

鋼橋の疲労損傷のデータベースの構築と
その応用に関する研究

2021年5月

横山 薫

概要

本研究では、まず、国内外の公表されている資料から鋼橋の疲労損傷と補修事例を約200事例集め、インターネット上のデータベースを構築した。データベースのプラットフォームとして、Wiki型コンテンツ管理システムを採用することで、Wikipediaのように利用者がWebブラウザを使って閲覧や投稿が可能なデータベースとした。また、収録した事例を基に、損傷原因による分類等のいくつかの分析を行った。

次に、都市高速道路会社の実際の点検結果をもとに、主桁と横桁の取り合い部の疲労損傷のデータベースを構築するとともに、そのデータベースを使って、当該部位の構造ディテールと損傷レベルの関係について分析を行った。また、既存のデータを組み合わせることによって、各疲労損傷の情報に緯度・経度情報を追加し、地理情報システム上にプロットすることで、当該疲労損傷の「見える化」等を試みた。

更に、構築したデータベースに収録した疲労損傷に関する情報を活用し、鋼橋の疲労損傷の近接目視点検を学習することができる教育ソフトを開発し、その有用性を把握した。

キーワード：疲労損傷，データベース，主桁-横桁取り合い部，見える化，近接目視点検，教育ソフト

目 次

| | |
|--|----|
| 第1章 序論..... | 1 |
| 1.1 研究の背景..... | 1 |
| 1.2 本研究の目的..... | 3 |
| 1.3 本論文の構成..... | 4 |
| 第2章 国内外の各種メディアから収集した鋼橋の疲労損傷と補修事例のデータベースの構築とその分析..... | 5 |
| 2.1 はじめに..... | 5 |
| 2.2 新データベースの概要..... | 5 |
| 2.2.1 コンセプト..... | 5 |
| 2.2.2 プラットフォーム..... | 6 |
| 2.2.3 アドレス..... | 6 |
| 2.2.4 構成..... | 6 |
| 2.2.5 検索機能..... | 9 |
| 2.3 収録事例の分析..... | 10 |
| 2.3.1 補修方法と損傷原因..... | 10 |
| 2.3.2 損傷原因による分類..... | 13 |
| 2.3.3 損傷原因と補修方法の組合せ..... | 14 |
| 2.3.4 供用年数と損傷原因との関係..... | 14 |
| 2.3.5 損傷レベルによる分類..... | 15 |
| 2.3.6 溶接の不具合の種類..... | 17 |
| 2.4 まとめ..... | 17 |
| 第3章 実際の点検結果に基づく都市高速道路の主桁と横桁の取り合い部の疲労損傷データベースとその分析..... | 19 |
| 3.1 はじめに..... | 19 |
| 3.2 主桁と横桁との取り合い部の疲労き裂に関するデータベースの構築..... | 20 |
| 3.2.1 データベースの構築方法..... | 20 |
| 3.2.2 データベースの概要..... | 20 |
| 3.3 データベースを用いた分析..... | 21 |
| 3.3.1 仕口タイプと損傷レベル..... | 21 |
| 3.3.2 分析結果..... | 23 |
| 3.3.3 緯度・経度情報を用いたき裂発生箇所「見える化」..... | 25 |
| 3.3.4 累積等価繰返し回数とき裂発生箇所との関係..... | 26 |
| 3.4 まとめ..... | 28 |

| | |
|---|----|
| 第 4 章 データベースを応用した鋼橋の疲労損傷に関する近接目視点検教育ソフトの 開発..... | 29 |
| 4.1 はじめに..... | 29 |
| 4.2 教育ソフトの開発..... | 30 |
| 4.3 教育ソフトの構成..... | 31 |
| 4.3.1 計算装置..... | 31 |
| 4.3.2 視界模擬装置..... | 31 |
| 4.3.1 信号入力装置..... | 32 |
| 4.4 モデル化した橋梁と疲労亀裂..... | 32 |
| 4.4.1 モデル化した橋梁..... | 32 |
| 4.4.2 モデル化した疲労亀裂..... | 32 |
| 4.5 教育ソフトの利用方法..... | 34 |
| 4.5.1 模擬点検員の操作方法..... | 34 |
| 4.5.2 Learning mode..... | 35 |
| 4.5.3 Experience mode..... | 37 |
| 4.6 教育ソフトを利用した講習会とアンケートの実施..... | 39 |
| 4.7 まとめ..... | 42 |
| 第 5 章 結論..... | 43 |
| 謝辞..... | 47 |
| 参考文献..... | 48 |
| 付録 データベース収録事例..... | 55 |

第1章 序論

1.1 研究の背景

我が国の社会活動, 経済活動を支えている交通インフラの大動脈の構造物は経年50年を迎えはじめ, 鋼橋において疲労き裂の報告事例が多くなってきた. 典型的な一例として, 図1-1¹⁾に2006年10月に発見された, 一般国道25号(名阪国道)の山添橋(鋼3径間連続鈹桁橋, 橋長128.02m, 1971年竣工)の疲労き裂を示す. 本事例では主桁腹板を横桁下フランジの溶接部を起点として, 疲労き裂が発生し, 発見時には1mにも及ぶき裂となっており, 極めて危険な状況であったと考えられる.



(a) き裂発生箇所

(b) 疲労き裂詳細

図1-1 名阪国道・山添橋に発生した疲労き裂¹⁾

当該損傷事例の応急処置として, き裂進展防止のストップホールの施工と, き裂部へのあて板補強が応急処置として実施された(図1-2).



図1-2 山添橋に発生した疲労き裂に対する応急処置(ストップホールの施工とあて板補強)

本事例から示唆される教訓として, 以下の3点が挙げられる.

1点目は, き裂が発見された時点で, き裂長が1mにも及んでしまっていたという点である.

定期点検が適切に実施されていれば、より早い段階で発見され、構造物として危険な状態になる前に処置がなされ、安全性が確保できていたと考えられる。

2点目は、応急処置としてストップホールとあて板補強がなされているが、あて板にストップホールの観察孔が無く、対策後のき裂の進展の有無が確認できない構造となっているため、必ずしも適切な応急処置であったとは言えない点である。

3点目は、山添橋と同じディテールを有する鋼橋に対して、全国的な一斉点検が実施されなかった点である。主桁と横桁の取り合い部の疲労損傷は、主桁の脆性破壊を発生させる可能性の高い疲労損傷であり、鋼橋の疲労損傷の中でも最も注意が必要な疲労損傷である。従って、山添橋のき裂が発見された際に、同じディテールの部位を全国的に一斉点検する必要があったと思われるが、実際には実施されなかった。

1点目、2点目の対策としては、点検技術者の知識、技量の向上が必要である。その一つの手段として、近年のインターネット技術やアクセス環境の向上を利用し、鋼橋の疲労損傷と補修事例のデータベースを構築して、技術者がいつでも利用できる環境を整備することが考えられる。

既往の研究では、三木らが公表されている資料をもとに疲労損傷と補修事例のデータベースの構築を行っている^{2), 3)}。文献2)では、マイコン用データベース構築支援ツールを用いてパソコン上にデータベースを構築している。文献2)の段階では、年代が1980年代後半ということもあり、現在ほどインターネットの環境が良くないことから、インターネット上には公開されていない。

その後、インターネット技術が著しく発展し、文献3)では、写真や図などの画像情報を含めインターネット上のデータベースとして技術者の誰もが利用可能なものに発展させている。

また、点検技術者の教育方法にも工夫が必要と考えられる。

現状の点検技術者の教育はテキストによる座学と現地における実習によるものに大別されると考えられる。テキストによる座学教育は比較的容易に実施できるが、実際の構造の板組や溶接ビードといった構造詳細を十分に理解させることは難しい。他方、現地における実習は実構造物を見ることができるメリットがあるものの、現地の準備や安全性の確保に労力を要することや、1回で受講できる受講者の人数に制限があるなどのデメリットもある。

テキストによる座学や現地における実習を補完する新たな学習方法として、澤村ら⁴⁾はコンクリート橋を対象とし、橋梁点検技術者のためのVR技術を活用した損傷体験システムの開発を行っている。橋梁を診断する上で重要な目視点検技術を習得するためのVR技術による損傷体験システムを提案し、若手技術者へのアンケートにより、点検技術教育用として有用性があることを示している。

鋼橋の疲労損傷についても、テキストによる座学や現地における実習を補完する新たな学習方法の構築が必要と考えられる。

3点目については、各道路管理者において、管理している鋼橋の構造ディテールや、既に発生している損傷の情報を把握しておく必要がある。

山添橋の事例のような、主桁と横桁の取り合い部の疲労損傷は、主桁の脆性破壊を発生させる可能性の高い疲労損傷であり、鋼橋の疲労損傷の中でも最も注意が必要な疲労損傷である。当該部位については、通常のカセット板タイプのほか、様々な構造ディテールが採用されている。しかし、それらの疲労強度は低く、また、構造ディテールにより差がある。これは、道路橋の設計において疲労設計を取り入れてこなかったことに起因する。

従って、道路橋の設計に疲労設計が取り入れられる前に建設された、数多くの鋼橋を管理する必要がある都市高速道路会社等においては、特に当該部位の疲労損傷の発生位置や進展状況を把握しておく必要があると考えられる。

1.2 本研究の目的

本研究では、まず、基本構成は三木らの鋼橋の疲労損傷と補修事例のデータベースを継承し、プラットフォームを変更することで、利便性を向上させた新しいインターネット上のデータベースを構築する。また、データベースの収録事例として国内外の企業の技報、新聞、Webなどさまざまなメディアから近年の事例を追加するとともに、収録事例について、損傷原因による分類などの分析を行う。

次に、都市高速道路会社の実際の点検結果をもとに、主桁と横桁の取り合い部の疲労損傷のデータベースを構築するとともに、そのデータベースを使って、当該部位の構造ディテールと損傷レベルの関係について分析を行う。また、既存のデータを組み合わせることによって、各疲労損傷の情報に緯度・経度情報を追加し、地理情報システム上にプロットすることで、当該疲労損傷の「見える化」を試みる。

更に、新しいデータベースに収録した疲労損傷に関する情報を活用し、鋼橋の疲労損傷の近接目視点検を学習することができる教育ソフトを開発し、その有用性を把握する。

1.3 本論文の構成

本論文は全5章から構成され、その内容は以下の通りである。

第1章では、序論として研究の背景、関連する既往の研究、研究の目的について述べる。

第2章では、国内外の公表されている資料から鋼橋の疲労損傷と補修事例を約200事例集め、インターネット上に構築した新しいデータベースについて述べるとともに、収録した事例について、損傷原因による分類、損傷原因と補修方法の組合せの分布、損傷原因別の損傷発見までの供用年数と損傷事例数との関係、損傷レベルによる分類、溶接の不具合の種類と事例数の分析について述べる。

第3章では、鋼道路橋の疲労損傷の中でも最も注意を要する疲労損傷である主桁と横桁の取り付け部の疲労損傷について、実際の都市高速道路会社における点検結果を基に構築したデータベースについて述べるとともに、そのデータベースを使って行った仕口タイプの割合、仕口タイプと損傷レベルの関係の分析結果、各疲労損傷発生箇所「見える化」と累積等価繰返し回数とき裂発生箇所との関係について述べる。

第4章では、第2章で構築した新しいデータベースに収録した鋼橋の疲労損傷事例をもとに、点検技術者が近接目視すべき部位を学習することができる教育ソフトの開発について述べるとともに、開発した教育ソフトを用いて、点検に関する講習会を行い、講習会後のアンケート調査により把握した、開発した教育ソフトの有用性について述べる。

第5章では、一連の研究成果について述べる。

第 2 章 国内外の各種メディアから収集した鋼橋の疲労損傷と補修事例のデータベースの構築とその分析

2.1 はじめに

疲労損傷は過去の事例に倣いその原因および対策が判断されることが多い。従って、過去に報告された疲労損傷に対する補修事例を取りまとめ、これらの情報を技術者の誰もが簡単に得られるようにすることが対策を講じる上で有効である。

三木らは過去二度にわたり、公表されている資料をもとに疲労損傷と補修事例のデータベースの構築を行っている^{2), 3)}。文献2)では、マイコン用データベース構築支援ツールを用いてパソコン上にデータベースを構築した。その後、インターネット技術が著しく発展し、文献3)では、写真や図などの画像情報を含めインターネット上のデータベースとして技術者の誰もが利用可能なものに発展させた。文献3)のデータベースは国際溶接学会 (IIW) ・第XIII委員会 (疲労委員会) ・補修に関するワーキンググループ (WG5) の活動成果の一つである。

本研究では、基本構成は文献3)のデータベースを継承し、プラットフォームを変更することで、利便性を向上させた新しいデータベースを構築した。文献3)のデータベースではIIW・第XIII委員会のメンバーからの情報提供を主な情報源としていた。新データベースでは、より多くの情報を集める目的で利用者が投稿できる機能を加えた。また、収録事例として近年の事例を追加し、収録数を文献3)の96事例から204事例に倍増させた。本章では、まず、そのデータベースの内容を紹介する。次に、収録事例について、損傷原因による分類、損傷原因と補修方法の組合せの分布、損傷原因別の損傷発見までの供用年数と損傷事例数との関係、損傷レベルによる分類、溶接の不具合の種類について分析を行った結果を示す。

2.2 新データベースの概要

2.2.1 コンセプト

本研究では、新しく構築するデータベースをインターネット上のフリー百科事典である Wikipedia⁹⁾のように、利用者がその構築に積極的に参加できるようにすることを目標とした。企業の技報、新聞、Webなどさまざまなメディアに公表された事例を広く収集でき、かつ、利用者が疲労損傷やその対策事例を容易に投稿したり編集できるデータベースである。一方で、データベースの全てのページについて利用者が自由に編集できるように設定すると、情報の正確性が失われる恐れもある。そこで、誰でも編集と閲覧が可能な投稿のページと、データベースを管理している専門家のみが編集可能なページを設けることとした。前者は後述する Contributionのページであり、後者はそれ以外のページが該当する。

2.2.2 プラットフォーム

前述のコンセプトを実現するため、本データベースのプラットフォームとしてPukiWiki^{例えば6)}を採用した。PukiWikiはWikipediaなどで利用されているWiki型コンテンツ管理システムの一つである。Wiki型コンテンツ管理システムの大きな特徴はWebページの更新をWebブラウザのみで行えることである。また、従来のHTMLの文法よりも簡単な記述でWebページの編集が可能である。さらに、Webページ更新の衝突検出機能を有しているため、編集権限を持つ複数人でWebページの編集作業が可能である。PukiWikiには全文検索機能が標準で具備していることやWebページ単位で閲覧と編集の権限設定を行えることが本データベースのプラットフォームとして採用した理由である。

2.2.3 アドレス

「<http://fatigue.civi.tcu.ac.jp/pukiwiki/>」のアドレスから本データベースを公開している。閲覧については制限を設けていないため、誰でも全てのページが閲覧可能である。国際溶接学会の活動成果の一つをベースとしていること、日本人以外の利用も考慮していることから、使用言語は英語である。

Webブラウザを用いてデータベースのアドレスにアクセスすると、**図2-1**に示すデータベースのFront Pageが表示される。

2.2.4 構成

本データベースはContribution, Repair cases, Members, Referencesのメニューにより構成される。Membersのページには、本データベースの構築と管理を行っているメンバーの氏名が記載されている。Referencesには、本データベースを構築する際に参照した文献のリストが記載されている。以下に本データベースの主要な構成要素であるContributionとRepair casesについて述べる。



図2-1 新データベースのFront Page

a) Contribution (投稿)

Contributionは利用者が事例を投稿できるページである(図2-2)。ページ下端にRepair casesの体裁に准じたサンプルが記載されている。ここで投稿された事例は、IIW・第XIII委員会のメンバーを中心とした溶接構造物の疲労、橋梁工学の専門家により審査された後、Repair casesの事例として採用される。事例の投稿から、収録、公開までの一連の流れを図2-3に示す。

このように、専門家による情報の信頼性が担保される仕組みが整備されたうえで、データベースの構築に利用者も参加できる点が本データベースの大きな特徴である。

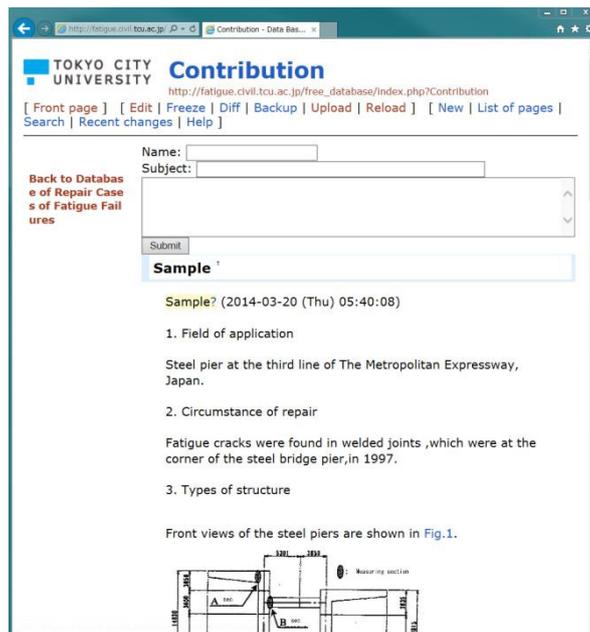


図2-2 ContributionのWebページ

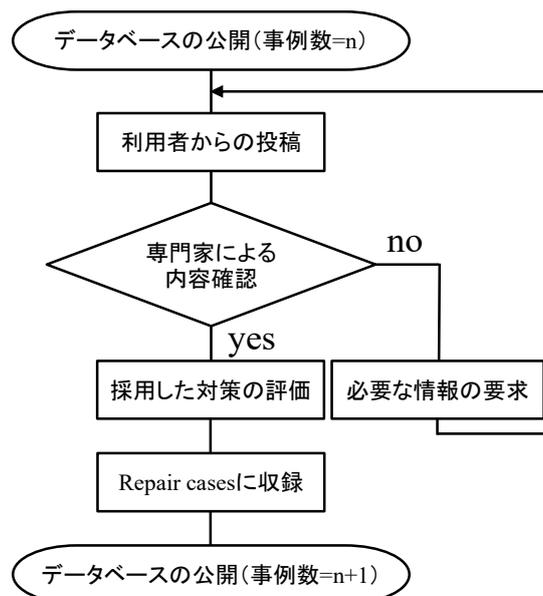


図2-3 事例の投稿から専門家による評価、収録、公開までの流れ

b) Repair cases (補修事例)

Repair casesには疲労損傷と対策の事例が収録されている。本データベースに収録されている事例は全て過去に公表された資料^{3), 7)-110)}から収集したものである。国内道路橋, 国内鉄道橋, 海外橋梁, 鋼床版, 鋼製橋脚, 付属物に分けて収録している。収録事例数はそれぞれ, 国内道路橋が67事例 (64橋梁), 国内鉄道橋が33事例 (33橋梁), 海外橋梁が61事例 (44橋梁), 鋼床版が27事例 (19橋梁), 鋼製橋脚が11事例 (11橋梁), 付属物が5事例 (5橋梁) の計204事例 (176橋梁) である。各事例は橋梁名もしくは一般名でページ名を表記している。各事例の記載は, 利用者が比較しやすいように, できるだけ同じ構成とし, 文献³⁾と同様に表2-1の通りとした。

Repair casesの記載例 (Steel bridge on road way (bottom flange)のWebページ) を図2-4に示す。

表2-1 各事例の記載様式³⁾

| | | |
|---|-------------------------|---------|
| 1 | Field of application | (現場箇所) |
| 2 | Circumstances of repair | (補修の履歴) |
| 3 | Types of structure | (構造形式) |
| 4 | Details of loading | (荷重種類) |
| 5 | Description of damage | (損傷の概要) |
| 6 | Repair method applied | (補修方法) |
| | References | (参考文献) |

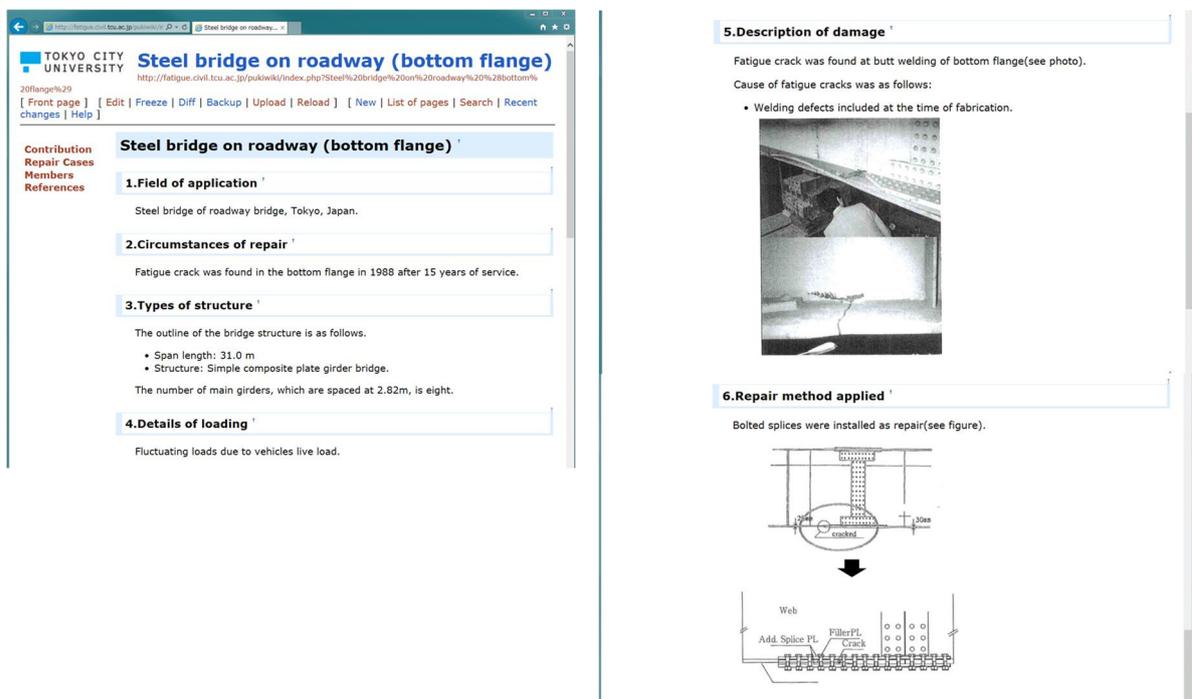
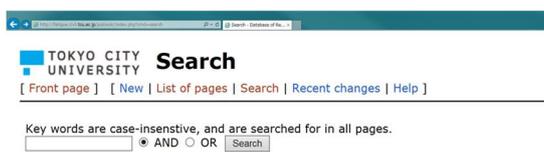


図2-4 Repair casesの記載例 (Steel bridge on road way (bottom flange)のWebページ)

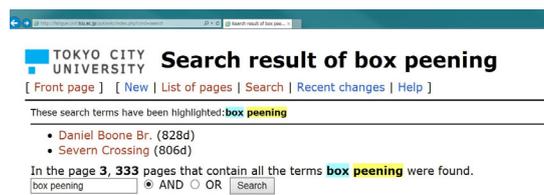
2.2.5 検索機能

データベースの全てのページの上側に“Search”ボタンが配置されている。“Search”をクリックすると図2-5(a)に示すキーワード入力画面に切り替わる。検索例として“box”，“peening”をキーワード入力欄に記載しANDのチェックボックスにチェックを入れ，“Search”を実行すると、図2-5(b)のようにキーワードを含むページの一覧が表示される（この例では“Daniel Boone Br.”と“Severn Crossing”が表示される）。ページ名をクリックすると該当する事例のWebページが表示される。例として、図2-5(c)に“Severn Crossing”の“6. Repair method applied”の部分を示す。事例ページの中でキーワードは着色されて表示される。

このように“Search”機能を利用することで利用者は必要な情報を本データベースから抽出することができる。



(a) “Search” のキーワード入力画面



(b) キーワード “box” “peening” の検索実行結果

6.Repair method applied

- In case of trough to cross-beam.

