

断面内の繊維不均一性を有するGFRP部材の 部材強度評価法の検討

二見 悠太郎¹・橋本 国太郎²

¹学生会員 神戸大学大学院博士前期課程 工学研究科市民工学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: 195t131t@stu.kobe-u.ac.jp

²正会員 神戸大学大学院准教授 工学研究科市民工学専攻(〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)
E-mail: hashimoto@person.kobe-u.ac.jp

繊維強化樹脂(Fiber Reinforced Polymer)は強度が高く、剛性も高いが、FRP部材断面内の繊維量が部位によって不均一なため、部材から切り出す位置によって試験片の強度が変化する。特に角部においては繊維が入りにくい事が多いため、強度が他の部位と比べ小さくなることが多い。

既存の研究から繊維の少ない部分の影響で、材料強度に比べて部材強度が小さくなることがわかっている。部材強度を求めるには部材試験を行う必要があるが、予算や技術的な面から試験を行うのが難しく試験方法も確立されていない。そこで、本研究では、GFRPを対象に部材を構成する板要素で試験する板要素試験を提案し、部材強度を予測する手法を検討する。実験方法としては1方向材と2方向材の2種類のGFRPを用意し、板要素およびクーボンに対して引張及び圧縮試験を行い比較した。

Key Words: GFRP, plate member test, tensile test, compression test

1. 研究背景および目的

FRPとは、F: fiber(繊維)、R: reinforced(強化)、P: polymer(プラスチック)の略語で、繊維で強化されたプラスチック材料であり、複合材料の一つである。FRPの特徴としては、錆びや腐食が発生しないという点が挙げられ軽量なため施工性が高い。

しかし、FRPは図-1に示すように断面内の繊維が不均一に入っているため、材料試験などにおいて試験片を切り出す位置によって強度が変化し、強度のばらつきが大きい^{1,2)}。特に角部において、繊維が隅まで入りきらないことにより、角部における強度が平面部(フランジやウェブ)に比べ小さくなることが多い。

既往の研究からFRP部材の繊維の少ない部分の影響により材料強度に比べて部材強度が小さくなることがわかっており^{1,2)}、構造物の設計においては部材強度を使用した方がより安全となると考えられる。また、材料強度から設計する現行の設計で、部材強度と材料強度との比率がわかれば、部材係数をより合理的な値に設定することができ、より合理的な設計が可能である。

しかし、その部材強度を求めるには部材試験を行う必要があるが、部材試験を行うには、予算や技術的な

面で試験を行うのが難しいことや、部材試験の試験方法も確立されていない。

そこで本研究では、部材を板要素に分割し、それらに対し試験を実施することで、部材強度を予測する手法を検討する。また、本研究では、FRP部材の繊維の不均一性を検討するために、フランジの板要素に含まれるフランジと角部のクーボン試験、ウェブに含まれるウェブのクーボン試験も実施する。なお、著者らは、文献3)で引張方向に対する検討を行っており、ここでは、圧縮方向の結果を追加し、引張・圧縮における検討を行った。また、文献3)と同様に、繊維が部材軸方向のみ入っている1方向材、および繊維が部材軸方向および部材軸直角方向の2方向に入っている2方向材の2種類のGFRP溝形部材を対象とした。

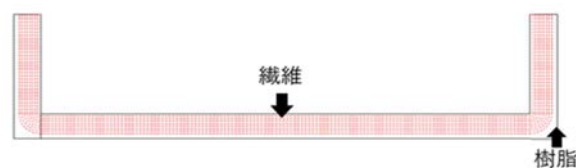


図-1 FRP部材の断面図の例

2. 実験方法

(1) 引張試験

引張試験は JIS K 7164⁴⁾および7165⁵⁾に準拠した方法で行った。図-2 に引張試験のセットアップの様子を示す。試験機は 2000kN 万能試験機を用いた。

試験片は、図-3～図-6 に示すように引抜き成形法で成形した 1 方向材である GFRP 溝形部材およびハンドレイアップ成形法で成形した 2 方向材である GFRP 溝形部材から、フランジ(F)、ウェブ(W)および角部(E)を、板要素引張試験はフランジ(F)およびウェブ(W)をそれぞれ合計 5 体となるように切り出した。図よりわかるようにフランジ板要素に角部が含まれている。切り出しは、機械切断を用いたため、板要素の切り出し時に切代が 1～2mm 程度生じている。また、2 方向材ウェブの板要素試験片においては、試験片のつかみやすさを考慮し、R 部があまり入らないように切断した。

