

FRPロッドの静的強度と弾性係数

魚本健人*・西村次男**

本研究は、アラミド繊維、ガラス繊維、炭素繊維で一方強化された繊維強化プラスチックロッドをコンクリート用補強材として利用するために最も重要で基礎的な特性である静的引張強度と変形特性を明らかにする目的で、土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法(試案)」に準拠して実施した実験結果ならびに解析結果をまとめたものである。本研究の結果、ロッドの強度は定着具によって影響を受ける可能性があること、変形は塑性ひずみ測定用ワイヤーストレインゲージでは正しい値が求められない可能性があること、試験方法(試案)には改良すべき点があることなどが明らかになった。

Key Words : FRP rod, static strength, strength distribution, Young's modulus, test method

1. 序 論

この数年来、我が国のみならず諸外国においても、多くのプレストレストコンクリート構造物の緊張材(高張力鋼材)が腐食し、社会的にも問題となっている。これらはいずれも沿岸、海洋構造物などの海洋環境下に建設されている構造物か、または融氷剤が多量に散布される橋梁などで、その原因は塩分腐食である。このような厳しい腐食環境下に建設されるプレストレストコンクリート構造物の抜本的な防食策として、現在の高張力鋼製緊張材を、これとほぼ同等以上の引張耐力を有する繊維強化プラスチック(FRP)製緊張材に置き換える方法に関する研究が1980年から小林ら^{1),2)}によって始められた。

一方、近年では磁気浮上型のリニアモーターカーの実用化に関する研究が進んでおり、構造物の補強材として従来の鉄筋やPC鋼材ではなく、非磁性体である材料が必要とされている。中でもFRPロッドは可能性の高い補強材として有望視されている。

このように従来の鋼材では対処できなかった問題を解決する1つの方法として、FRPロッドはプレストレストコンクリートおよび鉄筋コンクリートの分野で注目され、研究および実用化が図られている^{2)~4)}。今後、FRPロッドを構造用コンクリート補強材として広く利用するためには、その特性を十分に明らかにすることが必要である。すでに多くの研究が行われており、様々な角度からFRPロッドの特性が明らかになりつつあるものの、試験方法などが異なっているためこれらの結果を比較検討することができなかった。しかし、1992年4月に土木学会からは各種の試験方法(試案)⁴⁾が発表され、一

応の基盤が整ったものと考えられる。

そこで本研究では、これらのFRPロッドをコンクリート用補強材として利用するために最も重要で基礎的な特性であるFRPロッドの静的引張強度および変形特性を明らかにする目的で、土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法(試案)」⁴⁾に基づき、アラミド繊維、ガラス繊維、カーボン繊維を用いた一方強化プラスチックロッド(それぞれAFRPロッド、GFRPロッド、CFRPロッドと略記する)の引張試験を実施した。本論文はその結果ならびに解析結果をまとめたものである。

2. 実験概要

実験は2つにわかれており、第1シリーズではFRPロッドの引張強度と弾性係数およびそのバラツキを調べることが主な目的とし、第2シリーズではFRPロッドの変形特性と変形の測定方法を調べることを目的としている。

表-1に示すように、実験に用いたFRPロッドの補強繊維は、アラミド繊維、ガラス繊維、カーボン繊維の3種類である。また、マトリックスはすべて表-2に示すビニルエステル樹脂で、AFRPとGFRPロッドではRipoxy-R 802、CFRPロッドではRipoxy-H 600である。いずれのFRPロッドも直径6mmの丸棒状で(写真-1参照)、一方強化されており、繊維混入率(V_f)は45%、55%および66%の3種類である。なお、表-1に示した繊維の寸法、強度および弾性係数は、ホドホドらがそれぞれ100本以上のモノフィラメントの試験結果から求めたものである⁵⁾。

FRPロッドの引張試験は、土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法(試案)」に基づいて実施し、定着具は小林らが開発した2つ割りチャック^{1),2)}(写真-2参照)を用いた。このチャックはもともとAFRPロッド

* 正会員 工博 東京大学生産技術研究所 教授
(〒106 港区六本木7-22-1)

** 正会員 東京大学生産技術研究所 技術官

表-1 FRP ロッド用補強繊維の特性¹⁾

種類	アラミド			ガラス			カーボン			
	平均値	12.15	12.77	6.68	0.4141	0.6049	0.4441	0.0341	0.0474	0.0664
寸法 (μm)	標準偏差									
	変動係数									
強度 (kgf/mm^2)	平均値	389	251	335	36	87	52	0.092	0.347	0.155
	標準偏差									
弾性係数 (kgf/mm^2)	平均値	8355	8551	22730	1081	1629	2152	0.129	0.191	0.095
	標準偏差									
	変動係数									

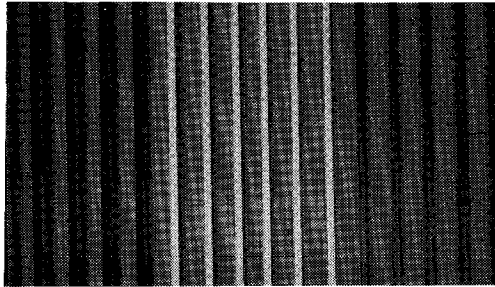


写真-1 実験に用いた各種FRPロッド

用として開発されたものであるが、GFRP および CFRP ロッドの場合にも形状寸法が同じであり、適用上大きな問題はないと考えて使用した。なお、ロッドの定着部表面には保護被覆を施すこととし、下地処理として不飽和ポリエステル樹脂を塗布したのち、不飽和ポリエステル樹脂に鉄粉(300 mesh)を重量比で1:1.8の割合で混合し均一になるよう塗布した。この保護皮膜の厚さは小林らの結果⁹⁾を考慮して厚さ約300 μm とした。

第1シリーズでは、長さ40cmに成形したAFRP、GFRP、CFRPロッドについて、繊維混入率ごとに、同一種類のロッドを一日約20本の割合で試験を行い、100本終了させた後、次に異なる種類のロッドについても同様な方法で引張試験を実施した。試験は変位制御型試験機(オートグラフ:10 ton)を用い、載荷速度を5mm/分とした。各試験片の引張強度は、最大荷重をその断面積(平均直径:6.0mm)で除した値とし、ひずみは普通ワイヤーストレインゲージ(長さ2mm:以下、普通ゲージと略す)で測定した。なお、試験は室温で行い、温度は $20\pm 5^\circ\text{C}$ の範囲であった。

