

鋼橋に生じる疲労損傷に対する  
センシングと損傷規模の把握に関する研究

専攻名：建築・都市専攻 都市工学領域

学籍番号：1891608      氏名：森近 翔伍

# 目次

<b>第 1 章 序論</b> .....	1
1-1. 鋼橋における疲労損傷の現状 .....	1
1-2. 本研究の目的 .....	3
1-2-1. 疲労損傷が抱える課題 .....	3
1-2-2. ヘルスモニタリング技術の活用とセンサの選定理由 .....	4
1-2-3. 圧電素子センサによる損傷検知と研究対象 .....	5
1-2-4. K 値計測と研究対象 .....	7
1-3. 本論文の構成 .....	8
<b>第 2 章 圧電素子センサによる疲労き裂の検知に関する基礎検討</b> .....	12
2-1. 概説 .....	12
2-2. 圧電素子センサの概要 .....	13
2-2-1. 圧電セラミックスの概要 .....	13
2-2-2. センサ出力と応力の関係 .....	14
2-3. 圧電素子センサの特性試験 .....	16
2-3-1. 試験概要 .....	16
2-3-2. 試験結果とセンサ特性 .....	18
2-4. 引張試験片を用いた疲労試験 .....	22
2-4-1. 試験概要 .....	22
2-4-2. 試験結果 .....	23
2-5. 引張試験片を用いた疲労試験に関する有限要素解析 .....	26
2-5-1. 解析概要 .....	26
2-5-2. 解析結果 .....	27
2-6. 大型試験体を用いた疲労試験 .....	29
2-6-1. 試験概要 .....	29
2-6-2. 試験結果 .....	31
2-7. 総括 .....	34

<b>第 3 章 圧電素子センサの現場適用に向けた基礎的な検討</b> .....	36
3-1. 概説 .....	36
3-2. 現場への適用を目的としたモニタリングシステムの概要 .....	37
3-3. MEMS 加速度センサを用いた変位算出 .....	39
3-3-1. 試験概要 .....	39
3-3-2. 積分範囲による算出精度の違い .....	40
3-4. 現場計測による疲労き裂モニタリングシステムの検証 .....	48
3-4-1. 試験概要 .....	48
3-4-2. MEMS 加速度センサを用いたモニタリング結果 .....	49
3-4-3. 圧電素子センサを用いたモニタリング結果 .....	50
3-4-4. 疲労き裂の発生および進展のモニタリングについて .....	52
3-5. 総括 .....	53
<b>第 4 章 K 値に基づく一様な引張荷重下の平板における半楕円き裂深さの推定の試み</b> .....	55
4-1. 概説 .....	55
4-2. K 値ゲージの概要 .....	56
4-3. 有限要素解析による K 値ゲージ適用性の評価 .....	58
4-3-1. 解析概要 .....	58
4-3-2. 解析結果 .....	61
4-3-3. K 値ゲージを用いた非貫通き裂に対するき裂深さの推定手法 .....	64
4-3-4. K 値ゲージの小型化による効果 .....	68
4-4. 引張試験片を用いた疲労試験によるき裂深さの推定精度の検証 .....	70
4-4-1. 試験概要 .....	70
4-4-2. 破面状況 .....	72
4-4-3. K 値ゲージの貼付精度について .....	72
4-4-4. き裂深さの推定結果 .....	74
4-5. 総括 .....	77

<b>第 5 章 溶接止端部における K 値ゲージを用いた疲労き裂の深さ推定</b>	<b>79</b>
5-1. 概説	79
5-2. 面外ガセット溶接試験体を用いた疲労試験	80
5-2-1. 試験概要	80
5-2-2. き裂深さの推定結果	81
5-3. 解析による面外ガセット溶接部に対する K 値ゲージの適用性検証	85
5-3-1. 解析概要	85
5-3-2. 解析結果	87
5-4. 総括	90
<b>第 6 章 結論</b>	<b>91</b>
6-1. 各章の総括	91
6-2. 課題と今後の展望	93
謝辞	94

# 第1章 序論

## 1-1. 鋼橋における疲労損傷の現状

我が国の鋼橋の架設は、1950年代から1970年代までの高度経済成長期に集中しており、供用開始から50年以上を経過する橋梁を中心に、損傷の報告数が増加している<sup>1-1)</sup>。その中でも、交通荷重などの外力が繰り返し作用することにより生じる疲労損傷は、橋梁の安全性に大きな影響を与えることが予想されるため、維持管理が必要な損傷の1つといえる。

これまでに、我が国の鋼橋にて発生した疲労損傷の事例を、**図 1-1(a)**<sup>1-2)</sup>および**図 1-1(b)**<sup>1-3)</sup>に示す。**図 1-1(a)**は、主桁と横桁の交差部から発生し、主げた腹板まで進展した事例である。このような疲労き裂は、主桁を破断する可能性があるため、車両の通行制限や橋梁の封鎖など、橋梁の機能制限が必要となる。本事例では、疲労損傷の発見直後に、橋梁の通行を禁止する措置を行い、応急処置が完了するまでの間、社会経済活動に大きな影響を与えた。

次に示す**図 1-1(b)**は、主桁下フランジのソールプレートから生じた疲労き裂の事例であり、下フランジを破断し主桁ウェブまで進展している。ソールプレートを含む支承部近傍は、活荷重を集中的に受ける場所であり、本事例のような疲労き裂は、橋梁全体に重大な影響を与える。



(a) 主桁取り付け部からの疲労損傷<sup>1-2)</sup>



(b) ソールプレートからの疲労損傷<sup>1-3)</sup>

図 1-1 疲労損傷事例

これらの疲労損傷などが生じる溶接構造が、我が国の鋼道路橋に採用されるようになったのは1960年頃である。その当時の鋼道路橋における疲労設計は、「設計活荷重はかなり安全側のものであり、設計計算により求まる応力は実際に生じる可能性は小さいこと、疲労に対して安全な構造ディテールを用いることで十分」の認識のもと、行われていない<sup>1-4)</sup>。しかし、交通量の増大や過積載のトラックを含む重量車両の増加により、当時の設計荷重のレベルを超えた橋梁が増大し、1980年頃からは交通荷重による疲労損傷が報告されるようになった<sup>1-5)</sup>。これを受け、1990年代に全国レベルでの道路橋の疲労損傷に対する調査が行われ、2002年には道路橋への疲労設計が導入されることとなった。このような経緯から、2002年以前に架設された道路橋に対しては、疲労照査が十分ではなく、我が国の橋梁の大部分が疲労に対する性能が不明である。すなわち、疲労制御から見た場合には、危険な構造ディテールが存在している可能性があり、今後も疲労損傷が増大する危険性があるといえる<sup>1-6)</sup>。

## 1-2. 本研究の目的

前節においては、鋼橋に発生する疲労損傷の現状について説明した。本節では、疲労損傷が抱える課題および本研究の位置付けについて説明する。

### 1-2-1. 疲労損傷が抱える課題

鋼橋に生じる疲労損傷は、部材が突然破断する脆性破壊の要因になりうることから、適切な対処を必要とするが、そのためには、(1) 疲労損傷の早期発見、(2) 疲労損傷の大きさに合わせた適切な補修・補強法の選定、の2点が重要であるといえる。

まず、疲労損傷に対処するためには、損傷を見つけ出す必要がある。その手法の1つである目視点検は、有効な損傷検知手法として用いられている。しかしながら、疲労損傷の特徴である開口幅の狭い損傷の検出が必要となることから、損傷の見逃しや点検技術者の技量に大きく依存するなどの課題がある。この課題に対し、現在では磁粉探傷試験、渦流探傷試験、超音波探傷試験などの非破壊検査による損傷検知手法が提案されており、目視点検を支援する技術となっている。しかし、非破壊検査を含む目視点検は、数年に一度の検査に制約されるため、点検間隔の期間中に疲労損傷が進展し、発見時には大規模な損傷につながっている可能性がある。また、初期段階における疲労損傷の発見は、補修補強費用の抑制に効果があることから、早期の発見が望ましいといえる<sup>1-7)</sup>。したがって、疲労損傷を常時監視する技術の開発も必要であると考えられる。

続いて、疲労損傷発見後の補修補強の選定方法について、ウェブガセットの取り付け部から発生した疲労損傷を例に説明する。各損傷段階における疲労損傷事例を図1-2<sup>1-8)</sup>に示す。図1-2(a)は、き裂幅20 mm、き裂深さ1 mm程度の損傷規模であり、バークラインダーにて容易に削り取ることが可能である。そのため、き裂が浅い場合は、グラインダーを用いたき裂除去が、有効な補修補強方法といえる。一方、図1-2(b)は、き裂幅60 mmの貫通したき裂であり、バークラインダーによるき裂除去は困難なため、ストップホールや高力ボルトによる補強部材の添接が有効な方法といえる。このように疲労き裂の規模により、有効な補修補強方法が異なることから、き裂深さを含めた損傷規模の把握が損傷の発見後に重要となる。

これまで疲労損傷の規模を把握する手法として、非破壊検査による把握が行われており、その有効性が示されている。しかしながら、点検員の潜在的な不足の解決に向けては、より簡易な手法も必要であると考えられる。



(a) 軽度な損傷



(b) 重度な損傷

図 1-2 ウェブガセットの取り付け部から発生した疲労損傷の規模<sup>1-8)</sup>

### 1-2-2. ヘルスモニタリング技術の活用とセンサの選定理由

近年、常時監視や定量的な評価を可能とするヘルスマニタリング技術が着目されている。本研究は、前項にて取り上げた課題の解決に向け、ヘルスマニタリング技術の活用が有効であると判断し、本技術を用いた新たな評価手法について検討した。

ヘルスマニタリング技術の活用にあたっては、目的に合わせたセンサを選定する必要がある。まず、疲労損傷の検知を行うセンサを選定した。これまでに、センサを用いた損傷検知には、加速度センサ・ひずみゲージ・圧電素子センサなどが用いられている。加速度センサを用いた手法では、固有振動数、減衰定数、振動モードなどの振動特性の変化から損傷を判断するもの<sup>1-9),1-10),1-11),1-12),1-13)</sup>や、数多く得られた車両走行による橋梁のたわみ値の平均や分散の変化から検知する試み<sup>1-14)</sup>、加振データの回帰直線のズレから検知する試み<sup>1-15)</sup>など統計的データから損傷の有無を判断するものが提案されている。これらの検討では、損傷前と損傷後の特性値の変化から検知できることを示しているが、部材の破断などの大規模な損傷を対象としているため、疲労き裂など小規模な損傷に対する検出には適さないと考えられる。

一方、佐々木<sup>1-16)</sup>は、ひずみゲージによる損傷検知を提案しており、疲労き裂の近傍に貼り付けたひずみゲージの変化から、疲労損傷の検知が可能であることを示している。しかし、疲労き裂の検知には大量のひずみゲージが必要となるため、実橋梁への適用には、消費電力やコスト面に課題が残る。

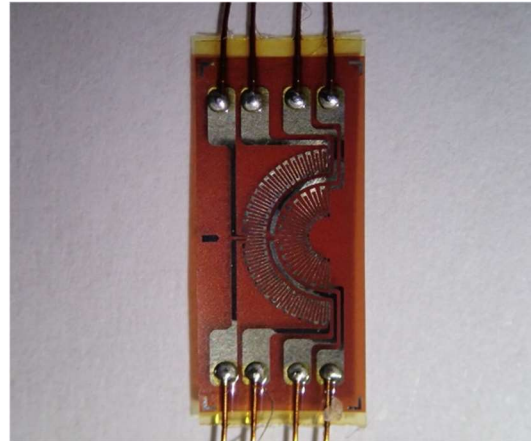
最後に示す圧電素子センサは、発生したひずみに応じて電圧を出力する性質を持つセンサであり、電圧のモニタリングからひずみゲージと同様にひずみの変化を把握することが可能であると考えられる。また、圧電素子センサの価格は1枚数十円と安価であり、従来の疲労き裂の検知に用いられてきたひずみゲージと比べ省電力である。このことから、本研究は図 1-3(a)に示す圧電素子センサを疲労き裂の検知に活用した。



続いて、疲労き裂の深さを推定するセンサを検討した。これまで直接的に疲労き裂の深さを把握する方法として、超音波探傷試験<sup>1-17),1-18),1-19),1-20)</sup>を用いた方法や渦流探傷試験<sup>1-21),1-22)</sup>を用いた方法など、非破壊検査による手法が提案されている。一方、間接的に疲労き裂の深さを推定する手法として、き裂先端近傍の応力分布の強さを表す応力拡大係数（以降、K 値と呼ぶ）に着目した方法が考えられる。K 値は、き裂先端近傍の応力分布の強さを表す物理量であり、その中には、き裂深さ、き裂幅、鋼材寸法(板厚、板幅)、公称応力の情報が含まれている。したがって、き裂深さと K 値のみが不明な場合、K 値を推定することにより、き裂深さの推定が可能である<sup>1-23)</sup>。また、推定した K 値からは、き裂の進展性評価が可能であり、き裂深さ以外の評価にも活用できる。このことから、本研究では、K 値をき裂の深さ推定に活用し、その K 値を図 1-3(b)に示す応力拡大係数解析用ひずみゲージ（以降、K 値ゲージと呼ぶ）にて推定した。



(a) 圧電素子センサ



(b) K値ゲージ

図 1-3 本研究にて用いたセンサ

### 1-2-3. 圧電素子センサによる損傷検知と研究対象

これまで、構造物の損傷検知に圧電素子センサが多く用いられている。小幡ら<sup>1-24)</sup>は、骨組み試験体を作製し、添接部のボルト接合の状態を変化させた際の圧電素子センサの応答変化を確認している。試験では、健全・き裂発生・破断の3通りにて圧電素子センサを用いた計測を行い、時刻歴応答と周波数応答を分析している。その結果、損傷時において、圧電素子センサの出力電圧に変化が見られ、特に損傷位置の近傍にある圧電素子センサにおいては、大きな変化が確認された。このことから、損傷検知と損傷位置の同定が可能であることを示している。また小幡らは、今後の展望として圧電素子センサにて計測した電圧をひずみ等の物理量へ変換し、損傷の程度を実ひずみまたは実応力にて表すことをあげている。

谷口ら<sup>1-25)</sup>は、圧電素子センサを用いた一次元部材におけるアクティブ損傷検知手法について提案している。本手法は、電圧の印加によりラム波や超音波などを励起する圧電素子センサの性質を活用し、センシングだけでなくアクチュエータとしても圧電素子センサを用いている。対象構造物は、薄板材料（アルミニウム）とし、ウェーブレット変換を用いた波動伝播速度の同定結果と、波の挙動解析により精度よく損傷位置の同定が可能であることを示している。また谷口らは今後の展望として損傷度合の把握と二次元部材への適応をあげている。これまで述べた上述の既往研究は、圧電素子センサによる損傷検知と損傷位置の同定が可能であることを明らかにしている。しかしながら、対象とする損傷は、部材の破断などであり、本論文が対象とする疲労損傷に対する適用性は不明である。

その一方、疲労損傷の検知を目的とした方法も検討されている。Jingjing<sup>1-26)</sup>らは、リベット継ぎ手部から生じる疲労損傷の検知を目的とし、圧電素子センサによるモニタリングを行っている。谷口らの研究と同様に、センシングだけでなくアクチュエータとしても圧電素子センサを用いている。Jingjingらは、アクチュエータ用の圧電素子センサによりラム波を発生させ、その波を損傷エリアに伝播させることにより、損傷を検知している。また、Jingjingらは今後の展望とし、提案した手法の自動化、複合構造物などの他の構造への適用性の検証が必要であることを示している。

鉄川ら<sup>1-27)</sup>は、溶接構造物に発生する疲労損傷の検知を試みている。角巻き溶接部と梁桁溶接部を対象としており、ひずみゲージと圧電素子センサにより、疲労試験をモニタリングしている。試験では、疲労損傷の発生・進展に伴い、圧電素子センサの出力電圧が低下することを明らかにした。また、ひずみゲージの応答変化よりも先に圧電素子センサの出力電圧に変化が生じる結果も報告されていることから、ひずみゲージよりも感度良く疲労損傷の検知ができる可能性を示している。しかし、圧電素子センサの応答は載荷周波数に依存することが報告されているため、周波数応答が広い実橋梁への適用には、課題が残る。また、これまでの既往研究では、既知の外力が作用した場合の検討であり、外力が未知となる供用下の橋梁においては、外力を考慮した手法も望まれる。

以上の既往研究にて報告されている結果を鑑み、本研究では、供用中の実橋梁に適応可能な損傷検知手法を提案する。具体的には、圧電素子センサのセンサ特性を把握し、載荷周波数が異なる場合においても適用できるモニタリング手法の提案を試みる。また、未知の外力が作用する実橋梁においても適用できるシステムを開発するために、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）加速度センサによる変位計測と圧電素子センサによる計測を組み合わせた新たなモニタリングシステムの提案する。

#### 1-2-4. K 値計測と研究対象

部材に生じたき裂に対し、K 値を把握する方法として、ひずみゲージによるひずみ値から解析する方法が提案されている。これらの研究は、従来のひずみゲージを用いた方法と、K 値解析用のひずみゲージを用いた 2 通りの方法に分類される。従来のひずみゲージによる K 値の推定では、北川ら<sup>1-28)</sup>が、き裂を含む板状構造物中に、き裂先端を囲む仮想の部分領域を設定し、その外周にて計測したひずみ値と境界条件から K 値を推定する方法を提案している。本手法は、精度よく K 値を推定できることを示しているものの、複数のひずみゲージを貼り付ける必要があることから、施工性の点に課題が残る。そのため、本論文ではもう一つの方法である K 値解析用のひずみゲージを用いた手法に着目した。これまで、黒崎ら<sup>1-29)</sup>は、貫通き裂におけるき裂先端の K 値と、表面のひずみ分布との関係を導くとともに、新たな K 値ゲージを開発し、K 値を推定する手法を提案している。本手法は、ゲージ 1 枚のみによって、簡易に貫通き裂の K 値を推定できることから、本研究では、黒崎らが提案した手法により K 値の推定を試みることにした。

しかし、黒崎らの研究では、疲労寿命のうち大部分を占めるき裂発生初期から中期にあたる非貫通のき裂に対する検討はされておらず、非貫通き裂に対する適用性は不明である。さらに、平板下の疲労き裂を対象としたものであることから、溶接止端による応力集中が K 値ゲージの計測に与える影響も不明である。このことから、本研究では、K 値ゲージを用いた非貫通き裂に対する K 値の推定手法と、推定した K 値に基づくき裂深さの推定手法の検討、および溶接止端における K 値ゲージの適用性を検討する。

### 1-3. 本論文の構成

本論文は、全6章にて構成される。

**第1章**では、本論文の社会的背景、既往研究および本論文の目的について説明した。

**第2章**では、圧電素子センサによる疲労き裂の検知を目的とした基礎試験の結果について述べる。はじめに、圧電素子センサの概要について説明する。続いて、圧電素子センサの特性を確認するために、引張試験片を用いた載荷試験を行い、載荷荷重および載荷速度が圧電素子センサの出力に与える影響を確認する。次に、引張試験片を用いた疲労試験を行い、圧電素子センサによる疲労き裂の検知の可能性を検証する。また、引張試験片を用いた疲労試験に関しては、有限要素解析を通して、ひずみと出力電圧の関係について検討する。最後に、溶接止端部からの疲労き裂の検知について検証するために、I 桁試験体を用いた疲労試験を実施し、その結果について述べる。

**第3章**では、圧電素子センサの現場適用について検討する。はじめに、MEMS 加速度センサを組み合わせた新たなモニタリングシステムを提案する。続いて、MEMS 加速度センサによる変位算出の際に重要となる積分範囲の決定手法について検討し、最適な方法について検証する。最後に、圧電素子センサおよび MEMS 加速度センサを用いた現場計測を行い、提案システムの実用性を検証する。

**第4章**では、K 値ゲージを活用した疲労き裂の深さ推定手法について述べる。はじめに、使用した K 値ゲージの概要について説明する。次に、き裂幅、き裂深さ、板厚、荷重をパラメータとした有限要素解析を実施し、K 値ゲージを用いた非貫通き裂に対する K 値の推定手法について提案する。さらに、推定した K 値、板厚、板幅、公称応力、き裂幅に基づくき裂深さの推定手法について提案する。提案した手法は、引張試験片による疲労試験を通して、その精度について検討する。

**第5章**では、溶接止端部から生じた疲労き裂に対する、き裂深さの推定を K 値ゲージにて行い、溶接止端部における提案手法の適応性について検証する。また、溶接止端から生じた疲労き裂を有限要素解析にてモデル化し、溶接止端の応力集中が K 値ゲージの計測に与える影響を分析した。

**第6章**では、本論文にて得られた知見について述べる。

## 参考文献

- 1-1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集 No.501/I-29, pp. 1-10, 1994.
- 1-2) 玉越隆史，三宅淳市，村越潤：鋼部材の疲労き裂について（その1）—道路橋の主桁—，土木技術資料平成21年10月号，pp. 39-40, 2009.
- 1-3) 玉越隆史，大久保雅憲，星野誠，横井芳輝，強瀬義輝：道路橋の定期点検に関する参考資料(2013年版)—橋梁損傷事例写真集—，国土技術政策総合研究所，p. 76.
- 1-4) 鋼構造委員会疲労変状調査委員会：鋼橋の疲労変状，土木学会論文集，第368号/I-5, pp. 1-12, 1986.
- 1-5) 西川和廣：プレートガーダー橋の疲労損傷事例，1985.
- 1-6) 三木千壽：橋梁の疲労と破壊—事例から学ぶ—，朝倉書店，2011.
- 1-7) 三木千壽，徳永皓平，判治剛：鋼橋に生じた疲労損傷に対する低変態温度溶接材料による溶接補修の試み，土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 4, pp. 836-849, 2010.
- 1-8) 三木千壽：橋の臨床成人病学入門，pp175-184，建設図書，2017.
- 1-9) 田中英哲，宮本文穂，江本久雄，矢部明人：中小橋梁を対象としたバスモニタリングシステムの長期実証実験と損傷検知，土木学会論文集 F3, Vol.70, No.2, pp.193-206, 2014.
- 1-10) 斎藤拓馬，渡邊和樹，佐伯昌之：精密小型加振機と無線センサネットワークを結合した構造センシング手法の精度検証，土木学会論文集 A2, Vol. 68, No.2, pp.761-769, 2012.
- 1-11) 篠田昌弘，真井哲生，江原季映，中島進，阿部慶太，藤田圭一，土屋宗典：小型加振器と光ファイバセンサを用いた鉄道橋梁下部構造物の振動計測，土木学会論文集 A1, Vol. 69, No.1, pp. 40-56, 2013.
- 1-12) 吉岡勉，伊藤信，山口宏樹，松本泰尚：鋼トラス橋の斜材振動練成とモード減衰変化を利用した構造物健全度評価，土木学会論文集 A, Vol. 66, No.3, pp516-534, 2010.
- 1-13) 塚原美佳，奥村昂史，渡邊和樹，大谷隆浩，石井克哉，佐伯昌之，藤原鉄朗：精密小型加振機を用いた振動特性同定手法の開発，土木学会論文集 A2, Vol. 70, No.2, pp. 921-928, 2014.
- 1-14) 大島義信，船水洋輔，山本亨輔，杉浦邦征：橋梁の損傷検知を目的とした車両振動の統計的分析，構造工学論文集，Vol. 60A, pp. 175-183, 2014.
- 1-15) 服部洋，松山卓真，白土博通，八木知己，岡野雅：振動応答予測モデルを用いた橋梁構造物の損傷検知手法に関する研究，構造工学論文集，Vol.59A, pp.673-681, 2013.

- 1-16) 佐々木哲也：ひずみゲージを用いた疲労き裂モニタリングの基礎研究，産業安全研究所研究報告，NISS-RR94, pp. 21-26, 1995.
- 1-17) 福富広幸，林山，緒方隆志：超音波探傷試験における新しいき裂深さ測定法の開発（第5報，き裂開口部からの深さ測定への適用），日本機械学会論文集(A編)，74巻738号，pp. 185-190, 2008.
- 1-18) 白旗弘実，上栗拓真：フェーズドアレイ超音波探傷法による鋼床版デッキプレート進展き裂の非破壊評価，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 72, No.1, pp. 206-219, 2016.
- 1-19) 服部雅史，牧田通，舘石和雄，判治剛，清水優，八木尚人：鋼床版Uリブ・デッキプレート溶接部の内在き裂に対するフェーズドアレイ超音波探傷の測定精度，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.74, No. 3, pp. 516-530, 2018.
- 1-20) 村越潤，高橋実，小池光裕，木村友則：臨界屈折角近傍に調整した超音波斜角探触子による鋼床版デッキ進展き裂の探傷法の検討，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 68, No. 2, pp. 453-464, 2012.
- 1-21) Pasadas, D. J., Lopes Ribeiro, A., Rocha, T. J. and Helena Geirinhas Ramos: Open crack depth evaluation using eddy current methods and GMR detection, 2014 IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace), pp. 117-121, 2014.
- 1-22) Yusa, N., Hashizume, H., Urayama, R., Uchimoto, T., Takagi, T. and Sato, K.: An arrayed uniform eddy current probe design for crack monitoring and sizing of surface breaking cracks with the aid of a computational inversion technique, NDT&E International, Vol. 61, pp. 29-34, 2014.
- 1-23) 岡村弘之：線形破壊力学入門，培風館，1976.
- 1-24) 小幡卓司：圧電素子を用いた損傷同定モニタリングシステムの実験的研究，構造工学論文集，Vol. 60A, pp. 165-174, 2014.
- 1-25) 谷口龍太，三田彰：波動伝播特性を用いた損傷検知手法に関する基礎的研究，応用力学論文集，Vol. 5, pp. 873-880, 2002.
- 1-26) Jingjing He, Xuefei Guan, Tishun Peng, Yongming Liu, Abhinav Saxena, Jose Celaya and Kai Goebel: A multi-feature integration method for fatigue crack detection and crack length estimation in riveted lap joints using Lamb waves, Smart Materials and Structures, 22, pp. 1-12, 2013.
- 1-27) 鉄川進，勝田順一，重村正和，高橋和雄：溶接構造物のヘルスマニタリングにおける疲労損傷検知に関する考察，鋼構造論文集，第8巻第29号，pp. 1-13, 2001.

- 1-28) 北川英夫, 石川晴雄 : 境界条件の不確定な板状構造物中き裂のひずみゲージと変分法による解析, 日本機械学会論文集 (第 1 部), 44 卷 383 号, pp.2209-2216, 1978.
- 1-29) 黒崎茂, 山地周作, 小針遼, 兼平光隆, 施村偉, 志村穰 : き裂の応力拡大係数解析ひずみゲージの開発, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 824, pp. 1-19, 2015.

## 第 2 章 圧電素子センサによる 疲労き裂の検知に関する基礎検討

### 2-1. 概説

本章では、圧電素子センサによる疲労き裂の検知を目的とする基礎検討を行った。まず、2 節にて、圧電素子センサの概要について説明した後、セラミック誘電工学に基づき、センサの出力と応力の関係について述べる。次に、3 節にて、圧電素子センサに対し荷重を作用させ、ひずみとセンサ出力の関係から、センサの出力特性を評価した。続いて、4 節では、引張試験片を用いた疲労試験を実施し、圧電素子センサとひずみゲージによる疲労き裂のモニタリング結果から、圧電素子センサにより疲労き裂の発生および進展の検知が可能であるかを検証した。さらに、5 節にて、有限要素解析を通じてセンサ出力とひずみとの関係を分析した。6 節においては、大型試験体による疲労試験を通じて、溶接止端部における疲労き裂の検知性能を検証した。本章は、参考文献 2-1) の内容に基づき記載する。



## 2-2. 圧電素子センサの概要

### 2-2-1. 圧電セラミックスの概要

圧電素子センサは、センサの変形により電圧を出力する圧電効果の性質を持つセンサである。また、圧電素子センサには、 piezofilmタイプとセラミック圧電素子タイプの2種類のタイプがある。piezofilmタイプは、セラミック圧電素子タイプと比較して、センサのヤング率が低いため、貼り付けた構造体の変化を受けづらい。また、センサの形状に自由性が高いことが特徴である<sup>2-2)</sup>。一方、セラミック圧電素子タイプは、ヤング率が高いため、piezofilmタイプと比較して、貼り付けた構造体との追従性を有する<sup>2-2)</sup>。また、セラミックタイプの出力電圧は、フィルムタイプと比較して、約10倍以上の高さを有しており、微小な変化でも大きな出力電圧となる。本研究では、貼り付けた構造物の応力変化を感度よく捉える必要があると考え、構造体の変化を敏感に捉えることができるセラミック圧電素子タイプを選定した。

続いて、本研究にて使用したセラミック圧電素子であるチタン酸ジルコン酸鉛（以降、PZTと呼ぶ）について述べる。PZTの単位格子を図2-1(a)に、圧電性のメカニズムを図2-1(b)に示す。PZTは、鉛を頂点、酸素を面心、プラスの電荷を有するチタンジルコンが体心に位置する構造であり、平常時においてはイオンの偏りを持たない。一方、図2-1(b)のように、PZTが外力により変形した際には、各単位格子内にある体心位置のチタンジルコンが移動し、イオンに偏りが生じる。しかし、チタンジルコンの移動方向は単位格子ごとに異なるため、それぞれの単位格子内のイオンの偏りは、打ち消し合い、構造全体においてはイオンの偏りが起きない。イオンの偏りによる電圧を発生させるためには、PZTに対して強力な電界を負荷し、体心位置にあるイオンの移動方向を一方向に固定する分極処理を行う。この処理により、PZTは特定方向の応力に対して、特定方向にイオンの偏りをもたらし、電圧を発生させる。この電圧の出力と、応力の関係については、次項にて詳細に述べる。

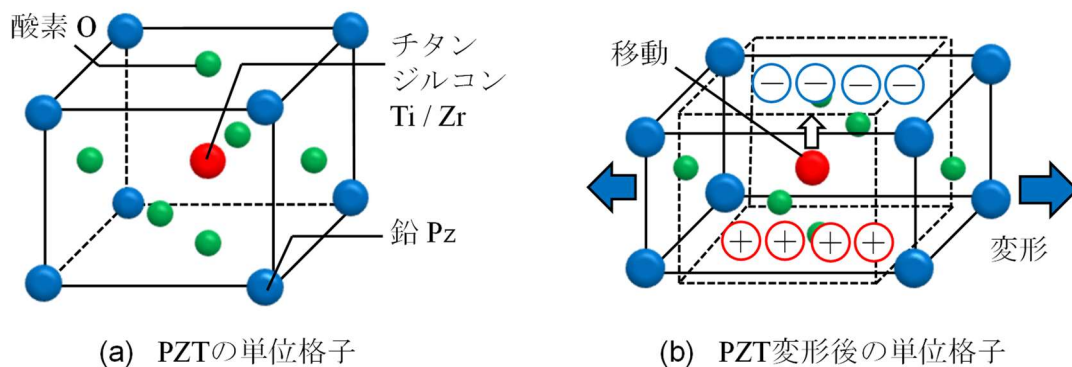


図 2-1 PZT の構成

## 2-2-2. センサ出力と応力の関係

本項では、圧電現象と応力の関係について述べる。圧電現象にて生じた電束密度  $\mathbf{D}$  [C/m<sup>2</sup>]は、圧電体に加わる応力の変化率  $\mathbf{T}$  [N/m<sup>2</sup>]と圧電体の周辺に生じている単位電界  $\mathbf{E}$  [V/m]により、式(2-1)にて表すことができる<sup>2-3)</sup>。

$$\mathbf{D} = \mathbf{dT} + \varepsilon\mathbf{E} \quad (2-1)$$

ただし、電束密度  $\mathbf{D}$  [C/m<sup>2</sup>]は、単位面積あたりの電気力線の本数であり、電界の強さを表すものである。 $\mathbf{d}$  [C/N]は圧電ひずみ定数、 $\varepsilon$  [C/V・m]は誘電率である。

次に、圧電体にかかる応力成分と出力する電圧成分について考える。圧電素子にかかる応力成分と電束密度の方向を定義した直座標系を図 2-2(a)および図 2-2(b)に示す。X 軸、Y 軸を圧電体面内方向、Z 軸を圧電体面外方向とすると、応力の変化率成分は、X 軸、Y 軸、Z 軸に生じる軸応力の変化率  $\Delta T_1$ ,  $\Delta T_2$ ,  $\Delta T_3$  と X 軸面、Y 軸面、Z 軸面に生じるせん断応力の変化率  $\Delta T_4$ ,  $\Delta T_5$ ,  $\Delta T_6$  の計 6 つの成分となる。この時、圧電体の周辺に生じている電界  $\mathbf{E}$  が 0 V/m と仮定すると、X 軸、Y 軸、Z 軸のそれぞれの方向に生じる電束密度  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  は、式(2-1)を用いて式(2-2)にて表せる<sup>2-3)</sup>。

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \Delta T_3 \\ \Delta T_4 \\ \Delta T_5 \\ \Delta T_6 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

ただし、 $d_{ij}$  は圧電ひずみ定数であり、 $i$  成分は電気分極の方向、 $j$  成分は応力成分を表している。各応力成分は、X 軸、Y 軸、Z 軸の 3 方向の電気分極の方向に関係しているが、前述したように圧電体としての性質を持たせる分極処理により、特定の方向のみに電気分極が発生し、各軸に生じる電束密度  $\mathbf{D}$  は、式(2-2)から式(2-3)にて書き表せる<sup>2-3)</sup>。

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \Delta T_3 \\ \Delta T_4 \\ \Delta T_5 \\ \Delta T_6 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