試験片の寸法を表-1 にまとめて示す。クーボン試験片は JIS に準拠して設定したが、万能試験機のつかみ部分でのすべりを防ぐために試験片長さは、規格より長めに設定した。また、試験体のつかみ位置では、つかみ具での破壊を防ぐために厚さ 2mm 長さ 200mm のアルミ板を試験片を表裏両面に貼り付けた。

計測データとして、万能試験機より荷重とストロークを記録した。また、引張弾性率を求めるため、クーボン試験体に対しては 5 体の試験片にひずみゲージを貼りつけた。板要素引張試験時には、3 体の試験片にひずみゲージを試験体の中央部の表裏に貼り付け、残り 2 体の試験片には何も貼り付けずに試験を行った。表裏のひずみの値の平均を試験片のひずみとして扱うことにした。

引張強度は式(1)から算定し、引張弾性率は Excel の SLOPE 関数を用いて 500×10^6 から 2500×10^6 までの回帰曲線の傾きの値とした。

$$\sigma^t = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (1)$$

ここで、 σ^t : 引張強度 (MPa) , P_{\max} : 最大荷重 (kN) , A_0 : 初期断面積 (mm^2)

(2) 圧縮試験

図-7 に圧縮試験のセットアップの様子を示す。圧縮試験は、文献 1)での部材試験と同様に試験体の端部での破壊を防ぐために試験体の両端を鋼管で囲み、無収縮モルタルで充填することで試験体の端部に内圧をかけ、万能試験機を用いて圧縮試験を行った。

試験片は引張試験と同様に図-3～図-6 に示すように引



図-2 引張試験のセットアップの様子



図-3 クーボン切り出し位置 (1方向材)



図-4 板要素切り出し位置 (1方向材)

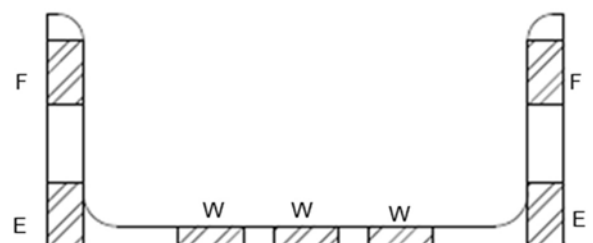


図-5 クーボン切り出し位置 (2方向材)

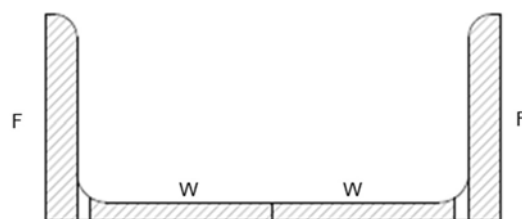


図-6 板要素切り出し位置 (2方向材)

表-1 試験片寸法

1方向クーポン	幅(mm)	厚さ(mm)	2方向クーポン	幅(mm)	厚さ(mm)
フランジ	25	10	フランジ	25	14
ウェブ	25	10	ウェブ	25	8
角部	25	10	角部	25	14
1方向板	幅(mm)	厚さ(mm)	2方向板	幅(mm)	厚さ(mm)
フランジ	50	10	フランジ	90	14
ウェブ	86	10	ウェブ	80	8

抜き成形法で成形した1方向材 GFRP 溝形部材およびハンドレイアップ成形法で成形した2方向 GFRP 溝形部材から、各部位5体ずつ切り出し、評定長さが25mmになる様に鋼管の長さを調節した。試験片の寸法は表-1に示す。

計測データとして、万能試験機より荷重とストロークを記録し、圧縮強度は式(2)から算定した。

$$\sigma_c = \frac{P_{\max}}{A_0} \quad (2)$$

ここで、 σ_c ：圧縮強度 (MPa) , P_{\max} ：最大荷重 (kN) , A_0 ：初期断面積 (mm²)



図-7 圧縮試験のセットアップの様子

(3) 繊維含有率

図-8および図-9に示した位置から長さ5cmの試験片を1体ずつ切り出し、さらに切り出した試験片を3分割した供試体を重量計算によって、繊維含有率を以下の式(3)を用いて算定した。各部位の平均値を結果として表-2に示す。

$$M_{\text{glass}} = \frac{M_5 - M_4}{M_2 - M_1} \times 100 \quad (3)$$

M_{glass} ：繊維含有率 (%)

M_1 ：加熱後の供試体の質量 (g)

M_2 ：定温(105°C)乾燥後の供試体の質量 (g)