第2シリーズの変形特性試験は、長さ80cmに成形したFRPロッド試験片各3本について実施した。実験に使用した試験機は10tonサーボパルサ(荷重制御型)で、荷重速度は20~22kgf/秒とした。測定項目として、①単調載荷時の応力-ひずみ曲線、②漸増繰り返し載荷(1回ごとに500kgf増)を行った場合の応力-ひずみ曲線、③漸増20回繰り返し載荷(下限応力比を各FRPロッドの平均引張強度の25%とし、上限応力比を50, 75, 85%とした)を行った場合の応力-ひずみ曲線をそれぞれ求め、割線弾性係数を求めた。ひずみの測定はひずみゲージ式伸び計(EDP-5A-50, 伸び計の

表-2 FRP用マトリックスの特性¹⁾

種類	Ripoxy -R 802		Ripoxy -H 600		
	平均値	8.49	6.70	0.115	0.496
引張強度 (kgf/mm^2)	標準偏差				
	変動係数	0.01	0.07	3.11	4.00
弾性係数 (kgf/mm^2)	平均値	3.7	3.9	0.01	0.01
	標準偏差				
ポアソン比 (ν)	平均値	0.335	0.351	0.005	0.004
	標準偏差				
破断時伸び (%)	平均値	5.22	1.95	0.15	0.11
	標準偏差				
	変動係数	0.02	0.14	0.02	0.14

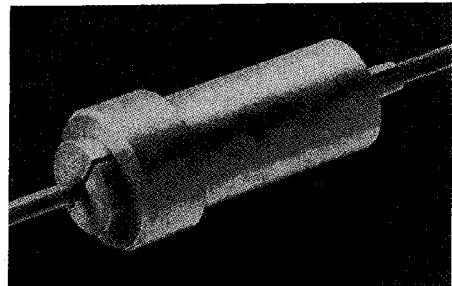


写真-2 使用した2つ割定着治具

ゲージ長50mm, 5mm変位繰り返し測定で誤差0.03%:以下, 伸び計と略す)を基準とし、従来使用されている普通ワイヤーストレインゲージ(長さ2mm:以下, 普通ゲージと略す)と塑性ワイヤーストレインゲージ(長さ5mm:以下, 塑性ゲージと略す)とを比較した。なお、塑性ゲージおよび普通ゲージはロッド中央の表面にいずれも対称に2枚ずつ貼付した。

3. 引張強度試験結果と考察

(1) 静的引張強度とバラツキ

各種FRPロッドの引張強度と弾性係数の平均値、標準偏差、変動係数を表-3にまとめて示す。

図-1(a)~(c)は、各種FRPロッドの繊維混入率(V_f)を45~66%と変化させたときの引張強度と破壊確率との関係を示したものである。これらの結果より(a)のAFRPロッドでは、バラツキの違いは多少あるものの、繊維混入率が増加すると、引張強度はほぼ繊維混入率に比例して増大している。また(b)のGFRPロッドは、繊維混入率が45%および55%の場合にはAFRPロッドと同様な傾向となっているが、繊維混入率が66%の場合には引張強度の増大があまり認められない。しかし(c)のCFRPロッドでは、AFRPロッドおよびGFRPロッドの傾向とは明らかに異なり、バラツキも大きく繊維混入率を増しても引張強度の増大にはあまり寄与していない。

