

有限要素解析による台形断面 CFRP 桁の曲げ挙動の把握

Finite element analysis on bending behavior of a trapezoidal section CFRP beam

北海道大学大学院工学院 学生員 ○白木 聡仁 (Akihito Shiraki)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)
北海道大学大学院工学研究院 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究院 正会員 何 興文 (Xingwen He)

1. はじめに

炭素繊維強化ポリマー (Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP) は、軽量かつ高強度な新素材で耐腐食性に富み、宇宙・航空産業を中心として開発が進められてきたが、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いる^{1),2)}。このような状況下、建築物・橋梁などの構造物においては、損傷・劣化部位に対する補修・補強材としての活用にとどまっている^{3),4)}。しかし、建設材料として CFRP 材を活用することで、建設工事における施工の合理化・省略化が可能であり、また供用時のメンテナンスフリーも期待できる。

こうした土木構造物などの大型構造物へ CFRP を活用するには、CFRP の変形・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⁵⁾ではコンクリート充填箱形断面 CFRP 梁の曲げ荷重実験を行い、この実験結果に対して有限要素解析で CFRP 梁の変形と破壊に対して卓越した応力を把握することで、CFRP 梁の解析モデルを提案している。

本研究ではスペインで建設された橋梁の CFRP 桁の曲げ荷重実験⁶⁾⁻⁸⁾を対象に、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。

2. 荷重実験の概要

2.1 解析対象

本研究では、スペインのカンタブリコ自動車道のタモン・オトゥル間に建設された CFRP 橋梁に用いられている CFRP-RC 桁を解析対象とする。

CFRP-RC 桁の側面図および断面図を図-1 に示す。CFRP 材は、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・ねじり変形に対する配慮が必要で、箱桁断面を桁構造に採用するのが望ましいと言われている。そのため CFRP 桁の断面は高比強度・高比剛性に優れる台形箱形断面⁹⁾を有しており、CFRP 桁の上部に RC 床版が設置されている。また、CFRP 桁の内部には中詰め材として、コンクリートと比較して軽いポリウレタンが充填されている。

2.2 CFRP 桁の積層構成と RC 床版

CFRP 桁は、炭素繊維にエポキシ樹脂を含浸させたシート状のもの(単層板)を重ねて作成される。まず、桁形状の核となる発泡性のポリウレタンに、炭素繊維を巻きつけ、その後、熱硬化処理を施すことで母材であるエ

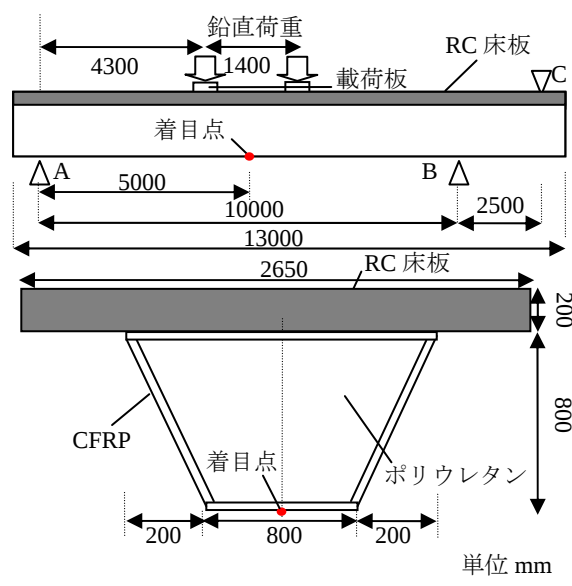


図-1 CFRP の側面図 (上) および断面図 (下)

表-1 CFRP 桁の断面寸法

試験体寸法	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

ポキシ樹脂が硬化し、各層は接着される。

CFRP 桁は、配向角 0° (桁軸方向)、配向角 90° (桁周方向) および配向角 ±45° 方向の繊維比率を変化させ、構成されている。CFRP 桁の積層構成は上フランジでは [0/±45/0]₂、下フランジでは [0_s/±45/0]₂、また、ウェブでは [±45]₇ 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° 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° 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 桁内部の中詰め材である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° 層が 0.59mm、±45° 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 床版に関しては、図-2 に示すように軸方向鉄筋およびせん断補強筋が配置されており、コンクリートの圧縮強度は 37MPa、引張強度は 2.55 MPa である。

