

論文 アラミド繊維を用いた連続繊維強化プラスチックロッドの リラクゼーション特性と疲労特性

松元香保里*1・小田切隆幸*2・中井裕司*3

要旨：本稿では、 ϕ 6.0mmと ϕ 7.4mmの異径AFRPロッドのリラクゼーション特性、および疲労特性を実験的に明らかにした。その結果、リラクゼーション率に関しては、1本留め、多本数留め、ロッド径に関係なく経過時間の対数に比例すること、リラクゼーション率は、ロッド径により多少差はあるが、17000時間（約2年）において約15%であり、100万時間（約114年）における推定値は約19%であることがわかった。疲労特性に関しては、疲労破壊は全て定着体端部にて発生しており、破壊形態は静的引張試験の形態に類似していること、200万回疲労強度は670N/mm²であることがわかった。

キーワード：アラミド繊維、FRP、ロッド、リラクゼーション率、疲労強度

1. はじめに

FRPロッドは、軽量、高強度、非磁性、耐腐食性および化学抵抗性が大きいという特性をもつことから、鋼材にかわるPC緊張材やコンクリート用補強材としての活用が期待されている。

著者らは、アラミド繊維を用いた連続繊維強化プラスチックロッド（以下、AFRPロッド）について数々の材料試験や部材試験を行ってきた。これまでに、AFRPロッドの付着性状やクリープ特性等の材料特性を把握し、リラクゼーションによる応力緩和を低減させる緊張管理手法およびリラクゼーション率の推定式を提案している。また、ポストテンション単純桁およびプレテンション単純桁の静的載荷試験と曲げ疲労試験を実施し、異形AFRPロッドを緊張材とするPC構造物の設計上必要な諸数値と設計手法の検討も行っている。

これらの研究成果として、AFRPロッドの実構造物への適用が進められている。施工例として、プレテンション橋、ポストテンション橋、コンクリート橋の補強工事における外ケーブル定着ブロックの横締めや、斜面安定工事におけるグラウンドアンカー工事が挙げられる。AFRPロッドの弾性係数が小さく腐食しないという特性を生かして、軟弱地盤地帯の樋管や水路のプレキャスト化施工における緊張材としても適用されている。AFRPロッドは、PC鋼材にはない特性を生かした形で、新設から補強まで幅広く利用され始めている。

平成8年9月に、土木学会より「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）」[1]が出された。この中で、AFRPロッドの疲労耐力およびリラクゼーションに関する設計用値と設計基準値が述べられている。また、AFRPロッドの疲労特性[3]およびリラクゼーション特性[2]に関する報告も幾つかなされている。しかし、設計を行なうにあたり、これらに関する試験データはまだ十分とはいえず、明らかとすべき点も残されている。特に、大容量の多本数留め緊張材に関するリラクゼーション特性については殆ど明らかにされていない。本稿では、付着型定着体を用いた、1本留めおよび多本数留め異形AFRP緊張材のリラクゼーション特性と、 ϕ 6.0mmと ϕ 7.4mmの異形AFRP緊張材の疲労特性を実験的に明らかにし、設計式の提案を行なった。

* 1 住友建設（株）技術研究所（正会員）

* 2 住友建設（株）技術研究所、工修（正会員）

* 3 住友建設（株）技術研究所主任研究員（正会員）

2. 供試体

本試験では、異形AFRPロッドを使用した。ロッド形状は、図-1に示すように母材と同種のアラミド繊維で表面を異形化したものである。ロッド径は、 $\phi 6.0\text{mm}$ および $\phi 7.4\text{mm}$ の2種類である。AFRPロッドの諸元を表-1にまとめる。本試験では、鋼管内に無収縮モルタル（W/C=31%）を充填した付着式定着体を用いた。定着具は、文献[1]のテクノラ工法で規定されているものを使用し、1本留め緊張材はタイプAを、多本数留め緊張材はタイプBを使用した。定着具によりロッドの付着機構が異なるため、供試体の定着方法が試験結果に与える影響は大きいものと考えられる。リラクセーション試験では、定着体からのロッドの伸び出し量の補正を行うことで、定着方式の影響を除去し、標準化したリラクセーション率の設計式を提案する。疲労強度に関しては、定着体を含めた設計式として提案する。

