

### 4.3 AFRP の紫外線劣化モデル

#### 4.3.1 概要

本節ではまず、各種繊維の中でも耐紫外線性の劣っていたアラミド繊維の紫外線劣化現象をワイブルの確率理論により定式化し、劣化後の強度を推定する事を試みた。また、マトリックス樹脂の紫外線劣化の進行を定式化することを試みた。さらに、それぞれの強度低下予測手法を用いて、AFRP ロッドの紫外線による強度低下を定量的に予測することを試みた。次節以降に、それぞれの強度低下予測方法を示す。

#### 4.3.2 紫外線劣化したアラミド繊維の強度推定

高分子材料であるアラミド繊維は結晶部分と非結晶部分から構成されるため、その破壊は主に結合力の弱い非結晶部分に存在する欠陥を起点として発生すると考えられる。したがって、繊維強度は繊維の平均的な性質ではなく繊維内に含まれる最大欠陥により支配されると考えることができる。勝木らは、アラミド繊維のアルカリおよび酸性の溶液による劣化のメカニズムを定量化するために、材料の破壊を鎖の破断と考えたワイブルの weakest link 仮説<sup>4)</sup>を用いた強度推定方法を提案し、その適用性を確認している<sup>5)</sup>。

ここで本研究では、紫外線による劣化現象に関しても同様のワイブルの weakest link 仮説を用いることを考え、繊維の紫外線照射後の強度推定を試みた<sup>6) 7)</sup>。

この仮説によれば、ある荷重  $X$  で一つの結合が破壊する確率を  $F$ 、 $n$  個の結合を持つ鎖の破壊確率を  $F_n$  とすると、 $n$  個の結合のうちどれか一つが破壊しても鎖は破壊することから、 $n$  個の結合を持つ鎖が破壊しない確率  $1 - F_n$  は  $n$  個の結合すべてが破壊しない確率に等しい。

$$1 - F_n = (1 - F)^n \quad (1)$$

また、ワイブルは(1)式中の  $F$  を、試料内の結合点の応力  $\sigma$  と最大応力  $\sigma_0$  との比として表した

$$F = (\sigma / \sigma_0)^m \quad (2)$$

ここで、 $m$  : ワイブル係数

したがって、(2)を(1)式に代入すれば、(3)式が得られる。

$$1 - F_n = (1 - (\sigma/\sigma_0)^m)^n \quad (3)$$

$$\cong \exp(-n(\sigma/\sigma_0)^m)$$

$$= \exp(-(\sigma/\alpha)^m)$$

$$\text{ただし、} \alpha = n^{-\frac{1}{m}}\sigma_0 \quad (4)$$

また、平均強度は(5)式により与えられる。

$$\sigma_{f-ave} = \alpha \cdot \Gamma(1 + 1/m) \quad (5)$$

そこで、(5)式の未知数 $m$ および $\alpha$ の値を決定するため、(3)式の両辺の対数を2度とると、

$$\ln(-\ln(1 - F_n)) = m \ln(\sigma) - m \ln(\alpha) \quad (6)$$

即ち、

$$Y = mX + b \quad (7)$$

となり、(6)式は(7)のような一次式になる。したがって、未知数 および  $b$  は直線式(7)から求めることができる。

各紫外線照射時間ごとの各種繊維の強度試験結果を図 4.3.1 にワイブル分布として示した。図 4.3.1 より、アラミド繊維の場合、各照射時間毎にほぼ直線的な分布を示しており、照射時間が長くなるにしたがい分布は左へ移行していることから、繊維強度に及ぼす紫外線照射時間の影響を weakest link 理論により評価できると考えられる。またカーボンの場合、ほぼすべての照射時間で分布が重なり合っており、紫外線による劣化がないといえ

る。またガラス繊維の場合では、促進試験後の繊維の分布はほぼ一致しているが、屋外に暴露したものは、やや劣化の傾向を示している。これは、前述したように、ガラス繊維が紫外線以外の環境要因、すなわち降雨や温度、湿度等が影響していると考えられる。

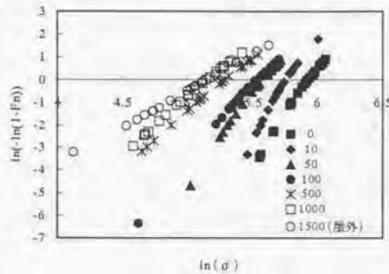


図 4.3.1(a) アラムド繊維強度のワイブル分布

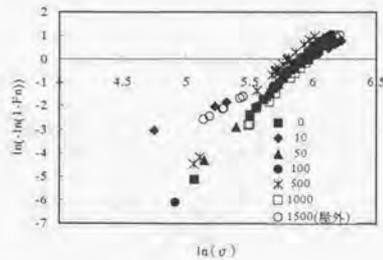


図 4.3.1(b) 炭素繊維強度のワイブル分布

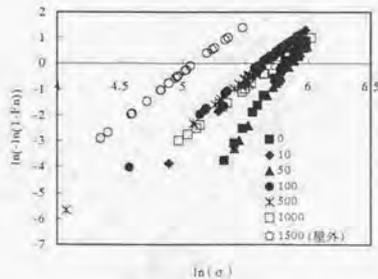


図 4.3.1(c) ガラス繊維強度のワイブル分布

図 4.3.1 の結果と(6)式を用いて、各照射時間ごとのワイブル係数 $m$ および $\alpha$ の値を算定した結果を表 4.3.1 および図 4.3.2 に示す。 $m$ は図 4.3.1 の直線の傾きであるから強度のぼらつきの度合いによって変化するが、各強度とも強度の標準偏差と同様に紫外線照射による影響は大きくない。 $\alpha$ の値は、アラミド繊維の場合、照射時間が増加するに従い減少しており、明らかに紫外線による影響を示しているが、他の繊維については、明確な相関がみられなかった。この現象と(4)式から、アラミドの繊維強度は乗数を持つ変数である $n$ すなわち繊維内の欠陥数に支配されていると考えられる。

表 4.3.1 ワイブル係数の算定結果

	時間	0	10	50	100	500	1000	1500
アラミド	$m$	8.4	9.5	7.6	6.5	4.8	4.9	3.2
	$\alpha$	379	318	266	254	199	174	173
カーボン	$m$	5.7	2.7	5.2	5.9	5.8	5.6	3.4
	$\alpha$	372	384	375	394	354	393	370
ガラス	$m$	7.1	4.7	8.1	3.9	3.7	3.8	3.9
	$\alpha$	343	292	363	281	288	317	164

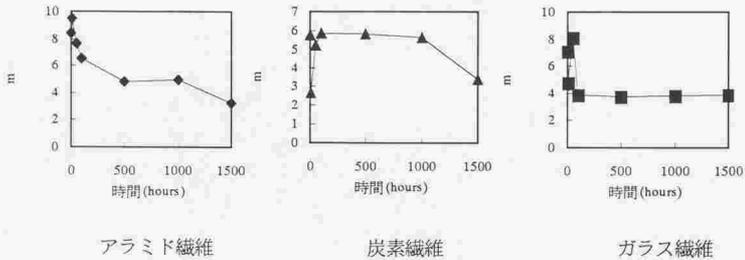


図 4.3.2(a) ワイブル係数  $m$  の経時変化

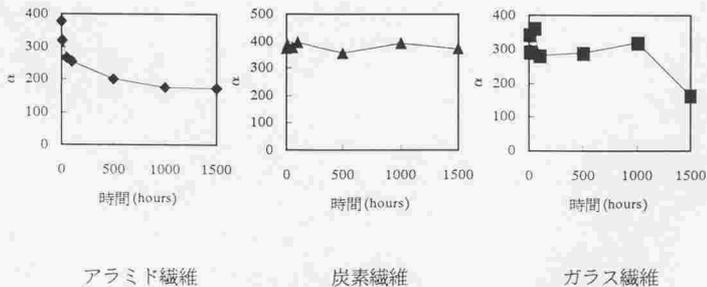


図 4.3.2(b) ワイブル係数  $\alpha$  の経時変化

そこで、求めた $\alpha$ の値を用いて、紫外線照射により生じるアラミド繊維の欠陥数( $n$ )を(4)式から算出した結果を図 4.3.3 に示す。なお、解析に使用する $m$ の値は表中の計算結果の平均値を用いた。図のように、紫外線照射時間の増加に伴いアラミド繊維内の欠陥数( $n$ )が直線的に増加していることが確認できる。これは、アラミド繊維内部の欠陥数は、紫外線の照射時間に比例して増加することを示唆している。紫外線照射  $t$  時間後のアラミド繊維内部の欠陥数は、最小二乗法により以下のように与えられる。

$$n = 0.34 \cdot t + 4.23 \quad (8)$$

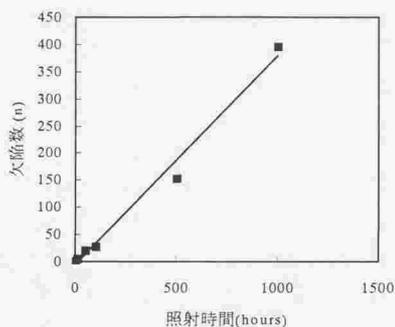


図 4.3.3 紫外線照射によるアラミド繊維の欠陥数

もしも、この関係がその後も継続すると仮定すると、長期材令中の任意の照射時間で発生するアラミド繊維の欠陥数( $n$ )を予測することができ、それを用いて繊維強度を推定するための $\alpha$ の値を(4)式から求めることができる。

以上の結果を用いて、紫外線照射によるアラミド繊維の強度低下を推定した結果を図 4.3.4 に示す。図のように強度低下の推定曲線は実験による実測値と非常に良く一致している。また、本実験の一時間当たりの紫外線照射量は  $0.2 \text{ MJ/m}^2$  であり、東京における紫外線の平均年間照射量が約  $264.3 \text{ (MJ/m}^2)$  であることから、本実験の約 1650 時間に相当することになる屋外暴露 15 ヶ月後のアラミド繊維の引張強度も、図 4.3.4 に併せて示したように促進試験の結果を用いて行った強度推定結果と極めてよく対応していることがわかる。したがってワイブルの weakest link 理論を用いることにより紫外線照射後のアラミド

繊維の強度推定が可能であることが明らかとなった。

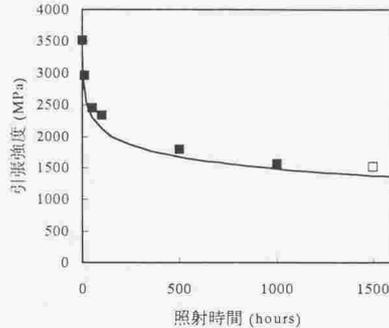


図 4.3.4 アラミド繊維の強度変化

#### 4.3.3 マトリックス樹脂の紫外線透過率

紫外線促進実験結果から明らかとなったように、マトリックス樹脂の紫外線による強度低下はわずかである。しかも、マトリックス樹脂の引張強度は、連続繊維補強材の引張強度にほとんど寄与していないため、紫外線劣化に対しても強度の低下という面では特に問題にはならない。しかし、マトリックス樹脂は、強化材である繊維の、結合材あるいは繊維の保護材としての役割が大きいため、その物理化学的特性や保護皮膜としての性能変化に関しては考慮する必要があると考えられる。特に、アラミド繊維のように著しく紫外線劣化するような強化材に使用している場合は、マトリックス樹脂のもつ紫外線に対する保護皮膜としての性能が問題となり得る。したがってマトリックス樹脂の場合、紫外線による樹脂自身の劣化以上に、紫外線透過率あるいは紫外線吸収率を明らかにすることが重要となる。

前節で示したマトリックス樹脂の赤外顕微鏡による光吸収分析試験の結果から、マトリックス樹脂は紫外線により化学的な変化を生じることがわかった。このマトリックス樹脂の化学的な変化を定量的に検討するため、各紫外線照射時間ごとのマトリックス樹脂表面における $>C=C<$ 結合の吸収スペクトルピーク面積を算出した。その結果を表 4.3.2 および図 4.3.5 に示す。図のように、ピーク面積は時間の対数に対して直線的に減少しており、

表 4.3.2 照射時間と>C=C<ピーク面積の関係

照射時間	1	1000	2000
AFRP用	15.6	4.5	3.3
GFRP用	12.0	4.8	4.0
CFRP用	7.5	2.5	2.0

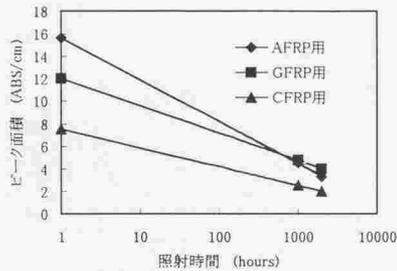


図 4.3.5 紫外線照射時間とピーク面積の関係

紫外線による化学的な変化は照射時間の対数に比例して進行していくことがわかる。最小二乗法により各マトリックス樹脂表面のピーク面積と紫外線照射時間の関係を求めると以下ようになる。

$$\text{CFRP 用マトリックス樹脂} : A = -0.72 \cdot \ln(t) + 7.50 \quad (9)$$

$$\text{AFRP 用マトリックス樹脂} : A = -1.62 \cdot \ln(t) + 15.63 \quad (10)$$

$$\text{GFRP 用マトリックス樹脂} : A = -1.05 \cdot \ln(t) + 12.00 \quad (11)$$

ここで、 $A$  : >C=C<結合のピーク面積 (ABS/cm<sup>2</sup>)

$t$  : 紫外線照射時間 (hours)

上記の近似式からわかるように、各 FRP 用マトリックス樹脂の近似直線の傾き、すなわち >C=C<結合ピーク面積の減少速度は、もともと各 FRP 用樹脂が保有する >C=C<結合の量と関係があり、保有量の最も多い AFRP 用が最も大きく、次いで GFRP 用、CFRP 用の順となっていることがわかった。

表 4.3.3 AFRP 用マトリックスの表面深さと >C=C< ピーク面積の関係

表面深さ(μm)	0	20	30
ピーク面積	3.30	8.25	12.50
面積減少量	12.33	7.38	3.13

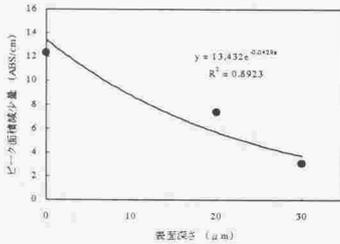


図 4.3.6 表面深さと >C=C< ピーク面積

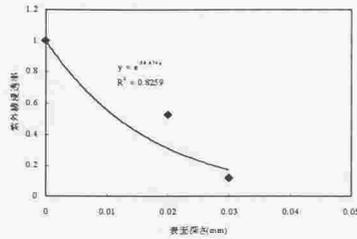


図 4.3.7 マトリックス深さと紫外線透過率

このときの樹脂内部への影響を調べるため、紫外線照射 2000 時間後の AFRP 用マトリックス樹脂について、その表面深さ 0.02 および 0.03 mm の位置における結合のピーク面積減少量を算出した。その結果を表 4.3.3、および図 4.3.6 に示す。図のように表面からの深さが深くなるにしたがって、>C=C< 結合のピーク面積減少量は少なくなっており、紫外線によるマトリックス樹脂の劣化は、樹脂の表面からの深さ位置によってその進行の度合いが違うことがわかる。

一般に、物質にある波長の電磁波が照射された場合、その透過の割合は物質表面での反射とその物質内での吸収に依存することが知られているおり、ある波長に対して

$$A_{\lambda} + R_{\lambda} + T_{\lambda} = I \quad (12)$$

という関係が成り立つ<sup>5)</sup>。ここで、 $A_{\lambda}$  は吸収率、 $R_{\lambda}$  は反射率、 $T_{\lambda}$  は透過率を表し、いずれも波長  $\lambda$  の関数である。吸収率の大きさは、波長と同時に光路の長さにも依存し、その関係は

$$dI/I = -cdx \quad (13)$$

あるいはこれを積分して

$$I = I_0 \exp(-\beta x) \quad (14)$$

と表すことができる。ここで、 $I$  は  $x$  だけ通過した光の強度、 $I_0$  は入射光の強度、 $\beta$  が吸収係数である。この考え方を、AFRP 用マトリックス樹脂を透過する紫外線に適用する。

マトリックス樹脂内部での紫外線の反射はなく、樹脂内部での吸収率は一定であると考えると、樹脂内部における  $>C=C<$  結合ピーク面積の減少速度が、そこに透過した紫外線強度と比例関係にあると仮定すれば、表面の紫外線強度  $I_0$  と、マトリックスの表面深さ  $x$  での透過紫外線強度  $I_m$  との関係は図 4.3.7 のようになり、最小二乗法によりその関係式を求めると以下の式ようになる。

$$I_m = I_{m0} \exp(-58.67 x) \quad (15)$$

ここで、AFRP 用マトリックス樹脂の吸収係数  $\beta$  は 58.67 であり、 $I_m$  は厚さ  $x$  のマトリックスを透過した光の強度である。また、厚さ  $x$  のマトリックス樹脂の透過率  $T(x)$  は、

$$\begin{aligned} T(x) &= I_m / I_{m0} \\ &= \exp(-58.67 x) \end{aligned} \quad (16)$$

と表せる。本節で求めたマトリックス樹脂の紫外線吸収率を用いて、次項において FRP ロッドの紫外線劣化の定式化を試みる。

#### 4.3.4 FRP ロッドの劣化モデル

アラミド繊維は紫外線を照射することにより劣化し引張強度が著しく低下することは既に述べたとおりであり、その強度低下は 4.3.2 に示した手法により推定可能となった。また前節では、マトリックス樹脂の紫外線透過率が実験的に明らかとなった。ここではこれらの結果を基に、アラミド繊維を用いた AFRP ロッドの紫外線による強度低下を推定することを試みる。

