

台形断面CFRP桁の曲げ挙動に関する 有限要素解析

松本 高志¹・白木 聡仁²・林川 俊郎³・何 興文⁴

¹正会員 北海道大学准教授 大学院工学研究院北方圏環境政策工学部門
(〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目)

E-mail:takashim@eng.hokudai.ac.jp

²学生会員 北海道大学 大学院工学院北方圏環境政策工学専攻
(〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目)

E-mail:shirakia0929@gmail.com

³フェロー会員 北海道大学教授 大学院工学研究院北方圏環境政策工学部門
(〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目)

E-mail:toshiroh@eng.hokudai.ac.jp

⁴正会員 北海道大学助教 大学院工学研究院北方圏環境政策工学部門
(〒060-8628 北海道札幌市北区北十三条西8丁目)

E-mail:xingwen_he@eng.hokudai.ac.jp

本研究ではスペインで建設された橋梁のCFRP桁の曲げ載荷実験を対象として、既往の研究で提案されたCFRPの解析モデルを用いて有限要素解析を行い実験結果と比較することで、実大CFRP桁の曲げ挙動を把握することを目的としている。結果として、解析モデルに試験で得られた材料特性値を用いることで、実大CFRP桁の曲げ挙動を概ね再現できることを確認した。また、有限要素解析において、卓越応力である σ_1 と τ_{12} の分布を確認し、Hill則を用いて梁の損傷を確認した際、正曲げが最大となる断面においてCFRP桁の破壊が生じていないことが確認された。

Key Words : CFRP, girder, flexure, finite element analysis, real scale experiment

1. はじめに

炭素繊維強化ポリマー (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) は、軽量かつ高い強度を有し耐食性も高い複合材料である。CFRP は、その材料特性を利点として、航空宇宙、自動車、スポーツなどの分野で用いられており、近年では多様なもの造りの素材としての活用が高まってきている^{1,2)}。

社会基盤用途においては、コンクリートもしくは鋼構造物の損傷・劣化部位に対する補修・補強材としての活用が多く図られてきた^{3,4)}。さらに、橋梁の主部材にCFRPを用いる構造も研究開発されてきている^{5,7)}。CFRPによる軽量化上部工は、下部工の負担軽減、重機の使用軽減、工期の縮減などにつながり、設計及び施工の見直しを図ることができる。また、CFRPが耐食性を有することで、経年劣化が少なく維持管理の負担が軽減された長寿命な構造物が期待できる。このように、CFRPは社

会基盤構造物においても安全性と耐久性を確保できる構造材料として有望である。

社会基盤用途の大型構造物における活用を進めるには、CFRP部材の変形及び耐荷特性についてメカニズムを把握する必要がある。特に、積層材料であるCFRPは異方性材料であり材料設計の自由度と構造性能への影響が大きく、材料と構造の双方のレベルで挙動を理解する必要がある。こうしたメカニズムの把握には、実験で観察されるCFRPの部材挙動に対して、CFRP材料の積層構成と損傷・破壊過程に基づいたモデルの構築と解析による再現が必要不可欠である。

既往の研究においては様々な積層構成のCFRP梁について実験と解析による検討がなされてきている。まず、曲げと軸力を受けるコンクリート充填箱形断面CFRP梁の研究では、有限要素解析によりCFRP梁の変形と破壊に対して卓越した応力を把握し、梁の変位と耐荷力の算定式を検討している⁸⁾。また、箱形断面CFRP梁につい

て、曲げ載荷実験を行い、変位、ひずみ、破壊形態、耐荷力の把握と、変位とひずみの算定式との比較をするとともに⁹⁾、補剛された箱形断面 CFRP 梁についても曲げ実験を行っており、材料実験により得られた材料特性値と合わせて、変位と耐荷力の算定値を実験値と比較検討している¹⁰⁾。これらの研究では、積層構成の影響を踏まえた算定式が概ね妥当な変位と耐荷力を与えることが示されている。ただし、これらの CFRP 梁は比較的小寸法であり、実大寸法も含めた広範囲な検討による解析の妥当性の確認が必要とされている。

本研究では、スペインで建設された橋梁に用いられている台形断面 CFRP 桁の曲げ載荷実験^{5,7)}を対象として、有限要素解析を行い実験で得られた挙動と比較することで、実大 CFRP 桁の曲げ挙動を把握することを目的としている。

