

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：18001

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420489

研究課題名(和文) 重度の腐食損傷を受けた鋼桁腹板のせん断耐荷力性能評価と機能回復に関する研究

研究課題名(英文) Study on the ultimate shear strength and recovering function of steel plate girders seriously damaged by corrosion

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) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：鋼橋の腐食損傷は、伸縮装置や床版端部からの漏水や橋台天端に堆積する土砂の影響から桁端部に集中しやすい。本研究では、腐食の進行によりウェブと下フランジの首溶接部付近の破断損傷を模擬した試験体を設定し、このモデルに対して、下部欠損のみの回復とウェブ全面の健全回復を各種補修材で補修した試験体を製作し、せん断耐荷力実験を行い、鋼桁腹板の補修・補強による機能回復方法について検討を行った。補修・補強を行った試験体のせん断耐荷力実験の結果、弾性係数の低いウレタン系接着剤を母材と補修材料との間に挿入することで、補修材の剥離が急激に起らず、耐荷力の回復と高い変形性能の持続が共に得られることが確認された。

研究成果の概要(英文)：Recently, the corrosion damage on steel plate girders has been often reported. In particular, a section loss and a plate thickness reduction of steel plate girders seriously damaged by corrosion are concentrated in bridge girder ends, and the damage leads bridge failure in the worst case scenario. Since it is estimated that the corrosion damage of steel bridges greatly increases, effective and efficient repair methods are required. In this research, the recovery shear strength for ends of steel plate girders damaged by corrosion are investigated. This study focuses on the repair method with carbon fiber sheets for shear panels. As a result of tests, the good specimen of shear strength, load carrying capacity and elongation performance, has been proven to be with low elasticity adhesives.

研究分野：工学 土木工学 構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：鋼橋 腹板 せん断耐荷力 残存耐荷力 補修・補強工法 機能回復

1. 研究開始当初の背景

(1)近年、橋梁において重大損傷が多数報告されており、更に、社会経済情勢の変化により社会基盤施設の長寿命化やライフサイクルコストの最小化が強く要求されている。

(2)鋼橋の経年劣化の現象として、腐食損傷が代表的であり、経済的かつ高耐久性を有する補修工法の開発が求められる。鋼橋の腐食損傷は、伸縮装置や床版端部からの漏水や橋台天端に堆積する土砂の影響から桁端部に集中しやすい¹⁾。

(3)腐食損傷対策は、その腐食損傷度合によって対処法が異なり、腐食減厚量が小さい場合は塗装補修の適用となる。しかし、桁端部の腐食減厚の場合は、激しい腐食により部材破断に至った損傷に対して当て板ボルト工法などが適用されている。現在、腐食損傷対策における標準的な補修工法は当て板ボルト工法であり^{2)~4)}、これまでに多く研究が行われており、例えば、腐食の不陸面処理にエポキシ樹脂パテを用いた際の硬化時間と高力ボルト軸力のリラクセーションの影響特性に関する実験研究が行われている⁵⁾。また、補修材に炭素繊維強化樹脂材（以下、CFRP）を用い、エポキシ樹脂接着剤で接合した実験的研究では、鋼板とCFRPとの間に低弾性パテ材を挿入することで、補強材の急激な剥離を緩和し、せん断強度が増加する効果があることが示されている⁶⁾⁷⁾。更に、腐食凹凸面を人工的に模擬した腐食鋼板に当て板の板厚をパラメータとした実験的研究により、当て板の板厚の違いで剥離現象が異なることを示している⁸⁾。

(4)鋼橋の長期耐久性を確保するためには腐食損傷の集中しやすい桁端部における効果的な性能回復技術を確認することが重要である。

2. 研究の目的

(1)既往研究で得られた腐食鋼板に対する各種補修工法の知見を踏まえ、本研究では腐食損傷した鋼桁端部の効果的な性能回復技術の検討を目的として、損傷シナリオを実橋で多く発生しているウェブ減厚モデル、ウェブと下フランジとの溶接破断モデルを研究対象として設定し、各種補修工法に対する耐荷力特性と変形性能の検証実験を行った。

