腐食劣化の生じた橋梁部材の耐荷性能 評価手法に関する共同研究報告書

- 腐食劣化の生じた鋼トラス橋を活用した臨床研究報告書-

平成 25 年 6 月

独	<u>Т</u>	行	政	法	人	土	木	研	究	所
首		都		大		学		東		京
早		秳	心旧		田		ノ	Ł		学

Copyright © (2014) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したも のである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行 政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはなら ない。

腐食劣化の生じた橋梁部材の耐荷性能 評価手法に関する共同研究報告書

ー腐食劣化の生じた鋼トラス橋を活用した臨床研究報告書ー

独立行政法人 土木研究所 首都大学東京 早稲田大学

要旨

土木研究所 CAESAR では、首都大学東京及び早稲田大学と共同研究「腐食劣化の生じた橋梁部材の耐荷性能評価手法に関する研究」(平成21~24年度)を実施し、鋼トラス橋を対象として、腐食等の損傷を受けた鋼部材の耐荷性能評価手法、腐食部材を含む橋全体系の耐荷性能評価手法の検討を行ってきた。

本報告書は、平成21年度から平成23年度にかけて、約50年供用され撤去に至った腐食劣化の生じた鋼トラス橋を対象に実施した、撤去前の現地載荷試験、撤去部材の腐食量調査及び載荷試験、数値 解析との比較分析等の一連の臨床研究の成果をとりまとめたものである。

キーワード:鋼トラス橋、腐食、破壊性状、耐荷力評価、弾塑性有限変位解析

機関	氏 名	所属	担当期間
	村越 潤	構造物メンテナンス研究センター 上席研究員	H21.4~H25.3
	梁取 直樹	構造物メンテナンス研究センター 主任研究員※1	H21.4~H22.3
	遠山 直樹	構造物メンテナンス研究センター 主任研究員※1	H22.4~H25.3
	澤田守	構造物メンテナンス研究センター 研究員*2	H21.4~H25.3
独立行政法人	郭 璐	構造物メンテナンス研究センター 専門研究員 ^{※3}	H22.8~H24.7
土木研究所	前田 和裕	構造物メンテナンス研究センター 交流研究員※4	H21.4~H22.3
	有村 健太郎	構造物メンテナンス研究センター 交流研究員※5	H22.4~H24.6
	(7章非破壊検査技術担当)		
	高橋 実	構造物メンテナンス研究センター 主任研究員	H23.4~H25.3
	飯塚 拓英	構造物メンテナンス研究センター 交流研究員 [≫]	H23.4~H25.3
首都大学東京	野上 邦栄	都市環境科学研究科都市基盤環境学域教授	H21.4~H25.3
日孫田十学	依田 照彦	理工学術院 社会環境工学科 教授	H21.4~H25.3
干加田八子	笠野 英行	理工学術院社会環境工学科准教授	H21.4~H25.3

共同研究担当者名簿

- ※1 現 本州四国連絡高速道路株式会社
- ※2 現 国土交通省 中部地方整備局 沼津河川国道事務所
- ※3 現 中国北京建築工程研究院
- ※4 現 一般財団法人首都高速道路技術センター
- ※5 現 株式会社オリエンタルコンサルタンツ
- ※6 現 島根県 土木部 道路維持課

目 次

4		4
	$ \mathbf{T} $	L

2. 対象橋梁の概要

2.1 橋梁の概況	
2.2 塗装履歴	
2.3 腐食状況	 į

3. 鋼トラス橋の現地載荷試験と耐荷性能評価に関する検討

3.1	検討概要6
3.2	現地載荷試験による実挙動とモデル化手法の検討6
3.3	腐食劣化及び境界条件の橋全体系への影響に関する検討
3.4	部材破断が耐荷性能に与える影響の感度解析
3.5	腐食損傷及び部材破断時を考慮した耐荷性能評価手法の検討
3.6	まとめ

4. 鋼トラス橋の主構部材の腐食状況に関する調査・分析

4.1 検討概要		••••••	
4.2 上弦材側格	ら点部の腐食計測とその形:	伏評価	
4.3 腐食状況の)計測手法に関する検討		
4.4 まとめ …			

5. 模擬腐食を導入したトラス斜材の載荷試験

5.1	検討概要
5.2	試験体
5.3	引張試験と初期不整計測
5.4	試験方法と試験結果
5.5	弹塑性有限変位解析 61
5.6	解析結果と考察
5.7	まとめ

6. 腐食劣化の生じたトラス格点部の載荷試験

6.1	検討概要	 9
6.2	試験体	 9
6.3	試験方法	 2

6.4	試験結果	75
6.5	弹塑性有限変位解析	85
6.6	解析結果と考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	89
6.7	まとめ	98

7. 腐食鋼部材の残存板厚計測への各種計測技術の適用性の検討

7.1 検討概要
7.2 対象とした非破壊検査技術
7.3 各種計測技術の適用性の確認試験
7.4 試験結果と考察106
7.5 実用的簡易計測手法の提案と適用性の検討115
7.6 まとめ119
8. まとめ
謝辞

付属資料 1 引張を受ける腐食鋼板の試験結果及び残存試験データの整理

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急速に進む中で、近年、 鋼トラス橋において主構部材の重大損傷が報告されている。平成19年には直轄の鋼トラス 橋において、コンクリート部材に埋込まれた鋼製の斜材が腐食により破断する事例が相次 いで発生している(図-1.1)。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に至った。その後の国家運輸安全委 員会(NTSB)の報告書では、崩壊の要因ではないものの、既設トラス橋における格点部の 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。今後、 腐食劣化の進行した橋梁において、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、実際に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。

このような背景から、CAESARでは、首都大学東京および早稲田大学と共同研究「腐食劣 化の生じた橋梁部材の耐荷性能評価手法に関する研究」(平成21~24年度)を実施し、鋼 トラス橋を主な対象として、腐食等の劣化損傷を受けた主構部材の耐荷性能評価手法およ び損傷部材を含む橋全体系の耐荷性能評価手法について研究を進めてきた(図-1.2)。

本報告書は、平成21年度から平成23年度にかけて、約50年供用され撤去に至った腐食劣 化の生じた鋼トラス橋を対象に実施した、撤去前の現地載荷試験、撤去部材の腐食量調査 および載荷試験、数値解析との比較分析等の一連の臨床研究についてとりまとめたもので ある。臨床研究の実施にあたっては、千葉県と連携し、平成21年度に撤去された鋼トラス 橋(千葉県銚子大橋)を試験フィールドとして活用している。



(a)全景

(b)破断した斜材

図-1.1 トラス橋の斜材の腐食破断



図-1.2 研究の概要

対象橋梁の概要

2.1 橋梁の概況

対象とした橋梁は、一般国道 124 号線にて千葉県と茨城県との県境の利根川に架かる銚 子大橋であり、橋長 407m の側径間にゲルバー吊構造を有する鋼 5 径間連続下路式トラス橋 である。図-2.1.1 に銚子大橋の全景、図-2.1.2 に側面図および断面図を示す。1962 年に建設 され、2000 年の調査結果では、交通量は 21251 台/12h、大型車混入率は 8.5%であった。 適用基準は昭和 31 年版の道路橋示方書であり、設計活荷重は TL-20、主要鋼材は SS400、 SM490 である。

本橋では、図-2.1.3 に示すように塩害による部材の腐食損傷が著しく、これまでに斜材、 格点部及び床組の断面補強、横構交換等の大規模な補修補強が行われてきた^{2-1)~2-3)}(図 -2.1.3 (a)、(b)、(k))。供用停止前には、腐食欠損による部材耐荷力の低下により、通行車両 の車重が20トン以下に制限されたほか、架橋地点にて震度5以上の地震が観測された場合 には通行止めとする措置がとられており、2009年に新橋の供用開始にあわせて撤去された。



図-2.1.1 対象橋梁の外観



(b) 平面図

図-2.1.2 橋梁一般図(単位:mm)



(a) 当て板補強された斜材・下弦材格点部



(b) 上弦材格点部と交換された上横構



(c) 上弦材格点部



(d) 下弦材格点部



(e) 上弦材格点部(図(b)の塗膜除去後)



(f) 上弦材格点部(図(c)の塗膜除去後)



(g) 下弦材各点部(塗膜除去後)



(h) 斜材



(i) 箱形断面部材内面 (密閉部)



(j) 箱形断面部材内面(添接部)



(k) 補強された縦桁と床版の 接合部図-2.1.3 腐食状況と補修補強状況



(l) 縦桁上フランジ上面 (床版撤去後)

2.2 塗装履歴

本橋は、著しい腐食の発生により、約50年の供用期間中に数度にわたり塗装塗替が実施 されている。本橋の塗装は竣工当初の1962年には、A系(フタル酸系)塗装が適用されて いたが、1977年から数年にわたる塗装塗替ではB系(塩化ゴム系)塗装が適用されている。 しかし、塗替後に腐食が再度顕在化したことにより、1985年にはC系(ポリウレタン樹脂 系)、1992年には超厚膜型フッ素系塗装によって塗替されている²⁻¹⁾。

このように、比較的短い期間で鋼材の腐食が再発を繰り返し、数回の塗装塗替に至った 要因としては、建設当時の塗装方法として黒皮を残した状態で塗装が施工された可能性が あること、当初の現場塗装時に既に塩分付着があった可能性があること、塗装塗替時に下 地処理の多くを 3 種ケレンで実施したことにより、塩分を完全に除去できなかったこと等 が考えられる。

2.3 腐食状況

本橋の鋼部材は、過去に超厚膜フッ素系塗装による塗替が実施されており、腐食減肉量 の把握は困難であるが、目視でも格点ガセットとその周辺部に腐食が進行している状態が 見られた(図-2.1.3 (b)~(d))。特に主構部材については、塩害に加えてボルト部の塗膜厚不 足や部材境界部での滞水などが原因と考えられるが、ガセットプレートと接合部材との境 界部において腐食減肉が著しい。このことは、本橋の撤去後に塗膜を除去した状態からも 伺える(詳細は、3章に示す。)(図-2.1.3 (e)~(g))。一方、斜材の一般部においては、孔食 が点在する箇所も見られるが、耐荷性能への影響は比較的小さいと考えられる(図-2.1.3 (h))。 箱断面部材については、密閉部については密閉状態が保たれており、内部の腐食は赤さび 程度であったが(図-2.1.3 (i))、密閉となっていない添接部内部は、箱断面内部の腐食が生 じており、板厚の減肉やボルトの一部腐食欠損が確認された(図-2.1.3 (j))。

床組部材については、特に下フランジの腐食欠損が激しく、縦桁下フランジは補強されていた(図-2.1.3 (k)).また、部材撤去後の状態からは、縦桁上フランジ上面には全体的に 錆が生じていた(図-2.1.3 (l))。

参考文献

- 2-1) 後藤和満、石塚宏之:塩害を受けた鋼トラス橋の塗装管理-銚子大橋の事例・危機管
 理体制の強化-、Structure Painting、Vol.36、No.1、pp.18-23、2008.3.
- 2-2) 佐藤恒明、倉西茂:床組が補強された鋼トラス橋の応力・変位挙動、構造工学論文集、
 Vol.39A、pp.981-988、1993.3.
- 2-3) 佐藤恒明、倉西茂、中沢正利:鋼トラス橋の床桁ウェブに生じる面外二次応力の数値 的原因分析、土木学会論文集、No.492/VI-23、pp.87-95、1994.6.

3. 鋼トラス橋の現地載荷試験と耐荷性能評価に関する検討

3.1 検討概要

本章では、2章に示す著しい腐食劣化の生じた鋼トラス橋を対象として、橋全体系の実挙 動を把握するとともに、応答値算出のためのモデル化手法および耐荷性能の評価手法を検 討することを目的として、荷重車の静的荷重載荷時における挙動計測と弾性3次元 FEM 解 析を行った。ここで、対象とした鋼トラス橋では、主構部材の格点部とその周辺に特に著 しい腐食劣化が確認されており、鋼材の腐食による断面欠損が橋の全体挙動に及ぼす影響 については、耐荷力評価を行う上で把握しておく必要がある。また、応答値算出に際して、 格点部、床板と縦桁の接合部および支承部といった境界条件のモデル化についても、橋の 挙動を適切に把握するうえで検討しておくべき点と言える。

以上のような点を踏まえ、まず、トラス主構に着目し、実測値と解析値の比較分析によ り、解析モデルの妥当性の検証を行った。また、既設橋の劣化等の不確実要因を想定し、 それらの要因が主構部材の応答値算出に及ぼす影響を解析により検討した。さらに、ケー ススタディとして、本橋の主構部材の未破断時の耐荷力評価を行うとともに、一部材が破 断した場合を想定し、リダンダンシーを考慮した耐荷性能の評価法について検討した。

3.2 現地載荷試験による実挙動とモデル化手法の検討

3.2.1 試験方法

図-3.2.1 に計測対象橋梁の全体一般図を示す。主に P16~P17 径間(ゲルバー径間)にお いて、荷重車による載荷試験を実施した。図-3.2.2 に主構部材におけるひずみの計測箇所を 示す。また、写真-3.2.1 にはひずみゲージの設置状況を示す。載荷試験では、全体挙動を把 握する観点から主構部材、床組のひずみ、変位の計測を、構造上弱点となる可能性のある トラス格点部の挙動を把握する観点から、ガセット及び斜材取付け部のひずみの計測(計 測箇所は計 356 箇所)を行った。

図-3.2.3 および表-3.2.1 に荷重車の寸法諸元および軸重を、図-3.2.4 に載荷ケースを示す。 また、支間中央部において、荷重車 1 台の後輪を 175 mmの枕木から自由落下させる段差加 振を行った。表-3.2.2 に計測内容を示す。まず、活荷重の実態を把握するために、交通供用 下における挙動計測を実施した。次に、主構部材、床組の全体挙動及び格点部とその近傍 の詳細挙動を把握するために、総重量約 20tonf (193kN) に調整したダンプトラックを用い て、着目主構格点位置に直列 2 台、並列 2 台載荷する定点載荷(写真-3.2.2(a))、各車線上 に 1m ピッチで荷重車 1 台を移動させながら載荷する影響線載荷(写真-3.2.2(b))を実施し た。これらのうち、本文では荷重車載荷時の挙動計測について述べる。







写真-3.2.1 ひずみゲージの設置状況



図-3.2.3 荷重車の寸法

表-3.2.1 荷重	軍の	軸重	量
------------	----	----	---

前軸重	後軸重合計	総重量		
86.5 kN	106.5 kN	193.0 kN		



ひずみの計測結果は表-3.2.3 に示す方法により、軸方向応力、面内曲げ応力、面外曲げ応 力にそれぞれ変換し、後述する FEM 解析結果との比較を行った。なお、トラス橋主構部材 の主たる応力成分である軸方向応力については、局部的な断面変化に伴う応力集中の影響 が含まれないように腐食による断面欠損が比較的少ない部位としている。



(a) 定点載荷(右側が銚子側)(b) 定点載荷(奥が銚子側)(c) 影響線載荷(奥が銚子側) 写真-3.2.2 荷重車載荷の状況

表-3.2.2 計測内容

計測項目	計測の目的	試験の内容	
交通供用下 の挙動計測	交通供用下における活荷重実 態の把握(1ケース)	・24 時間応力頻度測定(PV/RF 法) ・昼間 3 時間の通行車両ビデオ撮影	
荷重車載荷時 の挙動計測	主構部材、床組の全体挙動及び 格点部とその近傍の詳細挙動 の把握(10ケース)	 ・20t 荷重車2台(直列及び並列配置)による 定点(トラス格点位置)載荷(4ケース) ・荷重車1台による影響線載荷(1mピッチで 移動させながら載荷)(3ケース) ・荷重車1台による段差加振(3ケース) 	

表-3.2.3 斜材に貼付したひずみゲージによる軸方向ひずみと曲げひずみの定義

対象部材	軸方向ひずみ	曲げひずみ(面内)	曲げひずみ(面外)
斜材□断面	$\frac{FOU + FOL + FIU + FIL}{4}$	$\frac{(DLO + DLI) - (DUO + DUI)}{4}$	$\frac{(DUO + DLO) - (DUI + DLI)}{4}$
斜材H断面	$\frac{FOC + FIC}{2}$	$\frac{(DLO + DLI) - (DUO + DUI)}{4}$	$\frac{(DUO + DLO) - (DUI + DLI)}{4}$

3.2.2 FEM 解析

弾性 3 次元 FEM 解析による載荷試験の再現解析を行い実測値との比較を行った。表 -3.2.4 に解析モデルの概要を、図-3.2.5 にモデル図を示す。本解析は弾性微小変形解析とし、 主構・床組・横構をはり要素(実橋の部材補強を反映)、床版をシェル要素とし、5 径間全 橋をモデル化した。表-3.2.5 に解析で用いた材料物性値を示す。荷重車は、タンデム軸を1 軸としてモデル化した。主構部材の格点部については主構面内・面外ともに剛結合とし、 床版と縦桁の接合については、実橋計測において縦桁が非合成桁に近い挙動を示していた ことから(当初設計も非合成桁として設計されている。)、非合成桁を想定し、スラブアン カーに用いたバネ要素によって床版からの鉛直力のみを伝達する結合条件とした。なお、 主構面外方向に対する主構部材と床組や横構の結合条件は全ケースについて剛結合とした。 解析には、有限要素法の汎用ソフト NX Nastran を用いた。

また、格点部については、橋梁全体のモデルに図-3.2.6 に示す格点部の詳細なモデルを組 み込んだモデルを使用した。対象とした格点部は図-3.2.2(a)における P72d (d は下流側を示 す。)である。主構部材にははり要素、床版部・格点部の詳細なモデル部分にはシェル要素 を用いた。主構部材のはり要素は格点において剛結合とし、P72d における格点部の詳細な

項目		内容	
	解析手法	弹性 3 次元 FEM 解析	
THE	主構、横構、床組	はり要素	
安玉	床版	シェル要素	
モ	スラブアンカー	バネ要素	
デル	故上如	主構面内: 剛結	
	伯从即	主構面外: 剛結	

表-3.2.4 解析モデル概要

表-3.2.5 解析で使用した材料の物性値

使用材料	弹性係数 E(N/mm ²)	ポアソン比
鋼材	2.0×10^{5}	0.3
コンクリート	2.35×10^{4}	0.167



図-3.2.5 FEM 解析モデル



図-3.2.6 格点部の FEM 解析モデル

モデルは剛なはり要素で主構部材に接合した。ここでの解析ソフトは有限要素法の汎用プログラムである DIANA9.2 を用いた。

3.2.3 試験結果と考察

(1) 床組の挙動

図-3.2.7 に下り車線の影響線載荷時における、下り線着目縦桁における上下フランジ応力 の計測値を、図-3.2.8 に支間中央付近の上下線着目縦桁の応力について実測値と解析値(床 版と縦桁間を合成または非合成と仮定)の比較結果を示す。また、図-3.2.9 に格点載荷時に おける、支間中央付近の縦桁の応力について実測値および床版と縦桁を合成または非合成 と仮定した場合の中立軸位置を示す。床版と縦桁間はスラブ止め鉄筋で接合されており、 既設橋では一般に合成挙動を示す事例も多いが、下り線側においては合成と非合成の中間 的な挙動が見られた。本橋撤去後の外観調査によれば、ほとんどの縦桁で上フランジ全面



に腐食劣化が見られており(写真-3.2.3)、床版コンクリートとの付着が喪失された状態であったものと推測される。また、1台載荷時(図-3.2.9 (a)(b))の計測値の重ね合わせと2台(並列)載荷時(図-3.2.9 (c))の計測値で異なる結果となっている。本文では省略するが、当該縦桁では床版接合部の橋軸方向のずれ変位も計測している。それによると、載荷荷重の増加に伴い床版と縦桁のずれ量が非線形的に増加することや、除荷時には残留変位が確認されていることから、2台載荷時には非合成に近い挙動を示したものと考えられる。なお、主桁ウェブにおいても計測しているが、上下フランジの計測値を結ぶ直線と大きくかけ離れる値ではないことを確認している。





図-3.2.10に、交通供用下の挙動計測結果 について、縦桁支間中央下フランジ(下り 線側)のレインフロー(RF)法による24 時間応力頻度分布を示す。20tonf荷重車に よる実測値は最大で12N/mm²程度である のに対し、動的な衝撃の影響も含めて最大 で43N/mm²程度の応力が発生している。ビ デオ撮影によればダンプトラックであり



写真-3.2.4 下り線縦桁応力最大時の通行車両

(写真-3.2.4)、本橋では通行車両に対して20tonfの総重量制限が行われていたが、荷重車載 荷時の応答を超える頻度は3%程度であるものの、日常的に20tonfを超える応答が生じてい たものと推測される。

(2) 主構部材の挙動

1) トラス主構部材

図-3.2.11 に下り車線の影響線載荷時における、主構部材(上弦材、斜材、下弦材)の軸 方向応力について計測値と解析値(床版と縦桁間を非合成と仮定)の比較結果の例を示す。 いずれの部材においても計測値と解析値は比較的良く一致している。

また、図-3.2.12 に格点載荷ケースに対する主構部材の軸方向応力の計測値と解析値の関係を示す。解析値と計測値に若干違いが見られるが、両者は概ね一致しており、トラス主 構部材の主たる断面力である軸方向力に対しては、前述の解析モデルにより活荷重載荷時



の応答を適切に再現できている。なお、図-3.2.12 における解析値と計測値の差の要因は明 確ではないが、実橋と解析モデルにおける境界条件や部材の初期不整の影響が考えられる (図-3.3.4、図-3.3.5 参照)。例えば、後述の図-3.3.4 の感度解析に示すように境界条件によ っては、同程度のばらつきは見られており、腐食による合成挙動の変化、支承の機能喪失 による可能性も考えられる。また、3.3.2 で述べるが、合成および非合成の違いが、主構部 材の主たる応答値となる軸方向応力に与える影響は小さい。

トラス主構部材のうち斜材については、軸方向応力の他にトラス格点部取付け部の面 内・面外曲げ応力の計測を行っており、それらのうち軸方向応力の大きい D72d 斜材におけ る計測値と解析値(床板と縦桁値を非合成と仮定)の比較結果を図-3.2.13 に示す。曲げ応 力については下弦材側(P72d 格点)の計測結果であり、計測箇所は腐食による断面欠損が ほとんど生じていない箇所である。一方、解析値の曲げ応力は、格点位置(部材の接点位 置)に生じる曲げモーメントに対する計算値であり、計算値との測定位置に違いがあるも のの、両者は概ね一致している。

また、計測の結果から、軸方向応力に対する曲げ応力の比率を図-3.2.14 に示す。軸方向 応力に対して面内で約 10%、面外で約 30%の曲げ応力が発生しているが、それらを適切に 評価するのは難しいと考えられることから、実務的には二次的な応力に対する安全余裕の 確保に配慮する必要があると考えられる。



また、図-3.2.15 に、斜材 D72d (H 形断面) における支間中央付近の P71 格点部載荷時の 面外曲げ応力についての解析値と計測値の比較結果を示す。計測値と解析値の傾向は概ね 一致しているが、下流側載荷時における下弦材側の格点 (P72d) においては乖離がみられ る。当該計測部位は図-3.2.16 に示すように腐食欠損の著しい箇所であり、断面欠損による 影響が考えられる。



図-3.2.16 格点部近傍の斜材の腐食状況 (D72d)

2) トラス格点部

図-3.2.17 (a)に格点部の計測結果を示す。荷重車2台を用いた格点載荷におけるひずみの 計測結果である。この結果から、斜材とガセットの境界部や、ガセットと下弦材の境界部 にひずみが集中していることがわかる。一方、格点部シェルモデルにより解析結果では、 同様の箇所でひずみが集中している(図-3.2.17 (b))。また、図-3.2.18にはガセットプレート 両面の圧縮斜材端部における計測結果及び解析結果の関係を示すが、計測値と実測値は一 部で乖離がみられるものの、概ね近い値を示している。



図-3.2.17 格点部のひずみ



図-3.2.18 ひずみ計測値と解析値の関係

3.3 腐食劣化及び境界条件の橋全体系への影響に関する検討

3.3.1 解析方法

前項で示した解析モデルを用いて、橋梁の各種の劣化現象を想定し、解析モデルにおけ る各種の不確定要因が主構部材に及ぼす影響を各種のパラメータを用いて感度解析を行い 検討した。

表-3.3.1 に解析モデルにおける境界条件を、表-3.3.2 に解析ケースに示す。基本となるケ ースに対して、劣化現象として、床版と縦桁の付着劣化、支承機能の劣化および鋼材の腐 食による断面減少を想定し、主構部材の応答値に及ぼす影響を確認した。さらには曲げ応 力に影響をおよぼす格点部の結合条件についても検討した。

床版と縦桁の間は一般的に非合成として設計されるが、実挙動は合成桁に近い挙動を示 す場合がある。一方では、前述のように非合成に近い挙動も計測されている。ここでは、 床版コンクリートと縦桁間を、完全合成(水平方向のバネを剛)、非合成(バネを零)、不 完全合成(スラブアンカーのみで結合)の場合の3ケースの解析を実施した。不完全合成 では、既往の実験結果³⁻¹⁾を基にせん断バネ値を設定した。図-3.3.1にスラブアンカーのモデ ル化の概要を示す。

トラス主構格点については、設計上はピン結合と仮定して、骨組モデルにて断面力解析 の上、部材設計されるのが一般的であるが、本橋では比較的大きい面外曲げ応力が計測さ れている。したがって、ガセットプレートを介して接合されるトラス橋の場合、格点部は 比較的剛に近い挙動を示すことが考えられ、ガセット周辺の主構部材では面内・面外曲げ による二次応力の影響も想定される。ここでは、図-3.3.2 に示すように、主構格点での部材 結合条件について、当初設計仮定のピン結合の場合と、弦材のみ剛結、弦材・斜材とも剛

	• •	2 - 2 1 1 1 1	
境界条件		萬里	
項目	境界条件	帆安	
床版	完全合成	スラブアンカーバネあり (鋼桁との付着がある状態)	
	不完全合成	スラブアンカーバネあり (鋼桁との付着がない状態)	
	非合成	スラブアンカーバネなし	
	剛結+剛結	上下弦材、斜材ともに剛結合	
格点	剛結+ピン	上下弦材 : 剛結合 斜材 : ピン結合	
	ピン+ピン	上下弦材、斜材ともにピン結合	
支承	回転拘束	全支点の回転方向を固定	
	水平拘束	全支点の水平方向を固定	

表-3.3.1 境界条件

表-3.3.2 解析ケース

	境界条件			
解析モデル	格点 (弦材+斜材)	床版と鋼桁	支承	鋼材
基本モデル	剛結+剛結	完全合成		_
格点部 モデル化	ピン+ピン	完全合成	—	_
	剛結+ピン	完全合成	—	_
床版と鋼桁 の付着劣化	剛結+剛結	不完全合成	—	_
	剛結+剛結	非合成	_	_
支承機能 の劣化	剛結+剛結	完全合成	回転拘束	_
	剛結+剛結	完全合成	水平拘束	_
腐食による 断面減少	剛結+剛結	完全合成	_	1斜材のみ 断面積15%減
	剛結+剛結	完全合成	_	1斜材のみ 断面積35%減
	剛結+剛結	完全合成	_	片側主構斜材 断面積15%減
	剛結+剛結	完全合成	_	全ての斜材 断面積15%減



結合の場合の3ケースの解析を実施した。なお、面外曲げ応力の計測結果を踏まえて、主 構面外方向に対する主構部材と床組や横構の結合条件は全ケースについて剛結合とした。

鋼材の腐食については、本橋のように主構部材に著しい腐食が生じた場合を想定し、部 材の腐食が構造全体系の耐荷性能に与える影響について、図-3.3.3 に示す腐食ケースを想定 し前述の解析モデルを用いて検討した。なお、腐食は着目斜材が全長にわたり一様に断面 減少するものと仮定した。

3.3.2 解析結果と考察

図-3.3.4 に解析結果を示す。図中に示す応力値は軸方向応力および曲げ応力の合計値である。





(1) 境界条件のモデル化の影響

1) 格点部の結合条件

格点部の結合条件をピンとした場合および斜材のみピンとした場合では、斜材および下 弦材に若干の影響はあるが、その影響は小さい。詳細は省略するが、格点部の結合条件の 違いにより軸力変動はほとんどなく、格点部を剛結としたことにより曲げモーメントが発 生するが、軸力による応力に対して大きいものではない。また、変位についてもいずれの ケースにおいてもほぼ同等であった。

