

(24) 鋼桁腹板のCFRPシートによる補強に関する解析的研究

下前 照¹・PHAM NGOC VINH²・大垣 賀津雄³・櫻井 俊太⁴
秀熊 佑哉⁵・服部 雅史⁶・宮下 剛⁷

¹正会員 株式会社IHIインフラシステム 建設部 (〒108-0023 東京都港区芝浦3-17-12)
E-mail: b01512097@iot.ac.jp (研究当時, ものづくり大学大学院)

²正会員 ものづくり大学特任講師 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地)
E-mail: pnvinh@iot.ac.jp

³正会員 ものづくり大学教授 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地)
E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

⁴正会員 日鉄ケミカル&マテリアル㈱ コンポジット事業部 (〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1)
E-mail: sakurai.sh.msu@nscm.nipponsteel.com

⁵正会員 日鉄ケミカル&マテリアル㈱ コンポジット事業部 (〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1)
E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

⁶正会員 高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail: m.hattorit.ab@ri-nexco.co.jp

⁷正会員 長岡技術科学大学准教授 環境社会基盤工学専攻 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)
E-mail: mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

近年、高速道路における大規模な床版の取り替え工事が行われているが、合成桁橋の床版取替え時にあって、鋼桁の耐力不足が懸念されている。そこで鋼構造物の新たな補強材料として、炭素繊維強化プラスチック（以下、CFRPと記す）が注目されている。CFRPは軽量、高強度、高耐久性といった特徴を有しており、施工も容易で狭隘な場所にも対応できる。さらに断面欠損や熱影響もなく、従来の当て板工法に比べ様々な点で優れている。そのため、橋梁の耐荷力保持などの課題に対し、CFRPを用いた補強工法が有効であると考えられる。本研究は合理的な設計・施工法の確立に有用な資料を提示することを目的に、CFRPシートを用いた補強工法の有限要素解析のモデル化の検討を行い、過去に実施した鋼桁腹板のCFRPシート補強に関する実験で得られた結果と比較・考察するものである。

Key Words : FEA, CFRP sheet, steel girder, bond, reinforcement, ultimate strength

1. はじめに

日本の道路構造物の多くは高度経済成長期に建設されたものであり、近年、それらの老朽化が問題視されている。高速道路においては床版の劣化が確認されており、これを受けて大規模な床版の取り替え工事が実施されているが、合成桁において、一時的に一部の床版がなくなり、鋼桁のみで橋を保持することから、鋼桁の耐力不足が懸念される。しかし、一般的な補強工法である当て板工法は、鋼板をボルトや溶接で添接するため、ボルト孔による断面欠損や溶接による熱影響が生じてしまう。

そこで新たな鋼構造物の補強材料として注目されてい

るのがCFRPである。CFRPは、軽量かつ高強度、高耐久性といった特徴を有しており、施工も大掛かりな機械を必要とせず、CFRPを接着するだけなので、施工が容易かつ狭隘な場所にも対応することができる。さらに断面欠損や熱影響もないため、従来の当て板工法に比べ様々な点で優れている。以上のことから、近年、高速道路総合技術研究所からは、鋼構造物の補修・補強設計施工マニュアル¹⁾が発刊されている。

このCFRPを用いた補強工法によって、床版取替え工事における鋼桁の耐荷力不足や、建設後に改定された基準に対応できていない、古い橋梁の耐荷力保持などの課題を解決できると考えらる。

本研究は、この工法を確立するための部分モデル載荷実験およびFEM解析によってCFRP補強した鋼桁の構造特性を究明し、合理的な設計、施工法確立に有用となる資料を提示することを目的としている。そこで、過去に実施した鋼桁のCFRPシート補強に関する載荷実験で得られた結果を用いて、CFRPシートを用いた補強工法の有限要素解析におけるモデル化の検討を行った。

2. 鋼桁の載荷実験概要

これまでI形断面の鋼桁に対して、曲げ、せん断、曲げとせん断のように、載荷方法を変えて異なる力が作用するような載荷実験を実施してきた²⁾。また、それぞれの載荷実験において、CFRPによる補強を行い、供試体の形状や補強の有無、シートの貼り方等をパラメータとして、補強効果の確認を行っている。

