

報告 AFRP ストランドのリラクゼーション特性

松元香保里*1・藤田学*2・中井裕司*3・吉川淳一*4

要旨：本報告では、付着型定着体を用いたφ12.4mm AFRPストランドのリラクゼーション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は経過時間の対数に比例すること、1000時間において約12%で有ること、φ7.4 AFRPロッドの推定式で評価できることが明らかとなった。

キーワード：AFRPストランド、付着型定着体、定着用膨張材、リラクゼーション率

1. はじめに

連続繊維補強材は、軽量、高強度、非磁性、耐腐食性および化学抵抗性に優れているという特徴を有する。このため、従来の鋼材に代わるPC緊張材や、コンクリート補強材としての活躍が期待されている。

著者らは、AFRPロッドに関する数々の材料試験や部材試験を実施し、これまでに付着性状やクリープ特性等の材料特性について明らかにするとともに、リラクゼーション率および疲労強度に関する設計式の提案を行い¹⁾、AFRPロッドを緊張材とするPC建造物の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ロッドは、新設建造物から既設建造物の補修・補強まで、実建造物への適用が幅広く進められている。

現在、主に使用されているAFRPロッドは、φ6.0mmおよびφ7.4mm異形AFRPロッドである。これらの保証耐力は、前者が56.9kN、後者が81.4kN²⁾であり、1本あたりの耐力は小さいため、導入緊張力および用途に応じ、数本を束ねた緊張材として利用することが多い。φ12.4mm AFRPストランドは、新しく開発された連続繊維補強材である。AFRPストランドの保証耐力は152.0kN³⁾であり、従

来のAFRPロッドに比べ、1本あたりの耐力は大きく、取り扱い性能に優れている。AFRPストランドに関しては、PC部材への適用性について検討することを目的として、曲げ引張試験、付着伝達長試験、PC梁の載荷試験を行っている²⁾。これより、曲げ角度と曲げ引張強度の関係、付着伝達長、曲げ耐力およびせん断耐力の算定方法について明らかにした。しかしながら、AFRPストランドに関する設計用値は十分に揃っていないことから、リラクゼーション特性を明らかにすることを目的として、付着型定着体を用いたAFRP緊張材のリラクゼーション試験を実施した。

2. 試験体

AFRPストランドは、7本のφ4mm AFRPロッドをストランド状に加工したものである(図-1)。AFRPストランドの規格値および力学特性を表-1に示す。引張強度は同径のP



図-1 AFRPストランドの形状

*1 住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

*2 住友建設(株) 技術研究所主任研究員 工修 (正会員)

*3 住友建設(株) 技術部 (正会員)

*4 住友電気工業(株) 工修 特殊線事業部PC部

C鋼線とほぼ等しく、伸びはPC鋼より線のJIS規格値を満足している。弾性係数はPC鋼線の約1/4である。

本試験では、テクノーラ工法で規定³⁾されているφ12.4AFRPストランド用の付着型定着具（付着長500mm）を使用した。試験体は、定着具（鋼管）内部に定着用膨張材（エクスグリッパー TYPE A）を充填し、ストランドと定着具を一体化させた緊張材である。試験体の製作および養生は養生室（20℃）で行い、製作方法は「定着用膨張材による定着法マニュアル」⁴⁾を準用した。引張試験およびリラクセーション試験の試験体を図-2に示す。

3. 引張特性

AFRPストランドの引張耐力および剛性に関するデータは数少ないため、リラクセーション試験に先立ち、リラクセーション試験と同程度の試験長を有する引張試験を行った。

3.1 引張試験方法

試験は、土木学会「連続繊維補強材の引張試験方法（案）」³⁾に準じて実施した。試験体は、試験長L=7500mm、全長L'=8500mm、試験体数5本、試験時の材齢は7日とした。

載荷装置を図-3に示す。試験は、試験体をテンションベッドにセットし、2台の40tfジャッキにより、AFRPストランドが破断または付着型定着体から抜け出し、緊張材が破壊するまで荷重を与えた。載荷速度は毎分約100N/mm²とし、載荷荷重をロードセルにより、

表-1 AFRPストランドの規格値

呼び名	AS
連続繊維	芳香族ポリアミド繊維テクノーラ
繊維結合材	ビニルエステル樹脂
呼称	φ12.4
軸方向繊維体積混入率(%)	65
公称径(mm)	11.2
公称断面積(mm ²)	97.9
公称単位質量(g/m)	122
弾性係数(kN/mm ²)	42.0
保証耐力(kN)	152.0
伸び(%)	4.4

