

論文 連続繊維緊張材の長期特性に関する実験的検討

安藤直文*¹・松川治雄*²・足立幸郎*³・服部篤史*⁴

要旨：連続繊維は軽量、高強度、非磁性、非腐食性など様々な特徴を持った新しい構造物材料である。このような材料を橋梁の補強に緊張材として用いる場合、引張荷重の限界値を決定するために重要な要因となる長期的基礎性状を明らかにしておく必要がある。本研究では炭素系とアラミド系の連続繊維緊張材を対象としたクリープ破壊試験とリラクゼーション試験を実施し、クリープ破壊時間と載荷荷重との関係、温度の影響を考慮したリラクゼーションと時間との関係を実験的に検討し、それらの設計基準値を設定するための一つの手がかりとした。

キーワード：連続繊維緊張材、クリープ破壊、リラクゼーション、荷重比

1. はじめに

本検討は、連続繊維緊張材を既設PC橋の補強に外ケーブルとして用いるための一連の研究の一部であり、連続繊維緊張材の緊張力の制限値を設定する際に重要な要因となる材料の基礎性状を明らかにすることを目的としている。

連続繊維緊張材は鉄筋やPC鋼材と異なり、静的強度以下の持続

荷重を同一環境下で長時間作用させたときにクリープ破壊することがあり、その強度は持続荷重の大きさや繊維の種類等によって異なることが知られている。しかし、その試験実績はまだ少ないのが現状である。したがって、連続繊維緊張材を用いる場合には、クリープ破壊試験を実施しその結果を考慮して、緊張力を設定しなければならない。リラクゼーション特性に関しても同様であり、リラクゼーション試験を実施しその結果を反映させる必要がある。

実験に用いた連続繊維緊張材は現在市販されている炭素系連続繊維緊張材（以下CFRPと略称）とアラミド系連続繊維緊張材（以下AFRPと略称）のうち代表的なものの一つである。その主要諸元を表-1に示す。ここで、有効断面積は平均値を、保証荷重は平均-3σを考慮した連続繊維緊張材の製造メーカーが設定した規格値である。

表-1 連続繊維緊張材の主要諸元

緊張材	CFRP		AFRP	
呼称	CFCC		FiBRA	
繊維材	PAN系		アラ系	
繊維結合材	変形エポキシ樹脂		ビスフェノール型エポキシ樹脂	
形状	より線状		組み紐状	
呼び径	φ12.5	φ5	φ15	φ5
有効断面積	76.0 mm ²	10.1 mm ²	170.0 mm ²	21.0 mm ²
保証荷重	142.1kN	17.6kN	235.2kN	31.4kN

* 1 住友建設（株）大阪支店土木部主任（正会員）

* 2 川田建設（株）大阪支店技術部技術課課長代理（正会員）

* 3 阪神高速道路公団保全技術部（現在建設省土木研究所）（正会員）

* 4 京都大学助手（正会員）

2. クリープ破壊特性

2. 1 実験概要

クリープ破壊試験は、実際に使用する連続繊維緊張材と同じものを用いた試験を行うのが適切である。しかし、一般にクリープ破壊試験は非常に長い時間と大規模な試験設備を必要とするため、実使用を想定した大容量の連続繊維緊張材を用いて長時間低荷重比域のクリープ破壊試験を行うことは極めて大がかりな試験になると考えられる。このため、本検討では長時間低荷重比域でのクリープ試験については、実使用を想定した連続繊維緊張材に比べて容量の小さいもので代用することにより試験規模の縮小と効率化を図った。

すなわち、大容量の連続繊維緊張材でクリープ破壊試験が可能と考えられる短時間高荷重比域において、容量だけが異なる大小2種の連続繊維緊張材に関するクリープ破壊特性を比較し、

①任意の荷重比におけるクリープ破壊確率の分布形（生存確率）が同一

②クリープ破壊時間と荷重比との関係が同一

であるならば、連続繊維緊張材の容量の違いがそのクリープ破壊特性に与える影響は小さい

ものと考え、容量の異なる2種の連続繊維緊張材は長時間低荷重比域でも同じクリープ破壊特性を有するものと見なした。①②の事項を確認した上で、小容量の連続繊維緊張材を用いて長時間低荷重比域でのクリープ破壊試験を行い、長期クリープ破壊特性を明らかにするものとする。

