

CFRP 接着により補強された鋼桁のせん断載荷実験の解析的検討

東京都立大学 学生員○荒井康太（研究当時），東京都立大学 正会員 中村一史
（国研）土木研究所 正会員 小野健太，（国研）土木研究所 正会員 澤田 守

1. はじめに

道路橋示方書の限界状態設計法への移行に伴って，部材・構造物の限界状態の明確化，既設橋の補修・補強に対する現行基準との整合が必要となった．現状の鋼桁ウェブのせん断耐力の評価法では，破壊に至るまでの過程を十分に説明できないなどの課題がある．本研究では，せん断を受ける鋼桁の耐荷機構を評価するためのモデル化，FRP 接着による補修・補強の適用性の把握を目的として，CFRP 接着により補強された鋼桁のせん断載荷実験¹⁾に対して，FEM 解析による再現性を検討するとともに，種々の簡便なモデル化によるせん断耐力の評価を行った．

2. CFRP 補強された鋼桁のせん断載荷実験¹⁾の概要

実験供試体は3種類（S1，S2，S3）であり，S1は無補強鋼桁，S2はCFRP 接着補強鋼桁，S3はCFRP 接着補強と定着板の高力ボルトの添接による鋼桁の試験体である．図-1に，無補強供試体（S1）を，図-2に，補強供試体（S2，S3）の解析モデルを示す．表-1に，鋼材の材料物性値を，表-2に，炭素繊維シート（中弾性型），含浸接着樹脂，CFRP の材料物性値を示す．腹板の対角線方向に片面あたり2層の炭素繊維シートを積層接着した．炭素繊維シートの含浸接着樹脂は，エポキシ樹脂とした．3点曲げ載荷により供試体に荷重を与えた．

3. 解析モデルと解析条件

せん断載荷実験の再現解析を行うため，Msc Marc/Mentat 2019 を適用して，弾塑性有限変位解析を行った．ウェブ，垂直補剛材，上下フランジをシェル要素で，載荷板，ソールプレート，ソリッド要素でモデル化した．要素寸法は10×10mmを基本とした．支点の境界条件は単純支持とした．斜張力場に配置されたCFRP と鋼材の接着層は，垂直・水平方向に弾性ばね要素を定義することで表現する．ここでは，はく離は考慮しない．降伏後の鋼材の弾性係数は，その1/100としてモデル化した．

また，CFRP がはく離し，軸力部材として働く場合を検証するため，CFRP と鋼材は接触のみを考慮したモデルを追加する．なお，このモデルでは，定着板の範囲は，節点共有により，CFRP，ウェブ，定着板は一体化してモデル化する．さらに，CFRP に引張破壊の破壊条件（破壊後のCFRP の弾性係数0.01N/mm²）の適用を検討する．S2，S3モデルに対して，これらのパラメータの組み合わせを考慮して，表-3に示す条件で，パラメトリック解析を行った．なお，無補強鋼桁モデル（S1）に対して，鋼定着板を設置したモデルS4Aも検討した．

解析条件として，変位制御による弧長増分法を適用した．初期応力としてウェブとフランジに残留応力を導入した．さらに，終局モードと相似な形状で，最大で桁高に対して1/250の大きさの初期たわみをウェブの面外方向に与えた．

4. 解析結果と考察

解析モデルの妥当性を検討するため，図-3に，無補強鋼桁モデル（S1）の荷重-変位関係とイベントを示す．S1では，各イ

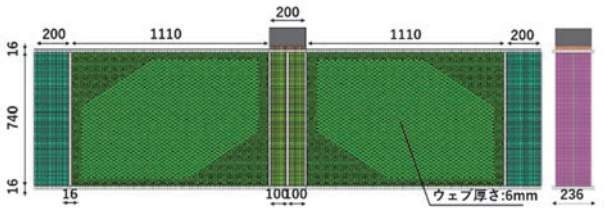
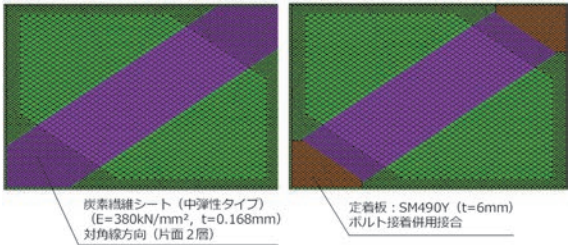


