

論文 ガラス繊維を用いたH形FRP材の曲げ性状に関する解析的研究

関島謙蔵*¹・荻迫栄治*²・井原 務*³・林耕四郎*⁴

要旨：本研究では、ガラス繊維を用いたH形FRP材を三次元直交異方性体と仮定して、最初にウェブとフランジから切り出した供試体を用いて3種類の材料試験を行い、各種の弾性定数を求めた。次に、これらの弾性定数を用いて、三次元有限要素法によってH形FRP材の曲げ性状を解析し、ウェブのせん断変形を含んだたわみが精度よく計算できることを確認した。

キーワード：H形FRP材、三次元直交異方性体、せん断変形、有限要素法

1. はじめに

繊維強化プラスチック（FRP）は成形方法が多岐にわたっていて、コンクリート用の連続繊維補強材として使用されている棒材や格子材のみならず、山形材、溝形材やH形材のような形状の形材を自由に成形できる特長がある。そこで、従来のH形鋼の代わりにH形FRP材とコンクリートスラブを組み合わせたFRP・コンクリート合成桁を開発すれば、耐久性に優れ、軽量かつ曲げ剛性が高くなり、連続繊維補強材を用いたRC構造よりも有利になると期待される。

筆者らは、既にガラス繊維を用いたH形FRP材およびFRP・コンクリート合成桁の曲げ試験を行って、両者の曲げ性状について実験的に検討した。その結果、H形FRP材がせん断力を受ける場合は、ウェブのせん断変形が無視できなくなり、両者のたわみははりの曲げ理論による弾性計算値よりも大きくなることわかった¹⁾。

本研究では、H形FRP材を三次元直交異方性体と仮定して、最初にウェブとフランジから切り出した供試体を用いて3種類の材料試験を行って、各種の弾性定数を求めた。次に、これらの弾性定数を用いて、三次元有限要素法によってH形FRP材の曲げ性状を解析し、ウェブのせん断変形を含んだたわみが精度よく計算できることを確認した²⁾。

2. H形FRP材の仕様

H形FRP材の構造を図-1に示す。断面の

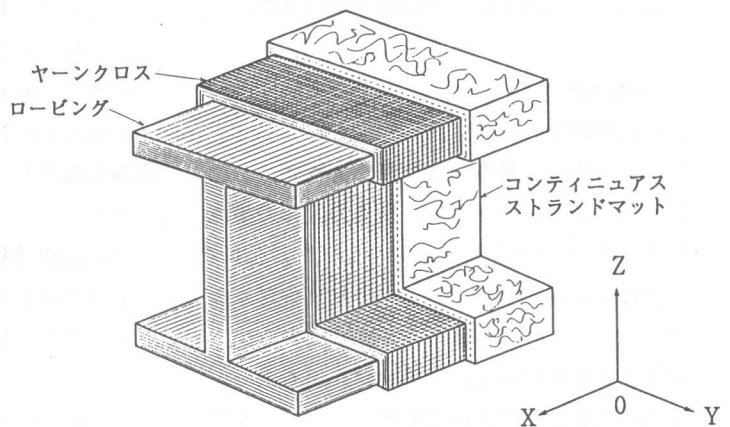


図-1 H形FRP材の構造

*1 清水建設(株)技術研究所先端技術開発部新素材グループ主任研究員 工修 (正会員)

*2 清水建設(株)技術研究所先端技術開発部新素材グループ主任研究員 工博

*3 元日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻 (現片山ストラテック(株)) 工修

*4 旭硝子マテックス(株)生産技術グループ主任技師 (正会員)

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{yx}}{E_y} - \frac{\nu_{zx}}{E_z} & & & & & \\ & \frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{xy}}{E_x} - \frac{\nu_{zy}}{E_z} & & & & \\ & & \frac{1}{E_z} - \frac{\nu_{xz}}{E_x} - \frac{\nu_{yz}}{E_y} & & & \\ & & & 0 & & \\ & & & & \frac{1}{G_{xy}} & \\ & & & & & \frac{1}{G_{yz}} \\ & & & & & & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

内部は長手方向に引き揃えたガラス繊維ローピング、表層部はガラス繊維をランダムに配置したコンティニューアストランドマット (CSM) およびガラス繊維を二方向に織ったヤーンクロス積層構造となっており、不飽和ポリエステル樹脂に含浸して、引き抜き成形したものである¹⁾。ガラス繊維の体積含有率は45~60%であり、ローピングが大部分を占めている。

H形FRP材の寸法は、幅140mm、高さ200mm、上下フランジの厚さ10mm、ウェブの厚さ14mmであり、通常のH形鋼材と異なり、フランジよりもウェブの方が厚くなっている (図-6 参照)。

