

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 2 日現在

機関番号：54501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04587

研究課題名(和文) 腐食した組立部材の圧縮耐荷力特性に関する研究

研究課題名(英文) Study on the ultimate compression strength properties of corroded built-up member

研究代表者

三好 崇夫 (Miyoshi, Takao)

明石工業高等専門学校・都市システム工学科・准教授

研究者番号：40379136

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、腐食に伴う部分欠損が生じた鋼橋の組立部材の圧縮強度について明らかにするため、現地調査を実施するとともに、実橋から撤去された組立部材を用いて材料特性について実験的に把握した。また、強度に及ぼす影響の大きい残留応力の計測を実施した。それらの結果に基づいて、現地調査で腐食損傷の認められた組立部材を対象に、コンピュータシミュレーションによって圧縮強度を調べた。そして、組立部材を構成するレーシングバーや形鋼、タイプレートの腐食による部分欠損と圧縮強度の低下の関係について明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

伸縮装置からの漏水は、鋼橋の代表的な腐食要因であるが、本研究で実施した現地調査からは、周囲に繁茂した草木も腐食に影響を及ぼすことが示唆された。

経年鋼材の材料特性に関するデータ蓄積の必要性も指摘されている中で、本研究では、材料試験により、1906年に竣工した鋼橋の組立部材の材料特性に関するデータを入手できた。また、計測事例の少ない、経年鋼材の残留応力についても、同部材を構成する溝形鋼の残留応力を計測し、その分布性状について明らかにした。

本研究で実施したコンピュータシミュレーションでは、あまり議論されていない組立部材のモデル化や、部分的な欠損が生じた組立部材の強度について明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study conducted a field study and tested material properties using specimens obtained from built-up members of the actual steel bridge to investigate the compressive strength of the built-up member employed in the steel bridge. In addition, residual stress, which significantly affects the compressive strength of the built-up member, was measured using the specimen. Based on the results, we numerically investigated the compressive strength of the actual built-up members with damages due to corrosion observed in a field study. As a result, we found a relationship between partial loss of lacing bars, tie plates, and section steels consisting of a built-up member due to corrosion and the reduction of compressive strength.

研究分野：構造工学

キーワード：組立材 腐食 レーシングバー 形鋼 リベット 部分欠損 圧縮力 耐荷力

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

1960年頃までに建設された鋼橋には、形鋼とエンドタイププレート (E.T.P.) やレーシングバー (L.B.) をリベット接合した組立部材が用いられた。同部材には、腐食に伴う断面欠損や破断も発生している。形鋼は腐食形態によっては幅厚比が増加するため、局部座屈の発生が懸念される。加えて、腐食に伴う断面欠損過程では残留応力の再配分や、それが局部座屈強度に及ぼす影響も想定される。しかし、腐食損傷をもつ組立部材の圧縮耐荷力特性はもとより、同部材の腐食状況、形鋼の残留応力分布やその断面欠損過程における再配分挙動は明確にされていない。また、同部材に用いられている鋼材の機械的特性はばらつきが大きいとされている。

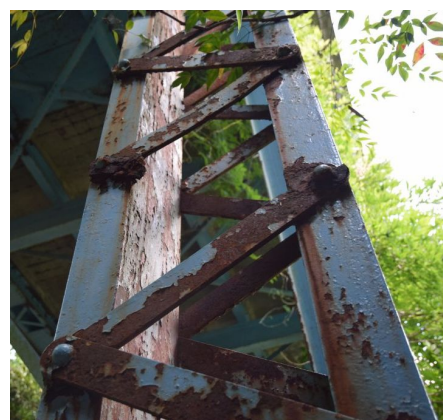


写真1 腐食損傷をもつ組立部材

### 2. 研究の目的

本研究では、以下の(1)~(6)について明らかにすることを目的とする。

- (1) 実橋の組立部材の腐食状況
- (2) 実橋から撤去された組立部材の板厚、形状寸法
- (3) L.B.や形鋼などの鋼材の機械的特性
- (4) 組立材を構成する溝形鋼の残留応力分布とその断面欠損過程における再配分挙動
- (5) 腐食損傷をもつ組立部材の圧縮耐荷力評価のための簡易な解析モデル
- (6) 腐食損傷をもつ組立部材の圧縮耐荷力特性と実用的なその評価法