FRP ロッドの引張強度はそのほとんどを繊維強度に依存しているため、紫外線により

ロッド内部に存在する繊維の強度が低下する場合、当然 FRP ロッド全体も相応の強度低下を生じることになる。しかし、4.2.2 に示した AFRP ロッドの場合の紫外線照射による引張強度低下率(2500 時間で 13%低下)と、4.2.3 に示したアラミド繊維の場合のそれ(1000 時間で 53%低下)を比較しても明らかのように両者の引張強度低下率は大きく異なる。これは FRP ロッドの場合、繊維単体の場合と違って、内部繊維の周囲に存在するマトリックス樹脂が紫外線に対する保護皮膜としての役割をし、ロッドの内部方向へ透過する紫外線の強度を弱める働きをするためである。つまり、図 4.3.8 に示すようにロッド内部への紫外線透過率が小さいほど、紫外線劣化の影響部分の厚さは減少し、ロッド内部の繊維の劣化の進行も抑制できることになる。したがって、マトリックス樹脂の保護皮膜としての効果の程度は、マトリックス樹脂の紫外線透過率に依存すると考えられる。以下に紫外線透過率とロッド内部のアラミド繊維の強度低下との関係を検討する。

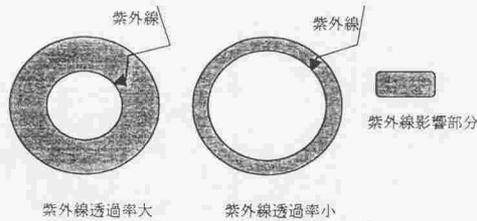


図 4.3.8 紫外線透過率の影響深さ

紫外線照射  $t$  時間後のアラミド繊維の平均強度  $\sigma_{f-ave}$  は、繊維に存在する欠陥数  $n$  を指標として、以下の式のように表せる。

$$\sigma_{f-ave} = n^{-\frac{1}{m}} \sigma_0 \cdot \Gamma(1+1/m) \quad (17)$$

またここで、欠陥数  $n$  は紫外線照射時間  $t$  に対して以下の式のように直線的に増加する。

$$n(t) = 0.34 \cdot t + 4.23 \quad (18)$$

上式は、紫外線強度が本実験で設定した、一時間当たりの紫外線照射量  $0.2 \text{ MJ/m}^2$  の場合であり、紫外線透過率によって透過した紫外線の強度が変化すればそれに応じて欠陥数  $n$  の増加率、つまり(18)式中の傾きの値が変化すると考えられる。欠陥の増加率が紫外線強度に比例すると仮定し、吸収係数  $\beta=58.67$ 、表面深さ  $x$  の位置までのマトリックス樹脂の紫外線透過率を  $T(x)$  とすると、位置  $x$  における紫外線強度  $I_m$  は

$$\begin{aligned} I_m &= T(x) I_{m0} \\ &= I_{m0} \exp(-58.67 x) \end{aligned} \quad (19)$$

となる。このとき、 $x$  の位置にある繊維の紫外線照射  $t$  時間後の繊維の欠陥数  $n_x$  および平均強度  $\sigma_{f-ave,x}$  はそれぞれ、

$$\begin{aligned} n_x &= I_m n_0 \\ &= I_{m0} \exp(-58.67 x) (0.34t+4.23) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\sigma_{f-ave,x} = n_x^{-\frac{1}{m}} \sigma_0 \cdot \Gamma(1+1/m)$$

となる。上式によって算出したアラミド繊維の欠陥数  $n$  と表面深さの関係を図 4.3.9 に示す。図のように、表面のマトリックス樹脂が紫外線を吸収することにより、ロッド内部の繊維に生じる欠陥数を大幅に減らすことができ、ロッド内部のアラミド繊維の紫外線による強度低下を防ぐことができることを示している。

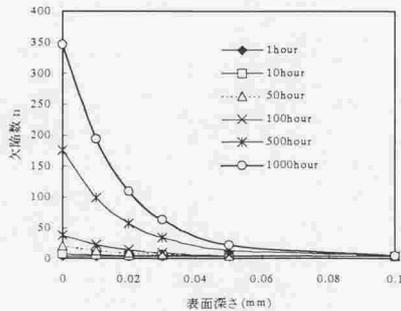


図 4.3.9 表面深さと欠陥数の関係 (表面深さまでがすべてマトリックス樹脂の場合)

ここまで得られた欠陥数  $n$  と表面深さ  $x$  の関係から考えると、計算上ロッドの表面にマトリックス樹脂の保護皮膜厚さが 0.1mm 程度あれば、保護皮膜を透過する紫外線強度はほぼゼロとなるため、実際には 20~30% の強度低下を示した 3 年間の屋外曝露をおこなったとしても AFRP ロッドは紫外線劣化はほとんど生じることなく初期強度を維持できることになり、実用上問題なくなると考えられる。

ところが実際の FRP ロッドのほとんどは、ロッド表面にマトリックス樹脂のみによる保護層を確保しておらず、全断面にほぼ一様にマトリックス樹脂と繊維が混在しているため、表層部分の紫外線が到達する範囲に存在する繊維が紫外線劣化を生じる。しかも表層部の樹脂の混入率が下がることによりロッドの紫外線吸収率が低下し、ロッド内部の紫外線到達範囲は樹脂だけの場合より広範囲になると考えられる。繊維の紫外線吸収率を 0 と仮定した場合、ロッド内部に到達する(19)式による平均紫外線強度は、

$$I_R = I_{m0} \exp(-58.67 \cdot (1 - \sqrt{V_f})x) \quad (21)$$

と変形できる。ここで、 $R$  はロッドの半径、 $V_f$  はロッドの繊維混入率である。このときの繊維の欠陥数  $n$  と表面深さ  $x$  の関係は、

$$n_{Rx} = I_R n_0 \quad (22)$$

となり、図 4.3.10 に示すようになる。マトリックス樹脂のみによる透過率と異なり、1000 時間の紫外線照射で、表面深さ 0.2mm 程度までの繊維の劣化が進行することがわかる。また深さ  $x$  の位置における欠陥数  $n_{Rx}$  の繊維の平均引張強度は、

$$\sigma_{f-ave} = n_{Rx}^{-\frac{1}{m}} \sigma_0 \cdot \Gamma(1 + 1/m) \quad (23)$$

となる。図 4.3.11 に示したロッドの深さ方向における繊維の強度分布からわかるように、一定時間紫外線を照射したロッド内部の強度分布はロッド表面に近づくほど低下することになる。ここで、劣化した部分の強度が繊維の引張強度分布の  $3\sigma$ 、すなわち標準偏差の 3

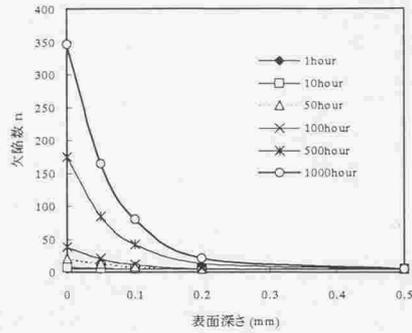


図4.3.10 表面深さと欠陥数の関係（表面深さまでが繊維とマトリックス樹脂の場合）

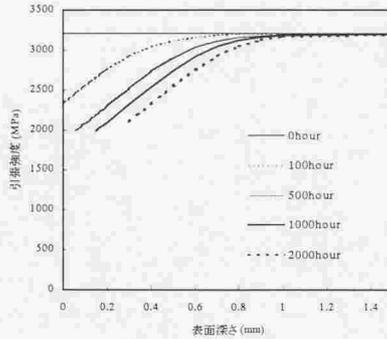


図4.3.11 表面深さと繊維の引張強度分布

倍よりも小さい場合、その劣化部分の繊維はロッド全体の強度に寄与しないものとして、照射時間と FRP ロッドの推定強度の関係を求めると図 4.3.12 のようになる。推定結果が図中に併せて示した実験結果とほぼ一致していることから、アラミド繊維の紫外線吸収率がほぼ無視できる程度であること、また紫外線劣化した FRP ロッドの引張強度はマトリックス樹脂の紫外線吸収率と繊維の欠陥数から予測することが可能であることが示されたといえる。しかし、アラミド繊維の吸収率を 0 と仮定しているにも関わらず推定結果よりも実験結果の引張強度の方がやや低いこと、屋外曝露した各種 FRP の表面に内部繊維が

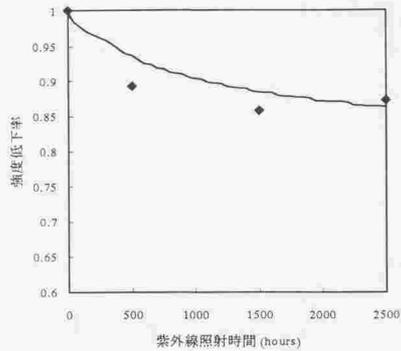


図 4.3.12 紫外線照射時間と AFRP ロッドの推定強度低下率

露出していたことなどを考慮すると、FRP ロッドの紫外線劣化は紫外線の透過による内部繊維の強度低下だけでなく、ごく表面のマトリックス樹脂が風化・剥離していくことによる劣化も同時に進んでいる可能性がある。このことは、炭素繊維が紫外線照射促進試験の結果では強度低下を示さなかったにもかかわらず、それを使用した CFRP ロッドが屋外曝露では僅かながら強度低下していることから推察される。

そこで、CFRP ロッドの屋外曝露における強度低下の原因が、紫外線による繊維の強度低下ではなく、表面マトリックス樹脂の剥離とそれによる繊維の分断にあると考えると、実験結果から推定して図 4.3.13 に示すようなマトリックス樹脂の剥離が経時的に進行していることになる。t 時間後のマトリックス樹脂の剥離厚さを $\delta$ としたときの、剥離の進行式は最小二乗法により以下の式に表される。

$$\delta = 0.03 t^{0.26} \quad (24)$$

AFRP ロッドの紫外線劣化現象では紫外線透過のみによる強度低下とマトリックス樹脂の剥離劣化による強度低下の両方が同時に進行するものと仮定すると、時間とともに紫外線透過深さが進むことになり繊維の欠陥数 n の増加率も変化するため、紫外線透過だけの場合よりも強度低下が早まることとなる (図 4.3.14 参照)。図 4.3.15 に FRP ロッドの屋外曝露後の引張強度の推定方法をフローチャートとして示す。マトリックス樹脂の剥離に関

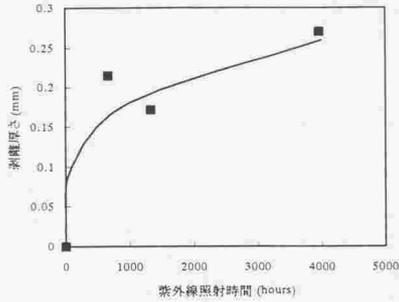


図 4.3.13 紫外線照射時間とマトリックス樹脂の剥離厚さ

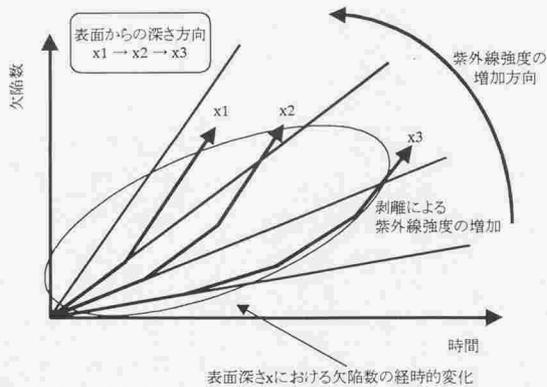


図 4.3.14 剥離による欠陥数の増加の影響

しては CFRP ロッドから算出した(24)式を適用し、紫外線のみによる強度低下に関しては前述のように到達する紫外線の強度に従ったアラミド繊維の欠陥数の増加率を考慮している。このフローチャートに従った各 FRP ロッドの推定強度と実際の屋外曝露結果および紫外線促進試験結果を併せて図 4.3.16 に示す。実験と推定による引張強度の低下率は極めてよく対応しており、FRP の耐候性劣化の場合は、繊維の紫外線劣化の影響と、マトリックス樹脂の紫外線や風雨による剥離劣化の影響の両方によって、全体としての劣化が進行することが明らかとなった。

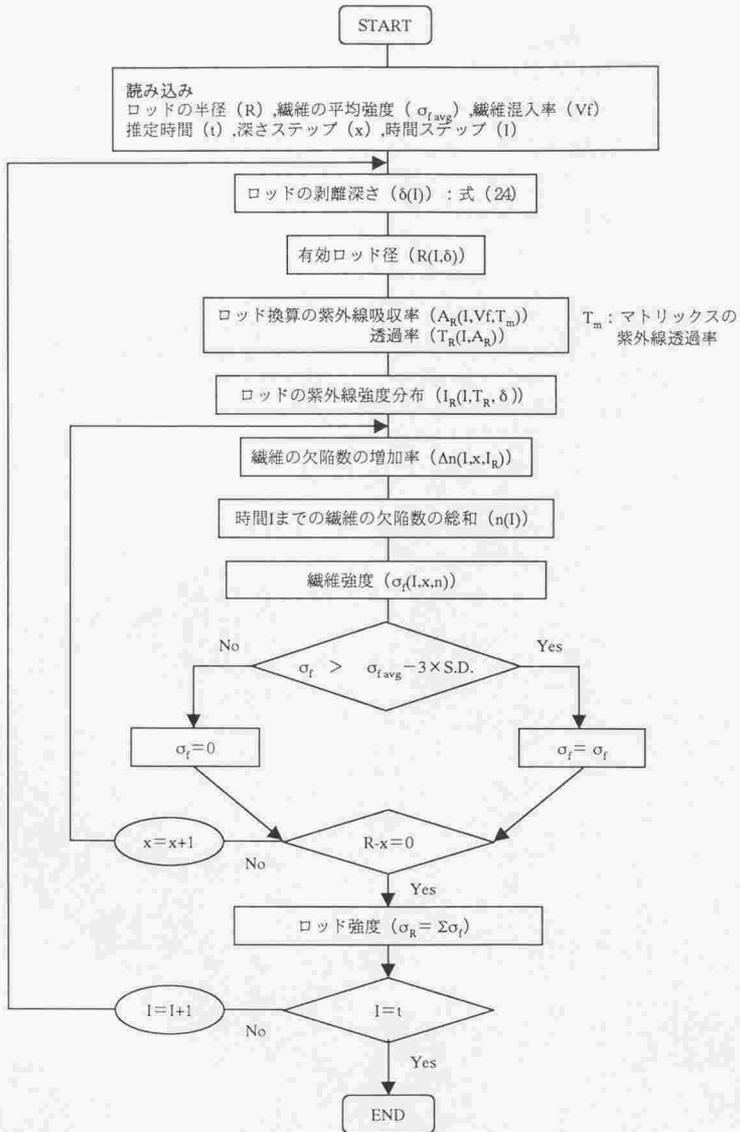


図4.3.15 FRPロッドの屋外曝露後の引張強度の推定フローチャート

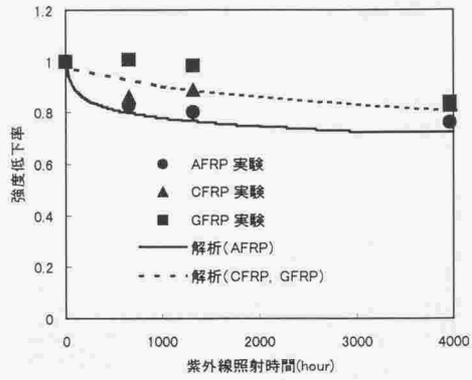


図 4.3.16 各種 FRP ロッドの強度低下率

#### 4.4 まとめ

本章では、各種 FRP ロッドの耐候性のうち紫外線による劣化特性を検討するために各種 FRP ロッドとそれを構成する各種繊維およびマトリックスの紫外線暴露実験を行い、その劣化性状を明らかにするとともに、紫外線による強度低下を定量的に予測することを試みた。その結果以下のようなことが明らかとなった。

- (1)各種 FRP ロッドの紫外線照射促進試験の結果、CFRP、GFRP ロッドは紫外線による強度の影響がほとんどみられないのに対し、AFRP ロッドは、紫外線照射 500 時間で約 11% (180MPa) の強度低下、2500 時間では約 13% (216MPa) の強度低下を示し、CFRP ロッドおよび GFRP ロッドとは異なり強度低下が大きく、紫外線による影響を最も受けやすいことが明らかとなった。この強度低下の原因は、AFRP ロッドの強化材であるアラミド繊維が紫外線により劣化したためであると考えられる。
- (2)各種繊維の紫外線照射促進試験の結果、炭素繊維、ガラス繊維には紫外線による影響がみられなかったが、アラミド繊維の場合は紫外線照射 10 時間後で約 16% (550MPa)、1000 時間照射後には約 55% (1980MPa) の強度低下が生じた。このアラミド繊維の紫外線劣化は、ワイプルの Weakest link 理論に基づき、紫外線の照射によりアラミド繊維内部の欠陥数が増加すると仮定することにより、定量的に劣化後の強度を推定できることが明らかとなった。
- (3)各種マトリックス樹脂の紫外線照射促進試験の結果、各種マトリックスは紫外線照射により  $>C=C<$  結合が減少しその化学的組成が変化することが明らかになった。マトリックス樹脂中に存在する、 $>C=C<$  結合の吸収スペクトル面積の時間的および位置的变化からマトリックス樹脂の紫外線に対する吸収率および透過率を求めることにより、マトリックス樹脂の紫外線に対する保護皮膜としての効果を明確にすることが可能となった。
- (4)マトリックス樹脂の紫外線吸収率を考慮し、ロッド内部へ到達する紫外線強度が位置的に変化する場合におけるロッド内アラミド繊維の照射時間ごとの強度分布を算出することにより、AFRP ロッドの紫外線による強度低下を推定することが可能である。本手法により推定した紫外線照射にともなう AFRP ロッドの引張強度低下率は、実際の紫外線照射促進試験結果とよく対応することが明らかとなった。