Z 軸方向に生じる電束密度  $D_3$  は、各方向にかかる軸応力の変化率に依存する。一方、せん断応力の変化率に対しては、X 軸方向および Y 軸方向の電気分極に依存してお

り，その圧電ひずみ定数は等しい．このとき，極板間に蓄えられる電気量  $Q[C]$  は，式(2-4)を用いて表される<sup>2-3)</sup>．

$$Q = \iint [D_1 \ D_2 \ D_3] \begin{bmatrix} dA_1 \\ dA_2 \\ dA_3 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

ただし， $A_1[m^2]$  は Y 軸・Z 軸にて構成される電極面積， $A_2[m^2]$  は X 軸・Z 軸にて構成される電極面積， $A_3[m^2]$  は X 軸・Y 軸にて構成される電極面積である．出力電圧  $V[V]$  は，静電容量  $C[F]$  と電気量  $Q[C]$  の関係から，式(2-5)を用いて表される<sup>2-2)</sup>．

$$V = Q/C \quad (2-5)$$

圧電体周辺の電界に変化が生じない場合，式(2-3)，式(2-4)および式(2-5)の関係より出力電圧  $V$  と応力の変化率  $\Delta T$  が線形の関係の有していることがわかる．この関係から，圧電素子センサの出力電圧のモニタリングにより，疲労き裂による応力変化を捉えることができると考えられる．

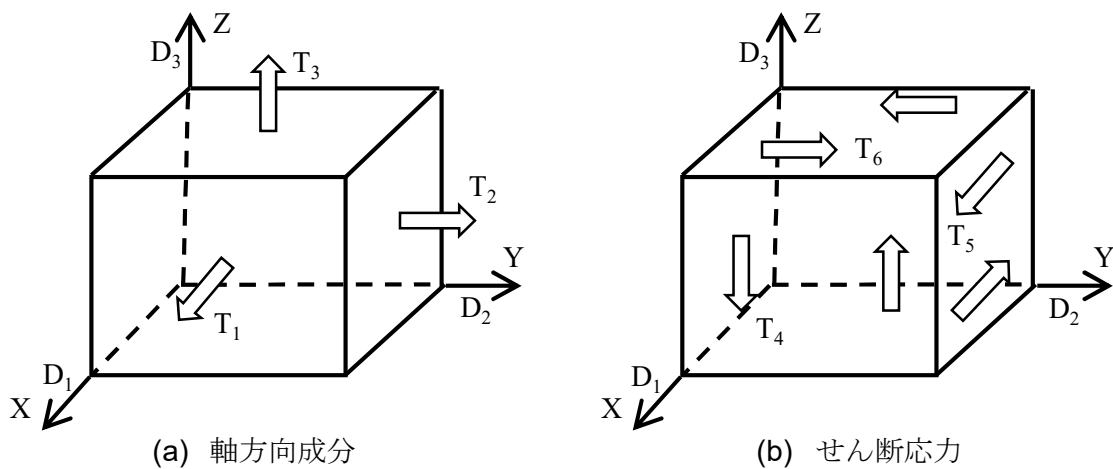


図 2-2 各成分の定義

## 2-3. 圧電素子センサの特性試験

本章では、引張試験体を用いた繰り返し载荷試験から、圧電素子センサの出力電圧とひずみ応答との関係を確認し、圧電素子センサのセンサ特性を分析した。

### 2-3-1. 試験概要

本試験にて用いた引張試験片の寸法とセンサ設置位置を図 2-3 に、センサの設置状況を図 2-4 に示す。試験片の全長は 600 mm、平行部の長さが 160 mm、平行部の幅が 50 mm、試験片の厚さが 9 mm とし、材質は鋼材 SM490Y である。本試験では、圧電素子センサとひずみゲージを試験片に貼付し、さまざまな载荷荷重と载荷速度下における出力電圧とひずみ応答の関係を確認した。センサは、圧電素子センサと三軸ひずみゲージを試験体中央から左右 15 mm 離れた位置に設置した。使用した圧電素子センサの材料特性を表 2-1 に示す。圧電素子センサは、直径 30 mm の銅板に直径 25 mm の圧電セラミックを貼り付けた丸型形状のものを用いた。材料の主成分は、鉛・ジルコニア・チタンである。また微量の添加物として、亜鉛・ニオブ・マグネシウムを添加している。データ計測は、共和電業のデータロガー (EDX-200A) を用いて実施し、サンプリング周波数は、圧電素子センサ・三軸ひずみゲージともに 100 Hz とした。試験条件は、表 2-2 に示すように载荷荷重を 0.5 kN (1.1 MPa) から 50 kN (111.1 MPa) までとする 6 パターン、载荷速度を 0.1 Hz から 5.0 Hz までとする 8 パターンを選定し、各载荷条件を組み合わせることにより、計 48 パターンとした。

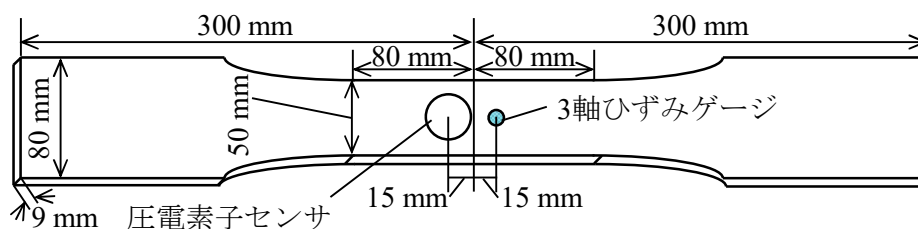


図 2-3 試験片の寸法とセンサの設置位置

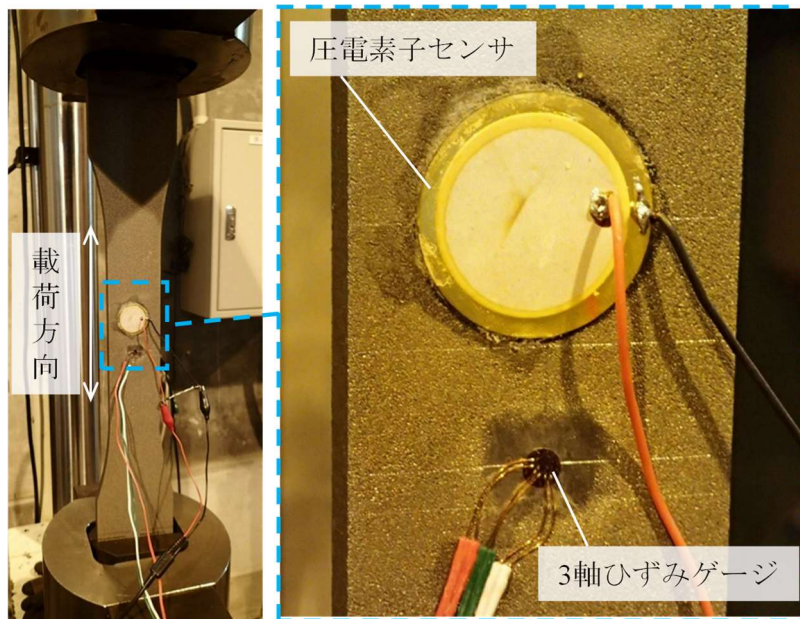


図 2-4 試験片の設置状況とセンサの設置状況

表 2-1 圧電素子センサの特性値<sup>2-1)</sup>

密度	7800 kg/m <sup>3</sup>
誘電率	2200
圧電ひずみ定数 $d_{31}$	0.20 nm/V
圧電ひずみ定数 $d_{33}$	0.49 nm/V
使用可能温度	320 °C

表 2-2 荷重条件

荷重荷重 [MPa]	荷重速度 [Hz]
1.1-11.1(10)	0.1
2.2-22.2(20)	0.2
4.4-44.4(40)	0.3
6.6-66.6(60)	0.5
8.8-88.8(80)	0.7
11.1-111.1(100)	1.0
-	3.0
-	5.0

### 2-3-2. 試験結果とセンサ特性

載荷速度 0.1 Hz, 応力振幅 100 MPa (0.5 kN から 50 kN まで) における圧電素子センサの出力電圧と載荷方向のひずみ応答を図 2-5 に示す. 図 2-5 より出力電圧と載荷方向の軸ひずみの間には,  $\pi/2$  の位相差を確認できる. これは, 前節にて述べたように出力電圧がひずみの変化率に依存しているためだと考えられる. 次に, 出力電圧の全振幅値とひずみの全振幅値との関係を図 2-6 に示す. 図 2-6 より, ひずみの全振幅値が増加するにつれて, 出力電圧の全振幅値も増加することが確認できる. また, 載荷速度が速くなる場合にも, 出力電圧の全振幅値が増加を示している. これは, 圧電素子センサの出力電圧がひずみの変化率と線形関係を有しているためだと考えられる. したがって, ひずみ応答に対応した値を算出するために, 出力電圧を一階積分した. 出力電圧の数値積分は, 台形則に基づいて行い, 基線ずれによるドリフト成分は, 一次近似による最小二乗法を用いて取り除いた. 本研究では, 電圧を積分して算出した値を電圧積分と定義し, その全振幅値とひずみの全振幅値との関係を図 2-7 に示した. 図 2-7 より, 電圧積分の全振幅値は, 載荷速度 1.0 Hz までは, 載荷速度によらずに同一線上にある. しかし, 載荷速度 3.0 Hz および 5.0 Hz においては, 電圧積分の全振幅値が減少を示している. 応力振幅 100MPa のとき, 0.1 Hz を基準とした変化率は, 3.0 Hz にて 15.3%, 5.0 Hz にて 31.2% と高い載荷速度になるほど, 減少率が大きくなっている.

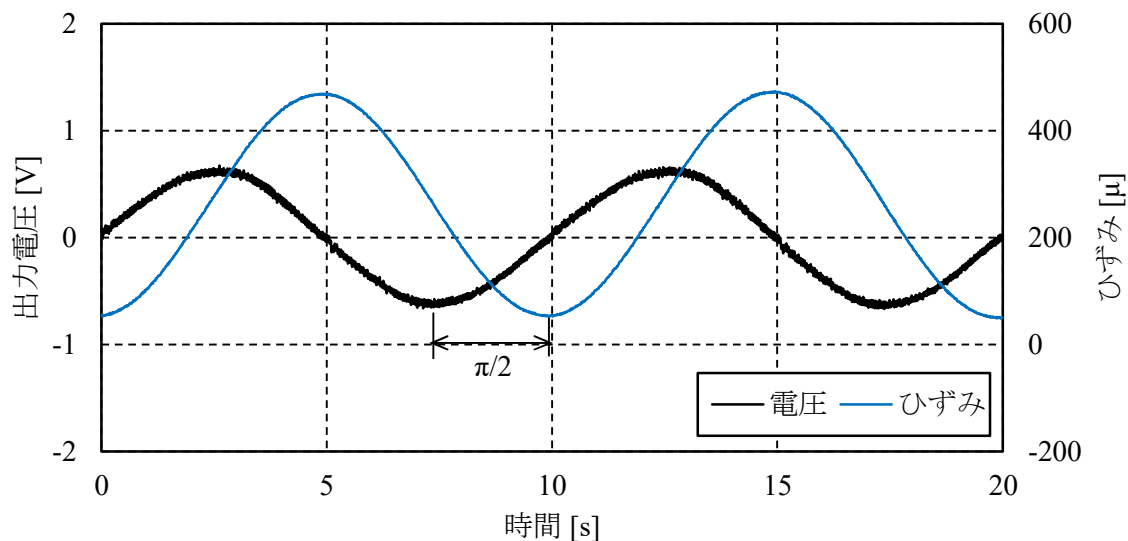


図 2-5 圧電素子センサの出力電圧およびひずみゲージによるひずみの時刻歴情報<sup>2-1)</sup>

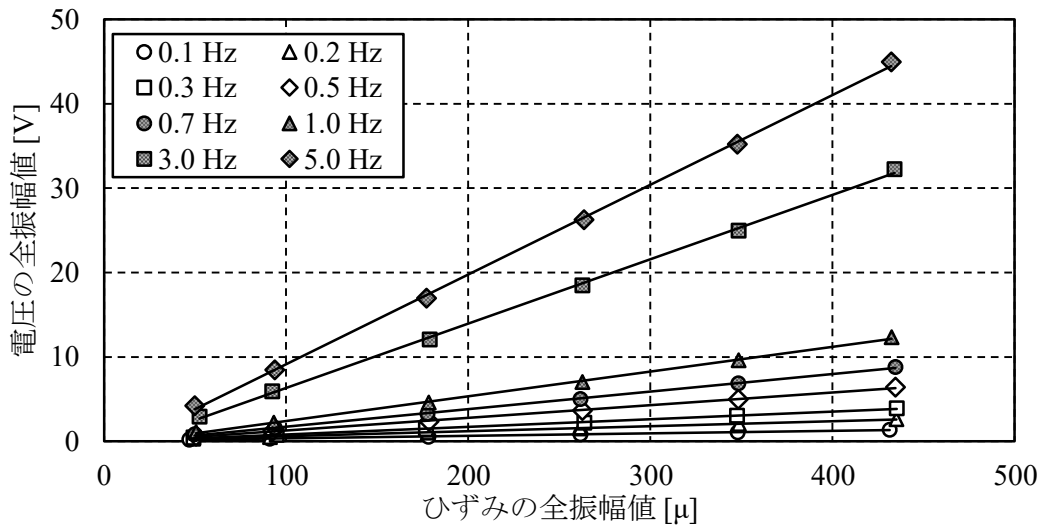


図 2-6 電圧の全振幅値とひずみの全振幅値の関係

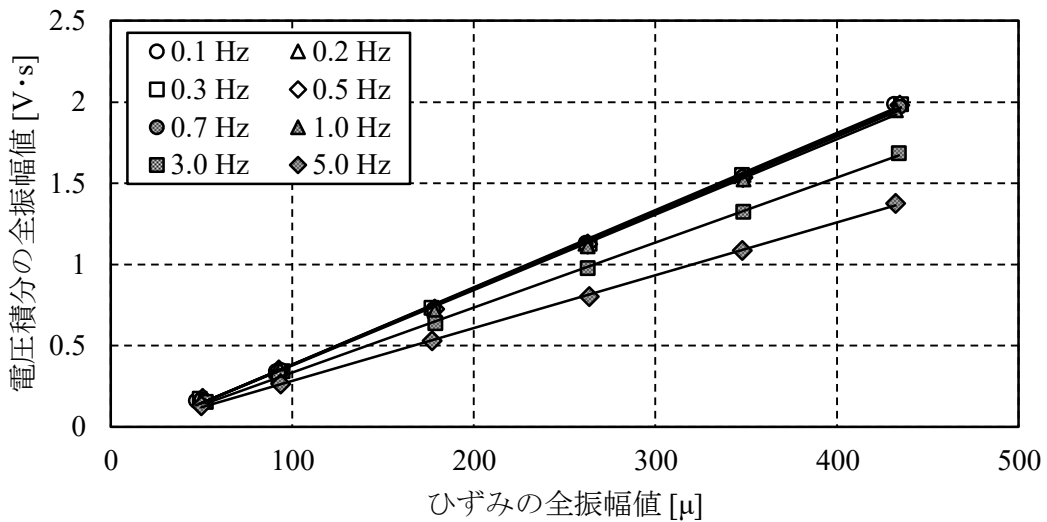


図 2-7 電圧積分の全振幅値とひずみの全振幅値の関係

本試験は、圧電素子センサを用いてひずみ応答の変化を把握する方法について検討した。その結果、出力電圧を一階積分した電圧積分値により、载荷速度 1.0 Hz までは、载荷速度に依存しない評価が可能であることを確認した。

このセンサ特性を持つ圧電素子センサが、実橋梁に対して適用可能かを検証するため、実橋梁に生じるひずみ応答の周波数分析を行った。検証に活用した橋梁の全体図を図 2-8(a)に、ひずみの計測位置を図 2-8(b)に示す。対象橋梁は、日本の高速道路橋の一般的な長さである支間長 38 m の桁橋である<sup>2-4)</sup>。ひずみの計測位置は、橋梁の機能不全をもたらす主桁の面外ガセットの疲労き裂を対象とするため、主桁の面外ガセットの溶接止端部を選定した。計測したひずみ応答を図 2-9 に、そのひずみ応答に対

するパワースペクトル密度（PSD）と周波数の関係を図 2-10 に示す．図 2-10 より，ひずみ応答の主な周波数成分が 1.0 Hz 以下にあることを確認できる．続いて，計測した時間領域のひずみ応答に対し，1.0 Hz のローパスフィルタを適用し，1.0 Hz 以下の周波数成分にて構成されるひずみ応答を算出した．1.0 Hz 以下の周波数成分によるひずみ波形と，計測したひずみ波形を図 2-11 に示す．図 2-11 より，復元したひずみ波形は，原波形と概ね一致しており，鋼橋の疲労損傷を起因するひずみの周波数成分が 1.0 Hz 以下であることが示された．以上の結果より，圧電素子センサを実橋梁においても適用できる可能性が示された．

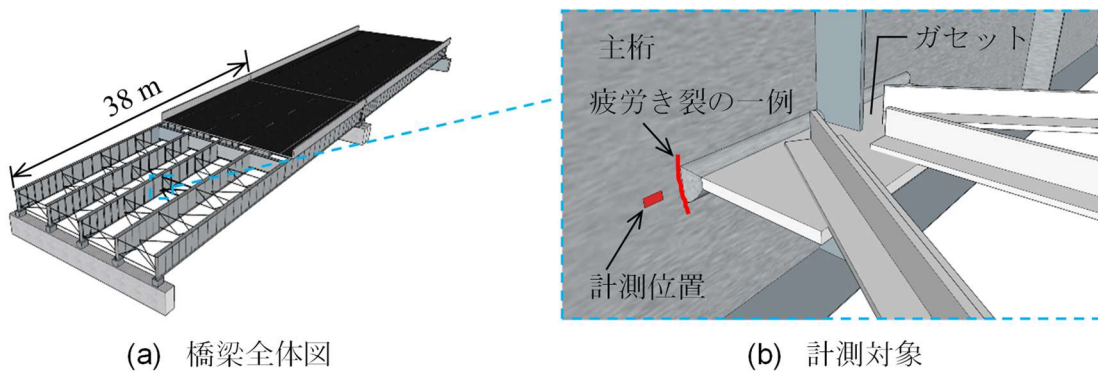


図 2-8 試験橋梁とひずみ計測位置<sup>2-1)</sup>

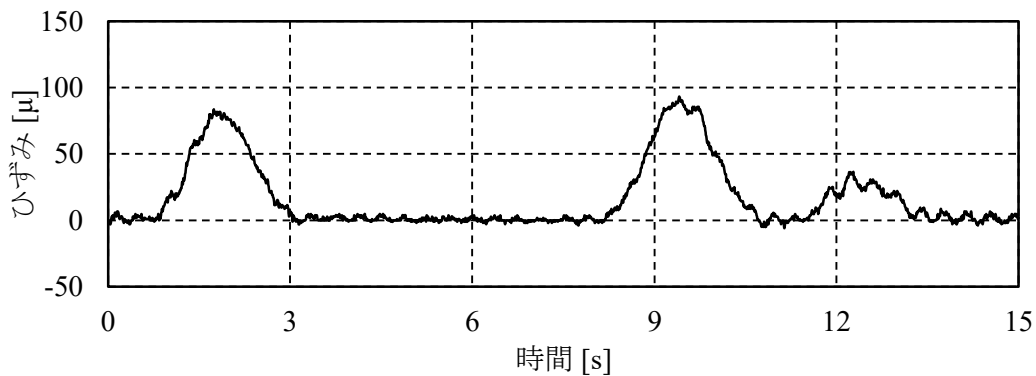


図 2-9 ひずみ計測結果



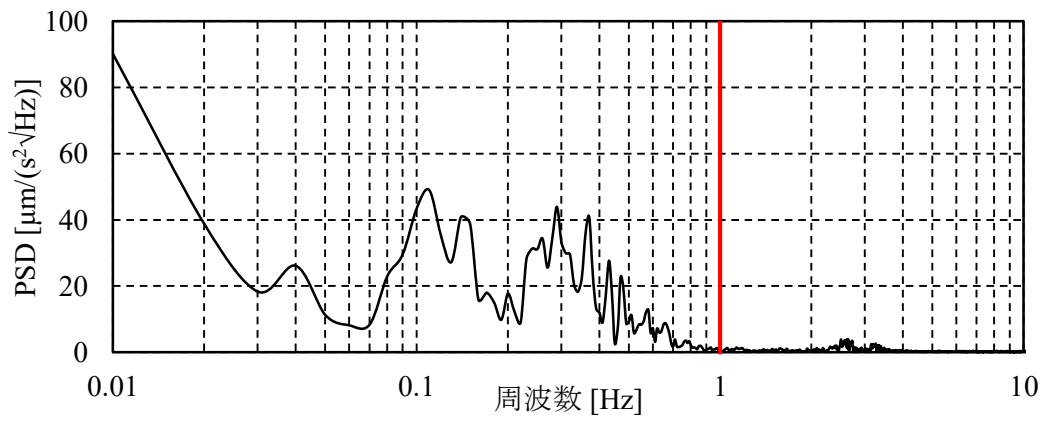


図 2-10 ひずみ応答に対する周波数解析結果

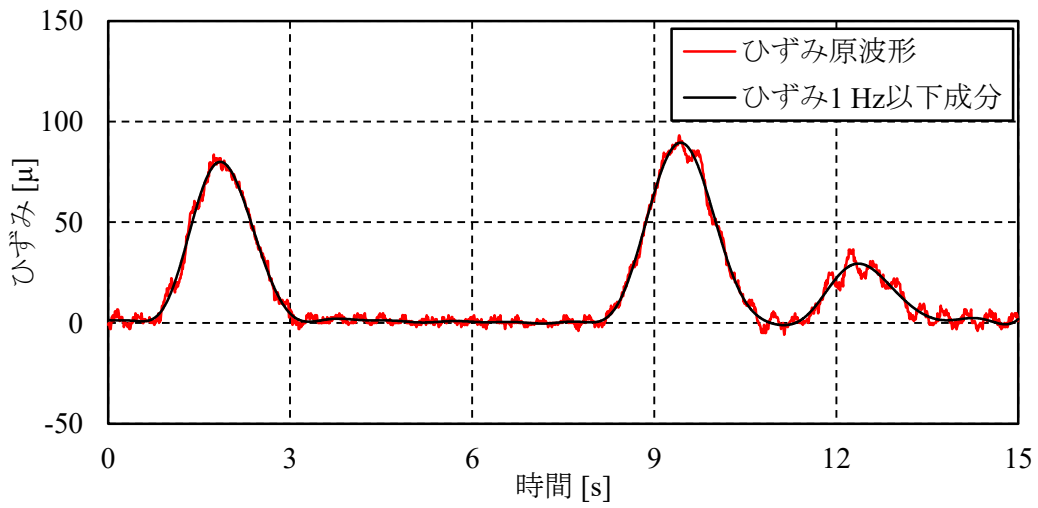


図 2-11 ひずみ計測波形と 1 Hz 以下の成分によるひずみ波形の比較

## 2-4. 引張試験片を用いた疲労試験

### 2-4-1. 試験概要

本試験にて用いた引張試験片の寸法とセンサの設置位置を図 2-12 に示す。引張試験片は、全長 600 mm、平行部の長さ 160 mm、平行部の幅 50 mm、厚さは 9 mm とし、試験片中央には放電加工によるスリットを設けた。スリット形状は、長径 10 mm、短径 4 mm の楕円を選定した。

続いて、センサの設置状況を図 2-13 に示す。圧電素子センサは、スリットの近傍とスリットの影響を受けない 2 か所に貼り付け、疲労き裂の発生および進展による応答変化を確認した。スリット近傍の圧電素子センサ（以降、き裂発生部と呼ぶ）は、スリットが銅板の縁端に沿うように貼り付けた。スリットの影響を受けない圧電素子センサ（以降、き裂未発生部と呼ぶ）は、スリットおよび試験片の絞り部の影響を避けるために、スリットから 55 mm 離れた位置に貼り付けた。それぞれの圧電素子センサは、グラインダー処理等の表面処理を行わずに、市販の瞬間接着剤を用いて圧着させ固定した。

また、圧電素子センサと応力の関係を明確にするために、圧電素子センサの周辺に 3 軸ひずみゲージを貼り付けた。き裂発生部における圧電素子センサの周辺には、スリット側を除く 3 箇所（S1-S3）と、圧電素子センサの中央と同等の位置にあたる S4 に対し、ひずみゲージを設置した。き裂未発生部における圧電素子センサの周辺には、圧電素子センサに沿ってひずみゲージを設置した（S5-S8）。圧電素子センサと 3 軸ひずみゲージの計測は、(株) 共和電業のデータロガー（EDX-200A）を用いて行い、それぞれのセンサのサンプリング周波数は、100 Hz とした。本試験では、スリットの端部から疲労き裂を発生させ、発生前と発生後の圧電素子センサとひずみゲージの応答変化を確認し、提案手法による疲労き裂の検知が可能であるかを検証した。

載荷条件は、載荷速度を 6 Hz の正弦波とし、平行部の公称引張応力が、振幅応力 120 MPa となるように引張荷重を上限 60 kN、下限 6 kN に設定した（以下、正規載荷と呼ぶ）。本試験においては、載荷速度が 1 Hz を超えているが、図 2-7 の載荷試験の結果より、同一の載荷速度であれば、試験に問題無いと判断した。また、疲労き裂の進展状況を試験終了後に確認するため、ビーチマークの導入を正規載荷 10 万回ごとに試みた。ビーチマーク導入時は、正規載荷の振幅応力の半分である 60 MPa とし、上限荷重の 60 kN は変更せず、下限荷重の 6 kN を 33 kN とした（以下、ビーチマーク載荷と呼ぶ）。本計測は、疲労き裂により引張試験片が破断した正規載荷 170 万回まで断続的に行った。

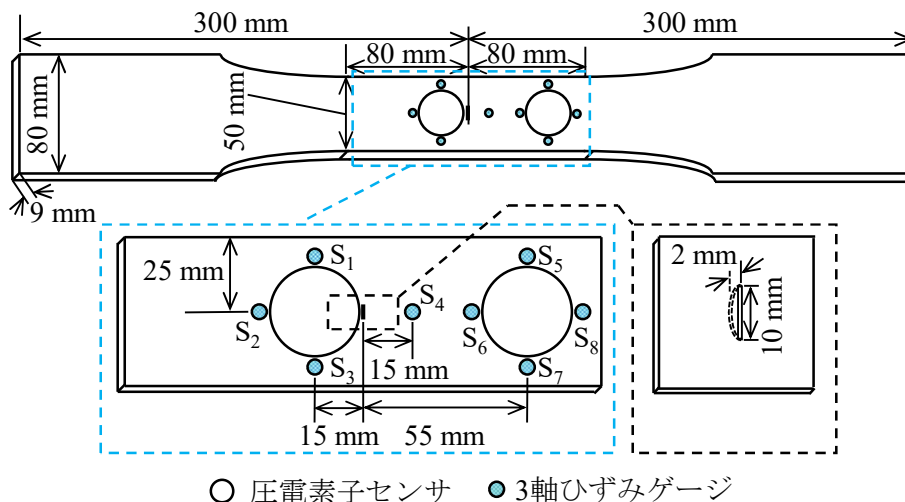


図 2-12 試験片の寸法とセンサの設置位置

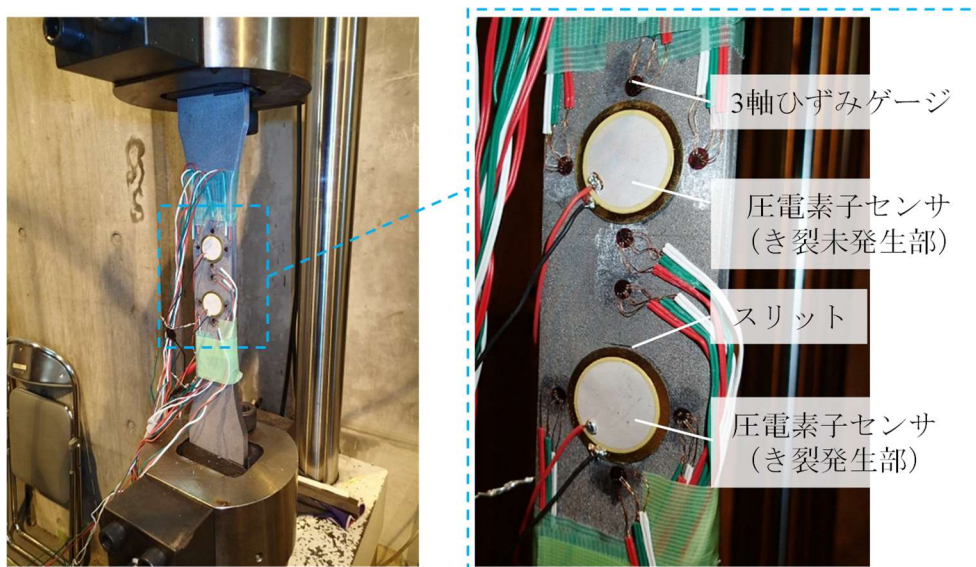


図 2-13 試験片設置状況とセンサの設置状況<sup>2-1)</sup>

## 2-4-2. 試験結果

はじめに、本試験にて得られた破断面とビーチマークのスケッチを図 2-14(a)および図 2-14(b)に、その形状の寸法を表 2-3 に示す。図 2-14(a)より、スリット端部から複数の細かい凹凸を確認できることから、複数の微小な疲労き裂が発生したと推察される<sup>2-5)</sup>。き裂初期に確認される複数の微小な疲労き裂は、進展するにつれて合体し、1つの疲労き裂となっており、その形状は半楕円状である。本試験における最後のビーチマーク荷重は、正規荷重 170 万回であることから、図 2-14(b)に示す外縁のビーチマークが、正規荷重 170 万回時に導入されたものと推察できる。また、本試験では正規荷重 10 万回ごとにビーチマーク荷重を行っていることから、最初に確認できるビーチマークは正規荷重 60 万回時に導入されたものと推察できる。以上より、疲労

き裂の発生は、正規载荷 50 万回から 60 万回の間、疲労き裂が貫通したのは、正規载荷 160 万回から 170 万回の間と考えられる。

続いて、圧電素子センサによって計測した出力電圧を一階積分し、電圧積分の全振幅値と、センサ中央部の载荷方向に対するひずみの全振幅値との関係を図 2-15 に示す。出力電圧の積分方法は、2 章 3 節 2 項にて用いた手法と同様である。図 2-15 より、载荷回数が増加するにつれ、電圧積分の全振幅値とひずみの全振幅値は、ともに低下を示した。この結果から、圧電素子センサによる電圧積分値の変化とひずみの変化は、同等であることが確認された。続いて、き裂発生部にて計測した圧電素子センサの電圧積分の全振幅値と、き裂未発生部にて計測した圧電素子センサの電圧積分の全振幅値を比較した。

き裂発生部およびき裂未発生部の電圧積分の全振幅値と、き裂深さの関係を。図 2-16 に示す。き裂発生部において、き裂が進展するとともに、電圧積分の全振幅値が低下している。一方、き裂未発生部においては、き裂が進展した場合でも、ほぼ横ばいの状態を示した。以上の結果より、疲労き裂の発生および進展を圧電素子センサにて検知できる可能性が示された。

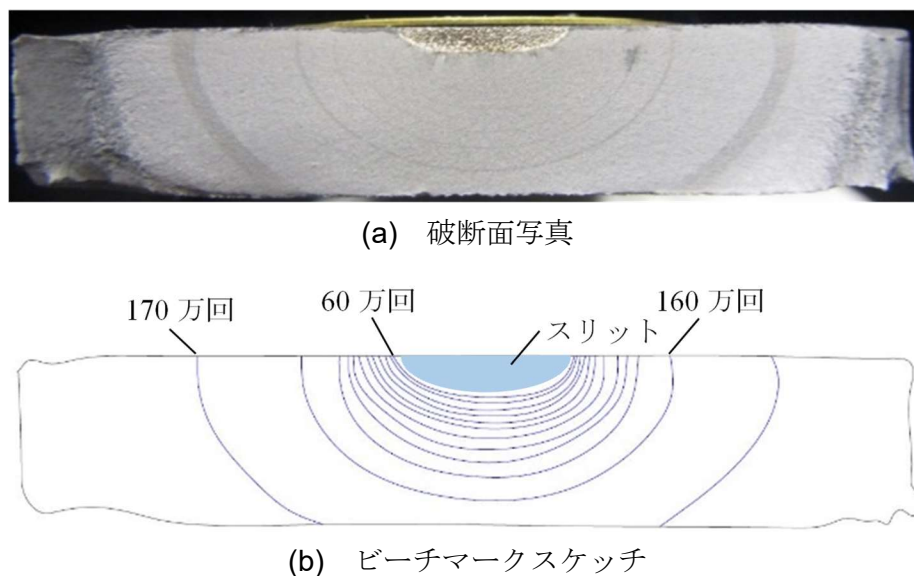


図 2-14 破面状況<sup>2-1)</sup>

表 2-3 ビーチマークから読み取るき裂形状の寸法<sup>2-1)</sup>

载荷回数 [万回]	き裂幅 [mm]	き裂深さ [mm]	载荷回数 [万回]	き裂幅 [mm]	き裂深さ [mm]
60	10.31	2.32	120	13.95	4.66
70	10.62	2.67	130	15.01	5.30
80	11.07	3.07	140	15.84	6.04
90	11.74	3.40	150	17.02	6.88
100	12.34	3.79	160	20.97	8.20
110	12.98	4.13	170	32.64	9.00(貫通)

