

(59) ハイブリッドI型FRP構造部材の曲げ性状に関する実験的、解析的検討

浅本 晋吾¹・睦好 宏史²・鈴川 研二³

¹正会員 埼玉大学大学院助教 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
E-mail:asamoto@mail.saitama-u.ac.jp

²フェロー会員 埼玉大学大学院教授 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
E-mail: mutuyosi@mail.saitama-u.ac.jp

³正会員 東レ株式会社

本研究は、鋼材に代わる新たな建設材料としてFRP材料に着目し、炭素繊維とガラス繊維を組み合わせたハイブリッドI型構造部材の開発を目的とした。フランジ部分には炭素繊維を加え、ウェブ部分にはガラス繊維のみを用い、力学的、経済的に最適な炭素、ガラス繊維の組み合わせを検討した。異なるフランジ積層構成、フランジ幅を持つI桁試験体で4点曲げ載荷実験を行った結果、いずれの試験体も圧縮フランジで破壊した。フランジ幅が小さい場合は層間剥離、幅の大きな試験体は局部座屈で破壊し、終局荷重は炭素繊維の混入量より破壊モードに依存することが分かった。さらに、FEM解析を行い実験との比較検討を行った結果、局部座屈破壊は概ね予測が可能であるが、層間剥離等の圧縮破壊モードの予測は難しく、今後より詳細な検討が必要であることがわかった。

Key Words : GFRP, CFRP, hybrid, I-shaped beam, buckling, delamination

1. はじめに

我が国の社会基盤施設は今後老朽化が進んでいくと推察され、近い将来、維持・管理を含めたインフラ設備の再構築が必要となる。これらの再構築や再生に際しては、社会・経済活動を極力妨げないように短工期、低コスト（ライフサイクルコスト（LCC））と環境負荷低減技術（LCCO₂）が求められている。これらの社会的要請に応えるべく、著者らは繊維複合材料であるFRP（Fiber Reinforced Plastics）に着目した。我が国の炭素繊維生産量は世界の75%を占めており、FRP材料は航空・宇宙、自動車分野等において様々な形で構造部材としての開発が進んでおり、これらが実用化されている。建設分野で言えば、国内では主に耐震補強に用いられている程度で、構造部材としての利用は極めて少ないのが現状である。一方で、欧米ではFRP構造部材の研究開発が活発に行われており^{1,2)}、近年韓国³⁾などアジア諸国でもFRP構造部材の開発に着手している。近い将来、この分野における熾烈な国際競争が予想され、我が国においても早急に本研究に着手する必要があると認識している。

炭素、ガラス繊維から成るFRP部材は、軽量、高強度、錆びない等の長所を有し、さらに繊維の種類を適切に組

み合わせることで、構造部材に要求される力学的性能を付与できるなどの大きなメリットがある。以上の背景のもと、著者らは炭素繊維とガラス繊維から成るハイブリッド構造材料を開発し、LCCとLCCO₂をも考慮することで、社会基盤施設の再構築を目指す研究プロジェクトを立ち上げた。本稿では、本プロジェクトの一部であるハイブリッドI型FRP構造部材の4点曲げ載荷実験結果とFEMを用いた解析的な検討について報告する。

2. ハイブリッドI型FRP構造部材の4点曲げ載荷実験

(1) 試験体

歩道橋やペデストリアンデッキにおける鋼材桁に代わる構造部材としての適用を見据え、まずはI型のFRP構造部材の開発に取り組んだ。大きな引張力や圧縮力がかかるフランジ部に力学特性に優れる炭素繊維（以下、CFRP）を、上下フランジに応力を伝達させるウェブ部に経済性に優れるガラス繊維（以下、GFRP）を用いることで、ハイブリッドFRPのI桁構造部材の開発を行った。フランジ部分のCFRPの積層構成比率が異なる3種類のI桁試験体を開発、RTM工法で製作し、強度、桁剛性と