図-2(a)~(c)は、図-1の各種FRPロッドの引張強度をそれぞれの繊維混入率で除した値、すなわち織

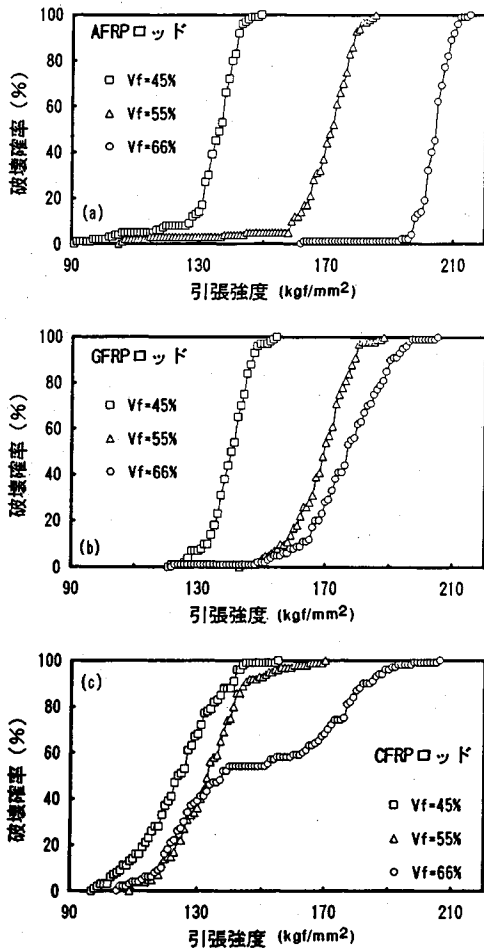


図-1 各種FRPロッドの引張強度と破壊確率の関係

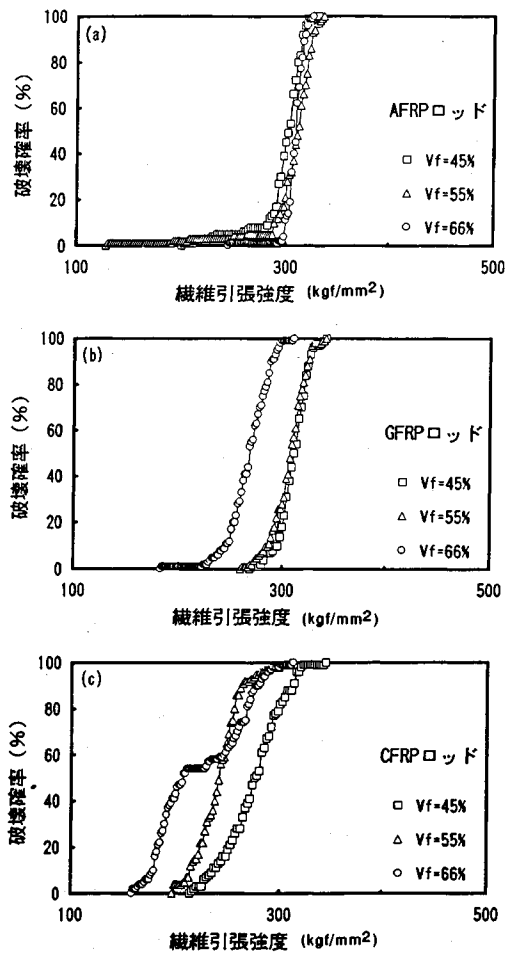


図-2 各種FRPロッドの繊維引張強度と破壊確率の関係

表-3 FRPロッドの強度と弾性係数

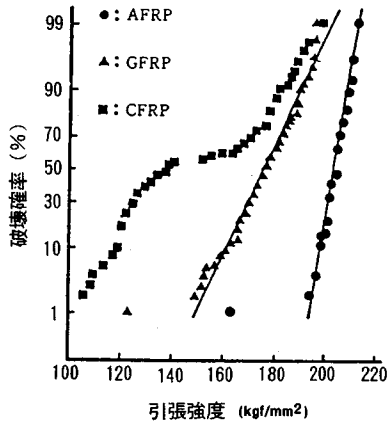
	Vf	種類	AFRP	GFRP	CFRP
強度 (kgf/mm ²)	45%	平均値	135	140	124
		標準偏差	9.49	5.83	11.8
		変動係数	0.0703	0.0416	0.0952
	55%	平均値	169	169	134
		標準偏差	14.8	8.53	11.2
		変動係数	0.0876	0.0505	0.0836
	66%	平均値	204	177	148
		標準偏差	5.73	12.2	27
		変動係数	0.0281	0.0689	0.1824
弾性係数 (kgf/mm ²)	45%	平均値	3748	4274	11202
		標準偏差	216.1	52.2	259.5
		変動係数	0.0576	0.0122	0.0232
	55%	平均値	4570	5211	13530
		標準偏差	194.5	47.6	236.3
		変動係数	0.0428	0.0091	0.0175
	66%	平均値	5460	6024	15714
		標準偏差	241.2	101.2	379.4
		変動係数	0.0442	0.0168	0.0241

維混入率の影響を取り除いた繊維引張強度と破壊確率との関係を示したものである。この図より (a) のAFRPロッドでは繊維混入率に関係なくほぼ同じ強度分布となり、繊維平均引張強度はいずれの繊維混入率でも約308 kgf/mm²となった。(b) のGFRPロッドでは繊維混入

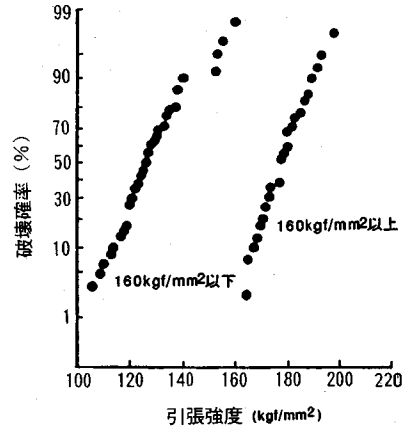
率 (Vf) が45%および55%ではほぼ同じ強度分布となり、繊維平均引張強度はいずれの繊維混入率でも約310 kgf/mm²となった。しかし、繊維混入率が66%になると繊維平均引張強度は約270 kgf/mm²に低下する。一方、(c)のCFRPロッドでは、AFRPおよびGFRPロッドとは異なり、強度分布が各々の繊維混入率で異なるばかりでなく、繊維平均引張強度は繊維混入率45%で276 kgf/mm²、55%で243 kgf/mm²、66%で224 kgf/mm²となり繊維混入率の少ないものほど繊維平均引張強度は高くなっている。

図-3は、FRPロッドの強度がどのように分布しているかを調べるために、繊維混入率66%の場合を例に取り、実験で得られたFRPロッドの強度を正規確率紙にプロットしたものである。

この図から明らかなように、AFRPロッドおよびGFRPロッドでは、バラツキの違いはあるもののほぼ直線関係が得られており、これらの破壊強度はいずれも正規分布であると判断しても大きな間違いはないと考え



図—3 各種 FRP ロッドの引張強度と破壊確率の関係 (正規確率紙へのプロット, 繊維混入率 66%)



図—4 CFRP ロッドの引張強度と破壊確率の関係 (正規確率紙へのプロット, 繊維混入率 66%)

られる。なお、AFRP ロッドではバラツキが少なく (標準偏差 5.7 kgf/mm²), GFRP ロッドは AFRP ロッドに比してバラツキは大きい (標準偏差 12.2 kgf/mm²)。しかし、CFRP ロッドは他のロッドと異なり直線関係が認められず、高応力レベル, 中応力レベル, 低応力レベルの 3 段階に分類できる。また、CFRP ロッドはバラツキが他のロッドに比較して大きいだけでなく、平均引張強度が 148 kgf/mm² と最も低い値であり、繊維強度から判断するともっと高い強度が得られても良いはずである。そこで、この原因を調べるために次のような検討を行った。

(2) CFRP ロッドの引張強度のバラツキと破壊形式

一般に、FRP では繊維の破損、マトリックスの割れ、繊維とマトリックスの界面剥離または部分割がれ、縦割れなど多くの破壊モードが存在し、条件によって異なった破壊が生じる。本研究で行った CFRP ロッドにおいて図—3 のような特異な分布が発生した原因は、このロッドの破壊形式が条件によって異なっていたためではないかと考えられる。事実、これらの FRP ロッドの破断性状をみると、AFRP ロッドおよび GFRP ロッドは強度に関係なくほぼ同様な破壊形式であり、定着部分の抜けと繊維破断が同時に生じていたが、CFRP ロッドでは条件によって異なった破壊となり、①抜けと同時の定着部近傍での一部破断、②「ほうき状」の破壊、③これら①②の混在型破断の 3 つに分類することができた。そこで、CFRP ロッドの 160 kgf/mm² 以上となった (ほぼ①に相当) データと、それ以下となったデータ (ほぼ②に相当) をわけて正規確率紙にプロットすると図—4 に示すように 2 本の直線で近似することができた。