3. 材料試験

3.1 材料試験の概念

(1) 三次元直交異方性体の構成方程式

弾性論によれば、三次元直交異方性体の構成方程式は式(1)のようになる³⁾。同式には12個の弾性定数が存在するが、ベッチの相反定理が成り立つので、その内9個のみが独立である。

各種類の材料試験を行う場合は、切り出した供試体の表面および側面にもひずみゲージを貼り付ける必要がある。以下の議論においては、主として、貼り付ける厚さを確保しやすいウェブから切り出した棒材を対象とする。

(2) 材料試験の種類

今回行った3種類の材料試験、すなわち一軸

引張試験、一軸圧縮試験および斜め圧縮試験の試験方法の概念を図-2に示す。また、各材料試験において作用させる応力と求められる弾性定数との関係を表-1に示す。ベッチの相反定理やH形FRP材の形状を考慮すると、最終的には12個の弾性定数が全て決定される。

3.2 一軸引張試験 (ウェブ)

(1) 供試体および試験方法

供試体は、ウェブから長手方向に切り出した幅15mm、厚さ14mm、長さ1,200mmの棒材の両端に長さ300mmの鋼管を挿入し、定着用膨張材を充填したものであり、5体製作した⁴⁾。試験部の中央の表裏および側面には、二軸ひずみゲージを1枚ずつ、計4枚貼り付けた。試験機はアムスラー型2,000kN万能試験機を使用し、供試体の両端の鋼管をチャックで直接つかみ、引張力を加えた。

(2) 試験結果および考察

FRP材を構成するCSMおよびヤーンクロスから成る表層部の方が、長手方向にローピン

表-1 材料試験の種類 (ウェブ)

| 材料試験の種類 | 作用させる応力 | 求められる弾性定数 |
|---------|---------------|---------------------------|
| 一軸引張試験 | σ_x | E_x, ν_{xy}, ν_{xz} |
| 一軸圧縮試験 | σ_z | E_z, ν_{zx}, ν_{zy} |
| 斜め圧縮試験 | σ_{45} | G_{zx} |

グを引き揃えた内部よりも伸び能力が小さいので、先行して破断した。なお、代表的な供試体の荷重とひずみの関係を図-3に示す。破壊に至るまで、ほぼ線形であることが確認された。

試験部で破断した5体の供試体の試験結果のまとめを表-2に示す。ヤング係数は、土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法(案)」に従って、最大引張荷重の20%と60%の荷重とひずみを用いて計算したものであり、ポアソン比もこれに準じて計算した⁵⁾。

3.3 一軸引張試験(フランジ)

供試体は、フランジから長手方向に切り出した幅15mm、厚さ10mm、長さ1,000mmの棒材の両端に長さ300mmの鋼管を挿入し、定着用膨張材を充填したものであり、5体製作した。試験部の中央の表裏のみ、二軸ひずみゲージを1枚ずつ貼り付けた。試験方法は3.2と同様である。試験結果のまとめを表-2に示す。

3.4 一軸圧縮試験

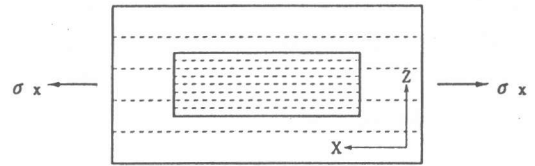
(1) 供試体および試験方法

供試体は、ウェブから鉛直方向に切り出したもので、寸法は幅20mm、厚さ14mm、高さ60mmであり、5体製作した。一軸引張試験と同様に二軸ひずみゲージを貼り付けた。試験機は、アムスラー型500kN万能試験機を使用し、供試体の端面に均等に載荷するように注意を払った。

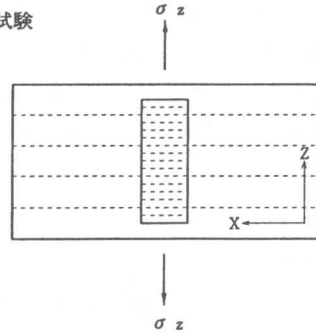
(2) 試験結果および考察

表層部が内部から剥離して、圧縮破壊した。代表的な供試体の荷重とひずみの関係を図-4

一軸引張試験



一軸圧縮試験



斜め圧縮試験

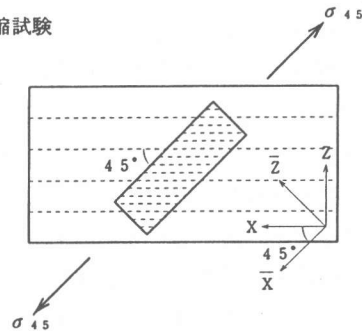


図-2 材料試験方法の概念(ウェブ)

