1層の転圧厚さが5cm以下になるように埋戻しを行った。図-6.1に疑似L型擁壁の配置図と断面図を示す。鉄線の平均有効高さは17mmで、普通鉄線(SWM-B) $\phi 2.6\text{mm}$ が1本配筋されている。疑似L型擁壁の天端が軽量形鋼の箱の天端より3cm上がった分は、角パイプ 2.3mm \times 30mm \times 30mm を軽量形鋼の箱の天端に固定して高さ調整を行い、裏込め材の側方への移動対策として、裏込め材の端部には木材を設置した。



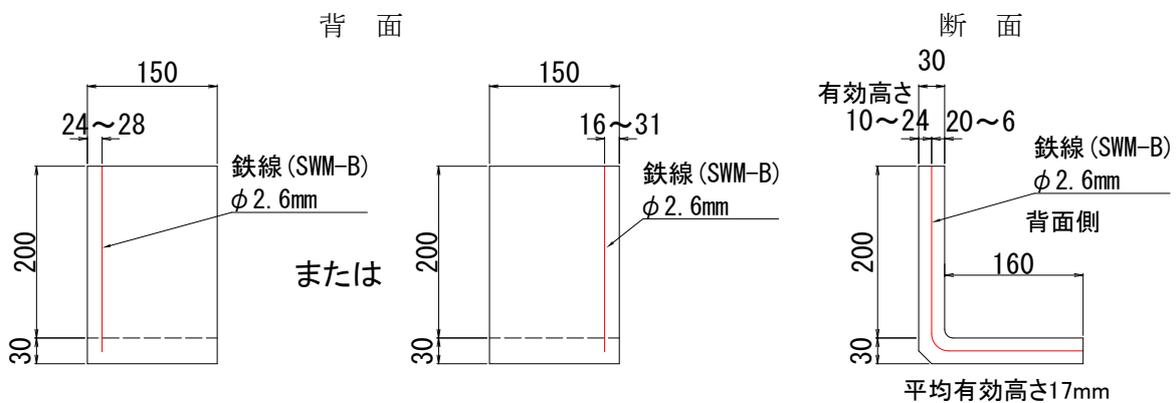
写真-6.3 圧力計、配線の養生



写真-6.4 タンパ転圧



(a) 配置図



(b) 断面図

図-6.1 疑似L型擁壁の配置と断面

載荷装置として使用したホイールトラッキング試験機の仕様を**表-6.1**に、載荷装置を**写真-6.5**に、制御盤および計測装置の全景を**写真-6.6**に示す。

表-6.1 ホイールトラッキング試験機の仕様

項目	緒元
駆動方式	クランク駆動水平直進往復方式
走行距離	230mm
走行速度	8回/min
載荷荷重	1692N～2073N
試験輪	直径φ200mm, 幅50mm, ゴム厚15mmのソリッドタイヤ

重りを載せないときの載荷重は687N(70kg)であり、載荷重を変える場合は、1枚18.1N～95.6Nの鋼板(**写真-6.7**)および9.8Nの薄鉄板を、試験輪上方に積み重ねて調整した。走行距離は、疑似L型擁壁の延長15cmを通過しきれるように23cmとした。



写真-6.5 ホイールトラッキング試験機(載荷装置)



写真-6.6 制御盤および計測装置



写真-6.7 鋼板の重り

6.2.2 水平応力の計測と繰返し載荷重の載荷方法

繰返す載荷重の大きさは、**図-5.2**において疑似L型擁壁が裏込め材を介して破壊する荷重を1875Nと推定していることから、1875Nに対して約50N間隔ごとに載荷重を設定し、重量比110.6%～90.2%(2073N～1692N)の範囲とした。実験を行う供試体は8個で、試験輪の走行は自動とし、8回/minの載荷速度で裏込め材上をたて壁に平行に繰返し走行させた。繰返し載荷の初期段階において、試験輪の走行で裏込め材が沈み込んだ場合は、試験機を止めて凹んだ箇所に裏込め材を補充し、表面を平らにしてから再び載荷を繰返した。そして、変位が急増したときを、疑似L型擁壁の破壊とみなして繰返し載荷を止めた。

変位計とメモリーレコーダは、軽量形鋼の壁面に作用した背面からの水平応力を測定したときと同じものを使用し、測定回数は2回/secとした。圧力計をスポンジゴムで養生した後、圧力計および変位計の値をリセットして、それぞれ0kN/m²および0mmとした。鉛直方向の背面からの水平応力および2か所の天端水平変位の計測は、裏込め材を投入する前から始め、タンパ転圧から繰返し載荷の過程を得て、たて壁が破壊するまで行った。測定した圧力x(kN/m²)は、スポンジゴム無しの圧力y(kN/m²)に**図-2.6**の直線式を用いて変換した。

6.3 繰返し載荷実験結果

繰返し載荷におけるたて壁の破壊は、無筋コンクリートのように突然で、たて壁取り付け部から折れる様相を示した。

6.3.1 たて壁の破壊形状

各繰返し載荷重によって、疑似L型擁壁の厚さ3cmの側面に発生したひび割れを**写真-6.8**および**写真-6.9**に、背面に発生したひび割れを**写真-6.10**に示す。今回の繰返し載荷実験においては、供試体 j(1692N)のみハンチの始まりでひび割れが発生し、厚さ3cmの壁を最短距離で横断するようにひび割れが発生した。ほかの7個の供試体は、ひび割れがたて壁取り付け部のハンチの部分で発生し、前面の面取り部分に向かって、概略斜め45°でひび割れが進展していた。

実物のプレキャストL型擁壁には前面に面取りがなく、天端付近に背面からの水平荷重を受けた場合には、ひび割れがハンチの始まりからたて壁背面に対し直角に入り、主鉄筋まで進展した後下向きに方向を変えて主鉄筋に沿って進展し、さらに下部底面まで到達することが報告されている¹⁾。このとき、ひび割れがたて壁前面および底版下面まで到達すると、崩壊に至ることも報告されている。本実験の疑似L型擁壁は前面に面取りがあるため、部材厚さの影響でひび割れ形態が異なると考えられる。



(a) 供試体 d(2073N(211.362kg))



(b) 供試体 f(2019N(205.803kg))



(c) 供試体 c(1967N(200.560kg))



(d) 供試体 g(1911N(194.749kg))

写真-6.8 疑似L型擁壁の側面に発生したひびわれ(2073N~1911N)



(e) 供試体 b(1855N(189.086kg))



(f) 供試体 h(1809N(184.423kg))



(g) 供試体 i(1757N(179.108kg))



(h) 供試体 j(1692N(172.512kg))

写真-6.9 疑似L型擁壁の側面に発生したひびわれ(1855N~1692N)

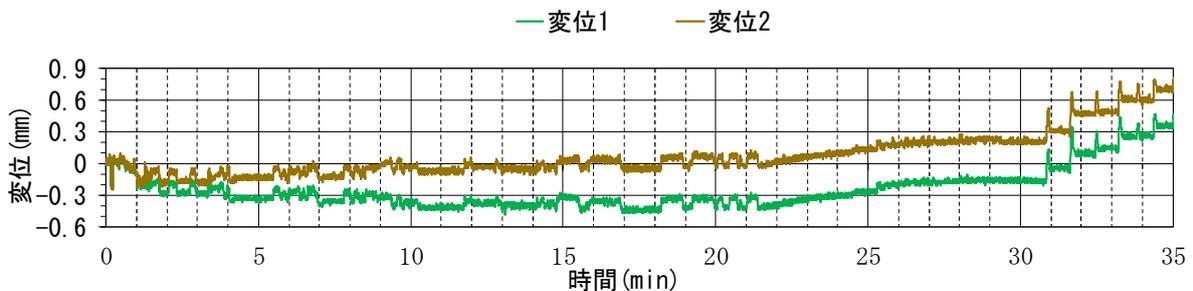


写真-6.10 疑似L型擁壁の背面に発生したひびわれ(左側から 2073N, 2019N, 1967N, 1911N, 1855N, 1809N, 1757N, 1692N)

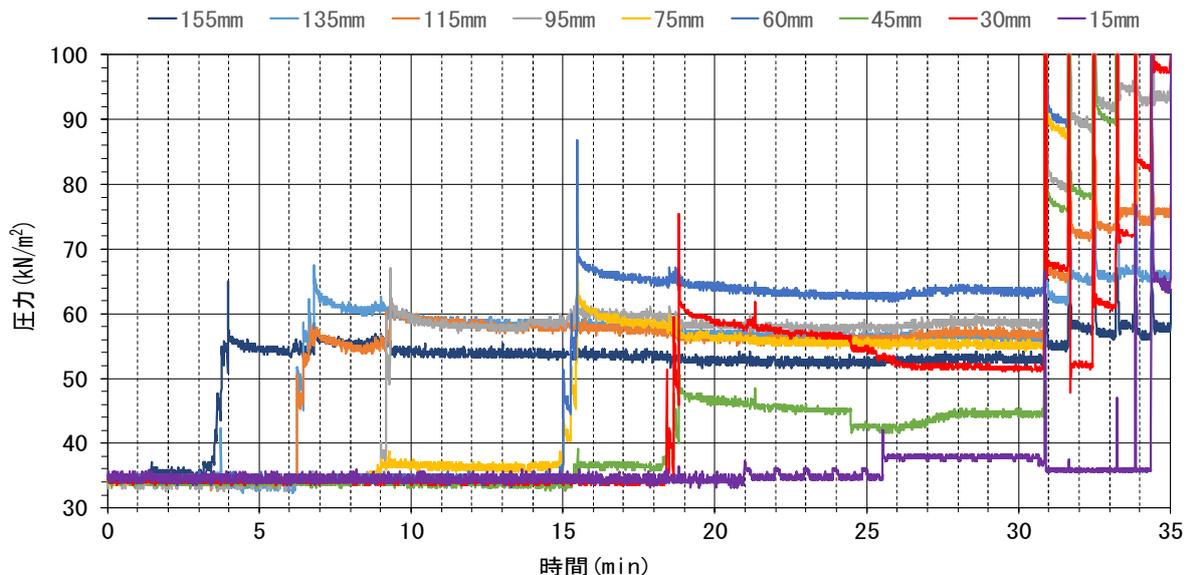
6. 3. 2 鉛直方向の水平応力と天端水平変位

(1) タンパ転圧時

輪荷重 1757N を繰返し载荷する前の、各深さにおけるタンパ転圧中の背面からの水平応力の時間変化を図-6.2(b)に、天端水平変位を図-6.2(a)に示す。図-6.2(b)では、深さ 20cm の裏込め材を、1 層の転圧後の厚さが 4cm 程度になるようにタンパ転圧を行っている。そのため、大きな応力の振幅が 5 箇所と、最後に表面の凹凸を平らにした後の転圧 1 箇所が存在する。タンパ転圧中における各深さの圧力計に作用した背面からの水平応力は、前面の土層が初めて転圧されたとき急上昇し、当該圧力計より上部の土層が巻きだされるにしたがって、タンパ転圧した瞬間の応力の振幅は減少した。また、1 回目の転圧後から残留応力が発生し、時間とともに漸減する傾向を示した。天端水平変位は埋戻しが進むにつれて微増し、経過時間約 18.5 分からの最上部の 5 層目の転圧で増加率が一番大きかった。



(a) たて壁の天端水平変位



(b) たて壁の各深さにおける水平応力

図-6.2 タンパ転圧中の水平応力と天端水平変位(1757N, 44回载荷, 実験 No. 419)

(2) 載荷重 1692N

輪荷重 1692N を繰返し載荷したとき、載荷 69 回で破壊した(写真-6.11)。破壊するまでのたて壁における天端水平変位の時間変化を図-6.3(a)に、各深さにおける背面からの水平応力の時間変化を図-6.3(b)に示す。計測開始から約 27.6 分までは、埋戻しおよび転圧に時間を要している。応力の振幅の間隔が広いところは、試験機を止めて試験輪通過後の窪みに裏込め材を補充しているか、表面の凹凸を修正している。

図-6.3(a)で凡例の変位 1 および変位 2 は、写真-6.11(b)で示す天端に設置された変位計の値を表している。埋戻し前 0mm だった水平変位は、載荷開始時に変位計 1 が 0.30mm、変位計 2 が 0.44mm であり、平均して 0.37mm となった。経過時間 40.6 分の降伏時の水平変位は、変位計 1 が 1.58mm、変位計 2 が 1.71mm であり、平均して 1.64mm となり 1.27mm 増加した。

図-6.3(b)の凡例は地表面からの深さを表している。深さ 45mm の図中の赤字は載荷回数を表している。裏込め材の深さ 60mm 以深の残留応力は、載荷 3 回までは急上昇し、8 回程度で最大値となり、載荷 30 回までは緩やかに減少し、その後漸減する傾向が見られた。深さ 45mm の残留応力は、載荷 6 回までは急上昇し、11 回で最大値となり、69 回で破壊するまでほぼ一定となった。深さ 30mm の残留応力は、載荷 12 回まで緩やかに上昇し、その後漸増して載荷 58 回で最大値となった後漸減した。深さ 15mm の残留応力は、載荷 3 回まで一旦減少したものの、その後緩やかに増加して載荷 58 回で最大値となった後漸減した。

裏込め材の深さ 60mm 以深の応力の振幅は、載荷 2 回で最大となり、破壊するまで載荷を重ねるごとに緩やかに減少した。深さ 45mm の応力の振幅は、載荷開始時は大きく、徐々に減少して載荷 30 回程度で最小値となり、その後破壊するまで徐々に増加した。深さ 30mm の応力の振幅は、載荷開始時は大きく、載荷 11 回程度で最小値となり、載荷 66 回で最大値となった後、破壊するまで漸減した。深さ 15mm の応力の振幅は、載荷開始時から小さく、載荷 5 回程度で最小値となり、載荷 66 回で最大値となった後、破壊するまで漸減した。

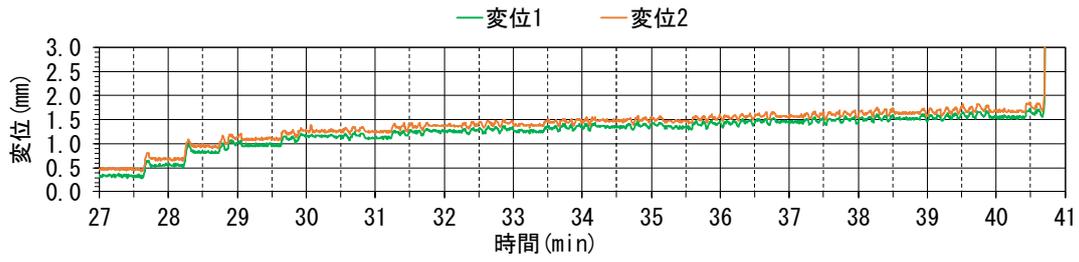


(a) 載荷状況

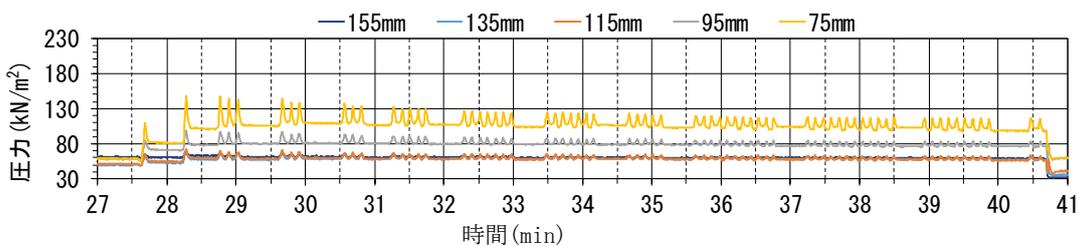
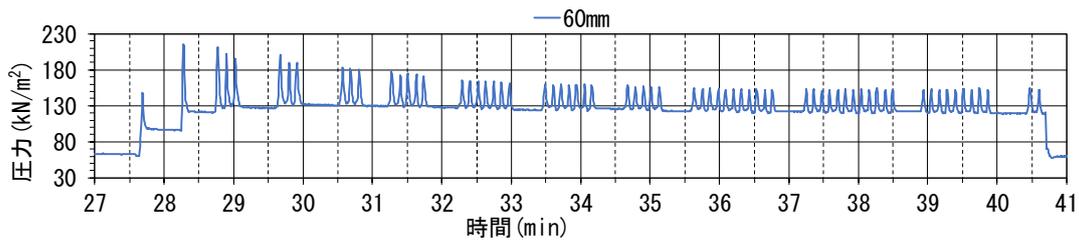
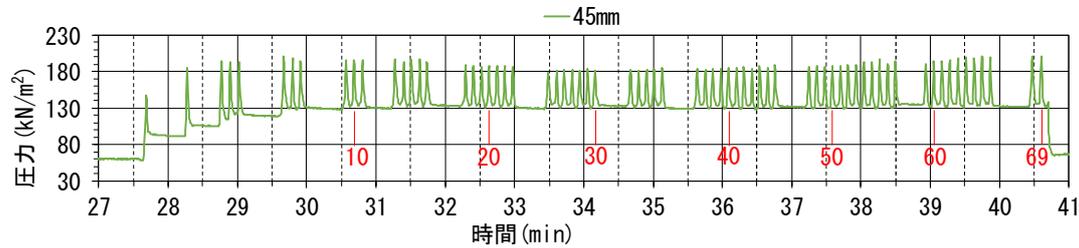
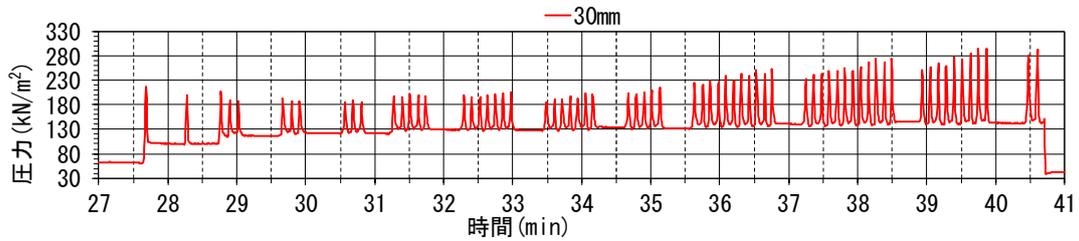
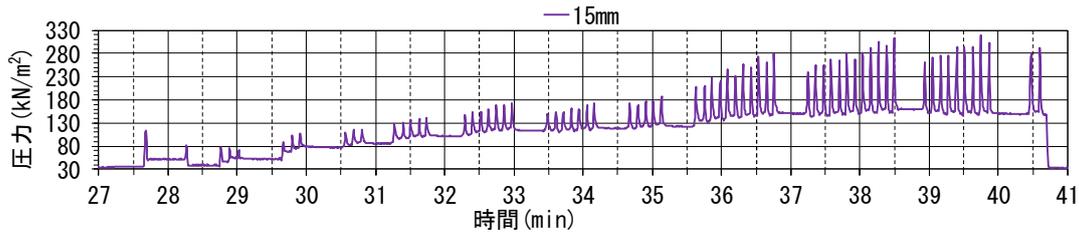


(b) 破壊直後のたて壁

写真-6.11 供試体 j(1692N, 載荷 69 回)



(a) たて壁の天端水平変位



(b) たて壁の各深さにおける水平応力

図-6.3 水平応力と天端水平変位の時間変化(供試体 j, 1692N, 69回破壊, 実験 No. 420)

破壊するまでの、たて壁における背面からの水平応力と天端水平変位の関係を図-6.4に示す。凡例は地表面からの深さを表し、天端水平変位は変位計1の測定値と変位計2の測定値の平均としている。天端水平変位が0.3mmより小さいときの水平応力の増加は、タンパ転圧によるものである。各深さに共通することは、残留応力がピークとなるまでは、試験輪が圧力計に近づくにつれて、天端水平変位と残留応力は増加した。そして、試験輪が圧力計から遠ざかるにつれて、天端水平変位は一旦小さくなるけれども残留応力はほとんど下がらなかった。残留応力がピークを越えた場合は、天端水平変位が増減を繰り返しながら少しずつ増加しても、残留応力および応力の振幅は载荷を重ねるごとに減少した。

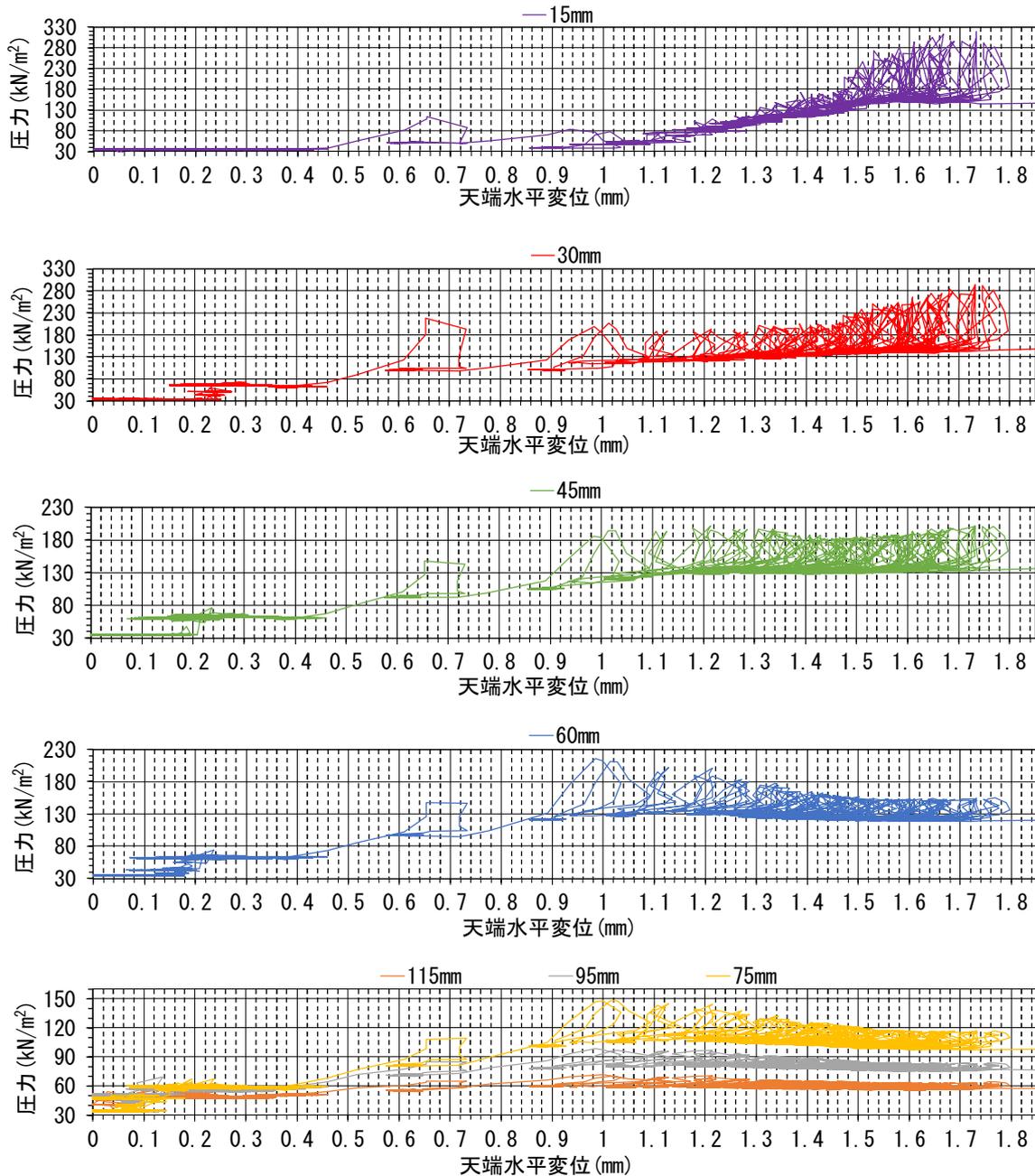


図-6.4 1692Nにおける水平応力と天端水平変位の関係(供試体 j, 69回破壊, 実験 No. 420)

(3) 載荷重 1757N

輪荷重 1757N を繰返し載荷したとき、載荷 44 回で破壊した(写真-6.12)。破壊するまでのたて壁における天端水平変位の時間変化を図-6.5(a)に、各深さにおける背面からの水平応力の時間変化を図-6.5(b)に示す。計測開始から約 30.8 分までは、埋戻しおよび転圧に時間を要している。応力の振幅の間隔が広いところは、試験機を止めて試験輪通過後の窪みに裏込め材を補充しているか、表面の凹凸を修正している。

図-6.5(a)で凡例の変位 1 および変位 2 は、写真-6.12(b)で示す天端に設置された変位計の値を表している。変位計 1 の水平変位は載荷開始時に -0.16mm であり、経過時間 39.70 分の破壊時は 1.10mm で 1.26mm 増加した。変位計 2 の水平変位は載荷開始時に 0.20mm であり、破壊時は 1.50mm で 1.30mm 増加した。二つを平均すると 1.28mm の増加となった。

図-6.5(b)の凡例は地表面からの深さを表し、深さ 45mm の図中の赤字は載荷回数を表している。裏込め材の深さ 60mm 以深の残留応力は、載荷 3 回までは緩やかに上昇した後 7 回程度で最大値となり、載荷 25 回までは緩やかに減少し、その後漸減する傾向が見られた。深さ 45mm の残留応力は、載荷 6 回までは緩やかに上昇した後 7 回で最大値となり、44 回で破壊するまでほぼ一定となった。深さ 30mm 以浅の残留応力は、載荷 14 回まで緩やかに上昇した後 43 回までほぼ一定で、載荷 44 回後に減少した。

裏込め材の深さ 75mm 以深の応力の振幅は、載荷 2 回で最大値となった後、載荷 20 回まで緩やかに減少し、その後破壊するまで漸減した。深さ 60mm の応力の振幅は、載荷 3 回で最大値となった後、載荷 20 回まで緩やかに減少し、その後破壊するまで漸減した。深さ 45mm の応力の振幅は、載荷開始時は大きく、徐々に減少して載荷 25 回程度で最小値となり、その後破壊するまで徐々に増加した。深さ 30mm 以浅の応力の振幅は、載荷開始時は大きく、載荷 3~4 回程度で最小値となり、載荷 33 回前後で最大値となった後、載荷 44 回で破壊するまで減少した。

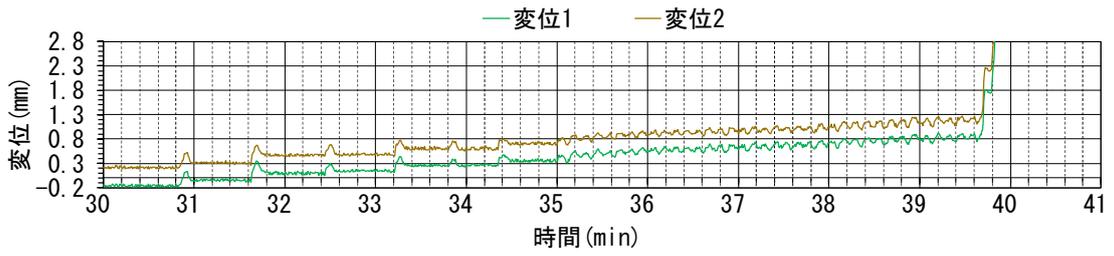


(a) 載荷状況

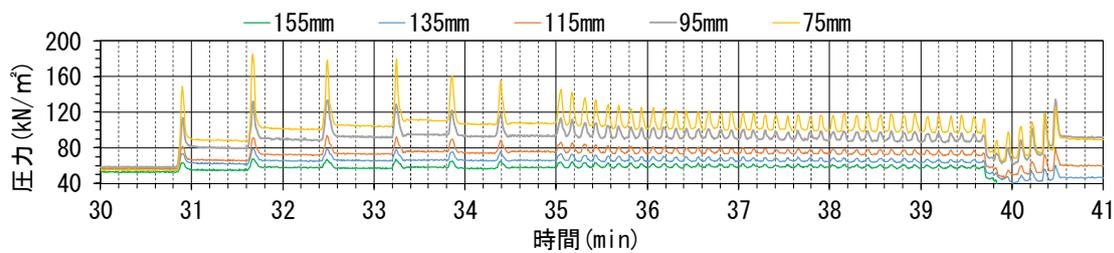
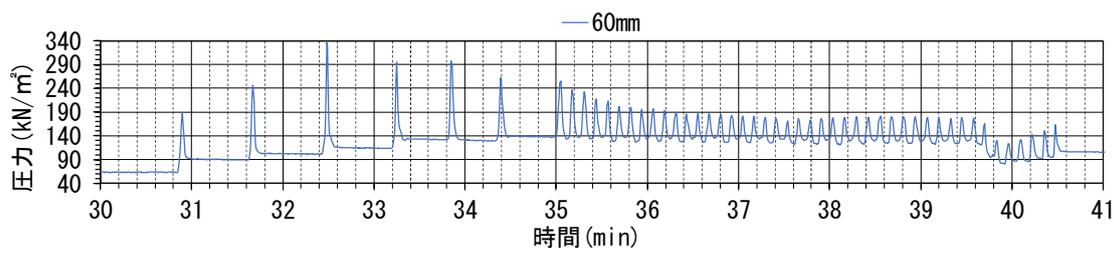
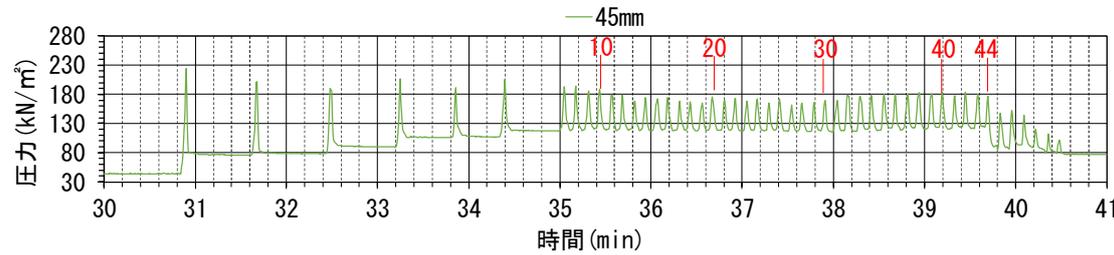
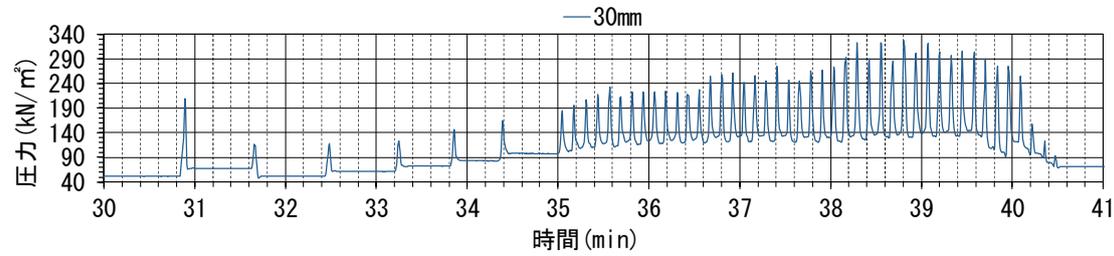
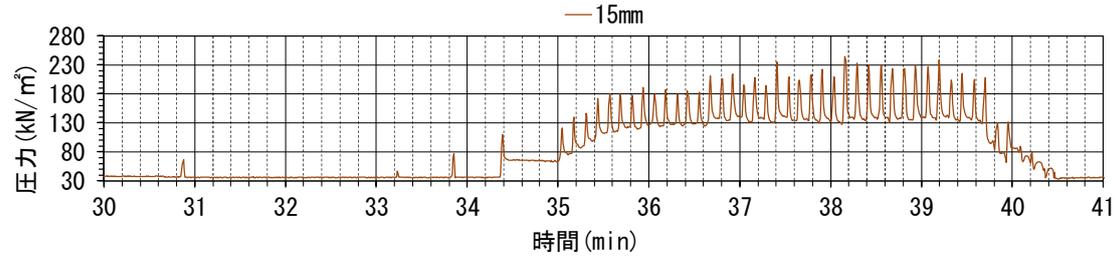