以上のことを考慮して、図—4 に示されている CFRP ロッドの高応力レベル, 中応力レベル, 低応力レベルの 3 段階に分かれている強度特性を次のように考える。すなわち、ロッドの破断を大きく 2 種類の原因 (例

えば①応力集中による繊維破断と②繊維とマトリックスの界面破断) で破壊したと考え、さらに両者が混在して破壊する領域を第 3 の破壊として分類する。①と②とはお互いに独立した現象であると考え、それぞれが異なった分布をしているが、ロッド全体の破壊は各々の混合型破壊であるとする。

図—3 の結果を尊重して、①と②はそれぞれ正規分布であると仮定し、①で生じた破壊の割合を p_1 、②で生じた破壊の割合を p_2 とすればロッド全体としての破壊確率密度関数 $f(x)$ は次式であらわせる。

$$f(x) = p_1 \cdot f_1(x) + p_2 \cdot f_2(x) \dots \dots \dots (1)$$

ただし

$$p_1 + p_2 = 1$$

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right]$$

$$f_2(x) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2} \right]$$

μ_1, μ_2 : 各々の平均値

σ_1, σ_2 : 各々の標準偏差

この考えに基づいて図—3 に示したデータを 2 種類に分類し、160 kgf/mm² を境にこれ以上の値となったものとこれ以下の値となったものの平均値と標準偏差を求めると $p_1 = 0.4$, $p_2 = 0.6$ となり、次に示す値が求められる。

160 kgf/mm² 以上: 平均値 $\mu_1 = 178.1$ kgf/mm²,
標準偏差 $\sigma_1 = 9.3$ kgf/mm²

160 kgf/mm² 以下: 平均値 $\mu_2 = 127.7$ kgf/mm²,
標準偏差 $\sigma_2 = 11.5$ kgf/mm²

これらの結果を用いて引張強度の頻度分布を式 (1) により計算すると図—5 に示すようになり、上述の①, ②, ③に分類することができる。また、累積頻度の計算値と試験値を比較すると図—6 に示す結果となる。

図—6 から明らかなように、計算値と実測値はよく一

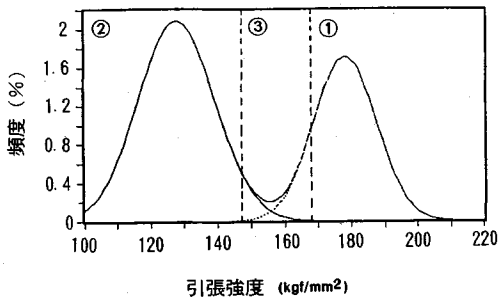


図-5 CFRP ロッドの引張強度の頻度分布の計算結果

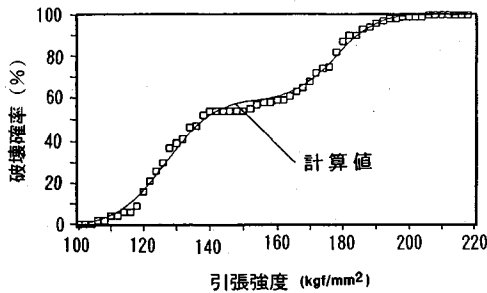


図-6 累積頻度の計算値と実測値の比較 (CFRP ロッド)

致しており、上記の考え方はほぼ妥当なものであると
言うことができる。すなわち、CFRP ロッドの強度分布
が図-3に示したようになったのは、このロッドの場合
には2つの異なった破壊形式があり、それぞれが独立し
て生じているために発生した現象であると考えられる。
この2つの異なった破壊形式としては、本実験に用いた
定着具と破壊性状を考慮すると①応力集中による定着部
近傍での繊維破断 (160 kgf/mm² 以上の場合に相当) と
②繊維とマトリックスの界面破壊 (160 kgf/mm² 以下
の場合に相当) が主な原因であると推定される。これは、
CFRP ロッドの場合、繊維の伸び率が1%程度と小さく、
定着部の応力集中による影響を受けやすいことが原因
であると推定される¹¹⁾。なお、①の分布曲線から求め
たロッドの繊維平均引張強度は

$$178/0.66=270 \text{ kgf/mm}^2$$

となり、繊維混入率45%の繊維強度に近い値となる。

(4) 引張強度と試験本数

図7(a)~(c)は、上記の各種FRP ロッド100本の
引張試験結果をもとに、試験片本数(n)を3本から90
本までランダムに各々100回選り出して、各平均強度を
求め、その最大値と最小値を100本で実施した平均強度
との比で示した図である。この図から明らかなように、
繊維混入率によって多少の違いはあるが、同じ100本の
平均強度との偏差が最も小さいものはGFRP ロッドで
あり、CFRP ロッドが最も偏差が大きい。例えば試験
片本数10本であっても、AFRP ロッドでは偏差が約5

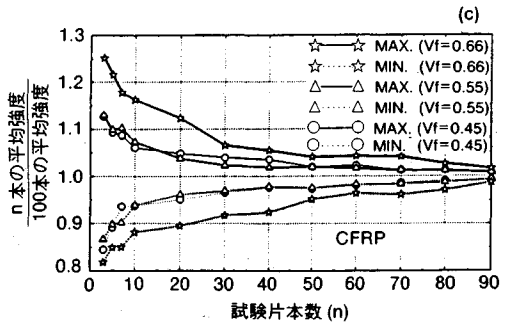
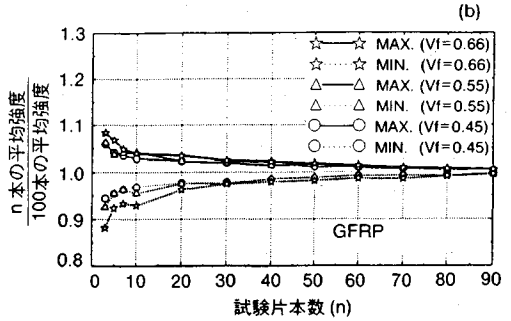
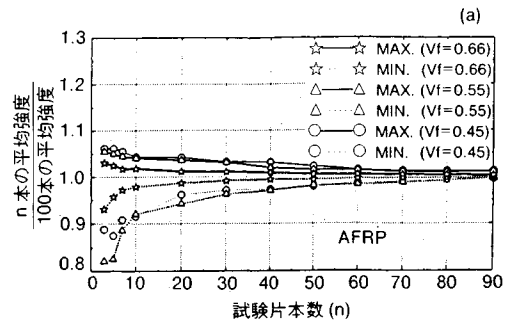


