腹板腐食部にCFRP接着した鋼桁の実物大せん断座屈試験

NEXCO総研　正会員　○若林　大
長岡技術科学大学　正会員　宮下　剛，長井正嗣
長野工業高等専門学校　正会員　奥山雄介
川崎重工業　正会員　小出宜央
新日鉄住金マテリアルズ　正会員　小林　朗，秀熊佑哉
倉敷紡績　正会員　堀本　歴

1. はじめに

伸縮装置からの漏水に起因して，鋼桁端部の腐食が断面欠損に至るまで進行している事例が多く確認されている。この場合の対策方法は，鋼材を用いた部材取替えや当て板が一般的と言われているが，腐食状況と比較して対策事例数は極めて少なく，特に断面欠損量が軽微な場合の対策事例はほとんどない。この要因は，鋼材を用いた対策の場合，補修範囲が局部的であっても一定の架設機材や専門技術者が必要となり，補修費が著しく割高となるためである。このような現状から，架設機材や特殊技能を必要とせず，対策範囲が局部的な場合であっても補修費が割高とならない簡易な補修工法の開発が強く望まれている。

これに対応するため，著者らは，主に鋼桁端部を対象として，炭素繊維強化プラスチック（以下，CFRP と記す）を用いた補修工法の開発を進めており，既に縮小桁試験体などを用いた各種載荷実験により，終局時に生じる支点部補剛材の局部座屈や腹板のせん断座屈などの面外変形に対しても，接着層にポリウレア樹脂パテ材を塗布することで，CFRP が適切に追従して補修効果が得られることを確認している[1)2)]。

本稿では，CFRP を用いた鋼桁端部の腐食補修工法を実用化するための最終確認として，実物大スケールのせん断座屈試験を実施したので，その結果について報告する。

2. 試験体と試験ケース

試験体に使用した鋼桁の諸元は，アスペクト比 1.0，桁長 7.8m，腹板高さ 1.3m，腹板厚 8mm であり，比較的小規模ではあるが，実物大スケールとした。また，鋼種は SS400 で，降伏応力は材料試験結果より腹板で 292MPa，フランジと補剛材で 268MPa である。

試験ケースは，腐食のない健全モデル（G1），腐食を模擬した無補修モデル（G2），同様の腐食損傷を与え CFRP 補修したモデル2ケース（G3，G4）の全4ケースとした。試験ケースを**表-1** に示す。ここで，鋼桁の腐食損傷を模擬する形状は，桁端部の腹板が完全に腐食した状況を想定し，下端 100mm の範囲に完全断面欠損（貫通孔）を与えた。製作した試験体の寸法を**図-1** に示す。

表-1　試験ケース

試験体番号	断面欠損の有無	補修方法・補修量			
		貼り方	引張側	圧縮側	シート総面積
G1	なし	―	―	―	―
G2	有	補修なし	―	―	―
G3	有	部分貼り	9層	9層	15.50㎡
G4	有	全面貼り	2層	2層	13.52㎡

