

特集：道路橋保全の取組み —この5年の実績と今後—

# 鋼橋における劣化損傷と技術開発 —これまでの主な取組みと今後の方向性—

村越 潤\* 高橋 実\*\* 木ノ本 剛\*\*\* 澤田 守\*\*\*\*

## 1. はじめに

我が国の道路橋については、その大半が高度経済成長期頃から建設されており、急速な高齢化が進む中、厳しい自然環境や交通条件によって様々な劣化損傷事例が顕在化しつつある。道路橋の維持管理を取り巻く状況については、本特集号の論説「道路橋保全の取組み」に紹介されているとおりであり、鋼製の道路橋（以下、鋼橋）においても、トラス橋の斜材の腐食破断や鈹桁橋の主桁の1mに及ぶき裂の発生など、深刻な劣化損傷や不具合の事例が報告され始めている。本稿では、鋼橋の主たる劣化損傷である腐食や疲労に伴う重大損傷事例と各事例に関わる課題を述べるとともに、これまで実施してきた臨床研究等による主な取組みと今後の方向性について紹介する。



図-1 鋼床版を有する箱桁橋の全景

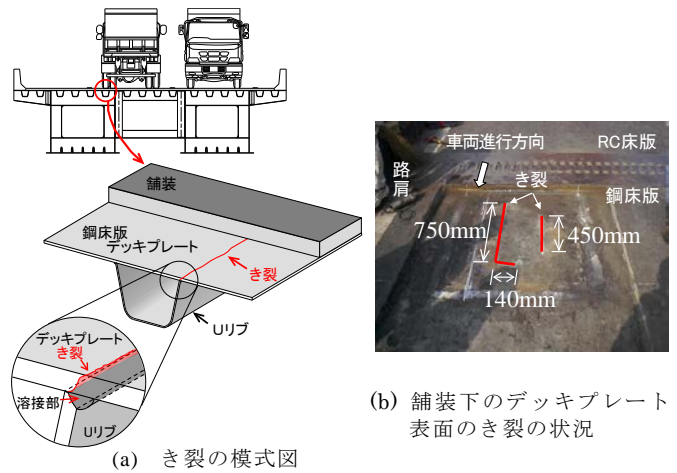


図-2 鋼床版デッキプレートに発生したき裂

## 2. 鋼床版橋の疲労

### 2.1 損傷事例と経緯

鋼床版橋（図-1）は、死荷重軽減等の観点から都市内高架橋や長支間の橋の床構造に広く用いられている。昭和40年代半ば頃より、現在の一般的な構造であるU型の縦リブ（以下、Uリブ）で補剛された構造が用いられるようになった。近年、大型車交通量の多い路線の鋼床版橋において、各部にき裂が発生しており、そのうち、図-2に示すようにUリブの溶接部からデッキプレートやUリブ内に進展し、供用性に影響を与えるおそれのあるき裂（以下、デッキ進展き裂）が発見されている。

特にデッキ進展き裂は、目視困難な部位に発生し、舗装の著しい損傷・変状の発生に至らないと一般には見つけられないため、国土技術政策総合研究所と連携して、損傷原因の解明、非破壊調査技術、耐久性を向上させるための構造、既設橋の補修補強技術について、事例調査、疲労試験、FEM解析等により検討を進めてきた。

### 2.2 検討概要

新設橋への対応に関して、既往の損傷事例の調査、輪荷重走行試験やFEM解析による構造諸元の影響度感度分析などを行い構造的な損傷要因について検討した結果、デッキプレートの板厚を増加させることが耐久性向上の観点から最も効果的であることが確認された<sup>1)</sup>。き裂の発生要因や進展挙動に関しては、溶接の施工品質等も関係するため、必ずしも知見が十分でない点は残されているものの、これらの検討結果を踏まえ、平成24年の道路橋示方書の改定では、大型車の輪荷重が常時載荷される位置直下のデッキプレートの板厚を従来の12mmから16mm以上に見直している。

既設橋への対応に関して、目視困難なデッキ進展き裂の非破壊検査技術として、進展初期の浅いき裂に対する検出の信頼性を確保した超音波探傷法の検討を進めてきた。超音波法は溶接内部のき裂を検出する方法として広く活用されているが、探傷結果については検査技術者の技量に左右され

Recent Research and Development on Maintenance Technology for Steel Highway Bridges