2) 床版と縦桁の付着劣化

床版と縦桁の結合条件の違いが主構部材の応答に与える影響は小さい。すなわち、床版 と縦桁の付着劣化が主構部材に与える影響は小さい。

3) 支承の機能劣化

支承の回転機能を拘束した場合、支点に近い上弦材の圧縮応力度が減少し、下弦材の引 張応力度は増加する。一方、支承の水平変位を拘束した場合、下弦材両端が圧縮部材とな り、中間部引張応力が減少する。

(2) 鋼材の腐食による断面減少の影響

図-3.3.5に健全時に対して腐食を想定した各ケースにおける主構部材の軸力および応力の 変動率を示す。鋼材の腐食によって断面欠損が生じた部材のみにその影響が大きく生じて いることがわかる。これは、いずれの腐食パターンについても軸方向力の変化は小さく、 腐食による断面欠損が各主構部材の断面力分担に与える影響は小さいことによる。応力に ついては、当然ながら断面積の減少に応じた増加が生じるため、応力値の算出に際しては、 断面腐食の影響を考慮する必要がある。



3.4 部材破断が耐荷性能に与える影響の感度解析

3.4.1 解析方法

対象橋梁について、腐食損傷などの影響によって主構部材の一部が破断するという致命 的な状況を想定した解析を実施し、一部の部材破断が全体系挙動に与える影響について検 討した。解析モデルは、3.2.2 に示したモデルと同一とし、斜材が破断した場合の各部材の 応答値を健全時の応答と比較した。部材破断時のモデル化に際して、破断による衝撃の影 響は考慮せず、着目部材を取り除いた状態を初期状態として死荷重のみを作用させた。

3.4.2 解析結果と考察

(1) 部材破断時の床版と縦桁との合成挙動の影響

部材未破断時の解析結果によれば、主構部材の応答に対して床版合成効果の影響はほとん ど見られなかったが、斜材などの主構部材の破断時には、主構全体にねじれや過度のたわ みが発生することが想定されるため、これらの挙動に対する橋全体の抵抗として床版と縦 桁との合成効果が寄与すると考えられる。第一引張斜材破断時について、図-3.4.1 に主構部 材の死荷重時断面力を、図-3.4.2 にスラブアンカーバネのせん断力分布を示す。健全時、非 合成、不完全合成及び完全合成と仮定した場合の結果を示している。床版の合成効果の考



図-3.4.1 床版と縦桁との合成効果の影響(主構断面力)

慮の有無により、斜材破断時の主構の面内面外曲げモーメントが床版合成を考慮しない場 合に比べ約 20%程度低減されている。

また、破断部材周辺のスラブアンカーでは、せん断力が大きくなっており、部材破断時に スラブアンカーを介して床版に断面力が伝達されていることがわかる。スラブアンカーの バネ定数の違い(完全合成、不完全合成)は解析値には大きく影響しない結果となった。 なお、その際のバネ1本当り換算応答せん断力は、スラブアンカー単体のせん断耐力を下 回っており、床版やスラブアンカーが健全な場合には死荷重載荷に対して荷重伝達の役割 を果たしている可能性が高い。



図-3.4.2 床版と縦桁との合成効果の影響(スラブアンカーせん断力)

(2) 部材破断時の主構部材の挙動に対する格点モデルの影響

図-3.4.3 に部破断時における主構格点のモデル化を変えた場合の主構部材の死荷重時断面 力・変位の解析結果を示す。軸力については、斜材破断によって上下流側の主構ともに健 全時に比べ大きく変動するものの、モデル化の違いによる差は小さい。一方、面内・面外 曲げモーメントについては、主構格点を剛結合とすることで破断部材近辺の部材で卓越す る傾向が見られる。その結果、主構格点を剛結合とした場合、軸力はピン結合モデルと大 きく変わらないものの曲げモーメントが生じることで部材断面の応力はピン結合に比べ厳 しくなる結果となった。主構の変位については、最も変位が生じる主構格点において、剛 結合の鉛直方向変位量はピン結合に対して 70%程度であり、主構部材の曲げモーメントの 増加により部材の応力度は増すものの、橋全体としては変形量が抑えられる結果となって いる。



図-3.4.3 主構格点のモデル化の影響(斜材破断時)

3.5 腐食損傷及び部材破断時を考慮した耐荷性能評価手法の検討

国内で発生した鋼トラス橋の斜材破断を例に、今回対象とした鋼トラス橋(側径間部の 単純トラス)の一主構部材が破断した場合の、その他の主構部材の状態について検討した. 対象橋梁の主構部材が破断に至っていない状況下(死荷重+B活荷重)での強度照査を基本 としつつ、主構部材が破断した場合の状態のリダンダンシーに着目した評価を組み合わせ ることにより、致命的状態に対する各主構部材の安全余裕の評価方法を検討した。

3.5.1 検討方法

部材破断時については、前述の解析モデルを用いて、各主構部材が破断した場合の構造 系により弾性解析を行い、他の部材の状態評価を行った。弾性解析を適用しているため、 塑性後の剛性変化による断面力再配分や、他部材の連鎖的な破壊などの挙動は評価できな いが、各部の状態の相対的な厳しさは表現できるものと考えた。なお、部材の強度照査は、 道路橋示方書II鋼橋編³⁻²⁾(以下、道示II)に準じ、軸方向力と曲げモーメントを受ける部 材として式(3.5.1)~式(3.5.5)により行った。

(a) 軸方向力が引張の場合

$$\sigma_{t} + \sigma_{bty} + \sigma_{btz} \le \sigma_{ta}$$
 (引張応力照査) (3.5.1)

$$-\sigma_t + \sigma_{bcy} + \sigma_{bcz} \le \sigma_{cal}$$
 (局部座屈照査) (3.5.3)

(b) 軸方向力が圧縮の場合

$$\frac{\sigma_{c}}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy}} + \frac{\sigma_{bcz}}{\sigma_{eay}} \leq 1 \quad (\text{ind} \text{ ind} \text{ ind}$$

$$\sigma_{c} + \frac{\sigma_{bcy}}{1 - \frac{\sigma_{c}}{\sigma_{eay}}} + \frac{\sigma_{bcz}}{1 - \frac{\sigma_{c}}{\sigma_{eaz}}} \le 1 \quad (\texttt{B} \text{B} \texttt{E} \texttt{E} \texttt{E} \texttt{R} \texttt{E})$$
(3.5.5)

ここに、

 σ_t 、 σ_c : それぞれ照査する断面に作用する軸方向力により引張及び圧縮応力度(N/mm²) σ_{bty} 、 σ_{btz} : それぞれ強軸及び弱軸まわりに作用する曲げモーメントによる曲げ引張応 力度(N/mm²)

 σ_{bcy} 、 σ_{bcz} : それぞれ強軸及び弱軸まわりに作用する曲げモーメントによる曲げ圧縮応力度(N/mm²)

σ_{ta}: 道示 II の表-3.2.1 に示す許容軸方向引張応力度(N/mm²)

σ_{caz}: 道示 II の式 (3.2.1) により算出した弱軸まわりの許容軸方向圧縮応力度(N/mm²)

 σ_{cal} :両端支持板、自由突出板、補剛板及び鋼菅についてそれぞれ道示 II の 4.2.2 から 4.2.4 まで及び 14.3 に規定されている局部座屈に対する許容応力度(N/mm²) σ_{eay} 、 σ_{eaz} : それぞれ強軸及び弱軸まわりの許容オイラー座屈応力度(N/mm²)

$$\sigma_{eay} = 1,200,000 / (l/r_y)^2$$
(3.5.6)

$$\sigma_{eaz} = 1,200,000 / (l/r_z)^2 \tag{3.5.7}$$

1: 道示Ⅱの各章に規定されている有効座屈長(mm)

r_v、r_z: 強軸及び弱軸まわりの断面二次半径(mm)

3.5.2 解析結果

図-3.5.1 に解析結果を示す。横軸は、色分けした各主構部材の健全時における許容値に対 する設計応力の比率を示している。縦軸は、各主構部材が破断した場合の、他の主構部材 における許容値に対する作用応力の比率を示している。

図-3.5.1 (c)に示すように、部材が破断した場合に死荷重のみが載荷された状態を想定する と、D72d (図中の D3u)のような支間中央付近の斜材では健全時に負担している断面力が 小さく、下弦材では床版および縦桁が断面力を負担するため、仮に D72d (図中の D3u)が 破断しても他部材が断面力を負担しつつ不安定な状態には至らないことを示している。一 方、上弦材や支点付近の斜材が破断した場合には、近接する他部材の断面力が著しく増加 し、構造として不安定な状態になることを表している。図-3.5.1 (d)に示すように、部材破断 時に T 荷重が載荷している場合を想定すると、部材の応答の傾向は死荷重載荷時と同様で あるが、プロットは上方にシフトする。例えば、D72d (図中の D3u)が破断した場合でも、 弾性挙動が保証されない範囲にいたることとなり、仮に本橋において当該部材が部材破断 に至るような腐食状況が生じている場合には危険な状態になり得ることを示すものである。

ただし、この結果はあくまでも弾性解析によるものであること、現場での対応時に破断 部材以外の部材・部位の腐食劣化状態と残存耐荷力が適切に確認出来ているか不確実な面 があることから、本橋(ゲルバー径間部)のように、静定トラスとして設計している場合、 いずれの主構部材の破断も致命的な状態に至る可能性があると考えて対応することが必要 と言えよう。なお、健全時に許容値を超過し、その度合いにもばらつきが生じているが、 これは耐荷力評価に、建設当時の設計活荷重 TL-20 に対して B 活荷重を適用していること、 当時の設計では床版、床組および横構等を考慮しない 2 次元モデルで設計されているが、 本検討では全ての部材を考慮した 3 次元モデルにより検討を行ったことにより、部材毎に 断面力の負担が異なるためである。

以上、設計基準に準じた耐荷力評価(横軸)に、破断時の耐荷力評価(縦軸)を加える ことで、各主構部材の破断時の影響が相対的にわかりやすく表現され、構造的な余裕を把 握する上で参考になると考えられる。なお、トラス橋の斜材破断事例³⁻³⁾において崩壊に至 らなかった要因の一つとして、構造諸元は異なるものの破断部材が比較的断面力分担の小 さい支間中央付近の斜材であったことが挙げられ、上記結果と対応するものと考えられる。



(d) 主構部材破断時の応力状態の評価結果(部材破断時: 死荷重+T荷重)

図-3.5.1 各主構部材の状態の評価例

3.6 まとめ

腐食劣化の著しい鋼トラス橋を対象として、交通供用下及び荷重車を用いた現地載荷試 験及び FEM 解析を行い、全体挙動び局所挙動を把握するとともに解析モデルの妥当性を検 証した。その上で、対象とする部材の耐荷力喪失前及び耐荷力喪失後について、各種の不 確実要素が橋全体系の耐荷性能評価に与える影響について把握した。さらに、鋼トラス橋 の斜材破断を例に、耐荷力喪失前および耐荷力喪失後を想定した耐荷力評価手法について 検討した。得られた主な結果を以下にまとめる。

- 主構部材の主たる作用力である軸方向力による挙動に関して、軸力成分の実測値は、解 析値と概ね一致すること、主構部材が破断していない状況では、腐食欠損の状況や床版 と縦桁の結合条件が、各主構部材の断面力分担に及ぼす影響は小さいことがわかった。
- 2) トラス格点部斜材取付け部では、活荷重載荷時に主構部材に面内・面外曲げによる二次 応力が発生しており、かつ同部位は構造上腐食欠損が著しい部位と一致しており、耐荷 力上、構造的弱点となる可能性がある。これらの部位の残存耐荷性能の評価にあたって は、二次応力や腐食損傷の影響を適切に評価することが重要と考えられる。
- 3) 鋼トラス橋の斜材破断事例を踏まえ、弾性解析を用いた現行設計基準に基づく耐荷性能 評価と、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に基づく耐荷性 能評価を組み合わせることにより、各部材の破壊時の相対的な影響度をわかりやすく評 価する一方法を示した。なお、あくまでも弾性解析に基づく結果であり、弾塑性解析と の結果の相違の有無、適用の範囲・条件については今後の課題である。

参考文献

- 3-1) 桝田智子、平城弘一、渡辺滉、高田嘉秀、宮地真一、牛島祥貴:スラブアンカーの静 的ずれ耐荷力特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.47A、pp.1373-1380、2001.3.
- 3-2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 Ⅱ鋼橋編、2002.3.
- 3-3) http://www.cbr.mlit.go.jp/mie/oshirase/kisya/h190620/h190620.pdf: 国土交通省中部地方整備 局三重河川国道事務所記者発表資料、2007.6.20.

4. 鋼トラス橋の主構部材の腐食状況に関する調査・分析

4.1 検討概要

本章では、2章に示す著しい腐食損傷により撤去された鋼トラス橋におけるリベット接合 の上弦材側格点部を対象とし、上弦材、斜材およびガセットプレートの塗膜を除去した表 面および狭隘部の内面、ならびに接合境界部の周辺についてレーザ変位計によって詳細な 計測を行った。この計測結果からトラス橋格点部およびその周辺部の腐食実態を定量的に 明らかにした。

4.2 上弦材側格点部の腐食計測とその形状評価

4.2.1 対象格点部

腐食量計測は、第2径間の下流側上弦材格点部を対象に行った。写真-4.2.1 に塗膜除去後の対象格点部を示す。目視により、ガセットの表面はリベット孔まわりに腐食がみられるもののリベット孔付近以外の腐食量は比較的小さいこと、ガセット表面に比べて内面のほうが、腐食量が大きい傾向が確認された。なお、弦材の箱断面内部には腐食は見られなかった。



(a) 全体

写真-4.2.1 塗膜除去後の対象格点部

4.2.2 計測方法

(1) 外面の計測方法

格点部試験体(P25d)の腐食形状を計測するにあたり、格点部試験体は枕材(I桁)上に できるだけ鉛直度を確保するように設置した。格点部外面の腐食形状の計測は、写真-4.2.2 に示す腐食形状計測装置によって行った。腐食形状計測装置は、レーザ変位計を組み込ん だ①表面粗さ計測装置、②掴み具装置、③A-D変換器と④計測制御装置とから構成される。 図中の掴み具装置には鋼板試験体を固定している。レーザ変位計は、計測対象物に応じて 基準距離や分解能を選択し、取替えられるようになっている。

計測装置の計測範囲は、x、y方向に1m×1m、奥行き方向ストローク±35mm、リニアス ケール読み10µm である。この計測装置は、1mm 隔での計測の場合、200 data/min の計測速 度で自動計測が可能である。レーザ変位計は、基準距離100mm、測定範囲45mm、分解能 30µm の仕様を有するオプテックス社製(CD3-100CN)を用いる。

格点部試験体の凹凸表面の計測間隔は、力学的性能を把握できる程度の密度として 1mm 間隔を選定した。基準面は、部材表面に腐食が発生していない健全な箇所を目視や指で触 って確認して設定している。表面腐食深さは、図-4.2.1 のようにレーザ変位計で計測した部 材表面に設定した基準面 (H) から腐食表面深さ (h) までの距離 (H-h) により算出される。 したがって、図中の腐食により減肉した部分は負の値、リベットの頭は正の値になる。腐 食していない健全部は、基準面上にある。さらに、残存板厚(t)は、健全時板厚(t₀)に対して 外面の表面腐食深さ(H-h)_{out} と内面の表面腐食深さ(H-h)_{in} を差し引いて、つまり t =t₀+ (H-h)_{out}+(H-h)_{in}により算出される。なお、上弦材の箱断面内面は、粒子状のさびはあるもの の減肉は発生していないため、(H-h)_{in}=0 と仮定した。 同様に、ガセットプレートおよび斜 材フランジのリベット接合部にはすきま腐食がないものと仮定した。

今回計測に用いた表面粗さ計測装置は、計測範囲が最大 1m×1m と限られているため、 P25d の表面を一度に計測することができない。そのため、計測範囲を区切り、盛替えを行 いながら複数回に分けて計測を実施する。写真-4.2.3 は、下流側領域の表面腐食計測状況の 様子である。







写真-4.2.2 腐食形状計測装置 図-4.2.1 板厚の算出方法 写真-4.2.3 格点部計測状況

(2) 狭隘部内面の計測方法

格点部内面の腐食状況を写真-4.2.4 に示す。この狭隘部は、表面粗さ計測装置により直接 計測できないため、石膏で型取りし、その石膏供試体表面を表面粗さ計測装置で計測する 方法を採用した。型取りは、写真-4.2.4 のガセットプレート内面(2面)と上弦材下フラン ジ(1面)、斜材ガセットプレート取付部内面(8面)に対して分割して実施し、石膏供試 体を全体で18体作成した。

石膏には、高強度石膏(ゾーストーンK)を採用し、①石膏の計量、②水と石膏の配合(標準 混水率 40%)、③石膏の攪拌(3分)、④型枠設置、⑤石膏の流込み、⑥養生硬化(約1時間)、 ⑦脱型の手順で石膏供試体を作成した。

④の型枠打設は、ガセットプレートおよび斜材フランジにおける上流側、下流側各々4 分割した8石膏供試体(R1~R4、L1~L4)の場合、図-4.2.2のように試験体を水平レベル を調整した枕材(I桁)上に設置し、ガセットプレートと19mmの隙間を設けて打設高さ基 準板を設置した。この基準板によって成形される石膏が水平となるため、後で実施される 板厚計測における基準面とした。また、材料硬化後に脱型できなくなることを避けるため、 型取りを実施する周囲10mmを採取不可能な範囲と設定し、隙間テープで周囲を取り囲ん だ。なお、打設直前には部材表面にグリスを塗布し、脱型がスムーズにできるようにする とともに、型取りに影響しないように厚みを極力薄く塗布した。さらに、脱型の際に材料 が破損しないように、ワイヤーメッシュ(D6×150mm ピッチ)を内部に設置した。



写真-4.2.4 狭隘部内面の腐食状況


- 変位計

掴み具装置



(a) 採取面が水平になるように 吊上げた格点部 (b)採取面の型枠と鉄筋配置

(c)上弦材下フランジの石膏供試体

写真-4.2.5 狭隘部斜材腹板の打設状況(RI1の例)

表面粗さ計測装置





写真-4.2.6 石膏供試体の計測風景

一方、箱断面が I 断面に絞り込まれる斜材腹板の型取り(R01~RI2、L01~LI2)は、写 真-4.2.4 のように採取面が水平になるように部材を吊り上げ、その後の脱型までの作業手順 は前述の外面計測の場合と同様に行った。また、上弦材下フランジは、写真-4.2.5 のように 板幅中央から左右に分離した石膏供試体を作成した。

計測は、写真-4.2.6 の掴み具装置に脱型した石膏供試体を固定して、表面粗さ計測装置を 用いて計測する。掴み具装置の性能は、掴める最大試験体寸法は 780×1000mm、水平軸回 転範囲、および垂直軸回転範囲は 360 度、微動回転範囲 2 軸ともに±5 度の微調整が可能で ある。なお、下フランジ供試体は掴み具装置に固定できないため、水平な机の上に万力で 縦置きに固定して計測した。

石膏供験体の表面形状を計測する際の基準面の設定は、次の方法を採用した。予め供試体に設定されている基準板の平面において任意の3点を計測して行った。図-4.2.2のように予め平面設定時の基準板からガセットプレートまでの距離19mmおよび12mmのガセットプレート厚を考慮したガセットプレート表面までの距離(19+12=31mm)を用いて、表面腐食深さ(H-h-31)を算出する。斜材腹板の石膏供試体の計測における基準面は、供試体表面の減肉していない範囲の3点を用いて設定した。なお、石膏供試体の表面形状は、実際の格点部形状とは凹凸が逆方向になることから、計測値全体に負符号を乗じて実際の形状に戻している。

4.2.3 外面の腐食

(1)上弦材

箱断面を有する上弦材のフランジおよび腹板は、板継ぎ溶接位置で板厚が各々10mmから 18mm、10mmから12mmに変化している。図-4.2.3の残存板厚分布から明らかなように各々 の板継ぎ境界部が明確に現れている。表-4.2.1は、箱断面の平均残存板厚および標準偏差値 をまとめたものである。上フランジおよび腹板の腐食による平均減肉量は、0.1 mm~0.5mm と極めて少ない。箱断面内部は、粒子状のさびはあるものの減肉は発生していない。なお、 下フランジについては、4.2.4 項の内面の腐食において述べる。



表-4.2.1 上弦材残存板厚

	健全時板厚 t _o (mm)	平均残存板厚 t _a (mm)	標準偏差 v(mm)
上フランジ(右)	10.00	9.76	0.49
〃 (左)	18.00	17.94	0.34
下流側腹板(右)	12.00	11.48	0.51
〃 (左)	10.00	9.90	0.54
上流側腹板(右)	10.00	9.89	0.52
" (左)	12.00	11.84	0.67
下フランジ(右)	10.00	9.76	1.28
〃 (左)	18.00	15.89	2.27

図-4.2.3 上弦材(上フランジ、腹板)の 残存板厚分布

(2) ガセットプレート

ガセットプレート表面の腐食は、図-4.2.4 から明らかなようにリベット群の領域以外はほ とんど見られない。リベット群全体の平均表面腐食深さは、下流側で 1mm、上流側で 2mm 程度である。いま、すき間腐食が発生していないと仮定できれば、ガセットプレートの健 全板厚 12mmに対して、上流側リベット群のガセットプレート全体の平均残存板厚は 10mm、 下流側のその平均残存板厚は 11mm になる。なお、下流側の圧縮斜材側のガセットプレー トの先端部 (図中の緑色の領域) は、少し手前に反っている。斜材との境界部にそりを目 視確認しているが、このそり量については、計測時設定した基準面の傾斜および試験体の 設置時の鉛直度の影響も含まれている可能性がある。



図-4.2.4 ガセットプレートおよび斜材フランジ外面の表面腐食深さ分布(mm)

(3) リベットおよびその周辺の表面腐食深さ

上流側ガセットプレートの引張斜材側のリベット群におけるある特定のリベットに着目 し、その近傍を含めた腐食状況を示したのが図-4.2.5 である。リベット頭部は、とんがり帽 子状に大きく欠損している。さらに、リベット中心から 20~30mm 位置近傍のガセットプ レートにドーナツ状の腐食が発生しており、最大表面腐食深さは 4.9mm、平均表面腐食深 さでも約 2mm になる。他のリベットについても同様な腐食傾向を示している。



図-4.2.5 リベットおよびその周辺の腐食分布(上流側)(mm)

(4) 斜材フランジとガセットプレート境界部および斜材フランジ

ガセットプレートと斜材フランジの境界部の腐食状況を明らかにするため、ガセットプ レート先端から 10mm 位置の斜材フランジの腐食分布に着目した。上流側、下流側の圧縮 および引張斜材フランジについて、ガセットプレート先端形状に沿って、原点(S=0)から斜 材フランジ他端までの範囲の表面腐食深さ分布をまとめたのが図-4.2.6 である。上流側、下 流側ともに、原点から 160mm の範囲で腐食減肉が顕著に発生しており、下流側③ではその 範囲の平均表面腐食深さが 4mm ほど発生している。一方 250mm 付近では+1mm~+1.5mm、 下流側⑤の場合原点から 110mm の範囲において+1mm ほど反っている。また、上流側③、 ⑤では、フランジ中央(S=190mm)から縁端部(S=0)に向かって線形的に腐食が増加してお り、原点付近の最大表面腐食深さは 7mm に達している。

さらに、斜材フランジ表面の腐食の著しい範囲について、より詳細にまとめたのが表-4.2.3 である。上流側および下流側の引張斜材①の□で囲んだ領域において激しい腐食が生じて おり、その平均表面腐食深さは各々4.78、4.27mm となる。その他の範囲においても平均表 面腐食深さは1.91~3.71mm となり、特に引張斜材の板厚減少が大きい。図-4.2.6の表面腐



図-4.2.6 斜材フランジとガセットプレート境界部の表面腐食深さ分布(mm)

	下流側 引張部材	上流側① 圧縮部材	上流側② 圧縮部材	上流側① 引張部材	上流側② 引張部材	۰ 🔪	
健全時板厚	10	1	2	1	0		
範囲 (a×b)	138×210	34×26	90×114	102×158	98×171	0	Frankelik)
平均表面腐食深さ	4.27	3.71	3.43	4.78	1.91		
最大表面腐食深さ	7.99	7.96	7.99	7.89	7.58		
						上法側任務	い ト液側側電

表-4.2.2 斜材フランジの腐食の激しい領域の表面腐食深さと残存板厚(mm)

食深さ分布図からもわかるように斜材フランジの左縁領域の腐食が大きい。なお、下流側 圧縮斜材のフランジには腐食が発生していない。

4.2.4 内面の腐食

(1)上弦材下フランジ

狭隘部の上弦材下フランジは、板幅中央から左右に分離した2供試体について、各々3回の盛替えにより腐食形状を計測した。図-4.2.7 は、表面腐食深さ分布および残存板厚分布を示す。なお、図(a)(b)の波線の矩形の空白は、盛替え時の基準面を正確に設定できなかったため描いていない。また、左のスケールは図(a)の腐食深さを、右のスケールは図(b)の残存板厚を意味する。図(b)から明らかなように、左側(黄色)の18 mm、右側(赤茶色)の10 mm板厚の板継ぎ境界部が鮮明に表れている。腐食の激しい領域の表面腐食深さおよび残存板



図-4.2.7 上弦材下フランジの表面腐食

厚をまとめたのが表-4.2.3 である。表中に おいて、例えば①-1 は表中のコンター図 の①-1 の領域を表し、その領域の横縦寸 表-4.2.3 上弦材下フランジの腐食の激しい領域

	-					1
	0-1	0-2	① -3	2-1	2-2	
健全時板厚	10		1	8		
範囲 (a×b)	343×164	352×200	545×200	372×163	437×31	
平均表面腐食深さ	0.49	3.02	2.8	1.63	2.25	
最大表面腐食深さ	6.84	8.93	9.85	6.83	8.21	
平均残存板厚	9.51	14.98	15.20	16.37	15.75	
最小板厚	316	907	815	11 17	9 79	1



ガセットプレートで囲まれた上弦材下フランジ領域

法値を(a×b)に示している。左側領域の平均残存板厚は15.45 mmになり、板厚欠損率は14.2% である。なお、表-4.2.1 から明らかなように□領域以外を含めた下フランジ左側全体の平均 残存板厚は 15.89mm となり、健全板厚に比べて減肉量が大きいのに対して、右側領域①-1 の平均残存板厚は 9.51mm と減肉量が少ない。

(2) ガセットプレート

ガセットプレートおよび斜材フランジは、上流側、下流側各々4 分割した石膏供試体を、 計8体計測した。図-4.2.8 は、ガセットプレート表面を基準にして内面の平均腐食深さ分布 を示したものである。ガセットプレートは、表面全体にわたり不均一腐食が発生している。 また、その縁端部および斜材との先端部に激しい腐食が発生している。

リベット群を除くガセットプレート表面の腐食がないものとすると、表-4.2.4 に示すよう に下流側(L)の縁端部において、引張斜材側の L2①および L3②の平均残存板厚は、各々



図-4.2.8 ガセットプレートおよび斜材フランジ内面の表面腐食深さ分布(mm)

5.32mm、4.21mmと厳しい減厚であり、その他の縁端部の平均残存板厚も8.42~10.57mmとなり、リベット群の領域を除くガセットプレート内面の□領域全体の平均残存板厚は面積 比を考慮して算出すると約7.94mm、板厚欠損率は33.8%になる。 同様に、表-4.2.5の上流側(R)のガセットプレートにおいて、圧縮斜材との接合領域の縁端 部(R1①、R2①、R2②、R3①)は腐食が激しく、平均腐食深さが 3.56~5.76 mm にもなり、 それらの平均残存板厚は 6.24~8.44mm に達する。また、ガセットプレートの斜材フランジ 先端部との境界域(R2①、R3②、R4②)には板厚欠損が見られる。これらの着目したガセ ットプレート全体の平均残存板厚は 7.97mm となり、板厚欠損率は 33.6%に達する。