使用したCFRPシートの種類と材料特性を図-1、表-1に示す。CFRPは、炭素繊維を一方向に引き揃えたCFRPシートと、炭素繊維を樹脂で固めて、ストランド状にしたものを一方向に引き揃えたCFRPストランドシート(以下、ストランドシート)の2種類を用いている。両者とも高弾性と中弾性タイプがある。剛性が高く腐食部の補修でよく使われるのが高弾性タイプであり、中程度の剛性と強度を併せ持ち座屈防止効果が期待できるのが中弾性タイプである。本研究では中弾性タイプを用いている。

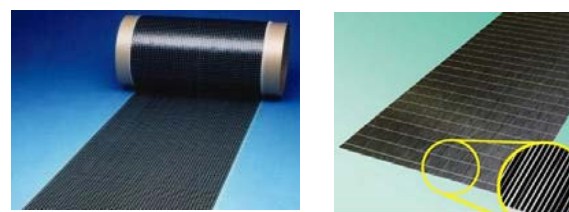
CFRPをエポキシ樹脂で鋼部材に接着した場合、座屈変形等の大変形が起きるとCFRPがはく離し、CFRPによる補強効果を十分に発揮できない。そのため、以下で説明する載荷実験では補強を行ったすべての供試体に対し、文献1)と同様、鋼材とCFRPの間にシートのはく離抑制効果のあるポリウレアパテ（以下、パテ材）を挿入した。

今までの鋼桁を対象としたCFRP補強効果に関する載荷実験について、代表的なケース（水平補剛材無し、中弾性シート使用、腹板のみ補強）を以下にまとめる。

(1) 曲げ載荷実験

曲げ載荷実験の試験体は実橋の1/2程度の寸法である、高さ1000mm、幅1000mmの試験パネルの両端に、実験用載荷桁を添接して、支間長6000mmとした試験体に対し、図-2に示すように4点載荷を行う²⁾。また、鋼材の材質、腹板の幅厚比、補剛材の有無をパラメータとしている。

実験結果は表-2、図-3に示す通りである。中弾性CFRPシートTMMで鋼桁腹板上部両面を補強した供試体MRは、腹板の面外座屈が抑えられて耐荷力が向上し、無補強MNに対して補強効果が確認できた。供試体MRの耐荷力は、無補強のMNに比べて142%向上している。



(a)CFRPシート (b)CFRP ストランドシート
図-1 炭素繊維補強材

表-1 CFRP シートの材料特性

種類	繊維目付量 g/m ²	設計厚さ mm	設計弾性係数 GPa	設計引張強度 MPa
中弾性CFRPシート TMM	300	0.165	390	2900
高弾性CFRPシート THM	300	0.143	640	1900
中弾性ストランドシート HM	600	0.330	390	2900
高弾性ストランドシート MM	600	0.286	640	1900

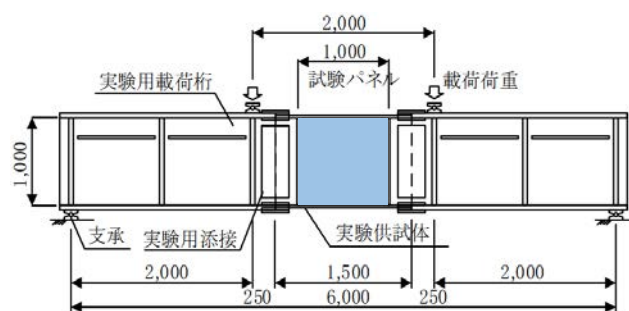


図-2 曲げ載荷実験

表-2 曲げ実験供試体パラメータと実験結果

ケース	鋼種	腹板幅厚比	補強方法	最大荷重 (kN)	耐荷力増減率
MN			無	634	-
MR	SM490Y	125	中弾性CFRPシート TMM 腹板上部両面	899	1.42