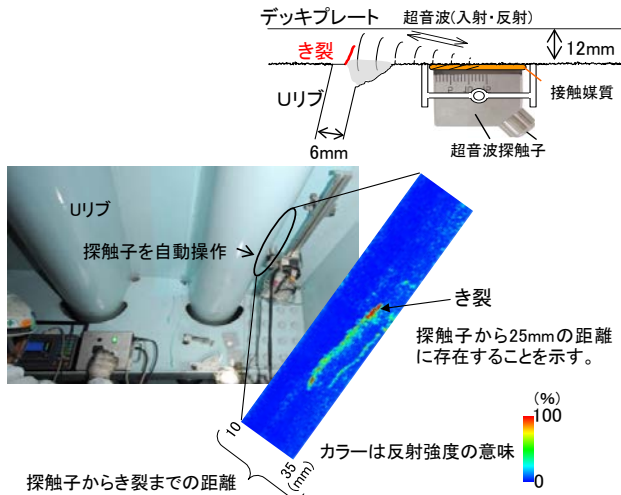


図-3 超音波探傷法によるき裂調査の概要

やすい面がある。精度・信頼性の高いき裂の情報を得るためには、探触子の選定、探傷方法、き裂の状態とエコー高さの関連付け等による検出結果の評価方法について十分な検討が必要となる。例えば、鋼床版の鋼材表面の塗装等による探傷面の状態の違いが探傷結果に影響を与えるが、これらの感度補正方法の検討が必要である。また、実用面では上向き姿勢での探傷となるため、輪荷重直下の溶接線を橋長全長にわたって調査するには現場作業性の高い探傷法であることが求められる。これらの技術的課題の解決を目指して要求性能・仕様を設定し、超音波自動探傷法（臨界屈折角探傷法）の開発を行ってきた。これまで5橋の現場での試行を踏まえ探傷マニュアル(案)<sup>2)</sup>を作成し、11橋の調査に適用されている。図-3に超音波探傷法による現場でのき裂調査の概要を示す。また、図中にはき裂の二次元画像の例を示す。現場では対象とする溶接線に沿って、自動走査装置をデッキ下面に磁石で固定し、探触子を自動走査することにより超音波探傷器上でデータを画像で確認しながら記録できる。超音波探傷試験の資格を有する検査技術者であれば、基本的に使用できる技術である。今後、き裂の深さ推定のさらなる精度の向上策を検討するとともに、き裂の進展挙動の計測データを蓄積しつつ、探傷結果の評価方法について詰めていくことを考えている。

また、この技術の他に、既に貫通き裂が報告されている橋梁での対策実施までの管理ニーズ等を踏まえ、き裂のデッキプレート貫通を、貫通に伴うUリブ内の滞水の有無から間接的に点検する手法を開発している（図-4）。具体的には、送受信

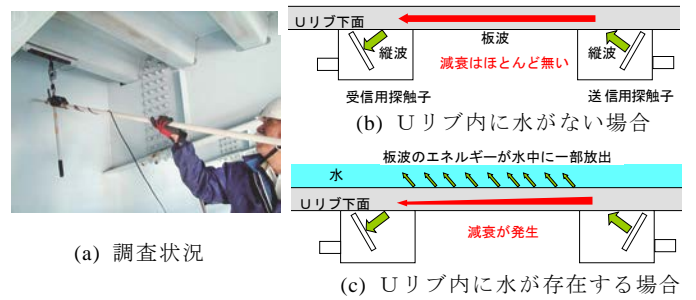
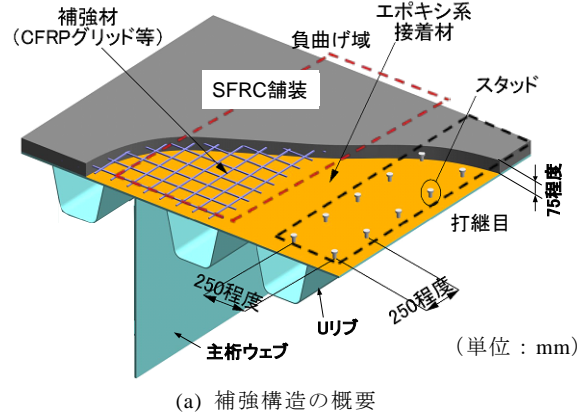


