

腐食劣化の生じた実橋梁部材を活用した 鋼トラス橋の耐荷性能評価手法に関する研究

村越 潤¹・遠山 直樹²・野上 邦栄³・依田 照彦⁴

¹土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²土木研究所 構造物メンテナンス研究センター (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

³首都大学東京 都市環境科学研究科都市基盤環境学域 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

⁴早稲田大学 理工学術院社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)

本研究は、平成21年度に撤去された鋼トラス橋の腐食部材等を活用して、橋全体系の耐荷性能への影響の大きい格点部及びその周辺構造に着目し、実験的・解析的検討を行うことにより、腐食劣化の生じた鋼トラス橋の耐荷性能評価手法の開発を目的とするものである。具体的には、腐食部材の残存耐荷性能評価手法の提案、橋全体系の耐荷性能評価のためのモデル化手法の提案を行った。

キーワード 鋼トラス橋, 腐食, 耐荷性能評価, 維持管理

1. はじめに

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が進む中、近年、劣化損傷に伴う重大事故が報告されている。鋼橋では平成19年に国道23号木曾川大橋、国道7号本荘大橋において、トラス斜材のコンクリート埋込部の腐食による破断が発生し、補修補強のために通行規制を余儀なくされた。その後の点検においても、鋼トラス、アーチ橋において格点部及び周辺部の腐食等による損傷事例が報告されている。また、海外では、同年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が発生している。その後の事故調査委員会の報告書では、崩壊の要因ではないものの、格点部の腐食欠損の調査とそれに基づく健全度評価の重要性が指摘されているところである。このように鋼橋のうちトラス、アーチ橋といった橋梁形式の主構部材においては、一部の部材の損傷が橋全体系の安全性に与える影響が大きい。

今後、このような腐食劣化の進行した橋梁において、損傷状況の把握程度に応じた耐荷性能に係る技術的判断が必要となる機会が増えてくることも考えられるが、実際の腐食の生じた主構部材の耐荷力に関して、これまでも研究事例は少なく、評価手法は確立されていない状況である。このような背景の下、本研究では、鋼トラス橋を対象として、橋全体系の安全性への影響の大きい格点部に着目し、腐食劣化の生じた鋼トラス橋の耐荷性能評価手法の検討を行ったものである。具体的には、撤去された鋼トラス橋の実腐食部材等を活用して実験的・解析

的検討を行うことにより、(1)腐食部材の残存耐荷性能評価手法の提案、(2)橋全体系の耐荷性能評価のためのモデル化手法の提案を行った。また、既存損傷事例の整理分析等を行い、耐荷性能評価の考え方、手法とともに維持管理上の留意点をとりまとめた。図-1に本研究の概要を示す。研究の実施にあたっては、道路管理者の協力を得て、飛来塩分の影響により厳しい腐食状況にあり平成21年度に撤去された鋼トラス橋 (千葉県銚子大橋、橋長407m、46年間供用、図-2) を試験フィールドとした。同橋の撤去前に挙動計測を行うとともに、撤去後には撤去部材を試験体とした耐荷力試験を行った。なお、本研究の一部は(独)土木研究所、首都大学東京、早稲田大学