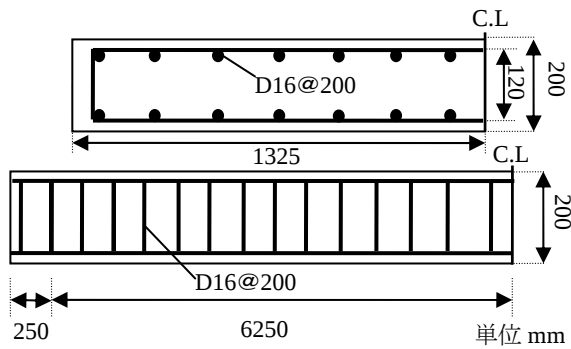


図-2 鉄筋の配置（断面図（上）および側面図（下））

2.3 荷重方法

荷重荷重方法は図-1 に示すように、スパン中央部において、4つのピストンによる変位制御により荷重されている。ピストンはそれぞれ1MNを荷重することができ、最大4MNまで荷重できる。

3. CFRP 桁の有限要素解析

本章では、曲げ作用下の台形断面 CFRP 桁の有限要素解析を行い、桁の変形性状および荷重分布を確認する。

本研究では CFRP 桁の基本的な変形性状の把握を目的とするため、線形解析を行い実験結果と比較する。なお解析コードには MSC.Marc を使用した。

3.1 境界条件

図-3 に CFRP 桁の解析モデルを示す。解析では、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。解析モデルの要素は RC 床版の鉄筋要素を2節点の梁要素、それ以外を8節点ソリッド要素とし、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。解析の支点は、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定義している。

3.2 材料特性

(1) 荷重点と支点

荷重点と支点には幅100mm、厚さ120mmの鋼板を配

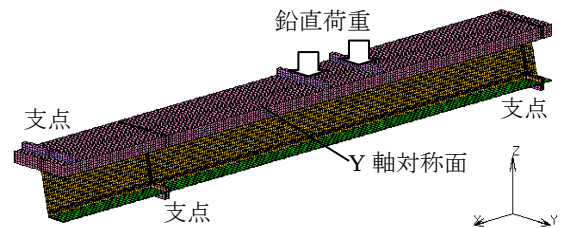


図-3 有限要素モデル

置し、CFRP 桁および RC 床版と鋼板は剛結とした。鋼板は弾性係数210GPa、ポアソン比0.3の弾性体とした。

(2) 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) 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の弾性体として定義した。

3.3 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。しかし、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¹⁾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。

3.4 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

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 ⁵⁾
G_{31}		3200	3200	3200	文献より仮定 ⁵⁾
ν_{12}	—	0.63	0.5	0.77	—
ν_{23}		0.16	0.06	0.77	—
ν_{31}		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 ⁵⁾
τ_{12}^U		300	167	700	—
τ_{23}^U		32	32	32	文献より仮定 ⁵⁾
τ_{31}^U		32	32	32	文献より仮定 ⁵⁾

るスパン中央部（ $x=5250\text{mm}$ ）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_{11} , τ_{12} に着目し、式(1), (2)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(3)に示す Hill 則¹⁾を用いて破壊指標値を算定した。

$$f_{\sigma_{11}} = \sigma_{11} / \sigma_{11}^T \quad (1)$$

$$f_{\tau_{12}} = |\tau_{12} / \tau_{12}^U| \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_1^2}{(\sigma_1^T)^2} + \frac{\sigma_2^2}{(\sigma_2^T)^2} + \frac{\sigma_3^2}{(\sigma_3^T)^2} - \left(\frac{1}{(\sigma_1^T)^2} + \frac{1}{(\sigma_2^T)^2} + \frac{1}{(\sigma_3^T)^2} \right) \sigma_1 \sigma_2 \left(\frac{1}{(\sigma_1^T)^2} + \frac{1}{(\sigma_3^T)^2} + \frac{1}{(\sigma_2^T)^2} \right) \sigma_1 \sigma_3 - \left(\frac{1}{(\sigma_2^T)^2} + \frac{1}{(\sigma_3^T)^2} + \frac{1}{(\sigma_1^T)^2} \right) \sigma_2 \sigma_3 + \frac{\tau_{12}^2}{(\tau_{12}^U)^2} + \frac{\tau_{31}^2}{(\tau_{31}^U)^2} + \frac{\tau_{23}^2}{(\tau_{23}^U)^2} = 1 \quad (3)$$

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

載荷実験は TEST-T02, TEST-T03, TEST-T05 と行われており、それぞれ最大荷重が 862kN, 1042kN, 1334kN 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。

4.1 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 (a), (b), (c) 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1042kN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