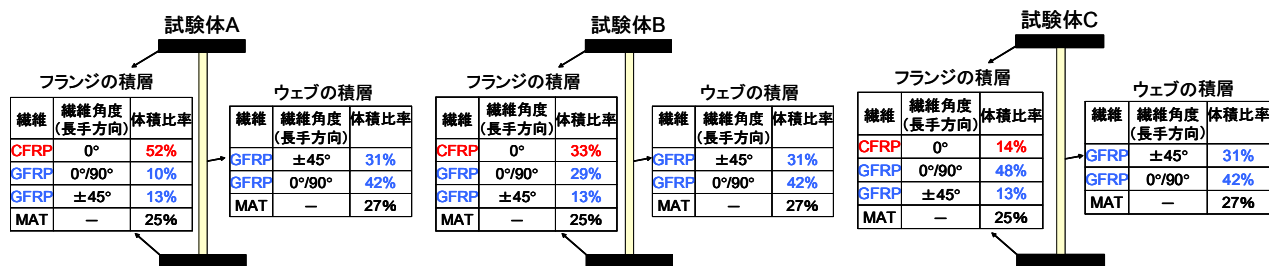


図-1 各試験体の積層構成

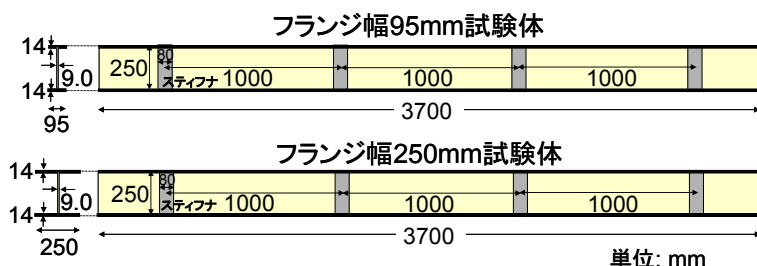


図-2 試験体寸法

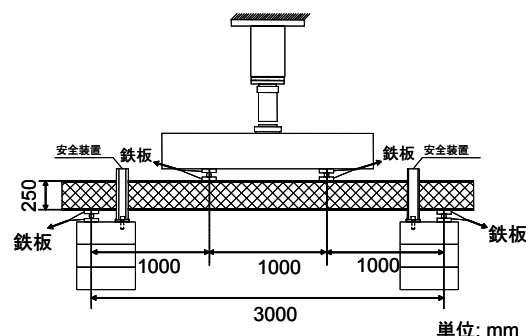


図-3 荷重実験条件

いった力学的性能、およびコストの両面で最適なGFRPとの組み合わせについて検討した。検討した各試験体の積層構成は図-1に示すとおりである。フランジ部には、CFRPとGFRPを組み合わせ長手方向に角度0度で配向し、異方性を低減させるため±45度に配向したGFRPも13%積層している。比較的作用応力が小さいウェブ部分については、GFRPのみを用いた。剛性が高く高価なCFRPの構成比率が高くなるにつれて、経済面では不利になるが、桁剛性は大きくなると予想される。また、引張強度の高いCFRPを多く配向することで、曲げ耐力の向上も期待される。強度、剛性、コストの三点から最適な積層を考える。

試験体の寸法を図-2に示す。フランジ幅250mm、高さ250mmは、鋼材1桁と比較できるように、歩道橋などで一般に使われている寸法に合わせた。フランジ幅250mmの桁は座屈が予想されたことから、座屈の影響を排除しFRPの材料特性を生かすため、フランジ幅を小さくした試験体も比較検討用に作製した。荷重点、支点部分には横倒れ座屈を防止するため、鉄製ボックスをスティフナとして挿入した。

(2) 試験概要

荷重実験の条件を図-3に示す。4点曲げ荷重実験を行い、荷重は油圧ジャッキで各ステップ約4kNずつ与えた。支点付近には、横倒れなど脆性破壊した際に安全を確保する鉄製の安全装置を配置した。ただし、本試験範囲において横倒れは発生せず、荷重中安全装置と試験体が接触することはなかった。