図-4 超音波探傷法によるUリブ内の滞水の調査の概要



(a) 補強構造の概要



(b) 補強効果模式図

(c) 施工事例

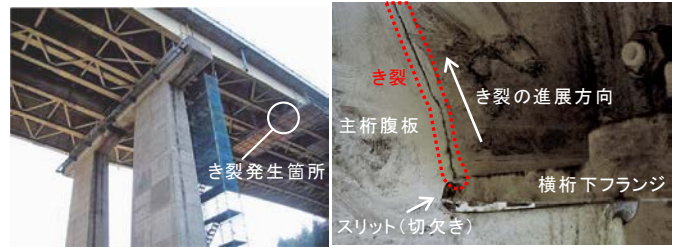
図-5 SFRC舗装の構造概要と施工事例

用の2個の超音波探触子（板波を使用）をUリブ下面に当てて、Uリブ内の水の存在による超音波の受信波形の顕著な減衰特性より検出するものである。既に現場で試行し、伸縮用の簡易治具を利用し、対象Uリブから3m程度離れた距離から1箇所あたり5秒程度の調査時間で滞水の有無と同時に深さの計測が可能である。なお、滞水に伴う温度変化を捉える手法として有効な赤外線サーモグラフィについて併せて現場適用性を検討したが、遠望からの調査が可能である一方で、日照条件・測定時刻・水深の程度等により計測の制約や検出性能に限界があるため確実性・迅速性の点で優位性を発揮できない結果であった。

鋼床版の補修補強に関して、輪荷重直下の構造部位にき裂が発見された場合には、他の同一構造部位にも同種のき裂が存在する可能性があり、また、未だ発生していないとしても、将来の発生の可能性のあることを考慮し対策を講じる必要があ



図-6 水張り・負曲げひび割れ発生状況でのSFRC舗装の輪荷重走行試験



(a) 補強構造の概要 (b) き裂の状況

図-7 鋼桁橋の主桁溶接部に発生したき裂

る。このため、鋼床版全体の応力軽減を図ることのできる対策が必要と判断される場合が多く、既存の舗装を剛性の高い鋼繊維補強コンクリート(SFRC)舗装(図-5)に置き換え、接着材を介して鋼床版と一体化を図る対策が提案されている。

一方では、SFRC舗装のひび割れの発生は不可避と考えられ、ひび割れ発生後の応力軽減効果の持続性、水浸入の影響も含めたSFRC、接着材接合部の耐久性、デッキ表面の腐食への耐久性等を確保する必要がある。同工法の実橋への適用にあたって、耐久性に関わる信頼性を確保するために、各種の試験によりSFRC舗装の耐久性の検証を行う(図-6)とともに、これまでの研究成果や施工実績等による技術的知見を踏まえ、SFRC舗装を適用する場合の基本的な考え方、使用材料、構造細目、施工方法等についてマニュアル(案)としてとりまとめている<sup>3)</sup>。なお、舗装自体の耐久性の定量評価については実橋での様々な供用条件に対して不確実な面もあり、これまでの施工事例の経過をフォローしていく必要があると考えている。

### 3. 鋼桁橋の疲労

#### 3.1 損傷事例と経緯

平成18年に重交通路線の鋼桁橋(鋼3径間連続I桁橋、支間38m+51m+38m、昭和46年竣工)において、点検時に主桁に1mに及ぶき裂が発見され、安全確保のために通行止めと応急対策が実施された(図-7)。き裂発生箇所は、主桁ウェブに荷重分配横桁の下フランジを貫通させ溶接した構造である。

鋼橋の疲労設計は、平成14年の道路橋示方書(H14道示)より導入され、具体的な設計法は同時に発刊された鋼道路橋疲労設計指針(日本道路協会)によっている。指針では、活荷重等によって生じる応力変動の影響を適切に評価できる場合

には、応力照査による疲労設計の方法が適用されている。き裂の見つかった溶接継手は、指針では疲労強度が低い適用しない方がよい継手とされている。また、重要な点は、これまで報告されていなかった応力照査による疲労設計の対象の溶接継手からのき裂であり、進展すると主桁破断による重大事故につながりかねない点にある。実橋部材でのき裂の進展性については各種要因が関係し一般に予測が難しく、ある程度進展した場合、脆性破壊に移行し主桁破断に至るおそれがあることから、点検時に発見次第、き裂長さでは判断せず慎重に対処する必要がある。一方では、交通条件や適用基準等による構造条件の違いなどから、今後同様な疲労損傷が発生する可能性が相対的に高い橋梁に共通する特徴を捉えておくことは、管理リスクを評価し、点検の信頼性を確保する上で参考となるものと考えられる。このような背景の下、既設橋の応力計測データの収集分析を行い、疲労環境の実態の評価や古い年代の鋼材のき裂の進展特性(脆性破壊特性)等の調査分析を行っている。