M_4 ：定温(105°C)乾燥後のガラスフィルタの質量 (g)

M_5 ：ガラスフィルタと酸処理残分の合計質量 (g)

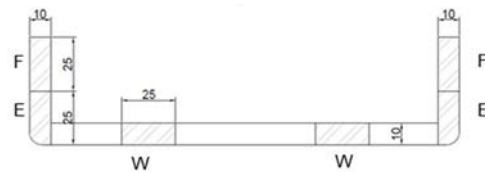


図-8 繊維含有率切り出し位置(1方向材)

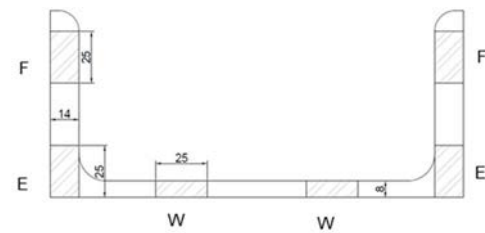


図-9 繊維含有率切り出し位置(2方向材)

3. 実験結果

(1) 1方向材引張試験結果

図-10および表-3に1方向材の引張強度の結果を示し、図-11および表-4に1方向材の引張弾性率の結果を示す。それぞれ図の右の縦軸が変動係数および繊維含有率の値を示し、左の縦軸に強度あるいは弾性率の値を示し

表-2 繊維含有率

部位	繊維含有率 (%)	部位	繊維含有率 (%)
1方向W	62.0%	2方向W	69.7%
1方向F	63.6%	2方向F	64.6%
1方向E	61.3%	2方向E	54.8%

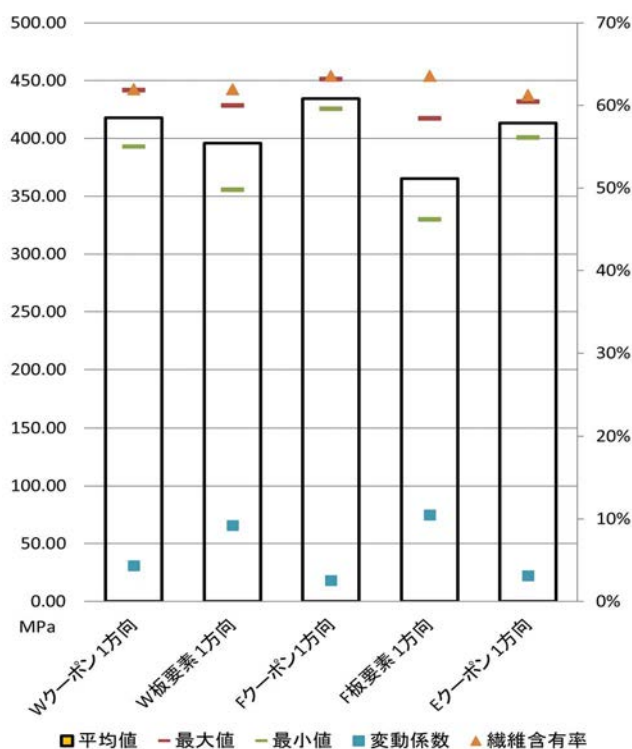


図-10 1方向材引張強度

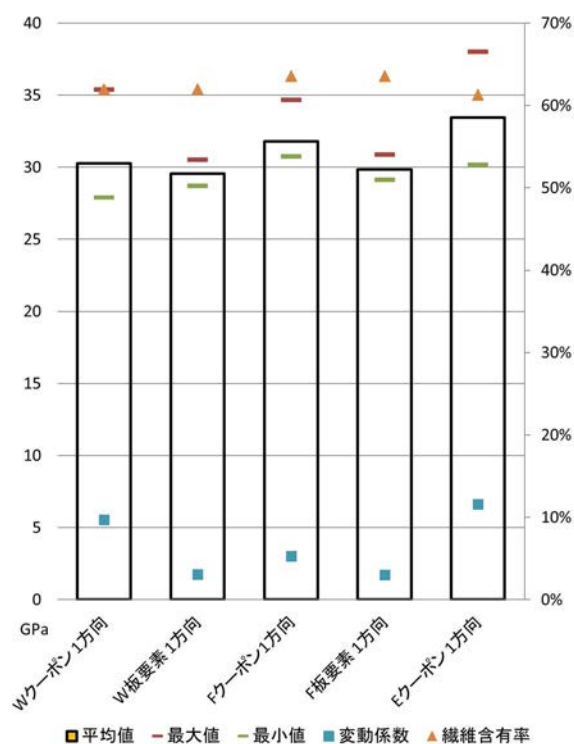


図-11 1方向材引張弾性率

表-3 1方向材引張強度

引張強度 (MPa)	平均値	最大値	最小値	変動係数
Wクーポン	417.72	441.72	392.98	4%
W板要素	396.00	428.70	355.67	9%
Fクーポン	434.19	451.30	425.52	3%
F板要素	365.23	417.55	329.99	11%
Eクーポン	413.37	432.10	401.00	3%