- (5)屋外曝露した各種 FRP ロッドの外観および強度試験結果から、FRP ロッドは風雨や温・湿度などの紫外線以外の要因によりマトリックス樹脂が剥離劣化し引張強度も若干低下する。CFRP ロッドを屋外曝露後の強度低下の原因がマトリックス樹脂の風化や剥離にあると仮定し、その消失分の影響を加味した場合の紫外線照射後の各 FRP ロッドの強度低下率を推定すると、屋外曝露した FRP ロッドの強度低下率と極めて良い相関を示した。したがって、FRP ロッドの耐候性を定量的に評価するためには、紫外線による繊維の強度低下、マトリックス樹脂の紫外線吸収性、さらに、マトリックス樹脂の風化・剥離劣化による消失分の影響を考慮する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 西村, 魚本, 加藤, 勝木: 異なった環境条件で暴露した各種 FRP ロッドの引張強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, 1996
- 2) 島津製作所: 光吸収分析—FTIR による高分子材料の劣化状態の分析—, No.A219
- 3) ビニルエステル樹脂研究会編: ビニルエステル樹脂, 化学工業日本社, 1993.6
- 4) Weibull: A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, Vol.13, pp.293-297, 1951.9
- 5) 勝木, 魚本: アラミド繊維の耐アルカリ性および耐酸性の評価方法に関する一試案, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, 1995.6
- 6) 山口, 西村, 魚本: 紫外線による各種繊維の劣化現象の評価方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, 1996.6
- 7) 山口, 西村, 魚本: プレストレスコンクリート用 FRP 緊張材の特性 (11) —紫外線によるアラミド繊維劣化のモデル化—, 生産研究, No.48, Vol.5, 1996.5
- 8) J.Wulff 編: 材料化学入門IV—電子物性—, 岩波書店, 1968

## 第5章 FRP ロッドのクリープ特性

### 5.1 はじめに

FRP ロッドは、その引張強度より低い応力であっても一定持続荷重によって破壊に至るケース、すなわちクリープ破壊を生じることがあり、近年その長期耐久性が検討され始めたことは既に述べた。破壊に至らない場合でも、FRP ロッドを PC 用緊張材として使用する場合、プレストレスのロス、ひび割れ荷重の低下、部材の変形等に与えるクリープの影響は非常に大きい。土木学会では、いくつかの報告を基に FRP ロッドの長期耐久性の評価手法を提示しているが、これまでのところ一定荷重下における寿命予測の経験式等による定性的なものに留まっている<sup>1)</sup>。これは、未だデータの量が十分であることはもちろんだが、強化材や結合材といった FRP ロッドの構成材料、特に強化材である繊維の強度や耐久性能にばらつきが大きいとその定量評価が難しいことや、FRP ロッドのクリープ破壊のような時間依存的な破壊機構に不明な点が多いことなどが主な原因と考えられる。

本章では、FRP ロッドの定量的なクリープ破壊モデルを構築することを目的として、まず、これまでほとんど検討されていなかった、主な FRP ロッド用各種繊維（炭素繊維、アラミド繊維、およびガラス繊維）のクリープ破壊特性を実験的に検討するとともに、ワイプルの確率理論<sup>2)</sup>に基づく定量的評価を試みた。さらに、これら繊維の破壊特性を用いて、ロッド内部の繊維の損傷度を考慮した FRP ロッドのクリープ破断モデルを構築し、既往の実験結果との比較を行った。

## 5.2 クリープ試験の結果と考察

### 5.2.1 概要

本節では、3章に示す試験方法に従って行った各種クリープ試験の結果について説明する。まず、FRP ロッド (CFRP, AFRP, GFRP) のクリープ試験結果を示し、それに対する考察をおこなう。さらに、構成材料である各種繊維 (炭素繊維, アラミド繊維, ガラス繊維), それに対応する各種マトリックス, のクリープ試験の結果を示すとともに、同様にそれらの結果に対する考察をおこなう。

### 5.2.2 FRP ロッド

実験に使用した FRP ロッドの繊維混入率 ( $V_f$ ) はいずれも 55% であり、一方向強化された直径 6mm の丸棒状であり、各載荷応力条件につき 10 本以上おこなった。なお載荷時間は 1000 時間を上限として終了させた。クリープ試験における持続応力は、第3章、表 3.4.3 に示すように各ロッドの静的平均引張強度に対して、AFRP ロッドの場合は 65% から 90%, GFRP ロッドの場合は 60% から 95%, CFRP ロッドの場合は 96.4% から 106% に設定した。

#### (1) 載荷応力とクリープ破断時間<sup>\*)</sup>

図 5.2.1～図 5.2.3 に各 FRP ロッドにおける載荷応力ごとのクリープ試験結果を示すが、いずれのロッドに場合も、同一載荷応力下における個々のロッドのクリープ破断時間が大きくことなることから、破壊確率が 50% となる持続時間をクリープ破断時間と定義した。

図 5.2.4 に各 FRP ロッドの載荷応力とクリープ破断時間を示す。用いた繊維の種類によって FRP ロッドのクリープ破断特性は異なっており、CFRP ロッド、AFRP ロッド、GFRP ロッド、の順に破断までの載荷時間が長くなっている。また、これを FRP ロッドの平均引張強度に対する応力比としてみた場合、応力比と破断時間との関係は図 5.2.5 のようになる。応力比で示した場合、AFRP ロッドと GFRP ロッドはほぼ同様のクリープ性状を示しているが、CFRP ロッドは、AFRP ロッドおよび GFRP ロッドに比べ、同一応力比におけるクリープ破断時間が長くなっている。これらの試験結果から最小二乗法により求めた各 FRP ロッドの応力比とクリープ破断時間の関係は以下ようになる。

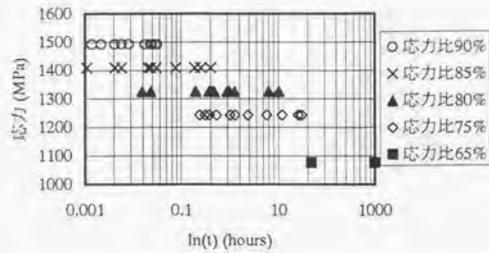


図 5.2.1 AFRP ロッドのクリープ試験結果

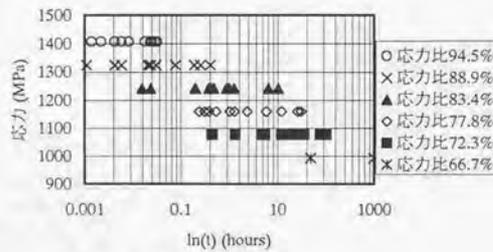


図 5.2.2 GFRP ロッドのクリープ試験結果

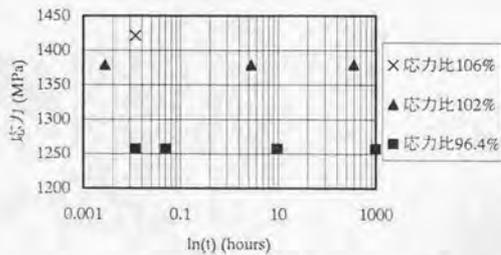


図 5.2.3 CFRP ロッドのクリープ試験結果

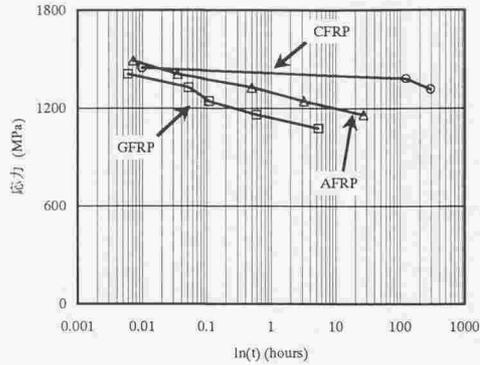


図 5.2.4 載荷応力とクリープ破壊時間

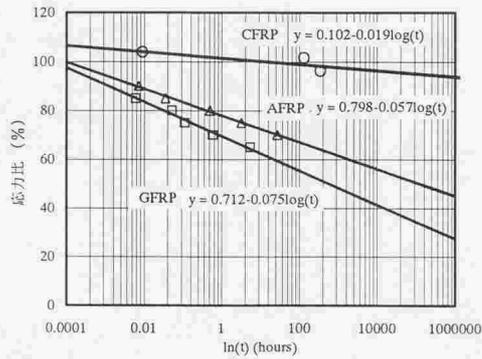


図 5.2.5 応力比とクリープ破壊時間

$$\text{CFRP ロッド} : \sigma_{app} / \sigma_{ave} = 102.0 - 1.91 \cdot \text{Log}(t) \quad (25)$$

$$\text{AFRP ロッド} : \sigma_{app} / \sigma_{ave} = 79.8 - 5.67 \cdot \text{Log}(t) \quad (26)$$

$$\text{GFRP ロッド} : \sigma_{app} / \sigma_{ave} = 79.2 - 8.29 \cdot \text{Log}(t) \quad (27)$$

ここで、 $\sigma_{app}$ : 載荷応力 (MPa)  
 $\sigma_{ave}$ : 静的引張強度 (MPa)  
 $t$ : クリープ破断時間 (hours)

各関係式と実験結果の相関係数の2乗は CFRP ロッドが 0.913, AFRP ロッドが 0.987, GFRP ロッドが 0.984 となり, 各 FRP ロッドとも良い相関を示している。土木学会の定める連続繊維補強材のクリープ破断試験方法(案)(JSCE-E 533-1995)によれば, クリープ破断の限界応力が存在しないと仮定して, 応力比とクリープ破断時間の近似式から 100 万時間(約 114 年)後の応力を推定する方法が提案されている。本実験で得た上記の近似式をこの方法に適用し, 100 万時間後のクリープ破断を生じない限界載荷応力を推定すると, CFRP ロッドは 1244.6MPa (応力比 91.1%), AFRP ロッドは 763.4MPa (応力比 46.1%), GFRP ロッドは 446.9MPa (応力比 30%), となり, FRP ロッドの種類により所要の供用期間における限界載荷応力(限界載荷応力比)は大きく異なることがわかる。

#### (2)各種ロッドのクリープひずみと破壊形式

図 5.2.6~図 5.2.8 に各種 FRP ロッドのクリープひずみと載荷時間の関係の一例を示す。これらの図から明らかなように, 各 FRP ロッドのクリープひずみ曲線はそのロッドの固有の特性を持っていることがわかる。まず, CFRP ロッドの場合, 載荷応力比に関わらずほとんどクリープひずみが生じておらず, クリープ破断する場合もほぼ一定のひずみのまま突然クリープ破断に至っている。それに対して AFRP ロッドの場合は, 高温下での鋼材のクリープと同様の傾向がみられる。すなわち, 初期段階でクリープひずみが急激に増加する第 1 期クリープ, ひずみ量がほぼ一定の割合で増加を続ける第 2 期クリープ, 再度ひずみが急激に増加し破断に至る第 3 期クリープ, が観察された。ただし, AFRP ロッドにおける最後の第 3 期クリープは鋼材と異なり, 連続的なひずみの増加ではなく急激なひずみの増加が生じている。また GFRP ロッドの場合は, 連続的なクリープひずみの増加は微小であるが, AFRP ロッドと同様, 載荷途中で階段状の急激なひずみの増加を生じながらクリープ破断に至っている。このような AFRP ロッドと GFRP ロッドにみられるひずみの急激な増加は, ロッドに亀裂が生じたためにロッドの有効断面積が瞬間的に減少したことによるものと考えられる。

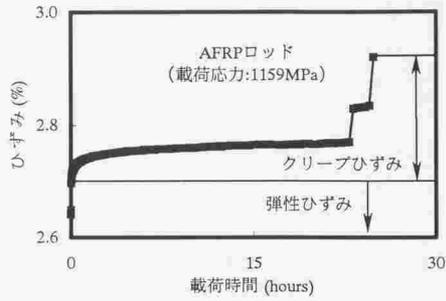


図 5.2.6 AFRP ロッドのクリープひずみと載荷時間の関係

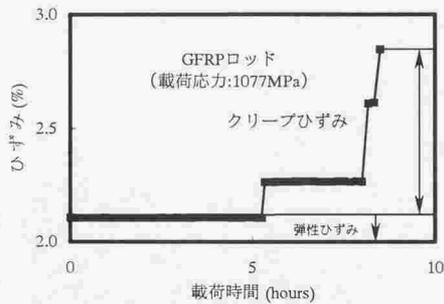


図 5.2.7 GFRP ロッドのクリープひずみと載荷時間の関係

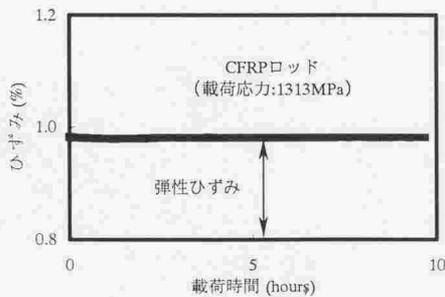


図 5.2.8 CFRP ロッドのクリープひずみと載荷時間の関係

また、これらのロッドの破断状況を示したものが写真 5.2.1 である。静的引張試験では AFRP ロッドおよび GFRP ロッドは強度に関係なく、繊維破断とそれにとまなう定着部の抜けが同時に生じるような破壊形式であった<sup>9)</sup>。それに対してクリープ試験の場合は AFRP ロッドについては静的破壊と同様な破壊形式が多いものの、破壊後の定着部を観察するとロッド内部における付着破壊の跡がみられるものもあった。また、GFRP ロッドの場合は静的破壊の場合の破壊形式とは異なり、载荷時間の経過にとまない、ロッドに部分的な亀裂が入り、その亀裂が大きくなるなつて縦に割れるような亀裂になるかまたは細かい亀裂のまま、ほうき状に完全破壊するような破壊になつた。CFRP ロッドの場合は静的破壊の場合と同様に定着部近傍での繊維破断と、縦割れしてある程度の繊維の束なつて壊れる形式が観察された。

このような各 FRP ロッドのもつクリープ特性は、主としてそのロッドを構成する繊維とマトリックス樹脂の特性に起因するものであるから、FRP ロッドのクリープ破壊機構を明らかにし、その特性を定量的に評価するためには、まず構成材料である各種繊維およびマトリックス樹脂のクリープ特性を明らかにする必要があると考えられる。

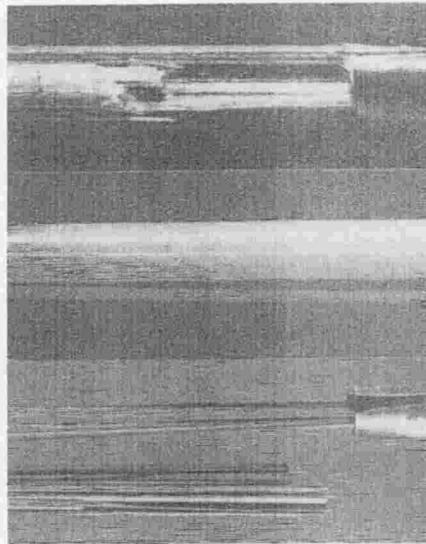


写真 5.2.1 FRP ロッドの破断状況

## 5.2.3 繊維

繊維は FRP ロッドに比べて強度のばらつきが大きいため、個々の繊維のクリープ特性を実験的に検討する場合はある程度のサンプル数が必要となる。そこで、3章に示したように、クリープひずみ量の時間的特性を検討するための微小載荷試験機によるクリープ試験に加えて、一定荷重載荷時における破断時間のばらつきを検討するためのクリープ破断試験の2つの実験をおこなった。以下にそれぞれの試験の結果を示す。

## (1) 繊維変形の時間依存性

図 5.2.9 に、静的強度試験結果によって求めたほぼ同一の載荷応力比を与えたときの各種繊維の変形量の経時変化を示す。アラミド繊維およびガラス繊維の場合、載荷初期から破断時までの時間経過に伴い、変形量が曲線的に増加しており、これらの繊維がクリープ変形を生じることが明かとなった。また、図 5.2.9 からわかるように、ガラス繊維のクリープ変形量はアラミド繊維に比べて非常に小さく、さらにひずみ量がほぼ一定となるまでの時間はアラミド繊維のそれと比べてかなり短いことが分かる。これは、AFRP ロッドと GFRP ロッドのクリープひずみの増加傾向と同様であり、繊維のクリープ変形特性が FRP ロッドのクリープ特性に影響していることがわかる。一方、カーボン繊維では約2週間の載荷期間中ほぼ一定の変形量を保っており、ほとんどクリープ変形を生じなかった。この結果も CFRP ロッドのクリープ試験と同様の傾向を示している。本実験はグラム単位の微小荷重域で行っているため、データの信頼性に多少問題があるものの、これらの変形特性は、それぞれの繊維を用いた FRP ロッドのクリープ変形特性の傾向とほぼ類似していることが明らかとなった。

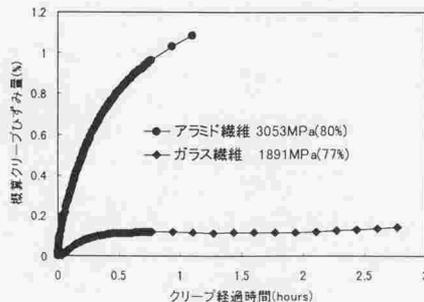


図 5.2.9 概算クリープひずみ量と載荷時間の関係の一例

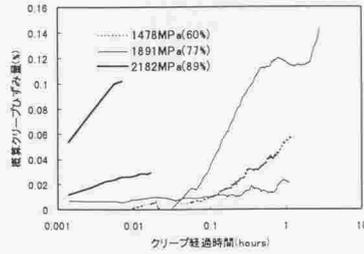
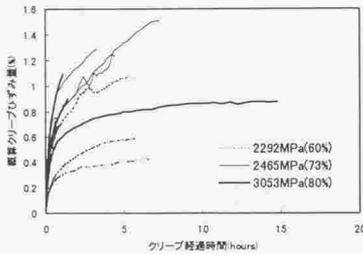