Repair was performed by increasing the weld size, replacing the fillet by penetration weld, special jigs and drilling equipment. By means of repairing, only a small increase in fatigue strength could be achieved. The repair finally adopted was that of fitting a steel strap around the end of the trough on each side of the cross-beam (Fig.5). The strap was fillet welded to the cross-beam and trough in a controlled sequence. The weld toes were then treated in the most highly stressed locations. Hammer peening was used initially, but, alternative processes have been investigated due to the noise and so on.

This repair showed the required fatigue strength (class D).

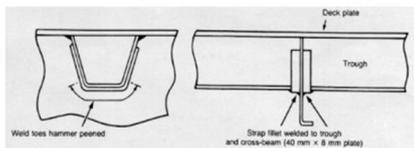


Fig.5 Welded strap repair for trough to cross-beam joint.

- In case of trough to deck plate.

Repair for the trough to deck plate joints was to replacing the 6mm fillet weld with a larger weld on a machined preparation (Fig.6). This repair increased the fatigue strength from BS 5400, class F, to the above class D for stress in the web of the trough at 15mm from the deck plate.

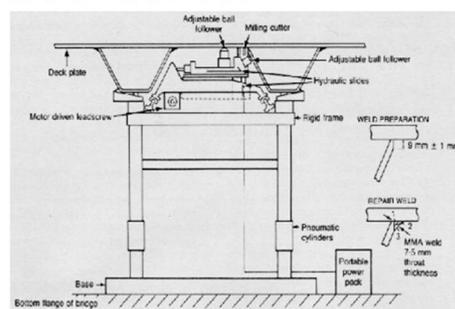


Fig.6 Trough to deck plate weld repair machine.

- In case of web to deck joint strengthening.

For cracking of the surfacing over the longitudinal web of the box on the Wye Bridge, the welded plate stiffening were carried out (Fig.7). This repair indicated that stress ranges recorded under normal traffic were very low, and estimated fatigue lives were well over 120 years for all welds.

(c) “Severn Crossing” のWebページ(6. Repair method applied)部分。キーワードの“box”は青色で，“peening”は黄色で着色表示される)

図2-5 “Search” 機能

2.3 収録事例の分析

本データベースに収録されている事例について分析を行った。なお、鋼床版の疲労損傷は、自動車荷重を直接受けることにより、鋼床版を構成する板要素の複雑な変形や応力の挙動に起因すること¹¹¹⁾、鋼製橋脚の疲労損傷はその多くが溶接部の内部欠陥に起因すること¹¹²⁾が既往の研究で示されていることから、分析対象外としている。

2.3.1 補修方法と損傷原因

補修方法は、文献³⁾と同様に、表2-2のように分類した。補修方法Gのストップホールは応急対策として実施されることが多く、一つの事例に対して他の補修方法と組み合わせられて実施されることが多い。ここでの分類では恒久対策として実施された補修方法を、その事例の補修方法として分類した。

以下に補修方法A~Hについて、その概要を述べる。

表2-2 補修方法³⁾

| | |
|---|---|
| A | removal of crack (き裂の除去) |
| B | re-weld (溶接補修) |
| C | surface treatments such as TIG dressing and Peening (TIG処理やピーニングによる表面処理) |
| D | re-weld + post weld surface treatment (溶接補修+表面処理) |
| E | bolted splice (添接板による補修) |
| F | shape improving (形状改善) |
| G | strop hole (ストップホール) |
| H | modification of connection detail (接合部ディテールの変更) |

a) 補修方法A（き裂の除去）

き裂の除去は、溶接止端部から発生した初期き裂に対して、き裂そのものを除去することにより応力集中源をなくし、き裂発生前の状態に戻すことを主な目的とする補修方法である。

b) 補修方法B（溶接補修）

溶接補修は、き裂発生部をグラインダー、ガウジングなどで除去し、再溶接することにより損傷部を補修する方法である。現場での溶接については、作業スペースの確保、溶接姿勢が上向きに限定される、溶接に伴う変形の拘束が困難であることなど、その品質確保が難しいため、採用にあたっては十分な検討が必要である。

c) 補修方法C（TIG処理やピーニングによる表面処理）

補修方法Cは予防保全として行われる補修である。TIG処理は、溶接電極から発生させるアークで止端部を再溶融し、止端形状を滑らかにすることで継手の疲労強度を改善する方法である。また、ピーニング（図2-6(a)）は溶接止端部をハンマー等で叩き、塑性変形により止端部の曲率半径を大きくすることで応力集中を低減し、同時に溶接止端部の表面近傍に圧縮残留応力を導入させることで継手の疲労強度を改善する補修方法である。

d) 補修方法D（溶接補修+表面処理）

補修方法Dは補修方法B（溶接補修）の後に補修方法C（TIG処理やピーニングによる表面処理）を行うもので、疲労き裂発生後に行う事後補修である。

e) 補修方法E（添接板による補修）

補修方法Eは、き裂発生箇所に添接板を設置することで、断面を増加させ、き裂発生部の発生応力を低減する補修方法である（図2-6(b)）。

f) 補修方法F（形状改善）

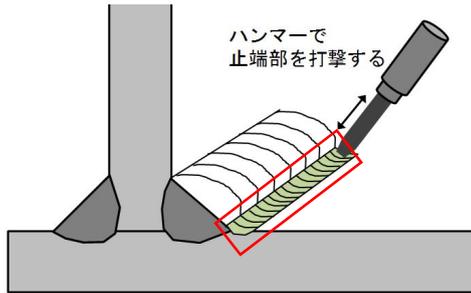
補修方法Fは、フランジガセット継手部コーナーの形状改善（図2-6(c)）や、鋼床版橋梁の垂直補剛材とデッキプレートとの溶接部近傍における垂直補剛材の半円切り欠き⁷⁾などのように、溶接部に作用せする応力を低減するよう形状を改善する補修方法である。

g) 補修方法G（ストップホール）

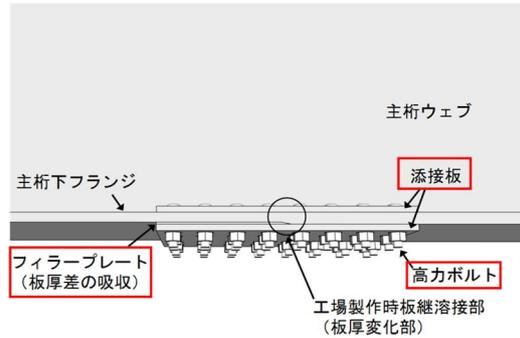
ストップホール（図2-6(d)）は、き裂の先端部を穿孔することで応力集中を緩和し、き裂の進展を一時的に防止することが主な目的であり、補修補強対策の検討や補強材の製作に時間を要する場合などの応急的な対策として施工されることが多い補修方法である。

h) 補修方法H (接合部ディテールの変更)

補修方法Hは、継手周辺から構造系全体までを含めた接合部ディテールの変更を意味し、補修方法EやFとは、補修対象ディテールや補修規模の差で区別される。図2-6(e)は、ソールプレートとの溶接部に発生した疲労き裂に対する補修事例を示したものであり、L型添接板及び新設ソールプレートと高力ボルトを用いた補修である。



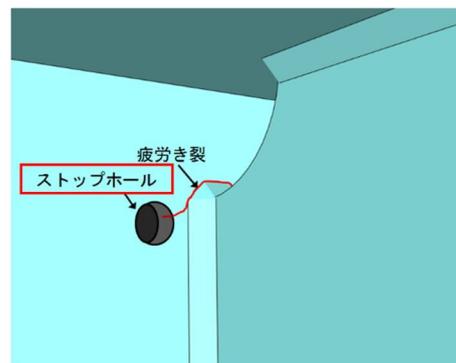
(a) 補修方法C (ピーニングの例)



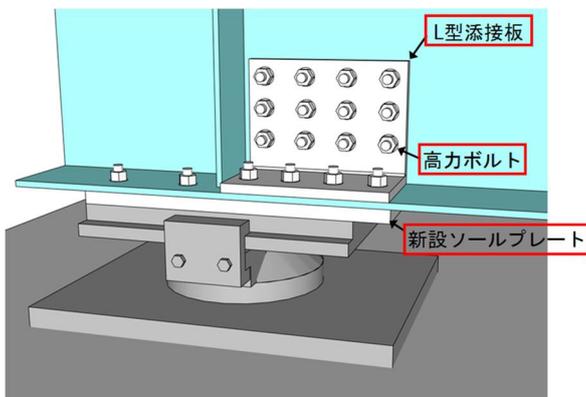
(b) 補修方法E (添接板による補修)



(c) 補修方法F (形状改善)



(d) 補修方法G (ストップホール)



□ : 補修箇所及び補強部

(e) 補修方法H (接合部ディテールの変更)

図2-6 補修方法C, E, F, G, Hのスケッチ

疲労損傷の原因についても、文献3)と同様とし、表2-3に示すCause1～Cause4に分類した。疲労損傷の原因がCause1～Cause4の複数の要因に起因すると思われる事例については、著者の判断により、主たる原因に相当するものに分類した。

表2-3 疲労損傷の原因³⁾

| | |
|--------|---|
| Cause1 | Welding defects were included at the time of fabrication. (溶接の不具合) |
| Cause2 | An inappropriate structural detail of low fatigues strength had been adopted. (低い疲労強度の継ぎ手ディテールの採用) |
| Cause3 | Stresses and defomations unforeseen in design occurred at joints of members. (設計で想定していない応力や変形) |
| Cause4 | The structure behaved in a manner not expected such as due to vibration. (風の作用や車両通行による部材振動) |

2.3.2 損傷原因による分類

収録事例について損傷原因による分類を行った。損傷原因の割合を図2-7に示す。分析対象全てに対する結果を示す「国内+海外」を見ると、Cause3が50%を占め、次にCause2が28%となっており、この二つの原因で全体の約3/4を占めている。同図には「国内」の事例のみを分析対象とした結果と、「海外」の事例のみを分析対象とした結果も示した。「海外」ではCause1の溶接の不具合を原因とする事例が多い結果となっており、「国内」では、Cause1を原因とする事例は少ない。鋼製橋脚を除くと、海外に比べ、国内では、溶接の不具合を原因とする事例の報告が少ないことが分かる。

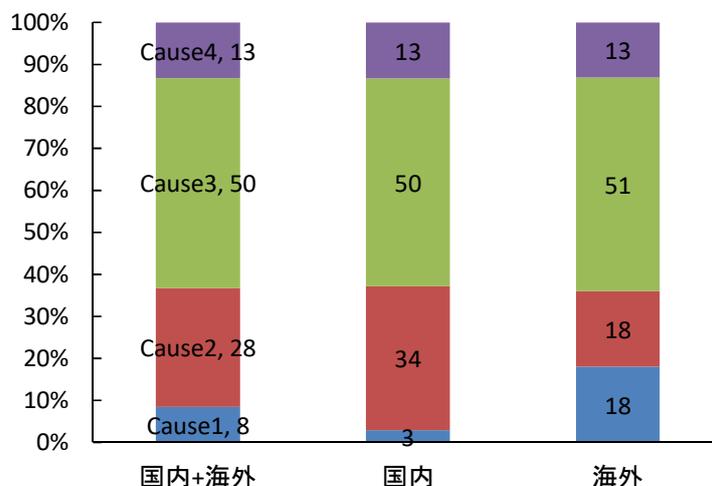


図2-7 損傷原因の割合

2.3.3 損傷原因と補修方法の組合せ

収録事例について補修方法の分類を行ったのち、損傷原因と補修方法の組合せの分布を調べた。横軸をA～Hの補修方法、縦軸をCause1～4の損傷原因、バブルの大きさを事例数としたバブルチャートを図2-8に示す。

Cause1を除き、継手周辺から構造系全体までを含めた接合部ディテールを変更する“H”を適用した事例が多く、次に添接板による補修“E”が多い。

“H”の構造ディテールの改良を行うためには、損傷原因の特定が不可欠である。近年の構造解析技術や現場計測技術の向上により損傷原因の特定がしやすくなり、“H”の補修方法を採用する事例が増えているものと推察され、今後も増加していくと考えられる。

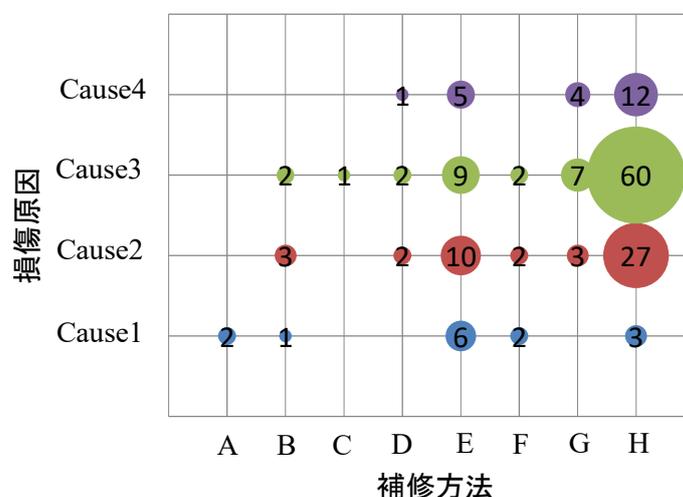


図2-8 損傷原因とそれに対する補修方法の組合せの分布

2.3.4 供用年数と損傷原因との関係

図2-9に損傷原因別の損傷発見までの供用年数と損傷事例数との関係を示す。

図2-9(a)よりCause1の溶接の不具合による損傷はCause2やCause3に比べ供用の早い時期に発見されており、供用25年までに全ての事例が発見されている。振動を原因とする損傷を示すCause4になるとその傾向はさらに早まり、供用15年までに全ての損傷事例が発見されている(図2-9(d))。これらのことから、供用の早い段階で発見された疲労損傷については、交通量との関係を検討する必要があるが、その原因として、“溶接の不具合”や“振動”について疑う必要があると考えられる。

図2-9(b)と(c)より損傷事例数の多いCause2とCause3は供用15年から25年に損傷発見のピークがあり、供用45年までにほぼ全ての損傷が発見されている。以上のことは供用年数と損傷事例の累積比率の関係を示した図2-10からも読み取れる。

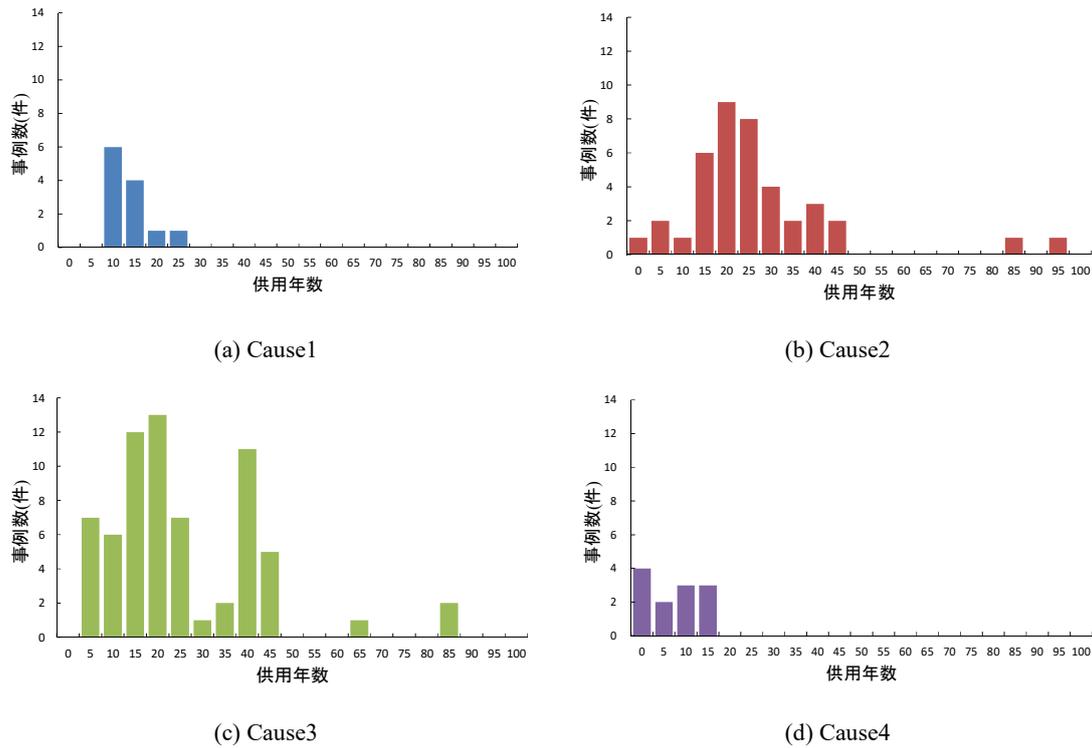


図2-9 損傷原因別の損傷発見までの供用年数と損傷事例数との関係

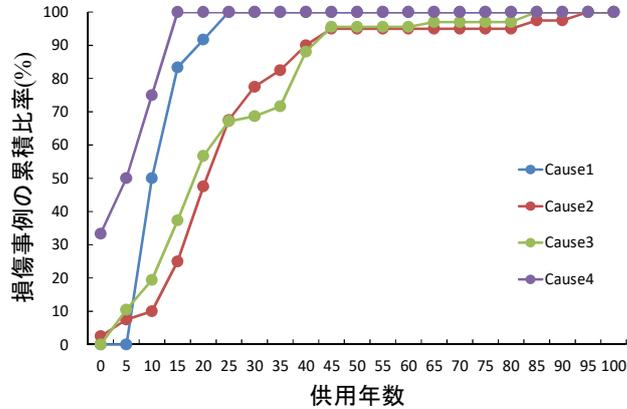


図2-10 供用年数と損傷事例の累積比率の関係

2.3.5 損傷レベルによる分類

収録事例数の多い“低い疲労強度の継ぎ手ディテールの採用 (Cause2)”を原因とする事例と，“設計で想定していない応力や変形 (Cause3)”を原因とする事例について、損傷レベルによる分類を行った。ここで、本研究では、各損傷レベルに対する疲労き裂のサイズ、状態を表2-4のように定義した。Cause2とCause3では損傷レベルに対するき裂のサイズ、状態の定義を変えている。横桁や横構のガセットと主桁ウェブとの溶接部、ソールプレートと下フランジとの溶接部、桁端切欠き溶接部の疲労き裂が主な対象となるCause2の疲労き裂は、主桁作用による応力により

主桁の脆性破壊に移行する可能性があるため、き裂が母材に5mm以上進展している状態を損傷レベルIVの緊急措置段階とした。一方、ウェブギャッププレートや垂直補剛材と主桁との溶接部の疲労き裂が主な対象となるCause3の疲労き裂は、疲労き裂が溶接線全長にわたり進展しても、ただちに主桁が脆性破壊に移行することはない。そこで、き裂が母材に5mm以上進展し、かつ、進展方向が変化した状態を損傷レベルIVの緊急措置段階とした。“進展方向が変化した状態”とは、たとえば垂直補剛材と主桁ウェブとの廻し溶接部から発生した疲労き裂の進展方向がフランジ方向に変化した状態を意味している。

Cause2とCause3の事例の損傷レベルの割合を図2-11に示す。Cause2では、ほとんどの事例が損傷レベルIVに達している。このことは、点検にあたっては、横桁や横構のガセットと主桁との溶接部、ソールプレートと下フランジとの溶接部、桁端切欠き溶接部については特に入念に実施する必要があることを示唆している。

一方、Cause3では損傷レベルIVに達している事例は約半数となり、割合としてはCause2ほど多くないことが分かる。

表2-4 本研究における損傷レベルの定義(Cause2及びCause3)

| 区分 | | き裂のサイズ, 状態 | |
|-----|--------|---------------------------|-------------------------------|
| | | Cause2 | Cause3 |
| I | 健全 | き裂なし | き裂なし |
| II | 予防保全段階 | 溶接部に5mm程度のき裂が発生している状態 | き裂が溶接ビード内に留まっている状態 |
| III | 早期措置段階 | き裂が5mm以上かつ溶接ビード内に留まっている状態 | き裂が溶接ビードを進展し、母材に5mm程度進展している状態 |
| IV | 緊急措置段階 | き裂が母材に5mm以上進展している状態 | き裂が母材に5mm以上進展し、かつ、進展方向が変化した状態 |