LI L12 L2① L22 L3① L32 L41 L42 L43 健全時板厚 12 範囲(a×b) 271×351 108×88 231×200 232×60 171×80 315×60 161×284 95×132 105×62 平均腐食深さ 2.49 2.9 3.55 7.79 3.31 2.57 1.43 6.68 3.58 最大腐食深さ 9.91 8.24 9.02 6.81 7.22 9.65 8.86 6.93 5.82 平均残存板厚 9.51 9.1 5.32 8.45 8.42 4.21 8.69 9.43 10.57 最小板厚 2.01 3.76 2.98 5.19 4.78 5.07 2.35 3.14 6.18

表-4.2.4 下流側ガセットプレート内面の激しい腐食領域の腐食深さと残存板厚(mm)

表-4.2.5 上流側ガセットプレート内面の激しい腐食領域の腐食深さと残存板厚(mm)

	R1 ①	R12	R 2①	R22	R3①	R3②	R41)	R42
健全時板厚				1	2			
範囲(a×b)	218×338	147×72	230×202	175×52	239×52	239×305	114×302	108×78
平均腐食深さ	4.80	1.12	5.76	3.56	4.91	2.25	2.04	1.59
最大腐食深さ	9.33	5.84	8.81	5.31	8.75	9.57	6.78	4.77
平均残存板厚	7.41	10.88	6.24	8.44	7.09	9.75	9.96	10.41
最小板厚	2.67	6.16	3.19	6.69	3.25	3.76	5.22	7.23



⁽a)上流側ガセットプレート領域(内面)

(b) 下流側ガセットプレート領域(内面)

L1

(3) 斜材フランジ

(2)のガセットプレート表面を基準にして内面の腐食深さ分布を表した図-4.2.8 に対して、 斜材表面を基準にして内面の腐食深さ分布を表したのが図-4.2.9 である。ガセットプレート とリベット接合された斜材フランジの表面は、リベット周りを中心に全体的に激しい腐食 が発生している。表-4.2.6 は、下流側斜材フランジ内面の平均腐食深さと平均残存板厚をま とめたものである。ここに、フランジの平均残存板厚は、腹板が絞り込まれた L2②、L3②、 L4②の領域を除いて裏側のガセットプレートとの接触面は腐食欠損(すき間腐食)がない ものとして算出している。ガセットプレートと接合された圧縮斜材フランジ領域の平均残 存板厚は、L1 の狭隘部の外側フランジの腐食は少ないが、内面の L2①の平均残存板厚は 6.31mm となり、健全時板厚 12mm に比して腐食減厚が激しい。また、腹板が絞り込まれる



図-4.2.9 ガセットプレートおよび斜材フランジ内面の表面腐食深さ分布(mm)

表-4.2.6	下流側斜材フ	ランジア	内面の激しい	い腐食領域の	腐食深さ	と残存板厚(mm)
---------	--------	------	--------	--------	------	-----------

	L1①	L12	L13	L2①	L2②	L3①	L32	L4①	L42
健全時板厚			12					10	10
	110	200, 121	43×52	102.70	.70 24252	040 50 047 004	227.50	466 202	250×219
範囲(a×b)	118×66 208×131 (90×114) 102×78 243×52 247×2	247×221	227×50	400×383	(98×171)				
平均腐食深さ	3.5	0.98	3.13	5.69	2.63	2.07	1.42	2.74	1.85
最大腐食深さ	10.99	7.03	10.98	10.99	11.94	7.14	7.63	8.91	7.69
平均残存板厚	8.5	11.02	(5.43)	6.31	9.37	7.93	8.58	7.26	(6 24)
最小板厚	1.01	4.97	1.02	1.01	0.06	2.86	2.37	1.09	2.31

()は、表-4.3.3の表面の平均腐食深さを考慮して板厚算定)



	R1①	R12	R2①	R22	R23	
健全時板厚			12			
範囲(a×b)	444×421	341×197	363×431	142×71	385×10	
平均腐食深さ	2.43	4.19	4.77	1.96	6.14	
最大腐食深さ	8、98	10.99	11.95	11.37	11.96	
平均残存板厚	9.57	7.81	7.23	10.04	5.86	
最小板厚	3.02	1.01	0.05	0.63	0.04	
	R3①	R3②	R3③	R4①	R4②	R43
健全時板厚				10		
a×b	435×272	511×15	139×194	445×420	176×162	224×271
平均腐食深さ	2.13	3.13	1.94	3.10	5.03	5.64
最大腐食深さ	8.99	8.48	8.99	9.85	9.85	9.73
平均残存板厚	7.87	6.87	8.06	6.9	4.97	4.36
最小板厚	1.01	1.52	1.01	0.15	0.15	0.27



(a)上流側ガセットプレート領域(内面)



⁽b) 下流側ガセットプレート領域(内面)

遷移領域フランジの縁端部 L4②領域の平均残存板厚は、その領域の裏側の平均腐食深さで ある表-4.2.3 の②領域の 4.27mm を考慮するとき 3.88 (=10-4.27-1.85) mm となり、著しい板 厚減少が見られる。それ以外の縁端領域 L2②、L3②の平均残存板厚は各々9.37、8.58mm に なる。

一方、表-4.2.7 は、上流側斜材フランジ内面の平均腐食深さと平均残存板厚をまとめたものである。平均腐食深さは、1.96~6.14mm と激しく、R3②の領域を除いた平均残存板厚は4.36~10.04mm となり、引張斜材のR4 は健全時板厚 12mm に対して 50%減厚している。引 張フランジ(R3①およびR4)および圧縮フランジ(R1 およびR2)全体の平均残存板厚は6.36、8.24mm となり、板厚欠損率は、各々36.4%、31.3%になる。また、腹板が絞りこまれたR3②の平均残存板厚は6.87mm と著しい減厚となっている。さらに、上流側および下流側のリベット周りの腐食状況は、ガセットプレート表面のリベット群と同じように頭部およびその周辺にドーナツ状の激しい腐食が発生している。

(4) 斜材腹板

I 断面に絞り込まれる斜材腹板の表面腐食深さ分布を示したのが図-4.2.10 である。図中の RO1、 RI1、 LO1、 LI1 は絞り込まれる遷移領域の腹板であり、RO2、 RI2、 LO2、 LI2 は絞り込まれた I 断面の腹板である。図から明らかなように、狭隘部内面 (RI2、 RI1、 LI2、 LI1)の腐食が激しい。いま、斜材腹板の激しい腐食領域の平均腐食深さと平均残存板厚分 布をまとめたのが表-4.2.8 である。圧縮斜材の LI2①領域の平均残存板厚は 9.60mm、引張斜 材の RI2②領域で 8.56mm であり、板厚欠損率は各々31%、22%に達しており、絞り込まれ た境界部の腐食が激しい。

一方、外側の腹板 (RO1、RO2、LO1、LO2)の腐食は、内面の腐食に比して少ないが、 絞り込まれた境界部の平均残存板厚は、RO1、RO2②で各々9.25、8.40mm、LO1①で11.05mm と他の領域に比して大きな減厚が発生している。さらに、I 断面腹板の先端部 (RO2①、RI2 ①、LO2、LI2②)の平均残存板厚の板厚欠損率は、14.8%~23.6%の減肉量が発生している。



図-4.2.10 斜材腹板の表面腐食深さ分布(mm)

4.2.5 考察

前節までに格点部の腐食計測方法およびその腐食形態について詳細に述べてきた。いま、 図-4.2.8の格点部外面および図-4.2.9の狭隘部内面の表面腐食深さ分布に対して、その外面・ 内面においてガセットプレート表面を基準面とした表面腐食深さ分布と斜材フランジ表面 を基準面とした表面腐食深さ分布を統合してまとめたのが、図-4.2.11である。この図から、 格点部の腐食劣化しやすい個所は、次のようにまとめることができる。

- 格点部外面では、ガセットプレートのリベット群とその周辺、斜材フランジ縁端部および斜材フランジとガセットプレートとの境界部
- ② 狭隘部内面は、斜材フランジのリベット群とその周辺、ガセットプレート縁端部、斜 材フランジ先端部のガセットプレート領域および箱断面斜材から I 断面に絞り込まれ る遷移領域の上下フランジ縁端部

次に、リベット群領域を除いたガセットプレート外面の腐食は、ほとんど発生していな い。一方、リベット群領域は平均 2mm の板厚減であった。また、ガセットプレート内面の 斜材との接合部にはすきま腐食は生じていないと仮定できるならば、ガセットプレートの 残存板厚分布は図-4.2.12 のようになる。さらに、上流側および下流側のガセットプレート において全体平均残存板厚分布、および腐食状況の異なる 4 領域に分割した場合の各領域 の平均残存板厚分布を描いたのが図-4.2.13、図-4.2.14 である。両図(a)に示すようにガセッ トプレート(斜材接合部を除く)の全体平均残存板厚は、道路側(上流側)において 9.01mm、

	RI1	RI2①	RI22	R01	R02①	R02②	
健全時板厚				11			
範囲(a×b)	134×182	178×101	304×75	300×146	301×109	300×48	
平均腐食深さ	2.62	1.78	2.44	1.75	1.63	2.60	
最大腐食深さ	10.76	6.74	10.33	8.97	6.67	6.85	
平均残存板厚	8.38	9.22	8.56	9.25	9.37	8.40	
最小板厚	0.24	4.26	0.67	2.03	4.33	4.15	
	LI1①	LI12	LI2①	LI2②	L01①	L012	L02
健全時板厚				14			
範囲(a×b)	55×114	300×30	177×298	159×81	299×20	76×36	300×78
平均腐食深さ	2.99	2.29	4.40	2.63	2.95	1.83	2.52
最大腐食深さ	7.13	5.36	9.66	6.55	6.70	5.00	9.42
平均残存板厚	11.01	11.71	9.60	11.37	11.05	12.17	11.48
最小板厚	6.87	8.64	4.34	7.45	7.30	9.00	4.58

表-4.2.9 斜材腹板の激しい腐食領域の腐食深さと残存板厚(mm)



海側(下流側)において 9.40mm となり、健全時板厚 12mm に対して各々25%、22%の低減 であった。また、4 領域に分割した場合、図-4.2.13(b)の上流側ではサイド部領域で 7.3 mm、 斜材先端部領域において 8.1 mmの板厚となり、健全時板厚 12 mmに対して各々39%、33%の減 肉量であった。また、図-4.2.14(b)の下流側では、斜材先端部領域において 8.9 mmとであり、 健全時に対して 26%の減肉量であった。



図-4.2.12 ガセットプレートの残存板厚分布



4.3 腐食状況の計測手法に関する検討

本試験体の場合、ケレン、ブラスト処理して素地調整した後に、室内計測においてレー ザ計測装置による 1mm ピッチでの詳細な自動計測を可能している。しかし、既設橋梁にお いては、レーザ変位計による非接触型計測法の適用は困難であり、より簡易的に直接板厚 を計測できる機械的計測手法や超音波板厚計などの接触型計測法が有効となる。その際、

どのくらいの計測点数に対して、どのような 計測方法で実施するかが問題になる。計測点 数を増やすことにより、より高精度の腐食形 状および板厚分布を得ることができるが、そ の増大にともない塗装のケレンなど手間と時 間がかかるため、適切な計測点数の設定が重 要になる。

いま、図-4.3.1 のようにガセットプレート外 面(上流側)を対象にして、1mm ピッチのデ ータを間引くことで腐食形状の再現性にどう 影響するかを確認する。対象箇所①は、欠損



対象箇所

の最も激しいリベットとリベット周辺、対象個所②は、腐食の激しいより広い領域である。

①について、リベット周辺 100×100mm の範囲において 1mm、2mm、5mm、10mm に間 引いたデータについて検討を行う。図-4.3.2 はリベット及びリベット周辺の間引いた場合の 腐食深さ分布を描いたものである。また、各ピッチにおける平均腐食深さおよび標準偏差 を表-4.3.1 に示す。

なお、表中の()の値は、リベットありの平均腐食深さの値である.図-4.4.2 からもわ かるように 10mm ピッチでも腐食の状態が完全にわからないというほどでもなく、腐食形 状は確認できる。リベット周辺のドーナツ状の腐食は 5mm ピッチまでなら、コンター図か ら確認できる。10mm ピッチではドーナツ状ではないが、リベットの周辺に腐食欠損が生じ ているということは確認できる。

同様に、図-4.3.1の腐食が激しい広い領域を対象にした個所②についてピッチ毎の平均腐 食深さ(かっこ内の数値はリベットも含めた平均)と標準偏差を示したのが表-4.3.2である。 図-4.3.3 は其の領域の腐食深さ分布を描いたものである。20mm ピッチまで粗くしたが詳細 な 1mm ピッチと比較しても腐食の激しい箇所の色の濃淡やリベットの位置を判断するでき ることがわかる。したがって、形状も確認できるレベルの計測ピッチとして少なくとも 20 mmを適用できる。

計測ピッチ (mm)	平均腐食深さ (mm)	標準偏差
1	2.01(1.94)	0.96
2	2.01(1.94)	0.95
5	2.01(1.94)	0.92
10	2.01(1.94)	0.85

表-4	3	1 領	城①	OI	区均	腐食	深	3
2		1 122						-

表-4.3.2	領域2の	平均	腐食深	さ
長-4.3.2	領域(2)の	平均	腐食深	đ

計測ピッチ	平均腐食深さ	標準偏差
(mm)	(mm)	
1	1.92(1.03)	3.11
2	1.92(1.03)	3.10
5	1.92(1.03)	3.00
10	1.92(1.03)	2.77
20	1.92(1.03)	2.14



図-4.3.2 対象個所①のピッチを間引いた場合の腐食深さ分布



4.4 まとめ

鋼トラス橋の上弦材位置の格点部(P25d)の試験体について、詳細な腐食計測を実施した。得られた主な結果を以下にまとめる。

- 1) 箱断面を有する上弦材の上フランジ表面の腐食はほとんど発生していない。腹板表面は 0.1~0.5mm 程度の一部局部腐食が存在する程度である。これは、厳しい腐食環境下にあっ て、雨水などにより塩分が常時水洗いされていたためと考えられる。
- 2) ガセットプレートの上流側および下流側表面の腐食は、斜材とのリベット接合領域以外 はほとんど発生していない。リベット群全体の平均表面腐食深さは下流側 1mm、上流側 2mm である。特に、上流側の多くのリベット頭部はとんがり帽子のような腐食損傷が生 じており、さらにリベット中心から約 20~30mm 位置がドーナツ状に減肉している。そ の最大腐食深さは 4.9 mm に達する箇所もある。なお、リベット周りにドーナツ状の腐食 は、今回に限らず多くのリベット部に見られる現象であり、そのメカニズムは不明であ るが、リベット部の塗膜損傷に伴う滞水および塩分付着状態が影響していることが考え られる。
- 3) ガセットプレート先端部との境界部の斜材フランジは、上下流側ともに、一方の斜材フランジ縁端部からフランジ幅中央付近までの領域に、ガセットプレート先端部に沿って腐食損傷が生じており、平均表面腐食深さは4mm程度である。また、引張斜材および圧縮斜材のフランジ縁端部にも腐食損傷が発生しており、上流側の引張斜材フランジ縁端領域における平均残存板厚は6.87mm程度になり、板厚欠損率は31%に達する。このような腐食形状分布の偏りは、風向きの影響が考えられる。
- 4) 次に、狭隘部内面は、全体的に激しい不均一腐食が発生している。これは、表面と異なり、雨水による水洗いされず塩分が付着し易く、湿気も残るためと考えられる。
- 5) 上弦材下フランジは、狭隘部中央付近に平均腐食深さ 1.63 mm~3.02mm の皿状の局部腐 食が多く発生している。これらの領域の平均残存板厚は 7.45mm になり、板厚欠損率は 25.5%に達している。
- 6) ガセットプレート内面の腐食は、上下流側共にその縁端部および斜材先端部に激しい腐 食が発生している。下流側の縁端部の平均腐食深さの最大値は7.79mmであり、リベット 群の領域を除くガセットプレート内面の□領域全体の平均残存板厚は面積比を考慮して 算出すると約7.94mmとなり、板厚欠損率は33.8%に達している。上流側の縁端部の平均 腐食深さの最大値は、5.76mmに達しており、ガセットプレート全体の平均残存板厚は 7.97mm、板厚欠損率は33.6%に達する。
- 7) 斜材上下フランジの内面腐食は、全体的に激しい不均一腐食が生じている。リベット頭部、およびその周辺を中心にフランジ全領域にわたって腐食が激しい。また、箱断面斜材が I 断面に絞り込まれる遷移領域のフランジ縁端部にも腐食が発生している。また、斜材腹板は、狭隘部内面および I 断面に絞り込まれた境界部に腐食損傷が見られ、引張斜材腹板では 34%の板厚欠損率に達した領域もある。

参考文献

4-1)野上邦栄、山本憲、山沢哲也、依田照彦、笠野英行、村越潤、遠山直樹、澤田守、有村健太郎、郭路:鋼トラス橋の上弦材側格点部の腐食計測とその腐食形態の特徴、構造工学論文集、Vol.58A、2012.3.

5. 模擬腐食を導入したトラス斜材の載荷試験

5.1 検討概要

本章では、約50年経過し、地震による被害のため撤去された鋼トラス橋の箱断面を有す る斜材を対象にして、圧縮部材の載荷試験、および残存耐荷力特性に関する解析的検討を 行い、腐食劣化した圧縮部材の耐荷力評価法に関する基礎的検討を行った。具体的には、 対象部材は腐食がほとんど発生していないため、模擬的に腐食を導入した圧縮部材の載荷 試験、およびその残存耐荷力特性に関する解析的検討を行い、腐食劣化した圧縮部材の耐 荷力評価式の検討を試みた。

5.2 試験体

残存耐荷力試験に用いる部材は、平成20年の岩手宮城内陸地震で被害を受けたため撤去 された写真-5.2.1 に示す鋼単純トラス橋の斜材を対象とする。この橋梁は、昭和31年の道 路橋示方書に基づき設計された橋長70.8m、有効幅員5.0mの上路トラス橋であり、昭和37 年に竣工した。写真-5.2.2 は、このトラス橋から切り出した斜材の圧縮試験体4体である。 さらに、材料引張試験、残留応力計測用に斜材1体を確保した。

試験体は、図-5.2.1 のような箱断面(300×318×15×13mm)を有する部材長 3000mm で ある。材質は SM41 であり、換算細長比 λ =0.295、幅厚比パラメータ R=0.36 の諸元を有する 部材である。なお、 λ および R の値の算出に用いる降伏応力度は、表-5.3.1 の材料試験値 σ_y =265N/mm²を用いている。図中の 318mm 幅側より時計回りに a 面、b 面、c 面、d 面と定 義する。対象部材は、腐食がほとんど発生していないため、図-5.2.2 のように模擬的に腐食



写真-5.2.1 対象とした鋼トラス橋



写真-5.2.2 対象斜材



図-5.2.1 対象圧縮部材の諸元(単位:mm)



図-5.2.2 腐食導入断面とその位置(単位:mm)



(腐食量 50%)



写真-5.2.3 減肉部状況

を導入する。模擬腐食の導入領域は、これまでの導入位置およびその範囲に関するパラメトリック解析結果 ⁵⁻¹⁾、コンクリートに埋め込まれた斜材部およびその近傍、格点部のガセットプレートと斜材などの接合部およびその近傍などに激しい局部腐食が発生している事例があること、さらに試験体数の制約を踏まえて、4 面全てについて左端から 500mm の位置を中心に幅 300mm の領域を機械加工により減肉した。この領域は、図-5.2.3 および写真-5.2.2 のように断面 4 隅の溶接ビード部(40mm)を除外した幅を切削した。減肉部コーナーの曲率半径は 12.5R である。 模擬腐食試験体は、次式で定義される最大板厚欠損率 *R*_tおよび最大断面欠損率 *R*_Aをパラメータにした表-5.2.1 のような 4 ケースである。なお、表中の CASE-1 は健全試験体であり、

$$R_t = \frac{t_0 - t_{min}}{t_0}$$

$$R_A = \frac{Ao - A_{min}}{Ao}$$

(5.2.2)

(5.2.1)

ここに、to:健全時の板厚、tmin:最小板厚、Ao:健全時の断面積、Amin:最小断面積

			in Dependence			
CASE No.	最小板厚 tmin[mm]		最小断面積	板厚欠損率	断面欠損率	
	a、c 面	b、d 面	$A_{min} [\mathrm{mm}^2]$	$R_t \ [\times 100\%]$	$R_A [\times 100\%]$	
CASE-1	13	15	16488	0	0	
CASE-2	11.7	13.5	15202	10	7.8	
CASE-3	9.1	10.5	12646	30	23.3	
CASE-4	6.5	7.5	10091	50	38.8	

表-5.2.1 模擬腐食試験体



写真-5.2.4 試験体全景 (a 面)

その板厚及び断面積の値は各々to、Aoを意味する。

試験体の端部は、平行度を精密に確保するように切削加工している。写真-5.2.4 は、4 試験体の a 面から見た全体系を示している。

5.3 引張試験と初期不整計測

5.3.1 引張試験

引張試験片は、箱断面のウェブ面およびフランジ面に対して1体づつ計2体(JISZ2241 の1A号引張試験片)採取し、JISZ2241にしたがって引張試験を実施した。図-5.3.1のよう に上面(UL)および側面(LU)の引張試験の結果について、それらの材料特性、応力~ひずみ 関係を各々表-5.3.1、図-5.3.2に示す。

5.3.2 残留応力計測

残留応力は、切断法(ひずみ開放法)を用いて計測した。図-5.3.3 のように上面および側面(左面)の2面に対して計43点数のひずみゲージを貼付した。まず、初期値を計測・記録し、その後、20mm間隔(一部14、15mm間隔)に切断し、切断後の小片のひずみを計測した。なお、切断時は、ひずみゲージに対し有害な熱を与えないよう放電加工切断とした。開放ひずみは、切断後の値から初期ひずみを差し引いた値を用いて残留応力を算出した。図-5.3.4 は、両面の残留応力分布をまとめたものである。上面の圧縮残留応力度は、側面(左面)の値に比べて大きく、平均圧縮残留応力度は $\sigma_{rr}=0.13\sigma_{y}$ になる。また、引張残留応力度は両面共に $\sigma_{rr}=1.0\sigma_{y}$ に達している。

試験片	上降伏点 (N/mm ²)	下降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
上面(UL)	267	257	420	28	52
側面(LU)	288	273	435	30	49
平均值	277	265	427	29	51

表-5.3.1 材料特性



図-5.3.3 ひずみゲージ貼付

図-5.3.4 残留応力分布

5.3.3 初期たわみ計測

試験体の長手方向の初期たわみ形状は、両端部に基準点(100mm)を設置後、道糸を張り、 直尺を用いて計測した。図-5.3.5 には、基準線から各面の中央位置までの形状計測位置を、 また表-5.3.2 には各試験体の初期たわみ計測値を示す。

模擬腐食を導入した試験体は、CASE-1のd面およびCASE-3のa、b面の②~⑤領域、さらにCASE-4のa面の⑤およびb面の②~④領域において1mmの凸型の初期たわみが発生している。

5.3.4 角溶接部のマクロ試験

対象試験体の角溶接部 4 箇所のマクロ試験を行い、断面の写真撮影を行った。採取した マクロ試験片は、研磨後にエッチングを施し、光学式顕微鏡を用いて倍率 5 倍で撮影を行 った。写真-5.3.1 にマクロ試験の結果を示す。部位によっては溶接金属部に 1mm 程度のブ ローホールが確認された。

1000					_
試験体 No	測定 ライン	たわみ測定(mm)			
		基準点 100mm からの距離			
2		a	b	с	d
	1	100	100	100	100
	2	100	100	100	99
	3	100	100	100	99
CASE-1	4	100	100	100	99
	5	100	100	100	99
	6	100	100	100	100
	1	100	100	100	100
	1	100	100	100	100
	2	100	100	100	100
	3	100	100	100	100
CASE-2	4	100	100	100	100
	5	100	100	100	100
	6	100	100	100	100
	7	100	100	100	100
1	1	100	100	100	100
	2	99	99	100	100
	3	99	99	100	100
CASE-3	4	99	99	100	100
	5	99	99	100	100
	6	100	100	100	100
	1	100	100	100	100
	1	100	100	100	100
	2	100	99	100	100
	3	100	99	100	100
CASE-4	4	100	99	100	100
	5	99	100	100	100
	6	100	100	100	100
	7	100	100	100	100

表-5.3.2 各試験体の初期たわみ



図-5.3.5 形状測定位置



写真-5.3.1 断面マクロ試験結果

5.4 試験方法と試験結果

5.4.1 試験方法

圧縮部材の試験は、10MN大型構造物試験機(JFEテクノリサーチ(株)所有)を用いて変位 制御方式、載荷速度 0.01mm/s の漸増載荷で行った。図-5.4.1 は、試験体設置状況である。





図-5.4.1 試験体の設置状況



図-5.4.3 変位計配置

⑤~⑨断面

Π

図-5.4.2 ひずみゲージ貼付位置

計測は、荷重、試験体に添付したひずみゲージ(単軸ゲージ44枚、3軸ゲージ44枚)、試験体変位(変位計38台)により実施した。それらの計測位置を図-5.4.2、図-5.4.3に示す。なお、試験体端面は、試験機の載荷冶具底板とメタルタッチさせている。

5.4.2 耐荷力試験結果

(1) CASE-1(健全試験体)

CASE-1 の荷重~鉛直変位曲線と支間中央部の荷重~面外変位曲線を図-5.4.4 に示す。なお、図中の横軸の鉛直変位 *u* は、載荷点の *x* 軸方向変位量(部材長手方向変位量)、*v、w* はそれぞれ、支間中央部 c 面の *y* 軸方向変位量(赤色)、支間中央部 b 面の *z* 軸方向変位量(青色)を表す。なお、面外方向変位は外側にはらみだす方向を正としている。

最大荷重は、 P_{max} =4484kN であり、このときの鉛直および面外変位は、各々u=35.9mm、 v=2.9mm、w=-9.6mm である。P=3500kN 付近から鉛直変位の増加に伴い、荷重〜鉛直変位 曲線の傾きが変化し、P=4200kN に達した後、鉛直変位が 14mm から 18mm の範囲で面外方 向変位vが、負の方向から正の方向に急変している。その後、わずかな荷重載荷により最 大荷重に達して崩壊した。図-5.4.5 は、除荷開始時の各面の幅中央位置の初期たわみ(赤色) と終局時たわみ(青色)の変位量を示す。また、写真-5.4.1 は各面から見た試験後の崩壊モ ードを示す。したがって、図-5.4.5 の a 面の終局時たわみ形状は、写真-5.4.1 の b 面から見 たときの a 面の変形モードを表している。1mm の初期たわみの方向に関わらず、弱軸(z 軸) まわりに大きく面外変位が発生しており、さらに部材中央部の板パネルでより大きなへこ みが出ている。また、写真-5.4.1 から明らかなように b、d 面から見た場合、柱全体系が S 字モードの全体座屈変形を示している。

(2) CASE-2(10%減肉試験体)

次に、10%減肉試験体の荷重~鉛直変位曲線と支間中央部の荷重~面外変位曲線を図 -5.4.6 に示す。CASE-1 と挙動は同様な傾向を示しており、最大荷重は、P_{max}=4306kN であ り、このときの鉛直および面外変位は、各々u=15.0mm、v=-0.6 mm、w=-2.9 mm である。 P=3500kN 付近から鉛直変位の増加に伴い、荷重~鉛直変位曲線の傾きが変化し、P=4000kN を超えたところで面外方向変位vが、負の方向から正の方向に急変している。P=4200kN か ら鉛直変位および面外変位が急激に増大し、最大荷重に達した後、鉛直変位が 14mm から 22mm の範囲で荷重はほぼ一定である。

図-5.4.7 に初期たわみと終局時たわみの変位量を示す。最大荷重に達する前に、減肉部に 局部座屈が発生し、最大荷重後に z 軸方向の全体座屈変形を連成した。この時、減肉部を含 めた下端から 1000mm の領域は 4 面ともに一波形の変形モードが発生し、減肉部の中央が 変曲点になっている。写真-5.4.2 は、試験後の部材全体系の崩壊モードおよび減肉部を拡大 した崩壊変位モードを示している。a 面、d 面は、初期たわみ方向と逆方向に全体変形した 連成座屈挙動を示している。

(3) CASE-3 (30%減肉試験体)