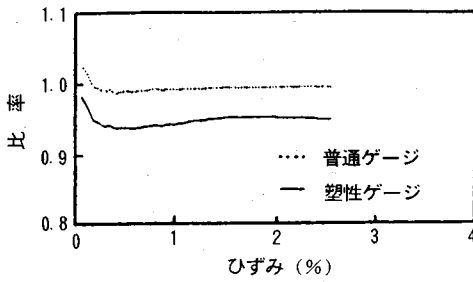
図-7 平均強度比と試験片本数の関係

表-4 母集団の平均値推定所要本数 (危険率10%)

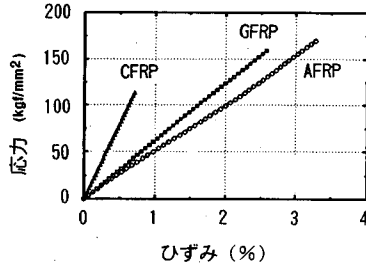
繊維混入率	CFRP	AFRP	GFRP
45%	7	9	10
55%	7	13	8
66%	12	10	11

~9%, GFRP ロッドでは約4~8%, CFRP ロッドで
は約17~12%となっている。

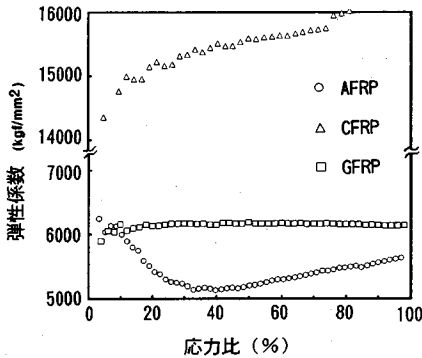
一方、これらの実験データを用いて、危険率10%で
母集団の平均値を推定するのに必要な試験本数を求める
ために、100本で実施した試験の平均値を母集団の平均
値と仮定して必要な本数を求めると表-4に示すとおり
となる。なお、ここではいずれの試験本数の場合にもラン
ダムに100組の値を選定し、その平均値と標準偏差から
母集団の平均値を推定したときに、危険率10%で推
定できる本数とした。この表から明らかなように、母集



図—8 伸び計を基準とした普通ゲージおよび塑性ゲージの測定値比率 (GFRP)



図—9 各種 FRP ロッドの単調載荷時の応力—ひずみ曲線



図—10 単調載荷時の応力比と割線弾性係数の関係

団を推定するのに必要な本数は繊維種類および繊維混入率によって異なり7~13本となる。すなわち、本研究で実施した繊維混入率45%~66%のFRP ロッドでは、定着具の影響までも含めると危険率10%で母集団の平均値を推定するためには、AFRP ロッドでは試験本数を13本以上、GFRP ロッドでは11本以上、CFRP ロッドでは12本以上必要となる。なお、すでに土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法 (試案)」⁹⁾では「試験片の本数を5本以上」としているが、本研究の結果を考慮すると試験本数5本ではAFRP ロッド、GFRP ロッド、CFRP ロッドのいずれの場合にも、危険率が10%を超えることになる。

表—5 単調載荷における最大応力85%時のひずみの比率

(Vf=66%)

	AFRP	GFRP	CFRP
塑性ゲージ	0.908	0.960	0.993
普通ゲージ	0.958	1.023	1.009

(伸びのひずみを1とした)

表—6 弾性係数の求め方による値の比較

(普通ゲージ)

繊維混入率	項目	AFRP	GFRP	CFRP
45%	平均値 ①	3760	3848	10229
	土木学会②	3391	4220	11292
	②/①	0.90	1.10	1.10
	計算値 ③	3748	4274	11202
	①/③	1.00	0.90	0.91
	②/③	0.90	0.99	1.01
55%	平均値 ①	4595	4703	12502
	土木学会②	4363	5209	13541
	②/①	0.95	1.11	1.08
	計算値 ③	4570	5211	13530
	①/③	1.01	0.90	0.92
	②/③	0.95	1.00	1.00
66%	平均値 ①	5514	5644	15002
	土木学会②	5043	5986	15968
	②/①	0.91	1.06	1.06
	計算値 ③	5460	6024	15714
	①/③	1.01	0.94	0.95
	②/③	0.92	0.99	1.02

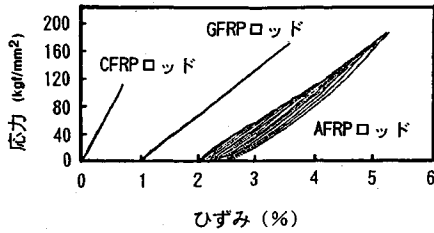
(①、②、③の単位はkgf/mm²)

4. 変形特性試験結果と考察

(1) FRP ロッド単調載荷時の応力—ひずみ曲線と弾性係数

図—8は、一例としてGFRP ロッドの単調載荷試験時における応力—ひずみ曲線の関係から、伸び計で得られたひずみの値を基準とし、普通ゲージおよび塑性ゲージの値を比率で表したものである。また表—5は伸び計を基準にして各種FRP ロッドのひずみ測定値の比率を求めたものである。なお、試験に先立ち8種類の接着剤を使用し、最も変形追従性の良いものを使用した。