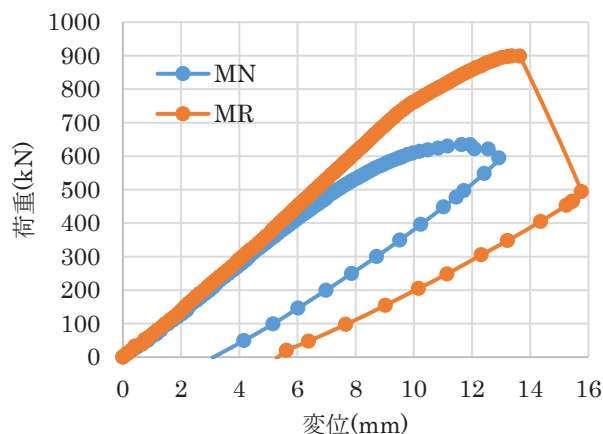


図-3 曲げ載荷実験結果

(2) セン断載荷実験

せん断載荷実験では、腹板の高さと幅を 910mm とした試験パネルに実験用載荷桁を添接し、支間長 3500mm とした試験体で、図-4 のように 3 点曲げ載荷を行う⁴⁾。この載荷実験に使用した試験パネルは全て同じ形状であり、パテ材の有無や、補強方法（シートの種類、シートの貼り方、層数）をパラメータとしている。

文献 4) に示す実験結果は、CFRP シートの貼付け方向を $\pm 45^\circ$ に配置した供試体等を含めて高い補強効果が得られた。また、シートの貼り付け方向による補強効果に大きな差はないことも確認できた。本文では代表的な事例として、表-3 に示す 0° 、 90° 方向に CFRP シートを配置した供試体の載荷実験結果を図-5 に示す。

このような補強を行ったケース SR は無補強の SN に比べ、耐力力が 141% に向上することが分かった。このことから、次に述べる曲げせん断載荷実験のせん断補強は、 0° 、 90° に CFRP シートを配置を適用している。

(3) 曲げせん断載荷実験

曲げせん断載荷実験では、腹板の高さと幅を 1000mm とした 2 枚の試験パネルを実験用載荷桁と添接し、支間長 6000mm とした試験体に対し、図-6 に示すように 3 点載荷を行う⁵⁾。パラメータは水平補剛材の有無、せん断補強のシートの方向、層数としている。

文献 4) に示す実験結果は、CFRP シート補強したどのケースでも無補強の初期降伏荷重を超えて、全塑性荷重付近までの補強効果を確認できた。本文では代表的な事例

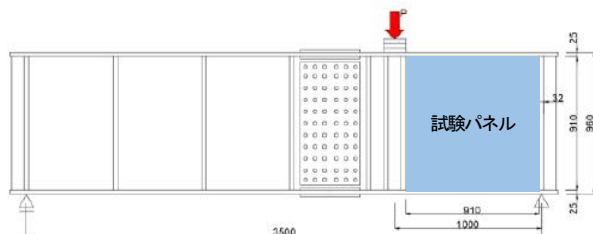


図-4 セン断載荷実験

例として、表-4 に示す 0° 、 90° 方向に CFRP シートを配置した供試体の載荷実験結果を図-7 に示した。補強有りの MSR は無補強の MSN に比べ、131% の耐力力向上を確認できた。