#### 3.2 検討概要

図-8に、過去に応力頻度計測を実施した鋼I桁橋について、実応力に基づく疲労への影響(疲労損傷度)と日大型車交通量との関係を示す。疲労損傷度については、各橋梁の主桁に作用する応力頻度の24時間計測結果を用いて、一般的に適用されている累積損傷の評価式より算出したものである。ここでは、主桁に取り付く面外ガセット継手(ガセット位置を考慮し下フランジ位置での計測値に0.85を乗じた値を使用)を対象としている。20tonf荷重車載荷時の応力を併せて計測している橋梁については損傷度を発生応力により区分して示している。損傷度の評価値には各種の不確実要因が含まれており、損傷時期の定量的な評価が行

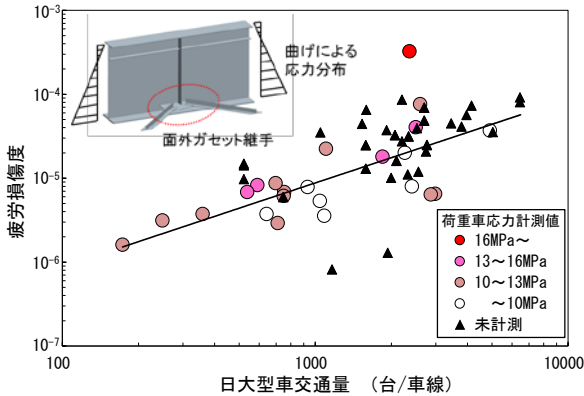


図-8 既設橋の疲労損傷度と日大型車交通量の関係

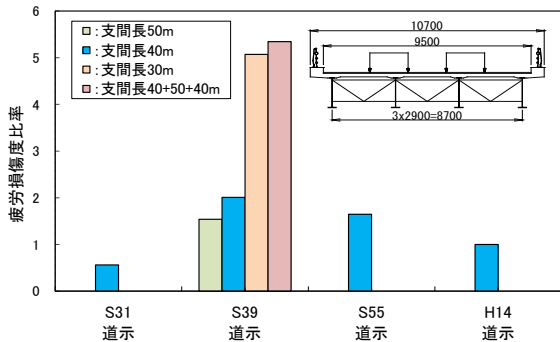


図-9 H14道示(支間長40m)に対する疲労損傷度比率の例

えるほどの信頼性はないが、少なくとも損傷度の相対的に高い橋梁では疲労の影響が厳しいと考えられる。ばらつきは大きいですが、日大型車交通量が多く、構造上、活荷重載荷時の応力が大きい橋ほど、疲労損傷度は相対的に大きくなる傾向が伺える。

構造条件の違いが発生応力及び疲労損傷度に与える影響を把握するために、建設当時の設計基準や設計法を考慮し試設計を行い比較分析を行っている。図-9に主桁構成と幅員構成を同一条件として、内桁支間中央位置（連続桁は中央径間の同位置）における面外ガセット継手の疲労損傷度の比率（H14道示の支間長40mの場合を1とする）を示す。溶接接合が道路橋に広く普及し始めたのは昭和30年代以降であり、損傷事例の比較的多い昭和39年の鋼道路橋設計示方書による支間長40mの単純桁を基本ケース（S39道示）として、適用基準、支間長、構造形式等の設計・構造条件の異なるケースを選定した。適用基準（支間長40mの場合）に着目すると、鋼種、床版、活荷重等の基準改定の変遷により、S39道示の疲労損傷度は相対的に大きい。また、S39道示における構造条件の影響に着目すると、支間長、幅員が小さ