これらの結果より静的単調載荷の場合に伸び計と5%以内の誤差で測定できるのは普通ゲージであって、塑性ゲージの場合にはAFRP ロッドのように測定値が10%も実際の値より小さな値となる場合があることに注意が必要である。この原因は、本実験で用いた塑性ゲージの保証適用範囲が0%~15%であったにもかかわらず、一般に塑性ゲージは大ひずみである5%~15%の範囲を精度良く測定できるように製造されていたため、0%~5%の範囲では若干低めの値となる傾向をもっていたからである。本実験で得られた結果を考慮すると、CFRP のように最大ひずみが小さいFRP ロッドを除き、単調載荷の場合でもひずみは伸び計または普通ゲージで求めるのがよいと考えられる。なお、最大ひずみまでを求めようとする場合には、伸び計の損傷などを考慮すると普通ゲージで測定することが望ましい。(製造者の話によると、本実験結果を考慮し、現在ではこれらの塑性ゲージも改良が加えられ、小さなひずみからでも精



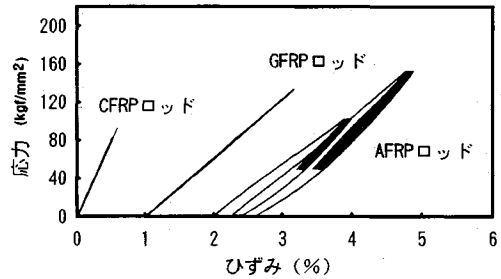
図一11 漸増繰り返し載荷における応力-ひずみ曲線

度良く測定することが可能となったとのことである。）

図-9は各種FRPロッドの単調載荷時(応力比85%)による応力-ひずみ曲線を示したものである。なおCFRPロッドの場合については破断の恐れがあるので応力比65%で伸び計を取り外した。この図よりFRPロッドによる応力-ひずみ曲線に若干の違いはあるものの、マクロに見れば各種FRPロッドの応力-ひずみ曲線を直線で近似できよう。しかし、詳細に検討するとGFRPロッドは直線と見なせるが、AFRPロッドおよびCFRPロッドは直線からやや外れている。すなわち、AFRPロッドは低応力の範囲でひずみの増分が大きくなり高応力になるにしたがってひずみの増分は少なく下に凸状の曲線となっている。一方、CFRPロッドでは、わずかではあるが初期の段階から下に凸状の曲線となり、高応力になるにしたがってひずみの増分が小さくなっている。このことはAFRPロッドとCFRPロッドの場合には、高応力になるにしたがって弾性係数も増大することになり、設計および解析上問題点が生じる可能性があることを示している。

図-10は、図-9の応力-ひずみ曲線より、荷重が200kg(7kgf/mm²)となった時点をもとに、破断時までのひずみを荷重100kgごとに測定して求めた割線弾性係数を示したものである。この図よりGFRPロッドでは荷重が増加しても割線弾性係数はほぼ一定であるのに対して、CFRPロッドは直線的に増加し、またAFRPロッドは一度低下してから増大する曲線となっていることが明らかである。この結果を考慮すると応力-ひずみ曲線は、GFRPロッドは1次曲線、CFRPロッドは2次曲線およびAFRPロッドは3次曲線で近似されることになる。なおCFRPロッドの応力-ひずみ曲線を直線近似すると弾性係数の最大誤差は7%程度、AFRPロッドでは13%程度生じることになる。

以上の結果より単調載荷時における弾性係数は、GFRPロッドではほぼ一定値となるがCFRPロッドおよびAFRPロッドでは微小応力区間における変形量が荷重によって異なり、弾性係数は一定値とならないことが明らかになった。しかし、土木学会の「連続繊維補強材の引張試験方法(試案)」⁹⁾では保証強度の10%



図一12 漸増繰り返し20回載荷における応力-ひずみ曲線

表一7 漸増繰り返し載荷時の残留ひずみの比率

	(V _f =66%)		
	A FRP	G FRP	C FRP
塑性ゲージ	1.207	4.263	0.408
普通ゲージ	1.182	3.245	0.310

(伸び計を用いた際の残留ひずみを1とした)

表一8 漸増繰り返し20回載荷時の残留ひずみの比率

	(V _f =66%)		
	A FRP	G FRP	C FRP
塑性ゲージ	1.528	15.563	0.548
普通ゲージ	1.223	9.372	0.303

(伸び計を用いた際の残留ひずみを1とした)

と50%の2点間で求めることになっており、CFRPロッドおよびAFRPロッドの場合には破断近くの値より小さな値として測定されることになる。

そこで表-6に土木学会で定められた方法で求めた弾性係数②と、破壊時までの平均割線係数①とを比較した結果(②/①)をまとめて示す。この表から明らかなように、弾性係数の求め方によって10%程度の違いが存在する。特にAFRPロッドの場合には、最大荷重の10%~50%の範囲が最も弾性係数が小さい領域となることから、他のFRPと異なった傾向が認められる。

以上の結果から、FRPロッドの弾性係数は応力比によって異なる場合があるため、土木学会の試験方法(試案)では述べられていないが、実際に使用する応力近傍での弾性係数を求めることが必要であると考えられる。

(2) FRPロッド漸増繰り返し載荷時の応力-ひずみ曲線と弾性係数

漸増繰り返し1回載荷試験ではAFRPロッドおよびGFRPロッドはともに応力比で85%までとし、CFRPロッドでは65%までの漸増載荷を行ったときの応力-ひずみ曲線を求めた。漸増繰り返し20回載荷実験では下限値を一定(応力比25%)とした。AFRPロッドおよびGFRPロッドでは上限応力比を50%、75%とし、それぞれ20回の漸増繰り返し載荷を行ったときの応力-ひずみ曲線を求めた。なお、いずれの試験に用いたFRPロッドも繊維混入率は66%である。

図-11は伸び計を用いて測定した各種FRPロッド

表一 混合則による引張強度の計算値と実測値の比較

繊維混入率	項目	A FRP	G FRP	C FRP
4 5 %	実測値 ①	134.5	140.1	124.4
	計算値 ②	175.1	113.0	150.8
	①/②	0.77	1.24	0.83
5 5 %	実測値 ①	169.9	168.9	133.5
	計算値 ②	214.0	139.1	184.3
	①/②	0.79	1.22	0.72
6 6 %	実測値 ①	204.2	176.9	148.4
	計算値 ②	256.7	165.7	221.1
	①/②	0.80	1.07	0.67
				0.81*

