

土木構造材料としてのFRP 素材の安全率

Safety Factor of FRP as Structural Material for Construction

西崎 到*, 木嶋 健**, 明嵐政司***

NISHIZAKI Itaru, KISHIMA Takeshi and MEIARASHI Seishi

ABSTRACT It is important to set a safty factor of Fiber Reinforced Plactics (FRP) in appopriate value. Concept of safty factor is proposed for FRP in construction application. Dispersion of materials, environment, and load are the main factors that reduce strength of FRP. The safty factor on dispersion for water tank is refered and tried to apply for construction use. As regards the environment and load factors, strength reduction caused by theses factors is refered, and the appropriate values for the each factors are proposed in this paper.

Keywords: 繊維強化プラスチック, 引抜成形材, 土木構造物, 安全率
FRP, pultrusion, construction application, safty factor

1. はじめに

FRPを土木構造材料として用いる場合には、適切な安全率を用いて設計される必要がある。FRPは航空、船舶、プラントなどの分野でこれまで多く使われてきた。このため、これらの分野での安全率に関する研究は十分に行われている。しかし、橋梁などの土木構造材料としての適用が本格的に検討され始めたのは比較的最近である。土木構造材料として利用するにあたっての安全率は、既に適用が盛んな分野での情報が基礎となることはもちろんであるが、それとともに、土木構造材料として使う場合の条件を考慮に入れた検討が必要となる。土木構造材料として用いる場合の条件としては、例えば、引抜成形材が主要材料となること、土木構造物のために材料が改良（ハイブリッド化や剛性向上策など）されること、土木特有の荷重条件や環境条件があること、などの点が挙げられる。本報告では、このような観点から、これまでの文献情報などから、土木構造用FRPの適切な安全率について検討した結果を報告する。なお、本報告は過去に行った報告^[1]の資料を補強するとともに、新たな内容を追加してとりまとめたものである。

* 建設省土木研究所化学研究室主任研究員

** 工修, 建設省土木研究所化学研究室主任研究員

*** 工博, 建設省土木研究所化学研究室長

(〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

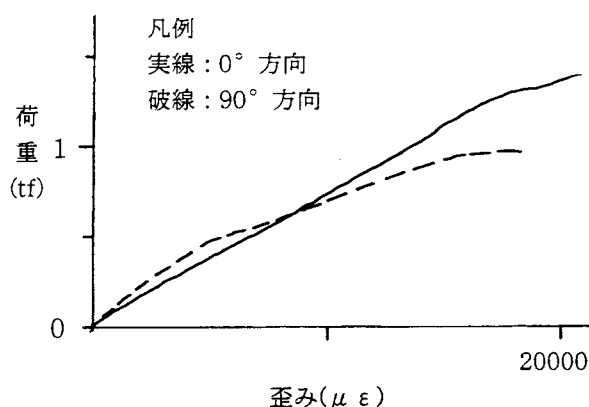


図-1 FRP 引張試験の歪み-応力線図事例

2. 安全率のコンセプト

図-1に、GFRP 引抜成形材の引張試験における、歪み-応力線図の事例を示す。引抜方向に対して90°方向では、歪みの増加にともない歪み-応力線図の傾きが小さくなる傾向にある。引抜方向に対して0°方向の場合でも、90°方向よりは小さいものの、歪みの増加にともないわずかながら傾きが小さくなる傾向がある。この傾きの変化は繊維とマトリックス樹脂の部分的破壊によるものであり、初期破壊と呼ばれる。土木構造物に期待される長期の寿命と、その構造材料に求められる高い信頼性に応えるために、FRP部材は初期損傷を起さないように設計される必要がある。

安全率の設定方法には様々な方法があるが、本報告では最大応力（以下強さとする）を低下させ

る様々な要因を考慮し、各要因毎に安全係数を設定し、これらをかけ合わせたものを安全率とした。

$$\sigma = \sigma_0 / F \quad \cdots \cdots (1)$$

σ : 許容応力

σ_0 : FRPの強さ

F: 安全率

$$F = F_1 \times F_2 \times \cdots \times F_n \quad \cdots \cdots (2)$$

F : 安全率

$F_1, F_2, \cdots, F_n$: 強さ低下因子の安全係数

3. FRPの強さ低下に影響を与える因子

FRPの強さ低下に影響を与える因子としては、(1) 材料品質のばらつき、(2) 環境劣化、(3) 荷重(静的及び動的)、の3種類が主なものとしてあげられる。本章ではこれらの因子による強さの低下特性を検討した。本検討では、GFRP及びCFRPを対象とした。