表-4 1方向材引張弾性率

引張弾性率 (GPa)	平均値	最大値	最小値	変動係数
Wクーポン	30.25	35.38	27.87	10%
W板要素	29.56	30.54	28.72	3%
Fクーポン	31.80	34.68	30.75	5%
F板要素	29.86	30.88	29.13	3%
Eクーポン	33.43	38.03	30.18	12%

ている。平均値を棒グラフで示し、最大値、最小値は線分で変動係数は四角形、繊維含有率は三角形で示している。

図-10 および表-3 より、どの部位においてもクーポン試験体の方が板要素試験と比べ、平均引張強度が高く、変動係数が小さいことが分かる。

また、クーポンの引張強度の最小値と板要素の平均引張強度を比較すると、ウェブではこれらが近い値を示したが、フランジではクーポン (F と E) の最小値が板要素の平均引張強度より約 10%大きい値を示した。

角部とフランジのクーポンの平均引張強度の差は約 5%のみなので、この強度差のみが、フランジの板要素の引張強度が小さくなった主要因ではない可能性が高いと考えられる。

また、引張弾性率の試験結果より、クーポンと板要素を比較すると板要素の方がクーポンと比べばらつき

が小さいことが分かり、角部およびウェブクーポンの弾性率は大きなばらつきを示した。

(2) 2方向材引張試験

2方向材のクーポン引張試験および板要素試験の引張強度の試験結果を図-12 および表-5 に、引張弾性率の結果を図-13 および表-6 に示す。これらの図でも、右の縦軸が変動係数および繊維含有率の値を示し、左の縦軸に強度あるいは弾性率の値を示している。また、平均値を棒グラフ、最大値および最小値は線分で変動係数は四角形、繊維含有率は三角形で示している。

試験結果より、どの部位においてもクーポン試験体の方が板要素試験体と比較して平均引張強度が高く、クーポン試験体の引張強度のばらつきは板要素試験体と比べ小さいことが分かる。

