

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 17 日現在

機関番号：55503

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22760351

研究課題名（和文） 性能回復を意識した腐食鋼材の強度評価技術の改善

研究課題名（英文） Improvement of remaining strength estimation method for corroded steel plates intended to strength performance recovery

研究代表者

海田 辰将 (KAITA TATSUMASA)

徳山工業高等専門学校・土木建築工学科・助教

研究者番号：10390519

研究成果の概要（和文）

本研究では、まず重度に腐食した幅広供試体の引張試験と強度解析を実施して腐食鋼板の降伏・引張強度評価法の改善を試みた。また、超音波板厚計を用いた腐食鋼板の実用的板厚評価式を提案したとともに、研究試料として入手した旧余部橋梁鋼材の材料特性試験と化学成分分析等を実施し、老朽化橋の性能回復に関する有用な知見を得た。さらに、腐食減肉により鋼板に生じる荷重偏心の影響について、実験・解析の両観点より言及した。

研究成果の概要（英文）

Main results of this study are as follows;

- (1) A remaining strength estimation method of severely corroded tensile plates was tried to modify with higher reliability by carrying out the tensile test for wide-width specimens.
- (2) A useful thickness estimation formula was proposed for the thickness measurement by using the portable ultrasonic thickness gauge.
- (3) Some useful knowledge for strength recovery of aged bridge were obtained by material property tests and the chemical component analyses about previous "Amarube Bridge".
- (4) The mechanical influences for load-eccentricity due to corrosion were clarified by the buckling test and FEM analyses for severe corroded plates.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学

キーワード：鋼構造

1. 研究開始当初の背景

現在、我が国では高度経済成長期より建設されてきた社会基盤構造物が 40 余年を経過

し、例えば木曾川大橋（トラス橋）斜材における腐食に起因する破断事故（2007.9.）のように、国民の安全性を脅かすような重大な

腐食損傷が発生し始めている。木曾川大橋の例のように緊急を要するケースは今のところ少ないものの、その予備軍とも言うべき腐食橋梁の数は計り知れない。

他方で、現在の我が国の経済状況を考慮すると、現存する鋼構造物を安全にかつ社会的利便性を損なうことなく長期に亘って供用し続けるための技術が強く要求されている。このような問題は、都市部よりもむしろ地方において特に深刻化しており、腐食等の経年劣化が認められる各橋梁に対してその損傷度と劣化進展を定量的に評価・予測し、今後の数十年における段階的な補修・補強計画（長寿命化計画）の策定が急務の課題として取り上げられつつある。

上記のような問題を解決するには、まず現存する腐食鋼構造物の現有保有性能（残存強度）を高精度で推定可能な強度評価技術を確立し、次に合理的な強度回復（補強）法とその効果を検証する技術に繋げていくことが不可欠である。申請者は、強度評価と強度回復は表裏一体の関係にあると考えており、安全性と経済性を両立した合理的な強度回復を実現するためには、現在までに提案されている種々の強度評価法の問題点を洗い出し、新規に実験・解析を実施して改善することで強度評価法に一般性を持たせて適用範囲を拡大することが必要との認識に至った。

2. 研究の目的

本研究では、腐食損傷を有する鋼構造物の維持管理（測定→評価→対策）で根幹を成すと考えられる残存強度評価技術について、引張応力状態にある腐食鋼板のその後の強度回復（補強）を意識して強度評価法を改善（場合によっては新規提案）し、評価精度を向上させることを研究全体の主目的とする。具体的な構想・目的としては以下に示す通りである。

- (1) 申請者らが提案してきた方法を含め、従来の強度評価法における課題の確認（適用可能な腐食形態・応力状態・部位、実物との相違点、強度評価精度など）
- (2) 強度回復を考える上で必要な情報を検討し、(1)にフィードバックさせる（作用応力、終局強度、腐食形態、応力分布、崩壊形式など）
- (3) (1)(2)を考慮した実腐食鋼材の載荷実験を実施し、強度評価法の改善策を提案
- (4) (1)～(3)のための、特徴的な腐食形態を有する鋼材の収集→鋼表面測定→腐食形態の分類

本研究によって、現有強度評価技術の向上はもちろん、強度評価の次のステップとして今後精力的に研究・議論されるであろう、「腐食部材の強度回復技術」に対して、部材の応力状態と腐食形態に適した強度回復法の選定、施工法、補強効果の確認のための有用な基礎資料を提供したい。

3. 研究の方法

本研究では、基本的な応力状態として引張および圧縮を対象とし、JIS5号試験片程度の小さな供試体の引張試験結果からこれまでに提案されている強度評価法を強度回復の観点から見直すことで、新たに明らかにすべき点や改善すべき点について重点的に強度実験を実施し、強度評価法の改善と評価精度の向上を図る。また、終局状態における応力・ひずみ分布や崩壊形式など、強度回復を考える上での重要な情報を得る。具体的には、科学研究費補助金の研究期間内に、腐食鋼材の引張・圧縮強度に関する以下の研究項目の達成を目指す。