実験に使用した連続繊維緊張材を表-1に示す。このうちCFRPφ12.5、AFRPφ15は、実橋に使用することを想定したマルチ緊張材を構

成する1本の単線である。一方、CFRPφ5、AFRPφ5はクリープ破壊試験を縮小するために用いたものである。試験体の定着には保証荷重を定める際に適用したのと同じ構造の付着型定着体を用いた。設定した載荷荷重は、各緊張材の静的引張り強度の平均値に対する比（荷重比）で示す。試験体数は1荷重比につき10体程度である。試験方法は、連続繊維補強材のクリープ破壊試験方法（試案）[1]を準用し、室内常温にて各荷重比に対するクリープ破壊時間を測定した。[2]

表-2 クリープ破壊試験結果
(AFRPの一部)

載荷荷重比	破壊時間(h)	備考
0.89	1.63	破壊
	4.70	〃
	6.05	〃
	10.50	〃
	11.50	〃
	12.55	〃
	24.00	打切り
	24.00	〃
0.93	0.40	破壊
	2.23	〃
	6.23	〃
	6.40	〃
	7.75	〃
	8.19	〃
	9.50	〃
	10.70	〃
	15.56	〃

表-3 荷重比、試験体数

	呼び径	載荷荷重比	試験体数		
			瞬時切れ	破壊	打切り
CFRP	φ12.5	0.92	0	4	0
		0.91	0	3	0
		0.90	0	4	0
	φ5	1.04	13	7	0
		1.03	10	10	0
		1.01	8	8	4
0.91		0	0	(14)	
AFRP	φ15	0.93	0	9	0
		0.91	0	10	2
		0.89	0	9	3
	φ5	0.94	0	11	0
		0.91	0	12	0
		0.89	0	9	2
		0.83	0	15	0
		0.77	0	0	(14)

継続中

継続中

2. 2 実験結果及び考察

(1) 実験結果

緊張材の径および各荷重比ごとの実験データを表-2、3に示す。瞬時切れとは、载荷中に破断した供試体、すなわち静的引張り強度が低くクリープ破壊しなかった供試体を示す。打ち切りとは、計測時間中にクリープ破壊しなかった供試体で、クリープ破壊の時間的ばらつきにより計測できなかった供試体を示す。

(2) 生存確率とクリープ破壊時間

順序統計量の正規分布を採用した場合の生存確率とクリープ破壊時間の関係をCFRPについて図-1、2に、AFRPについて図-3、4に示す。ここで、生存確率とはクリープ破壊の時間軸上での分布を示し、グラフの勾配は生存確率の時間変化量であり、すなわち故障率を表す。[3],[4]

CFRP、AFRPともに、生存確率とクリープ破壊時間の対数との関係がほぼ直線近似できることから、クリープ破壊の対数時間軸上での分布は正規分布であると言える。また近似直線の勾配は荷重比および径の差によらずほぼ一定であることから、クリープ破壊の時間的分布は荷重比によらずほぼ同一であると言える。さらに、対数時間軸上における各荷重比のなす近似直線は、荷重比に比例して降順に並ぶので、クリープ破壊時間の対数と荷重比は比例することがわかる。ここで、径の異なるもの同士を比較した場合、同一荷重比で両者の近似直線はほぼ重なるので、クリープ破壊特性に関して径の違いによる影響は小さいものと考えられる。

両者の生存確率とクリープ破壊時間との関係をまとめ模式的に示したものを図-5に示す。

(3) 荷重比とクリープ破壊時間

荷重比とクリープ破壊時間との関係をCFRPについて図-6、AFRPについて図-7に示す。各荷重比におけるクリープ破壊時間の平均値、平均-3 σ 値をプロットしたものである。グラフは容量の異なる2種の連続繊維緊張材について同一の直線に近似されるので、クリープ破壊に関してその容量の違いによる影響は小さいものと考えられる。CFRPでは同一荷重比でのクリープ破壊時間の分布が瞬時近傍から1,000,000時間の範囲におよびAFRPに比べて非常に大きいこと、本研究の高いレベルの荷重比(0.9Pu以上)では瞬時切れが多く、こ