30%減肉試験体の荷重~鉛直変位曲線と支間中央部の荷重~面外変位曲線を図-5.4.8 に示 す。荷重~鉛直変位曲線から明らかなように、最大荷重に達する直前の P=3100kN まで、荷 重は線形的増大し、その間面外変位はほとんど発生していない。最大荷重は3245kN であり、 このときの鉛直変位 u=4.1mm、面外変位 v=0.1mm、w=0.3mm である。図-5.4.9 に初期たわ みと終局たわみ形状を示す。図より部材の全体座屈変形は発生しておらず、減肉部を含め た下端から 1000mm の領域に局部座屈のみが発生している。この領域の局部座屈変形は、a ~c の 3 面とも減肉部において中央部が大きくはらみだした 1.5 波の変形モードであり、d 面のみ凹んだ半波モードに変形している。写真-5.4.3 に試験後の変形モードを示す。なお、 減肉領域の a 面は、b 面との角部側の溶接ビード部に溶接われが発生した。

(4) CASE-4 (50%減肉試験体)

50%減肉試験体の荷重~鉛直変位曲線と支間中央部の荷重~面外変位曲線を図-5.4.10 に示 す。荷重変位挙動は、30%試験体と同様な傾向を示しているが、最大荷重に達した後の低下 がより激しい。最大荷重は2338kNであり、このときの鉛直変位 *u*=2.8mm、面外変位 *v*=-0.2mm、 *w*=0.4mm であった。図-5.4.11 に初期たわみと終局時たわみ変形を、写真-5.4.4 に試験後の変 形モードを示す。図-5.4.11 において、減肉部を含めた下端から 1000mm の領域の局部座屈 変形は、減肉部の中央点に変曲点を持つ 1.5 波の変形モードを示している。それ以外は 30% 試験体 (CASE-3) と同様な傾向を示している。



写真-5.4.1 崩壊時の変形モード (CASE-1)







(5) 考察

a) 荷重-変位関係

4 試験体の面内および面外の荷重~変位曲線をまとめたのが、各々図-5.4.12、図-5.4.13 で ある。なお、図中の軸方向変位 u_cは載荷点の軸方向変位であり、面外変位 v_cは部材中央の 面外方向の変位である。面内の荷重~変位曲線は、荷重増加とともに直線的に変化し、直 線から離れるところまで 4 曲線は重なっている。CASE-1、CASE-2 の軸方向変位が急増し 始めた付近から一定荷重を維持したまま軸方向変位が増加し、粘りのある挙動を示した。 このとき同時に面外にも大きな変位量を示している。試験体中央部の面外方向変位を見て も、CASE-1 に関しては y 軸方向、CASE-2 に関しては y、 z 軸方向において、最大荷重前に 変位の向きが変わるような挙動を示している。

一方、CASE-3、4の面内の荷重~変位曲線は、最大荷重に達した後、直ぐに荷重低下が 生じている。この相違点に関する要因については、明確にできていないが、試験体とそれ を挟んでいるプレートとを固定していないため、いわゆるメタルタッチであるため、荷重 の増加とともにわずかにずれ、これにより、載荷点が重心位置からずれることになり、今 回のような挙動を示したとも考えられる。また、図-5.4.13 から明らかなように面外の荷重 ~変位曲線をみると、最大荷重に達するまで面外変位が発生していないことがわかる。



図-5.4.12 荷重一軸方向変位曲線



図-5.4.13 荷重一面外変位曲線

b) 耐荷力特性

図-5.4.12 の最大荷重時における a 面および b 面の中央部の面外変形を示したのが、図 5.4.14 である。また、写真-5.4.5 は載荷試験終了時の崩壊モードを表している。健全体の CASE-1 は、S 字波形の全体座屈変形が発生している。模擬腐食を導入した CASE-2~4 の試 験体は、全て腐食を導入した減肉部に局部座屈が発生した。また、CASE-2 は、上端から 2000mm の領域で半波の全体座屈モードを、減肉部を含む残り 1000mm の領域で1 波の局部 座屈した、いわゆる連成座屈変形が発生している。また、CASE-3、4 では、部材全体系と



図-5.4.14 最大荷重時における面外変形

 CASE-1
 CASE-2
 CASE-3
 CASE-4

 写真-5.4.5
 載荷試験後における試験体の 全体変形(b面側)



図-5.4.15 溶接ビード部の溶接われ(CASE-3、a面)

A still Winterst CAAAh E			
試験体名	最大初期たわみδ _{MAX} [mm] (δ _{MAX} /変形範囲長 Le)	最大荷重 P[kN] (変位 u、v、 w[mm])	終局時 状態
CASE-1	1 (1/2500)	$\begin{array}{c} 4484 \ (P/P_U = 1.053) \\ (35.93, 2.9, -9.6) \end{array}$	連成座屈
CASE-2	1 (1/2500)	$\begin{array}{c} 4306 \ (P/P_U = 1.014) \\ (14.98, -0.6, -2.9) \end{array}$	連成座屈
CASE-3	1 (1/2500)	$3245 (P/P_U=0.764)$ (4.05,0.1,0.3)	局部座屈
CASE-4	1 (1/2000)	$\begin{array}{c} 2338 \ (P/P_U = 0.549) \\ (2.75, 0.2, 0.4) \end{array}$	局部座屈

表-541	初期たわみと最大荷重
1X-7.4.1	初期に和今日取八明里

道示基準耐荷力 Pug =4258[kN]

しての面外変形が発生しておらず、これらの部材の耐荷力は、減肉部を含む下端から 1000mm領域の1.5 波の局部座屈変形のみであり、模擬腐食を導入した領域に集中した局部 座屈変形が耐荷力を支配的している。

なお、CASE-3 の載荷試験では、図-5.4.15 に示すように a 面の減肉領域の b 面との角部側 の溶接ビード部に沿って 150mm の溶接われが発生した。溶接われの発生時荷重は確認でき なかったが、他のケース(特に CASE-4)では発生していないこと、および 5.3.4 で述べたよ うに溶接金属部に溶接欠陥 (ブローホール)が確認されたことから、CASE-3 では溶接部の 品質に問題があった可能性がある。しかし、荷重一鉛直変位関係において、最大荷重に至 るまでに荷重の急激な低下は見られず他のケースと比べ特段違いも見られないことから、 この溶接割れが最大耐力に影響を及ぼした可能性は低いものと考えられる。

耐荷力実験で得られた最大荷重と終局時の変形状態をまとめたのが表-5.4.1 である。表中 には、5.3.3 で計測した断面構成板中央部の最大初期たわみ、 およびその変形範囲長さ (CASE-1、CASE-3: L_e =2500mm、CASE-4: L_e =2000mm)に対する比率、終局時の耐荷力、面 外変位量、終局時の座屈変形状態を示す。道路橋示方書II鋼橋編(以後、道示と呼ぶ)により 算出した圧縮柱の基準耐荷力 P_u に対して健全体の CASE-1 は、ほぼ同等の耐荷力が得られ ている。一方、模擬腐食量の導入が増大するにしたがって、耐荷力は低下しており、CASE-4 では基準耐荷力 P_u に比較して 55%ほど低下している。なお、CASE-2 以外の 3 ケースの初 期たわみは、その変形範囲長さに対する比率が 1/2500、1/2000 と小さく、初期たわみの耐荷 力への影響はなかったものと推定できる。

c) 残存耐荷力評価

最大荷重 P_{max} を降伏荷重 P_y で無次元化した P_{max}/P_y と式(5.2.1)で定義した最大板厚欠損率 R_t [%]の関係、および最大荷重 P_{max} を道示の柱の基準耐荷力曲線から求めた基準耐荷力 P_u で無次元化した P_{max}/P_u と最大板厚欠損率 R_t [%]の関係をまとめたのが各々図-5.4.16、図 -5.4.17 である。両図ともに残存耐荷力と最大板厚欠損率 R_t は、式(5.4.1)のような線形関係が 成り立っている。

$$\frac{P_{max}}{P_y} = 1.04 - 0.973 R_t$$

$$\frac{P_{max}}{P_t} = 1.07 - 0.999 R_t$$
(5.4.1)

同様に、降伏荷重 *P_y*および基準耐荷力 *P_u*で無次元化した最大荷重と式(5.2.2)で定義した 最大断面欠損率 *R_A*[%]との関係を示したのが図-5.4.18 および図-5.4.19 である。両図において、 残存耐荷力と最大断面欠損率 *R_A*は、式(5.4.2)のような線形関係になっている。



残存耐荷力は、式(5.4.1)および式(5.4.2)のように最大板厚欠損率 *R*_tあるいは最大断面欠損率 *R*_Aを用いた線形式で評価できることが明らかになった。したがって、今回の腐食形状から大きく異ならない範囲においては、橋梁を構成する部材の残存耐荷力指標である最大板厚欠損率 *R*_tあるいは最大断面欠損率 *R*_Aが分かれば、前述の線形式で部材の残存耐荷力を簡易的に求めることができるものと考える。なお、今回の模擬腐食は、4 試験体ともに同位置、しかも 4 面に均一な局部腐食を導入しているため、圧縮部材の残存耐荷力に関するパラメータ指標である最大板厚欠損率 *R*_tあるいは最大断面欠損率 *R*_Aは、表-5.2.1に示したように、傾向に大きな相違がない。これが結果的に、*R*_tあるいは *R*_Aのどちらのパラメータを用いても、残存耐荷力を評価することができた理由である。

最大板厚欠損率 *R*_tに関しては、部材の最も腐食している 1 点のみでの評価となり、均一 腐食の仮定が前提となるため実腐食部材への適用は難しい。一方、最大断面欠損率 *R*₄に関 しては、現場点検の目視段階で腐食の比較的大きな断面箇所で評価することができるので、 一般的には、最大断面欠損率 *R*₄を用いた線形式である式(5.4.2)が有効であると考える。

5.5 弹塑性有限变位解析

5.5.1 解析モデル

圧縮耐荷力試験装置の両端ピン支持冶具および試験体の解析モデルを示したのが図-5.5.1 である。試験体端部から球座まで 100mm あるため、端部には板厚 100mm の剛板を取り付 けた(荷重載荷点での応力集中を避けることにも寄与する)。したがって、両端ピン間の部 材長は、3200mm となる。ソリッド要素による試験体のモデル化にあたり、フランジとウエ ブの幅方向にはおよそ 15mm 間隔に、部材軸方向は 20mm 間隔にメッシュ分割した。なお、 肉厚方向には 3~5 分割している。また、初期たわみは表-5.3.2 の測定値を測定位置の節点 に導入し、板幅縁端でゼロになるようにした。



図-5.5.1 模擬腐食モデル (unit:mm)

5.5.2 構成則と残留応力度

鋼材の材質は、SM41 であり、5.3.1 の引張試験結果を基本にして、降伏後の加工効果を図 -5.5.2 のような 5 点折れ線で近似した。表-5.3.1 から明らかなように降伏応力 σ_yには、UL お よび LU 試験体の下降伏点の平均値である 265N/mm²を用いる。

初期たわみは、5.3.3 における表-5.3.2 の計測結果を導入した。また残留応力は 5.3.2 にお



ける計測結果から引張の残留応力が 1.0₅、圧縮の残留応力が 0.13₅の大きさをもつ、圧縮 残留応力は、図-5.5.3の理想化した直線分布形状を仮定し、その大きさは、0.13₅とした。

5.5.3 解析結果

(1) CASE-1

弾塑性有限変位解析により得られた荷重一変位曲線(実線)と試験結果(破線)と比較 したのが、図-5.5.4 である。解析では、P=3700kN付近で両端部に初期降伏が起こり、wの 面外方向(z軸方向)に大きく変位した。この時y軸方向への面外変位vは見られない。試験





結果に対して、解析による最大荷重 P=4336kN は試験の最大荷重 P=4484kN に近いものの、 最大荷重に達した後の荷重一変位曲線は相違している。各面の中央ラインに着目した試験 体の変形を図-5.5.5 に示す。部材全体系の変形は、実験結果と解析結果にはあまり一致が見 られない。なお、解析結果における x=1000mm 付近の局所的な面外変形は、最大荷重後に 生じたものである。

(2) CASE-2

10%減肉した試験体 CASE-2 の試験と解析による荷重一変位曲線を比較したのが、図-5.5.6 である。試験結果は、4000kN 付近から荷重の増加が横ばいになり、最終的に



図-5.5.7 各面の変形モードの比較(CASE-2)

P=4306kN、u=15mm で終局に至った。最大荷重に達した後、荷重は緩やかに低下している。 一方、解析結果は、P=3000kN 付近で模擬腐食領域の端部にて初期降伏が発生し、 P=4023kN、u=4.8mm で終局に至った。各面の中央ラインに着目した試験体の変形を図-5.5.7 に示す。解析による試験体全体系の変形はa面およびc面において試験結果と良い一致を示 している。一方、b面とd面において解析結果は試験結果より大きな変位が発生しており、 あまり再現できていない。

(3) CASE-3

30%減肉した試験体の荷重一変位曲線である図-5.5.8から明らかなように、試験結果は、



図-5.5.9 各面の変形モードの比較(CASE-3)

面外方向に変位することなく、P=3347kN、u=4.1mm で最大荷重に達した。その後、緩やか に荷重が低下するとともに軸方向変位が増大していった。解析曲線では、P=2000kN 付近で 模擬腐食領域の端部に初期降伏が発生し、P=3347kN、u=3.6mm で最大荷重に至った。最大 荷重後の面外変位は、解析の方が大きくなった。軸方向変位と荷重曲線において、立ち上 がりの勾配に試験結果と解析結果とで違いが現れたが、全体的には試験挙動を解析曲線は 再現できている。各面の中央ラインに沿った変形状況をまとめたのが図-5.5.9 である。解析 結果では、a 面および c 面で上端から 1500mm までの区間に全体的に面外変形が生じている 点が試験結果と異なるが、この点以外の変形は実験をよく再現できている。

(4) CASE-4

50%減肉した試験体の荷重~変位曲線を示したのが図-5.5.10 である。試験結果と解析結 果から得られた荷重変位曲線は良い一致を示している。試験結果は初期荷重増分段階から 少し不安定な曲線を示しており、解析の直線的な立ち上がりと多少相違している。試験結 果は、面外方向変位がほとんど発生せずに P=2338kN、u=2.8mm で最大荷重に至った。そ の後、荷重は低下し、軸方向変位が増大している。なお、2000kN 近傍まで荷重低下した後、 それ以上の低下は見られない。解析結果は、P=1100kN 付近で模擬腐食領域の端部に初期 降伏が起こり、P=2651kN、u=3.2mm で最大荷重が得られた。この値は、試験による最大荷 重より高い値となった。最大荷重に達した後に面外変位v、wが発生している。各面の中央 ラインに着目した試験体の変形を図-5.5.11 に示す。試験結果は、30%減肉した CASE-3 と 同様に、減肉部に変形が集中している。解析結果も同様の傾向を再現できている。





5.6 解析結果と考察

ここでは、5.4節と5.5節で得られた残存耐荷力について比較検討する。

CASE-1~CASE-4 の全 4 試験体の解析と試験により得られた残存耐荷力をまとめたのが、 表-5.6.1 および図-5.6.1 である。解析結果と試験結果の誤差は±3%~13%となり、全体的に 良い精度が得られた。模擬腐食の導入量が少ない CASE-1 と CASE-2 の解析値は、試験結果 より低い値となった。一方、模擬腐食の導入量が多い CASE-3 と CASE-4 は試験結果より高 い値となった。
軸方向 20mm 間隔要素分割、肉厚方向 3 分割のモデル化による弾塑性有限変位解析によって、試験により得られた耐荷力の再現、および模擬腐食を導入した減肉部及びその近傍の座屈変形形状の再現は可能である。なお、残存耐荷力の誤差要因は、試験では試験体と装置冶具部の挙動評価、解析においては、肉厚方向の solid 要素の分割数による剛性評価、初期不整(特に残留応力分布)の導入精度が考えられる。

表-5.6.1 各試験体の残存耐荷力

試験体	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
解析值(kN)	4336	4023	3347	2651
試験值 (kN)	4484	4306	3245	2338
試験値/解析値	1.033	1.070	0.970	0.882



図-5.6.1 解析と試験の耐荷力の比較

次に、試験および解析により得られた残存耐荷力は、式(5.2.2)で与えられる断面欠損率 *R_A*との関係をまとめたのが図-5.6.2 である。残存耐荷力 *P_{max}*を道示の柱の基準耐荷力曲線か ら求めた基準耐荷力 *P_u*で無次元化した *P_{max}/P_u*と断面欠損率 *R_A*の間には、また降伏軸力 *P_y* で無次元化した *P_{max}/P_y*と断面欠損率 *R_A*の間には、式(5.4.2)で与えられる線形式が成り立つ。 なお、試験および解析により得られた残存耐荷力は、今回導入した模擬腐食のような均一 局部腐食の場合、試験体の最小板厚から求められる板厚欠損率を用いても、最小断面積か ら求められる最大断面欠損率 *R_A*を用いても同一評価が可能である。



5.7 まとめ

実際の鋼トラス橋斜材に模擬腐食を導入した試験体を対象にして、圧縮耐荷力試験および 弾塑性有限変位解析を実施することにより、腐食した圧縮部材の残存耐荷力評価方法につ いて検討した。得られた主な結果を以下にまとめる。

- 2) 模擬腐食を導入した試験体の崩壊形式は、導入した模擬腐食量により局部座屈と連成座 屈に分離できる。なお、解析による終局時変形状態は、健全体の CASE-1 を除いて、試験 結果と概ね一致した。
- 3) 試験と解析による最大荷重に達した後の荷重一軸方向変位挙動は、減肉量の多い CASE-3、 CASE-4 は概ね一致した。しかし、健全体の CASE-1 及び減肉量の少ない CASE-2 では違 いが見られた。
- 4) 試験および解析により得られた残存耐荷力は、試験体の最小断面積から求められる最大 断面欠損率 R_Aを用いて評価でき、残存耐荷力 P_{max}を道路橋示方書の柱の基準耐荷力曲線 から求めた基準耐荷力 P_uで無次元化した P_{max}/P_u と R_Aの線形関係式を提案した。

参考文献

5-1) 山沢哲也、野上邦栄、小峰翔一、依田照彦、笠野英行、村越潤、遠山直樹、澤田守、有 村健太郎、郭路:模擬腐食を導入した鋼トラス橋斜材の残存圧縮耐荷力、構造工学論文 集.Vol.59A、2-8、pp.143-155、2013.3.

6. 腐食劣化の生じたトラス格点部の載荷試験

6.1 検討概要

本章では、2章に示す著しい腐食の生じた腐食劣化の生じた鋼トラス橋より切り出したト ラス格点部を対象として、腐食量計測後に斜材軸力に対する圧縮耐荷力に着目した載荷試 験及び弾塑性有限変位解析を行い、破壊性状や残存耐荷力を把握するとともに、腐食状態 のモデル化手法について検討を行った。

6.2 試験体

(1) 対象格点部

図-6.2.1 に対象とした格点部と撤去後に切り出された試験体を示す。対象とした格点部は、 4 章で腐食量計測を実施した下流側の上弦材格点部(P25d)である。鋼種は SM41 であり、 斜材とガセットプレート(以下、ガセット)はリベット(鋼種 SV34)によって接合されて いる。上弦材及び斜材の箱断面内部に腐食は見られなかったが、ガセット内面側に著しい



(c) 切り出された格点部試験体 P25d(上面が上流側)



(d)フランジの縁端部

(b) 格点部断面図

(e) ガセット外面側

(f) ガセット内面側

図-6.2.1 対象格点部と切り出された試験体の腐食状況

腐食が生じており、ガセット(斜材フランジと重なる領域を除く)の上・下流の平均残存 板厚は 9.2mm であり、健全時の 12mm に対して 23%減少していた。

(2) 鋼材の材料特性

載荷試験後に対象格点部の斜材およびガセットから採取した試験片により引張試験を実施した。図-6.2.2 に応力-ひずみ関係を、表-6.2.1 に鋼材の引張試験結果を示す。



図-6.2.2 鋼材の応力-ひずみ関係

採取位置	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弹性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
①ガセット	251.0	428.8	210.8	43.3
②ガセット	255.8	422.7	207.5	42.0
③ガセット	257.9	428.8	210.3	46.4
④ガセット	254.3	426.9	211.8	45.9
ガセット平均値	254.8	426.8	209.5	43.9
①斜材(ウェブ)	272.9	452.9	204.5	18.7
②斜材(フランジ)	270.6	454.9	202.0	18.4
③斜材(ウェブ)	277.2	451.0	205.0	18.5
斜材平均值	273.5	452.9	203.8	18.5

表-6.2.1 鋼材の引張試験結果

(3) 腐食状況と解析モデルにおける腐食の扱い

腐食状況の詳細は4章に述べるが、解析モデルの作成にあたって、圧縮耐荷力に影響を 与える斜材のフランジ、ウェブ及びガセットの各部の残存板厚をシェル要素に考慮してい る。図-6.2.3 及び図-6.2.4 に腐食量分布と2ケース(以下、腐食(平均)ケースと腐食(部位別) ケース)のモデル化における各部の平均残存板厚を示す。腐食(平均)ケースと腐食(部位別)

[※]ガセット、斜材(フランジ)については下流側より採取



※図-6.2.3 と図-6.2.4 のコンター図は、残存板厚ではなく各部材の各面の板厚減少量を表している。

ケースでは、ガセットの腐食のモデル化の方法が異なる。腐食(平均)ケースでは、上下流ガ セット面(斜材フランジの接合部を除く)の残存板厚の平均値(以下、平均残存板厚)をシェル 要素に反映している。また、腐食(部位別)ケースでは、ガセット面を腐食の著しい斜材先端 部等の 4 部位(C、S₁、S₂、S₃)に区分して、上下流のそれぞれの部位の平均残存板厚をシェ ル要素に反映している。

以下、各部位の腐食量のモデル化について説明する。ガセット外面についてはリベット 周りで腐食している箇所が見られるが、この接合部の 腐食量が格点部の耐荷力に与える 影響は小さいとみなし、ガセット内面については斜材との接触面には隙間腐食はないとみ なし、接合部のガセット板厚は12mmとした。腐食(平均)ケースでは、ガセットの平均残存 板厚 9.2mm(上流側 9.0mm、下流側 9.4mmの平均残存板厚(図中の青の実線で囲まれた領 域)から求まる上・下流の平均残存板厚)を考慮した。腐食(部位別)ケースでは、外・内面 について斜材先端部及びそれ以外の部位の計 4 部位に区分し、それぞれの領域の平均残存 板厚をモデル化に考慮した。

斜材フランジについては、外面の腐食が局部的に著しい部位(図中の赤の実線で囲まれた領域)に対して、両面の腐食量から求めた平均的な残存板厚をモデル化に考慮した。斜材フランジのうち、内面のガセットと重なる部位については、例えば、圧縮側では平均残存板厚 8.7mm(上流)と11.5mm(下流)をモデル化に考慮した。また、絞り込まれた圧縮斜材ウェブについては、各面の平均残存板厚をモデル化に考慮した。

6.3 試験方法

(1) 載荷方法

図-6.3.1 に試験体と試験治具の概要を示す。写真-6.3.1 に載荷試験時の状況を示す。載荷 試験は、それぞれの斜材に圧縮荷重と引張荷重を漸増載荷する2軸載荷とした。

表-6.3.1 に設計軸力及び応力度(L-20 活荷重載荷時)を示す。圧縮及側及び引張側の斜材の 設計軸力が概ね同値であることから、載荷試験における両者の荷重増分は同じとした。圧 縮側は土木研究所構内の 30MN 大型構造物万能試験機により、引張側は取付架台に引張載 荷のための自定式フレームを取付け、センターホールジャッキにより載荷した。なお、圧 縮載荷側の試験機の載荷板と試験体は固定せずに面接触させた。

載荷試験時に、引張荷重が約2000kNの時点で試験体の引張載荷用治具の取付け部付近の 角溶接に割れが生じた。このため、引張荷重は1500kNまで落とし、1500kNで一定とした 条件で、圧縮側の荷重を増加させた。なお、自定式フレームは死荷重が試験体に作用しな いように架台で支持した。



図-6.3.1 試験体と試験治具の概要(単位:mm)



(a) 試験装置全景(※公開試験を実施)(b) 試験体の設置状況写真-6.3.1 圧縮/引張二軸載荷試験の状況

設計荷重	引張側	則(斜材D24) 圧縮側(斜材		(斜材D25)
	軸力(kN)	応力(N/mm ²)	軸力(kN)	応力(N/mm ²)
死荷重	1027	69	-973	-52
活荷重	785	53	-742	-40
合計 (比率)	1812 (-1.06)	112	-1715 (1.00)	-92

表-6.3.1 設計軸力及び設計応力度

(2) 計測項目・位置

試験時には、載荷点および試験体の面外・面内の変位について接触型変位計で、試験体の斜材及びガセットのひずみについて1軸及び3軸方向ひずみゲージ(ゲージ長3mm)で、ガセットと斜材間の相対変位についてクリップゲージで計測を行った。図-6.3.2に下流側外面の主なひずみゲージと変位計の設置位置を示す。ひずみゲージはガセットの各面(計4面)に貼付しているが、図に示す下流側外面に最も多く貼付している。また、図中には図-6.4.6における最小主ひずみ角度の定義を示す。



図-6.3.2 主なひずみゲージと変位計の設置位置(下流側外面)

6.4 試験結果

(1) 荷重-変位関係と破壊性状

図-6.4.1 に荷重と載荷方向変位(取付架台の弾性変位に伴う変位を除いた鉛直方向変位)の 関係を示す。図中には、平均残存板厚を考慮して部材断面より推定した斜材及びガセット 部の耐荷力算定値と、FHWA ガイダンス⁶⁻¹⁾ (7.2.1 参照) による局部座屈に対する耐荷力算 定値を示す(表-6.4.1 参照)。ガセット部の降伏耐荷力とは、斜材最前列のリベット位置に おける Whitmore 有効幅⁶⁻²⁾を考慮して算出した値である。ガセットの降伏耐荷力付近の荷重 までは概ね線形性が保たれているが、それ以降、勾配は徐々に緩やかになり最大荷重 3598kN に達した。最大荷重以降は穏やかに低下している。なお、斜材のリベット接合部における 降伏耐荷力は 4516kN であり、斜材側は最大荷重時に断面計算では降伏していない状況にあ る。

図-6.4.2 に除荷後の試験体の破壊状態を示す。ガセットの斜材先端部において外面に向かって面外変形が見られ、ガセットの外側自由端でも非対称であるが面外変形が発生しており、これらのガセットの変形の進行に伴い耐荷力が失われたものと考えられる。ガセット 外側自由端の面外変形は、上流側・下流側ともに、同じ方向(上流側)に向かって生じており、ガセットが全体的に上流側に平行移動するように変形していることがわかる。



図-6.4.1 荷重と載荷方向変位の関係

		諸元	元板厚	腐食考慮
	最縁リ	Whitmore有効幅 (mm)	703	703
	ベット部	ガセット板厚 (mm)	12	9.2
	のガセッ	ガセットの降伏強度 (N/mm²)	255	255
	ト	降伏耐荷力 ^{注1)} (kN(比率))	4302(1.20)	3298(0.92)
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	斜材ウェブ板厚 (mm)	14	12
耐荷力	斜材	斜材フランジ板厚 (mm)	12	9
算定值	(孔引き	斜材の総断面積 (mm²)	21432	16482
(圧縮側) 断面)	断面)	斜材の降伏強度 (N/mm ²)	274	274
	2	降伏耐荷力 (kN(比率))	5872(1.63)	4516(1.25)
		断面二次半径 (mm)	3.46	2.66
	ALL LA DA	仮定圧縮柱の長さ (mm)	218	218
	斜材先端	有効座屈長係数	1.2	1.2
3	のカセッ	細長比	0.738	1.248
	여고기	ガセットの降伏強度 (N/mm²)	255	255
		局部座屈耐荷力 ^{注2)} (kN(比率)	3212(0.89)	2006(0.56)
試験値	(最大値)	(kN(比率))	2	3598(1.00)

表-6.4.1 耐荷力算定結果

注1):Whitmore有効幅断面の降伏を考慮

注2):Whitmore有効幅断面の局部座屈を考慮(FHWAガイダンスによる)