また、クーポン試験体と板要素試験体の引張強度の

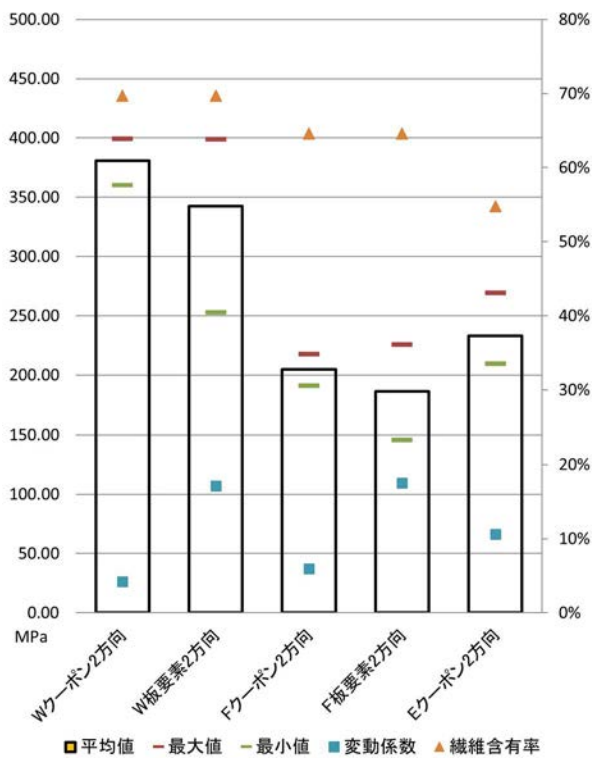


図-12 2方向材引張強度

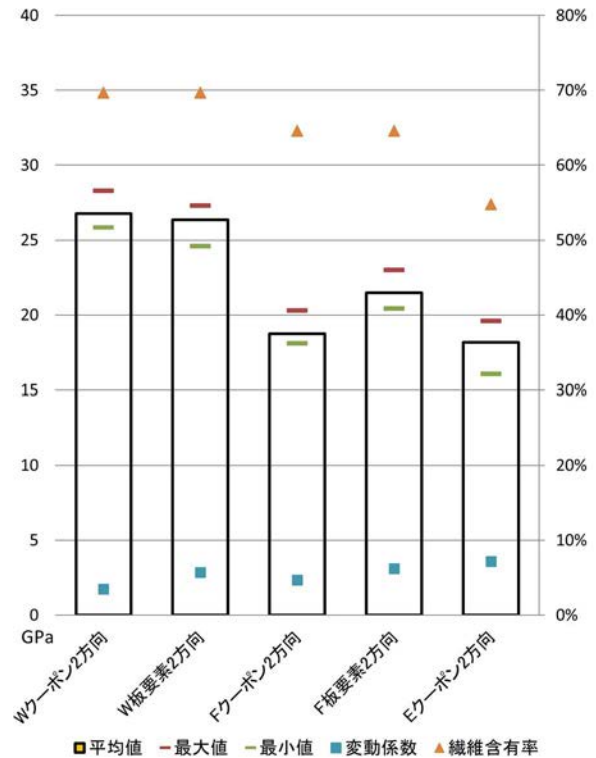


図-13 2方向材引張弾性率

表-5 2方向材引張強度

引張強度 (MPa)	平均値	最大値	最小値	変動係数
Wクーポン	380.96	399.50	360.20	4%
W板要素	342.44	399.06	252.81	17%
Fクーポン	204.66	217.80	190.90	6%
F板要素	186.19	225.68	145.74	18%
Eクーポン	233.18	269.40	209.80	11%

表-6 2方向材引張弾性率

引張弾性率 (GPa)	平均値	最大値	最小値	変動係数
Wクーポン	26.76	28.29	25.84	4%
W板要素	26.34	27.30	24.61	6%
Fクーポン	18.76	20.30	18.10	5%
F板要素	21.50	23.01	20.43	6%
Eクーポン	18.16	19.61	16.08	7%

変動係数を比較すると板要素試験体のばらつきが大きいことが分かる。引張弾性率のばらつきは全的には約 4%~7%前後となり比較的ばらつきが小さい結果となった。

クーポンの最小引張強度と板要素の平均引張強度を比較すると、フランジ、ウェブともに近い値を示した。

角部のクーポン平均引張強度はフランジのクーポン引張強度と比べ約 12%だけ大きい値を示したことから、フランジ板要素試験体が角部を含んでいることは、引張強度が小さくなる原因となっているとは考えにくい。

図-12 および図-13 より、ウェブの引張強度および引張弾性率が、他の部位と比べ大きい値を示している。これはウェブが他の部位と比べ、繊維含有率の値が高いためと考えられる。

(3) 圧縮試験結果

1方向材の圧縮強度の試験結果を図-14 および表-7 に示し、2方向材の圧縮強度の試験結果を図-15 および表-8 に示す。これらの図でも、右の縦軸が変動係数および繊維含有率の値を示し、左の縦軸が強度あるいは弾性率の値を示している。また、平均値を棒グラフ、最大値および最小値は線分で変動係数は四角形、繊維含有率は三角形で示している。

図-14 および表-7 より、1方向材のクーポン試験体の平均圧縮強度はどの部位においても、引張試験と同様に板要素試験体と比べ大きな強度を示し、フランジの板要素は大きなばらつきを示した。また、角部の圧縮強度はフランジクーポンより大きな値を示しているため、フランジ板要素の強度が小さくなっている要因と

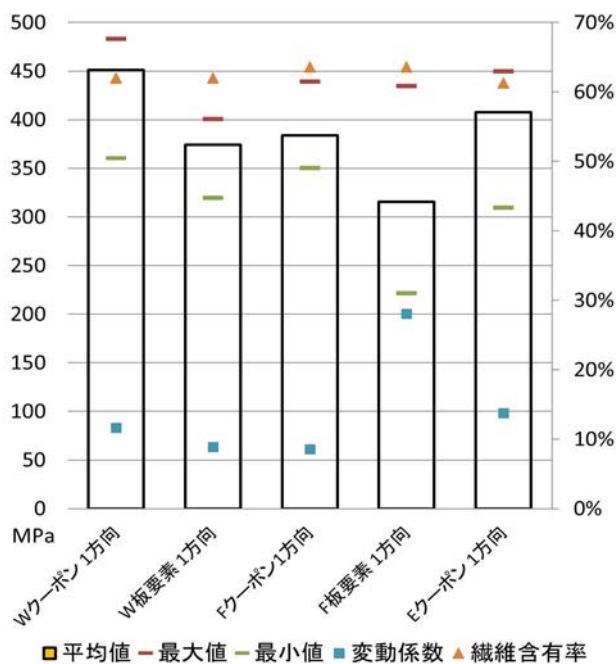


図-14 1方向材圧縮強度

表-7 1方向材圧縮強度

圧縮強度 (MPa)	平均値	最大値	最小値	変動係数
Wクーポン	451.4	483.2	360.0	12%
W板要素	374.3	400.6	319.8	9%
Fクーポン	383.8	439.2	350.4	9%
F板要素	315.7	434.7	221.4	28%
Eクーポン	407.8	449.9	309.6	14%

