

令和元年5月9日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06479

研究課題名(和文) ボルト孔に樹脂を充填した高力ボルト接合の継手強度評価

研究課題名(英文) Evaluation of strength of high-strength bolted joint with filled bolt holes by resin

研究代表者

石川 敏之 (ISHIKAWA, TOSHIYUKI)

関西大学・環境都市工学部・准教授

研究者番号：00423202

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、既存鋼橋の補修・補強法である鋼板高力ボルト接合において、現場ですべり係数を十分に確保できない場合の対策として、ボルト孔に樹脂を充填する工法に着目し、充填した樹脂による支圧効果を明らかにした。また、鋼板高力ボルト接合補修された断面欠損部材が受持つ断面力の推定式を与え、ボルト孔に充填した樹脂が断面欠損部の補修効果に与える影響も明らかにした。さらに、高力ボルト摩擦接合による当て板補修部のボルト孔に充填した樹脂が50-60 程度の高温下にさらされた場合の樹脂の支圧効果も明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

既存の鋼橋の鋼板高力ボルト補修・補強において、断面欠損部材が受持つ断面力を明らかにすること、および、すべり係数の確保が困難な場合への対策(ボルト孔に樹脂を充填する工法)は、技術力の向上として学術的にも意義があり、社会貢献につながる成果であると考えている。

研究成果の概要(英文)：For the patch repair method of deteriorated steel members using high-strength bolts without enough slip coefficient for to patch plates, I focus on the patch repair method using high-strength bolted connection with bolt holes filled up the epoxy resin. It was clarified that the bolted joint with bolt holes filled up the epoxy resin showed the higher slipping strength even in the low slip coefficient condition. Additionally, the equation of axial force in thickness-reduced section repaired by patch plates was given, and the effect of patch repair method for thickness-reduced plate with bolt holes filled by epoxy resin was clarified by the tensile tests. Furthermore, the behavior of high-strength bolted connection filled with epoxy resin in bolt hole under the temperature of 50 °C and 60 °C was clarified by the tensile test.

研究分野：鋼構造学，維持管理工学，構造工学

キーワード：高力ボルト 樹脂 充填 断面欠損

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

現在、鋼橋では、疲労や腐食といった損傷が問題となっており、鋼板を当てて高力ボルト摩擦で締付ける補修法が一般的に行われている。しかし、高力ボルト摩擦接合では、高力ボルトの軸力を導入し鋼部材から当て板へ摩擦力を介して力を伝達しているため、摩擦面に腐食による凹凸などがあり十分に摩擦力が取れていない場合が考えられる。また、実橋では、既に溶接などによって部材や補剛材が取り付けられていることが多く、腐食した位置へ当て板高力ボルト接合に必要なボルト本数の確保が困難な場合も考えられる。

これまで、すべり係数を向上させてボルト本数を減らす研究や、摩擦面に薄く接着剤を設けて高力ボルト接合する研究が行われているが、高力ボルト接合では、孔径が高力ボルトの直径よりも大きいため、大きな荷重の作用によってすべりが生じてしまう。また、すべりが生じないように打ち込みボルトの適用も考えられているが、現場での施工が困難であること、打ち込みの際にボルト孔に傷をつけるので疲労き裂の起点になることが懸念されている。

このような背景から、ボルト孔を樹脂で充填する工法によって、すべり係数が低い場合であっても、打ち込みボルトと同様な効果で、当て板補修が可能になると考えられる。

2. 研究の目的

鋼橋の腐食や疲労の当て板高力ボルト接合補修の際の摩擦力を十分確保できない場合に、高力ボルト摩擦接合継手の継手強度を向上させる工法として、高力ボルト孔に樹脂を注入する工法に着目した。この工法では、摩擦力に加え支圧力で力を伝達させることができるため、すべり荷重の向上が期待できる。本研究では、ボルト孔に樹脂を充填した際の継手強度を明らかにする。具体的には、樹脂充填性の評価、樹脂を挿入するボルト孔の位置の影響、樹脂が温度依存性材料であるため温度による影響も評価する。