に示す。破壊に至るまで、ほぼ線形であることが確認された。

試験結果のまとめを表-2に示す。ヤング係数およびポアソン比は、一軸引張試験に準じて

表-2 材料試験結果のまとめ(平均値)

| 試験の種類 | 断面積 (mm ²) | 最大荷重 (kN) | 強度 (N/mm ²) | 終局ひずみ (%) | | | 剛性 (kN) | ヤング係数 (kN/mm ²) | ポアソン比 | | せん断弾性係数 (kN/mm ²) |
|------------------|---------------------------|--------------|----------------------------|------------------|-------------------|--------------|------------|--------------------------------|------------|------------|----------------------------------|
| | | | | ϵ_{xu} | ϵ_y | ϵ_z | | | ν_{xy} | ν_{xz} | |
| 一軸引張試験 (ウェブ) | A | P_{xu} | σ_{xu} | ϵ_{xu} | ϵ_y | ϵ_z | E_{xA} | E_x | ν_{xy} | ν_{xz} | — |
| | 211.2 | 73.57 | 348 | 1.398 | -0.406 | -0.342 | 5,461 | 25.9 | 0.269 | 0.203 | |
| 一軸引張試験 (フランジ) | A | P_{xu} | σ_{xu} | ϵ_{xu} | ϵ_y | | E_{xA} | E_x | ν_{xy} | | — |
| | 154.6 | 65.61 | 424 | 1.147 | -0.277 | | 5,712 | 37.0 | 0.255 | | |
| 一軸圧縮試験 | A | P_{zu} | σ_{zu} | ϵ_{zu} | ϵ_x | ϵ_y | E_{zA} | E_z | ν_{zx} | ν_{zy} | — |
| | 278.6 | 13.09 | 47.0 | -0.581 | 0.097 | 0.141 | 2,425 | 8.70 | 0.156 | 0.211 | |
| 斜め圧縮試験 | A | P_{45u} | σ_{45u} | ϵ_{45u} | ϵ_{135u} | | E_{45A} | E_{45} | ν_{45} | | G_{zx} |
| | 274.9 | 16.75 | 60.9 | -0.902 | 0.426 | | 2,178 | 7.92 | 0.431 | | |

計算した⁵⁾。ウェブの鉛直方向のヤング係数は長手方向の約1/3であり、極めて小さく、この結果からもH形FRP材が異方性体であることが確認された。

3.5 斜め圧縮試験

(1) 供試体および試験方法

供試体はウェブの長手方向と45度の方向に切り出したもので、寸法は幅20mm、厚さ14mm、長さ206mmであり、5体製作した。ただし、45度方向の供試体の圧縮試験を行うとせん断変形を伴うので、供試体の両端の回転を拘束して固定することは好ましくない⁶⁾。そこで、両端の拘束の影響が少なくなるように、できるだけ長い供試体を用いた。なお、一軸圧縮試験と同様に二軸ひずみゲージを貼り付けた。

(2) 試験結果および考察

表層部が内部から剥離して、最終的には供試体が屈曲した。代表的な供試体の荷重とひずみの関係を図-5に示す。若干上に凸の曲線であり、非線形性を示していた。

試験結果のまとめを表-2に示す。45度方向のヤング係数 E_{45} およびポアソン比 ν_{45} は、一軸引張試験に準じて計算した⁵⁾。さらに、ZX平面内せん断弾性係数 G_{zx} は、式(2)によって求めた⁶⁾。

$$G_{zx} = \frac{E_{45}}{2(1 + \nu_{45})} \quad (2)$$

上記の材料試験を行っても求められなかったウェブのその他の弾性定数は、H形FRP材の形状の対称性を考慮して決定した。さらに、フランジについても、ウェブの値を参考にして決定した。

4. 有限要素法による解析

4.1 解析の対象とした曲げ試験

供試体の形状・寸法を図-6に示す。載荷点と支点には、ウェブの局部座屈を防止するための補剛材として、角形FRP管をエポキシ樹脂

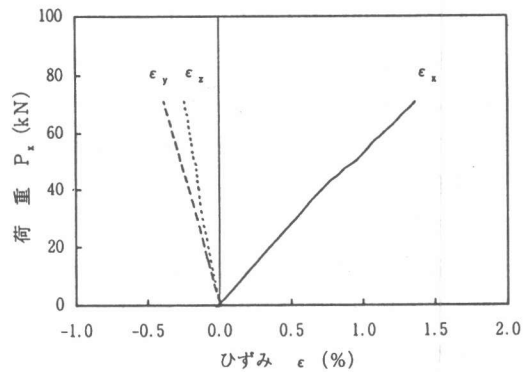


図-3 荷重-ひずみ関係 (一軸引張試験)

