

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：55503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420494

研究課題名(和文)性能回復を意識した重度腐食鋼板の座屈実験 - 強度評価から補修・補強設計へ -

研究課題名(英文) Experimental study for buckling strength of severe corroded steel members considering performance recovery - For the remaining strength estimation and repair design -

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・准教授

研究者番号：10390519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実腐食鋼材や実橋梁の補修設計や点検等に有用な知見を得るため、腐食鋼管柱の曲げ座屈実験、残存強度推定のための板厚評価法の提案、老朽化トラス橋の耐荷力解析を実施した。

対しては、超音波厚さ計を用いた腐食部位の簡易な板厚評価式を提案し、鋼支柱の腐食性状と曲げ座屈性状の関連を明らかにした。については、部材レベルから橋梁全体レベルに視点を拡大し、延命化が望まれる地域の老朽化鋼橋について、腐食が無い状態での耐荷力を活荷重倍率の概念を用いて解析的に評価した。しかしながら、解析モデルを構築する上で改善・検討すべき課題も見つかった。

研究成果の概要(英文)：This study has 3 main contents ((1) flexural buckling test of corroded steel column (2) ultrasonic thickness measurement (3) finite element analyses of an aging truss bridge) for obtaining the useful knowledge of bridge maintenance, which includes thickness inspection and repair, for the actual corroded bridge members. Main results of this study are as follows;

(1) From the flexural buckling test and UT measurement, a simple thickness estimation formula was proposed for modifying measurement results, which will be overestimated than actual thickness due to surface roughness, to safe side.

(2) From the analytical results of whole bridge model, the load bearing capacity of an actual aging truss bridge was estimated based on the concept of scale factor of B live load.

研究分野：工学

キーワード：鋼構造 腐食 残存耐荷力 座屈実験 有限要素解析 残存板厚評価 性能回復 トラス橋

1. 研究開始当初の背景

現存する鋼構造物を安全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、都市部よりも地方、大規模橋梁よりも小～中規模橋梁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）を策定、実施される予定である。

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残存強度を高精度で推定可能な強度評価技術を確認し、次に合理的な性能回復設計法とその効果を検証する技術や、より正確に残存強度を評価するための点検・計測法等にリンクさせていくことが不可欠である。

本研究では、残存強度評価と性能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性能回復を実現するためには、板レベルの部材を対象とした既往の強度評価法から、より複雑な形状および構造全体レベルでの耐荷力評価に拡大するため、新規に実験・解析を実施し、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、鋼部材の座屈を主な対象とし、これまでに提案されている腐食部材の圧縮強度評価法を性能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座屈実験を実施し、強度評価法の改善を図る。また、実際の維持管理を考えると、残存強度だけではなく、残存強度を正確に推定するための点検（板厚測定）方法や当て板等による補修方法に有用な知見を得ることを視野に入れるべきである。この考えに基づき、本研究開始当初の目的として、腐食鋼材の座屈に関する以下の研究項目の達成を目指した。

(1) 重度腐食部材の座屈実験

撤去された老朽化鋼構造物から重度腐食鋼板を切り出して供試体を作成し、2辺単純支持形式等の座屈実験を実施する。これに併せて、超音波厚さ計や2次元レーザーを用いた詳細な板厚測定を実施し、残存板厚評価法の精緻化を図るとともに、部材の座屈強度評価を行う。

(2) 重度腐食鋼板の座屈解析

座屈実験と併せて、有限要素法による座屈解析を実施し、孔食周辺などの激しい腐食による凹凸が板の降伏強度や座屈強度、座屈変形性状に与える影響を明らかにする。

(3) 性能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する。

3. 研究の方法

本研究では、著しい腐食のために撤去された鋼構造物から供試体を切り出し除錆した後、腐食表面形状測定を実施して板厚統計量を求める。次に供試体の座屈実験を実施して座屈強度を求め、代表板厚の概念を用いた強度評価結果と比較することで、強度評価法の改善点を洗い出し、残存強度を推定するための評価板厚等の見直しを図る。

一方、昨今の腐食鋼構造物における維持管理技術ニーズを鑑みると、腐食による道路附属物支柱の倒壊事故や地域の鋼橋における橋梁全体の耐荷力評価など、1枚の板レベルに関する強度評価技術よりも、より複雑な形状かつ構造全体の耐荷力に直結する成果が求められるようになってきた。このことから、本研究では、上記のような社会的要求に対してタイムリーな知見を示すため、研究対象となる供試体を板から鋼管柱に変更し、等圧縮分布を想定した単純な板の座屈から、鋼管柱の曲げ座屈強度に着目した実験および強度評価を実施することとした。また、研究代表者が過去に実施してきた腐食部材の残存強度評価法に関する実験・解析的研究成果を発展させた形で、非線形有限要素解析による老朽化鋼橋全体の耐荷力推定を試みた。