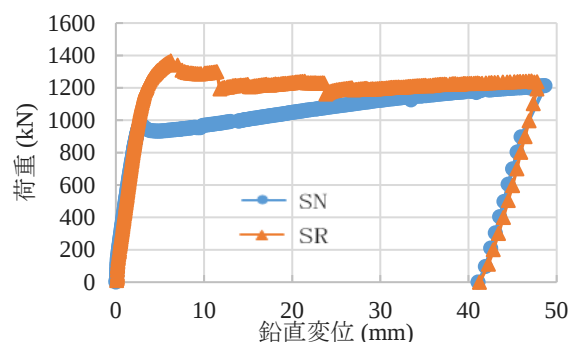


図-5 セン断載荷実験結果

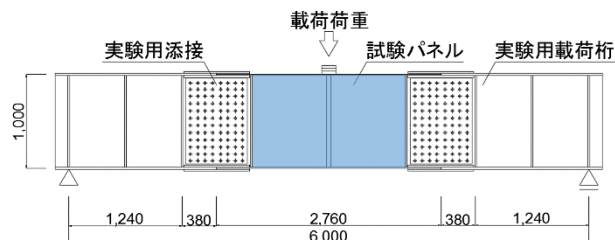


図-6 曲げせん断実験

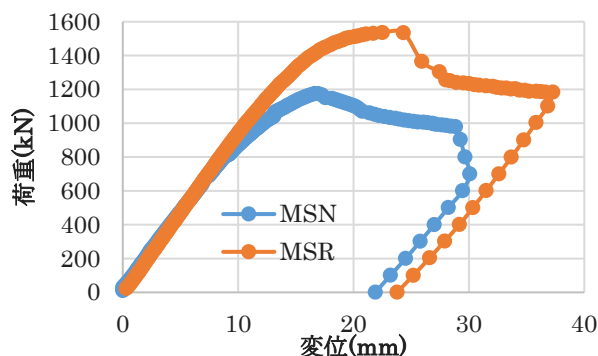


図-7 曲げせん断載荷実験結果

表-3 セン断実験供試体パラメータと実験結果

ケース	シート 貼り方	パテ 材	補強方法				最大荷重 (kN)	無補強からの 耐力力増減率
			内層	外側	補強シート	層数 (片面)		
SN	無	×	無				970	-
SR	$0^\circ, 90^\circ$ 貼り	○	90°	0°	中弾性ストランド シート MM	1	1366	1.41

表-4 曲げせん断実験供試体パラメータと実験結果

ケース	水平 補剛材	補強シート	補強方法				最大荷重(kN)	無補強からの 耐力力増減率
			腹板 曲げ補強	腹板 せん断補強	圧縮フランジ 幅厚比 R_f	腹板幅厚比 R_w		
MSN	無	無	無	無	0.768	1.218	1176	-
MSR		中弾性 CFRP シート TMM	$0^\circ, 90^\circ$ 5 層**	$0^\circ, 90^\circ$ 2 層**	0.678	0.779	1538	1.31

3. 解析方法

解析に使用したソフトウェアはDIANA10.4である。解析モデルの各種材料諸元を表-5に、パテ材の材料非線形モデルを図-8に、鋼板とCFRPの接着部における解析モデル詳細図を図-9に示す。鋼板とエポキシ樹脂は20節点ソリッド要素、CFRPシートは8節点シェル要素で構成されている。CFRPシートの1層目と鋼材の間に挿入されたパテ材による接着層は、応力と相対変位をモデル化したインターフェイス要素で構成した⁶⁾。この要素の特性値は各種引張試験結果等から、図-8のように設計した。CFRPシートのシェル要素を、エポキシ樹脂の厚み0.8mm間隔で、高さ方向に層数分を配置し、そのシェル要素の間に、エポキシ樹脂の20節点ソリッド要素を配置している。

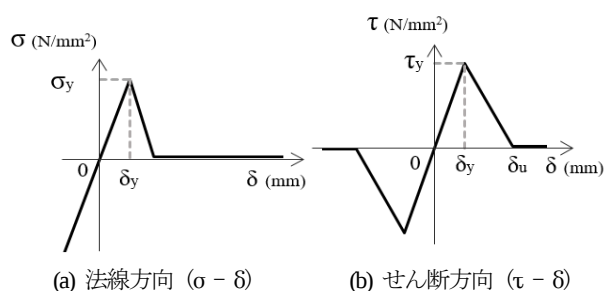


図-8 パテ材の材料非線形モデル

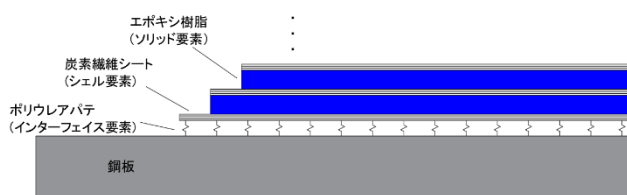


図-9 各材料の構成モデル

表-5 解析モデルの材料特性

材料	項目	値
炭素繊維	弾性係数 (MPa)	6.4×10^5
	引張強度 (MPa)	2430
	厚さ (mm) (CFRP シート)	0.143
	厚さ (mm) (ストランド)	0.429
	ポアソン比	0.3
エポキシ樹脂 (FR-E9P, FB-E9S)	弾性係数 (MPa)	2500
	厚さ (mm)	0.8
パテ材 (FU-Z)	厚さ (mm)	0.6
	せん断強度 τ_y (MPa)	6.13
	せん断強度における 相対変位 δ_y (mm)	0.81
	はく離段階における 相対変位 δ_u (mm)	2.1