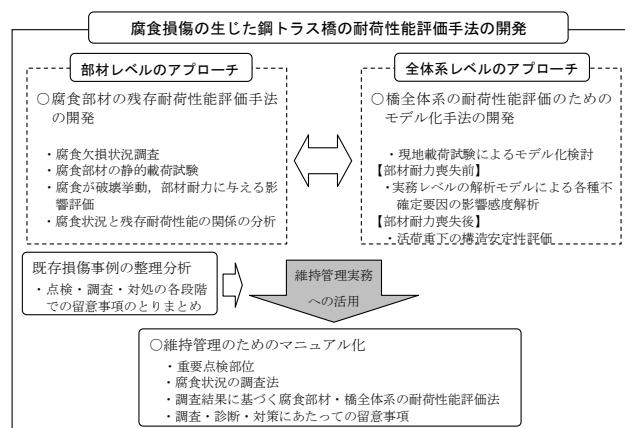


図-1 研究の概要

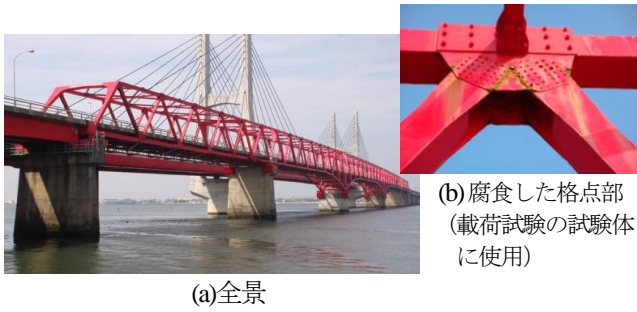


図-2 試験フィールドとして活用した鋼トラス橋

の三者による共同研究の一環として、平成 21, 23 年度の建設技術研究開発助成を受けて実施した。

2. 腐食部材の残存耐荷性能評価手法の開発

(1) トラス格点部

トラス格点部に関しては、研究対象とした鋼トラス橋の撤去後、部材を切り出し、塗膜及び錆層の除去後、レーザー変位計を用いて腐食量の詳細計測を行い、減肉状況を把握した(図-3)。特にガセット内面側の斜材先端部の減肉が著しく、斜材軸力に対するガセットの耐荷力低下への影響評価の重要性が確認された。

斜材からの引張・圧縮軸力に対する格点部の破壊性状を整理すると図4のとおりである。このうち、既往の評価式では試験結果との乖離の大きく、かつクリティカルとなる可能性のある圧縮材端部の局部座屈(ガセットの圧縮耐荷力、図中⑤)に着目して、斜材圧縮・引張軸力による二軸載荷試験(図-5)を行い、破壊性状や残存耐荷力を把握した。破壊性状としては、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(図-6)。

また、腐食無しのケースとガセットの腐食状況のモデル化を変えた3ケース(板厚減少を、ガセット全体の平均値もしくは腐食の程度に応じた領域別の平均値としてモデル化)を対象として弾塑性有限変位解析を行い(図-7)、試験結果との比較分析、耐荷力低下の評価を行った(図-8)。その結果、今回の腐食試験体においては、不均一な腐食であっても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ことを確認した。

次に、試験及び解析による破壊性状を踏まえて、ガセットの斜材先端部の局部座屈強度と、その周りのガセット領域の降伏強度を考慮した圧縮耐荷力の評価式を検討した。その上で、本試験結果の他、既往の国内外の載荷試験データ(腐食なしの格点部試験体)及び残存板厚、構造諸元をパラメータとした解析との比較分析を行い、格点部の圧縮耐荷力を概ね推定できる実用的な評価式を提案した(図-9)。