(b) 破壊直後のたて壁

写真-6.12 供試体 i (1757N, 載荷 44 回)



(a) たて壁の天端水平変位



(b) たて壁の各深さにおける水平応力

図-6.5 水平応力と天端水平変位の時間変化(供試体 i, 1757N, 44 回破壊, 実験 No. 419)

破壊するまでの、たて壁における背面からの水平応力と天端水平変位の関係を図-6.6に示す。凡例は地表面からの深さを表し、天端水平変位は変位計1の測定値と変位計2の測定値の平均としている。天端水平変位が0.08mm以下で水平応力が一定の部分、タンパ転圧によるものである。1692Nの実験結果と同様に、残留応力がピークとなるまでは、試験輪が圧力計に近づくにつれて、天端水平変位と残留応力は増加した。そして、試験輪が圧力計から遠ざかるにつれて、天端水平変位は一旦小さくなるけれども残留応力はほとんど下がらなかった。残留応力がピークを越えた場合は、天端水平変位が増減を繰り返しながら少しずつ増加しても、残留応力および応力の振幅は载荷を重ねるごとに減少した。

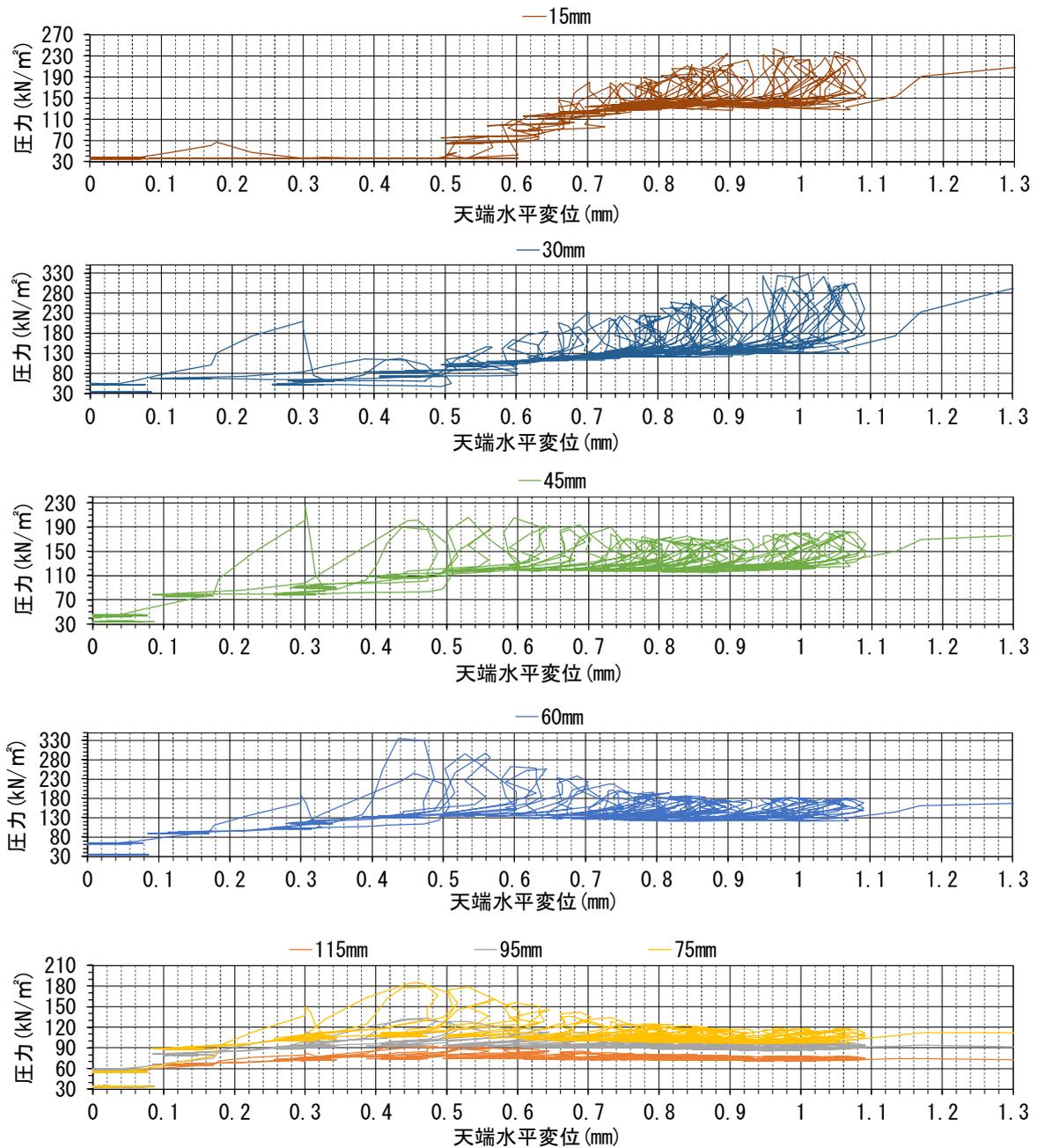


図-6.6 1757Nにおける水平応力と天端水平変位の関係(供試体 j, 44回破壊, 実験 No. 419)

(4) 載荷重 1809N

輪荷重 1809N を繰返し載荷したとき、載荷 36 回で破壊した(写真-6.13)。破壊するまでのたて壁における天端水平変位の時間変化を図-6.7(a)に、各深さにおける背面からの水平応力の時間変化を図-6.7(b)に示す。計測開始から約 32.0 分までは、埋戻しおよび転圧に時間を要している。応力の振幅の間隔が広いところは、試験機を止めて試験輪通過後の窪みに裏込め材を補充しているか、表面の凹凸を修正している。

図-6.7(a)で凡例の変位 1 および変位 2 は、写真-6.13(b)で示す天端に設置された変位計の値を表している。変位計 1 の水平変位は載荷開始時に -0.07mm であり、経過時間 48.38 分の破壊時は 1.44mm で 1.51mm 増加した。変位計 2 の水平変位は載荷開始時に 0.03mm であり、破壊時は 1.41mm で 1.38mm 増加した。二つを平均すると 1.45mm の増加となった。

図-6.7(b)の凡例は、地表面からの深さを表している。深さ 45mm の図中の赤字は、載荷回数を表している。裏込め材の深さ 60mm 以深の残留応力は、載荷 3 回までは緩やかに上昇して 4 回程度で最大値となり、載荷 14 回までは緩やかに減少し、その後破壊するまで漸減する傾向が見られた。深さ 45mm の残留応力は、載荷 6 回までは緩やかに上昇し、破壊直前の載荷 35 回で最大値となり、載荷 36 回目から大きく減少した。深さ 30mm の残留応力は、載荷 12 回まで緩やかに上昇し、その後漸増して載荷 35 回で最大値となった。深さ 15mm の残留応力は、載荷 12 回まで緩やかに上昇し、一旦下降した後再び上昇して載荷 24 回で最大値となった後、破壊するまで減少し続けた。

裏込め材の深さ 75mm 以深の応力の振幅は、載荷 3 回で最大値となった後、載荷 14 回まで緩やかに減少し、その後破壊するまで漸減した。深さ 60mm の応力の振幅は、載荷 3 回で最大値となった後、載荷 20 回まで緩やかに減少し、その後破壊するまで漸減した。深さ 45mm の応力の振幅は、載荷開始時は大きく、徐々に減少して載荷 13 回程度で最小値となり、その後破壊するまで徐々に増加した。深さ 30mm の応力の振幅は、載荷開始時は小さく、載荷を重ねるごとに増加して、載荷 34 回で最大値となった後、破壊するまで急激に減少した。深さ 15mm の応力の振幅は、載荷開始時は小さく、載荷を重ねるごとに増加して、載荷 25 回で最大値となった後、破壊するまで減少した。

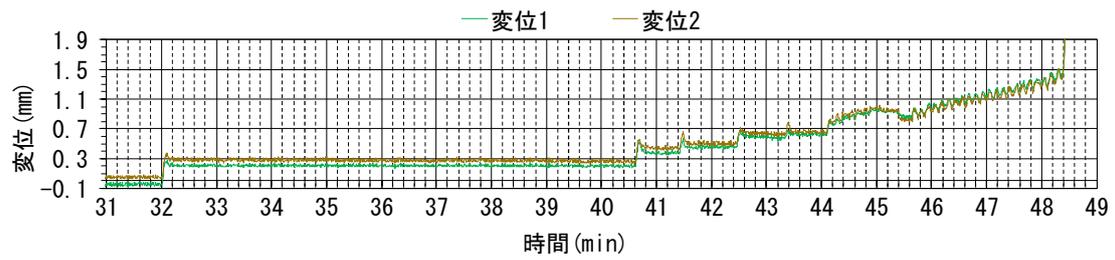


(a) 載荷状況

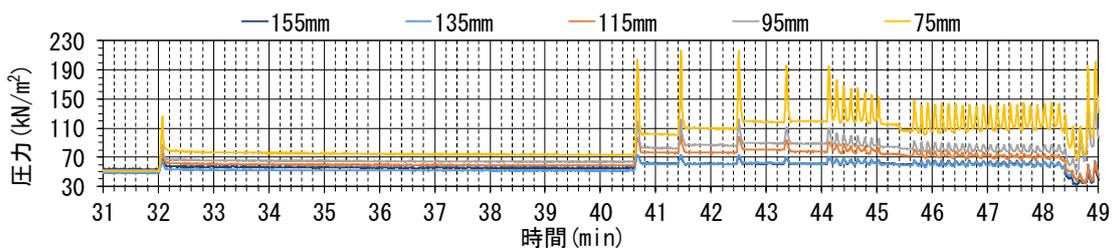
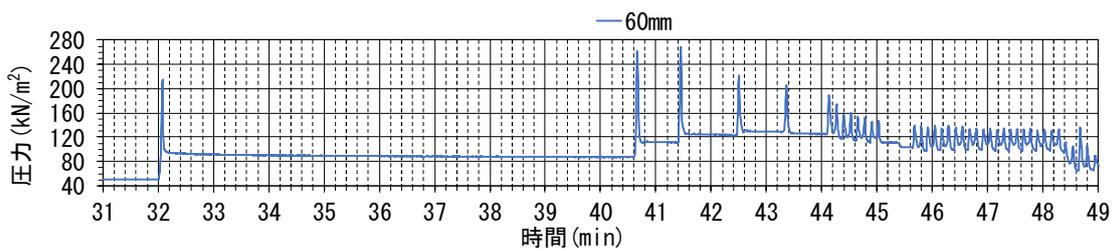
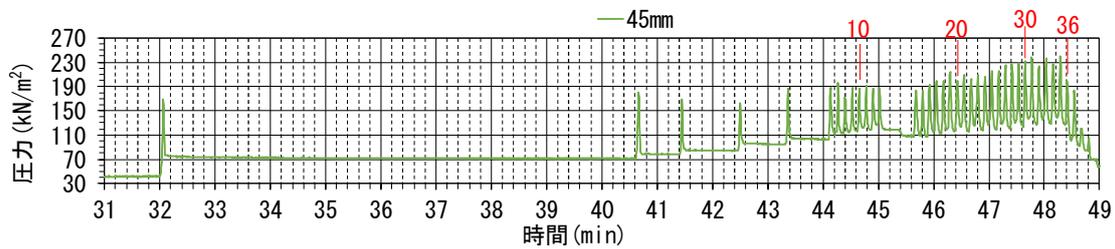
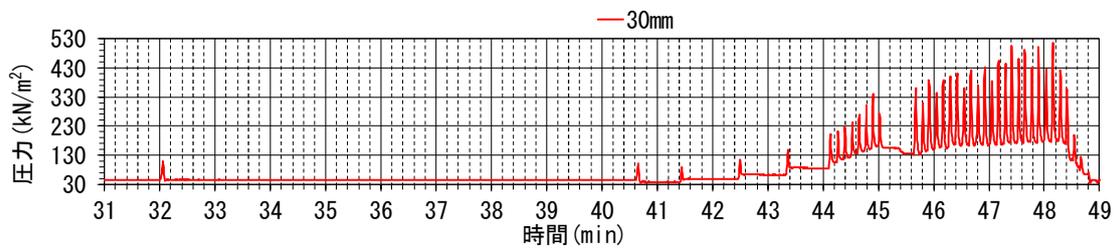
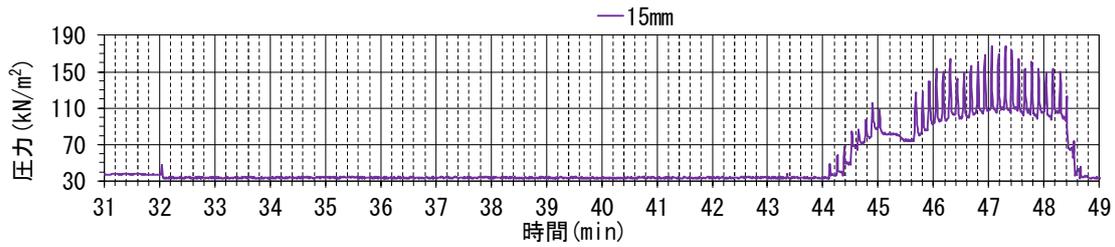


(b) 破壊直後のたて壁

写真-6.13 供試体 h(1809N, 載荷 36 回)



(a) たて壁の天端水平変位



(b) たて壁の各深さにおける水平応力

図-6.7 水平応力と天端水平変位の時間変化(供試体 h, 1809N, 36 回破壊, 実験 No. 418)

破壊するまでの、たて壁における背面からの水平応力と天端水平変位の関係を図-6.8に示す。凡例は地表面からの深さを表し、天端水平変位は変位計1の測定値と変位計2の測定値の平均としている。天端水平変位が0.04mm以下で水平応力が一定の部分、タンパ転圧によるものである。1692Nおよび1757Nの実験結果と同様に、残留応力がピークとなるまでは、試験輪が圧力計に近づくとつれて、天端水平変位と残留応力は増加した。そして、試験輪が圧力計から遠ざかるにつれて、天端水平変位は一旦小さくなるけれども残留応力はほとんど下がらなかった。残留応力がピークを越えた場合は、天端水平変位が増減を繰り返しながら少しずつ増加しても、残留応力および応力の振幅は载荷を重ねるごとに減少した。

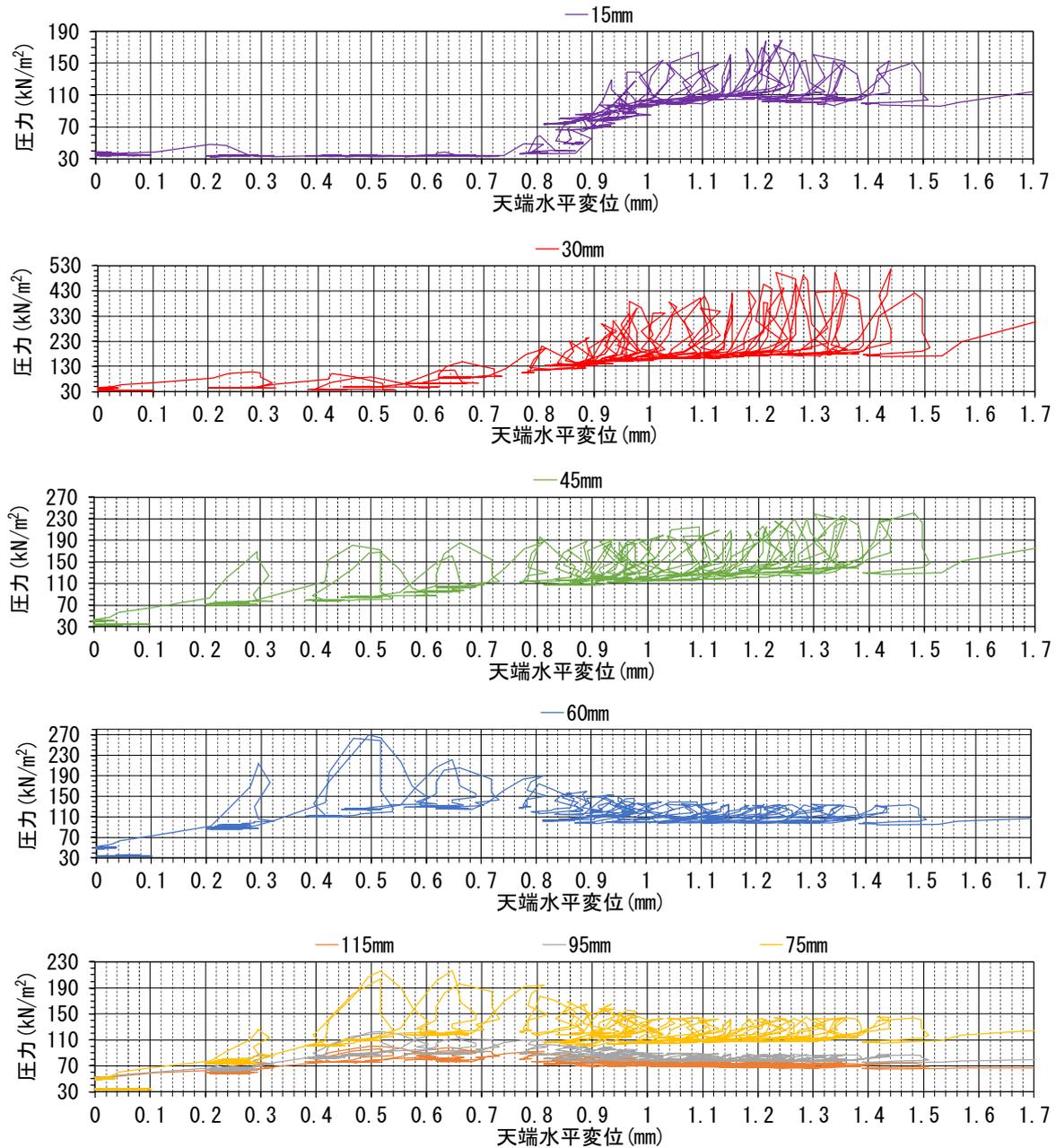


図-6.8 1809Nにおける水平応力と天端水平変位の関係(供試体h, 36回破壊, 実験No.418)

(5) 載荷重 1855N

輪荷重 1855N を繰返し載荷したとき、載荷 32 回で破壊した(写真-6.14)。破壊するまでのたて壁における天端水平変位の時間変化を図-6.9(a)に、各深さにおける背面からの水平応力の時間変化を図-6.9(b)に示す。計測開始から約 46.8 分までは、埋戻しおよび転圧に時間を要している。応力の振幅の間隔が広いところは、試験機を止めて試験輪通過後の窪みに裏込め材を補充しているか、表面の凹凸を修正している。

図-6.9(a)で凡例の変位 1 および変位 2 は、写真-6.14(b)で示す天端に設置された変位計の値を表している。変位計 1 の水平変位は載荷開始時に 0.09mm であり、破壊直前の経過時間 63.55 分では 2.08mm で 1.99mm 増加した。変位計 2 の水平変位は載荷開始時に -0.07mm であり、破壊時は 1.97mm で 2.04mm 増加した。二つを平均すると 2.02mm の増加となった。

図-6.9(b)の凡例は地表面からの深さを表し、深さ 45mm の図中の赤字は載荷回数を表している。裏込め材の深さ 60mm 以深の残留応力は、載荷 3 回までは緩やかに上昇して 10 回程度で最大値となり、その後破壊するまで漸減する傾向が見られた。深さ 45mm の残留応力は、載荷 5 回までは急上昇し、載荷 10 回で最大値となった後、載荷 32 回でたて壁が破壊するまで減少した。深さ 30mm の残留応力は、載荷 10 回まで緩やかに上昇し、その後漸増して載荷 14 回で最大値となった後は破壊するまで漸減した。深さ 15mm の残留応力は、破壊する直前の載荷 31 回まで緩やかに上昇した。

裏込め材の深さ 75mm 以深の応力の振幅は、載荷 2 回で最大値となった後載荷 10 回まで緩やかに減少し、その後破壊するまで漸減した。深さ 60mm の応力の振幅は、載荷 2 回で最大値となった後、載荷 12 回まで緩やかに減少し、その後破壊するまで漸減した。深さ 45mm の応力の振幅は、載荷 2 回で最大値となった後は載荷 16 回まで緩やかに減少し、その後破壊するまで漸減した。深さ 30mm の応力の振幅は、載荷を重ねるごとに増加して載荷 6 回で最大値となった後、載荷 9 回まで緩やかに減少した。減少後載荷 14 回まで再び増加したが載荷 14 回以後減少に転じて、載荷 20 回以後は破壊するまで一定となった。深さ 15mm の応力の振幅は、載荷開始時は小さく、載荷を重ねるごとに増加して、載荷 14 回で減少に転じた。載荷 17 回から再び増加に転じ、載荷 29 回で最大値となった後、破壊するまで急激に減少した。

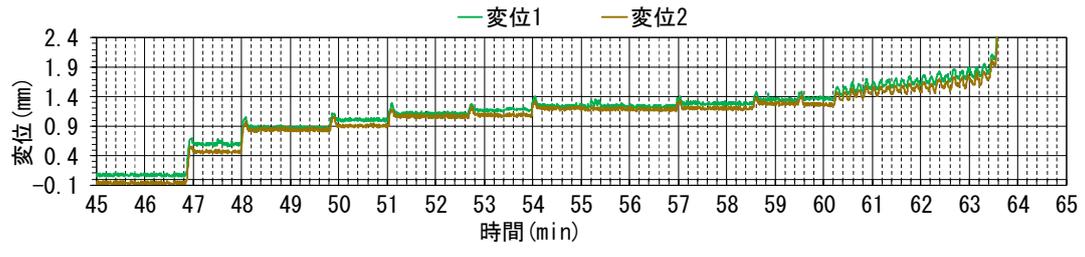


(a) 載荷状況

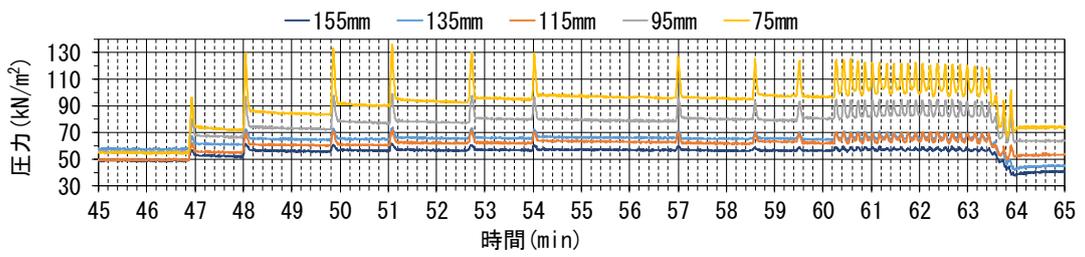
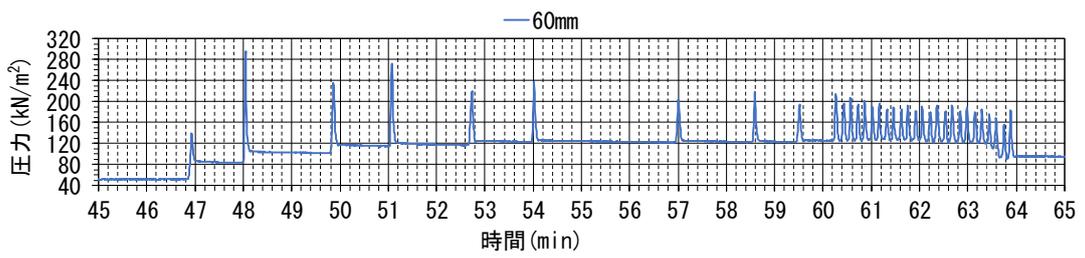
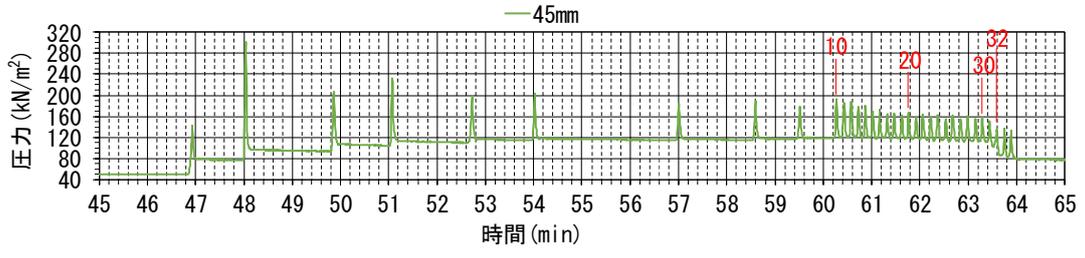
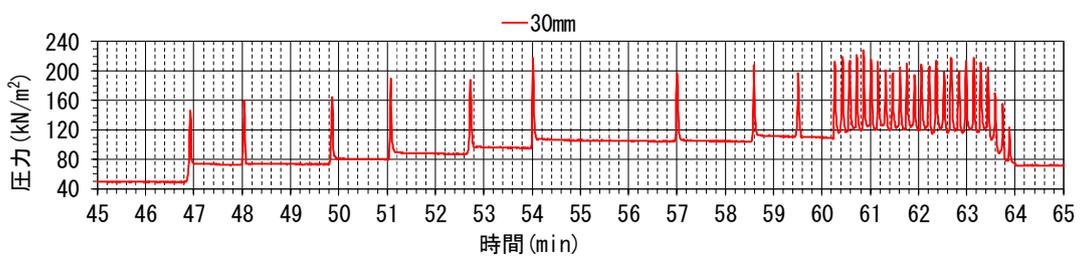
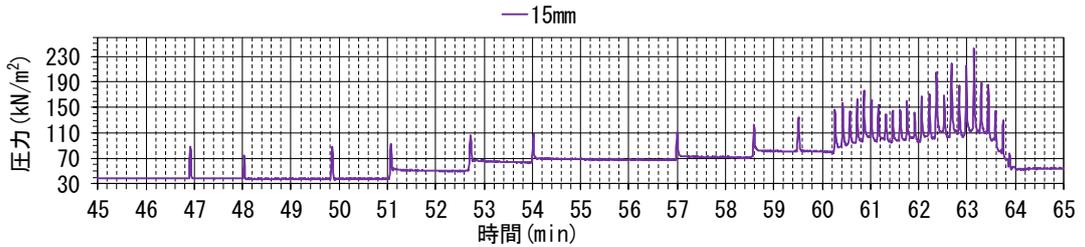


(b) 破壊直後のたて壁

写真-6.14 供試体 b(1855N, 載荷 32 回)



(a) たて壁の天端水平変位



(b) たて壁の各深さにおける水平応力

図-6.9 水平応力と天端水平変位の時間変化(供試体 b, 1855N, 32 回破壊, 実験 No. 404)

破壊するまでの、たて壁における背面からの水平応力と天端水平変位の関係を図-6.10に示す。凡例は地表面からの深さを表し、天端水平変位は変位計1の測定値と変位計2の測定値の平均としている。1692N~1809Nの実験結果と同様に、残留応力がピークとなるまでは、試験輪が圧力計から遠ざかるにつれて、天端水平変位と残留応力は増加した。そして、試験輪が圧力計から遠ざかるにつれて、天端水平変位は一旦小さくなるが残留応力はほとんど下がらなかった。残留応力がピークを越えた場合は、天端水平変位が増減を繰り返しながら少しずつ増加しても、残留応力および応力の振幅は载荷を重ねるごとに減少した。

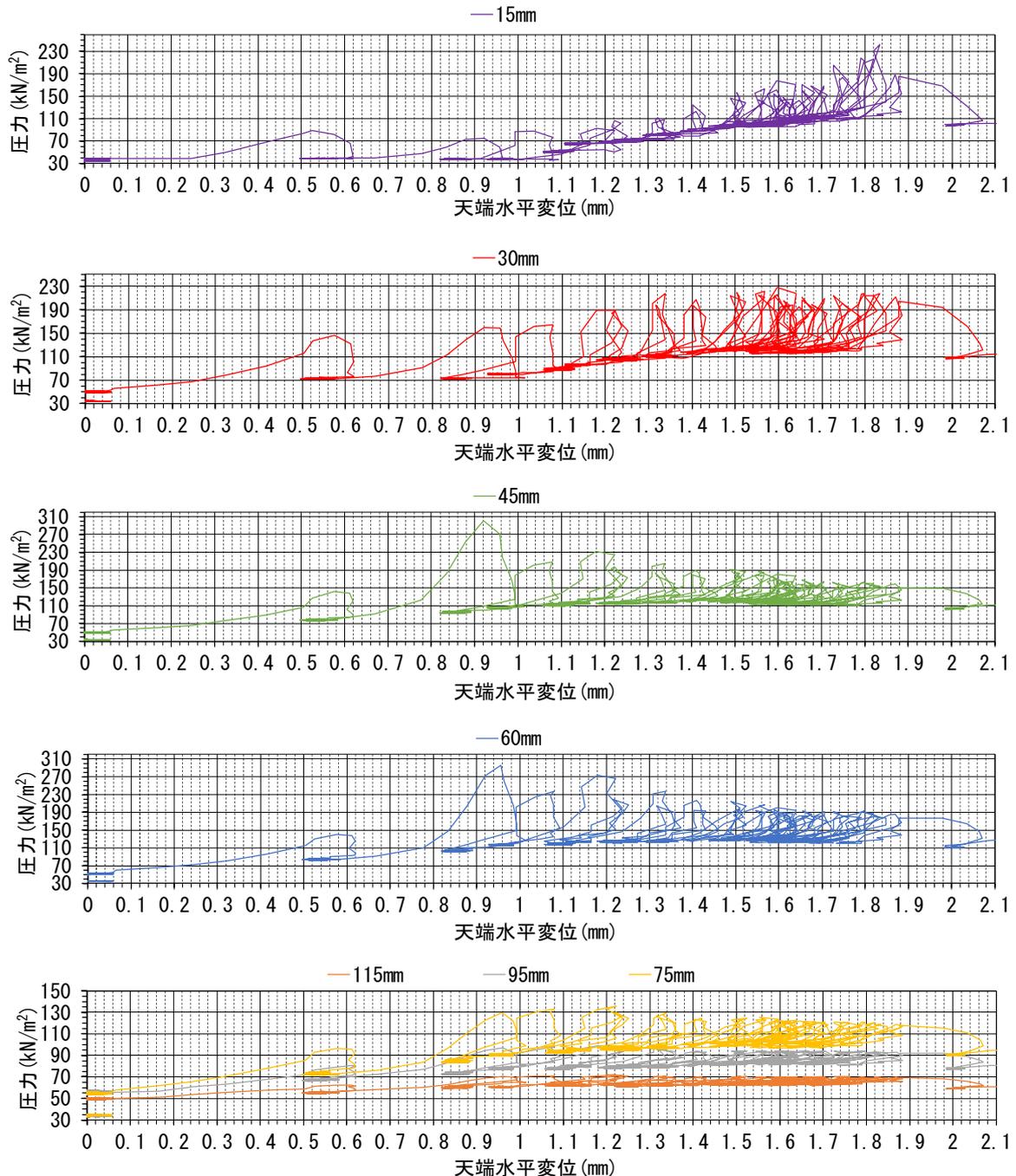


図-6.10 1855Nにおける水平応力と天端水平変位の関係(供試体b, 32回破壊, 実験No.404)