2. 載荷実験の概要

本章では、既往の文献⁵⁾⁻⁷⁾にある台形断面 CFRP 桁の曲げ載荷実験について述べる。なお、実験の結果については3章の有限要素解析の結果と合わせて示す。

(1) 実験対象

文献⁵⁾⁻⁷⁾で対象としているのは、スペインのカンタブ

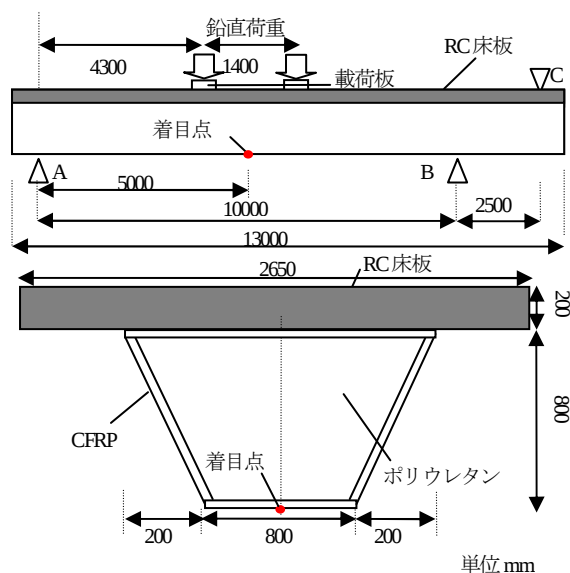


図-1 桁の側面図（上）および断面図（下）

表-1 CFRP桁の断面寸法

単位		
上フランジ厚	mm	5.52
下フランジ厚		11.42
ウェブ厚		11.06

リコ自動車道のタモンーオトゥル間に建設された橋梁に用いられている CFRP 桁である。建設された橋梁は橋長 46m であり、10+13+13+10m の 4 径間から構成されている。曲げ載荷実験では、建設された橋梁に用いられている 13m の桁を対象として実験を行っている。

桁の側面図および断面図を図-1 に示す。CFRP は、積層構成に依存するが、一般にせん断弾性係数が小さいため、せん断変形とねじり変形に対する配慮が必要で、サンドイッチ構造とするか箱形断面を桁構造に採用するのが望ましいと言われている¹¹⁾。実験対象の CFRP 桁の断面は高比強度・高比剛性に優れる台形箱形断面としており、CFRP 桁の断面内部にはコア材として、コンクリートと比較して軽い発泡ポリウレタンが用いられている。CFRP 桁の上部の RC 床版とは、シアコネクターにより接合されている。シアコネクターは、I 形断面の GFRP を橋軸直角方向に並べて CFRP 桁上フランジにエポキシ樹脂系接着剤により接着することで構成されている。

(2) 供試体

CFRP 桁はコアが発泡ポリウレタンであり外殻が CFRP で構成されている。CFRP はプリプレグと呼ばれる炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させたシート状の単層板を重ねて作成している。まず、台形断面形状のコアとなる発泡ポリウレタンにプリプレグを巻きつけ、その後熱硬化処理を施すことで母材であるエポキシ樹脂が硬化

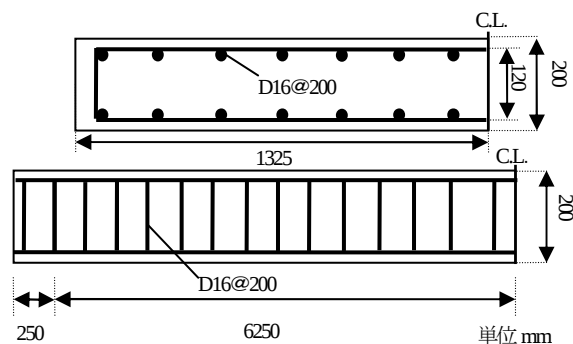


図-2 鉄筋の配置（断面図（上）および側面図（下））

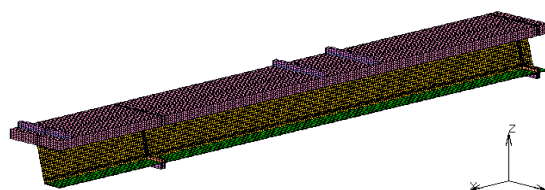


図-3 有限要素モデル

し、CFRP の外殻が形成される。コアの発泡ポリウレタンは、外殻成形の型であると同時に中詰材としての役割も担っている。CFRP 桁の両端部は閉じられており、CFRP と発泡ポリウレタンの付着を向上させるための処置は特に施されていない。