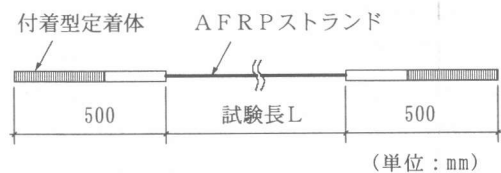


図-2 試験体図

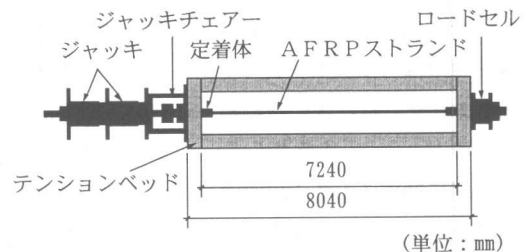


図-3 引張試験載荷装置

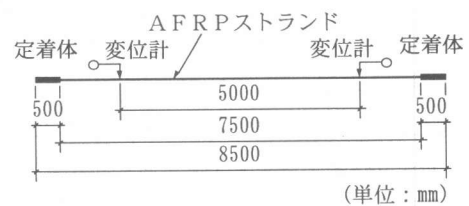


図-4 引張試験計測位置

表-2 引張試験結果

No.	破壊形態	最大引張荷重 F_u (kN)	引張強度 f_u (N/mm ²)	引張剛性 EA (kN)	ヤング係数 E (kN/mm ²)	終局ひずみ ϵ_u	気温 (°C)
T-1	付着破壊	153	1562	—	—	—	7.1
T-2	付着破壊	147	1505	4181	42.7	0.0352	9.3
T-3	付着破壊	163	1662	4263	43.5	0.0382	10.0
T-4	付着破壊	157	1603	4208	43.0	0.0373	10.2
T-5	付着破壊	155	1583	4227	43.7	0.0362	10.0
平均値	—	155	1583	4232	43.2	0.0367	9.3

注) 土木学会「連続繊維補強材の引張試験方法（案）」では、引張剛性およびヤング係数は最大引張荷重の20%と60%の値を用いて算出することになっているが、ここでは、20%と50%の値を用いた。

AFRPストランドのひずみを変位計で計測した。計測位置を図-4に示す。

3.2 引張試験結果

本試験では、全ての試験体でAFRPストランドが付着型定着体から抜け出す付着破壊となった。破壊は、付着長500mmの付着破壊が一気に生じる脆性的なものであった。AFRPストランドの破壊には至らなかったため、母材の引張強度の確認はできなかった。従って、本試験結果は定着体を含めた引張強度として評価せざるを得ない。試験結果の一覧を表-2に示す。最大引張荷重は147～163kN、平均値で155kNであり、AFRPストランドの保証耐力152kNと同程度であった。ヤング係数は、各試験体ごとのばらつきは小さく、平均値で43kN/mm²であった。これは、AFRPストランドの規格値42kN/mm²にほぼ一致する。また、計測を行った範囲内では全ての試験体で安定した応力-ひずみ関係が得られた。応力-ひずみ関係の一例を図-5に示す。

本試験より、付着型定着体を用いたAFRPストランドの静的な引張特性に、特に問題はないことが明らかとなった。また、試験体は、保証耐力にほぼ匹敵する引張耐力を有しており、リラクゼーション試験における初期導入緊張力を、最大で保証耐力の70%に設定することは可能と判断できる。従って、AFRPストランドのリラクゼーション特性の把握を目的とし、リラクゼーション試験を実施した。

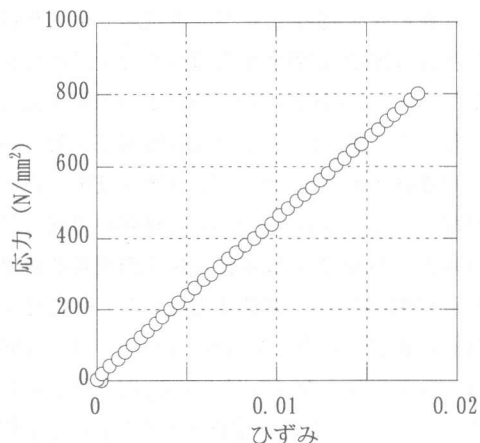


図-5 応力-ひずみ関係 (T-3)

4. リラクゼーション試験

4.1 リラクゼーション試験方法

試験は、土木学会「連続繊維補強材の長時間リラクゼーション試験方法(案)」³⁾に準じて実施した。試験パラメータは初期導入緊張力とし、緊張力はAFRPストランドの保証耐力に対して40、50、60、70%の4ケースに設定した。これより、導入緊張力によるリラクゼーション特性の違いについて確認した。各試験ケースの試験体数は3体とし、試験は住友建設(株)技術研究所実験棟内において常温で行った。载荷方法は前出の試験方法に従い、毎分200N/mm²の载荷速度で目標とする初期導入緊張力まで载荷し、荷重を120秒維持後、試験体のひずみを固定し、この時を試験開始時間とした。試験条件を表-3にまとめる。