(6) 載荷重 1911N

輪荷重 1911N を繰返し載荷したとき、載荷 33 回で破壊した(写真-6.15)。破壊するまでのたて壁における天端水平変位の時間変化を図-6.11(a)に、各深さにおける背面からの水平応力の時間変化を図-6.11(b)に示す。計測開始から約 42.7 分までは、埋戻しおよび転圧に時間を要している。応力の振幅の間隔が広いところは、試験機を止めて試験輪通過後の窪みに裏込め材を補充しているか、表面の凹凸を修正している。

図-6.11(a)で凡例の変位 1 および変位 2 は、写真-6.15(b)で示す天端に設置された変位計の値を表している。変位計 1 の水平変位は載荷開始時に 0.0mm であり、経過時間 52.31 分の破壊時は 2.03mm で 2.03mm 増加した。変位計 2 の水平変位は載荷開始時に 0.11mm であり、破壊時は 2.08mm で 1.97mm 増加した。二つを平均すると 2.00mm の増加となった。

図-6.11(b)の凡例は地表面からの深さを表している。深さ 45mm の図中の赤字は載荷回数を表している。裏込め材の深さ 60mm 以深の残留応力は、載荷 2 回までは緩やかに上昇して 4 回程度で最大値となり、その後載荷 33 回で破壊するまで漸減する傾向が見られた。深さ 45mm の残留応力は、載荷 6 回までは緩やかに上昇し、その後載荷 33 回でたて壁が破壊するまで漸増した。深さ 30mm の残留応力は、載荷 12 回まで緩やかに上昇し、その後載荷 33 回で破壊するまで漸増した。深さ 15mm の残留応力は、載荷 20 回まで緩やかに上昇し、その後たて壁が載荷 33 回で破壊するまで漸増した。

裏込め材の深さ 60mm 以深の応力の振幅は、載荷 2 回で最大値となった後、載荷 15 回まで緩やかに減少し、その後破壊するまで漸減した。深さ 45mm の応力の振幅は、載荷 2 回で一度最大値となり、載荷 13 回まで緩やかに減少し、その後載荷 33 回で破壊するまで緩やかに増加した。深さ 30mm の応力の振幅は、載荷 1 回目に大きく作用したが載荷 3 回で最小になり、その後緩やかに増加して、破壊する直前の載荷 31 回で最大値になった後ほぼ一定となった。深さ 15mm の応力の振幅は、載荷開始時は小さく、載荷を重ねるごとに増加して、載荷 30 回で減少に転じた。

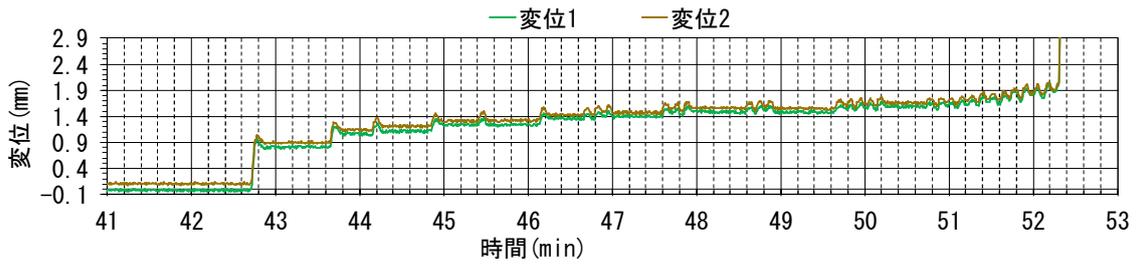


(a) 載荷状況

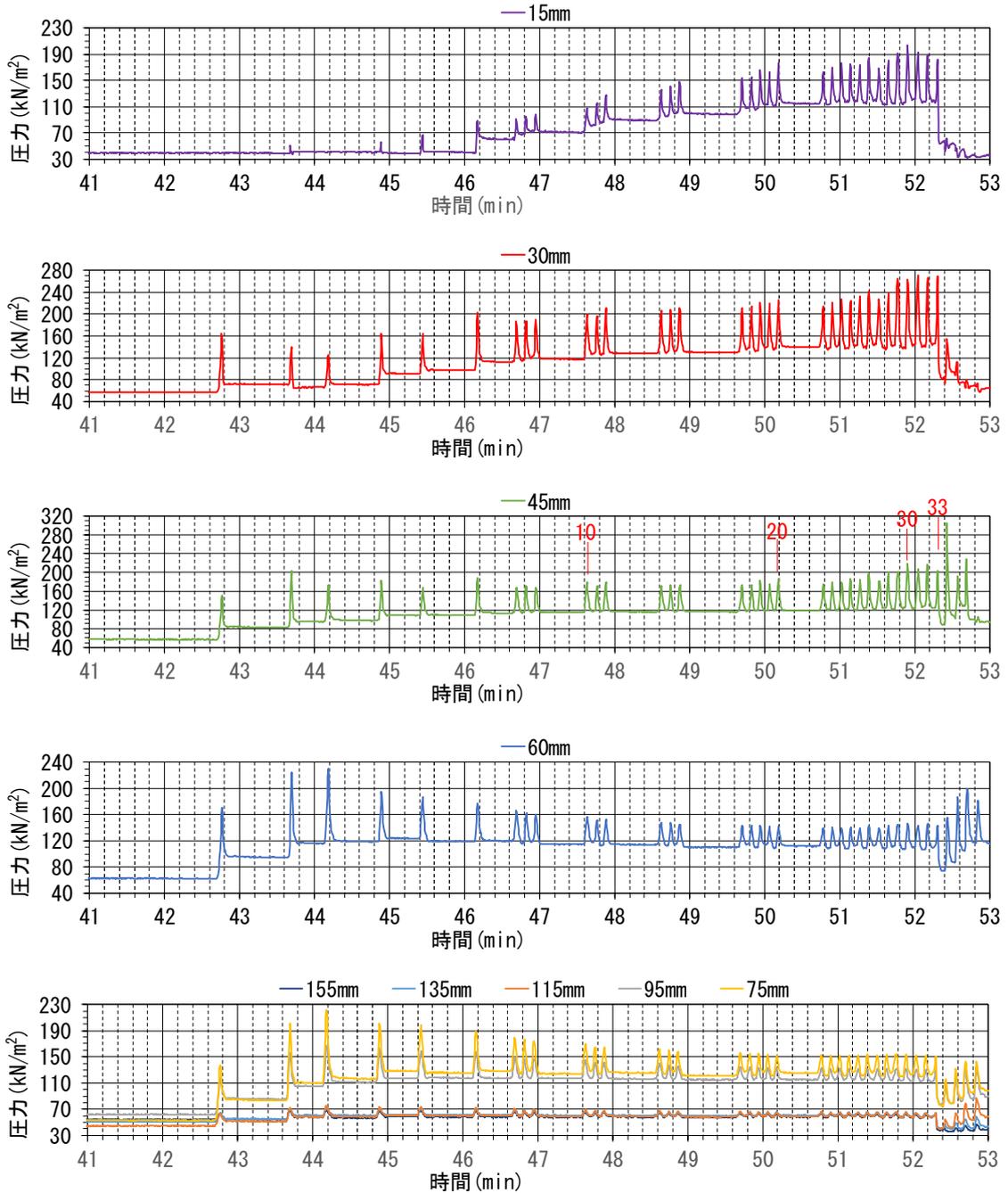


(b) 破壊直後のたて壁

写真-6.15 供試体 g(1911N, 載荷 33 回)



(a) たて壁の天端水平変位



(b) たて壁の各深さにおける水平応力

図-6.11 水平応力と天端水平変位の時間変化(供試体 g, 1911N, 33 回破壊, 実験 No. 417)

破壊するまでの、たて壁における背面からの水平応力と天端水平変位の関係を図-6.12 に示す。凡例は地表面からの深さを表し、天端水平変位は変位計1の測定値と変位計2の測定値の平均としている。天端水平変位が0.11mm以下で水平応力が一定の部分、タンパ転圧によるものである。1692N~1855Nの実験結果と同様に、残留応力がピークとなるまでは、試験輪が圧力計に近づくにつれて、天端水平変位と残留応力は増加した。そして、試験輪が圧力計から遠ざかるにつれて、天端水平変位は一旦小さくなるが残留応力はほとんど下がらなかった。残留応力がピークを越えたとき、天端水平変位が増減を繰り返しながら少しずつ増加しても、残留応力および応力の振幅は载荷を重ねるごとに減少した。

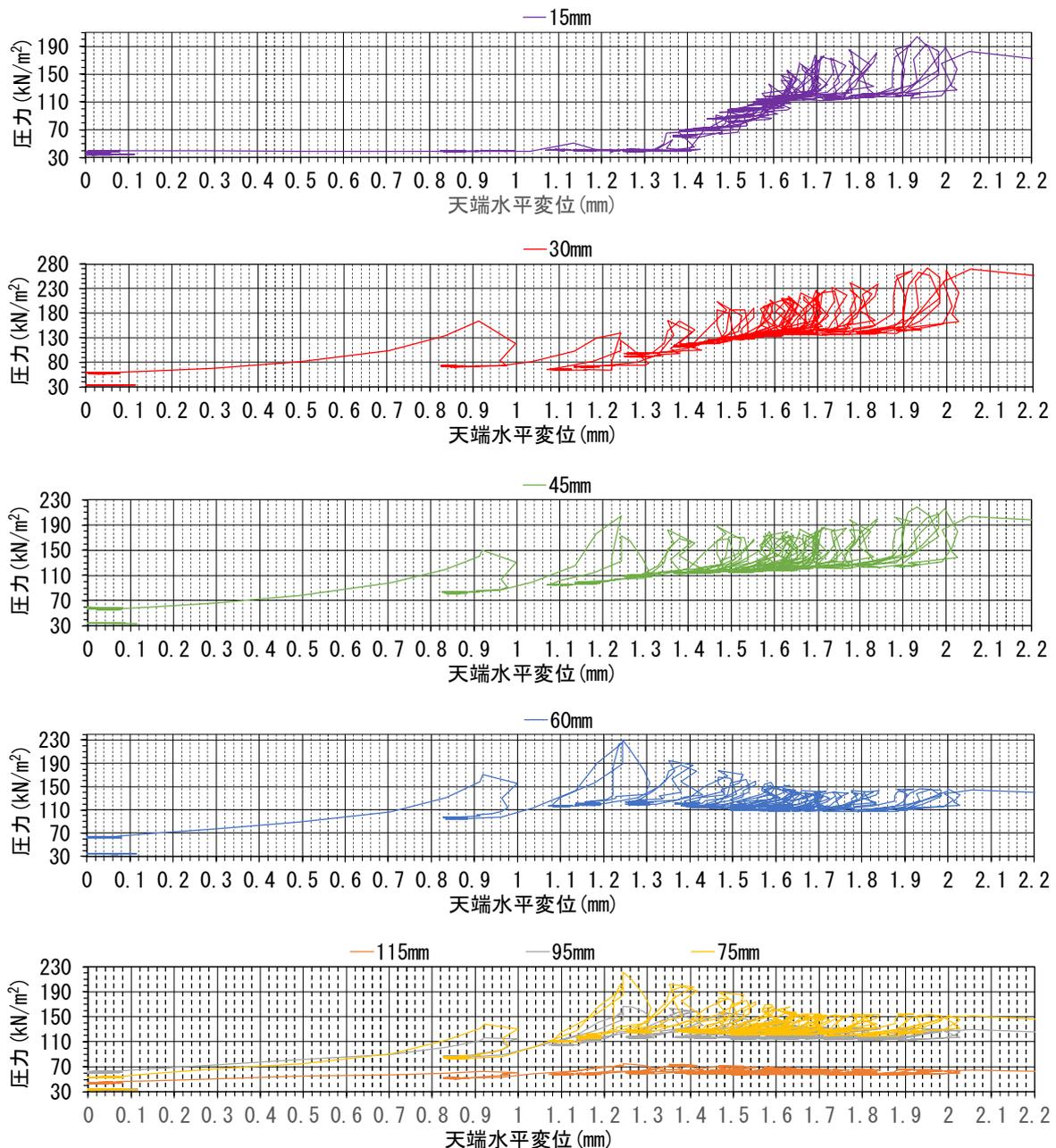


図-6.12 1911Nにおける水平応力と天端水平変位の関係(供試体 g, 33 回破壊, 実験 No. 417)

(7) 載荷重 1967N

輪荷重 1967N を繰返し載荷したとき、載荷 19 回で破壊した(写真-6.16)。たて壁の破壊とともに、試験輪が写真-6.16(b)のように裏込め材に大きく沈み込んだ。破壊するまでのたて壁における天端水平変位の時間変化を図-6.13(a)に、各深さにおける背面からの水平応力の時間変化を図-6.13(b)に示す。計測開始から約 18.1 分までは、埋戻しおよび転圧に時間を要している。応力の振幅の間隔が広いところは、試験機を止めて試験輪通過後の窪みに裏込め材を補充しているか、表面の凹凸を修正している。

図-6.13(a)で凡例の変位 1 および変位 2 は、写真-6.16 で示す天端に設置された変位計の値を表している。変位計 1 の水平変位は載荷開始時に 0.13mm であり、経過時間 37.13 分の破壊時は 2.45mm で 2.32mm 増加した。変位計 2 の水平変位は載荷開始時に -0.07mm であり、破壊時は 2.29mm で 2.36mm 増加した。二つを平均すると 2.34mm の増加となった。

図-6.13(b)の凡例は地表面からの深さを表している。深さ 45mm の図中の赤字は載荷回数を表している。裏込め材の深さ 60mm 以深の残留応力は、載荷 7 回まで徐々に上昇して載荷 7 回で最大値となり、その後載荷 19 回で破壊するまで漸減する傾向が見られた。深さ 45mm の残留応力は、載荷 11 回までは緩やかに上昇し、その後載荷 19 回でたて壁が破壊するまで漸増した。深さ 30mm の残留応力は、載荷 3 回まで緩やかに下降し、その後載荷 19 回で破壊するまで緩やかに増加した。深さ 15mm の残留応力は、はじめのうちは緩やかに下降し載荷 3 回で最小値になった後、載荷 14 回まで緩やかに上昇し、その後たて壁が載荷 19 回で破壊するまで漸減した。

裏込め材の深さ 75mm 以深の応力の振幅は、載荷 4 回で最大値となり、載荷 19 回で破壊するまで緩やかに減少した。深さ 60mm の応力の振幅は、載荷 3 回で最大値となり、載荷 11 回まで緩やかに減少し、その後破壊するまで一定となった。深さ 45mm の応力の振幅は、載荷 2 回で一度最大値となった後載荷 5 回まで緩やかに減少し、その後載荷 19 回で破壊するまでほぼ一定となった。深さ 30mm の応力の振幅は、載荷 2 回目で一旦大きくなった後載荷 3 回で最小値になり、その後緩やかに増加して、破壊した載荷 19 回で最大値になった。深さ 15mm の応力の振幅は、載荷開始時は小さく、載荷を重ねるごとに増加して、載荷 14 回で最大値となった後、一旦減少し再び破壊するまで増加した。

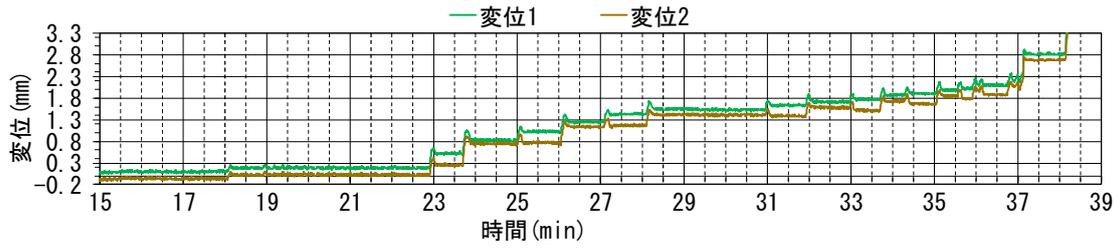


(a) 載荷状況

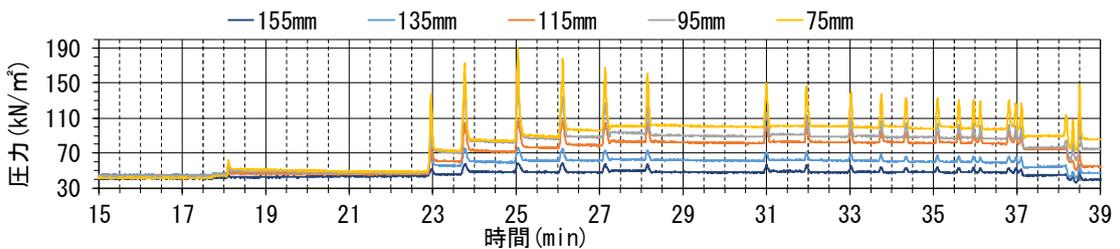
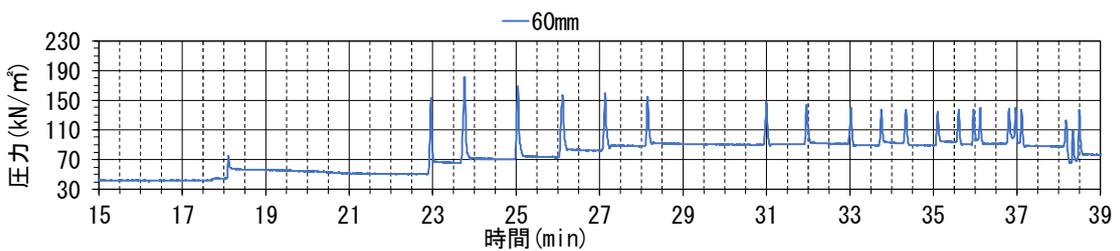
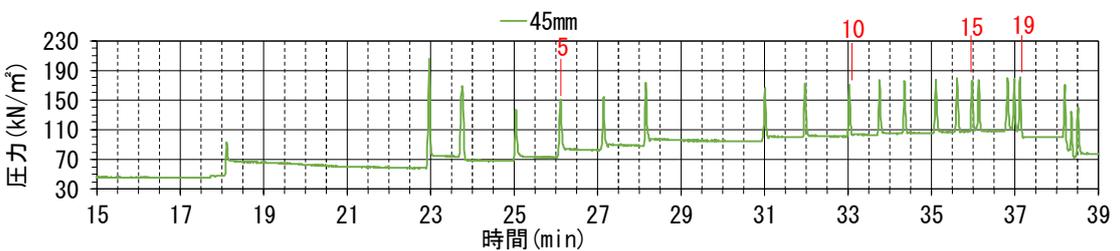
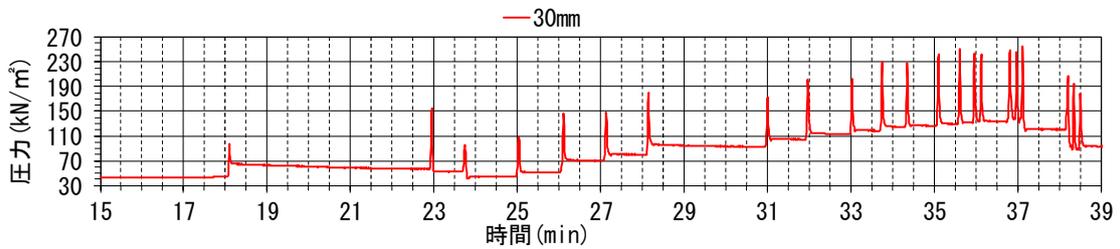
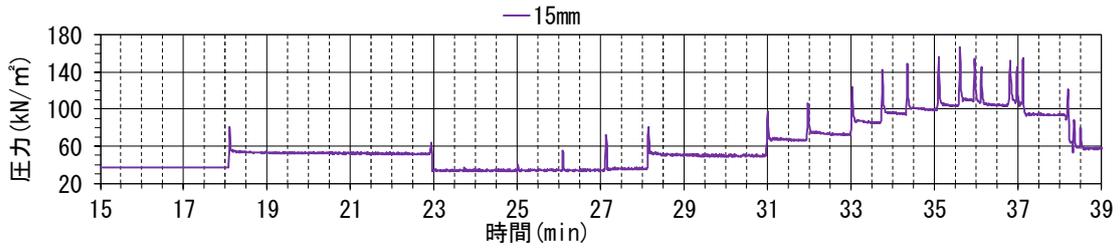


(b) たて壁破壊直後の試験輪の沈み込み

写真-6.16 供試体 c(1967N, 載荷 19 回)



(a) たて壁の天端水平変位



(b) たて壁の各深さにおける水平応力

図-6.13 水平応力と天端水平変位の時間変化(供試体 c, 1967N, 19回破壊, 実験 No. 405)

破壊するまでの、たて壁における背面からの水平応力と天端水平変位の関係を図-6.14に示す。凡例は地表面からの深さを表し、天端水平変位は変位計1の測定値と変位計2の測定値の平均としている。天端水平変位が0.05mm以下で水平応力が一定の部分は、タンパ転圧によるものである。1692N～1911Nの実験結果と同様に、残留応力がピークとなるまでは、試験輪が圧力計に近づくとつれて、天端水平変位と残留応力は増加した。そして、試験輪が圧力計から遠ざかるにつれて、天端水平変位は一旦小さくなるが残留応力はほとんど下がらなかった。残留応力がピークを越えたとき、天端水平変位が増減を繰り返しながら少しずつ増加しても、残留応力および応力の振幅は载荷を重ねるごとに減少した。

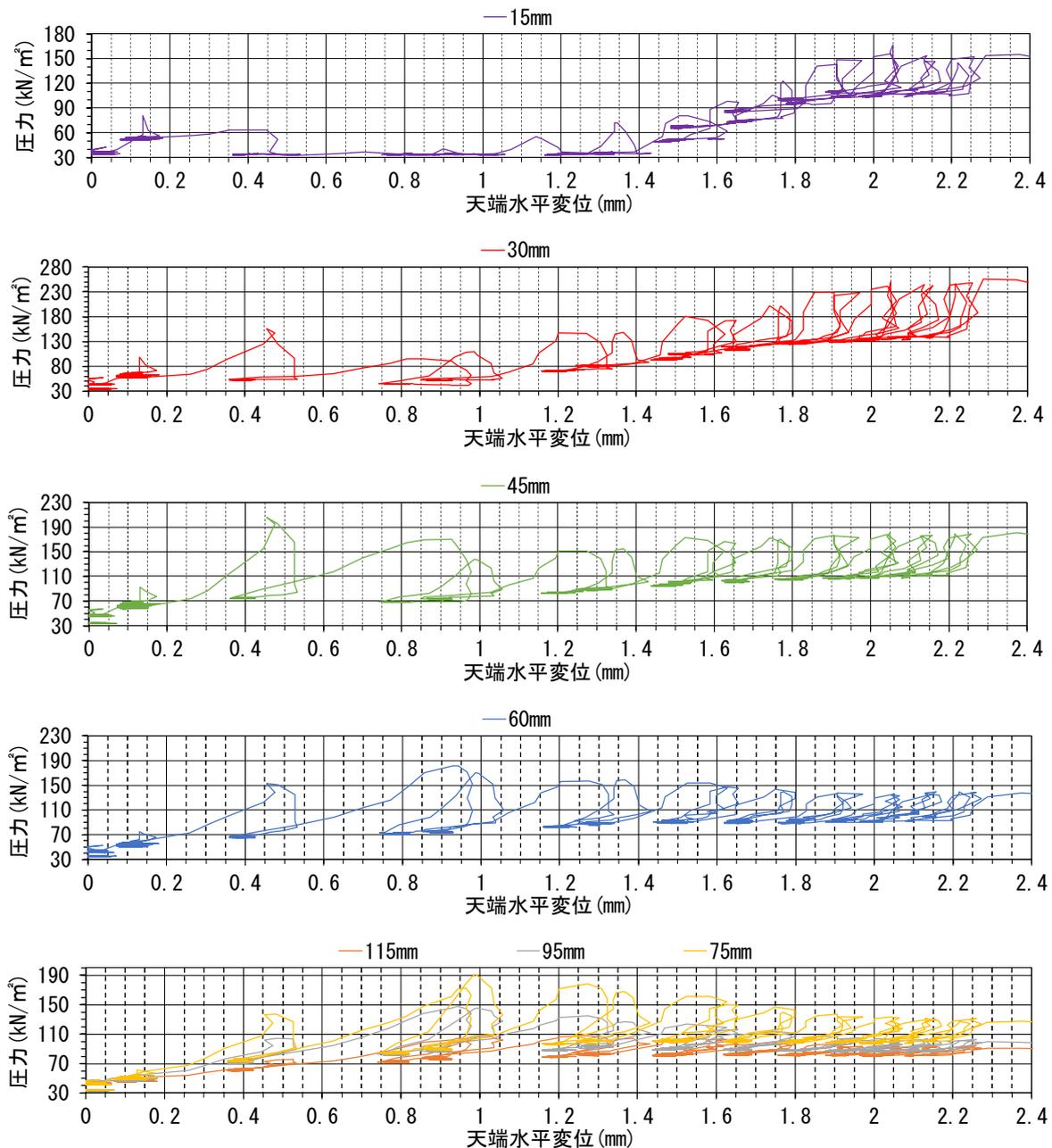


図-6.14 1967Nにおける水平応力と天端水平変位の関係(供試体c, 19回破壊, 実験 No. 405)

(8) 載荷重 2019N

輪荷重 2019N を繰返し載荷したとき、載荷 7 回で破壊した(写真-6.17)。破壊するまでのたて壁における天端水平変位の時間変化を図-6.15(a)に、各深さにおける背面からの水平応力の時間変化を図-6.15(b)に示す。計測開始から約 47.4 分までは、埋戻しおよび転圧に時間を要している。応力の振幅の間隔が広いところは、試験機を止めて試験輪通過後の窪みに裏込め材を補充しているか、表面の凹凸を修正している。52.33 分が経過したあたりで、天端水平変位が急激に大きくなり 3.0mm を超えたので、この時点で破壊とした。52.33 分以後の計測値は、たて壁の転倒防止用に軽量形鋼の箱の上部に設置した木材に、破壊したたて壁がもたれかかっていると判断した。

図-6.15(a)で凡例の変位 1 および変位 2 は、写真-6.17(b)で示す天端に設置された変位計の値を表している。変位計 1 の水平変位は載荷開始時に -0.07mm であり、経過時間 52.33 分の破壊時は 1.10mm で 1.17mm 増加した。変位計 2 の水平変位は載荷開始時に 0.38mm であり、破壊時は 1.57mm で 1.19mm 増加した。二つを平均すると 1.18mm の増加となった。

図-6.15(b)の凡例は地表面からの深さを表している。深さ 45mm の図中の赤字は載荷回数を表している。裏込め材の深さ 60mm 以深の残留応力は、載荷 3 回まで徐々に上昇し、その後漸増して載荷 6 回で最大値となり、載荷 7 回で破壊するまで一定だった。深さ 45mm の残留応力は、載荷 1 回目から緩やかに上昇し、載荷 6 回で最大値となった。深さ 30mm の残留応力も、載荷 1 回目から緩やかに上昇し、載荷 6 回で最大値となった。深さ 15mm の残留応力は、はじめのうちは漸減し載荷 3 回で最小値になった後、載荷 6 回まで緩やかに上昇し、その後載荷 7 回で破壊するまで減少した。

裏込め材の深さ 60mm 以深の応力の振幅は、載荷 3 回で最大値となり、載荷 7 回で破壊するまで緩やかに減少した。深さ 45mm の応力の振幅は、載荷 3 回で最大値となった後、載荷 7 回で破壊するまで緩やかに減少した。深さ 30mm の応力の振幅は、載荷 2 回目が大きく、載荷 4 回で最小になり、載荷 5 回で再び増加したものの、その後載荷 7 回まで緩やかに減少した。深さ 15mm の応力の振幅は、載荷 1 回目が大きく、その後減少して載荷 3 回で最小値となり、再び増加して載荷 6 回で最大値となった。