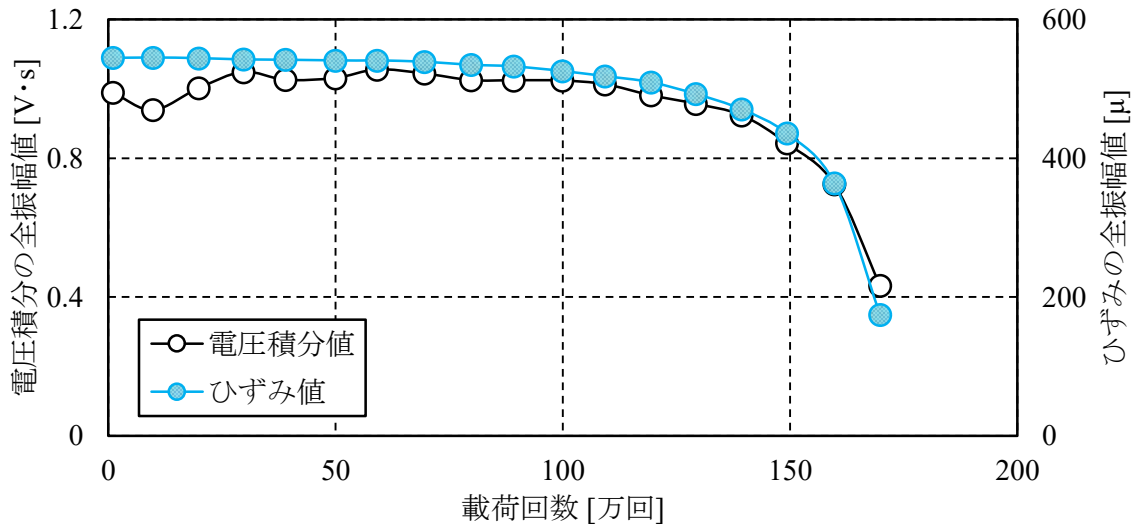


図 2-15 電圧積分の全振幅値およびひずみの全振幅値と载荷回数との関係<sup>2-1)</sup>

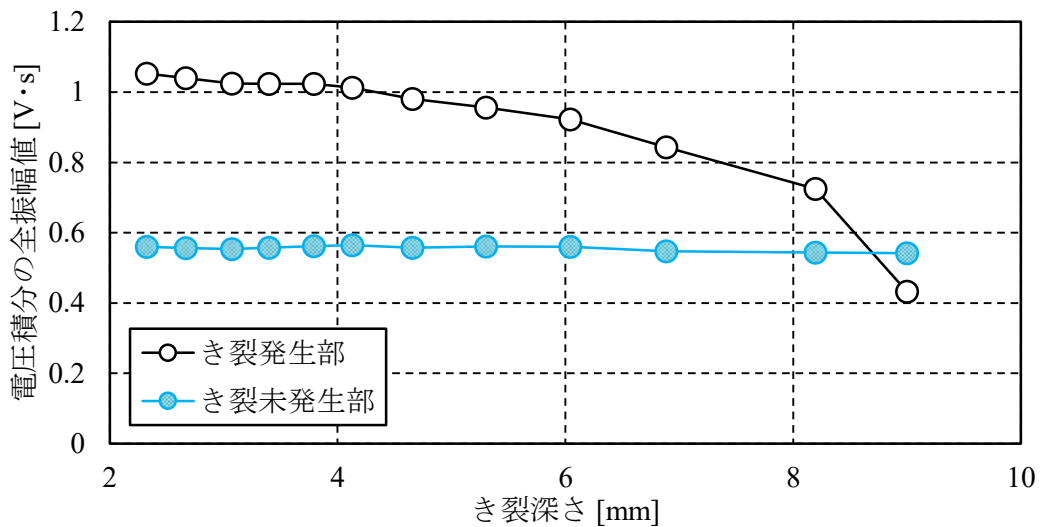


図 2-16 き裂発生部およびき裂未発生部の電圧積分の全振幅値とき裂深さとの関係<sup>2-1)</sup>

## 2-5. 引張試験片を用いた疲労試験に関する有限要素解析

本節では、疲労き裂の発生および進展に伴うひずみ応答の変化を確認するため、有限要素解析による分析を行った。また、圧電素子センサ内のひずみ積分値を解析的に算出し、圧電素子センサの出力との関係について分析した。

### 2-5-1. 解析概要

有限要素解析には、汎用有限要素解析ソフト ABAQUS6.14 を用いた。作成した解析モデルを図 2-17 に示す。解析モデルは、き裂を中心とした際、対称となることから 1/2 モデルを採用した。疲労き裂のモデルは、表 2-3 に示した実際のき裂寸法から作成し、その形状は半楕円形状とした。境界条件は、図 2-17 に示すように、対称面では対称条件として軸方向変位を固定した。載荷荷重に関しては、上縁に対し引張荷重を与え、その大きさは前述する実験値である振幅応力 120 MPa となるように設定した。各材料構成則は、弾性係数  $E$  を 205 GPa、ポアソン比  $\nu$  を 0.3 とした。

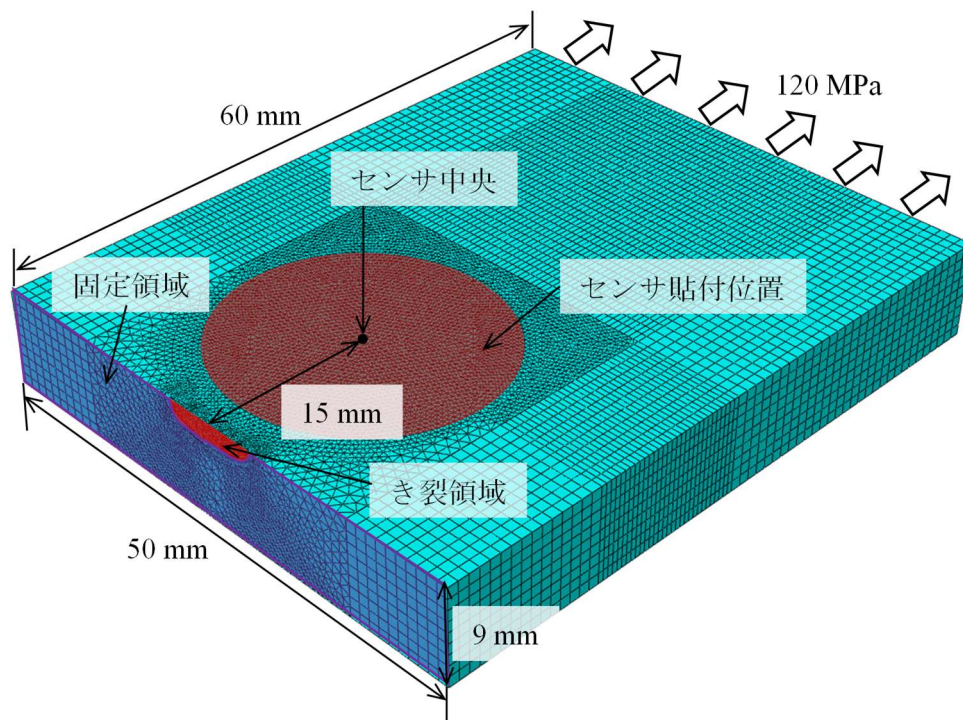


図 2-17 解析モデル



## 2-5-2. 解析結果

本解析は、はじめに図 2-17 に示すセンサ中央部のひずみ解析値を確認し、センサ中央のひずみにあたる S4 ひずみゲージ (図 2-12) との比較により、解析モデルの正当性を確認した。解析値および実験値に対するセンサ中央部のひずみ変化率とき裂深さの関係を図 2-18 に示す。疲労き裂が深くなるほど、実測値、解析値ともにひずみの値が低下しており、その変化は概ね一致している。このことから、本解析モデルは 2 章 4 節にて述べた実験を再現できており、モデルの正当性を確認した。

続いて、正当性を確認した解析モデルを用いて、圧電素子センサの出力とセンサ内のひずみとの関係を確認した。センサ貼付位置内のひずみを解析的に積分し、実測値である圧電素子センサの出力結果と比較する。ひずみの積分値の変化率および計測した電圧積分の全振幅値の変化率と、き裂深さの関係を図 2-19 に示す。センサ貼付位置内のひずみの積分値は、き裂の進展とともに低下していることが確認できる。また、実験値である圧電素子センサの変化率と良い一致を示している。以上の結果により、センサ貼付部のひずみ積分値と圧電素子センサの出力には関係性があることが示された。したがって、対象部位におけるひずみ分布の解析により、最適なセンサ形状やセンサ位置などの分析が可能になると考えられる。

今後は、有限要素解析により実橋梁モデルを作成し、対象部位におけるひずみ分布の解析結果から、最適なセンサ形状やセンサ位置を判断することが課題である。

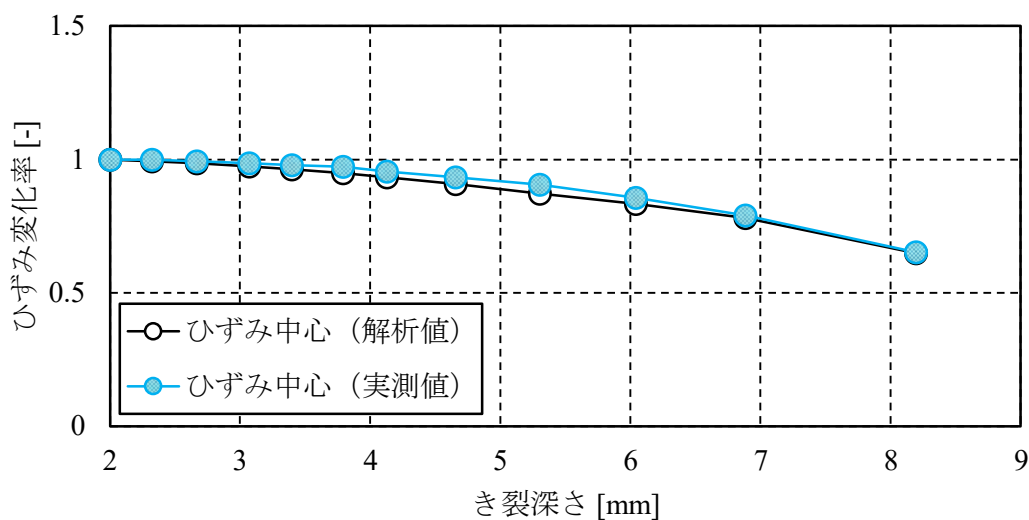


図 2-18 センサ中心部のひずみ解析値と実測値の比較

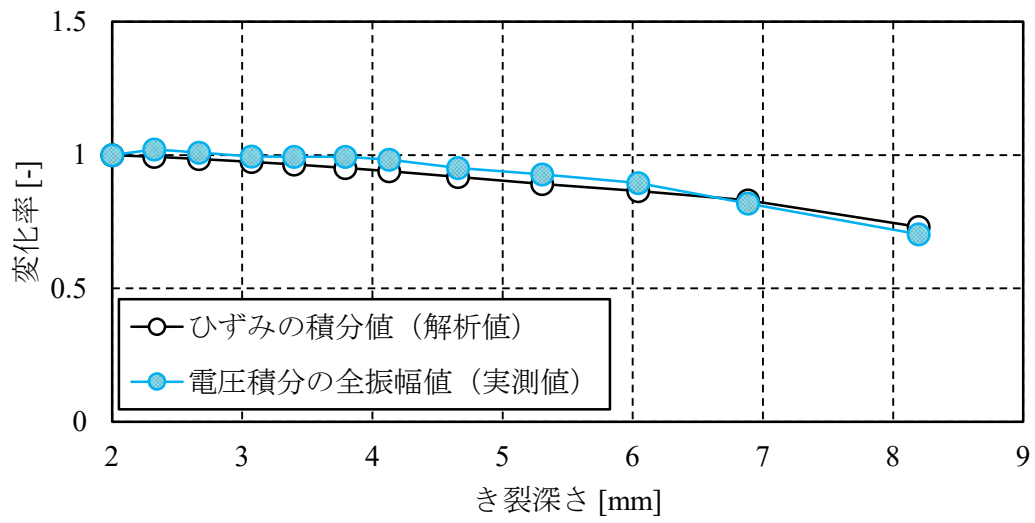


図 2-19 解析したひずみの積分値と実測した電圧積分の全振幅値との比較



## 2-6. 大型試験体を用いた疲労試験

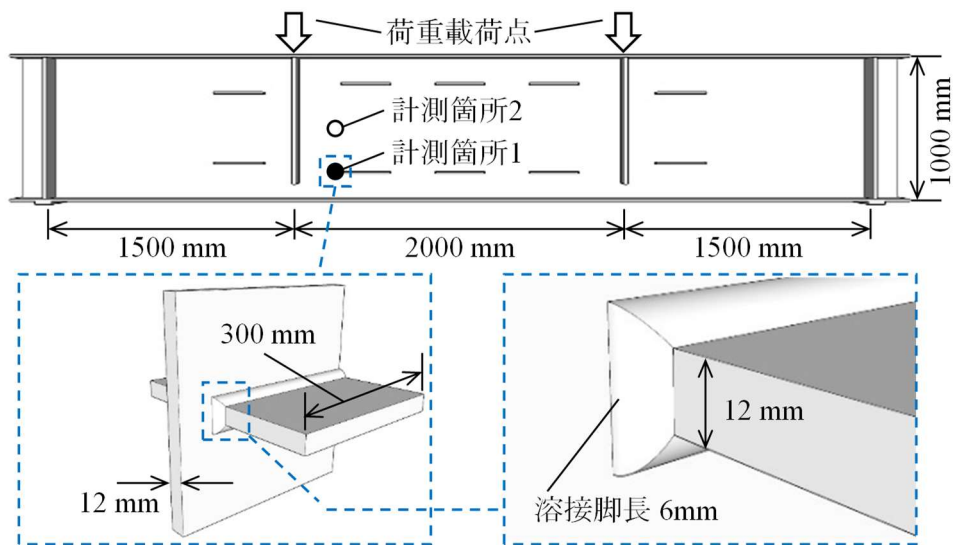
溶接止端部における圧電素子センサのモニタリングを目的とし、面外ガセットが付属した大型試験体による疲労試験を実施した。本節では、疲労き裂の発生および進展状況に基づき、圧電素子センサの出力結果を検証した。

### 2-6-1. 試験概要

作製した大型試験体の寸法を図 2-20 に示す。試験体は、支間長 5000 mm、桁高 1000 mm、上下フランジ幅 300 mm、ウェブ厚 12 mm、フランジ厚 16 mm とし、ウェブの両面には、幅 300 mm、厚さ 12 mm の面外ガセットを回し溶接にて取りつけた。溶接条件は、溶接脚長を 6 mm とし、グラインダー等の止端処理は行わない。

本試験は、それぞれの支点から 1500 mm 離れた垂直補剛材の上部を載荷位置とする 4 点曲げ載荷にて行った (図 2-20)。試験体に負荷した荷重値は、1 つの載荷点について上限荷重 700 kN、下限荷重 40 kN の振幅荷重 660 kN の正弦波とし、この時の繰り返し速度は 1.55 Hz とした。また、き裂の進展状況を確認することを目的とし、上述の載荷が 10 万回に達したごとに、ビーチマークを導入する作業を行った。その際は、1 つの載荷点について上限荷重 700 kN、下限荷重 370 kN の振幅荷重 330 kN とし、下限荷重のみを変更した。一連の試験については、疲労き裂が溶接止端から母材側に約 10 mm 程度、進展するまで行った。

上述の疲労試験中は、圧電素子センサとひずみゲージを用いて、モニタリングを行った。試験体の設置状況を図 2-21(a)に、計測箇所 1 における溶接ビード付近のセンサ設置状況を図 2-21(b)に、計測箇所 2 のセンサ設置状況を図 2-21(c)に示す。本論文では、センサの取り付け面を表面、その反対側の面を裏面とする。圧電素子センサは、丸型の圧電素子センサを面外ガセットの溶接ビードの近傍に設置した (計測箇所 1)。一方、疲労き裂が発生しない試験体のウェブ中央部 (計測箇所 2) にも、丸型の圧電素子センサを設置し、計測箇所 1 の圧電素子センサの応答との違いを確認する。それぞれの圧電素子センサの設置は、下地処理は行わず、市販の瞬間接着剤を用いて貼付を行った。ひずみゲージは、計測箇所 1 の溶接ビード上の上部・中央部・下部の 3 箇所、一軸ひずみゲージを設置した (図 2-21(b))。貼付の際は、ゲージ先端がビード止端と一致するように調整し、上部と下部のひずみゲージは、ガセット角部を起点として 45 度、中央部のひずみゲージは水平とした。これらの圧電素子センサ・ひずみゲージのサンプリング周波数は 2000 Hz とし、疲労試験開始から疲労試験終了まで断続して計測した。



○ 圧電素子センサ ● 圧電素子センサ+ひずみゲージ

図 2-20 大型試験体寸法<sup>2-1)</sup>



(a) 試験体設置状況



(b) 計測箇所1

(c) 計測箇所2

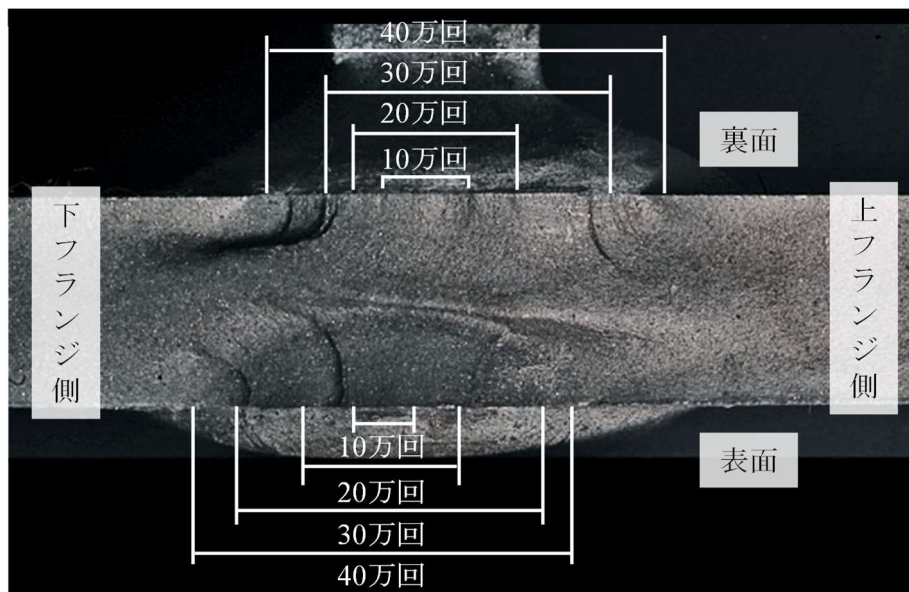
図 2-21 センサの設置状況と試験状況<sup>2-1)</sup>

## 2-6-2. 試験結果

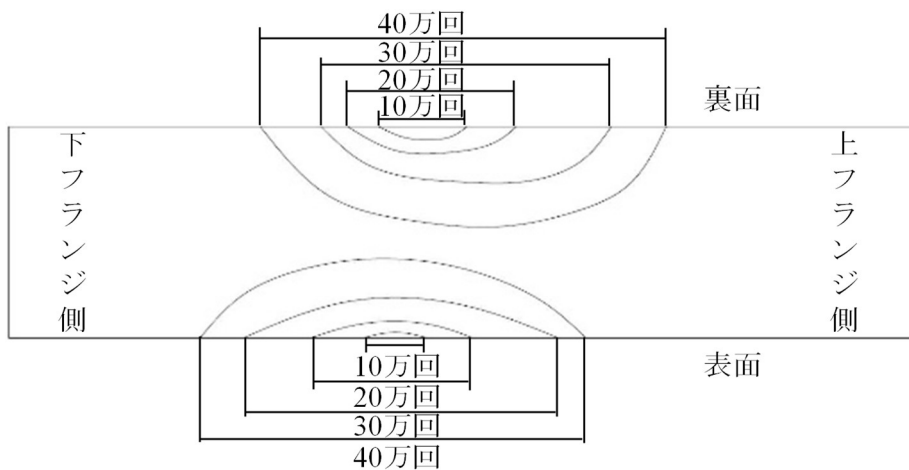
はじめに、疲労き裂の発生および進展状況を確認するため、破面の観察を行った。破断面写真を図 2-22(a)に、ビーチマークのスケッチを図 2-22(b)に示す。また、ビーチマークから読み取った、き裂幅とき裂深さを表 2-4 に示す。図 2-22 の数値は、正規载荷の回数を示しており、ビーチマーク载荷を除いた回数である。図 2-22(b)より、表側・裏側ともに、正規载荷 10 万回までにき裂が発生したことが示されている。また、両側の溶接止端から発生した疲労き裂は、半楕円状に板幅・板厚方向へ進展し、特に板厚方向に進展したき裂は、ウェブ厚の中央付近にて、両側の疲労き裂が接触して貫通に至った。この時の载荷回数は、正規载荷 40 万回から 50 万回までの間である。

続いて、き裂発生部（計測箇所 1）における圧電素子センサを用いて計測した電圧積分の全振幅値と、き裂未発生部（計測箇所 2）における圧電素子センサを用いて計測した電圧積分の全振幅値の関係を図 2-23 に示す。横軸は、表 2-4 に示した表面のき裂深さとした。図 2-23 より、き裂が発生した計測箇所 1 では、電圧積分の全振幅値が徐々に低下していることを確認できる。一方、き裂が発生しない計測箇所 2 では、ほぼ一定の値を示した。以上の結果より、溶接止端部においても疲労き裂の発生および進展を圧電素子センサにて検知できることを確認した。

最後に、圧電素子センサとひずみゲージによる疲労き裂の検出性能を比較するため、計測箇所 1 における圧電素子センサの電圧積分の全振幅値と、溶接ビードの中央部におけるひずみ応答の全振幅値との関係を図 2-24 に示す。横軸は図 2-23 と同様に、き裂深さとした。図 2-24 より、電圧積分の全振幅値は、ひずみ応答の全振幅値と同様の減少を示している。以上の結果より、圧電素子センサは、疲労き裂の発生および進展をひずみゲージと同等の精度にて検知できることが確認された。



(a) 破断面写真



(b) ビーチマークスケッチ

図 2-22 計測箇所 1 における破面状況

表 2-4 き裂形状の寸法<sup>2-1)</sup>

表面			裏面		
载荷回数 [万回]	き裂幅 [mm]	き裂深さ [mm]	载荷回数 [万回]	き裂幅 [mm]	き裂深さ [mm]
10	3.56	0.30	10	5.09	0.75
20	9.06	0.93	20	9.65	1.56
30	17.7	2.27	30	16.5	3.22
40	21.8	4.48	40	23.0	5.71

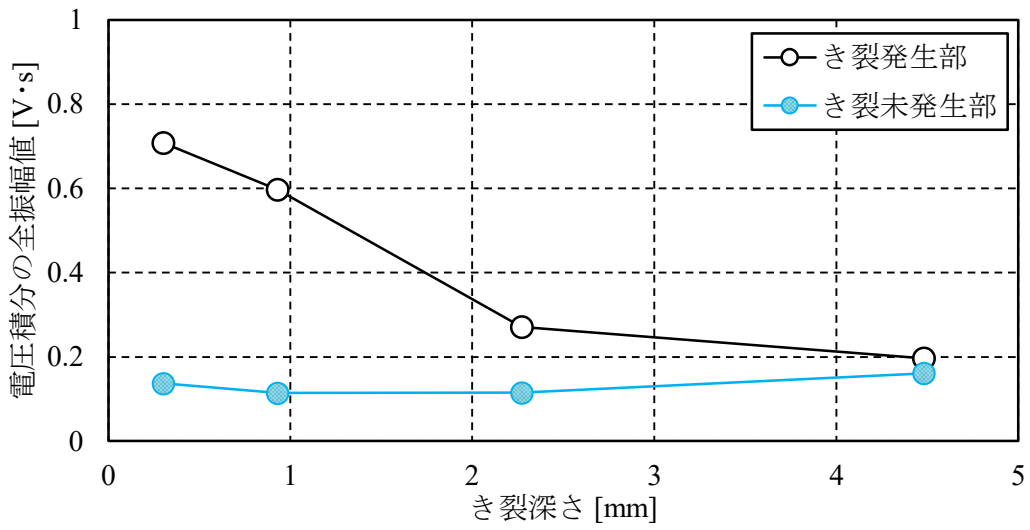


図 2-23 き裂発生部およびき裂未発生部の電圧積分の全振幅値の変化<sup>2-1)</sup>

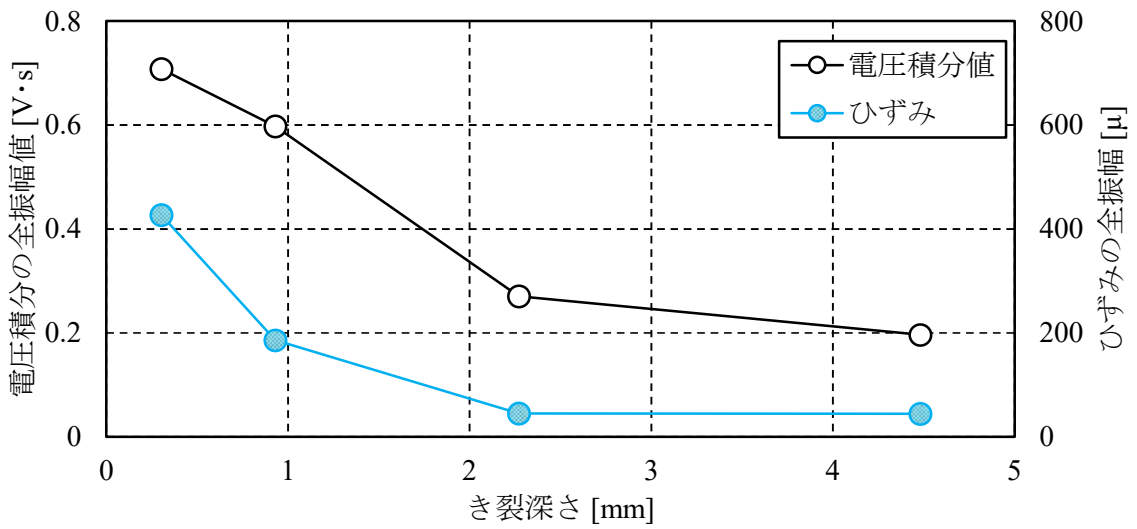


図 2-24 電圧積分の全振幅値とひずみの全振幅値の比較<sup>2-1)</sup>

## 2-7. 総括

本章は、圧電素子センサを用いた疲労き裂の検知を目的とし、基礎的な試験を実施した。以下に、得られた知見を示す。

- a) 圧電素子センサに対し、様々な載荷荷重と載荷速度を与え、ひずみ応答と比較した。その結果、圧電素子センサは、載荷荷重と載荷速度ともに、比例の関係があることを確認した。
- b) 圧電素子センサの出力電圧は、ひずみ変化率に依存すると仮定し、電圧を積分した電圧積分値とひずみ応答を比較した。その結果、載荷速度 1 Hz 以下において電圧積分値は、載荷速度に依存せず、ひずみの大きさのみに依存することが確認された。
- c) 実橋梁において、圧電素子センサの適用が可能かを検証するため、鋼桁橋における活荷重の応答に対し周波数分析を行った。面外ガセットの溶接止端部における、ひずみ計測結果より、1 Hz 以下が疲労損傷に起因する、主な周波数成分であることを確認し、圧電素子センサを実橋梁下に活用できる可能性を示した。
- d) 引張試験片を用いた疲労試験を実施し、圧電素子センサにより、疲労き裂の発生および進展の検知が可能であることを示した。
- e) 有限要素解析を用いて、圧電素子センサ内のひずみの積分値を算出し、センサ出力と依存関係にあることを示した。
- f) 面外ガセットを溶接にて取り付けられた大型試験体による疲労試験を行い、その試験を通して、圧電素子センサにより、溶接止端部から生じる疲労き裂の発生および進展の検知が可能であることを示した。

## 参考文献

- 2-1) Shogo Morichika, Hidehiko Sekiya, Osamu Maruyama, Shuichi Hirano and Chitoshi Miki: Fatigue crack detection using a piezoelectric ceramic sensor, *Welding in the World*, 64, pp. 141-149, 2019.
- 2-2) Jayant Sirohi and Inderjit Chopra: Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, pp.246-257, 2000.
- 2-3) 岡崎清：第3版セラミック誘電工学，学献社，319-323，1983.
- 2-4) 関屋英彦，横関耕一，木村健太郎，小西拓洋，三木千壽：橋梁の加速度記録を用いた変位応答算出法の提案，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.72，No.1, pp. 61-74, 2016.
- 2-5) 山田健太郎，Ya Samol：U リブすみ肉溶接のルートき裂を対象とした板曲げ疲労試験，構造工学論文集 Vol.54A, pp. 675-684, 2008.