CFRP 桁は、上フランジ、下フランジ、ウェブのそれぞれにおいて、圧縮力や引張力の作用など、力学的作用の違いから積層構成が異なっている。積層構成とは、単層板を重ねる順序と配向させる角度のことを意味する。上フランジ、下フランジ、ウェブは、配向角 0 度（桁軸方向）、配向角 90 度（桁周方向）および配向角 ± 45 度方向の繊維比率を変化させ、構成されている。上フランジでは $[0/\pm 45/0]_2$ 、下フランジでは $[0/\pm 45/0]_2$ 、また、ウェブでは $[\pm 45]_2$ となっており、上フランジは RC 床版が圧縮力を受けもつため、0 度方向の層の割合が低く、一方、下フランジは引張力への抵抗性を高めるため、0 度方向の繊維の割合が高くなっている。ウェブにおいては CFRP 桁内部の中詰材である発泡ポリウレタンとの相互作用により、引張力および座屈への抵抗性を高めている。個々の層の厚さは、0 度層が 0.59mm、 ± 45 度層が 1.58mm であり、積層構成より算定される CFRP 桁の断面寸法は表-1 に示すようになる。

RC 床版は、GFRP の型枠を CFRP 桁の上部に設置し、図-2 に示すように軸方向鉄筋およびせん断補強筋を配置してコンクリートを打設することで作られた。コンクリートの強度は材齢 32 日において圧縮強度 31.2MPa である。

(3) 荷重方法

荷重荷重方法を図-1 に示す。支間 AB 間が 10,000mm、スパン BC 間が 2,500mm、曲げ支間長が 1,400mm、せん

断支間長が 4,300mm となっており、支間 AB 間において 4 つのアクチュエーターにより変位制御で荷重されている。アクチュエーターの最大荷重はそれぞれ 1,000kN であり、合計して最大 4,000kN まで荷重できる。

(4) 計測項目

実験では合計 164 の計測項目（荷重 10 箇所、ひずみ 94 箇所、変位 50 箇所）が設けられているが、本研究では、荷重、支間 AB 間中央の下フランジ（図-1 の着目点）の変位とひずみ、支点（図-1 の A, B, C 点）の反力に着目する。

3. CFRP桁の有限要素解析

本章では、曲げ荷重下の台形断面 CFRP 桁の基本的な変形挙動と耐荷機構の把握を目的とするため、有限要素法により線形解析を行い実験結果と比較する。なお解析ソフトウェアには MSC.Marc を使用した。

(1) 境界条件

図-3 に CFRP 桁の有限要素モデルを示す。座標系は、桁軸方向、奥行き方向、鉛直方向をそれぞれ、X, Y, Z 方向として定義した。解析モデルでは、RC 床版の鉄筋に 2 節点の梁要素、それ以外では 8 節点ソリッド要素を用い、図-3 に示すように桁の対称性を考慮して 1/2 モデルとして対称面節点の Y 方向の変位を拘束した。支点では支点上の節点の X, Z 方向変位を拘束し、鉛直荷重は面に作用する圧力として与えている。

表-2 CFRP の材料特性

材料特性	単位	上フランジ	下フランジ	ウェブ	備考
E_1	MPa	77125	98000	14000	—
E_2		17300	9833	14000	—
E_3		4000	4000	4000	—
G_{12}		13500	8330	29500	—
G_{23}		3200	3200	3200	文献より仮定 ^⑨
G_{31}		3200	3200	3200	文献より仮定 ^⑨
ν_{12}	—	0.63	0.5	0.77	—
ν_{23}		0.16	0.06	0.77	—
ν_{13}		0.129	0.094	0.089	積層理論により仮定
σ_{11}^T	MPa	938	1083	500	—
σ_{22}^T		245	111	500	—
σ_{33}^T		67	67	67	文献より仮定 ^⑨
τ_{12}^U		300	167	700	—
τ_{23}^U		32	32	32	文献より仮定 ^⑨
τ_{31}^U		32	32	32	文献より仮定 ^⑨

(2) 材料特性

a) 載荷点と支点

載荷点と支点には幅 100mm, 厚さ 120mm の鋼板を配置し, 幅 100mm, 厚さ 60mm の石膏の層を介して, CFRP 桁もしくは RC 床版と剛結とした. 鋼板は弾性係数 210GPa, ポアソン比 0.3 の弾性体, 石膏は弾性係数 5GPa, ポアソン比 0.24 の弾性体とした.

b) CFRP

CFRP は直交異方性とし, 材料特性は表-2 に示す値を用いた. 添え字 1, 2, 3, T, U はそれぞれ桁軸方向, 桁周方向, 積層方向, 引張強度, せん断強度を示す. CFRP の隅角部は, ウェブもしくはフランジとして明確に区別できないが, 実験において隅角部の損傷は確認されなかったため, 上フランジおよび下フランジそれぞれの材料特性を用いた.