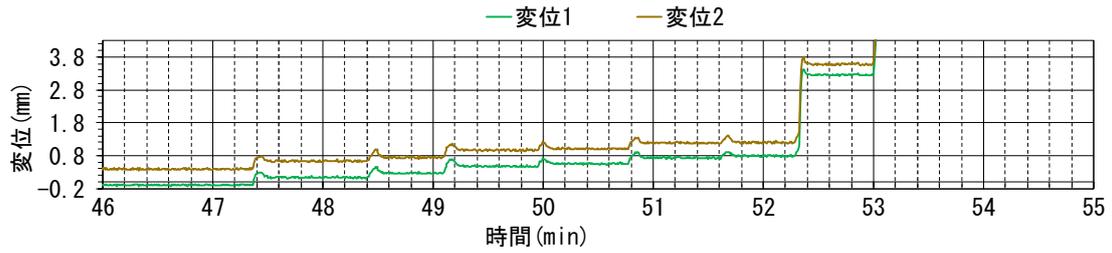


(a) 載荷状況

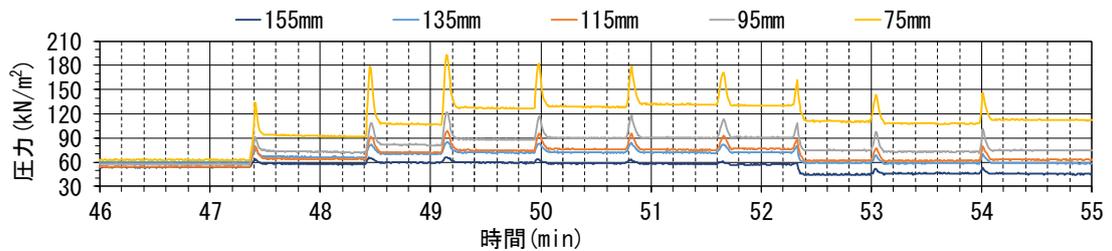
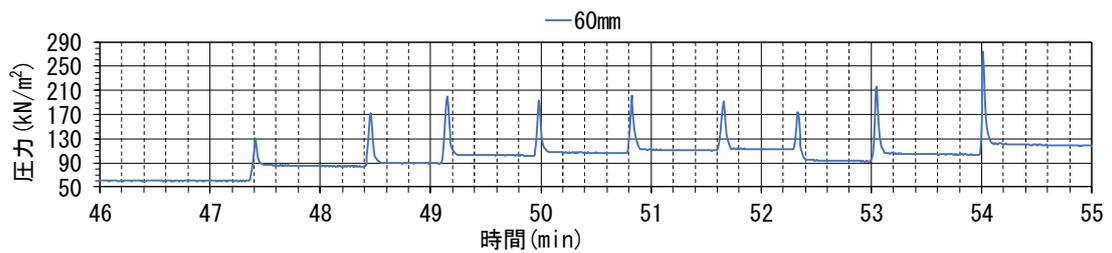
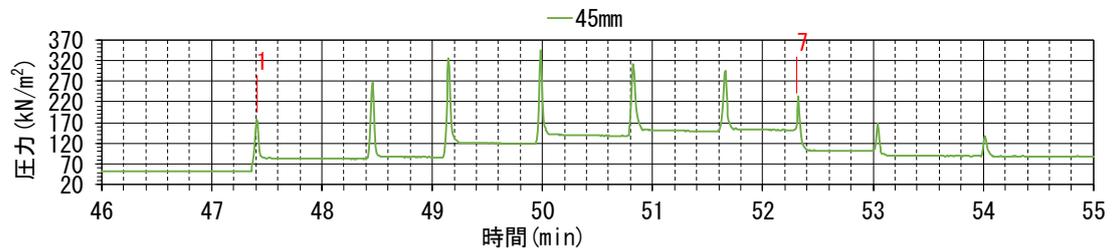
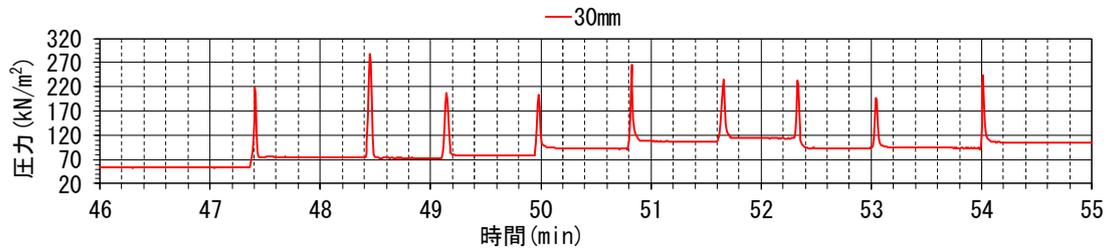
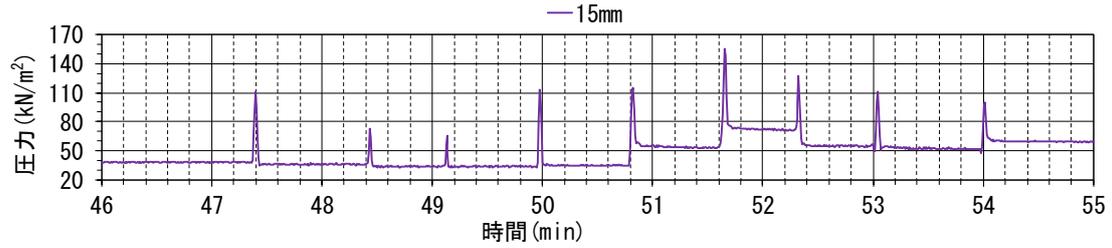


(b) 破壊直後のたて壁

写真-6.17 供試体 f(2019N, 載荷 7 回)



(a) たて壁の天端水平変位



(b) たて壁の各深さにおける水平応力

図-6.15 水平応力と天端水平変位の時間変化(供試体 f, 2019N, 7回破壊, 実験 No. 416)

破壊するまでの、たて壁における背面からの水平応力と天端水平変位の関係を図-6.16に示す。凡例は地表面からの深さを表し、天端水平変位は変位計1の測定値と変位計2の測定値の平均としている。天端水平変位が0.14mm以下で水平応力が一定の部分は、タンパ転圧によるものである。1692N~1967Nの実験結果と同様に、残留応力がピークとなるまでは、試験輪が圧力計に近づくにつれて、天端水平変位と残留応力は増加した。そして、試験輪が圧力計から遠ざかるにつれて、天端水平変位は一旦小さくなるが残留応力はほとんど下がらなかった。

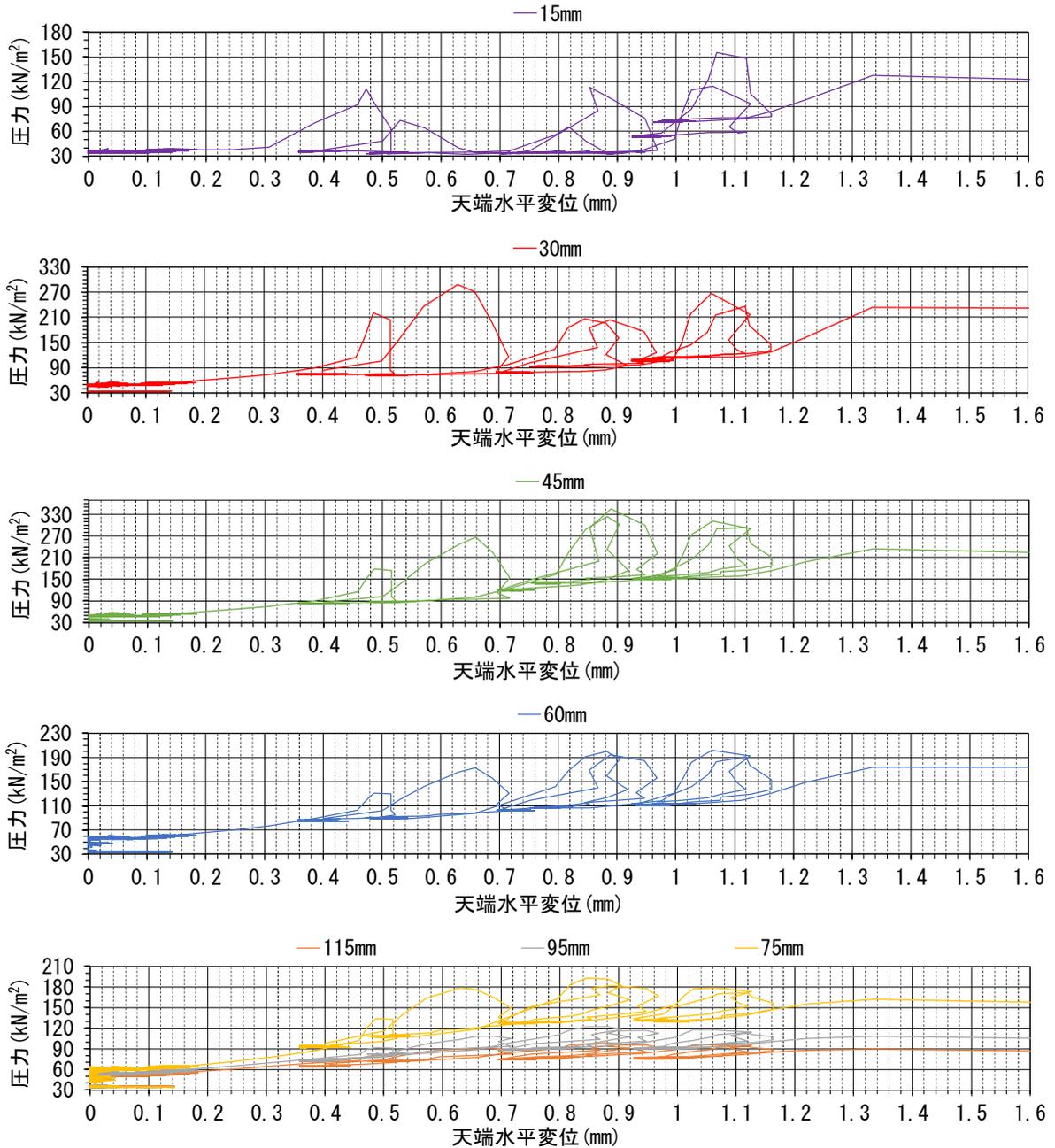


図-6.16 2019Nにおける水平応力と天端水平変位の関係(供試体f, 7回破壊, 実験 No. 416)

(9) 載荷重 2073N

輪荷重 2073N を繰返し載荷したとき、載荷 3 回で破壊した(写真-6.18)。破壊するまでのたて壁における天端水平変位の時間変化を図-6.17(a)に、各深さにおける背面からの水平応力の時間変化を図-6.17(b)に示す。計測開始から約 46.8 分までは、埋戻しおよび転圧に時間を要している。応力の振幅の間隔が広いところは、試験機を止めて試験輪通過後の窪みに裏込め材を補充している。

図-6.17(a)で凡例の変位 1 および変位 2 は、写真-6.18(b)で示す天端に設置された変位計の値を表している。変位計 1 の水平変位は載荷開始時に 0.12mm であり、経過時間 48.41 分の破壊時は 2.34mm で 2.22mm 増加した。変位計 2 の水平変位は載荷開始時に 0.31mm であり、破壊時は 2.62mm で 2.31mm 増加した。二つを平均すると 2.27mm の増加となった。

図-6.17(b)の凡例は地表面からの深さを表している。裏込め材の深さ 60mm 以深の残留応力は、載荷 1 回から徐々に上昇した。たて壁破壊後の残留応力があまり下がらないのは、写真-6.18(b)で示すとおり、試験輪が圧力計の前で裏込め材に沈み込んだ状態で止まったためである。深さ 45mm の残留応力も徐々に上昇した。深さ 30mm の残留応力は、載荷 1 回目で上昇した後、緩やかに減少した。深さ 15mm の残留応力は、載荷開始前後でほとんど変化しなかった。これは載荷するたびに、試験輪が裏込め材に沈み込んだためと思われる。

裏込め材の深さ 95mm 以深の応力の振幅は、載荷 2 回で最大値となり、破壊した載荷 3 回目は大きく減少した。深さ 75mm の応力の振幅は、載荷 3 回目で異常に増加した。これは圧力計の端部に碎石の尖った部分が当たるなど偏圧が作用したためと思われ、上下の圧力計の値からすると、通常は 190kN/m^2 程度と推測される。60mm の応力の振幅は、載荷 2 回で最大値となり、載荷 3 回目で若干減少した。深さ 45mm の応力の振幅は、載荷 1 回目が最大値となり、載荷 3 回まで緩やかに減少した。深さ 30mm の応力の振幅は、載荷 1 回目が最大値となり、載荷 3 回まで大きく減少した。深さ 15mm の応力の振幅も、載荷 1 回目が最大値となり、載荷 3 回まで緩やかに減少した。

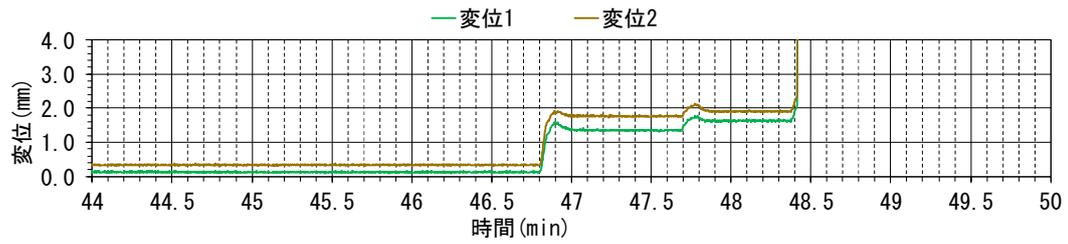


(a) 載荷状況

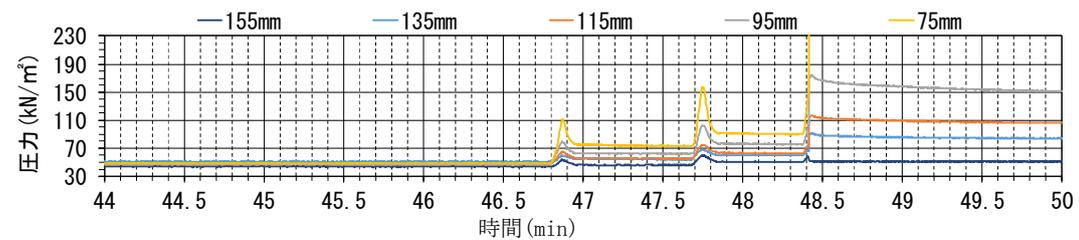
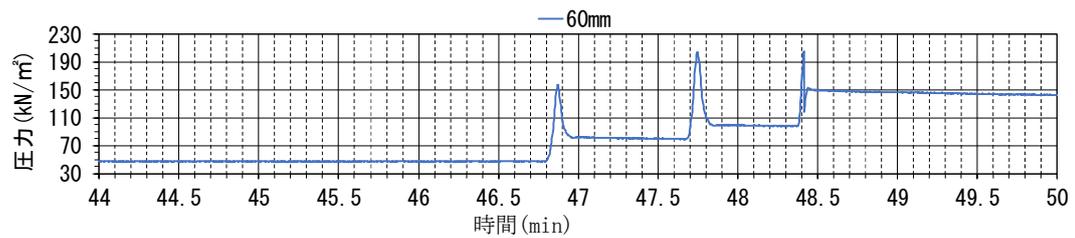
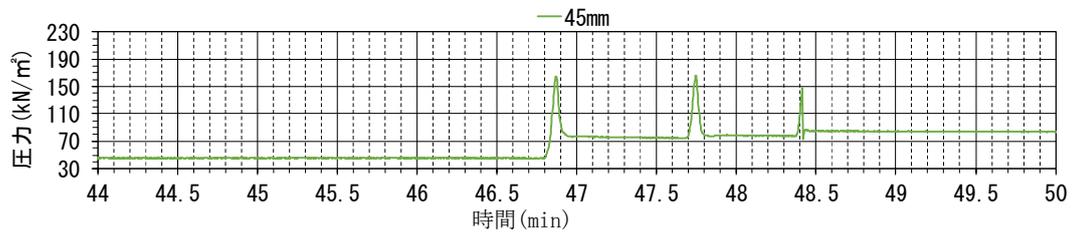
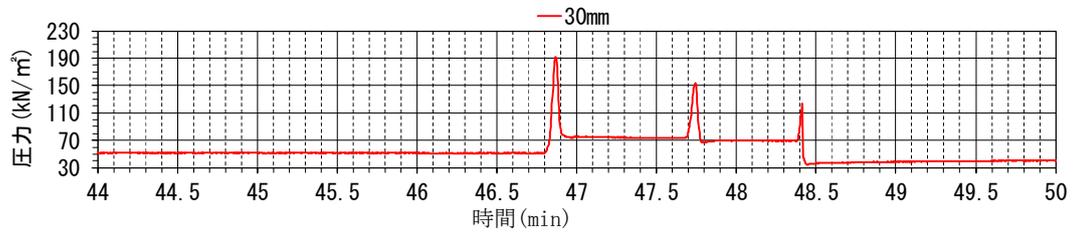
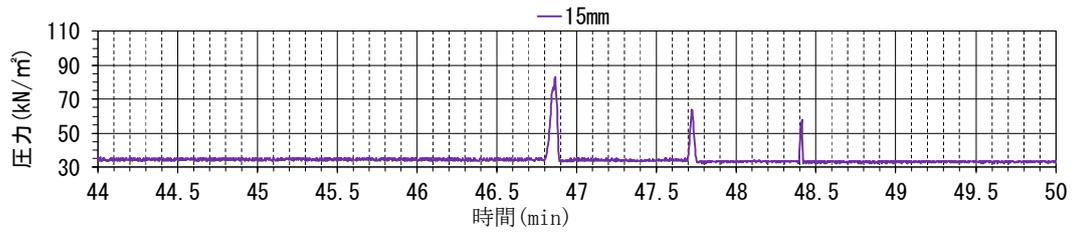


(b) 破壊直後のたて壁

写真-6.18 供試体 d(2073N, 載荷 3 回)



(a) たて壁の天端水平変位



(b) たて壁の各深さにおける水平応力

図-6.17 水平応力と天端水平変位の時間変化(供試体 d, 2073N, 3回破壊, 実験 No. 406)

破壊するまでの、たて壁における背面からの水平応力と天端水平変位の関係を図-6.18に示す。凡例は地表面からの深さを表し、天端水平変位は変位計1の測定値と変位計2の測定値の平均としている。天端水平変位が0.25mm以下で水平応力が一定の部分、タンパ転圧によるものである。1692N～2019Nの実験結果と同様に、残留応力がピークとなるまでは、試験輪が圧力計に近づくにつれて、天端水平変位と残留応力は増加した。そして、試験輪が圧力計から遠ざかるにつれて、天端水平変位は一旦小さくなるが残留応力はほとんど下がらなかった。

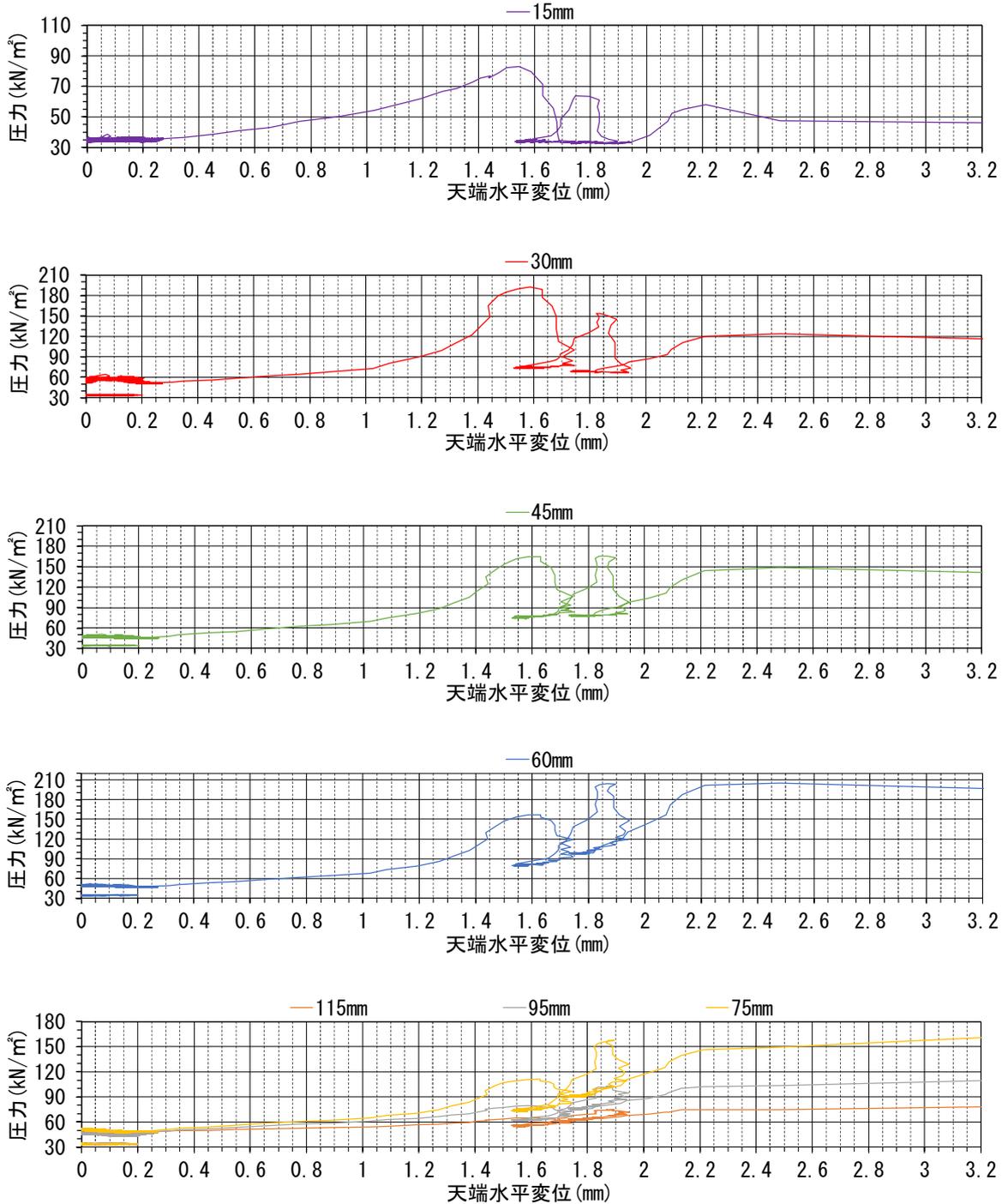


図-6.18 2073Nにおける水平応力と天端水平変位の関係(供試体 d, 3回破壊, 実験 No. 406)

6. 3. 3 まとめ

(1) 天端水平変位

各繰返し載荷重において、たて壁が破壊する直前の天端水平変位を表-6.2に示す。たて壁が破壊する天端水平変位は載荷重の大きさに左右されておらず、おおよそ1.84mmと推定される。図-6.3(a)、図-6.5(a)、図-6.7(a)、図-6.9(a)、図-6.11(a)、図-6.13(a)、図-6.15(a)、図-6.17(a)より、天端水平変位は残留応力の増加に合わせて載荷初期に大きく増加し、残留応力が漸増するようになってからは天端水平変位も漸増した。また、天端水平変位は応力の振幅に合わせて波状に増減を繰り返した。

表-6.2 たて壁が破壊した天端水平変位

載荷重	1692N	1757N	1809N	1855N	1911N	1967N	2019N	2073N	全平均
変位計1	1.58mm	1.10mm	1.58mm	2.08mm	2.03mm	2.45mm	1.10mm	2.34mm	
変位計2	1.71mm	1.30mm	1.55mm	1.97mm	2.08mm	2.29mm	1.57mm	2.62mm	
平均	1.65mm	1.20mm	1.57mm	2.03mm	2.06mm	2.37mm	1.34mm	2.48mm	1.84mm

(2) 各深さにおける背面からの水平応力

粒状土は繰返し載荷することによって、はじめてその載荷重に対応した粒子構造となり、土中の応力の増加とともに内部構造の変化に起因する塑性変形が生じるとされている²⁾。これを引用して、図-6.3(b)、図-6.5(b)、図-6.7(b)、図-6.9(b)、図-6.11(b)、図-6.13(b)、図-6.15(b)、図-6.17(b)より得られた、各深さの繰返し載荷による背面からの水平応力を、塑性変形に関連付けて以下の通り考察した。

深さ75mm以深の残留応力は、載荷4~6回で最大値となったあと、載荷を重ねるごとに減衰する。残留応力の減衰は初期に大きく、その後漸減していく傾向がある。応力の振幅は載荷2~3回で最大値になり、その後は載荷を重ねるごとに減衰する。応力の振幅の減衰は初期に大きく、その後漸減していく傾向がある。これらから、深さ75mm以深では、軽量形鋼の壁面と同様に、繰返し載荷開始より裏込め材に塑性変形が生じ、載荷4~6回で土中の応力に対応した粒子構造になったと推測される。

深さ60mmの残留応力は、載荷5~7回で最大値となった後、載荷を重ねるごとに減衰する。残留応力の減衰は初期に大きく、その後漸減していく傾向がある。応力の振幅は載荷2~3回で最大値になり、その後は載荷を重ねるごとに減衰する。応力の振幅の減衰は初期に大きく、その後漸減していく傾向がある。これらから、深さ60mmでも、繰返し載荷開始より裏込め材に塑性変形が生じ、載荷5~7回で土中の応力に対応した粒子構造になったと推測される。

深さ45mmの残留応力は、載荷7~11回までゆるやかに上昇し、その後たて壁が破壊するまで

一定または漸増あるいは漸減する。応力の振幅は載荷1～3回で最大値になり、その後は載荷13～30回程度まで載荷を重ねるごとに減衰し、再び増加に転じる傾向がある。これらから、深さ45mmでは、載荷7～11回で土中の応力に対応した粒子構造に1度なり、その後の疑似L型擁壁のたて壁の水平変位により、載荷13～30回程度から再び塑性変形が継続され、応力の振幅のみが増加したと推測される。

深さ30mmの残留応力は、載荷10回程度までゆるやかに上昇し、その後たて壁が破壊するまで漸増する傾向がある。応力の振幅は1855Nを例外とすれば、載荷1～2回で最大値になり、その後は載荷3～9回程度まで載荷を重ねるごとに減衰し、再び増加に転じた後、たて壁が破壊するまで増加し続ける傾向がある。これらから、深さ30mmでは、載荷10回で土中の応力に対応した粒子構造に1度なり、その後の疑似L型擁壁のたて壁の水平変位により、載荷3～9回程度から再び塑性変形が継続され、残留応力および応力の振幅が増加したと推測される。

深さ15mmの残留応力は、載荷初期に試験輪の裏込め材への沈み込みがあったため、繰返し載荷重が大きいほど残留応力が発生する載荷回数は増加した。また、残留応力が最大値になるのはほぼたて壁が破壊するときで、最大値になるまでの載荷回数は載荷重が小さいほど増加する。応力の振幅も、載荷初期における試験輪の裏込め材への沈み込みの影響で、載荷1回目の値は小さく、その後は載荷2～5回まで載荷を重ねるごとにさらに小さくなる。再び増加に転じた後は、たて壁が破壊する載荷回数から1～11回少ない回数で最大値になり、その後は載荷を重ねるごとに減衰する。これらから、深さ15mmでは、たて壁の水平変位により載荷初期にたて壁と裏込め材の分離が生じ、残留応力および応力の振幅が減少したと思われる。たて壁と裏込め材の分離が無くなってからは、塑性変形が継続されているため、残留応力および応力の振幅が増加したと推測される。

各測定データの注意点は、載荷重が大きくなるほど、載荷初期において試験輪の裏込め材への沈み込みが大きくなっていることである。この沈み込みは載荷を重ねるほど減少しているが、載荷重が大きいほど測定された載荷初期における背面からの水平応力は誤差を含む。

(3) 天端水平変位と水平応力の関係

残留応力がピークとなるまでは、試験輪が圧力計に近づくにつれて、天端水平変位と残留応力は増加する。そして、試験輪が圧力計から遠ざかるにつれて、天端水平変位は一旦小さくなるが残留応力はほとんど下がらない。残留応力がピークを越えた後は、天端水平変位が増減を繰返しながらかつて少しずつ増加しても、残留応力および応力の振幅は載荷を重ねるごとに減少する。

相似性を考慮したとき、曲げ剛性がプレキャストL型擁壁とほぼ同じ疑似L型擁壁では、深さ15mm～45mmの浅い深さでは残留応力にピークが無く、深さ60mm以深では残留応力にピークが存在する。

参考文献

- 1) 王海軍, 長谷川明, 塩井幸武, 庄谷征美 : 繰返し水平力を受けるL型擁壁の低サイク

ル疲労実験，八戸工業大学構造工学研究所紀要，第6巻，1999.

- 2) 落合英俊：粒状土の圧縮変形に及ぼす初期密度の影響，土質工学会論文報告集，Vol. 15, No. 2, pp. 89-95, 1975.