# 第3章 圧電素子センサの現場適用に向けた 基礎的な検討

## 3-1. 概説

本章は、2章にて検討した圧電素子センサによる疲労損傷の検知を実橋梁に適用することを目的とし、モニタリングシステムの構築および実証実験を行った。まず、2節にて、圧電素子センサとMEMS加速度センサを用いた疲労き裂のモニタリングシステムを提案し、外力が変動する実橋梁においても適用可能な手法を構築する。続いて、3節においては、外力同定を目的としたMEMS加速度センサによる変位計測手法について検討する。最後の4節においては、2節にて提案したシステムの運用が可能であるかを検証するため、供用下の橋梁において実証試験を行った。



## 3-2. 現場への適用を目的としたモニタリングシステムの概要

提案するモニタリングシステムのデータ処理に関する手順を図 3-1 に示す。本システムは、(1) 外力の応答を計測するパートと、(2) 疲労き裂の発生および進展によるひずみ応答の変化を検知するパートの 2 つから構成されている。

(1) 外力の応答を計測するパートでは、橋梁の変位応答から、外力の大きさを把握する。以下にその手順を説明する。

- a) MEMS 加速度センサによる加速度記録から最適な積分範囲を決定する(詳細については、3 章 3 節にて述べる)。
- b) MEMS 加速度センサによる変位算出手法として、自由振動仮定法<sup>3-1)</sup>を活用し、加速度記録から変位応答を算出する。
- c) 外力の大きさを評価する指標として、b) にて算出した変位応答を、積分区間にて足し合わせ、変位応答の総和  $S_d$  を算定する。

一方、(2) 疲労き裂の発生および進展によるひずみ応答の変化を検知するパートは、圧電素子センサによりひずみ応答の変化を把握する。以下にその手順を説明する。

- d) 圧電素子センサを用いて電圧を計測する。
- e) 前章にて述べたように、計測した電圧を一階積分し、電圧積分値を算出する。ただし、a)にて特定した積分区間に基づいて積分を行う。
- f) ひずみ応答の変化を評価する指標として、e) にて算出した電圧積分値を、積分区間にて足し合わせ、電圧積分値の総和  $S_v$  を算定する。

本手法では、c) および f) にて算定したそれぞれの指標に基づき、疲労き裂の発生および進展の判定を行う。判定には、次式で表される変位応答の総和と電圧積分値の総和との比  $R$  を用いた。

$$R = S_v/S_d \quad (3-1)$$

ここで、 $S_d$  は変位応答の総和、 $S_v$  は電圧積分値の総和である。 $S_d$  の値は、活荷重のみに依存した指標である。一方、 $S_v$  の値は、圧電素子センサが監視する電圧積分値に依存し、ひずみ応答の変化に関係する値である。つまり、疲労損傷が発生した場合に生じるひずみ応答の変化および活荷重によるひずみ応答の変化に依存する指標である。したがって、評価値  $R$  は、活荷重によるひずみ変動のみの場合は一定、疲労損傷によるひずみ変動が含まれる場合は低下するものと考えられる。以上から、本システムは、ランダムな外力が作用する実橋梁においても疲労き裂の発生および進展の検知が可能となると考えられる。

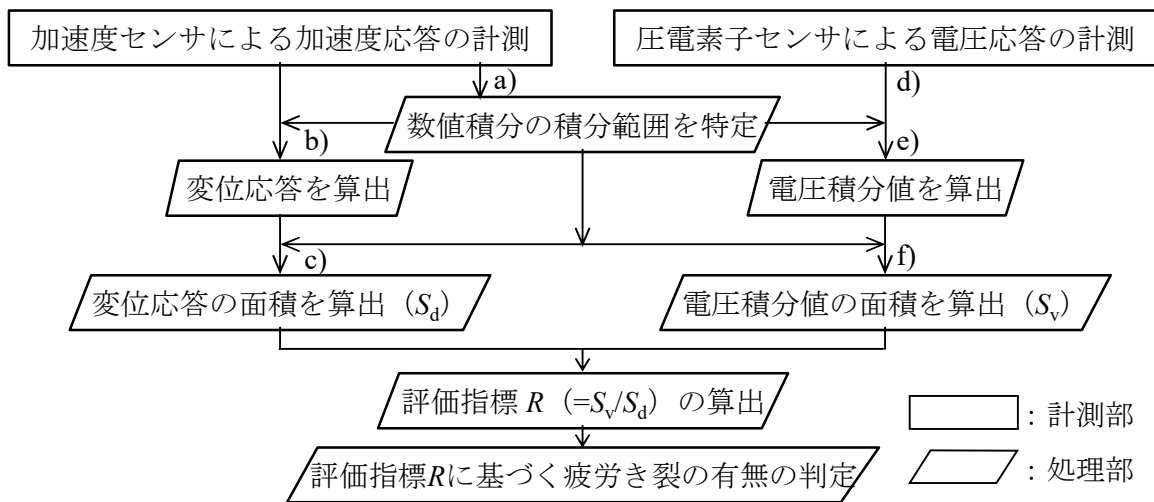


図 3-1 センサを用いたモニタリングシステム

### 3-3. MEMS 加速度センサを用いた変位算出

これまでの橋梁における変位計測では、接触式変位計やレーザー変位計などが用いられてきたが、不動点を確保する必要があることから、これらの計測機器を使用できる橋梁は限られる。このため、近年では橋梁下の空間を確保できない場合でも計測可能な MEMS 加速度センサによる変位計測が提案されている。これまで関屋ら<sup>3-1)</sup>は、MEMS 加速度センサを用いて計測した加速度記録から変位応答を算出する自由振動仮定法を提案し、精度よく変位を算出できることを示している。しかし、自由振動仮定法による変位の算出には、積分範囲を決める必要があり、その積分範囲は変位算出の精度に対し、大きな影響を与えることが指摘されている<sup>3-2)</sup>。そこで本節では、(i) これまでの手法である橋梁の両端に設置した車両検知用センサを用いた積分範囲の決定手法、(ii) 橋軸中央部にて計測した加速度応答の高周波数帯成分による積分範囲の決定手法、(iii) 橋軸中央部にて計測した加速度応答の低周波数帯成分による積分範囲の決定手法の3通りにより、変位応答を算出し、その精度について検証した。

#### 3-3-1. 試験概要

本節は、積分範囲の違いが変位の算出精度に与える影響を確認するために、供用下の橋梁において現場計測を実施した。試験橋梁の平面図および断面図と、センサの設置位置を図 3-2 に示す。また、使用した MEMS 加速度センサと MEMS 慣性センサの性能特性を表 3-1 に示す。試験橋梁は、単支間 RC 床版合成 5 主桁プレートガーター橋の支間長 38 m であり、道路構成は路肩・第一走行・第二走行・第三走行となっている。

本試験では、変位応答の計測を目的とした MEMS 加速度センサと、車両検知を目的とした MEMS 慣性センサを橋梁下部に設置した。変位計測部におけるセンサ設置状況を図 3-3(a)に、車両検知部におけるセンサの設置状況を図 3-3(b)に示す。図 3-3(a)に示すように、変位計測部では、橋軸中央部の G3 桁の下フランジに MEMS 加速度センサを設置した。また、加速度記録から算出した変位応答の精度を確認するため、接触式変位計を MEMS 加速度センサの直下に設置した。それぞれのサンプリング周波数は、MEMS 加速度センサを 1000 Hz、接触式変位計を 100 Hz に設定した。車両検知部は、G1 桁を除く G2 桁から G5 桁までの進入側と退出側（図 3-3(b)）にある端補剛材の上端部に、MEMS 慣性センサを設置した。MEMS 慣性センサのサンプリング周波数は、500 Hz に設定した。

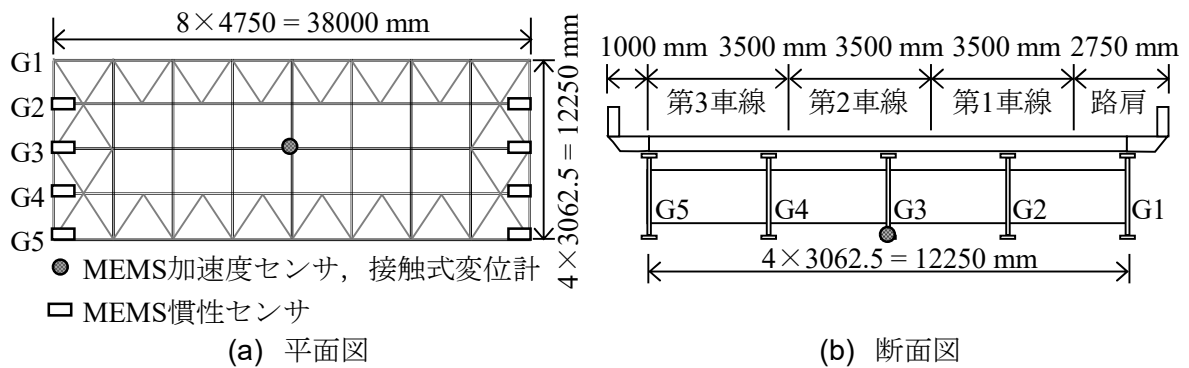


図 3-2 試験橋梁の概要とセンサの設置位置<sup>3-3)</sup>

表 3-1 MEMS センサの性能<sup>3-3)</sup>

センサタイプ	計測範囲 ( $m/s^2$ )	分解能 ( $(\mu m/s^2)/LSB$ )	帯域幅 (Hz)	ノイズ密度 ( $(\mu m/s^2)/\sqrt{Hz}$ , rms)
MEMS 慣性センサ	$\pm 49.0$	1961	200(-3dB)	1961
MEMS 加速度センサ	$\pm 147.1$	0.59	460(-6dB)	1.96



図 3-3 センサの設置状況<sup>3-3)</sup>

### 3-3-2. 積分範囲による算出精度の違い

本項では、積分範囲を 3 つの方法から決定し、積分範囲が変位応答の算出に与える影響を確認した。精度検証に用いた加速度応答を図 3-4 に示す。図 3-4 は、一般車両が橋梁を通過した際の橋軸中央部における加速度応答の結果である。

はじめに、(i) 橋梁両端部の車両検知から決定する手法を検討した。積分範囲の決定手順と変位算出手順を図 3-5 に示し、以下に説明を箇条書きにてまとめた。

- i-a) 橋軸中央部に設置した MEMS 加速度センサと端補剛材に設置した MEMS 慣性センサを用いて、車両が橋梁を通過した際の加速度応答を計測する。
- i-b) MEMS 慣性センサによる進入側・退出側の加速度応答をもとに、通過車両の進入時間と退出時間を推定する。
- i-c) 推定した車両の通過時間を数値積分の範囲とする。

i-d) 自由振動仮定法<sup>3-1)</sup>を用いて、変位応答を算出する。

検証対象の車両が通過した際の両桁端部における加速度応答を図 3-6 に示す。図 3-6 より、三軸の車両が 1.192 秒に進入し、3.142 秒に退出したことが確認できる。以上の計測結果より、積分範囲を 1.192 秒から 3.142 秒までとし、自由振動仮定法により図 3-4 に示す加速度応答を積分した。加速度応答から算出した変位応答と接触式変位計を用いて計測した変位応答を図 3-7 に示す。図 3-7 より、加速度応答から算出した変位応答は、接触式変位計の変位応答よりも小さく算出された。これは、車両が試験橋梁の前後を走行した際に与える試験橋梁への影響を、本手法では把握できないことが要因だと考えられる。

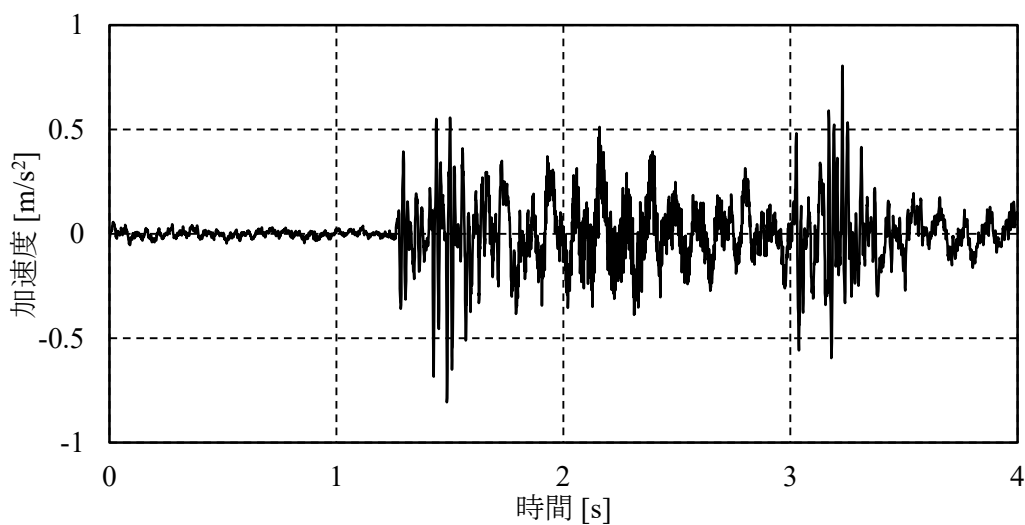


図 3-4 橋軸中央部に設置した MEMS 加速度センサによる加速度応答<sup>3-3)</sup>

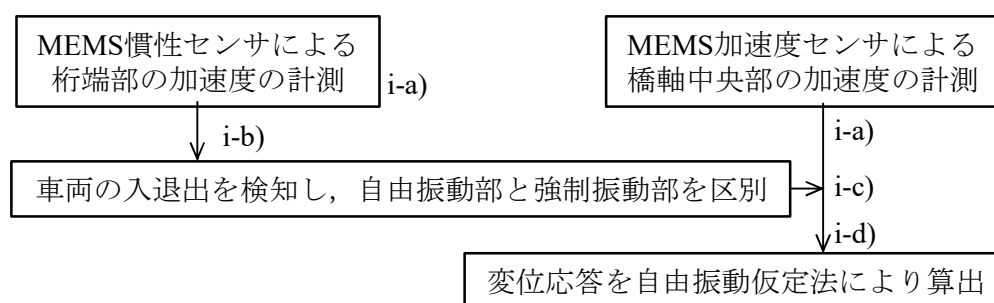


図 3-5 橋梁両端部の車両検知から変位応答を算出する手法

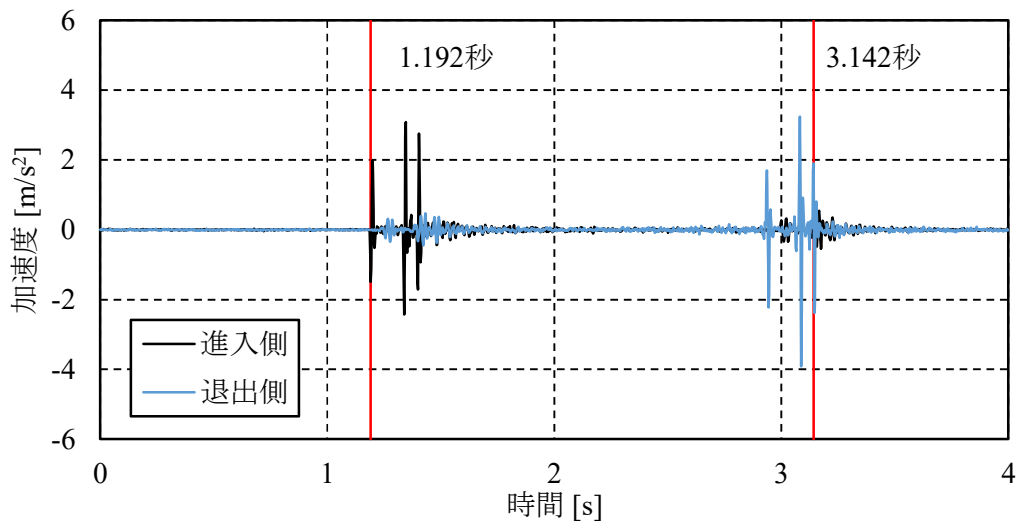


図 3-6 橋梁両端に設置した MEMS 慣性センサによる車両検知の結果<sup>3-3)</sup>

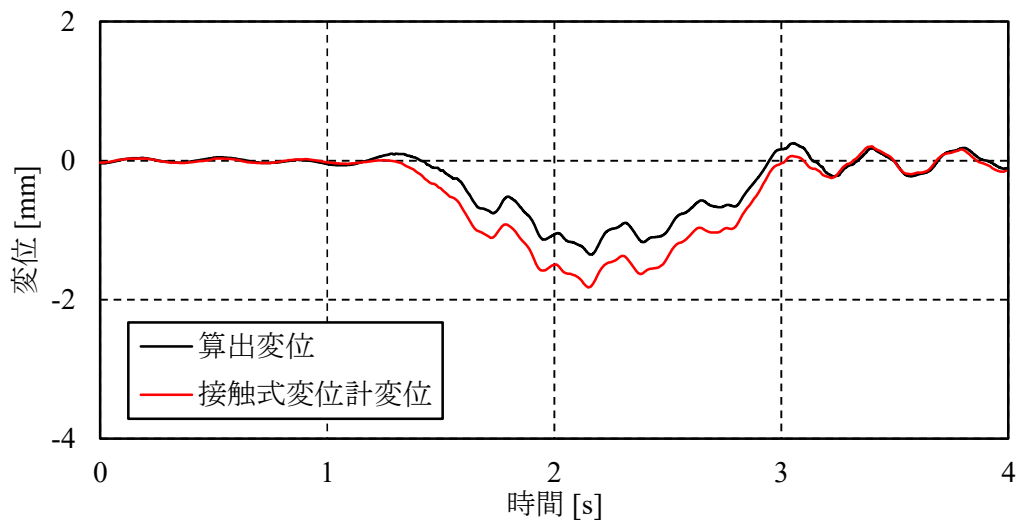


図 3-7 車両検知センサにて決定した積分範囲による変位算出結果

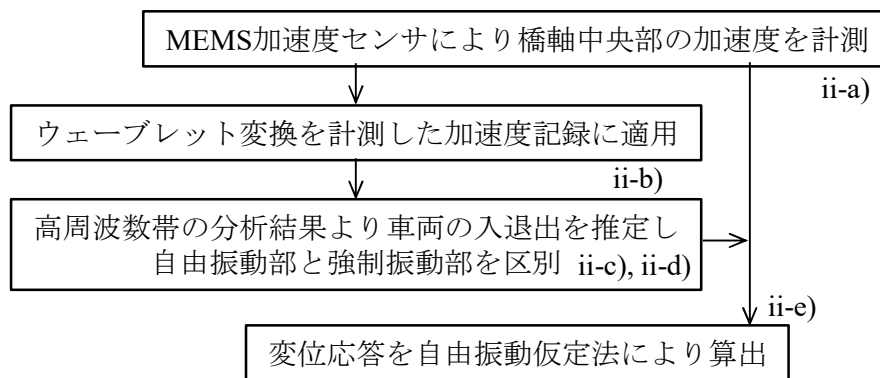


図 3-8 橋軸中央部に設置した加速度応答の高周波数帯成分から決定する変位算出手法

続いて、(ii) 橋軸中央部にて計測した加速度応答の高周波数帯成分から決定する手法を検討した。本手法は、参考文献 3-3) の内容に基づいて記載する。高周波数帯による積分範囲の決定手順を図 3-8 に示し、以下に説明を箇条書きにてまとめた。

- ii-a) 橋軸中央部に MEMS 加速度センサを設置し、加速度応答を計測する。
- ii-b) 計測した加速度応答に対し、ウェーブレット変換による周波数分析を行う。
- ii-c) 分析結果から、車両が進入・退出した際の橋梁振動を抽出する。
- ii-d) 抽出した加速度応答から、車両が進入・退出した時間を推定し、その時間間隔を数値積分の対象範囲とする。
- ii-e) 自由振動仮定法を用いて、変位応答を算出する。

本手法は、橋軸中央部に設置した MEMS 加速度センサの加速度記録から、車両の入退出を検知する方法であるため、両端部に設置した慣性センサが不要となり、施工性の向上が期待される。これまで、Yang Yu<sup>3-4)</sup>らが提案した橋軸中央部におけるひずみ応答から車両検知を行う手法では、ウェーブレット変換を活用することにより、車両の入退出の検知が可能であることを示している。これはひずみ応答に加え、加速度応答に対しても、有効であると考えられることから、本手法においてもウェーブレット変換を採用した。

ウェーブレット変換は、時間情報を保持したまま周波数領域にて時系列データを分析する方法であり、 $x(t)$ の時間領域におけるウェーブレット $\Psi_{\beta, \gamma}(t)$ は、次式のように表される。

$$\omega_{\beta, \gamma}(\tau, s) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{s} \Psi_{\beta, \gamma}^* \left( \frac{t-\tau}{s} \right) x(t) dt \quad (3-2)$$

ここで、アスタリスクは複素共役、 $\tau$ は時間のオフセット、 $s$ はスケールパラメータ、 $\beta$ は低周波数帯の動作を制御するパラメータ、 $\gamma$ は高周波数帯の減衰を制御するパラメータである<sup>3-5), 3-6)</sup>。本分析では、一般化 Morse ウェーブレットを MATLAB Toolbox<sup>3-7)</sup>にて実行した。

本ウェーブレット変換は、解析パラメータ $\gamma$ と $\beta$ を設定する必要がある。Morse ウェーブレットを可能な限り対称にするため、パラメータ $\gamma$ は3に設定した<sup>3-6)</sup>。また、車軸の入退出による加速度応答を明確にするため、試行錯誤により解析パラメータ $\beta$ を5に設定した。まず、図 3-6 に示す車両進入側の加速度応答に対し、ウェーブレット変換を適用した結果を図 3-9(a)と図 3-9(b)に示す。図 3-9(b)より、図 3-6 にて示した車軸通過時の応答成分が高周波数帯を中心にあることを確認できる。

続いて、上述の設定によるウェーブレット変換を図 3-4 に示す加速度応答に適用した結果を図 3-10(a)と図 3-10(b)に示す。図 3-10(b)より、図 3-9(b)にて確認した車軸通過時の応答と同様の成分を確認でき、その応答は約 50 Hz を中心として分布してい

る. このことから, 本検討では図 3-10(b)に示した 50 Hz の応答を抽出し, 積分範囲を決定した. 50 Hz における加速度振幅の時刻歴応答を図 3-11 に示す. 図 3-11 より, 進入・退出時の応答を確認でき, そのピークから 1.293 秒から 3.234 秒までを積分範囲とした. 決定した積分範囲から自由振動仮定法により図 3-4 に示す加速度応答を積分した. 加速度応答から算出した変位応答と接触式変位計を用いて計測した変位応答を図 3-12 に示す. 図 3-12 より, 加速度応答から算出した変位応答は, 接触式変位計の変位応答より小さく算出された. これは, 橋梁両端部の車両検知から決定する手法と同様, 車両が試験橋梁を通過する前後に, 橋脚を介して試験橋梁に影響を与えているためだと考えられる.

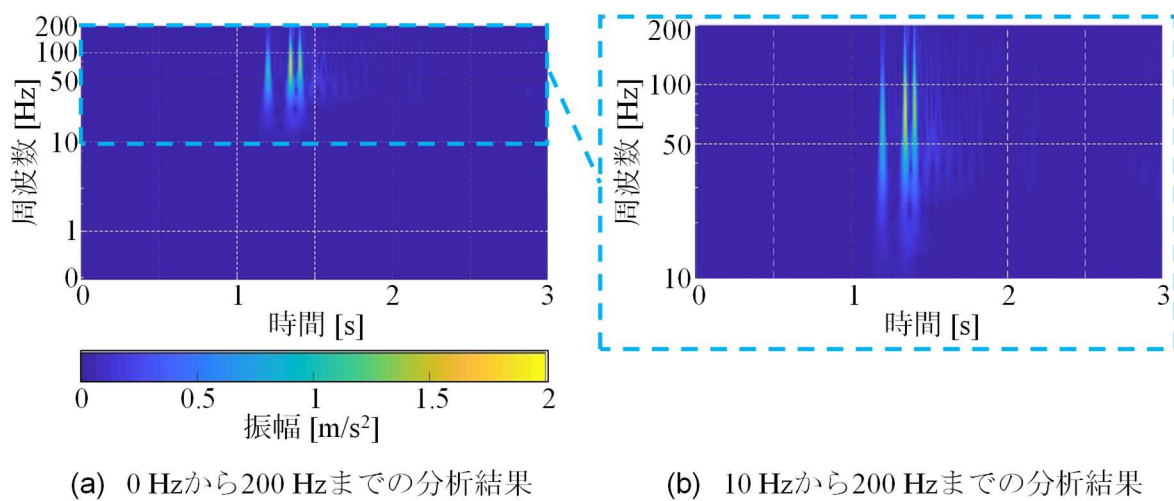


図 3-9 車両検知（進入側）における周波数解析結果<sup>3-3)</sup>

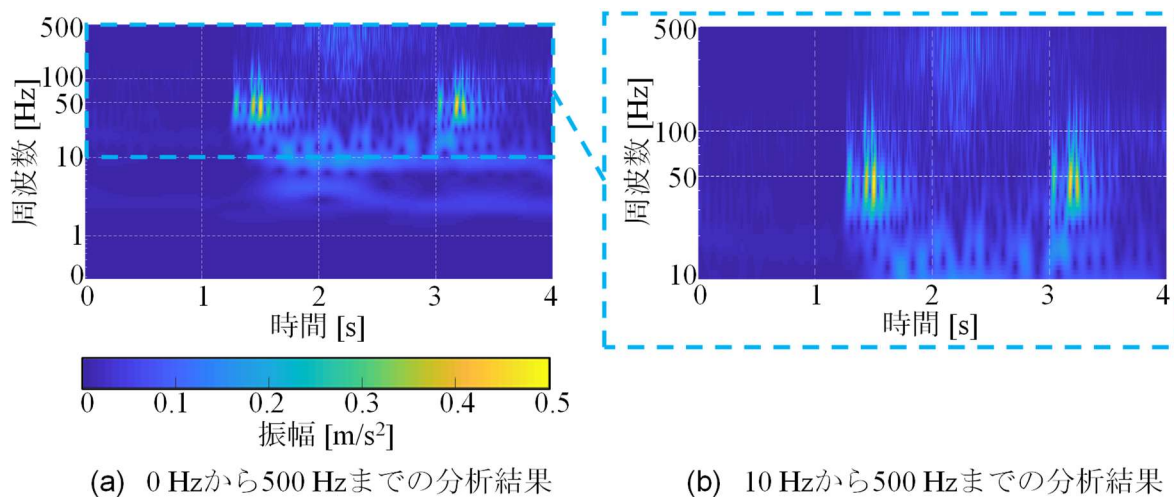


図 3-10 橋軸中央部における周波数解析結果<sup>3-3)</sup>



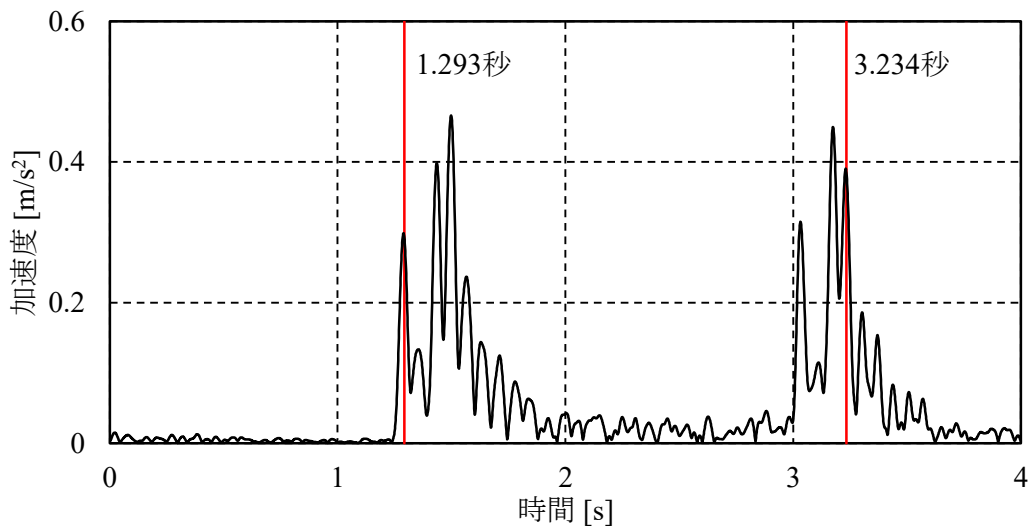


図 3-11 橋軸中央部にて計測した 50 Hz 成分の加速度応答<sup>3-3)</sup>

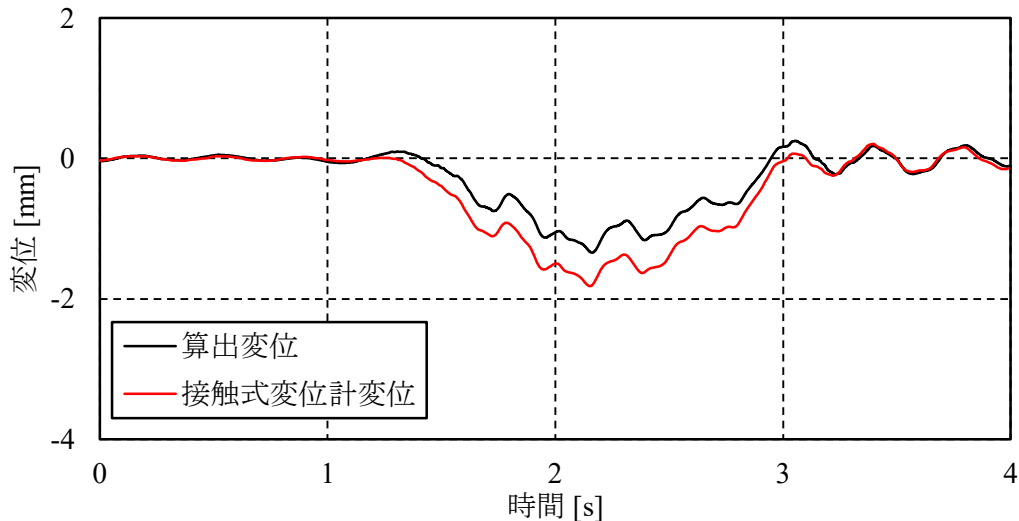


図 3-12 橋軸中央部の加速度応答の高周波数帯にて決定した積分範囲による変位算出結果

最後に、(iii) 橋軸中央部にて計測した加速度応答の低周波数帯成分から決定する手法を検討した。本手法は、これまでの(i)および(ii)の手法にて確認された、車両が隣接橋梁を走行した際に生じる、対象橋梁への影響を考慮することを目的とした方法である。支間長 30 m から 60 m までの橋梁の場合、橋梁の自由振動の周波数応答は、約 2 Hz 程度、車両重量による橋梁のたわみ成分は、1 Hz 以下となる<sup>2-4)</sup>。これを参考に、1 Hz 以下の低周波数帯の応答を抽出し、車両通過による影響範囲を推定した。

車両 1 台が橋梁を走行した場合の車両重量のみによる橋梁のたわみ成分を人為的に作成した結果について、図 3-13(a)に示す。また、図 3-13(a)の変位応答を二階微分することにより得られる加速度記録を図 3-13(b)に示す。図 3-13(b)より、走行車両による影響範囲を特定できる可能性を確認した。

続いて、低周波数帯による積分範囲の決定手順を図 3-14 に示し、以下に説明を簡条書きにてまとめた。

- iii-a) 橋軸中央部に MEMS 加速度センサを設置し、加速度応答を計測する。
- iii-b) 記録した加速度応答に対し、1 Hz 以下のローパスフィルタを施す。
- iii-c) ローパスフィルタを施した加速度記録から、車両の通過によるたわみ成分を抽出し、積分範囲を決定する。
- iii-d) 自由振動仮定法を用いて、変位応答を算出する。

本手順に基づいて、図 3-4 に対し 1.0 Hz のローパスフィルタ処理を施した結果を図 3-15 に示す。図 3-15 より、図 3-13(b)に示した同様の形状を確認でき、その積分範囲は 0.895 秒から 3.636 秒までと判断した。決定した積分範囲から自由振動仮定法により図 3-4 に示す加速度応答を積分した。加速度応答から算出した変位応答と接触式変位計を用いて計測した変位応答を図 3-16 に示す。図 3-16 より、加速度応答から算出した変位応答は、接触式変位計の変位応答と良い一致を示した。以上より、変位算出、電圧積分値、変位応答の総和および電圧積分値の総和に用いる積分範囲は、(iii) 橋軸中央部にて計測した加速度応答の低周波数帯成分から決定する手法を採用した。

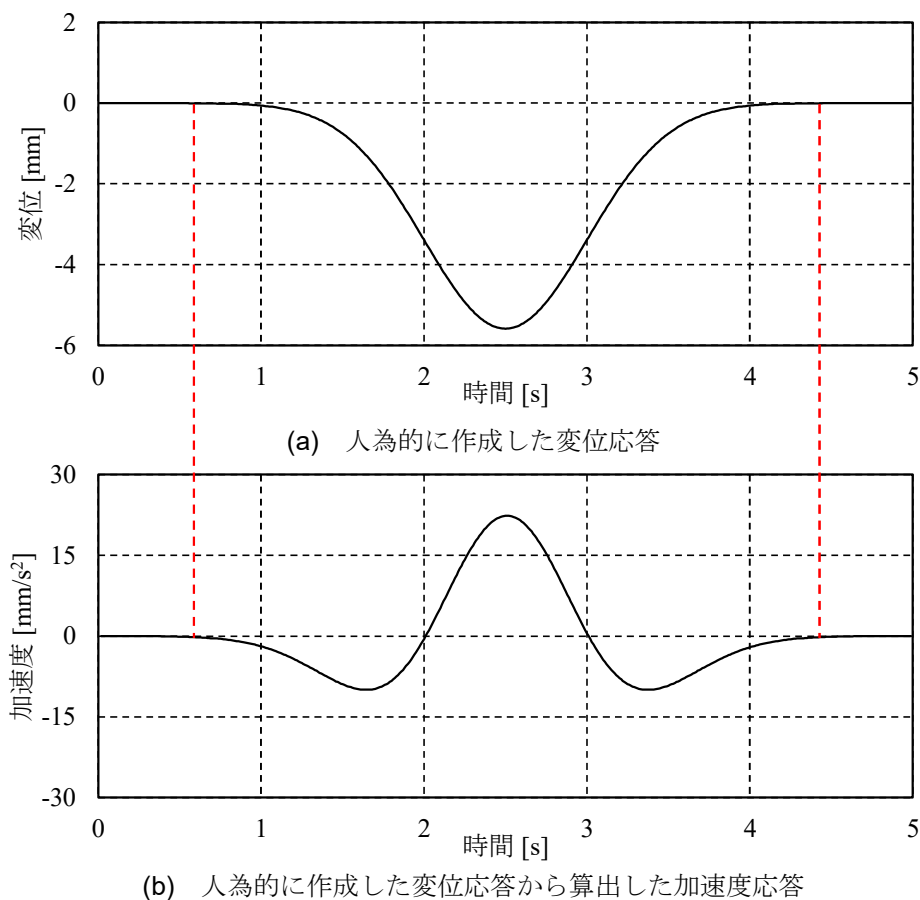


図 3-13 車両重量のみによる橋梁の変位応答と加速度応答の関係



### 3-4. 現場計測による疲労き裂モニタリングシステムの検証

#### 3-4-1. 試験概要

3章2節にて提案した疲労き裂に対するモニタリングシステムの実用性を検証するため、前節の現場計測とは別日に、供用下の橋梁において計測を行った。試験橋梁は、**図 3-2** に示した橋梁と同一である。

計測を行った位置を**図 3-17(a)**に示す。また、外力の大きさを計測すること目的とし、G5 桁の下フランジに設置した MEMS 加速度センサと接触式変位計の配置状況を**図 3-17(b)**に、ひずみ応答の変化を計測することを目的とする圧電素子センサとひずみゲージの設置状況を**図 3-17(c)**に示す。外力の大きさを計測する箇所では、活荷重による変位を MEMS 加速度センサにて計測する。また、MEMS 加速度センサにて算出した変位応答の精度検証用として、接触式変位計を設置した。MEMS 加速度センサおよび接触式変位計のサンプリング周波数に関しては、各々100Hz に設定した。

一方、面外ガセットの回し溶接の近傍には、疲労き裂モニタリング用の圧電素子センサを設置した。使用した圧電素子センサについては、前章にて用いた圧電素子センサと同一のものをを用いた (**表 2-1**)。また、圧電素子センサを用いて得られた応答と、実際に生じているひずみ応答との関係を検証するため、圧電素子センサの外周3か所に、3軸ひずみゲージを設置した。圧電素子センサおよび、ひずみゲージのサンプリング周波数については、各々100Hz とした。

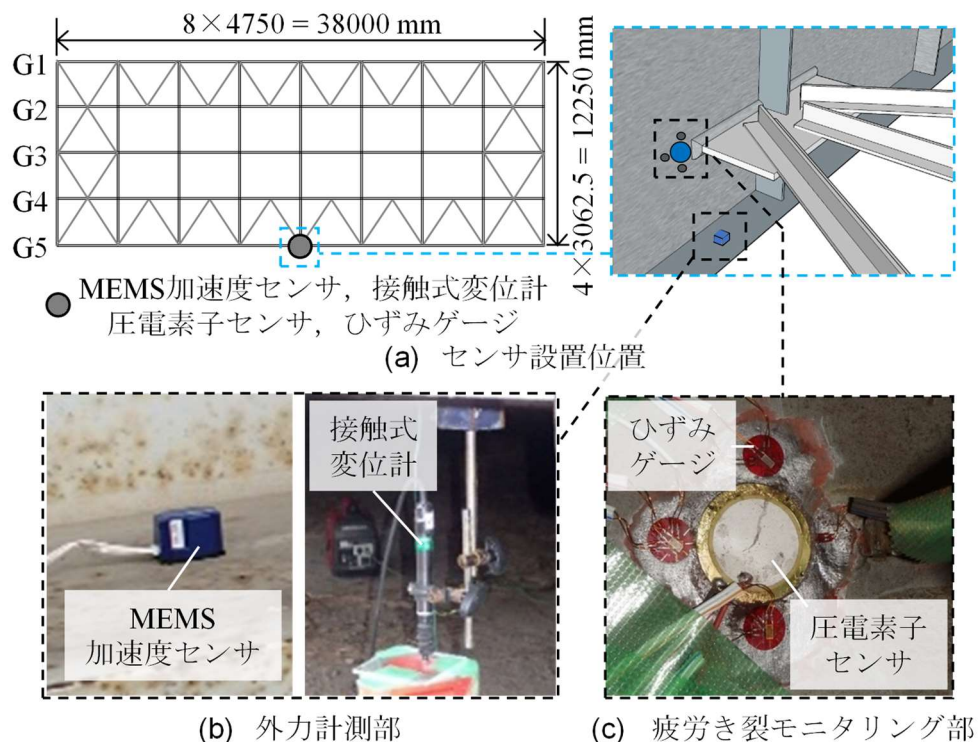


図 3-17 センサ設置位置と設置状況

### 3-4-2. MEMS 加速度センサを用いたモニタリング結果

3章3節2項にて検証した加速度応答の低周波数帯成分による積分範囲を用いて変位応答を算出した。本検討では、車両1台が橋梁上を走行したと考えられるデータを用いた。加速度応答に対し、1.0Hzのローパスフィルタ処理を施した結果を図3-18に示す。図3-18より、積分範囲は2.43秒から5.38秒までと特定できることから、その範囲を積分範囲として、変位応答を算出した。加速度記録から算出した変位応答を図3-19に示す。図3-19には、加速度記録から算出した変位応答の精度検証用として、接触式変位計を用いて計測した変位応答も示している。図3-19より、低周波数帯の加速度応答から決定した積分範囲に基づく変位応答は、接触式変位計を用いて計測した変位応答と良い一致を示した。