3 次元の直交異方性要素には 9 つの独立な弾性定数が必要である. 式(1)にひずみ-応力関係を示す. 添え字の 1, 2, 3 はそれぞれ桁軸方向, 桁周方向, 積層方向を示す.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに, E_1 : 桁軸方向弾性係数, E_2 : 桁周方向弾性係数, E_3 : 積層方向弾性係数, G_{12} : 面内せん断弾性係数, G_{23} , G_{31} : 面外せん断弾性係数, ν_{12} , ν_{21} , ν_{13} , ν_{31} , ν_{23} , ν_{32} : ポアソン比, である.

また, 直交異方性要素のポアソン比は, 等方性の場合と異なり, 方向に注意しなければならない. 添え字の 1 文字目は応力の方向, 2 文字目はひずみの方向を示す. また一般に $\nu_{12} = \nu_{21}$ ではなく, 応力構成則の対称性を示す式(2)が成り立つ. よってポアソン比は, それぞれが独立ではなく式(2)により 3 つが独立な定数ということになる.

$$\frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1} \quad (2)$$

本研究での解析対象の CFRP 桁では, 材料試験により, 面内に関する 4 つの工学的弾性定数 (E_1 , E_2 , G_{12} , および ν_{12}), および面外に関する 2 つの工学的弾性定数 (E_3 および ν_{23}) は既に得られている. 残りの面外に関する

工学的弾性定数 (G_{23} , G_{31} , および ν_{13}) は, 文献 12) に示されている値や既往の供試体の材料試験値を仮定する必要がある. ここで, 積層板の面外方向のポアソン比 ν_{13} に関しては, 対称積層の積層板であれば, 単層板の面外方向ポアソン比 ν_{xz} を用いて, それらを算定できることが文献 12) に示されている. 本研究で用いている CFRP 積層板も対称積層の積層板であるため, 上述の算定が可能である.

そこで, CFRP 桁を 3 次元の直交異方性の固体要素でモデル化するために, ν_{13} を算定した. ただし, 単層板の面外方向に関する材料試験は行っておらず, 単層板の面外方向ポアソン比 ν_{xz} は文献 12) に示されている値を仮定するため, ν_{13} は推定値となる.

c) 補剛材

一般的な鋼桁の支点部には座屈を防ぐために補剛材を設置するのと同様に, 載荷実験においても支点部分で CFRP 桁の座屈を防ぐため, CFRP からなる補剛材を設置している. 実験で用いられている補剛材の断面寸法は, 厚さ 4mm, 高さ 75mm であるが, 解析では要素分割の都合上, 厚さ 50mm, 高さ 75mm の補剛材としている. 補剛材の材料特性は表-2 に示した下フランジの値を用いており, 厚さを変更した分, 軸剛性が等価となるようにしている.

d) RC 床版

RC 床版の鉄筋の材料特性は鋼板と同じ値を用いた. コンクリートにおいては, 弾性係数 28GPa, ポアソン比 0.2 の弾性体とした.

(3) CFRPの材料座標

CFRP 桁のウェブおよびフランジには直交異方性要素を用いているが, CFRP 桁のウェブは図-3 に示した全体座標と材料座標が一致しなくなってしまう. そこで, CFRP 桁のウェブの材料座標はオリエンテーション機能^{13), 14)}を用いて定義した. これは材料の第 1 軸 (積層板の長さ方向) と第 2 軸 (長さ方向と垂直な方向) をベクトルで指定するものであり, 残りの第 3 軸の方向はこれらの外積で定まる.