(1) 腐食鋼板の引張試験・強度解析

従来の引張・降伏強度評価法は、材料試験等で一般的に用いられる幅の狭いJIS試験片による実験結果から提案されたものである。本研究では少なくとも80～150mmの幅を持つ腐食供試体を作成して載荷実験を行い、実構造物スケールに対応した強度評価法に改善する。また、幅広試験体では、孔食の大きさ（直径）が試験体の幅に占める割合がJIS5号試験片よりも相対的に小さくなるので、降伏過程や破断位置などが、変わってくると考えられる。このことから、有限要素法による解析も併せて実施し、腐食が降伏過程や破断位置の特定に及ぼす影響を考察する。

(2) 腐食鋼板の疲労試験または座屈試験

腐食による凹凸を有したままの状態における鋼板の疲労寿命を予測することは、補強前はもちろん、補強後においても母材がいくらかの力を分担すると考えられるため、長期耐久性の評価等に重要な情報を与える。現在までに、疲労強度評価のための統計指標が1～2例提案されているが、1)と同様の理由により、ここでは、実構造物スケールに対応した疲労強度評価法の改善を目指す。

一方、入手する腐食鋼材の腐食状況を吟味したよっては、疲労試験に適さない場合も考えられる。すなわち、たとえば板の局所的に腐食が激しく、貫通孔を有するような腐食鋼板では、長期強度を対象とした疲労試験よりもむしろ、座屈の方が急務の課題となる場合が多いと考えられる。その場合には、載荷実験の治具を別途製作する必要があるものの、座屈試験を優先して実施する。

(3) 補強前後における強度回復効果の定量的検証

上記(1)、(2)の実験・解析がスムーズに遂行できた場合、これらの実験・解析から得た情報を基に、当て板等の補強（補強方法は(1)、(2)の結果を考慮して選択）を施した供試体の載荷実験を行い、実際の強度回復効果について定量的検証を試み、今後の性能回復設計の一助としたい。

(4) 腐食鋼材の収集と表面形状測定、腐食形態の分類

強度評価法に一般性を持たせ、適用範囲を拡大するには、より多くの腐食形態を有する鋼材が不可欠である。調査・情報収集を継続して行い、実験・測定の供試体として用いる。また、得られた腐食鋼材には、その腐食表面形状を測定することが不可欠であるため、現場で効率的かつ精度良く、残存強度を評価するための板厚統計量を得るための、実用的板厚測定法についても強度評価法とセットで考えていきたい。

4. 研究成果

(1) 幅広供試体による腐食鋼板の降伏・引張強度評価法の提案 (2010-2011 年度)

重度に腐食した鋼桁より幅広タイプの供試体 26 体を製作し、引張試験を完了した。本試験結果から、当て板補強や鋼板接着といった性能回復工法を適用する際に有益となる以下のような板の力学挙動を明らかにした。

- ① 腐食の激しい鋼板は、応力集中の影響が弾性域内で卓越し、最小板厚位置から亀裂が生じ破断する。
- ② 残存最小板厚と最小平均板厚の位置と大きさの関係が引張強度評価および破断面推定に重要となる。
- ③ 腐食鋼板の降伏荷重は、最小平均板厚を有効板厚に適用することで強度評価可能であるが、引張強度は最小平均板厚を用いると若干危険側の判断となる。
- ④ 引張強度は板厚標準偏差と非常に強い相関があり、初期板厚と標準偏差から推定が可能である。

また、2011 年度には、船越運河橋（愛媛県）から採取した腐食鋼材を加工して幅広供試体を新たに 24 体作成した。腐食表面形状は、新たな試みとして 2 次元レーザー変位センサを用いた走査法によって測定した。その後、愛媛大学所有の 3000kN 万能試験機を用いて静的引張試験を実施し、実際の降伏強度およ

び引張強度を明らかにしたとともに、これまでに我々が提案・改善してきた残存強度評価法を適用して、その一般性や汎用性を検証した。現在までのところ、実験値と予測値（評価値）は概ね一致しているものの、極めて局所的かつ重度に腐食している場合には、実際よりも危険側の判断を与える場合があるので、できるだけ安全側かつ精度良く評価できるように、改善策を検討している。

(2) 実験と強度解析を合わせた残存強度評価法の改善 (2011 年度)

(1) に示した腐食鋼板の引張強度解析を有限要素法により実施し、過去に研究代表者らが実施した JIS5 号試験片による腐食鋼板の引張強度実験および解析結果と併せて、板の引張・降伏強度評価法を改善した。また、引張試験結果と解析結果がよく一致していることから、有限要素解析による今後の研究発展の可能性を示した。