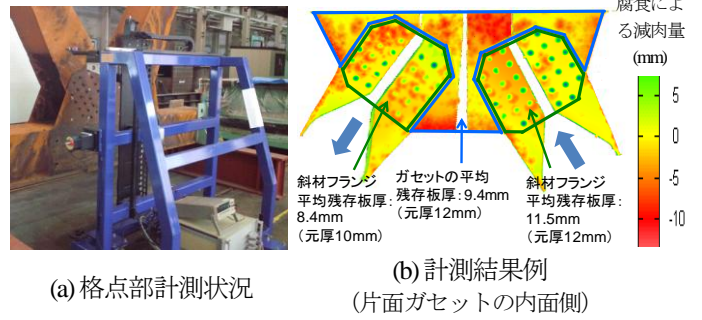


図-3 切り出した格点部の腐食量計測

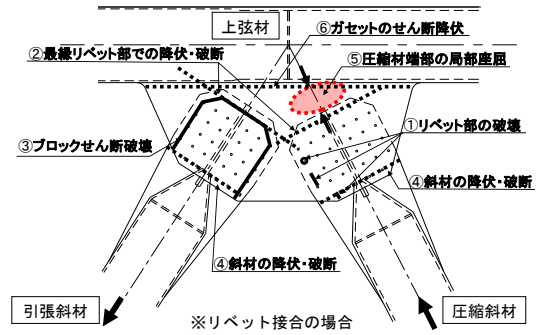


図-4 トラス格点部において想定される破壊性状

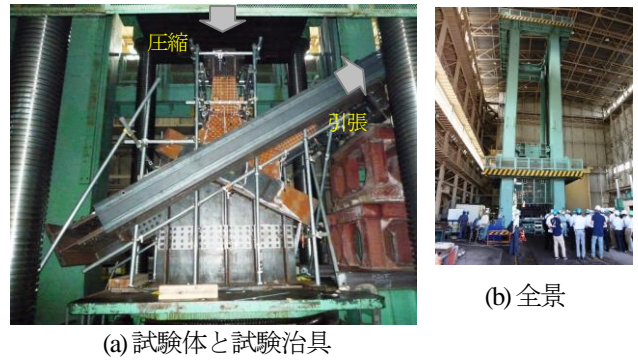


図-5 圧縮/引張二軸載荷試験の状況
※公開試験を実施

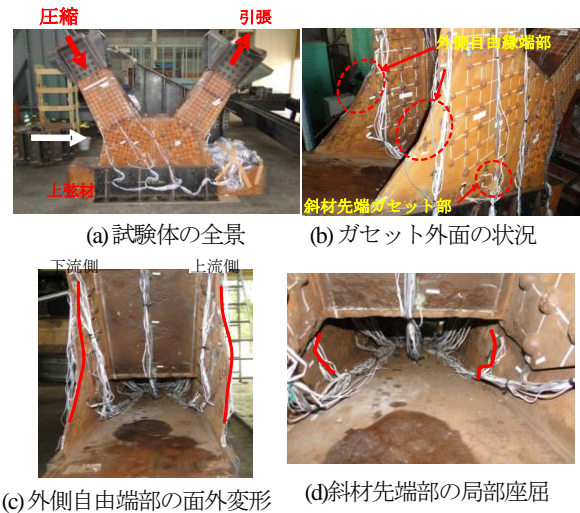


図-6 荷重除荷後の試験体の破壊状態

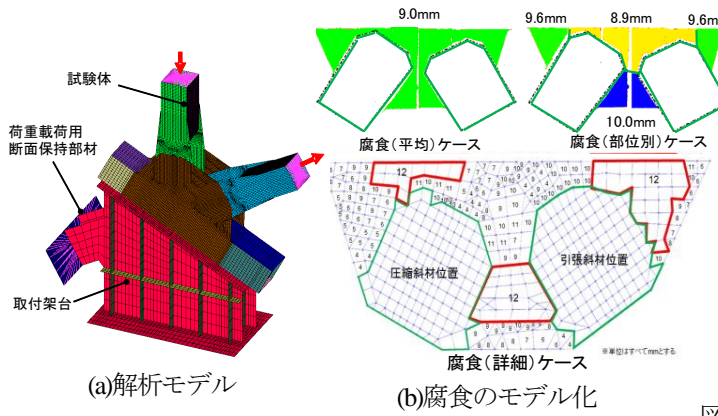


図-7 トラス格点部の解析

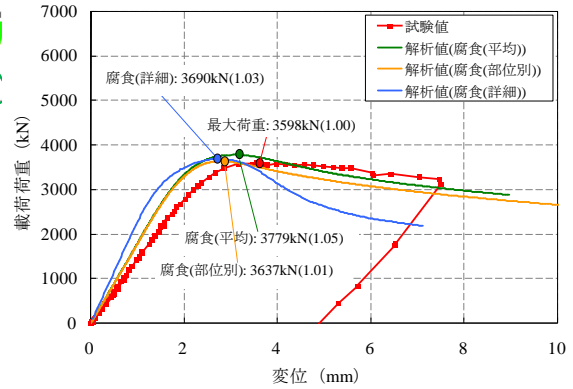


図-8 荷重—鉛直変位曲線（試験値と解析値との比較）

耐力評価式： $P_{max} = P_{grc1}$ (圧縮斜材端) + P_{gy1} (外側自由端) + P_{gy2} (内側自由端)