(4) 破壊指標値の算定

CFRP 桁の損傷を検討する際に用いる CFRP の破壊指標値の算定方法を示す. 本研究では, 正曲げが最大となるスパン中央部の断面の破壊指標値を算定し, CFRP 桁の損傷を検討する. CFRP 桁において卓越応力と考えられる σ_1 , τ_{12} に着目し, 式(3), (4)から破壊指標値を算定し, また同時に, 引張応力とせん断応力の相互作用を考慮するため, 式(5)に示す Hill 則を用いて破壊指標値を算定した.

$$f_{\sigma_1} = \sigma_1 / \sigma_1^T \quad (3)$$

$$f_{\tau_{12}} = |\tau_{12} / \tau_{12}^U| \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\sigma_1^2}{(\sigma_1^T)^2} + \frac{\sigma_2^2}{(\sigma_2^T)^2} + \frac{\sigma_3^2}{(\sigma_3^T)^2} - \left(\frac{1}{(\sigma_1^T)^2} + \frac{1}{(\sigma_2^T)^2} - \frac{1}{(\sigma_3^T)^2} \right) \sigma_1 \sigma_2 \\ & - \left(\frac{1}{(\sigma_1^T)^2} + \frac{1}{(\sigma_3^T)^2} - \frac{1}{(\sigma_2^T)^2} \right) \sigma_1 \sigma_3 - \left(\frac{1}{(\sigma_2^T)^2} + \frac{1}{(\sigma_3^T)^2} - \frac{1}{(\sigma_1^T)^2} \right) \sigma_2 \sigma_3 \\ & + \frac{\tau_{12}^2}{(\tau_{12}^U)^2} + \frac{\tau_{31}^2}{(\tau_{31}^U)^2} + \frac{\tau_{23}^2}{(\tau_{23}^U)^2} = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

Hill 則の適用条件は、次の 2 点が挙げられる。(a) 直交異方性材料にのみ適用可能である。(b) 引張時と圧縮時の挙動が同じである。(b) において、Hill 則では圧縮側と引張側で強度が異なる複合材料で本質的に矛盾が生じてしまうが、Hill 則を用いた理由は次の 2 点である。1) 本研究の解析対象である CFRP 桁の圧縮強度が不明であり圧縮強度を仮定するのは適切ではない。2) 試験体の中立軸は RC 床版内部にあり、CFRP 桁は引張応力作用下にある。

Hill 則では上述の理由のため、圧縮側は危険側と考えられる。そこで、本研究では正曲げ側での σ_{11} , τ_{12} の相互作用に着目する。着目点の位置を図-4 に示す。図-4 において、隅角部を除いたウェブとフランジの破壊指標値に着目する。

4. 実験結果と解析結果の比較

文献5)-7)の載荷実験では TEST-T02, TEST-T03, TEST-T05 と行われており、それぞれ最大荷重が 862kN, 1,042kN, 1,334kN に達するまで載荷している。本研究では、TEST-T03 の実験結果と解析結果の比較を行う。

(1) 荷重－変位, 荷重－ひずみ, 曲げモーメント－曲率関係の比較

図-5, 6, 7 にスパン中央部下フランジ縁 (図-1 参照) における荷重－変位, 荷重－ひずみ, 曲げモーメント－曲率関係を示す。

荷重－変位関係から、荷重が最大となる 1,042kN において、実験値の変位が 23.1mm であるのに対して解析値では 23.8mm となり実験の変形を精度良く再現できているといえる。また、荷重－変位関係において実験値では僅かに非線形になっていることがわかる。これは、後述する図-8 に示す曲げモーメント図からわかるように、支点 B (主軸方向 10,000mm) において、負曲げが作用しており、コンクリートの引張強度を超える引張応力が