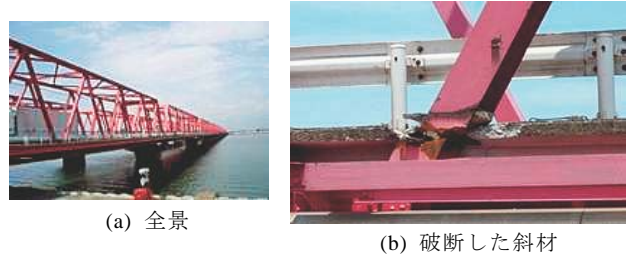


図-10 トラス橋の斜材の腐食破断

くなるほど許容応力度に占める活荷重応力の比率が増加し、疲労照査に考慮する応力範囲が大きくなるため、損傷度が大きくなる傾向が伺える。加えて、図-7の橋梁のように連続桁の場合には、荷重応力の比率が単純桁と比較して大きく、かつ負曲げによる応力振幅も応力範囲に考慮されるため、損傷度は大きくなる傾向にある。疲労損傷の発生そのものの不確実性を踏まえると、類似の構造条件、交通条件の橋梁での同種の主桁の疲労き裂の発生に注視するとともに、定期点検時に小さいき裂の段階で確実に見つけていくことが重要と考えられる。引き続き、既設橋の疲労耐久性の評価につながるため検討を進めていく予定である。

#### 4. 腐食の生じた鋼トラス橋の耐荷力評価

##### 4.1 損傷事例と経緯

平成19年に鋼トラス橋の斜材が腐食等により床版コンクリート埋込部で破断し、損傷発生後復旧に至るまで数ヶ月におよぼ通行規制を余儀なくされる重大事故が発生した（図-10）。その後の緊急点検でも、鋼トラス、アーチ橋において主構部材の格点部や斜材との接合部周辺に腐食や疲労による損傷事例が報告されている。また、海外では、同時期に米国ミネソタ州の鋼トラス橋（I-35W橋）が供用中に突然崩壊し、多数の死傷者を出す事故に至った。国家運輸安全委員会（NTSB）の事故報告書によれば、格点部ガセットを起点に全体崩壊に至ったとのことであり、主要因は設計の誤りによるガセットの耐力不足（板厚不足）であったとしている。また、崩壊の起点となったガセットに関して、重要部材であるにもかかわらず、点検において変形や腐食欠損等の耐荷力低下につながる変状・劣化損傷に注意が払われていないことや耐荷力評価が行われていないことを事故の一因として言及しており、連邦道路庁（FHWA）に対する安全勧告では、ガセットの腐食や変形等に