3. 研究の方法

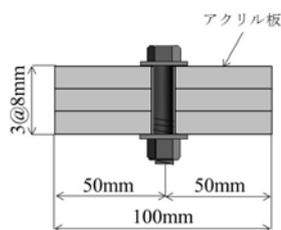
本研究では、高力ボルト摩擦接合継手のボルト孔に樹脂を充填することによって継手強度が従来の高力ボルト摩擦接合継手と比べてどの程度向上するかを、引張試験により明らかにする。また、ボルト孔への樹脂の充填を確認するために、充填試験も実施する。さらに、鋼部材の腐食部を当て板高力ボルト接合した場合の腐食部が受持つ断面力の推定式を、当て板と主板の変位の適合条件から推定し、FEM 解析結果と比較して、その妥当性を明らかにする。

4. 研究成果

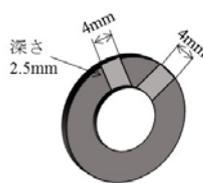
(1) 樹脂の充填試験

ボルト孔への樹脂の充填性を確認するために、図-1 に示す様なアクリル板を用いて充填試験を行った。今回、提案する樹脂の充填孔は、座金を図-1 のように加工している。これは、鋼橋のウェブなどの横向きに 1 枚の座金(ナット側のみ)しか用いないトルシア形高力ボルトを適用する場合が最も充填が困難であると考えて、1 枚の座金に注入孔と空気抜き孔を設けた構造としている。ただし、充填試験には六角ボルトを用いている。充填試験の結果、図-2 に示す様な位置に充填不良が生じた。これは、樹脂の充填が、当て板の片側からであったためである。両側に座金を用いて、樹脂の充填孔と空気抜き孔を設けることで、対応できると考えられる。

ただし、作用力を受ける部分は樹脂が充填されているため、後の引張試験では、ボルト軸を水平にした状態で、トルシア形高力ボルトの利用を想定した樹脂の充填方法で樹脂の充填を行い、一軸引張試験を実施することとした。トルシア形高力ボルトを用いた引張試験体においても、同様な箇所若干の充填不足が見られた。



小型試験体側面図



座金の加工

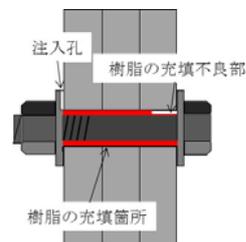


図-2 樹脂の充填不良の位置

図-1 充填試験体概要

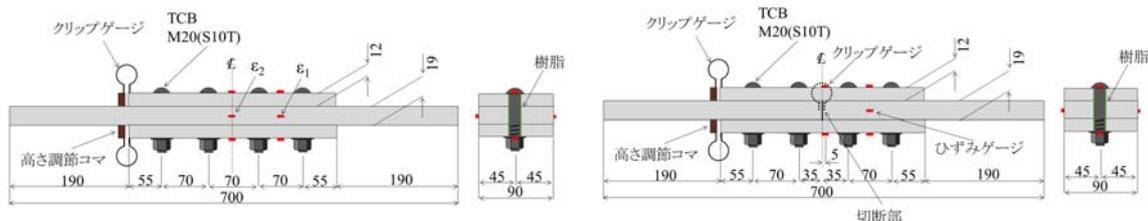
(2) ボルト孔に樹脂を充填した試験体の引張試験

引張試験は、図-3 に示すように、高力ボルト摩擦接合による腐食損傷の当て板補修を想定した連続板タイプと、疲労損傷の当て板補修を想定した切断タイプの 2 種類の試験体を用意した。連続板タイプの試験体は、幅 90mm、厚さ 19mm、長さ 700mm の主板と、幅 90mm、厚さ 12mm、長さ 320mm の当て板を用いた。連続板タイプの試験体は、ボルト孔への樹脂の充填による支圧効果を明らかにすることを目的としているため、腐食損傷の模擬は行っていない。切断タイプの試験体は、連続板タイプの試験体と同寸法とし、き裂を模擬するために主板の中央を切断した。本試験では、図-4 に示すように、全てのボルト孔に樹脂を充填するケースに加えて、連