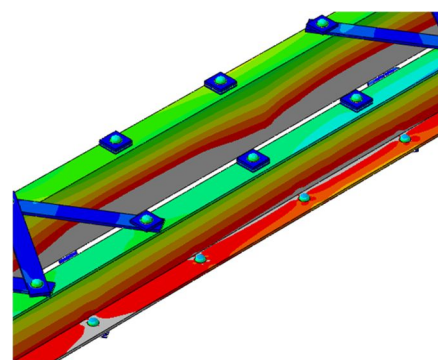


図1 リベットを含む有限要素モデル

### 3. 研究の方法

「2. 研究の目的」で述べた(1)~(6)について明らかにするため、下記を実施した。

- (1) 設計図面と計算書が入手可能で、組立部材を持つ鋼アーチ橋 (1933年竣工) の現地調査を実施し、腐食状況や板厚計測を実施した。
- (2), (3), (4) 森村橋 (1906年竣工) の復原工事で撤去された組立部材を入手し、3D レーザスキャナ等を用いて板厚や寸法計測を実施した。また、撤去部材から試験片を採取し、引張試験、Vノッチシャルピー試験、ピッカース硬さ試験、化学成分分析、結晶粒度試験等を実施した。さらに、撤去材の溝形鋼については切断法により、部材軸方向の残留応力を計測した。

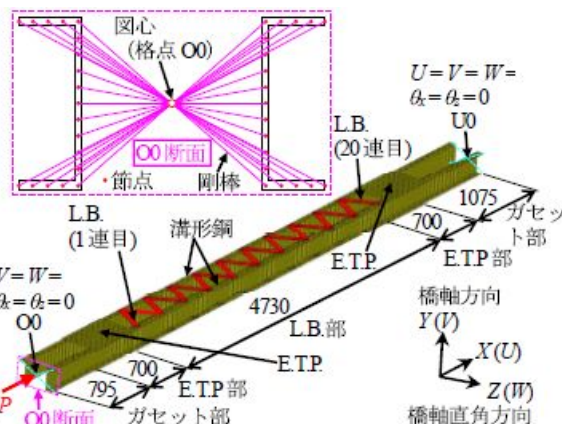


図2 実橋組立部材の有限要素モデル

- (5) L.B.のモデル化に種々の有限要素を適用した解析モデル、図1に示すように、リベットも含めた解析モデルを作成して弾塑性有限変位解析を実施し、解析結果の比較から有限要素やリベットのモデル化の影響について検討した。
- (6) (1)の現地調査において、腐食損傷が認められた圧縮力を受ける組立柱を対象に、支間中央で部材長の1/1000倍の最大値をもつ正弦半波形状の初期たわみをもつ、図2に示す解析モデルを作成した。仮定した初期たわみの妥当性は、座屈固有値解析を実施して検証した。腐食損傷として、L.B.やE.T.P.の消失、溝形鋼の部分欠損を想定した複数の解析ケースを設定し、強、弱軸まわりの曲げ座屈強度に着目して弾塑性有限変位解析を実施した。同解析から得られた最大荷重に基づいて、道路橋示方書<sup>1)</sup>(道示)の圧部材の耐荷力評価法の適用性について検討した。

### 4. 研究成果

- (1) 現地調査によれば、写真1のようなL.B.の腐食による消失が目立った。また、支点部の端横桁、鉛直材と端対傾構斜材は、伸縮装置からの漏水のほか、周囲の植生が日射を遮ったために腐食を生じ、鉛直材の溝形鋼、タイプレートやL.B.に腐食や破断が見られた。
- (2) 一例を図3に示すように、撤去材の板厚計測結果によれば、溝形鋼においてもリベット周りの腐食欠損や溝形鋼に土砂の堆積によるものとみられる腐食減肉が認められたが、撤去材の実橋における採取箇所が明確でないことや、限られたデータしか得られていないため、以降の弾塑性有限変位解析では、腐食はL.B.や形鋼の部分的な消失として考慮した。



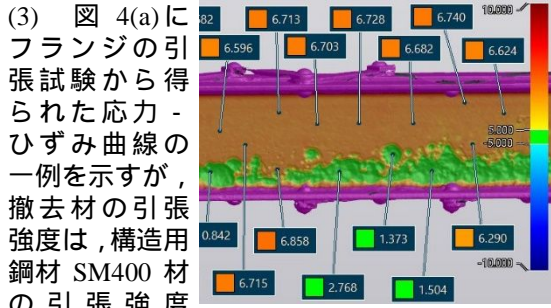


図3 撤去材の板厚計測結果

(3) 図4(a)にフランジの引張試験から得られた応力-ひずみ曲線の一つを示すが、撤去材の引張強度は、構造用鋼材 SM400 材の引張強度  $400\text{N/mm}^2$  を下回る場合や、C含有量が低く、コトترل効果により、同図(b)のL.B.1のように、明確な降伏棚を示さない場合も見られた。このほか、撤去材は SM400 材に比べて著しい低温脆化特性、低いピッカース硬さを有し、PやSの含有量が高いこと、フェライトとパーライトの混合組織を持ち、平均結晶粒度番号7~8と粗い組織を持つことも分かった。