(2)損傷部位を模擬した補修材にて修復した桁試験体のせん断耐荷力実験結果に基づき各種補修工法によるせん断耐荷力の回復効果と変形性能について考察を行った。

3. 研究の方法

(1)ウェブの腐食を模擬した桁試験体モデルを用いて、せん断耐荷力実験を実施した。腐食損傷試験体では、ウェブ腐食の一様減厚

に加え、ウェブと下フランジとの首溶接付近の局部腐食の進行による断面欠損を模擬した。せん断座屈やせん断耐荷力の性能回復では、せん断後座屈後の変形追従性が要求される。従って、静的引張試験で得られた知見を基に、耐荷力の回復と高い変形性能が期待できる補修材と接合材の組合せを選定して、せん断耐荷力実験を実施した。図-1に桁試験体の寸法概要を示す。

(2)荷重方法は、図-2に示すように試験桁の両側に荷重桁を設定して、2点荷重、2点支持として、試験体中央に配置した着目するパネル付近に発生する曲げモーメントを極力小さくし、せん断力が卓越する実験装置とした。荷重には2台の油圧ジャッキ（最大荷重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行った。支持条件は単純支持として、支点1をピンローラー支持、支点2をピン支持とし、水平方向の拘束が生じないように配慮した。

(3)試験体のウェブ板厚は健全モデルを4.5mmに、腐食モデルおよび補修モデルを3.2mmとした。腐食モデルは、ウェブ一様減厚と、腐食の進行によりウェブと下フランジの首溶接部付近の破断損傷を模擬した試験体を設定し、このモデルに対して、下部欠損のみの回復とウェブ全面の健全回復を各種補修材で補修した試験体を設定した。表-1に試験体の一覧を示し、図-3にせん断試験体の寸法詳細を示す。また、表-2、表-3に本研究で用いた補修材料及び接着剤の材料特性値を示す。以下に補修試験体の概要について示す。

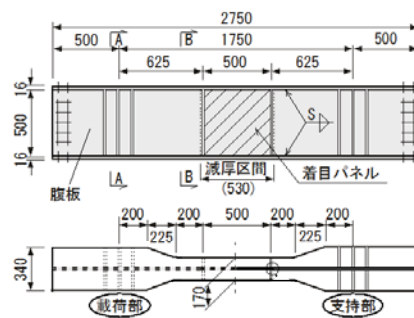


図-1 桁試験体寸法概要

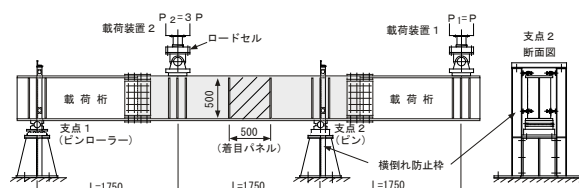


図-2 せん断実験装置設置状況

a) 試験体①RHB (当板ボルト接合) : 下フランジとウェブとの溶接破断部による荷重伝達機能を回復することを目的に、板厚 4.5mm の L 字型鋼板を高力ボルトで接合したモデルである。これは一般的な補修工法であり、他の実験パラメータとの比較対象とした。

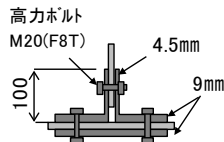
b) 試験体 ②RST (薄鋼板の接着接合) : 下

フランジとウェブとの溶接破断部に、荷重伝達機能の回復を目的に、板厚 3.2mm の L 字型薄鋼板を下フランジとウェブの両面に接着を用いて接合したモデルである。

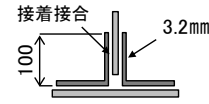
c) 試験体 ③RSTCF1 (薄鋼板+低弾性炭素繊維) : 下フランジとウェブとの溶接破断部による荷重伝達機能の回復を目的に、板厚