(①、②の単位はkgf/mm²、*印は $\sigma=100\text{kgf/mm}^2$ 以上の実測値の平均値を計算値で除した値)

の漸増繰返し载荷 (1 回ごと 500 kgf 増) における応力—ひずみ曲線を示したものである。また普通ゲージおよび塑性ゲージでも同時に測定を行い、その結果を表一 7 (伸び計の値を基準としてそれぞれ比率で表したものである) に示す。

この図より、CFRP ロッドおよび GFRP ロッドの場合には、漸増繰返し载荷を行ってもほとんど残留変形が認められず、応力—ひずみ曲線は静的単調载荷時とほとんど変わらない。しかし、AFRP ロッドの場合には、処女载荷部分は単調载荷時とほぼ同じ曲線となっているが、荷重低下時および再载荷時にはその曲線がはずれ、2 次曲線に近い軌跡をたどっている。また、CFRP ロッドおよび GFRP ロッドでは、荷重除下後のひずみは、最大ひずみに対して 2~3% の残留ひずみであるのに対して AFRP ロッドでは約 18% 近くの非常に大きな残留ひずみが生じている。このため、どの応力レベルで比較するかにもよるが、AFRP ロッドの場合、漸増 1 回繰返し载荷時の弾性係数は、単調载荷で得られた弾性係数より大きな値となっている。応力 0 の点を基準として割線弾性係数を求めると、応力比 20% 以下ではその違いは 5% 以下であるが、応力比 85% では 20% 以上である。

図一 12 は漸増繰返し 1 回载荷の場合と同様に、伸び計を用いて測定した各種 FRP ロッドの漸増繰返し 20 回载荷における応力—ひずみ曲線を示したものである。また、普通ゲージおよび塑性ゲージでも同時に測定を行い、伸び計の値を基準とした残留変形の比率を表一 8 に示した。

この図より漸増繰返し 1 回载荷の場合と同様に、CFRP ロッドおよび GFRP ロッドでは荷重除下後のひずみは最大ひずみに対して 1.5~2.5% の残留ひずみであり、弾性係数もほとんど変化していない。しかし、AFRP ロッドでは最大ひずみの約 18% という大きな残留ひずみが生じているとともに、いずれの応力比の場合にも処女载荷時と繰返し载荷時では応力—ひずみ曲線が大きく変化し、繰返し時には処女载荷時よりも大きな弾性係数となっている。この図に示した応力比 25%

~50% と 25%~85% の場合には、弾性係数は処女载荷時の 1.53 倍と 1.47 倍となっている。

図一 11 および図一 12 で得られた結果から明らかなように、GFRP ロッドと CFRP ロッドでは弾性係数もほとんど変化せず大きな残留ひずみも生じないが、AFRP ロッドは、繰返し载荷を受けると弾性係数が大きく変化するとともに大きな残留ひずみが生じる。AFRP ロッドでこのような現象が生じたのは、測定方法によるものではなく繊維そのものの特徴であると判断される。主たる原因は、高分子系複合材料からなるアラミド繊維は繊維構造中に剛性の異なる部分が存在するためではないかと考えられるが、今後の検討が必要であろう。この現象を考慮すると、AFRP ロッドの場合には 4. 1 で述べた単調载荷試験で求めた弾性係数が、限定された条件での値となることに注意が必要である。繰返し荷重などを受ける構造物に適用する場合には、使用荷重まで数回以上繰返し载荷した後に求めた弾性係数を用いる必要がある。この場合、残留ひずみにも注意が必要である。

表一 7 および表一 8 より、漸増繰返し载荷を行った場合、AFRP ロッドと GFRP ロッドでは、普通ゲージおよび塑性ゲージを用いて測定すると、伸び計に比べ大きな残留ひずみが測定されることになる。特に GFRP ロッドでは漸増繰返し 1 回载荷の場合、伸び計に比較して 3~4 倍強、漸増繰返し 20 回载荷行った場合に 9~15.5 倍強の残留ひずみが測定されているが、これは伸び計で求めた残留ひずみがほぼ 0 であるために大きな値として現れたものである。また CFRP ロッドでは、いずれの場合にも伸び計の値の方が大きい、いずれの方法でも残留ひずみが $10\sim 30 \times 10^{-6}$ であり、実用上の問題はないと考えられる。

これらの結果から、CFRP ロッドの場合には測定上の問題はないが、AFRP ロッドや GFRP ロッドのように 3% 程度までの大きな変形を繰返し受ける繰返し载荷の場合には、普通ゲージや塑性ゲージで測定すると実際の値よりも大きな残留ひずみが測定されるという測定上の問題がある。これはひずみゲージそのものが塑性変形してしまうためであり、塑性ゲージの場合に著しい。このことを考慮すると、確実に残留ひずみを測定するためには伸び計を用いて測定するのが望ましい。

5. 引張強度、弾性係数と混合則

一般に FRP のような複合材料の場合には、「混合則」が成り立つと考えられているが、繊維とマトリックスの強度および弾性係数から FRP ロッドの強度および弾性係数を推定することができるであろうか。混合則で強度 (σ) と弾性係数 (E) を求めると次式となる。なお、混合則では、次のように仮定されている。

- ①繊維とマトリックスは完全弾性体である。
- ②繊維とマトリックスの付着は完全である。
- ③ひずみ ε のときに繊維破断とマトリックス破壊が同時に生じる。

$$E = E_1 V_f + E_2 (1 - V_f) \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma = \varepsilon E = \sigma_1 V_f + \sigma_2 (1 - V_f) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 E ：ロッド全体としての弾性係数

E_1 ：繊維の弾性係数

E_2 ：マトリックスの弾性係数

σ ：ロッド全体としての強度

σ_1 ：繊維強度

σ_2 ：マトリックス強度

V_f ：繊維混入率

なお、マトリックスの弾性係数および強度が、繊維の弾性係数および強度に比べてはるかに小さいことから次のように近似することができる。

$$E \approx E_1 V_f \dots\dots\dots (4)$$

$$\sigma \approx \sigma_1 V_f \dots\dots\dots (5)$$

表一六および表一九にそれぞれのFRPロッドの実験値と計算値ならびにその比(実験値/計算値)をまとめて示す。なお、計算に用いた繊維強度および弾性係数は表一に示した値であり、ロッドの弾性係数は破壊までの平均弾性係数である。