図 5.2.10 アラミド繊維のクリープひずみ 図 5.2.11 ガラス繊維のクリープひずみ

また、アラミド繊維とガラス繊維の各載荷応力ごとのクリープひずみを図 5.2.10、図 5.2.11 に示す。図のように載荷応力比が同じでも繊維のクリープひずみのばらつきは極めて大きいために応力ごとの定式化が難しい。これは図 5.2.12 に示すように繊維の引張強度と弾性係数および断面寸法のそれぞれのばらつきが大きいためであるが、特にクリープひずみ量の大きいアラミド繊維の場合、AFRP ロッドのクリープ特性を評価する上で繊維のクリープひずみ量を定式化する必要がある。そこで、最小二乗法により個々の繊維のクリープひずみの近似曲線を以下に示す 3 つの式で近似した。またそれぞれの近似曲線について、同一応力比ごとに近似式の係数を平均することにより、アラミド繊維の載荷応力ごとの平均クリープひずみ曲線を求めた。

$$\varepsilon_t = A \cdot t^B \quad (28)$$

$$\varepsilon_t = A \cdot \ln(t) + B \quad (29)$$

$$\varepsilon_t = t / (A \cdot t + B) \quad (30)$$

各近似式の相関係数、また増加傾向から、(28)式による近似曲線が最もクリープひずみの経時変化を追っていた。(28)式による近似曲線と実験結果のクリープひずみを図 5.2.13 ~ 図 5.2.15 に、また近似式の係数と載荷応力との関係を、図 5.2.16 および表 5.2.1 に示す。

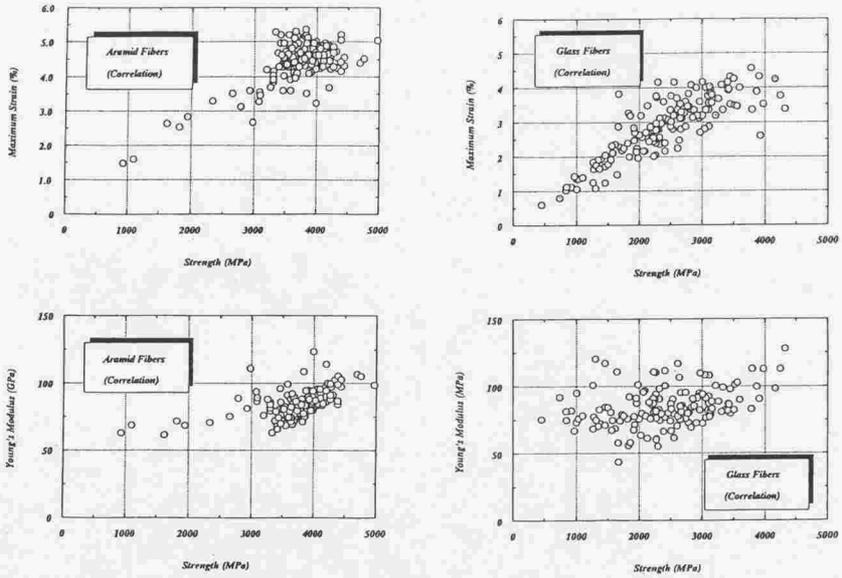


図 5.2.12 引張強度と弾性係数のばらつき

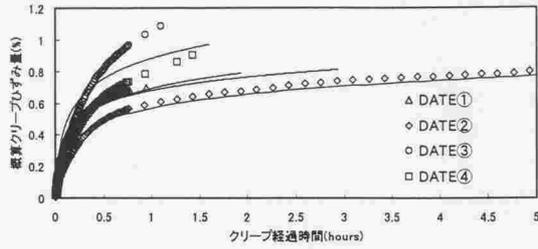


図 5.2.13 アラミド繊維のクリープひずみ (80%)

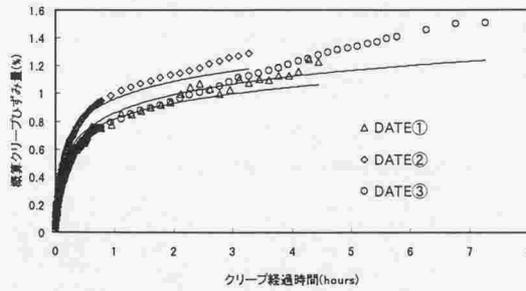


図 5.2.14 アラミド繊維のクリープひずみ (73%)

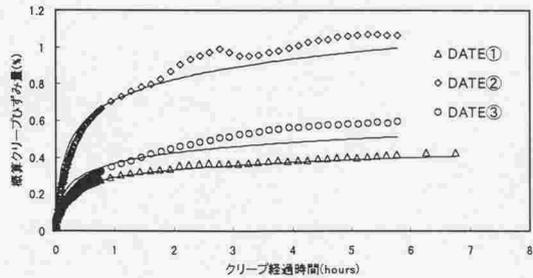


図 5.2.15 アラミド繊維のクリープひずみ (60%)

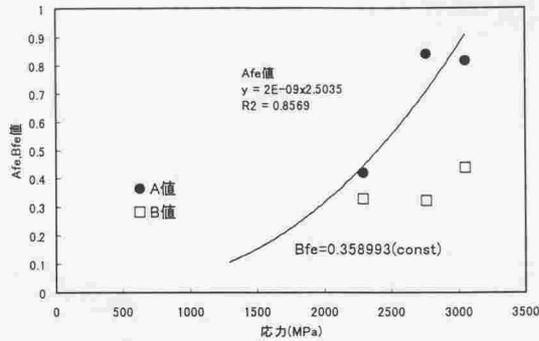


図 5.2.16 アラミド繊維の近似式の係数と応力との関係

表 5.2.1 アラミド繊維の近似式の係数

応力(MPa)	$A_{fe}$	$B_{fe}$	$R^2$
2292(60%)	0.270	0.277	0.965
	0.650	0.339	0.968
	0.334	0.368	0.990
平均	0.418	0.328	
2765(73%)	0.782	0.316	0.973
	0.964	0.309	0.971
	0.774	0.341	0.988
平均	0.840	0.322	
3053(80%)	0.786	0.361	0.987
	0.511	0.252	0.929
	1.144	0.540	0.992
	0.850	0.488	0.986
平均	0.814	0.384	

(2) 繊維破断の時間依存性

破断試験による各種繊維の破断時間の測定結果を図 5.2.17 および図 5.2.18 に示す。FRP ロッドの場合と同様に繊維の破断時間には大きなばらつきがあるため、各载荷応力ごとの破壊確率が 50%となる持続時間を求めると図 5.2.19 のようになる。なお、炭素繊維の場合、応力载荷に破断しなかった繊維は、全ての载荷応力で試験期間中の破断を生じなかった。つまり、炭素繊維には時間依存性の破壊が生じなかった。図よりアラミド繊維とガラス繊維のクリープ破壊時間は载荷応力が小さくなると载荷時間も長くなっていく傾向があ

る。また、これを繊維の平均引張強度に対する応力比としてみた場合、応力比と破断時間との関係は図 5.2.20 のようになる。アラミド繊維とガラス繊維の平均クリープ破壊時間は最小二乗法により以下の式に近似できる。

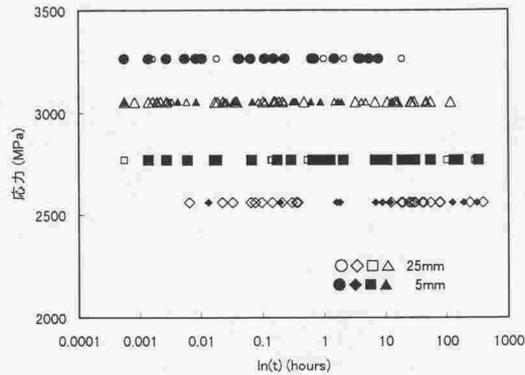


図 5.2.17 アラミド繊維の荷重応力と破断時間の関係

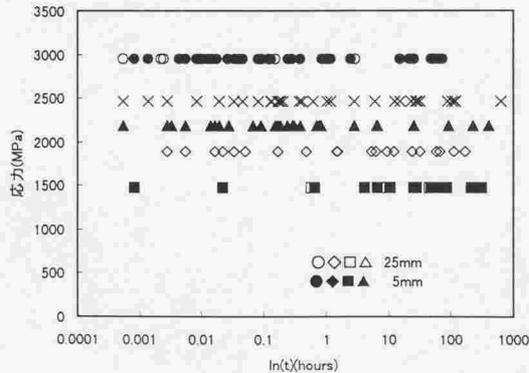


図 5.2.18 ガラス繊維の荷重応力と破断時間の関係

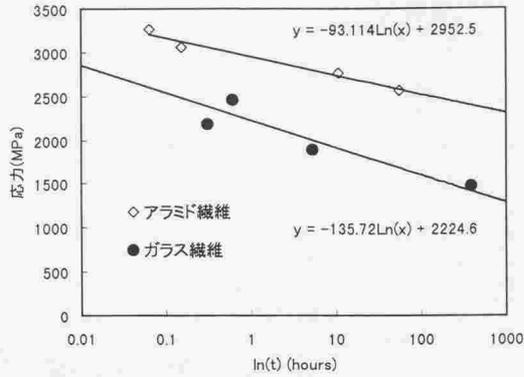


図 5.2.19 載荷応力とクリープ破断時間 (破壊確率 0.5)

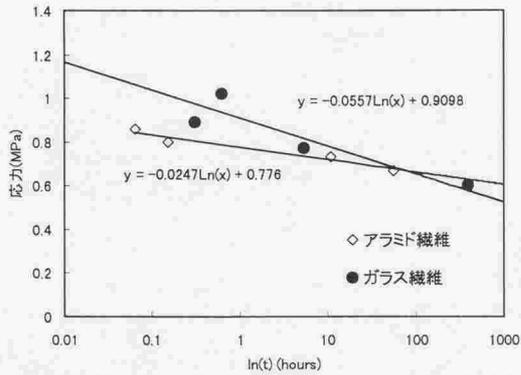


図 5.2.20 載荷応力比とクリープ破断時間 (破壊確率 0.5)

$$\text{アラミド繊維} : \sigma_{app} / \sigma_{ave} = 0.776 - 0.025 \cdot \ln(t) \quad (31)$$

$$\text{ガラス繊維} : \sigma_{app} / \sigma_{ave} = 0.910 - 0.056 \cdot \ln(t) \quad (32)$$

ここで、 $\sigma_{app}$ ：載荷応力 (MPa)

$\sigma_{ave}$ ：静的引張強度の平均 (MPa)

$t$ ：クリープ破断時間 (hours)

各関係式と実験結果の相関係数の 2 乗はアラミド繊維が 0.9523、ガラス繊維が 0.9098 となり、各繊維とも良い相関を示している。しかし、繊維の場合のクリープ破断時間のばらつきはロッドに比べて極めて大きいため、平均破壊確率が 100 時間を越えている場合でも、早いものは数 10 秒で破断する繊維もある。また、破壊確率の傾きはそれぞれの繊維を用いた FRP ロッドの破壊確率の傾きに比べて 2 分の 1 程度に小さくなっており、繊維のクリープ破断時間から直接 FRP ロッドのクリープ破断時間を算定することはできない。つまり、FRP ロッドのクリープ破壊はある一定の応力比における繊維のクリープ破断と同じではなく、これらの繊維を用いた FRP ロッドのクリープ特性を評価するためには、繊維のクリープ破断時間の平均だけでは不十分であり、その他の要因も考慮する必要があることがわかる。

次に、アラミド繊維とガラス繊維の載荷応力ごとのクリープ破断時間のばらつきを生存確率として図 5.2.21 および図 5.2.22 に示す<sup>9)</sup>。アラミド繊維とガラス繊維の両者は、その生存確率が載荷時間の対数に対して単調減少していることから、時間依存的な破壊機構を有している材料であると考えられる。さらに、アラミド繊維の場合は、各載荷応力比ごとに生存確率の減少度合いが異なっており、破断寿命に与える載荷応力比の影響が大きいことがわかる。例えば、載荷応力比 73%と 83%を比較すると、73%の場合は 1000 時間後も約 40%の生存確率を維持しているのに対して、83%の場合は 10 時間後には既に生存確率がほぼ 0 となっており、応力比 10%増加により破断寿命は 1/100 に減少している。これに対してガラス繊維の場合は、時間依存の破断は生じるものの、その生存確率は載荷応力比 70%と 80%の異なる載荷応力下においてほぼ一致する結果となった。このときの各応力ごとの生存確率と時間の関係を対数式

$$P_s(t) = A - B \cdot \ln(t) \quad (33)$$

で近似した。それぞれの載荷応力における生存確率と近似式の係数を表 5.2.2 および表 5.2.3 に示す。

各 FRP ロッドの場合の、時間依存性の破壊特性は既に示した通りであるから、これらの結果を各々の繊維と対応する FRP ロッドの場合と比較すると、各繊維とも FRP ロッドにした場合の破壊特性とよく類似しており、定性的には FRP ロッド破壊特性が繊維の破壊特性に依存していることが明らかとなった。

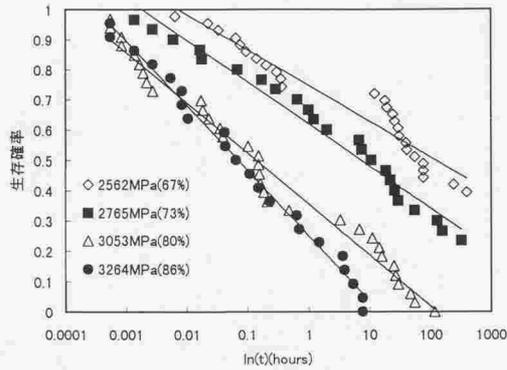


図 5.2.21 アラミド繊維の生存確率

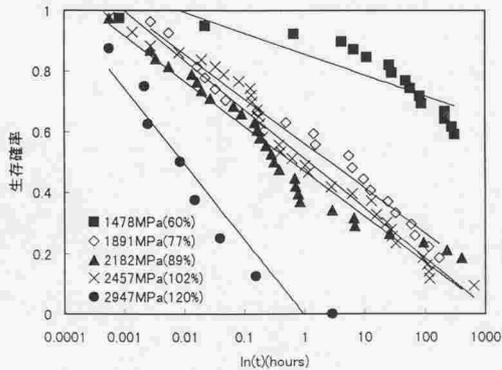


図 5.2.22 ガラス繊維の生存確率

表 5.2.2 アラミド繊維生存確率の対数近似係数

A <sub>nn</sub> 値			
載荷応力比	L=25mm	L=5mm	L=250mm
0.67	0.0513	0.0462	
0.73	0.0604	0.0424	
0.8	0.0727	0.0575	0.0946
0.86	0.0934	0.0873	

B <sub>nn</sub> 値			
載荷応力比	L=25mm	L=5mm	L=250mm
0.67	0.7472	0.8057	
0.73	0.6208	0.69	
0.8	0.3549	0.5511	0.3015
0.86	0.2508	0.2874	

表 5.2.3 ガラス繊維生存確率の対数近似係数

載荷応力比	A <sub>nn</sub> 値	B <sub>nn</sub> 値	繊維長(mm)
0.5	0.032	0.936	5
0.6	0.030	0.856	25
0.77	0.064	0.563	25
0.89	0.071	0.510	25
1.02	0.065	0.470	25
1	0.080	0.439	5
1.2	0.108	0.003	25

## 5.2.4 マトリックス樹脂

各種 FRP ロッド用マトリックス樹脂の各載荷応力ごとのクリープ破壊時間を図 5.2.23 に示す。試験方法は3章の実験概要に示したとおりである。マトリックス樹脂のクリープ破壊時間は、繊維の場合に比較して、載荷応力ごとのクリープ破壊時間のばらつきが少ない。これはマトリックス樹脂の静的引張強度や弾性係数のばらつきが小さいためである。アラミド繊維の場合と同様に、最小二乗法により個々のマトリックス樹脂のクリープひずみの近似曲線を(28)式で近似した。また、同一応力比ごとに近似式の係数を平均することにより、マトリックス樹脂の載荷応力ごとの平均クリープひずみ曲線を求めた。近似曲線と実験結果のクリープひずみを図 5.2.24～図 5.2.26 に、また近似式の係数と載荷応力との関係を、図 5.2.27 および表 5.2.4 に示す。また、各マトリックス樹脂の破断状況を写真 5.2.2 に示す。

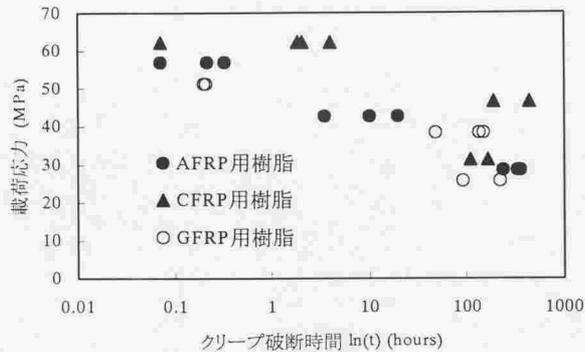


図 5.2.23 マトリックス樹脂のクリープ破壊時間

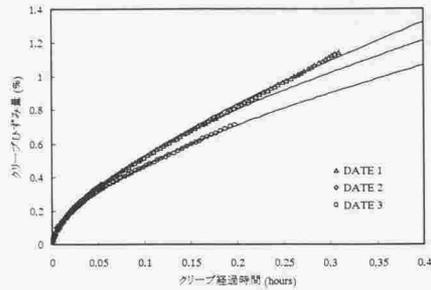


図 5.2.24(a) 荷重応力 80%のクリープひずみ (AFRP 用樹脂 57MPa)

