

(12) 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

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: 以下, FRP)は強度が高いなどの利点があるが, FRP 部材断面内の繊維量が部位によって不均一であるため, 強度のばらつきが大きい。また, 強度試験時, 試験片を切り出す位置によって強度が変化する。特に角部では繊維量が少なく, 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 FRP 部材の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, 板要素およびクーポンに対して引張試験を行い比較した。

Key Words: FRP, plate member test, tensile test, member strength

1. はじめに

(1) 研究背景

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 1 つである。FRP の特徴として, 軽量かつ強度や剛性が高く, 錆びないということが挙げられる。さらに, 軽量であるため施工性にも優れる。

しかし, FRP は, 配置する繊維の種類や量, 配向方向によって材料特性が変化する異方性があり¹⁾, 断面内の繊維含有率が不均一であることが多いため, 材料試験などで試験片を部材から切り出す位置によって強度が変化する²⁾。図-1 に示すように, 特に, 部材の角部においては繊維が FRP 部材の隅まで入りきらないことが多い。このこと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。

(2) 研究目的

既往の研究から FRP 部材の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おり³⁾, 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。なお, 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ポン試験, ウェブに含まれるウェブのクーポン試験も実施する。また, 本論文では, 基礎的な研究として, ガラス繊維を用いた GFRP の溝形部材を対象とし, その引張強度に関する試験を実施した。

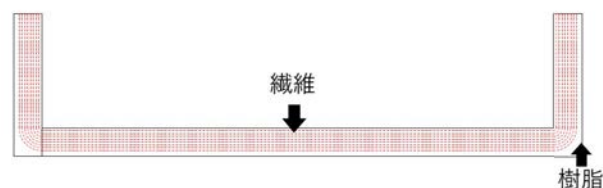


図-1 FRP 部材の断面図の例

2. 引張試験

(1) 実験方法

試験方法はJIS K 71654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 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、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。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。クーポン試験片は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、引張弾性率とポアソン比を求めるため、クーポン試験体に対しては3体の試験片に1軸ひずみゲージを貼りつけ、2体の試験片に2軸ひずみゲージを試験片の表裏の中央部に貼り付けた。板要素引張試験時には、2体の試験片に1軸ひずみゲージを1体の試験片に2軸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、ポアソン比は式(2)から算定しひずみが 500×10^{-6} から 2500×10^{-6} の間の平均をポアソン比として求めた。

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⁴⁾。

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

$$\nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \quad (2)$$

ここで、 σ : 引張強度 (MPa), P_{max} : 最大荷重 (kN), A_0 : 初期断面積 (mm^2), ν_y : ポアソン比, ε_y : 縦ひずみ, ε_x : 横ひずみである。



図-2 引張試験のセットアップの様子

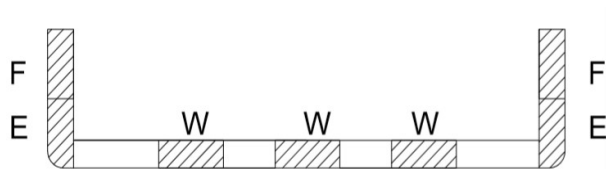


図-3 クーポン切り出し位置 (1方向材)



図-4 板要素切り出し位置 (1方向材)



図-5 クーポン切り出し位置 (2方向材)

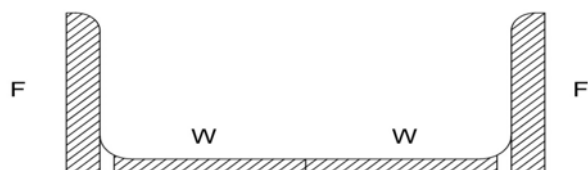


図-6 板要素切り出し位置 (2方向材)

表-1 試験片寸法

1方向クーポン	幅(mm)	長さ(mm)	厚さ(mm)	2方向クーポン	幅(mm)	長さ(mm)	厚さ(mm)
フランジ	25	500	10	フランジ	25	550	14
ウェブ	25	500	10	ウェブ	25	550	8
角部	25	500	10	角部	25	550	14
1方向板	幅(mm)	長さ(mm)	厚さ(mm)	2方向板	幅(mm)	長さ(mm)	厚さ(mm)
フランジ	50	500	10	フランジ	90	550	14
ウェブ	86	500	10	ウェブ	80	550	8

(2) 1方向材引張試験結果

図-7および表-2に引張強度の結果を示し、図-8および表-3に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。これらの図では平均値を棒グラフで示し、最大、最小および変動係数を点で示している。