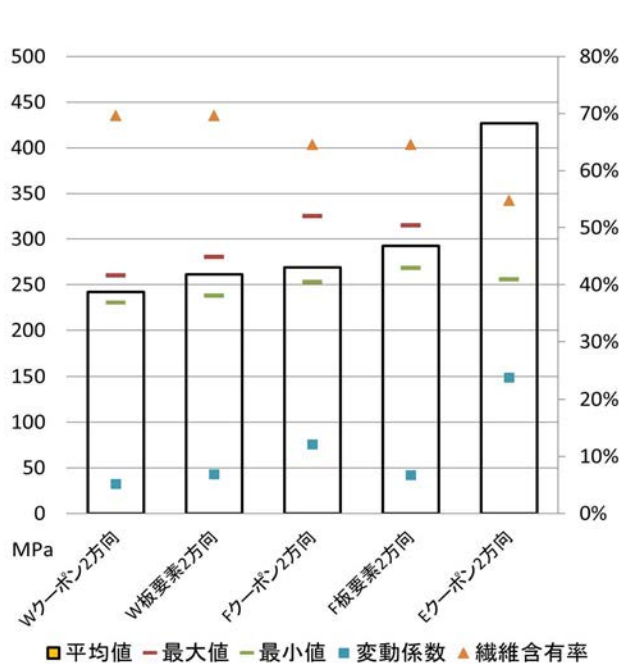


図-15 2方向材圧縮強度

表-8 2方向材圧縮強度

圧縮強度 (MPa)	平均値	最大値	最小値	変動係数
Wクーポン	242.00	260.00	230.00	5%
W板要素	261.09	280.47	238.28	7%
Fクーポン	268.69	325.33	252.80	12%
F板要素	292.53	314.90	268.47	7%
Eクーポン	426.81	518.04	255.92	24%

なりにくい事が分かる。

図-15および表-8より、2方向材のクーポン試験体と板要素試験体の平均強度を比較すると、どの部位においても板要素試験体が大きな強度を示した。また、角部クーポンが大きな強度を示し、ばらつきが大きな結果となった。

4. 実験結果の考察

(1) 1方向材と2方向材の比較

図-16および図-17に引張強度および圧縮強度の試験結果をまとめた図を示す。これらの図でも、右の縦軸が変動係数および繊維含有率の値を示し、左の縦軸に強度あるいは弾性率の値を示している。また、平均値を棒グラフ、最大値および最小値は線分で変動係数は四角形、繊維含有率は三角形で示している。また、オレンジ色の棒グラフは2方向材の試験結果を表している。

1方向材、2方向材を比較すると引張、圧縮どちらに

おいても1方向材が大きな強度を示した。理由としては、1方向材は2方向材と比べ、部材軸直角方向に繊維が無いいため、2方向材と比べ荷重方向にある繊維量が多いためと考えられる。

(2) 繊維含有率について

表-2および図-16より、1方向材はどの部位においても62%前後の繊維含有率を示しているため、クーポン試験体は引張試験において平均強度が近い値を示したと考えられる。また、2方向材においてもウェブが他の部位と比べ、繊維含有率、引張強度が共に大きな値を示していることから繊維含有率と引張強度の間にある程度の相関関係があると考えられる。

(3) 角部について

図-16および図-17より引張試験、圧縮試験において1方向材、2方向材どちらにおいても角部の強度はフランジの板要素試験体の平均強度より大きな値を示し、平面部と比べて強度が小さくならなかった。その理由と

しては今回使用した1方向部材は表-2に示す様に部位毎の繊維量含有率の差が小さく角部においても繊維が入っているため、強度が落ちなかったと考えられる。2方向材に関しては本来樹脂のみである角部にロービング材が付与されており、引張試験においてはフランジと近い強度を示し、圧縮試験に関しては他の部位より大きな強度を示した。