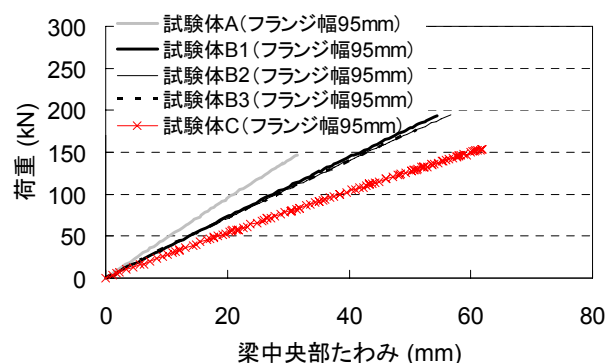


図-4 フランジ幅 95mm の試験体の荷重—たわみ関係

(3) 実験結果

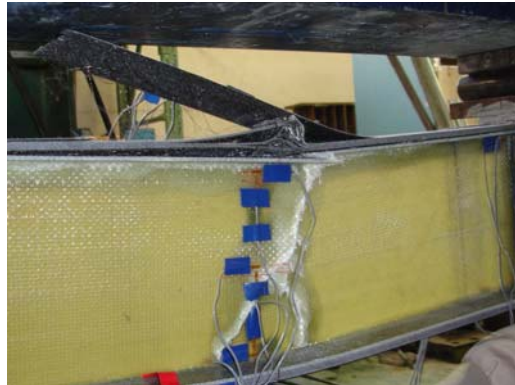
a) フランジ幅95mm試験体

まずフランジ幅の小さい試験体の荷重試験結果について述べる。荷重—たわみ関係を図-4に示す。なお、試験体Bについては、3体試験を行っている。図-4に示されるように、桁剛性、終局荷重ともに3体で相違は小さく、ハイブリッド試験体の作製精度は高いことが分かる。

剛性が高く、引張強度の高いCFRPの構成比率が高くなるほど、桁剛性は大きくなるが、終局耐力はCFRPの割合によらず、試験体Bが最も高くなった。いずれの試験体も、終局に至るまで荷重—たわみの関係はおおよそ線形関係にあり、上フランジで脆性的な圧縮破壊が起こった。各試験体の破壊状態について写真-1にまとめる。破壊はいずれも圧縮フランジで起こったものの、試験体の積層構成によって破壊の形式は異なっている。終局荷重は破壊形式に依存すると考えられ、以下、各試験体の破壊について詳細に議論する。



試験体 A 破壊状況



試験体 B 破壊状況



試験体 C 破壊状況

写真-1 各試験体の破壊状況

最も強度の高かった試験体Bは、写真-1に示すように圧縮フランジ中央部で界面剥離して破壊に至った。フランジ部分は写真-2に示すように、CFRPとGFRPから成る層と、ウェブから伸びるGFRPの層に大きく分けられ、剥離はこの層間で発生しているように見受けられた。CFRPが積層された硬い層とGFRPのみから成る柔らかい層の層間では圧縮応力が作用すると、その剛性の違いによって圧縮座屈を起こし、界面で剥離したのではないかと推察される。ただし、圧縮座屈、界面剥離のいずれが先行破壊であるのかについてはより詳細な検討が必要と考えられ、今後の検討課題とする。なお、3体の試験体Bはいずれも同様の破壊形態であった。

試験体Aでは、フランジ中央部ではなく荷重点の上フ

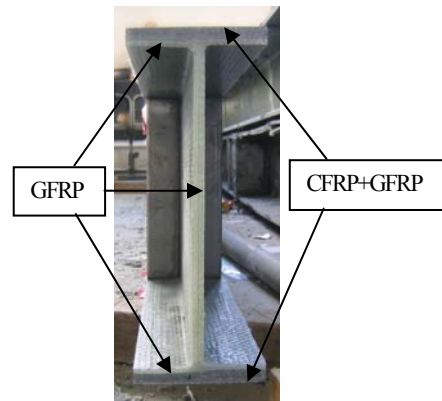


写真-2 積層構成

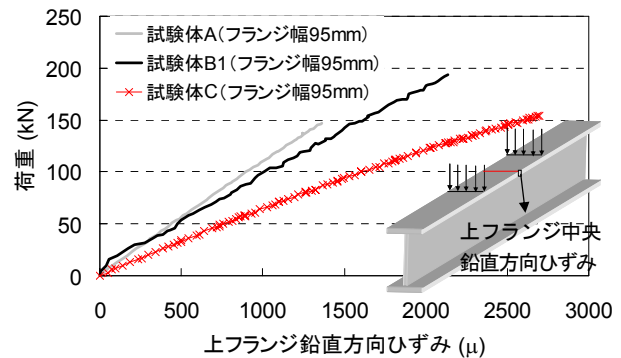


図-5 上フランジ中央部鉛直方向ひずみ

ランジで圧壊し破壊に至った。CFRPの構成比率が大きいためフランジの剛性が高くなり、鋼製の荷重板の剛性との相違が小さく、荷重点下で応力集中したと考えられる。なお、この圧壊でも界面の剥離が観察された。圧縮応力作用時には、剛性の異なる層間での剥離が起こりやすいと考えられる。