連続板タイプでは試験体端部のボルト孔にのみ樹脂を充填するケースも準備した。試験体の素地調整の状態として、ショットブラスト処理(B)したすべり係数が高い試験体と、グラインダー処理(G)したすべり係数が低い試験体を用意した。

載荷荷重 P と、主板と当て板の相対変位 δ の関係を図-5~8 にそれぞれ示す。これらの図には、主板純断面に対する降伏荷重 P_Y も示している。図-5 から、ブラスト処理した連続板タイプの試験体では、降伏荷重付近から、樹脂を充填した試験体(I-Bf)の相対変位の大きさが、樹脂を充填していない試験体(I-Bn)の相対変位より小さくなった。これから、摩擦力が十分である場合は、相対変位が大きくなった後に充填した樹脂の支圧効果が作用すると考えられる。図-6 から、グラインダー処理した連続板タイプの試験体では、樹脂を充填していない試験体(I-Gn)に比べ、樹脂を充填した試験体(I-Gf)の相対変位が小さくなった。外側のボルト孔のみに樹脂を充填した試験体(I-Gp)も同様に、試験体 I-Gn と比べて相対変位が小さくなった。このように、すべり係数が低い場合、ボルト孔に樹脂を充填することによる支圧効果が、荷重が低い範囲から見られ、端部に樹脂を充填するだけでもその効果が見られた。

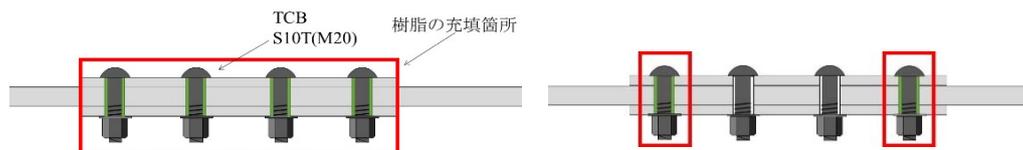
図-7, 8 から、切断タイプの試験体では、樹脂を充填しない場合、ブラスト処理の試験体(II-Bn)では 270kN 付近で、グラインダー処理した試験体(II-Gn)では、130kN 付近で主すべりが生じ、



(a) 連続板タイプ

(b) 切断タイプ

図-3 引張試験体



(a) 全てのボルト孔に樹脂を充填

(b) 端部のボルト孔に樹脂を充填

図-4 樹脂の充填箇所

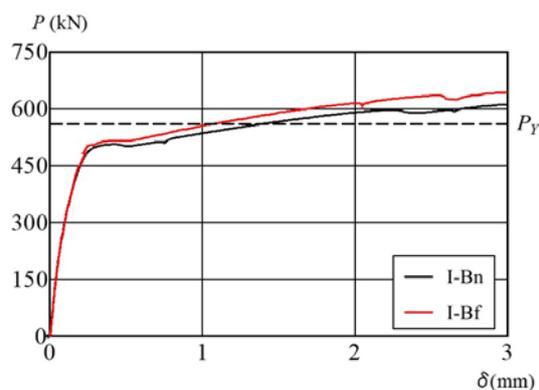


図-5 P - δ 関係(連続板タイプ, B 処理)

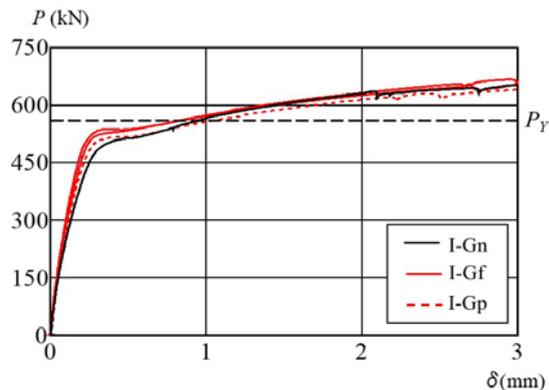


図-6 P - δ 関係(連続板タイプ, G 処理)