表-1 せん断耐荷力実験の試験体種類

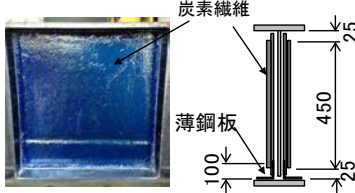
	健全モデル	腐食モデル			補修モデル			
イメージ図								
腐食・補修説明	健全	一律減厚	下部欠損	当板ボルト	薄鋼板接着	薄鋼板+炭素繊維 (低弾性タイプ)	薄鋼板+炭素繊維 (低弾性タイプ) ウェブ面ウレタン系挿入	薄鋼板+炭素繊維 (低弾性タイプ) ウェブ面+下フランジウレタン系挿入
試験体名	w4.5/N	w3.2/D	w3.2/DL	①RHB	②RST	③RSTCF1	④RSTCF2	⑤RSTCF3
母材板厚	4.5mm	3.2mm	3.2mm	3.2mm	3.2mm	3.2mm	3.2mm	3.2mm
補修材	-	-	-	L型薄鋼板 4.5mm	L型薄鋼板 3.2mm	L型薄鋼板3.2mm 低弾性炭素繊維シート 4層/片面		
接合材	-	-	-	高力ボルト	アクリル系接着剤	鋼板:アクリル系 FRP:エポキシ系	鋼板:アクリル系 FRP:ウレタン系 +エポキシ系	鋼板:ウレタン系 FRP:ウレタン系 +エポキシ系
性能		低下	低下	回復	下部欠損のみ回復	健全回復		



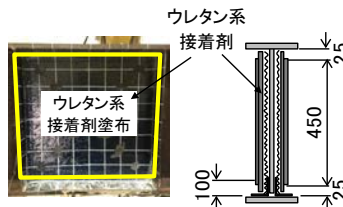
①RHB 当板ボルト接合



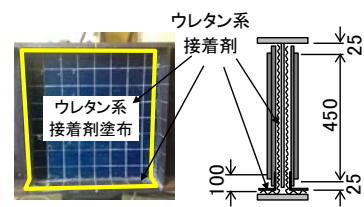
②RST 薄鋼板接着接合



③RSTCF1 薄鋼板+炭素繊維



④RSTCF2 薄鋼板+ウレタン系接着剤ウェブ挿入+炭素繊維



⑤RSTCF3 炭素繊維+ウレタン系接着剤全面挿入+炭素繊維

図-3 せん断試験体詳細図

表-2 補修材料の特性値

項目	鋼材	高弾性炭素繊維	低弾性炭素繊維
弾性係数 (vs鋼材比)	$2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (1.0倍)	$6.4 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (3.2倍)	$2.45 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (1.2倍)
密度 (vs鋼材比)	7.8 g/cm^3 (1.0倍)	1.8 g/cm^3 (0.2倍)	1.8 g/cm^3 (0.2倍)
引張強度 (vs鋼材比) [※]	400.490 N/mm^2 (1.0倍)	1900 N/mm^2 (3.9倍)	3400 N/mm^2 (6.9倍)
繊維目付量	-	300 g/m^2	300 g/m^2

※引張強度の比率はSM490材の理論値に対する比率を示す。

表-3 接着剤の特性値

種類	アクリル系接着剤	エポキシ系接着剤	ウレタン系接着剤
材質	アクリル樹脂	エポキシ樹脂	ポリウレタン樹脂
弾性係数 (vsアクリル比)	1000 N/mm^2 ^{※1} (1.0倍)	圧縮 2810 N/mm^2 (2.8倍)	引張 68 N/mm^2 (0.1倍)
引張強度 (vsアクリル比)	10 N/mm^2 (1.0倍)	40 N/mm^2 (4.0倍)	11 N/mm^2 (1.1倍)
剥離強度 ^{※2} (メーカ実測値)	1.0 N/mm^2 以上 (2.1 N/mm^2)	1.0 N/mm^2 以上 (規定なし)	1.0 N/mm^2 以上 (6.6 N/mm^2)
適用温度	~40°C	5~35°C	5~35°C
可使時間	15min (23°C)	197min (20°C)	25min (23°C)
硬化時間	52min (23°C)	13hour (20°C)	6hour (23°C)
硬化物比重	1.04	1.16	1.25
伸び率	6%	規定なし	450%