具体的には、鋼部材あるいは鋼橋全体の点検や性能回復（補修補強）設計に対して有用な情報を提供するため、以下の研究方法により2.の冒頭に示した目的の達成を目指した。

(1) 重度腐食鋼管柱の曲げ座屈実験・解析

山口県内の沿岸部で約40年間供用された後、県内で発生した腐食支柱の倒壊事故を契機とした緊急点検の際に撤去された道路照明柱（基部からの高さ約1.4m）を入手し、これを実験供試体とした曲げ座屈実験を実施した。実験は、自重に相当する一定軸力下での水平繰り返し載荷とし、基部に大きな断面欠損をともなう支柱の曲げ座屈強度および崩壊挙動に着目した。

また、供試体の有限要素解析を実施するため、シェル要素で解析モデルを作成し、基部の腐食箇所や腐食形態等をパラメータとした弾塑性非線形解析を行った。

(2) 残存強度推定のための簡易板厚評価法

(1)の実験・解析の際に、腐食が激しい支柱のベースプレート近傍の断面について、3Dスキャナと超音波厚さ計（UTG）の2種類のデバイスを用いて残存板厚の測定を行った。

3D スキャナでは、鋼表面の凹凸から得られる座標値から、2mm ピッチで板厚データを求めた。UTG では、サンドブラスト処理を施した支柱基部に 25mm ピッチで測点を設け、グラインダによる前処理無しに直径 9mm の円形探触子を接触させて板厚を計測した。これら 2 種類のデバイスによる板厚測定結果を統計処理することにより、UTG を用いた腐食支柱の残存曲げ座屈強度を簡便かつ安全側に推定するための簡易板厚評価法を検討した。

(3) 老朽化トラス橋の耐荷力解析

解析対象の鋼トラス橋は現在までに 95 年間供用されているスパン 50m の曲弦プラットトラス橋（総リベット接合）とし、梁やシェル要素による全橋解析モデルを作成する。荷重は、死荷重と現行 B 活荷重を想定するが、橋梁が崩壊するまで B 活荷重を等倍する形で載荷し、崩壊したときの荷重倍率（活荷重倍率）で橋梁全体の耐荷力を評価する。着目する部材と崩壊形式は、上弦材（圧縮材）の座屈および斜材（引張材）の降伏である。

4. 研究成果

(1) 重度腐食鋼管柱の曲げ座屈実験・解析 (2013~2014 年度)

図 1 に示すような 4 枚の補強リブを有する道路照明柱を高さ約 1.4m で切り出し、曲げ座屈実験と弾塑性 FEM 解析を行った。実験では、腐食部位に最大の曲げモーメントが生じるように、初期降伏変位 δ_y を等倍する形での水平繰返し荷重を載荷した。また、解析では実験結果と耐荷力や座屈性状の観点から比較した他、基部の腐食形態の違いにも着目した。主な成果は以下の通りである。

① 今回の道路照明柱は、健全時と比較して、曲げ耐荷力（最大荷重）が 35% 低下した ($3\delta_y$) と推定される。また、エネルギー吸収能については健全時に比べて最大で 42% ($9\delta_y$) と、大幅に低下しており、基部の腐食損傷が柱の弾塑性挙動に大きく影響を与えることがわかった。

② パラメトリック解析の結果から、基部の腐食形態や凹凸の形状によって、局部座屈と全体座屈に分かれ、この違いが柱の耐荷力に大きく影響することがわかった。（図 2, 3）

③ 断面の腐食率が大きくなるにつれて耐荷力は低下するが、補剛リブ付きの支柱では、その影響はベースプレート近傍よりもリブの上端部付近の方が大きい。また、補強リブが顕著に腐食した解析モデルでも同様に大幅な耐荷力低下が認められた。

④ FEM 解析では、材料構成則として混合硬化則を用いることで、基部に重度の腐食を有

する道路照明柱の繰返し弾塑性挙動を精度良く表現できた。

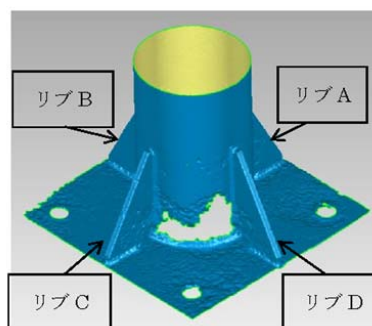


図 1 供試体の基部（レンダリング図）

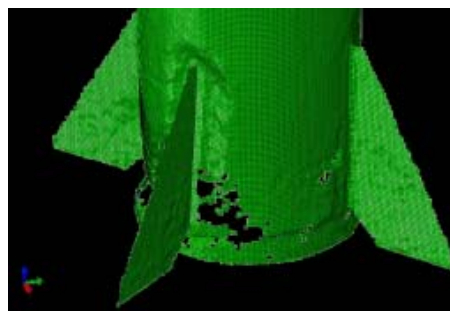


図 2 リブ付近の局部座屈（FEM）



図 3 リブ付近の局部座屈（実験）

(2) 残存強度推定のための簡易板厚評価法 (2013~2014 年度)