(a) 試験体の全景

(b) ガセット外面の状況



(c) 外側自由端部の面外変形 (図(a)の白矢印方向から見た状況) 図-6.4.2 荷重除荷後の試験体の破壊状態



(d) 斜材先端部の局部座屈変形

図-6.4.3 に載荷時及び荷重除荷時のガセット斜材先端部の面外変形分布図を示す。最大載 荷時のガセット斜材先端部の面外変形は、上流側のほうが下流側と比較して若干大きく、 荷重除荷後についても同様の傾向にある。また、荷重除荷後の計測によれば、斜材最縁リ ベット(図中の1列目リベット)位置付近では上下流のガセットがともに正方向に変位が 生じており、ガセットが全体的に上流側に平行移動するように変形している様子(図(c)参 照)がうかがえる。

ガセット斜材先端部の腐食減肉量は図-6.2.4 に示したように上流側の方が大きく、このため上流側の面外変形が先行して生じ、変形量が大きくなっているものと考えられる。ガセット外側自由端については、上流側・下流側ともに上流側に面外変形が生じている。この理由として、試験体の初期不整や腐食による偏心等が影響を及ぼした可能性が考えられる。

図-6.4.4 に上流側(道路側)と下流側(海側)の両ガセットの荷重と面外変位の関係を示 す。斜材先端部と外側自由端部では面外変位は載荷初期段階からみられる。斜材先端部で は荷重が大きくなるにつれて片側のガセットの面外変位が先行して発生している。外側自 由端部では、上流・下流側ともに、上流側に面外変形が発生している。



図-6.4.3 載荷時及び除荷後のガセット斜材先端部の面外変形分布



(c) 斜材先端部のガセット(斜材軸方向の中央変位)

図-6.4.4 ガセットの荷重と面外変位の関係

(2) ガセット部及び斜材部のひずみ

図-6.4.5 に最大荷重時における下流側のガセット及び斜材フランジの主ひずみ分布を示す。 ガセットの降伏ひずみは 1210µ、斜材の降伏ひずみは 1300µ である。斜材フランジ自由端部 は概ね降伏に達している。また、主ひずみについては、外側自由端と内側自由端部の斜材 近傍と、ガセット内面における斜材先端部の最小主ひずみの絶対値が大きい。ガセット外 面における外側自由端部とガセット内面の斜材先端部については、面外変形が卓越した箇 所と一致している。なお、ガセット内面の斜材先端部においては、外面に比べ内面のほう が大きくなっているが、面外変形が外面に凸な方向に生じていることが影響しているもの と考えられる。

図-6.4.6 に下流側ガセット外面のひずみゲージ G1~G12 の主ひずみ値、最小主ひずみの 角度と荷重の関係を示す。圧縮主ひずみの角度の定義は前述の図-6.3.2 に示す。ひずみゲー ジは反時計回りに斜材接合部を取り囲むように貼付しているが、最小主ひずみ角度は、外 側自由端部(G1~G5)ではせん断の影響により-45 度付近、斜材先端部(G6~G8)では圧 縮の影響により0度付近、内側自由端部(G9~G12)ではせん断の影響により 45 度付近に 変化している。



(b) 内面 図-6.4.5 最大荷重時における下流側ガセット及び斜材フランジの主ひずみ分布



図-6.4.6 下流側ガセット外面の主ひずみ値、最小主ひずみ角度と荷重の関係



図-6.4.6 下流側ガセット外面の主ひずみ値、最小主ひずみ角度と荷重の関係(続き)



図-6.4.6 下流側ガセット外面の主ひずみ値、最小主ひずみ角度と荷重の関係(続き)

図-6.4.7 に下流側ガセット部外面の 2000kN 荷重時の軸方向の斜材先端部の応力分布と Whitmore 有効幅を考慮した場合の応力算定値を示す。斜材軸中心において圧縮応力が大き く、応力算定値は、この応力計測値と概ね一致している。図-6.4.8 に下流側の斜材先端のガ セット部のひずみについて、曲げひずみ成分((外面-内面)/2)と軸ひずみ成分((外面+内面)/2) を示す。載荷開始直後より荷重に比例して曲げ成分が作用しておりガセットが曲げを受け ているが、片面接合や内面側腐食による載荷偏心や初期不整の影響が考えられる。

図-6.4.9 に圧縮斜材とガセットの荷重と最小主ひずみの関係を示す。斜材フランジでは、 上流側、下流側ともに最大荷重時には降伏ひずみに達している。ガセットの外側自由端部 では、下流側内面において最大荷重時に降伏ひずみに達したが外面では達していなかった。 また、上流側内面・外面のひずみはほぼ同時に増加し、最大荷重時に降伏ひずみに達した。 斜材先端部では、両ガセットの内面のひずみは線形的に増加し、外面より先行して、約 2000kN 荷重時に降伏ひずみに達した。両斜材の間のガセット自由端部では、最大荷重時に おいて、上流側のガセットのひずみは降伏ひずみに達したが、下流側のガセットのひずみ は降伏ひずみに達していなかった。



図-6.4.7 下流側外面の斜材先端のガセット部の応力分布(2000kN 荷重時)



図-6.4.8 下流側ガセットの荷重と斜材先端のガセット部のひずみの関係 (1列目リベットからの距離 70mm)



図-6.4.9 荷重と最小主ひずみの関係

(3) 圧縮斜材の軸方向ひずみ

図-6.4.10 に荷重と圧縮斜材フランジ及び先端のガセット部(外面)のひずみの関係を示 す。最大荷重時において、自由突出板となる斜材フランジの一部(下流側)は塑性化している が、ウェブにより囲まれた部分では塑性化していない。一方、ガセットでは、上下流側と もに塑性化しており、ガセット側の局部座屈により最大荷重を迎えたものと考えられる。



図-6.4.10 荷重と圧縮斜材の軸方向のひずみの関係

6.5 弹塑性有限变位解析

前述のトラス格点部試験体の圧縮載荷試験に対して、その破壊性状及び耐荷力を明らか にするとともに、腐食欠損の耐荷性能への影響の評価を目的として弾塑性有限変位解析を 行った。また、今回、引張載荷試験を実施出来なかったが、引張斜材載荷時を想定した弾 塑性有限変位解析も行った。

(1) 解析モデル

解析は試験条件に合わせて行うことを基本とし、6.2節に示した格点部及び載荷試験用の 取付架台をモデル化の対象とした。荷重条件は載荷試験と同様に、下弦材を固定した状態 で、圧縮側・引張斜材両方の2軸載荷とした。ただし、解析モデルでは自定式フレームは モデル化せず、引張載荷側の反対側にも引張載荷側と同じ引張力を作用させて載荷試験時 の荷重状態を表現した。

解析は弾塑性有限変位解析とし、非線形解析手法には弧長増分法と Newton-Raphson 法を 併用した。解析ソフトは汎用ソフトの LS-DYNA(米国 LSTC 社)である。 図-6.5.1 に解析モデルの概要を示す。格点部及び載荷試験用の取付け架台の鋼部材はシェル 要素でモデル化した。斜材とガセットは板厚中心位置にシェル要素を配置し、リベット中 心位置に線形バネ要素を配置して両者を結合した。ただし、リベットと鋼部材間はバネの 剛性のモデル化が最大荷重にほとんど影響を与えないことを確認した上で完全剛結合とし た。シェル要素は、変形や局部の応力性状について精度よく再現できるよう、試験体部分 は最大でも 20mm×20mm 程度の要素サイズに分割した。なお、シェル要素について、面内 の積分点数は4、板厚方向は8 である。荷重の載荷断面については、載荷により断面の縁部 分に局所変形が発生するため、載荷断面に剛体梁要素を設置して断面保持を図った。なお、 本解析ではガセットの初期たわみは考慮していない。

鋼材の応力-ひずみ関係には、斜材及びガセットの材料引張試験により得られたガセット 及び斜材それぞれの応力-ひずみ関係を用いた。図-6.5.2 にガセット及び斜材から切り出し た鋼材の引張試験結果と解析で用いた応力-ひずみ関係を示す。弾性係数 E=2.1×10⁵ N/mm²、 ガセットの降伏点 σ_y =255 N/mm²、 σ_u =427 N/mm²、斜材の降伏点 σ_y =274 N/mm²、 σ_u =453 N/mm²とした。応力-ひずみ関係はトリリニア型(二次剛性: E/100 (σ_y ~1.5 σ_y)、三次剛 性: E/700 (1.5 σ_y ~ σ_u)) モデルで表現した。ここでは、全体挙動や耐荷力の把握を主な目 的としており、応力-ひずみ関係を平均的にモデル化した方法を採用した。降伏条件は von Mises の降伏条件、等方硬化則とした。また、解析では、1 ステップあたり 15kN ごとに増 分させる荷重増分法を適用し、解が収束しない場合には荷重増分を低減させて再度同ステ ップでの収束計算を行った。



図-6.5.1 解析モデルの概要



(2) 解析ケース

表-6.5.1 に解析ケースを示す。解析にあたって、まず、リベットのモデル化が耐荷力に与 える影響について検討した。その結果を踏まえて、リベットのモデルを剛結合に設定し腐 食欠損が耐荷力に与える影響について検討した。

1) リベットのモデル化の検討

リベットのモデル化が終局挙動に及ぼす影響について検討するため、表中の解析モデル の基本ケースを用いてリベットのバネ剛性をパラメータとして解析を行った。表-6.5.2 に解 析ケースのバネ剛性を示す。表中の剛結、線形バネ、バイリニア及びトリリニアとはリベ ットのせん断バネ剛性を変化させたものである。剛結のケースは せん断方向、軸方向、曲 げのバネ剛性として十分大きい値を与え、剛結合とみなせるような条件としたものである。 線形バネの要素の軸剛性とせん断剛性は式(6.5.1)と式(6.5.2)により算定した。曲げ剛性につ いては結果にほとんど影響を与えないことを確認した上で、十分大きい値(1.26x10⁷N・ mm/rad)としている。

① 軸剛性K,

$$K_l = EA/l \tag{6.5.1}$$

ここに、

E: リベットのヤング率 (=2.1×10⁵MPa)

A: リベットの断面積 (リベット直径 22mm より 380mm²)

1: リベットの軸長さ

② せん断剛性K_G

$$K_G = GA/l \tag{6.5.2}$$

ここに、

G: リベットの材料せん断係数G=E/2(1+v)

v: リベットの材料ポアソン比 (=0.3)

A: リベットの断面積 (=380mm²)

1: リベットの軸長さ

リベットの軸長さは、圧縮側 24mm、引張側 22mm(引張斜材フランジ板厚 10mm、圧縮 斜材フランジ板厚 12mm、ガセット板厚 12mm)に対して、軸長さが耐荷力に及ばす影響は 小さいことを確認した上で、12mm としている。

図-6.5.3 にリベットのせん断試験で得られた荷重-変位関係と解析に用いたトリリニア型 モデルを示す。トリリニア型モデルについては、式(6.5.2)によらずに同一の鋼種でほぼ同一 の軸径のリベットのせん断試験結果を用いてモデル化を行っている。格点部に用いられて いるリベットの断面積及びせん断断面の数が一致するように換算し、トリリニア型でモデ ル化したものであるが、初期剛性は若干小さく試験方法の影響も含まれた可能性も考えら れる。

2) 腐食欠損の耐荷力への影響の検討

表-6.5.1 に示すように、腐食が生じていない健全時の当初板厚を想定したケース1(以下、 健全ケース)、腐食量計測結果に基づき、ガセット内の平均的な板厚減少を考慮したケース 2(腐食(平均)ケース、図-6.2.3 参照)、斜材先端部のように腐食部の厳しい部位を考慮し たケース3(腐食(部位別)ケース、図-6.2.4 参照)の3ケースとした。

解析ケース		部材の板厚(mm)					
		斜枝	才		ガセット		
ケース名	モデル概要	フラン ジ	ウェブ	圧縮部 C	自由端部 S_1	自由端部 S ₂	自由端部 S ₃
1 GN-CS12	健全 (リベット : 剛結)	12	14	12	12	12	12
1a GN-CS12-L	健全 (リベット : 線形)	12	14	12	12	12	12
1bGN-CS12-BL	健全 (リベット : バイリニア)	12	14	12	12	12	12
1cGN-CS12-TL	健全 (リベット:トリリニア)	12	14	12	12	12	12
2 GN-CS9-2	腐食(平均) (リベット:剛結)	図-6.2.3 参照	図-6.2.3 参照	9.2	9.2	9.2	9.2
3 GN-C8S10	腐食(部位別) (リベット:剛結)	図-6.2.3 参照	図-6.2.3 参照	上流 8.1 下流 8.9	上流 10.8 下流 9.6	上流 10.4 下流 10.0	上流 7.3 下流 9.6
4 T-GN-CS12*	腐食 (リベット:剛結)	7.79	9.86	9.2	9.2	9.2	9.2

表-6.5.1 解析ケース

*ケース 4(T-GN-CS12)の斜材フランジ・ウェブの板厚は、上下流の残存板厚の平均値としている。

解析ケース		軸バネ			
	バネ モデル	初期勾配 (N/mm)	二次勾配 (N/mm)	三次勾配 (N/mm)	剛性 (N/mm)
1 GN-CS12	剛結	1.00×10 ¹⁰	-	-	1.00×10'°
1a GN-CS12-L	線形バネ	2.56×10 ⁶	-	-	6.65×10 ⁶
1b GN-CS12-BL*	バイリニア	2.56X10 ⁶	2.56×104		6.65×10 ⁸
1e GN-CS12-TL**	トリリニア	4.58×10⁵	5.16×104	6.50×10 ³	6.65×10 ⁶

表-6.5.2 リベットのモデル化の比較に用いた解析ケースとモデルの概要

*バイリニア型モデルの二次勾配はE/100(Eは初期勾配)

**トリリニア型モデルの詳細は図-6.5.3を参照



図-6.5.3 リベットのせん断試験における荷重-ずれ変位関係とトリリニア型モデル

6.6 解析結果と考察

(1) リベットのモデル化の影響

図-6.6.1 に荷重-載荷点軸方向変位曲線を示す。また、図中には線形バネケースに対する各 ケースの最大荷重の比率を示しているが、いずれのケースも1%以内であり、最大荷重の違 いほとんどみられない。また、図-6.6.2 に荷重-ガセット・斜材間の相対変位の関係を示す。 図中には、前述の載荷試験結果についても併記している。線形バネケース、バイリニアケ ース、剛結合ケースではほとんど差はみられず、剛結合ケースが最も試験値に近い(健全ケ ースのため腐食は考慮していない)。以上より、圧縮力を受ける格点部を対象とした弾塑性 有限変位解析において、リベットをモデル化したバネの剛性を変化させても耐荷力に及ぼ す影響は小さく、今回の試験体の場合には剛結合としたモデル化においても実務上問題な いものと考えられる。



(2) 圧縮載荷試験結果と解析結果の比較分析

図-6.6.3 に荷重と荷重載荷方向変位(取付架台の弾性変形の影響は除去)の関係を示す。 健全ケース、腐食(平均)ケース及び腐食(部位別)ケースにおける最大荷重の解析値は それぞれ 4693kN、3779kN、3637kN であった。

健全ケースと腐食ケースを比較すると、腐食を考慮することにより、耐荷力は約81%(腐 食(平均)ケースの3779kNと比較し約81%)、77%(腐食(部位別)ケースの3637kNと比 較し約77%)に低下している。ガセット部の腐食は不均一であるため、耐荷力と平均的な腐 食量との関係は一概には言えないが、結果としてこの耐荷力の低下率は、ガセットの減厚 の比率(元厚12mmに対して平均9.2mmで約77%)に概ね近い値を示している。また、最 大荷重について、試験値に対する解析値の比率(解析値/試験値)は、腐食(平均)ケース では1.05、腐食(部位別)ケースでは1.01であり、試験値と解析値は良く一致しているこ と、かつ、ガセットの残存板厚を部位毎に考慮することで若干ではあるが解析値は試験値 に近づく傾向が見られる。また、最大荷重以降の挙動(荷重の低下傾向)についても、試 験値と解析値は比較的良く一致している。なお、初期剛性について試験値は腐食(部位別) ケースの解析値の82%程度となっている。これは、今回の腐食のモデル化において、ガセ ットの初期たわみやその内面側の減肉による偏心の影響を考慮できていないことなどが考 えられる。

参考までに図-6.6.4 に斜材(矩形部分、ガセットと斜材の接合部分)及びガセット(有効幅として斜材幅を考慮)から構成される圧縮柱を想定した場合の初期剛性算定値について、腐食残肉や初期不整が剛性に与える影響を試算した結果を示す。なお、ガセット部は文献 6-3)を参考して、水平力を受ける 2-ヒンジアーチの剛性を与えることにより簡易にモデル化した。試験結果に対して、算定値も解析値も剛性が大きい傾向にあるが、初期不整を考慮することにより近づく傾向が伺える。



図-6.6.5 最大荷重時の斜材先端ガセットの面外変位分布の比較

図-6.6.5 に最大荷重時の斜材先端ガセット部の面外変位分布の試験値と解析値の比較を示 す。上流側については、解析値と試験値は概ね一致しており、腐食(部位別)ケースでは腐食 (平均)ケースよりも、さらに試験値に近づいている。しかし、下流側については、斜材側で 試験値と解析値に若干の相違が見られる。

図-6.6.6 に腐食(部位別)ケースの最大荷重時のガセットの変形を示す図-6.6.7 にガセット の荷重と面外変位の関係の試験値と解析値の比較を示す。試験では、ガセットの外側自由 端は 2 面とも上流側に向かって変形が生じているが、解析では、それぞれ外側に向かって 変形が生じている。斜材先端部については、試験値と解析値が概ね一致しているが、ガセ ット外側自由端の下流側では、初期の段階から試験値と解析値で面外変位の向きが異なっ ている。このように、ガセットの外側自由端および両斜材間自由端の下流側の面外変形の 向きが試験結果と異なったのは、後述する詳細モデルによる結果を考慮すると、腐食(部 位別)ケースではまだ十分な精度で腐食による減厚分布を再現していなかったことが主な 要因と考えられる。腐食ケースの解析結果は、初期剛性や下流側ガセットの面外変位のよ うに一部で試験結果と異なる部分が見られるが、最大荷重や全体としての挙動を概ね評価 できているものと考えられる。



図-6.6.6 腐食(部位別)ケースの最大荷重時におけるガセットの変形図(変形倍率:20倍)



※図中丸印は最大荷重点を示す

(3) 引張載荷の場合の解析結果

図-6.6.8に荷重と載荷方向変位の関係を示す。表-6.6.1に斜材のリベット接合部(孔引断面) における引張耐荷力算定結果を示す。引張載荷では、最大荷重4961kN時に、解析計算にお いて収束条件を満足しなくなった。勾配の急変する変曲点荷重は3517kNであり、概ね引張 斜材の全断面において塑性化が生じた荷重に一致している。図-6.6.9に変曲荷重時の上流側 外面相当塑性ひずみ分布図を示す。斜材側の全断面が塑性化に至る過程においてガセット 部の塑性化の進展が見られた。





	諸元		腐食考慮
耐荷力 算定値	斜材ウェブ板厚 (mm)	11	9.86
	斜材フランジ板厚 (mm)	10	7.79
	斜材の総断面積 (mm²)	15916	13315
(引張側)	斜材の降伏強度 (N/mm²)	274	274
	斜材の降伏耐荷力(kN)	4361	3648

表-6.6.1 斜材接合部の引張耐荷力の算定結果



図-6.6.9 1軸引張ケースの相当塑性ひずみ分布図(変曲点荷重時、上流側外面)

(4) 詳細モデルによる弾塑性有限変位解析

1) 解析条件

均一腐食を仮定して、上流側と下流側の 2 枚のガセットの板厚を均一に減じたモデルで 弾塑性有限変位解析を実施した場合、モデルが幾何学的に対称になるので、終局時の両側 のガセットの変形モードも対称となる。しかしながら、載荷試験から得られたガセットの 変形モードは図-6.4.3 に示すように両側のガセットが非対称であり、対称性を前提とした弾 塑性有限変位解析の結果とは変形モードが異なる。この理由は腐食量や腐食の分布が上流 側および下流側のガセットでそれぞれ異なるためであると考えられる。そこで本解析では、 腐食(部位別)ケースに対して、実際のガセットの腐食状況をより詳細に再現するために、 図-6.6.10 に示すように、シェル要素で構成されたガセットを複数の小領域に分割して、各 領域の平均板厚を 4 章で示した腐食量コンター図をもとに定めてモデル化を行うこととし た(以下、腐食(詳細)ケース)。ただし、斜材のフランジと重なる領域に関しては、その領 域の板厚が終局耐荷力に与える影響は少ないと考えられるため、大きな分割領域としてあ る。なお、図中の各領域は、さらに 16 要素に分割されている。解析では図-6.6.11 に示すよ うに、斜材の切断面から剛な梁要素を介した 1 節点に、段階的に強制変位を与える変位増 分法を用いた。また、斜材切断面から斜材軸方向に約 300mm の位置までの斜材の剛性はヤ ング係数を 100 倍に設定してある。これは、載荷点近傍の応力集中による斜材断面の過度 な変形を抑制するためである。その他の部材の構成則は、材料試験の結果から得た応力-ひ ずみ曲線をマルチリニア型モデルで近似し、200000μ以上のひずみ領域では傾きを 0 とし

たものを用いた。また、リベットはバネ要素でモデル化し、軸方向、せん断方向、回転方 向の3方向の線形バネ(表-6.5.2参照)を採用した。解析はFEMの汎用プログラム DIANA4.3 を使用した。材料非線形解析に関して、鋼材の降伏条件は von Misesの降伏条件に従い、関 連流れ則、等方硬化則を用いた。なお、ここでの解析と、前述の解析では異なる解析ソフ トを用いているが、同じ腐食条件の P25d 格点部の解析を行い、最大荷重がほぼ一致するこ とを確認している。

2) 解析結果と考察

図-6.6.12 に最大荷重の比較を示す。載荷試験では 3598kN であるのに対し、解析では 3690kN となった。試験値に対する解析値の比率(解析値/試験値)は 1.025 であり、試験値 と良く一致しているとともに、腐食(平均)ケース、腐食(部位別)のケースとの差は小 さい。また、図-6.6.13 に最大荷重時の斜材先端ガセットの面外変位分布を示す。解析結果 は、載荷試験の面外変位分布と良く一致している。

また、図-6.6.14 に最大荷重時の変形図と試験体の破壊状態の比較を示す。試験で得られ た格点部のガセットの最大荷重時の変形モードの特徴は、外側自由端部の湾曲と、ガセッ ト斜材先端部の局部座屈であり、両ガセットの自由端部は共に上流側に湾曲し、ガセット 斜材先端部の局部座屈はそれぞれのガセットの外側に向かって生じている。解析結果もガ セットの外側自由端が共に上流側に湾曲し、ガセット斜材先端部にはそれぞれ外側に変位 する座屈が生じ、試験の変形モードと良く一致している。



図-6.6.10 腐食量分布のモデル化 ※図中の数字は残存板厚(mm)





(a)最大荷重時の変形図(変形倍率:20倍)

(b)試験体の破壊状態



以上のように、耐荷力については平均残存板厚を基本とした解析モデルと詳細モデルで は大きな相違は見られなかった。一方、ガセットの変形挙動については、解析モデルにあ る程度詳細な腐食量分布を適用することによって、さらに精度良く再現できることが確認 された。しかしながら、今回、ガセットを分割した際の小領域のサイズは解析モデルの作 成上の都合から決められたものであり、小領域ごとの腐食量の詳細な測定には時間と手間 を要すること、腐食(部位別)ケースと比較して、最大荷重の差は同程度であることを考える と、どの程度詳細に腐食量を考慮すべきか検討することが今後の課題である。

6.7 まとめ

平成21年度に撤去された鋼トラス橋より切り出したトラス格点部を対象として、腐食量 計測後に、斜材軸力に対する圧縮耐荷力に着目した載荷試験及び弾塑性有限変位解析を行 い、破壊性状や残存耐荷力を把握するとともに、腐食状態のモデル化手法について検討を 行った。主な結果を以下にまとめる。

- 載荷試験の結果、ガセットの降伏耐荷力付近の荷重までは概ね線形性が保たれているが、 それ以降、勾配は徐々に緩やかになり最大荷重 3598kN に達した。荷重増加とともに、 ガセットの斜材先端部及びガセットの自由縁端部に面外変形が進行し、これらの部位の 局部的な変形の進行に伴い耐荷力を喪失し最大荷重に達したものと考えられる。最大荷 重以降は急激な荷重低下は見られなかった。
- 2)トラス格点部の腐食状態を平均残存板厚に換算してシェル要素によりモデル化に反映し 弾塑性有限変位解析を行った結果、耐荷力の解析値は試験値に対して腐食(平均)ケー スでは1.05、腐食(部位別)ケースでは1.01であり、試験値と解析値は概ね一致した。 腐食(部位別)ケースの耐荷力(3637kN)は健全ケースの耐荷力(4693kN)の約77%であり、 ガセットの腐食が耐荷力低下に影響を与えたものと考えられる。
- 3) 腐食ケースの解析結果については、初期剛性や下流側ガセットの面外変形挙動のように 一部試験結果と異なる部分が見られるが、最大荷重や全体挙動については試験結果と概 ね一致した。また、最大荷重に関して、板厚のモデル化を部位別の残存板厚に近づける と、解析値はある程度試験値に近づく傾向が見られた。ただし、その差はわずかであり、 今回の試験体では、腐食の影響を平均的な残存板厚としてモデル化することにより耐荷 力を概ね推定できることを確認した。

参考文献

- 6-1) FHWA : Load Rating Guidance and Examples For Bolted and Riveted Gusset Plates In Truss Bridges, 2009.
- 6-2) Whitmore, R.E.: Experimental Investigation of Stresses in Gusset Plates, Bulletin No.16, Engineering Experiment Station, University of Tennessee, May, 1952.
- 6-3) 日本橋梁建設協会:デザインデータブック、p.304、2011.