※印以外は全て、試験値を示す。

※1. アクリル系接着剤の弾性係数は規定がなく、仮定値を示す。

※2. 本研究では全て 1.0 N/mm^2 以上で統一する。

3. 2mm の L 字型薄鋼板を下フランジとウェブの両面に接着剤で設置した後、一様減厚を仮定(3.2mm)したウェブの性能回復を目的に、ウェブパネル全面に低弾性炭素繊維シートを接着剤で接着接合したモデルである。シートは片面 4 層とした。シートの接着方向は、1 層目をせん断引張方向、2 層目を斜め張力場 45° 方向、3、4 層目は交互に接着を行った。炭素繊維の端部は応力集中を避けるため、3 層目、4 層目を 25 mm オフセットして接着させた。

d) 試験体④RSTCF2 (薄鋼板+ウレタンウェブ挿入+低弾性炭素繊維) : 試験体③RSTCF1 のモデルに対して、弾性係数の低いウレタン系接着剤をウェブ全面に挿入したモデルである。薄鋼板を接着後、ウェブ全面にウレタン系接着剤を塗布し、片面 4 層の低弾性炭素繊維シートを接着させた。炭素繊維シートの接着方向は試験体③RSTCF1 に同じである。ウレタン系接着剤を挿入することで、延性効果を期待したモデルである。

e) 試験体⑤RSTCF3 (薄鋼板+ウレタン全面挿入+低弾性炭素繊維) : 試験体④RSTCF2 のモデルに対して、薄鋼板の接着に弾性係数の低いウレタン系接着剤を使用したモデルである。初めに L 字型薄鋼板を下フランジ上面も含めてウレタン系接着剤にて接合させ、更に、ウェブ全面にウレタン系接着剤を挿入し、4 層の低弾性炭素繊維シートをエポキシ系接着剤で接合した試験体である。試験体④RSTCF2 に対し、下フランジ付近での剥離を防止し、更なる延性効果を期待したモデルである。

4. 研究成果

(1) 図-4 に実験で得られたせん断力-鉛直

変位関係を示す。ここに、縦軸のせん断力は着目パネルに作用するせん断力、横軸の鉛直変位は載荷装置 1 (P1 載荷位置) の鉛直変位を示す。また、本研究でのせん断耐荷力は着目パネルに作用する最大せん断力と定義した。図中の縦軸に対応した一点破線は、健全モデル (w4.5/N) と一様減厚モデル (w3.2/D) のせん断耐荷力を示し、せん断耐荷力の回復の目安とした。また、図中の横軸に対応した一点破線は、せん断耐荷力回復後の変形追従性 (変形性能) を評価する目安として、健全モデル (w4.5/N) と一様減厚モデル (w3.2/D) の降伏せん断力載荷時の変位を表記した。また、写真-1 に補修を施した試験体のせん断座屈時の変形モードを示す。

以下に各供試体の実験で得られた結果から補修による機能回復状況について示す。

a) 試験体①RHB : 当板ボルトの試験体①は一様減厚モデル w3.2/D とほぼ同じせん断力-変位曲線を示し、ウェブと下フランジの破断部に対する荷重伝達機構は回復しているものと判断できる。せん断耐荷力の回復、延性効果の双方共に、ウェブ下端の欠損を補う特性を示している。なお、写真-1 からパネルの面外変形は、当て板部分の剛性が高いため、ウェブ下端付近では変形しておらず、当て板していないウェブ範囲でのパネルの座屈となっている。

b) 試験体②RST : L 字型薄鋼板接着の試験体②は、一様減厚タイプ w3.2/D の降伏以上に耐荷力は回復するものの、薄鋼板と接着剤の剥離により、急激なせん断力の低下が見られた。写真-1 からパネルの面外変形は、ウェブ下端付近の変位が大きく、降伏直後の急激な剥離によるものである。