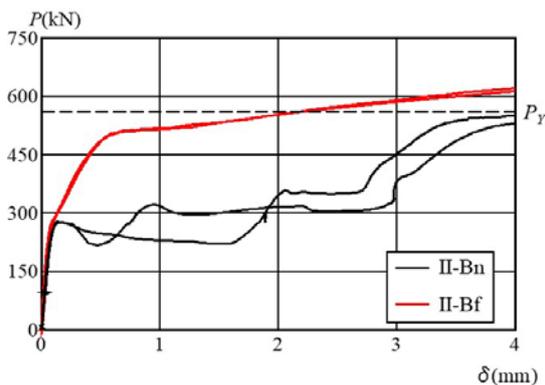


図-7 P - δ 関係(切断タイプ, B 処理)

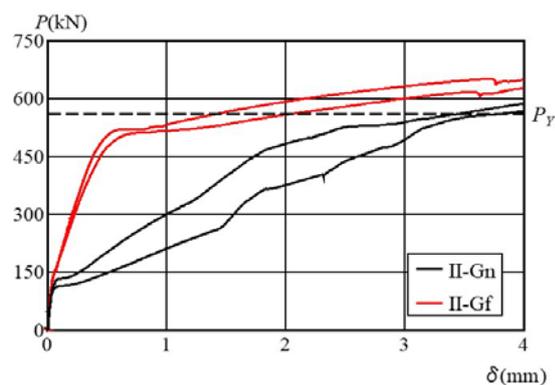


図-8 P - δ 関係(切断タイプ, G 処理)

相対変位 δ が急激に増加している。しかし、ボルト孔に樹脂を充填した試験体(II-Bf, II-Gf)では、ボルト孔に充填した樹脂の支圧効果により、主すべりが生じず相対変位が抑えられている事がわかる。このように、十分に摩擦力が取れずすべり係数が小さい場合であっても、ボルト孔に樹脂を充填することで、主すべりが生じず、力の伝達が行えることが明らかとなった。

以上より、すべり係数が低い場合であっても、ボルト孔に樹脂を充填することにより、少なくとも通常の高力ボルトと同等の強度として設計できると言える。

(3) ボルト孔に樹脂を充填した試験体の高温時の挙動の確認

鋼橋では日射により、鋼部材の温度が上昇しやすい。一般に樹脂は温度依存性があり、高温になると弾性係数が低下する。したがって、鋼部材が高温になった場合、樹脂の支圧効果が十分に発揮されない可能性がある。そこで、図-3(b)の切断タイプの試験体を用いて、試験体の温度を 50、60°Cとしたときの、載荷荷重と相対変位の関係を調べた。使用した樹脂のガラス転移点は 94.9°Cである。図-9、10 に、ブラスト処理した場合とグラインダー処理した場合の載荷荷重 P と、主板と当て板の相対変位 δ の関係を示す。試験体温度が 50、60°Cの場合(II-Bf50, II-Gf50, II-Gf60)、常温の試験結果(II-Bf, II-Gf)と比べて、若干相対変位が大きくなっているが、樹脂を充填しない試験体(II-Bn, II-Gn)と比べて大幅に相対変位が抑えられていることがわかる。したがって、ガラス転移点が 80°C程度のエポキシ樹脂を利用した場合、部材温度が 60°C程度までは、ボルト孔に充填した樹脂の支圧効果への影響は小さいと言える。

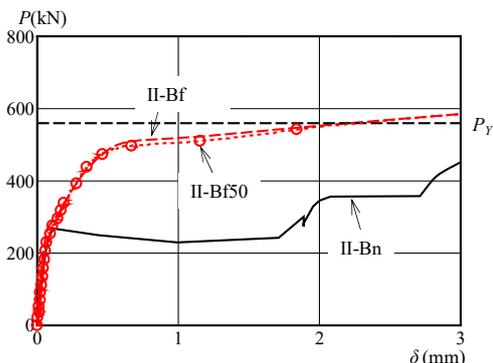


図-9 P- δ 関係(切断タイプ, B 処理)