(4) 圧縮試験について

圧縮試験は偏心等の影響により引張試験と比べるとばらつきが大きい結果となった。そのためより平均的な強度を求めるため、図-18 に試験結果から最大値および最小値を除いた試験体3体の結果をまとめた図を示す。なお、1方向材のフランジ板要素に関しては5体中3体が偏心もしくは座屈による影響で明らかに小さな値を示したため、2体分の試験結果を用いている。表-9にフランジ板要素の圧縮試験結果も示している。

図-18 より1方向材において、ウェブのクーポンは大きな値を示したが、他の部位に関しては400MPaに近い強度を示し、2方向材に関しても同様にどの部位も250MPaに近い値を示した。この結果を繊維含有率と比較してみると相関性が無いように考えられる。

(5) クーポン試験体と板要素試験体の比較

図-16 および図-17 より、2方向材の圧縮試験を除いてクーポン試験体の平均強度が板要素試験体より大きな値を示した。また、クーポン試験体の強度の最小値が板要素の平均強度と近い値を示している。このことから、板要素試験体は強度の小さい箇所から破壊が開始されていると予想できるので、部材試験においても同様に強度の小さい箇所から破壊されていくと考えられる。よって、部材強度を評価する際はクーポン試験体もしくは板要素試験体の強度の最小値を基準にできると考えられる。

2方向材の圧縮の場合、板要素の平均圧縮強度がクーポンの強度より大きくなる理由として、部材軸直角方向に入っている繊維による影響で圧縮時に繊維が座屈することを防ぐ働きが板幅が大きくなる事によって、その影響が大きくなった可能性がある。