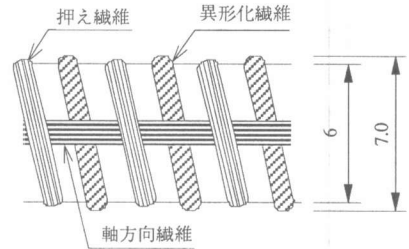


図-1 AFRP ロッドの形状 ($\phi 6.0\text{mm}$)

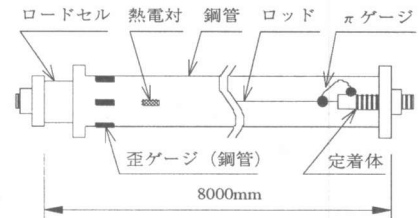


図-2 試験概略図

3. リラクセーション特性

3.1 試験方法

試験は、住友建設(株)技術研究所実験棟内において、1994年5月～1996年5月までの約2年間(17700時間)常温で行なった。試験条件を表-2に示す。各試験ケース3体、計15体の供試体について試験を行なった。本試験で用いた付着式定着体では、定着体からロッドの伸び出しが生じるため、試験長が短いと試験結果にこの影響が大きく現われてくる。よって、試験長は可能な限り長くする必要がある。さらに、歪量を一定に保持する必要があることから、緊張材の拘束には全長8000mmの一般構造用炭素鋼鋼管を使用している(鋼管応力は、降伏応力度の10～30%程度)。試験概略図を図-2に示す。本試験では1本留め緊張材(1 $\phi 6.0$ および1 $\phi 7.4$)の他、多本数留め緊張材(7 $\phi 6.0$ および9 $\phi 7.4$)についても計測した。多本数留め緊張材では、ロッド個々の長さのばらつきの影響や、定着部における付着性状も1本留め緊張材の場合とは異なることから、このリラクセーション特性について明らかにする必要がある。

試験で使用した付着式定着体を用いた緊張材の保証耐力は、ロッドの保証耐力に構成本数と低減係数をかけて求められる[1]が、本試験では、1本の保証耐力に構成本数をかけた値を基本

表-1 AFRP ロッドの諸元

呼び名	AR	
連続繊維	アラミド繊維	
繊維結合材	ビニルエステル樹脂	
呼称	$\phi 6.0$	$\phi 7.4$
軸方向繊維 体積混入率 (%)	65	65
公称径 (mm)	6.43	7.88
公称断面積 (mm ²)	32.5	48.8
弾性係数 (kN/mm ²)	46.0	46.0
保証耐力 (kN)	56.9	81.4
伸び (%)	3.8	3.6

表-2 試験条件

試験ケース	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
供試体	1 $\phi 6.0$	1 $\phi 7.4$	1 $\phi 7.4$	7 $\phi 6.0$	9 $\phi 7.4$
基本耐力Pu (kN)	50	74.8	74.8	350	673.2
目標定着荷重	0.75Pu	0.75Pu	0.65Pu	0.75Pu	0.75Pu
全長 (mm)	8290	8280	8280	8320	8380
付着長 (mm)	400	500	500	460	510
試験長 (mm)	8000				
載荷速度 (N/mm ²)	200				
初期荷重維持時間(秒)	120				
計測間隔 (標準時)	12時間				
試験時間	約17700時間 (1994.5.17～1996.5.25)				
試験温度 (°C)	1.4～35.0				

耐力 P_u とする。初期荷重は、基本耐力の75%または65%として、初期荷重の違いによるリラクゼーション特性の違いを確認する。載荷方法は、文献 [1] に従い、初期荷重を毎分 $200\text{N}/\text{mm}^2$ で載荷し、荷重を2分間維持後、供試体の歪を固定した時を試験開始時間としている。

計測は、緊張力の変化を端部のロードセルで、鋼管の歪量を歪ゲージで行なった。1本留め緊張材では、定着後における定着体両端からのロッドの伸び出し量を κ ゲージにより計測した。試験中の気温は、任意の1供試体に取り付けた熱電対により計測した。