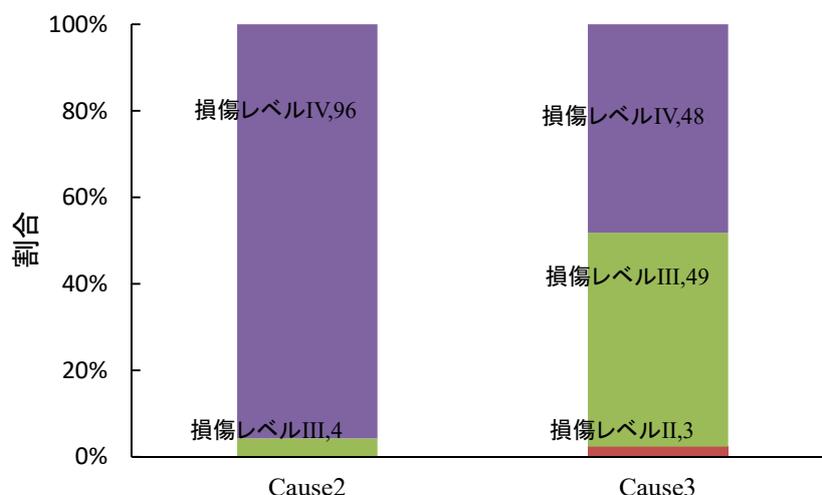


図2-11 Cause2とCause3の損傷レベルの割合

2.3.6 溶接の不具合の種類

損傷原因がCause1と判断された計14事例について、溶接の不具合の種類を調べた結果そのほとんどが完全溶込み溶接部の未溶着であった。これは、工場製作段階において、開先加工された部分が十分に裏はつりされることなく溶接されたために開先加工された面がそのまま残ったものである。この調査には鋼製橋脚は含めておらず、鋼製橋脚を含めると、完全溶込み溶接部の未溶着による事例はさらに増加する。

2.4 まとめ

本章では、利用者がその構築に参加可能な鋼橋の疲労損傷と補修事例のデータベースの構築を行うとともに、構築したデータベースに収録した事例について、損傷原因による分類、損傷原因と補修方法の組合せの分布、損傷原因別の損傷発見までの供用年数と損傷事例数との関係、損傷レベルによる分類、溶接の不具合の種類と事例数について分析を行った。

本章の成果を以下にまとめる。

- 1) プラットフォームとしてWiki型コンテンツ管理システムの一つであるPukiWikiを採用し、利用者がその構築に参加可能な鋼橋の疲労損傷と補修事例のデータベースを構築した。構築したデータベースのアドレスを公開し、Webブラウザを用いて技術者の誰もが閲覧可能な環境を整備した。また、従来のデータベースに収録されていた事例に最近の事例を加え収録事例数を計204事例とした。
- 2) 収録した事例について分析を行った結果、損傷原因としては、設計で想定していない応力や変形によるもの（Cause3）が最も多く、次に低い疲労強度の継手ディテールの採用によるもの（Cause2）が多いことが分かった。
- 3) 損傷原因について国内の事例と海外の事例とを比較すると、溶接の不具合によるもの（Cause1）の報告事例が海外では多く、国内では少ないことが分かった。ただし、この分析には鋼製橋脚は含めておらず、その取扱いには注意する必要がある。
- 4) 補修方法は、継手周辺から構造系全体までを含めた接合部ディテールを変更する方法を採用する事例が最も多く、次に添接板による補修が多いことが分かった。
- 5) 損傷原因別の損傷発見までの供用年数を調べた結果、溶接の不具合によるもの(Cause1)は供用25年までに、振動によるもの(Cause4)は供用15年までに発見されており、供用の早い段階で発見されていることが分かった。低い疲労強度の継手ディテールの採用によるもの（Cause2）と設計で想定していない応力や変形によるもの（Cause3）については供用15年から25年に損傷発見のピークがあり、供用45年までにはほぼ全ての損傷が発見されていることが分かった。
- 6) 収録事例の多いCause2とCause3を原因とする事例について損傷レベルの分類を行った結果、Cause2については大半が損傷レベルIVを占めた。Cause2を原因とする疲労き裂は、き裂が

進展すると、主桁の脆性破壊につながる可能性が高いため、点検にあたっては該当部位を特に入念に実施する必要がある。

- 7) 溶接の不具合を原因とする事例について、溶接欠陥の種類を調べた結果、そのほとんどが、工場製作段階において、開先加工された部位が十分に裏はつりされることなく溶接されたことによる完全溶け込み溶接部の未溶着であった。

第 3 章 実際の点検結果に基づく都市高速道路の主桁と横桁の取り合い部の疲労損傷データベースとその分析

3.1 はじめに

近年、様々な分野でデータプラットフォーム構築の取り組みが進められている。現場からのリアルなデータをデジタルデータとして、データプラットフォームに統合し、サイバー空間上で解析、分析することにより、維持管理の効率化を目指している。本研究では、首都高速のデータプラットフォーム (i-DREAMs®) など各機関のプラットフォームとの連携に向け、首都高速道路の鋼桁の主桁と横桁との取り合い部に発生する疲労き裂事例(図 3-1) をデータベース化した。この主桁と横桁の取り合い部の疲労損傷は、山添橋¹⁾や Hoan 橋¹¹³⁾のように、主桁の脆性破壊を発生させる可能性の高い損傷モードである¹¹⁴⁾。この疲労き裂は主桁の活荷重応力に依存する疲労であり、米国などでは *load induced fatigue* と呼ばれている疲労モードである。

この主桁と横桁との取り合い部については、通常のガセット板タイプのほか、様々な構造ディテールが採用されている¹¹⁴⁾。しかし、それらの疲労強度は低く、また、構造ディテールにより差がある^{115), 116)}。これは道路橋の設計において疲労設計が取り入れてこなかったことに起因する。本章では、主桁と横桁との取り合い部に発生した疲労損傷に着目し、損傷情報(点検結果)を集約したデータベースの構築と、データベースを用いた損傷分析結果について述べる。また、データベースには構造物の位置情報(緯度、経度情報等)が登録されていることから、それらの情報を用いて、疲労き裂発生箇所をGIS(地理情報システム)上にプロットすることで、地図上に疲労き裂発生箇所の「見える化」を行うとともに、路線ごとの累積等価繰返し回数とき裂発生箇所について考察を行う。

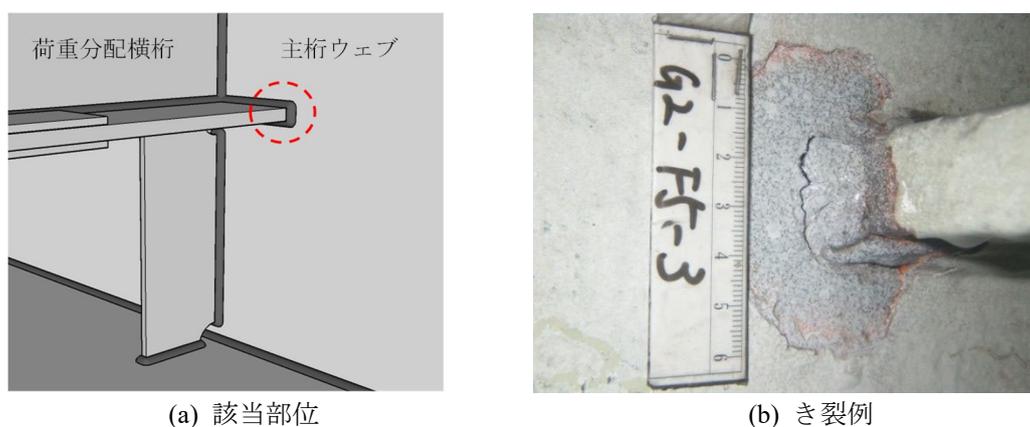


図 3-1 荷重分配横桁と主桁との取り合い部の疲労き裂事例

3.2 主桁と横桁との取り合い部の疲労き裂に関するデータベースの構築

3.2.1 データベースの構築方法

主桁と横桁の取り合い部に関する疲労損傷データベースの構築には、既存の二つのデータを用いた。一つは「平成13年～平成27年までの首都高速道路における点検補修台帳におけるクラック情報データ」であり、そこには、き裂の種類、き裂長、発生位置、上部工IDなどの情報が含まれている。もう一つは「上部工台帳データ」であり、主桁本数、主桁高さ、主桁間隔などの橋梁構造諸元、製作時の適用道示、製作会社、竣工年、使用鋼種の割合、緯度・経度、上部工IDなどが含まれている。この二つのデータを共通の情報である上部工IDで関連付けを行うことにより、主桁と横桁の取り合い部の疲労き裂のデータベースを構築した。データベースはファイルメーカーで作成した。取り合い部の疲労き裂数は1,184個である。図3-2にデータベースの構築方法の概要を示す。

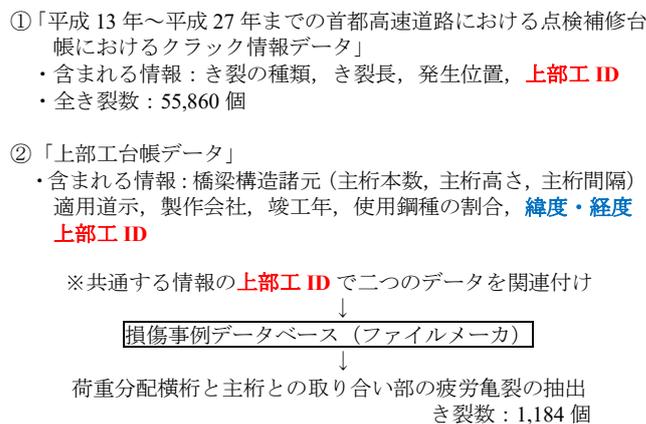


図 3-2 データベースの構築方法

3.2.2 データベースの概要

データベースの画面例を図3-3に示す。画面の左側には、点検時の登録番号、路線名、上部工ID、緯度・経度、架設年次、仕口形式、クラック情報、き裂起点、損傷レベルが表示される。画面右側には遠景、近景、黒色磁粉の写真とき裂のスケッチが表示される。仕口形式、損傷レベルの詳細については次項以降の本データベースを使った分析の中で詳述する。

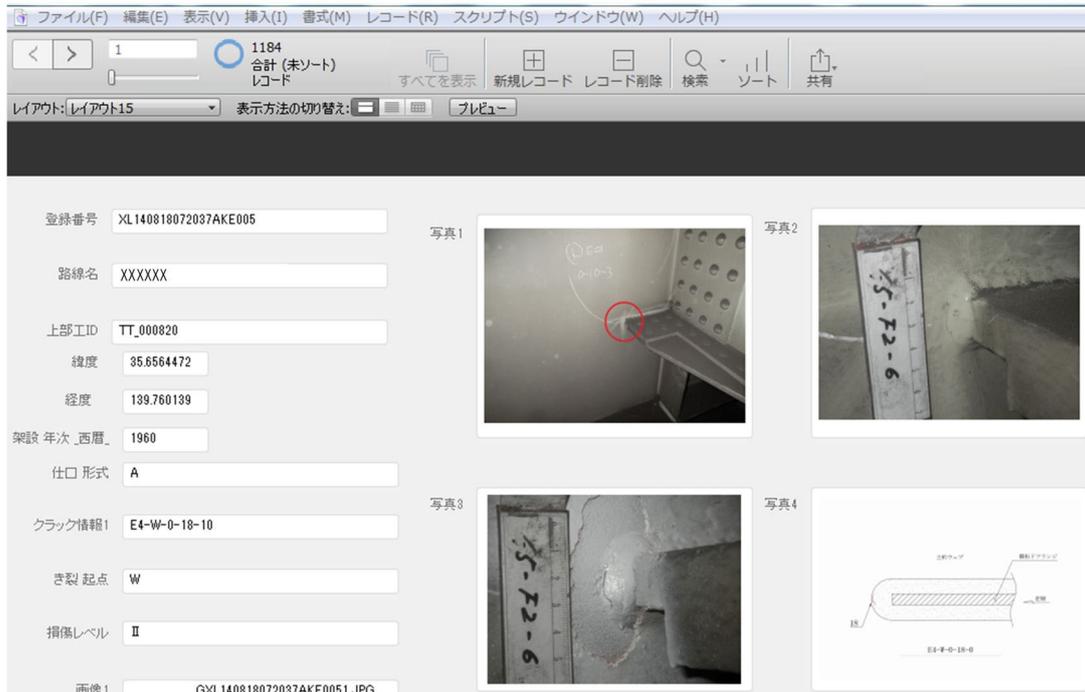


図 3-3 データベースの画面例

3.3 データベースを用いた分析

3.3.1 仕口タイプと損傷レベル

a) 仕口タイプの分類

首都高速道路で採用されている荷重分配横桁と主桁との取り合い部の構造ディテールを文献117)を参考にして、図 3-4 に示す Type-A から Type-D に分類した。Type-A はスカラップの無い通常の面外ガセット継手構造である。ウェブの両側にガセット板が隅肉溶接で取り付けられている。

Type-B から Type-D はウェブにスリットを設け、横桁の下フランジを連結する板をスリットに挿入する構造ディテールである。スリットの端部には孔が設けられており、その大きさと位置を変えた構造である。

Type-B は半径 10mm 程度の小孔が設けられた構造であり、仕口フランジコバ面に廻し溶接部が存在する構造である。

Type-C は半径 20mm 程度のスカラップが設けられた構造であり、仕口フランジコバ面に廻し溶接部が存在しない構造である。廻し溶接は連結版の上で施されている。

Type-D は Type-C のスカラップが下側に偏心して設けられた構造であり、仕口フランジコバ面上側は廻し溶接部が存在し、下側は廻し溶接部が存在しない構造である。

どのような構造ディテールを採用するかは、詳細設計の段階で決められてきた。したがって、

当該の橋が設計された年代，路線，工区により，構造ディテールの採用についての傾向が認められる．そのため，ここでは首都高速道路全体での各構造ディテールの数や割合は把握できていない．

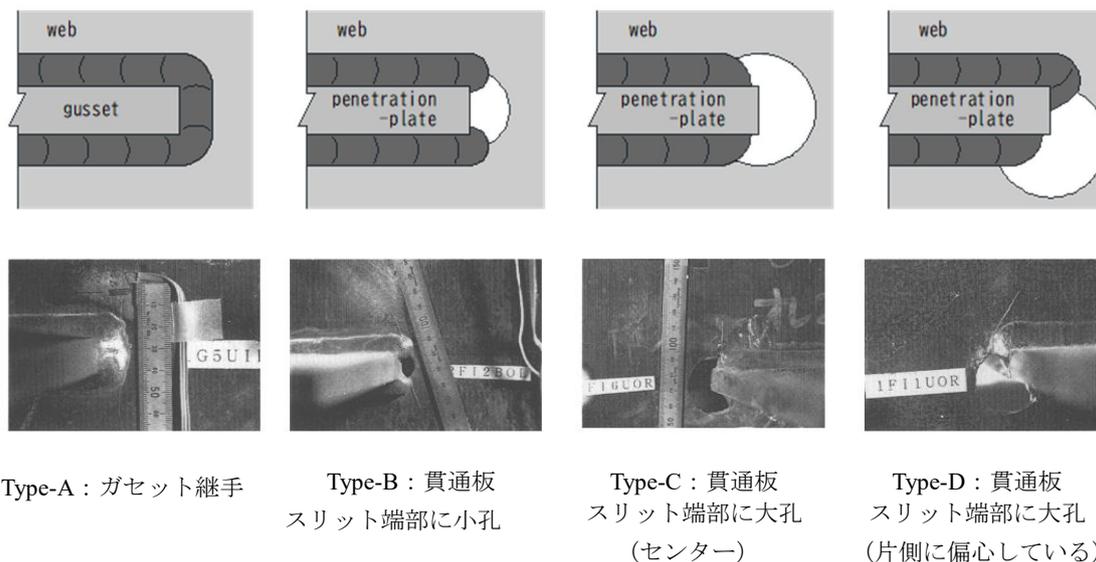


図 3-4 仕口ディテールの分類¹¹⁷⁾

道路橋示方書の疲労設計¹¹⁶⁾ではガセット形式で G 等級，貫通タイプで H'等級に分類され，H'等級は採用しないほうが良い構造ディテールとされている．文献 117)によるこれらの横桁主桁取り合いディテールに対する実大桁試験によれば，Type-A は G 等級を満足するが，他のディテールについては G 等級を下回る疲労強度であり，Type-B は H 等級，Type-C, D は H 等級を満足しない実験結果であった．

b) 損傷レベルの分類

損傷レベルの分類を図 3-5 に示す．損傷レベル I はき裂の無い健全な状態である．損傷レベル II はき裂が止端 (ビード) 内に留まっている状態のき裂である．損傷レベル III はき裂が母材に 5mm

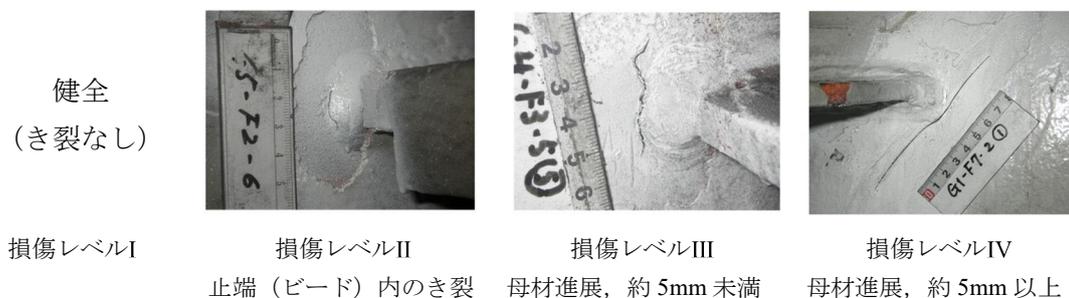


図 3-5 損傷レベルの分類

未満進展した状態である。損傷レベルIVはき裂が母材に5mm以上進展した状態である。この分類は実大桁の疲労試験¹¹⁸⁾に基づいて決定した。文献118)はレベルIIIとレベルIVの境界は、疲労き裂が母材に侵入した時点としているが、ここでは母材上5mmとしている。疲労試験によれば、疲労き裂が溶接ビードから離脱し、表面で5mm程度進展した時点で、疲労寿命の70～80%である。

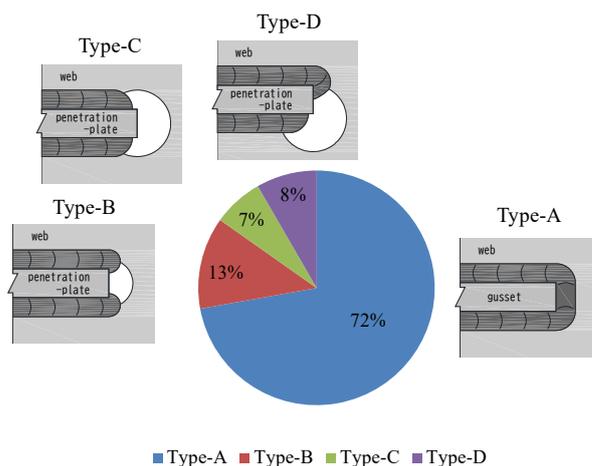


図 3-6 仕口タイプの割合

3.3.2 分析結果

a) 仕口タイプの割合

全1,184個のき裂に対する仕口タイプの割合を図3-6に示す。スカラップの無い通常の面外ガセットタイプであるType-Aが72%を占めた。き裂が発生していない箇所も含めType-Aの構造が一般的な構造として数多く採用されているためであると考えられる。次いでType-Bが13%であり、Type-CとType-Dが7%、8%という割合であった。

b) 仕口タイプと損傷レベルの関係

表3-1に仕口タイプと損傷レベルとの関係を示す。全1,184個のき裂のうち、損傷レベルIIが1,137個を占め、き裂の多くが母材に進展していない比較的軽微なき裂（割れや疑似模様もあると思われる）であることが分かった。

図3-7に仕口タイプ毎の損傷レベルの割合を示す。Type-Cで若干ではあるが損傷レベルIII以上の割合が他の仕口タイプより多い傾向が見られた。Type-C構造は仕口部コバ面に廻し溶接部が存在しないため、き裂発生後比較的早い段階で母材に進展しやすい構造であるためと考えられる。

Type-CおよびType-Dの片側については連結板のコバ面への廻し溶接がなく、疲労き裂は直接

母材部に入り込むことから、表面長さ5mmのき裂の脆性破壊に対する危険度は、溶接止端部の局所的な応力集中の影響を受けてき裂深さが極めて浅いType-Aの疲労き裂の母材侵入と若干異なるものと考えられる。しかし、前述のとおり溶接ビードからき裂が離脱し表面で5mm程度進展すると疲労寿命の70～80%相当になっているという試験結果¹¹⁸⁾を踏まえると、き裂深さに違いはあるものの脆性破壊に対する安全度は、同等に扱ってよいと考えている。

表 3-1 仕口タイプと損傷レベルの関係

| | | 損傷レベル | | | 合計 |
|-------|--------|-------|----|----|-------|
| | | Ⅱ | Ⅲ | Ⅳ | |
| 仕口タイプ | Type-A | 825 | 14 | 15 | 854 |
| | Type-B | 149 | 0 | 1 | 150 |
| | Type-C | 71 | 8 | 3 | 82 |
| | Type-D | 92 | 1 | 5 | 98 |
| 合計 | | 1,137 | 23 | 24 | 1,184 |

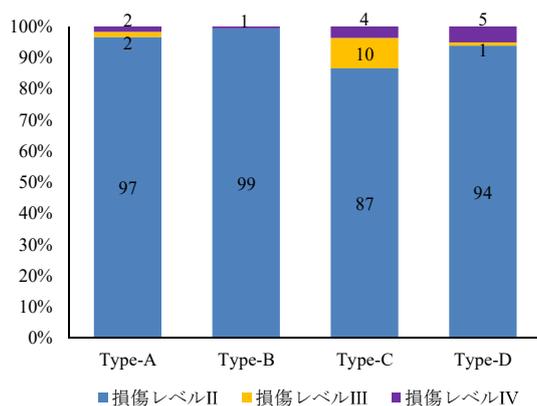


図 3-7 仕口タイプ毎の損傷レベルの割合

3.3.4 累積等価繰返し回数とき裂発生箇所との関係

時田ら¹¹⁹⁾は、道路橋の疲労に対する活荷重の厳しさを表す指標として、累積等価繰返し回数を提案している。これは、道路橋を通過する活荷重の重量とその数を T 荷重に換算した値である。図 3-9 に文献(119)に示されている首都高速における開通(1962年度)～2001年の累積等価繰返し回数を示す。累積等価繰返し回数が多い区間は都心環状線(C1)の北側、都心環状線(C1)から箱崎に至るまでの6号向島線(6)、3号渋谷線(3)、湾岸線(B)東京～千葉間である。