第7章 疑似L型擁壁の破壊過程

7.1 まえがき

British Standards¹⁾では、擁壁のたて壁に作用する土圧の大きさの計算において、地面上の載荷重と地面の傾斜、垂直に対する壁の傾斜、地下水面と地面の浸透力、地面に対する壁の移動量と方向、地盤のせん断強度(ϕ , C)と単位体積重量 γ 、壁の剛性、壁面摩擦角を考慮することになっている。これらのうち、壁の剛性は「道路土工-擁壁工指針」でも考慮していない。

そこで、本研究においては、たて壁に作用する背面からの水平応力が、たて壁の曲げ剛性の影響を大きく受けることを**第2章**および**第6章**で明らかにした。**第2章**では、輪荷重が繰返し載荷されたときに、裏込め土を介して壁体に作用する背面からの水平応力を、相似性を考慮したとき曲げ剛性がプレキャストL型擁壁の約3倍である軽量形鋼の壁面を用いて測定した。その結果、剛性の高い壁面においては、残留応力および応力の振幅が載荷を重ねると任意のピーク値に達した後は漸減することが分かった。**第6章**では、相似性を考慮したとき、曲げ剛性がプレキャストL型擁壁の1.25倍である疑似L型擁壁を使用して、裏込め材上に試験輪を繰返し走行させたときの、たて壁背面に作用する水平応力を測定した。その結果、曲げ剛性がプレキャストL型擁壁の1.25倍であるたて壁においては、残留応力および応力の振幅が浅い深さほど載荷を重ねるたびに漸増することが分かった。

本章では、浅い深さほど、載荷を重ねるごとに軽量形鋼の壁面と疑似L型擁壁とで作用する背面からの水平応力に差異が生じたので、両者を曲げ剛性の観点から比較する。

7.2 疑似L型擁壁の破壊時に作用した鉛直断面の応力の分布と近似曲線

7.2.1 Boussinesq 式に係数 α を乗じた近似式の作成

軽量形鋼の壁面と同様に、残留応力 σ_{x1} および水平応力(残留応力+応力の振幅) σ_{x2} を、Boussinesq 式に係数 α を乗じて近似することにした。壁面に作用する曲げモーメントは、浅い深さの残留応力の影響が大きいので、浅い深さの残留応力が最大となる破壊時の応力値を使用した。残留応力および水平応力(残留応力+応力の振幅)の係数 α の計算は **3.3.1** で記したように、鉛直断面の各測定値と Boussinesq 式に任意の係数に乗じた値との差を求め、差の二乗和が最小となる係数を係数 α とした。Boussinesq 解析解の値は**式(3-3)**において、壁面からの距離 $x=0.04\text{m}$ 、 x の起点から壁面に沿った距離 $y=0\text{m}$ 、ポアソン比 $\nu=0.35$ で計算をした。

計算結果を**表-7.1**に示す。軽量形鋼の壁面に作用した残留応力最大値および水平応力最大値を、Boussinesq 式で近似したときの係数 α を示した**表-3.1**と比較すると、**表-7.1**の係数 α は破壊までに要した繰返し載荷数が増えるほど、大きくなる傾向がある。載荷30回~40回で破壊すると想定した繰返し載荷重1875Nに対し、載荷重1855N以上の繰返し載荷重では、残留応力の係数 α が1以下であり、繰返し載荷重の値が大きいほど、残留応力の係数 α は小さくなっ

ている。これは裏込め材が塑性変形中で安定した粒子構造になりつつあるときに破壊したためと思われ、弾性状態を前提とした Boussinesq 式が成り立たないためと思われる。背面からの水平応力(残留応力+応力の振幅)については、軽量形鋼の壁面が載荷重 883N~1472N において係数 α の平均値が 1.23 であったのに対し、載荷重 2019N で7回載荷したときの係数 α は 1.41 であり、載荷重 1692N を 69 回載荷して破壊したときに至っては係数 α が 2.38 まで増加した。これらから、曲げ剛性が低いと水平応力(残留応力+応力の振幅)は載荷するほど増加するのが分かる。

表-7.1 Boussinesq 式を用いた近似式に使用する係数 α

実験No.	供試体	載荷重 (N)	破壊回数 (回)	1875Nとの比率	係数 α		摘要
					残留応力	水平応力	
406	供試体d	2073	3	1.106	0.19	0.69	破壊時の応力
416	供試体f	2019	7	1.077	0.59	1.41	''
405	供試体c	1967	19	1.049	0.78	1.53	''
417	供試体g	1911	33	1.019	0.65	1.53	''
404	供試体b	1855	32	0.989	0.76	1.73	''
418	供試体h	1809	36	0.965	1.06	2.70	''
419	供試体i	1757	44	0.937	1.00	2.11	''
420	供試体j	1692	69	0.902	1.07	2.38	''

7.2.2 疑似L型擁壁に作用した鉛直断面の応力の分布と近似曲線

疑似L型擁壁における 2073N, 2019N, 1967N, 1911N, 1855N, 1809N, 1757N, 1692N の繰返し載荷による、鉛直断面の残留応力 σ_{x1} および水平応力 σ_{x2} の分布データと近似曲線を図-7.1(a)~(h)に示す。図の凡例で赤色の実線は分布データの近似式であり、Boussinesq 式に表-7.1の係数 α を乗じている。分布データは繰返し載荷重の大きさが小さいほど、Boussinesq 式に係数 α を乗じた近似式との誤差が減少するのが分かる。

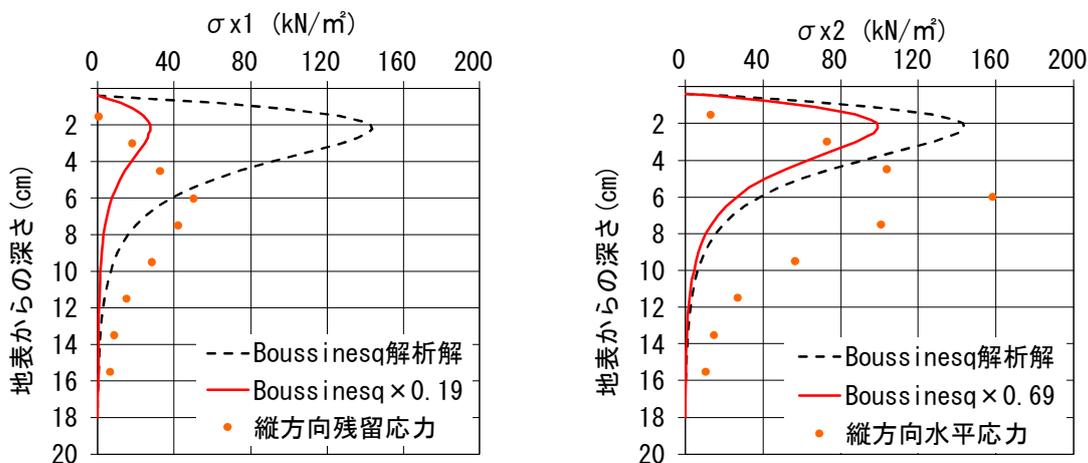


図-7.1(a) 疑似L型擁壁の残留応力最大値および水平応力最大値(2073N, 距離 4cm, $\nu = 0.35$)

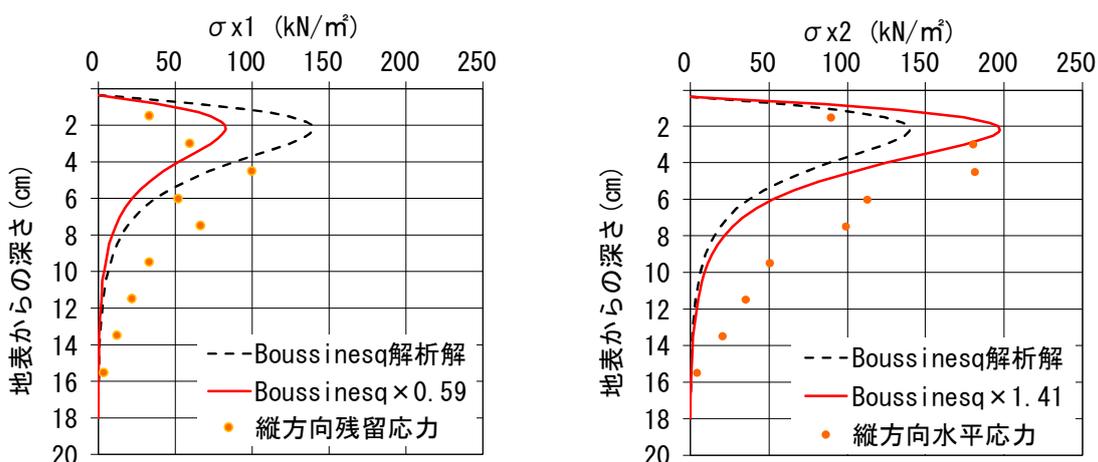


図-7.1(b) 疑似L型擁壁の残留応力最大値および水平応力最大値(2019N, 距離4cm, $\nu=0.35$)

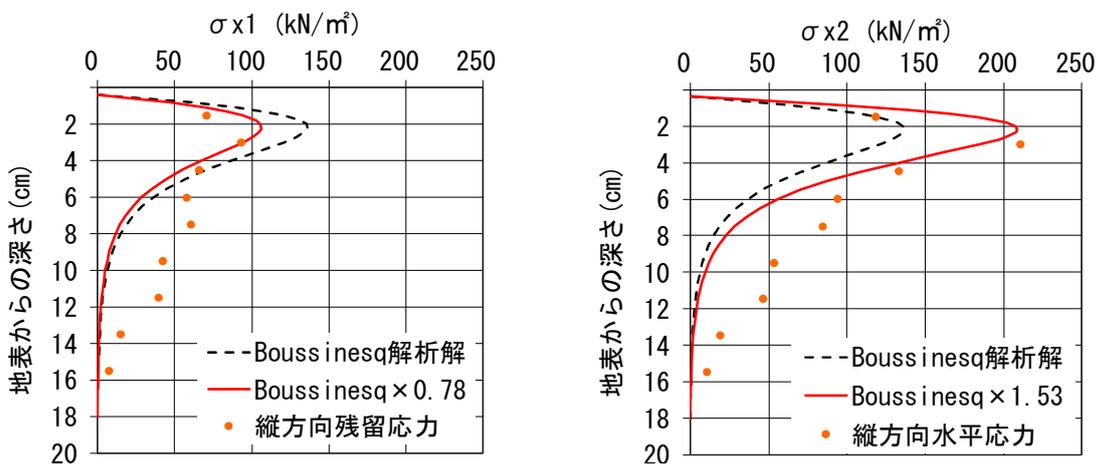


図-7.1(c) 疑似L型擁壁の残留応力最大値および水平応力最大値(1967N, 距離4cm, $\nu=0.35$)

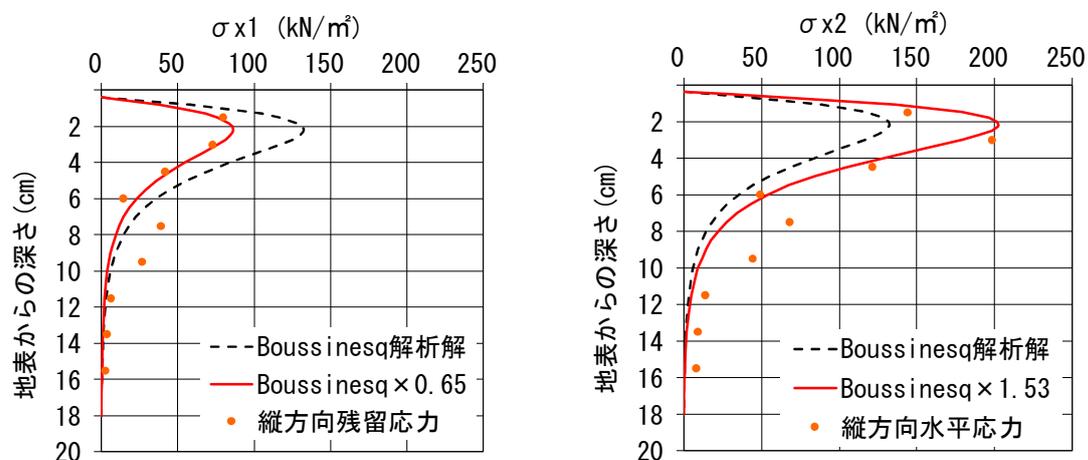


図-7.1(d) 疑似L型擁壁の残留応力最大値および水平応力最大値(1911N, 距離4cm, $\nu=0.35$)

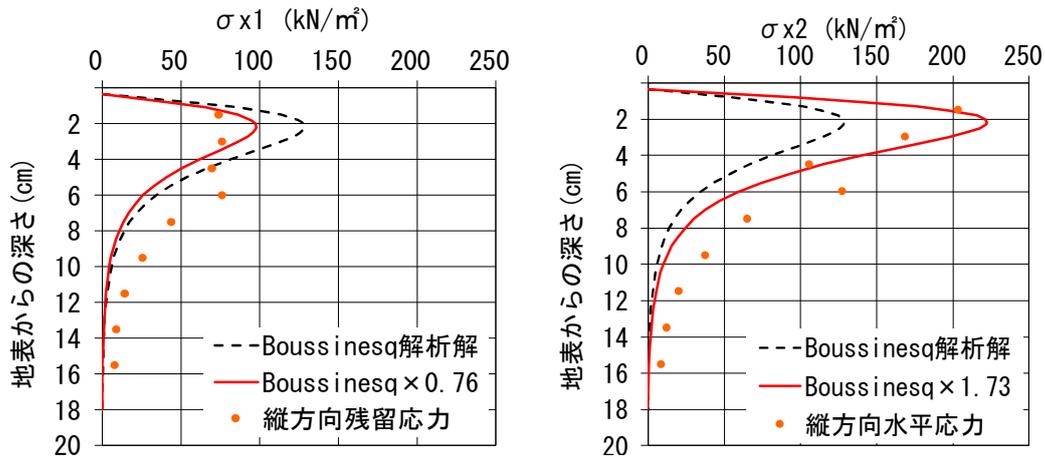


図-7.1(e) 疑似L型擁壁の残留応力最大値および水平応力最大値(1855N, 距離4cm, $\nu=0.35$)

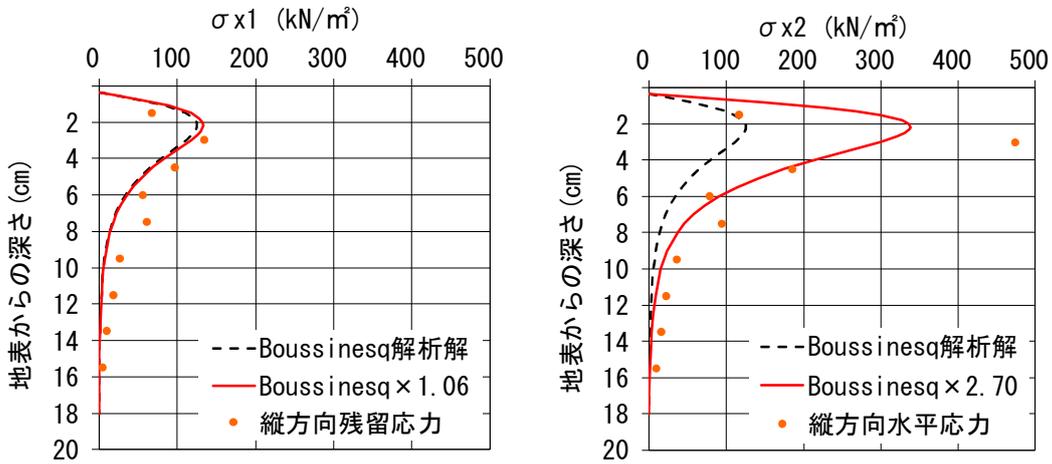


図-7.1(f) 疑似L型擁壁の残留応力最大値および水平応力最大値(1809N, 距離4cm, $\nu=0.35$)

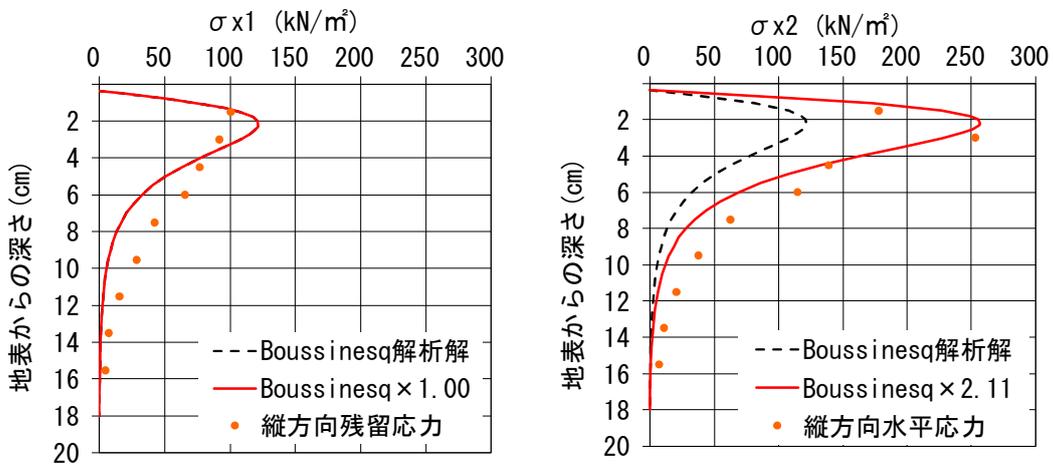


図-7.1(g) 疑似L型擁壁の残留応力最大値および水平応力最大値(1757N, 距離4cm, $\nu=0.35$)

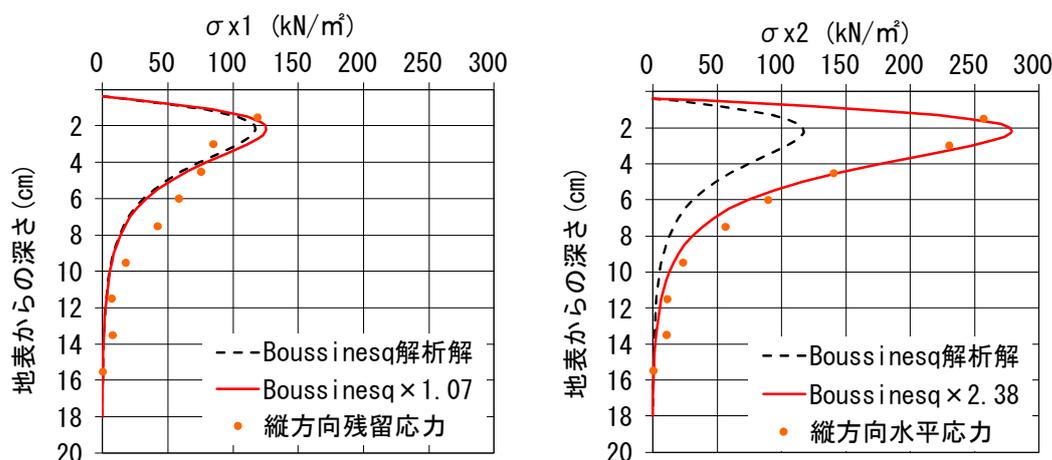


図-7.1(h) 疑似L型擁壁の残留応力および水平応力(1692N, 距離4cm, $\nu=0.35$)

7.2.3 壁体の曲げ剛性の相違による天端水平変位と水平応力の変化

図-2.23～図-2.26 で示した載荷重 1275N で深さ 2～4cm における背面からの水平応力の形状と、図-6.3 で示した載荷重 1692N で深さ 1.5～4.5cm における背面からの水平応力の形状を比較すると、軽量形鋼の壁面と疑似L型擁壁のたて壁との違いは、載荷 30 回以後の残留応力および応力の振幅の増加の有無にある。疑似L型擁壁の深さ 45mm 以浅で、載荷 30 回以後の残留応力および応力の振幅が増加した原因は、たて壁の水平変位に伴う水平応力の増加である。

その理由として、擁壁に作用する土圧は構造物や基礎地盤との相互作用の結果生じ、土の応力-ひずみ関係を考慮する必要があるとされていること²⁾。また、擁壁の水平変位による土圧の増加については、室内実験により季節変動による繰返し微小変位を伴う際には、側壁の主働方向への変形が進行しながら、背面土圧が増加することが報告されていることである^{3),4)}。

天端水平変位を比較すると、図-2.44(b)において軽量形鋼の壁面は載荷重 1275N で 120 回載荷したとき、繰返し載荷開始から終了まで 5.11mm から 5.53mm に 0.42mm 変位した。このとき、変位が収束してからは残留応力および応力の振幅は増加していない。図-6.3(a)において疑似L型擁壁の場合、載荷開始時 0.37mm であった天端水平変位は、降伏時に 1.64mm となり 1.27mm 増加した。このとき、たて壁の深さ 15mm～45mm は、天端に近いほど残留応力および応力の振幅の増加が大きいことが伺える。したがって、本実験においては、壁体の曲げ剛性 EI が小さいほど天端水平変位が大きくなり、水平変位が大きいと作用する背面からの水平応力も大きくなるのが分かる。実物のプレキャストL型擁壁の場合、曲げ剛性はほぼ疑似L型擁壁と相似関係にあるので、天端に近いほど残留応力および応力の振幅は天端水平変位の影響を受ける。

以上のことから、裏込め材の塑性変形がたて壁の水平変位を増加させ、たて壁の水平変位が裏込め材の塑性変形を促し、残留応力および応力の振幅を増加させた。そして増加する水平応力の大きさは、擁壁のたて壁の曲げ剛性に左右される。

7.3 疑似L型擁壁における繰返し載荷重の大きさと破壊回数の関係

7.3.1 普通鉄線の有効高さの影響

道路で使用されている一般的なプレキャストL型擁壁では、鉄筋の有効高さがたて壁背面側に生じる鉄筋の引張応力度およびたて壁前面側に生じるコンクリートの圧縮応力度に大きく影響する。しかしながら、部材厚7cm以下の薄肉鉄筋コンクリート部材では、曲げ応力を受けたとき鉄筋がほとんど機能せず、ひび割れ発生と同時に終局に至るといって、無筋コンクリートと類似した耐荷挙動を示すことが報告されている^{5),6)}。そのため、部材厚さ3cmである疑似L型擁壁のたて壁においては、配筋されている普通鉄線の有効高さの相違による、水平応力および破壊回数の変化はないものと考えた。

7.3.2 本研究とコンクリートの疲労との関係性

長谷川ら⁷⁾は、寒冷地において裏込め土の凍結融解により発生する日周期レベルの繰返し荷重により、擁壁が疲労破壊する様子を、実物大のプレキャストL型擁壁を用いて実験を行った。実験では天端付近に繰返し載荷される荷重は一定であり、設計荷重以下で破壊する様子が示されている。しかしながら、コンクリート構造物の疲労については、過去に数多くの実験がなされており、その報告から以下のことが分かっている。まず、多数個のコンクリート供試体に対して同じ応力レベル(最大, 最小, 応力一定)で繰返し疲労実験を行うと、破壊時までの寿命回数は各研究者によって著しく異なること⁸⁾。二つ目は、一定の持続荷重を個々の供試体に破壊するまで載荷し続けたときの時間は、研究者によって大きくばらつくこと。ここで、持続荷重は本研究では残留応力に置き換えて解釈できる。これらは、測定結果に実験条件および測定環境が厳しく影響を受けることを意味している。そのほか、同一条件で製作した供試体であっても、破壊時までの寿命回数は大きくばらつくことが指摘されている。これは単なる測定誤差によるもの以上に、材料が固有に持っている性質に基づくこととされている⁸⁾。

このように疲労現象の解明には多くの実験が必要であり、得られたコンクリートの破壊時までの寿命回数は大きくばらつくので、個々のデータの統計的処理が必要となる^{9),10)}。本研究においては、破壊実験に供した供試体数が少なかったことや、たて壁に作用した背面からの水平応力が載荷回数の増加とともに変化したことから、ほかの研究者が同じような疑似L型擁壁を製作して、同じ実験装置で実験を行っても測定値はばらつくことが想像できる。そのため、統計的解釈が難しく、疲労現象の明確な解明には至っていないことを前置きした上で、疑似L型擁壁の疲労の問題は除外して、繰返し載荷重の大きさと破壊回数の関係のみを記す。

7.3.3 繰返し載荷重の大きさと破壊回数の関係

疑似L型擁壁の繰返し載荷実験における、繰返し載荷重の大きさと破壊回数の関係を図-7.2に示す。測定した繰返し載荷重の個数は8個である。図中の1875Nは図-5.2において、裏込め材を介して疑似L型擁壁が破壊すると想定した繰返し載荷重であり、想定した破壊回数は30~40回である。1875Nに対し重量比110.6%~90.2%(2073N~1692N)の繰返し荷重で実験をした結

果、一部を除き繰返す載荷重が小さいほど、破壊までに要する載荷回数は増加した。

図-6.3(b), 図-6.5(b), 図-6.7(b), 図-6.9(b), 図-6.11(b), 図-6.13(b), 図-6.15(b), 図-6.17(b)において、疑似L型擁壁のたて壁に作用した応力の振幅からすると、測定値の大きさが減少あるいは変わらない状態から増加に転じたとき、繰返し載荷重による背面からの水平応力に、たて壁の水平変位による背面からの水平応力が加算されていると考えられる。載荷重1692Nの応力の振幅を例に挙げると、図-6.3(b)において、深さ15mmは載荷8回程度から、深さ30mmは載荷12回程度から、深さ45mmは載荷25回程度から応力の振幅が増加し始めた。ほかの載荷重における応力の振幅を確認しても、一番浅い15mmで増加に転じる載荷回数が最も少なく、2番目が30mm、3番目が45mmの順となった。したがって、曲げ剛性が疑似L型擁壁とほぼ同じプレキャストL型擁壁のたて壁では、天端水平変位が大きく影響して、たて壁の上部ほど残留応力および応力の振幅が増加しやすいと考えられる。図-7.2において、近似曲線が直線式より上向きの曲線の方が一致したのは、たて壁の天端水平変位により、背面からの水平応力の値が徐々に大きくなり、破壊を早めたためである。

図-7.2の傾向として、1875Nより大きい繰返し載荷重においては、裏込め材本来の塑性変形が主要因となり、安定した粒子構造になりつつあるときに、疑似L型擁壁が破壊したと推測される。また、疑似L型擁壁のたて壁に作用した残留応力および応力の振幅は、載荷8回程度から、繰返し載荷重による応力にたて壁の水平変位による応力が徐々に加算されたと考えられる。1875Nより小さい繰返し載荷重においては、裏込め材本来の塑性変形に対し、繰返し載荷回数が増えるほど、たて壁の天端水平変位による塑性変形の割合が徐々に大きくなり、そのために破壊するまでの繰返し載荷回数の増加率が減少した。したがって、たて壁の曲げ剛性が疑似L型擁壁とほぼ等しいプレキャストL型擁壁は、同様な挙動を示すと考えられる。

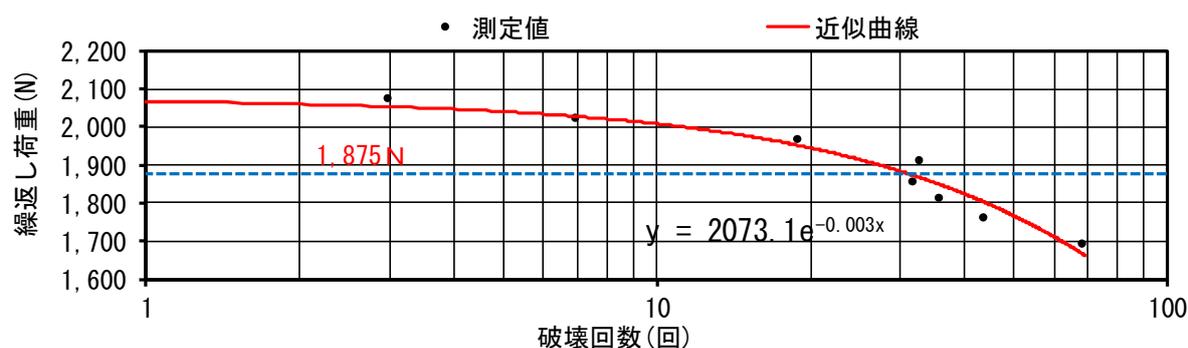


図-7.2 繰返し載荷重の大きさと破壊回数の関係(たて壁高さ20cm, 壁厚3cm)

7.4 まとめ

繰返し載荷重が小さいほど、破壊までに要する載荷回数は増加し、破壊すると想定した繰返し載荷重以下でも破壊した。また、輪荷重の繰返し載荷により、裏込め材を介して壁面に作用する残留応力および応力の振幅は、壁体の曲げ剛性により大きさが左右された。相似性を考慮

したとき、曲げ剛性がプレキャストL型擁壁とほぼ等しい疑似L型擁壁では、裏込め材の塑性変形がたて壁の水平変位を増加させ、今度はたて壁の水平変位が裏込め材の塑性変形を促した。それが残留応力および応力の振幅の増加を誘引し、たて壁の破壊を早めた。これと同じことが、通行車輛の輪荷重を受けるプレキャストL型擁壁でも十分起こりうる。

参考文献

- 1) British Standards Institution: *British Standards, Eurocode 7. Geotechnical design- Part1. General rules*, pp.102-103, British Standards Institution, 2004.
- 2) 社団法人日本道路協会：道路土工 擁壁工指針(平成24年度版)，pp.53-55，丸善，2012.
- 3) 住吉卓，山村博孝，藤本慎也，内村太郎，龍岡文夫：擁壁の繰り返し微小変位と背面土圧，土木学会第59回年次学術講演会，第3部門，pp.246-247，2004.
- 4) 住吉卓：繰り返し微小変位に伴い変形が進行したU型擁壁の挙動，平17，都土木技研年報，pp.69-78，2005.
- 5) 田所雄治，國府勝郎，森田秀明，宇治公隆：薄肉鉄筋コンクリート製品の終局曲げ耐力，土木学会第63回年次学術講演会概要集，pp.1181-1182，2008.9
- 6) 宇治公隆，大野健太郎，中嶋彩乃，國府勝郎，清水和久：薄肉鉄筋コンクリート部材の終局曲げ耐力評価手法の提案，土木学会論文集E2，Vol.67，No.3，pp.361-373，2011.
- 7) 王海軍，長谷川明，塩井幸武，庄谷征美：繰り返し水平力を受けるL型擁壁の低サイクル疲労実験，八戸工業大学構造工学研究所紀要，第6巻，pp.1-12，1999.
- 8) 永松静也：コンクリートの各種破壊強度における統計的性質，コンクリート工学，Vol.18，No.2，pp.10-23，1980.
- 9) 徳光善治，松下博通：繰り返し荷重を受けるコンクリートの疲労強度，コンクリート工学，Vol.17，No.6，pp.13-22，1979.
- 10) 阪田憲次，木山英郎，西林新蔵：統計的処理によるコンクリートの疲労寿命に関する研究，土木学会論文報告集，Vol.198，pp.107-114，1972.