試験体Cでは、試験体Bと同様のフランジ中央の界面剥離、もしくはウェブ中央上部での局部座屈のいずれかで破壊した。脆性的な破壊であったため、どちらの破壊が先行したかは目視では確認できなかったが、ウェブの破壊が激しく、試験体Bとは若干異なっているように見受けられた。

試験体中央部の上フランジで側面鉛直方向のひずみを計測したところ、図-5のようになり、いずれの試験体もフランジ鉛直方向に引張の応力が作用し、界面を剥離させる方向に力が働いていることが分かる。異種材料のCFRPの構成率が低いほど界面剥離方向の最終ひずみは上昇するが、終局荷重の増加はない。圧縮応力下におけるCFRPとGFRPの最適な積層比率については、今後材料試験等を通じて詳細に検討する予定である。

図-6に荷重—上下フランジ長手方向のひずみの関係を示す。ひずみは弾性的な変化をしており、塑性変形はなく脆性破壊したと推察される。CFRPの最大引張ひずみは一般に約15000マイクロ以上の伸び能力を発揮する⁴⁾ことを勘案すると、FRPの特徴のひとつである高い引張強

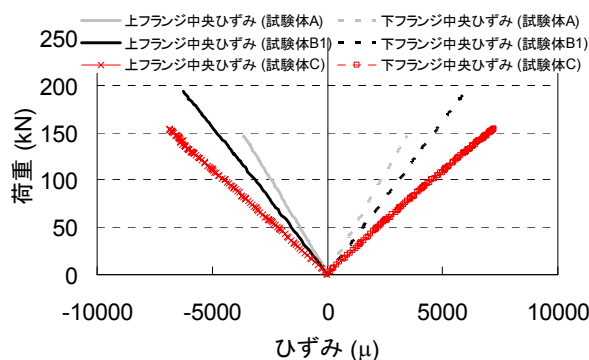


図-6 上下フランジ中央ひずみの変化



写真-3 試験体 A (250mm フランジ幅) の座屈変形

度を生かしきれずに圧縮脆性破壊したことが分かる。今後高い引張強度を有効利用できる構造形式についても検討を行う予定である。

b) フランジ幅250mm試験体

フランジ幅250mmの荷重－たわみ関係を図-7に示す。95mmのフランジ幅の実験結果と同様、CFRPの構成比率が多いほど、桁剛性は高くなっている。一方、終局耐力は積層構成にさほど依存しない。この理由としては、どちらの試験体も同じ破壊モード、つまり載荷スパン内における局部座屈で破壊したこと、荷重制御であるため載荷速度が速く、脆性的な破壊の進展に違いをもたらさなかったこと等が考えられる。いずれも200kN付近で載荷スパン内で座屈変形が観察され（写真-3）、240kN付近で脆性的な座屈破壊が起こった。試験体Bについては、座屈変形が生じた200kN付近で一度除荷したが、残留変位は少なかった。

荷重と上下フランジの長手方向のひずみの関係を図-8に示す。フランジ幅の小さい試験体に比べ、フランジ幅250mmの試験体は破壊時の圧縮・引張ひずみはともに小さく、材料の持つ圧縮・引張強度を十分に有効利用できていないことが分かる。従って、幅厚比の高い桁では、スティフナを適切に配置する必要があるといえる。

