

土木構造用FRPの物性のばらつきと信頼性

西崎 到* 富山禎仁**

1. はじめに

FRP（繊維強化プラスチック）は、軽量・高強度・腐食しないなどの卓越した性能を活かすことを期待して、近年、土木構造物への実用化が進みつつある。コンクリート構造物補強材として既に広く普及している連続繊維シートやFRPシート材を始めとして、PC緊張材やグラウンドアンカーに使われるFRPケーブル材、下水管・下水道施設の防食・更生材料、FRP水門・樋門、FRP合成床板、FRP歩道橋・検査路など、多岐にわたって適用が進んでいる（写真-1）。FRPの土木における適用が進むにつれ、その構造材料としての適用も増加している。このためFRPの構造材料としての性能評価方法や品質の信頼性に関する知見が安全かつ合理的な設計のために重要であるが、FRPは鋼やコンクリートとは異なる性質を有することから、その性能や信頼性についての情報の集約が必要となっている。このため土木研究所では、FRPの物性の評価方法とその信頼性に関する検討を行ってきたので、本稿ではその一部を紹介する。



写真-1 最近のFRPの土木構造用途の例（左）FRP水門扉体、（右）FRP検査路

2. FRPの物性の特徴とその信頼性

2.1 FRPの基本構造と物性

FRPは簡単に言えば繊維を樹脂で硬化させたものである。土木用途においては、繊維はガラス繊維や炭素繊維が主流であり、樹脂は不飽和ポリエステル樹脂、ビニルエステル樹脂などが用いら

れることが多い。FRP中の繊維の方向は、一方向に束ねてそろえる場合の他、織布あるいは不織布としてなどの使い方があり、多くの場合はこれらを組み合わせた積層材として利用される（図-1）。FRPの物性には、これらの繊維および樹脂の物性および繊維の方向が反映される。繊維の繊維方向の物性は樹脂に比べて強度・弾性率ともに約40倍と大きい。そのため、一方向性が強いFRPの場合には、繊維方向のFRPの物性に繊維の特性が大きく寄与するため、強度・弾性率ともに高くなる。逆に繊維が入っていない方向のFRPの物性は、繊維が入っている方向に比べてかなり小さくなる。また、FRPがある程度複雑な形をして、場所によって入っている繊維の量や方向が異なると、場所・方向によって物性が異なるという結果となるが、製造上のばらつきなどで、各部位の一方向層/織布/不織布の比率変化や、繊維の方向の誤差などが生ずると、FRPの部位による物性のばらつきに影響することとなる。

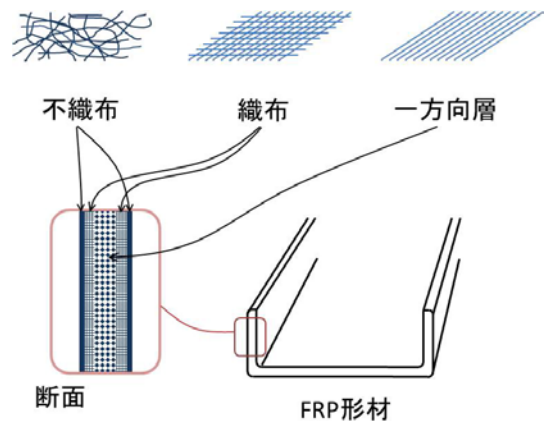


図-1 FRPの典型的な内部構造

2.2 FRPの物性の信頼性

土木構造用FRP材料のばらつきについての先駆的な検討は、連続繊維補強材（FRPケーブル）のPC緊張材への適用に関して行われた例¹⁾があり、技術基準にも材料係数^{*}として反映されている²⁾。文献²⁾におけるFRPケーブルの材料係数 γ_m は、保証荷重（平均値 -3σ ）を材料係数で除し

Reliability and dispersion of the structural FRP for construction applications.