(4) 撤去材を構成する溝形鋼と残留応力の計測箇所を写真2と図5に示す。図5に示す左側溝形鋼の残留応力  $\sigma_r$  の計測結果について、降伏応力  $\sigma_y$  で無次元化して、既往のSS400溝形鋼(75x40x5x7)の計測結果<sup>2)</sup>とともに図6に示す。これより、分布性状の規則性は認められず、残留応力は概ね既存の計測結果と同程度の大きさで、小さいものであった。よって、以降の弾塑性有限変位解析では残留応力の影響を無視し、断面欠損過程における残留応力の再配分も無視した。

(5) 腐食による一切の損傷のない健全状態を対象に、L.B.をそれぞれトラス要素、ビーム要素とシェル要素でモデル化した弾塑性有限変位解析結果に有意な差異はなかったため、本研究では基本的にはL.B.のモデル化には計算上の負担が小さいトラス要素を用いることとした。リベットのモデル化については、図1に示すように、ソリッド要素を用いて作成した有限要素モデルによる弾塑性有限変位解析によって検討し、L.B.が5本程度消失してもリベットが残っていれば耐荷力の影響は少ないが、リベットも消失した場合は最大荷重が大きく低下し、耐荷力への影響が大きいことを確認した。

(6) 代表的な解析結果として、強軸まわりに曲げを受ける場合の健全(解析ケースH)と、部材軸方向片側でL.B.の50%が消失した解析ケースHULEの最大荷重時の変形状況を図7に示すが、L.B.の消失部はあたかも重ねばりのように曲げ変形し、L.B.の剛性への寄与が伺える。図8はこれらのケースに加えて、支間中央部のL.B.が50%消失したケースも含めて圧縮力Pと変位Uの関係を示す。P,Uはそれぞれ降伏軸力  $P_y$ 、そのときの変位  $U_y$  で無次元化した。L.B.については、同図に示すように全体の50%が消失すると、道示の設計耐荷力U.L.を下回り、25%以内の消失であれば、最大荷重はU.L.を上回った。

<引用文献>

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II鋼橋・鋼部材編，2017.
- 2) 林田幸浩：繊維化塑性関節法の汎用性の向上と実用化に関する研究，長崎大学博士学位論文，2007.