(1)に示した腐食照明柱の実験・解析の過程において、腐食部位の残存板厚を詳細に測定する必要があった。そこで、過去に研究代表者らが実施した UTG による腐食鋼板の合理的板厚測定法に関する研究成果⁹⁾を応用し、より重度に腐食した鋼管柱の板厚評価法について検討するため、3D レーザースキャナと UTG の両方を用いて基部の残存板厚を測定した。主な成果は以下の通りである。

① 測点のグラインダ処理をせずに支柱腐食部の UTG 測定を行い、平均板厚を求めると、実際の板厚よりも過大に評価してしまう可能性が極めて高い。このことは、測定対象の断面がベースプレートおよび地際部に近いほど顕著である（図 4）。

② 周方向 1 断面あたりの UTG 測点数を多くすることで、平均板厚の場所的なばらつきは抑えられる。本供試体の基部では、測点数を 4 点から 8 点に増やすことで平均板厚のばらつきはほぼ半減した。

③ 周方向 1 断面あたり 4 点 (90° 毎) の UTG 測定から得られる平均板厚と板厚標準偏差を用いて平均板厚を安全側に補正するための板厚評価式を下記のように提案した。

$$\text{評価板厚} = \text{平均板厚} - \alpha \times \text{板厚標準偏差}$$

補正係数 α は、断面の板厚標準偏差を用いて表すことが可能と考えられる (図 5) ため、両者の関係を明らかにする必要がある。

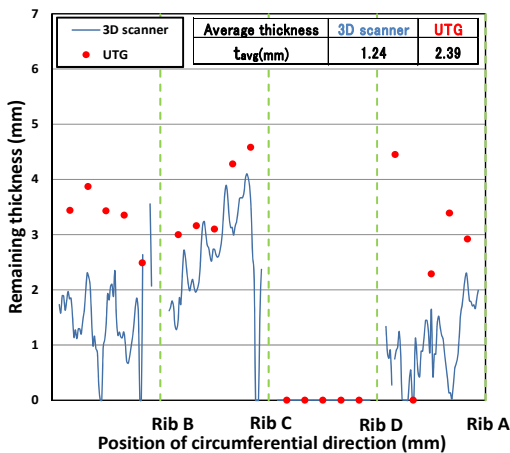


図 4 3D スキャナと UTG の測定結果の比較 (基部高さ $h=25mm$)

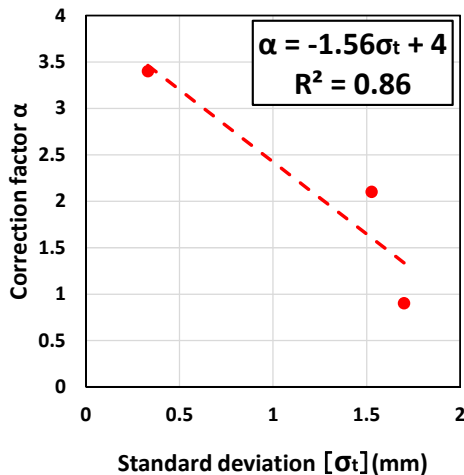


図 5 補正係数 α と標準偏差 σ_t の関係

(1), (2)の両成果より、重度に腐食した道路照明柱支柱の腐食状況と残存曲げ座屈強度・座屈性状の関係を示したとともに、その点検や補修の際に有用な知見を見出した。しかし、これらの成果は、今回の供試体 1 体からのみ得られたものである。本供試体のよう

に倒壊寸前と判断されるような減肉率を有する支柱を数多く入手することは困難であるが、様々な減肉率や腐食形態を有する支柱に対しても今後、研究事例を蓄積していくべきと考えられる。

[参考文献]

1) 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, New Developments in Structural Engineering and Construction, pp.453-458, 2013.6.