*土木用語解説：材料係数

た場合の不良品発生確率が 1×10^{-6} 以下となる値としている。炭素繊維およびアラミド繊維を用いたFRPケーブルの実験の結果からは材料係数は1.15以上という値を得ており、設計における終局限界状態に対する材料係数は1.15～1.3が設定されている。

ケーブルの場合には全断面で物性を評価することが比較的容易であり、部位による誤差を考慮する必要はないが、より大きな断面形状を有するFRPを構造材料として適用する場合には、部位による材料の物性の相違を考慮する必要がある。また、このような場合の多くでは、FRP部材の物性の品質管理を常に部材試験で実施することは困難であるので、FRP部材から切り出したクーポン試験片による試験で実施することとなり、品質管理の面からも部位による物性の相違の考慮は重要である。FRP部材の形状には様々なものが可能である。土木用途に主に使われるものとしては、比較的単純な板の他に、L（アングル）断面、C形（チャンネル）断面、I形断面などがある。FRPの部位による物性のばらつきは、断面形状が複雑な場合に大きくなりやすいと考えられる。また、土木構造用にはガラス繊維を用いたFRP（GFRP）が多く使われるが、GFRPの材料係数に関するデータは多くないのが現状であった。そこでここでは、これらの断面のうちいくつかのものについて、物性のばらつき程度を、部位による物性の相違とあわせて検討した。

3. FRPの物性のばらつきに関する試験

3.1 供試体

FRP引抜成形材（チャンネル材）を用い、ここからクーポン試験片を採取した。まず長さ1,500mmのFRP引抜成形材をそれぞれ長さ250mmとなるように軸方向に6分割し（図-2）、その各々のウェブ部、フランジ部から図-3に示すように精密切断機を用いて切り出した。

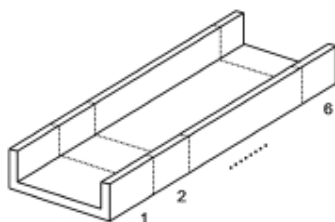


図-2 FRP引抜成形材（チャンネル材）の軸方向切断図

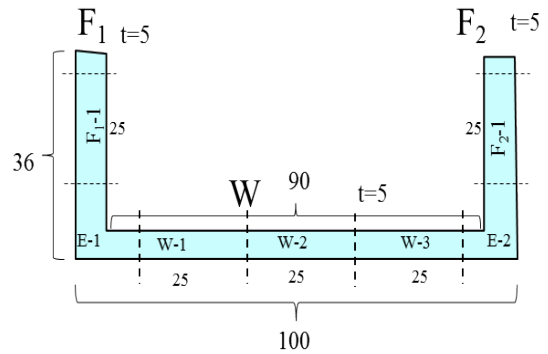


図-3 FRPチャンネル材断面からのクーポン試験片切り出し図

クーポン試験片の寸法は、JIS K7164:2005「プラスチック - 引張特性の試験方法 - 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」に基本的に準拠し、幅25mm×長さ250mm×厚さ5mm程度とした。長さ方向がチャンネル材の軸方向となっている。各試験片の両端部は、幅25mm×長さ50mm×厚さ3mm程度のFRP製のタブを接着剤で貼付した。

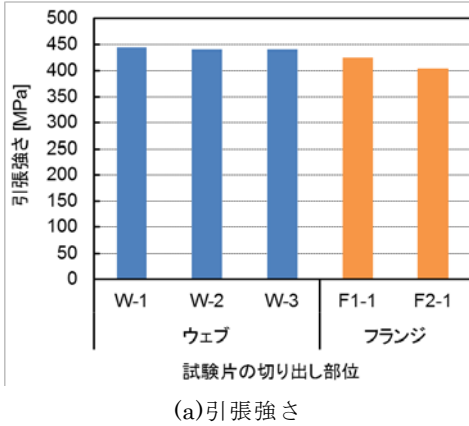
3.2 引張試験方法

クーポン試験片による引張試験は、万能材料試験機を用い、載荷速度を2mm/minとして実施した。試験片の表面・裏面の中央部にはそれぞれひずみゲージを貼付し、試験片の長軸方向の引張ひずみを計測した。引張弾性率は、2点の引張ひずみ 500×10^{-6} および 2500×10^{-6} の区間の応力 - ひずみ曲線の線形回帰によって求めた。