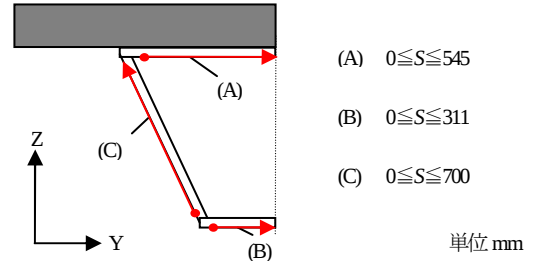


図-4 着目点の位置

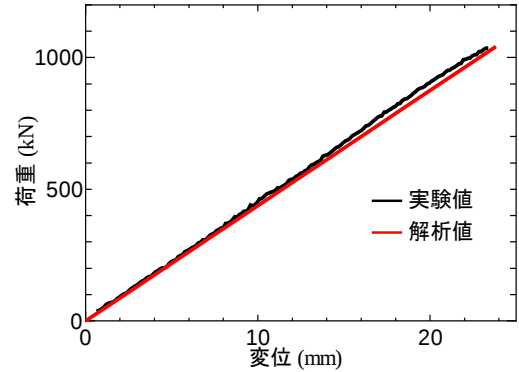


図-5 荷重－変位関係

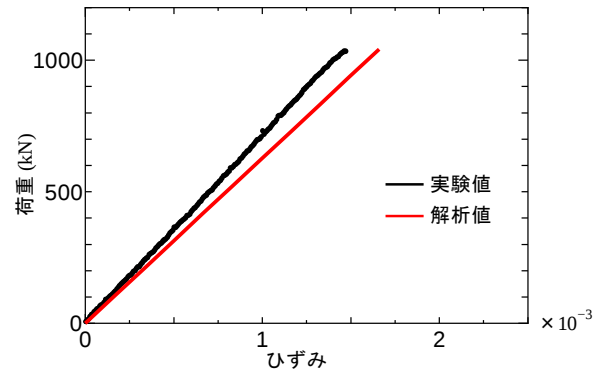


図-6 荷重－ひずみ関係

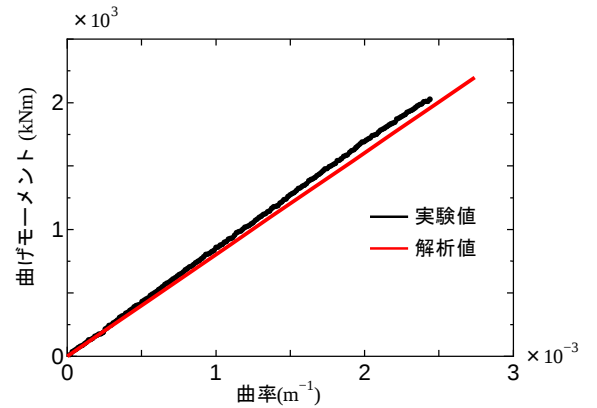


図-7 曲げモーメント－曲率関係

作用し、RC 床版にひび割れが生じたため、実験値では僅かに非線形になっていると考えられる。

荷重－ひずみ関係においては、実荷重最大時に実験値と解析値でひずみに約 100μ 程度の誤差が生じている。曲げモーメント－曲率関係においては、剛性は再現できているものの、実験値より解析値の曲げモーメントの値が大きくなっている。

(2) 支点反力の比較

表-4 に実験と解析の支点反力、最大および最小曲げモーメントを示す。表-4 からわかるように支点反力において、支点 A では実験値と解析値で約 10%の差異に収まっているが、支点 B では実験値と解析値で約 25%の差異が生じている。この原因として、実験では荷重を載荷する際に、アクチュエーターが試験体に対して垂直に作用せず、不均等に荷重が作用したため、試験体にねじれが生じていることが確認されている。そのため、実験値と解析値で支点反力の割合が変化したと考えられる。

次に図-8 の曲げモーメント図において、実験値と解析値の支点反力の差異により、主軸に沿った曲げモーメントの値に違いが見られるが、分布形状は概ね再現できているといえる。また、この支点反力の違いが、前項で示した曲げモーメント－曲率関係において、実験値と解析値で差異が生じた原因として考えられる。

(3) CFRPの損傷の検証

図-9、10 にスパン中央部（図-4 参照）における破壊指標値を示す。図-9 は CFRP 桁の卓越応力と考えられる引張応力 σ_{11} 、せん断応力 τ_{12} に着目しており、図-10 は Hill 則を用いて引張応力とせん断応力の相互作用を考慮している。

図-9 からわかるように、破壊指標値の最大値は下フランジの 0.17 であり、CFRP 桁の損傷は見られないことがわかる。また、上フランジ、下フランジでは式(3)、(4)から算定される σ_{11} 、 τ_{12} を比較すると、 σ_{11} の破壊指標値が大きく、 σ_{11} が支配的な応力と考えられる。ウェブにおいては σ_{11} 、 τ_{12} の破壊指標値は同じ程度であり、 σ_{11} 、 τ_{12} の両者が支配的な応力と考えられる。

次に図-10 において、Hill 則を用いて引張応力とせん断応力の相互作用を考慮した場合、破壊指標値の最大値は下フランジでの 0.11 となっており、破壊規準に達していないことが確認された。

また、最大荷重作用時の CFRP 桁の卓越応力と考えら

れる σ_{11} 、 τ_{12} の等高線を図-11 に示す。図-11 は実験において正曲げが最大となる、スパン中央部の CFRP 桁の断面での σ_{11} 、 τ_{12} を示している。図-11 からわかるように、上フランジ、ウェブと比較して下フランジの σ_{11} が大きくなっており、また、ウェブ、下フランジと比較して上フランジの τ_{12} が大きいことがわかる。