4. 実験と解析の比較

(1) 曲げ载荷実験

前述した解析方法で、曲げを受ける鋼桁に CFRP シート補強を施したケースの FEM 解析を行った。解析モデルは実験用载荷桁を含めた供試体全体とした。境界条件は片側の支点を全方向固定、もう片方の支点は軸方向を自由にし、荷重は载荷点の位置に強制変位を設定した。モデルの要素メッシュは、試験パネルと添接部を 50mm、実験用载荷桁の軸方向端側のパネルを 100mm として、材料非線形と幾何学的非線形を考慮した解析を実施した。

初期不整は、初期たわみの実測値の最大値と形状を参照し、初期たわみのみを反映した。

荷重-鉛直変位関係について、解析結果と実験結果を比較したグラフを図-10に示す。弾性域の剛性は一致しており、最大荷重は解析値の方がやや低くなっている。また、実験値は降伏以降、グラフが徐々に横ばいになっているのに対し、解析ではほぼ弾性域の剛性のまま、実験値の最大荷重に到達する前に CFRP のはく離に至っており、途中で計算が止まっている。このときの荷重は、CFRP による補強を鋼板厚換算して算出した初期降伏荷重と一致しており、この時点で鋼材側が大きく変形し始めたことで、CFRP がはく離する解析結果が得られたと考えている。

ここで、解析の荷重条件は、2 点の载荷位置に強制変位を与えたことに対し、载荷実験では試験機と供試体の間に 1 つの梁を挟み、2 点の载荷点を設けるようにしたことや、荷重伝達部分にある程度の回転を許すユニバーサルヘッドを用いたことが、実験値と解析値の違いを生んでいると推察される。また、実験値の方が早く降伏し始める原因として、溶接入熱による残留応力の影響が考えられる。

(2) せん断载荷実験

せん断载荷実験についても、曲げ载荷実験と同様に CFRP 補強を施したケースの FEM 解析を行った。解析モ

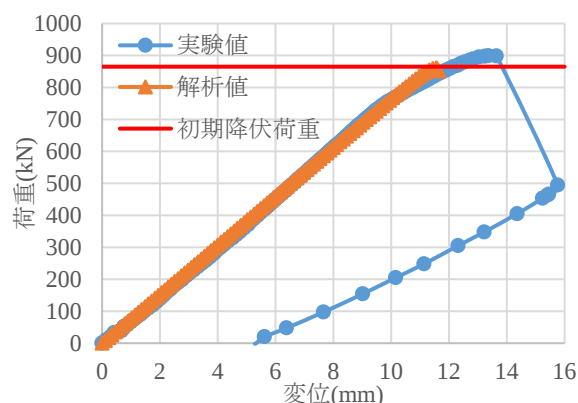


図-10 曲げ载荷実験と解析の比較

デルは実験用載荷桁を含めた供試体全体とした。境界条件は片側の支点部を全方向固定、もう片方の支点は軸方向を自由にし、荷重は載荷点の位置に強制変位を設定した。モデルの要素メッシュは、試験パネルと添接部を 50mm、実験用載荷桁の軸方向端側のパネルを 100mm として、材料非線形と幾何学的非線形を考慮した解析を実施した。モデルで使用した構成要素と初期不整は曲げ載荷実験の解析と同様である。