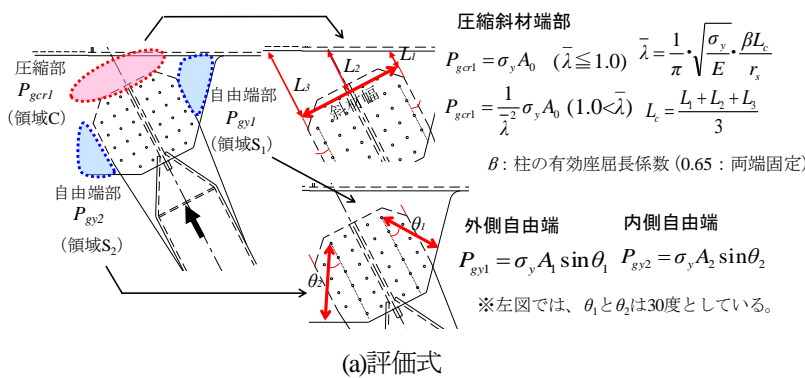


図-9 トラス格点部の圧縮耐力評価式の提案と検証



図-10 荷重試験の状況



図-11 荷重除荷後の試験体の破壊状態

Case No.	Case-1	Case-2	Case-3	Case-4
板厚欠損率 R_t (%)	0	10	30	50
断面欠損率 R_A (%)	0	7.8	23.3	38.8

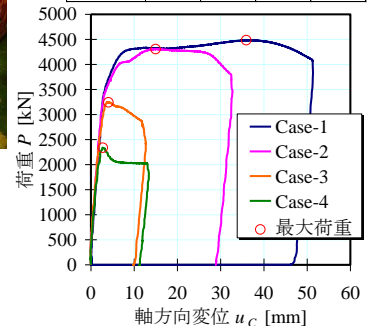


図-12 荷重—鉛直変位曲線

(2) トラス斜材

圧縮軸力を受ける斜材に関して、撤去された鋼トラス橋（橋長70m、46年間供用）より切り出した箱断面斜材を対象として、腐食を模擬して部分的に減肉させた試験体（断面欠損率0, 10, 30, 50%の4体）の圧縮荷重試験を行い、局所的な腐食が破壊性状や残存耐力に及ぼす影響を把握した（図-10～12）。併せて、解析に必要な溶接残留応力の計測を行うとともに、試験体毎の初期不整、腐食量を考慮した弾塑性有限変位解析を行い、試験結果との比較分析を行った。

耐力評価式：

$$\frac{P_{max}}{P_u} = 1.08 - 1.36R_A \times 10^{-3}$$

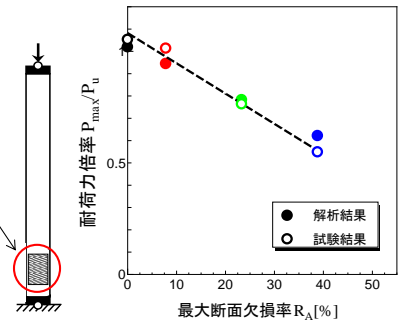
P_u ：道路橋示方書の柱の基準耐力
曲線から求めた基準耐力

R_A ：最大断面欠損率

$$R_A = \frac{A_0 - A_{min}}{A_0} \times 100$$

A_0 ：健全時の断面積

A_{min} ：最小断面積



(a) 評価式

(b) 評価式による算定値と実験・解析結果との比較

図-13 斜材の圧縮耐力評価式の提案と検証

最大荷重の試験値と解析値は概ね一致すること、また、実用性の観点から腐食状況を簡易な指標（最大断面欠損率）により表現し、この指標と健全時の耐荷力（設計基準の耐荷力曲線）を基にした評価式（線形回帰式）により残存耐荷力を概ね推定できることを確認した（図-13）。さらに、腐食損傷の生じた既往のH型、T型断面の鋼圧縮部材の残存耐荷性能に関する試験および解析からも、最大断面欠損率と残存圧縮耐荷力の相関が高く、最大断面欠損率を指標とした線形回帰式によって簡易に耐荷力を推定できることを確認した。