(科学研究費 若手研究(B) 2010-2012)

(3) 老朽化トラス橋の耐荷力解析 (2015 年度)

地域の老朽化鋼橋では、比較的短期間の供用年数を想定した形での維持管理 (点検の重点箇所、性能回復の判断、補修工法の選定など) に関するニーズが高まっている。また、新設時の部材の設計応力と橋梁全体で評価した場合の実応力は異なる上、腐食によって応力状態はより複雑化する。このことから、腐食に対する橋梁全体の残存耐荷力を議論するためには、FEM によって橋梁全体の崩壊形式を把握し、それぞれの形式に対応した耐荷力面での余裕分を推定する必要がある。この考えに基づき、図 6 に示すような実際の鋼橋を対象に非線形有限要素法による全橋解析を行った。主な成果を以下に示す。

① 梁要素モデルの解析結果より、上弦材の座屈によって橋梁全体が崩壊する場合の活荷重倍率は 5~6 程度であることがわかった。RC 床版を考慮しない場合には、活荷重倍率が 3.2 となったことから、全橋解析において、本来主構造部材ではない部材であっても解析モデルには正確に考慮すべきである。

② 最大の引張力が生じる斜材に着目した解析結果より、死荷重のみに対する斜材の降伏安全率は 3.02 と推定された。また、死荷重に加えて設計当時の推定活荷重を考慮しても、降伏安全率は 2.7 が確保されている。このことから、新設時の部材は主荷重に対して高い安全率を有していたことが推察される。

③ シェル要素モデル (図 6) では、RC 床版を考慮していなくても現行 B 活荷重 (活荷重倍率=1) に対して、活荷重倍率 1.9 が確保されている結果になった。

④ シェル要素モデルの端斜材に最も不利な載荷状態で活荷重倍率を増加させた場合、活荷重倍率が 3.2 で終局に至ったが、端斜材よりも床桁の曲げ座屈が先行して崩壊した (図 7)。この原因としては、RC 床版を考慮

していないこと、床桁の2次部材の断面寸法が図面に無く、実際よりも小さい値を仮定した可能性等が考えられる。このことから、各種崩壊形式に対する活荷重倍率の推定には至らなかった。

以上の成果と反省を踏まえ、今後の研究展開として、改善・注力すべき事項は以下の通りである。

- ① シェル要素モデルにRC床版を考慮する。
- ② 2次部材の断面寸法を測定する。
- ③ ①②改善後、腐食をモデルに考慮する。



図6 解析モデルのトラス橋（橋齢95年）

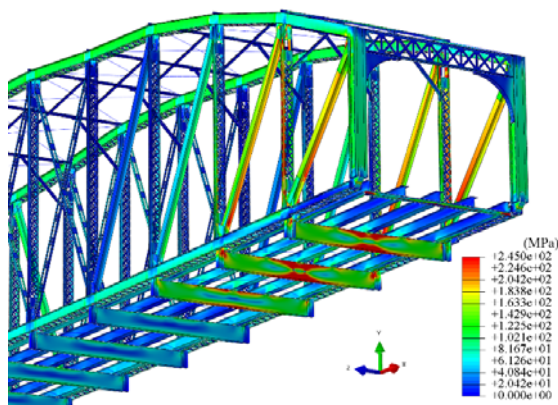


図7 解析結果の一例（ミーゼス応力分布）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計3件）

- ① Mitsunaga, T., Kaita, T. and Fujii, K.: Basal study on simple thickness evaluation for road-lighting poles with local corrosion near the baseplate, *Implementing Innovative Ideas in Structural Engineering and Project Management*, 査読有, 2015, pp.243-248. 「Sydney (Australia)」
- ② Satake, R., Fujii, K., Kosako, N. and Kaita, T.: Remaining strength test of riveted joint of a bridge used for about 100 years, *Bridge Maintenance, Safety, Management and Life Extension- Chen, Frangopol & Ruan (Eds) © 2014 Taylor & Francis Group*, 査読有, 2014, pp.2441-2448. 「Shanghai, (China)」
- ③ 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, *New Developments in Structural Engineering and Construction*, 査読有, 2013, pp.453-458. 「Hawaii (USA)」

〔学会発表〕（計4件）

- ① 佐竹亮一：老朽化鋼トラス橋の耐荷力評価に関する解析的検討ー【中間報告】高齢化したインフラ構造物の維持補修技術検討委員会ー, 第68回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, I-18, 2016.5.21「広島工業大学五日市キャンパス（広島県・五日市市）」
- ② 山根達郎：全橋解析モデルを用いた既設鋼トラス橋の耐荷力推定に関する基礎的検討, 第68回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, I-17, 2016.5.21「広島工業大学五日市キャンパス（広島県・五日市市）」
- ③ 小山諒子：周南市最古の鋼橋「松室大橋」における損傷調査と維持管理を意識した住民アンケート, 第68回土木学会中国支部研究発表会発表概要集, I-30, 2016.5.21. 「広島工業大学五日市キャンパス（広島県・五日市市）」
- ④ 光永知央：超音波板厚測定による道路照明柱基部の簡易な平均板厚評価に関する研究, *土木学会第70回年次学術講演会講演概要集*, I-402, pp.803-804, 2015.9.16「岡山大学津島キャンパス（岡山県岡山市）」

〔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・
准教授

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