7. 腐食鋼部材の残存板厚計測への各種計測技術の適用性の検討

7.1 検討概要

道路橋の点検は、近接目視による定期点検を主体に行われている。一方、点検部位によっては目視だけでは健全度評価に必要な情報が得られない場合や、近接するのに労力を要し、必ずしも効率的・合理的でない場合があり、これらのニーズを踏まえた信頼性の高い 非破壊検査技術が求められている。非破壊検査技術については、他分野を含め数多くの研 究開発が行われているが、道路橋の維持管理への適用を考えた場合に、本来必要とされる 性能を満足するか否か明確でない場合も多く、このため、点検・調査技術に求められる性 能・仕様を明確にした上で、意志決定となる情報を提供するためのツールとしての適用条 件、適用方法を個別に明らかにしていく必要がある。

本章では、鋼部材の腐食欠損部を対象として、錆層上からの残存板厚の非破壊による計 測技術の適用性について検討するものである。板厚計測の非破壊検査技術については、こ れまでにも鋼構造分野において各種の技術が開発されている。腐食欠損に対しては、錆層 を除去した上で、防食を行い、必要に応じて補強となることから、計測技術としても点検 時に簡易に効率的に概略計測できる実用性の高い技術が求められる。鋼橋に関しては、例 えば、名取らは部材の片側から裏面の腐食を検知するために超音波探傷装置による板厚計 測について検討している⁷⁻¹⁾。探傷面の平滑性を確保すれば、裏面側における錆層の付着の 有無及び腐食による凹凸の有無にかかわらず、平均的な板厚を推定することができるとし ている ⁷⁻¹⁾。また、文献 7-2)では、複数の非破壊検査技術について表面の浮き錆を除去した 状態で適用した場合の計測性能の比較を行っている。一方では、これらの調査研究事例に おいても前提となる錆層の状態と各種技術の性能との関係については明確でない点もある。 本章では、これまで提案されている既往の非破壊検査技術を文献調査し、点検・調査への 適用が考えられる非破壊による計測手法を抽出するとともに、人工欠損試験体及び実腐食 試験体を対象とした残存板厚の計測を実施し、錆層除去前後での性能確認を実施した。ま た、非破壊検査技術ではないが、あわせて著者らが考案した簡易な板厚計測手法(以下、電 気抵抗検知式厚さ計)についても、同様の性能確認試験を実施し、適用性の評価を行った。

7.2 対象とした非破壊検査技術

7.2.1 既往の非破壊検査技術

(1) 調査方法

腐食欠損部の残存板厚の計測を対象とし、他分野を含め既往の非破壊検査技術の文献調 査を行い、適用可能と考えられる技術について抽出、整理を行った。調査対象は、鋼部材(鋼 板で構成された主構部材)の腐食欠損部の残存板厚を短時間に計測できる可能性のある実 用的な技術とし、計測するためのセンサは腐食欠損の生じている部位の直上に接触または 近接して配置することを前提条件とした。

(2) 調査結果

表-7.2.1 に、調査により抽出した主な非破壊検査技術を示す。対象とした鋼構造物は、鉄 道橋、石油・化学プラント、発電プラント、電力鉄塔、照明柱(標識柱、信号柱)、海洋・ 港湾構造物、船舶である。配管や石油タンク底面の腐食を対象とした主な技術としては、 超音波法、共鳴法(共振、打音法)、電磁誘導法(パルス渦流試験法)、放射線透過法による 非破壊検査技術がある。ただし、鋼材表面に錆が層状に生じているような著しい腐食状況 下において、錆を除去せずに残存板厚を計測できるかどうかといった点については、課題 も多く未知数である。なお、表-7.2.1 に示す以外の非破壊検査技術として赤外線サーモグラ フィ法、アコースティックエミッション法、自然電位法、光学的方法、高エネルギーの放 射線を利用した方法等が挙げられるが、腐食欠損部の残存板厚の計測精度等の点から、前 提条件を満たさないと考えられるため、本検討では対象としなかった。

甘生の種類	概 要				
1又111071里浜	波の分類	原 理	主な対象施設		
電磁誘導法	渦電流	板厚に応じた渦電流の変化に伴う検出電力の周波数分析により特定の周波数を選択増幅し、その検出電力の振幅とそれがゼロになるまでの時間変化を利用 ⁷⁻³⁾	配答		
(ハルトノーロルにいった)		上記と同様の検出電力の振幅と位相を利用7-4)	(発電, 石油・ 化学プラント等)		
	縦波または横波	電磁誘導を利用する非接触の電磁超音波センサを用いて,反射されるエ コーを受信するまでの経過時間と音速を利用 ⁷⁻⁵⁾			
超音波法	縦波	センサ内に充水することにより超音波ビーム幅を細めた垂直縦波センサと高 感度ログアンプ探傷器を組合せて、反射されるエコーを受信するまでの経過 時間と音速を利用 ⁷⁻⁶⁾	水門扉 (ダム, 堰等)		
共鳴法	可聴波	板厚に対して固有に定まる卓越周波数(共振周波数)の変化を利用 ⁷⁻⁷⁾	船舶		
(共振法, 打音法)	縦波または横波	様々な周波数のバースト波を逐次入射させ、横波の多重反射における共鳴 (共振)現象により強められた2つ以上の卓越周波数を利用 ⁷⁻⁸⁾	配管		
放射線透過法	X線	高感度のイメージングプレートを用いたデジタル放射線画像システムを用いて,透過線量の差を利用 ⁷⁻⁹⁾	(元电, 石油・ 化学プラント等)		

表-721	腐食部の残存板厚計測を対象	として抽出した主な非破壊検査技術 ^{7-3),}	~7-9)
4×-1.4.1	质皮前2/元1+10月前侧径刈家		

7.2.2 試験対象とした技術と概要

腐食欠損の生じた試験体を用いて既往の非破壊検査技術の腐食欠損部の残存板厚計測に 関する性能確認試験を行った。表-7.2.1に示す技術のうち、現時点で試験可能な技術として、 電磁誘導法、超音波法及び共鳴法から計3手法を選定した。具体的には、電磁誘導法とし てパルス渦流試験法を、超音波法として局部水浸探触子による超音波法を、共鳴法として 電磁超音波共鳴法の計3手法を選定した。図-7.2.1に選定した各手法の概要と計測原理の模 式図を示す。また、これらの技術の概要と性能確認試験に用いた技術の仕様を以下に示す。 なお、表-7.2.1に示した非破壊検査技術のうち、放射線透過法については、供用下での計測



図-7.2.1 対象とした非破壊検査技術の概要と計測原理の模式図

時に放射線管理の課題が避けられないことから、現場適用の実用性(錆層を除去して直接板 厚計測することに対する優位性等)の点から試験対象の技術としなかった。

(1) パルス式渦流探傷法

パルス渦流試験法では、コイルの励磁電流にパルス状の電流が用いられている。通常の 渦流探傷法は周波数が一定の交流正弦波を用いてセンサを走査してきず等を探傷するのに 対し、本手法ではコイルを計測部位に押し当て、励磁直後にコイルで受信される瞬間的な 渦電流の時間変化により残存板厚を計測する。被調査物の板厚および保温材厚によって、 直径 50mm~200mm 程度のコイルが用いられ、腐食していない健全部で計測装置の板厚校 正を行い、その健全部での渦電流の時間変化と相対比較することにより、センサのコイル 面積の範囲の平均的な板厚を計測する。文献 7-3)では、保温材や防食材で覆われた配管の 減肉調査のスクリーニング手法として、保温材や防食材に限らず非金属のものならばあら ゆるものを介して肉厚測定が可能(ただし、孔食は検出不可)であり、超音波厚さ計の結果 よりも若干の過大評価となるものの減肉傾向は確実に捉えられるとしている。

性能確認試験では、図-7.2.1(a)のセンサのリフトオフは 15mm に固定し、直径 φ 46mm 及 び φ 63mm のコイルを使用したが、φ 46mm のコイルでは錆層が厚い箇所で適切な計測値が 得られなかったので、本文では φ 63mm の結果を示す(7.4.2(3)に詳細を示す)。

(2) 局部水浸探触子による超音波探傷法

通常の超音波厚さ計の探触子は、孔食径と比べて振動子の直径が大きいため(通常多く用いられる 5MHz では振動子の直径は約 10mm)、腐食の凹凸した面には適用できないことが多い。このため、局部水浸探触子では、ピンポイントで探傷できるような、細い径を使用している点に特徴がある。探触子内に水を充水することにより、探触子内で超音波ビームを集束させている。探触子の寸法は、外寸高さ 32mm、胴部径 φ 17mm、先端径 φ 3.5mm(内径 φ 2.5mm)である。文献 7-6)では、錆・塗装上から板厚を計測可能であり、実際の水門扉から切り出したサンプルを用いた性能試験では、超音波厚さ計では計測不可であった一般腐食部の計測精度が±0.2mm 以内、著しい孔食部の計測精度が±0.5mm 以内であることを検証したとしている⁷⁻⁶。

性能確認試験では、計測方法として、多重エコー方式のうち第1回底面エコー(B1)と第2 回底面エコー(B2)との間隔から厚さを計測する B1~B2 方式⁷⁻¹⁰⁾を用いた。

(3) 電磁超音波共鳴法

電磁超音波共鳴法は、永久磁石とトラック状渦巻きコイルを組合せて電磁気作用によっ て、材料表面に直接駆動力を起こして超音波を発生させ、その超音波の板厚方向の多重反 射を用いて板厚を計測する方法である。コイルに用いる交流正弦波の周波数を変化させる ことにより様々な周波数の横波を励起し、逐次板厚方向に伝搬させ、鋼板表裏面間におい て生じる多重反射における共鳴(共振)現象により強められる卓越周波数(横波の波長)と板 厚の関係から残存板厚を算出する。文献 7-8)では、局部腐食を模擬した試験片を用いた性 能確認試験結果より、局部腐食を模擬した溝深さの推定が可能であり、溝形状で 0.1mm 未 満の精度で溝深さが計測可能であるとしている。

性能確認試験では、センサの寸法は、外寸が 50×50mm、内部の永久磁石の外寸が N 極 と S 極のいずれも面積が 15×14mm のものを使用した。

7.3 各種計測技術の適用性の確認試験

7.3.1 試験体

試験体には、腐食欠損を模擬した人工欠損試験体 2 体と、撤去された側道橋の腐食の著 しい桁端部から切り出した腐食欠損試験体 1 体の 2 種類を用いた。桁端部は、伸縮装置か らの漏水に伴い凍結防止剤等による塩分を含む水の影響を受けやすいこと、狭隘な空間の ため湿気がこもりやすいこと等より、腐食しやすい部位であることが知られている⁷⁻¹¹。

図-7.3.1 に、対象とした人工欠損試験体の寸法形状を示す。また、写真-7.3.1 に、腐食欠 損試験体の撤去前状況を示し、図-7.3.2 に、腐食欠損試験体の寸法形状を示す。


(a) 人工欠損試験体 1 (φ 19 円錐くぼみ)

(b) 人工欠損試験体 2(φ 52.2 円錐くぼみ)

図-7.3.1 人工欠損試験体の寸法形状



写真-7.3.1 腐食欠損試験体の撤去前状況



7.3.2 試験方法

(1) 各種汎用計測技術の仕様と計測状況

7.2.2 項に示した 3 種類の非破壊検査技術の計測精度を調査するため、錆除去後にレーザ 変位計を用いた残存板厚計測を実施した。各非破壊検査技術による計測、評価については、 各非破壊技術に対応した JIS Z 2305 に基づく資格を有し、かつ同技術を用いた腐食厚さ計測 の経験のある専門の計測技術者により行った。板厚校正は、人工欠損試験体では板厚 19mm の部分、腐食欠損試験体では比較的健全な板厚 13mm の部分を用いて行った。レーザ変位 計については残存板厚を算出するために試験体の表裏面を計測した。併せて、超音波厚さ 計(表面エコー・第1回底面エコー方式(S~B1 方式)⁷⁻¹⁰)及びキャリパーによる計測を行っ た。以下、レーザ変位計の計測値が真値と仮定して他の計測手法の計測精度等の適用性を 評価することとした。

人工欠損試験体では、パルス渦流試験法、局部水浸探触子による超音波法、電磁超音波 共鳴法、超音波厚さ計による計測法、レーザ変位計による計測法の5種類を対象とし、腐 食欠損試験体では、これらにキャリパーによる計測法、電気抵抗検知式厚さ計による計測 法の2種類を加えて7種類を対象とした。表-7.3.1に試験体と対象とした非破壊計測技術の 一覧を示す。

使用した各種汎用計測技術の主な仕様は、以下のとおりである。超音波厚さ計は、計測 精度±0.1mm(板厚 1.5~19.9mm)、±0.5%×計測値(板厚 20.0~250mm)、分解能 0.1mm で ある。キャリパーは、計測精度±50μm、分解能 0.05mm である。レーザ変位計は、計測精 度±30μm、分解能 3μm であり、計測距離 80mm の位置でのレーザ光のスポット径(直径)が φ約70µmのものを用いた。

写真-7.3.2 に、これらの計測技術による計測状況を示す。

対験体の種類	対象とし	た計測技術
武徳1407連須	腐食欠損部を対象とした非破壊検査技術	その他汎用計測技術
人工欠損試験体1,2	パルス渦流試験法 局部水浸探触子による超音波法 電磁超音波共鳴法	レーザ変位計による計測法 超音波厚さ計による計測法
腐食欠損試験体	パルス渦流試験法(錆除去前後) 局部水浸探触子による超音波法(錆除去前) 電磁超音波共鳴法(錆除去前)	レーザ変位計による計測法(錆除去後) キャリパーによる計測法(錆除去前後) 超音波厚さ計による計測法(錆除去前後) 電気抵抗検知式厚さ計による計測法(錆除去前)

表-7.3.1 対象とした計測技術の一覧

注:括弧内には、計測時の錆状態を示す.



(c) レーザ変位計

写真-7.3.2 各種計測技術による腐食欠損量の計測状況

(2) 欠損試験体の計測位置

図-7.3.3 に、人工欠損試験体の計測ライン及び計測ピッチを、図-7.3.4 に、腐食欠損試験 体の計測ライン、計測面及び計測ピッチを示す。ここで、計測ラインとは腐食状況と計測 値との対応関係を断面で示すための代表値として選定したものである。計測範囲と計測ピ ッチは、人工欠損試験体では、センサの計測面積を考慮し、かつ試験体端部の影響が含ま れないように、欠損の中央を中心として計測ライン上を 2mm ピッチで欠損部が含まれる範 囲とした。このピッチは人工欠損を有する部材の力学的性能を把握できる程度の計測密度 として設定したものである。腐食欠損試験体では、試験体中央から 1×1cm の格子ピッチで ウェブ付近を除いた計測面積 8×20cm の範囲 2 つ(計測面①②)とした。また、計測は、人 工欠損試験体では、欠損部(円錐くぼみ)を裏面にして欠損のない平滑面側から、腐食欠損 試験体では、ウェブのないフランジ下面側から各種のセンサを配置して行った。





図-7.3.4 腐食欠損試験体の計測位置(計測ライン①②及び計測面①②)

(3) 腐食欠損試験体の残存板厚

図-7.3.5 に、レーザ変位計による計測面①②の全計測点(それぞれ 189 点)の板厚頻度分布 を示し、図-7.3.6 に、腐食欠損試験体の残存板厚のコンターを示す。図-7.3.5 (b)では、パル ス渦流試験法の場合、計測値が原則的にコイル(直径 φ 63mm)を当てる領域内の平均的な板 厚量を計測するものであることから、レーザ変位計の計測値との比較をより適切にするた め、このコイル直径(φ 63mm)を考慮し、これに内接する 40mm 四方の正方形及び外接する 63mm 四方の正方形の面積内の板厚平均値(以下、それぞれ 40mm 四方レーザ平均値、63mm 四方レーザ平均値)を算出し、計測面②において算出可能な全計測点(ぞれぞれ 85 点、60 点) の板厚分布を併記した。



注)計測点数は、ウェブの影響により計測できなかった点 (白色部分)を除き、189×2=378 点

7.4 試験結果と考察

7.4.1 人工欠損試験体

図-7.4.1 に、各計測手法による人工欠損試験体の計測結果を示す。人工欠損試験体につい ては、レーザ変位計では設計図値との誤差がほとんどない計測値が得られたので図中では 省略する。超音波厚さ計は、裏面側のくぼみをある程度認識しているが、設計図値との誤 差が大きく、レーザ変位計ほどの精度は得られなかった。その他、パルス渦流試験法、局 部水浸探触子超音波法及び電磁超音波共鳴法における計測値は、裏面側のくぼみ部分につ いて、それをほとんど認識できない箇所や適切な計測値が得られない(以下、計測不能)箇

図-7.3.6 腐食欠損試験体の残存板厚コンター(レーザ変位計計測値)

所が見られた。

図-7.4.2 に、パルス渦流試験法による計測値と、そのコイル直径(φ63mm)を考慮し、こ れに内接する一辺 40mm 四方の正方形及び外接する 63mm 四方の正方形の面積内の設計図 上の板厚の平均値(以下、それぞれ 40mm 四方設計平均値、63mm 四方設計平均値)と比較し た結果を示す。40mm 四方設計平均値では、計測ライン上の円錐くぼみの設計図値よりも厚 い周辺の板厚平均値となるため、計測値に近づく結果となり、さらに 63mm 四方設計平均 値では計測値とほとんど一致した結果となった。このようにパルス渦流試験法による計測 値は、センサ周辺の平均板厚と比較することにより、良好な相関性が見られた。また、後 述する腐食欠損試験体でも、計測値と平均板厚との比較において良好な相関性が見られて いる。





7.4.2 腐食欠損試験体

(1) 計測ラインに対する各計測手法の計測精度の比較

図-7.4.3 に、レーザ変位計で計測した腐食欠損試験体のフランジ上面・下面形状及び残存 板厚を示す。ここでは、基準高さを決めて、フランジ上下面の各計測箇所の変位を計測す ることにより板表面の凹凸形状を計測し、上下面の変位量の差より残存板厚を算出してい る。すなわち、フランジ上面及び下面形状の折れ線グラフは、計測ライン①では腐食が比 較的軽微であることを、計測ライン②では腐食が著しい位置であることを示している。

図-7.4.4 に、腐食欠損試験体の計測ライン①②における計測結果を示す。錆が鋼材表面に 付着している状態で残存板厚を計測できるかを確認する目的で、錆を除去する前の状態(以 下、錆除去前)で計測した。また、残存板厚を正確に把握するために、錆を完全に除去した 状態(以下、錆除去後)にして板厚計測を行った。

計測ライン①における腐食が比較的軽微な箇所では、超音波厚さ計では若干大きめの値を示し たが、他の計測手法では、真値(13mm)に近い計測値が得られた。計測ライン②における腐食が 比較的著しい箇所では、超音波厚さ計、電磁超音波共鳴法及び局部水浸探触子超音波法の場合、 適切な計測値が得られなかった。特に、超音波厚さ計は、腐食による表面及び底面の凹凸が大き く、超音波が試験体に入射しないため計測できない、または探触子面に対して平行な面が底面側 になく反射波が探触子に戻らず計測できない可能性が考えられる。超音波厚さ計の場合、計測ラ イン①(図-7.4.4 (a))では計測できたものの、錆層で音速が変わることによる影響等のため計測値 が若干大きくなったものと考えられる。錆除去後のキャリパーとレーザ変位計の計測値はある程 度の相関性がみられた。錆除去前のパルス渦流試験法では、計測値は得られたものの、錆除去後 におけるキャリパーやレーザ変位計の計測値との相関は見られなかった。錆除去前と錆除去後に おけるキャリパーの計測値を比較すると、計測ライン①側は桁外面側で腐食が比較的軽微な箇所 で、計測ライン②は桁内面側で腐食が著しい箇所であることを端的に示している。

図-7.4.5 に、パルス渦流試験法の錆除去前及び錆除去後の計測値と除去後の40mm 四方レ ーザ平均値を示す。図-7.4.4 における計測ライン②では、レーザ変位計とパルス渦流試験法 との差(ともに、錆除去後)は最大約7mmの差が生じていたが、計測差が最大でも4mm弱 まで近づく結果となった。板厚分布(レーザ変位計計測値)においても、図-7.4.4(b)と比較し て、より平均化していることがわかる。

108





(2) 計測面に対する各計測手法の計測精度の比較

図-7.4.6 及び図-7.4.7 に、全計測位置について、それぞれ錆除去前後におけるレーザ変位 計による板厚計測値と各計測手法との比較結果を示す。計測不能点については、縦軸の値 をゼロとして図中にプロットしている。図中には、計測点数、計測不能点数、計測不能点 を除いて算出した平均誤差、標準偏差及び相関係数を示した。

パルス渦流試験法では、計測値がレーザ変位計計測値よりも厚く評価している。また、 計測点を全て計測できており、計測不能な点はなかった。なお、図-7.4.7 (b)より、錆除去後 についても計測精度としては必ずしも高いとは言い難い。また、図中では 5mm 程度以下の 薄い板厚の計測値が得られていない。計測技術者へのヒアリングによれば、板厚校正値(本 計測では板厚 13mm)に対して、40%程度以下の板厚(5.2mm 程度以下の板厚)となる場合で は適切な計測値が得られない可能性があるとしており、適切な計測値が得られる範囲を超 えているものと考えられる。

超音波厚さ計については、(1)に記述したとおり、腐食による表面及び底面の凹凸が激し い場合には、値が安定しない、もしくは誤った値が生じる等、計測不能な場合が多かった。 別途垂直探触子(仕様:φ10mmの振動子を用いた縦波用の非集束垂直探触子、φ5mm半円 二分割の振動子を用いた焦点距離3.5mmの縦波用の線集束二振動子垂直探触子の2種類) を用意し、探傷を試みたが、やはり板厚を推定するのが難しい点では同様であった。

図-7.4.7 (a)より、錆除去前のキャリパー計測値は、残存板厚によらず 10~22mm の値を示 しており、少なくとも外観からの残存板厚の推定は難しいと言わざるを得ない。その他の 計測手法では、計測面①側(ほとんど腐食していない側)の結果はほぼ計測できているもの の、計測面②側(腐食の激しい側)では計測できないか、計測できたとしても計測精度は低 いことがわかる。この計測不能となる理由について、以下に各手法別に述べる。局部水浸 探触子による超音波法では、超音波厚さ計と比較すると計測不能点数は減っているものの、 計測不能の場合には探傷感度を上げる等を実施してもノイズと区別できる明瞭なエコーは 得られなかった。超音波厚さ計で用いられる探触子と比較するとピンポイントで探傷でき るように細い径の探触子としている効果は確認できるものの、計測不能となる場合には錆 層が超音波の鋼板への入射伝搬を困難にしているものと考えられる。電磁超音波共鳴法で は、激しい腐食による表裏面の凹凸のため、鋼板表裏面間の多重反射によって生じるはず の複数の共鳴エコーが識別できず、計測値そのものを得ることができなかった。従って、 局部水浸探触子による超音波法とは逆に、錆層による影響というより表裏面の凹凸の影響 を受けているものと考えられる。

110







(3) パルス渦流試験法の計測値に対する考察

パルス渦流試験法については、他の非破壊計測手法と比較して、計測ライン②や計測面 ②の腐食の激しい側においても計測不能な点はなく、全ての計測点を計測できたことから、 さらに計測値に対する考察を行った。

図-7.4.8 に、錆除去後の計測面①におけるパルス渦流試験計測結果(ウェブに対して直角 方向に計測値を 10mm 間隔で整理)とウェブ位置関係の比較を示す。本計測手法では、コイ ル面の範囲内の板厚の平均的な値を計測することから、計測位置がウェブに近づくほど計 測値が大きくなる傾向が見られる。また、ウェブ付近が凸状になっており、計測値がウェ ブの形状に影響していることを端的に示している。コイル直径 φ 63mm を考慮すると、計測 裏面のウェブにコイルが掛からない限界値は、ウェブ中心から 36.5mm 離れた位置となる。 概ね計測値が健全時の板厚 13mm より厚くなる位置は、この位置と一致している。なお、 負側の計測値は実際に減肉している部分を示している。

図-7.4.9 に、計測面②に対しての錆除去前後のそれぞれの状態において、ウェブの影響を 受けないと考えられるウェブ中心から 36.5mm 離れた位置での計測値を抽出し、63mm 四方 レーザ平均値と比較した結果を赤丸のプロットで示す。なお、ウェブの影響を受けた可能 性が高いと考えられる計測値(ウェブ中心から 36.5mm までの範囲)についても青丸のプロ ットで併記した。図-7.4.6 (c)(ii)および図-7.4.7(b)(ii)と比較して、錆除去前後のいずれの状態 においても、平均誤差及び標準偏差が小さくかつ相関係数が大きくなっており、計測精度 は高くなっている。

図-7.4.10 に、計測面②に対しての錆除去前後のそれぞれの状態において、レーザ変位計 による表面側の形状のみの 63mm 四方レーザ平均値(裏面側を平滑と仮定。)と比較した結 果を示す。錆除去前及び錆除去後の計測値ともに、レーザ変位計の表面計測値より低い値 が得られたことより、裏面側の形状が計測値に影響していることを示している。

図-7.4.11 に、パルス渦流試験法における錆除去前後の計測値の比較結果を示す。錆除去 前後の計測値には高い相関性が見られており、錆除去前の計測値においても、今回の腐食 欠損試験体に関して言えば、精度は高くないものの、板厚校正を適切に行えば、ある程度 の計測値が得られるものと考えられる。ただし、前提として、ウェブ等の影響を受けない 平滑な鋼板腐食面での計測である必要がある。

(4) パルス渦流試験法におけるコイルのサイズの影響

7.2.2(1)に示した直径 φ 46mm のセンサを用いたときのパルス渦流試験法について補足 する。腐食欠損試験体について、腐食の厳しい計測面②に対する計測結果を図-7.4.12 に示 す。φ 63mm のセンサと比較するために、図-7.4.9 と同様に、錆除去前後において 46mm 四 方のレーザ変位計計測平均値との比較図として整理した。錆除去前の計測値としては、 15mm を超える値は計測異常値の扱いとして 15mm としてプロットした。最大計測異常値は 約 870mm であった。一方、錆除去後は、概ねφ 63mm のセンサと類似した値を示した。ま た、人工欠損試験体についても概ねφ63mmのセンサと類似した値を示した。同図より錆除 去前の計測値にのみ大きな誤差が含まれることから、パルス渦流試験法では、錆層が激しい 場合には、センサのコイルのサイズにより、誤差を多く含む場合がある結果が得られた。こ の原因を解明するためには、今後のさらなる検討が必要と考えている。



図-7.4.8 パルス渦流試験法計測結果とウェブ位置関係の比較(錆除去後・計測面①)



※図中の(13、13)は、試験体の元板厚13mmを示す。





※図中の(13、13)は、試験体の元板厚13mmを示す。

図-7.4.10 レーザ変位計計測平均値(計測面側の欠損量)とパルス渦流試験法計測結果の比較(計測面②)



※図中の(13、13)は、試験体の元板厚 13mm を示す。 図-7.4.11 パルス渦流試験法における錆除去前後の計測値比較(計測面②)





7.5 実用的簡易計測手法の提案と適用性の検討

前節で述べたように、既往の非破壊検査技術では、現状では錆が付着した状態での残存 板厚の計測は難しいか、適用上制約がある。一方で、詳細な板厚計測が必要な場合や、防 せい防食等を実施する場合には、錆層を除去することになることから、その前段階の点検 手法としては、簡易的な手法でなければ、現場ニーズに合わないものと考えられる。そこ で、出来るだけ簡易で、かつ精度の高い計測手法として、施工総合技術研究所との共同研 究「鋼部材の腐食状況の簡易計測機器の開発に関する共同研究(平成 21~22 年度)」において、 錆層上からの計測手法(電気抵抗検知式厚さ計)を考案している。 以下に、この厚さ計の概 要と、計測性能の検討結果を示す。

7.5.1 電気抵抗検知式厚さ計の概要

(1) 厚さ計の特徴

図-7.5.1 に、電気抵抗検知式厚さ計の模式図とプロトタイプを示す。キャリパー方式の厚 さ計測器と同様に、対象鋼板両面側から計測部を当てて、計測部間の距離によって板厚を 計測するものである。計測部先端には測定ピンを設け、これを錆(腐食生成物)に貫通させ て、対象物の厚さを直接計測するものである。計測手順としては、図に示すように、1)計測 部先端の測定ピンを回転させながら腐食生成物等に貫入させる、2)測定ピンの鋼材表面への 到達を電気的抵抗値によって検知し、測定ピンの貫入を停止させる、3)この時点での上下の 両測定ピン先端間の距離を内蔵した変位計により厚さを計測する、となる。腐食生成物や 塗膜の電気的な抵抗が鋼材のそれより著しく高いことを利用したものである。

なお、図中のプロトタイプはフランジ等を両面から挟み込んで計測することを想定したもので あり、形状寸法などは洗練されたものではないが、今後、鋼板厚さを計測する場合の奥行につい て、鋼桁端部のウェブの範囲までの計測を可能とした治具への改良、ウェブを対象として片面側 からの計測を可能とした改良、及びよりコンパクトで扱いやすい装置への改良等を進めたいと考 えている。



 (a) 電気抵抗検知式厚さ計と計測方法の模式図
 (b) 計測装置プロトタイプ

 図-7.5.1
 電気抵抗検知式厚さ計の概要

(2) 鋼材表面の検知方法の検証

同厚さ計の原理は簡単なものであるが、実橋の鋼材面の場合には、塩を含む水分の付着 により、抵抗値が低下し、鋼材表面位置を捉えられなくなることが、装置の考案段階で懸 念された。

そこで、プロトタイプ製作の事前検討として、蒸留水や塩水そのものの電気抵抗や、塩 水を散布した腐食鋼板を用いて、ピンの貫入とともに変化する電気抵抗を計測した。表-7.5.1 は、蒸留水や塩水に電極を挿入し、電極間の抵抗を計測した結果を示す。多少のバラツキ はあるものの、10%濃度の塩水の電気抵抗が最も小さく、その値は端子間距離 1mm では 22kΩ であった。次に、腐食した鋼板に、10%濃度の塩水を完全な湿潤状態となるように散 布し、測定ピンの貫入にともなう電気抵抗の変化を計測した。その結果を図-7.5.2 に示す。 測定ピンが腐食生成物内を進入しているときの電気抵抗は 10kΩ 以上を示していたが、鋼材 に到達(腐食生成物を完全に貫通)したときには、電気抵抗は 1Ω 以下と著しく低下した。