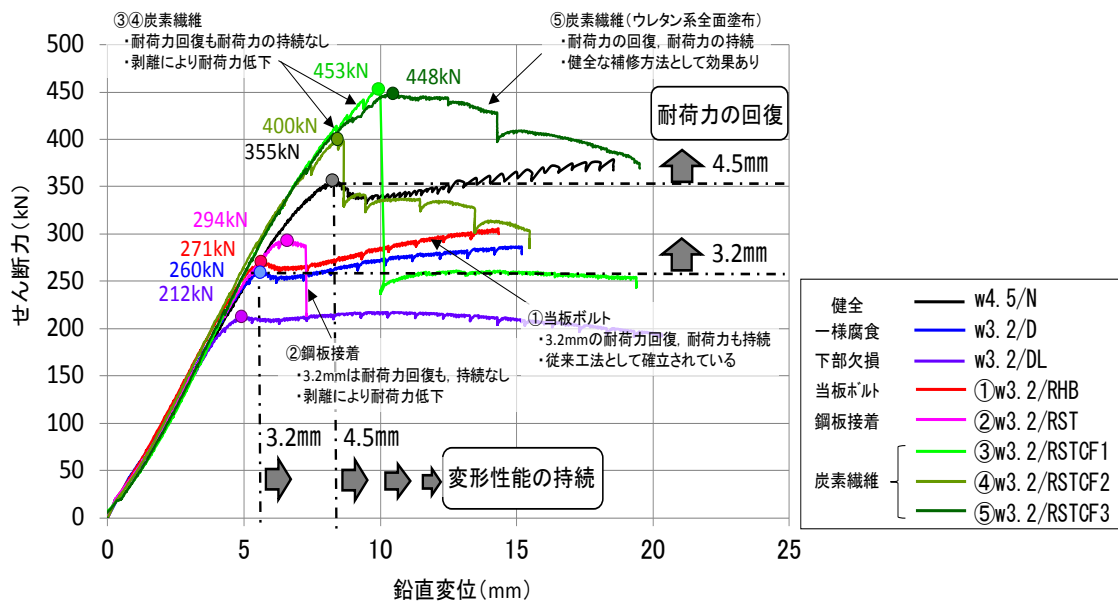


図-4 せん断力 - 変位関係図

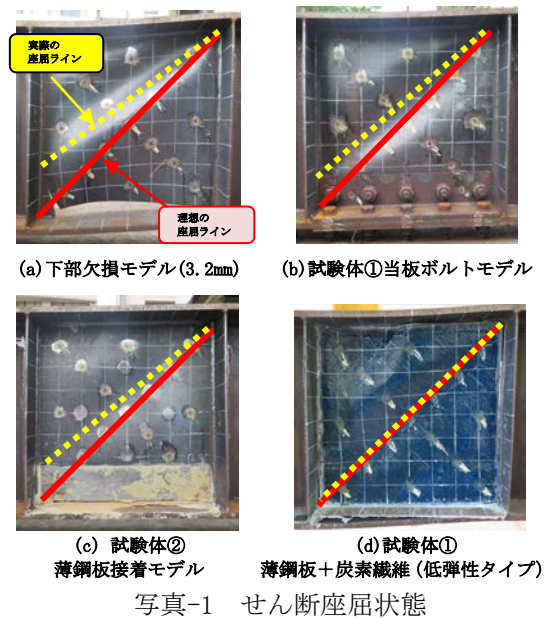
c) 試験体③、④、⑤RSTCF : L 字型薄鋼板と低弾性炭素繊維シートで補修した試験体③RSTCF1、④RSTCF2、⑤RSTCF3 は、いずれも健全モデル w4.5/N 相当以上に耐荷力が回復しており、薄鋼板による欠損部分の補修とウェブの減厚に対する低弾性炭素繊維シートの併用により、性能が回復することが確認された。しかしながら、試験体③、④については、接着剤の剥離によるせん断力の急激な低下が見られた。一方、L 型薄鋼板の接着にもウレタン系接着剤を塗布した試験体⑤では降伏以降も徐々にせん断力が低下し、変位も追従する結果を示した。写真-1 から試験体⑤RSTCF3 の面外変位はウェブ中心での値が比較的大きな結果となったが、ウェブパネルの座屈モードは均等な 3 次曲線を示しており、これより理想的な張力場が形成されたと判断できる。従って、耐荷力および変形性能ともに良好な結果になったものと考えられる。

(2) 以上の実験結果より、腐食桁端部を模擬したせん断耐荷力実験において従来の当板ボルト工法は、耐荷力および変形性能ともに満足する結果を示した。

(3) 各補修モデルに対する耐荷力や変形性能を比較することで、有効な補修工法に関する基礎的な情報を取得することができた。特に弾性係数の低い補修材に弾性係数の低い接着剤を合わせることで、柔軟な追従性のある層が形成され、降伏耐力以降の変形性能が期待できることを確認した。