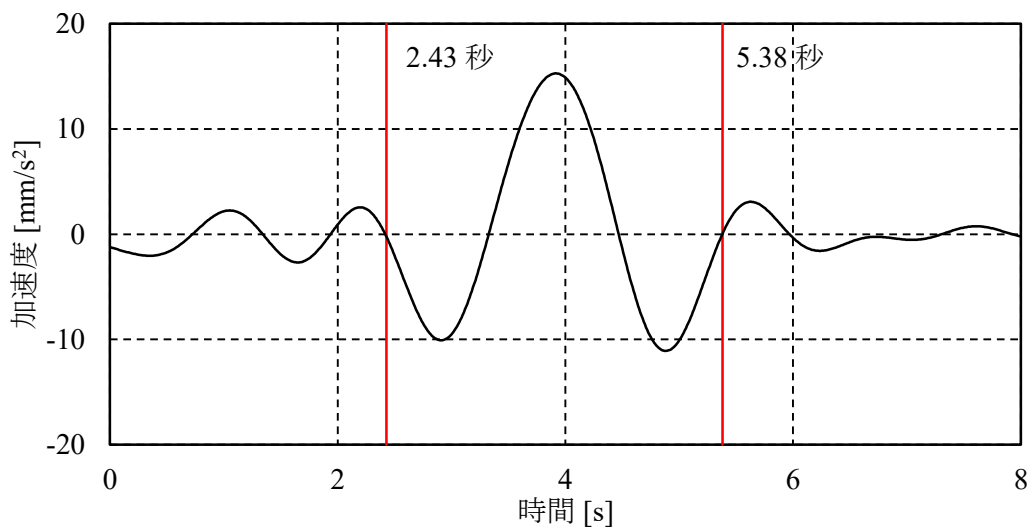


図 3-18 橋軸中央部における加速度応答の低周波数帯成分

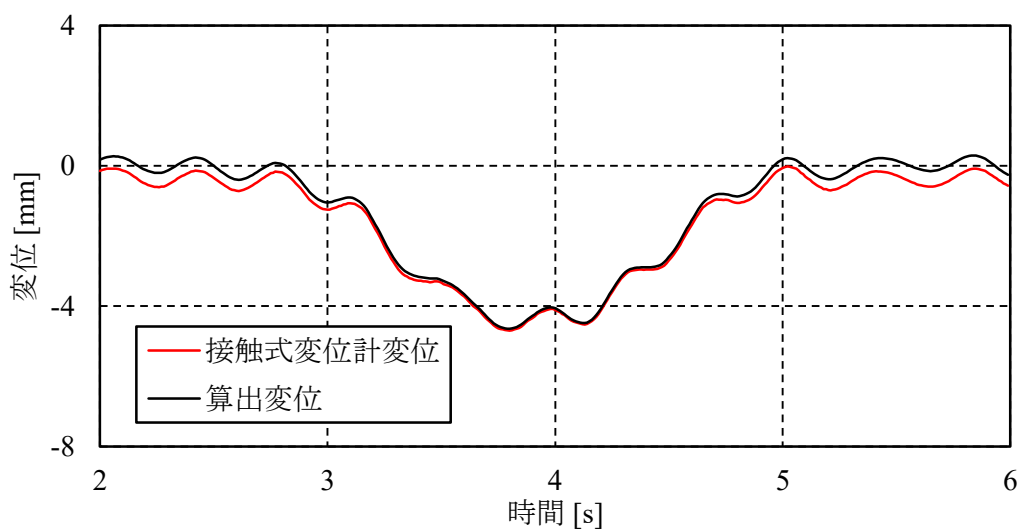


図 3-19 橋軸中央部の加速度応答から算出した変位と接触式変位計の変位計測結果

### 3-4-3. 圧電素子センサを用いたモニタリング結果

圧電素子センサを用いて計測した電圧を一階積分し、電圧積分値を算出した。積分を行う際の積分範囲は、**図 3-18**にて特定した 2.43 秒から 5.38 秒を用いた。なお、電圧を一階積分する際は、自由振動仮定法の考えに基づき、**図 3-20**に示す手順にて行った。以下に手順を説明する。

- a) 計測した電圧を自由振動部と強制振動部に区別する。
- b) 自由振動部の電圧データに対し、1 Hz のローパスフィルタを施す。
- c) b)にて処理した電圧データを数値積分し、自由振動部の電圧積分値を算出する。
- d) 強制振動部の電圧データに対しては、数値積分を行い強制振動部の電圧積分値を算出する。
- e) c)にて算出した自由振動部の電圧積分値を境界条件とし、強制振動部の電圧積分値のドリフト成分を除去した。

上述の手順に基づいて算出した電圧積分値を**図 3-21**に示す。**図 3-21**には、ひずみゲージを用いて計測した橋軸方向のひずみ応答も併記している。**図 3-21**よりひずみゲージを用いて計測したひずみ応答と、圧電素子センサにより得られた電圧積分値は、良い一致を示していることから、ひずみ応答の変化を圧電素子センサにて把握できる可能性を確認した。

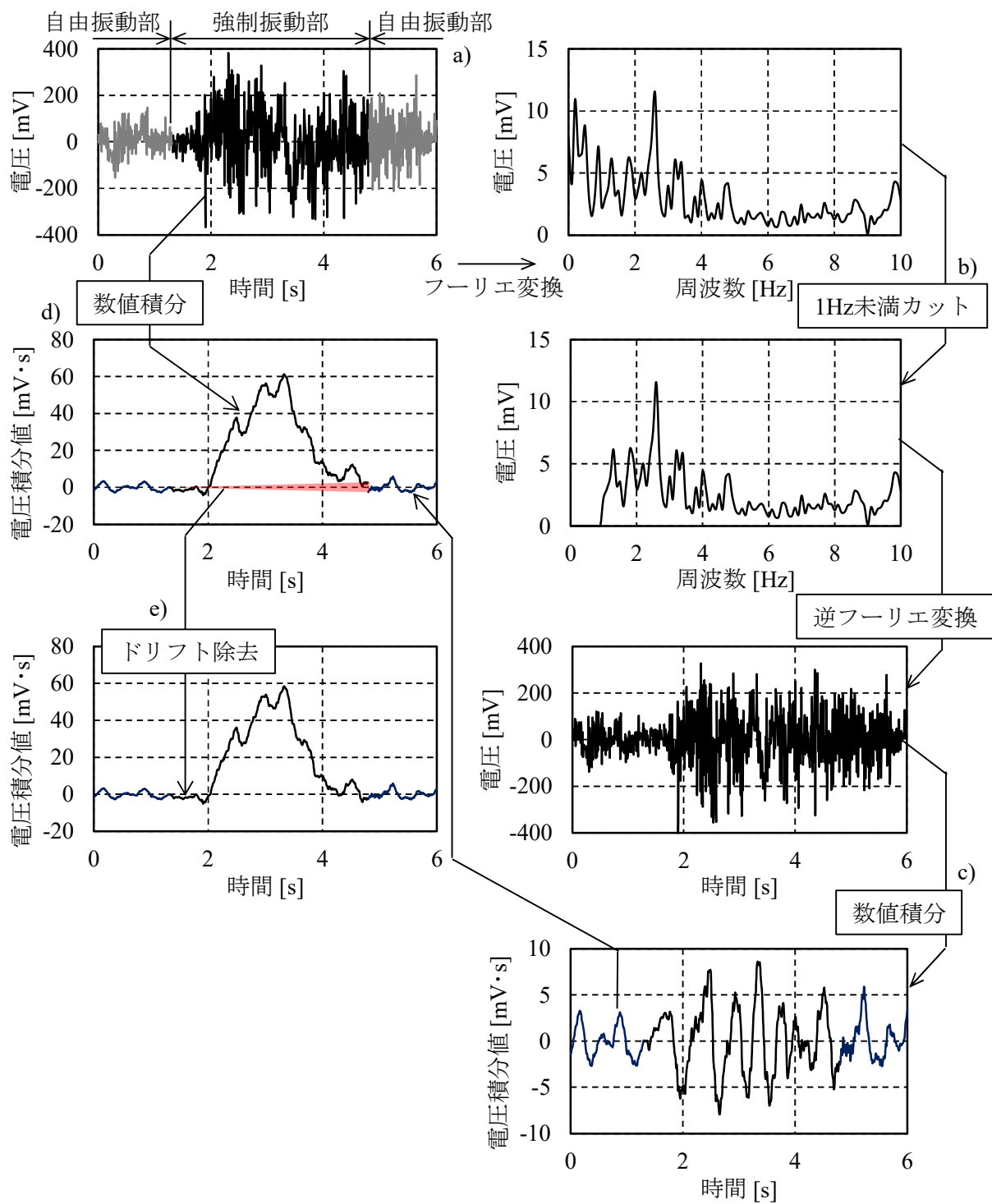


図 3-20 圧電素子センサによる電圧積分値の算出手順

### 3-4-4. 疲労き裂の発生および進展のモニタリングについて

3章4節2項および3章4節3項において算出した変位応答と電圧積分値を数値積分し、 $S_d$ および $S_v$ を求めた。疲労き裂の発生および進展のモニタリングは、式(3-1)を用いて算出した $R$ により行う。各々の総和は、低周波数帯の加速度記録から特定した積分範囲を算出範囲として算出した。その結果について表3-2に示す。本検討により、評価指標 $R$ の算出が可能であることを確認した。また、疲労き裂が発生および進展した場合、電圧積分値の総和 $S_v$ が低下していくと考えられ、その結果、評価指標 $R$ が低下する。したがって、 $R$ の値をモニタリングすることによって、疲労き裂の発生および進展の検知が可能であると考えられる。今後は、モニタリング指標 $R$ の安定性について検証が進め、長期間のモニタリングが可能であることを確認することが必要である。

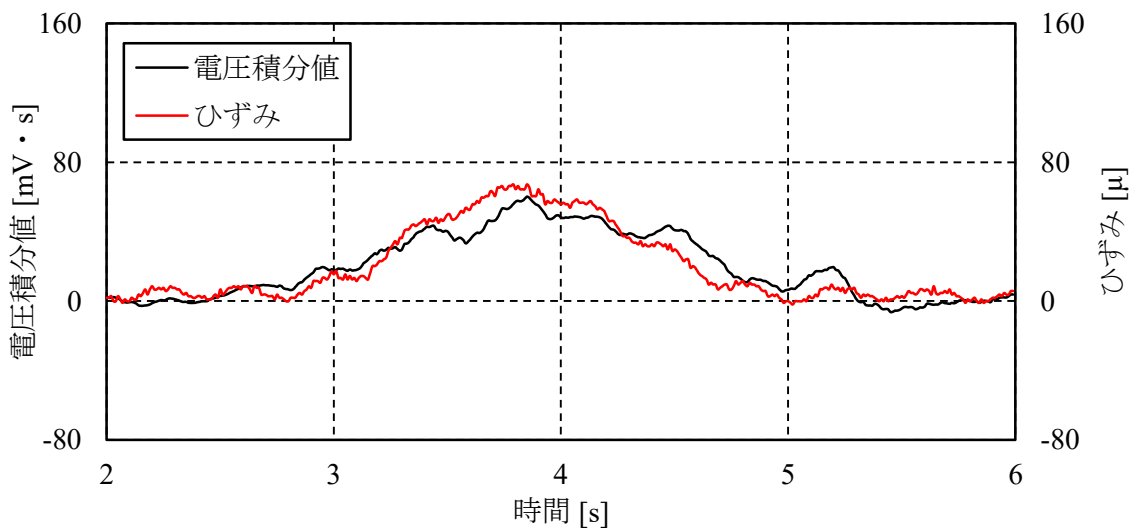


図 3-21 圧電素子センサによる電圧積分値とひずみ計測結果の関係

表 3-2 評価指標  $R$  の算出結果

変位応答の面積 $S_d$	5.65 [mm・s]
電圧積分値の面積 $S_v$	79.6 [mV・s <sup>2</sup> ]
評価指標 $R$	14.1 [mV・s/mm]



### 3-5. 総括

本章では、圧電素子センサによる疲労き裂の検知を実橋梁に適用することを目的とし、供用中の橋梁にてセンサ計測を実施した。本章にて得られた知見を以下にまとめる。

- a) MEMS 加速度センサによる変位算出を、3 通りの積分範囲にて行い、橋軸中央部における低周波数帯の加速度応答からの積分範囲が、変位算出に適していることを確認した。
- b) 圧電素子センサにて計測した電圧積分値と、溶接止端部におけるひずみ計測値を比較した結果、電圧積分値を用いてひずみ応答の変化を把握できる可能性を確認した。
- c) 疲労き裂をモニタリングする指標  $R$  (電圧積分値の積分値 / 変位応答の積分値) を算定できることを確認した。今後は、指標  $R$  の安定性について、さらなる検討が必要である。

## 参考文献

- 3-1) Sekiya H., Kubota K., Miki C.: Simplified Portable Bridge Weigh-in-Motion System Using Accelerometers, *J. Bridge Eng*, 23(1), pp. 1-15, 2018.
- 3-2) Gindy, M., Vaccaro, R. and Nassif, H.: A state-space approach for deriving bridge displacement from acceleration, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol.23, pp. 281-290, 2008.
- 3-3) Shogo Morichika, Hidehiko Sekiya, Yanjie Zhu, Shuichi Hirano and Osamu Maruyama: Estimation of Displacement Response in Steel Plate Girder Bridge Using a Single MEMS Accelerometer, *IEEE sensors journal*, Vol.21, No.6, pp. 8204-8208, 2021.
- 3-4) Yang Yu, CS Cai and Lu Deng: Vehicle Axle Identification Using Wavelet Analysis of Bridge Global Responses, *Journal of Vibration and control*, pp. 1-11, 2015.
- 3-5) Jonathan M. Lilly: Element analysis a wavelet-based method for analysing time-localized events in noisy time series, *proceedings of the royal society A*, Volume 473, Issue 2200, pp. 1-28, 2017.
- 3-6) Jonathan M. Lilly and Sofia C. Olhede: Higher-Order Properties of Analytic Wavelets, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 57(1), pp. 146-160, 2009.
- 3-7) S. C. Olhede and A. T. Walden: Generalized morse wavelets, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 50, No. 11, pp. 2661-2670, 2002.

# 第 4 章 K 値に基づく一様な引張荷重下の平板における半楕円き裂深さの推定の試み

## 4-1. 概説

これまで、2 章と 3 章において圧電素子センサを用いた疲労き裂の検知を試みてきたが、本章より K 値ゲージによるき裂深さの推定手法について検討した。本章では、まず 2 節において、本研究にて使用した K 値ゲージの概要について説明する。3 節では、K 値ゲージを用いた非貫通き裂に対する K 値の推定を目的とし、有限要素解析による検証を行う。また、K 値ハンドブックを活用したき裂深さの推定手法を提案する。さらに、黒崎らが使用した旧型の K 値ゲージと新型の K 値ゲージにて計測可能なひずみ値を解析的に算出し、その精度について確認する。4 節では、引張試験片による疲労試験を行い、3 節にて提案した手法の推定精度を確認した。本章は、参考文献 4-1) に基づいて記載する。

## 4-2. K 値ゲージの概要

黒崎ら<sup>1-29)</sup>は、貫通き裂におけるき裂先端の K 値と、き裂まわりのひずみ分布との関係を解明し、そのひずみ分布から K 値を推定できる K 値ゲージを開発した。ひずみゲージによるひずみ計測と同様に、簡易に貫通き裂の K 値を推定できる点や、通常のひずみ計測に使用するロガーにより計測できる点が特長である。

本研究に用いた K 値ゲージの構成と寸法を図 4-1 に示す<sup>42)</sup>。本研究に適用した K 値ゲージは、黒崎らが用いた K 値ゲージよりも小型である。これは、き裂先端の特徴が表れるき裂のごく近傍の変化をより捉えやすくすることを目的として小型化した。K 値ゲージの小型化による効果の詳細については、4 章 3 節 4 項にて述べる。

K 値ゲージは、4 枚のゲージ素子 (G1, G2, G3 および G4) によって構成されており、ゲージの中心をき裂の先端に合わせて貼り付けることにより、き裂先端まわりのひずみを計測する。貫通き裂を対象としたとき、それぞれのゲージ素子にて計測したひずみと、K 値との関係は、既往研究から式(4-1)を用いて表される<sup>1-29)</sup>。

$$K = \frac{(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - (\varepsilon_3 + \varepsilon_4)}{2Q(R_1 - R_2)} \quad (4-1)$$

ただし、K は開口モードにおけるき裂先端の K 値、 $\varepsilon_i$  はゲージ G $i$  における計測値、Q は材料定数、 $R_1$  および  $R_2$  は形状定数とする。なお、ゲージ G $i$  にて計測する値  $\varepsilon_i$  は、ゲージ G $i$  における半径  $r$  方向のひずみの平均値である。材料定数 Q、形状定数  $R_1$  および  $R_2$  は、式(4-2)、式(4-3)および式(4-4)にて表される<sup>1-29)</sup>。

$$Q = \frac{4(7 - 5\nu)}{9E(\pi)^{3/2}} \quad (4-2)$$

$$R_1 = \frac{r_2^{3/2} - r_1^{3/2}}{r_2^2 - r_1^2} \quad (4-3)$$

$$R_2 = \frac{r_4^{3/2} - r_3^{3/2}}{r_4^2 - r_3^2} \quad (4-4)$$

ただし、E は貼り付け材料の弾性係数、 $\nu$  は貼り付け材料のポアソン比、 $r_i$  は図 4-1(b) に示したゲージ中央部からの半径とする。それぞれの半径  $r_1$  から  $r_4$  までの寸法を式(4-3)および式(4-4)に代入することにより、 $R_1$  は 23.0 [ $\sqrt{1/m}$ ],  $R_2$  は 16.0 [ $\sqrt{1/m}$ ] となる。

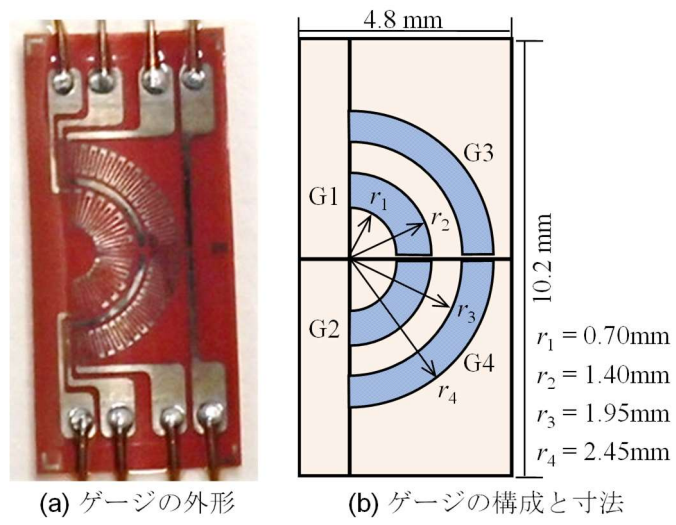


図 4-1 K 値ゲージの概要<sup>4-1)</sup>

### 4-3. 有限要素解析による K 値ゲージ適用性の評価

本節では、既往研究<sup>1-29)</sup>において検討できていない、非貫通き裂に対する K 値の推定を目的としている。まず、き裂幅、き裂深さ、板厚、荷重をパラメータとした有限要素解析を行い、K 値ゲージを用いた非貫通き裂に対する K 値の推定手法について提案する。次に、推定した K 値に基づく、き裂深さの推定手法についても説明する。最後には、提案した手法を旧型 K 値ゲージおよび新型 K 値ゲージの両ケースに適用し、小型化による効果を確認する。

#### 4-3-1. 解析概要

有限要素解析には、汎用有限要素解析ソフト ABAQUS6.14 を用いた。解析モデルは、き裂を中心とした際、対称となることから 1/2 モデルとした。き裂形状は、き裂幅  $2a$ 、き裂深さ  $b$  の半楕円形状と仮定し、その大きさは、後述する実験結果をふまえて、き裂のアスペクト比  $b/a$  が 0.4, 0.5, 0.6 となるように設定した。板厚  $t$  に関しては、9 mm, 16 mm, 24 mm の 3 通りの断面を対象とした。実施した 50 種類の解析ケースを表 4-1 に、作成した解析モデルを図 4-2 に示す。

境界条件は、図 4-2 に示すように、対称面では対称条件として軸方向変位を固定した。載荷荷重に関しては、公称応力が 130.8 MPa となるように引張荷重を上縁に与えた。材料構成則は、弾性係数  $E$  を 205 GPa, ポアソン比  $\nu$  を 0.3 とした。

はじめに、解析モデルの正当性を評価した。J 積分による K 値の算出を目的とし、き裂の前縁には図 4-3 に示す環状の要素（最小要素寸法 0.1 mm 程度）を配置した。また、き裂先端に合わせて K 値ゲージを貼付した場合、ゲージ素子の位置は、図 4-4 に示した G1 および G3 の範囲と図 4-1 中に示した G1 および G3 のゲージ範囲が対応している。また、本解析モデルは、き裂を中心に対称であることから、G1 ゲージのひずみ値と G2 ゲージのひずみ値、ならびに G3 ゲージのひずみ値と G4 ゲージのひずみ値は、等しいものとした。

表 4-1 解析条件<sup>4-1)</sup>

板厚 $t$ [mm]	板幅 $2W$ [mm]	き裂ア スペク ト比 $b/a$	き裂幅 $2a$ [mm]	き裂 深さ $b$ [mm]	板厚 $t$ [mm]	板幅 $2W$ [mm]	き裂ア スペク ト比 $b/a$	き裂幅 $2a$ [mm]	き裂 深さ $b$ [mm]
9	50	0.4	5.00	1.00	16	90	0.6	5.93	1.78
			10.0	2.00				11.9	3.56
			15.0	3.00				17.8	5.33
			20.0	4.00				23.7	7.11
		4.00	1.00	29.6				8.89	
		8.00	2.00	35.6				10.7	
	0.5	12.0	3.00	24	135	0.4	13.3	2.67	
		16.0	4.00				26.7	5.33	
		20.0	5.00				40.0	8.00	
		24.0	6.00				53.3	10.7	
		3.33	1.00				66.7	13.3	
		6.67	2.00				10.7	2.67	
0.6	10.0	3.00	24	135	0.5	21.3	5.33		
	13.3	4.00				32.0	8.00		
	16.6	5.00				42.7	10.7		
	20.0	6.00				53.3	13.3		
	64.0	16.0				8.89	2.67		
	17.8	3.56				17.8	5.33		
16	90	0.4	26.7	5.33	16	90	0.6	26.7	8.00
			35.6	7.11				35.6	10.7
			44.4	8.89				44.4	13.3
			7.11	1.78				53.3	16.0
		14.2	3.56	0.5				21.3	5.33
		21.3	5.33					28.4	7.11
	28.4	7.11	35.6		8.89				
	35.6	8.89	42.7		10.7				

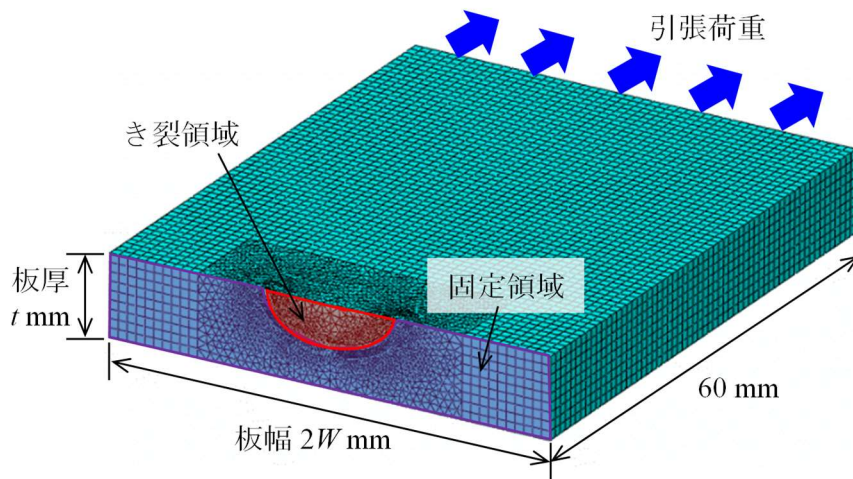


図 4-2 作成した解析モデル<sup>4-1)</sup>

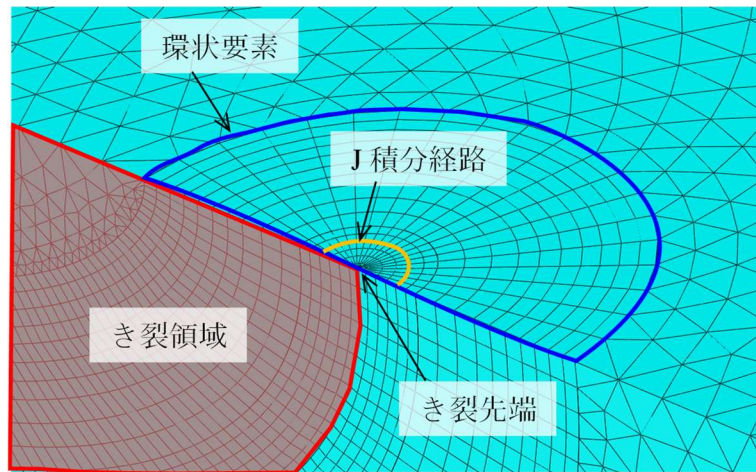


図 4-3 き裂前縁と環状要素<sup>4-1)</sup>

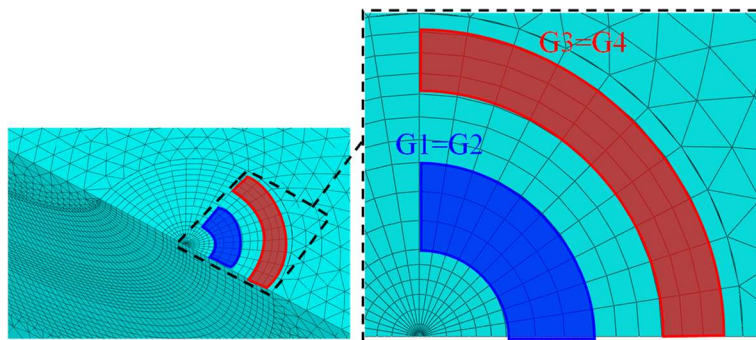


図 4-4 K 値ゲージにて計測可能なひずみの領域<sup>4-1)</sup>



### 4-3-2. 解析結果

一例として、板厚 9 mm、板幅 50 mm、き裂幅 16.6 mm、き裂深さ 5 mm、公称応力 130.8 MPa におけるひずみ分布を図 4-5 に示す。分布は、載荷方向に生じたひずみを示している。図 4-5 より、き裂先端において、ひずみが集中しており、その分布は先端から離れるほど、小さくなっていくことが確認できる。

続いて、有限要素解析による K 値の解析方法の 1 つである J 積分を用いる方法により、K 値を算出した。J 積分  $J$  から K 値の算出は、式(4-5)に示す関係式を用いた<sup>1-23)</sup>。

$$K_{FEM} = \sqrt{J \left( \frac{1 - \nu^2}{E} \right)^{-1}} \quad (4-5)$$

まず、J 積分の計算経路を検証することを目的とし、き裂先端から 7 番目までにおける J 積分を解析し、式(4-5)を用いて K 値を算出した。一例として、板厚 9 mm、板幅 50 mm、き裂幅 16.6 mm、き裂深さ 5 mm、公称応力 130.8 MPa における 1 番目から 7 番目までの経路ごとの K 値算出結果を図 4-6 に示す。図 4-6 より、1 番目の経路と 4 番目の経路では、わずかに差異を確認できるが、5 番目以降の経路については、比較的安定した解析結果を得られている。そのため、本解析では、5 番目の経路を J 積分の解析経路とし、K 値の算出を行う。

続いて、 $K_{FEM}$  との比較を目的とし、応力拡大係数ハンドブック<sup>4-3)</sup> (以降、K 値ハンドブックと呼ぶ) に示される、次式を用いて、き裂先端における応力拡大係数  $K_{Shape}$  を算出した。

$$K_{Shape} = \frac{\sigma \sqrt{\pi b}}{E(k)} F(\alpha, \beta, \gamma) \quad (4-6a)$$

$$E(k) \cong \sqrt{1 + 1.464(\alpha)^{1.65}} \quad (4-6b)$$

$$F(\alpha, \beta, \gamma) = \{M_1 + M_2(\beta)^2 + M_3(\beta)^4\} \cdot \sqrt{\alpha} \cdot g \cdot f_w \quad (4-6c)$$

$$M_1 = 1.13 - 0.09\alpha \quad (4-6d)$$

$$M_2 = -0.54 + \frac{0.89}{0.2 + \alpha} \quad (4-6e)$$

$$M_3 = 0.5 - \frac{1}{0.65 + \alpha} + 14(1 - \alpha)^{24} \quad (4-6f)$$

$$g = 1 + (0.1 + 0.35\beta^2) \quad (4-6g)$$

$$f_w = \{\sec(\pi\gamma\sqrt{\beta})\}^{\frac{1}{2}} \quad (4-6h)$$

ここで、 $E(k)$ と $F(\alpha, \beta, \gamma)$ は、き裂形状に対する補正係数と板厚・板幅が有限であることに対する補正係数、 $\alpha = b/a$ 、 $\beta = b/t$ 、 $\gamma = a/2W$ である。また、適用可能な条件は、遠方にて一様な引張応力を受ける平板中の半楕円き裂であり、き裂の適用範囲は、 $0 \leq b/a \leq 1$ 、 $a/W < 0.5$ である。公称応力 130.8 MPa における、 $K_{FEM}$ と $K_{Shape}$ との関係を図 4-7 に示す。図 4-7 中の記号、○、△、□はそれぞれ、板厚 9 mm、16 mm、24 mm の結果を表している。また、記号の白塗り、網掛け、黒塗りは、き裂アスペクト比 0.4、0.5、0.6 の結果を示している。図 4-7 より、それぞれのプロットは、原点を通る傾き 1 の直線上にあり、 $K_{FEM}$ と $K_{Shape}$ は、良い一致を示していることを確認できる。 $K_{FEM}$ を算出した式(4-5)は、平面ひずみ場を対象とした式であるが、図 4-7 の結果より、 $K_{FEM}$ と $K_{Shape}$ は良い一致を示していることから、本解析モデルの妥当性を確認することができた。