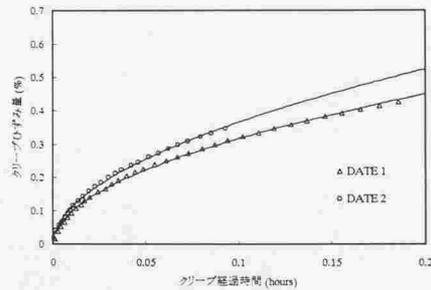


図 5.2.24(b) 荷重応力 80%のクリープひずみ (GFRP 用樹脂 51MPa)

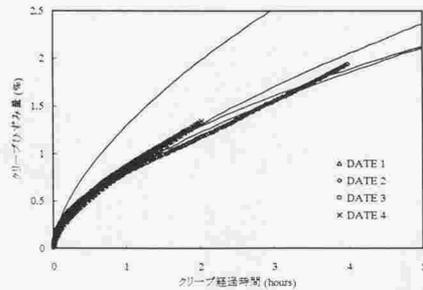


図 5.2.24(c) 荷重応力 80%のクリープひずみ (CFRP 用樹脂 62MPa)

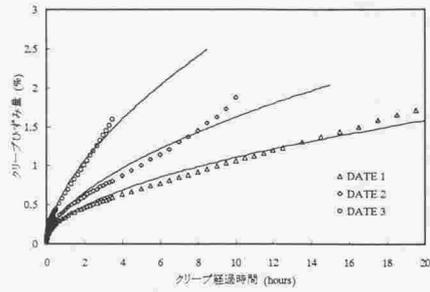


図 5.2.25(a) 載荷応力 60%のクリープひずみ (AFRP 用樹脂 42MPa)

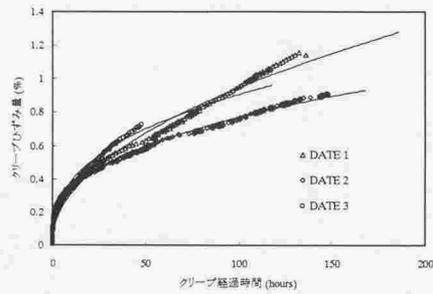


図 5.2.25(b) 載荷応力 60%のクリープひずみ (GFRP 用樹脂 39MPa)

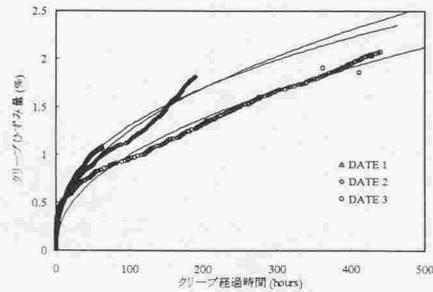


図 5.2.25(c) 載荷応力 60%のクリープひずみ (CFRP 用樹脂 46MPa)

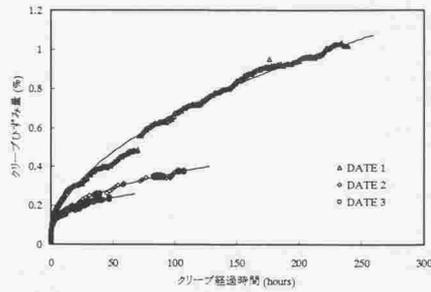


図 5.2.26(a) 載荷応力 40%のクリープひずみ (AFRP 用樹脂 28MPa)

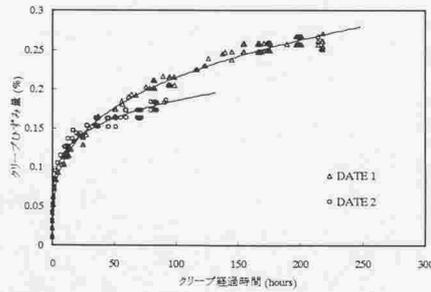


図 5.2.26(b) 載荷応力 40%のクリープひずみ (GFRP 用樹脂 26MPa)

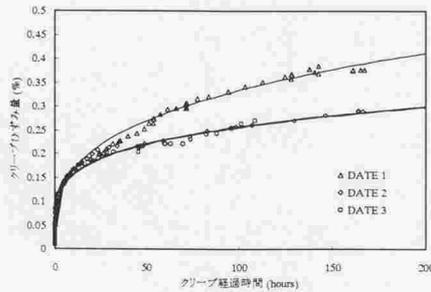


図 5.2.26(c) 載荷応力 40%のクリープひずみ (CFRP 用樹脂 31MPa)

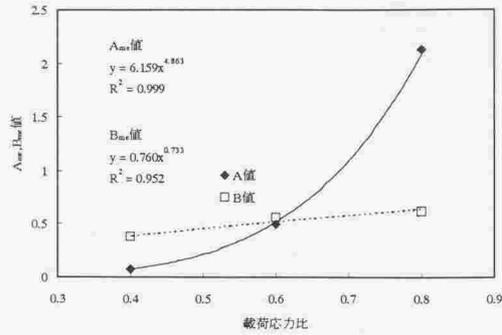


図 5.2.27(a) AFRP 用マトリックス樹脂の実験定数と荷重応力比の関係

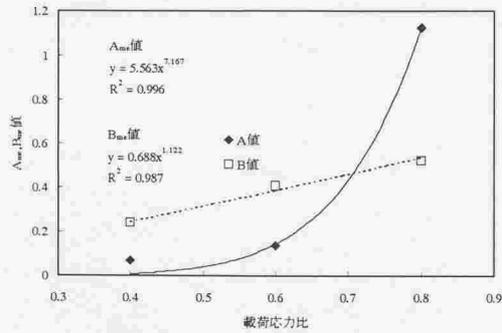


図 5.2.27(b) GFRP 用マトリックス樹脂の実験定数と荷重応力比の関係

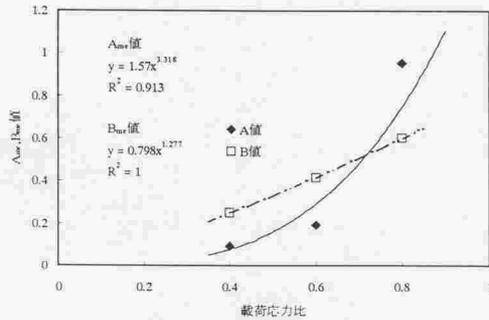


図 5.2.27(c) CFRP 用マトリックス樹脂の実験定数と荷重応力比の関係

表 5.2.4(a) AFRP 用マトリックス樹脂の実験定数

载荷応力比	試験体番号	A <sub>me</sub> 値	B <sub>me</sub> 値	R <sup>2</sup>
0.4	DATE 1	0.068	0.497	0.993
	DATE 2	0.070	0.359	0.990
	DATE 3	0.080	0.278	0.922
	平均	0.073	0.378	
0.6	DATE 1	0.336	0.516	0.990
	DATE 2	0.441	0.565	0.984
	DATE 3	0.701	0.592	0.992
	平均	0.388	0.541	
0.8	DATE 1	2.448	0.670	0.999
	DATE 2	2.109	0.603	0.998
	DATE 3	1.837	0.593	0.999
	平均	2.131	0.622	

表 5.2.4(b) GFRP 用マトリックス樹脂の実験定数

载荷応力比	試験体番号	A <sub>me</sub> 値	B <sub>me</sub> 値	R <sup>2</sup>
0.4	DATE 1	0.056	0.291	0.987
	DATE 2	0.077	0.190	0.956
	平均	0.067	0.241	
0.6	DATE 1	0.101	0.485	0.985
	DATE 2	0.140	0.370	0.996
	DATE 3	0.165	0.370	0.989
	平均	0.135	0.408	
0.8	DATE 1	1.027	0.513	0.998
	DATE 2	1.222	0.525	0.998
	平均	1.124	0.519	

表 5.2.4(c) CFRP 用マトリックス樹脂の実験定数

载荷応力比	試験体番号	A <sub>me</sub> 値	B <sub>me</sub> 値	R <sup>2</sup>
0.4	DATE 1	0.081	0.306	0.992
	DATE 2	0.094	0.218	0.989
	DATE 3	0.092	0.221	0.990
	平均	0.089	0.248	
0.6	DATE 1	0.219	0.387	0.999
	DATE 2	0.163	0.442	0.986
	DATE 3	0.114	0.471	0.988
	平均	0.191	0.415	
0.8	DATE 1	1.293	0.607	0.997
	DATE 2	0.810	0.595	0.995
	DATE 3	0.876	0.551	0.999
	DATE 4	0.830	0.650	0.999
	平均	0.952	0.601	



写真 4.2.2(a) AFRP ロッド用マトリックス樹脂のクリープ破断状況

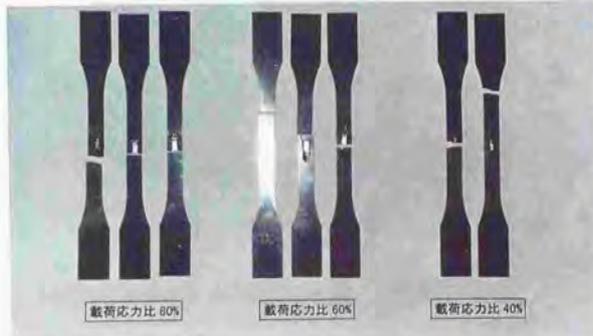


写真 4.2.2(b) GFRP ロッド用マトリックス樹脂のクリープ破断状況

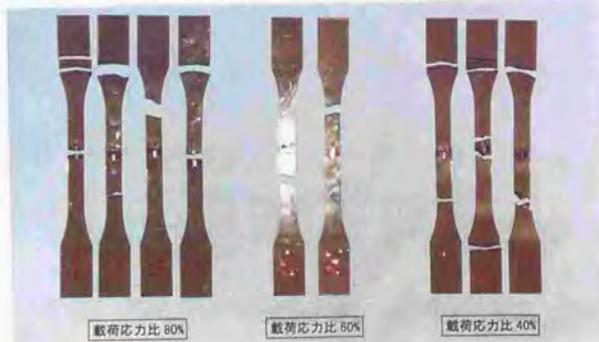


写真 4.2.2(c) CFRP ロッド用マトリックス樹脂のクリープ破断状況

### 5.3 FRP ロッドのクリープモデル

#### 5.3.1 概要

本節では、FRP ロッドの定量的なクリープ破壊モデルを構築することを試みた。まず、前節で示した各種繊維（炭素繊維、アラミド繊維、およびガラス繊維）のクリープ試験結果から、各種繊維のクリープ破壊特性をワイブルの確率理論<sup>7)</sup>に基き定量的に評価することを試みた。次に、各種マトリックス樹脂のクリープ試験結果から、FRP ロッド載荷時におけるマトリックスの応力緩和算定式を求めることを試みた。さらに、これら繊維の破壊特性を用いて、ロッド内部の繊維の損傷度を考慮した FRP ロッドのクリープ破断モデルを構築し、既往の実験結果との比較を行った。

#### 5.3.2 繊維のクリープ破壊時間の定式化

##### (1) ワイブル理論による破壊時間の推定

前述のクリープ破壊試験から明らかになった各種繊維固有の時間依存性の破壊特性を、ワイブルの理論に基づいて確率的に推定することを試みた。

繊維の破壊を有限個の結合部分から成り立っている鎖の破壊として考えた場合、その強度はワイブル分布に従うことが分かっている<sup>8)</sup>。時間依存破壊の場合も静的強度の場合と同様に、繊維全体の寿命は個々の結合部が有する寿命の最小値に一致すると仮定すると、 $t$  時間後に繊維が破断する確率は下式のように表せると考えられる。

$$F(t) = 1 - \exp\{-(t/\alpha)^m\} \quad (34)$$

ここで、 $F(t)$  : 繊維が  $t$  時間後までに破壊する確率、

$\alpha, m$  : ワイブル定数

なお  $F(t)$  は、応力載荷の際瞬時に破壊する繊維の破壊確率も含んだ、繊維の母集団全体に対する破壊確率  $F_{fail}(\alpha, t)$  でなければならない。このような瞬時に破壊する繊維は載荷応力以下の引張強度である繊維か、あるいは載荷応力に極めて近い引張強度である繊維である。したがって、対象とする繊維の母集団に対する破壊確率は、クリープ応力を静的に載

荷した場合に生存する確率に、クリープのみによる破壊確率を乗じることで、繊維群全体に対する破壊確率が算出できる。

$$F_{fall}(\sigma_c, t) = (1 - F_{fs}(\sigma_c)) \cdot F_{fc}(\sigma_c, t) \quad (35)$$

ここで、 $F_{fall}(\sigma_c, t)$  : 載荷応力  $\sigma_c$  で  $t$  時間後に破壊した繊維の母集団に対する破壊確率

$F_{fs}(\sigma_c)$  : 応力  $\sigma_c$  の時の静的破壊確率

$F_{fc}(\sigma_c, t)$  : 載荷応力  $\sigma_c$  で  $t$  時間後に破壊した繊維のクリープ破壊確率

母集団に対する破壊確率  $F_{fall}$  を(34)式の左辺としたとき、両辺の対数を2度とり、

$$\ln(-\ln(1 - F_{fall})) = m \ln(t) - m \ln(\alpha) \quad (36)$$

のような直線式に表すことにより、直線の傾きおよび  $y$  切片から定数  $\alpha$  および  $m$  を求めることができる。(36)式を用いてアラミド繊維とガラス繊維の破壊確率を示したものが図 5.3.1 および図 5.3.2 であり、全ての条件でほぼ直線となっていることから、繊維の時間依存性の破壊確率はほぼワイブル分布に従っているといえる。また、アラミド繊維、ガラス繊維ともに、載荷応力比が大きくなるに従って直線が左に移行しているのが分かる。これは、静的強度の場合と異なり、載荷応力によって繊維を構成する鎖の対象結合部数が変化するためと考えることができる。つまりこれは、載荷応力によって繊維内部で破壊する可能性のある結合部数が変化することを意味しており、載荷応力が大きくなるほど繊維は破断しやすくなることになる。ここで、 $t$  時間後に、ある一つの結合部が破壊する確率  $f(t)$  を、基準となる経過時間  $t_0$  (ここでは 1000 時間と設定) に対する比を用いて表すと、

$$f(t) = (t/t_0)^m \quad (37)$$

となり、このとき破壊の対象となる結合部数を  $n$  個とすると、 $t$  時間後に繊維が破壊しない確率は、

$$1 - F_{fall} = (1 - f(t))^n \quad (38)$$

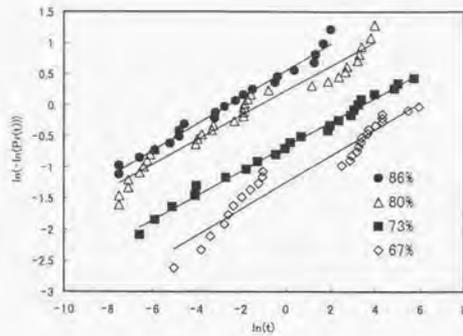


図 5.3.1 アラミド繊維破壊時間のワイブル分布

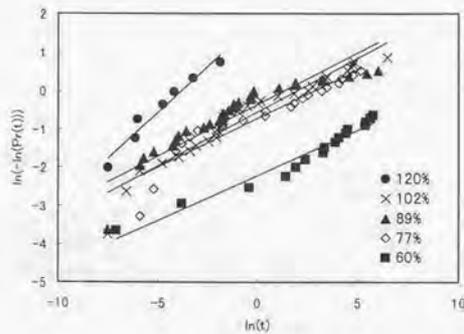


図 5.3.2 ガラス繊維破壊時間のワイブル分布

となるから、(34)(36)(37)式より、 $t$  時間後に破壊する可能性のある結合部  $n$  は

$$n = (t/\alpha)^m \quad (39)$$

と表せる。図 5.3.1 および図 5.3.2 と(36)、(39)式を用いて算定した両繊維の各載荷応力比におけるワイブル定数  $m$ 、 $\alpha$ 、ならびにその時の対象結合部数  $n$  を表 5.3.1 および表 5.3.2 に示す。また、載荷応力比に対する対象結合部数の変化を図 5.3.3 および図 5.3.4 に示す。

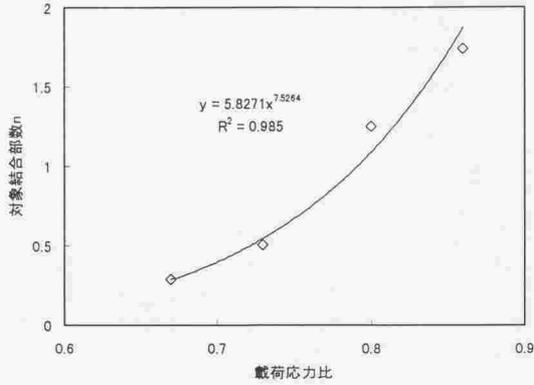


図 5.3.3 アラミド繊維の载荷応力と対象結合部数の関係

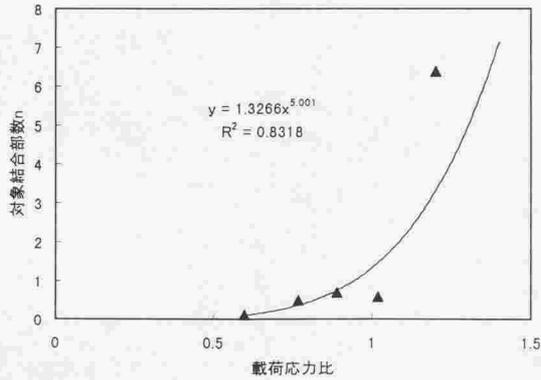


図 5.3.4 ガラス繊維の载荷応力比と対象結合部数の関係

表 5.3.1 アラミド繊維のワイブル定数と対象結合部数

载荷応力比	m	$-m \cdot \text{LN}(\alpha)$	$\alpha$	n
0.67	0.212	-1.246	435.650	0.288
0.73	0.196	-0.677	27.230	0.508
0.8	0.197	0.223	0.336	1.250
0.86	0.215	0.552	0.068	1.737
平均	0.204975			