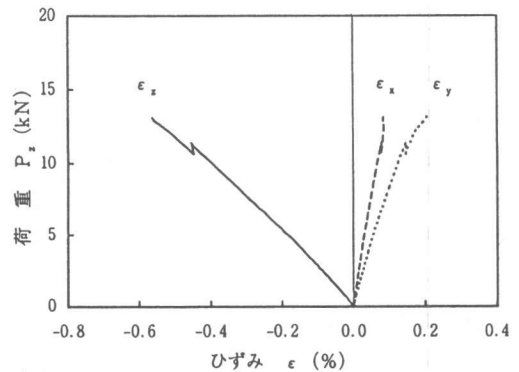


図-4 荷重-ひずみ関係 (一軸圧縮試験)

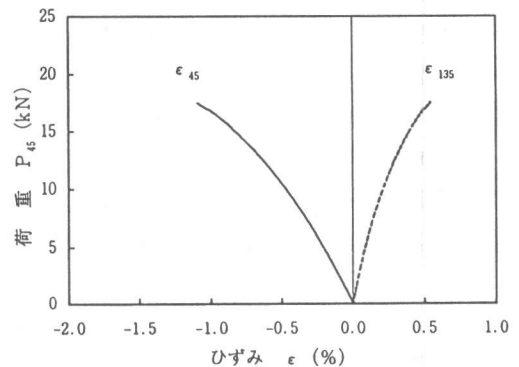


図-5 荷重-ひずみ関係 (斜め圧縮試験)

を用いて取り付けられた。

載荷方法は、同図に示すようにスパン2,200mm、等曲げモーメント区間400mmの単純ばり対称2点載荷とした。曲げ試験においては、荷重を段階的に増加させ、破壊に至るまでの荷重、変位およびひずみを測定した。

供試体は、荷重が99.7kNの時、左側せん断スパンのウェブの中立軸付近で、表層部にほぼ水平なひび割れが発生して、せん断破壊した¹⁾。

4.2 解析モデルおよび解析条件

解析には三次元20節点アイソパラメトリック六面体要素を使用した。解析モデルは、形状と荷重条件の対称性を考慮して、H形FRP材全体から1/4を切り出した溝形の形状とした。

図-7に示すように、解析モデルは長手方向1,200mmとし、曲げ試験の状況を考慮して、支点と載荷点には鋼板の層（厚さ20mm）と石膏の層（厚さ10mm）を設けた。

荷重条件は、載荷点に強制変位（仮の値10mm）を与え、生じた反力から荷重を求めた。また、弾性定数は材料試験によって得られた値を使用した。

4.3 解析結果および考察

H形FRP材のスパン中央におけるたわみと荷重の関係について、実験値、はりの曲げ理論による弾性計算値およびFEM解析値の比較を図-8に示す。はりの曲げ理論のCASE1は、断面全体がフランジと同一のヤング係数を有する一様体と仮定した場合であり、CASE2は、フランジとウェブのヤング係数比を用いて、フランジを等価な断面積のウェブに換算した場合である。

CASE1は最もたわみが小さくなった。表-2に示したように、フランジのヤング係数はウェブのそれよりもかなり高いため、断面全体がフランジと同一のヤング係数を有する一様体と仮定することは、H形FRP材の曲げ剛性を過大評価する結果となった。