また、重度の局所的な腐食減肉を有する鋼板の圧縮強度評価について、平均偏心量と平均板厚の比をパラメータとして荷重偏心の影響を定量的に強度評価に考慮することを試みた。

(3) 超音波板厚計を用いた腐食鋼板の実用的板厚評価法に関する研究 (2011-2012 年度)

本研究課題を遂行する過程において、レーザー変位計による板厚測定精度を比較検証するため、ポータブル超音波板厚計を用いて腐食表面形状を測定した。その結果から、実務現場での超音波計測における以下のような知見を得た。

- ① 腐食鋼板における超音波板厚測定結果は、若干ではあるが板厚を過大評価する傾向にある。
- ② 測定結果のばらつきは、ユニット数を増加させることで大幅に抑えられる。
- ③ 超音波板厚計を用いたポイント測定により腐食鋼板の板厚を安全側に評価できる式を提案した。

(4) 腐食鋼板の座屈強度実験および強度解析 (2012 年度)

2012 年度は、板幅 150mm 程度の重度腐食鋼板に当て板補強を施して引張試験を実施する予定であったが、供試体となる鋼 I 桁の腐食状況を詳しく調査したところ、重度の腐食が認められる部位がかなり限定されている上、多数のリベット孔や断面欠損があるために、供試体の幅を約半分縮小し、かつ今後密接に関連してくるであろう重度腐食鋼板

の圧縮強度評価に載荷実験の内容を変更し、愛媛大学の協力を得て腐食表面形状計測および載荷実験、有限要素解析を実施した。

その結果、鋼板の片面が著しく腐食するような腐食形態の場合には荷重偏心が生じるため、荷重の初期段階から曲げが作用し、著しい座屈強度が低下することが実験的に確認できた。このことは、過去に申請者らが行った全面腐食鋼板の座屈強度にする解析的研究の結果とも概ね一致しており、当て板補強を考える際の添接板寸法などの補強設計に有用と思われる。しかし、複雑な凹凸面を有する腐食鋼板から、減肉にともなう荷重偏心量を定量的に把握することは実務的に考えて容易ではない。

そこで、上記の結果を受けて、局所的に著しい腐食を有する2辺単純支持板の圧縮強度解析を行い、実験結果と解析結果との整合性を検証した後、荷重偏心量をパラメトリックに変化させてFEM解析を実施し、初期不整感度曲線を用いて荷重偏心量を容易に残存強度評価に反映させることを試みた。その結果、過去に申請者らが提案した平均偏心量を初期板厚で除して無次元化した値を初期不整パラメータとする2/3乗則の感度曲線によって板の座屈強度を推定できる可能性を示した。

局所腐食鋼板の座屈強度評価法および補強法については、本申請課題にて、平成24年度の計画を一部変更して試行的に実施する運びとなったが、2013年度より基盤研究(C)にて新規採択された課題においてその成果を引き継ぎ、重度腐食鋼板の座屈強度評価法の改善提案ならびに補強設計に関する有用な提案を目指す。

(5) 旧余部鉄橋鋼材の材料特性試験および化学成分分析(2011-2012年度)

2010年度に、旧余部橋梁の主桁鋼材を入手できた。この主桁は2010年度までに本研究で供試体として使ってきた鋼材とは全く異なる環境条件で供用されていたため、腐食損傷状況を詳細に調査したとともに、鋼材の素性を明らかにするため、材料特性試験、化学成分分析等を実施した。また、このような老朽化橋梁の維持管理で今後問題となる塗膜除去法についても検討した。以下の研究成果は、(3)と同じく、本研究の目的を達成する過程で不可欠であった作業からわかったことをまとめた、いわば派生的に得られた成果である。

① 海側外桁の上フランジ下面など、雨水に当たり難い部分で断面欠損を伴う重度な腐食が確認された。

② 枕木敷設やカバープレート境界などにお

いて隙間腐食による断面欠損が顕著である。

③ 本桁は16層以上の厚い塗膜を有しており、この種の塗膜除去には、超高压水吹付工法が有効である。

④ フランジ鋼材は、降伏強度、伸び、炭素量などの点でウェブや対傾構部材に比べて劣っている。

⑤ 引張試験、化学成分、金属組織観察結果より、本鋼材は材質的にかなり不均質である可能性が高い。このことから、構造主要部への溶接補修は避けるべきと考える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計10件)

① Ohga, M., J.M.R.S. Appuhamy, Kaita, T., Fujii, K. and P.B.R. Dissanayake : Numerical Study on Remaining Strength Prediction of Corroded Steel Bridge Plates, Proc. of International Conference on Sustainable Built Environments, 査読無, No.2, 2010, 529-536