図 3-10 は上記の累積等価繰返し回数が多い区間を疲労き裂発生箇所図に示したものである。

図 3-10 より3号渋谷線(3)、都心環状線(C1)から箱崎に至るまでの6号向島線(6)は疲労き裂が多く発生していることが分かる。しかし、都心環状線(C1)の北側や湾岸線(B)東京～千葉間ではそれほど多く発生していない。前述の区間に比べて累積等価繰返し回数が若干少ない4号新宿線(4)の新宿から西側で疲労き裂の発生が多いことが分かる。これは、鋼 I 桁区間が新宿から西側でしか採用されていないためと考えられる。図 3-11 に鋼 I 桁橋が採用されている区間を示す。また、累積等価繰返し回数が少ない1号上野線(1)の上野駅付近や5号池袋線(5)の板橋ジャンクション付近での疲労き裂の発生が多いことが分かる。上野駅付近では、製作時の溶接品質等の影響も考えられるため、詳細な分析が必要である。また、5号池袋線(5)では、貫通構造の孔ありタイプであるため、H 等級未満の疲労強度と考えられ、少ない繰返し回数でもき裂が発生しやすいものと考えられる。

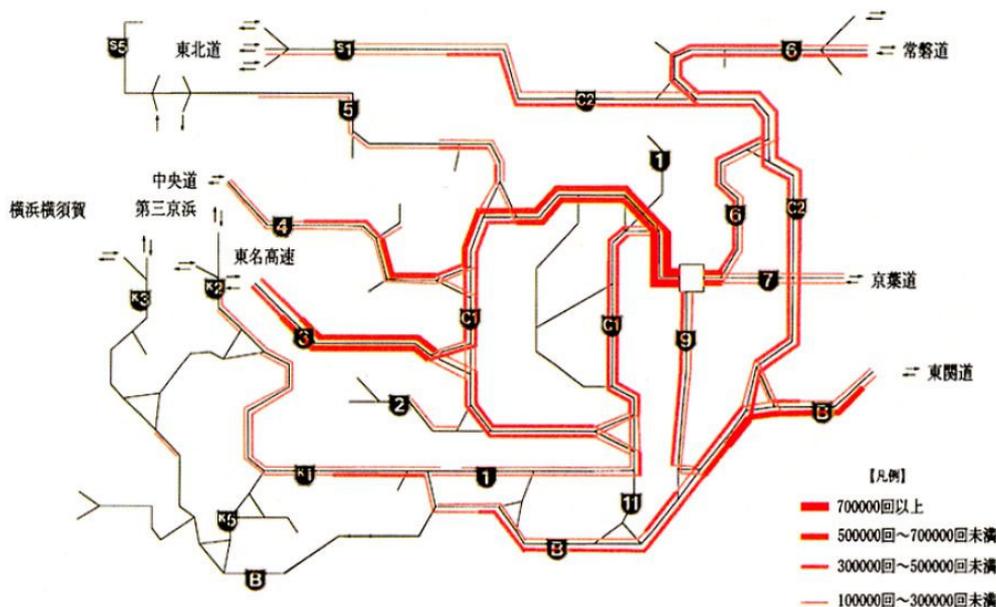


図 3-9 開通(1962年度)～2001年の累積等価繰返し回数¹¹⁹⁾



図 3-10 累積等価繰返し回数が多い箇所と疲労き裂発生箇所との関係

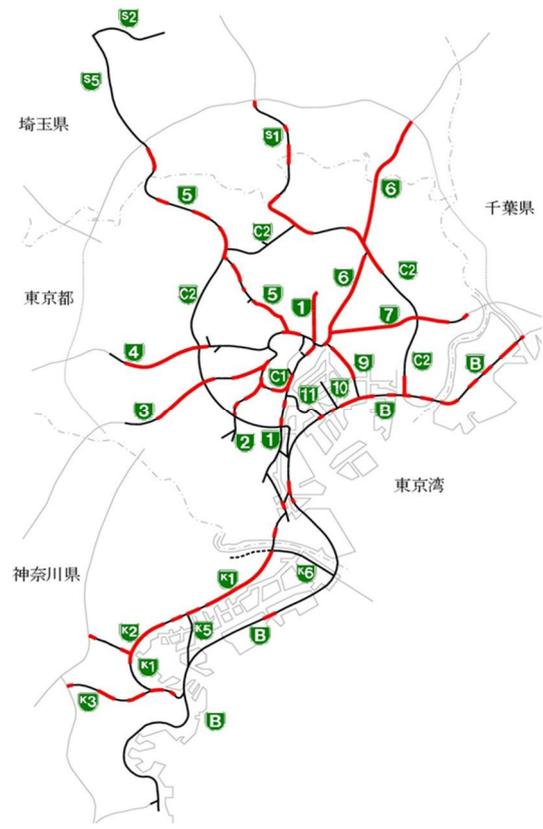


図 3-11 鋼 I 桁橋が用いられている区間

3.4 まとめ

本章では、実際の都市高速道路会社における点検結果を基に構築した、主桁と横桁の取り合い部の疲労損傷のデータベースについて述べるとともに、そのデータベースを使って行った仕口タイプ別の割合、仕口タイプと損傷レベルの関係の分析結果、各疲労損傷発生箇所での「見える化」と累積等価繰返し回数とき裂発生箇所との関係について述べた。

本章の成果を以下にまとめる。

- 1) 鋼桁橋の主桁と横桁との取り合い部の疲労損傷に関するデータベースを、首都高速道路における点検補修台帳におけるクラック情報データと上部工台帳データを統合することにより構築した。取り合い部の疲労き裂数は1,184個である。
- 2) 主桁と横桁の取り合い部のディテールは、面外ガセットタイプ (Type-A) と、連結板がウェブを貫通するタイプがあり、貫通板タイプは、貫通板端部のスカラップの大きさと位置により3タイプ (Type-B, C, D) がある。損傷数としてはType-Aが72%, Type-Bが13%, Type-Cが7%, Type-D8%であった。各タイプの疲労強度は、Type-Aが最も高くJSSC基準のG等級、Type-BがH等級、Type-CおよびType-DはH等級を下回る。
- 3) 損傷レベルを以下のように分類した。
 - ・損傷レベルI：亀裂なし。
 - ・損傷レベルII：疲労亀裂が溶接ビード上にとどまっている状態。
 - ・損傷レベルIII：疲労亀裂がウェブの母材部に侵入しているがその表面長さが5mm以下の状態。
 - ・損傷レベルIV：疲労亀裂が5mm以上母材の中に進展している状態。
- 4) 注意すべき損傷レベルといえるIIIおよびIVの割合は、Type-Cが14%, Type-Dが6%, Type-Aが4%, Type-Bが1%であった。その順はほぼ疲労強度の低い順と一致している。取り合いディテールの分布は路線によって異なるため、経年や活荷重の違いなども影響すると考えられる。
- 5) 首都高速における開通（1962年度）～2001年の累積等価繰返し回数と、疲労き裂発生数を比較したところ、累積等価繰返し回数の多い路線での疲労亀裂の発生が多いことが見える。ただし、累積等価繰返し回数が比較的少ないにもかかわらず疲労亀裂の発生数が多い箇所もある。これについては、累積等価繰返し回数を更新する、またはき裂の再確認などから見直す必要がある。
- 6) 上記のように、必要な情報を適切に収集・記録し、適切にデータベース化することで、損傷の可視化や損傷の原因などについて分析が容易にできることを示した。

第4章 データベースを応用した鋼橋の疲労損傷に関する近接目視点検教育ソフトの開発

4.1 はじめに

我が国の社会活動、経済活動を支えている交通インフラの大動脈の構造物は経年50年を迎えはじめ、疲労や腐食などの経年による劣化が目立つようになってきた。このような社会的背景のもと、道路法施行規則の一部を改正する省令が平成26年3月31日に告示され、同年7月1日より施行された。これにより、橋長2.0m以上の橋、高架の点検は近接目視による5年に1回の定期点検が基本となった。また定期点検を行う者は、点検を適正に行うために必要な知識及び技能を有することが明記された¹²⁰⁾。そのため、点検技術者の効率的な養成が喫緊の社会的要求事項と考えられる。

鋼橋の経年劣化の一つである疲労き裂は、進展すると部材の破断を起こすこともある。従って、初期の段階で発見し、適切な措置を行うことが橋梁の安全性を確保する上で重要である。しかし、初期の疲労き裂は微細であるため、点検時に見落とされることも少なくない。

現状の点検員の教育はテキストによる座学と現地における実習によるものに大別されると考えられる。テキストによる座学教育は比較的容易に実施できるが、実際の構造の板組や溶接ビードといった構造詳細を十分に理解させることは難しい。他方、現地における実習は実構造物を見ることができ、現地の準備や安全性の確保に労力を要することや、1回で受講できる受講者の人数に制限があるなどのデメリットもある。

テキストによる座学や現地における実習以外の点検技術者育成の取り組みとして、さまざまな劣化、損傷が生じ撤去された橋梁の部材を集めて建設された研修施設によるものが行われている^{121), 122)}。平成24年度の実績では177名が受講し、その内の7割が施設のある中部地域の受講者であり、地域に根付いた取り組みと言える。

また、澤村ら⁴⁾はコンクリート橋を対象とし、橋梁点検技術者のためのVR技術を活用した損傷体験システムの開発を行っている。橋梁を診断する上で重要な目視点検技術を習得するためのVR技術による損傷体験システムを提案し、若手技術者へのアンケートにより、点検技術教育用として有用性があることを示している。

本研究では、第2章で述べた新しいデータベースに収録した疲労損傷に関する情報を活用し、疲労損傷の近接目視点検を学習できる教育ソフトの開発を行った。開発した教育ソフトは、インターネットを介してウェブブラウザで利用することができ、データベースと同様に技術者の誰もが利用可能である。ウェブブラウザを使って前述のデータベースのURLにアクセスすると、データベースのFrontPageが表示される(図4-1)。図4-1の黒点線枠で示したSimulatorをクリックすると開発した教育ソフトを利用できる画面に移ることができる。教育ソフトの利用方法の詳細については4.5で詳述する。

また、開発した教育ソフトは、疲労き裂の解説ツールとしても利用できる。そこで開発した教育ソフトを用いて疲労損傷に関する講習会とそれに対するアンケート調査を行った。

Welcome to database of repair cases on fatigue failures.

This web site is a user participation database of repair cases of fatigue failures.

Any user can obtain information about repair methods for fatigue damage.

And any user can contribute repair cases of fatigue failures from "Contribution".

A part of this database is a result of activities of International Institute of Welding, Commission XIII, Working Group5.

We are glad this database is useful for you.

図 4-1 データベースの Front Page

4.2 教育ソフトの開発

教育ソフトの主たる部分の開発は 3D ゲーム開発ソフトの Unity を用いた。Unity はゲーム開発ソフトであるが、最近では様々な分野で利用され始めている。例えば、医療の分野では Unity を用いて 3D 人体解剖アプリが開発されている¹²³⁾。また、Unity は外部ツールとの連携にも秀でており、SketchUp などの 3DCG ソフトウェアで作成した 3D モデルを Unity にインポートすることが可能である。本研究では近接目視点検対象となる橋梁の 3D モデルを SketchUp で作成し、Unity にインポートした。

更に、Unity には Asset と呼ばれるゲーム開発を行うためのリソースが専用の Web 上に公開されている。Asset を活用することにより、開発の労力を大幅に削減することができる。本研究では利用者が操作する点検員（以下、模擬点検員）の基本コンポーネントに Asset を活用し、Unity 上で修正を加えることで、模擬点検員として設定した。教育ソフト全体の制御は C# と JavaScript のプログラムにより行った。

Unity で開発したアプリケーションは Windows や Mac, Linux などの複数の OS 上でスタンドアロンとして利用可能とすることができる。さらに、ウェブブラウザを使ってインターネットを介したネットワークアプリケーション（以下、Web Player）としても利用可能とすることができる。本研究では多くの技術者が利用できるように開発した教育ソフトを Web Player として公開することとした。なお Web Player の利用にあたっては初回のみ Web Player を動作させるブラウザプラグインである Unity Web Player を PC にインストールする必要がある。

4.3 教育ソフトの構成

開発した教育ソフトの構成を図4-2に示す。システムは大きく計算装置、視界模擬装置、信号入力装置から構成される。以下にサブシステム毎に説明する。



図4-2 教育ソフトの構成

4.3.1 計算装置

利用者のPCに接続されたキーボードとマウスからの信号を入力として、模擬点検員の動作や、疲労き裂発見の判定などを計算し、視界模擬装置に結果を出力する装置である。計算装置は利用者のPCと当研究室のインターネットサーバーにより構成される。教育ソフトをWeb Playerとして公開することで、利用者のPCのOSに依存することなく利用可能となっている点が本ソフトの大きな特徴の一つである。

4.3.2 視界模擬装置

計算装置によって生成される模擬点検員から一定距離離れた視点から見た点検対象空間と模擬点検員とを表示する装置である。一般的な利用方法では利用者のPCに接続されたCRTディスプレイを利用することができる。また、4.6で述べる講習会等の広い会場で利用する場合はプロジェクタースクリーンを利用することができる。図4-3に視界模擬装置に映し出される教育ソフトの画面例を示す。



図 4-3 視界模擬装置に映し出される教育ソフトの画面例

4.3.1 信号入力装置

模擬点検員の動きや近接目視点検の実施，教育ソフトの終了などの入力を行う装置で，利用者のPCに接続されたキーボードとマウスから構成される。

4.4 モデル化した橋梁と疲労き裂

4.4.1 モデル化した橋梁

点検対象とした橋梁は，鋼橋の一般的な形式の一つであるRC床版鋼単純鈎橋とした．対傾構，横構があり，支間中央には荷重分配横桁を配置した．また，片方の鈎端は切欠き構造とした．図4-4に作成した橋梁の3DCGモデルを示す．

4.4.2 モデル化した疲労き裂

モデル化した疲労き裂は鋼鈎に発生する典型的な疲労き裂 10 種類とした．いずれも実例がデータベースに収録されているものである．図 4-5 にモデル化した疲労き裂を示す．鋼橋の疲労き裂を説明する上で溶接ビードは重要な要素となるため，疲労き裂モデルの周辺は溶接ビードもモデル化した．モデル化は Unity にインポートする前段階の SkechUp で行っている．本研究では前述の 10 種類の疲労き裂のみモデル化を行ったが，疲労き裂モデル数の増減や，疲労き裂の長さの変更は SkechUp で実施可能である．なお，この疲労き裂モデルは，後述する Learning mode では画面に表示されるが，Experience mode では表示されない。

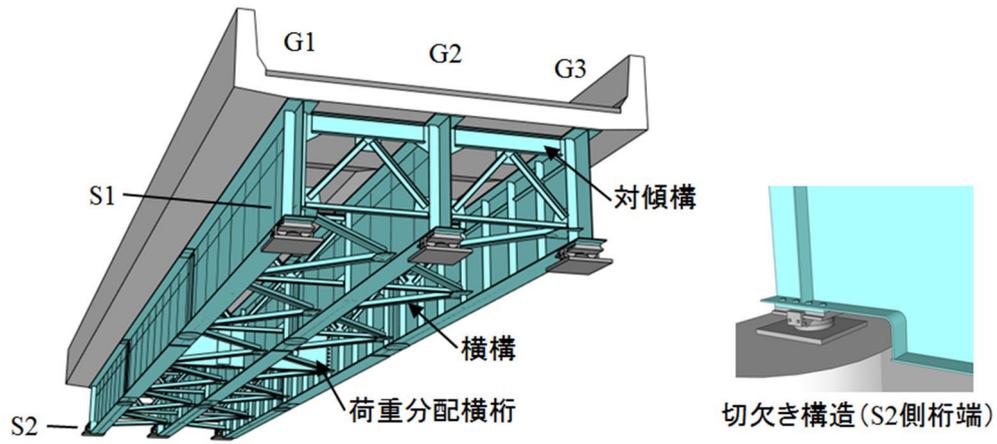


図 4-4 作成した橋梁の 3DCG モデル

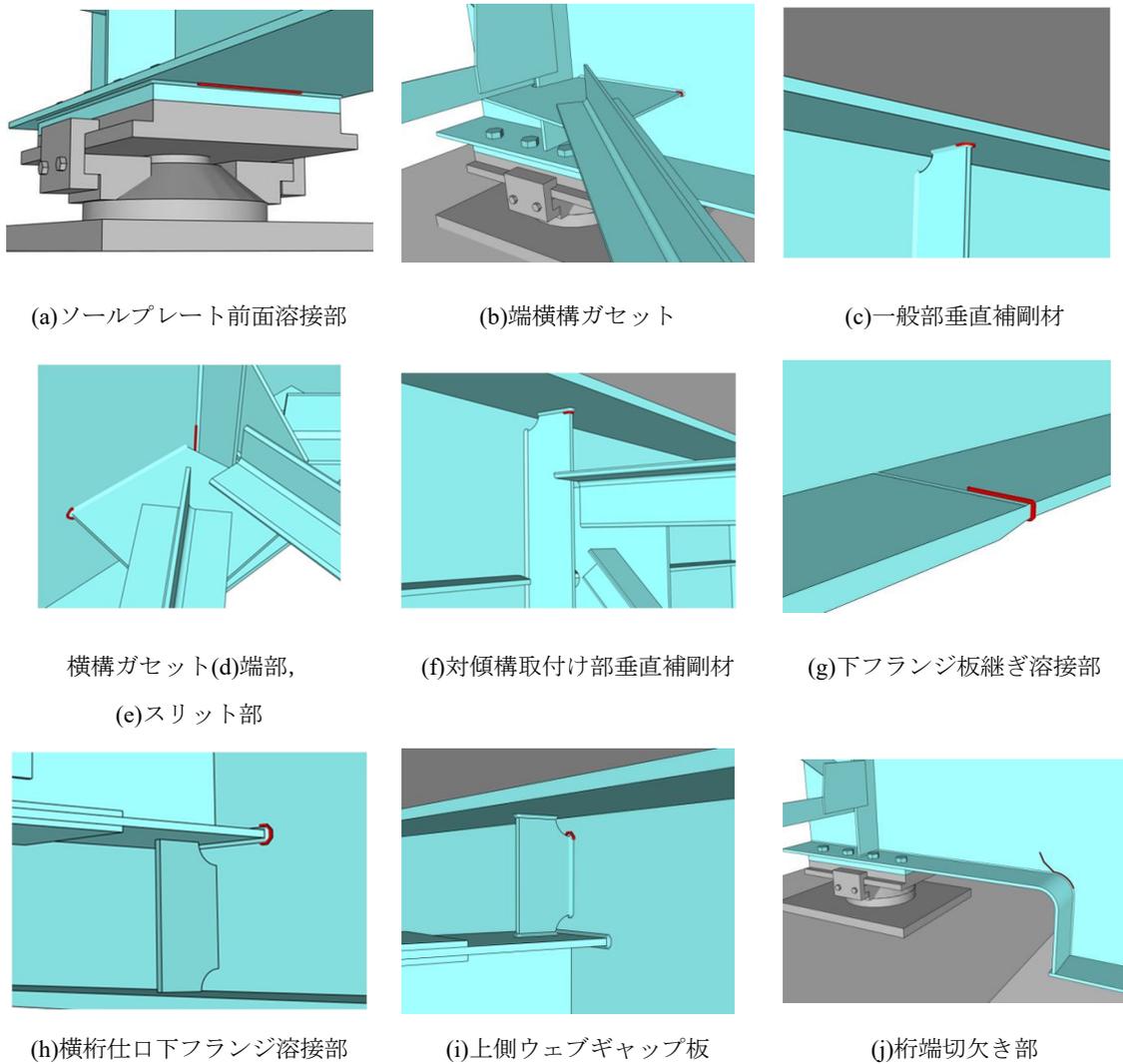


図 4-5 モデル化した疲労き裂

4.5 教育ソフトの利用方法

ウェブブラウザを使って前述のデータベースの URL にアクセスし、**図 4-1** の黒点線枠で示した Simulator をクリックすると Learning mode と Experience mode の二つの mode を選択する画面が表示される (**図 4-6**) .