図-1 実験供試体（S1）の解析モデル（mm）



(a) S2 (b) S3
図-2 右腹板に着目した補強供試体の解析モデル

表-1 鋼材の材料物性値

項目	ウェブ	補剛材・フランジ
弾性係数（GPa）	207	197
降伏応力（MPa）	402	373
引張強度（MPa）	545	534

表-2 炭素繊維シートと含浸接着樹脂の材料物性値

材料	項目	値
炭素繊維シート （中弾性タイプ）	目付量（g/m ² ）	300
	設計厚さ（mm）	0.168
	弾性係数（GPa）	380
	引張強度（MPa）	3365
含浸接着樹脂 （エポキシ樹脂）	弾性係数（MPa）	3523
	引張強度（MPa）	52.2
	引張せん断強度（MPa）	15.4
CFRP（炭素繊維シート2層の樹脂硬化物）	弾性係数（GPa）	89.4
	引張強度（MPa）	795
	繊維体積含有率（%）	19.3
	厚さ（mm）	1.74

表-3 試験体と各解析ケース

試験体 （実験）	CFRP 接着	鋼定着板	接着（ばね要素）	CFRP の破壊を考慮	モデル名
S1	—	—	—	—	S1A
S2	有	無	有	する	S2Af
—	有	無	有	しない	S2An
—	有	無	無	する	S2Bf
—	有	無	無	しない	S2Bn
S3	有	有	有	する	S3Af
—	有	有	有	しない	S3An
—	有	有	無	する	S3Bf
—	有	有	無	しない	S3Bn
—	—	有	—	—	S4A

キーワード 炭素繊維シート，せん断耐力，鋼桁，補強
連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 東京都立大学 TEL.042-677-1111 内線（4564）

ベントの発生時の荷重・変位に若干の差異があるものの、実験と解析でよい一致を示すことがわかる。

表-3 に示した条件で、パラメトリック解析を行った結果を図-4 に示す。S2 シリーズの解析では、最大荷重は、実験値に比べて若干高く、その時の変位も大きく評価されるが、CFRP の引張破壊後に荷重が低下する挙動 (S2Af) が再現されているものの、CFRP の破壊後も荷重が残存する挙動であった。

S3 シリーズの解析では、最大荷重とその時の変位は、実験値に比べて大きく評価されること (S3Af, S3An), また、CFRP の破壊による荷重の低下は評価できなかった (S3Af, S3Bf)。

図-5 に、S3 シリーズのウェブ面外変位のコンタ図を示す。最大荷重は異なるもの、実験と解析でよい一致を示すことがわかる。なお、図を略したが、各ケースのウェブの終局モードは、実験と解析で概ね一致することを確認している。

S2, S3 シリーズの全体の傾向として、ウェブ斜張力場の降伏時の鉛直変位は、実験値と解析値で同程度であるが、荷重に差異が見られた。また、上下フランジの降伏時の鉛直変位については、解析値は実験値に比べ小さいことがわかる。

一方、CFRP の破壊の考慮の有無による比較では、両者の差異は小さい、もしくは明確ではなかった。CFRP のはく離が考慮されないこと (S2Af, S3Af) から、CFRP の破壊が適切に評価されないためと考えられた。

定着板の有無による比較では、定着板のみをモデル化した S4A の耐荷力は、荷重が低下することなく、増加傾向であるが、試験体 S3 において CFRP の破壊後の残存耐力とほぼ同じであることが確認できた。

図-6 に、実験、解析の全ケースでの最大荷重を比較して示す。最大荷重が得られなかった解析ケースでは、解析の最終ステップの値とした。図より、接着 (ばね要素) の有無の比較では、実験による最大荷重は、S2 シリーズでは概ねその中間、S3 シリーズでは接着を考慮しない場合に近かった。接着を考慮しない解析モデルは、CFRP による補強効果を簡便に評価できる可能性があるといえた。

5. まとめ

鋼桁のせん断抵抗機構の検討を目的として、CFRP 接着により補強された鋼桁のせん断載荷試験の再現解析を行った。解析では、ウェブのせん断座屈挙動を捉えることはできたものの、はく離が考慮されないため、最大荷重は高く評価された。接着を考慮しない解析では、最大荷重 (実験値) を安全側に評価できることから、簡便なモデル化が可能であるといえた。

謝辞

本研究は (国研) 土木研究所「FRP を用いた複合構造化による補修補強効果の評価法に関する共同研究」の一環として行われた。ここに記して関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小野健太, 宮下剛, 澤田守: 炭素繊維シート補強構造を有する鋼桁のせん断耐荷力に関する実験的検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 2022.