② Ohga, M., J.M.R.S. Appuhamy, Kaita, T., Fujii, K. and P.B.R. Dissanayake : Evaluation of Tensile Strength Deterioration of Steel Bridge Plates due to Corrosion, Proc. of International Conference on Sustainable Built Environments, 査読無, No.2, 2010, 521-528

③ J.M.R.S. Appuhamy, Kaita, T., Ohga, M., Fujii, K. and P.B.R. Dissanayake : Numerical investigation of corrosion effects on ductile fracture and ultimate strength, 査読有, Annual Research Journal of SLSAJ-2010, No.2, 2010, 7-12

④ J.M.R.S. Appuhamy, Kaita, T., Ohga, M. and Fujii, K : Analytical Study on Significance of Corroded Surface Measurement Intensity on Residual Strength Prediction, 査読有, Proc. of the 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2011, No.175 (DVD-ROM)

⑤ Kaita, T., J.M.R.S. Appuhamy, Itogawa, K., Ohga, M. and Fujii, K. : Experimental Study on Remaining Strength Estimation Method of Corroded Wide Steel Plates under Tensile Force, 査読有, Proc. of the 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 2011, No.176 (DVD-ROM)

⑥ Kaita, T., J.M.R.S. Appuhamy, Itogawa, K., Ohga, M. and Fujii, K.: Experimental Study on Remaining Strength Estimation Method of Corroded Wide Steel Plates Under Tensile Force, 査読有, The 12th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Proc. of EASEC-12, 2011, pp.739-740 (No.176 in CD-ROM)

⑦ Kaita, T., Appuhamy, J.M.R.S., Itogawa, K.,

Ohga, M. and Fujii, K.: Experimental Study on Remaining Strength Estimation of Corroded Wide Steel Plates under Tensile Force, 査読有, Journal of Procedia Engineering (JPE), 2011, Vol.14, pp. 2707-2713,

⑧ Kaita, T., Appuhamy, J.M.R.S., Ohga, M. and Fujii, K.: Estimation of Effective Thickness of Corroded Steel Plates for Remaining Strength Prediction, 査読有, Asset Management and Maintenance Journal (AMMJ), 2011, Vol.24, No.3. pp. 38-45

⑨ Kaita, T., Appuhamy, J.M.R.S., Ohga, M. and Fujii, K.: An Enhanced Method of Predicting Effective Thickness of Corroded Steel Plates, 査読有, Steel and Composite Structures-An International Journal (SCS), 2012, Vol.12, No. 5, pp.379-393

⑩ Kaita, T., Nishioka, h., Sugiyama, Y., Nakazawa, K. and Fujii, K.: Basal study on reliability improvement of thickness measuring result by applying portable ultrasonic thickness gauge to corroded plate, 査読有, New Developments in Structural Engineering and Construction, 2013, pp.xx-xx (掲載予定)

[学会発表] (計8件)

① 糸川和樹：幅広供試体を用いた引張試験による腐食鋼板の力学特性と残存強度評価，土木学会四国支部技術研究発表会，2010.5.15 (徳島大学)

② 桑山大輔：破壊基準を導入した腐食鋼板の FEM 残存引張強度，土木学会四国支部技術研究発表会，2010.5.15 (徳島大学)

③ 中塚 萌：局所腐食鋼板の残存強度における荷重偏心の影響，第 63 回土木学会中国支部研究発表会，2011.5.21 (岡山大学)

④ 海田辰将：超音波板厚計を用いた腐食鋼板の残存板厚測定における信頼性向上に関する研究第 63 回土木学会中国支部研究発表会，2011.5.21 (岡山大学)

⑤ Appuhamy, J.M.R.S. : Effect of surface measurement intensity on remaining strength prediction of corroded steel members, 土木学会四国支部技術研究発表会，2011.5.14 (香川大学)

⑥ 中塚萌：荷重偏心に着目した局所腐食鋼板の圧縮強度解析，土木学会第 66 回年次学術講演会，2011.9.7 (愛媛大学)

⑦ 杉山泰基：超音波板厚計を用いた腐食鋼板の実用的板厚評価法に関する研究，土木学会第 66 回年次学術講演会，2011.9.7 (愛媛大学)

⑧ Appuhamy, J.M.R.S. : Investigation of brisk finite element analytical model for prediction of remaining strength capacities of corroded steel plates, 土木学会第 66 回年次学術講演会，

2011.9.7 (愛媛大学)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

<http://www.tokuyama.ac.jp/profiles/kaita.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

海田 辰将 (KAITA TATSUMASA)

徳山工業高等専門学校・土木建築工学科・助教

研究者番号：10390519

(2) 研究分担者

該当なし ()

(3) 連携研究者

該当なし ()