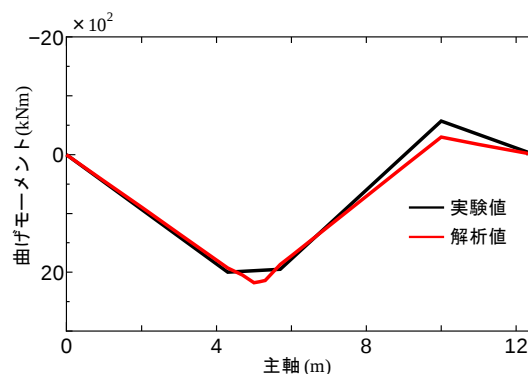


図-8 曲げモーメント図

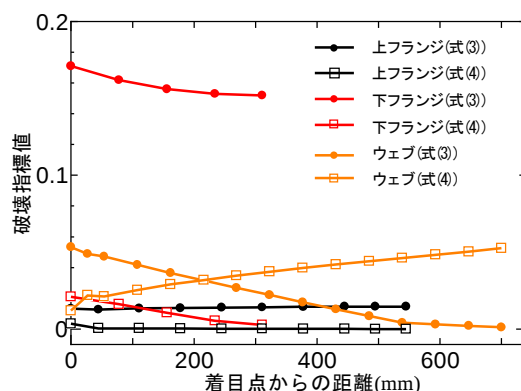


図-9 破壊指標値 (σ_{11} , τ_{12})

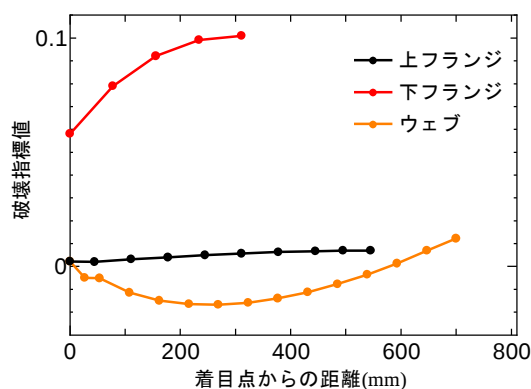


図-10 破壊指標値 (Hill則)

表-4 支点反力、最大および最小曲げモーメント

	$P_{\max}$ (kN)	R_A (kN)	R_B (kN)	R_C (kN)	$M_{\max}$ (kNm)	$M_{\min}$ (kNm)
実験値	1042(100%)	480(46%)	806(77%)	-245(24%)	2000	-570
解析値	1042(100%)	410(39%)	1072(103%)	-442(42%)	2150	-300

一方、最大荷重作用時の Hill 則の破壊指標値等高線を図-12 に示す。図-12 では、実験において正曲げが最大となる、スパン中央部の CFRP 桁の断面での破壊指標値を示している（凡例の 1.0 が降伏規準を満たしたことを示す）。図-12 からわかるように、上フランジとウェブは下フランジに比べて破壊指標値が低いことがわかる。

5. まとめ

本研究ではスペインで建設された台形断面 CFRP 桁の曲げ載荷実験を対象に、既往の研究で提案された解析モデルを用いて有限要素解析を行い、実験結果と比較することで、実大 CFRP 桁の曲げ挙動を把握した。以下にまとめを示す。

CFRP 桁のモデル化において、既往の研究で提案された解析モデルを用いることで実大 CFRP 桁の曲げ挙動を再現できていることを確認した。

実験では試験体に不均等荷重が作用したことにより、実験結果と解析結果で支点反力、曲げモーメントの値に差異が生じたが、主軸に沿った荷重分布形状を再現できていることを確認した。

曲げモーメントが最大となるスパン中央部において、卓越応力である σ_{11} 、 τ_{12} に着目した場合、上フランジおよび下フランジでは σ_{11} が、ウェブでは σ_{11} および τ_{12} が支配的な応力であることを確認した。また、引張応力とせん断応力の相互作用を考慮した Hill 則を用いることで、正曲げ位置の損傷を確認し、CFRP 桁の破壊は進行していないことを確認した。

参考文献

- 1) 強化プラスチック協会：FRP 構造設計便覧，1994.
- 2) 宮入裕夫：サンドイッチ構造の基礎，日刊工業新聞社，1999.
- 3) 土木学会：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー88 号，1996.
- 4) S. S. J. Moy: FRP composites: life extension and strengthening of metallic structures: ICE Design and Practice Guide, Thomas Telford Publishing, 2001.
- 5) E. Gutiérrez and S. Primi: Experimental analysis of the shear transfer mechanism in a composite bridge beam manufactured from advanced polymer composites, Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2005.
- 6) E. Gutiérrez, S. Primi, J. M. Mieres, and I. Calvo: Structural testing of a vehicular carbon fiber bridge: quasi-static and short-term behavior, Journal