※腹板片面あたりの積層数

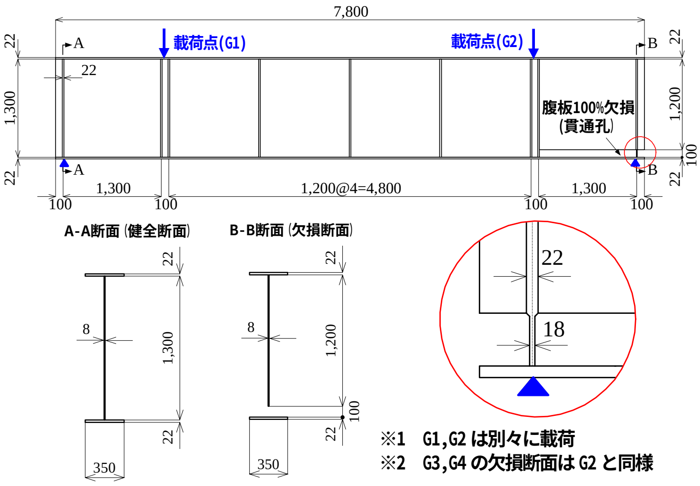


図-1　試験体寸法

また，補修に用いた各種材料諸元を**表-2, 3** に示す

表-2　炭素繊維シートの材料物性

種類	目付量 [g/m²]	厚さ [mm]	弾性係数 [GPa]
高弾性型／1方向	300	0.143	701

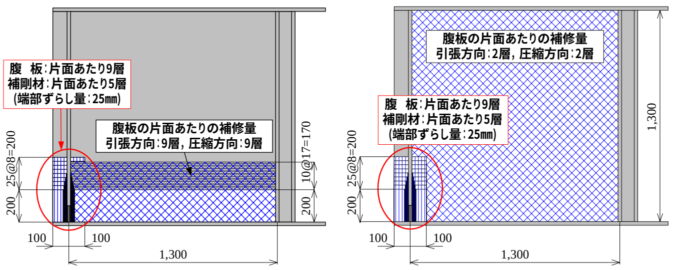
表-3　樹脂材料の物性値

種類	塗布量 [kg/m²]	比重	弾性係数 [MPa]
エポキシ樹脂パテ材	欠損量相当	1.55	1,735
ポリウレア樹脂パテ材	1.00	1.25	66
含浸樹脂接着剤	0.60	1.16	2,533

3. 補修形状と補修量

補修モデルの 2 ケースは，CFRP を腐食部近傍に部分的に貼付けるモデル（G3，部分貼り）と腹板全面に貼付けるモデル（G4，全面貼り）とした（**図-2**）。炭素繊維シートの繊維方向は主応力方向に一致させるため，下フランジに対して ±45°の角度で交互に貼付けている。また，部分貼りのみ R50 でシートを曲げて下フランジに定着している。

キーワード　CFRP，鋼桁，腐食，補修，せん断座屈試験，実物大
連絡先　〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1 ㈱高速道路総合技術研究所 TEL042-791-1625



(a)部分貼り (G3)　　(b)全面貼り (G4)

図-2　CFRP 貼付形状

表-1 及び**図-2** に示した各補修量（積層数）の決定方法は，以下のとおりである。

①部分貼り補修

CFRP を弾性係数比で鋼換算した厚さが，鋼部材の断面欠損量を補えるように積層枚数を決定する。今回の実験モデルでは,片面あたりの断面欠損量が 4mm であり，補修必要層数は 8.8 層となるため，9 層とした。

②全面貼り補修

あらかじめ FEM 解析により断面欠損に伴う強度低下率を算定しておき，Baslar 式を応用した**式(1)**に示す評価式 1)を用いて補修量を算定する。

$$\frac{Q_u}{Q_y}=\frac{\tau_{cr}}{\tau_y}+\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{1-\tau_{cr}/\tau_y}{\sqrt{1+\alpha^2}}\left(1+\frac{E_L\bar{t}_c}{E_s t_s}\right) \qquad \textbf{式(1)}$$

ここで，Q_uはせん断強度，Q_yは降伏せん断強度，τ_{cr}は弾性せん断座屈応力，τ_y は降伏せん断応力，σ_y は降伏応力，α は腹板のアスペクト比，E_Lは CFRP の弾性主方向の弾性係数，$\bar{t}_c$ は引張側に配置した CFRP 総厚である。

今回の実験モデルでは，断面欠損に伴う強度低下率が FEM 解析結果より約 11%であったため, これを上回る補修量を**式(1)**により算定し,片面あたり 2 層とした。なお，このときの強度増加率の計算値は 16%である。