また、引張軸力を受ける斜材に関して、腐食試験体の引張試験を行うとともに、既往の荷重試験結果の整理分析を行い、引張部材（トラス斜材）を対象とした耐荷力評価式に関する検討を行った。その結果、腐食試験体の引張破断はほぼ全数が最小平均板厚断面において発生すること、引張耐荷力の試験値は最小断面積（試験では、

最小平均板厚×板幅）と材料強度より推定される耐荷力算定値により精度良く推定できることを確認した。

3. 橋全体系の耐荷性能評価のためのモデル化手法の開発

撤去前の鋼トラス橋において、荷重車を用いて撤去前・解体時における静的・動的荷重試験（図-14）を行い、主構部材、トラス格点部を中心にひずみ、変位等の計測を行った。これにより、全体挙動、ガセット周辺の局部挙動を把握するとともに、全体系解析及び格点部解析結果との比較を行い、モデル（図-15~17）の妥当性の評価を行った。その結果、格点部は剛結、RC床版と縦桁は非合成としたモデル化により荷重車載荷時の各部のひずみ、変位は部位により計測値と差違は若干見られるものの、概ね全体傾向を把握できることを確認した（図-18）。また、リダンダンシーの小さい側径間単純トラ



図-14 撤去前のトラス橋における荷重試験状況

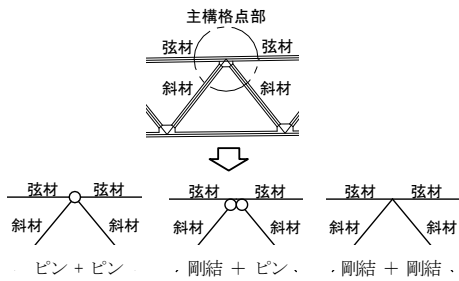


図-16 トラス格点部の主構面内の結合条件

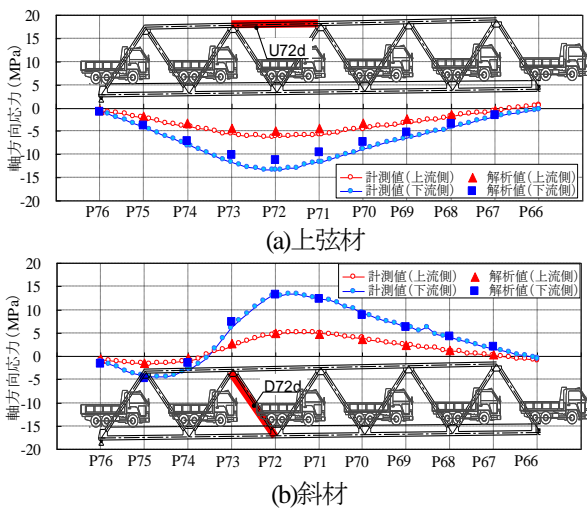


図-18 荷重車影響線載荷時の主構部材の応力（格点部：剛結，床版：非合成）

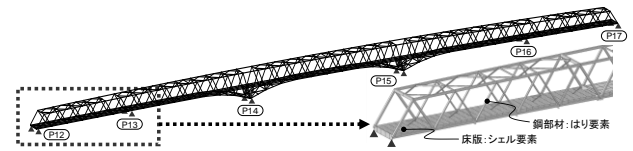
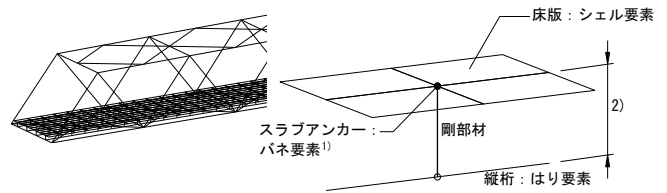