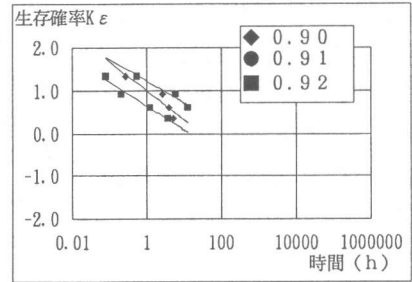


図-1 生存確率 (CFRP ϕ 12.5)

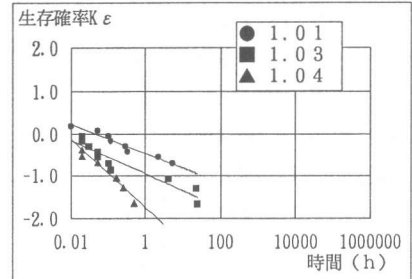


図-2 生存確率 (CFRP ϕ 5)

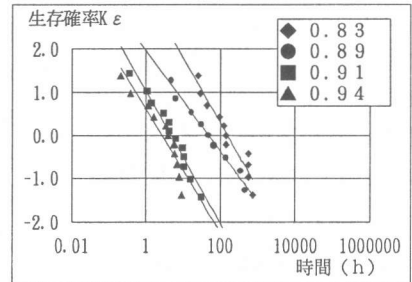


図-3 生存確率 (AFRP ϕ 15)

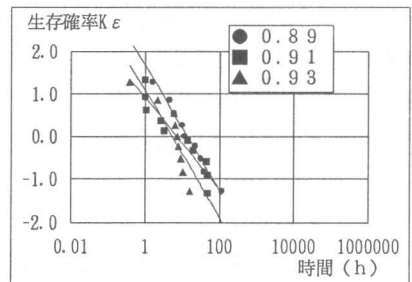


図-4 生存確率 (AFRP ϕ 5)

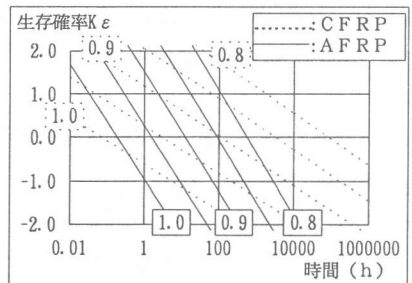


図-5 生存確率まとめ

の結果のみで長期クリープ破壊を論ずることは難しい。ところで、グラフ中の(■→)は、より長時間低荷重比にて現在継続中の試験状況である。それぞれ14体の試験を行っている。このデータより近似直線が安全側の値となっていることがわかり、また、クリープ破壊強度の推定値がほぼ妥当であることが確認される。

(4) クリープ破壊強度

本検討結果から、緊張材の引張強度の設計基準値設定の1要因であるクリープ破壊の限界値が推定できる。荷重比とクリープ破壊時間とのなす近似直線より、構造物の使用年限として50年後の値を考えると、AFRPで0.66Pu(50%生存)、CFRPで0.79Pu(50%生存)となる。ここでPuは静的平均強度である。

ところで、t=10分程度の時クリープ破壊の近似直線

(Mean-Line)が荷重比1.0を通過する。この時の破壊は静的

破壊に相当すると考えられ、強度の分布も静的引張試験の結果とほぼ一致している。

2.3 まとめ

本研究で得られたクリープ破壊に関する主な知見を以下に示す。

- 1) 本検討における試験の範囲ではクリープ破壊が生じた。また、その破壊時間はばらつくため確率統計的な取り扱いが今後有効な手段と思われる。
- 2) 生存確率の時間変化率(故障率)は、径および荷重比にかかわらずほぼ同一の対数正規分布をなす。
- 3) 容量の違いによるクリープ破壊時間の差はなくほぼ同一であり、荷重比とクリープ破壊時間の対数はほぼ比例する。
- 4) 今後の課題として、今回の結果から推定されるより長時間低荷重比域での試験を実施し、多くのデータの蓄積を行う必要がある。