表-3 リラクゼーション試験条件

試験ケース	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4
緊張材	1φ12.4			
保証耐力 Pu (kN)	152			
導入緊張力 (kN)	106.4 (0.7Pu)	91.2 (0.6Pu)	76.0 (0.5Pu)	60.8 (0.4Pu)
全長 (mm)	8500			
付着長 (mm)	500			
試験長 (mm)	7500			
载荷速度 (N/mm ²)	200			
初期荷重維持時間 (秒)	120			
標準時計測間隔 (時間)	12			
試験時間	2000			
試験温度 (°C)	5.5～28.4		15.1～34.6	

試験装置を図-6に示す。本試験で用いた付着型定着体は、定着体からロッドの抜け出しが生じるため、試験長が短い場合この影響が大きくなる。よって、試験長は可能な限り長くする必要がある。さらに、ひずみ量を一定に保持する必要があることから、緊張材の拘束には長さ8000mmの一般構造用炭素鋼鋼管を使用した(鋼管応力は、降伏応力度の5~8%程度)。計測は緊張力の変化を端部のロードセルで、鋼管のひずみ量をひずみゲージで、定着体からのストランドの抜け出し量をストランドと定着体の間に取り付けたパイ型変位計により行った。試験中の外気温は各鋼管に取り付けた熱電対により計測した。

4.2 リラクゼーション試験結果

リラクゼーション率の算出にあたり、全データについてストランドの定着体からの抜け出し、による緊張力の変化量を補正した。なお、

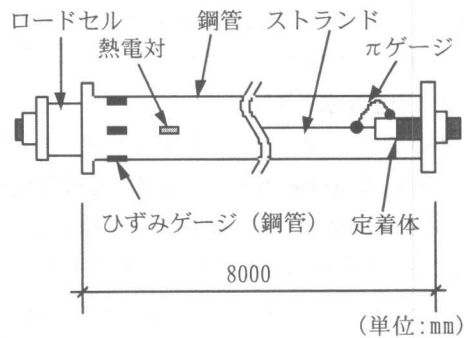


図-6 リラクゼーション試験装置図

2000時間後におけるAFRPストランドの定着体からの抜け出し量は、AFRPロッドの場合の半分以下であった。

表-4に、全試験体と過去に行ったAFRPロッドに関する10、120、1000、100万時間後のリラクゼーション率をまとめた。図-7-1~6に、CASE1~4とφ6.0およびφ7.4AFRPロッドの代表的なリラクゼーション率の経時

表-4 リラクゼーション試験結果一覧

試験ケース	連続繊維補強材	緊張材	導入緊張力	No.	リラクゼーション率(%)			
					10時間	120時間	1000時間	100万時間 ^{*2}
CASE1	ストランド*	1φ12.4	0.7Pu	1	5.23	7.88	10.10	17.90
				2	6.34	8.90	11.03	18.39
				3	5.83	8.33	10.54	17.90
				平均	5.80	8.37	10.55	18.06
CASE2	ストランド*	1φ12.4	0.6Pu	1	6.32	9.18	11.55	19.51
				2	6.31	9.14	11.67	19.99
				3	7.64	10.04	12.47	20.11
				平均	6.76	9.45	11.90	19.87
CASE3	ストランド*	1φ12.4	0.5Pu	1	6.86	8.85	11.47	19.58
				2	6.29	8.18	11.47	18.28
				3	5.42	8.15	11.26	19.01
				平均	6.19	8.39	11.65	18.96
CASE4	ストランド*	1φ12.4	0.4Pu	1	5.69	8.69	12.27	20.54
				2	7.43	10.20	14.43	23.38
				3	8.36	11.44	15.43	24.48
				平均	7.16	10.11	14.05	22.80
CASE5 ^{*1}	異形ロッド*	1φ6.0	0.75Pu	平均	5.45	7.50	9.85	17.05
CASE6 ^{*1}	異形ロッド*	1φ7.4	0.75Pu	平均	6.67	8.63	11.67	19.53
CASE7 ^{*1}	異形ロッド*	1φ7.4	0.65Pu	平均	7.13	9.47	11.80	18.80
CASE8 ^{*1}	異形ロッド*	7φ6.0	0.75Pu	平均	6.60	7.73	10.33	18.00
CASE9 ^{*1}	異形ロッド*	9φ7.4	0.75Pu	平均	7.85	8.95	11.15	19.65
推定式 ^{*1}	異形ロッド*	φ7.4	—	—	7.24	9.84	12.06	19.29