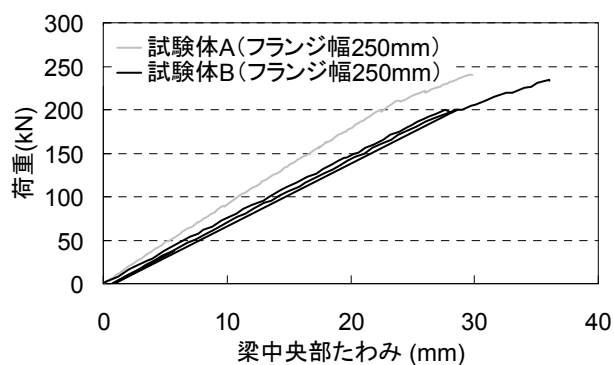


図-7 フランジ幅 250mm の試験体の荷重－たわみ関係

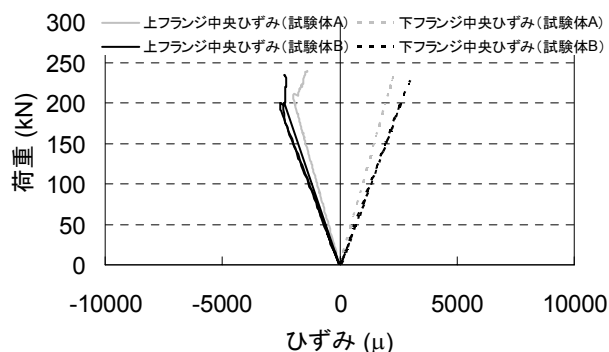
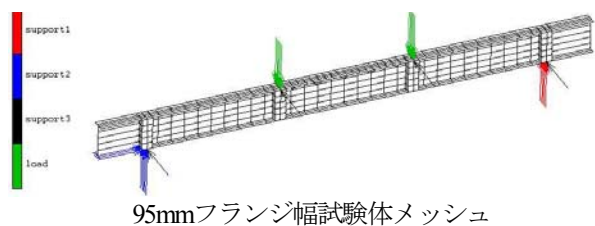
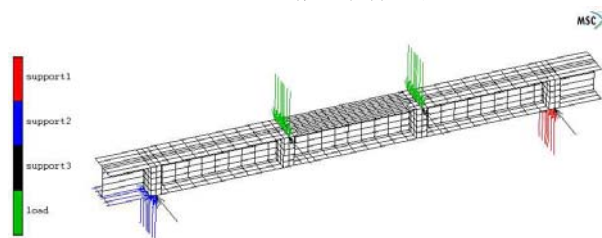


図-8 上下フランジ中央ひずみの変化



95mm フランジ幅試験体メッシュ



250mm フランジ幅試験体メッシュ

図-9 解析メッシュ

3. ハイブリッドI型FRP構造部材のFEM解析

(1) 解析条件

解析は汎用FEMプログラムであるMARCで行った。解析に用いたFEMメッシュを図-9に示す。要素はすべて4節点厚肉四辺形シェル要素を用いた。非線形の座屈が発生した上フランジ載荷スパン内のメッシュは収束性を考慮して細かく分割した。スティフナは実験と同様に厚さ1.6mmの鉄製ボックスをシェル要素でモデル化した。

CFRP, GFRPおよびMATを図-1の各試験体の積層構成に従い解析ファイルに入力した。各層の力学的特性を表-1に示す。繊維の弾性係数、引張強度については、技

表-1 各繊維の剛性および強度（単位：N/mm²）

	静弾性係数		ポアソン比		せん断弾性係数		
	E ₁₁	E ₂₂	ν ₁₂	ν ₂₁	G ₁₂	G ₂₃	G ₁₃
CFRP	113,000	7,400	0.32	ν ₁₂ *E ₂₂ /E ₁₁	3,200	3,200	3,500
GFRP	24,000	24,000	0.28	ν ₁₂ *E ₂₂ /E ₁₁	3,500	3,500	3,500

	引張強度		圧縮強度		せん断強度		
	f _{t1}	f _{t2}	f _{c1}	f _{c2}	γ ₁₂	γ ₂₃	γ ₁₃
CFRP	2,100	210	1470	147	67	67	67
GFRP	1,450	145	1015	102	70	70	70

*11:繊維方向, 22:繊維面内直交方向

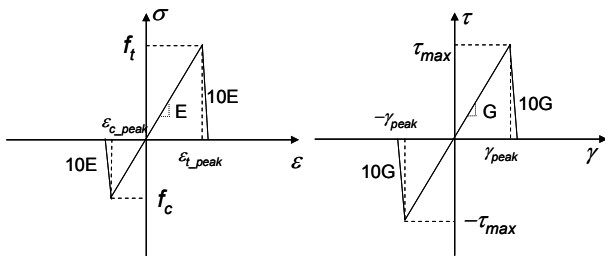


図-10 圧縮・引張，せん断応力-ひずみ構成則

術資料⁴⁾に基づいた。既往の報告書⁵⁾を参考に、圧縮強度については繊維引張強度の70%とし、繊維面内直交方向の強度についても単純に1/10と仮定した。せん断強度はせん断破壊が起こらない程度の値とした。応力-ひずみの関係については、図-10に示すように破壊するまで線形弾性変形すると仮定した。破壊後は、圧縮、引張、せん断いずれも速やかに軟化すると仮定した。強度、材料の構成則については詳細に検討し、上記仮定を検証する必要があると認識しているが、現状そこまで至っておらず今後の検討課題とする。また、荷重条件は、実験同様各ステップごとに4kNずつ与える荷重制御とした。