以上のことから、塩水等が付着していても、測定ピンと鋼板間の電気抵抗をモニターし ながら測定ピンを貫入することで、腐食生成物に覆われた鋼材の表面位置を正確に捉え、 残存板厚を計測することが可能であることが確認できた。また、測定ピンの電気抵抗の変 化を検知することにより客観的に計測が可能であり、技術者の技量による精度の違いはほ とんどない手法と考えている。なお、プロトタイプでは測定ピンが鋼材に接触した時点で 測定ピンを停止するようにしており、鋼材表面にきずを付けるようなことはなかった。測 定ピンによる鋼材到達(錆層貫通)の判断基準となる電気抵抗のしきい値(図-7.5.2 より約1 ~0.001Ω)については、1橋梁の錆層に対する値であり、今後、実橋の錆層の条件下での現 場検証によるデータの蓄積が必要と考えている。

表-7.5.1 電気抵抗の計測結果

	端	子間距離	推
	1mm	1cm	5cm
蒸留水	2,500	350	1,270
塩水(5%濃度)	30	30	28
塩水(10%濃度)	22	27	24



7.5.2 厚さ計の性能確認試験

電気抵抗検知式厚さ計の残存板厚計測への適用性を検討するために、前節までに示した 非破壊計測技術の性能確認試験と同様の試験を行った。計測対象は図-7.3.4 に示す腐食欠損 試験体とした。計測状況を写真-7.5.1 に示す。測定ピンによる鋼材到達(錆層貫通)の判断基 準となる電気抵抗のしきい値は 1Ω とした。図-7.5.3 に、腐食欠損試験体の計測ライン①② における、レーザ変位計及び同厚さ計による計測値の比較結果を示す。計測ライン①②と もに両者は良く一致しており、特に、腐食が著しい計測ライン②では、錆を除去しなくて も精度の高い計測値が得られた。

図-7.5.4 に、全計測位置における、レーザ変位計の板厚計測値と同厚さ計による計測値の 比較結果を示す。レーザ変位計の計測値との高い相関が認められる。なお、計測面①②の 各計測点数は、144 点、128 点となっているが、残りそれぞれの 45 点(=189-144)、61 点(= 189-128)は、計測装置の治具の制約により計測できなかった位置(計測面①②それぞれの 中央部分であり、測定ピンが計測位置に届かず計測装置を設置できなかった部分)である。

以上により、錆除去前での計測手法として、直接鋼材表面を計測することができる電気抵 抗検知式厚さ計は計測精度が高く、実用性は高いと言える。







図-7.5.4 電気抵抗検知式厚さ計及びレーザ変位計における板厚計測結果の比較

7.6 まとめ

鋼部材の腐食欠損量の非破壊計測に関して、既往のパルス渦流試験法、局部水浸探触子 による超音波法及び電磁超音波共鳴法の3手法を対象として、腐食欠損試験体を用いた計 測性能確認試験を行い、一般的に用いられている計測手法とともに、計測精度等、適用性 の評価を行った。また、残存板厚を直接計測する手法として、電気抵抗検知式厚さ計を考 案し、同様の試験により適用性の評価を行った。以下に、主な結果をまとめる。

- 人工欠損試験体において、局部水浸探触子による超音波法及び電磁超音波共鳴法では、 円錐くぼみ(人工欠損)による板厚差を認識できない計測結果が得られ、適切な値が得られ れなかった。
- 2) 腐食欠損試験体において、直接的な計測手法である電気抵抗検知式厚さ計はレーザ変位 計の計測値と相関性が高く、本計測法の実用性が確認された。鋼板表面の錆層がある状 態では、超音波法、電磁超音波共鳴法では計測困難であった。
- 3) パルス渦流試験法では、人工欠損試験体及び腐食欠損試験体において、計測不能となることなく、全ての計測値は得られたものの、レーザ変位計の直接の計測値との相関性は、 錆除去前後の両方の計測値において高いものではなかった。同手法がコイル部分の平均 的な板厚量が計測されるという特徴を踏まえ、コイル部に対応する範囲の計測値平均値 と比較したところ、人工欠損及び腐食欠損(ウェブやリブなど附属物がある計測点を除い た腐食欠損)のいずれの場合でも、相関性が相対的に改善された。

参考文献

- 7-1)名取暢、西川和廣、村越潤、大野崇:鋼橋の腐食事例調査とその分析、土木学会、土
 木学会論文集、No.668/I-54、pp.299-311、2001.1.
- 7-2) 土木学会:腐食した鋼構造物の耐久性照査マニュアル、鋼構造シリーズ18、pp.176-197、 2009.3.
- 7-3) 例えば、古海寛:保温材上や防食材上からの肉厚測定-INCOTEST-、非破壊検査、
 第 55 巻 3 号、pp.109-113、2006
- 7-4) 例えば、杉本和彦、木村幸夫:金属管路の肉厚測定に関する一考察、土木学会、年次 学術講演概要集、第42回、VI-27、pp.70-71、1987.9.
- 7-5) 例えば、藤懸洋一、川島捷宏、山田 敏行:(654) 横波電磁超音波法による腐食残存肉 厚の測定、日本鉄鋼協会、鐵と鋼、日本鐡鋼協會々誌、71(13)、S1437、p.233、1985.9.
- 7-6) 例えば、上林正和、川上善道、高木直樹、土生川直二、前川伸:鋼構造物(水門扉)の 腐食劣化に対する余寿命診断技術及びシステム(CLAS-G)、三菱重工技報、vol.43、No.1、 2006.
- 7-7)例えば、島田道男、吉井徳治、成瀬健:鋼板の反発を利用した厚さ測定法の検討、-インパルスハンマによる方法-、(社)日本非破壊検査協会、超音波による非破壊評価シンポジウム講演論文集、第8回、7-6、pp.153-158、2001.1.

- 7-8) 例えば、三谷欣也、中山吉晴、金井英一、望月正人、豊田政男:電磁超音波共鳴スペクトルによる鋼板の減肉評価、(社)溶接学会、溶接学会論文集、第25巻、第4号、 pp.507-513、2007.11.
- 7-9) 例えば、取違正明、松本拓俊、宮澤敬之、茶園聡、和田恭子:X 線画像処理によるボ イラのき裂評価技術、三菱重工技報、Vol.46 No.2(2009)、発電技術特集、pp.66-70、2009.
- 7-10) (社)日本規格協会: JIS Z 2355、 超音波パルス反射法による厚さ測定方法、2005.
- 7-11) 国土交通省国土技術政策総合研究所:鋼道路橋の局部腐食に関する調査研究、国土技 術政策総合研究所資料 第 294 号、2006.1.

8. まとめ

撤去された鋼トラス橋の腐食部材を活用して、橋全体系の安全性への影響の大きい格点 構造及びその周辺部に着目し、現地載荷試験及び弾性3次元 FEM 解析を行い、主構部材の 応答算出のための橋全体系のモデル化手法の検討、腐食欠損等の不確実要因の影響の感度 解析、耐荷性能評価手法の検討を行った。また、撤去部材の腐食状況計測、載荷試験及び 弾塑性 FEM 解析を行い、破壊性状や残存耐荷力を把握するとともに、腐食状態のモデル化 手法について検討を行った。さらに、鋼部材の腐食欠損量の非破壊計測に関して、既往技 術の適用性の評価等を行った。本研究で得られた主な結果を以下にまとめる。

(1)鋼トラス橋の現地載荷試験と耐荷性能評価

- 主構部材の軸方向力による挙動に関して、軸力成分の実測値は、解析値と概ね一致すること、主構部材が破断していない状況では、腐食欠損の状況や床版と縦桁の結合条件が、各主構部材の断面力分担に及ぼす影響は小さいことがわかった。
- 2) トラス格点部斜材取付け部では、活荷重載荷時に主構部材に面内・面外曲げによる二次応力が発生しており、かつ同部位は構造上腐食欠損が著しい部位と一致しており、耐荷力上、構造的弱点となる可能性がある。これらの部位の残存耐荷性能の評価にあたっては、二次応力や腐食損傷の影響を適切に評価することが重要と考えられる。
- 3) 鋼トラス橋の斜材破断事例を踏まえ、弾性解析を用いた現行設計基準に基づく耐荷性 能評価と、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に基づく耐 荷性能評価を組み合わせることにより、各部材の破壊時の相対的な影響度を評価する 一方法を示した。なお、あくまでも弾性解析に基づく結果であり、弾塑性解析との結 果の相違の有無、適用の範囲・条件については今後の課題である。

(2) 模擬腐食を導入したトラス斜材の載荷試験

- 斜材試験体の耐荷力に関して、腐食形状や断面欠損の状態が大きな影響を与えること がわかった。また、減肉部では初期降伏後、荷重増分に伴って塑性化が進展するとと もに座屈変形が集中するため、今回の試験体では初期たわみ分布の影響は相対的に小 さかった。
- 3) 試験および解析により得られた残存耐荷力は、試験体の最小断面積から求められる最大断面欠損率 R_Aを用いて評価でき、残存耐荷力 P_{max}を現行設計基準における柱の基準耐荷力曲線から求めた基準耐荷力 P_uで無次元化した P_{max}/P_u と R_Aの線形関係式を提案した。

(3) 腐食劣化の生じたトラス格点部の載荷試験

- E縮荷重と鉛直変位の関係に関して、ガセットの降伏耐荷力付近の荷重までは概ね線 形性が保たれているが、それ以降、勾配は徐々に緩やかになり最大荷重(3598kN)に達し た。荷重増加とともに、ガセットの斜材先端部及びガセットの自由縁端部の面外変位 が進行し、これらの部位の局部的な変形の進行に伴い耐荷力を喪失し最大荷重に達し たものと考えられる。
- 2) トラス格点部の腐食状態を平均残存板厚に換算してシェル要素によりモデル化して弾 塑性 FEM 解析を行った結果、耐荷力の解析値は試験値に対して腐食(平均)ケースで は1.05、腐食(部位別)ケースでは1.01 であり、試験値と解析値は概ね一致した。腐 食(部位別)ケースの耐荷力(3637kN)は健全ケースの耐荷力(4693kN)の約 77%であり、 ガセットの腐食が耐荷力低下に影響を与えたものと考えられる。腐食ケースの解析結 果については、初期剛性や下流側ガセットの面外変位のように一部試験結果と異なる 部分が見られるが、最大荷重や全体挙動については試験結果と概ね一致した。また、 最大荷重に関しては、板厚のモデル化を部位別の残存板厚に近づけると、解析値はあ る程度試験値に近づく傾向が見られた。ただし、その差はわずかであり、今回の試験 体では、腐食の影響を平均的な残存板厚としてモデル化することにより、耐荷力を概 ね推定できることが確認できた。

なお、1 格点試験体についての実験的・解析的成果をまとめたものであり、実橋における 格点部の腐食状況は様々であることから、今後種々の腐食形態を有する格点部を対象にし た実験および解析、実用的な腐食量計測の手法と耐荷力算定式の検討が必要と考えられる。

(4)残存板厚計測への各種計測技術の適用性

既往技術であるパルス渦流試験法、局部水浸探触子による超音波法及び電磁超音波共鳴 法の3 手法を対象として、腐食欠損試験体を用いた計測性能確認試験を行い、計測精度等、 適用性の評価を行った。また、残存板厚を直接計測する手法として、電気抵抗検知式厚さ 計を考案し、同様の試験により適用性の評価を行った。

- 人工欠損試験体において、局部水浸探触子による超音波法及び電磁超音波共鳴法では、 円錐くぼみ(人工欠損)による板厚差を認識できない計測結果が得られ、適切な値が得られなかった。
- 2) 腐食欠損試験体において、直接的な計測手法である電気抵抗検知式厚さ計はレーザ変 位計の計測値と相関性が高く、本計測法の実用性が確認された。鋼板表面の錆層があ る状態では、超音波法、電磁超音波共鳴法では計測困難であった。
- 3) パルス渦流試験法では、人工欠損試験体及び腐食欠損試験体において、計測不能となることなく、全ての計測値は得られたものの、レーザ変位計の直接の計測値との相関性は、錆除去前後の両方の計測値において高いものではなかった。

謝 辞

本研究における鋼トラス橋の現地での載荷試験、土木研究所での撤去部材の腐食量計測 や載荷試験の実施にあたっては、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。

付属資料1

引張を受ける腐食鋼板の試験結果及び残存試験データの整理

付属資料1 引張を受ける腐食鋼板の試験結果及び残存試験データの整理

(1) 検討概要

腐食鋼材の引張耐荷力の評価方法については、これまでにも数多くの調査研究が行われ ている。本項では、過年度に著者らが実施した試験結果と腐食試験体に対して新たに実施 した試験結果を比較するとともに、既往の調査研究も含めて腐食部材の引張耐荷力の評価 式に関する検討を行う。

(2) 試験体と試験方法

1) 調査対象とした腐食鋼材

腐食鋼材には、長期間供用されて撤去に至った鋼トラス橋の部材(上弦材)を用いた。図 -付1.1にトラス橋の全景と入手した部材位置を示す。本橋は1936年に竣工し、1991年に供 用が停止され、対象径間は2005年に撤去された。同橋は、日本海側、海岸線から3kmの位 置に建設されていた。供用停止から撤去されるまでの間、塗装塗替えはされていなかった と推察される。塗装の種類、最後の塗替え時期は不明である。図-付1.2に入手した上弦材



図-付 1.1 調査に用いたトラス橋 ※撤去直前の状況と入手した上弦材の位置を破線で示す。



(a) 下面 (天地反転)

(b) トラス上弦材内部のこぶさび

図-付1.2 入手したトラス上弦材の外観

の外観と内部の状況を示す。上弦材は、平鋼板と山形鋼をリベットで接合した断面で構成 されており、下フランジにはレーシング材が配置されていた。上下フランジの下面とウェ ブ内面には、こぶさびを伴う著しい腐食が見られた。レーシング材も同様であり、腐食に より消失している箇所が多数見られた。雨に洗われやすい上下フランジの上面及びウェブ 外面は腐食の程度が軽微であった。試験体は上フランジより切り出した。図-付 1.3~図-付 1.4 に、切り出した後、機械加工された試験片を示す。試験片は、ガス切断で所定の大きさ よりも大きめ(ガス切断線から 50mm 程度)に切り出した後、機械加工により所定の形状寸法 に加工した。

撤去部材(上弦材)の上フランジから鋼材を切り出した後、JIS Z2241 による引張試験片の 形状に加工した。腐食の凹凸の影響を除去するため、凹凸がなくなるまで研磨を行った。 引張試験は、JIS Z2241 によった。

2) 試験体

図-付 1.3 に試験体(以下、腐食試験体)の寸法を示す。図-付 1.4 に腐食試験体の腐食状況を示す。また、腐食試験体の他に、比較のため、平滑材に円孔等の人工欠損を設けた試験体(以下、人工欠損試験体)4 体についても引張試験を実施した。図-付 1.5 に代表的な試験体の寸法形状、4 体の人工欠損部の詳細を示す。



(a) 試験体 A-1~A-3 (3 体)

(b) 試験体 B-1~B-3 (3 体)

図-付1.3 腐食試験体の寸法形状(単位:mm)







(a) 全体図(試験体 C-1)



- (3) 試験結果と考察
- 1) 腐食状況の計測結果と試験結果

腐食状況の計測はレーザ変位計により、0.2mm 間隔で行った。表-付 1.1~表-付 1.2 に腐食 試験体及び人工欠損試験体の板厚計測結果と引張試験結果を示す。図-付 1.6 に平均板厚、 最小板厚及び最小平均板厚の定義を示す。いずれの試験体も円孔もしくは人工欠損を設け た最小断面積の部分で破断した。

試験体	元板厚 (mm)	元幅 (mm)	平均板厚 (mm)	最小板厚 (mm)	最小平均 板厚 (mm)	円孔部 最小板厚 (mm)	円孔部 最小断面積 (mm ²)	最大引張 荷重 (kN)	伸び (%)	備考 (材料強度)
A-1	12	60	11 82	9 25	10 94	9 01	463 96	197 23	8 66	引張強度
A-2	12	60	12 34	10 06	11 63	10 86	478 58	202 55	8 04	424 5 N/mm ²
A-3	12	60	11 76	8 23	10 60	7 98	417 64	169 93	7 97	降伏強度
B-1	12	40	9 41	8 42	10 29	986	206 74	81 16	8 44	243 9 N/mm ²
B-2	12	40	11 99	8 44	12 92	11 50	254 25	98 9 2	4 45	伸び
B-3	12	40	12 06	8 17	11 04	5 11	220 78	103 65	4 27	36 6%

表-付1.1 腐食試験体の板厚と引張試験結果

表-付1.2人工欠損試験体の板厚と引張試験結果

試験体	元板厚 (mm)	元幅 (mm)	最小 断面積 (mm ²)	最小 平均板厚 (mm)	最大 引張荷重 (kN)	伸び (%)	備考 (材料強度)
C-1	22	60	881 23	14 69	519 60	8 65	引張強度523 8 N/mm ²
C-2	22	60	876 61	14 61	535 70	9 50	降伏強度347 5 N/mm ²
C-3	22	60	840 58	14 01	518 56	788	伸び281%
C-4	22	60	793 45	13 22	484 48	7 31	



図-付1.6 平均板厚、最小板厚及び最小平均板厚の定義

2) 腐食欠損量と耐荷力との関係

腐食鋼板の引張耐荷力及び降伏耐荷力について、試験結果と以下の評価式による算定結 果の比較を行う。今回の試験体では、円孔等の欠損部を設けており、最小断面は欠損部の 最小断面となっている。なお、円孔等の人工欠損については断面減少分として整理してい る。

a) 引張耐荷力 $P_u = A_{\min} \sigma_u$ (1) ここに、 $A_{\min}: 最小断面積、 A_{\min} = t_{lm} \cdot b \ (mm^2)$ $t_{lm}: 最小断面位置での平均板厚(以下、最小平均板厚) (mm)$ $<math>b: 板幅 \ (mm)$ $\sigma_u: 平滑試験片の引張強度 (N/mm^2)$

b) 降伏耐荷力

 $P_y = A_{\min} \sigma_y$ (2) ここに、 A_{\min} :最小断面積、 $A_{\min} = t_{lm} \cdot b \pmod{2}$ t_{lm} :最小断面位置での平均板厚 (mm) b:板幅 (mm) σ_y :平滑試験片の降伏強度 (N/mm²)

図-付 1.7 に試験結果(以下、土研(2009))と算定値(最小平均板厚により算定)の比較結果 を示す。図中には過年度に(以下、土研(1996))において実施した腐食試験体の試験値も併 せて示す。引張耐荷力の試験値と算定値は良く一致している。なお、降伏耐荷力について は、傾向が明確に見られなかった試験体もあったため比較対象としていない。

腐食欠損量の引張耐荷力への影響を評価するため図-付1.8 に無次元最小平均断面積と無 次元引張耐荷力の関係を示す。腐食試験体の円孔は欠損分として見込んでいるため断面腐 食量は大きく(横軸の値は小さく)なっているが、試験体 A-3、B-1 及び B-2 では約10%程 度危険側の評価となっている。一方、人工欠損試験体の場合には、算定値よりも若干高めの値を示している。応力集中部を設けた場合の引張耐荷力は一般に低下するとされているが、今回の試験結果ではひずみ硬化の影響により高くなった可能性が考えられる。

図-付 1.9 に、材料試験結果に基づく人工欠損断面での降伏荷重時における孔周辺のひず み比率(計測値 ϵ /材料降伏ひずみ ϵ_y =1738µ)を示す。ひずみ計測値は、応力集中 5 軸ゲ ージによるものである(欠損部の近傍側から 1~5)。図-付 1.10 に人工欠損試験体 C-1 と C-4 及び材料試験体の応力とひずみの関係を示す。窪みがあると、応力集中の影響が大きくな るが、試験体 C-1~C-4 において耐荷力の差は見られない。







図-付 1.9 人工欠損試験体の孔からの測点距離 びと無次元ひずみの関係(降伏時)

1.4 1.2 8 1.0 A-3 B-1 B-2 0.8 0.6 0.4 土研(2009)、腐食試験体 0.2 ○ 土研(2009) 人工欠損試験体 □ 土研(1996) 0.0 0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.2 腐食最小断面積/腐食なし断面積





図-付 1.10 人工欠損試験体 C-1 と C-4 及 材料の応力とひずみの関係

3) 既往の調査研究を含めた耐荷力の試験値と算定値の比較分析

ここでの試験結果については限られた試験体によるものであることから、腐食鋼材に関わる既往の調査研究との比較を行った。表-付1.3に腐食鋼板(一部、人工欠損鋼板)による既往の引張試験結果の概要をまとめる。いずれも文献において比較に必要な諸数値が記載されているものを対象とした。なお、土研(2009)の人工欠損試験体は対象から外した。

図-付 1.11 に引張耐荷力及び降伏耐荷力に関して試験値と算定値の比較結果を示す。いず れも良い一致を示している。参考までに、算定値に関して、最小平均板厚の代わりに平均 板厚とした場合の結果を図-付 1.12 に示す。最小平均板厚の場合と比較して、ばらつきが見 られ、算定値の方が高めに推定する傾向がみられる。

図-付1.13 に、腐食欠損量の影響を評価するため、断面腐食量と無次元引張耐荷力の関係 を示す。最小平均板厚による算定値では最大で約16%程度危険側の評価となっている。腐 食欠損量の大小とばらつきとの関係に特に傾向は明確には見られないが、計測値の精度等 の影響も含まれているものと推測される。

文献名	試験体寸法(mm) (幅x標点間距離x板厚)	試験体数	試験結果-破断面	引張 耐荷力	降伏 耐荷力
土研(1996)1)	40x200x10	19 (17)	最小板厚または最小平均板厚断面	0	0
森ら(2008) ²⁾	40x200x9	25 (22)	腐食の著しい断面	0	0
角(2005) ³⁾	40x100x8,50x20x4, 25x10x2 人工円錐形ピット 深さ2.5,1.25,0.625	12 (6)	ピットのほぼ中心からき裂を生じ, 破断している2つのピット をつなぐようにき裂が生じている	0	-
杉浦ら(2006) ⁴⁾	30x150x8	24 (18)	最小板厚断面または孔食を有する断面	0	-
Appuhamy, Kaitaら(2011) ⁵⁾	25x70x10	42 (32)	最小板厚または最小平均板厚断面	0	0
松本ら(1989) ⁷⁾	40x200	44 (33)	最小板厚または最小平均板厚断面	0	0
村中ら(1998) ⁸⁾	40x200x12(10)	33 (33)	最小板厚または最小平均板厚断面	0	0

表-付1.3 既往の引張試験結果の概要

※1: 試験体数の()内数値は、文献中の人口欠損と考えられる試験体を対象外とし、諸元、腐食計測値を 抽出できた数を示す。

2: "-"は文献中に記載のないことを示す。

4	-+E4 (+ 17		板厚((mm)		板幅	降伏強度	引張強度	降伏耐荷力	陵(犬耐荷力計算値((N)	引張耐荷力	립년	長耐荷力計算値(4	(N
又献名	試験体名	原板厚	最小板厚	平均板厚	最小平均板厚	(mm)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	実験値(kN)	最小断面	平均断面	最小平均断面	実験値(kN)	最小断面	平均断面	最小平均断面
	S1	10.00	8.74	10.06	9.77	40.0	353.8	435.7	131.41	123.70	142.38	138.28	176.81	152.32	175.33	170.28
	S2	10.00	8.76	10.10	9.86	40.0	353.8	435.7	135.23	123.98	142.95	139.55	178.48	152.67	176.03	171.84
	ß	10.00	9.62	10.15	10.04	40.0	353.8	435.7	140.63	136.15	143.65	142.10	179.27	167.66	176.90	174.98
	¥	10.00	8.77	10.12	9.88	40.0	353.8	435.7	137.29	124.12	143.23	139.83	177.30	152.85	176.38	172.19
	S5	10.00	8.83	10.16	9.89	40.0	353.8	435.7	134.74	124.97	143.79	139.97	176.32	153.89	177.07	172.37
	S6	10.00	8.66	9.86	9.46	40.0	353.8	435.7	121.70	122.57	139.55	133.89	168.38	150.93	171.84	164.87
	S7	10.00	8.55	9.92	9.58	40.0	353.8	435.7	129.45	121.01	140.40	135.59	173.09	149.01	172.89	166.96
-	%	10.00	8.41	9.45	9.02	40.0	353.8	435.7	120.03	119.03	133.75	127.66	162.99	146.57	164.70	157.20
土研「	88	10.00	8.48	9.86	9.47	40.0	353.8	435.7	123.07	120.02	139.55	134.03	171.62	147.79	171.84	165.05
(0661)	S10	10.00	8.03	9.55	8.99	40.0	353.8	435.7	113.07	113.65	135.16	127.24	165.63	139.95	166.44	156.68
	S11	10.00	7.91	9.65	8.79	40.0	353.8	435.7	119.74	111.95	136.58	124.41	166.42	137.86	168.18	153.20
	S12	10.00	8.30	9.29	8.99	40.0	353.8	435.7	116.50	117.47	131.48	127.24	164.26	144.66	161.91	156.68
	S13	10.00	00.6	9.81	9.63	40.0	350.3	438.6	133.66	126.11	137.46	134.93	171.22	157.88	172.09	168.93
	S15	10.00	9.20	9.83	9.66	40.0	350.3	438.6	126.51	128.91	137.74	135.35	175.24	161.39	172.44	169.46
	S17	10.00	9.49	10.03	9.86	40.0	350.4	434.4	141.71	133.01	140.58	138.20	178.09	164.91	174.30	171.34
	S18	10.00	9.16	10.02	69.6	40.0	350.4	434.4	142.59	128.38	140.44	135.81	178.97	159.18	174.12	168.39
	S28	10.00	9.42	9.91	9.82	40.0	386.2	480.7	140.92	145.52	153.08	151.69	177.30	181.14	190.56	188.83
	K1	00.6	2.61	7.99	4.92	40.0	267.5	423.0	61.60	27.93	85.49	52.67	80.20	44.16	135.19	83.28
	52	9.00	2.98	8.50	5.66	40.0	267.5	423.0	68.90	31.89	90.95	60.56	91.00	50.42	143.82	95.77
	ñ	9.00	3.82	8.06	6.03	40.0	267.5	423.0	68.60	40.87	86.24	64.53	99.10	64.63	136.38	102.04
	K4	9.00	3.65	7.91	5.23	40.0	267.5	423.0	56.10	39.06	84.64	55.97	81.90	61.76	133.84	88.51
	K5	00.6	3.10	7.12	5.15	40.0	267.5	423.0	60.10	33.17	76.18	55.15	91.10	52.45	120.47	87.21
	K6	9.00	4.24	8.76	7.49	40.0	267.5	423.0	88.40	45.37	93.73	80.11	135.60	71.74	148.22	126.68
	K7	9.00	4.24	8.76	6.70	40.0	267.5	423.0	72.70	45.37	93.73	71.68	107.50	71.74	148.22	113.34
	C1	00.6	7.08	8.98	8.66	40.0	267.5	423.0	93.00	75.76	96.09	92.66	134.10	119.79	151.94	146.52
	C2	00.6	5.34	7.97	7.15	40.0	267.5	423.0	76.60	57.14	85.28	76.54	124.70	90.35	134.85	121.03
	ខ	9.00	5.95	9.93	8.28	40.0	267.5	423.0	99.30	63.67	106.25	88.60	150.30	100.67	168.02	140.10
禁 ら ²⁾	C4	9.00	5.30	8.48	6.88	40.0	267.5	423.0	77.90	56.71	90.74	73.66	102.80	89.68	143.48	116.48
(2008)	C5	9.00	3.09	7.51	5.86	40.0	267.5	423.0	70.30	33.06	80.36	62.67	103.10	52.28	127.07	99.10
	90 C6	9:00	1.97	7.39	4.54	40.0	267.5	423.0	54.60	21.08	79.07	48.54	75.50	33.33	125.04	76.76
	C7	9.00	4.72	8.79	6.99	40.0	267.5	423.0	84.60	50.50	94.05	74.78	124.60	79.86	148.73	118.25
	ő	9.00	6.21	8.63	7.72	40.0	267.5	423.0	87.10	66.45	92.34	82.59	135.90	105.07	146.02	130.60
	C9	9.00	3.66	7.99	5.93	40.0	267.5	423.0	60.60	39.16	85.49	63.47	105.50	61.93	135.19	100.37
	C10	9.00	4.48	7.61	6.20	40.0	267.5	423.0	74.10	47.94	81.43	66.37	117.30	75.80	128.76	104.95
	D1	9.00	5.31	8.26	7.53	40.0	267.5	423.0	73.40	56.82	88.38	80.57	121.90	89.85	139.76	127.41
	D2	9.00	4.84	5.87	4.74	40.0	267.5	423.0	55.60	51.79	62.81	50.74	89.10	81.89	99.32	80.24
	D3	9.00	5.34	7.76	6.60	40.0	267.5	423.0	73.10	57.14	83.03	70.58	112.30	90.35	131.30	111.61
	D4	9.00	3.25	5.71	4.25	40.0	267.5	423.0	52.40	34.78	61.10	45.44	73.10	54.99	96.61	71.86
	D5	9.00	4.10	6.80	5.32	40.0	267.5	423.0	59.80	43.87	72.76	56.88	90.50	69.37	115.06	89.95
注) 文献	2)の試験	(体 D2、 D4	1の結果につ	いては、第	5 一著者に確	認の上修正	щ									