3. 2 試験結果および考察

全ての測定データは、鋼管の歪変化に伴う緊張力の変化量を補正している。ロッドの伸び出し量を計測した1本留め緊張材では、伸び出し量についても補正した。本試験で計測されたロッドの伸び出し量を図-3に示す。時間軸を対数表示とした片対数グラフとなっている。図中のデータは、ロッドの両端で計測された値の和である。ロッドの伸び出し量は最大で約 1.7mm 、試験長の約 0.02% と大変少なく、本試験は純リラクゼーション試験に非常に近いといえる。従って、ロッドの伸び出し量を計測していない多本数留め緊張材では、伸び出し量の補正は行なっていないが、これが試験結果に与える影響は小さいと考えられる。

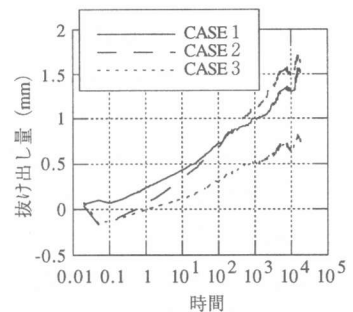
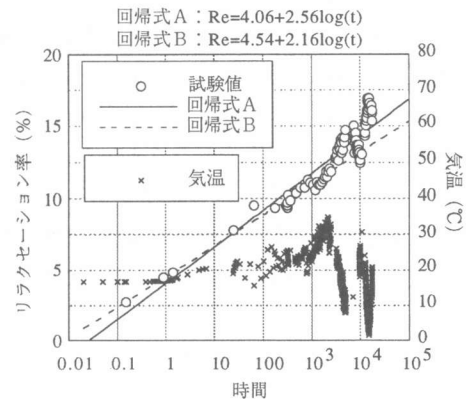
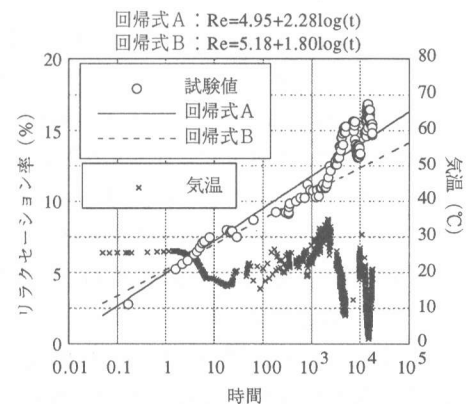


図-3 ロッド伸び出し量

試験結果の一例として、 $1\phi 7.4$ および $9\phi 7.4$ 緊張材における、リラクゼーション率の経時変化を図-4に示す。時間軸を対数表示とした片対数グラフとなっている。図中に示した両回帰式は、標準温度 (気温 $20\pm 2^\circ\text{C}$) 時のデータから得られたリラクゼーション率について、実線 (回帰式A) は試験終了 (17700時間) まで、破線 (回帰式B) は1000時間まで回帰したものである。これより、1本留め緊張材と多本数留め緊張材のリラクゼーション特性は、定性的にも定量的にもほぼ等しいといえる。また、1000時間までのデータによる回帰式は、試験終了までによるものより、リラクゼーション率を過小に評価することがわかる。



(a) CASE 2 ($1\phi 7.4$)



(b) CASE 5 ($9\phi 7.4$)

図-4 試験結果の一例

図-4の試験結果を見ると、リラクゼーション率は波打つように上下に変動しながら、経過時間の対数に比例してることがわかる。試験は実験棟内において常温下で行なったため、試験期間の温度差は最大 33.5°C 生じている。異形AFRPロッドの熱膨張係数の実測値は、 $-3\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ [1] と報告されており、計測されたリラクゼーション率も、気温変化に伴い変化し、気温の高い時には回帰式よりも小さく、気温の低い時には大きな値となっている。また、リラクゼーション率の変動は、標準温度における回帰式を中心としたものである。よって、計測されたリラクゼーション率の変動は、