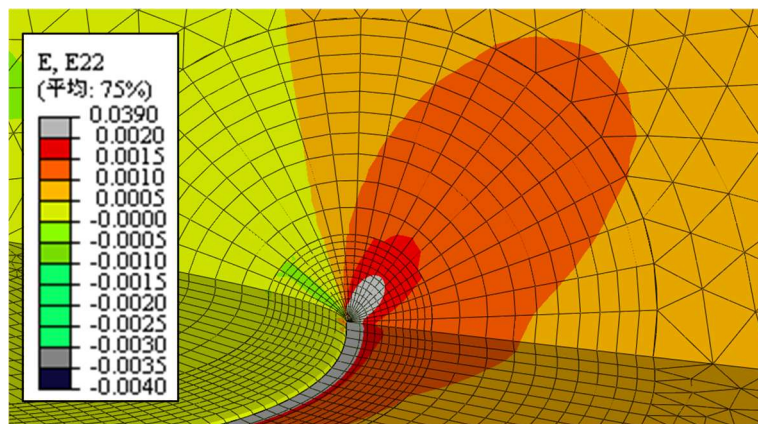


図 4-5 き裂の先端まわりにおけるひずみ分布<sup>4-1)</sup>

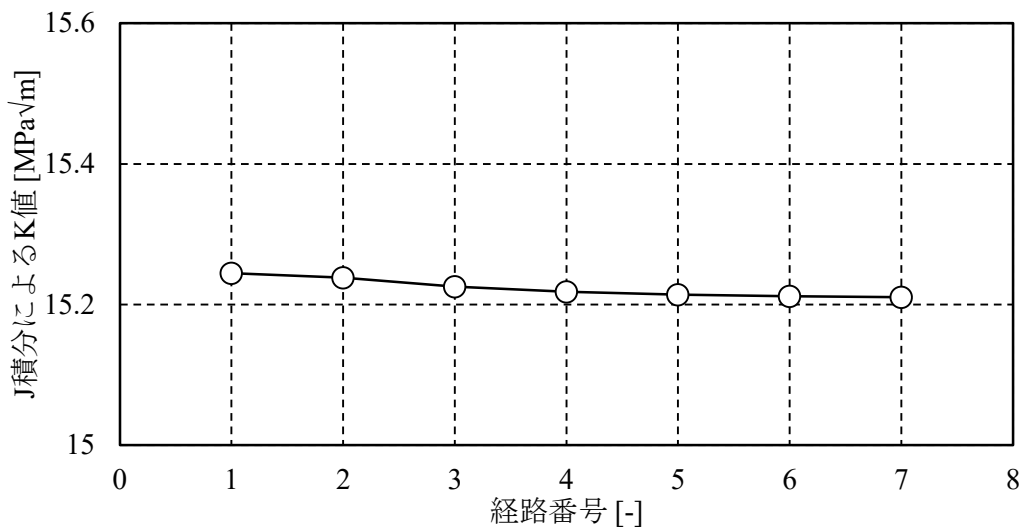


図 4-6 経路ごとの J 積分による K 値の算出結果<sup>4-1)</sup>

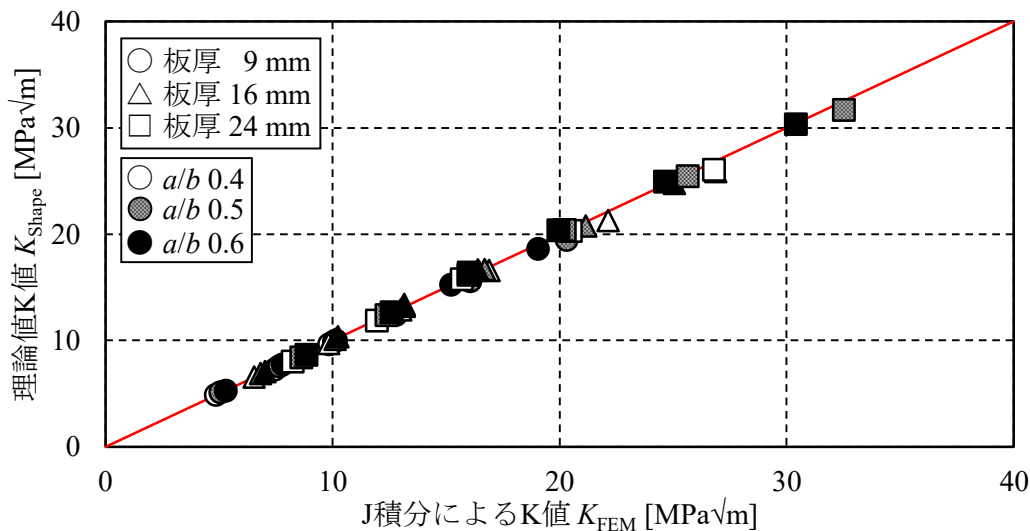


図 4-7 J 積分による K 値と K 値ハンドブックによる K 値との関係<sup>4-1)</sup>

次に、K 値ゲージにて計測できるひずみの値を解析的に算出する。K 値ゲージは、[図 4-4](#) に示す領域の半径方向に対するひずみの平均値を式(4-7)に基づいて、算出した<sup>1-29)</sup>。

$$\varepsilon_i = \frac{\int_S \varepsilon_r dS}{S} = \frac{\int_S \varepsilon_r \cdot r d\theta dS}{S} \quad (4-7)$$

ただし、 $\varepsilon_r$  はき裂先端部を中心とした半径  $r$  方向におけるひずみ成分、 $S$  は[図 4-4](#) 内にて示したそれぞれのひずみ計測範囲の面積、 $\theta$  はき裂先端と着目点が成す角度とする。

式(4-1)に示した貫通き裂に対する K 値の算出式と、式(4-7)に基づき算出した K 値ゲージによるひずみの解析値を用いて、応力拡大係数  $K_{Strain}$  を算出した。一例として、板厚 9 mm、板幅 50 mm、き裂幅 16.6 mm、き裂深さ 5 mm、公称応力 130.8 MPa における、解析によるひずみ値と算出した  $K_{Strain}$  を[表 4-2](#) に示す。

次に、各き裂形状に対する  $K_{Strain}$  と  $K_{Shape}$  を比較するため、後述する実験の最大の公称応力である 130.8 MPa および、その半分の値である 65.4 MPa における、 $K_{Strain}$  と  $K_{Shape}$  との関係を[図 4-8](#) に示す。赤色の実線は、原点を通る傾き 1 の直線であり、 $K_{Strain}$  と  $K_{Shape}$  との誤差が少ないほど、この直線に近づく。それぞれの凡例マークについては、[図 4-7](#) と同一のルールに基づいている。式(4-1)を用いて算出した  $K_{Strain}$  は、 $K_{Shape}$  と比較して常に小さく算出される結果となった。これは、貫通き裂に対する式(4-1)を非貫通き裂に対して適用したためであり、式(4-1)を用いて非貫通き裂に対する K 値を推定する場合、K 値の補正が必要であることがわかる。

表 4-2 解析によるひずみ値と算出した K 値<sup>4-1)</sup>

$\varepsilon_1 (\varepsilon_2)$ [ $\mu$ ]	$\varepsilon_3 (\varepsilon_4)$ [ $\mu$ ]	$K_{Strain}$ [ $MPa\sqrt{m}$ ]
536	359	11.70

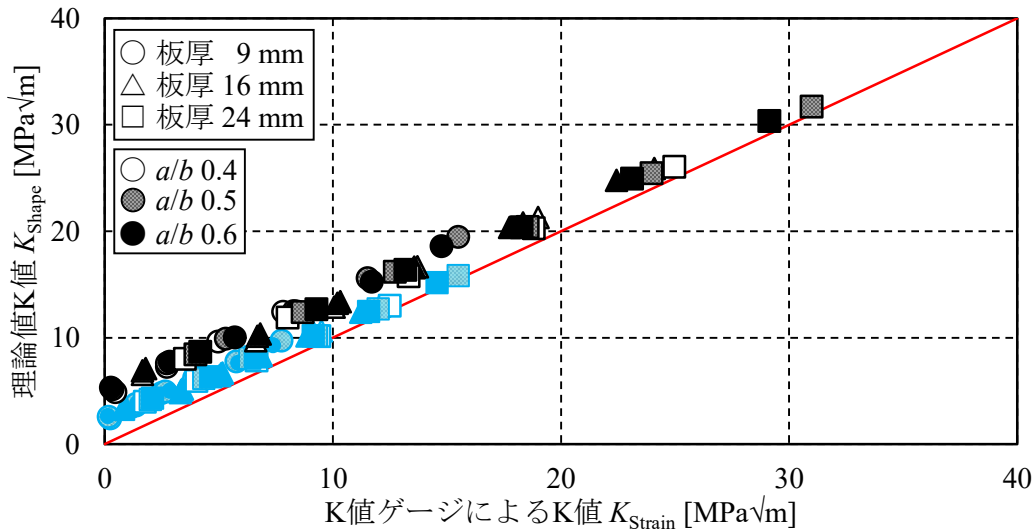


図 4-8 公称応力 65.4 MPa と 130.8 MPa のときの K 値ゲージによる K 値と K 値ハンドブックによる K 値との関係<sup>4-1)</sup>

#### 4-3-3. K 値ゲージを用いた非貫通き裂に対するき裂深さの推定手法

貫通き裂を想定した式(4-1)を用いて算出した K 値を補正することによって、非貫通き裂の K 値を推定する手法を検討する。具体的には、図 4-8 より、 $K_{Strain}$  と  $K_{Shape}$  の間に線形関係を確認できることから、最小二乗法を用いて導出した回帰式による、K 値の補正方法を検討する。

32.7 MPa, 65.4 MPa, 98.1 MPa, 130.8 MPa における回帰式を式(4-8a), 式(4-8b), 式(4-8c)および式(4-8d)に示す。

$$K_{Shape\_32.7MPa} = 0.858K_{Strain} + 1.26 \quad (4-8a)$$

$$K_{Shape\_65.4MPa} = 0.858K_{Strain} + 2.52 \quad (4-8b)$$

$$K_{Shape\_98.1MPa} = 0.858K_{Strain} + 3.78 \quad (4-8c)$$

$$K_{Shape\_130.8MPa} = 0.858K_{Strain} + 5.04 \quad (4-8d)$$

式(4-8a), 式(4-8b), 式(4-8c)および式(4-8d)より、回帰式の傾きは応力に依存せず、一定であると考えられる。これは、 $K_{Strain}$  と  $K_{Shape}$  は応力が 2 倍となると両者もほぼ 2 倍となるため、公称応力による影響は、回帰式の傾きにほとんど影響しないことが要因

である。一方、回帰式の切片は、公称応力により変化を示している。これは、 $K_{Strain}$  が低く推定されることによる  $K_{Shape}$  との差が、公称応力に依存するためだと考えられる。それゆえ、この回帰式の切片と公称応力との関係について整理し、補正する方法を検討した。公称応力 (32.7 MPa, 65.4 MPa, 98.1 MPa, 130.8 MPa) と回帰式の切片との関係を図 4-9 に示す。図 4-9 より、公称応力と回帰式の切片は、線形関係を示しており、その関係は式(4-9)を用いて、表すことができる。

$$y = 0.039\sigma \quad (4-9)$$

したがって、式(4-8a), 式(4-8b), 式(4-8c), 式(4-8d)および式(4-9)より、公称応力の違いを考慮した K 値の補正式  $K_{Mod}$  は、式(4-10)を用いて表すことができる。

$$K_{Mod} = 0.858K_{Strain} + 0.039\sigma \quad (4-10)$$

なお、回帰式の切片は、K 値の単位と一致している。図 4-8 にて算出した  $K_{Strain}$  を式(4-10)の補正式に代入し、応力拡大係数  $K_{Mod}$  を算出した。公称応力 130.8 MPa における  $K_{Mod}$  と  $K_{Shape}$  との関係を図 4-10 に示す。赤色の破線は、 $K_{Shape}$  の値を基準とした際の相対誤差±12%を示している。式(4-10)を用いた K 値の補正により、非貫通き裂に対する K 値の推定は、誤差±12%以内の精度に向上することができた。また、他の公称応力 (32.7 MPa, 65.4 MPa, 98.1 MPa) についても同様の結果が得られた。以上より、式(4-10)による K 値の補正を行うことにより、非貫通き裂に対しても K 値ゲージを用いて、誤差±12%以内の精度にて K 値を推定できる可能性がある。

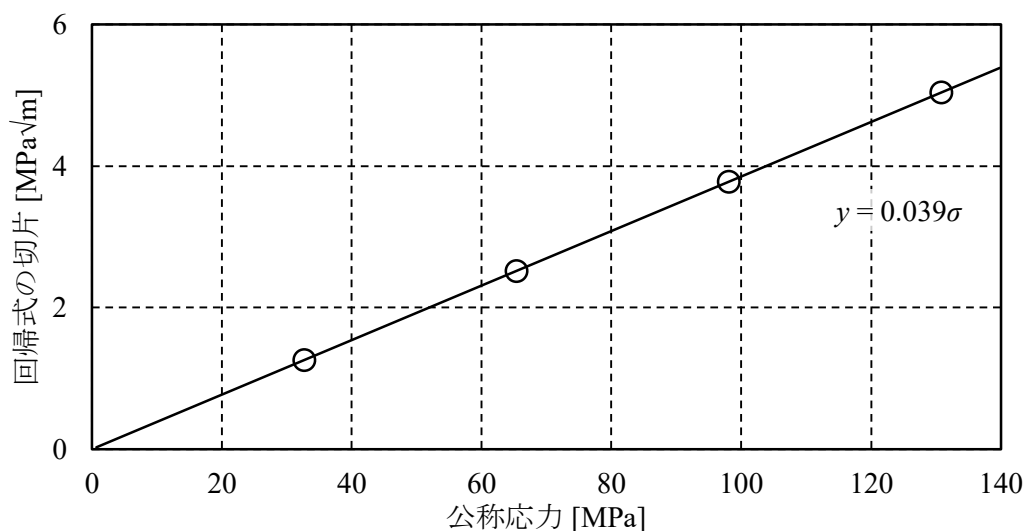


図 4-9 公称応力と回帰式の切片との関係<sup>4-1)</sup>

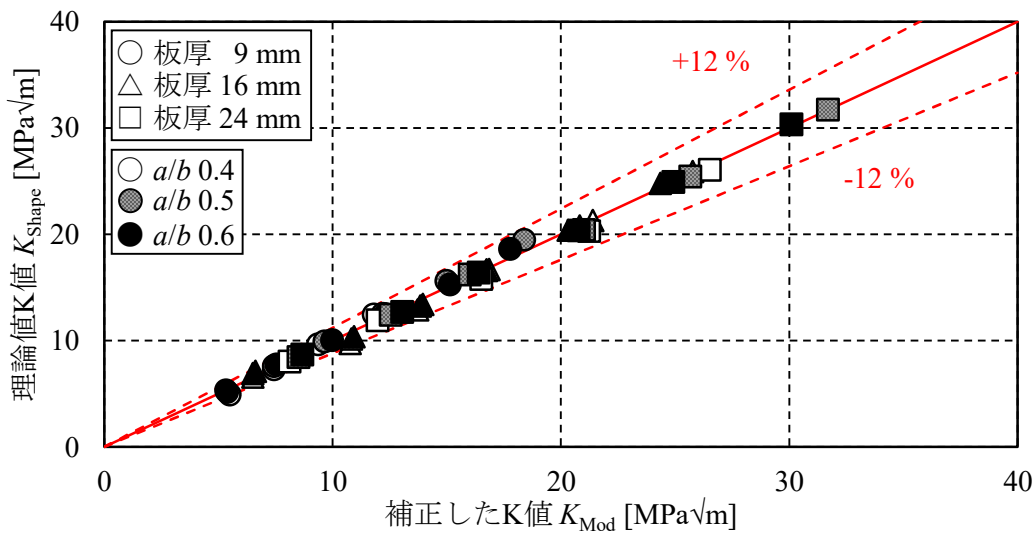


図 4-10 補正した K 値と K 値ハンドブックの K 値との関係<sup>4-1)</sup>

式(4-10)から補正して得られた K 値を用いて、き裂深さの推定を試みる。き裂深さの推定手順を図 4-11 に示し、以下に手順を説明する。

- a) き裂幅，鋼材寸法（板厚，板幅）を計測する。
- b) K 値ゲージとひずみゲージより，K 値推定用のひずみ値と公称応力用のひずみ値を計測する。
- c) 式(4-1)および式(4-10)を用いて，計測した K 値ゲージのひずみ値と公称応力から，K 値を推定する。
- d) K 値ハンドブックの式(4-6a)～式(4-6h)に基づき，き裂深さ 0.01 mm ごとの K 値を算出する。なお，本試験片では板幅の影響を考慮したが，実構造物においては，き裂寸法・板厚と比較して板幅が十分に大きいことから，式(4-6h)に示す補正係数は，1 に近似され，板幅の考慮は必要ない。
- e) d)にて算出したそれぞれの K 値と，き裂深さの関係から，切片を 0 とした回帰式を導く。一例として，板厚 9 mm，板幅 50 mm，き裂幅 16.6 mm，公称応力 130.8 MPa におけるき裂深さと K 値の関係および，その回帰式を図 4-12 に示す。
- f) e)にて算出した回帰式に対し，c)にて推定した K 値を代入することによって，き裂深さを推定する。

これらの手順にて，推定したき裂深さと，実際のき裂深さとの関係を図 4-13 に示す。赤の実線は，推定したき裂深さが，実際のき裂深さと一致する線を示している。赤の破線は，実際のき裂深さを基準とした際の相対誤差±15%を示している。図 4-13 より，誤差±15%以内の精度にて，非貫通き裂に対するき裂深さを推定できる可能性がある。

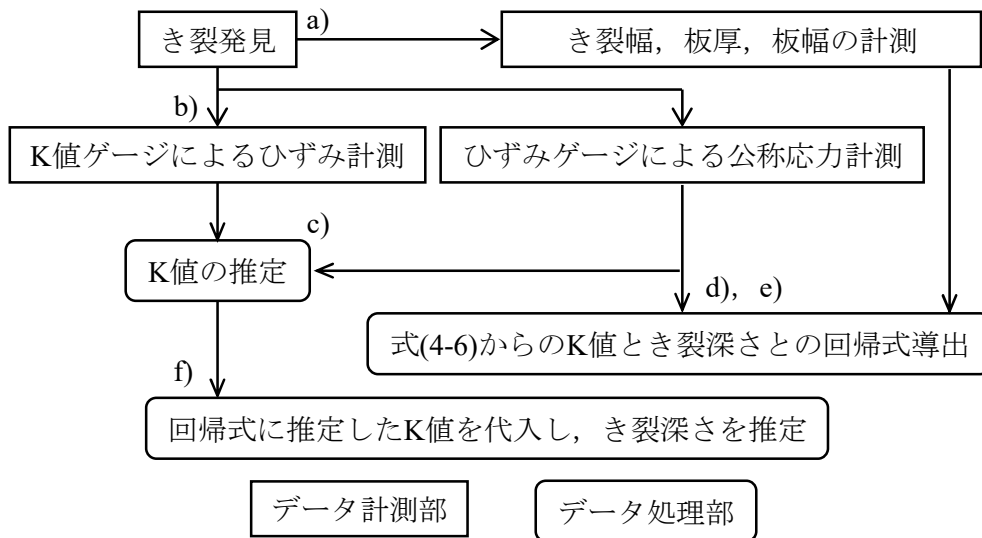


図 4-11 き裂深さの推定手順<sup>4-1)</sup>

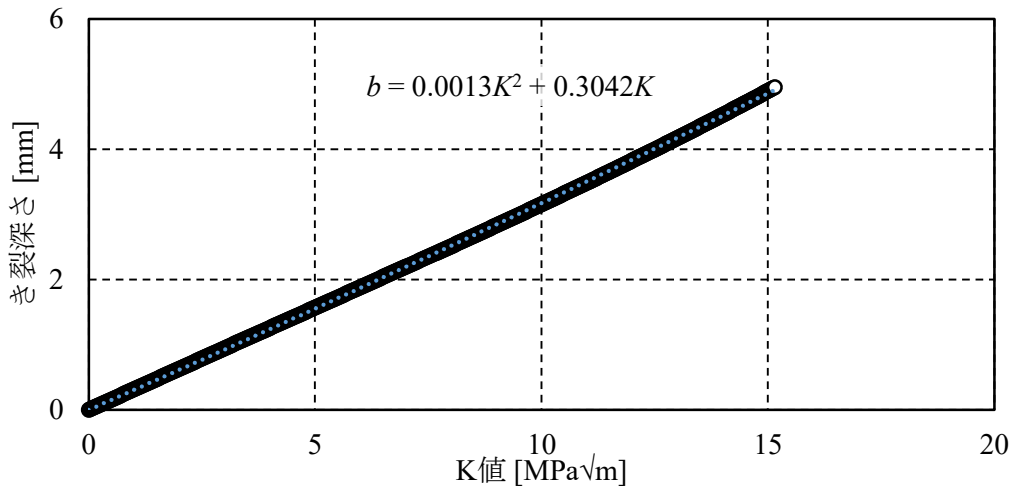


図 4-12 K 値とき裂深さとの関係<sup>4-1)</sup>

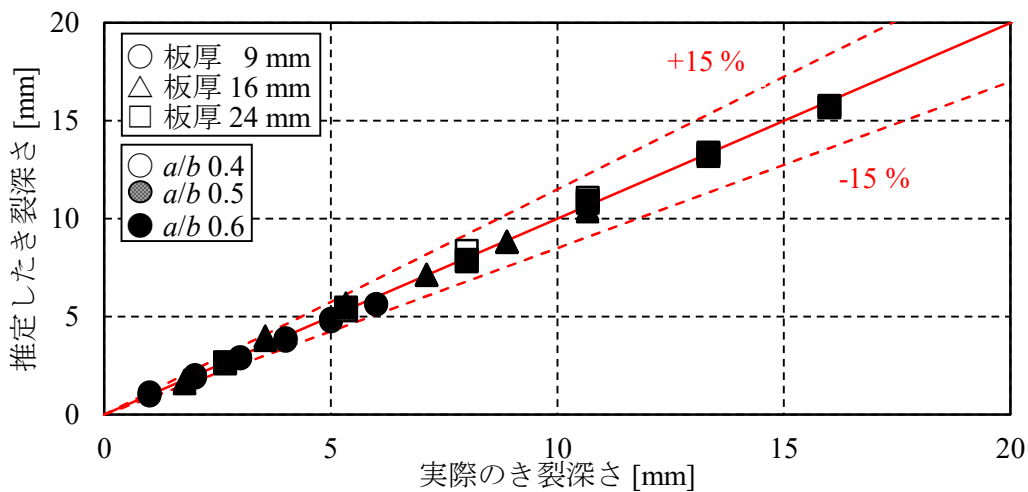


図 4-13 推定したき裂深さと実際のき裂深さとの関係<sup>4-1)</sup>



#### 4-3-4. K 値ゲージの小型化による効果

本項は、K 値ゲージの小型化が K 値の推定に対し、どのような効果を与えたのかを検証するため、旧型の K 値ゲージにおける K 値の推定を解析的に行った。作成した解析モデルを図 4-14 に示す。解析モデルは、旧型の K 値ゲージのゲージ寸法に合わせてパートを分割し、旧型の K 値ゲージが計測するひずみ値を解析した。境界条件、载荷条件、き裂形状のモデルパターンについては、表 4-1 および図 4-2 にて示した各条件と一致している。

はじめに、作成した解析モデルの正当性を確認するため、4 章 3 節 2 項にて用いた K 値によるモデルの評価を行った。J 積分による K 値は、4 章 3 節 2 項と同様に 5 番目の環状要素における J 積分を用いて評価し、式(4-5)を用いて算出した。また、算出した J 積分からの K 値との比較は式(4-6)に示した K 値ハンドブックを用いて行った。各き裂形状における J 積分からの K 値と K 値ハンドブックからの K 値の関係を図 4-15 に示す。図 4-15 より、J 積分からの K 値と K 値ハンドブックからの K 値は、良い一致を示しており、作成したモデルの正当性を確認できた。続いて、旧型の K 値ゲージモデルから解析的に K 値ゲージのひずみ値を算出し、式(4-1)、式(4-2)、式(4-3)および式(4-4)を用いて K 値を推定した。ただし、旧型の K 値ゲージの場合、新型の K 値ゲージとゲージ寸法が異なるため、式(4-3)および式(4-4)を再計算し、 $R_1$  は  $16.7[\sqrt{1/m}]$ 、 $R_2$  は  $11.9[\sqrt{1/m}]$  を用いている。旧型の K 値ゲージによる補正前の K 値と K 値ハンドブックからの K 値との関係を図 4-16 に示す。図 4-16 より、き裂深さが小さい場合に、K 値ゲージによる K 値が負値を示している。これは、き裂先端における内周と外周の差を捉えることができなくなったためだと考えられる。このことから、K 値ゲージの小型化により、浅いき裂形状にも適用できるようになったことが確認された。

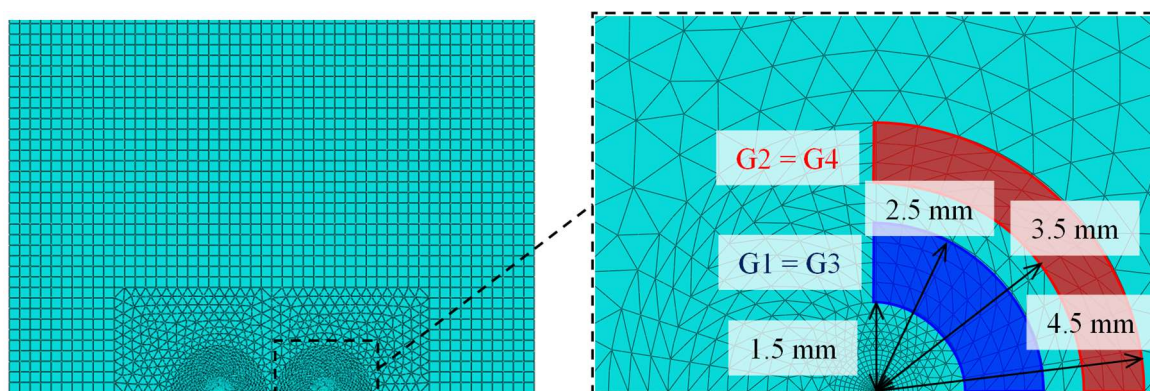


図 4-14 旧型 K 値ゲージの計測範囲と解析モデル



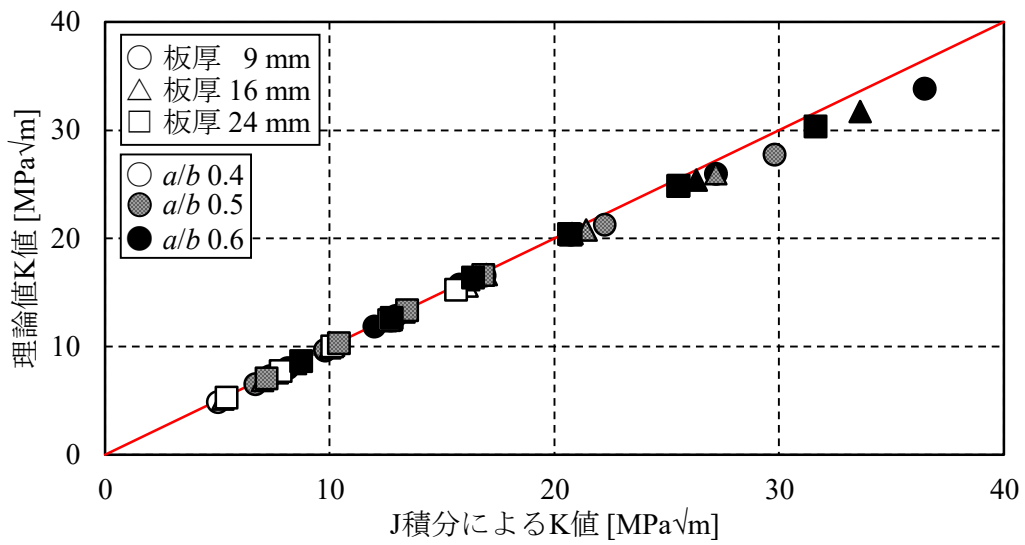


図 4-15 旧型ゲージによる J 積分からの K 値と理論値 K 値の関係

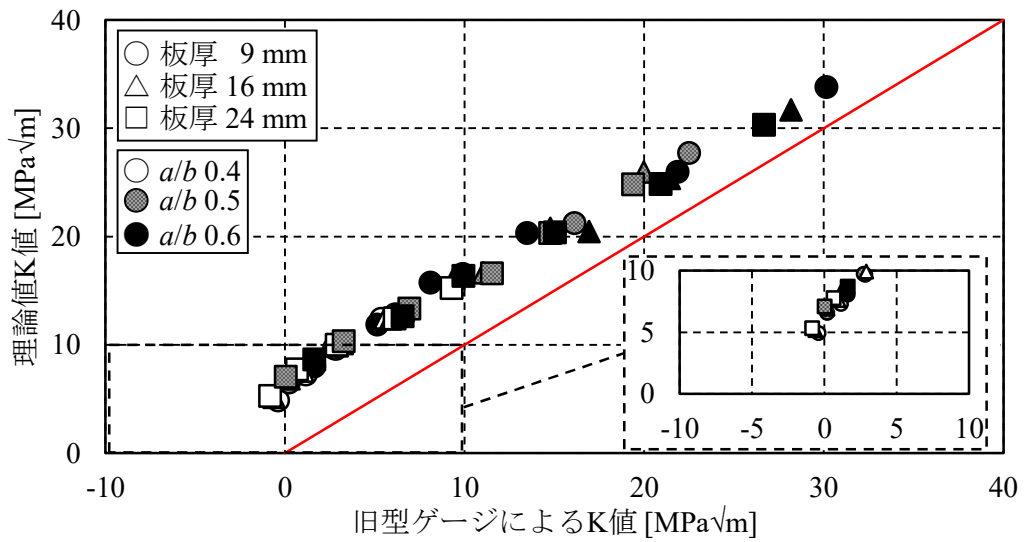


図 4-16 旧型ゲージによる K 値と理論値 K 値の関係

#### 4-4. 引張試験片を用いた疲労試験によるき裂深さの推定精度の検証

引張試験片による疲労試験を実施し、K 値ゲージを用いた非貫通の疲労き裂に対するき裂深さの推定精度を検証した。

##### 4-4-1. 試験概要

疲労き裂の深さ推定の精度検証を目的とし、疲労試験を実施した。試験体の寸法とひずみゲージの設置位置を図 4-17 に示す。試験体の中央には、放電加工による深さ 2 mm、幅 10 mm の半楕円形状のスリットを設け、その端部から疲労き裂を発生させた。また、公称応力の計測を目的として、スリットから 60 mm 離れた位置に、一軸ひずみゲージを両面に 4 枚貼付した。

载荷条件は、下限荷重を 5.9 kN (0.6 tf)、最大荷重を 58.8 kN (6.0 tf)、繰返し速度は、6.0 Hz にて実施した。以降、この载荷条件を疲労試験载荷と呼ぶ。疲労き裂の発生および進展の確認は、マイクロ스코プを用いたスリット端部の観察によって、実施した。疲労き裂の発生が認められた後の载荷については、最大荷重を一定としたまま、荷重範囲を半減させる载荷を、疲労試験载荷の载荷回数 10 万回ごとに行った。この载荷により、破断面上にビーチマークを導入し、き裂形状を確認する。

K 値ゲージの計測は、各疲労試験载荷の後に実施した。K 値ゲージの貼付にあたっては、マイクロ스코プ (50 倍) にて、き裂の観察を行い、き裂の進展方向と、き裂先端の位置を確認した。貼付の際は、ゲージ中央がき裂の先端に一致するように貼り付けた。一例として、マイクロ스코プにて確認したき裂先端部の状況を図 4-18 に、K 値ゲージの貼付状況と貼付方法を図 4-19 と図 4-20 に示す。K 値ゲージの計測は、最小荷重 9.8 kN (1.0 tf) から最大荷重 58.8 kN (6.0 tf) を 9.8 kN (1.0 tf) ごとに载荷した際の静ひずみを計測した。

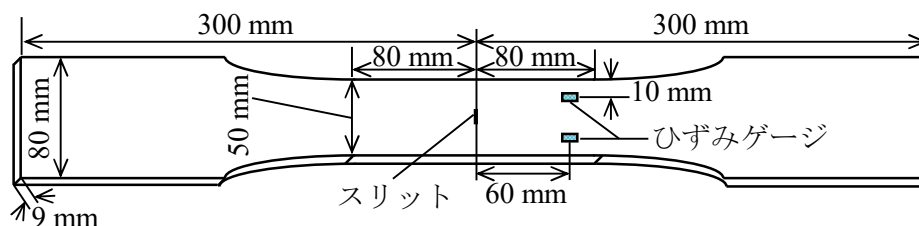


図 4-17 引張試験片の寸法とセンサ設置位置

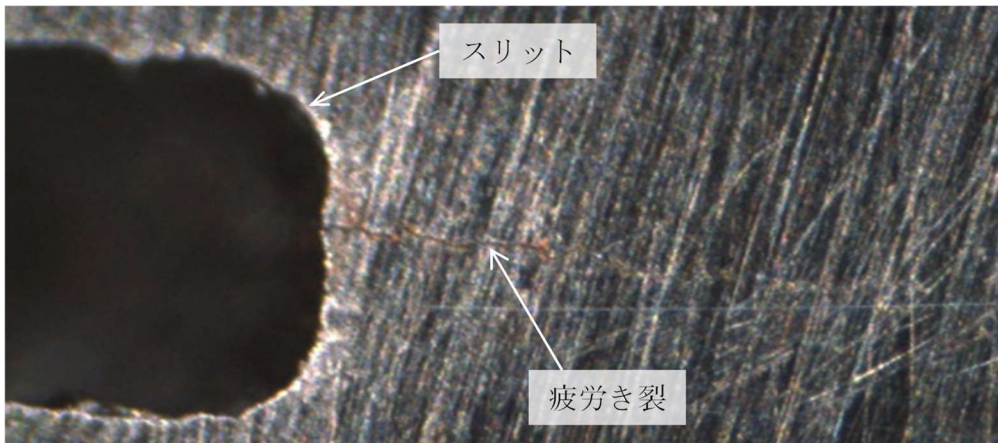


図 4-18 マイクロスコープによるき裂の観察 (50 倍) <sup>4-1)</sup>

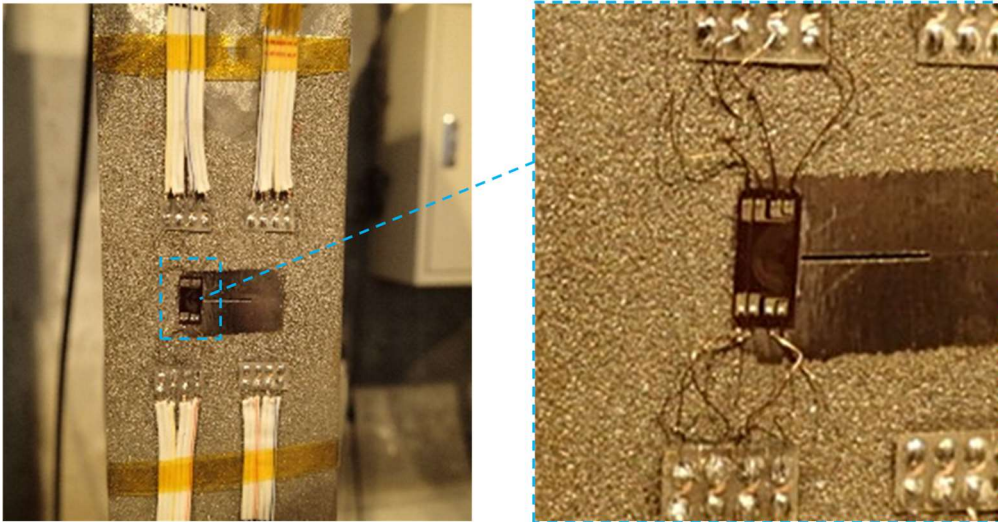


図 4-19 K 値ゲージの貼付状況 <sup>4-1)</sup>

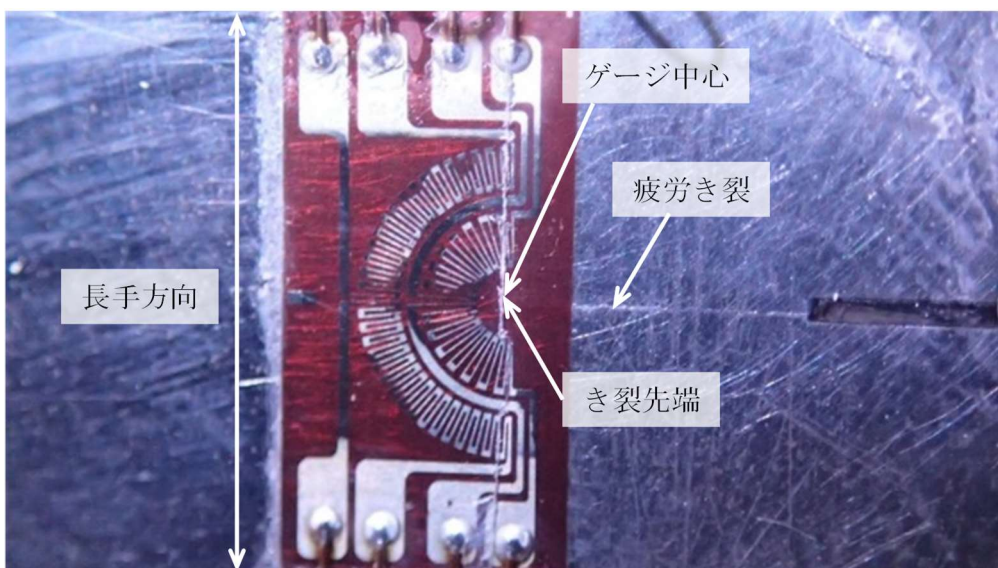


図 4-20 K 値ゲージの貼付方法 <sup>4-1)</sup>

#### 4-4-2. 破面状況

疲労き裂の発生・進展状況を示したビーチマークを図 4-21(a)に、そのスケッチとビーチマークが導入された载荷回数を図 4-21(b)に示す。载荷回数の括弧内の数字は、き裂のアスペクト比を示している。図 4-21(b)より、き裂が進展するにつれ、き裂の進展速度が速くなっていることが確認できる。図 4-21(b)に示すビーチマークから、各き裂形状におけるき裂幅とき裂深さを測定した。