しかし、実験値はCASE2よりも大きかった。この理由は、大部分のせん断力を負担するのは

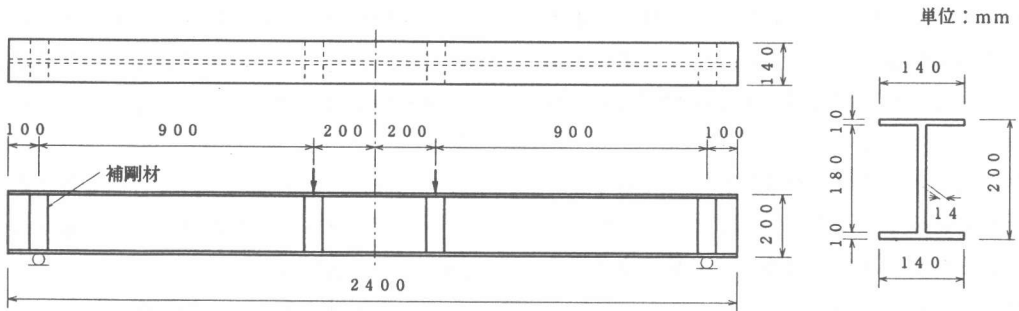


図-6 供試体の形状・寸法

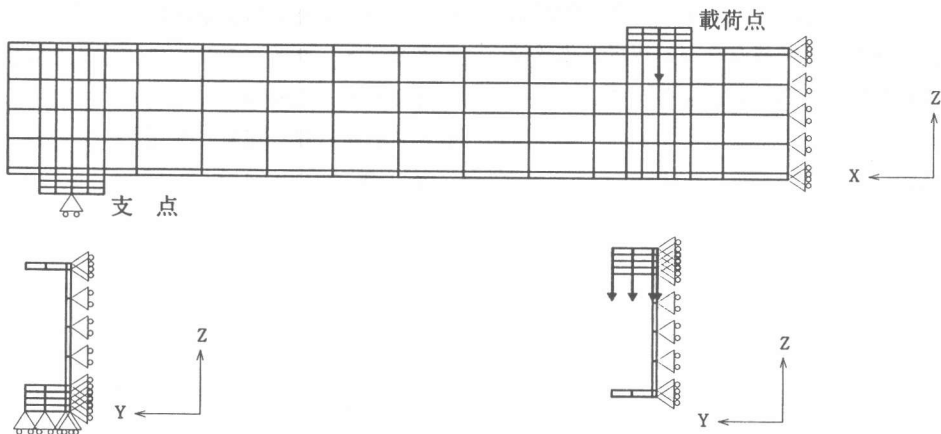


図-7 解析モデル

ウェブであり、ローピングは長手方向のみに配置してあるため、せん断スパンにおけるウェブのせん断変形が無視できない大きさになったからであると推定される。

一方、FEM解析値は最もよく実験値と一致した。H形FRP材のウェブのせん断変形を含んだたわみは、三次元直交異方性体と仮定した線形弾性FEM解析によって、精度よく計算できることが確認された。

5. まとめ

(1) ガラス繊維を用いたH形FRP材を三次元直交異方性体と仮定して、ウェブおよびフランジを対象として、3種類の材料試験、すなわち一軸引張試験、一軸圧縮試験および斜め圧縮試験を行って、FEM解析に必要な各種の弾性定数を決定した。

(2) ウェブおよびフランジの一軸引張試験および一軸圧縮試験より得られた供試体の荷重とひずみの関係は、破壊に至るまではほぼ線形であった。一方、ウェブの斜め圧縮試験においては非線形性を示していた。

(3) H形FRP材の曲げ試験におけるウェブのせん断変形を含んだたわみは、三次元線形弾性FEM解析によって精度よく計算できることが確認された。

謝 辞

本研究を行うに当たり、日本大学理工学部土木工学科 成瀬輝男教授ならびに塩尻弘雄教授から御助言を頂いたことに感謝します。

参考文献

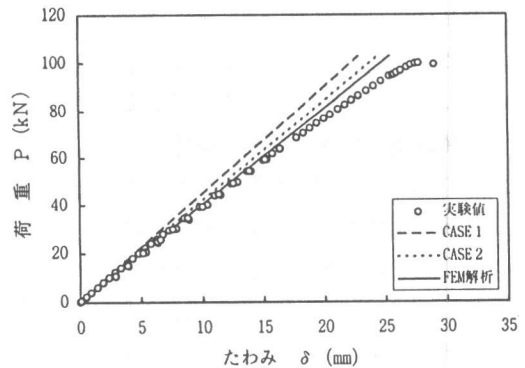


図-8 荷重-たわみ関係

- 1) 井原 務・関島謙蔵・宮田 和・林耕四郎・若下藤紀：FRP・コンクリート合成桁の曲げ性状に関する実験的研究，「新素材のコンクリート構造物への利用」に関するシンポジウム論文報告集，日本コンクリート工学協会北海道支部，pp.103-110，1996.11
- 2) 井原 務・関島謙蔵・荻迫栄治・林耕四郎：ガラス繊維を用いたH形FRP材の曲げ性状に関する研究，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.1128-1129，1997.9
- 3) Desai, C.S. and Abel, J.F. (山本善之訳)：マトリックス有限要素法，科学技術出版社，pp.35-38，1974.8
- 4) 定着用膨張材を用いた引張試験方法，コンクリート・ライブラリー第88号，土木学会，pp.337-341，1996.9
- 5) 連続繊維補強材の引張試験方法(案)，コンクリート・ライブラリー第88号，土木学会，pp.92-94，1996.9
- 6) FRP構造設計便覧，強化プラスチック協会，pp.119-123，1994.9