<引用文献>

- 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, 土木学会論文集 No. 668, pp. 299-311, 2001. 1.
- ②名取暢, 西川和廣, 村越潤, 大野崇: 腐食部材の添接板補強に関する研究, 土木学会論文集 No. 682/I-56, pp. 207-224, 2001. 7.
- ③茂手木博, 島辺政秀, 北野勇一: 鋼橋腐食部の断面補修工法, 川田技報 vol. 16, pp. 105-107, 1997. 1.
- ④日本鋼構造協会・接着接合研究小委員会: 鋼構造物への接着接合の適用, JSSC テクニカルレポート, No26, 日本鋼構造協会, 1993. 11.
- ⑤村越潤, 田中良樹, 船木孝仁: 接合面にエポキシ樹脂を塗布したボルト継手の力学的挙動に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 54A, pp. 563-574, 2008. 3.
- ⑥宇野暢芳, 井上一郎, 志村保美, 脇山広三: 硬さが異なる鋼材間の摩擦係数に関する基礎的研究, 日本建築学会系論文集, 第 494 号, 123-128, 1997 年 4 月
- ⑦宇野暢芳, 井上一郎, 竹内一郎, 東清三郎, 北卓也: 高摩擦係数高力ボルト接合部の耐力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 502 号, 127-133, 1997 年 12 月
- ⑧石川敏之, 大倉一郎, 西田貴裕, 横田季彦,



齊藤誠: CFRP 板付着端近傍への低弾性接着剤の使用による剥離せん断応力の低減, 構造工学論文集, Vol. 54A, p842-849, 2008. 3.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① 下里哲弘、長坂康史、矢吹哲哉、有住康則: 腐食鋼桁端部の性能回復技術に関する基礎的実験、構造工学論文集、Vol. 62A、pp. 559-570、2016 年 3 月、査読有。

〔学会発表〕 (計 8 件)

- ① 園田政和、下里哲弘、有住康則、玉城喜章: 異なる減厚分布形状を有する鋼 I 桁のせん断耐荷力特性に関する研究、土木学会西部支部沖縄会第 5 回技術研究発表会、琉球大学 (沖縄県西原町)、2016 年 1 月。
- ② 玉城 喜章、下里哲弘、有住康則: 実腐食減厚分布を有する鋼プレートガーダーのせん断耐荷力特性に関する解析的研究、土木学会西部支部研究発表会、琉球大学 (沖縄県西原町)、2015 年 3 月。
- ③ 玉城 喜章、下里哲弘、有住康則: 実腐食減厚分布を有する鋼プレートガーダー腹板のせん断強度特性に関する研究、土木学会西部支部沖縄会第 4 回技術研究発表会、琉球大学 (沖縄県西原町)、2014 年 10 月。
- ④ 園田政和、下里哲弘、有住康則、長坂康史: レーザー計測による実腐食鋼板の腐食形状と腐食深さに関する考察、土木学会西部支部沖縄会第 4 回技術研究発表会、琉球大学 (沖縄県西原町)、2014 年 10 月。
- ⑤ 利光崇明、下里哲弘、有住康則、玉城喜

章、島袋秀也、長嶺由智：腐食鋼 I 桁端部におけるせん断強度回復技術に関する実験的研究、第 69 回年次学術講演会講演概要集、大阪大学（大阪市）、I-561、2014 年 9 月。

- ⑥ 利光 崇明、下里 哲弘、有住 康則、玉城喜章、島袋 秀也、長嶺 由智：鋼 I 桁端部腹板の腐食モデルに対する回復法の耐荷力実験、土木学会西部支部研究発表会、福岡大学（福岡市）、2014 年 3 月。
- ⑦ 利光崇明、下里哲弘、有住康則、玉城善章、島袋秀也、長嶺由智：損傷を受けた鋼 I 桁端部腹板の補修法に関する実験研究、土木学会西部支部沖繩会第 3 回技術研究発表会、琉球大学（沖縄県西原町）、2013 年 10 月。
- ⑧ 利光崇明、下里哲弘、有住康則、矢吹哲哉、島袋秀也、長嶺由智：鋼 I 桁端部腹板の腐食を模擬したせん断耐荷力特性に関する研究、第 68 回年次学術講演会講演概要集、日本大学（千葉県習志野市）、I-358、2013 年 9 月。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有住 康則 (ARIZUMI Yasunori)
国立大学法人 琉球大学・工学部・教授
研究者番号：90109306

(2) 研究分担者

下里 哲弘 (SHIMOZATO Tetsuhiro)
国立大学法人 琉球大学・工学部・准教授
研究者番号：90452961