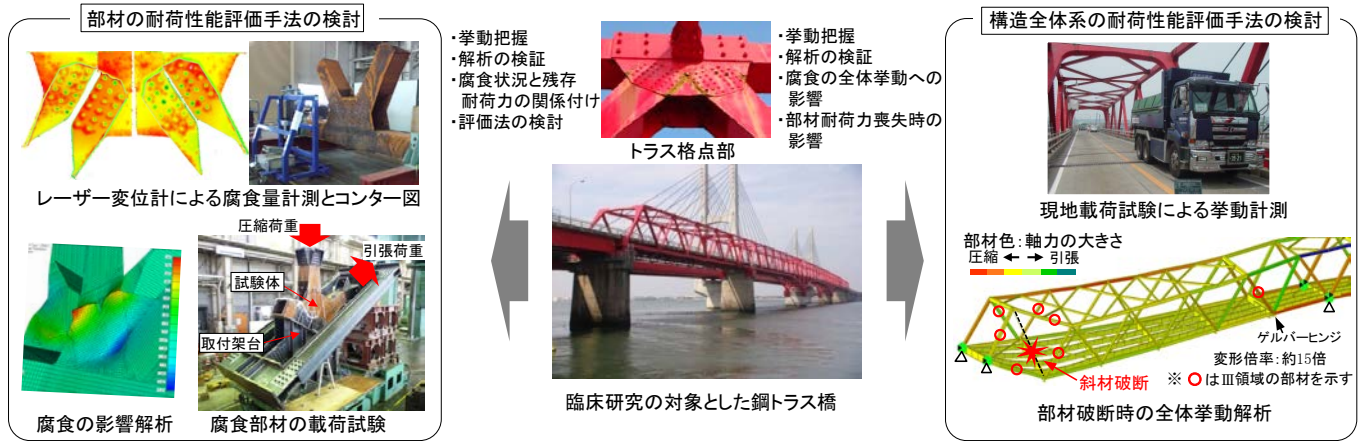


図-11 腐食の生じたトラス橋の臨床研究の概要

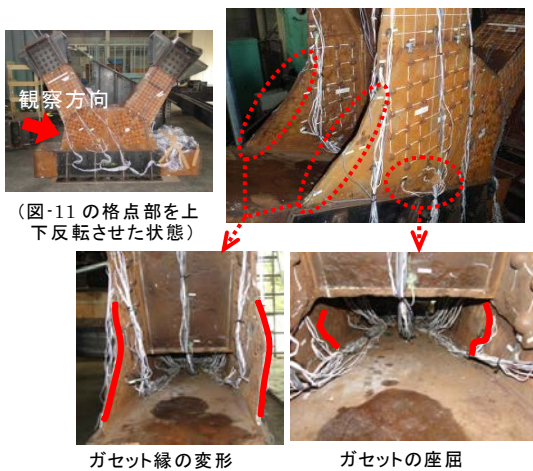


図-12 圧縮載荷時のガセットの破壊性状の例

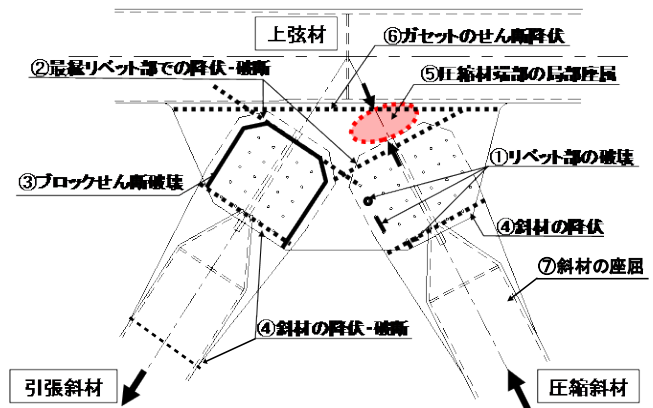
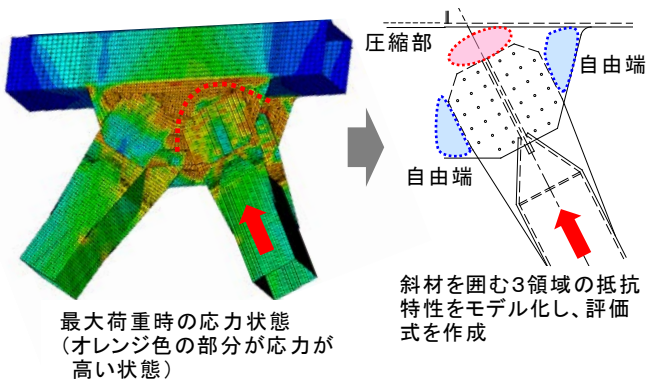
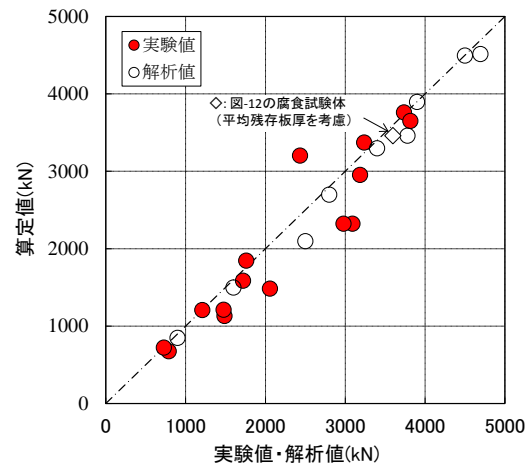


図-13 腐食時に想定される格点部と周辺の破壊性状



(a) ガセットの応力状態と耐荷力評価のためのモデル化



(b) 評価式による算定値と実験・解析結果との比較

図-14 格点部ガセットの耐荷力評価の検討例と評価結果 (図-13の⑤の破壊性状の場合)

対する状態評価に重点を置くことを指摘している。

このようにトラス橋のような橋梁形式では、一部の部材の損傷が橋全体系の安全性に与える影響は大きく、これらの橋梁の調査、診断に至る方法論の構築を目的として、腐食劣化の生じた鋼トラス橋の残存耐荷力の評価法の検討を行っている。