3.1 材料品質のばらつきに関する安全係数

FRP素材自身の不均一性や物性試験の測定誤差などの様々な原因により、材料品質にばらつきが生じる。材料品質のばらつきに関する安全係数は、航空やプラントなど、FRPの実績のある分野で確立された方法がある。材料の製造方法は利用分野による差は少ないため、これらの分野と同様の方法を参考とする事ができる。ここでは、比較的大型の構造物になることが多い、大型水槽の安全係数の考え方を引用した。FRP水槽構造設計計算法^[2]においては、材料品質のばらつきに関する安全係数を以下のように設定している。

$$F = F_0 \times L_1 \times \cdots \times L_n \quad \cdots \cdots (3)$$

F : 材料品質のばらつきに関する安全係数

F_0 : 基本の安全係数

材料の破壊強さが基準となる場合 $F_0=1.3$

部材の剛性が基準となる場合 $F_0=1.2$

L_1 : 材料特性値の信頼度係数

(試験条件と実際条件との差) $L_1=1.1$

L_2 : 用途・重要度係数

(雪・風・地震荷重等に対する係数) $L_2=1.0$

(外力基準で考慮するので1.0とする)

L_3 : 外力荷重の推定不確定係数 $L_3=1.0$

(外力基準で考慮するので1.0とする)

L_4 : 構造計算での精度係数

有限要素法等の精度の良い方法の場合

$L_4=1.0$

等方性材料力学で検討する場合 $L_4=1.2$

L_5 : 材料特性のばらつき係数

L_5 は式(4)により算出される。

$$L_5 = 1 / [1 - k_p(\sigma / x)] \quad \cdots \cdots (4)$$

x : 材料試験の平均値

σ : 材料試験の標準偏差

k_p : 信頼度係数 (99.9%の場合で $k_p=3.09$)

材料特性のばらつき係数は実際に使用する材料の試験を行い決定する。このため、設計時に材料がない場合には、類似材料の安全率を代用し、材料が設計・製作されて試験結果が出た後に、最終的な安全率を決定する。

3.2 環境劣化に関する安全係数

FRPが無塗装で直射日光のあたる屋外に置かれる場合には、表面の樹脂が劣化し繊維部分が露出する。また、高湿度条件ではFRP内部に水分が浸透する。これらの劣化現象はFRPの強さに影響を与えるので、安全係数として検討する必要がある。環境劣化に関する係数は、初期の静的強さに対する、環境劣化後の強さの低下率で示すこととした。表-1に環境劣化に関する安全係数に関する文献値を示す。GFRPの場合には屋外暴露2年程度で、曲げ強さが0.9くらいまで低下するとの報告がある。^[2]引張強さよりも曲げ強さや疲労特性などの方が変化を生じやすいようである。

これらのデータから安全係数の検討するにあたっては、以下の点に注意が必要である。

(1) 発表されている暴露試験の期間はおおむね数年であり、供用時間が数十年であることを考慮しなくてはならない。

(2) 塗装によって強さ低下をかなり抑制できる。また、実際に使用される場合にはほぼ全て塗装されると考えて良い。

このため、塗装等の実条件を考慮した上で、供用予定年数に応じた安全率の設定が必要である。

上記の(1)については、塗装品では曲げ強さ低下が暴露2年間で1.0とのデータがあるものの、供用年数に比べて短期間であることから、現段階では、引抜成形材の無塗装の2年間のデータを採用し、0.9程度を設定するのが妥当であろう。この結果から得られる、大気中での環境劣化に対する安全係

表-1 環境劣化に関する安全係数

材料	暴露試験後の物性保持率	文献
GFRP	0.95 (曲げ強さ, 5年) 1.0 (引張強さ, ハンドレイアップ成形, 5年)	植村他(1996) ^[3]
GFRP	1.0 (引張・衝撃強さ, ハンドレイアップ成形, 3年) 0.95 (引張・衝撃強さ, プレス成形, 3年) 0.85 (疲労限, ハンドレイアップ成形, 2年)	鶴江(1981) ^[4]
GFRP	0.9 (曲げ強さ, 引抜成形, 2年) 1.0 (塗装品, 曲げ, 引抜成形, 2年)	建設省土木研究所 ^[21]
CFRP	0.9 (曲げ・せん断強さ, 2年)	Backer(1984) ^[5]
CFRP	1.0 (引張, プレス成形, 10年) 僅かな変化 (曲げ, プレス成形, 10年)	山口他(1998) ^[6]

