

令和元年6月18日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06472

研究課題名（和文）鉛直・水平補剛材に重度の腐食損傷を受けた鋼桁腹板のせん断耐荷力評価と機能回復技術

研究課題名（英文）Shear load capacity evaluation and multi-functional recovery technology of heavily corroded steel girder with vertical and horizontal stiffeners

研究代表者

有住 康則（ARIZUMI, Yasunori）

琉球大学・工学部・教授

研究者番号：90109306

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、鋼桁端支点近傍の腐食損傷が主桁のせん断耐荷力に及ぼす影響を解明し、腐食損傷鋼桁の機能回復技術の提案を目的としている。

腐食模擬桁試験体を用いて、せん断耐荷力の低下メカニズムの解明を行った実験結果より、腐食模擬試験体は健全モデル試験体と比較してせん断耐荷力が約半減した。次に、腐食破断部の機能回復技術に当板ボルトと炭素繊維補修を適用した実験結果より、健全相当の耐荷力回復と十分なダクタリティが得られた。この当て板ボルトと炭素繊維接着の併用工法の検証として、実物大試験体を用いた耐荷力実験を行った。その結果、同工法により、腐食した鋼桁端部のせん断耐荷力と変形保持性能を回復できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、社会生活基盤を支える重要なインフラの鋼橋において、腐食による重大損傷が多数報告されており、損傷後の鋼橋の安全安心に対する技術の構築が強く要求されている。本研究では、腐食の生じやすい桁端部と支点近傍を対象に残存耐荷力の診断法と機能回復技術の構築を目的に、実験および解析的研究を実施した。その結果、腐食損傷を受けた鋼桁端部のせん断耐荷力特性の解明と効果的な機能回復方法を提案した。

研究成果の概要（英文）： The purpose of this study is to clarify the effect of corrosion damage the end of the steel girder on the shear load capacity, and to propose the functional recovery technology of the corrosion steel girder. From the experimental results of elucidation of the mechanism that the shear load capacity decreases by the experimental girder of the corrosion model, the experimental load of the corrosion model was about half the shear load capacity compared with the no corrosion model. Next, from the experimental results of applying this plate bolt and carbon fiber repair to the functional recovery technology of the corrosion fractured part, load capacity recovery and sufficient ductability of the reference model were obtained.

As verification of combined use of reinforcing plate bolt method and carbon fiber bonding method, as a result of Load capacity test by full-scale test girder, it was possible to recover the shearload capacity and deformation performance of corroded steel girder end .

研究分野：橋梁工学

キーワード：鋼橋 腐食損傷 残存耐荷力 機能回復 補修補強 耐荷力実験 耐荷力解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、社会生活基盤を支える重要なインフラである鋼橋において、腐食による重大損傷が多数報告されており、通行規制、大規模な補強および架け替えなどが増加している。このように腐食損傷を受けた鋼橋の増加の背景を踏まえ、腐食損傷後における鋼橋の安全性の検証となる残存耐力診断法と機能回復技術の構築が強く要求されている。

2. 研究の目的

本研究では、鋼橋で最も腐食の生じやすい桁端部と支点近傍を対象として、腐食損傷を受けた鋼桁の残存耐力の診断法と機能回復技術の構築を目的とした。ここで、研究対象の腐食部材は、鋼桁端部および支点部の耐力に影響を与える垂直・水平補剛材およびその周辺の腹板（ウェブ）とした。

3. 研究の方法

1) 腐食損傷した鋼桁端部のせん断耐力の低下メカニズムの解明

①弾塑性 FEM 解析

解析的研究では、実橋での腐食実態に基づき桁端支点近傍の腐食進行状態を変化させたパラメトリック FEM 解析を実施し、各腐食状態がせん断耐力に及ぼす影響を明らかにする。

②せん断耐力実験

実験的研究では、解析で解明された各腐食状態のせん断耐力に及ぼす影響度合いに基づき、影響の大きい腐食モデルを設定した鋼桁端部を用いて、実大の 1/3 モデルの試験桁を用いた中型せん断耐力実験を行い、せん断耐力の低下メカニズムを明らかにする。

2) 腐食損傷した鋼桁端部の機能回復技術の提案と検証

腐食損傷した鋼桁端部のせん断耐力の低下メカニズムに基づき、その低下したせん断耐力を回復することを目的に、実大の 1/3 モデルの試験桁を用いた中型せん断耐力実験を実施した。また、機能回復技術としては、鋼橋の補修技術で実績のある当て板ボルト工法、炭素繊維接着工法、およびそれらの併用工法を対象とした。研究ステップは、まず、1/3 モデルの中型せん断耐力実験で各種機能回復技術の評価を行い、次に、実大スケールの大型試験体を用いたせん断耐力実験による検証を行った。