(2) 解析結果

図-11に解析結果を示す。95mm, 250mmのフランジ幅ともに桁剛性についてはいずれの積層構成においても精度よく再現できている。一方で、終局荷重は実験と解析で大きな乖離があり、特にフランジ幅95mmの試験体で相違が著しい。この理由として、破壊モードの違いが挙げられる。解析では、荷重スパンにおけるウェブの圧縮破壊によって破壊したのに対し、実験では繊維層間の界面剥離などFEMで考慮していない脆性的な破壊モードであるがゆえに、相違が生じたと考えられる。また、解析で入力した強度については実測値ではないため、材料実験から得られた結果を解析に反映させ、再度解析と比較検討する必要があると認識している。

フランジ幅250mmの試験体は解析も実験と同様荷重スパンで局部座屈した、図-12に破壊時の変形の様子を示す。座屈変形は試験体Aで270kN付近、試験体Bで240kN付近で荷重スパンに現れた。終局荷重は実験と解析で約100kNも異なるが、局所的な脆性破壊であるため破壊時

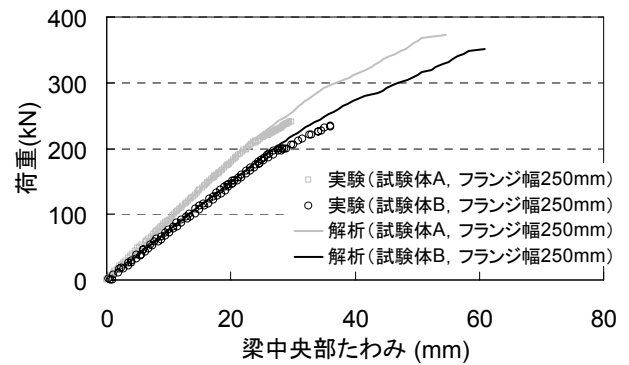
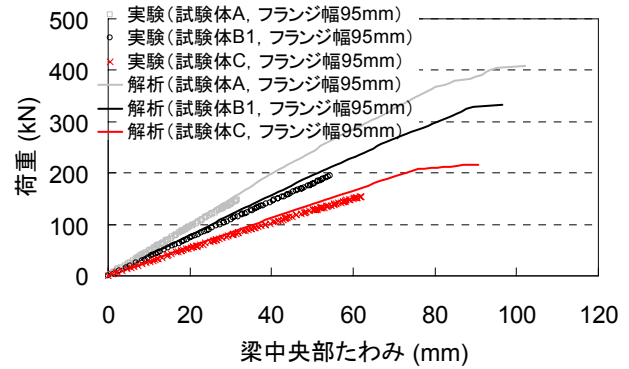


図-11 解析と実験の比較

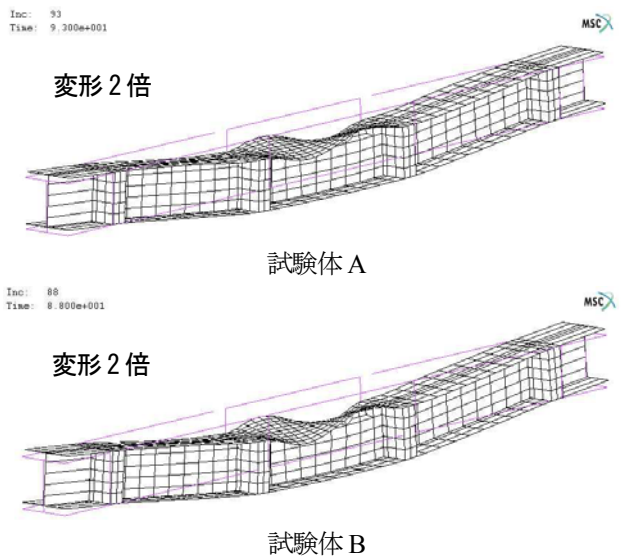


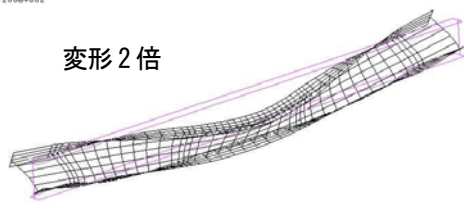
図-12 変位制御解析における破壊時の座屈変形

の荷重は荷重速度に依存すること、材料強度が実測値でないことなどから大きな相違が生じたと考えられる。一方で、座屈変形発生時の荷重は実験と解析で比較的乖離は小さく、荷重スパンで生じる座屈変形を概ね再現できていると考えられる。今後の材料強度、構成則を詳細な検討を通じて、解析の精度を高めていく予定である。