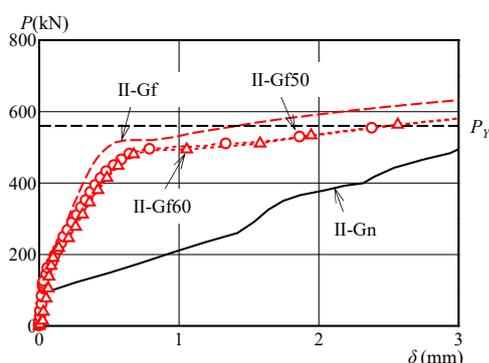


図-10 P- δ 関係(切断タイプ, G 処理)

(4) 断面欠損を有する当て板高力ボルト補修された鋼板の分担軸力

腐食による断面欠損を当て板補修する場合、図-11 のような状態となる。これまでに、断面欠損部を有効断面として当て板高力ボルト補修された主板の分担軸力は、断面欠損部の主板と当て板を合成断面として算出した主板の分担軸力より大きくなる事が示されている¹⁾。したがって、本研究では当て板高力ボルト補修された断面欠損を有する主板と当て板の分担軸力の推定を行う。

主板と当て板の分担軸力を推定するために図-11 に示すように、ボルト間長 l_b に対して、断面欠損深さ(残存板厚 t_{di})と断面欠損長さ l_{di} が異なる n 個の断面欠損を仮定する。次に、ボルト間長 l_b では、主板と当て板の荷重の再分配がされないと仮定し、主板に作用する荷重は、断面欠損を有するボルト間長 l_b では一定とする。このような条件下で、断面欠損を有するボルト間長 l_b において、当て板と主板の変位の適合条件を与え、作用荷重と分担軸力の条件から、断面欠損を有する主板の分担断面力 N_s と断面欠損部 i に生じる応力 $\sigma_{sdi}(=N_s/A_{di})$ がそれぞれ次式で与えられる。

$$N_s = \frac{P}{1 + \left\{ 1 - \gamma_0 + \sum_{i=1}^n (\gamma_i / \beta_i) \right\} \alpha} \quad (1)$$

$$\sigma_{sdi} = \frac{1}{\beta_i + \left\{ 1 - \gamma_0 + \sum_{i=1}^n (\gamma_i / \beta_i) \right\} \alpha \beta_i} \cdot \sigma_n \quad (2)$$

ここに、 $\alpha = 2A_p / A_s$ 、 $\beta_i = A_{di} / A_s$ 、 $\gamma_0 = l_d / l_b$ 、 $\gamma_i = l_{di} / l_b$ 、 $\sigma_{sn} = P / A_s$ 、 l_d は断面欠損長さ $l_{d1} \sim l_{dn}$ の総和、 l_{di} は i 番目の断面欠損長さ、 A_s は一般部の主板の断面積($w_s \times t_s$)、 A_{di} は断面欠損部 i の主板の断面積($w_s \times t_{di}$)、 A_p は当て板の断面積($w_p \times t_p$)、 t_s は一般部の主板厚、 t_{di} は断面欠損部 i の主板厚、 t_p は当て板厚、 w_s は主板の板幅、 w_p は当て板の板幅である。