荷重-鉛直変位関係について、解析結果と実験結果を比較したグラフを図-11 に示す。弾性域の剛性は一致しているものの、解析では、実験値の最大荷重に到達する前に、鋼桁のせん断座屈が発生しており、早い段階で変位が大きく伸び始めている。これは、載荷実験で使用した CFRP シートが、炭素繊維をあらかじめ樹脂で固めて、ストランド状に一方に引き揃えた炭素繊維ストランドシートであったことが関係していると考えられる。ストランドシートは、曲面に沿って貼付けを行うことができないが、設計厚さが通常の CFRP シートに比べ数倍厚く、積層数を減らすことができるという特徴がある。また、接着の際の樹脂量が多く、同じ補強用でも施工厚が厚くなる特徴がある。そのため、CFRP シート補強による面外剛性が高く初期たわみの影響を受けにくくなるものと考え、初期たわみを無しにした解析を行った。その結果、弾性域および降伏後、また座屈発生等の挙動が類似してくることがわかる。しかし、それぞれの荷重は実験値よりも大きく、危険側での評価になってしまうため、設計上好ましくない結果となっている。

また、降伏後の後座屈強度に注目すると実験結果と同様の挙動を示していることがわかるため、座屈発生後について、実験結果と解析結果はよく一致しているといえる。

(3) 曲げせん断載荷実験

曲げせん断載荷実験についても、これまでと同様に FEM 解析を行った。解析モデルは実験用載荷桁を含め

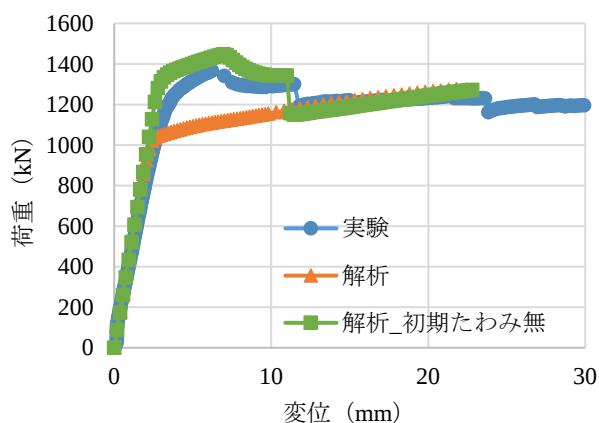


図-11 せん断載荷実験 実験と解析の比較

た供試体全体とした。境界条件は片側の支点部を全方向固定、もう片方の支点は軸方向を自由にし、荷重は載荷点の位置に強制変位を設定した。モデルの要素メッシュは、試験パネルと添接部を 50mm、実験用載荷桁の軸方向端側のパネルを 100mm として、材料非線形と幾何学的非線形を考慮した解析を実施した。モデルの構成要素と初期たわみの設定は曲げ載荷実験における解析と同様であり、さらに溶接組立プレートガーダーの残留応力分布を考慮した。

荷重-鉛直変位関係について、解析結果と実験結果を比較したグラフを図-12 に示す。残留応力を設定したことによって、載荷実験結果にみられるような、徐々に降伏する挙動が確認できた。しかし、解析結果の最大荷重が、載荷実験結果を下回っていた。これは、実際の CFRP シートの面外せん断剛性の値が解析で設定した値よりも大きいことや、せん断載荷実験と同様に、CFRP シートの初期不整の影響が要因であると推察される。曲げせん断載荷実験では、通常の CFRP シートを使用しているが、積層枚数が他の載荷実験と比較してかなり多くなっている。シートを積層するごとに面外せん断剛性が高くなる場合、鋼桁腹板の初期たわみの影響が小さくなると考えられる。そこで、せん断載荷実験の解析と同様に初期たわみがないケースの解析を行った。その結果、最大荷重が近い値になることが分かった。また、はく離を確認した位置は実験結果とほぼ一致していることも分かった。

5. まとめ

本研究では鋼桁の CFRP 補強について、FEM 解析によって CFRP 補強した鋼桁の構造特性を究明するため、過去に実施した鋼桁の各種載荷実験データと、ここに詳述した解析方法とを比較検討している。本研究で得られた知見は、以下の通りである。