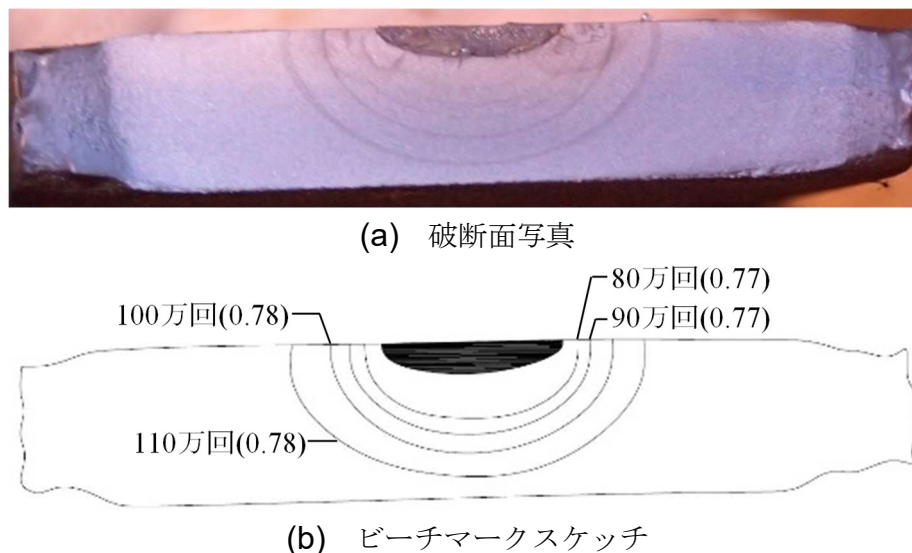


図 4-21 破面状況 <sup>4-1)</sup>

#### 4-4-3. K 値ゲージの貼付精度について

K 値ゲージは長手方向に対し左右対称の構造となっていることから、内側ゲージ G1 と G2 は同様な値となり、外側ゲージ G3 と G4 も同様な値となると考えられる (図 4-1(b))。また、K 値ゲージによる計測は、弾性範囲内の载荷荷重としているため、各計測値と公称応力との関係は線形となる。さらに、図 4-5 のひずみ分布より、G1, G2 の計測値が G3, G4 値よりも、大きくなると考えられる。この条件を満たしていることを、図 4-22 に示す公称応力とひずみとの関係より確認した。図 4-22 より、内側ゲージ G1 と G2 の計測値は、外側ゲージ G3 と G4 の計測値より大きくなっていることが確認できる。

K 値ゲージによる計測値と式(4-1)を用いて、K 値を推定する場合、式(4-11)に示す内側ひずみの和と外側ひずみの和の差分値  $\Delta\varepsilon$  が重要なパラメータとなる。

$$\Delta\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - (\varepsilon_3 + \varepsilon_4) \quad (4-11)$$

上述したように各計測値 ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  および  $\varepsilon_4$ ) は公称応力と線形の関係があることから、ひずみの和の差分値  $\Delta\varepsilon$  も線形関係となる。  $\Delta\varepsilon$  と公称応力の関係を図 4-23 に示す。また、図中には線形関係を評価する決定係数  $R^2$  を示している。図 4-23 より、

$\Delta\varepsilon$  と公称応力との決定係数は、0.9939 であり線形関係にあることが確認できる。図 4-22、図 4-23 の考察より、この計測ケースでは、K 値ゲージは精度良く貼付できていたと考えられる。

一方、K 値ゲージを精度良く貼付できていなかったと考えられる、K 値ゲージのひずみの計測値と公称応力の関係を図 4-24 に、 $\Delta\varepsilon$  と公称応力の関係を図 4-25 に示す。図 4-24 より、内側ゲージ G1 と G2 の計測値が、外側ゲージ G3 と G4 の計測値より必ずしも大きくなっていないことが確認できる。さらに、図 4-25 より、 $\Delta\varepsilon$  と公称応力との決定係数が 0.0217 を示したことから、線形関係にないことが確認できる。このような計測ケースでは、K 値ゲージの貼付が精度良くできていなかったと考えられる。本研究では、K 値ゲージの貼付精度を、「内側ゲージの計測値が外側ゲージの計測値より必ず大きくなること」および「図 4-23 に示す、 $\Delta\varepsilon$  と公称応力の決定係数が 0.99 以上にあること」の 2 項目から判断し、この条件を満たすデータのみを用いて K 値の推定および、き裂深さの推定を行った。

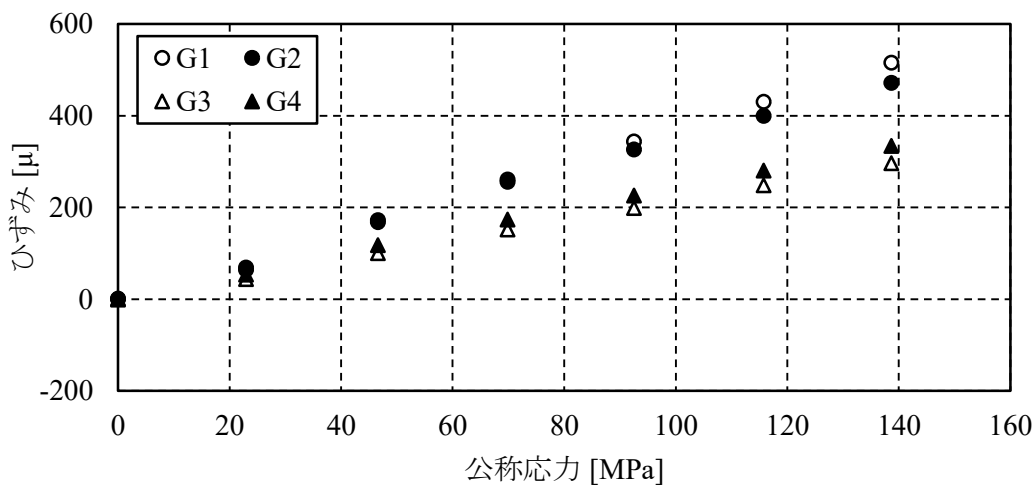


図 4-22 各ゲージ素子の計測値と公称応力との関係（貼付精度が良い場合）<sup>4-1)</sup>

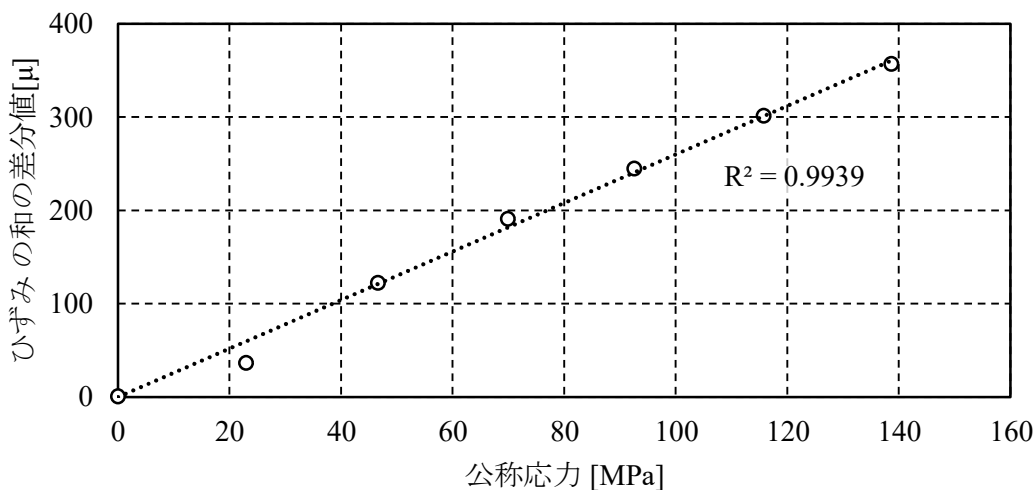


図 4-23 ひずみの和の差分値と公称応力との関係（貼付精度が良い場合）<sup>4-1)</sup>



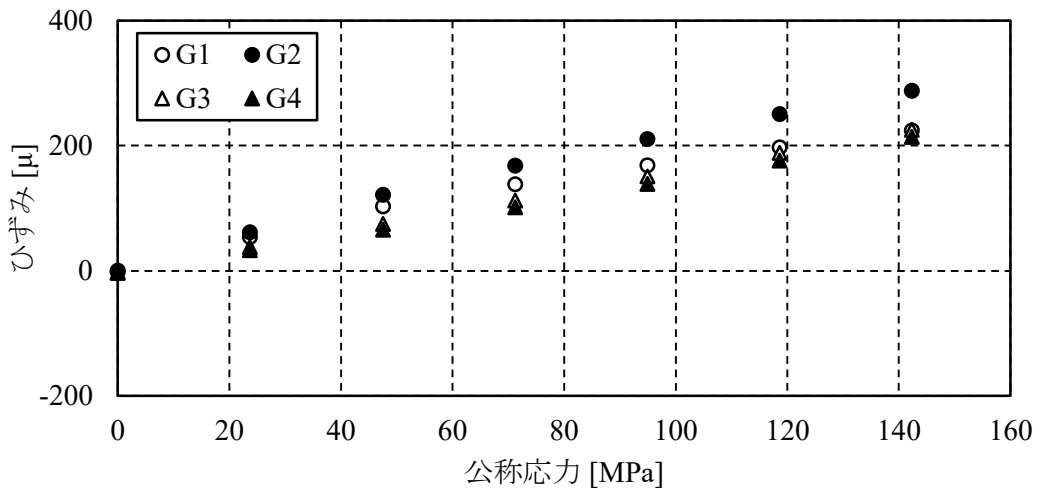


図 4-24 各ゲージ素子の計測値と公称応力との関係（貼付精度が悪い場合）<sup>4-1)</sup>

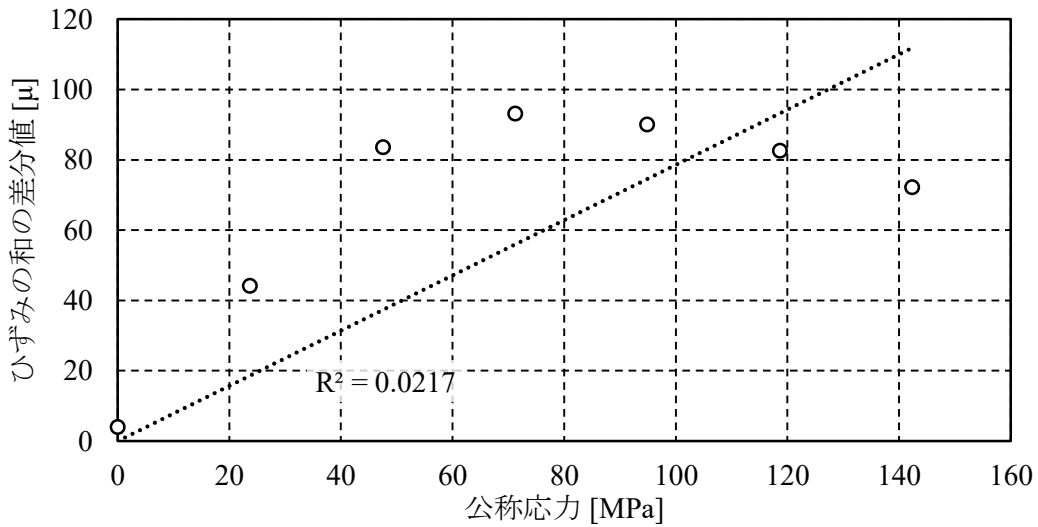


図 4-25 ひずみの和の差分値と公称応力との関係（貼付精度が悪い場合）<sup>4-1)</sup>

#### 4-4-4. き裂深さの推定結果

一例として、図 4-21(b)に示した 110 万回のき裂形状に対し、K 値の推定および、き裂深さの推定を行った。K 値ゲージにて計測したひずみの値と、一軸ひずみゲージを用いて計測した公称応力の値を式(4-1)および式(4-10)に代入し、K 値を推定した。推定した K 値と、K 値ハンドブックの式による K 値との関係を図 4-26 に示す。K 値ゲージの計測では、最小荷重 9.8 kN (1.0 tf) から最大荷重 58.8 kN (6.0 tf) を 9.8 kN (1.0 tf) ごとに载荷したため、6つのプロットとなっている。赤色の破線は、K 値ハンドブックの式による K 値を基準とした際の相対誤差が±17%となる線を示している。図 4-26 より、誤差±17%以内の精度にて、K 値を推定できていることが確認できる。

続いて、4章3節3項にて述べた手法を用いて、推定したK値から、き裂深さの推定を行った。推定したき裂深さと、き裂深さを推定した際の公称応力との関係を図4-27に示す。赤色の実線は、実際のき裂深さを、赤色の破線は、実際のき裂深さを基準とした際の相対誤差が±20%となる線を示している。図4-27より、それぞれの公称応力にて推定したき裂深さは、実際のき裂深さに対し、誤差±20%以内の精度にて、推定できていることが確認できる。なお、公称応力が大きくなるにつれて、推定精度が向上している理由は、計測時に含まれる電気ノイズ等のノイズに対するS/N比(Signal/Noise比)の向上によるものと考えられる。

最後に、他のき裂形状に対するき裂深さの推定結果を図4-28に示す。図4-28に示す実際のき裂深さ(横軸)一つの結果に対し、複数のプロットがある理由は、K値計測時の載荷荷重9.8 kN (1.0 tf) から58.8 kN (6.0 tf) までの9.8 kN (1.0 tf) ごとに推定したき裂深さを示しているためである。図4-28より、非貫通の疲労き裂の深さは、誤差±28%以内の精度にて推定することができた。また、その推定結果は、実際のき裂深さに比べ、小さくなる傾向が見られた。

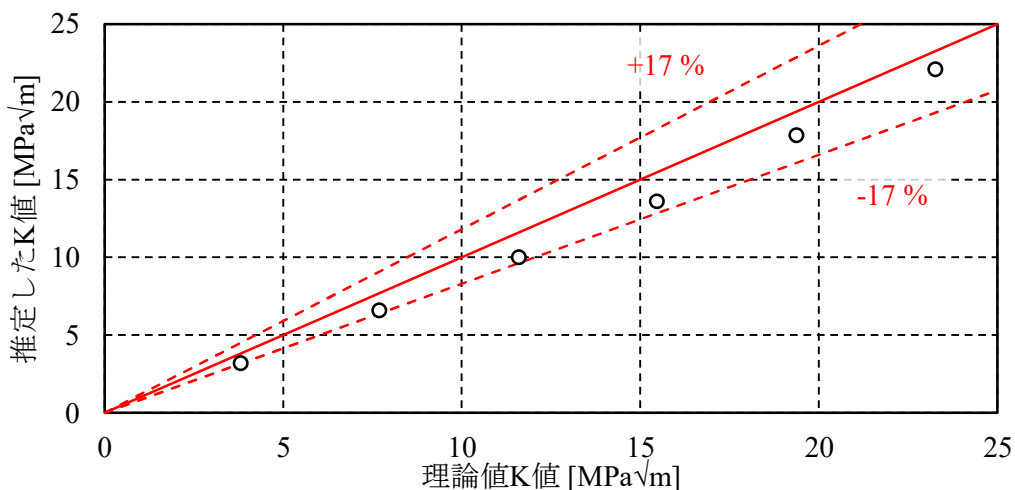


図4-26 推定したK値とK値ハンドブックのK値の関係<sup>4-1)</sup>

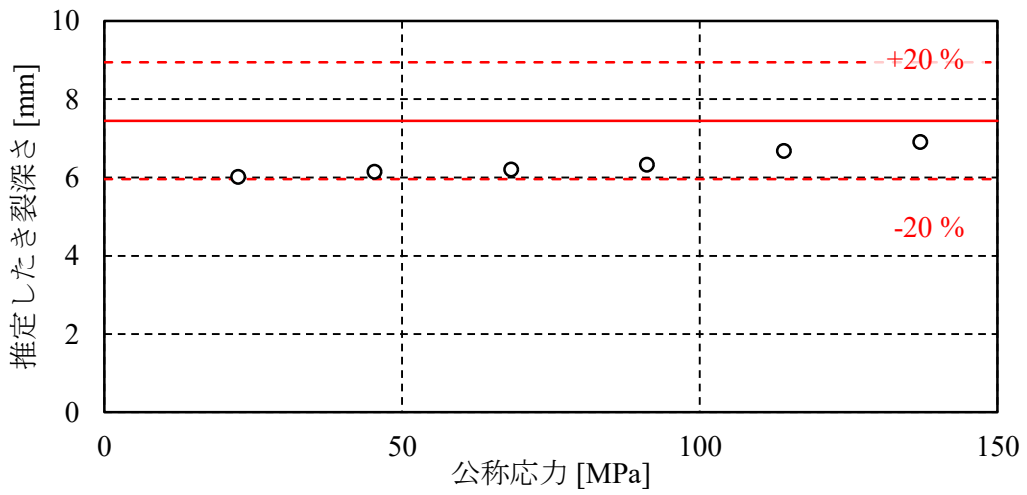


図 4-27 推定したき裂深さと推定した時の公称応力との関係<sup>4-1)</sup>

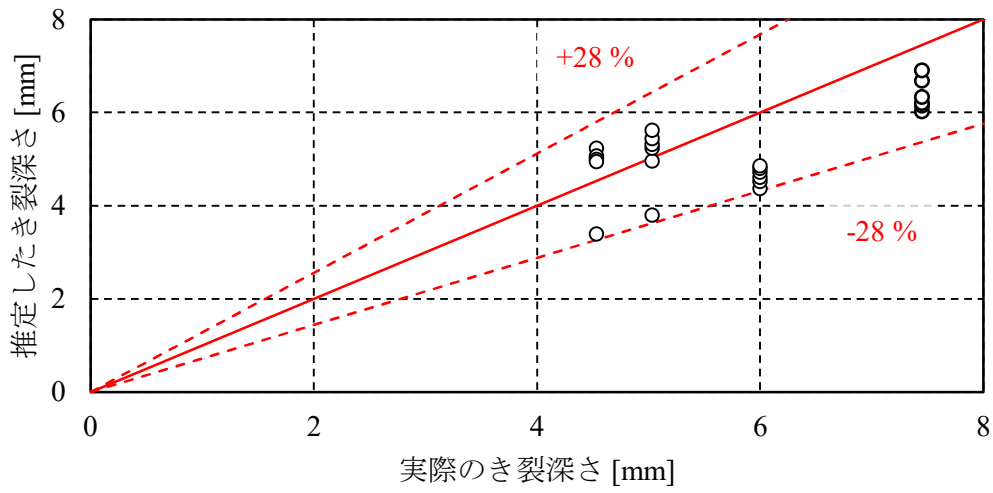


図 4-28 推定したき裂深さと実際のき裂深さとの関係<sup>4-1)</sup>



## 4-5. 総括

本章では、K 値ゲージによる疲労き裂の深さ推定を行った。得られた知見を以下に示す。

- a) 提案した補正式（式(4-10)）を用いることにより、非貫通き裂に対しても K 値ゲージを用いて、誤差±12 %以内の精度にて K 値を推定できる可能性があることを、有限要素解析により確認した。
- b) 疲労き裂の形状に依らず、K 値ゲージにより、誤差±15 %以内の精度にて、非貫通き裂に対するき裂深さを推定できる可能性があることを、有限要素解析により確認した。
- c) K 値ゲージ素子 (G1, G2, G3 および G4) にて計測したそれぞれの値の大小関係および、ひずみの和の差分値と公称応力との関係から、K 値ゲージの貼付精度を判断できることを、引張試験片による静的载荷試験により確認した。
- d) 引張試験片による疲労試験を通じ、疲労き裂の形状に依らず、K 値ゲージを用いて推定した K 値、鋼材寸法(板厚, 板幅), 公称応力, き裂幅から、き裂深さを誤差±28 %以内の精度にて推定した。また、その推定結果は、実際のき裂深さに比べ、小さくなる傾向が見られた。

## 参考文献

- 4-1) 森近翔伍, 関屋英彦, 田井政行, 高木真人, 丸山收, 三木千壽 : K 値に基づく一様な引張荷重下の平板における半楕円き裂深さの推定の試み, 土木学会論文集 A2 (応用力学), 76 卷 1 号, pp. 48-57, 2020.
- 4-2) 曾場知世, 関屋英彦, 森近翔伍, 丸山收, 田井政行, 高木真人, 三木千壽 : K 値ゲージを用いた疲労き裂深さの同定, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会講演概要集, I-129, 2019.
- 4-3) Murakami, Y., Aoki, S., Hasebe, N., Itoh, Y., Miyata, H., Miyazaki, N., Terada, H., Tohgo, K., Toya, M. and Yuuki, R.: Stress Intensity Factors Handbook, Vol. 2, Committee on Fracture Mechanics The Society of Materials Science, pp.712-722, 1987.

# 第 5 章 溶接止端部における K 値ゲージを用いた 疲労き裂の深さ推定

## 5-1. 概説

これまでは、平板に発生した疲労き裂を対象とし、溶接部の影響を考慮しない検討を行ってきた。そのため、溶接部を有する実橋梁への適応性が不明である。このことから、本章においては、2 節にて面外ガセット溶接試験体を用いて疲労試験を実施し、4 章にて提案した手法に基づき、溶接止端部から生じた疲労き裂の深さを推定する。3 節では、有限要素解析を通して溶接止端部近傍のひずみ分布を確認し、溶接ビードが K 値ゲージの計測に与える影響について分析した。

## 5-2. 面外ガセット溶接試験体を用いた疲労試験

### 5-2-1. 試験概要

溶接止端部から生じた疲労き裂の深さ推定を目的とし、面外ガセットを模擬した試験片による疲労試験を実施した。本試験にて用いた試験片の正面図を図 5-1(a)に、試験片の側面図を図 5-1(b)に示す。引張試験片は全長 600 mm、幅 65 mm、厚さ 12 mm、溶接脚長 6 mm とした。また、ガセット部の寸法は、高さ 75 mm、幅 200 mm、厚さ 10 mm とした。本試験においては、疲労き裂を発生させるガセットを選定し、残った他の溶接止端部は、グラインダー処理を施した。疲労試験は、最小荷重を 3.92 kN、最大荷重を 81.9 kN、繰り返し速度を 6 Hz として正規载荷を行った。また疲労き裂の形状と寸法を確認する目的とし、正規载荷 10 万回ごとに上限応力を維持しながら、応力範囲を 1/2 とする载荷を行い、ビーチマークを導入した。疲労試験は、試験片が破断した正規载荷 137.0 万回まで実施した。

続いて、K 値ゲージの設置状況を、図 5-2 に示す。K 値ゲージの貼付は、K 値ゲージの中心が疲労き裂の先端に一致するよう位置を調整した。疲労き裂の先端の確認および K 値ゲージの調整は、マイクロスコープを用いて行った。K 値ゲージの貼付後は、試験片に対し静的载荷を行い、その際に生じる静的なひずみ応答を計測した。载荷条件は最小荷重を 9.81 kN、最大荷重を 78.5 kN とし、9.81 kN ごとに計測を行った。

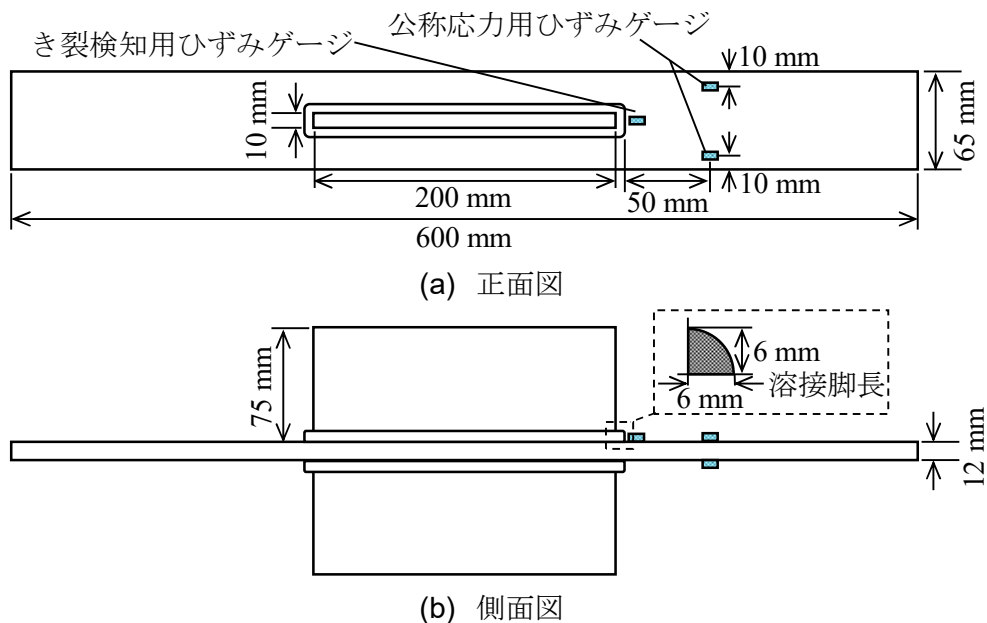


図 5-1 面外ガセット溶接試験体の寸法

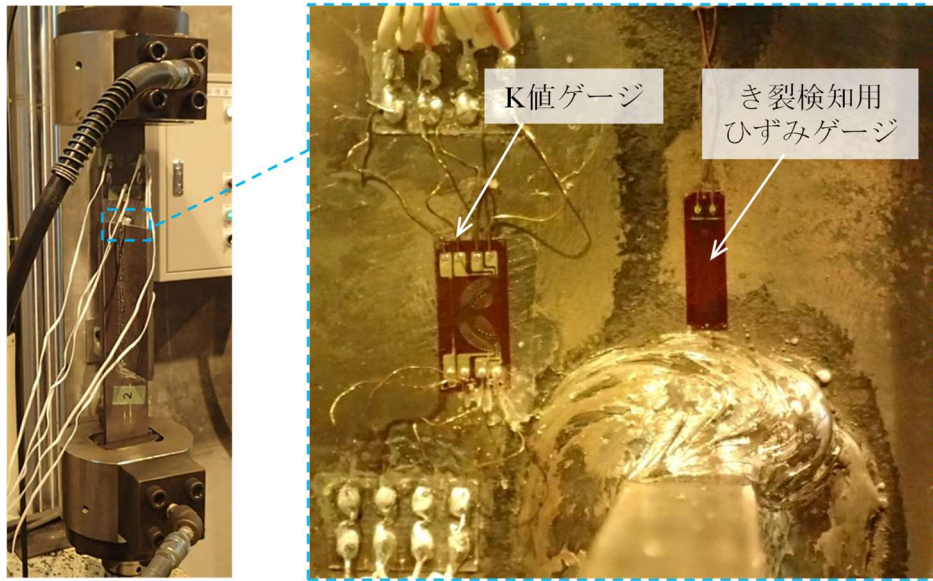


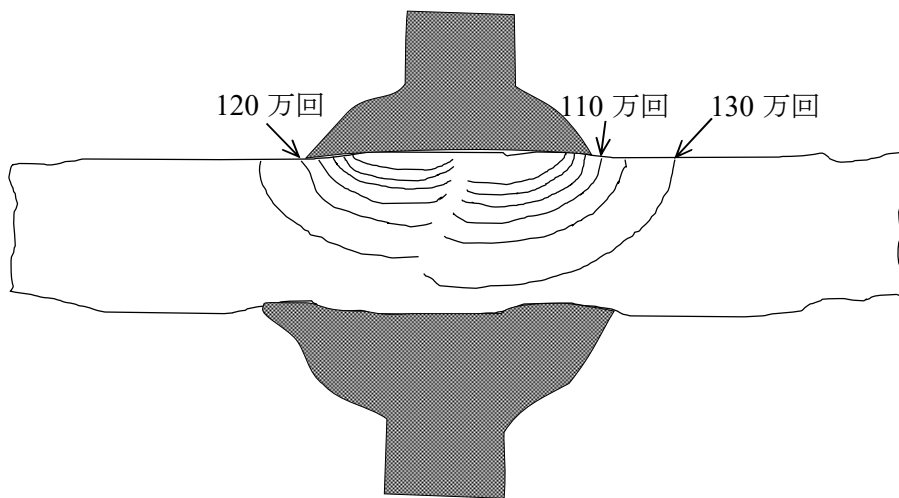
図 5-2 K 値ゲージの貼付状況

### 5-2-2. き裂深さの推定結果

試験片に導入されたビーチマークを観察することにより、き裂の進展状況を確認した。疲労破面に残されたビーチマークの外観を図 5-3(a)に、ビーチマークのスケッチを図 5-3(b)に示す。また、計測した各ビーチマークのき裂幅とき裂深さを表 5-1 に示す。疲労き裂は、正規載荷 70 万回から 80 万回の間が発生し、半楕円状にき裂が進展していることを確認できる。本研究では、疲労き裂が溶接止端から離れ、K 値ゲージの貼付が可能となった正規載荷 110 万回以降のき裂形状を対象とした。



(a) 破断面写真



(b) ビーチマークスケッチ

図 5-3 破面状況

表 5-1 ビーチマーク寸法

载荷回数 [万回]	き裂幅 [mm]	き裂深さ [mm]
80 万回	8.6	1.8
90 万回	16.6	2.6
100 万回	17.4	3.5
110 万回	20.5	5.2
120 万回	23.1	6.2
130 万回	29.0	9.2

続いて、K 値ゲージの貼付精度を検証するため、ビーチマークから読み取ったき裂先端と、ゲージ中心の位置関係を確認した。一例として、正規载荷 130 万回における K 値ゲージとき裂先端の位置関係を図 5-4 に示す。図 5-4 より、4 mm 程度のズレを確認できるが、他の試験と比較すると、良い貼付精度であった。本項は、この K 値ゲージにより計測されたひずみ値と、これまでの提案手法をもとに、き裂深さの推定を行った。これまでの提案手法に基づいて算出した補正 K 値の結果と、補正 K 値によるき裂深さの推定結果を、図 5-5 および図 5-6 に示す。図 5-5 および図 5-6 より、誤差が最大 60 %を示したことから、溶接止端における K 値ゲージのき裂深さの推定には、課題が残る結果となった。