表-3 試験結果

試験 ケース	緊張材 の構成	初期荷重	リラクセーション率 (%)					回帰式
			10時間	120時間	1000時間	17000時間	100万時間*	
CASE 1	1 φ 6.0	0.75Pu	5.45	7.50	9.85	12.59	17.05	Re=2.41+2.54log(t)
CASE 2	1 φ 7.4	0.75Pu	6.67	8.63	11.67	14.84	19.53	Re=4.57+2.43log(t)
CASE 3	1 φ 7.4	0.65Pu	7.13	9.47	11.80	14.97	18.80	Re=4.74+2.41log(t)
CASE 4	7 φ 6.0	0.75Pu	6.60	7.73	10.33	13.27	18.00	Re=4.22+2.39log(t)
CASE 5	9 φ 7.4	0.75Pu	7.85	8.95	11.15	15.32	19.65	Re=4.98+2.34log(t)

注) *は、回帰式より得られる推定値

Pu: 基本耐力、Re: リラクセーション率 (%), t: 時間

気温変化に伴う異形AFRPロッドの熱膨張による緊張力の変化に起因していると考えられる。しかし、AFRPロッドの弾性係数は46.0kN/mm²と小さいため、熱膨張係数の値の割には緊張力の変化は小さく、リラクセーション率の変動幅も±3%程度である。従って、本試験結果より得られた、標準温度における回帰式を用いて100万時間におけるリラクセーション率を推定しても問題ないものと思われる。

試験結果を表-3にまとめる。表中のリラクセーション率は、各ケース毎の試験結果の平均値である。回帰式は、各試験ケースにおける、標準温度時の全試験結果について回帰したものである。全供試体の10、120、1000、17000時間におけるリラクセーション率と、回帰式より推定した100万時間(約114年)の推定値を図-5に示す。なお、時間軸は対数表示となっている。これより、リラクセーション率は、定性的には1本留め、多本数留め、ロッド径、初期定着荷重に関係なく経過時間の対数に比例することがわかる。定量的には、1本留め緊張材も多本数留め緊張材もほぼ同じ値を示し、初期定着荷重が異なっても殆ど変わらない。ロッド径に関しては、φ7.4mmロッドの方がφ6.0mmロッドよりやや大きなリラクセーション率を示す傾向にある。従って、本試験より得られたリラクセーション率の推定式をロッド径別に示す。この推定式は、標準温度時の全試験結果について、ロッド径ごとに回帰したものである。

$$Re_{6.0} = 3.75 + 2.38 \log(t) \quad (1)$$

$$Re_{7.4} = 4.83 + 2.41 \log(t) \quad (2)$$

ここに、 $Re_{6.0}$ および $Re_{7.4}$ は、それぞれφ6.0mmおよびφ7.4mmロッドのリラクセーション率(%)を、tは経過時間を表す。この推定式は標準温度時のデータより回帰されたものであるが、前述のように、温度変化に伴うリラクセーション率の変動は推定式に対して±3%程度である。よって、推定式より推定されるリラクセーション率に、気温変化に伴うリラクセーション率の変動を考慮する安全率を加味した値は、設計用値として使用することも可能と考えられる。

同じ物性の1φ6.0緊張材を用いて過去に実施したリラクセーション試験(CASE 6) [2]と今回の試験結果について、10、120、1000時間におけるリラクセーション率と、回帰式より推定した100万時間(約114年)の推定値の比較を図-6に示す。時間軸