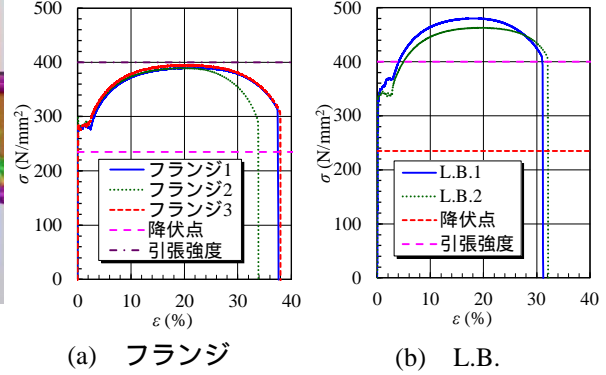


図4 撤去材の応力-ひずみ曲線

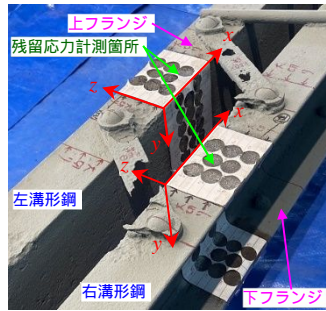


写真2 残留応力の計測箇所

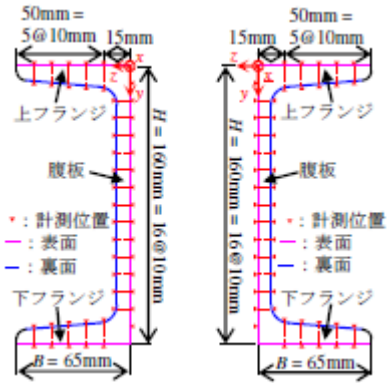


図5 断面内の計測位置

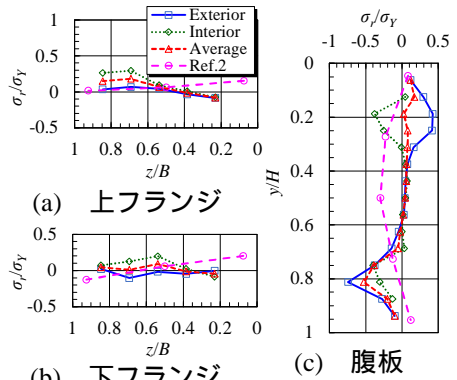


図6 左溝形鋼の残留応力分布

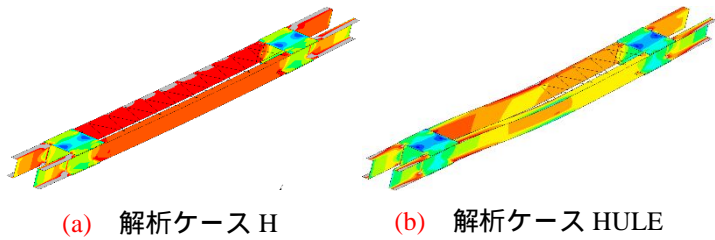


図7 最大荷重時の変形と相当応力分布

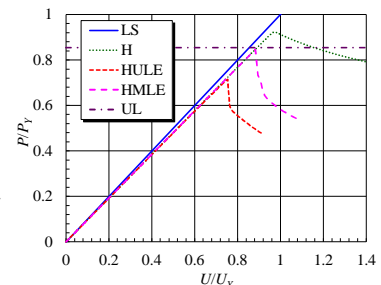


図8 圧縮力-軸方向変位関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 三好 崇夫, 岩坪 要, 高井 俊和, 玉田 和也	4. 巻 29
2. 論文標題 建設から115件が経過する鋼橋組立材の材料特性	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 48-57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中來田 宰, 三好 崇夫, 岩坪 要, 高井 俊和, 玉田 和也	4. 巻 68A
2. 論文標題 経年溝形鋼の残留応力とレーシングバーが消失した組立柱の圧縮強度	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 112-122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 岩坪 要, 小田七海, 三好崇夫, 高井俊和, 玉田和也	4. 巻 28
2. 論文標題 溝形鋼を用いた組立圧縮材の耐荷挙動について	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 102-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 三好崇夫	4. 巻 63
2. 論文標題 我が国の道路橋設計基準における組立柱の耐力条項に関する調査	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 明石高専研究紀要	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 上月 凜, 中来田 宰, 三好 崇夫	4. 巻 65
2. 論文標題 腐食損傷を有する組立柱の弱軸まわりの曲げ座屈強度	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 明石工業高等専門学校研究紀要	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 中来田 宰, 三好 崇夫, 岩坪 要, 高井 俊和, 玉田 和也	4. 巻 30
2. 論文標題 レーシングバーが消失した組立柱の耐荷性状	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 鋼構造年次論文報告集	6. 最初と最後の頁 767-776
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 三好崇夫, 岩坪 要, 高井俊和, 玉田 和也
2. 発表標題 建設から115年が経過する鋼トラス橋組立材の材料特性
3. 学会等名 令和3年度 土木学会全国大会 第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 建設から115年が経過する鋼トラス橋組立材の残留応力分布
2. 発表標題 中来田宰, 三好崇夫, 岩坪 要, 高井俊和, 佐竹亮一, 玉田和也
3. 学会等名 令和3年度 土木学会全国大会 第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩坪要, 小田七海, 三好崇夫, 高井俊和, 玉田和也
2. 発表標題 組立圧縮材の設計と耐荷力挙動について
3. 学会等名 令和2年度 土木学会全国大会 第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小嶋悠太, 高井俊和
2. 発表標題 初期不整を考慮した組立柱部材の座屈固有値に関する基礎的検討
3. 学会等名 令和2年度 土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中來田 幸, 三好 崇夫, 岩坪 要, 高井 俊和, 玉田 和也
2. 発表標題 腐食損傷を有する組立柱の終局挙動
3. 学会等名 令和4年度 土木学会全国大会 第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森本 賢太, 古市 太陽, 高井 俊和, 三好 崇夫, 岩坪 要, 玉田 和也
2. 発表標題 リベット接合部を考慮した組立て柱部材の腐食劣化後の座屈挙動に関する解析的検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Miyoshi, T. Nakakita, K. Iwatsubo, T. Takai, K. Tamada
2. 発表標題 Compression strength of aged built-up column with vanished lacing bars
3. 学会等名 The Eighth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation (SEMC 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takai T, Furuichi T, Miyoshi T, Iwatsubo K, Tamada K, Morimoto K
2. 発表標題 Numerical study on load-carrying capacity of built-up column damaged and lost lacing bars
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Applied Engineering and Sciences, SAES 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	玉田 和也  (Tamada Kazuya)  (00455148)	舞鶴工業高等専門学校・その他部局等・教授   (54301)	
研究分担者	高井 俊和  (Takai Toshikazu)  (00759433)	九州工業大学・大学院工学研究院・准教授   (17104)	
研究分担者	岩坪 要  (Iwatsubo Kaname)  (60290839)	熊本高等専門学校・生産システム工学系 A C グループ・教授   (57403)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------