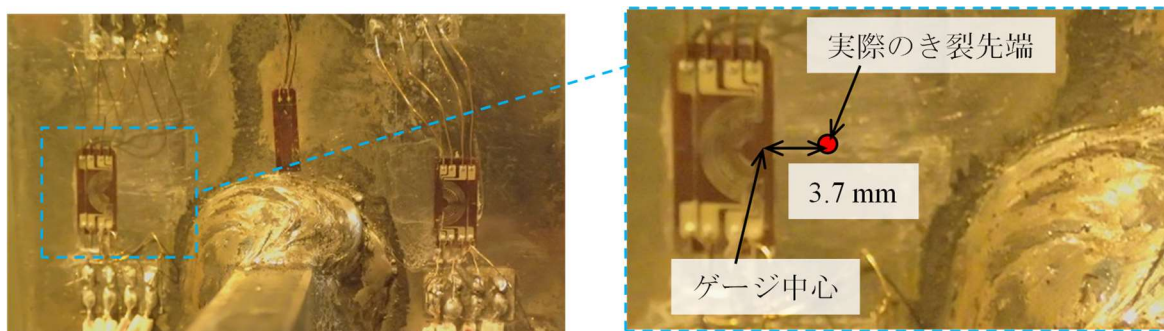


図 5-4 K 値ゲージの貼付とき裂先端の関係

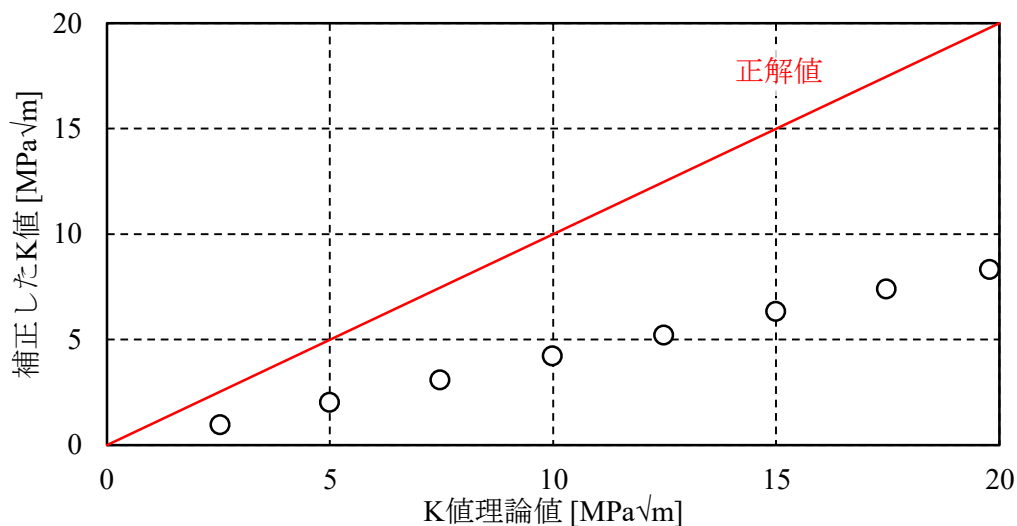


図 5-5 K 値ゲージによる K 値の推定値と K 値の理論値の関係

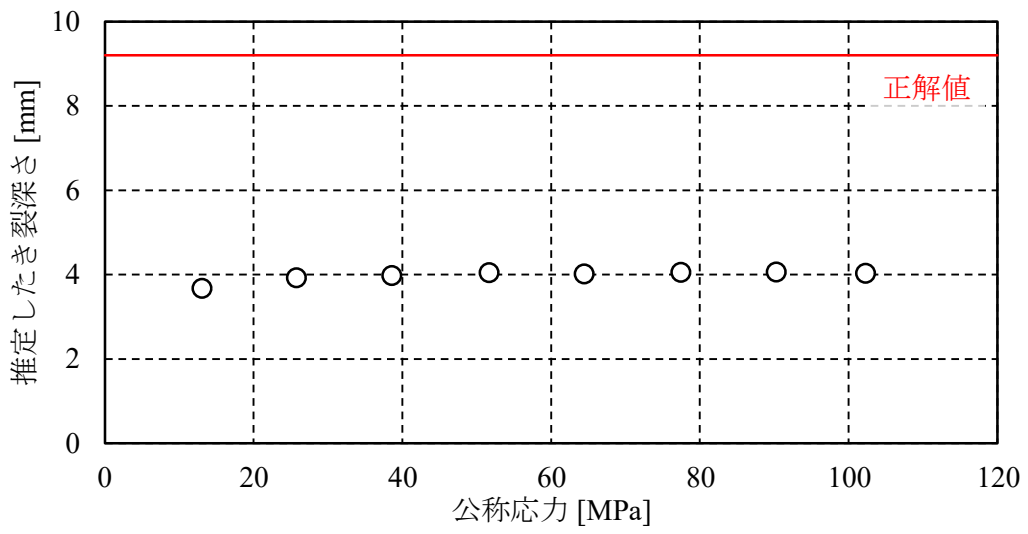


図 5-6 K 値ゲージによる K 値から推定したき裂深さと公称応力の関係



## 5-3. 解析による面外ガセット溶接部に対する K 値ゲージの適用性検証

### 5-3-1. 解析概要

前節において、溶接止端部のき裂深さの推定を K 値ゲージにて試みたが、提案したき裂深さの推定手法では、算出精度に課題が残った。本節においては、有限要素解析を通して、その要因について検討し、回し溶接部が周辺のひずみ分布にどのような影響を与えるのかを確認した。

有限要素解析は、ABAQUS6.14 を用いて行い、前述の実験から得られたき裂形状(表 5-1)に基づいて、モデルを作成した。検討したき裂形状は、溶接止端から母材に進展した直後(正規載荷 110 万回)、母材進展の中期(正規載荷 120 万回)、母材進展の後期(正規載荷 130 万回)の 3 パターンとし、き裂が進展するほど、き裂の先端が溶接止端から離れていくモデルである。

本解析では、はじめにガセットなしの平板モデルを作成し、疲労き裂を有するモデルの正当性を確認した。作成した平板モデルを図 5-7 に示す。平板モデルは、対称性を考慮した 1/2 モデルとし、対称条件として対称面の軸方向変位を固定した。モデルの正当性は、4 章 3 節 2 項にて行った K 値による手法を採用し、5 番目の環状要素における J 積分を用いて評価した。また、J 積分から K 値の算出は式(4-5)を、算出した J 積分からの K 値との比較は、式(4-6)に示した K 値ハンドブックを用いて行った。表 5-1 に示した各き裂形状における J 積分からの K 値と K 値ハンドブックからの K 値の関係を図 5-8 に示す。図 5-8 より、J 積分からの K 値と K 値ハンドブックからの K 値は、良い一致を示していることから、作成した平板モデルの正当性を確認できた。

続いて、K 値ゲージにて算出した、それぞれのゲージにおけるひずみ値の関係について検討した。一例として、き裂幅 20.5 mm、き裂深さ 5.2 mm における各ゲージにおけるひずみ算出値を図 5-9 に示す。図 5-9 より、平板下における K 値ゲージのひずみの解析値は、内側ゲージ G1 と G2 は同様な値となり、外側ゲージ G3 と G4 も同様な値であることが確認された。

以上の検討を行った平板モデルに対し、溶接モデルを介してガセットモデルを結合させた。作成した面外ガセットモデルを図 5-10 に示す。境界条件は、正当性を確認した平板モデルと同様、対称面の軸方向変位を固定とした。載荷条件は、前節の実験条件と同一とするために、対称面と正反対の面に対して、公称応力が 104.9 MPa となるように、引張荷重を載荷した。

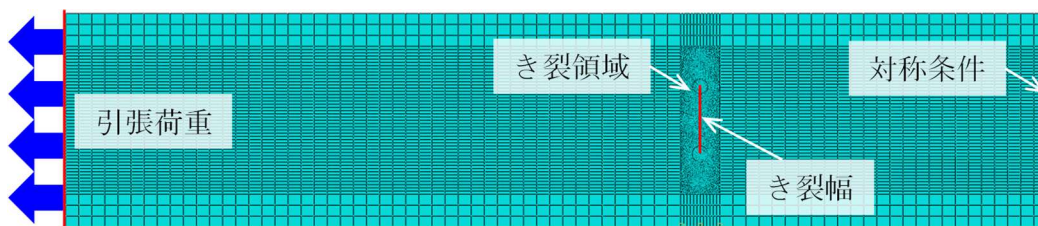


図 5-7 解析モデルの概要

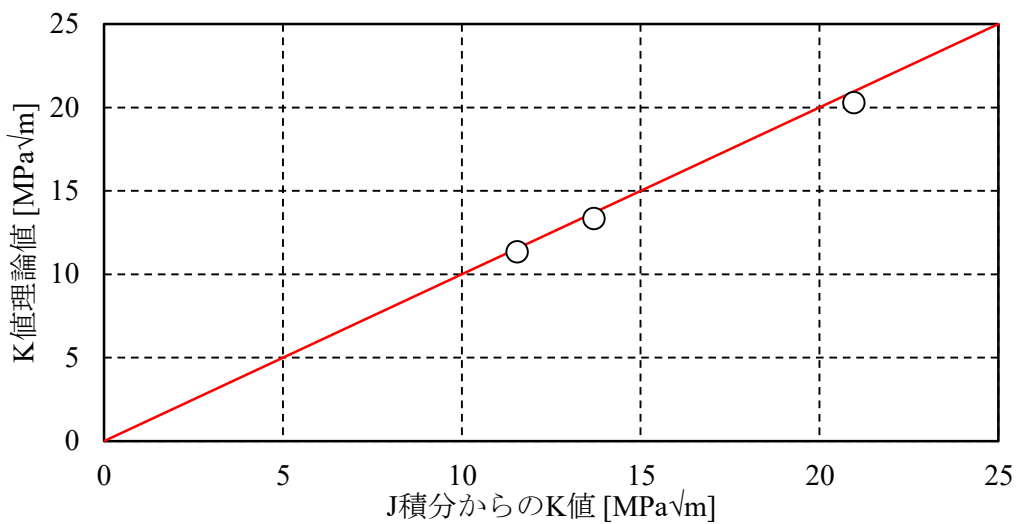


図 5-8 J積分による K 値と理論値 K 値の関係 (平板)

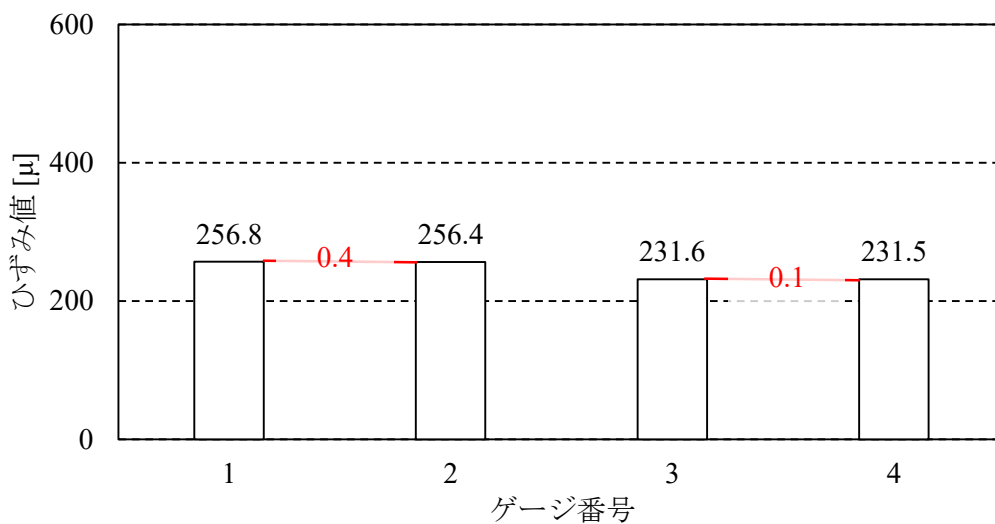


図 5-9 各ゲージにおけるひずみ解析結果 (平板)

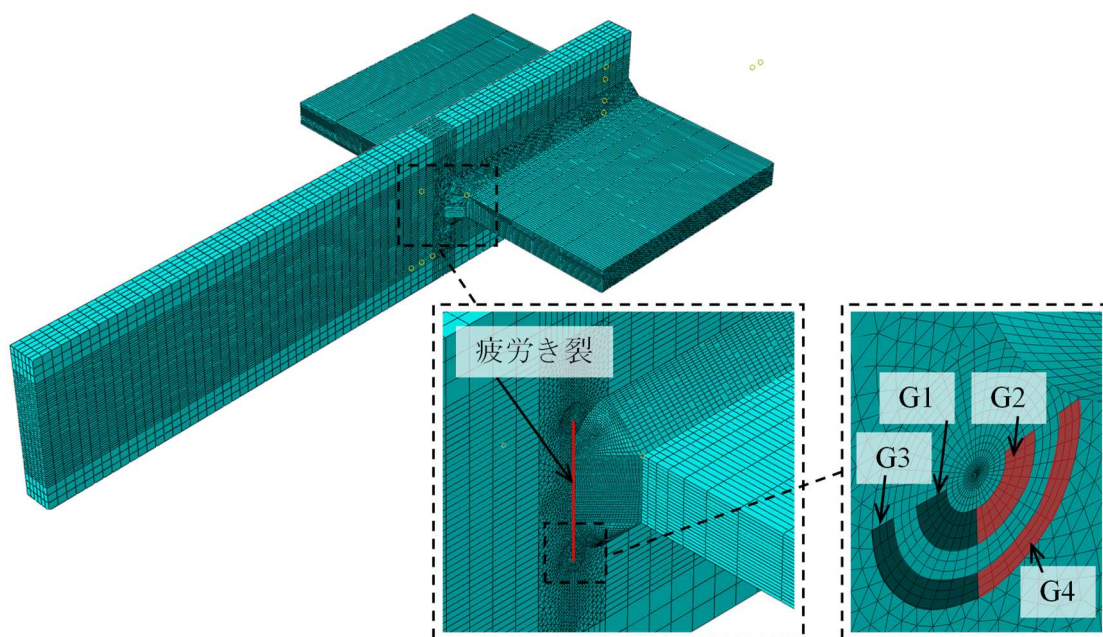


図 5-10 面外ガセットモデルの概要

### 5-3-2. 解析結果

一例として、き裂幅 20.5 mm、き裂深さ 5.2 mm における、き裂先端付近の荷重方向に対するひずみ分布を図 5-11 に示す。図 5-11 より、き裂先端にひずみ分布が集中していることを確認できる。また、溶接止端側では溶接ビードによる応力集中が、表面のひずみ分布に影響を及ぼしていることが確認できる。

続いて、K 値ゲージにて計測可能なひずみ値を解析的に算出した。正規荷重 110 万回、正規荷重 120 万回および正規荷重 130 万回におけるゲージ G1 からゲージ G4 までのひずみ算出結果を図 5-12(a)、図 5-12(b)および図 5-12(c)に示す。平板下における図 5-9 の結果とは異なり、溶接側にあるゲージ G2 およびゲージ G4 のひずみ値が、ゲージ G1 およびゲージ G3 のひずみ値と比べ、大きな値を示している。また、き裂の進展に伴い、溶接止端からき裂の先端が離れていくと、溶接側のゲージ値と平板側のゲージ値との差は、小さくなった。これは、溶接止端に起因する応力集中の影響を、溶接側にあるゲージ G2 およびゲージ G4 が捉えており、溶接ビードから離れるほど、その影響が小さくなるためだと考えられる。

続いて、算出した各ゲージのひずみ値に基づいて K 値の推定を行った。K 値の推定には、4 章 3 節 3 項にて提案した K 値の算出手法を用いて実施した。正規荷重 110 万回、120 万回および 130 万回における、K 値の推定結果を表 5-2 に示す。表 5-2 より、き裂形状が大きくなるほど、精度の低下が見られた。以上の結果より、溶接止端部における適用には、さらなる検討が必要であることが示された。

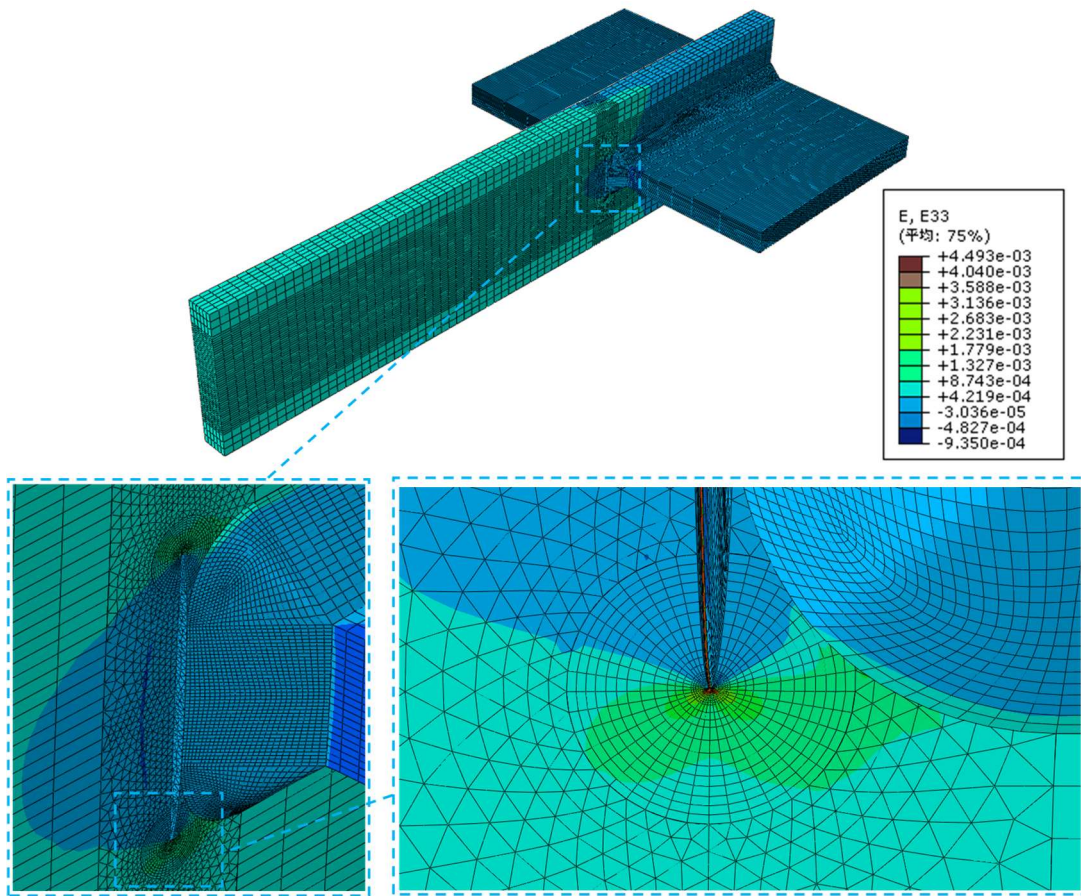
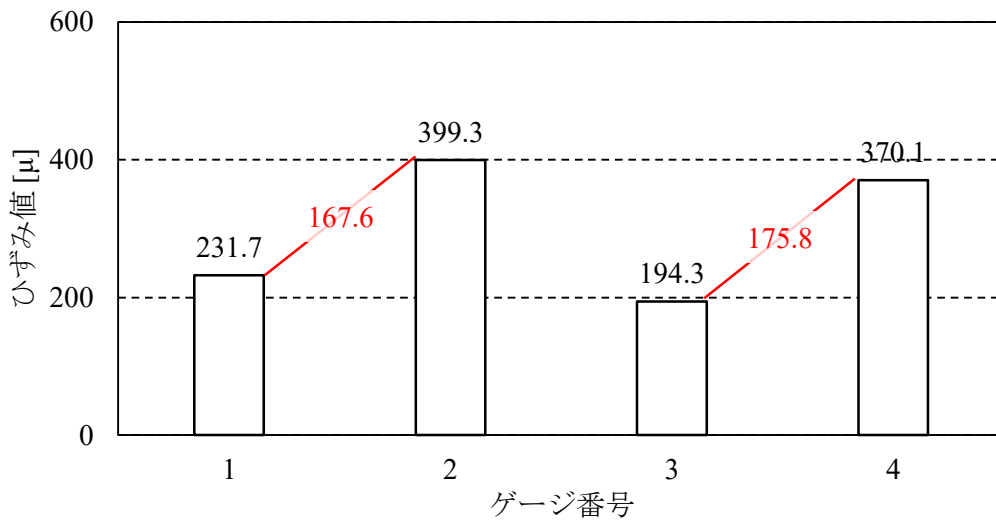
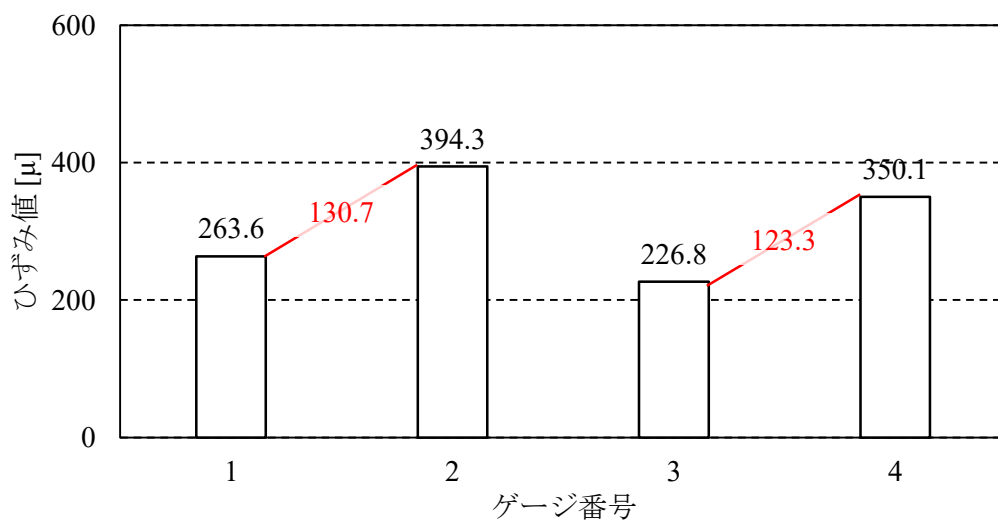


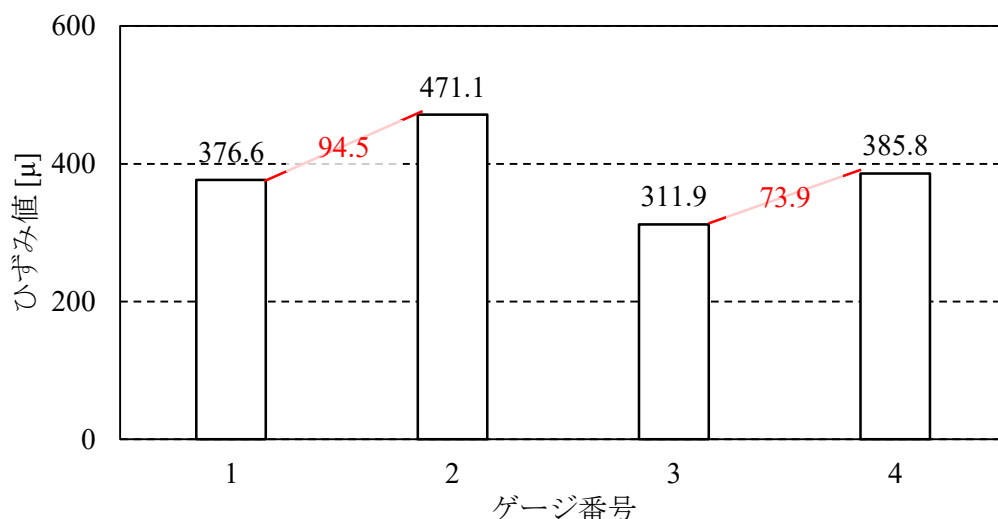
図 5-11 面外ガゼットモデルにおけるひずみ解析結果



(a) 溶接止端から母材に進展した直後 (正規載荷 110 万回)



(b) 母材進展の中期（正規載荷 120 万回）



(c) 母材進展の後期（正規載荷 130 万回）

図 5-12 各き裂形状におけるひずみ解析結果

表 5-2 解析による K 値の算出結果と理論値の比較

載荷回数 [万回]	解析による K 値 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]	理論値 K 値 [ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ]	誤差率 [%]
110	6.83	11.35	-39.8
120	7.42	13.35	-44.4
130	10.26	20.29	-49.4

## 5-4. 総括

本章では、溶接部から生じた疲労き裂に対し、き裂深さを推定した。以下に、得られた知見をまとめる。

- a) 平板にて提案した手法が、応力集中のある溶接止端部においても適用できることを確認するため、面外ガセット試験体を用いたモニタリングを実施した。その結果、溶接止端部における適用性を確認できず、今後の課題である。
- b) 溶接止端が  $K$  値ゲージ計測に与える影響を確認するため、有限要素解析を行い、疲労き裂の先端および溶接止端の近傍のひずみ分布を確認した。その結果、溶接ビードによる応力集中を受け、 $K$  値の計測に影響を与えていることを確認した。そのため、溶接止端による応力集中を考慮した手法が必要であり、今後の課題である。



## 第6章 結論

### 6-1. 各章の総括

疲労損傷に対し、最適な対策を施すことを目的とし、これまで困難であった常時監視や、定量的な評価を可能とするセンサ技術を活用した維持管理システムについて検討した。2章と3章では、疲労損傷の監視を行うことを目的とした圧電素子センサによるモニタリングシステムを、4章と5章では、発見した疲労損傷の規模を把握することを目的としたK値ゲージによる調査方法を検討した。圧電素子センサにより、疲労損傷の発生および進展を検知できることを、K値ゲージにより、平板下におけるK値とき裂深さの推定が可能であることを確認した。以下に、各章のまとめを述べる。

#### 第1章

第1章では、疲労損傷の事例を述べるとともに、維持管理が抱える課題について説明した。また、維持管理におけるセンサの活用方法を述べるとともに、本研究にて圧電素子センサとK値ゲージを選定した理由についても述べた。

#### 第2章

第2章では、圧電素子センサを活用した疲労損傷の検知手法の開発を目的とし、基礎試験を実施した。まず、引張試験片に対し、圧電素子センサとひずみゲージを貼り付け、圧電素子センサの出力電圧とひずみの関係を分析した。その結果、圧電素子センサの出力電圧は、ひずみの変化に依存していることを確認し、出力電圧を1階積分した電圧積分値は、載荷速度1 Hz以下のひずみ応答と線形関係にあることを明らかにした。さらに、このセンサ特性を持つ圧電素子センサを実橋梁に適用できることを確認するため、供用下の橋梁における活荷重のひずみを計測した。その結果より、圧電素子センサを実橋梁に適用できることを明らかにした。続いて、疲労き裂によるセンサの出力特性を確認するために、引張試験片と面外ガセットが取り付けられたI桁試験体による疲労試験を実施した。この試験を通して、平板下および溶接止端における疲労き裂を圧電素子センサにて検知できることを示した。

#### 第3章

第3章では、2章にて提案した圧電素子センサによる損傷検知を実橋梁へ適用する手法を検討するため、供用下の橋梁において計測を行った。まず、外力が変動する橋梁下において、その外力を把握する手法を検討した。本研究では、MEMS加速度センサによる変位計測を通して、把握する手法を検討した。その結果、MEMS加速度センサにより、精度良く変位を計測できることを確認し、外力の把握が可能であることを

明らかにした。続いて、圧電素子センサによる活荷重のひずみ応答計測を目的とし、面外ガセット溶接止端部に、圧電素子センサとひずみゲージを設置した。各センサの計測結果より、圧電素子センサにて活荷重によるひずみ応答を把握できることを確認し、実橋梁においても疲労損傷のモニタリングができる可能性を示した。

#### 第4章

圧電素子センサによる疲労損傷の発見後を想定し、K 値ゲージによる損傷規模の把握手法について検討した。まず、非貫通き裂に対する K 値の推定方法を検討することを目的とし、50 通りの有限要素解析を実施した。本研究では、従来の K 値推定式を用いて算出した K 値を補正する新たな手法により、K 値を精度良く推定できることを確認した。さらに、大型の K 値ゲージと小型の K 値ゲージの計測精度を有限要素解析により検証し、本研究にて用いた小型の K 値ゲージの有効性を確認した。続いて、K 値ハンドブック式を用いたき裂深さの把握手法により、推定した K 値、鋼材寸法（板厚、板幅）、公称応力、き裂幅に基づく新たなき裂深さの推定手法について提案した。最後に、平板下におけるき裂深さの推定を目的とした引張試験片による疲労試験を行い、K 値ゲージによるき裂深さの推定精度について検証した。

#### 第5章

第5章では、第4章にて提案したき裂深さの推定手法が、溶接止端部における疲労き裂に対しても適用できるのかを検証するため、面外ガセット溶接試験体による疲労試験と K 値ゲージによる計測を行った。その結果、K 値ゲージによる計測値と理論値となるハンドブックによる K 値の間に差異が見られた。そのため、有限要素解析を用いて、溶接止端部による応力集中が K 値ゲージの計測に与える影響について検証した。解析対象とした疲労き裂のモデルは、溶接止端から母材に進展した直後、母材進展の中期、母材進展の後期の3通りとし、各ゲージにおけるひずみ値を解析的に算出した。その結果、溶接止端側のゲージは反対側のゲージと比較し、大きな値を確認でき、その差分値は溶接止端に近いほど、大きな値となった。以上より、K 値ゲージの計測に対し、溶接止端部による応力集中の影響を受けていることを明らかにし、溶接止端部における K 値を推定するためには、その影響を考慮する必要があるといえる。



## 6-2. 課題と今後の展望

本研究では、センサ技術を活用した疲労損傷の維持管理システムについて検討した。これらの検討結果を踏まえ、解決すべき課題と今後の方針について述べる。

圧電素子センサの出力とひずみ積分値の関係について検証した有限要素解析の結果より、センサ貼付部のひずみ積分値と圧電素子センサの出力には線形性を有することが示された。したがって、対象部位におけるひずみ分布の解析により、最適なセンサ形状やセンサ位置の分析につながることを確認した。今後は、実橋梁モデルを有限要素解析により作成し、車両が走行した際の対象部位におけるひずみ分布から、最適なセンサ形状やセンサ位置の検討が必要である。

続いて、圧電素子センサによる疲労損傷の検知は、供用中の実橋梁において実地試験を行い、圧電素子センサにてひずみ応答を、MEMS 加速度センサにて変位応答を捉えられる可能性を示した。本システムの実用化に向けては、長期計測を行い、センサの安定性評価やモニタリング指標である  $R$  (電圧積分値の積分値 / 変位応答の積分値) の出力安定性を確認する必要がある。また、車両の走行位置や、面外方向にひずみが生じた際の圧電素子センサの出力の違いなど、幅広いデータに対する分析が必要といえる。

最後に、 $K$  値ゲージによるき裂深さ推定においては、平板下における疲労き裂に対し、 $\pm 28\%$  以内の精度にて推定が可能であることを確認したが、面外ガセットなどの溶接止端部においては、溶接止端部による応力集中が  $K$  値ゲージの計測に対し、影響を及ぼすことを確認した。そのため、溶接止端部に対し  $K$  値ゲージの適用に向け、新たなき裂深さの推定手法を検討する必要があるといえる。

本研究にて得られた知見より、圧電素子センサのセンサ特性を考慮した疲労き裂の発生および進展の検知と、平板下における  $K$  値ゲージによるき裂深さの推定が可能であることを確認した。圧電素子センサの出力安定性や最適化、溶接止端部における  $K$  値ゲージの適用には、さらなる検討が必要となるが、本研究にて提案したモニタリング手法は、疲労損傷に対する維持管理が抱える課題に対し、解決の一助になると考えられる。

## 謝辞

本論文は、2016年から開始された「センサを用いた疲労損傷に対するセンシング技術」に関する研究の成果についてまとめたものです。この論文の作成にあたっては、多くの皆様のご協力、ご尽力をいただきました。深く感謝を申し上げます。

指導教員であります丸山収先生（東京都市大学都市デザイン学部都市工学科教授）には、研究を進めるにあたり貴重なご意見をいただきました。また、研究のみではなく研究者として大事なことを教えていただきました。

また共同研究として指導および本論文の副査を担当してくださいました関屋英彦先生（東京都市大学都市デザイン学部都市工学科准教授）からも、多くの学びをいただきました。私が研究を本格的に開始した2015年度から約6年間、親身になって指導していただき、研究内容に関するご助言だけでなく、研究発表の技術や研究の心構えなど、今後も活用できる貴重な技術を教えていただきました。教えていただいた技術は今後も大切に、一研究者として活躍できるように、尽力していきたいと存じます。

今回、本論文の副査として白旗弘実先生（東京都市大学都市デザイン学部都市工学科教授）と、焦瑜先生（東京都市大学都市デザイン学部建築学科准教授）にご担当いただきました。白旗弘実先生には、貴重なご意見をいただいた上、本研究の疲労試験に際しては、試験機の使い方などをご教示いただき、本研究の貴重なデータを得る際にご尽力いただきました。焦瑜先生には、建築分野の視点からの貴重なご意見をいただき、本論文をよりよい内容とすることができたと存じます。

本論文に関する研究につきましては、田井政行先生（琉球大学工学部工学科助教）から、疲労き裂を含む有限要素解析において、多大なるご協力をいただきました。また、三木千壽先生（東京都市大学学長）からは、ゼミなどを通して温かくも厳しいご意見をいただきました。その甲斐ありまして、研究の質をあげられたものと感じております。また、博士後期課程に進学するにあたり、多くの相談に乗っていただきました。この進路に進めたのも三木先生にご助言いただいたおかげと感じております。

本論文にて行われた実験につきましては、多くの方にご協力・ご尽力いただきました。圧電素子センサの製作および提供に、株式会社セラテックエンジニアリング様、MEMS 加速度センサの設置および計測に、株式会社セイコーエプソン様、K 値ゲージの提供および計測に、株式会社共和電業様のご協力のもと実施されました。また、実橋梁における計測では、株式会社首都高速道路様、一般財団法人首都高速道路技術センター様、株式会社首都高技術様に、大型試験体による疲労試験には、施工技術総合

研究所様に多大なるご協力・ご尽力いただきました。各計測においては、これまでにない非常に重要なデータの取得することができ、センサによる疲労損傷センシングの実現に向け、大きな一歩を踏み出すことができたものと感じております。この場を借りまして、お礼申し上げます。誠にありがとうございました。

最後に、学部入学から9年間の長い間、支えてくれた家族に感謝いたします。誠にありがとうございました。