数は、1.1となる。

なお、大気中以外の環境の場合には、上記で考慮した環境とは全く条件が異なるため、別途検討する必要がある。例えば、コンクリートと接する場合には、勝木ら^[7]はコンクリート中におけるGFRP ロッドの引張強さ保持率を15年推定値で0.6と報告している。また、水中に没する場合にも、強度が0.6～0.9程度に低下するとの報告^{[8]・[11]}がある。

3.3 荷重に関する安全係数

FRPに荷重が作用するときに生じる劣化現象としては、繰り返し荷重を受ける場合の疲労破断と、静的荷重を長期間受ける場合のクリープ破断がある。

3.3.1 疲労破断に関する安全係数

FRPの弾性率は低いため、FRP 橋が道路橋示方書のたわみ制限を満たすように設計されると、耐荷力は必要な設計荷重に対してかなり余裕があるものとなる。この場合には疲労荷重が大きな問題とはなりそうにない。しかし、道路橋示方書のたわみ制限を無視することが許される場合には、より材料を節約した設計が可能となる。この場合には、FRP 橋は鋼橋に比べて軽量であるため、全荷重に占める活荷重の割合が大きくなる。このため疲労荷重による部材の損傷を受けやすくなる可能性がある。したがって、疲労破断に対する安全係数を適切に設定することが必要である。

表－2 疲労特性に関する安全係数（10⁷回疲労限度/静的強さ）

材料	10 ⁷ 回疲労限度 /静的強さ	試験条件	文献名・著者
鋼材（参考）	0.45～0.55	引張	日本鋼構造協会編 （昭和52年） ^[12]
GFRP	0.22～0.41	両振,片振, 引張,曲げ等	FRP構造設計便覧 p.37 ^[3]
GFRP	0.22～0.44 0.15～0.32	引張 曲げ	島村(1974) ^[13]
GFRP	0.23～0.60 0.18～0.30 （7°傾成形の 方が低い）	引張 曲げ	鶴江(1981) ^[4]
GFRP	0.22～0.23	曲げ	植村他 ^[14]
CFRP	0.4～0.6	曲げ,両振	FRP構造設計便覧 p.70 ^[3]
CFRP	0.6～0.8	曲げ,片振	FRP構造設計便覧 p.70 ^[3]
CFRP ハンドレイアップ成形 一方向材	0.73～0.82	引張,片振	池田哲史 (1999) ^[15]
CFRP ハンドレイアップ成形 [+45/0/-45/90] _s	0.66	引張,片振	池田哲史 (1999) ^[15]

疲労破断に関する安全係数は、静的強さに対する10⁷回疲労限度で表示する。主な既存文献から、この値を調べた結果を表－2に示す。

静的強さに対する10⁷回疲労限度は、GFRPで0.22～0.41程度、CFRPで0.4～0.8であった。鋼材は0.45～0.55程度であるので、GFRPとCFRPの間に位置することになる。疲労破断に関する安全係数は、表－2からGFRPで2.5～5、CFRPで1.25～2.5程度と見込まれる。

なお、菊川^[16]は、円孔継ぎ手のないCFRPの場合には、S-N線図には1～15Hz程度の荷重繰り返し速度の影響はないと報告している。しかし、円孔のある接合部では、周波数が遅い方が寿命が短い。また、シングルシェア（単せん断）継ぎ手の方がダブルシェア（複せん断）継ぎ手よりもS-N線図の傾きが大きく、疲労破断しやすい。ダブルシェア継ぎ手の疲労強さは非接合（穴有）とあまり変わらないと報告している。この文献の「10⁷回疲労限度/静的強さ」（穴有）は0.5程度である。ダブルシェア継ぎ手であれば、静的強さが低くなっているものの、S-N線図の傾きがほぼ同じで、「10⁷回疲労限度/静的強さ」は0.5程度になっている。

3.3.2 クリープ破断に関する安全係数

FRPに長期間、一定以上の静的荷重がかかる場合には、粘弾性挙動によるクリープ変形が起り、クリープ破断を生じる。鋼材の場合には高温域を除いてクリープを考慮する必要がない^[12]が、FRPではクリープに関する安全係数が必要となる。クリープに関する安全係数を設定する上では、クリープ破断が特に重要な項目になろう。クリープ破断に関する既存文献の報告は1000時間程度のもが多い。主な既存文献の静的強さに対する1000時間クリープ破断強さの比を表－3に示す。GFRPの場合、大気中では0.64～0.7程度である。これを基にすると、クリープ破断に関する安全係数は1.6程度が適している。