図-7および表-2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、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、角部およびウェブの弾性率は大きなばらつきを示した。

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、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の最小値が板要素の平均強度より約14%大きい値を示した。

角部のクーポン平均引張強度とフランジのクーポン引張強度の差は約5%のみなので、この強度差が、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ある。ポアソン比はウェブでは0.28、フランジでは0.27、角部では0.35の値を示した。

表-2 1方向材引張強度

	平均値 (MPa)	最大値 (MPa)	最小値 (MPa)	変動係数
Wクーポン	417.72	441.72	392.98	4.4%
W板要素	396.00	428.70	355.67	9.2%
Fクーポン	434.19	451.30	425.52	2.6%
F板要素	365.23	417.55	329.99	10.5%
Eクーポン	413.37	432.10	401.00	3.1%

表-3 1方向材引張弾性率

	平均値 (GPa)	最大値 (GPa)	最小値 (GPa)	変動係数
Wクーポン	30.26	35.38	27.87	9.8%
W板要素	29.56	30.54	28.72	3.1%
Fクーポン	31.80	34.68	30.75	5.3%
F板要素	29.86	30.88	29.13	3.1%
Eクーポン	33.43	38.03	30.18	11.6%

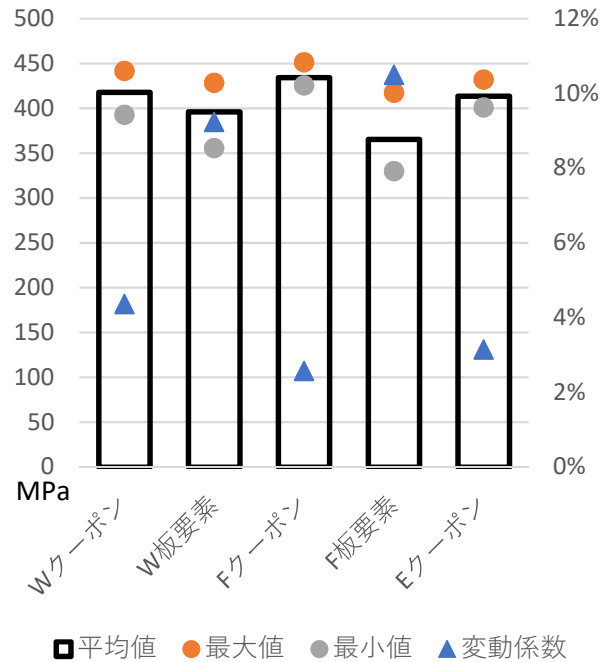


図-7 1方向材引張強度

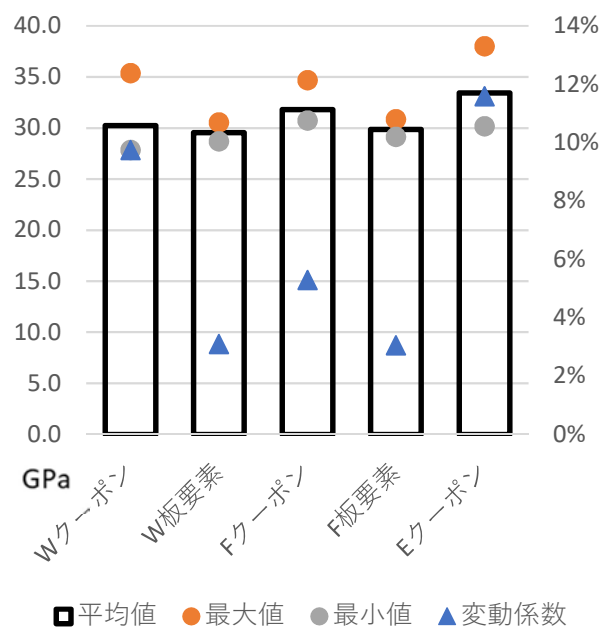


図-8 1方向材引張弾性率

(3) 2方向材引張試験結果

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-9および表-4に、引張弾性率の結果を図-10および表-5に示す。これらの図でも、平均値を棒グラフで示し、最大、最小および変動係数を点で示している。

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弾性率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体的には約4%~7%前後となりばらつきが小さい結果となった。

図-9および図-10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。これよりウェブは他の部位に比べて繊維量の割合が多かったためと考えられる。