一方、断面欠損部の主板と当て板を合成断面として算出した主板の分担軸力は次

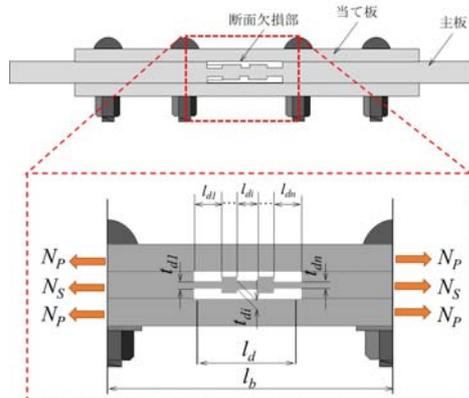


図-11 断面欠損を含むボルト間長 l_b での主板と当て板の分担軸力の仮定

式で与えられる。

$$N_{sdc} = \frac{A_d}{A_d + 2A_p} P = \frac{\beta}{\beta + \alpha} P \quad (3)$$

一方、文献1)では、主板と当て板の分担軸力 N_s の上限値として、一般部の主板と当て板を合成断面として算出した主板の分担軸力 N_{sc} が与えられている。

$$N_{sc} = \frac{A_s}{A_s + 2A_p} P = \frac{1}{1 + \alpha} P \quad (4)$$

式(1)の妥当性を明らかにするために、様々な断面欠損寸法に対して、断面欠損を有する主板の当て板高力ボルト接合の弾塑性有限変位解析(対称性を考慮した 1/8 モデル)を行った。要素には 8 節点 6 面体要素を用いて、主板と当て板、当て板と高力ボルトの間は摩擦係数を 0.45、そのほかの接触部は摩擦係数を 0.001 として接触を考慮した。要素サイズは、1×1mm 以下とした。高力ボルトはトルシア形高力ボルト(S10TM20)の利用を想定してモデル化を行ったが、高力ボルト頭部はモデルの簡素化のために円柱形としている。有限要素解析では、はじめに、高力ボルトの軸力が道路橋示方書に定められている設計ボルト軸力(165kN)になるようにボルト軸に強制変位を与え、その後に主板に引張力を与えた。

解析結果の一例として、主板厚 19mm、当て板厚 12mm、試験体幅 90mm、ボルト間長 $l_b=120\text{mm}$ に対して、矩形の断面欠損($t_d=7\text{mm}$)を有する場合の载荷荷重 P と主板の分担軸力 N_{s-FEM} の関係を図-12 に示す。図-12 から、断面欠損長さ l_d に応じて、 $P-N_{s-FEM}$ 関係の傾きが異なることがわかる。また、荷重が大きくなるとボルトにすべりが生じるため、 $P-N_{s-FEM}$ 関係が非線形になるが、荷重が小さい範囲では、式(3)の N_{sdc} ではなく、式(1)の N_s に近いことがわかる。

様々な断面欠損を模擬した FEM 解析の結果の分担軸力 $N_{s-FEM}(P/P_Y=0.2)$ と式(1)の N_s との比較を図-13 に示す。図では、縦軸横軸共に式(3)の N_{sdc} で除した値を示している。図-13 からわかるように、有限要素解析から得られる主板の分担軸力 N_{s-FEM} に対して、式(3)から得られる主板の分担軸力 N_s は、±5%程度の誤差で推定できていることがわかる。

(5) ボルト孔に樹脂を充填した断面欠損鋼板の補修効果

ボルト孔に充填した樹脂が断面欠損部の補修効果に与える影響を明らかにするために、断面欠損部を当て板高力ボルト摩擦接合で補修し、ボルト孔に樹脂を充填した試験体の一軸引張試験を実施した。試験体を図-14 に示す。グラインダー処理したすべり係数が低い試験体を用意し、図-4(b)のように、外側のボルト孔のみに樹脂を充填した試験体も実施した。

载荷荷重 P と、主板と当て板の相対変位 δ の関係を図-15 に示す。試験体名は T の後の数字が断面欠損部の厚さ t_d 、L の後の数字が断面欠損長さ l_d を示す。ボルト孔に樹脂を充填した場合、試験体名の最後を A あるいは AP(外側のボルト孔のみに樹脂を充填した試験体)としている。図-15 から樹脂を充填していないグラインダー処理した試験体では、設計荷重(全強の 75%に相当する荷重)以下の荷重で、 $P-\delta$ 関係が非線形となり、相対変位が増加した。これらに対して、ボルト孔に樹脂を充填した試験体では、相対変位が抑制されていることがわかる。また、全てのボルト孔に樹脂を充填した試験体 G-T7L10A と最外側のボルト列のボルト孔にのみ樹脂を充填した試験体 G-T7L10AP は、荷重と相対変位の関係に大きな差が生じていないことがわかる。したがって、最外側のボルト列のボルト孔にのみ樹脂を充填した場合でも、樹脂の支圧効果が十分に作用すると言える。