FRPは弾性率が低いため、多くの場合、構造設

表－3 静的荷重に関する安全係数

材料	1000時間破断強さ /静的強さ	文献
GFRP	0.7（引張） 0.25（曲げ,塩水中）	FRP構造設計便覧,p.71 ^[3]
GFRP	0.64（曲げ）	建設省土木研究所 ^[21]
GFRP	0.65～0.68	EUROCOMP Design Code ^[19]
CFRP	0.9（引張） 0.7（曲げ）	FRP構造設計便覧,p.71 ^[3]

計の際に強さに余裕を持たせた設計となる。このため、クリープに関する安全係数が、総合的な安全率に大きな影響を与えることは多くないと考えられる。

4. 安全率の試算

4.1 安全率の計算方法

安全率は、各安全係数を式(2)に代入することにより計算できる。この場合、各部材の応力条件に合わせて、必要な安全係数が異なる。活荷重に対しては疲労破断に関する安全係数を使い、死荷重に対してはクリープ破断に関する安全係数を使う。

構造設計時に、活荷重が疲労破断に関する安全係数を、死荷重が部材のクリープ破断に関する安全係数を、それぞれ越えないことを確認する。

4.2 安全率の計算例

FRPを構造部材とした8mの応急車道橋を想定し^[22]、安全率を試算した。結果を以下に示す。

(1)材料品質のばらつきに関する安全係数

$F_0=1.2$ (部材の剛性が基準となると想定)

$L_1=1.1$

$L_2=1.0$

$L_3=1.0$

$L_4=1.2$ (等方性材料力学で計算すると想定)

$L_5=1.13$ (3.1の試験結果より算出)

(2)環境劣化に対する安全係数：1.1 (大気中)

(3)荷重に関する安全係数

1)疲労破断に関する安全係数：4.0

(2.5～5の中間値を採用した)

2)クリープ破断に関する安全係数：1.6

(4)安全率

1)疲労破断に関する安全係数が必要な場合：7.9

2)クリープ破断に関する安全係数が必要な

場合：3.2(疲労破断を考慮しなくて良い場合)

なお、この安全率は暫定的に求めたものであり、設定条件により変わることがある。

4.3 FRP 引抜成形材の一般的な安全率

前節で暫定的に得たGFRPの安全率を、土木以外、あるいは一般的な用途向けに定められている安全率と比較した。結果を以下に示す。

4.3.1 引抜成形材の一般的な安全率の例

繊維強化プラスチック引抜材技術マニュアル^[17]は、以下のような一般的な安全率を示している。

(1)静的短期荷重 (風荷重, 地震荷重等) 2～4

(2)静的な長期荷重 3～6

(固定力, 載荷荷重, 積雪荷重等)

(3)繰り返し荷重 6～12

(4)衝撃荷重 12～20

(5)環境条件 (温度・薬品共に別途設定する)

4.3.2 海外のFRPメーカーの安全率の例

MMFG社設計マニュアル^[18]は、以下のような一般的な安全率を示している。

(1)曲げ部材、梁 2.5

(2)圧縮部材、柱 3.0

(3)せん断 3.0

(4)接合部 4.0

(5)弾性率 1.0

4.3.3 海外の設計指針の例

EUROCOMP Design Code^[19]は、材料に対して以下のような安全率を示している。

$$\gamma_m = \gamma_{m,1} \cdot \gamma_{m,2} \cdot \gamma_{m,3} \cdots \cdots (5)$$

γ_m : 材料に関する安全率 (γ_m は1.5以上であること、ただし10を越える必要はない)

$\gamma_{m,1}$: 物性データ取得手法係数(1.15～2.25)
(最低値：板, 引抜材のデータを実測により得た場合など, 最高値：素材の試験データや理論値による場合など)

$\gamma_{m,2}$: 材料成形係数(1.1～3.2)
(最低値：ポストキュアされた引抜材やFW材など, 最高値：ポストキュアされていないHL(スプレー)成形材)

$\gamma_{m,3}$: 設計供用温度係数(1.0～3.0)
(最低値：熱変形温度(HDT)80℃以上で短期載荷の場合など, 最高値：HDT80℃以下, 供用温度25～50℃で長期載荷の場合等)