4. 研究成果

1) 腐食損傷した鋼桁端部のせん断耐力の低下メカニズムの解明

①弾塑性 FEM 解析

腐食損傷により鋼桁端部のせん断耐力が大きく低下する損傷形態の抽出を目的に解析的検討を行った。図 1 に解析モデルを示す。着目パネルの板厚は 3.2mm、降伏応力は 360MPa とし、完全弾塑性解析を行った。解析パラメータは、実橋での腐食実態を踏まえ、ウェブと支点補剛材境界部、ウェブと垂直補剛材境界部、およびウェブと下フランジ境界部の 3 つの腐食損傷を対象として、その組み合わせを含めて 5 つ設定した。ここで、支点補剛材および垂直補剛材とウェブとの境界部の腐食はウェブ面の切上げ高さで再現した。

解析結果より、5 つの解析パラメータのうち、3 つの腐食損傷を全て再現した腐食モデルとウェブと垂直補剛材境界部およびウェブと下フランジ境界部の 2 つの腐食損傷を再現した腐食モデルが耐力に影響を与える結果となった。一方、支点補剛材とウェブとの境界部の腐食損傷はせん断耐力に影響しない結果を得た。この理由は、せん断座屈後の後座屈強度は斜め張力場の形成で抵抗するが、この支点補剛材とウェブとの境界部は、この斜め張力場を形成に重要なアンカー位置とは無関係（逆の位置）であるためと考えられる。

②せん断耐力実験

腐食減肉を模擬した鋼桁試験体を用いたせん断耐力実験を実施した。図 2 に試験体と載荷方法を示す。荷重は載荷装置 1 および 2 の 2 台の油圧ジャッキ（最大載荷 1000kN/台）を使用し、P1:P2 が概ね 1:3 の荷重を保つように変位制御にて載荷した。解析結果を踏まえ、腐食形態はウェブと下フランジ境界部および両補剛材のウェブ面の切上げとし、切上げ高さは 75mm とした。なお、健全モデルのウェブ板厚は 4.5mm、腐食によるウェブの一樣減肉を模擬した板厚は 3.2mm とした。写真 1 にウェブと下フランジ境界部および両補剛材のウェブ面を切上げた腐食モデルの試験体を示す。

実験結果より、基準となる健全モデルのせん断耐力は 160MPa であった。それに対して、ウェブと下フランジ境界部および両補剛材のウェブ面の切上げモデルにより 80MPa と健全時の約半分の耐力まで低下した。また、その終局時の変形モードは、切上部に斜め張力場が形成され、ウェブ下部が最も大きな面外変形となった。

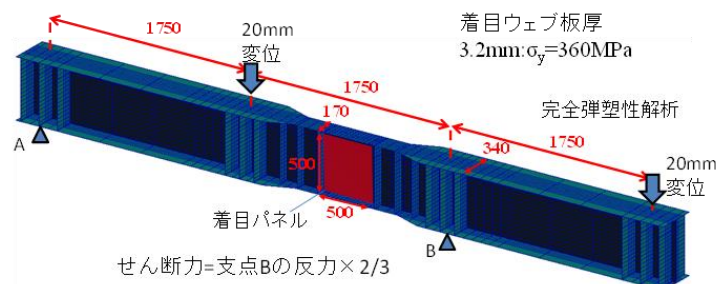


図1 FEM解析モデル

2) 腐食損傷した鋼桁端部の機能回復技術の提案と検証

① 中型せん断耐荷力実験による各種機能回復技術の評価

本実験では、当板ボルト法、当板ボルト法と炭素繊維法の併用の2種類を適用した。ここで、当板ボルト法に用いる高力ボルトは M20F10T を使用した。炭素繊維はヤング率 $2.45 \times 10^5 \text{MPa}$ 、繊維目付量 300g/m^2 、引張強度 3400MPa を使用した。炭素繊維の接着方向はせん断座屈時に生じる斜め張力場方向に沿って設置し、1層目は引張方向、2層目は圧縮方向として、交互に接着した。写真2に当板ボルト法のせん断試験体、当板ボルト法と炭素繊維接着法の併用法のせん断試験体を示す。

図3の実験結果より、当板ボルト法は、損傷により低下したせん断耐荷力を回復されており、更に健全モデル以上の耐荷力が得られた。また、当板ボルトと炭素繊維接着の併用法も健全モデル以上の耐荷力が得られ、炭素繊維4層貼り付けモデルで当板ボルト法のみよりも大きな耐荷力となり、ウェブ面への炭素繊維法の適用によって耐荷力の上昇が見られた。