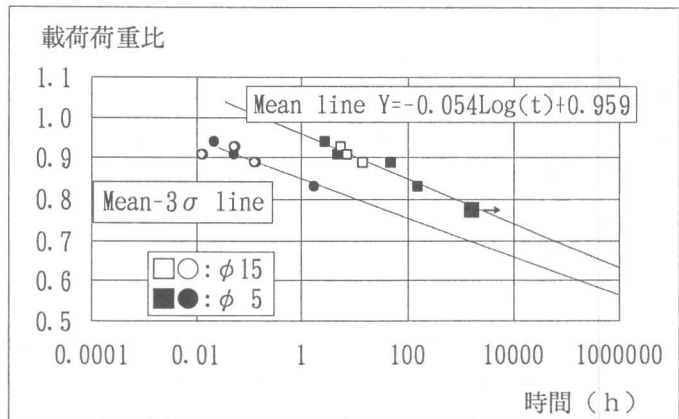


図-6 荷重比とクリープ破壊時間 (CFRP)

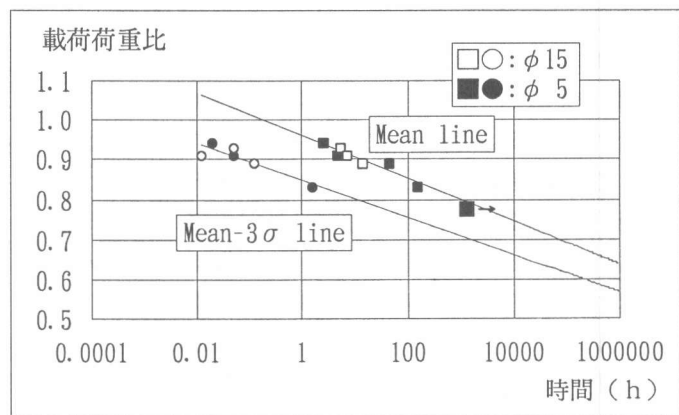


図-7 荷重比とクリープ破壊時間 (AFRP)

3. リラクゼーション特性

3. 1 実験概要

既往の1,000時間までの測定値を上回る長期のリラクゼーション特性を把握し、リラクゼーション率の設計基準値を設定することを目的として、ひずみ一定のもとでの、試験体張力の減少量と載荷時間の関係を実験的に検討したものである。

実験に使用した連続繊維緊張材は、CFRP ϕ 12.5とAFRP ϕ 15である。載荷荷重は、緊張材として利用

される場合のレベルを考慮して保証荷重の70%とした。環境条件として温度の違いがおよぼす影響を検討するために、20℃、40℃、60℃の3水準の温度を設定した。試験時間は長期リラクゼーション特性の把握と、リラクゼーション率の設計基準値の推定が可能な範囲を考え、既往の1,000時間を上回る3,000時間以上とした。試験部の長さは1,000mmとし、定着方法は保証荷重を定める際に適用したのと同じ構造の付着型定着体とした。試験方法は、連続繊維補強材の長時間リラクゼーション試験方法(案)[5]を準用した。試験はリラクゼーション試験機を用い、試験体の張力と載荷時間を自動計測した。試験諸条件を表-4に示す。[6]

表-4 リラクゼーション試験諸条件

No.		温度 (℃)	試験時間 (h)	試験部の 長さ(mm)	載荷荷重	
①	CFRP ϕ 12.5	20	3,000	1,000	0.7P (P:保証 荷重)	
②			1,000			
③			1,000			
④			40			1,000
⑤			60			1,000
⑥	AFRP ϕ 15	20	4,000			
⑦			40			1,000
⑧			60			1,000

3. 3 実験結果および考察

縦軸にリラクゼーション率、横軸に載荷時間の対数を取り試験結果をプロットしたものを図-8に示す。AFRPは多少曲ったようにも見受けられるがほぼ直線となる。これよりリラクゼーションの進行は載荷時間の対数にほぼ比例することがわかる。また、その傾きからCFRP、AFRPともにそれぞれ固有の純リラクゼーション特性を有していることがわかる。試験結果より構造物の使用年限として50年を考慮した場合のリラクゼーション率の推定値を表-5に示す。近似直線を温度をパラメーターとしとして再集計してまとめたものを図-9に示す。