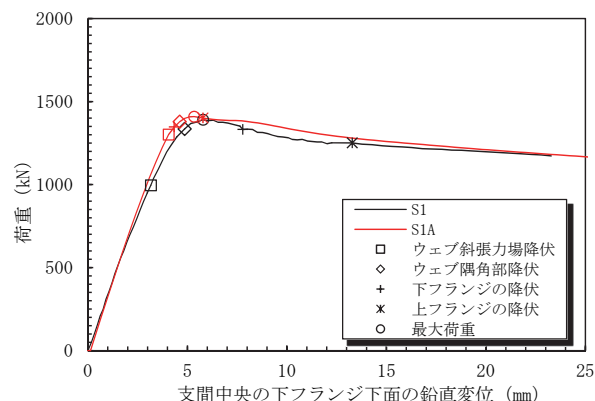
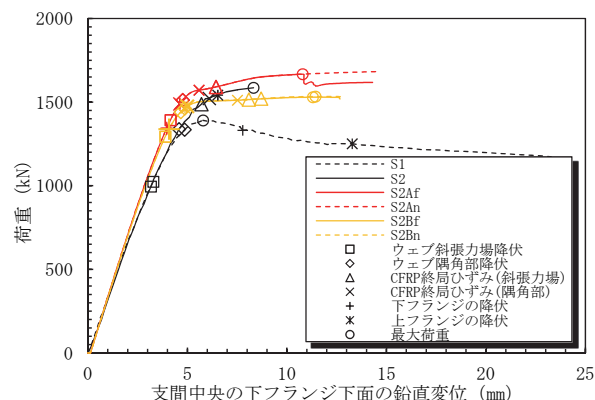
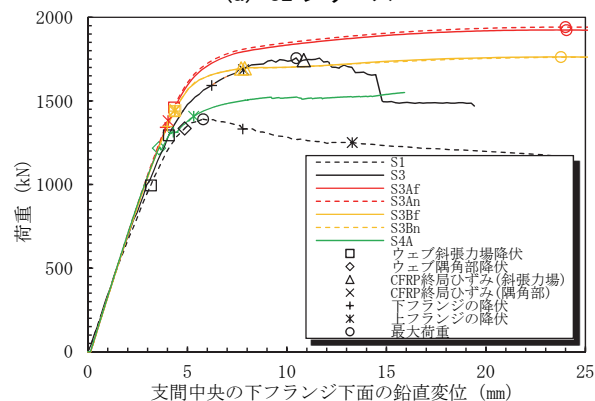


図-3 S1 (無補強) モデルの荷重-変位関係とイベント

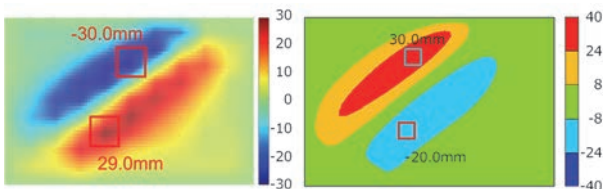


(a) S2 シリーズ



(b) S3, S4 シリーズ

図-4 パラメトリック解析による比較



(a) S3 (実験: $P_{max}=1756\text{kN}$) (b) S3Af (解析: $P_{max}=1936\text{kN}$)

図-5 S3 シリーズのウェブ面外変位のコンタ図

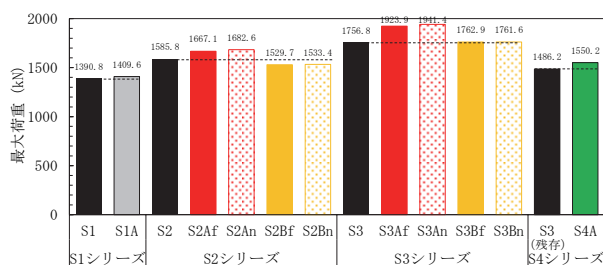


図-6 最大荷重の比較