終局時の変形モードとして、当板ボルト法は当板より上部のウェブに斜め張力場が形成され、ウェブ中央で最も大きな面外変形となった。当板ボルトと炭素繊維の併用法では当板ボルト法同様に当板より上部のウェブに斜め張力場が形成され、大きな面外変形が確認された。

以上の結果より、当板ボルト法は、腐食損傷で低下したせん断耐荷力を健全モデル以上まで回復できる結果を得た。当板ボルトと炭素繊維の併用法では、全てのケースで当板ボルト法以上の耐荷力を得た。

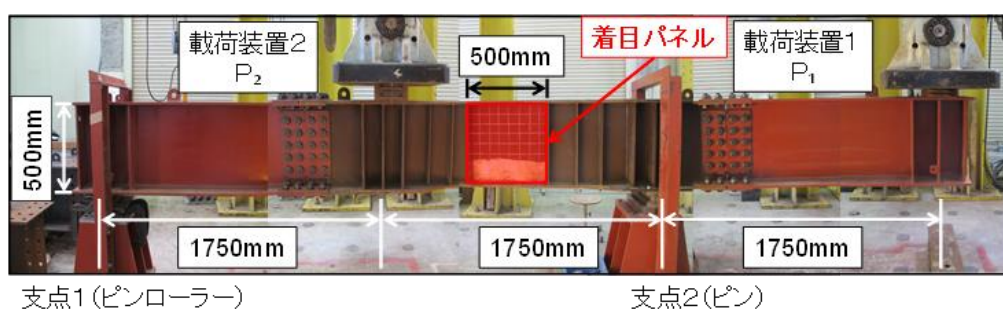


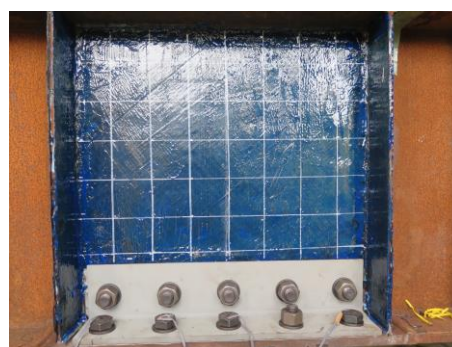
図2 せん断実験体と荷重方法



写真1 腐食模擬モデル



a) 当て板ボルト法



b) 当て板ボルト+炭素繊維併用法

写真2 実験検討した機能回復技術

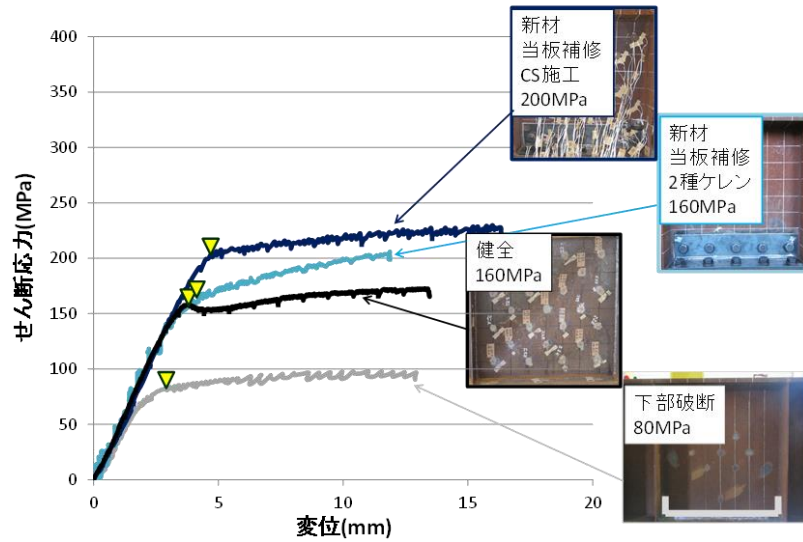


図3 せん断耐荷力（健全・破断・当板ボルト法）

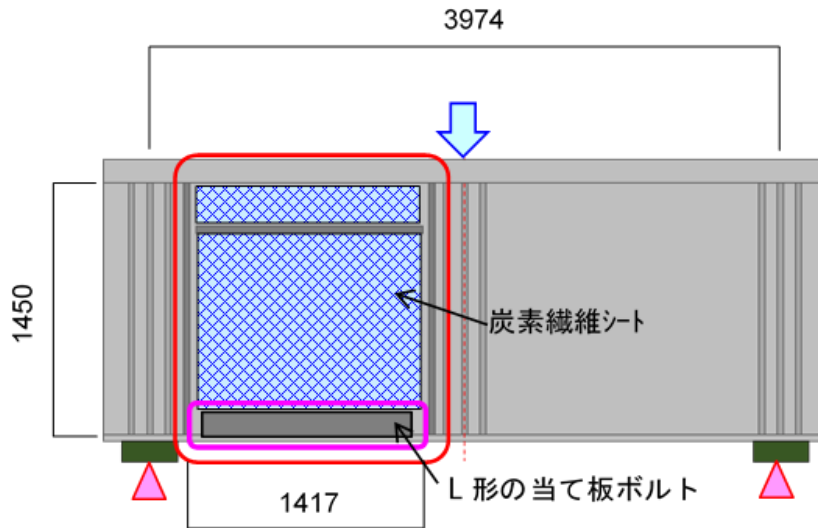


図4 機能回復技術の検証試験体

②大型試験体を用いたせん断耐力実験による検証

本実験では、中型せん断試験で得られたせん断耐荷力の回復技術の結果を基に、実大スケールのせん断耐荷力実験により耐荷力回復性能の評価を実施した。検証した回復技術は、ウェブと下フランジの腐食破断には高力ボルト摩擦接合を用いた当て板ボルト法、ウェブの腐食減肉には炭素繊維シートを適用した。図4に機能回復技術を検証した大型せん断試験体を示す。本試験体は、鋼I断面の実大スケール試験桁とした。試験機は6000kN大型試験機を使用した。

対象ウェブパネルには重度の腐食状態を再現した。まず、ウェブの腐食減肉を模擬して6mm鋼板を使用、ウェブと下フランジの接合部を破断、支点補剛材および垂直補剛材とウェブと境界部のウェブ面75mm切上げして腐食を模擬した。次に、水平補剛材を9mmから6mm減肉させた3mm鋼板を使用、水平補剛材とウェブと接合部の板厚を1mmとした。また、垂直補剛材は8mmから5mm減肉の3mm鋼板を使用した。

上記の重度の腐食損傷モデルに対して、適用した回復技術としては、下フランジとウェブ境界部の腐食破断に対しては高力ボルト摩擦接合によるL形部材の当て板法を適用、ウェブ減厚の回復には炭素繊維シート（目付量600g/m²）を片側6層（計12層）の板厚総計8.4mm相当を施した。また、水平および垂直補剛材については、ともに当て板高力ボルト摩擦接合を実施した。