図-15 全体系 FEM 解析モデル



- 注1) スラプアンカーバネ値
 $(F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z) = \begin{cases} \text{完全合成} & (\infty, \infty, \infty, 0, 0, 0) \\ \text{不完全合成} & (K, K, K, 0, 0, 0) \quad K = \text{せん断バネ値} \\ \text{非合成} & (0, 0, \infty, 0, 0, 0) \end{cases}$
- 注2) 縦桁はり要素と床版シェル要素のZ方向間隔は、床版と縦桁の図心間距離と一致させた
- 注3) K値は、既往文献を参考に、1力所あたりのせん断バネ定数約300 (kN/mm) に対し、実橋と解析におけるスラプアンカーのピッチ差（実橋：900mm、解析：1529mm）を考慮し、510 (kN/mm) とした。

図-17 RC床版と縦桁の結合条件

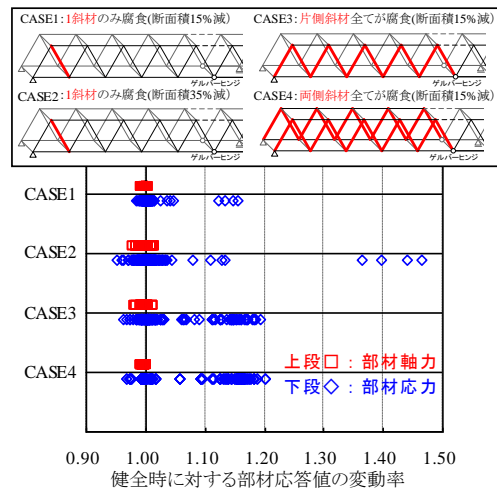
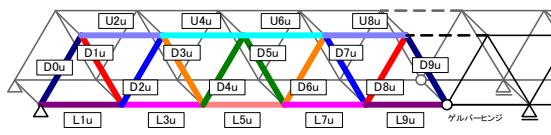
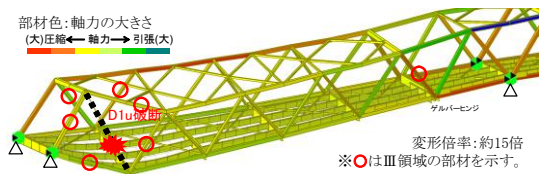