表 5.3.2 ガラス繊維のワイブル定数と対象結合部数

载荷応力比	m	$-m \cdot \text{LN}(\alpha)$	$\alpha$	n
0.60	0.235	-2.209	3788.560	0.110
0.77	0.254	-0.730	15.235	0.482
0.89	0.270	-0.369	3.955	0.692
1.02	0.280	-0.566	8.260	0.568
1.20	0.485	1.853	0.001	6.378
平均	0.268			

表に示すように、ガラス繊維、アラミド繊維ともに、破壊時間のばらつき度合いを示す  $m$  の値は各応力比でほぼ一定の値を示しているが、対象結合部数に関する  $n$  や  $\alpha$  の値は応力比により大きく変動している。図から分かるように、応力比 60% 以下では対象結合部数  $n$  がほぼ 0 であるが、载荷応力の増加に伴い対象結合部数が急激に増加している。これは、アラミド繊維の時間依存破壊が载荷応力に大きく影響されていること示しており、この傾向は既往の研究による AFRP、GFRP ロッドの平均持続時間が 1000 時間を越える場合の载荷応力比が 60~65% 程度であったことと対応していると考えられる<sup>3)</sup>。

これらの結果から得られた各繊維の载荷応力と対象結合部数  $n$  の関係が、任意の応力状態で成立すると仮定すると、図 5.3.3 および図 5.3.4 中に示した近似式と(39)式を用いて、任意の応力比での  $n$  および  $\alpha$  を算出し、これを(34)式に代入することにより、ある応力下における繊維の生存確率の経時変化を推定できる。生存確率の推定結果を図 5.3.5 および図 5.3.6 に示す。なお、ワイブル係数  $m$  の値は、それぞれの繊維ごとに各応力比の平均値を用いた。アラミド繊維、ガラス繊維のどちらの場合も、実験による生存確率と推定結果はよく対応しており、本手法により繊維単体のクリープ破壊特性を定量的に表現できるといえる。

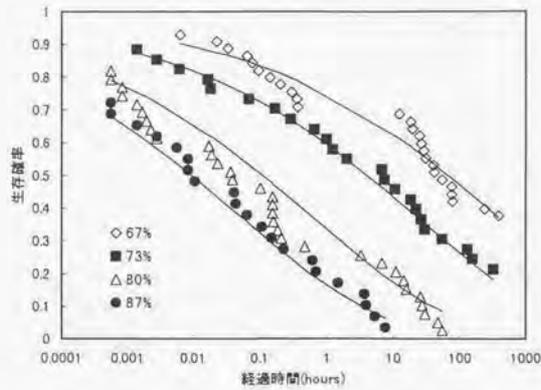


図 5.3.5 アラミド繊維の生存確率推定結果

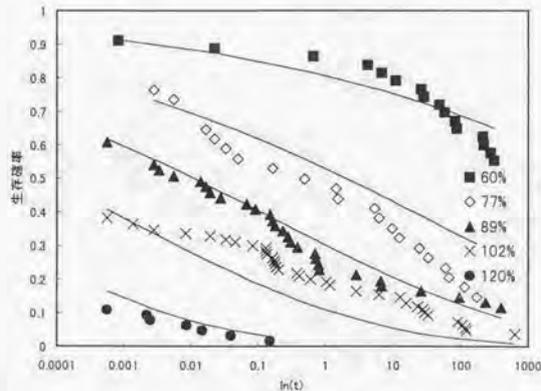


図 5.3.5 ガラス繊維の生存確率推定結果

ワイブル理論により時間に対する破壊確率が算出できるということは、それぞれの繊維がある破壊エネルギーで壊れるとすると、繊維内部に蓄えられるエネルギーの増加率が時間の関数であることを示しており、ある経過時間の破壊確率は、その時間までに蓄えられたエネルギーで破壊する確率と等しい。クリープの場合ような応力一定の場合、エネル

ギ-の増加速度はクリープひずみの増加速度と等しいと考え、繊維のクリープ破壊時間は載荷応力ごとの繊維のひずみ速度に依存するから、ワイブル理論の破壊確率のワイブルの破壊確率式の構造上から考えると、繊維のひずみ速度が時間に対する累乗式で表現できることになり、これは 5.3 で示したようにアラミド繊維のクリープひずみは(28)式のよ  
うな累乗関数による近似式が最も相関が良いことと対応している。

## (2)個々の繊維の応力比の算出

前述のワイブル理論に基づく繊維の生存確率は、任意の一定応力を載荷したときのその応力下における生存確率を示したものであるが、実際の FRP ロッドの破壊を考える上では、繊維にかかる応力は経時的に変化すると考えられる。そこで、応力の変化にともなう、生存確率の連続的な変化を考えやすくするために、繊維の応力比と破壊時間の関係についてより詳細に検討することとした。

繊維の平均応力比と破壊時間の関係については既に示したが、繊維の引張強度にはばらつきがあるため、一定の応力を載荷した場合、個々の繊維の応力比にも同様のばらつきが生じることになる。

ここで、全繊維の弾性係数がほぼ一定であり、繊維のクリープ破壊は応力比の大きいものから生じると仮定すると、 $F_{p,ant}(\sigma_c, t)$ と $F_{p,c}(\sigma_c, t)$ が等しいとき、つまり、クリープ破壊と静的破壊のように異なる破壊形態において破壊した繊維の全繊維に対する破壊確率が等しいとき、両繊維の引張強度は等しいと考えることができる(図 5.3.7 参照)。したがって、ワイブル理論によって求めたクリープ破壊確率を静的破壊確率へ変換することにより、クリープ破壊した個々の繊維の引張強度が推定し、それぞれの繊維の実質載荷応力比を算出することができる。

図 5.3.8 および図 5.3.9 に繊維長 25mm の場合のアラミド繊維とガラス繊維の実質応力比とクリープ破壊時間の関係を示す。図のように、いずれの繊維の場合も、繊維の破壊時間は載荷応力比が小さくなると時間の対数に対してほぼ直線的に長くなっている。繊維のクリープ破壊時間は、載荷応力ではなく、各々の繊維の強度に応じた実質的な載荷応力比にしたがって変化することが明らかとなった。つまり、ある引張強度分布を持つ繊維の集まりに対して、個々の引張強度や載荷応力に依らない破壊曲線として適用することができる。繊維の実質応力比とクリープ破壊時間との関係を最小二乗法により求めると下式のようなになる。

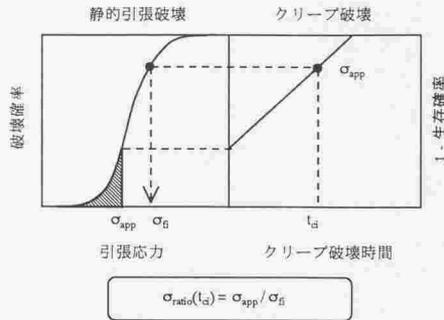


図 5.3.7 破壊確率に基づく強度推定方法の概念図

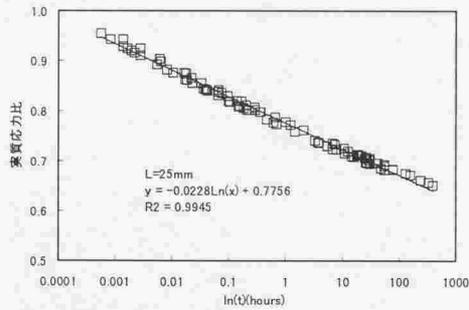


図 5.3.8 アラミド繊維のクリープ破壊曲線

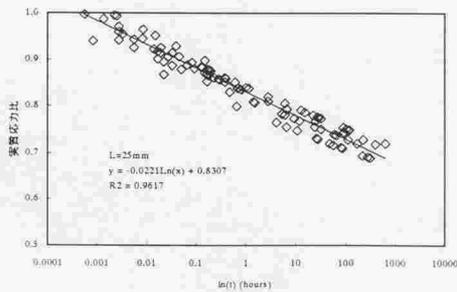


図 5.3.9 アラミド繊維のクリープ破壊曲線

$$\text{アラミド繊維} : \sigma_{app}/\sigma_{fs} = 0.776 - 0.023 \cdot \ln(t) \quad (40)$$

$$\text{ガラス繊維} : \sigma_{app}/\sigma_{fs} = 0.831 - 0.022 \cdot \ln(t) \quad (41)$$

ここで,  $\sigma_{app}$  : 載荷応力 (MPa)

$\sigma_{fs}$  : 各々の繊維の推定引張強度 (MPa)

t : クリープ破断時間 (hours)

なお, アラミド繊維に比べ, ガラス繊維の場合, 若干のばらつきが生じているが, これは実際のガラス繊維の弾性係数にばらつきが大きいため, 図 5.3.7 における強度推定結果に誤差が生じるためであると考えられる. すなわち, 繊維の弾性係数にばらつきがある場合, 破壊曲線の厚みが変わることになる. また, 繊維長繊維の引張強度は繊維長さに依存することは既に確かめられており, 任意の繊維長さの強度分布はワイブルの weakest-link 理論により図 5.3.10 および図 5.3.11 のように推定できる. この推定強度を用いて繊維長さが異なる場合のアラミド繊維とガラス繊維の実質応力比を算定し, 破壊時間との関係を求めた結果が図 5.3.12 および図 5.3.13 である. どちらの繊維の場合も 25mm と 5mm の繊維長ではほとんど関係式に変化はみられないが, 250mm のアラミド繊維の場合は 25mm の場合に比べて同一実質応力比におけるクリープ破壊時間が長くなっている. したがって, 繊維の強度分布が変動した場合, 破壊曲線は水平方向に移動することになると考えられる. ただし, 今回の実験では 250mm の場合のクリープ試験はデータ数が少ないため, 繊維長とクリープ破壊時間に関して, より多くのデータを蓄積する必要があると考えられる.

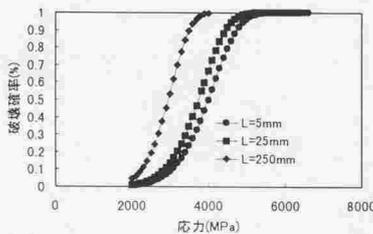


図 5.3.10 アラミド繊維の強度分布

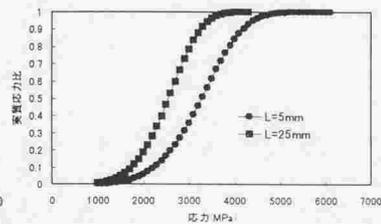


図 5.3.11 ガラス繊維の強度分布

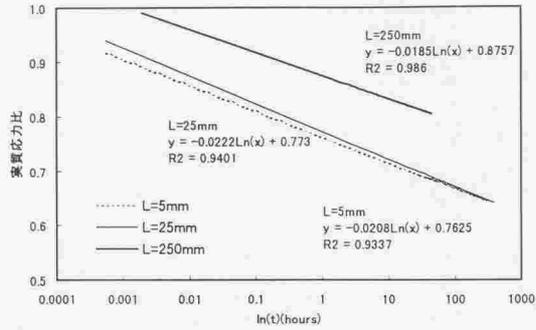


図 5.3.12 アラミド繊維の繊維長ごとのクリープ破壊曲線

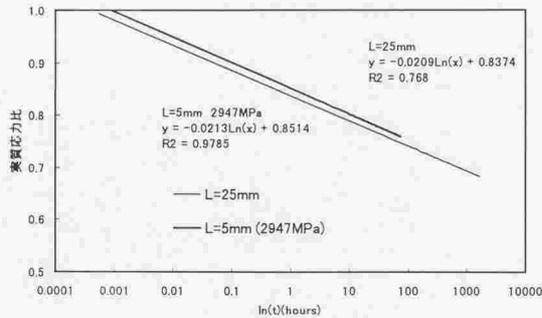


図 5.3.13 ガラス繊維の繊維長ごとのクリープ破壊曲線

### 5.3.3 FRP ロッドのクリープモデル

#### (I)破壊曲線の概念

FRP ロッドのクリープ破壊を考える場合、考慮しなければならない問題は、ロッドに使用する繊維の繊維長に応じた静的引張強度分布および弾性係数分布、繊維のひずみ速度、マトリックス樹脂の引張強度と弾性係数、マトリックス樹脂と繊維のせん断力、マトリックスの応力緩和など多くの要因があげられるが、ここではまず前節で得られた繊維の応力比とクリープ破壊時間の関係式（破壊曲線）を拡張し、FRP ロッドのクリープ破壊モデル

ルを構築することを試みた。破壊曲線を FRP ロッドの破壊に拡張するにあたり、その概念を整理する (図 5.3.14 参照)。

まず、繊維の弾性係数のばらつきに関しては前節で説明したとおり、繊維の弾性係数にばらつきがある場合は破壊曲線もそれに応じた太さを持つ。つまり、弾性係数のばらつきが大きいほど太くなり、少ないほど細くなる。例えばアラミド繊維の場合とガラス繊維の場合を比べると、ガラス繊維の方が弾性係数のばらつきが大きいため破壊曲線は太くなり、同一実質応力比におけるクリープ破断時間のばらつきも大きくなることになる。これは弾性係数が変われば、同じ応力を与えたとき弾性ひずみ量とクリープひずみ速度が変化すると考えられるためである。

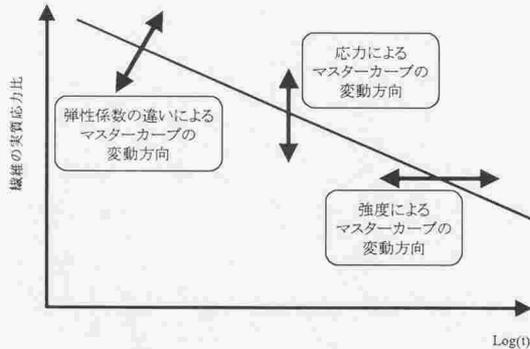


図 5.3.14 繊維の破壊曲線の FRP ロッドへの拡張概念



図 5.3.15 せん断力による破断繊維の寄与

次に、繊維の強度分布が変化する場合を考える。FRP ロッドにある程度以上の応力を与えると、繊維がその応力を分担することになるが、強度が分担応力よりも低い繊維はロッド内部で破断する。しかし、シエララグ理論により破断した繊維もマトリックス樹脂との界面に働くせん断力によりある程度の応力をうけると考えられる(図 5.3.15 参照)。このせん断力を介することにより破断した繊維もある程度の伝達長(臨界伝達長)を経た位置での繊維の応力は未破断繊維の分担応力まで回復することになるため、その臨界伝達長さ以上の位置では破断していない繊維として扱うことができる。逆にいえば、ある断面における応力分布を考えた場合、その断面の応力状態に影響するのはその断面から臨界伝達長さだけ離れた部分までの範囲における繊維の状態のみとなる。この臨界伝達長さはマトリックス樹脂のせん断応力に依存するため、マトリックス樹脂にリラクゼーションによる応力緩和が生じせん断力が低下した場合は、それに応じて臨界伝達長さは長くなる。臨界伝達長さの変化は繊維長の変化と同義であるから、繊維長の変化により繊維の強度分布が変化することになる。载荷応力が一定で強度のみが変化した場合、クリープひずみ速度は一定で繊維が破断する最大クリープひずみ量が変化する。したがって、強度が変化した繊維に対する破壊曲線は時間軸に水平に移動することになる。

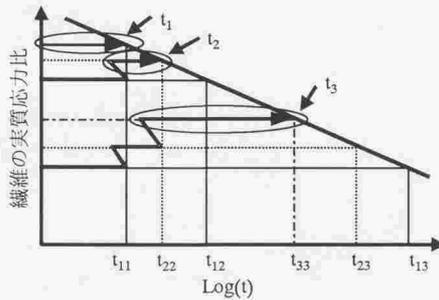
最後に、臨界伝達長の範囲内で繊維が破断した場合を考えると、未破断繊維の分担応力が増加するために载荷応力が変化する。このとき繊維の強度分布は一定のままと考えれば、個々の繊維は新しい分担応力に応じた応力比まで応力軸に平行に移動する。このとき、過去の応力比において蓄積されたひずみエネルギーは保存されたまま移動すると考えれば、過去の応力比におけるクリープ破断時間に対する時間の割合が等しい場所に移動することになる。

以上のように、繊維のクリープ破壊に対する破壊曲線は、クリープ開始時の繊維の初期条件、クリープ応力载荷中のロッド内の繊維の応力状態に応じて変動させることにより、FRP ロッドのクリープ破壊へ拡張することが可能であると考えられる。

## (2) 繊維束のクリープ破壊

まず簡単のためにマトリックスが応力伝達を考慮しないときのある長さの繊維の束に一定荷重を与えた場合、つまり繊維束のクリープ破壊について考える。弾性係数がすべて等しいと仮定すると、全体にある応力を载荷した場合の各繊維の分担応力は等しくなる。繊維の強度は強度分布にしたがってばらついているから、繊維束の中で最も強度が低い繊維、つまり実質応力比が最も大きいものがまず破断する。その繊維が壊れることによりに

より各繊維の分担応力が一律に増加するため、図 5.3.16(a)に示したようにそれぞれ実質応力比が変化する。このとき、各繊維がそれまでの応力比で蓄えたひずみエネルギーを保持した状態で、高い実質応力比の座標に移動する（図 5.3.16(b)参照）。その後、次の繊維が破断する時間まで、各繊維はその実質応力レベルでエネルギーを蓄えることになる。強度の順番に繊維が破断する度に同一の作業を繰り返し、最後の繊維が破断するまでに要した時間が繊維束の破壊時間となる。破壊時間を算出するためのフローチャートを図 5.3.17 に示す。