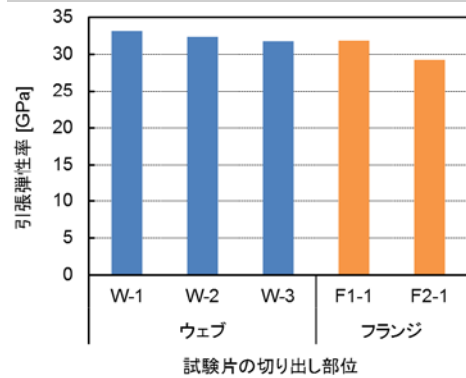
3.3 試験結果

クーポン試験片の引張強さおよび引張弾性率の平均値はそれぞれ430.5MPaおよび31.7GPaとなった。図-4はチャンネル材の引張試験結果を、断面の部位（図-3）ごとに整理したものである。図中の値は軸方向の6本の試験片の平均値である。ウェブ（W-1～3）から切り出したクーポン試験片の引張強さがいずれもおおよそ440MPaであったのに対し、フランジから切り出したF1-1は425MPa、F2-1は403MPaと、やや小さい値となった。特に、F2-1については引張弾性率が約29GPaであり、他の部位（32～33GPa）に比べて低い値となった。これはフランジ部の繊維の含有率がやや少ない方向への製造誤差が生じたことによると推測される。

なお、エッジ部分（E-1および2）についても引張試験の実施を検討したが、異形断面に対応し

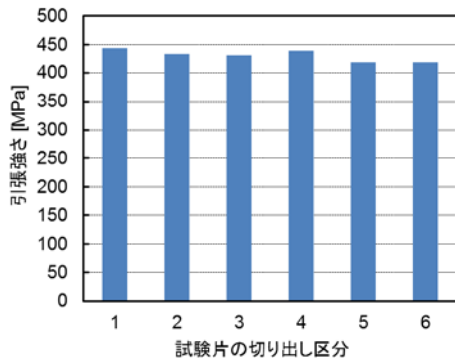


(a)引張強さ

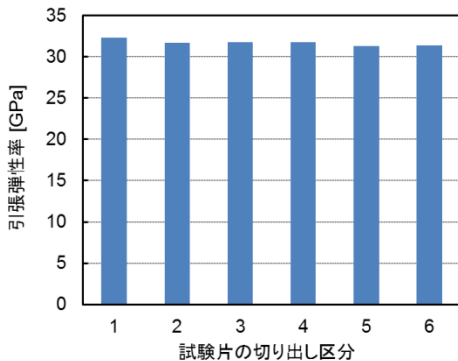


(b)引張弾性率

図-4 クーポン切り出し位置（断面）による引張特性の相違



(a)引張強さ



(b)引張弾性率

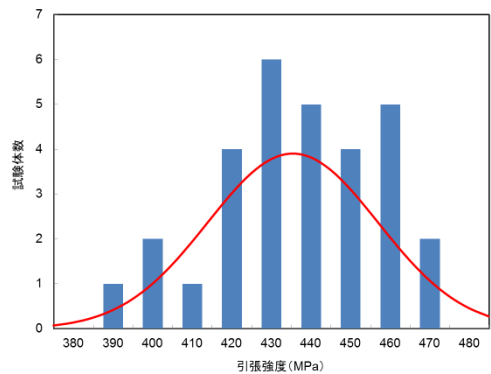
図-5 クーポン切り出し位置（軸方向）による引張特性の相違

た試験方法の工夫が必要なため、現時点では試験の実施に至っていない。

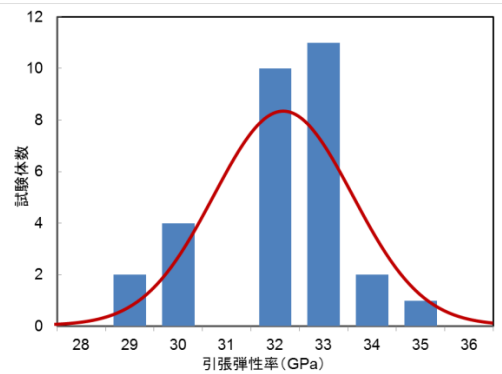
図-5は、チャンネル材の軸方向の各切り出し区分ごとの結果を整理したものである。図中の値は、各切り出し区分について、ウェブ部（W1～3）およびフランジ部（F1-1, F2-1）のそれぞれ5本の試験片の平均値を示している。実験結果を切り出し区分ごとに整理した結果、区分による差異は明確ではなく、チャンネル材軸方向（引抜方向）の引張特性のばらつきは小さいことがわかった。