重度の腐食損傷モデルに対して、当て板ボルト法と炭素繊維接着の併用法によるせん断耐荷力の実験結果より、健全モデル相当以上の十分な耐荷力の回復が確認された。また、炭素繊維シートの剥離やボルトのすべりなどによる急激な耐力低下も見られなかった。

以上のことより、本回復技術は、重度の腐食損傷に対しても十分な耐荷性能と変位性能を有すると言える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- ①田井政行、下里哲弘、高橋鴻、長坂康史：CFRPによるウェブのせん断耐荷力向上メカニズムに関する一考察：鋼構造論文集、第25巻第99号、pp. 41-51、2018年、(査読有)

〔学会発表〕(計4件)

- ①坂本健太、長坂康史、下里哲弘、田井政行、有住康則：腐食凹凸面に対する当板ボルト補修法のすべり耐力特性に関する実験的研究、土木学会西部支部沖縄会 第7回技術研究発表会、琉球大学(沖縄県)、2018年1月
- ②上村大河、下里哲弘、田井政行、玉城喜章：鋼桁ウェブ中央部の減肉に対するせん断耐荷力評価法の提案、土木学会西部支部沖縄会 第7回技術研究発表会、琉球大学(沖縄県)、2018年1月
- ③Y.NAGASAKA、T.SHIMOZATO、Y.ARIZUMI、M.TAI、T.TAKEBUCHI：Experimental Study on Recovery Method of Shear Strength for Corroded Steel Plate Girder、1st International Conference on Durability of Building and Infrastructures, Malaysia, 2018.
- ④高橋鴻、有住康則、下里哲弘、田井政行、玉城喜章：当て板ボルトと炭素繊維補修による腐食鋼I桁端部のせん断耐荷力特性、土木学会西部支部沖縄会 第6回技術研究発表会、琉球大学(沖縄県)、2017年1月

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：下里 哲弘 (SHIMOZATO, Tetsuhiro)

所属研究機関名：琉球大学

部局名：工学部工学科社会基盤デザインコース

職名：准教授

研究者番号：90452961

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。