第8章 本論文の擁壁構造物に対する考察

8.1 まえがき

「道路土工-擁壁工指針」第2章¹⁾では、擁壁工の設計時の留意事項として、特殊な箇所で構築される擁壁については、水平荷重の作用の仕方および作用荷重の設定等により、指針に示す一般的な事項に当てはまらない場合があるとしている。さらに、このような場合には、設計条件に応じた詳細な検討を追加し、必要に応じて関連する技術基準等を参考に、所要の性能が確保されるように設計する必要があると記されている。このことについて本研究では、通行車輛によって裏込め土を介してたて壁に作用する背面からの水平応力が、実際は Boussinesq 式の応力分布に近いことを**第3章**で、たて壁に作用する背面からの水平応力はたて壁の曲げ剛性で変わることを**第7章**で述べた。

また、同指針では維持管理時の留意事項として、変状・損傷が生じた場合には、適切な調査により原因を把握し、補修・補強対策を検討・実施する必要があるとしている。しかしながら、通行車輛による繰返し載荷重で、構造物が変状・損傷していく過程を現したものは、橋のコンクリート床版の疲労劣化ぐらいで、擁壁構造物の変状・損傷を記したものはほとんどない²⁾。

本研究は、歩道が無い道路の盛土区間において、車輛防護柵がたて壁に近接または天端に設置されているプレキャストL型擁壁のみならず、現場打ちL型擁壁に対しても、設計段階および維持管理段階で以下のように役立てられる。

8.2 Boussinesq 式を用いた水平応力の設計法の導入

設計段階の一つ目は、車輛が擁壁に接近して通行する場合に、Boussinesq 式を応用して背面からの水平応力を求め、それを用いた設計法の導入である。「道路土工-擁壁工指針」で考慮している載荷重 10kN/m^2 は、車輛総重量を車輛占有面積で除したものであることは**1.1.3**で既に述べた。しかし、実際にたて壁背面に作用する水平応力は、車輪からの輪荷重が裏込め土を介して伝わったものである。歩道が無く路肩も狭い道路においては、車輛がL型擁壁に接近して走行すると、輪荷重により裏込め土を介してL型擁壁のたて壁に作用する断面力が、 10kN/m^2 の載荷重を考慮した場合よりも上回ることがあることは**第4章**で述べた。その場合、たて壁に作用する背面からの水平応力は、たて壁から車輛が通行する位置までの距離および重さ指定道路であるかないかに応じて、等分布荷重 10kN/m^2 を用いて計算するのか、20ton 車の輪荷重 40kN から 25ton 車の輪荷重 50kN までを引用して Boussinesq 式を用いて計算するのか、区別して計算できる。

以下では重さ指定道路ではない道路を想定し、総重量 200kN 、後輪の輪荷重 40kN 、後輪の隣接軸距 1.31m 、輪距 1.85m の大型ダンプトラックが繰返し走行した場合の断面力と、等分布荷重 10kN/m^2 の断面力を比較した。それぞれの計算値には裏込め土自体の土圧を加味して、たて壁の曲げ剛性は十分高いものと想定した。Boussinesq 式に乗じる係数 α は、相似性を考慮した

とき曲げ剛性がプレキャストL型擁壁の約3倍である，軽量形鋼の壁面で求められた表-3.1の残留応力最大値の平均値0.95および水平応力最大値の平均値1.23を用いた。

壁側の車輛通行位置が，たて壁背面から1.0mの計算モデルを図-8.1に示す．延長方向の載荷位置は，車輛が走行中にプレキャストL型擁壁の製品延長2mの両端から同じ34.5cm離れた位置を後輪が通過した瞬間を表している．その瞬間の深さ1.2mにおける，たて壁に作用する背面からの水平応力の分布を図-8.2に示す．繰返し載荷では，壁側の車輪および1.85m離れた車輪の両方から，Boussinesq解析解に係数0.95を乗じた残留応力が延長方向に均一に作用し，4箇所の車輪接地位置正面をピークに山なりの応力の振幅が作用する．これらの断面力は第4章と同様に，残留応力と応力の振幅とを分けて考え，数値積分を用いて求めることができる。

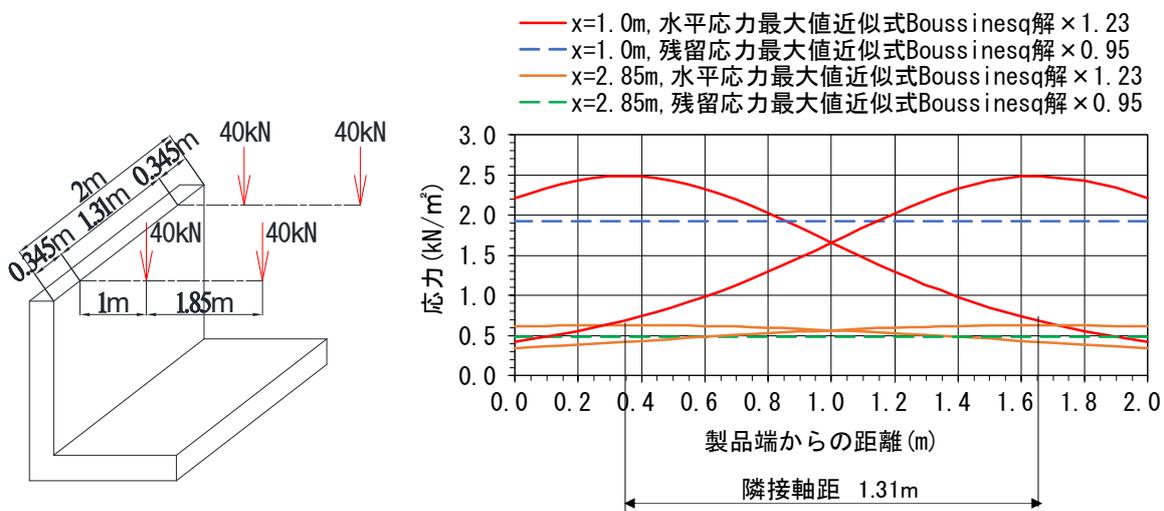


図-8.1 載荷モデル

図-8.2 たて壁に作用する水平応力(輪荷重40kN，深さ1.2m)

壁側の車輛通行位置が，たて壁背面から1.0mのときの断面力計算結果を表-8.1および表-8.2に示す．たて壁背面から1mの車輛通行では，曲げモーメントがたて壁天端から1.4mの深さで等分布荷重10kN/m²の1.22倍，せん断力はたて壁天端から1.0mの深さで1.31倍となり，等分布荷重を用いて水平応力を決めてしまうと，車輛通行による曲げモーメントおよびせん断力が過少評価されてしまう結果となった。

表-8.1 曲げ剛性が高いたて壁に作用する曲げモーメント(車輛通行位置1.0m)

(単位 kN・m)

たて壁深さ	1.0m	1.2m	1.4m	1.6m	1.8m	2.1m	2.4m	2.7m	3.0m
等分布荷重 A	3.64	5.65	8.24	11.48	15.43	22.86	32.27	43.90	57.98
輪荷重40kN B	4.27	6.85	10.07	13.94	18.50	26.70	36.68	48.64	62.75
比率 B/A	1.17	1.21	1.22	1.21	1.20	1.17	1.14	1.11	1.08

表-8.2 曲げ剛性が高いたて壁に作用するせん断力(車輛通行位置 1.0m)

(単位 kN)

たて壁深さ	0.8m	1.0m	1.2m	1.4m	1.6m	1.8m	2.1m	2.4m	2.7m
等分布荷重 A	6.28	8.69	11.43	14.52	17.93	21.68	27.94	34.95	42.72
輪荷重 40kN B	8.18	11.34	14.50	17.72	21.05	24.55	30.22	36.47	43.33
比率 B/A	1.30	1.31	1.27	1.22	1.17	1.13	1.08	1.04	1.01

さらに、たて壁背面から車輛通行位置までの距離を変えた比較も行った。壁側の車輛通行位置がたて壁背面から 1.4m のときの断面力計算結果を表-8.3 および表-8.4 に示す。たて壁背面から 1.4m の車輛通行では、曲げモーメントがたて壁天端から 2.7m~3.0m の深さで等分布荷重 10kN/m² の 0.93 倍、せん断力はたて壁天端から 1.6m の深さで 0.96 倍となり、等分布荷重を用いて水平応力を決めても安全という結果になった。

表-8.3 曲げ剛性が高いたて壁に作用する曲げモーメント(車輛通行位置 1.4m)

(単位 kN・m)

たて壁深さ	1.0m	1.2m	1.4m	1.6m	1.8m	2.1m	2.4m	2.7m	3.0m
等分布荷重 A	3.64	5.65	8.24	11.48	15.43	22.85	32.27	43.90	57.98
輪荷重 40kN B	2.65	4.51	6.96	10.06	13.85	20.91	29.82	40.65	53.70
比率 B/A	0.73	0.80	0.84	0.88	0.90	0.92	0.92	0.93	0.93

表-8.4 曲げ剛性が高いたて壁に作用するせん断力(車輛通行位置 1.4m)

(単位 kN)

たて壁深さ	1.0m	1.2m	1.4m	1.6m	1.8m	2.1m	2.4m	2.7m	3.0m
等分布荷重 A	8.69	11.43	14.51	17.93	21.68	27.94	34.95	42.72	51.24
輪荷重 40kN B	7.85	10.75	13.86	17.18	20.72	26.47	32.80	39.75	47.35
比率 B/A	0.90	0.94	0.96	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92

以上の表-8.1 から表-8.4 の結果を参考にすれば、重さ指定道路ではない道路に設置された曲げ剛性が高いL型擁壁では、たて壁背面から 1.3m~1.4m 以内を車輛が通行するときは、輪荷重を 40kN とし Boussinesq 式に係数 α を乗じて背面からの水平応力を算出し、その水平応力を基に断面力を算出するべきである。たて壁背面から 1.3m~1.4m 以遠は、従来通りの等分布荷重 10kN/m² を用いて計算可能である。重さ指定道路においては、第1章の図-1.4, 表-1.4 および表-1.5 からすれば、たて壁背面から 1.4m よりさらに距離をおいて、Boussinesq 式に係数 α を乗じて背面からの水平応力を算出すべきである。

以上は、軽量形鋼の壁面を用いた実験結果から導き出された、Boussinesq 式に乗じる係数 α を用いて計算しているので、今後更に実験データが増えればより正確な係数 α で計算可能と考える。

8.3 たて壁に作用する水平応力におけるたて壁の曲げ剛性の考慮

設計段階の二つ目は、車輛から繰返し载荷を受ける場合は、British Standards³⁾と同様に、たて壁の曲げ剛性(弾性係数×断面二次モーメント)を考慮して、背面からの水平応力を決めることである。本論文では、プレキャストL型擁壁の約3倍の曲げ剛性であれば、たて壁に作用する残留応力および応力の振幅が、载荷30~40回でピークを迎えた後、減少することを2.6.1および2.6.2で既に述べた。また、プレキャストL型擁壁の曲げ剛性程度では、たて壁に作用する残留応力および応力の振幅が増幅することも7.2.3で既に述べている。このとき用いたたて壁の部材厚さは、かかと版との取付け部の厚さであり、一番厚い箇所である。道路用のプレキャストL型擁壁の場合は、表-8.5のようにたて壁の背面に勾配がついており、擁壁高3m以下のたて壁の天端幅は8cm~10cmである。このような場合、繰返し载荷を受けると断面二次モーメントの減少による天端水平変位の増加は避けられず、背面からの水平応力の増幅は大きくなると考えられる。

これに対し現場打ちL型擁壁の場合は、「土木構造物設計ガイドライン」(平成8年6月)、「土木構造物設計マニュアル(案)〔土工構造物・橋梁編〕」(平成11年11月)および土木構造物設計マニュアル(案)に係わる設計・施工の手引き(案)〔ボックスカルバート・擁壁編〕⁴⁾により、生産性の向上が図られた結果、たて壁の前面と背面には勾配を設けないことになった。その結果、現場打ちL型擁壁のたて壁の天端幅は、地上高1.0mのL型擁壁でも15cmあり、弾性係数の差を考慮しても、天端ではプレキャストL型擁壁の3倍以上の曲げ剛性があるので、軽量形鋼の壁面が約3倍の曲げ剛性だったことを考えると、現場打ちL型擁壁に作用する背面からの水平応力は、繰返し载荷を受けても、あるピーク値を迎えた後は減少するものと考えられる。

表-8.5 現場打ちL型擁壁とプレキャストL型擁壁のたて壁の幅

擁壁高		1.0m	1.5m	2.0m	2.5m	3.0m
天端幅	現場打ちL型擁壁	15cm	15cm	25cm	25cm	30cm
	プレキャストL型擁壁	8cm以上	9cm以上	9cm以上	10cm	10cm
	差	7cm未満	6cm未満	16cm未満	15cm	20cm
取付け部の幅	現場打ちL型擁壁	15cm	15cm	25cm	25cm	30cm
	プレキャストL型擁壁	9cm	13cm	17cm	21cm	25cm
	差	6cm	2cm	8cm	4cm	5cm

※計算条件・・・上载荷重 10kN/m²，土の内部摩擦角 30°，土の単位体積重量 19kN/m³

※現場打ちL型擁壁のたて壁幅は、参考文献5)を参考に計算した。

※プレキャストL型擁壁のたて壁幅は、参考文献6)p31~p33による。

本研究で行った軽量形鋼の壁面と疑似L型擁壁を使用した繰返し载荷実験より、繰返し载荷で水平応力が増幅しない曲げ剛性は、プレキャストL型擁壁の曲げ剛性の1倍~3倍の間と想定される。もし、背面からの水平応力が増加する曲げ剛性が解明できれば、プレキャストL型擁壁の耐久性向上に繋がる。

8.4 プレキャストL型擁壁の変状・損傷に対する繰返し載荷重の評価と対策

コンクリート構造物の変状・損傷においては、いくつかの原因が複雑に作用し、荷重の繰返しによる疲労劣化のみが原因となることはほとんどないとされており、疲労損傷の診断法が確立されていない²⁾。この点について、長谷川らはプレキャストL型擁壁の天端近くに繰返し水平荷重を加え、L型擁壁のたて壁が設計荷重より小さい荷重で破壊する可能性を示している⁷⁾。この節では、1.1.2で取り上げた現道に設置されているプレキャストL型擁壁の損傷状況の内、たて壁のひび割れと傾斜について、評価と対策を考える。

(1) たて壁と車輛走行位置の離隔確保

大型車輛の走行位置がたて壁から1m程度未満の場合、あるいは車輛用防護柵が無く大型車輛が擁壁に接近して駐車できる場合は、輪荷重の方が設計で考慮している10kN/m²の載荷重よりも、大きな水平応力および断面力を発生させる可能性がある。このような場合、道路構造の対策として歩道の設置、車輛用防護柵や縁石の設置により、擁壁と通行車輛の離隔を確保して、プレキャストL型擁壁のたて壁に過大な水平応力が生じないようにする必要がある。

(2) たて壁の曲げ剛性の増加

プレキャストL型擁壁のたて壁において、明確な天端水平変位が確認される場合は、たて壁の増厚や炭素繊維シート等による補強が必要と思われる。

(3) 裏込め土の改良

擁壁高さ40cmで剛性が高いL型擁壁において、裏込め土をかかと版幅あるいはそれ以上の幅で地盤改良した場合、裏込め土表面に載荷重10kN/m²~70kN/m²が載荷されても、地盤改良部分の擁壁壁面には水平土圧が発生しないことが報告されている⁸⁾。この結果より、同論文では地盤改良された裏込め土に表面載荷がある場合は、擁壁と裏込め土が一体となるため、擁壁本体に発生する水平土圧は小さくなるとしている。

本研究においては、輪荷重によりたて壁に作用する背面からの水平応力が、裏込め土の塑性変形に影響されていることから、裏込め土が塑性変形しないように地盤改良を行うのも有効と思われる。

(4) 取替え

車輛の繰返し載荷によるプレキャストL型擁壁の損傷が著しい場合は、車輛走行位置と距離を離して、新しいプレキャストL型擁壁を設置するなどの措置が必要である。これは部分的な更新や補修等において、現場打ちL型擁壁だと大掛かりな補修工事になるところ、プレキャストL型擁壁だと細かなスパンでの取替えが可能とされている⁹⁾ためである。

これらの対策は、擁壁高さが低いほど輪荷重の影響が大きいので大事である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工 擁壁工指針(平成24年度版)，pp.16-22，丸善，2012.
- 2) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'13 [基礎編]，pp.57-60，pp.213-219，報光社，2013.
- 3) British Standards Institution: *British Standards, Eurocode 7. Geotechnical design- Part1. General rules*, pp.102-103, British Standards Institution, 2004.
- 4) 建設省大臣官房技術調査室, 建設省土木研究所監修: 土木構造物設計ガイドライン 土木構造物設計マニュアル(案)[土木構造物・橋梁編] 土木構造物設計マニュアル(案)に係る設計・施工の手引(案)[ボックスカルバート・擁壁編]，全日本建設技術協会，1999.
- 5) 東京都都市整備局: 「宅地造成等規制法」の規定に基づく宅地造成に関する工事の許可の審査基準 資料編 6. 鉄筋コンクリート造擁壁の標準断面図，2020.
- 6) 国土交通省四国整備局：プレキャストL型擁壁設計施工マニュアル(案) 改定版，2001.
- 7) 王海軍，長谷川明，塩井幸武，庄谷征美：繰り返し水平力を受けるL型擁壁の低サイクル疲労実験，八戸工業大学構造工学研究所紀要，第6巻，1999.
- 8) 和田昇三，遠坂文規，伊集院博，刑部徹：擁壁背面を地盤改良した場合の土圧に関する実験的研究 その1 上載荷重に対する地盤改良効果について，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.637，pp.487-494，2009.
- 9) 北陸地方整備局 企画部 技術管理課：北陸地方のプレキャストコンクリート製品活用事例，2016.

第9章 結論と今後の課題

9.1 結論

多くの研究者は、裏込め土上の活荷重載荷により、裏込め土を介してたて壁に作用する土圧が、表面付近で大きく壁の高さ全体にわたって非直線的に減少することを明らかにしている。しかしながら、我が国の盛土区間に設置されたプレキャストL型擁壁の設計においては、載荷重として車輛重量を車輛占有面積で除した等分布荷重を使用している。また、コンクリート構造物において、通行車輛の繰返し荷重による劣化の機構を明らかにしたものは、コンクリート道路橋の床版を除きほとんどない。このように、損傷の診断法が確立されていない。

そこで、本研究では軽量形鋼の壁面および疑似L型擁壁の模型実験を実施して、プレキャストL型擁壁の裏込め土表面に通行車輛の輪荷重が作用したとき、裏込め土を介してたて壁にどのような水平応力が生じ、どのような過程でL型擁壁が破壊に至るのかを推定した。

以下に、得られた結果をまとめ、本論文の結論とする。

第2章では、プレキャストL型擁壁のたて壁の破壊過程を知るには、基準となる曲げ剛性が高い壁面に作用する背面からの水平応力を調べる必要があったため、曲げ剛性が相似性を考慮したときプレキャストL型擁壁の約3倍である軽量形鋼の壁面を作成した。この壁面を利用して、裏込め材表面に輪荷重を繰返し載荷したとき、裏込め材を介して軽量形鋼の壁面に作用する背面からの水平応力を測定した。

一つ目の結果として、裏込め材表面に輪荷重を繰返し載荷すると、はじめは応力の振幅のみで、徐々に残留応力に置き換わり、応力の振幅は縮小していく。このとき、裏込め材の転圧を行うことで、水平応力最大値は下がる。二つ目の結果として、たて壁から試験輪までの距離が4cmの場合、鉛直断面における繰返し載荷時の残留応力および応力の振幅の分布は、地表面近くが大きく深さが増すほど急激に減少する。同じ深さ方向においては、残留応力は延長方向に同じ大きさで作用し、応力の振幅は載荷点の正面を最大値とした山なりになる。三つ目の結果として、曲げ剛性が高い壁面の場合、壁面の水平変位が抑えられるため、ある残留応力値に達するとそれ以後は載荷し続けても残留応力は減少に転じる。残留応力および応力の振幅の最大値を越えてからの減少率は、最大値の応力が大きいほど大きくなる。四つ目の結果として、繰返し荷重およびタンパ転圧による残留応力は、放置していると時間の経過とともに減少する。

第3章では、水平応力分布を表す数式を考えた。軽量形鋼の壁面に作用した残留応力および応力の振幅の分布が Boussinesq 解析解と似ていることから、これらは Boussinesq 式に係数を乗じた近似式で近似できる。

第4章では、**第3章**で求めた近似式を使用して、軽量形鋼の壁面に作用した断面力を数値積分にて計算した。結果として、繰返し載荷重により裏込め材を介して軽量形鋼の壁面に作用する断面力は、輪荷重が通過する時に作用する断面力に、残留応力による断面力を加えたものになる。この断面力は、輪荷重の大きさ、車輛の走行位置、断面力を求める地表面からの深さによっては、「道路土工-擁壁工指針」で決められている 10kN/m^2 の載荷重による断面力を上回る

ことがある。

第5章では、曲げ剛性がプレキャストL型擁壁とほぼ等しい、たて壁高さ20cm、部材厚3cmの疑似L型擁壁を作製して静的破壊実験を行い、静的に破壊する曲げモーメントを求めた。得られた曲げモーメントおよび軽量形鋼の壁面に作用した背面からの水平応力を基に、疑似L型擁壁は載荷重1875Nを繰返し載荷すれば破壊すると推定できた。1875Nで破壊する載荷回数は、たて壁に作用する曲げモーメントおよびせん断力がはじめに最大となった載荷30～40回程度と推定した。

第6章では、載荷位置がたて壁背面から4cmの条件で、載荷重の大きさを変えて疑似L型擁壁が破壊するまで繰返し載荷を続け、そのときの残留応力および応力の振幅、天端水平変位、破壊時の載荷回数を測定した。測定結果は以下の通りである。

疑似L型擁壁の深さ60mm以深の残留応力は、載荷4～7回で最大値となったあと、載荷を重ねるごとに減衰する。応力の振幅は載荷2～3回で最大値になり、その後は載荷を重ねるごとに減衰する傾向がある。深さ45mmの残留応力は、載荷7～11回までゆるやかに上昇し、その後たて壁が破壊するまで一定または漸増あるいは漸減する。応力の振幅は載荷1～3回で最大値になり、その後は載荷13～30回程度まで載荷を重ねるごとに減衰し、再び増加に転じる傾向がある。深さ30mmの残留応力は、載荷10回程度までゆるやかに上昇し、その後たて壁が破壊するまで漸増する傾向がある。応力の振幅は、載荷1～2回で最大値になり、その後は載荷3～9回程度まで載荷を重ねるごとに減衰し、再び増加に転じた後、たて壁が破壊するまで増加し続ける傾向がある。深さ15mmの残留応力は、たて壁が破壊するときに最大値になる。最大値になるまでの載荷回数は載荷重が小さいほど増加する。応力の振幅は、載荷初期の値は小さく、徐々に増加して、たて壁が破壊する載荷回数から1～11回少ない回数で最大値になり、その後は載荷を重ねるごとに減衰する傾向がある。

疑似L型擁壁の天端水平変位は、残留応力の増加に合わせて載荷初期に大きく増加し、残留応力が漸増するようになってからは天端水平変位も漸増した。また、天端水平変位は応力の振幅に合わせて波状に増減を繰り返した。そして、天端水平変位が平均して1.84mmに達するとたて壁は破壊した。

測定結果から言えることは、各深さに共通して、裏込め材の塑性変形が継続されている間は残留応力および応力の振幅が増加し、裏込め材が土中の応力に対応した粒子構造になりはじけると、残留応力および応力の振幅は減衰することである。また、繰返し載荷重の大きさが違って、壁の天端水平変位による残留応力および応力の振幅の増加は、たて壁の天端に近いほど大きくなる。裏込め土の塑性変形が大きければ水平応力も大きくなるのであれば、Spanglarが輪荷重により裏込め土を介して壁面に作用する水平応力を、Boussinesq解析解の2倍の大きさとした結果も理解できる。

第7章では、軽量形鋼の壁面と疑似L型擁壁のたて壁とを曲げ剛性の観点から比較した。疑似L型擁壁の場合、繰返し載荷重が小さいほど破壊までに要する載荷回数は増加し、破壊すると想定した繰返し載荷重以下でも破壊した。また、輪荷重の繰返し載荷により裏込め材を介して壁面に作用する残留応力および応力の振幅は、壁体の曲げ剛性により大きさが左右された。

相似性を考慮したとき、曲げ剛性がプレキャストL型擁壁とほぼ等しい疑似L型擁壁では、裏込め材の塑性変形がたて壁の水平変位を増加させ、今度はたて壁の水平変位が裏込め材の塑性変形を促した。それが残留応力および応力の振幅の増加を誘引し、たて壁の破壊を早めた。

9.2 今後の課題

研究当初はプレキャストL型擁壁の疲労劣化も対象としていたが、本実験の疑似L型擁壁の供試体数には限りがあり、7.3.2で述べた通り数多くの実験を行うのは難しかったため、実験データの統計的処理を行うまでに至っていない。例えば、疑似L型擁壁のたて壁背面から試験輪までの距離を変えて、たて壁に作用する背面からの水平応力の測定や、疑似L型擁壁の曲げ剛性を変えて、残留応力および応力の振幅が増幅しないたて壁厚さを求めるまでには至っていない。そのほか、今回は疑似L型擁壁の繰返し載荷試験で、繰返し載荷重の大きさを1692Nまでとしたが、これを更に小さくして破壊しない繰返し載荷重を求めることも今後の課題となった。いずれにせよ、車輛の繰返し載荷によるL型擁壁の劣化過程を解明するには、まだまだ多くの実験データが必要となる。

また、7.2において、載荷30～40回で破壊すると想定した繰返し載荷重1875Nに対し、それより大きな繰返し載荷重では、Boussinesq式が適用できないことが分かったので、裏込め土が塑性変形しているときに作用する、背面からの水平応力のメカニズムを解明することも今後の課題である。

付 録

第 3 章の表-3.1 および図-3.3, 図-3.4 について

1 軽量形鋼の壁面に作用した残留応力最大値および水平応力最大値の値

図-3.3 および図-3.4 に記した残留応力最大値および水平応力最大値は、付表-1 のように計算した。タンパ転圧後の残留応力の値が 34.3kN/m² を下回る測定値は、実際の測定値が 0kN/m² ~34.3kN/m² の間になるので、データとして棄却した。

付表-1 残留応力最大値および水平応力最大値

(a) 1472N

繰返し 載荷重	実験 No.	方向	載荷 回数 (回)	深さ (cm)	端部圧 力計か らの距 離 (cm)	載荷前50 回の測定 値平均		残留応力 最大値+タ ンパ転圧	残留応力 最大値 C=B-A (kN/m ²)	水平応力 最大値+タ ンパ転圧 D (kN/m ²)	水平応力 最大値 E=D-A (kN/m ²)
						A (kN/m ²)	B (kN/m ²)				
1472N	299	たて	800	1.5		33.94で棄却	93.63				
				3.0		50.08	91.72	41.64	101.28	51.20	
				4.5		46.69	83.08	36.39	86.34	39.65	
				6.0		52.18	80.24	28.06	87.56	35.38	
				7.5		50.26	61.13	10.87	63.98	13.72	
				9.5		48.78	59.89	11.11	62.41	13.63	
				12.0		46.64	53.81	7.17	56.25	9.61	
				15.0		53.26	56.63	3.37	58.62	5.36	
1472N	317	同じ 深さ	80	2.0	0.0	47.83	108.81	60.98	125.35	77.52	
					15.0	55.31	128.28	72.97	155.29	99.98	
					30.0	55.09	120.25	65.16	140.81	85.72	
					45.0	59.36	133.00	73.64	160.54	101.18	
					60.0	57.11	125.60	68.49	145.74	88.63	
					80.0	53.18	125.55	72.37	145.92	92.74	
					105.0	51.38	116.55	65.17	133.41	82.03	
					135.0	48.86	108.52	59.66	125.45	76.59	
1472N	310	同じ 深さ	80	3.0	0.0	57.99	115.72	57.73	125.13	67.14	
					15.0	67.41	151.92	84.51	179.43	112.02	
					30.0	55.53	159.51	103.98	178.21	122.68	
					45.0	51.58	153.82	102.24	181.06	129.48	
					60.0	53.27	174.55	121.28	203.83	150.56	
					80.0	57.61	145.48	87.87	167.73	110.12	
					105.0	51.92	144.88	92.96	163.98	112.06	
					135.0	43.54	123.21	79.67	142.36	98.82	
1472N	309	同じ 深さ	80	4.0	0.0	65.28	109.17	43.89	123.90	58.62	
					15.0	72.58	132.78	60.20	154.31	81.73	
					30.0	58.39	118.05	59.66	139.19	80.80	
					45.0	64.28	133.49	69.21	160.73	96.45	
					60.0	61.41	133.49	72.08	160.73	99.32	
					80.0	60.24	117.79	57.55	136.26	76.02	
					105.0	54.77	117.64	62.87	135.93	81.16	
					135.0	49.16	119.63	70.47	149.92	100.76	
1472N	304	同じ 深さ	80	6.0	0.0	59.58	123.16	63.58	146.59	87.01	
					15.0	32.86で棄却	77.26				
					30.0	47.17	95.30	48.13	102.48	55.31	
					45.0	52.93	96.50	43.57	105.44	52.51	
					60.0	50.24	110.73	60.49	122.92	72.68	
					80.0	59.95	107.07	47.12	118.45	58.50	
					105.0	61.08	96.81	35.73	104.37	43.29	
					135.0	43.87	82.27	38.40	89.18	45.31	
1472N	303	同じ 深さ	80	8.0	0.0	44.09	92.47	48.38	102.56	58.47	
					15.0	34.39で棄却	64.58				
					30.0	52.20	82.54	30.34	90.52	38.32	
					45.0	51.86	78.21	26.35	84.30	32.44	
					60.0	54.54	85.12	30.58	91.62	37.08	
					80.0	61.04	84.30	23.26	90.00	28.96	
					105.0	59.93	82.55	22.62	88.00	28.07	
					135.0	52.85	71.29	18.44	74.95	22.10	
平均						53.57					
データ数	51	使用不可	3								

(b) 1275N

繰返し 載荷重	実験 No.	方向	載荷 回数 (回)	深さ (cm)	端部圧 力計か らの距 離 (cm)	載荷前50	残留応力	残留応力	水平応力	水平応力
						回の測定 値平均 A (kN/m ²)	最大値+タ ンパ転圧 B (kN/m ²)	最大値 C=B-A (kN/m ²)	最大値+タ ンパ転圧 D (kN/m ²)	最大値 E=D-A (kN/m ²)
1275N	316	同じ 深さ	80	2.0	0.0	49.05	109.99	60.94	126.36	77.31
					15.0	53.90	128.40	74.50	152.32	98.42
					30.0	47.68	113.57	65.89	133.09	85.41
					45.0	54.36	115.61	61.25	140.41	86.05
					60.0	71.39	147.72	76.33	172.52	101.13
					80.0	52.58	116.53	63.95	132.48	79.90
					105.0	52.50	121.71	69.21	134.31	81.81
					135.0	50.83	173.86	123.03	208.94	158.11
					165.0	47.37	129.22	81.85	159.92	112.55
1275N	311	同じ 深さ	80	3.0	0.0	47.75	109.99	62.24	120.63	72.88
					15.0	67.92	142.75	74.83	159.49	91.57
					30.0	62.85	138.37	75.52	155.85	93.00
					45.0	54.72	106.26	51.54	142.44	87.72
					60.0	49.45	105.85	56.40	122.92	73.47
					80.0	50.02	137.93	87.91	157.65	107.63
					105.0	55.42	151.38	95.96	168.86	113.44
					135.0	46.81	122.42	75.61	139.17	92.36
					165.0	48.27	102.56	54.29	117.51	69.24
1275N	331	同じ 深さ	1090	3.0	0.0	48.11	119.81	71.70	146.82	98.71
					15.0	60.86	129.19	68.33	158.70	97.84
					30.0	54.24	112.76	58.52	137.97	83.73
					45.0	58.64	116.01	57.37	143.66	85.02
					60.0	59.26	118.05	58.79	148.54	89.28
					80.0	59.66	118.21	58.55	146.33	86.67
					105.0	51.89	125.77	73.88	154.23	102.34
					135.0	52.88	110.06	57.18	131.59	78.71
					165.0	51.05	132.45	81.40	155.89	104.84
1275N	330	同じ 深さ	721	3.0	0.0	36.48	137.40	100.92	193.05	156.57
					15.0	51.52	129.59	78.07	184.61	133.09
					30.0	45.46	126.58	81.12	173.74	128.28
					45.0	52.67	129.43	76.76	182.69	130.02
					60.0	52.09	141.22	89.13	198.54	146.45
					80.0	54.18	135.83	81.65	177.37	123.19
					105.0	39.78	117.23	77.45	159.92	120.14
					135.0	47.36	138.76	91.40	186.61	139.25
					165.0	47.88	154.27	106.39	186.18	138.30
1275N	329	同じ 深さ	120	4.0	0.0	33.68で棄却				
					15.0	44.15	130.29	86.14	175.85	131.70
					30.0	37.72	101.75	64.03	127.65	89.93
					45.0	40.28	137.11	96.83	186.84	146.56
					60.0	55.67	130.53	74.86	165.88	110.21
					80.0	49.67	158.22	108.55	209.13	159.46
					105.0	49.21	121.49	72.28	153.14	103.93
					135.0	43.77	114.97	71.20	143.60	99.83
					165.0	48.68	118.48	69.80	135.63	86.95
1275N	308	同じ 深さ	100	4.0	0.0	53.31	98.54	45.23	112.86	59.55
					15.0	59.92	94.51	34.59	106.87	46.95
					30.0	56.48	110.73	54.25	127.40	70.92
					45.0	59.63	118.05	58.42	150.16	90.53
					60.0	63.75	128.21	64.46	153.42	89.67
					80.0	60.77	134.58	73.81	161.01	100.24
					105.0	57.68	112.35	54.67	132.68	75.00
					135.0	48.89	121.22	72.33	153.92	105.03
					165.0	58.49	93.27	34.78	106.60	48.11
1275N	327	同じ 深さ	120	6.0	0.0	31.30で棄却				
					15.0	56.35	102.08	45.73	121.62	65.27
					30.0	56.05	94.87	38.82	109.51	53.46
					45.0	57.14	93.25	36.11	107.88	50.74
					60.0	61.91	125.36	63.45	157.89	95.98
					80.0	66.46	121.57	55.11	145.48	79.02
					105.0	54.57	93.25	38.68	108.70	54.13
					135.0	54.12	81.75	27.63	92.91	38.79
					165.0	51.33	81.56	30.23	90.85	39.52
1275N	326	同じ 深さ	120	8.0	0.0	34.24で棄却				
					15.0	55.46	91.72	36.26	101.28	45.82
					30.0	57.62	97.72	40.10	107.88	50.26
					45.0	58.12	91.62	33.50	103.41	45.29
					60.0	60.34	85.93	25.59	94.06	33.72
					80.0	59.38	88.84	29.46	97.65	38.27
					105.0	48.69	80.65	31.96	88.78	40.09
					135.0	50.00	76.16	26.16	83.34	33.34
					165.0	54.69	83.18	28.49	87.21	32.52
平均						53.29				
データ数	69	使用不可	3							