図-16 に、各試験体の破断箇所を示す。ボルト孔に樹脂を充填しない場合、断面欠損が深く短い場合(G-T7L10)、断面欠損部が破断に至るが、断面欠損が長くなると(G-T7L80)、最外側のボルト列の主板純断面が破断した。しかし、ボルト孔に樹脂を充填した試験体は、断面欠損が深く短い場合であっても最外側のボルト列の主板純断面が破断した。このように、ボルト孔に充填した樹脂の支圧効果によって主板から当て板に荷重が伝達されるため、断面欠損が深く短い場合でも、断面欠損部の破断が生じないことが明らかとなった。

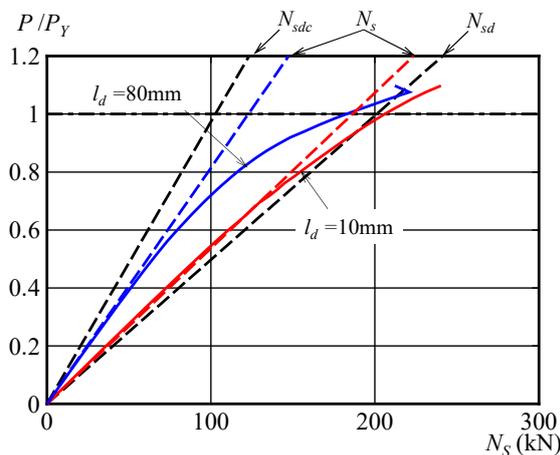


図-12 FEM 解析で得られた载荷荷重 P と主板の分担軸力 N_{s-FEM} の関係の一例

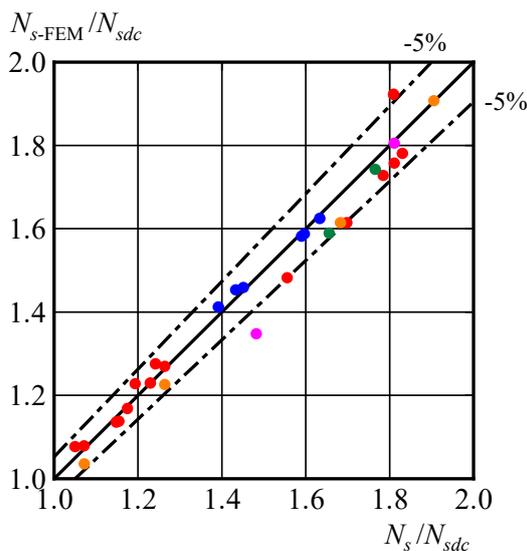


図-13 $N_{s-FEM}-N_s$ 関係

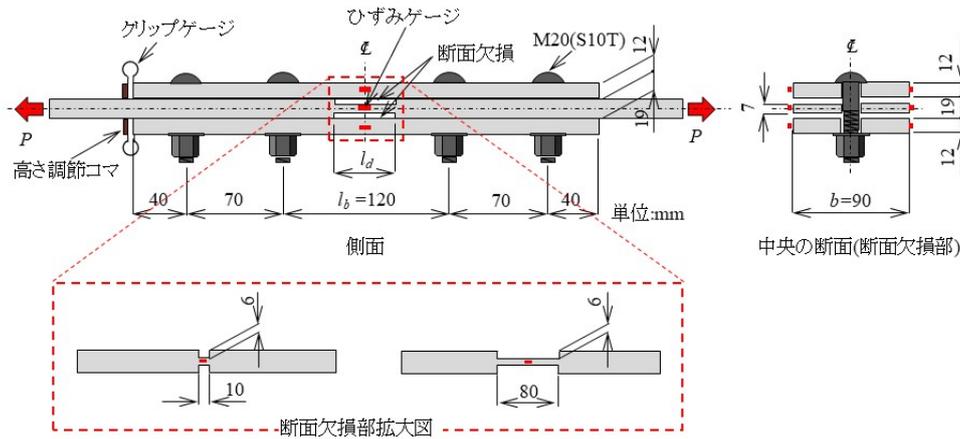


図-14 引張試験体の寸法(単位:mm)

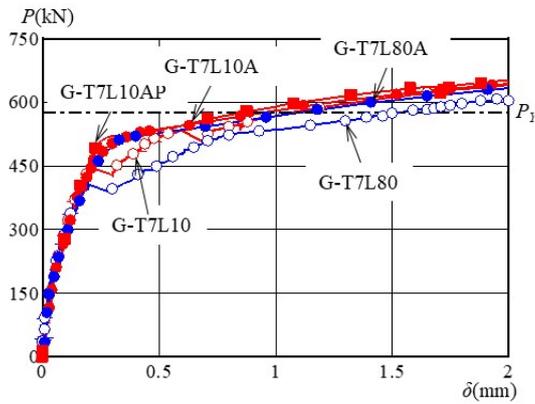


図-15 P-δ 関係

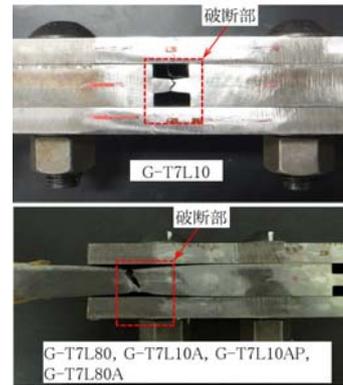


図-16 試験体の破断箇所

〈引用文献〉

- 1) 石川敏之, 清水優, 服部篤史, 河野広隆: 断面欠損した鋼板の当て板補修効果, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 69, No. 2(応用力学論文集 Vol. 16), pp. I_595-604, 2013.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- ① 石川敏之, 八重垣諒太, 木田秀人: ボルト孔に樹脂を充填した断面欠損鋼板の補修効果, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 26 巻, pp.269-276, 2018.