この表から明らかなように、弾性係数の場合には実験値は計算値の0.90~1.02の範囲に入っているが、強度の場合には0.67~1.24となっている。すなわち、弾性係数の場合には混合則を用いてロッドの値を求めてもほぼ実験値と等しい値を得ることができるが、強度については必ずしも正しい値とはならない。これはホドホドらが述べているように、繊維とマトリックスとの付着が完全であっても、繊維そのものの強度がばらついているため平均強度では論じられないこと^{9),10)}、CFRPロッドの場合のように破壊時伸びが小さいロッドの場合には定着部での応力集中の影響が卓越すること¹¹⁾、AFRPのように繊維破壊時近傍の伸び量ではマトリックスがほとんど力を伝達しないことなどがあるためである。

6. 結 論

本研究で得られたことをまとめると次のとおりとなる。

- ①繊維混入率45%~66%のAFRPおよび45%と55%のGFRPロッドでは、繊維混入率を増すことにより引張強度はほぼ繊維混入率に比例して増大する。しかし、CFRPロッドでは繊維混入率を増大させても繊維混入率に比例した強度増加は認められなかった。
- ②AFRPおよびGFRPロッドの強度は、いずれの場合にもほぼ正規分布となり、変動係数は10%以下である。

③CFRPロッドの場合には、本研究で使用した定着具では定着部の応力集中が原因と考えられる破壊が認められ、その結果繊維混入率を増大させても強度の増加が認められなかったと考えられる。

④定着具の影響をも含めたロッドの強度のパラツキを考慮すると、危険率10%以下で母集団の平均値を推定するためにはAFRPロッドで13本以上、GFRPロッドで11本以上、CFRPロッドで12本以上必要となる。土木学会の「引張試験方法(試案)」で規定している5本以上では、母平均の推定は危険率が10%を超えることになる。

⑤ロッドの応力-変形曲線は、GFRPではほぼ直線となり、CFRPでは下に凸の2次曲線に、AFRPでは低応力で上に凸で高応力で下に凸の3次曲線となる。

⑥ロッドの弾性係数は、繊維混入率にほぼ比例するが、最大荷重の10~50%で求める土木学会方式では、全体の平均値で求めた場合よりAFRPの弾性係数は1割程度小さく、CFRPの弾性係数は1割程度大きく評価することになる。

⑦AFRPロッドの場合、繰り返し载荷を行うと処女载荷時に比べ大きな弾性係数となることから、使用条件を考慮した試験を行うことが必要となる。

⑧繰り返し载荷を行った場合、GFRPおよびCFRPロッドは最大変形量の2%以下の残留変形しか生じないが、AFRPロッドの場合18%程度の残留変形が生じる。

⑨ロッドの変形を測定する場合、静的単調载荷では普通ゲージまたは伸び計で測定することが望ましく、塑性ゲージを用いる場合には0~5%程度までを精度よく測定できるものを使用することが必要である。繰り返し载荷を行う場合、普通ゲージおよび塑性ゲージではゲージそのものが塑性変形し、大きな値が測定されるため、確実に測定するには伸び計を用いることが望ましい。

⑩繊維強度のパラツキなどを考慮すると、ロッドの強度を混合則で求めても、実測値とは一致しないが、弾性係数の場合には10%以内の誤差で推定することができる。

本研究をまとめるに際し、ご援助いただいた東急建設(株)の宮崎太氏ならびに試験用FRPロッドを提供していただいた帝人(株)に深く感謝する。なお、本研究費の一部は、文部省科学研究費補助金総合研究(A)(代表者：角田與史雄)によったものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 小林一輔：繊維強化複合材料プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究，昭和59年度科学研究費(試験研究2)研究成果報告書。
- 2) 小林・魚本・趙：FRP緊張材を用いたプレストレストコンクリート構造，プレストレストコンクリート，pp.19~26，プレストレストコンクリート技術協会，Vol.30，

- No. 5, 1988. 9.
- 3) 土木学会：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集，コンクリート技術シリーズ 1, 1992. 4.
 - 4) 連続繊維研究小委員会：連続補強材のコンクリート構造物への適用，コンクリートライブラリー 72, 土木学会, 1992. 4.
 - 5) 連続繊維研究小委員会：連続繊維補強材の引張試験方法（試案），連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用，コンクリートライブラリー 72, 土木学会, 1992. 4.
 - 6) 魚本・ホドホド：プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性（2），生産研究，第 43 巻第 3 号，1991. 3.
 - 7) 小林一輔：FRP 製プレストレストコンクリート緊張材用定着装置，生研リーフレット，No.158, 1987.
 - 8) 小林・趙・西村：アラミッド繊維を用いた FRP 緊張材の樹脂被覆が引張強度に及ぼす影響，生産研究，第 41 巻，第 4 号，1989. 4.
 - 9) H. HODHOD・T. UOMOTO：Experimental Model for Ideal Tensile Failure of FRP Rods，コンクリート工学年次論文報告集，第 13 巻 1 号（1991. 6）.
 - 10) ホドホド・魚本：プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性（4），生産研究，第 44 巻第 4 号，1992. 4.
 - 11) H. HODHOD・T. UOMOTO：Effect of state of stress at the grips and matrix properties on tensile strength of FRP rods, 土木学会論文集 No. 451/V-17, pp. 245~253, 1992. 8.
- (1992. 11. 30 受付)

STATIC STRENGTH AND YOUNG'S MODULUS OF FRP RODS FOR CONCRETE REINFORCEMENT

Taketo UOMOTO and Tsugio NISHIMURA

This paper aims to clarify the fundamental properties of FRP rods for concrete reinforcements, such as static strength, Young's modulus and deformation characteristics. The rods are made of aramid fibers, glass fibers or carbon fibers, with the fiber content of 45%, 55% and 66% by volume. The tests were performed in accordance with the test method of JSCE (draft). The test results show that strength of CFRP rod may be affected by gripping chucks, strain measurement by plastic-wire-strain gauge may not be sufficient and it is also clarified that there are some points in the JSCE test method to be modified.