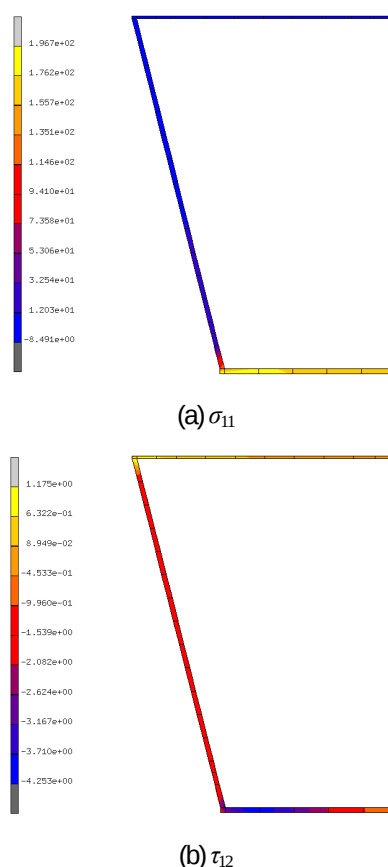


図-11 着目断面における σ_{11} 、 τ_{12} の等高線図

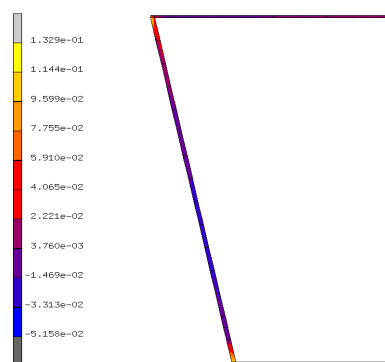


図-12 破壊指標値等高線（Hill則）

of Bridge Engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 271-281, 2008.

- 7) J. M. Mieres, I. Calvo, A. Miravete, E. Gutiérrez, E. Shahidi, C. López, J. Cuartero, P. Comino, and R. Guzmán de Villoria: Description of a traffic bridge of the Cantabrian speedway made of composite materials, Materiales de Construcción, Vol. 56, No. 284, pp. 81-86, 2006.
- 8) 櫻庭浩樹他：曲げと軸力作用下におけるコンクリート充填箱形断面 CFRP 梁の変形および耐荷特性の解析的検討，構造工学論文集，Vol. 56A, pp. 979-990, 2010.
- 9) 櫻庭浩樹，松本高志，林川俊郎：積層構成が異なる箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動に関する研究，土木学会論文集 A1, Vol. 68, No. 1, pp. 73-87, 2012.

- 10) 櫻庭浩樹, 松本高志, 堀本歴, 林川俊郎 : VaRTM 成形による箱形断面 CFRP 梁の曲げ挙動に及ぼす積層構成の影響, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.946-958, 2012.
- 11) Y. Kitane, A. J. Aref, and G. C. Lee: Static and fatigue testing of hybrid fiber-reinforced polymer-concrete bridge superstructure, Journal of Composites for Construction, Vol. 8, No. 2, pp. 182-190, 2004.
- 12) M. W. Hyer: Stress analysis of fiber-reinforced composite materials, pp. 58, 502-511, WCB/McGraw-Hill, 1997.
- 13) MSC Software : Marc 入門トレーニングコースノート, pp. 177-180, 2007.
- 14) MSC Software : MSC.Marc A 編 理論およびユーザー情報, pp. 309-314, 2007.

FINITE ELEMENT ANALYSIS ON THE FLEXURAL BEHAVIORS OF A TRAPEZOIDAL SECTION CFRP GIRDER

Takashi MATSUMOTO, Akihito SHIRAKI, Toshiro HAYASHIKAWA,
and Xingwen HE

Finite element analysis of a trapezoidal section CFRP girder is conducted, and it is compared with a real scale experiment reported in the literature. Finite element model based on the past studies is analyzed in order to understand the flexural behaviors of the real scale CFRP girder. As a result, the analysis with the detailed material properties shows a good agreement with the experiment. Distribution of dominant stresses, σ_{11} and τ_{12} , is obtained, and Hill failure criterion is calculated. It is shown that neither strength criterion nor Hill criterion meets a failure state.