スティフナを荷重点、支点到に設置したが、荷重スパンで実験、解析ともに局部座屈した。荷重点、支点到にもスティフナを用いない場合、図-13に示すようにフランジ幅95, 250mmいずれの試験体も解析上横倒れ座屈で破壊した。従って、荷重点、支点到に設置したスティフナは横

Inc: 32
Time: 3.200e+002

変形 2 倍

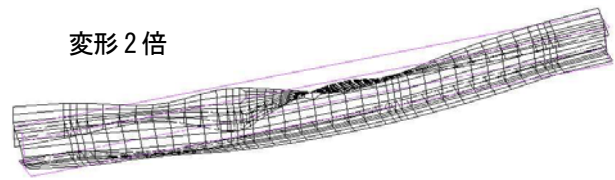


95mm フランジ幅試験体 B

MSC

Inc: 66
Time: 6.500e+001

変形 2 倍



250mm フランジ幅試験体 B

図-13 載荷点、支点にスティフナがない場合の破壊時の解析結果

倒れ破壊には効果があったことが分かる。

4. 結論

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- RTM工法によって、再現精度の高いGFRPとCFRPのハイブリッド桁構造体の開発に成功した。
- GFRP、CFRPハイブリッドI桁試験体で4点曲げ載荷実験を行った結果、いずれの試験体も圧縮フランジで破壊した。フランジ幅が小さい場合は層間剥離、幅の大きな試験体は局部座屈で破壊し、終局荷重は炭素繊維の混入量より破壊モードに依存することが分かった。
- FEM解析を行った結果、フランジ幅の大きい試験体の局部座屈破壊はシミュレート可能であるが、フランジ幅の小さい場合の界面剥離などの脆性破壊を解析するには、詳細な材料特性の把握が必要であることがわかった。

謝辞：本研究は国土交通省建設技術研究開発助成の補助を受け実施した。本研究プロジェクトの共同研究者各位からは貴重なご助言を頂いた。また、実験を行うにあたり、埼玉大学大学院生のNguyen Duc Hai氏、Allan Capilar Manalo氏、山本育実氏に協力頂いた。関係者の皆様に、ここで深謝の意を表す。

参考文献

- 1) Keller, T., Use of Fiber Reinforced Polymer in Bridge Construction, *International Association for Bridge and Structural Engineering*, Zurich, Switzerland, 2003.
- 2) A. Y. Ushakov, Y. G. Klenin, A. V. Pankov and S. N. Ozerov, Development of Calculation Resistance Definition Model for Bridge Designs Elements from Composite Materials, *COBRAE conference 2007 Benefits of composites in civil engineering*, 16A, Stuttgart, Germany, 2007.
- 3) Sung W. L. and Kee J. H., Experiencing More Composite-Deck Bridges and Developing Innovative Profile of Snap-Fit Connections, *COBRAE conference 2007 Benefits of composites in civil engineering*, 10B, Stuttgart, Germany, 2007.
- 4) 東レ技術資料
- 5) 革新的構造材料の活用検討委員会, 革新的構造材料の土木分野への活用に関する調査研究 成果報告書, 土木学会, 2005.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON FLEXURAL BEHAVIOR OF HYBRID FRP I-SHAPED GIRDER

Shingo ASAMOTO, Hiroshi MUTSUYOSHI and Kenji SUZUKAWA

The objective of this study is to develop a hybrid FRP I-shaped girder consisting of GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) and CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics). The flexural behavior of the girders with different layer compositions in the flange and flange widths is studied by four-points bending test. The failure mode of the girder with small flange width is the delamination in the compressive top flange. On the other hand, the wider flange width girder failed by the local buckling in the loading span. It is found that the load capacity is not dependent of CFRP volume but of the failure mode. FEM analysis can simulate the local buckling failure, while it is difficult to reproduce the failure mode such as delamination.