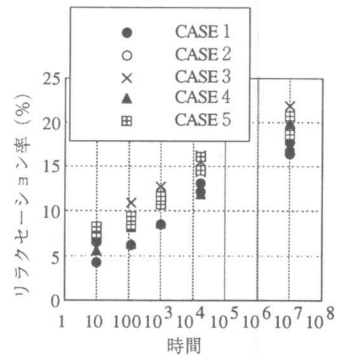


図-5 リラクセーション率の比較

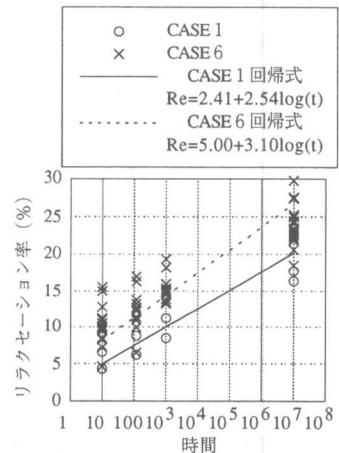


図-6 過去の試験との比較

は対数表示となっている。CASE 6 は、試験長 7500mm、初期定着荷重 0.6～0.8Pu、付着式定着体を用いて、常温下で約 5000 時間計測を行ない、データは全て温度補正をしている。ロッドの歪拘束および載荷方法は、今回の試験とは異なる。CASE 6 では、初期荷重維持の時間を変える方法と、目標定着荷重 (0.6～0.8Pu) よりも高い荷重 (0.8Pu) で一度引き越した後、定着荷重で定着する 2 通りの載荷方法で試験を行ない、これら全ての試験結果からリラクゼーション率の推定式 (回帰式) を求めている。CASE 6 から得られたリラクゼーション率の推定式は、本試験の式 (1) とは異なっている。CASE 6 の推定式は、定着前の初期荷重維持の間に生じた応力低下を含んだ値であり、今回の試験結果に比べ過大に評価した形となっていること、および様々な載荷方法による試験結果に基づいていることによるためである。

本試験は、文献 [1] の「連続繊維補強材の長時間リラクゼーション試験方法 (案)」にほぼ準拠して実施された。本試験より得られた推定式は、長い試験長により、長時間計測されたデータに基づいており、ロッドの定着方式の影響も極力排除されたものである。異形 AFRP ロッドのリラクゼーション率の推定式としては、今後は本試験の推定式を用いることが望ましいと思われる。

4. 疲労試験

4.1 試験方法

図-7 に供試体の概略図を示す。供試体の試験長は、φ 7.4 緊張材が 200mm、φ 6.0 緊張材が 300mm である。2 項に示した付着式定着体を用い、試験結果は定着体を含めた疲労強度として評価する。試験は動的に 10tf の能力を有する疲労試験機を用いた。載荷は上限応力 (σ_{max}) を一定とし、速度は 4～6Hz とした。また、疲労回数は 200 万回とした。表-4 に供試体の静的引張特性を示す。

4.2 試験結果

疲労破壊は全て定着体端部にて発生しており、破壊形態は静的引張試験の形態に類似している。従って、AFRP ロッドの弱点は、静的動的に関わらず定着体端部にある。疲労試験結果の S-N 線図を図-8～10 に示す。供試体の 200 万回疲労強度は、上限応力を引張強度の 0.54～0.73 倍とした場合、ロッド径に関わらず 500～550N/mm² である。図中に式 (3) で表せる S-N 線図を示す。

$$\sigma_n = \alpha \times 10^a / N^k \quad (3)$$

ここに、 σ_n は上限応力を固定とした疲労強度を、N は繰返し回数を、 α 、 a および k は実験で求める値を表す。

図-11 に試験結果をグッドマン線図により、完全片振り時の疲労応力度 (σ_0) に変換し、単回帰した図を示す。縦軸は疲労応力度を静的引張強度 (f_{An}) で除し無次元化している。図より、φ 6.0 緊張材は φ 7.4 緊張材に比べ、実験データにバラツキがあり、静的引張強度に対し疲労強度が安全側にあるといえる。従って、異形 AFRP ロッドの設計疲労強度 (f_{Afd}) を、φ 7.4 緊張材の実験式で代表するものと

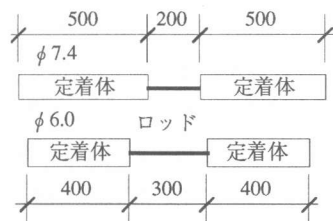


図-7 供試体概略図

表-4 静的引張特性

	φ 7.4	φ 6.0
断面積 (mm ²)	48.8	32.5
平均引張強度 (N/mm ²)	1714	1637

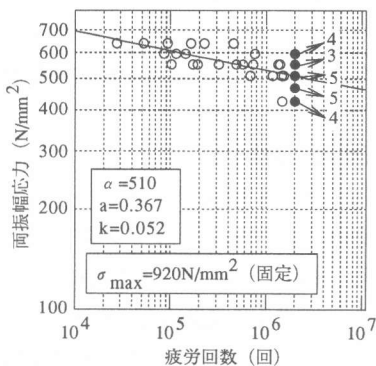


図-8 S-N 線図(φ 7.4)

して提案する。

$$f_{Afrd} = 670 \times 10^{0.215} / N^{0.0342} \times (1 - \sigma_{Afp} / f_{Afd}) / \gamma_{Afm} \quad (4)$$