上記が材料の安全率の基本である。クリープ、疲労、衝撃、爆発、耐火、化学腐食について、詳細な注意事項を定めている。また、特に繰り返し荷重がかかる場合には、疲労強度係数を以下のように設定している。

$$\gamma_m = \gamma_{m,1} \cdot \gamma_{m,2} \cdot \gamma_{m,3} \cdot \gamma_{m,4} \cdots \cdots (6)$$

$\gamma_m \sim \gamma_{m,3}$ は式(5)に同じ

$\gamma_{m,4}$: 疲労強度係数(1.5～3.0)

(最低値：Fail-safe構造で定期的な検査がなされ、接近できる場合, 最高値：Fail-safe構造でなく、定期的な検査が行われない場合)

4.3.4 本報告の安全率との比較

静的荷重時の安全率は、4.3.1の例では「静的な長期荷重＝3～6」であり、4.3.2の例では「2.5～4.0」、4.3.3の例では5.75 ($\gamma_{m,1}=1.15$, $\gamma_{m,2}=2.0$, $\gamma_{m,3}=2.5$, $\gamma_{m,4}=1.5$) となるが、本報告で得た静的荷重を考慮する場合の安全率の結果は

3.2であり、4.3.3の例が少し大きい値であるが、ほぼこれらの範囲内になっている。同様に疲労荷重については、4.3.1では「繰り返し荷重＝6～12」、4.3.3の方法では8.63となるが、本報告では8.9を得ており、ほぼ同程度の結果となった。

5. 基準強さの計算例

前節により得た安全率と式（1）により、基準強さを計算することができる。これにより許容応力、すなわち基準強さを得ることが出来る。

実際の構造物で用いられるFRPの積層構成が分かっている場合は、積層構成から得られる物性計算値に基づき基準強さを定める。また、実際に用いるFRPの物性試験結果がある場合には、これに基づき基準強さを定めるのが望ましい。以下に、4.2で示したFRP応急車道橋の事例の場合の、基準強さの設定事例を示す。FRPの積層構成が定まっていない場合の概略設計等に活用することができる。

なお、このFRP 応急車道橋にはGFRP 引抜成形材を用い、補強繊維はE- ガラス、マトリックス樹脂はビニルエステル樹脂とした。試験を行った引抜成形材は厚さ4mm、幅420mmの板状である。

5.1 物性試験による実測値の結果

構造設計に必要な主要な物性項目としては、引張特性、曲げ特性、圧縮特性、層間せん断強さ、横せん断強さ、面内せん断強さの6種類があげられる。これらの項目の物性試験を前項の材料について行った結果を表－4の左側に示す。繊維の積層構成は、引抜成形材としては比較的一方向性の強いものを使用した。引張特性の計算値は複合則により素材のデータより計算したものである。^[20]引抜方向に対して0° 方向の引張強さと弾性率の実測値は計算値と比較的良く一致した。90° 方向の引張強さは実測値が計算値よりも低い値となっており、計算値から設計用物性値を得るために、安全係数として1.2を設定した。

5.2 設計のための安全率1.0の物性値の設定

前項の結果をもとに、安全率を考慮していない設計用物性値を設定した。結果は表－4の中央列

表－4 GFRP引抜成形材の安全率を考慮した物性値の事例
積層構成[マツ層9.5%/ロベニングクロス層19%/ロベニング層43%/ロベニングクロス層19%/マツ層9.5%]

	項目	単位	実測値 (計算値)	安全率1.0 の数値	安全率3.2 の数値
0° 方向	引張試験	引張強さ (計算値)	MPa 518 (450)	450	141
		引張弾性率 (計算値)	GPa 24.0 (23.5)	23.5	23.5
	曲げ試験	曲げ強さ	MPa 413	413	129
		曲げ弾性率	GPa 11.9	11.9	11.9
	圧縮試験	圧縮強さ	MPa 430	430	134
		圧縮弾性率	GPa 30	30	30
	層間せん断試験	層間せん断強さ	MPa 38.4	38.4	12.0
	横せん断試験	横せん断強さ	MPa 183	183	57.2
	面内せん断試験	面内せん断強さ	MPa 106	106	33.1
90° 方向	引張試験	引張強さ (計算値)	MPa 147 (178)	147	46.3
		引張弾性率 (計算値)	GPa 12.9 (10.1)	10.1	10.1
	曲げ試験	曲げ強さ	MPa 281	281	87.8
		曲げ弾性率	GPa 11.4	11.4	11.4
	層間せん断試験	層間せん断強さ	MPa 24.6	24.6	7.7
	横せん断試験	横せん断強さ	MPa 90.2	90.2	28.2