なお、データベースと同様に日本人以外の利用も考慮し、使用言語は英語とした。



図 4-6 mode 選択画面

4.5.1 模擬点検員の操作方法

開発した教育ソフトは道路法施行規則の一部の改正に合わせ、近接目視点検の学習ならびに訓練を主たる目的としている。従って、模擬点検員は前後左右の移動に加え、下フランジ下面や支承部を近接目視できる姿勢がとれるように「しゃがむ動作」も行えるように設定した。模擬点検員の操作方法は Learning mode と Experience mode で共通であり、**表 4-1** の通りである。

表 4-1 模擬点検員の操作方法

| 点検員の動作 | 操作方法 |
|----------|-----------------|
| 移動(前後左右) | キーボードの矢印キー |
| しゃがむ動作 | キーボードの右Ctrlキー |
| ステップアップ | スペースキー |
| 視点の移動 | マウスの移動 |
| 視点のズームイン | マウスの左クリック |
| 近接目視 | マウスの左クリック+右クリック |

4.5.2 Learning mode

Learning mode の目的は利用者が疲労き裂の発生部位と発生原因とを効率的に学習できることである。

図 4-6 の Learning mode をクリックするとウェブブラウザにタイトル画面が表示される (図 4-7) 。タイトル画面には Mission と Control guide が記載されている。この mode の Mission は図 4-5 に示した疲労き裂各 1 箇所、合計 10 箇所の疲労き裂に対して、近接目視を行うことである。キーボードの「s」キーを押すと教育ソフトがスタートする (図 4-8) 。



図 4-7 タイトル画面 (Learning mode)

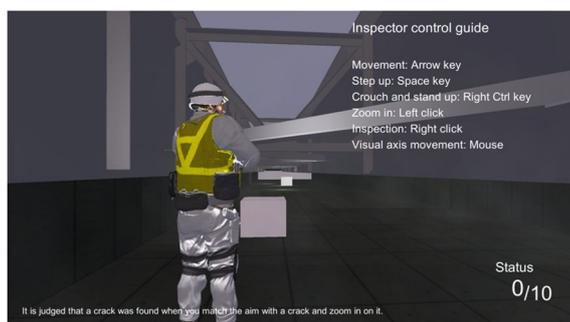


図 4-8 教育ソフトのスタート画面

この mode では利用者に対してモデル化した疲労き裂の部位のヒントが画面上に明示される。疲労き裂が赤い線で明示されるとともに、設置部位にスポットライトが照らされる。ヒントを用意することによって利用者が疲労き裂を発見しやすくなっている。スポットライトは図 4-5 の(a)～(j)の順番で S1 側の桁端から S2 側に向かって一つずつ照らされる。スポットライトが照らされている疲労き裂近傍に模擬点検員が移動し、赤い線で示された疲労き裂に視点を合わせ、ズームインを行い (図 4-9) 、右クリックを押すと、その疲労き裂に対して近接目視が行われたと判定される仕組みになっている。正しく近接目視が行われると、近接目視を行った疲労き裂の発生原因、同じ部位で発生頻度の多いき裂のイラスト、実橋で実際に発見された疲労き裂の写真を示す「疲労き裂解説スライド」が表示される (図 4-10)。「疲労き裂解説スライド」で示される実際のき裂の写真はデータベースに収録されているものを利用している。利用者は表示されたスライ

ドを閲覧することにより、疲労き裂に対する理解を深めることができる。

「疲労き裂解説スライド」が表示されている状態で「q」キーを押すと画面上からスライドが消え、次に近接目視すべき疲労き裂にスポットライトが照らされる（図 4-11）。全ての疲労き裂に対して近接目視行為が正しく行われると Mission 完了が示され、Retry と Quit を選択できる画面が表示される。

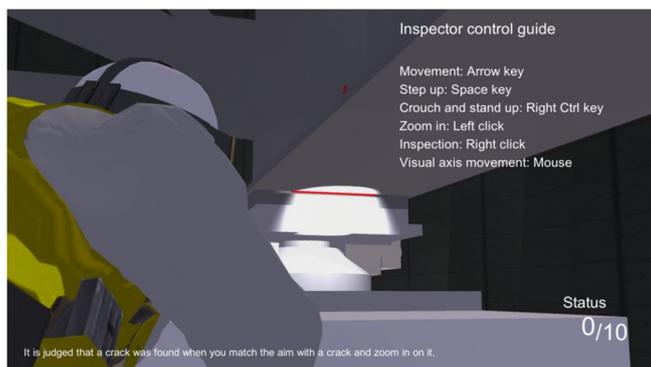


図 4-9 疲労き裂(a)発見シーン

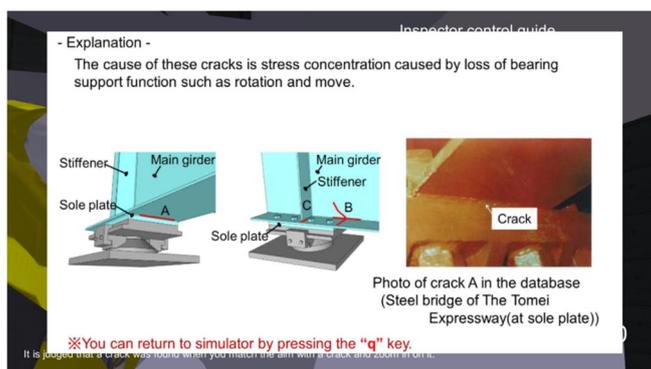


図 4-10 疲労き裂解説スライド

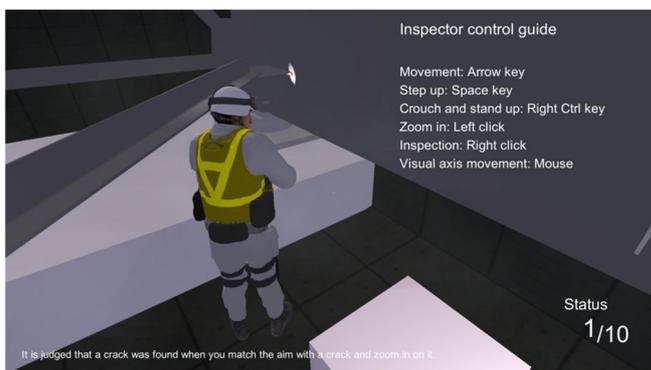


図 4-11 き裂(a)の解説スライドを閉じると、き裂(b)にスポットライトが照らされる

4.5.3 Experience mode

Experience mode は利用者が近接目視すべき部位をどの程度理解しているかを確認するために作成した。この mode の Mission は利用者が G1 及び G2 の S1 側支点部から S2 側支点部の範囲の全ての近接目視すべき部位を利用者自らが考え、近接目視を行うことである。そのため、この mode では Learning mode で明示された疲労き裂を示す赤色の線と疲労き裂を設置した場所を照らすスポットライトのヒントは用意されていない (図 4-12)。

要近接目視箇所は G1 の G2 側の面と、G2 の G1 側の面で、図 4-5 の(a)~(j)に示した疲労き裂部位に該当する箇所全てであり、合計 85 箇所である。

利用者が要近接目視箇所全てに対して近接目視を実施したと判断した時点でキーボードの「Enter」キーを押すと、教育ソフトの終了の判断を求める画面になる (図 4-13)。ここでキーボードの「y」キーを押すと、近接目視結果を示す画面が表示され、要近接目視箇所数に対する近接目視実施箇所数と、設定した疲労き裂箇所数(10 箇所)に対する発見した疲労き裂箇所数を示す画面が表示される。図 4-14 は、要近接目視箇所 85 箇所に対し、近接目視した箇所が 19 箇所、10 箇所に設定された疲労き裂に対し、発見した疲労き裂が 6 箇所の場合の近接目視結果の表示である。

さらに、ここでキーボードの「Enter」キーを押すと、設定した要近接目視箇所のどこを近接目視し、どこを近接目視しなかったかを示す近接目視結果シートが表示される (図 4-15)。

このように、利用者はこのmodeを利用することによって、鋼鈹桁の疲労損傷に対する要近接目視箇所の理解度を確認することができる。

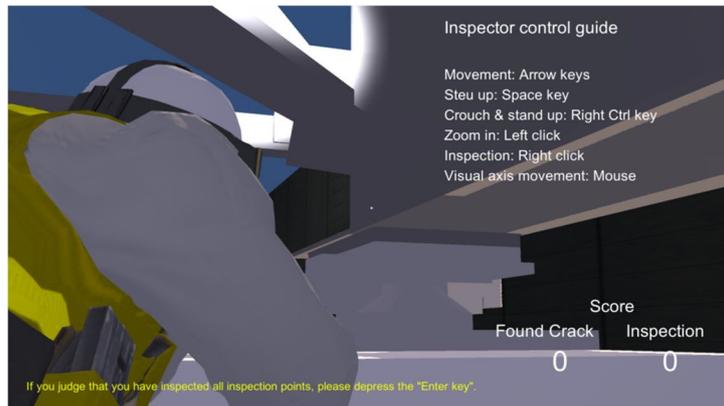


図 4-12 Experience mode の画面 (ヒントは明示されない)



図 4-13 教育ソフトの終了判断画面



図 4-14 近接目視結果の表示

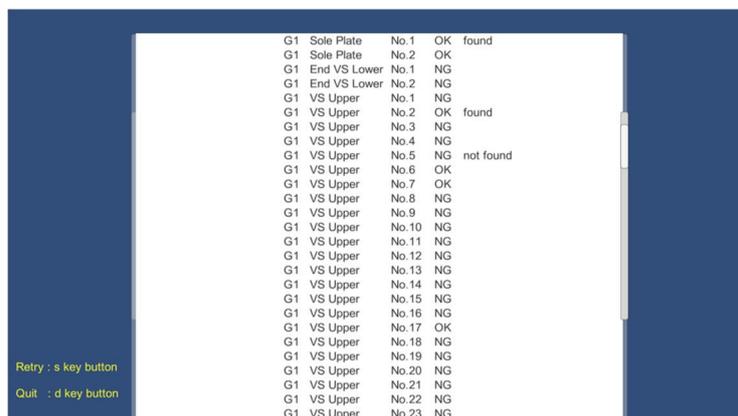


図 4-15 近接目視結果シートの表示

4.6 教育ソフトを利用した講習会とアンケートの実施

開発した教育ソフトの有用性を把握するため、教育ソフトを用いて点検に関する講習会を行い、講習会後に教育ソフトに関するアンケート調査を行った。講習会の様子を図 4-16 に示す。



図 4-16 教育ソフトを利用した講習会の様子

アンケートの調査対象は建設コンサルタント勤務者 40 名、検査会社勤務者 2 名の合計 42 名である。

アンケート調査項目は表 4-2 に示す 5 項目とし、全ての調査項目について 5 件法で実施した。Q1～Q5 のアンケート結果を図 4-17(a)～(e) に示す。

Q1 のアンケート結果 (図 4-17(a)) から約 95% (そう思う=64.3%, ややそう思う=31.0%) の受講者が疲労損傷発生部位の理解についてはテキストよりも教育ソフトの方が理解に効果的であると感じており、構造が視覚的に映し出される教育ソフトの特徴が理解されたと考えられる。

Q2 のアンケート結果 (図 4-17(b)) から約 72% (そう思う=40.5%, ややそう思う=31.0%) の受講者が疲労損傷発生原因の理解についてもテキストよりも教育ソフトの方が理解に効果的であると感じていることがわかる。ただし、Q1 と Q2 のアンケート結果を比較すると Q2 の方が教育ソフトの支持率が小さい。開発した教育ソフトで発生原因を示しているのは「疲労き裂解説スライド」のみであり、テキストと同様に文章で明示されるものであるため、発生部位ほどの優位性は得られなかったものと考えられる。発生原因の理解度を深めるためには改善の余地があることがうかがえる。

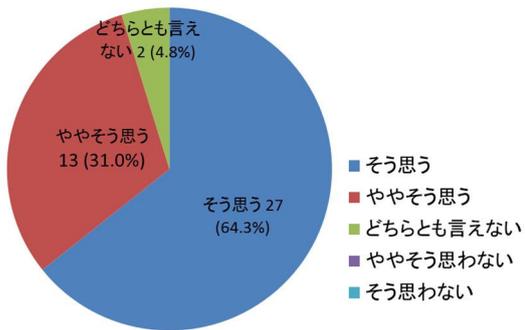
Q3 のアンケート結果 (図 4-17(c)) から約 88% (そう思う=66.7%, ややそう思う=21.4%) の受講者が、インターネットを利用した自己学習ツールとして利用したいと回答している。ウェブブラウザを使って簡単に利用できる仕様が、自己学習への抵抗感を下げられたと考えられる。このことは同様の結果となった Q4 のアンケート結果 (図 4-17(d)) にも示されているものと考えられる。

Q5 のアンケート結果 (図 4-17(e)) から約 90% (そう思う=66.7%, ややそう思う=23.8%) の

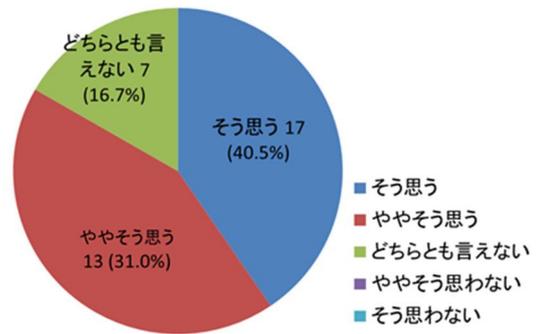
受講者が開発した鉸桁以外の教育ソフトも利用してみたいと回答しており、開発した教育ソフトへの期待度が高いことが示されたと考えられる。

表 4-2 アンケート調査項目

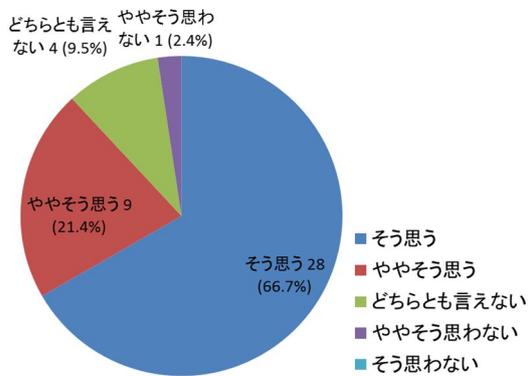
| | |
|----|---|
| Q1 | 「教育ソフト」を用いた講習は、テキストによる講習に比べて疲労損傷発生部位の理解に効果的である。 |
| Q2 | 「教育ソフト」を用いた講習は、テキストによる講習に比べて疲労損傷発生原因の理解に効果的である。 |
| Q3 | 自己学習として、インターネットを利用した「教育ソフト」を利用してみたい。 |
| Q4 | 会社の研修で「教育ソフト」を利用してみたい。 |
| Q5 | 鉸桁以外（鋼床版箱桁，トラス橋，アーチ橋など）の「教育ソフト」も利用してみたい。 |



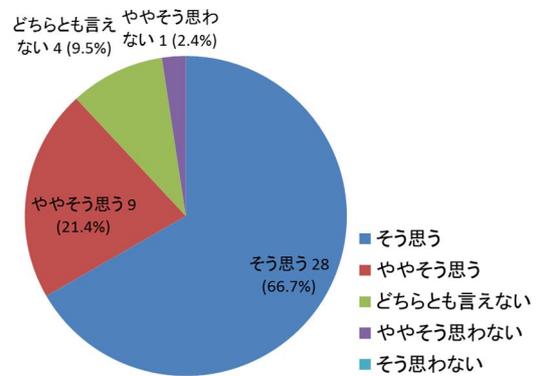
(a) Q1 のアンケート結果



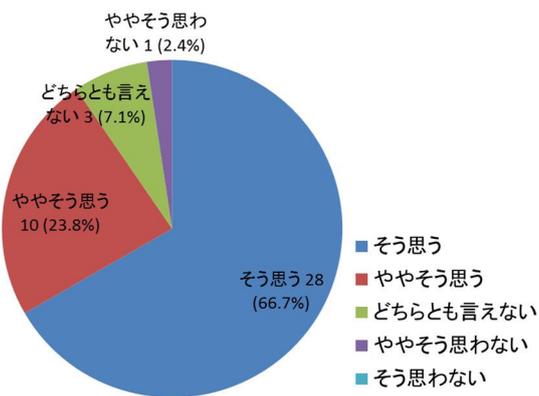
(b) Q2 のアンケート結果



(c) Q3 のアンケート結果



(d) Q4 のアンケート結果



(e) Q5 のアンケート結果

図 4-17 アンケートの結果

4.7 まとめ

本章では、第2章で述べた鋼橋の疲労損傷と補修事例の新しいデータベースを応用した、鋼橋の疲労損傷に関する近接目視点検教育ソフトの開発を行うとともに、開発した教育ソフトを用いて、点検に関する講習会を行い、講習会後のアンケート調査により、開発した教育ソフトの有用性の把握を行った。

本章の成果を以下にまとめる。

- 1) 疲労損傷と補修事例のデータベースを応用した鋼橋の疲労損傷に関する近接目視点検教育ソフトを開発した。開発にあたって、3Dゲーム開発ソフトのUnityを用いることにより、インターネットにアクセスできる環境下であれば、PCとウェブブラウザを用いて誰でも利用可能なものとした。
- 2) 点検対象の橋梁は、鋼橋の一般的な形式の一つであるRC床版鋼単純鋼桁橋とし、その橋梁モデルに鋼桁に発生する典型的な疲労き裂10種類をモデル化した。
- 3) 利用者が選択できるmodeとして、Learning modeとExperience modeの二つのmodeを用意した。Learning modeは利用者に対して、モデル化した疲労き裂の部位のヒントが画面上に明示されるようにし、利用者が疲労き裂の発生部位と発生原因とを効率的に学習できるものとした。Experience modeは、疲労き裂の部位のヒントは明示しない仕様とし、利用者自身の鋼桁の疲労損傷に対する要近接目視箇所の理解度を確認できるものとした。
- 4) アンケート調査の結果、テキストによる講習との比較では、疲労損傷発生部位の理解及び疲労損傷発生原因の理解について、開発した教育ソフトの優位性を確認できたが、疲労損傷発生部位の理解に比べ、疲労損傷発生原因の理解に対する支持率は低い結果となった。開発した教育ソフトで発生原因を示しているものは「疲労き裂解説スライド」のみであり、テキストと同様に文章で明示されるものであるため、発生部位ほどの優位性は得られなかったものと考えられる。
- 5) その他のアンケート調査項目では、インターネットによる自己学習での利用、会社での研修での利用、鋼桁以外（鋼床版箱桁、トラス橋、アーチ橋など）での利用に対して、開発した教育ソフトへの高い支持が得られ、本教育ソフトの有用性が確認できた。

第5章 結論

本研究では、まず、基本構成は三木らの鋼橋の疲労損傷と補修事例のデータベースを継承し、プラットフォームを変更することで、利便性を向上させた新しいインターネット上のデータベースを構築した。また、データベースの収録事例として近年の事例を追加するとともに、収録事例について、損傷原因による分類などの分析を行った。

次に、都市高速道路会社の実際の点検結果をもとに、主桁と横桁の取り合い部の疲労損傷のデータベースを構築するとともに、そのデータベースを使って、当該部位の構造ディテールと損傷レベルの関係について分析を行った。また、既存のデータを組み合わせることによって、各疲労損傷の情報に緯度・経度情報を追加し、地理情報システム上にプロットすることで、当該疲労損傷の「見える化」等を試みた。

更に、新しいデータベースに収録した疲労損傷に関する情報を活用し、鋼橋の疲労損傷の近接目視点検を学習することができる教育ソフトを開発し、その有用性を把握した。

以下に、本研究で得られた成果を示す。

第1章では、本研究の背景、関連する既往の研究、本研究の目的について述べた。

第2章では、利用者がその構築に参加可能な鋼橋の疲労損傷と補修事例のデータベースの構築を行うとともに、構築したデータベースに収録した事例について、損傷原因による分類、損傷原因と補修方法の組合せの分布、損傷原因別の損傷発見までの供用年数と損傷事例数との関係、損傷レベルによる分類、溶接の不具合の種類と事例数について分析を行った。

第2章で得られた成果は以下の通りである。

- 1) プラットフォームとしてWiki型コンテンツ管理システムの一つであるPukiWikiを採用し、利用者がその構築に参加可能な鋼橋の疲労損傷と補修事例のデータベースを構築した。構築したデータベースのアドレスを公開し、Webブラウザを用いて技術者の誰もが閲覧可能な環境を整備した。また、従来のデータベースに収録されていた事例に最近の事例を加え収録事例数を計204事例とした。
- 2) 収録した事例について分析を行った結果、損傷原因としては、設計で想定していない応力や変形によるもの（Cause3）が最も多く、次に低い疲労強度の継手ディテールの採用によるもの（Cause2）が多いことが分かった。
- 3) 損傷原因について国内の事例と海外の事例とを比較すると、溶接の不具合によるもの（Cause1）の報告事例が海外では多く、国内では少ないことが分かった。ただし、この分析には鋼製橋脚は含めておらず、その取扱いには注意する必要がある。
- 4) 補修方法は、継手周辺から構造系全体までを含めた接合部ディテールを変更する方法を採

用する事例が最も多く、次に添接板による補修が多いことが分かった。

- 5) 損傷原因別の損傷発見までの供用年数を調べた結果、溶接の不具合によるもの(Cause1)は供用25年までに、振動によるもの(Cause4)は供用15年までに発見されており、供用の早い段階で発見されていることが分かった。低い疲労強度の継手ディテールの採用によるもの(Cause2)と設計で想定していない応力や変形によるもの(Cause3)については供用15年から25年に損傷発見のピークがあり、供用45年までにほぼ全ての損傷が発見されていることが分かった。
- 6) 収録事例の多いCause2とCause3を原因とする事例について損傷レベルの分類を行った結果、Cause2については大半が損傷レベルIVを占めた。Cause2を原因とする疲労き裂は、き裂が進展すると、主桁の脆性破壊につながる可能性が高いため、点検にあたっては該当部位を特に入念に実施する必要がある。
- 7) 溶接の不具合を原因とする事例について、溶接欠陥の種類を調べた結果、そのほとんどが、工場製作段階において、開先加工された部位が十分に裏はつりされることなく溶接されたことによる完全溶け込み溶接部の未溶着であった。

第3章では、実際の都市高速道路会社における点検結果を基に構築した、主桁と横桁の取り合い部の疲労損傷のデータベースについて述べるとともに、そのデータベースを使って行った仕口タイプの割合、仕口タイプと損傷レベルの関係の分析結果、各疲労損傷発生箇所の「見える化」と累積等価繰返し回数とき裂発生箇所との関係について述べた。

第3章で得られた成果は以下の通りである

- 1) 鋼桁橋の主桁と横桁との取り合い部の疲労損傷に関するデータベースを、首都高速道路における点検補修台帳におけるクラック情報データと上部工台帳データを統合することにより構築した。取り合い部の疲労き裂数は1,184個である。
- 2) 主桁と横桁の取り合い部のディテールは、面外ガセットタイプ(Type-A)と、連結板がウェブを貫通するタイプがあり、貫通板タイプは、貫通板端部のスカラップの大きさや位置により3タイプ(Type-B, C, D)がある。損傷数としてはType-Aが72%、Type-Bが13%、Type-Cが7%、Type-Dが8%であった。各タイプの疲労強度は、Type-Aが最も高くJSSC基準のG等級、Type-BがH等級、Type-CおよびType-DはH等級を下回る。
- 3) 損傷レベルを以下のように分類した。
 - ・ 損傷レベルI：亀裂なし。
 - ・ 損傷レベルII：疲労亀裂が溶接ビード上にとどまっている状態。
 - ・ 損傷レベルIII：疲労亀裂がウェブの母材部に侵入しているがその表面長さが5mm以下の状態。
 - ・ 損傷レベルIV：疲労亀裂が5mm以上母材の中に進展している状態。
- 4) 注意すべき損傷レベルといえるIIIおよびIVの割合は、Type-Cが14%、Type-Dが6%、Type-A