表-9 フランジ板要素圧縮試験結果

	圧縮強度(MPa)
F1	434.73
F2	380.9
F3	269.17
F4	221.43
F5	272.21

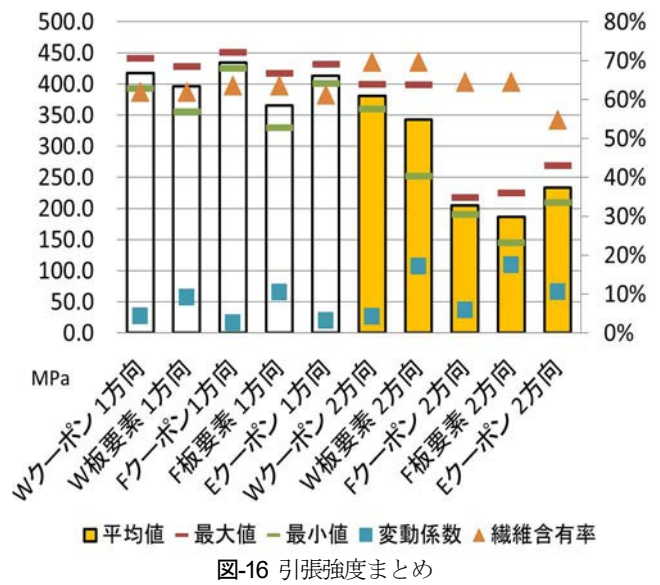


図-16 引張強度まとめ

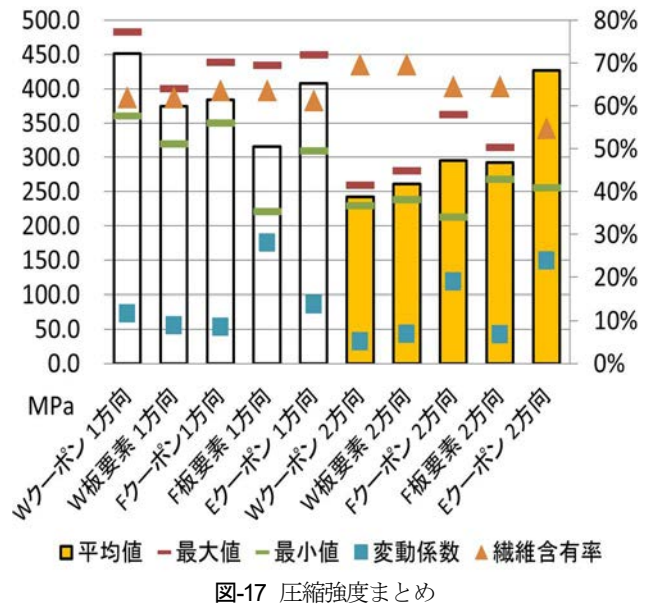


図-17 圧縮強度まとめ

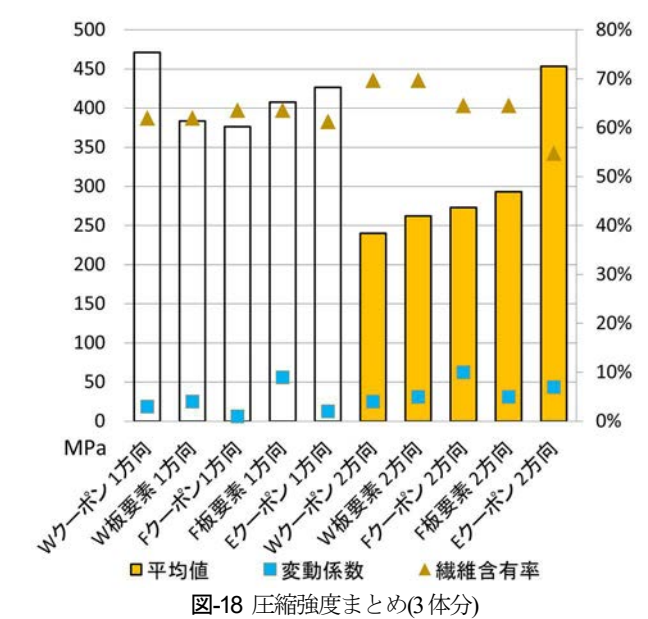


図-18 圧縮強度まとめ(3体分)

5. まとめ

本研究では部材強度を予測する手法を検討するために1方向材および2方向材からクーポン試験片、板要素試験片を切り出し引張試験および圧縮試験を行った。以下にその結果をまとめる。

- 1) クーポン試験体および板要素試験体の引張強度および圧縮強度を比較した際、2方向材の圧縮試験を除いて、クーポン試験体の方が大きな値を示した。
- 2) 1方向材、2方向材どちらにおいても角部のクーポンの強度はフランジの板要素より大きな強度を示した。
- 3) 1方向材と2方向材の引張強度および圧縮強度を比較すると、1方向材の方が大きな値を示した。
- 4) 2方向材の圧縮試験を除いて、板要素試験における平均強度とクーポン試験の強度の最小値が近い値を示した。

今後の課題として、本研究では、部材試験を行うことが出来ていないので実際に部材試験を実施し、今回の結果と比較する必要がある。

謝辞

本研究は、JSPS 科研費 JP19K04578 の助成を受け行わ

れた。また、試験片の製作には、株式会社ヒビおよび株式会社コムテックに多大な協力をいただいた。さらに、実験では、神戸大学大学院技術職員の中西智美氏および村瀬照寛氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会・複合構造委員会・FRP 複合構造研究小委員会：土木構造用 FRP 部材の設計基礎データ，複合構造レポート 11，2014
- 2) 土木学会・複合構造委員会・FRP 複合構造研究小委員会：土木構造用 FRP 部材の力学性能に関する研究，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.71，No.5，pp.II_50-II_64，2015
- 3) 二見悠太郎，橋本国太郎：断面内の繊維不均一性を有する FRP 部材の部材引張強度評価法の検討，第13回複合構造の活用に関するシンポジウム講演集，pp.12_1-12_6，2019
- 4) JIS K 7164：プラスチックー引張特性の求め方ー，第4部：等方性および直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件，2005
- 5) JIS K 7165：プラスチックー引張特性の求め方ー，第5部：一方向繊維強化プラスチック複合材料の試験条件，2008

(Received August 28, 2020)

STUDY ON EVALUATION METHOD OF MEMBER STRENGTH OF GFRP MEMBERS WITH FIBER NON-UMIFORMITY IN CROSS SECTION

Yutaro FUTAMI and Kunitaro HASHIMOTO

Fiber Reinforced Polymer (FRP) has high strength and high rigidity. However, the fiber quantity in the FRP member in cross section is uneven by the position of the cross section. In the strength test, the strength changes depending on the position where the specimen is cut out from the member. Especially at the corners of FRP members, the amount of fibers is small and the strength is often smaller than that of general parts of flanges and webs in member.

Existing research showed the strength of the GFRP member is less than that of the material due to the low fiber content. In order to obtain the strength of the member, it is necessary to perform a test for a member, however it is difficult to perform the member test due to a budget and technical aspect, and no test method has been established. Therefore, this research are proposed a plate element test to test with the plate elements that compose the member, and examine the method to predict the member strength. Two types of GFRP, unidirectional and bi-directional, were prepared as experimental methods, and tensile and compression tests were carried out for the plate elements and coupons for comparison.