(c) 1079N

繰返し 載荷重	実験 No.	方向	載荷 回数 (回)	深さ (cm)	端部圧 力計か らの距 離 (cm)	載荷前50 回の測定 値平均 A (kN/m ²)	残留応力 最大値+タ ンパ転圧 B (kN/m ²)	残留応力 最大値 C=B-A (kN/m ²)	水平応力 最大値+タ ンパ転圧 D (kN/m ²)	水平応力 最大値 E=D-A (kN/m ²)
1079N	315	同じ 深さ	80	2.0	0.0	36.24	94.85	58.61	104.67	68.43
					15.0	53.66	153.52	99.86	177.84	124.18
					30.0	46.74	111.14	64.40	124.96	78.22
					45.0	61.08	124.55	63.47	142.03	80.95
					60.0	59.38	134.31	74.93	160.33	100.95
					80.0	50.51	114.86	64.35	132.48	81.97
					105.0	52.92	111.95	59.03	127.80	74.88
					135.0	50.83	120.02	69.19	134.78	83.95
					165.0	57.62	150.23	92.61	179.71	122.09
1079N	312	同じ 深さ	80	3.0	0.0	55.38	121.45	66.07	136.18	80.80
					15.0	56.97	112.45	55.48	135.57	78.60
					30.0	51.03	105.85	54.82	122.52	71.49
					45.0	54.80	111.95	57.15	125.77	70.97
					60.0	52.15	110.32	58.17	126.99	74.84
					80.0	59.32	116.12	56.80	129.54	70.22
					105.0	53.12	126.99	73.87	143.66	90.54
					135.0	44.03	98.09	54.06	111.25	67.22
					165.0	44.61	98.93	54.32	113.47	68.86
1079N	307	同じ 深さ	80	4.0	0.0	38.50	81.76	43.26	90.35	51.85
					15.0	56.56	108.86	52.30	127.60	71.04
					30.0	53.31	111.54	58.23	127.40	74.09
					45.0	57.42	105.85	48.43	123.33	65.91
					60.0	57.50	106.66	49.16	122.92	65.42
					80.0	59.46	104.37	44.91	119.89	60.43
					105.0	50.82	85.52	34.70	93.65	42.83
					135.0	41.76	110.85	69.09	139.56	97.80
					165.0	43.57	82.77	39.20	91.66	48.09
1079N	328	同じ 深さ	120	6.0	0.0	34.20で棄却				
					15.0	49.65	92.11	42.46	104.47	54.82
					30.0	52.41	94.47	42.06	106.66	54.25
					45.0	50.51	88.37	37.86	99.35	48.84
					60.0	53.74	87.56	33.82	98.94	45.20
					80.0	57.97	91.36	33.39	101.43	43.46
					105.0	69.09	117.64	48.55	133.90	64.81
					135.0	60.65	110.06	49.41	126.01	65.36
					165.0	54.99	87.62	32.63	95.29	40.30
1079N	325	同じ 深さ	120	8.0	0.0	32.76で棄却				
					15.0	54.66	74.17	19.51	81.35	26.69
					30.0	49.74	68.86	19.12	74.14	24.40
					45.0	49.12	70.08	20.96	78.21	29.09
					60.0	57.61	74.55	16.94	80.65	23.04
					80.0	58.04	78.77	20.73	85.49	27.45
					105.0	51.33	74.95	23.62	81.46	30.13
					135.0	51.78	74.97	23.19	82.94	31.16
					165.0	47.19	70.65	23.46	73.89	26.70
平均					52.74					
データ数	43	使用不可	2							

(d) 883N

繰返し 載荷重	実験 No.	方向	載荷 回数 (回)	深さ (cm)	端部圧 力計か らの距 離	載荷前50 回の測定 値平均	残留応力 最大値+タ ンパ転圧	残留応力 最大値	水平応力 最大値+タ ンパ転圧	水平応力 最大値
					(cm)	A (kN/m ²)	B (kN/m ²)	C=B-A (kN/m ²)	D (kN/m ²)	E=D-A (kN/m ²)
883N	300	たて	600	1.5		33.94で棄却				
				3.0		50.08	91.72	41.64	101.28	51.20
				4.5		46.69	83.08	36.39	86.34	39.65
				6.0		52.18	80.24	28.06	87.56	35.38
				7.5		50.26	61.13	10.87	63.98	13.72
				9.5		48.78	59.89	11.11	62.41	13.63
				12.0		46.64	53.81	7.17	56.25	9.61
				15.0		53.26	56.63	3.37	58.62	5.36
				18.0		37.98	37.98	0.00	39.55	1.57
883N	314	同じ 深さ	80	0.0		34.81	79.31	44.50	87.90	53.09
				15.0		48.54	88.13	39.59	97.30	48.76
				30.0		46.89	96.50	49.61	104.22	57.33
				45.0		49.93	82.68	32.75	92.03	42.10
				60.0		54.18	99.35	45.17	109.10	54.92
				80.0		43.47	82.55	39.08	90.94	47.47
				105.0		45.18	89.59	44.41	98.13	52.95
				135.0		41.25	86.53	45.28	96.10	54.85
				165.0		43.74	103.78	60.04	115.49	71.75
883N	313	同じ 深さ	80	0.0		46.32	91.17	44.85	100.17	53.85
				15.0		61.44	107.26	45.82	118.83	57.39
				30.0		51.08	98.94	47.86	111.95	60.87
				45.0		53.57	103.82	50.25	114.79	61.22
				60.0		51.85	100.57	48.72	113.17	61.32
				80.0		59.24	115.28	56.04	127.44	68.20
				105.0		55.71	107.48	51.77	115.61	59.90
				135.0		46.09	96.10	50.01	106.07	59.98
				165.0		47.82	106.60	58.78	117.11	69.29
883N	306	同じ 深さ	80	0.0		33.57で棄却				
				15.0		50.63	100.49	49.86	115.24	64.61
				30.0		51.81	112.35	60.54	128.21	76.40
				45.0		50.56	108.70	58.14	133.09	82.53
				60.0		56.83	100.97	44.14	115.61	58.78
				80.0		58.75	102.27	43.52	115.70	56.95
				105.0		44.69	98.94	54.25	96.91	52.22
				135.0		41.15	78.56	37.41	93.31	52.16
				165.0		49.67	96.91	47.24	111.05	61.38
883N	305	同じ 深さ	80	0.0		34.15で棄却				
				15.0		56.18	77.76	21.58	83.34	27.16
				30.0		52.39	72.11	19.72	76.58	24.19
				45.0		57.31	79.83	22.52	85.52	28.21
				60.0		58.63	77.80	19.17	83.08	24.45
				80.0		58.77	75.00	16.23	80.87	22.10
				105.0		49.40	69.67	20.27	75.36	25.96
				135.0		45.00	61.01	16.01	68.19	23.19
				165.0		48.98	67.83	18.85	73.48	24.50
883N	302	同じ 深さ	80	0.0		33.56で棄却				
				15.0		51.59	64.20	12.61	71.38	19.79
				30.0		57.00	66.82	9.82	71.29	14.29
				45.0		56.24	67.64	11.40	72.92	16.68
				60.0		58.47	66.82	8.35	71.29	12.82
				80.0		60.07	68.70	8.63	72.48	12.41
				105.0		52.94	60.72	7.78	63.98	11.04
				135.0		42.77	52.64	9.87	57.43	14.66
				165.0		57.05	69.85	12.80	75.50	18.45
平均					50.68					
データ数	50	使用不可	3							

2 Boussinesq 式に乗じる係数 α の値

表-3.1 に記した係数 α は付表-2 のように計算した。付表-2(a)~(h) に繰返し載荷重ごとに行った最小二乗法による係数 α の決定過程を示す。

付表-2 最小二乗法による係数 α の決定

(a) 載荷重 1472N の残留応力最大値

壁面からの距離 x(m)	壁面に沿った距離 y(m)	地表からの深さ z(m)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(m)	輪荷重 P(kN)	ポアソン比 ν	Boussinesq 解析解 σ_x (kN/m ²)	② 残留 応力 最大値 (kN/m ²)	残留応力最大値												
								$\alpha = 0.91$			$\alpha = 0.92$			$\alpha = 0.93$						
								⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)				
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	84.16	92.54	-8.38	70.2	93.55	-9.39	88.2	94.57	-10.41	108.4				
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	59.66	92.54	-32.88	1081.1	93.55	-33.89	1148.5	94.57	-34.91	1218.7				
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	65.17	92.54	-27.37	749.1	93.55	-28.38	805.4	94.57	-29.40	864.4				
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	72.37	92.54	-20.17	406.8	93.55	-21.18	448.6	94.57	-22.20	492.8				
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	68.49	92.54	-24.05	578.4	93.55	-25.06	628.0	94.57	-26.08	680.2				
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	73.64	92.54	-18.90	357.2	93.55	-19.91	396.4	94.57	-20.93	438.1				
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	65.16	92.54	-27.38	749.7	93.55	-28.39	806.0	94.57	-29.41	864.9				
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	72.97	92.54	-19.57	383.0	93.55	-20.58	423.5	94.57	-21.60	466.60				
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	60.98	92.54	-31.56	996.0	93.55	-32.57	1060.8	94.57	-33.59	1128.30				
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	110.22	82.25	27.97	782.3	83.15	27.07	732.8	84.05	26.17	684.9				
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	108.64	82.25	26.39	696.4	83.15	25.49	649.7	84.05	24.59	604.7				
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	79.67	82.25	-2.58	6.7	83.15	-3.48	12.1	84.05	-4.38	19.2				
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	92.96	82.25	10.71	114.7	83.15	9.81	96.2	84.05	8.91	79.4				
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	87.87	82.25	5.62	31.6	83.15	4.72	22.3	84.05	3.82	14.6				
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	121.28	82.25	39.03	1523.3	83.15	38.13	1453.9	84.05	37.23	1386.1				
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	102.24	82.25	19.99	399.6	83.15	19.09	364.4	84.05	18.19	330.9				
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	103.99	82.25	21.74	472.6	83.15	20.84	434.3	84.05	19.94	397.6				
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	84.52	82.25	2.27	5.2	83.15	1.37	1.9	84.05	0.47	0.2				
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	57.73	82.25	-24.52	601.2	83.15	-25.42	646.2	84.05	-26.32	692.7				
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	63.58	58.79	4.79	22.9	59.43	4.15	17.2	60.08	3.50	12.3				
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	70.46	58.79	11.67	136.2	59.43	11.03	121.7	60.08	10.38	107.7				
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	62.87	58.79	4.08	16.6	59.43	3.44	11.8	60.08	2.79	7.8				
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	57.56	58.79	-1.23	1.5	59.43	-1.87	3.5	60.08	-2.52	6.4				
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	72.08	58.79	13.29	176.6	59.43	12.65	160.0	60.08	12.00	144.0				
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	69.21	58.79	10.42	108.6	59.43	9.78	95.6	60.08	9.13	83.4				
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	59.66	58.79	0.87	0.8	59.43	0.23	0.1	60.08	-0.42	0.2				
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	60.20	58.79	1.41	2.0	59.43	0.77	0.6	60.08	0.12	0.0				
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	43.89	58.79	-14.90	222.0	59.43	-15.54	241.5	60.08	-16.19	262.1				
0.04	0.00	0.045	0.0602	1.472	0.35	52.90	83.93	48.14	35.79	1280.9	48.67	35.26	1243.3	49.20	34.73	1206.2				
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	51.31	24.80	26.51	702.8	25.07	26.24	688.5	25.34	25.97	674.4				
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	48.38	24.80	23.58	556.0	25.07	23.31	543.4	25.34	23.04	530.8				
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	59.14	24.80	34.34	1179.2	25.07	34.07	1160.8	25.34	33.80	1142.4				
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	38.41	24.80	13.61	185.2	25.07	13.34	178.0	25.34	13.07	170.8				
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	35.74	24.80	10.94	119.7	25.07	10.67	113.8	25.34	10.40	108.2				
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	47.12	24.80	22.32	498.2	25.07	22.05	486.2	25.34	21.78	474.4				
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	60.49	24.80	35.69	1273.8	25.07	35.42	1254.6	25.34	35.15	1235.5				
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	43.57	24.80	18.77	352.3	25.07	18.50	342.3	25.34	18.23	332.3				
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	48.14	24.80	23.34	544.8	25.07	23.07	532.2	25.34	22.80	519.8				
0.04	0.00	0.075	0.0850	1.472	0.35	13.84	28.70	12.59	16.11	259.5	12.73	15.97	255.0	12.87	15.83	250.6				
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	20.19	10.11	10.08	101.6	10.22	9.97	99.4	10.33	9.86	97.2				
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	18.67	10.11	8.56	73.3	10.22	8.45	71.4	10.33	8.34	69.6				
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	18.44	10.11	8.33	69.4	10.22	8.22	67.6	10.33	8.11	65.8				
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	22.62	10.11	12.51	156.5	10.22	12.40	153.8	10.33	12.29	151.0				
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	23.26	10.11	13.15	172.9	10.22	13.04	170.0	10.33	12.93	167.2				
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	30.58	10.11	20.47	419.0	10.22	20.36	414.5	10.33	20.25	410.1				
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	26.35	10.11	16.24	263.7	10.22	16.13	260.2	10.33	16.02	256.6				
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	30.34	10.11	20.23	409.3	10.22	20.12	404.8	10.33	20.01	400.4				
0.04	0.00	0.095	0.1031	1.472	0.35	5.73	17.01	5.21	11.80	139.2	5.27	11.74	137.8	5.33	11.68	136.4				
0.04	0.00	0.120	0.1265	1.472	0.35	1.91	12.36	1.74	10.62	112.8	1.76	10.60	112.4	1.78	10.58	111.9				
0.04	0.00	0.150	0.1552	1.472	0.35	0.39	7.43	0.35	7.08	50.1	0.36	7.07	50.0	0.36	7.07	50.0				
0.04	0.00	0.180	0.1844	1.472	0.35	0.00	3.66	0.00	3.66	13.4	0.00	3.66	13.4	0.00	3.66	13.4				
※ σ_x は式(3-3)による。							サンプル数	51				19625.9			19624.6			19671.6		

$\alpha = 0.92$ のとき、差の二乗の合計は、19624.6 で最小になったので、載荷重 1472N の残留応力最大値の係数 α は 0.92 とする。

(b) 載荷重 1472N の水平応力最大値

壁面からの距離 x(m)	壁面に沿った距離 y(m)	地表からの深さ z(m)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(m)	輪荷重 P(kN)	ポアソン比 ν	Boussinesq 解析解 σ_x (kN/m ²)	③ 水平応力最大 値 (kN/m ²)	水平応力最大値									
								$\alpha = 1.16$			$\alpha = 1.17$			$\alpha = 1.18$			
								⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	118.07	117.96	0.11	0.0	118.98	-0.91	0.8	119.99	-1.92	3.7	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	76.59	117.96	-41.37	1711.5	118.98	-42.39	1796.9	119.99	-43.40	1883.6	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	82.03	117.96	-35.93	1291.0	118.98	-36.95	1365.3	119.99	-37.96	1441.0	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	92.74	117.96	-25.22	636.0	118.98	-26.24	688.5	119.99	-27.25	742.6	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	88.63	117.96	-29.33	860.2	118.98	-30.35	921.1	119.99	-31.36	983.4	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	101.18	117.96	-16.78	281.6	118.98	-17.80	316.8	119.99	-18.81	353.8	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	85.72	117.96	-32.24	1039.4	118.98	-33.26	1106.2	119.99	-34.27	1174.4	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	99.98	117.96	-17.98	323.3	118.98	-19.00	361.0	119.99	-20.01	400.4	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.472	0.35	101.69	77.52	117.96	-40.44	1635.4	118.98	-41.46	1718.9	119.99	-42.47	1803.7	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	130.16	104.84	25.32	641.1	105.74	24.42	596.3	106.65	23.51	552.7	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	137.32	104.84	32.48	1055.0	105.74	31.58	997.3	106.65	30.67	940.6	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	98.81	104.84	-6.03	36.4	105.74	-6.93	48.0	106.65	-7.84	61.5	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	112.07	104.84	7.23	52.3	105.74	6.33	40.1	106.65	5.42	29.4	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	110.11	104.84	5.27	27.8	105.74	4.37	19.1	106.65	3.46	12.0	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	150.55	104.84	45.71	2089.4	105.74	44.81	2007.9	106.65	43.90	1927.2	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	129.48	104.84	24.64	607.1	105.74	23.74	563.6	106.65	22.83	521.2	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	122.69	104.84	17.85	318.6	105.74	16.95	287.3	106.65	16.04	257.3	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	112.02	104.84	7.18	51.6	105.74	6.28	39.4	106.65	5.37	28.8	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.472	0.35	90.38	67.14	104.84	-37.70	1421.3	105.74	-38.60	1490.0	106.65	-39.51	1561.0	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	87.01	74.94	12.07	145.7	75.58	11.43	130.6	76.23	10.78	116.2	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	100.76	74.94	25.82	666.7	75.58	25.18	634.0	76.23	24.53	601.7	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	81.16	74.94	6.22	38.7	75.58	5.58	31.1	76.23	4.93	24.3	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	76.02	74.94	1.08	1.2	75.58	0.44	0.2	76.23	-0.21	0.0	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	99.32	74.94	24.38	594.4	75.58	23.74	563.6	76.23	23.09	533.1	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	96.45	74.94	21.51	462.7	75.58	20.87	435.6	76.23	20.22	408.8	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	80.80	74.94	5.86	34.3	75.58	5.22	27.2	76.23	4.57	20.9	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	81.73	74.94	6.79	46.1	75.58	6.15	37.8	76.23	5.50	30.3	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.472	0.35	64.60	58.62	74.94	-16.32	266.3	75.58	-16.96	287.6	76.23	-17.61	310.1	
0.04	0.00	0.045	0.0602	1.472	0.35	52.90	89.62	61.36	28.26	798.6	61.89	27.73	769.0	62.42	27.20	739.8	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	57.41	31.61	25.80	665.6	31.88	25.53	651.8	32.16	25.25	637.6	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	58.47	31.61	26.86	721.5	31.88	26.59	707.0	32.16	26.31	692.2	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	73.10	31.61	41.49	1721.4	31.88	41.22	1699.1	32.16	40.94	1676.1	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	45.32	31.61	13.71	188.0	31.88	13.44	180.6	32.16	13.16	173.2	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	43.29	31.61	11.68	136.4	31.88	11.41	130.2	32.16	11.13	123.9	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	58.50	31.61	26.89	723.1	31.88	26.62	708.6	32.16	26.34	693.8	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	72.68	31.61	41.07	1686.7	31.88	40.80	1664.6	32.16	40.52	1641.9	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	52.51	31.61	20.90	436.8	31.88	20.63	425.6	32.16	20.35	414.1	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.472	0.35	27.25	55.31	31.61	23.70	561.7	31.88	23.43	549.0	32.16	23.15	535.9	
0.04	0.00	0.075	0.0850	1.472	0.35	13.84	34.79	16.05	18.74	351.2	16.19	18.60	346.0	16.33	18.46	340.8	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	26.25	12.89	13.36	178.5	13.00	13.25	175.6	13.11	13.14	172.7	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	24.25	12.89	11.36	129.0	13.00	11.25	126.6	13.11	11.14	124.1	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	22.10	12.89	9.21	84.8	13.00	9.10	82.8	13.11	8.99	80.8	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	28.07	12.89	15.18	230.4	13.00	15.07	227.1	13.11	14.96	223.8	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	28.96	12.89	16.07	258.2	13.00	15.96	254.7	13.11	15.85	251.2	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	37.08	12.89	24.19	585.2	13.00	24.08	579.8	13.11	23.97	574.6	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	32.44	12.89	19.55	382.2	13.00	19.44	377.9	13.11	19.33	373.6	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.472	0.35	11.11	38.32	12.89	25.43	646.7	13.00	25.32	641.1	13.11	25.21	635.5	
0.04	0.00	0.095	0.1031	1.472	0.35	5.73	22.46	6.65	15.81	250.0	6.70	15.76	248.4	6.76	15.70	246.5	
0.04	0.00	0.120	0.1265	1.472	0.35	1.91	15.61	2.22	13.39	179.3	2.23	13.38	179.0	2.25	13.36	178.5	
0.04	0.00	0.150	0.1552	1.472	0.35	0.39	9.82	0.45	9.37	87.8	0.46	9.36	87.6	0.46	9.36	87.6	
0.04	0.00	0.180	0.1844	1.472	0.35	0.00	5.28	0.00	5.28	27.9	0.00	5.28	27.9	0.00	5.28	27.9	
※ σ_x は式(3-3)による。								サンプル数	51								
											27366.1			27352.2			27369.8

$\alpha=1.17$ のとき、差の二乗の合計は、27352.2 で最小になったので、載荷重 1472N の水平応力最大値の係数 α は 1.17 とする。

(c) 載荷重 1275N の残留応力最大値

壁面からの距離 x(m)	壁面に沿った距離 y(m)	地表からの深さ z(m)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(m)	輪荷重 P(kN)	ポアソン比 ν	Boussinesq 解析解 σ_x (kN/m ²)	② 残留 応力 最大値 (kN/m ²)	残留応力最大値								
								$\alpha = 0.98$			$\alpha = 0.99$			$\alpha = 1.00$		
								⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	81.86	86.32	-4.46	19.9	87.20	-5.34	28.5	88.08	-6.22	38.7
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	123.02	86.32	36.70	1346.9	87.20	35.82	1283.1	88.08	34.94	1220.8
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	69.21	86.32	-17.11	292.8	87.20	-17.99	323.6	88.08	-18.87	356.1
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	63.95	86.32	-22.37	500.4	87.20	-23.25	540.6	88.08	-24.13	582.3
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	76.33	86.32	-9.99	99.8	87.20	-10.87	118.2	88.08	-11.75	138.1
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	61.24	86.32	-25.08	629.0	87.20	-25.96	673.9	88.08	-26.84	720.4
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	65.89	86.32	-20.43	417.4	87.20	-21.31	454.1	88.08	-22.19	492.4
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	74.50	86.32	-11.82	139.7	87.20	-12.70	161.3	88.08	-13.58	184.40
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	60.94	86.32	-25.38	644.1	87.20	-26.26	689.6	88.08	-27.14	736.60
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	54.29	76.72	-22.43	503.1	77.51	-23.22	539.2	78.29	-24.00	576.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	75.61	76.72	-1.11	1.2	77.51	-1.90	3.6	78.29	-2.68	7.2
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	95.97	76.72	19.25	370.6	77.51	18.46	340.8	78.29	17.68	312.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	87.91	76.72	11.19	125.2	77.51	10.40	108.2	78.29	9.62	92.5
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	56.40	76.72	-20.32	412.9	77.51	-21.11	445.6	78.29	-21.89	479.2
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	51.53	76.72	-25.19	634.5	77.51	-25.98	675.0	78.29	-26.76	716.1
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	75.53	76.72	-1.19	1.4	77.51	-1.98	3.9	78.29	-2.76	7.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	74.83	76.72	-1.89	3.6	77.51	-2.68	7.2	78.29	-3.46	12.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	62.24	76.72	-14.48	209.7	77.51	-15.27	233.2	78.29	-16.05	257.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	106.39	76.72	29.67	880.3	77.51	28.88	834.1	78.29	28.10	789.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	91.40	76.72	14.68	215.5	77.51	13.89	192.9	78.29	13.11	171.9
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	77.45	76.72	0.73	0.5	77.51	-0.06	0.0	78.29	-0.84	0.7
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	81.66	76.72	4.94	24.4	77.51	4.15	17.2	78.29	3.37	11.4
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	89.13	76.72	12.41	154.0	77.51	11.62	135.0	78.29	10.84	117.5
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	76.76	76.72	0.04	0.0	77.51	-0.75	0.6	78.29	-1.53	2.3
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	81.12	76.72	4.40	19.4	77.51	3.61	13.0	78.29	2.83	8.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	78.07	76.72	1.35	1.8	77.51	0.56	0.3	78.29	-0.22	0.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	100.92	76.72	24.20	585.6	77.51	23.41	548.0	78.29	22.63	512.1
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	81.40	76.72	4.68	21.9	77.51	3.89	15.1	78.29	3.11	9.7
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	57.18	76.72	-19.54	381.8	77.51	-20.33	413.3	78.29	-21.11	445.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	73.88	76.72	-2.84	8.1	77.51	-3.63	13.2	78.29	-4.41	19.4
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	58.55	76.72	-18.17	330.1	77.51	-18.96	359.5	78.29	-19.74	389.7
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	58.79	76.72	-17.93	321.5	77.51	-18.72	350.4	78.29	-19.50	380.3
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	57.38	76.72	-19.34	374.0	77.51	-20.13	405.2	78.29	-20.91	437.2
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	58.52	76.72	-18.20	331.2	77.51	-18.99	360.6	78.29	-19.77	390.9
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	68.34	76.72	-8.38	70.2	77.51	-9.17	84.1	78.29	-9.95	99.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	71.70	76.72	-5.02	25.2	77.51	-5.81	33.8	78.29	-6.59	43.4
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	34.79	54.84	-20.05	402.0	55.40	-20.61	424.8	55.96	-21.17	448.2
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	72.33	54.84	17.49	305.9	55.40	16.93	286.6	55.96	16.37	268.0
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	54.68	54.84	-0.16	0.0	55.40	-0.72	0.5	55.96	-1.28	1.6
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	73.80	54.84	18.96	359.5	55.40	18.40	338.6	55.96	17.84	318.3
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	64.46	54.84	9.62	92.5	55.40	9.06	82.1	55.96	8.50	72.2
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	58.41	54.84	3.57	12.7	55.40	3.01	9.1	55.96	2.45	6.0
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	54.24	54.84	-0.60	0.4	55.40	-1.16	1.3	55.96	-1.72	3.0
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	34.59	54.84	-20.25	410.1	55.40	-20.81	433.1	55.96	-21.37	456.7
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	45.22	54.84	-9.62	92.5	55.40	-10.18	103.6	55.96	-10.74	115.3
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	69.80	54.84	14.96	223.8	55.40	14.40	207.4	55.96	13.84	191.5
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	71.20	54.84	16.36	267.6	55.40	15.80	249.6	55.96	15.24	232.3
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	72.28	54.84	17.44	304.2	55.40	16.88	284.9	55.96	16.32	266.3
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	108.55	54.84	53.71	2884.8	55.40	53.15	2824.9	55.96	52.59	2765.7
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	74.86	54.84	20.02	400.8	55.40	19.46	378.7	55.96	18.90	357.2
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	96.83	54.84	41.99	1763.2	55.40	41.43	1716.4	55.96	40.87	1670.4
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	64.03	54.84	9.19	84.5	55.40	8.63	74.5	55.96	8.07	65.1
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	86.14	54.84	31.30	979.7	55.40	30.74	944.9	55.96	30.18	910.8
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	30.23	23.13	7.10	50.4	23.36	6.87	47.2	23.60	6.63	44.0
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	27.63	23.13	4.50	20.3	23.36	4.27	18.2	23.60	4.03	16.2
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	38.68	23.13	15.55	241.8	23.36	15.32	234.7	23.60	15.08	227.4
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	55.11	23.13	31.98	1022.7	23.36	31.75	1008.1	23.60	31.51	992.9
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	63.45	23.13	40.32	1625.7	23.36	40.09	1607.2	23.60	39.85	1588.0
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	36.11	23.13	12.98	168.5	23.36	12.75	162.6	23.60	12.51	156.5
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	38.83	23.13	15.70	246.5	23.36	15.47	239.3	23.60	15.23	232.0
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	45.73	23.13	22.60	510.8	23.36	22.37	500.4	23.60	22.13	489.7
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	28.49	9.43	19.06	363.3	9.52	18.97	359.9	9.62	18.87	356.1
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	26.17	9.43	16.74	280.2	9.52	16.65	277.2	9.62	16.55	273.9
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	31.96	9.43	22.53	507.6	9.52	22.44	503.6	9.62	22.34	499.1
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	29.47	9.43	20.04	401.6	9.52	19.95	398.0	9.62	19.85	394.0
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	25.59	9.43	16.16	261.1	9.52	16.07	258.2	9.62	15.97	255.0
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	33.50	9.43	24.07	579.4	9.52	23.98	575.0	9.62	23.88	570.3
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	40.10	9.43	30.67	940.6	9.52	30.58	935.1	9.62	30.48	929.0
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	36.25	9.43	26.82	719.3	9.52	26.73	714.5			