4．実験結果と考察

実験結果を**表-4** 及び**図-3** に示す。この結果より，部分貼り，全面貼りいずれも，断面欠損により低下したせん断強度が健全時をやや上回る程度まで回復し，補修効果を得られることが確認できる。また，それぞれの補修量算定手法はやや安全側の評価を与え，実橋に適用するうえで妥当と考えられる。

さらに, 部分貼り補修では，**図-3** より初期剛性も健全時まで回復し，試験終了後の変形状態（**写真-1**）より，斜め張力場の角度も 45°方向に回復することがわかる。これは CFRP を下フランジへ定着した効果であると考えられる。

写真-1　試験終了後の変形状態（G3）

なお，実験における断面欠損モデル(G2)の強度低下率は，健全モデル(G1)に対し 16%であり，FEM 解析結果とやや誤差が生じている。この要因は，解析において溶接残留応力が未考慮であることや，貫通孔付近の応力集中の影響などが考えられる。

表-4　実験結果一覧

試験体番号	断面欠損の有無	補修方法	最大荷重 [kN]	健全モデルとの強度比率
G1	なし	—	1,389	100.0%
G2	有	補修なし	1,166	83.9%
G3	有	部分貼り	1,479	106.5%
G4	有	全面貼り	1,473	106.0%

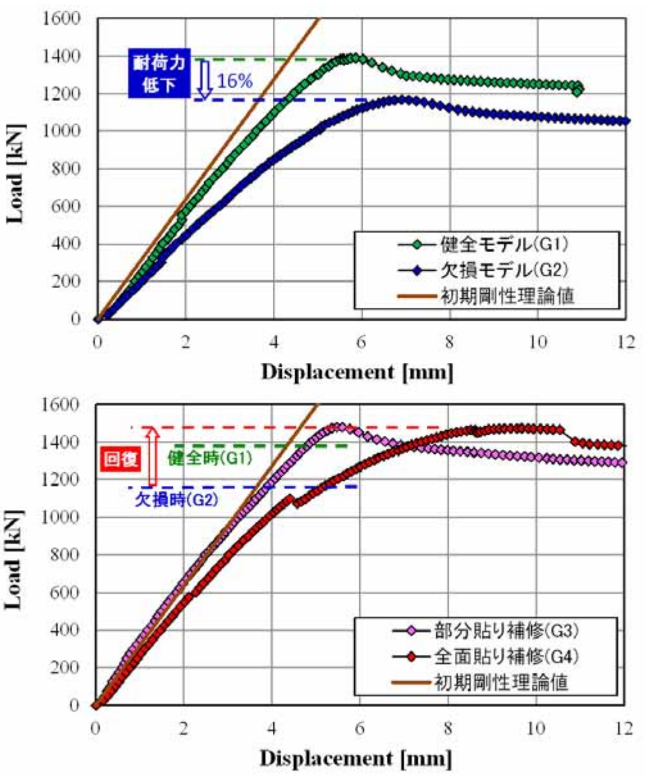


図-3　荷重-変位関係

5．まとめ

本研究により得られた成果をまとめると以下のとおりであり，CFRP 接着工法の実橋への適用性が検証された。

①部分貼り補修では，鋼換算した CFRP 厚さを用いて補修量が算定でき，せん断強度及び初期剛性を同時に回復できる。

②全面貼り補修では, CFRP 積層数に応じたせん断強度の増加が期待でき, 強度増加率も評価式を用いて算定できる。したがって, 断面欠損に対する性能回復のみでなく, 荷重増に対するせん断強度の補強にも適用可能である。

【参考文献】

1) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宜央，小林朗，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断座屈試験と強度評価法，土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 68 (2012), No. 3, pp. 635-654

2) 奥山雄介，宮下剛，長井正嗣，若林大，小出宜央，秀熊佑哉，小林朗，堀本歴：炭素繊維を用いた支点部垂直補剛材の腐食部補修法に関する実験的研究，第 30 回土木学会関東支部新潟会研調査発表会論文集，pp.60-63，2012