本試験では、温度が高くなるとリラクゼーション率も大きくなる結果が得られ、その影響はCFRPよりAFRPの方が大きい。

表-5 リラクゼーションの推定値

No.		温度 (℃)	試験時間 (h)	近似直線 $\gamma = A \times \text{Log}(t) + B$		リラクゼーション 50年値 (%)	
				A	B		
①	CFRP ϕ 12.5	20	3,000	0.315	0.201	2.0	
②			1,000	0.322	0.188	2.0	
③			1,000	0.449	0.245	2.8	
④			40	1,000	0.481	0.422	3.1
⑤			60	1,000	0.396	0.557	2.8
⑥	AFRP ϕ 15	20	4,000	2.438	4.603	18.4	
⑦			40	1,000	2.687	4.406	19.6
⑧			60	1,000	3.362	4.436	23.4

したがって、実使用の際には、載荷荷重の違いによる補正とともに、AFRPでは実使用環境を考慮したリラクゼーション値を設定する必要があると考えられる。

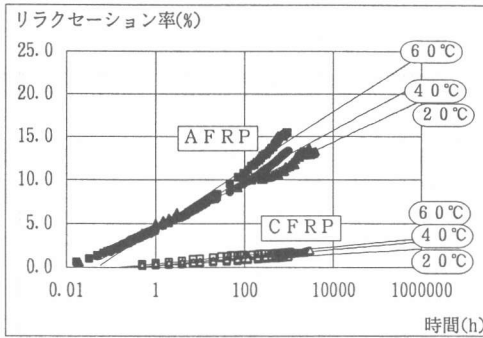


図-8 リラクゼーション試験結果

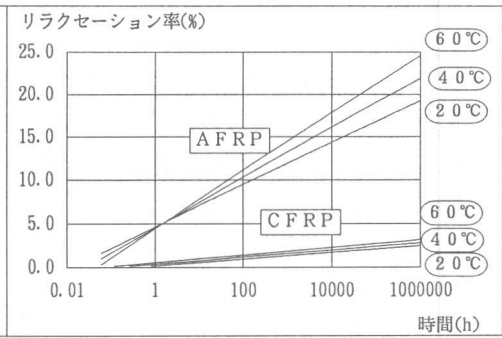


図-9 リラクゼーションまとめ

3. 4 まとめ

本研究で得られたリラクゼーションに関する主な知見を以下に示す。

- 1) リラクゼーション率は各々の連続繊維材固有の特性を示し、載荷時間の大小にかかわらず時間の対数にほぼ比例する。
- 2) CFRPは温度の影響をほとんど受けない。AFRPはCFRPより影響が大きい。
- 3) 今後の課題として、載荷荷重をパラメーターとしたリラクゼーション試験を行い、データを蓄積する必要があると思われる。

4. 最後に

本来、連続繊維緊張材のクリープ破壊とリラクゼーションは同時に生じるが、本検討では試験の都合上、両者を別々に取扱った。ところで、時間依存型の破壊にはクリープ破壊以外に疲労破壊や遅れ破壊があり、これらも考慮して連続繊維緊張材の緊張力の制限値を設定する必要がある。したがって、連続繊維緊張材に関する種々の破壊についての相違点、共通点を考慮し、相互複合作用についても明らかにすることが今後の研究課題の一つであると考えられる。

以上の研究は、阪神高速道路公団「コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会」の研究業務の一環で行われたものであり、同委員会に携われた方々に謹んで謝意を表します。

参考文献

- [1]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
- [2]安藤ほか：連続繊維緊張材の長期特性に関する研究、
プレストレストコンクリート技術協会第6回シンポジウム論文集、pp603-606、1996.10
- [3]井上ほか：コンクリートの圧縮疲労特性と疲労強度の特性値に関する研究、
土木学会論文集、No.451、Vol.17、pp.59-67、1992.8
- [4]塩見ほか：日科連信頼性工学シリーズ4、1991.8
- [5]連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針（案）、
コンクリートライブラリー88、土木学会
- [6]安藤ほか：連続繊維緊張材の長期純リラクゼーションに関する実験的検討、
土木学会第51回年次学術講演会概要集第5部、pp958-959、1996.9