(d) 載荷重 1275N の水平応力最大値

壁面からの距離 x(m)	壁面に沿った距離 y(m)	地表からの深さ z(m)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(m)	輪荷重 P(kN)	ポアソン比 ν	Boussinesq 解析解 σ_x (kN/m ²)	③ 水平応力最大値 (kN/m ²)	水平応力最大値								
								$\alpha = 1.37$			$\alpha = 1.38$			$\alpha = 1.39$		
								⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	112.55	120.67	-8.12	65.9	121.55	-9.00	81.0	122.43	-9.88	97.6
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	158.11	120.67	37.44	1401.8	121.55	36.56	1336.6	122.43	35.68	1273.1
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	81.81	120.67	-38.86	1510.1	121.55	-39.74	1579.3	122.43	-40.62	1650.0
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	79.90	120.67	-40.77	1662.2	121.55	-41.65	1734.7	122.43	-42.53	1808.8
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	101.13	120.67	-19.54	381.8	121.55	-20.42	417.0	122.43	-21.30	453.7
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	86.04	120.67	-34.63	1199.2	121.55	-35.51	1261.0	122.43	-36.39	1324.2
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	85.40	120.67	-35.27	1244.0	121.55	-36.15	1306.8	122.43	-37.03	1371.2
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	98.42	120.67	-22.25	495.1	121.55	-23.13	535.0	122.43	-24.01	576.5
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.275	0.35	88.08	77.30	120.67	-43.37	1881.0	121.55	-44.25	1958.1	122.43	-45.13	2036.7
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	69.24	107.26	-38.02	1445.5	108.04	-38.80	1505.4	108.82	-39.58	1566.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	92.36	107.26	-14.90	222.0	108.04	-15.68	245.9	108.82	-16.46	270.9
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	113.45	107.26	6.19	38.3	108.04	5.41	29.3	108.82	4.63	21.4
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	107.63	107.26	0.37	0.1	108.04	-0.41	0.2	108.82	-1.19	1.4
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	73.47	107.26	-33.79	1141.8	108.04	-34.57	1195.1	108.82	-35.35	1249.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	87.72	107.26	-19.54	381.8	108.04	-20.32	412.9	108.82	-21.10	445.2
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	93.01	107.26	-14.25	203.1	108.04	-15.03	225.9	108.82	-15.81	250.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	91.57	107.26	-15.69	246.2	108.04	-16.47	271.3	108.82	-17.25	297.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	72.88	107.26	-34.38	1182.0	108.04	-35.16	1236.2	108.82	-35.94	1291.7
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	138.29	107.26	31.03	962.9	108.04	30.25	915.1	108.82	29.47	868.5
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	139.25	107.26	31.99	1023.4	108.04	31.21	974.1	108.82	30.43	926.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	120.14	107.26	12.88	165.9	108.04	12.10	146.4	108.82	11.32	128.1
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	123.19	107.26	15.93	253.8	108.04	15.15	229.5	108.82	14.37	206.5
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	146.45	107.26	39.19	1535.9	108.04	38.41	1475.3	108.82	37.63	1416.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	130.02	107.26	22.76	518.0	108.04	21.98	483.1	108.82	21.20	449.4
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	128.28	107.26	21.02	441.8	108.04	20.24	409.7	108.82	19.46	378.7
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	133.09	107.26	25.83	667.2	108.04	25.05	627.5	108.82	24.27	589.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	156.57	107.26	49.31	2431.5	108.04	48.53	2355.2	108.82	47.75	2280.1
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	104.83	107.26	-2.43	5.9	108.04	-3.21	10.3	108.82	-3.99	15.9
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	78.71	107.26	-28.55	815.1	108.04	-29.33	860.2	108.82	-30.11	906.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	102.34	107.26	-4.92	24.2	108.04	-5.70	32.5	108.82	-6.48	42.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	86.66	107.26	-20.60	424.4	108.04	-21.38	457.1	108.82	-22.16	491.1
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	89.28	107.26	-17.98	323.3	108.04	-18.76	351.9	108.82	-19.54	381.8
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	85.02	107.26	-22.24	494.6	108.04	-23.02	529.9	108.82	-23.80	566.4
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	83.72	107.26	-23.54	554.1	108.04	-24.32	591.5	108.82	-25.10	630.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	97.84	107.26	-9.42	88.7	108.04	-10.20	104.0	108.82	-10.98	120.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.275	0.35	78.29	98.71	107.26	-8.55	73.1	108.04	-9.33	87.0	108.82	-10.11	102.2
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	48.11	76.67	-28.56	815.7	77.22	-29.11	847.4	77.78	-29.67	880.3
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	105.03	76.67	28.36	804.3	77.22	27.81	773.4	77.78	27.25	742.6
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	75.00	76.67	-1.67	2.8	77.22	-2.22	4.9	77.78	-2.78	7.7
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	100.24	76.67	23.57	555.5	77.22	23.02	529.9	77.78	22.46	504.5
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	89.66	76.67	12.99	168.7	77.22	12.44	154.8	77.78	11.88	141.1
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	90.53	76.67	13.86	192.1	77.22	13.31	177.2	77.78	12.75	162.6
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	70.91	76.67	-5.76	33.2	77.22	-6.31	39.8	77.78	-6.87	47.2
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	46.95	76.67	-29.72	883.3	77.22	-30.27	916.3	77.78	-30.83	950.5
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	59.54	76.67	-17.13	293.4	77.22	-17.68	312.6	77.78	-18.24	332.7
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	86.95	76.67	10.28	105.7	77.22	9.73	94.7	77.78	9.17	84.1
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	99.83	76.67	23.16	536.4	77.22	22.61	511.2	77.78	22.05	486.2
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	103.93	76.67	27.26	743.1	77.22	26.71	713.4	77.78	26.15	683.8
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	159.46	76.67	82.79	6854.2	77.22	82.24	6763.4	77.78	81.68	6671.6
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	110.21	76.67	33.54	1124.9	77.22	32.99	1088.3	77.78	32.43	1051.7
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	146.56	76.67	69.89	4884.6	77.22	69.34	4808.0	77.78	68.78	4730.7
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	89.93	76.67	13.26	175.8	77.22	12.71	161.5	77.78	12.15	147.6
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.275	0.35	55.96	131.70	76.67	55.03	3028.3	77.22	54.48	2968.1	77.78	53.92	2907.4
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	39.52	32.33	7.19	51.7	32.57	6.95	48.3	32.80	6.72	45.2
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	38.79	32.33	6.46	41.7	32.57	6.22	38.7	32.80	5.99	35.9
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	54.13	32.33	21.80	475.2	32.57	21.56	464.8	32.80	21.33	455.0
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	79.02	32.33	46.69	2180.0	32.57	46.45	2157.6	32.80	46.22	2136.3
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	95.97	32.33	63.64	4050.0	32.57	63.40	4019.6	32.80	63.17	3990.4
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	50.75	32.33	18.42	339.3	32.57	18.18	330.5	32.80	17.95	322.2
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	53.46	32.33	21.13	446.5	32.57	20.89	436.4	32.80	20.66	426.8
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.275	0.35	23.60	65.27	32.33	32.94	1085.0	32.57	32.70	1069.3	32.80	32.47	1054.3
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	32.53	13.18	19.35	374.4	13.28	19.25	370.6	13.37	19.16	367.1
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	33.34	13.18	20.16	406.4	13.28	20.06	402.4	13.37	19.97	398.8
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	40.09	13.18	26.91	724.1	13.28	26.81	718.8	13.37	26.72	714.0
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	38.28	13.18	25.10	630.0	13.28	25.00	625.0	13.37	24.91	620.5
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	33.72	13.18	20.54	421.9	13.28	20.44	417.8	13.37	20.35	414.1
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	45.29	13.18	32.11	1031.1	13.28	32.01	1024.6	13.37	31.92	1018.9
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.275	0.35	9.62	50.26									

(e) 載荷重 1079N の残留応力最大値

壁面からの距離 x(m)	壁面に沿った距離 y(m)	地表からの深さ z(m)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(m)	輪荷重 P(kN)	ポアソン比 ν	Boussinesq 解析解 σ_x (kN/m ²)	② 残留 応力 最大値 (kN/m ²)	残留応力最大値								
								$\alpha = 0.98$			$\alpha = 0.99$			$\alpha = 1.00$		
								⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	92.61	73.05	19.56	382.6	73.79	18.82	354.2	74.54	18.07	326.5
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	69.20	73.05	-3.85	14.8	73.79	-4.59	21.1	74.54	-5.34	28.5
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	59.03	73.05	-14.02	196.6	73.79	-14.76	217.9	74.54	-15.51	240.6
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	64.35	73.05	-8.70	75.7	73.79	-9.44	89.1	74.54	-10.19	103.8
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	74.93	73.05	1.88	3.5	73.79	1.14	1.3	74.54	0.39	0.2
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	63.47	73.05	-9.58	91.8	73.79	-10.32	106.5	74.54	-11.07	122.5
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	64.39	73.05	-8.66	75.0	73.79	-9.40	88.4	74.54	-10.15	103.0
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	99.86	73.05	26.81	718.8	73.79	26.07	679.6	74.54	25.32	641.10
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	58.61	73.05	-14.44	208.5	73.79	-15.18	230.4	74.54	-15.93	253.80
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	54.32	64.93	-10.61	112.6	65.59	-11.27	127.0	66.25	-11.93	142.3
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	54.06	64.93	-10.87	118.2	65.59	-11.53	132.9	66.25	-12.19	148.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	73.87	64.93	8.94	79.9	65.59	8.28	68.6	66.25	7.62	58.1
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	56.80	64.93	-8.13	66.1	65.59	-8.79	77.3	66.25	-9.45	89.3
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	58.17	64.93	-6.76	45.7	65.59	-7.42	55.1	66.25	-8.08	65.3
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	57.15	64.93	-7.78	60.5	65.59	-8.44	71.2	66.25	-9.10	82.8
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	54.82	64.93	-10.11	102.2	65.59	-10.77	116.0	66.25	-11.43	130.6
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	55.48	64.93	-9.45	89.3	65.59	-10.11	102.2	66.25	-10.77	116.0
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	66.07	64.93	1.14	1.3	65.59	0.48	0.2	66.25	-0.18	0.0
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	39.20	46.41	-7.21	52.0	46.89	-7.69	59.1	47.36	-8.16	66.6
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	69.10	46.41	22.69	514.8	46.89	22.21	493.3	47.36	21.74	472.6
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	34.71	46.41	-11.70	136.9	46.89	-12.18	148.4	47.36	-12.65	160.0
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	44.91	46.41	-1.50	2.3	46.89	-1.98	3.9	47.36	-2.45	6.0
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	49.16	46.41	2.75	7.6	46.89	2.27	5.2	47.36	1.80	3.2
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	48.43	46.41	2.02	4.1	46.89	1.54	2.4	47.36	1.07	1.1
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	58.23	46.41	11.82	139.7	46.89	11.34	128.6	47.36	10.87	118.2
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	52.30	46.41	5.89	34.7	46.89	5.41	29.3	47.36	4.94	24.4
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	43.26	46.41	-3.15	9.9	46.89	-3.63	13.2	47.36	-4.10	16.8
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	32.63	19.57	13.06	170.6	19.77	12.86	165.4	19.97	12.66	160.3
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	49.40	19.57	29.83	889.8	19.77	29.63	877.9	19.97	29.43	866.1
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	48.55	19.57	28.98	839.8	19.77	28.78	828.3	19.97	28.58	816.8
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	33.39	19.57	13.82	191.0	19.77	13.62	185.5	19.97	13.42	180.1
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	33.81	19.57	14.24	202.8	19.77	14.04	197.1	19.97	13.84	191.5
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	37.85	19.57	18.28	334.2	19.77	18.08	326.9	19.97	17.88	319.7
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	42.06	19.57	22.49	505.8	19.77	22.29	496.8	19.97	22.09	488.0
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	42.46	19.57	22.89	524.0	19.77	22.69	514.8	19.97	22.49	505.8
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	23.46	7.98	15.48	239.6	8.06	15.40	237.2	8.14	15.32	234.7
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	23.19	7.98	15.21	231.3	8.06	15.13	228.9	8.14	15.05	226.5
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	23.62	7.98	15.64	244.6	8.06	15.56	242.1	8.14	15.48	239.6
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	20.73	7.98	12.75	162.6	8.06	12.67	160.5	8.14	12.59	158.5
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	16.94	7.98	8.96	80.3	8.06	8.88	78.9	8.14	8.80	77.4
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	20.96	7.98	12.98	168.5	8.06	12.90	166.4	8.14	12.82	164.4
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	19.12	7.98	11.14	124.1	8.06	11.06	122.3	8.14	10.98	120.6
0.04	0.00	0.085	0.0939	1.079	0.35	6.53	19.51	6.40	13.110	171.9	6.46	13.05	170.3	6.53	12.98	168.5
※ σ_x は式(3-3)による。 サンプル数 43								8426.0			8421.7			8440.4		

$\alpha=0.99$ のとき、差の二乗の合計は、8421.7 で最小になったので、載荷重 1079N の残留応力最大値の係数 α は 0.99 とする。

(f) 載荷重 1079N の水平応力最大値

壁面からの距離 x(m)	壁面に沿った距離 y(m)	地表からの深さ z(m)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(m)	輪荷重 P(kN)	ポアソン比 ν	Boussinesq 解析解 σ_x (kN/m ²)	③ 水平応力最大 値 (kN/m ²)	水平応力最大値									
								$\alpha = 1.25$			$\alpha = 1.26$			$\alpha = 1.27$			
								⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	122.10	93.18	28.92	836.4	93.92	28.18	794.1	94.67	27.43	752.4	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	83.95	93.18	-9.23	85.2	93.92	-9.97	99.4	94.67	-10.72	114.9	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	74.88	93.18	-18.30	334.9	93.92	-19.04	362.5	94.67	-19.79	391.6	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	81.97	93.18	-11.21	125.7	93.92	-11.95	142.8	94.67	-12.70	161.3	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	100.95	93.18	7.77	60.4	93.92	7.03	49.4	94.67	6.28	39.4	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	80.95	93.18	-12.23	149.6	93.92	-12.97	168.2	94.67	-13.72	188.2	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	78.21	93.18	-14.97	224.1	93.92	-15.71	246.8	94.67	-16.46	270.9	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	124.18	93.18	31.00	961.0	93.92	30.26	915.7	94.67	29.51	870.8	
0.04	0.00	0.020	0.0447	1.079	0.35	74.54	68.43	93.18	-24.75	612.6	93.92	-25.49	649.7	94.67	-26.24	688.5	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	68.86	82.81	-13.95	194.6	83.48	-14.62	213.7	84.14	-15.28	233.5	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	67.22	82.81	-15.59	243.0	83.48	-16.26	264.4	84.14	-16.92	286.3	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	90.54	82.81	7.73	59.8	83.48	7.06	49.8	84.14	6.40	41.0	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	70.22	82.81	-12.59	158.5	83.48	-13.26	175.8	84.14	-13.92	193.8	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	74.84	82.81	-7.97	63.5	83.48	-8.64	74.6	84.14	-9.30	86.5	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	70.97	82.81	-11.84	140.2	83.48	-12.51	156.5	84.14	-13.17	173.4	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	71.49	82.81	-11.32	128.1	83.48	-11.99	143.8	84.14	-12.65	160.0	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	78.60	82.81	-4.21	17.7	83.48	-4.88	23.8	84.14	-5.54	30.7	
0.04	0.00	0.030	0.0500	1.079	0.35	66.25	80.79	82.81	-2.02	4.1	83.48	-2.69	7.2	84.14	-3.35	11.2	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	48.08	59.20	-11.12	123.7	59.67	-11.59	134.3	60.15	-12.07	145.7	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	97.80	59.20	38.60	1490.0	59.67	38.13	1453.9	60.15	37.65	1417.5	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	42.84	59.20	-16.36	267.6	59.67	-16.83	283.2	60.15	-17.31	299.6	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	60.43	59.20	1.23	1.5	59.67	0.76	0.6	60.15	0.28	0.1	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	65.42	59.20	6.22	38.7	59.67	5.75	33.1	60.15	5.27	27.8	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	65.91	59.20	6.71	45.0	59.67	6.24	38.9	60.15	5.76	33.2	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	74.09	59.20	14.89	221.7	59.67	14.42	207.9	60.15	13.94	194.3	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	71.04	59.20	11.84	140.2	59.67	11.37	129.3	60.15	10.89	118.6	
0.04	0.00	0.040	0.0566	1.079	0.35	47.36	51.86	59.20	-7.34	53.9	59.67	-7.81	61.0	60.15	-8.29	68.7	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	40.31	24.96	15.35	235.6	25.16	15.15	229.5	25.36	14.95	223.5	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	65.35	24.96	40.39	1631.4	25.16	40.19	1615.2	25.36	39.99	1599.2	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	64.81	24.96	39.85	1588.0	25.16	39.65	1572.1	25.36	39.45	1556.3	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	43.46	24.96	18.50	342.3	25.16	18.30	334.9	25.36	18.10	327.6	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	45.20	24.96	20.24	409.7	25.16	20.04	401.6	25.36	19.84	393.6	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	48.83	24.96	23.87	569.8	25.16	23.67	560.3	25.36	23.47	550.8	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	54.25	24.96	29.29	857.9	25.16	29.09	846.2	25.36	28.89	834.6	
0.04	0.00	0.060	0.0721	1.079	0.35	19.97	54.82	24.96	29.86	891.6	25.16	29.66	879.7	25.36	29.46	867.9	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	26.69	10.18	16.51	272.6	10.26	16.43	269.9	10.34	16.35	267.3	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	31.16	10.18	20.98	440.2	10.26	20.90	436.8	10.34	20.82	433.5	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	30.12	10.18	19.94	397.6	10.26	19.86	394.4	10.34	19.78	391.2	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	27.44	10.18	17.26	297.9	10.26	17.18	295.2	10.34	17.10	292.4	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	23.04	10.18	12.86	165.4	10.26	12.78	163.3	10.34	12.70	161.3	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	29.09	10.18	18.91	357.6	10.26	18.83	354.6	10.34	18.75	351.6	
0.04	0.00	0.080	0.0894	1.079	0.35	8.14	24.40	10.18	14.22	202.2	10.26	14.14	199.9	10.34	14.06	197.7	
0.04	0.00	0.085	0.0939	1.079	0.35	6.53	26.69	8.16	18.53	343.4	8.23	18.46	340.8	8.29	18.40	338.6	
※ σ_x は式(3-3)による。							サンプル数	43	15784.9			15774.8			15787.0		

$\alpha=1.26$ のとき、差の二乗の合計は、15774.8 で最小になったので、載荷重 1079N の水平応力最大値の係数 α は 1.26 とする。

(g) 載荷重 883N の残留応力最大値

壁面からの距離 x(m)	壁面に沿った距離 y(m)	地表からの深さ z(m)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(m)	輪荷重 P(kN)	ポアソン比 ν	Boussinesq 解析解 σ_x (kN/m ²)	② 残留 応力 最大値 (kN/m ²)	残留応力最大値												
								$\alpha = 0.90$			$\alpha = 0.91$			$\alpha = 0.92$						
								⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	60.04	54.90	5.14	26.4	55.51	4.53	20.5	56.12	3.92	15.4				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	45.28	54.90	-9.62	92.5	55.51	-10.23	104.7	56.12	-10.84	117.5				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	44.41	54.90	-10.49	110.0	55.51	-11.10	123.2	56.12	-11.71	137.1				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	39.08	54.90	-15.82	250.3	55.51	-16.43	269.9	56.12	-17.04	290.4				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	45.17	54.90	-9.73	94.7	55.51	-10.34	106.9	56.12	-10.95	119.9				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	32.75	54.90	-22.15	490.6	55.51	-22.76	518.0	56.12	-23.37	546.2				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	49.61	54.90	-5.29	28.0	55.51	-5.90	34.8	56.12	-6.51	42.4				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	39.59	54.90	-15.31	234.4	55.51	-15.92	253.4	56.12	-16.53	273.20				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	44.50	54.90	-10.40	108.2	55.51	-11.01	121.2	56.12	-11.62	135.00				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	41.64	48.80	-7.16	51.3	49.34	-7.70	59.3	49.88	-8.24	67.9				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	58.78	48.80	9.98	99.6	49.34	9.44	89.1	49.88	8.90	79.2				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	50.01	48.80	1.21	1.5	49.34	0.67	0.4	49.88	0.13	0.0				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	51.77	48.80	2.97	8.8	49.34	2.43	5.9	49.88	1.89	3.6				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	56.03	48.80	7.23	52.3	49.34	6.69	44.8	49.88	6.15	37.8				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	48.71	48.80	-0.09	0.0	49.34	-0.63	0.4	49.88	-1.17	1.4				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	50.24	48.80	1.44	2.1	49.34	0.90	0.8	49.88	0.36	0.1				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	47.86	48.80	-0.94	0.9	49.34	-1.48	2.2	49.88	-2.02	4.1				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	45.83	48.80	-2.97	8.8	49.34	-3.51	12.3	49.88	-4.05	16.4				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	44.85	48.80	-3.95	15.6	49.34	-4.49	20.2	49.88	-5.03	25.3				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	47.24	34.88	12.36	152.8	35.26	11.98	143.5	35.65	11.59	134.3				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	37.41	34.88	2.53	6.4	35.26	2.15	4.6	35.65	1.76	3.1				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	54.24	34.88	19.36	374.8	35.26	18.98	360.2	35.65	18.59	345.6				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	43.52	34.88	8.64	74.6	35.26	8.26	68.2	35.65	7.87	61.9				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	44.14	34.88	9.26	85.7	35.26	8.88	78.9	35.65	8.49	72.1				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	58.13	34.88	23.25	540.6	35.26	22.87	523.0	35.65	22.48	505.4				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	60.54	34.88	25.66	658.4	35.26	25.28	639.1	35.65	24.89	619.5				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	49.86	34.88	14.98	224.4	35.26	14.60	213.2	35.65	14.21	201.9				
0.04	0.00	0.045	0.0602	0.883	0.35	31.73	36.39	28.56	7.83	61.3	28.87	7.52	56.6	29.19	7.20	51.8				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	28.06	14.71	13.35	178.2	14.87	13.19	174.0	15.03	13.03	169.8				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	18.85	14.71	4.14	17.1	14.87	3.98	15.8	15.03	3.82	14.6				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	16.01	14.71	1.30	1.7	14.87	1.14	1.3	15.03	0.98	1.0				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	20.27	14.71	5.56	30.9	14.87	5.40	29.2	15.03	5.24	27.5				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	16.22	14.71	1.51	2.3	14.87	1.35	1.8	15.03	1.19	1.4				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	19.17	14.71	4.46	19.9	14.87	4.30	18.5	15.03	4.14	17.1				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	22.53	14.71	7.82	61.2	14.87	7.66	58.7	15.03	7.50	56.3				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	19.72	14.71	5.01	25.1	14.87	4.85	23.5	15.03	4.69	22.0				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	21.58	14.71	6.87	47.2	14.87	6.71	45.0	15.03	6.55	42.9				
0.04	0.00	0.075	0.0850	0.883	0.35	8.30	10.87	7.47	3.40	11.6	7.55	3.32	11.0	7.64	3.23	10.4				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	12.80	5.99	6.81	46.4	6.06	6.74	45.4	6.13	6.67	44.5				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	9.87	5.99	3.88	15.1	6.06	3.81	14.5	6.13	3.74	14.0				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	7.78	5.99	1.79	3.2	6.06	1.72	3.0	6.13	1.65	2.7				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	8.63	5.99	2.64	7.0	6.06	2.57	6.6	6.13	2.50	6.3				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	8.35	5.99	2.36	5.6	6.06	2.29	5.2	6.13	2.22	4.9				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	11.40	5.99	5.41	29.3	6.06	5.34	28.5	6.13	5.27	27.8				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	9.82	5.99	3.83	14.7	6.06	3.76	14.1	6.13	3.69	13.6				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	12.61	5.99	6.62	43.8	6.06	6.55	42.9	6.13	6.48	42.0				
0.04	0.00	0.095	0.1031	0.883	0.35	3.44	11.11	3.10	8.01	64.2	3.13	7.98	63.7	3.16	7.95	63.2				
0.04	0.00	0.120	0.1265	0.883	0.35	1.15	7.17	1.04	6.13	37.6	1.05	6.12	37.5	1.06	6.11	37.3				
0.04	0.00	0.150	0.1552	0.883	0.35	0.23	3.37	0.21	3.16	10.0	0.21	3.16	10.0	0.21	3.16	10.0				
0.04	0.00	0.180	0.1844	0.883	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00	0.0				
※ σ_x は式(3-3)による。							サンプル数	50				4527.1			4525.5			4537.8		

$\alpha=0.91$ のとき、差の二乗の合計は、4525.5 で最小になったので、載荷重 883N の残留応力最大値の係数 α は 0.91 とする。

(h) 載荷重 883N の水平応力最大値

壁面からの距離 x(m)	壁面に沿った距離 y(m)	地表からの深さ z(m)	$x^2+y^2+z^2$ の平方根 R(m)	輪荷重 P(kN)	ポアソン比 ν	Boussinesq 解析解 σ_x (kN/m ²)	③ 水平応力最大 値 (kN/m ²)	水平応力最大値												
								$\alpha = 1.11$			$\alpha = 1.12$			$\alpha = 1.13$						
								⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)	⑤ $\alpha \times \sigma_x$ (kN/m ²)	⑥= ②-⑤ (kN/m ²)	⑥の2乗 (kN/m ²)				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	71.75	67.71	4.04	16.3	68.32	3.43	11.8	68.93	2.82	8.0				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	54.85	67.71	-12.86	165.4	68.32	-13.47	181.4	68.93	-14.08	198.2				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	52.95	67.71	-14.76	217.9	68.32	-15.37	236.2	68.93	-15.98	255.4				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	47.47	67.71	-20.24	409.7	68.32	-20.85	434.7	68.93	-21.46	460.5				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	54.92	67.71	-12.79	163.6	68.32	-13.40	179.6	68.93	-14.01	196.3				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	42.10	67.71	-25.61	655.9	68.32	-26.22	687.5	68.93	-26.83	719.8				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	57.34	67.71	-10.37	107.5	68.32	-10.98	120.6	68.93	-11.59	134.3				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	48.76	67.71	-18.95	359.1	68.32	-19.56	382.6	68.93	-20.17	406.8				
0.04	0.00	0.020	0.0447	0.883	0.35	61.00	53.09	67.71	-14.62	213.7	68.32	-15.23	232.0	68.93	-15.84	250.9				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	51.20	60.18	-8.98	80.6	60.73	-9.53	90.8	61.27	-10.07	101.4				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	69.29	60.18	9.11	83.0	60.73	8.56	73.3	61.27	8.02	64.3				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	59.98	60.18	-0.20	0.0	60.73	-0.75	0.6	61.27	-1.29	1.7				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	59.90	60.18	-0.28	0.1	60.73	-0.83	0.7	61.27	-1.37	1.9				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	68.20	60.18	8.02	64.3	60.73	7.47	55.8	61.27	6.93	48.0				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	61.32	60.18	1.14	1.3	60.73	0.59	0.3	61.27	0.05	0.0				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	61.22	60.18	1.04	1.1	60.73	0.49	0.2	61.27	-0.05	0.0				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	60.87	60.18	0.69	0.5	60.73	0.14	0.0	61.27	-0.40	0.2				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	57.39	60.18	-2.79	7.8	60.73	-3.34	11.2	61.27	-3.88	15.1				
0.04	0.00	0.030	0.0500	0.883	0.35	54.22	53.85	60.18	-6.33	40.1	60.73	-6.88	47.3	61.27	-7.42	55.1				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	61.37	43.01	18.36	337.1	43.40	17.97	322.9	43.79	17.58	309.1				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	52.16	43.01	9.15	83.7	43.40	8.76	76.7	43.79	8.37	70.1				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	52.21	43.01	9.20	84.6	43.40	8.81	77.6	43.79	8.42	70.9				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	56.95	43.01	13.94	194.3	43.40	13.55	183.6	43.79	13.16	173.2				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	58.77	43.01	15.76	248.4	43.40	15.37	236.2	43.79	14.98	224.4				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	82.53	43.01	39.52	1561.8	43.40	39.13	1531.2	43.79	38.74	1500.8				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	76.40	43.01	33.39	1114.9	43.40	33.00	1089.0	43.79	32.61	1063.4				
0.04	0.00	0.040	0.0566	0.883	0.35	38.75	64.61	43.01	21.60	466.6	43.40	21.21	449.9	43.79	20.82	433.5				
0.04	0.00	0.045	0.0602	0.883	0.35	31.73	39.65	35.22	4.43	19.6	35.54	4.11	16.9	35.85	3.80	14.4				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	35.38	18.14	17.24	297.2	18.30	17.08	291.7	18.46	16.92	286.3				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	24.50	18.14	6.36	40.4	18.30	6.20	38.4	18.46	6.04	36.5				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	23.19	18.14	5.05	25.5	18.30	4.89	23.9	18.46	4.73	22.4				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	25.96	18.14	7.82	61.2	18.30	7.66	58.7	18.46	7.50	56.3				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	22.10	18.14	3.96	15.7	18.30	3.80	14.4	18.46	3.64	13.2				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	24.46	18.14	6.32	39.9	18.30	6.16	37.9	18.46	6.00	36.0				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	28.22	18.14	10.08	101.6	18.30	9.92	98.4	18.46	9.76	95.3				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	24.19	18.14	6.05	36.6	18.30	5.89	34.7	18.46	5.73	32.8				
0.04	0.00	0.060	0.0721	0.883	0.35	16.34	27.16	18.14	9.02	81.4	18.30	8.86	78.5	18.46	8.70	75.7				
0.04	0.00	0.075	0.0850	0.883	0.35	8.30	13.72	9.21	4.51	20.3	9.30	4.42	19.5	9.38	4.34	18.8				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	18.45	7.39	11.06	122.3	7.46	10.99	120.8	7.53	10.92	119.2				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	14.66	7.39	7.27	52.9	7.46	7.20	51.8	7.53	7.13	50.8				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	11.04	7.39	3.65	13.3	7.46	3.58	12.8	7.53	3.51	12.3				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	12.41	7.39	5.02	25.2	7.46	4.95	24.5	7.53	4.88	23.8				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	12.82	7.39	5.43	29.5	7.46	5.36	28.7	7.53	5.29	28.0				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	16.68	7.39	9.29	86.3	7.46	9.22	85.0	7.53	9.15	83.7				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	14.29	7.39	6.90	47.6	7.46	6.83	46.6	7.53	6.76	45.7				
0.04	0.00	0.080	0.0894	0.883	0.35	6.66	19.79	7.39	12.40	153.8	7.46	12.33	152.0	7.53	12.26	150.3				
0.04	0.00	0.095	0.1031	0.883	0.35	3.44	13.63	3.82	9.81	96.2	3.85	9.78	95.6	3.89	9.74	94.9				
0.04	0.00	0.120	0.1265	0.883	0.35	1.15	9.61	1.28	8.33	69.4	1.29	8.32	69.2	1.30	8.31	69.1				
0.04	0.00	0.150	0.1552	0.883	0.35	0.23	5.36	0.26	5.10	26.0	0.26	5.10	26.0	0.26	5.10	26.0				
0.04	0.00	0.180	0.1844	0.883	0.35	0.00	1.57	0.00	1.57	2.5	0.00	1.57	2.5	0.00	1.57	2.5				
※ σ_x は式(3-3)による。							サンプル数	50				8143.7			8142.2			8157.3		

$\alpha=1.12$ のとき、差の二乗の合計は、8142.2 で最小になったので、載荷重 883N の水平応力最大値の係数 α は 1.12 とする。

本論文に関する著者の発表論文

本論文に関する既発表論文(年代順)を以下に示す.

1. 小友行峰, 丸山收: 車輛通行によりプレキャスト L 型擁壁たて壁に作用する水平応力の評価, 土木学会第 74 回年次学術講演会, VI-24, 2019.
2. 小友行峰, 丸山收: 通行車輛によるプレキャスト L 型擁壁の低サイクル疲労について, 土木学会第 75 回年次学術講演会, VI-41, 2020.
3. 小友行峰, 丸山收: 車輛通行によりプレキャスト L 型擁壁たて壁に作用する水平応力の評価, 土木学会論文集 C, Vol. 76, No. 3, pp. 320-330, 2020.
4. 小友行峰, 丸山收: 通行車輛の繰返し荷重がプレキャスト L 型擁壁の破壊に及ぼす影響, 土木学会論文集 C, Vol. 77, No. 3, pp. 248-257, 2021.
5. 小友行峰, 丸山收: プレキャスト L 型擁壁の曲げ剛性が繰返し輪荷重によって作用する水平土圧に与える影響, 土木学会第 76 回年次学術講演会, VI-654, 2021.

謝 辞

筆者の東京都市大学大学院総合理工学研究科建築・都市専攻博士後期課程への入学から、研究テーマおよび実験へのアドバイス、論文の作成および投稿に至るまで、東京都市大学建築都市デザイン学部都市工学科 丸山收教授には、懇切丁寧なご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。研究経験が乏しい私を、研究の最終目標点を見失わず、最終目標への到達に向けて、研究の初歩から本当に辛抱強くご指導いただきました。

また、疑似L型擁壁を供試体に使用する際には、東京都立大学 國府勝郎名誉教授より部材厚さの薄いプレキャスト製品について御助言を賜りましたことを深く感謝申し上げます。

本研究を進めるに際し、世紀東急工業（株）技術研究所、関東製品試験所および関西支店関西試験所には、ご自身の業務があるにも関わらず貴重な実験場所、実験装置および測定機具等を提供していただき深く感謝致します。さらに、世紀東急工業（株）技術研究所、関東製品試験所、機材センターおよび関西試験所の皆様には、供試体製作および繰返し載荷実験へのご協力、土質試験のご指導をしていただき、関係各位に心から感謝の意を表します。

最後に、大学院博士後期課程への入学を承諾し、時間が許す限り研究をご支援してくださいました、世紀東急工業（株）工務部の皆様にも心より感謝致します。

2022 年 3 月
小 友 行 峰