3.4 材料係数の検討

すべてのクーポン試験片（30本）の引張試験結果をヒストグラムに表したものを図-6（棒グラフ）に示す。図中の赤線は、実験から得られた平均値および標準偏差から得られる正規分布の曲線をあわせて示したものである。標本の数が十分に多いとは言えないものの、おおむね正規分布に近い分布を示しているものと考えられる。



(a)引張強さ



(b)引張弾性率

図-6 クーポン切り出し位置（断面）による引張特性の相違

表-1 FRP引抜成形チャンネル材の材料係数と不良品発生確率（引張強さ）

試料数	平均値 X(MPa)	最小値 (MPa)	標準偏差 σ (MPa)	X-3σ (MPa)	材料係数 γ_m に対応した発生確率					
					$\gamma_m=1.0$	$\gamma_m=1.1$	$\gamma_m=1.15$	$\gamma_m=1.2$	$\gamma_m=1.3$	
30	430.5	381.2	21.49	366.0	$(X-3\sigma)/\gamma_m$	366.0	332.7	318.3	305.0	281.5
					正規偏差	3.00	4.00	5.22	5.84	6.93
					発生確率	1.35×10^{-3}	2.71×10^{-6}	8.89×10^{-8}	2.64×10^{-9}	2.11×10^{-12}

表-2 FRP引抜成形チャンネル材の材料係数と不良品発生確率（引張弾性率）

試料数	平均値 X(GPa)	最小値 (GPa)	標準偏差 σ (GPa)	X-3σ (GPa)	材料係数 γ_m に対応した発生確率					
					$\gamma_m=1.0$	$\gamma_m=1.1$	$\gamma_m=1.15$	$\gamma_m=1.2$	$\gamma_m=1.3$	
30	31.7	28.7	1.43	27.4	$(X-3\sigma)/\gamma_m$	27.4	24.9	23.8	22.8	21.1
					正規偏差	3.00	4.75	5.51	6.20	7.43
					発生確率	1.35×10^{-3}	1.03×10^{-6}	1.84×10^{-8}	2.79×10^{-10}	5.28×10^{-14}

材料係数を算出するには標本の数が十分とは言えないものの、試みに引張強さおよび引張弾性率の分布が正規分布であると仮定し、文献2)の手法を参考に材料係数を求めた結果を表-1および2にそれぞれ示す。この表では、材料係数 γ_m を1.0~1.3とした場合の不良品発生確率を算出している。不良品の発生確率が 1×10^{-6} 以下となる場合を「信頼できる範囲」とすると、引張強さおよび引張弾性率、いずれに対しても材料係数 γ_m は1.15以上必要となることがわかった。この結果は、文献2)で示されているFRPケーブルの材料係数とほぼ同様の値である。

4. まとめ

FRP引抜成形チャンネル材から切り出したクーポン試験片を用いて引張試験を行い、切り出し部位による引張特性の相違、およびばらつき程度を評価した。

チャンネル材の横断方向については、フランジ部の引張強度がウェブ部よりもやや低い結果となった。これは、フランジ部のガラス繊維含有率(V_f)がウェブ部より小さかったことに起因するものと推察される。一方で、チャンネル材軸方向の引張特性のばらつきは、比較的小さい結果となった。

標本の数が十分とは言えないものの、材料係数算出を試みた結果、1.15以上が必要であるとの結

果を得た。これは既存の文献と比較してほぼ同様の値である。

今後は材料の種類や試料数などのデータの拡充により、FRPなどの新しい材料の適切な活用に向けた信頼性向上を図りたい。

参考文献

- 1) 魚本健人他：「プレストレストコンクリート用FRP緊張材の強度と耐久性に関する研究」東京大学生産技術研究所報告、39(2)、1998。
- 2) コンクリートライブラリー88「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)」土木学会、1996。
- 3) JIS K7164:2005「プラスチック - 引張特性の試験方法 - 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」

西崎 到*



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料資源研究グループ新材料チーム 上席研究員、博(工)
Dr. Itaru NISHIZAKI

富山禎仁**



独立行政法人土木研究所
つくば中央研究所材料資源研究グループ新材料チーム 主任研究員、博(工)
Dr. Tomonori TOMIYAMA