に示す。

5.3 安全率を考慮した設計用物性値の設定

4.2で検討した条件に合わせて、FRPの設計許容応力を計算することとした。安全率には4.2で計算したクリープに関する安全率を考慮した場合の値(3.2)を使用した。これを式（1）に代入する事により、表－4右側の値を得た。なお、弾性率の安全率は1.0としている。なお、表－4で使用したFRPの繊維の積層構成は、引抜成形材としては比較的一方向性が強いものである。より等方性が強いものを設定する事も可能である。

6. 結論

本報告ではFRPを土木構造材料として用いる場

合の最適な安全率を検討した。その結果、強さに影響を与える因子をあげ、それぞれに使用条件に応じた安全係数を設定し、これらをかけ合わせたものを安全率として設定することが可能であることが分かった。

FRPの強さに影響を与える因子としては、(1)材料のばらつき、(2)環境劣化、(3)応力の影響(疲労と静的応力)の3つがある。それぞれについては、文献値が比較的多くあるため、暫定的な安全率を設定することが可能であった。また、FRP歩道橋の設計事例を基に、現在得られる引抜成形材の物性試験事例と安全率の計算事例を示すことが出来た。同様の方法により、安全率を設定することが可能である。

しかし、使用する材料によって材料物性に大きな差がある場合があるので、実際の適用にあたっては、使用材料での物性試験の実施などの追試が望ましい。これらのデータの蓄積によって土木構造物におけるFRPの安全率が最適なものとなっていくと考えられる。

7. おわりに

本研究は、建設省土木研究所と(社)強化プラスチック協会、及び民間5社との「繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究」の一環として実施されたものである。^[21]

参考文献

- [1]西崎他:土木学会大54回年次学術講演会講演概要集第I部(A)pp.20-21(平成11年9月)
- [2]福田他:「FRP水槽構造設計計算法」(強化プラスチック協会, 1996)
- [3]植村他:「FRP構造設計便覧」(1994)
- [4]鶴江:北海道工業開発試験所報告第24号, p198 (1981)
- [5]Backer: Journal of American Helicopter Society, Vol.29, p.3(1984)
- [6]山口, 百島, 代田:強化プラスチック, Vol.44, No.2, p.56 (1998)
- [7]勝木, 魚本:土木学会論文集 No.544/V-32, pp.101-107 (1996)
- [8]Harper, J. F.:14th Reinforced Plastics Congress 1984, pp.173-176 (1984)
- [9]Lark, R. F.:38th Annual Conference, Reinforced Plastics/Composites Institute, Vol.38, 12c, pp.1-15(1983)
- [10]Sridharan, S.: 56th Society of Plastics Engineering Annual Technical Conference, Vol.2, pp.2255-

2259(1998)

- [11]Gentry, T. R.: Journal of Composites Technology and Research, Vol.20, No.1, (1998.1)
- [12]日本鋼構造協会編:「建設用鋼材」(昭和52年, コロナ社)
- [13]島村:機械技術研究所報告第80号, p23 (1974)
- [14]植村他:「ハイブリッド(GF/CF)FRP積層板の力学的特性に関する研究報告書」昭和59年3月(強化プラスチック協会ハイブリッドFRP調査研究専門委員会)
- [15]池田哲史:強化プラスチック Vol.45, p.175 (1999)
- [16]菊川: 日本複合材料学会誌 Vol.22, No.3, p.100 (1996)
- [17]宮入他:「繊維強化プラスチック引抜材技術マニュアル」(強化プラスチック協会, H8)
- [18]"EXTREN® Design Manual", Morrison Molded Fiber Glass Company (1989)
- [19]Clarke, J. J.: "Structural Design of Polymer Composites -EUROCOMP Design Code and Handbook-", E & FN SPON (1996)
- [20]日本複合材料学会編:「複合材料ハンドブック」p.16 (1989.11)
- [21]明嵐他:「繊維強化プラスチックの土木構造物材料への適用に関する共同研究報告書(Ⅱ)」, 第252号, 建設省土木研究所 (2000.12)
- [22]鈴木他:「朝霧暴露試験場におけるGFRPモデル車道橋の設計」, 第1回「FRP橋梁に関するシンポジウム」講演概要集(2001.1)