ロッドのクリープ破断時間 =  $\Sigma t_i(l)$

図 5.3.16(a) 繊維束のクリープ破壊時間算出の概念

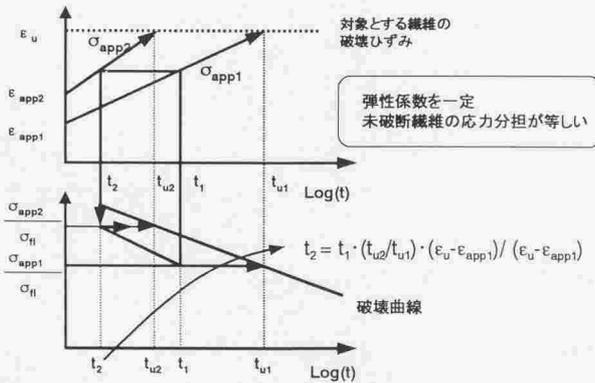


図 5.3.16(b) 繊維の分担応力が変動した時の破壊曲線上での移動

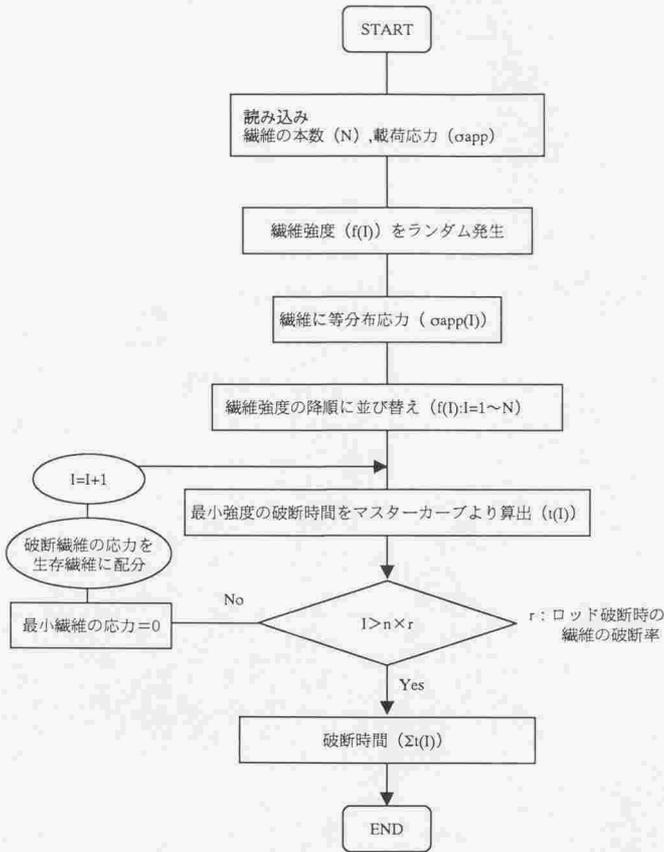


図 5.3.17 繊維の破壊曲線を利用した繊維束のクリープ破壊時間推定フロー

図 5.3.18～図 5.3.20 は繊維数を 10, 100, 1000 本とした場合の繊維束について、繊維の平均強度に対する荷重応力比が 50, 60, 80, 90, 100%としたときの、クリープ破壊時間を計算した結果である。強度分布のばらつきは繊維束ごとに 3 ケース用意した乱数を用いた。図中に示すケースが同じものは同じ乱数を用いていることを示す。また、解析に用いた破壊曲線は繊維長 25mm の場合のアラミド繊維の強度分布および平均弾性係数により求めたものである。

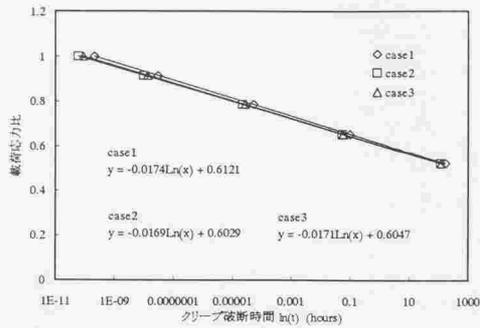


図 5.3.18 繊維束のクリープ破壊時間 (10 本)

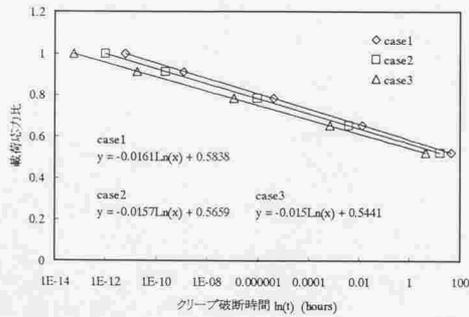


図 5.3.19 繊維束のクリープ破壊時間 (100 本)

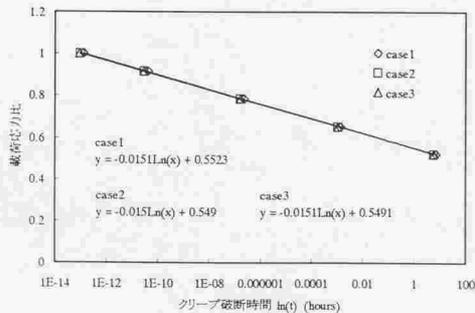


図 5.3.20 繊維束のクリープ破壊時間 (1000 本)

図より繊維束中の繊維の数が多くなるにしたがって、同一応力におけるクリープ破壊時間が短くなっている。これは繊維の数が多くなるにしたがって強度が一番弱い繊維がクリープ破壊する時間が早くなり易いためであり、つまり繊維束全体のクリープ破壊の開始時間が早まるためであると考えられる。

また、繊維 1000 本のアラミド繊維束とガラス繊維束における、推定破壊時間と実験による破壊時間とを比較した結果を図 5.3.21 およびに示す。

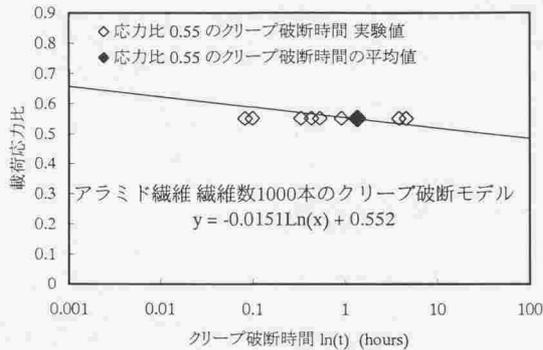


図 5.3.21(a) アラミド繊維束の解析結果と実験値の比較

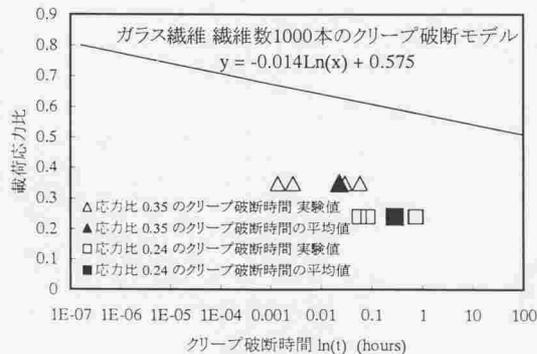


図 5.3.21(b) ガラス繊維束の解析結果と実験値の比較

アラミド繊維の場合、荷重応力比 50%における実験値と解析値は極めて良く対応しており、解析による推定結果 1.14 時間に対して、実験値の平均クリープ破壊時間は 1.35 時間となっている。したがって、アラミド繊維束のクリープ破壊に関しては、本モデルの妥当性を示していると考えられる。

一方、ガラス繊維束の場合の実験結果における平均破壊時間は、荷重応力比 0.35 および 0.24 でそれぞれ 1.4 分と 14 分となっており、推定結果は定性的な破壊時間の傾向を表現しているものの、いずれの場合も大きな違いが生じた。この原因としては、主に破壊曲線の誤差が考えられる。つまり、ガラス繊維のクリープひずみ量はアラミド繊維に比べて極めて少ないため、アラミド繊維に比べてクリープ破壊がほぼ瞬間的に生じる応力比の範囲が広く、クリープ破壊曲線の算出に際して、実際よりも静的破壊強度を小さく、すなわち実質荷重応力比を大きく見積もっているためであると考えられる。これは、ガラス繊維の破壊がアラミド繊維よりも、荷重応力比に敏感であることを示しているものと考えられる。したがってガラス繊維の場合は、どの程度までの荷重応力比で瞬間的破壊からクリープ破壊に転じるかを明らかにする必要がある、そのための実験データの蓄積と検討を要すると考えられる。

### (3)FRP ロッドへの拡張

以上の繊維束のクリープ破壊モデルを FRP ロッドに拡張するには、さらに本モデルにマトリックス樹脂の影響を考慮した、複合材料としての破壊モデルを構築する必要がある。そのためには図 5.3.15 で示したような構成材料同士の直列および並列的影響を考える必要がある<sup>9),10)</sup>。

本研究では、主に構成材料ごとのクリープ特性を明らかにするとともに、繊維束の場合のクリープ破壊モデルを構築したが、今後繊維とマトリックス樹脂の間のせん断力や、断面方向の応力伝達速度等についての実験および解析的検討を行いその結果を本モデルに加味することにより、複合材料としての FRP ロッドのクリープ破壊モデルを構築することが可能であると考えられる。

## 5.4 まとめ

本章では、各種 FRP ロッドの定量的なクリープ破壊モデルを構築することを目的として、まず、これまでほとんど検討されていなかった、主な FRP ロッド用各種繊維（炭素繊維、アラミド繊維、およびガラス繊維）のクリープ破壊特性を実験的に検討するとともに、ワイブルの確率理論に基づく定量的評価を試みた。さらに、これら繊維の破壊特性を用いて、繊維の損傷度を考慮した繊維束のクリープ破断モデルを構築し、既往の実験結果との比較を行った。その結果以下のようなことが明らかとなった。

- (1) 炭素繊維、アラミド繊維、およびガラス繊維を用いた CFRP ロッド、AFRP ロッド、AFRP ロッドはいずれも一定荷重応力によるクリープ破壊を生じる。また、いずれの FRP ロッドも、同一の荷重応力におけるクリープ破壊形態が試験体によって異なるため、クリープ破壊時間にばらつきが生じやすい。
- (2) クリープ破壊確率が 50% となる持続時間をクリープ破壊時間と定義すると、各 FRP ロッドの平均引張強度に対する応力比と破断時間の関係は時間の対数に対して、ほぼ比例関係があるが、FRP ロッドの種類によりその直線の傾きは異なる。
- (3) 土木学会の定める連続繊維補強材のクリープ破壊試験方法（案）（JSCE-E 533-1995）に基づき応力比とクリープ破断時間の近似式から 100 万時間（約 114 年）後の応力を推定し、100 万時間後のクリープ破断を生じない限界荷重応力を推定すると、CFRP ロッドは 1244.6MPa（応力比 91.1%）、AFRP ロッドは 763.4MPa（応力比 46.1%）、GFRP ロッドは 446.9MPa（応力比 30%）、となる。
- (4) FRP ロッドのクリープひずみ曲線は各ロッドの固有の特性を持っており、CFRP ロッドの場合、荷重応力比に関わらずほとんどクリープひずみが生じず突然クリープ破断に至る。AFRP ロッドの場合は、鋼材のクリープと同様の傾向がみられ、すなわち、初期段階でクリープひずみが急激に増加する第 1 期クリープ、ひずみ量がほぼ一定の割合で増加を続ける第 2 期クリープ、再度ひずみか急激に増加し破断に至る第 3 期クリープ、が現れる。GFRP ロッドの場合は、連続的なクリープひずみの増加は微小であるが、AFRP ロッドと同様、荷重途中で階段状の急激なひずみの増加を生じながらクリープ破断に至る。
- (5) 各種 FRP 用繊維のうちアラミド繊維とガラス繊維はクリープ破壊およびクリープひ

ずみを生じる。アラミド繊維とガラス繊維のクリープ破壊確率が 50%となる持続時間と載荷応力比の関係は FRP ロッドと同様に比例関係にあるがその傾きは繊維の種類によってことなる。またこの結果を各々の繊維と対応する FRP ロッドの場合と比較すると、各繊維とも FRP ロッドにした場合の破壊特性とよく類似していることが明らかとなった。

- (6) 繊維の破壊を有限個の結合部分から成り立っている鎖の破壊として考えるワイプルの Weakest-link 理論を拡張し、クリープひずみ速度が時間の関数である場合繊維全体の寿命は個々の結合部が破壊するひずみエネルギーの最小値に一致すると仮定すると、任意の載荷応力比と時間における繊維の生存確率を算出することが可能である。
- (7) クリープ時間と繊維の生存確率を繊維全体の静的破壊確率に変換することにより、個々の繊維の実質応力比とクリープ破壊時間の関係式（破壊曲線）を求めることが可能であり、これを弾性係数のばらつき、強度分布の変化、載荷応力の変化等の影響を考慮して拡張することにより、繊維束のクリープ破壊時間を推定することが可能である。
- (8) 今後さらに、マトリックス樹脂による伝達応力、せん断力および臨界伝達長の経時変化等を検討し、繊維の破壊曲線によるクリープ破壊モデルに導入することにより、FRP ロッドクリープ破壊モデルを構築することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 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，コンクリートライブラリー 72 号，1992.4
- 2) Weibull：A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, Vol.13, pp.293-297, 1951.9
- 3) 西村，魚本健人：FRP ロッドのクリープ破壊に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.1, pp.547-550, 1995
- 4) 魚本，西村，山口，大賀：繊維補強プラスチックロッドの時間依存特性の評価，土木学会論文集投稿中
- 5) 魚本，西村：FRP ロッドの静的強度と弾性係数，土木学会論文集，No.472, V-17, pp.77-86, 1993.8
- 6) 横堀武夫：材料強度学，技報堂出版株式会社，1955.9
- 7) Weibull：A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, Vol.13, pp.293-297, 1951.9
- 8) 山口明伸，西村次男，魚本健人：紫外線による各種繊維の劣化現象の評価方法に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.1161-1166, 1996.6
- 9) Curtin. W. A：Theory of Mechanical Properties of Ceramic-Matrix Composites, J. Am. Ceram. Soc., Vol.74(11),pp.2837-45,1991
- 10) Fabeny.B and Curtin.W.A：Damage-enhanced Creep and Rupture in Fiber-reinforced Composites, Acta mater, Vol.44,No9,pp.3439-3415,1996

## 第6章 結論

本研究は、FRP ロッドをコンクリート用補強材として用いる際に必要な耐久性のうち、既にその複合材料としての劣化現象が問題となっている紫外線劣化とクリーブ破壊を例に取り実験的検討を行い、それぞれについて、各種 FRP ロッド、またこれらを構成する各種繊維とマトリックス樹脂に与える影響を定量的に明らかにするとともに、その複合材料としての劣化および破壊のモデルを構築することを目的とした。

その結果紫外線劣化、およびクリーブ破壊についてそれぞれ以下のようなことが明らかとなった。

(1) 各種 FRP ロッドの紫外線照射促進試験の結果、CFRP、GFRP ロッドは紫外線による強度の影響がほとんどみられないのに対し、AFRP ロッドは、紫外線照射 500 時間で約 11% (180MPa) の強度低下、2500 時間では約 13% (216MPa) の強度低下を示し、CFRP ロッドおよび GFRP ロッドとは異なり強度低下が大きく、紫外線による影響を最も受けやすいことが明らかとなった。この強度低下の原因は、AFRP ロッドの強化材であるアラミド繊維が紫外線によりれっかしたためであると考えられる。

(2) 各種繊維の紫外線照射促進試験の結果、炭素繊維、ガラス繊維には紫外線による影響がみられなかったが、アラミド繊維の場合は紫外線照射 10 時間後で約 16% (550MPa)、1000 時間照射後には約 55% (1980MPa) の強度低下が生じた。このアラミド繊維の紫外線劣化は、Weibull の Weakest-link 理論に基づき、紫外線の照射によりアラミド繊維内部の欠陥数が増加すると仮定することにより、定量的に劣化後の強度を推定できることが明らかとなった。

(3) 各種マトリックス樹脂の紫外線照射促進試験の結果、各種マトリックスは紫外線照射により $\text{>C=C<}$ 結合が減少しその化学的組成が変化することが明らかになった。マトリックス樹脂中に存在する、 $\text{>C=C<}$ 結合の吸収スペクトル面積の時間的および位置的变化からマトリックス樹脂の紫外線に対する吸収率および透過率を求めることにより、マトリックス樹脂の紫外線に対する保護皮膜としての効果を明確にすることが可能となった。

(4) マトリックス樹脂の紫外線吸収率を考慮し、ロッド内部へ到達する紫外線強度が位置的に変化する場合におけるロッド内アラミド繊維の照射時間ごとの強度分布を算出することにより、AFRP ロッドの紫外線による強度低下を推定することが可能である。本手法により推定した紫外線照射にともなう AFRP ロッドの引張強度低下率は、実際の紫外線照射促進試験結果とよく対応することが明らかとなった。

(5) 屋外曝露した各種 FRP ロッドの外観および強度試験結果から、FRP ロッドは風雨や温・湿度などの紫外線以外の要因によりマトリックス樹脂が剥離し引張強度も若干低下することが推察される。CFRP ロッドを屋外曝露後の強度低下の原因がマトリックス樹脂の風化や剥離にあると仮定し、その消失分の影響を加味した場合の紫外線照射後の AFRP ロッドの強度低下率を推定すると、屋外曝露した AFRP ロッドの強度低下率と極めて良い相関を示した。したがって、FRP ロッドの耐候性を定量的に評価するためには、紫外線による繊維の強度低下、マトリックス樹脂の紫外線吸収性、さらに、マトリックスの風化・剥離による消失分の影響を考慮する必要があると考えられる。

(6) 炭素繊維、アラミド繊維、およびガラス繊維を用いた CFRP ロッド、AFRP ロッド、AFRP ロッドはいずれも一定応力によるクリープ破壊を生じる。また、いずれの FRP ロッドも、同一の応力におけるクリープ破壊形態が試験体によって異なるため、クリープ破壊時間にばらつきが生じやすい。

(7) クリープ破壊確率が 50%となる持続時間をクリープ破壊時間と定義すると、各 FRP ロッドの平均引張強度に対する応力比と破断時間の関係は時間の対数に対して、ほぼ比例関係があるが、FRP ロッドの種類によりその直線の傾きは異なる。