クーポンの最小引張強度と板要素の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。

ポアソン比はウェブでは0.15、フランジでは0.17、角部では0.22の値を示した。

表-4 2方向材引張強度

	平均値 (MPa)	最大値 (MPa)	最小値 (MPa)	変動係数
Wクーポン	380.96	399.50	360.20	4.2%
W板要素	342.44	399.06	252.81	17.1%
Fクーポン	204.68	217.81	190.93	5.9%
F板要素	186.19	225.68	145.74	17.5%
Eクーポン	233.19	269.37	209.83	10.6%

表-5 2方向材引張弾性率

	平均値 (GPa)	最大値 (GPa)	最小値 (GPa)	変動係数
Wクーポン	26.76	28.29	25.84	3.5%
W板要素	26.34	27.30	24.61	5.7%
Fクーポン	18.76	20.30	18.10	4.7%
F板要素	21.50	23.01	20.43	6.3%
Eクーポン	18.16	19.61	16.08	7.2%

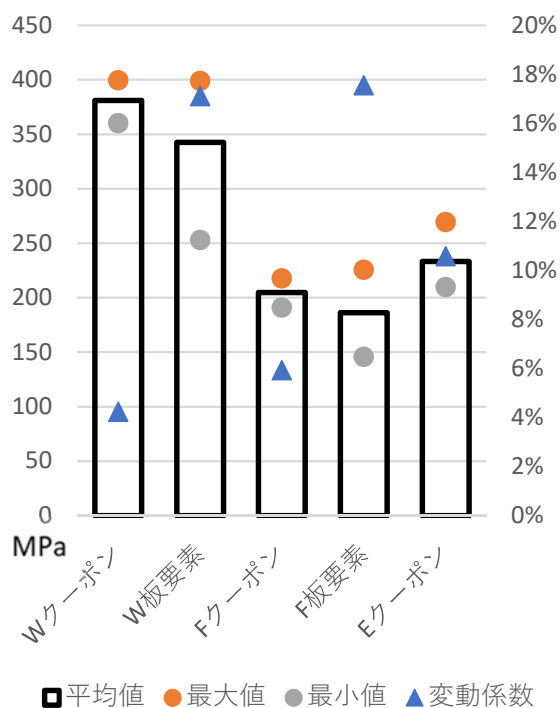


図-9 2方向材引張強度

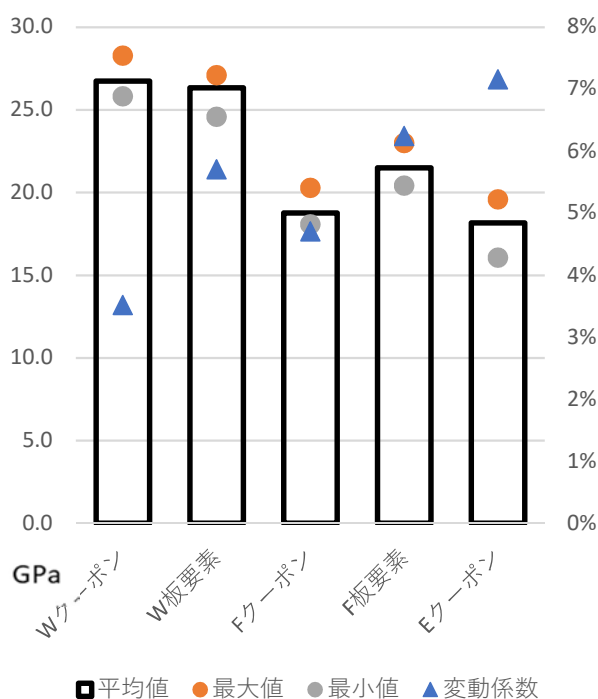


図-10 2方向材引張弾性率

3. 実験結果の考察

(1) 1方向材と2方向材の比較

1方向材と2方向材の平均引張強度を比較するために、図-11に、それぞれの結果を示す。

図-11より、すべての結果において、1方向材の方が強

度が大きいことが分かる。これは、部材軸方向に入っている繊維量が1方向材の方が2方向材より多いため、強度が大きくなっていると考えられる。

(2) クーポン試験体と板要素試験体の比較

1方向材、2方向材どちらにおいてもクーポン試験体と板要素試験体の平均引張強度を比較すると板要素試験体の平均引張強度は小さい値を示し、その値は1方向材のフランジを除いてクーポン試験の平均引張強度ではなく、最小引張強度に近い値を示した。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ると予想できる。部材試験においても同じ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ので、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引張強度の最小値を基準にできると考えられる。