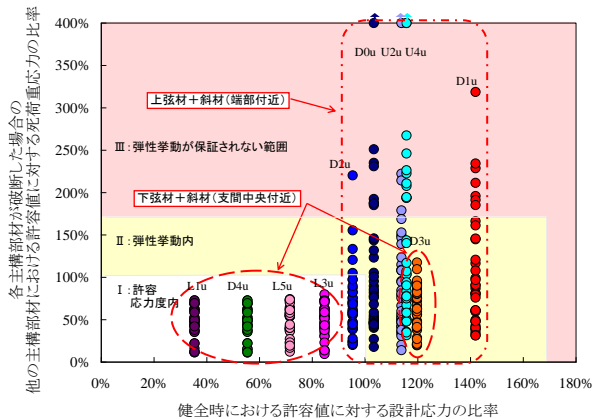
図-19 主構部材の腐食の影響の評価例（格点部：剛結，床版：非合成）



(a)破断させる部材

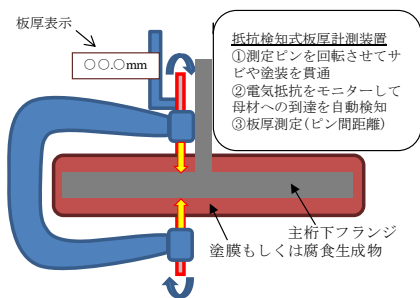


(b) D1u破断時の変形状況の例

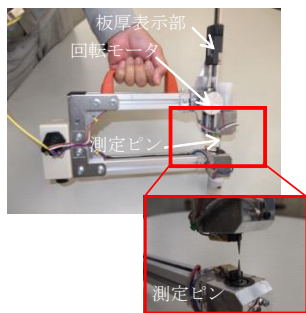


(c) 主構部材破断時の応力状態の評価結果

図-20 各主構部材の状態の評価例



(a)計測装置の模式図



(b)計測装置プロトタイプ

図-21 抵抗検知式板厚計測装置 (土研式計測法) と計測方法の模式図

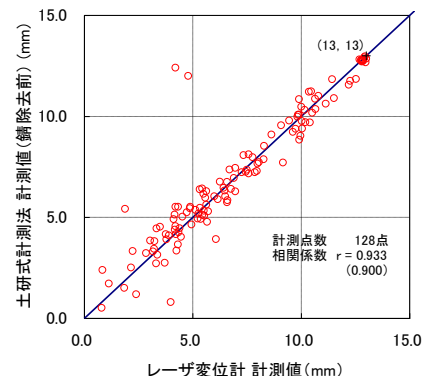


図-22 土研式計測法とレーザ変位計における計測結果の比較 ※レーザ変位計計測値(錆除去後)を真値と仮定

ス部を対象として、主構部材の格点部のモデル化の違いやRC床版-縦桁間の結合条件(非合成・合成)、部材の腐食欠損の考慮、支承機能不全の考慮など、実橋での不確定要因が解析結果に与える影響について感度分析を行った。これらのモデル化手法の違いによる部材応力度のばらつきは、部位により異なるものの最大-20~+20%程度見られ、実橋の状態を適切に評価する上でこれらの不確定な要因を想定しておくことが重要であることを確認した。さらに、部材未破断の場合には、相当程度の腐食欠損を想定しても各部材の断面力分担はほとんど変わらないこと(図-19)、一主構部材(下弦材)の破断の場合には、上下弦の横組部材と床組部材との協同作用により崩壊には至らない可能性が高い結果となった。

以上の結果を基に、現行の設計基準に基づく主構部材の耐荷性能と、一主構部材が破断した場合のその他の主構部材の状態への影響度を組み合わせることにより、橋全体系への影響を考慮して、各部材の耐荷性能を評価する方法を示した(図-20)。

4. 維持管理実務への成果の活用

最近の鋼橋における部材破断等の重大損傷事例の資料収集を行い、実務レベルの構造解析の現状、解析結果と部材破断後の実挙動との乖離程度、交通供用の判

腐食の生じた鋼トラス橋主構部材の維持管理上の留意点と耐荷力評価ガイドライン(試案)

1. 調査
 - 1.1 一般
 - 1.2 書類調査
 - 1.3 外観調査
 - 1.4 詳細調査
 - 1.5 腐食量の調査
2. 健全性の評価
 - 2.1 一般
 - 2.2 応答値算出のためのモデル化
 - 2.3 腐食した部材・構造の残存耐荷力評価

図-23 ガイドライン(試案)の目次構成

断に着目して、事例を整理し、供用時の構造安全性の確保の観点から、鋼トラス橋の維持管理上の留意事項をまとめた。また、現場での腐食状況調査に関して、実用性の観点から、錆を除去せずに残存板厚を計測することを目的として、各種の非破壊調査技術、及び別途土木研究所において開発した残存板厚を簡易に計測可能な装置(図-21)について、実橋から切り出した腐食試験片を用いて適用性の評価を行った(図-22)。さらに、2,3章で述べた耐荷性能評価手法の検討結果を基に、技術資料としてまとめた(図-23)。

謝辞：現地載荷試験の試験フィールドの提供や撤去部材の使用に関して、千葉県銚子土木事務所の多大なご協力を頂きました。ここに記して、深謝致します。