- ② 八重垣諒太, 石川敏之, 竹村 学, 木田秀人: ボルト孔に樹脂を充填した高力ボルト摩擦接合の高温時の挙動, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 26 巻, pp.262-268, 2018.
- ③ 八重垣諒太, 石川敏之, 木田秀人: ボルト孔に樹脂を充填した高力ボルト摩擦接合に関する研究, 構造工学論文集, 査読有, Vol.64A, pp.516-529, 2018.
- ④ 石川敏之, 八重垣諒太: 当て板高力ボルト補修された断面欠損部に生じる応力の推定, 構造工学論文集, 査読有, Vol.64A, pp.409-420, 2018.

〔学会発表〕(計 4 件)

- ① 八重垣諒太, 石川敏之: 当て板高力ボルト補修された断面欠損鋼板に生じる応力, 土木学会第 73 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 第 73 巻, I-055, pp. 109-110, 2018.
- ② 八重垣諒太, 石川敏之, 木田秀人: 断面欠損の当て板高力ボルト補修にボルト孔樹脂充填が与える影響, 平成 30 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-47, 2018.
- ③ 八重垣諒太, 石川敏之, 木田秀人: 高力ボルト摩擦接合へのボルト孔樹脂充填による支圧効果, 土木学会第 72 回年次学術講演会概要集 第 1 部, 第 72 巻, I-619, pp. 1237-1238, 2017.
- ④ 八重垣諒太, 石川敏之: 高力ボルト摩擦接合へのボルト孔樹脂充填による支圧効果, 平成 29 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-50, 2017.