ここに、 σ_{Afp} は永久荷重によるAFRPロッドの応力度を、 f_{Afd} は材料係数を1.15とした、定着体を含む異形AFRPロッドの設計引張強度を、 γ_{Afm} は異形AFRPロッドに対する材料係数(一般に1.15としてよい)を表す。式(4)より求めた設計疲労強度($\gamma_{Afm}=1.0$)と、試験結果の比較を図-12に示す。試験値は、横軸上で偏り無く分布し、疲労強度を適正に評価している。

5. まとめ

本稿では、異形AFRPロッドの材料特性のうち、リラクゼーション特性と疲労特性について実験的に明らかにし、設計式の提案を行なった。得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 異形AFRPロッドのリラクゼーション率は、定量的には、 $\phi 7.4\text{mm}$ ロッドの方が $\phi 6.0\text{mm}$ ロッドに比べやや大きな値となったが、定性的には、1本留め、多本数留め、ロッド径、初期定着荷重に関係なく経過時間の対数に比例する。
- (2) ロッド径ごとのリラクゼーション率は、式(2)および式(3)で評価できる。
- (3) 異形AFRPロッドのリラクゼーション率は、1000時間において約11%、17000時間(約2年)において約15%であり、100万時間(約114年)における推定値は約19%である。
- (4) 疲労破壊形態は、静的破壊形態に類似しており、付着式定着体を用いた場合の疲労強度は、 670N/mm^2 程度である。
- (5) 付着式定着体を用いた異形AFRPロッドの、定着体を含めた設計疲労強度は、式(4)で評価できる。

今後の課題として、AFRPストランドについても同様の試験を実施し、設計式の提案を行ないたいと考えている。これを通して、AFRPのさらなる利用拡大につながることを期待する。

【参考文献】

- [1] 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第88号、土木学会、1996.9
- [2] 浅井洋ほか：アラミド製FRPロッドの応力緩和特性、土木学会第46回年次学術講演会、第V部、pp.230-231、1991.1
- [3] 小田切隆幸ほか：アラミド製連続繊維補強材の疲労特性、土木学会第51回年次学術講演会、第V部、pp.962-963、1996.9

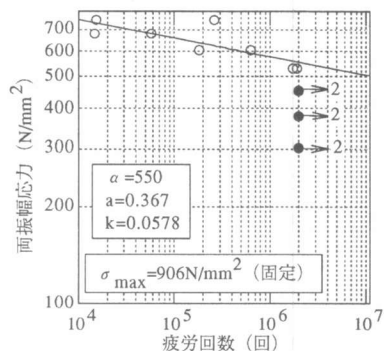


図-9 S-N線図($\phi 6.0$)

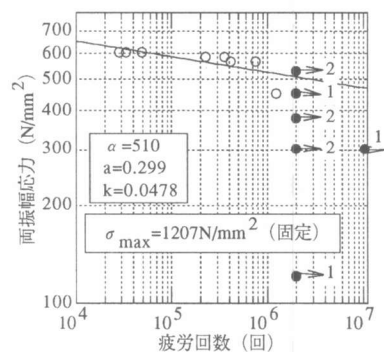


図-10 S-N線図($\phi 6.0$)

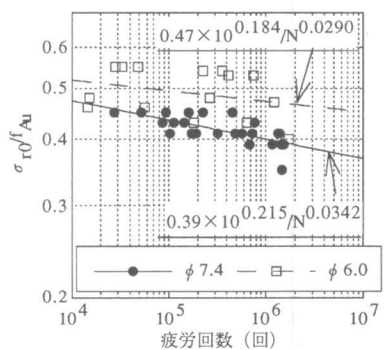


図-11 完全片振り時の疲労応力度

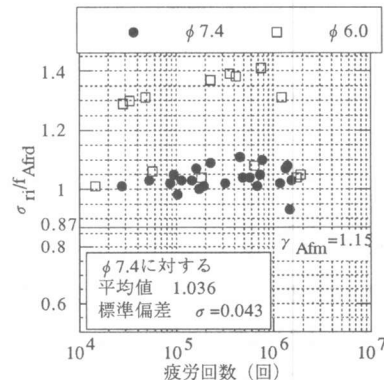


図-12 提案式と試験値の比較