#### 4.2 検討概要

CAESARでは、長期供用され劣化損傷の見られる実橋の状態を探る取組みを臨床研究と称して、撤去橋梁・部材を活用した各種の調査研究を進めている。本検討においても、河口部に位置し飛来塩分の影響により厳しい腐食状況にあったため、平成21年に撤去された鋼トラス橋（橋長407m、

46年間供用)を対象に、現地載荷試験や撤去部材の腐食状況調査、破壊試験等を行いつつ、部材および構造全体系の耐荷性能評価手法について検討を行っている(図-11)。以下では、腐食格点部の残存耐荷力の検討状況について述べる。

図-12に、図-11に示すトラス格点部を対象として、斜材に圧縮軸力を載荷した時のガセットの破壊性状を示す。載荷荷重の増加に伴い、ガセットの斜材先端部と斜材両側の自由端部に面外変形が進行し最大荷重に達した。併せてガセットの腐食状況を基に弾塑性FEMを実施した結果、不均一な腐食に対して平均的な残存板厚を考慮することにより全体的な挙動や残存耐荷力を概ね評価できるものであった。これは一例であり、斜材からの引張・圧縮軸力に対する格点部作用力に対する破壊性状は、個々の橋梁の格点部の構造条件や腐食形態により異なる。図-13はこれまでの知見を踏まえて腐食欠損時に想定される斜材軸力に対する破壊性状を整理したものである。このうち、圧縮軸力が作用する場合のガセットの破壊性状に対しては、図-12に示すように格点部ガセットの圧縮耐荷力を概ね推定できる実用的な耐荷力評価式を検討中である。図-14(a)に最大荷重時のガセットの応力状態と耐荷力評価のためのモデル化の模式図を示すとともに、図-14(b)に検討中の耐荷力評価式による評価結果を示す。既往の国内外の載荷試験データ(図中の◇印を除き、すべて腐食のない格点部試験体を対象としたもの)及び均一腐食を想定した感度解析との比較分析を行い、概ね試験・解析結果と一致することを確認している。不均一な腐食の耐荷力への影響については引き続き

検討を進めるとともに、破壊性状に応じた実用的な残存耐荷力の評価手法を検討していく予定である。

## 5. まとめ

近年、報告されている鋼道路橋の疲労や腐食に伴う重大損傷事例と各事例に関わる課題を述べるとともに、それに対する取組みを紹介した。これまでの研究成果についてはCAESARウェブページに掲載しているもので、興味ある方は参考にいただければ幸いである。道路橋の安全管理と計画的な保全の観点から、点検、詳細調査、診断、対策に至るまでのメンテナンスサイクルに関わる技術の体系化に向けて、引き続き現場ニーズに対応した研究開発を進めていく。

## 参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、(独)土木研究所、(社)日本橋梁建設協会：損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する研究、国土技術政策総合研究所資料 共同研究報告書、第608号、2010.9。  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryoutnn/tnn0608.htm>
- 2) 村越潤、木村嘉富、高橋実：鋼床版デッキプレート進展亀裂の調査のための超音波探傷マニュアル(案)、土木研究所資料、第4138号、2009.3.
- 3) (独)土木研究所、(株)横河ブリッジ、鹿島道路(株)、大成ロテック(株)、(株)NIPPO：鋼床版橋梁の疲労耐久性向上技術に関する共同研究(その2・3・4) 報告書-SFRC舗装による既設鋼床版の補強に関する設計・施工マニュアル(案)一、共同研究報告書、第395号、2009.10.

村越 潤\*



独立行政法人土木研究所  
構造物メンテナンス研究  
センター橋梁構造研究グ  
ループ 上席研究員  
Jun MURAKOSHI

高橋 実\*\*



独立行政法人土木研究所  
構造物メンテナンス研究  
センター橋梁構造研究グ  
ループ 主任研究員  
Minoru TAKAHASHI

木ノ本 剛\*\*\*



首都高速道路株式会  
社 保全交通部鋼構造  
物疲労対策課(前 独  
立行政法人土木研究  
所構造物メンテナ  
ンス研究センター橋  
梁構造研究グループ  
主任研究員)  
Takeshi KINOMOTO

澤田 守\*\*\*\*



国土交通省中部地方  
整備局沼津河川国道  
事務所調査第二課長  
(前 独立行政法人土  
木研究所構造物メン  
テナンス研究セン  
ター橋梁構造研究  
グループ研究員)  
Mamoru SAWADA