が4%、Type-Bが1%であった。その順はほぼ疲労強度の低い順と一致している。取り合いディテールの分布は路線によって異なるため、経年や活荷重の違いなども影響すると考えられる。

- 5) 首都高速における開通（1962年度）～2001年の累積等価繰返し回数と、疲労き裂発生数を比較したところ、累積等価繰返し回数の多い路線での疲労亀裂の発生が多いことが見える。ただし、累積等価繰返し回数が比較的少ないにもかかわらず疲労亀裂の発生数が多い箇所もある。これについては、累積等価繰返し回数を更新する、またはき裂の再確認などから見直す必要がある。
- 6) 上記のように、必要な情報を適切に収集・記録し、適切にデータベース化することで、損傷の可視化や損傷の原因などについて分析が容易にできることを示した。

第4章では、第2章で述べた鋼橋の疲労損傷と補修事例の新しいデータベースを応用した、鋼橋の疲労損傷に関する近接目視点検教育ソフトの開発を行うとともに、開発した教育ソフトを用いて、点検に関する講習会を行い、講習会後のアンケート調査により、開発した教育ソフトの有用性の把握を行った。

第4章で得られた成果は以下の通りである。

- 1) 疲労損傷と補修事例のデータベースを応用した鋼橋の疲労損傷に関する近接目視点検教育ソフトを開発した。開発にあたって、3Dゲーム開発ソフトのUnityを用いることにより、インターネットにアクセスできる環境下であれば、PCとウェブブラウザを用いて誰でも利用可能なものとした。
- 2) 点検対象の橋梁は、鋼橋の一般的な形式の一つであるRC床版鋼単純鉸橋とし、その橋梁モデルに鋼鉸に発生する典型的な疲労き裂10種類をモデル化した。
- 3) 利用者が選択できるmodeとして、Learning modeとExperience modeの二つのmodeを用意した。Learning modeは利用者に対して、モデル化した疲労き裂の部位のヒントが画面上に明示されるようにし、利用者が疲労き裂の発生部位と発生原因とを効率的に学習できるものとした。Experience modeは、疲労き裂の部位のヒントは明示しない仕様とし、利用者自身の鋼鉸の疲労損傷に対する要近接目視箇所の理解度を確認できるものとした。
- 4) アンケート調査の結果、テキストによる講習との比較では、疲労損傷発生部位の理解及び疲労損傷発生原因の理解について、開発した教育ソフトの優位性を確認できたが、疲労損傷発生部位の理解に比べ、疲労損傷発生原因の理解に対する支持率は低い結果となった。開発した教育ソフトで発生原因を示しているものは「疲労き裂解説スライド」のみであり、テキストと同様に文章で明示されるものであるため、発生部位ほどの優位性は得られなかったものと考えられる。
- 5) その他のアンケート調査項目では、インターネットによる自己学習での利用、会社での研修での利用、鉸以外（鋼床版箱鉸、トラス橋、アーチ橋など）での利用に対して、開発

した教育ソフトへの高い支持が得られ、本教育ソフトの有用性が確認できた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京都市大学三木千壽学長には、終始、丁寧なご指導と温かい激励を賜りました。心から感謝の意を表します。

新型コロナによる緊急事態宣言下の中、本論文の主査を務めて頂いた、東京都市大学建築都市デザイン学部の丸山収教授、副査を務めて頂いた、白旗弘実教授、焦 瑜准教授、関屋英彦准教授には、本研究に対する貴重なご意見とアドバイスを賜りました。心から感謝の意を表します。

第2章の鋼橋の疲労損傷と補修事例のデータベースの構築、及び第4章の近接目視点検教育ソフトの開発にあたっては、小西拓洋博士（当時東京都市大学特任教授）、田井政行琉球大学准教授に多大なご協力を賜りました。近接目視点検教育ソフトによる講習会の実施とアンケート調査については、（株）オリエンタルコンサルタンツ、（株）エイテック、（株）ジャストの皆様にご協力を頂きました。心から感謝の意を表します。

学生時代の指導教官である、東北大学大学院工学研究科土木工学専攻の岩熊哲夫教授、東北学院大学大学院工学研究科環境建設工学専攻の中沢正利教授（当時東北大学大学院工学研究科土木工学専攻助教授）には、研究へのアプローチと論文執筆の基礎を教えて頂きました。研究室の同期である、東北大学大学院工学研究科土木工学専攻の斉木功准教授、国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部橋梁研究室の白戸真大室長のご活躍には、現在も大きな刺激を受けており、本研究を進めるモチベーションとなりました。心から感謝の意を表します。

筆者が勤務するエム・エムブリッジ（株）には、本研究を実施するきっかけとなった、東京都市大学で勤務する機会を頂きました。また、河合良彦東日本支店長、橋本幹司技師長、鈴木俊光プロジェクト室長には、本研究のみならず、入社以来、様々な面で、ご指導と激励を賜りました。心から感謝の意を表します。

最後に、いつも笑いの絶えない明るい家庭で筆者を支えてくれている、妻の眞由美、娘の理子、すずに心から感謝します。

※本研究は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究(A)課題番号 25249063）の助成を受けて実施したものです。また、東京都市大学と首都高速道路株式会社、首都高技術株式会社、一般財団法人首都高速道路技術センターとの共同研究「都市基盤施設の再生工学首都高における点検・診断技術の開発・高度化」の一環として実施したものです。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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), 土木技術資料, 51-10, pp.39-40, 2009.
- 2) 三木千壽, 坂野昌弘, 館石和雄, 福岡良典: 鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分析, 土木学会論文集, 第 392 号/I-9, pp. 403-410, 1988.
- 3) 三木千壽, 伊藤裕一, 後藤清彦: 疲労損傷に対する補修事例のインターネット上データベースの構築とその利用, 土木学会論文集, No. 668/I-54, pp. 271-281, 2001.
- 4) 澤村修司, 溝部和広, 内村俊二, 宮本文穂: 橋梁点検者のためのバーチャルリアリティ損傷体験システムの開発, 土木情報利用技術論文集, vol.19, pp.227-238, 2010.
- 5) ウィキメディア財団: Wikipedia, <https://www.wikipedia.org/>, 2016年6月27日確認.
- 6) 大河原哲: PukiWiki による Web コラボレーション入門, 秀和システム, 2006.
- 7) 三木千壽: 橋梁の疲労と破壊, pp. 10-13, 朝倉書店, 2011.
- 8) 土木学会鋼構造委員会: 鋼橋の疲労対策技術, 鋼構造シリーズ 22, pp. 28-29, 土木学会, 2013.
- 9) 金子哲也: 生月大橋の補修工事について, 九州技報, 九州地方計画協会, 2011.
- 10) 三木千壽: 海上輸送中に発生したトラス桁の損傷, 土木学会誌, Vol. 97, No. 4, pp. 120-121, 2012.
- 11) 三木千壽: 橋梁の疲労と破壊, p. 51, 朝倉書店, 2011.
- 12) 三木千壽: 橋梁の疲労と破壊, pp. 58-62, 朝倉書店, 2011.
- 13) 木ノ本剛, 仲野孝洋: 応力計測結果に基づく鋼 I 桁橋の横構ガセット溶接部の疲労損傷原因推定, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, I-579, 2006.
- 14) 木ノ本剛, 平林泰明: 鋼 I 桁橋の横構ガセットスカラップ部に発生した疲労損傷の原因分析, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, I-037, 2007.
- 15) 渡辺真至, 西浩嗣, 谷倉泉, 海野清司: 鋼桁支承ソールプレート溶接部の疲労損傷と補強効果, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, I-A389, 1996.
- 16) 貝沼重信, 山田健太郎, 西岡啓治, 中村一平, 石井博典: 鋼 I 桁橋の主桁上フランジと横桁の取合部の応力緩和による疲労強度向上法, 構造工学論文集, Vol. 43A, pp. 1025-1032, 1997.
- 17) 石井博典, 堀江佳平, 新名勉, 貝沼重信, 山田健太郎: 補修溶接がウェブギャップ部の疲労性状に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 1183-1191, 1999.
- 18) 吉岡勉, 原田政彦, 山口宏樹, 伊藤信: 斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp. 199-208, 2008.
- 19) 吉岡勉, 伊藤信, 山口宏樹, 松本泰尚: 鋼トラス橋の斜材振動連成とモード減衰変化を利用した構造健全度評価, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 3, pp. 516-534, 2010.
- 20) 土木学会鋼構造委員会: 鋼橋の疲労対策技術, 鋼構造シリーズ 22, pp. 29-30, 土木学会, 2013.
- 21) 中村充, 増井隆, 仲野孝洋, 森猛: 「主桁-横桁取合い部」損傷の補修検討, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, I-140, 2009.

- 22) 石丸浩司, 増田高志, 佐々木靖彦, 小西拓洋, 澁谷敦: 鋼橋の橋脚隅角部・桁端切欠き部・支承受台部の疲労損傷に対する大規模対策, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, I-545, 2003.
- 23) 津田誠, 神田信也: 鋼橋の疲労損傷に対する大規模工事概要, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, I-112, 2007.
- 24) 瀬尾高宏, 大蔵大輔, 金子修, 和泉義和, 渡部鐘多朗: 実在する橋桁の疲労損傷に対する溶接補修, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, I-422, 2005.
- 25) 加福和直, 三宅淳市, 福永昭彦, 森野真之, 木村匡志: 鋼鈹桁の主桁支点上横構ガセット接合部に生じる疲労き裂要因と補強対策, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, I-450, 2010.
- 26) 長田隆信, 胡摩崎史英: 鋼箱桁橋の疲労損傷に対する補修事例, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, I-234, 2008.
- 27) 徳増健, 西岡勉, 田中智之: 東大阪線鋼床版 I 桁き裂損傷対応検討報告, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, I-669, 2011.
- 28) 永木勇人, 鷹羽新二, 二葉悟: き裂形状の三次元データ可視化により情報共有された鋼橋補修工事事例, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, I-616, 2014.
- 29) 熊野拓志, 神田恭太郎: 鋼箱桁ゲルバー切欠部における亀裂損傷部の溶接補修について, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, I-309, 2002.
- 30) 牛越裕幸, 佐々木一哉, 今井正智, 増井隆, 高草木智也: 鋼 I 桁の主桁端部の疲労損傷補修, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I-006, 2004.
- 31) 田中芳和, 時田英夫, 今井正智, 寺島善宏, 小林一雄: 斜張橋のペンデル支承損傷における原因と改良について, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I-018, 2004.
- 32) 小林一雄: 小松川橋梁ペンデル支承取替工事の設計・施工, 横河ブリッジグループ技報, No. 34, pp. 108-115, 2005.
- 33) 飯島雄一, 小西由人: 鋼箱桁ダイヤフラムのき裂補強検討, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, I-036, 2007.
- 34) 藤田真実, 武野優, 讃岐康博, 川村英文, 元井邦彦, 細川雅史: 鋼橋疲労亀裂の補修・補強に関する試験施工, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I-001, 2004.
- 35) 小河保之, 松尾英樹, 梶川正純: 床組部材の疲労損傷と保全対策 (その 1), 土木学会第 56 回年次学術講演会概要集, I-B151, 2001.
- 36) 丸山明, 梶川正純, 松尾英樹: 床組部材の疲労損傷と保全対策 (その 2), 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, I-B152, 2001.
- 37) 今村壮宏, 松田哲夫, 岩崎雅紀, 貝沼重信: 関門橋の補修における FEM 解析の適用事例, 第 15 回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp. 29-37, 2012.
- 38) 永田淳, 壁谷聡浩, 今村壮宏, 山下恭敬, 松田哲夫, 坂田裕彦: 40 年間供用された吊橋床組縦桁の疲労対策一補修施工一, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, I-188, 2014.

- 39) 名取暢, 浅岡敏明, 稲田育朗: 鋼橋の補修・補強, 横河ブリッジ技報, No. 21, pp. 63-90, 1992.
- 40) 寺田博昌, 松本好生, 岩崎雅紀, 江口宏, 佐々木保隆: 斜角を有する合成桁橋の損傷調査および補修, 補強方法の検討, 横河橋梁技報, No. 16, pp. 39-45, 1987.
- 41) 牟田口拓泉, 中野博文, 木ノ本剛: 張出しブラケットを有する主桁に発生した疲労き裂の応急対策, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, VI-008, 2006.
- 42) 近畿地方整備局奈良国道事務所: 名阪国道の橋を守るために, <http://www.kkr.mlit.go.jp/nara/ir/press/h22data/press20101122.pdf>, 2016年6月27日確認.
- 43) 国土交通省: 鋼橋(上部構造)の損傷事例, http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo3_1_1.pdf, 2016年6月27日確認.
- 44) 高橋和也, 内藤繁, 関雅樹, 市川篤司, 三木千壽: 鋼鉄道トラス橋縦桁横桁連結部の疲労き裂の原因解明, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp. 235-247, 2008.
- 45) 高橋和也, 内藤繁, 関雅樹, 市川篤司, 三木千壽: 鋼鉄道トラス橋縦桁横桁連結部の疲労特性とその改善方法, 土木学会論文集 A, Vol. 64, No. 2, pp. 394-407, 2008.
- 46) 小芝明弘, 宮西正人, 八島博昭, 相田亨, 宮原幸春: 鋼橋の疲労損傷に対する応力軽減工法の現場適用例, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, I-547, 2003.
- 47) 土木学会鋼構造委員会: 鋼橋の疲労対策技術, 鋼構造シリーズ 22, p. 16, 土木学会, 2013.
- 48) 土木学会鋼構造委員会: 鋼橋の疲労対策技術, 鋼構造シリーズ 22, pp. 16-17, 土木学会, 2013.
- 49) 丹羽雄一郎, 松本健太郎, 矢島秀治, 小林裕介: 鉄道合成桁ソールプレート溶接部の疲労対策, 構造工学論文集, Vol. 58A, pp. 611-621, 2012.
- 50) 矢野恵美子, 木村元哉, 西田寿生, 丹羽雄一郎: 鋼鉄道橋支承部における3面当板工法の施工報告, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, I-145, 2010.
- 51) 土木学会鋼構造委員会: 鋼橋の疲労対策技術, 鋼構造シリーズ 22, p. 19, 土木学会, 2013.
- 52) 星野智之, 長澤徹, 小林敬一: 都市部における老朽化橋りょう(バックルプレート桁)改良について, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, IV-161, 2008.
- 53) 伊藤裕規, 中瀬理至, 中山太士, 岡本陽介: 炭素繊維シートを用いた鋼鉄道橋の疲労き裂補修, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, I-614, 2011.
- 54) 宮島英樹, 中瀬理至, 中山太士, 石川敏之: 炭素繊維シートを用いた鉄桁き裂修繕, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, I-448, 2010.
- 55) 喜多輝, 中山太士, 小林裕介, 萬代能久: 半円切欠き工法を用いた鋼鉄道橋の端補剛材の補修, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, I-615, 2011.
- 56) 山口慎, 国分宏樹, 小林裕介: 斜角を有する開床式鋼下路鉄道橋端横桁ニーブレースの疲労変状原因と対策, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, I-041, 2007.
- 57) 高木俊介, 中西巧: 東海道新幹線下路トラス橋の腕材取付溶接部の亀裂変状に対する対策について, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, IV-225, 2009.

- 58) 佐藤浩二, 金谷大樹, 藤川義人: 腹板にブラケットを有する受桁に発生した亀裂の原因と対策事例について, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, IV-223, 2009.
- 59) 大谷将一郎, 西田寿生: 支承部付近の疲労き裂に対する 3 面当板工法の改良について, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, I-125, 2011.
- 60) 一條健吾, 内田一人, 中山太士: 丹羽雄一郎: 下路トラスの縦桁取替工事について, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, IV-228, 2009.
- 61) 千明祐也, 塚原高志, 井上英一: 鋼鉄道橋の支承部補修および応力測定による安全性と補修効果の確認, 土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集, VI-096, 2014.
- 62) 塚本清成, 小坂厚, 四宮卓夫, 工藤伸司: 橋りょう縦桁亀裂の原因と対策, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, IV-190, 2005.
- 63) 佐藤浩二, 川元隆史, 小芝明弘: 無道床ボックス桁鉄道橋の変状メカニズムとその対策について, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, IV-101, 2004.
- 64) 岡義晃, 今井卓也, 井上英司, 杉ノ上大我: 疲労亀裂の生じた鉄桁の補修工法について, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, IV-330, 2006.
- 65) 徳永直, 今井卓也, 七村和明, 丹羽雄一郎: 槽状桁の疲労き裂における一考察, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, I-175, 2009.
- 66) 小林祐輝, 吉田剛: 下路トラス橋縦桁に発生したき裂の対策方法について, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, IV-159, 2008.
- 67) 神谷弘志, 友利方彦: 鉄道鋼トラス橋に発生した疲労損傷の原因と対策, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, I-421, 2003.
- 68) 山村啓一, 重松彰人, 川崎智央: 鋼鉄道橋における下路鉸桁端横桁の取替えについて, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, IV-343, 2010.
- 69) 中泉治, 海沼誠司, 岡崎伸之介: 鋼鉄道橋りょう支点部の変状に関する一考察, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, I-275, 2013.
- 70) 岡義晃, 佐藤徹, 田村義政, 蔦守隆: 鋼鉄道トラス橋の縦桁に発生した疲労き裂の要因と対策工法, 土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, VI-191, 2010.
- 71) 岩岸現, 小林亜沙子, 高橋武志: 支点部にアオリが発生した鋼橋の変状と対策について, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, VI-459, 2013.
- 72) 高橋武志, 井上英一, 加藤勝, 浅岡敏明: トラフガーターの部材補修補強による延命化と性能評価, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, VI-007, 2006.
- 73) 細井幹生, 中山太士, 大谷将一郎, 松本健太郎: 槽状桁端支材の疲労損傷に対する補修方法の提案と適用 (その 1), 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, VI-461, 2013.
- 74) 大谷将一郎, 中山太士, 細井幹生, 公門和樹: 槽状桁端支材の疲労損傷に対する補修方法の提案と適用 (その 2), 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, VI-462, 2013.
- 75) 杉村誠, 社浦潤一, 角田慶一: 第 1 ボスポラス橋のハンガープレート交換工法, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, VI-064, 2009.

- 76) Zhou, Y. E., Beecher, J. B., Guzda, M. R. and Cunningham II, D. R. : Investigation and retrofit of distortion-induced fatigue cracks in a double-deck cantilever-suspended steel truss bridge, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 141, No. 1, D4014011, 2015.
- 77) 高田佳彦, 川上順子, 酒井優二, 坂野昌弘 : 半円切欠きを用いた既設鋼床版橋主桁垂直補剛材上端溶接部の疲労対策, 鋼構造論文集, Vol. 16, No. 62, pp. 35-46, 2009.
- 78) 濱博和, 讃岐康博, 夏秋義広, 野中砂男, 中村香澄, 水野洋幸, 坂野昌弘 : 鋼床版バルブリーブと横リブ交差部の補強効果の確認, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, I-133, 2009.
- 79) 田畑晶子, 木代穰, 西岡勉, 藤林美早 : 鋼床版 U リブ溶接部貫通き裂の損傷要因と対策, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, I-547, 2006.
- 80) 牛越裕幸, 下里哲弘, 弓削太郎, 児玉孝善 : 実橋における既設鋼床版への SFRC 補強効果確認計測, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, CS2-019, 2007.
- 81) 緑川和由, 玉越隆史, 村越潤, 山本洋司, 児玉孝善, 一瀬八洋, 太田孝二 : 大平高架橋の鋼床版における SFRC 舗装によるひずみ低減効果, 第 6 回道路橋床版シンポジウム論文報告集, pp. 111-120, 2008.
- 82) 齋藤豪, 鳥羽正樹, 木ノ本剛, 大道裕紀 : 鋼床版トラフリブの取替えによる補修の効果と応力性状の確認, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, I-202, 2008.
- 83) 児玉孝好, 後藤和満, 加形護, 近藤充志 : 供用下における SFRC による鋼床版の疲労対策, 橋梁と基礎, Vol. 40, No. 11, pp. 30-38, 建設図書, 2006.
- 84) 増井隆, 溝江慶久, 町田文孝, 勝俣盛, 大石隆宏, 石川誠 : 鋼床版箱桁橋の端ダイヤフラムに生じた疲労き裂に関する一考察, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, I-575, 2006.
- 85) 「道路橋補修・補強事例集」編集委員会 : 疲労損傷した鋼床版トラフリブの再溶接および部材取替えによる対策, 道路橋補修・補強事例集, pp. 116-118, オフィス・スペース, 2013.
- 86) 三木千壽 : 橋梁の疲労と破壊, pp. 133-137, 朝倉書店, 2011.
- 87) 新山惇, 佐藤昌志, 三田村浩, 岩崎雅紀, 石井博典 : 鋼床版縦リブ溶接部の疲労補強対策に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 1047-1054, 2001.
- 88) 杉本義博, 塚本成昭, 青木康素 : 疲労き裂に対する ICR 処理の試験施工と補修効果, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, I-553, 2013.
- 89) 神田信也, 高橋成典, 村井啓太, 齋藤豪 : 既設鋼床版閉断面 Y 型リブの疲労き裂対策検討, I-301, 2012.
- 90) 高田佳彦, 中島隆, 富永知徳, 松岡和己 : 鋼床版における超音波衝撃処理の試験施工, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, I-221, 2008.
- 91) 藤林美早, 田畑晶子, 西岡勉, 木代穰 : 鋼床版デッキ貫通き裂損傷に関する報告, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, I-546, 1998.
- 92) 塚狭研治, 桑原英之 : 交通共用下における疲労亀裂補修, 駒井ハルテック技報, No. 2, pp.