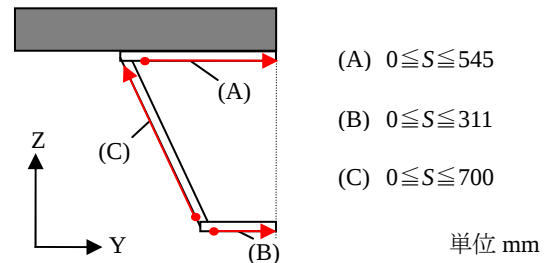


図-4 着目点の位置

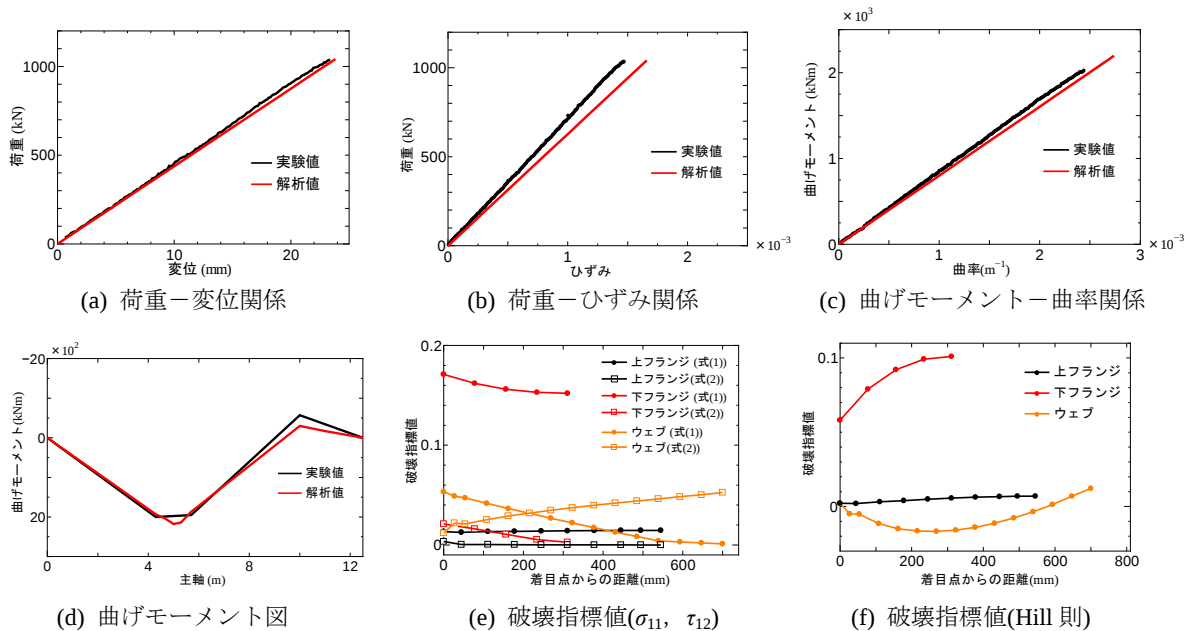


図-5 解析結果

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

に非線形になっていることがわかる。これは、図-5(d)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10000mm）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。

次に荷重-ひずみ関係において、実荷重最大時に実験値と解析値で誤差が生じているが、約100 μ 程度であり、実験結果を再現できているといえ、曲げモーメント-曲率関係においても、実験値より解析値の値が大きくなっているが、荷重-変位関係と同様に実験結果の変形を再現できているといえる。

4.2 支点反力の比較

表-4 に実験結果と解析結果の支点反力、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、ピストン力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-5(d)のスパン中央部における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。

4.3 CFRP の損傷の検証

図-5(e), (f)にスパン中央部の下フランジ縁（図-1 参照）における破壊指標値を示す。図-5(e)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-5(f)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-5(e)からわかるように、破壊指標値の最大値は下フランジの0.18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(1)、(2)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-5(f)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、CFRP 桁の損傷は見られないことが確認された。

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。

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 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，1994.9.
- 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，丸善，1996.9.
- 4) ICE Design and Practice Guide: FRP Composites Life Extension and Strengthening of Metallic Structures, Thomas Telford Publishing, 2001.
- 5) 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.
- 6) E.Gutierrez 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.
- 7) E.Gutierrez and S.Primi: Structural Testing of a Vehicular Carbon Fiber Bridge: Quasi-Static and Short-Term Behavior, Journal of Bridge Engineering, Vol.13, No.3, pp.271-281, 2008.
- 8) J.M.Mieres and I.Calvo: Description of a Traffic Bridge of the Cantabrian Speedway made of Composite Materials, Materials of Construction, pp.81-86, 2006.
- 9) Y.Kitane: Static and Fatigue Testing of Hybrid Fiber Reinforced Polymer-Concrete Bridge Superstructure, Journal of Composites for Construction, Vol.8, No2, pp.182-190, 2004.
- 10) MSC Software: Marc 入門トレーニングコースノート，pp.177-180，pp.205-248，2007.
- 11) MSC Software: MSC. Marc A 編 理論およびユーザー情報，pp.309-314，2007.