-覧①
長試験結果-
既往の引引
1.4
表-付

資料-7

体名	板厚(mm) ■小±=	(mm)	밀나무	1 1 1 1 1 1	板幅 (mm)	降伏強度 (N/mm ³)	引張強度 (N/mm ³)	降伏耐荷力 宝略値(LN)	始 王 王 王	伏耐荷力計算値(kN) = تر هر	引張耐荷力 宇路値(LNI)	313 E 4: 16: 2	長耐荷力計算値() 亚 笻	(N)
	<u> 取小被岸 半均做厚 取小半均做厚 、'''''''</u> 738 748 - 100	・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・	<u> </u> <u>100</u>	1004		-	AREA	— — —	듌小町 国 -	十四町国	<u> </u>	大明 (NIN) 1.40.05	<u></u> π√127 FΩ	半玛断国 130.40	<u> </u> 愈小半 动断
L1 0.00 7.38 7.22 - 40.0	7.38 7.22 - 40.0	7.22 - 40.0	- 40.0	40.0	-	-	439.5	-	-			140.63	129.64	126.83	
M1 4.00 3.69 3.74 - 20.0	3.69 3.74 – 20.0	3.74 – 20.0	- 20.0	20.0	-	Ţ	464.1	1	ı	T	I	37.13	34.22	34.69	ı
M2 4.00 3.69 3.61 – 20.0	3.69 3.61 – 20.0	3.61 – 20.0	- 20.0	20.0		-	455.9	-	-	-	-	36.48	33.63	32.89	-
Si 2.00 1.84 1.87 – 10.0	1.84 1.87 - 10.0	1.87 – 10.0	- 10.0	10.0	_	-	447.8	I	I	I	I	8.96	8.26	8.37	I
S2 2.00 1.84 1.80 - 10.0	1.84 1.80 - 10.0	1.80 – 10.0	- 10.0	10.0		-	451.6	I	-	1	-	9.03	8.33	8.15	1
A-1 8.00 6.94 8.12 7.83 30.0	6.94 8.12 7.83 30.0	8.12 7.83 30.0	7.83 30.0	30.0		I	519.5	1	I	I	-	124.00	108.16	126.55	122.03
A-2 8.00 6.57 7.86 7.54 30.0	6.57 7.86 7.54 30.0	7.86 7.54 30.0	7.54 30.0	30.0		-	519.5	I	I	I	1	116.40	102.39	122.50	117.51
A-3 8.00 6.23 8.52 7.80 30.0	6.23 8.52 7.80 30.0	8.52 7.80 30.0	7.80 30.0	30.0	_	-	519.5	1	1	T	1	120.00	97.09	132.78	121.56
3-1 8.00 3.01 5.15 4.46 30.0	3.01 5.15 4.46 30.0	5.15 4.46 30.0	4.46 30.0	30.(0	-	519.5	1	I	-	-	70.40	46.91	80.26	69.51
3-2 8.00 4.12 6.72 5.69 30.0	4.12 6.72 5.69 30.0	6.72 5.69 30.0	5.69 30.0	30.0		I	519.5	I	1	T	I	91.30	64.21	104.73	88.68
3-3 8.00 6.97 8.01 7.80 30.0	6.97 8.01 7.80 30.0	8.01 7.80 30.0	7.80 30.0	30.0		-	519.5	1	1	I	1	119.90	108.63	124.84	121.56
D-1 8.00 6.83 7.90 7.55 30.0	6.83 7.90 7.55 30.0	7.90 7.55 30.0	7.55 30.0	30.0		-	519.5	I	I	-	-	118.20	106.45	123.12	117.67
D-2 8.00 5.04 7.99 7.04 30.0	5.04 7.99 7.04 30.0	7.99 7.04 30.0	7.04 30.0	30.0		I	519.5	I	I	I	I	110.30	78.55	124.52	109.72
D-3 8.00 6.40 8.10 7.81 30.0	6.40 8.10 7.81 30.0	8.10 7.81 30.0	7.81 30.0	30.0		T	519.5	I	Т	T	I	120.70	99.74	126.24	121.72
D-1 8.00 4.76 8.18 7.91 30.0	4.76 8.18 7.91 30.0	8.18 7.91 30.0	7.91 30.0	30.0		-	519.5	I	I	T	I	124.40	74.18	127.49	123.28
D-2 8.00 6.97 7.88 7.55 30.0	6.97 7.88 7.55 30.0	7.88 7.55 30.0	7.55 30.0	30.0		-	519.5	I	-	T	-	118.60	108.63	122.81	117.67
D-3 8.00 5.58 7.65 7.52 30.0	5.58 7.65 7.52 30.0	7.65 7.52 30.0	7.52 30.0	30.0		-	519.5	I	-	I	I	115.40	86.96	119.23	117.20
A-1 8.00 7.29 8.42 8.17 30.0	7.29 8.42 8.17 30.0	8.42 8.17 30.0	8.17 30.0	30.0		I	495.9	I	T	T	1	120.40	108.45	125.26	121.55
A-2 8.00 6.12 8.08 7.82 30.0	6.12 8.08 7.82 30.0	8.08 7.82 30.0	7.82 30.0	30.0		-	495.9	1	-	I	1	117.30	91.05	120.21	116.34
A-3 8.00 7.36 8.39 7.99 30.0	7.36 8.39 7.99 30.0	8.39 7.99 30.0	7.99 30.0	30.0		-	495.9	I	I	I	1	118.60	109.49	124.82	118.87
D-1 8.00 6.74 7.96 7.75 30.0	6.74 7.96 7.75 30.0	7.96 7.75 30.0	7.75 30.0	30.0		-	495.9	I	1	I	ı	115.50	100.27	118.42	115.30
D-2 8.00 6.90 7.65 7.47 30.0	6.90 7.65 7.47 30.0	7.65 7.47 30.0	7.47 30.0	30.0		T	495.9	I	1	T	I	112.50	102.65	113.81	111.13
D-3 8.00 7.17 8.04 7.78 30.0	7.17 8.04 7.78 30.0	8.04 7.78 30.0	7.78 30.0	30.0		T	495.9	I	T	T	ī	116.50	106.67	119.61	115.74
1 10.00 7.90 9.25 9.03 25.0	7.90 9.25 9.03 25.C	9.25 9.03 25.C	9.03 25.0	25.0		299.9	417.1	60.89	59.23	69.35	67.70	92.20	82.38	96.45	94.16
2 10.00 9.04 9.86 9.73 25.	9.04 9.86 9.73 25.	9.86 9.73 25.	9.73 25.	25.	0	299.9	417.1	67.82	67.78	73.93	72.95	96.08	94.26	102.82	101.46
5 10.00 2.43 7.54 4.10 25.	2.43 7.54 4.10 25.	7.54 4.10 25.	4.10 25.	25.	0	299.9	417.1	26.78	18.22	56.53	30.74	35.82	25.34	78.62	42.75
-6 10.00 6.90 9.25 8.69 25.	6.90 9.25 8.69 25.	9.25 8.69 25.	8.69 25.	25.	0	299.9	417.1	59.57	51.73	69.35	65.15	87.19	71.95	96.45	90.61
8 10.00 8.47 9.16 9.02 25	8.47 9.16 9.02 25	9.16 9.02 25	9.02 25	25	0	299.9	417.1	64.10	63.50	68.68	67.63	91.39	88.32	95.52	94.06
9 10:00 8:34 9.39 9.16 25.	8.34 9.39 9.16 25.	9.39 9.16 25.	9.16 25.	25.	0	299.9	417.1	62.32	62.53	70.40	68.68	91.04	86.97	97.91	95.52
-10 10.00 8.29 9.03 8.88 25.0	8.29 9.03 8.88 25.0	9.03 8.88 25.0	8.88 25.0	25.(299.9	417.1	65.75	62.15	67.70	66.58	91.24	86.44	94.16	92.60
-11 10.00 7.50 8.97 8.41 25.0	7.50 8.97 8.41 25.0	8.97 8.41 25.0	8.41 25.0	25.0		299.9	417.1	61.88	56.23	67.25	63.05	87.42	78.21	93.53	87.70
12 10.00 8.00 8.73 8.51 25.0	8.00 8.73 8.51 25.0	8.73 8.51 25.0	8.51 25.0	25.0		299.9	417.1	64.83	59.98	65.45	63.80	91.29	83.42	91.03	88.74
-13 10.00 7.93 8.76 8.50 25.0	7.93 8.76 8.50 25.0	8.76 8.50 25.0	8.50 25.0	25.0		299.9	417.1	61.40	59.46	65.68	63.73	89.92	82.69	91.34	88.63
-14 10.00 7.97 8.82 8.53 25.0	7.97 8.82 8.53 25.0	8.82 8.53 25.0	8.53 25.0	25.0		299.9	417.1	62.50	59.76	66.13	63.95	89.52	83.11	91.97	88.95
-15 10.00 4.92 7.77 6.50 25.0	4.92 7.77 6.50 25.0	7.77 6.50 25.0	6.50 25.0	25.0		299.9	417.1	47.09	36.89	58.26	48.73	63.64	51.30	81.02	67.78
-18 10.00 6.64 9.01 7.22 25.1	6.64 9.01 7.22 25.1	9.01 7.22 25.1	7.22 25.	25.	0	299.9	417.1	59.85	49.78	67.55	54.13	83.64	69.24	93.95	75.29
-22 10.00 8.68 9.40 9.25 25.0	8.68 9.40 9.25 25.0	9.40 9.25 25.0	9.25 25.0	25.0		299.9	417.1	67.75	65.08	70.48	69.35	93.96	90.51	98.02	96.45
1 10.00 8.42 9.26 8.89 25.	8.42 9.26 8.89 25	9.26 8.89 25	8.89 25.	25.	0	299.9	417.1	63.91	63.13	69.43	66.65	89.54	87.80	96.56	92.70
2 10.00 8.31 9.41 8.96 25.1	8.31 9.41 8.96 25.1	9.41 8.96 25.1	8.96 25.	25.		299.9	417.1	65.45	62.30	70.55	67.18	90.53	86.65	98.12	93.43
3 1000 807 946 9.24 25	8.07 9.46 9.24 25	9.46 9.24 25	9.24 25	25	0	299.9	417.1	65.41	60.50	70.93	69.28	91.38	84.15	98.64	96.35

表-付1.5 既往の引張試験結果一覧②

ウ計々	±====================================		板厚	(mm)		板幅	降伏強度	引張強度	降伏耐荷力		长耐荷力計算値()	kN)	引張耐荷力	313	長耐荷力計算値()	Ń
× 家 名	动飘体石	原板厚	最小板厚	平均板厚	最小平均板厚	(mm)	(N/mm ²)	(N/mm^2)	実験値(kN)	最小断面	平均断面	最小平均断面	実験値(kN)	最小断面	平均断面	最小平均断面
	WT-4	10.00	8.35	9.26	9.00	25.0	299.9	417.1	64.46	62.60	69.43	67.48	92.00	87.07	96.56	93.85
	WT-5	10.00	7.88	9.16	8.71	25.0	299.9	417.1	62.87	59.08	68.68	65.30	91.21	82.17	95.52	90.82
	WT-6	10.00	8.55	9.48	9.22	25.0	299.9	417.1	64.75	64.10	71.08	69.13	91.68	89.16	98.85	96.14
	WT-7	10.00	7.86	9.32	9.04	25.0	299.9	417.1	64.23	58.93	69.88	67.78	87.19	81.96	97.18	94.26
	WT-8	10.00	7.92	9.27	8.89	25.0	299.9	417.1	64.78	59.38	69.50	66.65	91.19	82.59	96.66	92.70
_	WT-9	10.00	8.11	60.6	8.87	25.0	299.9	417.1	61.30	60.80	68.15	66.50	87.00	84.57	94.79	92.49
-	WT-11	10.00	8.13	9.31	8.90	25.0	299.9	417.1	63.24	60.95	69.80	66.73	90.96	84.78	97.08	92.80
Appuhamy, Voite 2 ⁵⁾ /2011)	WT12	10.00	8.47	9.31	9.00	25.0	299.9	417.1	64.15	63.50	69.80	67.48	92.72	88.32	97.08	93.85
	WT-13	10.00	7.61	8.82	8.33	25.0	299.9	417.1	63.74	57.06	66.13	62.45	90.78	79.35	91.97	86.86
_	WT-15	10.00	8.14	9.22	9.01	25.0	299.9	417.1	61.86	61.03	69.13	67.55	88.71	84.88	96.14	93.95
_	WT-16	10.00	8.14	9.02	8.79	25.0	299.9	417.1	62.78	61.03	67.63	65.90	89.36	84.88	94.06	91.66
	WT-17	10.00	8.18	9.13	8.94	25.0	299.9	417.1	62.16	61.33	68.45	67.03	90.03	85.30	95.20	93.22
	WT-18	10.00	8.20	9.17	8.94	25.0	299.9	417.1	65.23	61.48	68.75	67.03	92.03	85.51	95.62	93.22
	WT-19	10.00	7.70	8.86	8.49	25.0	299.9	417.1	63.46	57.73	66.43	63.65	87.41	80.29	92.39	88.53
	WT-21	10.00	8.03	9.16	8.89	25.0	299.9	417.1	69.64	60.20	68.68	66.65	91.03	83.73	95.52	92.70
	A-I-1	00.6	7.00	8.63	8.27	40.0	340.3	501.1	112.29	95.28	117.47	112.57	168.67	140.31	172.99	165.77
	A-I-2	00.6	6.60	7.37	6.96	40.0	340.3	501.1	98.07	89.84	100.32	94.74	146.12	132.30	147.73	139.51
	A-II-1	00.6	7.00	8.40	7.70	40.0	278.5	437.4	88.75	77.98	93.58	85.78	147.10	122.47	146.96	134.71
	A-II-2	00.6	7.50	9.04	8.64	40.0	278.5	437.4	91.69	83.55	100.71	96.25	154.45	131.21	158.16	151.16
	A-II-3	00.6	6.50	7.07	6.91	40.0	278.5	437.4	76.00	72.41	78.76	76.98	121.60	113.72	123.69	120.89
	A-III-1	10.00	8.80	10.58	10.00	40.0	285.4	457.0	114.74	100.45	120.77	114.15	185.84	160.86	193.40	182.80
	A-III-2	10.00	8.30	10.19	9.37	40.0	285.4	457.0	110.32	94.74	116.32	106.96	184.37	151.72	186.27	171.28
	A-III-3	10.00	8.00	9.37	8.71	40.0	285.4	457.0	106.40	91.32	106.96	99.42	173.09	146.24	171.28	159.22
	A-III-4	10.00	7.90	8.79	8.39	40.0	285.4	457.0	100.52	90.18	100.34	95.77	157.89	144.41	160.68	153.37
	B-I-1	12.00	10.20	11.92	11.16	40.0	272.6	429.5	124.05	111.23	129.99	121.70	197.60	175.25	204.80	191.74
	B-I-2	12.00	9.50	11.33	10.47	40.0	272.6	429.5	117.68	103.60	123.55	114.18	191.23	163.22	194.66	179.89
	B-II-1	12.00	10.60	11.98	11.49	40.0	266.7	425.6	132.39	113.10	127.82	122.59	205.94	180.46	203.95	195.61
松本ら"	B-II-2	12.00	10.60	11.92	11.09	40.0	266.7	425.6	125.53	113.10	127.18	118.33	203.49	180.46	202.93	188.80
(1989)	B-III-1	17.50	15.50	17.29	16.84	40.0	244.2	409.9	172.60	151.40	168.88	164.48	286.35	254.15	283.50	276.12
	B-III-2	17.50	16.40	17.48	17.04	40.0	244.2	409.9	176.03	160.19	170.73	166.44	285.37	268.91	286.61	279.40
	B-III-3	17.50	16.00	17.39	16.94	40.0	244.2	409.9	167.69	156.28	169.86	165.46	286.35	262.35	285.14	277.76
	B-III-4	17.50	15.40	17.22	16.17	40.0	244.2	409.9	159.36	150.42	168.20	157.94	279.00	252.51	282.35	265.13
	B-III-5	17.50	15.80	17.26	16.47	40.0	244.2	409.9	164.26	154.33	168.59	160.87	282.43	259.07	283.01	270.05
	B-III-6	17.50	15.50	17.33	16.69	40.0	244.2	409.9	165.24	151.40	169.27	163.02	278.51	254.15	284.16	273.66
	B-IV-1	17.50	14.80	16.55	15.79	40.0	250.1	408.0	159.36	148.04	165.55	157.94	270.66	241.51	270.07	257.67
	B-IV-2	17.50	15.40	16.76	16.13	40.0	250.1	408.0	165.73	154.04	167.65	161.34	270.66	251.30	273.49	263.21
	C-I-1	8.00	6.30	8.04	7.70	40.0	267.7	394.2	77.47	67.47	86.10	82.46	116.70	99.35	126.78	121.42
	C-I-2	8.00	5.50	7.95	7.24	40.0	267.7	394.2	74.04	58.90	85.14	77.53	114.74	86.73	125.36	114.17
	C-I-3	8.00	5.10	7.97	7.03	40.0	267.7	394.2	74.04	54.62	85.35	75.28	115.23	80.42	125.68	110.86
	C-II-1	00.6	6.30	9.11	8.51	40.0	305.0	383.4	101.01	76.86	111.14	103.82	139.25	96.63	139.73	130.52
	C-II-2	9.00	6.20	9.24	8.09	40.0	305.0	383.4	106.40	75.64	112.72	98.69	138.27	95.09	141.72	124.08

表-付1.6 既往の引張試験結果一覧③

計算値(kN) f面 最小平均断[72 132.82	55 156.26	45 159.86	92 161.44	19 279.25	25 281.09	50 282.69	173.81	118.37	136.16	159.04	134.41	144.02	147.96	135.84	143.39	151.26	127.18	131.11	114.59	117.74	111.60	117.74	112.54	111.75	113.01	123.21	128.53	132.99	137.79	135.74	133.33	130.93	132.65	124.07	135.56	132.13	130 03
<u> </u>	141.	169.	170.	173.	288.	290.	287.	-	-	1	-	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	-	1	1	-	1	1
最小断面	96.63	146.35	146.35	150.86	258.86	249.70	274.90	170.95	100.41	122.97	138.86	106.61	127.34	138.51	122.14	133.32	137.88	111.28	105.30	94.91	98.69	99.79	94.28	91.13	85.78	93.02	110.68	112.74	120.63	122.69	127.50	116.17	115.32	123.55	97.30	125.10	124.58	100 40
引張耐荷力 実験値(kN)	139.25	160.83	164.26	175.54	277.04	277.53	277.53	179.50	129.70	154.90	180.70	150.80	156.80	159.50	145.60	158.30	167.80	144.50	148.20	129.30	127.50	125.80	130.50	114.90	109.40	109.80	123.00	130.50	134.90	129.50	128.90	130.00	148.00	145.10	138.80	128.80	129.00	100.00
kN) 最小平均断面	105.65	106.17	108.62	109.69	172.14	173.27	174.26	110.80	75.45	86.80	101.38	85.68	100.06	102.80	94.38	99.63	105.09	88.36	91.10	79.61	81.80	77.54	81.80	78.19	77.65	78.52	81.39	84.91	87.85	91.03	89.67	88.08	86.49	87.63	81.96	89.55	87.29	07.00
<耐荷力計算値(平均断面	112.72	115.20	115.81	118.10	177.65	178.92	177.23	1	ı	I	ı	T	ı	ı	I	ı	I	ı	I	I	I	I	I	T	I	I	1	1	I	T	T	I	I	1	I	I	I	
降化最小断面	76.86	99.44	99.44	102.50	159.57	153.93	169.46	108.98	64.01	78.39	88.52	67.96	88.47	96.24	84.86	92.63	95.80	77.32	73.16	65.94	68.57	69.33	65.51	63.32	59.60	64.63	73.12	74.48	79.69	81.05	84.23	76.74	76.18	81.62	64.28	82.64	82.30	
降伏耐荷力 実験値(kN)	107.38	106.89	106.40	105.42	167.20	167.69	174.56	112.70	80.60	103.70	105.60	90.60	101.50	98.30	92.60	99.00	104.60	90.70	90.30	75.80	75.90	75.20	80.90	71.80	72.80	70.60	83.40	81.30	85.10	86.30	85.60	83.40	94.60	92.10	90.70	83.80	82.80	00 00
引張強度 (N/mm ³)	383.4	562.9	562.9	562.9	572.7	572.7	572.7	397.2	397.2	397.2	397.2	397.2	393.5	393.5	393.5	393.5	393.5	393.5	393.5	393.5	393.5	393.5	393.5	393.5	393.5	393.5	429.0	429.0	429.0	429.0	429.0	429.0	429.0	429.0	429.0	429.0	429.0	0.001
降伏強度 (N/mm ¹)	305.0	382.5	382.5	382.5	353.0	353.0	353.0	253.2	253.2	253.2	253.2	253.2	273.4	273.4	273.4	273.4	273.4	273.4	273.4	273.4	273.4	273.4	273.4	273.4	273.4	273.4	283.4	283.4	283.4	283.4	283.4	283.4	283.4	283.4	283.4	283.4	283.4	
板幅 (mm)	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	
最小平均板厚	8.66	6.94	7.10	7.17	12.19	12.27	12.34	10.94	7.45	8.57	10.01	8.46	9.15	9.40	8.63	9.11	9.61	8.08	8.33	7.28	7.48	7.09	7.48	7.15	7.10	7.18	7.18	7.49	7.75	8.03	7.91	77.7	7.63	7.73	7.23	7.90	7.70	c c r
mm) 平均板厚	9.24	7.53	7.57	7.72	12.58	12.67	12.55	1	I	I	I	I	I	I	I	I	1	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	1	T	I	I	I	1	T	I	I	
板厚(最小板厚	6.30	6.50	6.50	6.70	11.30	10.90	12.00	10.76	6.32	7.74	8.74	6.71	8.09	8.80	7.76	8.47	8.76	7.07	6.69	6.03	6.27	6.34	5.99	5.79	5.45	5.91	6.45	6.57	7.03	7.15	7.43	6.77	6.72	7.20	5.67	7.29	7.26	c c r
原板厚	00'6	9.00	9.00	9.00	14.00	14.00	14.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	
式験体名	C-II-3	C-III-1	C-III-2	C-III-3	D-I-1	D-I-2	D-I-3	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	W-1	W-2	W-3	W-4	W-5	W−6	W-7	W-8	6-M	W-10	W-11	W-12	W-13	W-14	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S9	S-10	S-11	•

-覧(
長試験結果
既往の引引
1.7
表-付



図-付1.13 無次元引張耐荷力と断面腐食量(最小平均板厚/元板厚)との関係

4) 腐食部の板厚計測方法の検討

腐食した試験片の場合、最小断面の平均板厚(最小平均板厚)より概ね耐荷力の推定は 可能と考えられる。一方、現場において錆層下の残存板厚を精度良く計測するには時間と 労力を要する。また、耐荷力評価には断面力や耐荷力の算出に各種の不確実要因があるこ と、断面欠損を伴う腐食の場合には一般的には安全側に当て板補修等の対策が行われるこ と等を考えると、耐荷力評価を目的として精緻な板厚計測の必要性は実務的には少ない場 合が多い。すなわち腐食欠損の厳しい箇所を目視で確認の上、耐荷性能に影響する部位に 限定して計測を行い、耐荷力を安全側に概略評価するというのが現実的な方法と考えられ る。そこで、限られた計測点から耐荷力評価の指標である最小平均板厚を推定する方法に ついて検討する。

部材中の腐食部分のどの箇所で、どの程度の間隔で計測するか、といった残存板厚の体 系的な計測手法は未だ確立されていない。文献10)においても指標や統計学的な要求、対 象とする腐食形態、適用可能な計測方法などを考慮して検討する必要があり、腐食事例の 収集とその分析結果の蓄積が重要であるとしている。ここでは、今回対象とした腐食部材 に関して、計測点を変えた場合の板厚計測値のばらつきについて考察を加える。

図-付1.14に計測により推測可能と考えられる平均板厚と、耐荷力評価の指標としての最 小平均板厚との関係を示す。両者の違いを見ると最大で約5.4mmの差が見られる。ただし、 試験結果の内訳を見ると、定性的であるが均一、不均一の腐食形態のデータが含まれてお り、ばらつきの要因は不均一の腐食形態のデータによるものであることがわかる。この点 については目視確認時にある程度計測範囲を絞り込むことにより解消されると考え、これ らのデータを除外すると最大で約1.7mmの差となる。両者の差を考慮することにより、最 小平均板厚を概略推定できる可能性がある。

図-付1.15 に最大腐食欠損量(元板厚-最小板厚)と無次元引張耐荷力の関係を示す。同 図では明確ではないが、最大腐食欠損量が大きいほど、耐荷力算定値のばらつきが大きく なることは想定され計測点数は増やした方が望ましいと考えられる。

図-付 1.16 に、腐食試験体 B-1 を例に、載荷方向に短冊状に分割し、各分割部について 4 点計測し、それを 10 回繰り返した場合の統計値を整理する。分割数に対する、実測平均値 と真値の差(最大・最小値、平均値、平均値-標準偏差)を示したものである。真値は計 測した全領域の板厚の平均値である。図に示すように分割数を小さくするほど実測平均値 と真値との差は大きくなるが、今回の試験体では、標準偏差の 2 倍の 1.2mm 程度(4 分割の 場合)の誤差を見込めば平均板厚が安全側に概略推定できる結果であった。



図-付1.14 平均板厚と最小平均板厚の関係

図-付1.15 最大腐食欠損量(元板厚-最小板厚) と無次元引張耐荷力の関係



(b) 4 分割での計測点抽出の概念図

図-付 1.16 計測点数の影響

(4)まとめ

腐食試験体の引張試験結果を基に、既往の調査研究も含めて引張部材(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、腐食試験体の破断はほぼ全数 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比較的精度良く推定 できることが確認された。また、現場における残存板厚の計測方法に関して、限られた計 測点数から最小平均板厚を推定する場合の誤差について考察を加えた。
参考文献

- 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室、日本橋梁建設協会:橋梁部材の腐食に対する 健全度評価手法に関する共同研究報告書、土木研究所共同研究報告書、第149号,1996.
- 2) 森猛、橘敦志、野上邦栄、山沢哲也:腐食鋼板の引張・降伏耐力評価法の検討、土木学 会論文集 A Vol.64 No.1、pp38-47、2008.
- 3) 角洋一:腐食鋼板の表面形状と応力・強度・変形能の関係に関する研究、平成14年度 ~平成16年度科学研究費補助金研究成果報告書、2005.
- 4) 杉浦邦征、田村功他:腐食鋼板の力学特性評価のための板厚計測および有効板厚に関す る考察、構造工学論文集 Vol.52A、pp679-687、2006.
- Appuhamy, J.M.R.S., Kaita, T., Ohga, M. and Fujii, K. : Prediction of Residual Strength of Corroded Tensile Steel Plates, International Journal of Steel Structures, Vol. 11, No 1, pp65-79, March 2011.
- 6) 土木学会鋼構造委員会:腐食耐久性照査マニュアル(案)、2007.
- 7) 松本勝、白井義朗、中村幾雄、白石成人:腐食鋼材の有効板厚評価法も提案、橋梁と基礎、No.12、pp19-25、1989.
- 村中昭典、皆田理、藤井堅:腐食鋼板の表面性状と残存耐荷力、構造工学論文集 Vol.44A、 pp1063-1071、1998.
- 9) 土木学会:海洋環境における鋼構造物の耐久・耐荷性能評価ガイドライン、2009.

共同研究報告書 Cooperative Research Report of PWRI No. 456 June 2013

編集·発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754