- 80-81, 2012.
- 93) 川上順子, 高田佳彦, 坂野昌弘: 鋼床版デッキと U リブ溶接部の疲労損傷に対する供用下溶接補修工法に関する検討, 鋼構造論文集, Vol. 22, No. 85, pp. 85-100, 2015.
 - 94) 松沢利充, 工藤光弘, 柳原正浩: ゴールデンホーン橋の補修, 橋梁と基礎, Vol. 33, No. 12, pp. 11-16, 建設図書, 1999.
 - 95) 森河久, 下里哲弘, 三木千壽, 市川篤司: 箱断面柱を有する鋼製橋脚に発生した疲労損傷の調査と応急対策, 土木学会論文集, No. 703/I-59, pp. 177-183, 2002.
 - 96) 木ノ本剛, 下里哲弘, 弓削太郎: 鋼横梁支点直下ダイヤフラム溶接部の疲労損傷原因の一考察, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I-548, 2004.
 - 97) 黒河武晴, 臼井恒夫, 山本哲, 一宮充: 円柱鋼製ラーメン橋脚隅角部の疲労損傷対策の事例, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, I-544, 2003.
 - 98) 下里哲弘, 清川昇悟, 花岡幸治, 化鍾福: 丸柱一横梁ウェブ貫通により製作された鋼製橋脚隅角部の疲労損傷調査と対策, I-576, 2006.
 - 99) 尾身正司, 飯古道則, 斎藤史朗, 三木千壽: 矩形鋼製橋脚隅角部の疲労損傷と補強設計 (その 2), 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, I-297, 2002.
 - 100) 須藤肇, 松岡昇, 渡邊裕一: 鋼製橋脚隅角部における疲労損傷部の亀裂除去対策事例, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, I-550, 2004.
 - 101) 梶原仁, 安田修, 鷹羽新二: 鋼製橋脚支点直下における疲労き裂観察, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, I-590, 2006.
 - 102) 臼井恒夫, 木ノ本剛, 栗原康行, 津村直宣, 月田良博, 三木千壽: 角鋼を用いた鋼橋脚隅角部の疲労き裂の補修対策, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, I-431, 2003.
 - 103) 菅原孝男, 大泉政彦, 松川俊介, 杉本一朗, 竹淵敏郎, 菅沼久忠: 鋼製門型ラーメン橋脚隅角部の変状に関する調査検討ーその 1ー, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, VI-141, 2011.
 - 104) 三木千壽: 橋梁の疲労と破壊, pp. 127-129, 朝倉書店, 2011.
 - 105) 杉本雅一, 三木千壽: 鋼管基部補強 U 字リブ構造の疲労強度, 土木学会論文集, No. 787/I-71, pp. 47-56, 2005.
 - 106) 三木千壽: 橋梁の疲労と破壊, pp. 131-133, 朝倉書店, 2011.
 - 107) 前野裕文, 片桐英喜, 小塩達也, 山田健太郎: 都市内高架橋に設置された情報板門型柱の疲労き裂発生要因の分析, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, I-392, 2005.
 - 108) 片桐英喜, 前野裕文, 山田健太郎, 小塩達也, 山田聡: 門型標識柱基部に発生した疲労き裂の調査・検討および補修工事について, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集, I-402, 2005.
 - 109) 高橋成典: 長大橋フィンガージョイントに生じたき裂損傷対策, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, I-564, 2013.
 - 110) 阪神高速道路公団, 阪神高速道路管理技術センター: 阪神高速道路における土木構造物補修

- 事例集 III, pp. 50-54, 1993.
- 111) 三木千壽：橋梁の疲労と破壊, p. 94, 朝倉書店, 2011.
- 112) 三木千壽：橋梁の疲労と破壊, p. 18, 朝倉書店, 2011.
- 113) J. W. Fisher, D. R. Mertz and A. Zhong: Steel Bridge Members Under Variable Amplitude Long Life Fatigue Loading, NCHRP Project 12-15(4), 1983.
- 114) J. W. Fisher (阿部英彦, 三木千壽監訳)：鋼橋の疲労と破壊—ケーススタディー, 建設図書, 1987.
- 115) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 2012.
- 116) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編, 2017.
- 117) 町田文孝, 三木千壽, 吉岡昭彦：主桁ウェブ貫通型横桁取り合い部の疲労特性, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.349-357, 1999.
- 118) 小西拓洋, 横山薫, 関屋英彦, 平野秀一, 三木千壽：ガセット取付部疲労亀裂の点検管理基準の提案, 鋼構造論文集, Vol.27, No.105, pp.43-52, 2020.
- 119) 時田英夫, 永井政伸, 三木千壽：交通データをベースとした首都高速道路の疲労環境の評価, 土木学会論文集, No.694/I-72, pp.55-65, 2005.
- 120) 国土交通省：道路の維持修繕に関する省令・告示の制定について（道路法施行規則の一部改正等）, 2014.
- 121) 田名瀬寛之, 築山有二, 国枝稔, 中村光：ニュー・ブリッジを活用した橋梁維持管理技術者の臨床型人材育成プログラム, 土木学会第 67 回年次学術講演会 VI-446, 2012.
- 122) 築山有二, 中村光, 国枝稔：傷んだ橋梁で点検技術が学べる施設を活用した技術者育成の取組み, 土木学会第 68 回年次学術講演会, CS1-010, 2013.
- 123) 大阪大学運動器バイオマテリアル学講座, <http://www.ort-biomaterial.med.osaka-u.ac.jp/research.html>, 2015年8月10日確認.

付録 データベース収録事例

第2章のデータベースにおける収録事例を付表-1から付表-6に示す。付表中において，“Const”は建設年，“Service”は損傷発見までの供用年数を示す。“Const” および“Service”の欄に“－”の記載があるものは建設年または損傷発見までの供用年数が参考文献からは不明であることを示す。また，“Ref No”は参考文献の番号を示す。

付表-1 収録事例一覧（国内道路橋）

| No | Structure | Const | Service | Crack location | Cause No | Repair No | Damage Level | Repair method | Ref No |
|----|--|-------|---------|---|-------------|--------------|-----------------|--|-----------|
| | | Year | | | | | | | |
| 1 | Steel bridge on roadway bridge (at coped end) | 1964 | 14 | Coped end of main girder | 2 | H | IV | Stop hole, Bolted splice | 3) |
| 2 | Steel bridge on roadway bridge (at coped end) (Part 2) | 1968 | 13 | Coped end of main girder | 2 | H | IV | Re-weld, Bolted splice | 3) |
| 3 | Jhojuin Br. (connection plates between floor beams and truss chords) | 1969 | 22 | Welds toe of connection plates between floor beams and main truss chord members | 3 | H | II | Gouging, Re-weld New attachment | 3) |
| 4 | Steel bridge on Hanshin Expressway | 1969 | 14 | Welds of web gap plates at the floorbeam and sway bracing locations | 3 | B | III | Replacement, Gouging Re-weld | 3) |
| 5 | The Fourth Line of The Metropolitan Expressway | 1973 | 15 | Welds of web gap plates at the girder-floorbeam locations | 3 | C | III | Replacement, Re-weld Tig dressing | 3) |
| 6 | Steel bridge of The Tomei Expressway | 1968 | 15 | Weld toes of connection plate end at transverse lateral locations | 3 | H | III | Addition of cross bracing or reinforced concrete deck | 3) |
| 7 | Shindenpo Bridge of Route 43 | 1966 | 24 | Sole plate front welds at girder supports | 2 | E | IV | Replacement, Bolted splice | 3) |
| 8 | Skewed girder bridge on roadway bridge | 1964 | 18 | Fillet weld of sole plate at girder support location | 2 | G | IV | Stop hole, Bolted splice | 3) |
| 9 | The Third line of The Metropolitan Expressway | 1971 | 15 | Sole plate welds at girder supports | 2 | G | IV | Stop hole, Bolted splice | 3) |
| 10 | Two hinges arch bridge on roadway bridge | 1965 | 16 | Welds at gusset plate connection with stiffening girders and arch ribs | 2 | H | IV | Stop hole, Bolted splice, Pin connection | 3) |
| 11 | Deck-type two hinge arch Br. | 1962 | 20 | Ends of side span girder | 2 | G | IV | Stop hole, Bolte dsplce, Install bracket | 3) |
| | | 1962 | 20 | Connections between column member and arch ribs | 3 | H | III | Improve guseet detail, Re-weld and Tig dressing | 3) |
| 12 | Shemimaru Bridge of Meishin Expressway | 1963 | 21 | Vertical member ends and stringer webs | 2 | H | IV | Improvement of the gusset detail, Addition of the member | 3) |
| 13 | Two hinges arch bridge on roadway bridge (Part 2) | 1969 | 20 | Vertical member weld connections with arch ribs and stiffening girders | 3 | D | III | Removal of crack, Re-weld, Tig dressing, Bolted splice | 3) |
| | | 1969 | 20 | Boxing of the gusset plate end which connected the lateral bracing to the end floorbeam | 3 | D | III | Removal of crack, Re-weld, Tig dressing, Bolted splice | 3) |
| 14 | Through-type curved-chord warren truss bridge | 1968 | 21 | Floorbeam top web gaps at bottom chord member connections | 3 | H | III | Re-weld, Flanges connection | 3) |
| 15 | Deck-type Langer bridge on roadway bridge | 1955 | 21 | Top and bottom ends of stringers and floorbeams | 2 | H | IV | Knee bracing, Bolted splice | 3) |
| 16 | Minato-Shin bridge of R-23 | 1964 | 23 | Corners of diaphragms and at intersections of transverse and longitudinal ribs | 2 | H | IV | Stop hole, Addition of truss structure | 3) |
| 17 | Gerber bridge on roadway bridge | 1955 | 29 | Coped corner at hinge locations | 2 | H | IV | Stop hole, Re-weld, Bolted splice | 3) |
| 18 | Gerber bridge on roadway bridge (Part 2) | 1962 | 29 | Gerber hinge location | 2 | H | IV | Re-weld, Bolted splice | 3) |

| | | | | | | | | | |
|----|---|------|-----|---|---|---|-----|---|------------|
| 19 | Steel bridge on Hanshin Expressway (at bracket end) | - | - | Interior vertical stiffener end and at bracket connection with box girder web | 4 | E | - | Removal of crack, Bolted splice | 3) |
| 20 | Steel bridge on Hanshin Expressway (at gusset end) | - | - | Contact locations between gusset plates and vertical stiffeners | 2 | H | IV | Replacement, Angle connection | 3) |
| 21 | Steel bridge on Hanshin Expressway (at branching girder end) | - | - | Weld root between girder web and branching girder web | 1 | B | - | Gouging, Re-weld, Plate connection | 3) |
| 22 | Steel bridge on Hanshin Expressway (at web gusset) | 1973 | 13 | Fillet weld beads between girder web and gusset plate and between end vertical stiffeners and girder webs | 4 | E | - | Bolted splice | 3) |
| 23 | Steel bridge on Hanshin Expressway (at sole plate) | 1970 | 12 | Fillet weld toes of sole plates under girder webs | 2 | H | IV | Replacement | 3) |
| | | 1970 | 14 | Fillet weld toes of sole plates under girder webs | 2 | B | IV | Stop hole Scalloped+gouging+Re-weld, Welded and bolted splice | 3) |
| 24 | Steel bridge on Hanshin Expressway (at corner plate weld) | 1968 | 16 | Welds of the corner plates at the diaphragm locations | 3 | F | III | Gouging, Re-weld, Removal of a part of corner plates | 3) |
| 25 | Steel bridge on Hanshin Expressway (at cantilever bracket) | - | - | Flange-web fillet welds of cantilever brackets which supported sign poles | 4 | H | - | Replacement with bracket fabricated with full penetration groove weld | 3) |
| 26 | Steel bridge on Hanshin Expressway (at floor-beam coped end) | - | - | Coped web of the end floorbeam | 4 | E | - | Re-weld, Bolted splice | 3) |
| 27 | Komazawa Br. | - | 22 | Intersection of lower flange of stiffening girder and vertical member | 2 | E | IV | Grinding+Re-weld, stop hole, Bolted splice | 3) |
| 28 | Shitoku-Ohashi | 1967 | 0.4 | Fillet weld at gusset connection with diagonal members | 4 | H | | Circular plate connection, Spiraled of trip wire | 3) |
| 29 | Steel bridge on Hanshin Expressway (at floor-beam end) | 1970 | - | Weld toe of floorbeam bottom flange at floorbeam-girder connection | 3 | E | III | Bolted splice | 3) |
| 30 | Deck-type Arch bridge on Tomei Expressway | 1969 | - | Boxing joint at the vertical member connection with the stiffening girder | 3 | H | IV | Stop hole, Replacement of connection plate | 3) |
| 31 | Sozuka-Ohashi (at member connection) | 1966 | 15 | Joint of arch rib and cross beam and at cross beam-stringer connection | 3 | H | IV | Addition of diagonal members | 3) |
| | | 1966 | 15 | Weld beads of the suspension members at the lower lateral bracing connections with the stringer | 3 | H | IV | Replacement | 3) |
| 32 | Mashita Bridge | - | - | Vertical member and tie girder | 4 | H | - | Plate connection | 3) |
| 33 | Through-type Langer bridge on the roadway bridge | - | - | Changing part of section at both top and bottom ends of vertical members | 4 | H | - | Re-weld, Install of rib plate, Install of device | 3) |
| 34 | Steel bridge on roadway (bottom flange) | 1973 | 15 | Butt welding of bottom flange | 1 | E | - | Bolted splice | 7) |
| 35 | Ikitsuki Bridge | 1991 | 18 | Panel point of the diagonal member | 3 | H | III | Replacement | 8), 9) |
| 36 | Tokyo Gate Bridge | 2010 | 0 | Welded joint of bottom lateral rib and longitudinal rib | 4 | H | - | Replacement | 10) |
| 37 | Yamazoe Bridge | 1971 | 35 | Web panel of main girder | 2 | E | IV | Bolted splice | 11) |
| 38 | M Bridge | 1972 | 38 | Web panel of the end of the girder | 3 | H | IV | Bolted splice | 12) |
| 39 | The Third line of The Metropolitan Expressway(Part 2) | 1972 | 28 | Welded joints which joined the gusset plates of lateral bracings to the web panels of the main girders | 2 | E | IV | Bolted splice | 13) 14) |
| 40 | Steel bridge of The Tomei Expressway(at sole plate) | 1978 | 22 | Sole plate welds at girder support locations | 2 | H | IV | Gouging, Re-weld, Bolted splice | 15) |
| 41 | Steel Bridge on The Hanshin Expressway(web gap plate) | - | - | Web gap plates | 3 | H | III | Install semicircular notch | 16) 17) |
| 42 | Through Type Warren Truss | 1965 | 42 | Panel point of the diagonal member | 3 | H | III | Bolted splice | 18) 19) |
| 43 | Half-through-type Arch Bridge | 1970 | 37 | Panel point of archrib and hanger member | 3 | H | IV | Bolted splice | 20) |
| 44 | The Third line of The Metropolitan Expressway(Connection part structure between main girder and cross beam) | - | - | Connection part structure between main girder and cross beam | 2 | E | IV | Bolted splice | 21) |

| | | | | | | | | | |
|----|--|------|----|---|---|---|-----|---|------------|
| 45 | Inner Circular Route of The Metropolitan Expressway | 1964 | 40 | Corner of steel pier, coped end and base part of support | 3 | H | III | Full web of main girder, Cross beam enlargement, stringer enlargement | 22) |
| 46 | Inner Circular Route of The Metropolitan Expressway(part2) | - | - | Corner of steel pier, bracket and coped end | 3 | H | III | Construction of new cross girder | 23) |
| 47 | Steel bridge of The Metropolitan Expressway(corner of coped end) | - | - | Corner of coped end | 2 | H | III | Bolted splice, Re-welding | 24) |
| 48 | I section plate girder(jointed part between gusset plate and main girder) | - | - | Jointed part between gusset plate and main girder | 3 | H | III | Bolted splice | 25) |
| 49 | Steel bridge of The Metropolitan Expressway(box girder) | - | - | Steel box girder | 1 | H | - | Bolted splice, Drilling scallop | 26) |
| 50 | The Higashi-Osaka line of The Hanshin Expressway(at support point) | 1978 | 32 | Welded joint between lower flange of main girder and lower flange of cross girder | 2 | H | IV | Bolted splice | 27) |
| 51 | Steel bridge on roadway bridge(at support point) | 1971 | 42 | Welded joint between web of main girder and lower flange of main girder | 2 | E | IV | Bolted splice | 28) |
| 52 | Suzugamori ramp of The Metropolitan Expressway(coped end) | 1964 | 38 | Coped end of main girder | 2 | B | III | Removal of crack, Re-weld | 29) |
| 53 | Steel bridge of The Metropolitan Expressway(end of main girder) | - | - | Fillet weld of shoe seat and end of sole plate | 2 | H | IV | Stop hole, Replacement of bearings, Bolted splice | 30) |
| 54 | Komatsugawa bridge of The Metropolitan Expressway(Anchor bolt of pendel shoe) | 1971 | 31 | Anchor bolt of pendel shoe | 3 | H | IV | Install anchoring structure | 31) 32) |
| 55 | Steel bridge of The Metropolitan Expressway(at diaphragm) | - | - | Diaphragms of steel box girder | 2 | H | IV | Bolted splice | 33) |
| 56 | Sengawa bridge of Chuou Expressway(connection part between main girder and cross beam) | - | - | Connection part between main girder and cross beam | 3 | H | IV | Bolted splice | 34) |
| 57 | Gerber truss bridge(floor system) | 1954 | 45 | Joint between cross beam and stringer | 2 | H | IV | Bolted splice | 35) 36) |
| 58 | Kanmon bridge(Connection plates of stringers) | 1973 | 23 | Connecion plates of stringers | 2 | H | IV | Replacement of bearing supports | 37) 38) |
| 59 | Suspension bridge (hanger anchorage) | - | - | Hanger anchorage | 4 | H | - | Replacement of hanger members | 39) |
| 60 | Skew composite plate girder (Sway bracing) | 1967 | 20 | sway bracing | 3 | H | III | Gouging, Re-welds, Bolted splice | 40) |
| 61 | Steel bridge of The Metropolitan Expressway(Box girder with overhung bracket) | 1969 | 36 | Connection between main girder webs and lateral gussets | 3 | H | IV | Stop holes, Bolted splice | 41) |
| 62 | Kamihata Bridge(Girder end lower flange) | 1970 | 37 | Girder end lower flange | 3 | E | IV | Stop hole, Bolted splice | 42) |
| 63 | Funatonishi Bridge(End cross beam) | 1968 | 35 | End cross beam | 3 | H | IV | Replacement of end cross beam | 43) |

付表-2 収録事例一覧（国内鉄道橋）

| No | Structure | Const | Service | Crack location | Cause No | Repair No | Damage Level | Repair method | Ref No |
|----|---|-------|---------|--|-------------|--------------|-----------------|--|------------|
| | | Year | | | | | | | |
| 1 | Shinkansen Br. (end of gusset attached to a flange) | - | - | End of gusset attached to flange | 2 | F | IV | Fillet radius enlargement by machine cut | 3) |
| 2 | Shinkansen Br. (fatigue cracks at main girder - floorbeam connection) | 1964 | 10 | Main girder - floorbeam connection | 3 | H | IV | Re-weld, Bolted splice | 3) |
| 3 | Shinkansen Br. (ends of vertical stiffener) | 1964 | 10 | Ends of vertical stiffeners | 4 | D | - | Tig dressing | 3) |
| 4 | Shinkansen Br. (fatigue cracks at coped end of girder) | 1964 | 30 | Coped end of deck plate girder | 2 | H | IV | Reinforcement by truss structure | 3) |
| 5 | Shinkansen Br.(connections between stringers and floorbeams in steel railway trusses) | 1964 | 40 | Connections between stringers and floorbeams | 3 | H | III | Reinforcement by bracket structure | 44) 45) |
| 6 | Railway Br.(welded joint between upper flange of stringer and vertical stiffener) | - | - | Welded joint between upper flange of stringer and vertical stiffener | 3 | H | III | Bolted splice | 46) |
| 7 | Railway Br.(welded joint between web of stringer and vertical stiffener) | - | - | Welded joint between web of stringer and vertical stiffener | 3 | H | III | L-form bolted splice | 47) |

| | | | | | | | | | |
|----|--|------|----|--|---|---|-----|--|------------|
| 8 | Railway Br.(angle steel's corner of upper flange) | - | - | Angle steel's corner part of upper flange of stringer | 3 | H | IV | Replacement of upper flange | 48) |
| 9 | Railway Br.(at sole plate) | 1972 | 40 | Welding joint between sole plate and lower flange | 3 | E | IV | Bolted splice | 49) |
| 10 | Railway Br.(at angle steel on sole plate) | 1928 | 81 | Angle steel on sole plate | 2 | H | IV | Bolted splice | 50) |
| 11 | Railway Br.(at coped end part1) | - | - | Coped end of main girder | 2 | H | IV | Bolted splice | 51) |
| 12 | Railway Br.(at buckle plate) | - | - | Buckle plate | 3 | H | IV | Reinforcement by railroad tie holding type girde | 52) |
| 13 | Railway Br.(knee brace) | 1971 | 40 | Knee brace | 3 | H | III | Carbon fiber sheet | 53) |
| 14 | Railway Br.(end cross girder) | 1968 | 41 | End cross girder | 3 | H | III | Carbon fiber sheet | 54) |
| 15 | Railway Br.(end stiffener) | - | - | End stiffener | 3 | H | II | Installing semicircular notches | 55) |
| 16 | Railway Br.(joint part between end cross girder knee brace and main girder) | - | - | Jointed part between end cross girder knee brace and main girder | 3 | B | III | Re-weld | 56) |
| 17 | Shinkansen Br.(connections between bracket and main girder) | 1964 | 45 | Connections between bracket and main girder | 3 | H | III | Bolted splice | 57) |
| 18 | Shinkansen Br.(support girder) | - | - | Brackets of support girder | 3 | H | IV | Bolted splice | 58) |
| 19 | Railway Br.(at sole plate part2) | 1928 | 82 | Angle steel on lower flange which was near support | 3 | E | IV | Bolted splice | 59) |
| 20 | Railway Br.(floor system) | - | - | Floor system | 3 | H | IV | Replacement of stringer | 60) |
| 21 | Railway Br.(at sole plate part3) | 1920 | 94 | Angle steel on lower flange which was near support | 2 | H | IV | Bolted splice | 61) |
| 22 | Railway Br.(at stringer) | 1968 | 37 | Stringers | 2 | H | IV | Replacement of stringer, Bolted splice | 62) |
| 23 | Shinkansen Br.(cross part between longitudinal rib and transverse rib) | 1964 | 40 | Cross parts between longitudinal ribs and transverse ribs | 3 | H | III | Bolted splice | 63) |
| 24 | Railway Br.(end cross beam) | 1981 | 25 | End cross beam | 3 | H | IV | Gouging, Re-weld, Bolted splice | 64) |
| 25 | Railway Br.(end cross beam part2) | - | - | End cross beam | 3 | H | IV | Gouging, Re-weld, Bolted splice | 65) |
| 26 | Railway Br.(at stringer part2) | 1963 | 45 | Stringers | 3 | H | IV | Bolted splice | 66) |
| 27 | Shinkansen Br.(stringer of trough truss) | 1960 | 40 | Stringer of trough truss | 3 | H | IV | Installing sway bracing, under stringer lateral, and bolted splice | 67) |
| 28 | Railway Br.(at end cross beam) | - | 81 | End cross beam | 3 | H | III | Replacement of end cross beam | 68) |
| 29 | Railway Br.(at stiffener of support point) | - | 40 | Stiffener of support point | 2 | H | IV | Rebuilt | 69) |
| 30 | Railway Br.(welded joint between web of stringer and vertical stiffener (part2)) | 1971 | 40 | Welded joint between web of stringer and vertical stiffener | 3 | H | IV | Bolted splice | 70) |
| 31 | Railway Br.(Connection angle) | 1951 | 61 | Connection angle | 3 | H | III | Bolted splice | 71) |
| 32 | Railway Br.(Trough girder) | 1962 | 44 | Lower flange angle steel in end of girder | 3 | H | IV | Installing lateral bracings | 72) |
| 33 | Railway Br.(Trough girder(part2)) | - | - | End cross beam | 3 | H | IV | Cut-off of end cross beam | 73) 74) |