(8) 土木学会の定める連続繊維補強材のクリープ破壊試験方法(案)(JSCE-E 533-1995)に基づき応力比とクリープ破断時間の近似式から100万時間(約114年)後の応力を推定し、100万時間後のクリープ破断を生じない限界载荷応力を推定すると、CFRP ロッドは1244.6MPa(応力比91.1%)、AFRP ロッドは763.4MPa(応力比46.1%)、GFRP ロッドは446.9MPa(応力比30%)となる。

(9) FRP ロッドのクリープひずみ曲線は各ロッドの固有の特性を持っており、CFRP ロッドの場合、载荷応力比に関わらずほとんどクリープひずみが生じず突然クリープ破断に至る。AFRP ロッドの場合は、鋼材のクリープと同様の傾向がみられ、すなわち、初期段階でクリープひずみが急激に増加する第1期クリープ、ひずみ量がほぼ一定の割合で増加を続ける第2期クリープ、再度ひずみが急激に増加し破断に至る第3期クリープ、が現れる。GFRP ロッドの場合は、連続的なクリープひずみの増加は微小であるが、AFRP ロッドと同様、载荷途中で階段状の急激なひずみの増加を生じながらクリープ破断に至る。

(10) 各種 FRP 用繊維のうちアラミド繊維とガラス繊維はクリープ破壊およびクリープひずみを生じる。アラミド繊維とガラス繊維のクリープ破壊確率が50%となる持続時間と载荷応力比の関係はFRP ロッドと同様に比例関係にあるがその傾きは繊維の種類によってことなる。またこの結果を各々の繊維と対応するFRP ロッドの場合と比較すると、各繊維ともFRP ロッドにした場合の破壊特性とよく類似していることが明らかとなった。

(11) 繊維の破壊を有限個の結合部分から成り立っている鎖の破壊として考える Weibull の Weakest-link 理論を拡張し、クリープひずみ速度が時間の関数である場合繊維全体の寿命は個々の結合部が破壊するひずみエネルギーの最小値に一致すると仮定すると、任意の载荷応力比と時間における繊維の生存確率を算出することが可能である。

(12) クリープ時間と繊維の生存確率を繊維全体の静的破壊確率に変換することにより、個々の繊維の実質応力比とクリープ破壊時間の関係式(破壊曲線)を求めることが可能であり、これを弾性係数のばらつき、強度分布の変化、载荷応力の変化等の影響を考慮して拡張することにより、繊維束のクリープ破壊時間を推定することが可能である。

(14) 今後さらに、マトリックス樹脂による伝達応力、せん断力および臨界伝達長の経時変化等を検討し、繊維の破壊曲線によるクリープ破壊モデルに導入することにより、FRP ロッドクリープ破壊モデルを構築することが可能であると考えられる。

## 謝辞

本論文は、東京大学生産技術研究所第5部魚本研究室においておこなった研究を取りまとめたものです。本研究を取りまとめるにあたり、研究全般にわたって終始多大な御指導御鞭撻を賜りました東京大学生産技術研究所 教授 魚本健人先生に心より感謝致します。大学院の5年間にわたって、研究面はもちろん、人生論、文化論、経済論、歴史論等々多方面にわたる数多くの貴重なご教授を頂いたお陰で、研究者としてだけでなく一個の人間としての視野が私なりに狭いながらも広がったと思っております。また、魚本研究室最初の日本人博士課程学生ではありましたが、御期待に十分添えず最初から最後までご迷惑をかけてばかりの私を、見捨てることなく御指導下さり、果ては結婚・就職まで面倒を見て頂きました。本当に魚本先生には御礼の言葉ありません。

東京大学 教授 岡村甫 先生、同 教授 藤野陽三 先生、同 教授 前川宏一 先生、同 助教授 古関潤一 先生には、本論文の副査をお引き受け頂くとともに、研究に関して数多くの貴重な御助言を頂戴いただきましたことを心より深く感謝致します。本研究は、決して完結しておらず今後多くの課題を残すものですが、副査の先生方の貴重な御指導御助言を今後の研究に生かしていきたいと思えます。

東京大学生産技術研究所 助教授 舘石和雄先生には、お忙しい中、東工大学部時代から本論文の締め切り直前まで長い期間にわたって温かい御指導を頂きました。心より感謝致します。

同 助手 加藤佳孝先生には、修士論文から博士論文に至る私の執筆したほぼ全ての論文に関して御相談に乗って頂きました。同時にそれらに関して実務的な御協力を頂くこともしばしばでした。また、良き友人として精神的な支えでもありました。今後とも長くお付き合いさせて頂ければ幸いです。同 技官 西村次男氏、同 技官 星野富夫氏には、実験に際して多大な御協力を頂くとともに公私にわたる御指導と御助言を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。特に西村次男氏には、FRP に関する試験体の作成方法から実験器械の扱い方全般に加え、義理・人情まで懇切丁寧にかつ厳しく御指導頂きました。また、本研究で参照している実験データの多くは氏によるものであり、氏の御協力なしに本論文をまとめることは出来ませんでした。深く感謝の意を表します。

東京都立大学 助教授 大賀宏行先生には、魚本研究室にお世話になる際、博士課程進学の際、また、就職先を決める際等これまで岐路に立った際にいつもご相談に乗って頂きました。芝浦工業大学 教授 矢島哲司先生、同 講師 勝木太先生、鹿児島大学 助教授 武若耕司先生には、いつも私の論文の進捗状況をお気にかけてご心配下さるとともに、優しさの中にも厳しく御指導頂きました。元東京工業大学 助手 久田真先生、同 鎌田敏郎先生には、東工大卒論生の頃から公私にわたりご助言御指導を頂きました。上記先生方に深く感謝致します。

鹿島建設(株) 古澤靖彦氏, 前田建設(株) 渡部正氏, 日本セメント(株) 後藤孝治氏, 元藤沢薬品(株) 大下健二氏, 佐藤工業(株) 伊東良浩氏, 同 小林裕二氏, (財)首都高速道路技術センター 吉沢勝氏, 同 友清剛氏 大成建設(株) 岡本修一氏, 電気化学工業(株) 森本丈太郎氏, 同 荒木昭俊氏 鹿島建設(株) 大野俊夫氏, (株)建設技術研究所 木下勝也氏, 秩父小野田セメント(株) 白坂徳彦氏, NMB(株) 太田晃氏, 上記の方々には, 魚本研究室の研究員として共に苦しみつつも学部生大学院生を含む私達学生のために, 貴重な時間を惜しむことなく昼夜をわけず御指導御助言を頂きました。上記の方々と懇意にして頂いたことは, 私が魚本研究室で得た最大の財産だと思います。ここに深く感謝の意を表します。

東日本旅客鉄道(株) 関口司氏, 東京電力(株) 大矢孝氏, 東急建設(株) 山口重英氏, 建設省土木研究所 大住道生氏, パシフィックコンサルタンツ(株) 増田克洋氏, 三井建設(株) 井波良太氏, Chayadi Jong Herman 氏, 大成建設(株) 許鑑麟氏, 双龍セメント(株) 朴錫均氏, 埼玉大学 牧剛史氏, 九州電力(株) 相良健一氏 東京大学大学院, Umesh Chandra Puri 氏, 同 出口知史氏, 同 後藤充志氏, 同, 植松敬治氏, 塚原絵万女史, 福島謙一氏, 芝浦工業大学大学院 伊代田岳史氏, 千葉工業大学大学院 鈴木元敏氏, その他多くの卒論生みなさんとは, 魚本研究室所属の大学院生の先輩あるいは後輩として, 時に学び, 時に遊び, 貴重な時間を共有させて頂きました。深く感謝するとともに, みなさんのご活躍をお祈りします。

元秘書 石井瑞恵さん, Jha Rekha さん, 秘書 奥山信江さん, 同 古澤恵子さんには, 研究員, 大学院生を問わず, 魚本研究室において実験・解析に日々苦悩する我々を常に温かく励まして頂きました。また, コンクリート研究室秘書 田畑和泉さんには, いつも突然のお願いにもかかわらず私の本郷キャンパスでの書類手続き等を快く代行して頂きました。深く感謝いたします。

元芝浦工業大学卒論生, 尻無浜公人氏, 金井建二氏, 金田修一氏には, 私の魚本研究室在籍期間中において, 共に実験に苦しみその結果に一喜一憂する研究のパートナーとして大変お世話になりました。大学院生として面倒をみてあげるべき立場でしたが, 決して謙遜ではなく, 逆の立場になることが多く少なからず迷惑をかけたと思います。特に, 金田修一氏には大変お世話になり, 本論文を取りまとめるにあたり, 試験体作成からファイル管理まで非常に多大な御協力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。今後のご活躍を祈っております。

最後に, 常に温かく見守ってくれていた両親と義理の父, そして見守ってくれているはずの祖父母と義理の母に, そして誰よりも私を心配し応援してくれた妻 明子に心から感謝の意を表して謝辞と致します。

平成 10 年 3 月

山口明伸

# 付 録

繊維単体のクリープ試験データ

## アラミド繊維

繊維長 : 25mm  
 載荷応力 : 2562MPa  
 破断本数 : 26本  
 未破断本数 : 17本  
 0sで破断 : 5本  
 試験本数 : 48本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00639
2	0.02222
3	0.03333
4	0.06528
5	0.07639
6	0.09667
7	0.14167
8	0.20583
9	0.30000
10	0.35889
11	0.37222
12	12.44167
13	18.22778
14	19.61667
15	24.80278
16	26.57500
17	29.46311
18	30.72778
19	40.27778
20	41.83889
21	55.55556
22	76.32889
23	77.20000
24	77.77778
25	241.01667
26	393.21667

## アラミド繊維

繊維長 : 25mm  
 載荷応力 : 2765MPa  
 破断本数 : 23本  
 未破断本数 : 7本  
 0sで破断 : 10本  
 試験本数 : 40本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00139
2	0.00278
3	0.00611
4	0.01667
5	0.01806
6	0.06806
7	0.17139
8	0.29250
9	0.66167
10	1.00889
11	1.24389
12	2.05056
13	6.79444
14	7.46667
15	10.82139
16	18.71722
17	21.92139
18	26.21722
19	30.20639
20	54.80639
21	130.85611
22	157.88639
23	327.71389

## アラミド繊維

繊維長 : 25mm  
 載荷応力 : 3053MPa  
 破断本数 : 33本  
 未破断本数 : 0本  
 0sで破断 : 3本  
 試験本数 : 36本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00056
2	0.00056
3	0.00083
4	0.00083
5	0.00139
6	0.00167
7	0.00194
8	0.00222
9	0.00278
10	0.01722
11	0.01861
12	0.02306
13	0.03611
14	0.03889
15	0.10194
16	0.15306
17	0.15306
18	0.15611
19	0.16111
20	0.18611
21	0.21139
22	0.47500
23	3.28500
24	6.81833
25	10.98500
26	14.59611
27	15.87278
28	25.70722
29	27.07222
30	30.18278
31	46.51667
32	54.85000
33	117.05000

## アラミド繊維

繊維長 : 25mm  
 載荷応力 : 3264MPa  
 破断本数 : 22本  
 未破断本数 : 0本  
 0sで破断 : 18本  
 試験本数 : 40本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00056
2	0.00056
3	0.00139
4	0.00278
5	0.00556
6	0.00833
7	0.00833
8	0.01056
9	0.04167
10	0.04306
11	0.06472
12	0.10833
13	0.15139
14	0.23139
15	0.63333
16	0.70694
17	1.48194
18	3.70417
19	3.90000
20	5.42500
21	7.73194
22	7.87083

## アラミド繊維

繊維長 : 5mm  
 載荷応力 : 2562MPa  
 破断本数 : 10本  
 未破断本数 : 10本  
 0sで破断 : 0本  
 試験本数 : 20本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.01306
2	0.18806
3	1.56222
4	1.78222
5	6.95111
6	8.92333
7	11.84000
8	126.30333
9	192.97000
10	306.07500

## アラミド繊維

繊維長 : 5mm  
 載荷応力 : 2765MPa  
 破断本数 : 10本  
 未破断本数 : 5本  
 0sで破断 : 5本  
 試験本数 : 20本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00056
2	0.13972
3	0.14194
4	0.54833
5	0.70417
6	56.34389
7	101.10917
8	291.41722
9	291.42000
10	305.74167

## アラミド繊維

繊維長 : 5mm  
 載荷応力 : 3053MPa  
 破断本数 : 10本  
 未破断本数 : 6本  
 0sで破断 : 4本  
 試験本数 : 20本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00056
2	0.00417
3	0.00833
4	0.07028
5	0.35722
6	0.61944
7	0.87500
8	1.70000
9	1.94361
10	13.27694

## アラミド繊維

繊維長 : 5mm  
 載荷応力 : 3264MPa  
 破断本数 : 15本  
 未破断本数 : 0本  
 0sで破断 : 4本  
 試験本数 : 19本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00056
2	0.00139
3	0.00167
4	0.00806
5	0.00833
6	0.01806
7	0.21389
8	0.21667
9	0.59028
10	1.01500
11	1.56111
12	2.12111
13	2.12667
14	7.26000
15	18.78778

アラミド繊維

繊維長 : 250mm  
載荷応力 : 3053MPa  
破断本数 : 28本  
未破断本数 : 0本  
0sで破断 : 27本  
試験本数 : 55本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00194
2	0.00278
3	0.00278
4	0.00306
5	0.00333
6	0.00583
7	0.02444
8	0.02583
9	0.03389
10	0.03500
11	0.03722
12	0.03889
13	0.04000
14	0.08806
15	0.10944
16	0.15778
17	0.22361
18	0.30694
19	0.33222
20	0.61917
21	0.87167
22	1.46944
23	4.11889
24	4.78500
25	12.79389
26	15.34056
27	44.92583
28	46.12722

ガラス繊維

繊維長 : 25mm  
 載荷応力 : 1478MPa  
 破断本数 : 16本  
 未破断本数 : 23本  
 0sで破断 : 9本  
 試験本数 : 48本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00083
2	0.02222
3	0.66944
4	4.14528
5	6.71750
6	10.97306
7	25.97306
8	28.17722
9	48.58972
10	57.40000
11	81.92306
12	87.95500
13	216.13972
14	217.41444
15	280.14778
16	310.77583

ガラス繊維

繊維長 : 25mm  
 載荷応力 : 1891MPa  
 破断本数 : 22本  
 未破断本数 : 5本  
 0sで破断 : 12本  
 試験本数 : 39本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00278
2	0.00556
3	0.01667
4	0.01667
5	0.01667
6	0.02222
7	0.03333
8	0.05000
9	0.16667
10	0.48750
11	1.45556
12	1.53333
13	5.33333
14	6.16667
15	9.53333
16	12.25000
17	24.45000
18	32.42778
19	58.50000
20	66.78333
21	113.81667
22	172.72250

ガラス繊維

繊維長 : 25mm  
 載荷応力 : 2182MPa  
 破断本数 : 32本  
 未破断本数 : 7本  
 0sで破断 : 28本  
 試験本数 : 67本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00056
2	0.00056
3	0.00278
4	0.00278
5	0.00278
6	0.00278
7	0.00333
8	0.00556
9	0.01389
10	0.01667
11	0.01944
12	0.02778
13	0.06667
14	0.09111
15	0.15000
16	0.16667
17	0.18222
18	0.23333
19	0.28333
20	0.30833
21	0.38500
22	0.70000
23	0.71667
24	0.78333
25	0.82944
26	2.85000
27	6.53333
28	6.77389
29	25.68333
30	94.33333
31	231.00000
32	403.00000

ガラス繊維

繊維長 : 25mm  
 載荷応力 : 2457MPa  
 破断本数 : 39本  
 未破断本数 : 4本  
 0sで破断 : 27本  
 試験本数 : 70本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00056
2	0.00139
3	0.00139
4	0.00278
5	0.00278
6	0.00833
7	0.01944
8	0.03333
9	0.04611
10	0.08333
11	0.12833
12	0.12917
13	0.13333
14	0.16667
15	0.17500
16	0.18167
17	0.18333
18	0.20000
19	0.37500
20	0.40833
21	0.61667
22	1.03333
23	1.16667
24	2.83333
25	2.83333
26	6.15389
27	12.82056
28	15.50000
29	15.50000
30	23.03333
31	27.50000
32	29.00000
33	32.34167
34	90.00000
35	90.00000
36	106.33333
37	116.22500
38	119.66667
39	642.33333

ガラス繊維

繊維長 : 25mm  
 載荷応力 : 2947MPa  
 破断本数 : 8本  
 未破断本数 : 0本  
 0sで破断 : 48本  
 試験本数 : 56本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00056
2	0.00222
3	0.00250
4	0.00861
5	0.01500
6	0.04000
7	0.15250
8	2.90750

ガラス繊維

繊維長 : 5mm  
 載荷応力 : 1478MPa  
 破断本数 : 4本  
 未破断本数 : 14本  
 0sで破断 : 1本  
 試験本数 : 19本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.57917
2	7.40833
3	46.29722
4	57.52361

ガラス繊維

繊維長 : 5mm  
 載荷応力 : 2947MPa  
 破断本数 : 37本  
 未破断本数 : 5本  
 0sで破断 : 14本  
 試験本数 : 56本

試験番号	破断時間 (hours)
1	0.00083
2	0.00139
3	0.00444
4	0.00556
5	0.00833
6	0.00944
7	0.01056
8	0.01250
9	0.01444
10	0.01750
11	0.02639
12	0.03444
13	0.04583
14	0.04583
15	0.08139
16	0.09056
17	0.11944
18	0.12889
19	0.24722
20	0.28000
21	0.38556
22	0.86722
23	0.87611
24	0.98972
25	1.02083
26	1.09028
27	1.09444
28	1.14111
29	1.18806
30	2.47056
31	15.40250
32	21.96944
33	25.41556
34	48.66417
35	53.94361
36	65.33083
37	73.38639