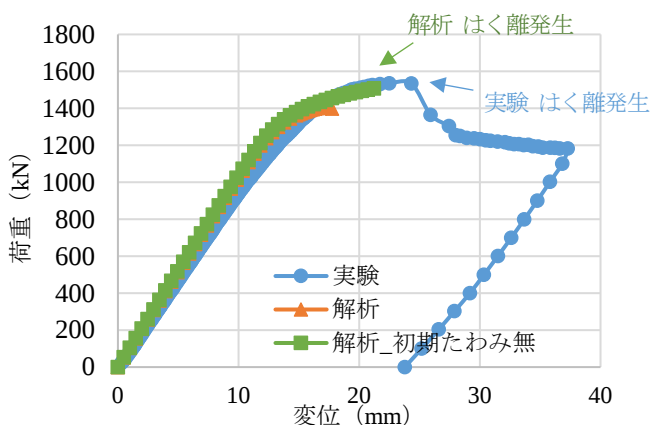


図-12 曲げせん断載荷実験 実験と解析の比較

- (1) パテ材をインターフェイス要素で、CFRPシートをシェル要素で、エポキシ樹脂や鋼板をソリッド要素でモデル化を行ったところ⁹⁾、鋼桁が座屈変形するあたりからの挙動について、実験値とFEM解析が近くなることがわかった。
- (2) CFRPシート補強後のせん断耐力や曲げせん断耐力については、腹板の初期たわみを考慮しないケースの方が実験結果に近い挙動を示すことがわかった。

今後の課題として、各解析で最大荷重が実験値を下回ったケースに対し、初期たわみによる影響があった場合の検討を行ったが、CFRPシートの面外曲げ剛性や水平せん断剛性による検討は行っていない。この検討を行うためには、積層したCFRPシートやパテ材等の間に生じる詳細な変形挙動に関する実験データを蓄積する必要がある。また、今後、実橋を対象に補強方法をパラメータとしたFEM解析を行い、補強方法による終局強度を比較することに取り組みたい。

参考文献

- 1) (株)高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法設計施工マニュアル，2013.10
- 2) 服部雅史，広瀬剛，大垣賀津雄，宮下剛，奥山雄介，小林朗，秀熊佑哉：2軸対称鋼桁のCFRPによる曲げ耐力補強に関する実験的研究，日本鋼構造協会，鋼構造論文集，第25巻，第99号，2018.9
- 3) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宣央，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，Vol.68，No.3，635-654，2012.11
- 4) 菊地新平，大垣賀津雄，宮下剛，奥山雄介，小林朗，秀熊佑哉，原田拓也，下前照：CFRPシートによる腹板の補強方法をパラメータとしたせん断耐力に関する実験的研究，土木学会年次学術講演会，I-173，2020. 9
- 5) 下前照，大垣賀津雄，菊地新平，原田拓也，長谷俊彦，宮下剛，奥山雄介，秀熊佑哉，西野晶弘：曲げとせん断を受けるプレートガーダーのCFRPシートによる補強効果に関する実験研究，土木学会年次学術講演会，I-172，2020. 9
- 6) Ngoc Vinh PHAM, Takeshi MIYASHITA: NONLINEAR STRESS ANALYSIS FOR CFRP-SHEET-BONDED STEEL PLATES UNDER UNIAXIAL TENSILE LOADING, Journal of JSCE, Vol. 8, pp.127-143, 2020
- 7) 土木学会：座屈設計ガイドライン，鋼構造シリーズ 2，1987.10

(Received September 10, 2021)

ANALYTICAL STUDY ON REINFORCEMENT OF STEEL GIRDER WEB PLATE WITH CFRP SHEET

Teru SHIMOMAE, Ngoc Vinh PHAM, Kazuo OHGAKI, Shunta SAKURAI,
Yuya HIDEKUMA, Masafumi HATTORI and Takeshi MIYASHITA

In recent years, slab replacement works have been carried out on highways. Then, carbon fiber reinforced plastics are attracting attention as a new reinforcing material for steel structures. CFRP has features such as lightweight, high strength, and high durability, and it is easy to install and can be used in narrow places. Therefore, it is considered that the reinforcement method using CFRP is effective for the problems such as maintaining the load-bearing capacity of the bridge.

In this study, for the purpose of presenting data useful for establishing rational design and construction methods, we examined the modeling of finite element analysis of reinforcement method using CFRP sheet. It is compared and considered with the experimental reinforcement data of steel girder web plate with CFRP sheet.