付表-3 収録事例一覧 (海外橋梁)

| No | Structure | Const | Service | Crack location | Cause No | Repair No | Damage Level | Repair method | Ref No |
|----|--|-------|---------|--|----------|-----------|--------------|---------------------------------|--------|
| | | Year | | | | | | | |
| 1 | Steel bridge on highway I-75, Georgia, USA | 1976 | 20 | Top ends of vertical stiffeners of main longitudinal girders | 2 | D | IV | Stop hole, Gouging+Re-weld, UIT | 3) |
| 2 | Quinnipiac River (Defects in the butt welds of horizontal stiffener) | 1964 | 9 | Butt connection groove weld of longitudinal stiffeners | 1 | E | - | Bolted splice | 3) |
| 3 | Yellow Mill Pond Br. (Cover plate ends, stress concentration) | 1958 | 12 | Cover plate fillet weld toe | 2 | E | IV | Bolted splice | 3) |
| 4 | Cleveland I-90 (vibration while the girders carried by train) | 1973 | 0 | Weld end of vertical stiffeners | 4 | G | - | Stop hole, High-tension bolt | 3) |

| | | | | | | | | | |
|----|---|------|----|---|---|---|-----|---|----|
| 5 | Aquasabon River (defects in the short groove weld in the web) | 1948 | 15 | Short groove weld in web | 1 | E | - | Bolted splice | 3) |
| 6 | I-95 over Rappahannock River , Virginia. | 1961 | 20 | Butt connection groove weld of continuous tension-side longitudinal stiffener | 2 | E | IV | Bolted splice | 3) |
| 7 | The Central Artery of I-93 in Boston, Massachusetts | 1974 | 10 | Horizontal fatigue cracks along longitudinal girder bottom web-flange weld at flange termination | 3 | E | IV | Stop hole, Bolted splice, Bolt removal | 3) |
| | | 1974 | 10 | Vertical fatigue cracks in longitudinal girder webs at reentrant corner of bottom cope and along bolt fixity line of connection angle | 3 | E | IV | Stop hole, Bolted splice, Bolt removal | 3) |
| | | 1973 | 13 | Intersection of fillet welds and groove welds | 1 | H | - | Stop hole, Wide flange detail | 3) |
| 8 | Canoe Creek Br. | 1969 | 14 | Girder top web gaps between girder web-flange fillet weld and cut short end of transverse connection plate | 3 | E | IV | Stop hole, Angle connection | 3) |
| | | 1969 | 14 | Girder horizontal web gap between lateral tab and transverse connection plate at lateral tab weld toe | 3 | G | IV | Stop hole, Gap size increase | 3) |
| 9 | 2682 Br. in I-79 | 1972 | 12 | Fatigue cracks in girder web at cut short ends of intermediate web stiffeners | 3 | G | IV | Stop hole | 3) |
| | | 1972 | 12 | Vertical fatigue cracks along stiffener weld at web gap locations | 4 | E | - | Stop hole Angle connection | 3) |
| | | 1972 | 12 | Fatigue cracks in floorbeam web copes at floorbeam top flange termination | 4 | E | - | Stop hole Angle connection | 3) |
| 10 | Platte-Winner Br. | 1961 | 25 | Fatigue cracks in girder web gaps in positive and negative moment regions | 3 | H | IV | Stop hole Dog-bone retrofit | 3) |
| 11 | Third St. Viaduct | 1960 | 18 | Fatigue crack from cold lap by weld intersection of groove weld connecting lateral gusset plate to girder web and fillet weld connecting transverse stiffener to girder web | 1 | E | - | Stop hole Bolted splice | 3) |
| 12 | 2680 Br. | 1972 | 12 | Fatigue cracks in bottom web gaps at web stiffener ends near field splices | 3 | H | III | Stop hole Angle connection | 3) |
| | | 1972 | 12 | Fatigue cracks in girder top web gaps at transverse connection plate end and along web-flange weld toe | 3 | H | III | Stop hole Angle connection | 3) |
| 13 | Beaver Creek Br. | 1969 | 15 | Fatigue cracks along transverse connection plate end and along web-flange fillet weld | 3 | G | III | Stop hole | 3) |
| 14 | Thomas Br. | 1979 | 9 | Fatigue cracks in top and bottom un-stiffened web gaps at transverse connection plate ends | 3 | H | IV | Stop hole Positive attachment | 3) |
| 15 | I-84 | 1978 | 6 | Fatigue cracks in vertical gaps of connection plates along fillet weld toe attaching floorbeam and cantilever bracket webs to main girder web | 4 | H | - | Removal of plate and some bolts | 3) |
| | | 1978 | 6 | Fatigue cracks in horizontal gaps along web fillet weld toe attaching floorbeam web to flange, and bracket web to flange | 4 | G | - | Stop hole | 3) |
| 16 | Lehigh Canal and River Br. | 1953 | 19 | Fatigue cracks in tie plates | 3 | H | IV | Replacement | 3) |
| | | 1953 | 19 | Fatigue cracks in floorbeam and bracket webs at top cope | 3 | E | IV | Stop hole Bolted splice | 3) |
| 17 | Woodrow Wilson Memorial Br. | 1962 | 20 | Horizontal fatigue cracks under stringers along fillet welds connecting web to top flange of floorbeam | 2 | B | IV | Stop hole Gouging+Re-weld Bolted splice | 3) |

| | | | | | | | | | |
|----|--------------------------------|------|----|--|---|---|-----|---|----|
| 17 | Woodrow Wilson Memorial Br. | 1962 | 20 | Vertical fatigue cracks at either top or bottom flange cope of floorbeam webs | 2 | E | IV | Stop hole Bolted splice | 3) |
| | | 1962 | 20 | Horizontal fatigue cracks in web gaps of main girder along fillet welds connecting webs to top flange | 2 | E | IV | Stop hole Bolted splice | 3) |
| 18 | Daniel Boone Br. | 1965 | 20 | Fatigue cracks in longitudinal girder web gaps at transverse connection plates | 3 | H | IV | Stop hole Angle connection | 3) |
| | | 1965 | 20 | Fatigue cracks in longitudinal girder web cope at connection with box beam cap | 3 | H | IV | Stop hole Bolt connection | 3) |
| 19 | I-470 and I-79 tied arch Br. | 1983 | 7 | Fatigue cracks at fillet weld terminations of diaphragm-tie girder web connection | 3 | H | III | Stop hole Angle connection | 3) |
| | | 1983 | 7 | Fatigue cracks at groove weld root of tie girder web-flange connection | 1 | H | - | Stop hole Angle connection | 3) |
| 20 | I-83 and I-695 Interchange | 1974 | 6 | Fatigue cracks at box girder webs in top web gaps of negative moment regions | 3 | F | III | Stop hole Angle connection | 3) |
| 21 | Section D10 | 1979 | 5 | Fatigue cracks in box girder bottom web gaps at weld toe of transverse connection plates | 3 | H | III | Stop hole Positive attachment | 3) |
| 22 | Section L-2C | 1979 | 8 | Fatigue cracks in groove-weld butt-splice connections of back-up bars | 1 | A | - | Grind out Hole saw | 3) |
| 23 | Lafayette Street Br. | 1968 | 7 | Fatigue crack at weld intersection which connected web gusset plate to vertical stiffener | 1 | F | - | Bolted splice Drilled hole with grind smooth | 3) |
| 24 | U.S.51 Br. | 1958 | 22 | Fatigue cracks in butt connection groove welds of cover plates | 1 | E | - | Bolted splice | 3) |
| 25 | Dan Ryan Express | 1969 | 9 | Fatigue cracks in groove weld at box beam web connection with girder bottom girder flange | 1 | F | - | Shop hole Saw cut | 3) |
| 26 | No. 28 County road Br. | 1968 | 9 | Fatigue cracks from cores refilled by welding in the main girder web, where were drilled by mistake | 1 | E | - | Replacement of cracked parts | 3) |
| 27 | Gulf Outlet Bridge, Louisiana. | 1965 | 13 | Fatigue cracks in fillet welds (corner joints) of tie girder web-flange connections near Pin-Link connection | 1 | A | - | Crack removal | 3) |
| 28 | Allegheny River Br. | 1952 | 19 | Fatigue cracks in tie plate connected with floorbeam top flange and cantilever bracket top flange | 3 | E | IV | Bolted splice | 3) |
| 29 | I-480 Cuyahoga River Br. | 1973 | 0 | Fatigue cracks in ends of intermediate stiffeners (the girder web gap) | 4 | G | - | Stop hole | 3) |
| 30 | Poplar Street Br. | 1971 | 2 | Fatigue cracks in girder bottom web gaps between girder bottom flange and cut short ends of vertical connection plates near girder support | 3 | H | III | Stop hole Gouging+re-weld Bolted splice | 3) |
| | | 1971 | 2 | Fatigue cracks in girder top web gaps between girder top flanges and top ends of vertical connection plates at negative moment regions | 3 | G | III | Stop hole | 3) |
| | | 1971 | 2 | Fatigue cracks in end stiffener termination doubling as connection plate connected to transverse floorbeam | 3 | H | III | Stop hole Gouging+re-weld Bolted splice | 3) |
| 31 | Polk County Br. | 1963 | 16 | Fatigue cracks in girder web gaps at girder-floorbeam connections near pier locations of negative moment regions | 3 | H | III | Stop hole Gap increase Angle connection | 3) |
| 32 | Belle Fourche River Br. | 1958 | 18 | Fatigue cracks in girder web gaps of girder-diaphragm connections near girder compression flanges of positive moment regions | 3 | G | IV | Stop hole Weld connection | 3) |
| 33 | Chamberlain Br. | 1952 | 21 | Fatigue cracks along the girder web-flange weld at girder web gap | 3 | G | IV | Stop hole Weld connection | 3) |

| | | | | | | | | | |
|----|--|------|----|--|---|---|-----|--|-----|
| | | 1952 | 21 | Fatigue cracks in girder web at top end of intermittent fillet weld of vertical stiffener | 3 | G | IV | Stop hole Weld connection | 3) |
| 34 | Prairie Du Chien Br. | 1974 | 5 | In tied arch span, fatigue cracks in floorbeam web-flange fillet welds | 3 | H | III | Stop hole Bolted splice | 3) |
| | | 1974 | 5 | In tied arch span, fatigue cracks in fillet welds at connection plate ends | 3 | H | III | Stop hole Bolted splice | 3) |
| 34 | Prairie Du Chien Br. | 1974 | 5 | In plate girder span, fatigue cracks in girder webs of girder-floorbeam connections | 3 | H | III | Stop hole Bolted splice | 3) |
| 35 | Walt Whitman Br. | 1957 | 11 | Fatigue cracks in stringer web-flange fillet welds and in stringer webs at bracket connections | 3 | H | III | Restraint removal | 3) |
| 36 | 51.4 Bridge | 1970 | 5 | Fatigue crack in stringer web (bottom flange) copes at stringer-floor beam connections | 2 | H | IV | Stop hole Gouging+re-weld Connection plate | 3) |
| 37 | Commodore John J. Barry Bridge | 1973 | 0 | Fatigue cracks near vertical member with upper chord member found during construction | 4 | H | - | Cable addition Install of damper | 3) |
| 38 | King Street Bridge | 1961 | 1 | Collapse of one span due to brittle fracture in welds at ends of tension-flange cover plates | 2 | H | IV | Pre-stress with steel cables | 3) |
| 39 | Haseltalbrücke Bridge | 1958 | 25 | Fatigue cracks in groove welds of longitudinal ribs and in vertical stiffener welds at floorbeam connections | 2 | H | IV | Re-weld Cover plate Truss structure | 3) |
| 40 | Fremont Bridge | 1971 | 0 | Fatigue crack in junction piece cope which connected arch rib to stiffening girder bottom flange | 2 | H | IV | Modification of structural detail | 3) |
| 41 | Steel girder interstate highway bridge, I-40 | - | 20 | Fatigue cracks in coped ends of diaphragms at girder connections | 2 | F | IV | Replacement, Removal of connection bolts | 3) |
| 42 | Steel Railway Bridge in Norway | 1960 | - | Fatigue cracks in webs of some plate girders at ends of vertical stiffeners | 4 | G | - | Stop hole | 3) |
| 43 | First Bosphorus Bridge | 1973 | 30 | Fatigue damages at hanger-plates | 3 | H | IV | Replacement | 75) |
| 44 | Girard Point Bridge | 1976 | 23 | Fatigue cracks in floor beam end connections | 3 | H | III | Dog-bone cutout Bolted splice | 76) |

付表-4 収録事例一覧（鋼床版）

| No | Structure | Const | Service | Rib type | Crack location | Repair method | Ref No |
|----|---|-------|---------|----------|--|------------------------------------|--------|
| | | Year | | | | | |
| 1 | Steel bridge on Hanshin Expressway (welded joints between vertical stiffeners and orthotropic deck plate) | 1996 | 9 | U | Welded joints between vertical stiffeners and orthotropic deck plate | Cutting treating of semicircle | 77) |
| 2 | Steel bridge on roadway bridge (intersection of bulb ribs and transverse ribs) | 1969 | 38 | Bulb | Boxing weld joints between bottom of bulb ribs and web plates of transverse ribs | Bolted angle connections | 78) |
| 3 | Steel bridge on Hanshin Expressway (welded joints between vertical stiffeners and orthotropic deck plate) | 1985 | 20 | U | Welded joints between longitudinal trough rib and orthotropic deck plate | Replacement of damaged trough ribs | 79) |
| 4 | Steel bridge of The Metropolitan Expressway (welded joint between longitudinal trough rib and orthotropic deck plate) | 1991 | 15 | U | Welded joints between longitudinal trough ribs and orthotropic deck plates | SFRC pavements | 80) |
| 5 | Ohira viaduct of R-50(welded joint between longitudinal trough rib and deck plate) | 1983 | 20 | U | Welded joints between longitudinal trough rib and orthotropic deck plate | SFRC pavements | 81) |
| 6 | Steel bridge on The Metropolitan Expressway (welded joint between longitudinal trough rib and orthotropic deck plate)(Part 2) | - | - | U | Welded joints between longitudinal trough ribs and orthotropic deck plates | Replacement of damaged trough ribs | 82) |

| | | | | | | | |
|----|--|------|----|---|--|--|-----|
| 7 | Shonan Br. of R-134(welded joint between longitudinal trough rib and deck plate) | 1986 | 13 | U | Welded joints between longitudinal trough ribs and orthotropic deck plates | SFRC pavements | 83) |
| 8 | Steel bridge on The Metropolitan Expressway (upper end of vertical stiffener at end diaphragm) | - | 30 | U | Boxing welded joints at the upper end of vertical stiffeners | Stop hole | 84) |
| 9 | Steel bridge on roadway bridge(butt welding of trough rib) | - | 20 | U | Butt welding of trough rib | Replacement, Re-weld | 85) |
| 10 | Specimen in transit | - | 0 | U | Welded joints between longitudinal trough ribs and transverse ribs | Rebuild | 86) |
| 11 | I Bridge(butt welding of trough rib) | - | 10 | U | Butt welding joints of trough ribs | Bolted splice | 87) |
| 12 | Steel bridge on Hanshin Expressway (boxing joints between vertical stiffeners and orthotropic deck plates) | - | - | U | Boxing joints between vertical stiffeners and orthotropic deck plates | ICR(Impact Crack closure Retrit treatment) | 88) |
| 13 | Steel bridge on The Metropolitan Expressway(Y-rib) | - | - | Y | Welded joints between Y-ribs and orthotropic deck plates | Replacement | 89) |
| 14 | Steel bridge of Kobe line on Hanshin Expressway | - | - | U | Welded joints between vertical stiffeners and deck plates | UIT | 90) |
| 15 | Shinhamadera bridge of Hanshin Expressway | 1993 | 12 | U | Upper surface of deck plate | Bolted splice | 91) |
| 16 | Suigou bridge | - | 30 | U | Weld zone between deck plate and trough rib | Removal of crack, Re-weld, Tig dressing | 92) |
| | | - | 30 | U | Butt weld of trough rib | Removal of crack, Re-weld, Bolted splice | 92) |
| | | - | 30 | U | Weld zone between deck plate and vertical stiffener | Removal of crack, Re-weld, Improvement of vertical stiffener | 92) |
| | | - | 30 | U | Weld zone between trough rib and transvers rib | Removal of crack, Re-weld, Tig dressing | 92) |
| 17 | Steel bridge on Hanshin Expressway(part2) | 1997 | 5 | U | Welded joints between longitudinal trough rib and orthotropic deck | Removal of crack, Re-weld | 93) |
| 18 | Savern Crossing | 1971 | 5 | U | Fatigue cracks at trough to cross-beam connection | Plate welding and Hammer peening | 3) |
| | | 1971 | 5 | U | Fatigue cracks at trough to deck plate connection | Increase of weld size | 3) |
| | | 1971 | 5 | U | Fatigue cracks at web to deck joint | Plate welding | 3) |
| | | 1971 | 5 | U | Fatigue cracks flotation diaphragm | Cut away and bolted splice | 3) |
| | | 1971 | 5 | U | Fatigue cracks at cross-beam to deck joint | Re-weld and treatment of the toe | 3) |
| 19 | Golden Horn Bridge | 1974 | 19 | U | Fatigue cracks in butt joints of longitudinal trough rib with cover plate | Reinforcement plates | 94) |

付表-5 収録事例一覧 (鋼製橋脚)

| No | Structure | Const | Service | Crack location | Cause No | Repair No | Repair method | Ref No |
|----|--|-------|---------|--|----------|-----------|--|--------|
| | | Year | | | | | | |
| 1 | T-type steel pier on Hanshin Expressway | - | - | Fatigue cracks in groove welds connected transverse beam flanges to column flanges | 1 | H | Reinforcing plate | 3) |
| 2 | Steel Pier with Box section on The Metropolitan Expressway | - | - | Welded joints at the corner of the steel bridge pier | 1 | H | Removal of crack, Stop hole, Bolted splice | 95) |
| 3 | Steel transverse beam on The Metropolitan Expressway | - | - | Welded joints of diaphragms under girder supports | 3 | H | Stop hole, Bolted splice | 96) |
| 4 | Steel Pier with circular section on The Metropolitan Expressway | - | - | Welded joints at the corner of the steel bridge pier | 1 | H | Removal of crack, Stop hole, Bolted splice | 97) |
| 5 | Steel Pier with circular section on The Metropolitan Expressway(part2) | 1969 | 36 | Corner of circular section steel pier | 1 | H | Removal of crack, Stop hole, Bolted splice | 98) |
| 6 | Kanagawa Route 1 Yokohane line of The Metropolitan Expressway | - | - | Corner of rectangular cross section steel pier | 1 | H | Removal of crack, Stop hole, Bolted splice | 99) |
| 7 | Steel Pier with Box section on The Metropolitan Expressway(part2) | 1971 | 32 | Corner of rectangular cross section steel pier | 1 | H | Removal of crack, Stop hole, Bolted splice | 100) |
| 8 | Steel transverse beam on The Metropolitan Expressway(part2) | - | - | Welded joints of diaphragms under girder supports | 3 | G | Stop hole | 101) |
| 9 | Steel Pier using square bar on The | - | - | Corner of rectangular cross section | 2 | H | Bolted splice, Removal of | 102) |

| | | | | | | | | |
|----|---|------|---|---|---|---|--|------|
| | Metropolitan Expressway | | | steel pier | | | crack, Re-weld, Drilling scallop | |
| 10 | Steel Pier with circular section on Tokyo Metro | - | - | Corner of the steel pier | 1 | H | Removal of crack, Stop hole, Bolted splice | 103) |
| 11 | Ft. Duquesne Bridge, Pennsylvania. | 1969 | 9 | Fatigue cracks in weld joint which connected box-section transverse beam flanges to box-section column flanges in rigid-frame piers | 1 | H | Slot-holes Bolted splice | 3) |

付表-6 収録事例一覧 (付属物)

| No | Structure | Const | Service | Crack location | Cause No | Repair No | Damage Level | Repair method | Ref No |
|----|--|-------|---------|--|----------|-----------|--------------|------------------------------------|--------------|
| | | Year | | | | | | | |
| 1 | Sign pole | 1999 | 0.5 | Pole base structure | 4 | H | - | U-shaped rib | 104) 105) |
| 2 | Luminaire | - | - | Ribs in luminaires | 4 | H | - | Reinforcement plate | 106) |
| 3 | Base structure of gate type road sign pole | - | - | Base structure of gate type road sign pole | 4 | H | - | Reinforce rib, Carbon fiber sheets | 107) 108) |
| 4 | Finger joint of long span bridge | 1994 | 10 | Welding joint of finger joint | 2 | D | IV | Re-weld, Peenig, Toe finishing | 109) |
| 5 | Hanger of inspection passage | - | - | Hanger of inspection passage | 4 | H | - | Install newly bracings | 110) |