(3) 角部の影響

過去の実験結果では1方向材2方向材どちらにおいても角部の引張強度はフランジ、ウェブと比べ小さな値を示したが⁴⁾、今回の引張試験においては1方向材、2方向材どちらにおいても角部のクーポン試験体の平均引張強度はフランジの板要素試験体の平均引張強度より大きな値を示したため、角部の影響で板要素の強度が落ちているとは考えにくい。今回の試験において角部の強度が小さくならなかった要因として以下の点が考えられる。

今回使用した1方向材の部材は図-12に示すように角部が丸まっており、角部における樹脂の割合が減ったため、繊維の割合が増えその影響で角部の強度が他の部位と比べ強度が下がらなかったと考えられる。

2方向材に関しては図-13に示すように樹脂部分に繊維が追加で足されており、その影響で繊維の強度が下がらなかったと考えられる。

4. 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を比較した際、どの部位においても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平均引張強度はフランジの板要素平均引張強度より大きな値を示した。
- 3) 1方向材と2方向材の引張強度を比較すると、1方向材の方が大きな値を示した。
- 4) 板要素試験における平均引張強度とクーポン試験の

最小引張強度に近い値となった。

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。

また、実験結果より繊維量が全体に占める割合が多いほど強度が高くなることが予想できるが、実際に入っている繊維量が分っていないので実際の繊維量を調べる必要がある。

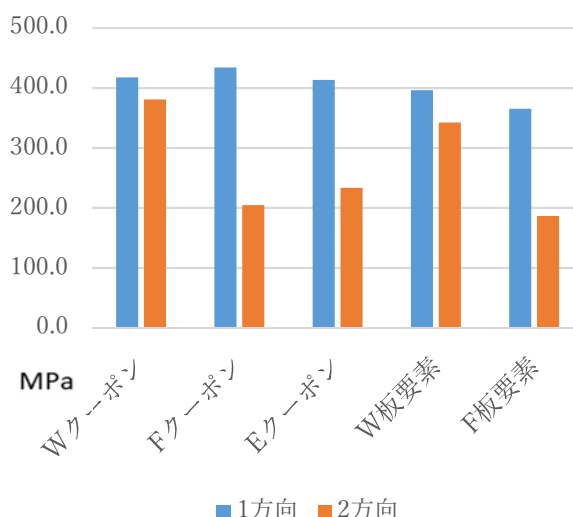


図-11 1方向材と2方向材の引張強度の比較

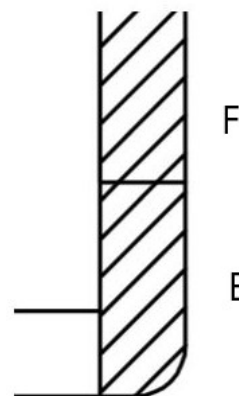


図-12 1方向材 角部断面の模式図

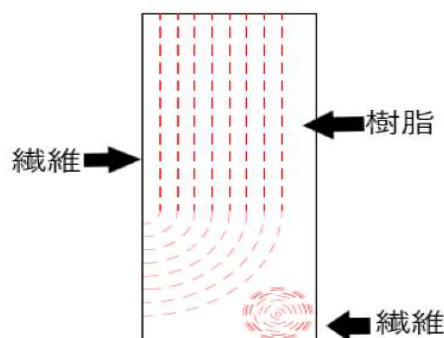


図-13 2方向材 角部断面の模式図

参考文献

- 1) 強化プラスチック協会 編：基礎からわかる FRP—繊維強化プラスチックの基礎から実用まで，コロナ社，pp.1-3,2016.4.
- 2) 土木学会・複合構造委員会・FRP 複合構造研究小委員会：土木構造物用 FRP 部材の設計基礎データ，pp.29,2014
- 3) 土木学会・複合構造委員会・FRP 複合構造研究小委員会：土木構造物用 FRP 部材の設計基礎データ，2014
- 4) 土木学会・複合構造委員会・FRP 複合構造研究小委員会：土木構造物用 FRP 部材の設計基礎データ，pp.208-212,2014

(Received August 30, 2019)

TENSILE STRENGTH EVALUATION MEMBER CONSIDERING FIBER NONUNIFORMITY IN CROSS-SECTION

Yutaro FUTAMI and Kunitaro HASHIMOTO

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

Existing research showed the strength of the FRP member is less than that of the material due to the low fiber content. In order to obtain the strength of a member, it is necessary to perform a member test, but it is difficult to perform the test from a budget and technical aspect, and no test method has been established. Therefore, in this research, we propose 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 tests were performed on plate elements and coupons for comparison.