注) 表中*1印のCASE5~9は著者らが過去に実施した同様のリラクゼーション試験結果¹⁾である。

*2印は、各試験体の0~2000時間のデータについて対数回帰して得られた推定値である。

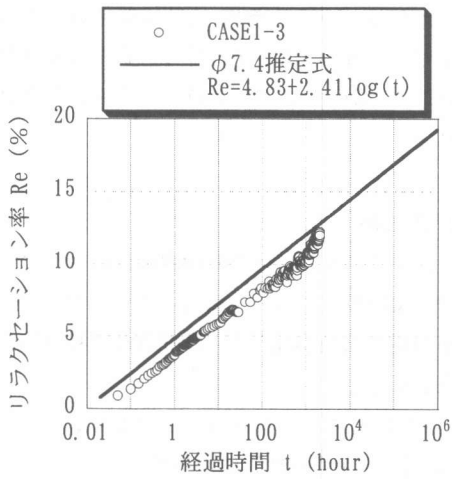


図-7-1 試験結果 (CASE1-3)

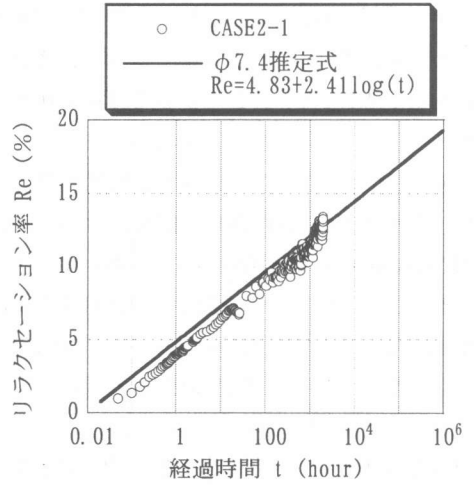


図-7-2 試験結果 (CASE2-1)

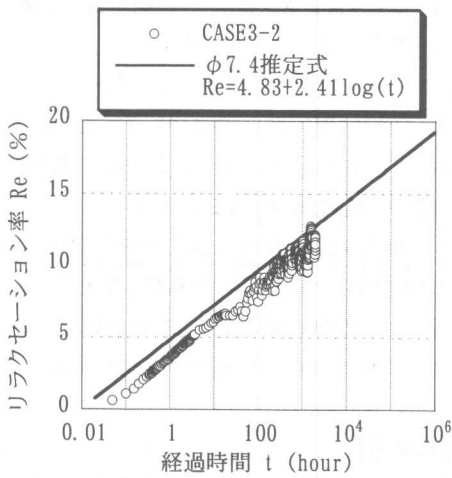


図-7-3 試験結果 (CASE3-2)

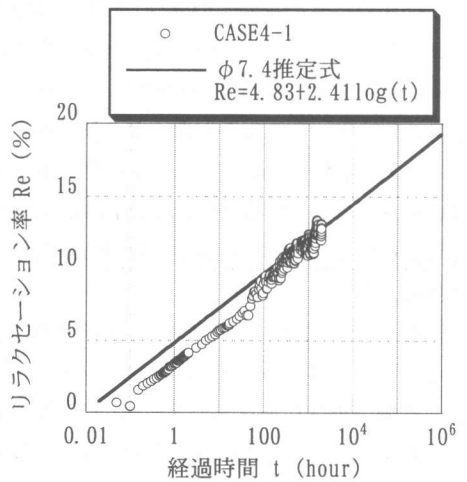


図-7-4 試験結果 (CASE4-1)

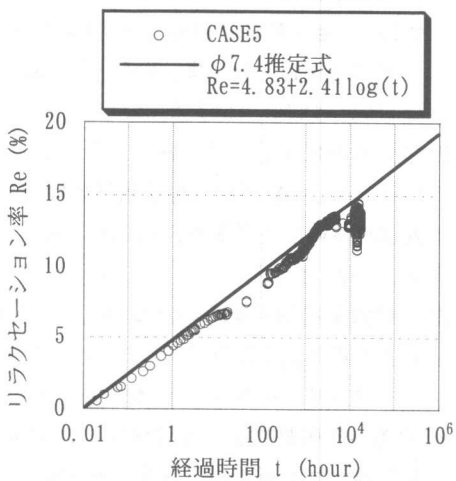


図-7-5 試験結果 (CASE5)

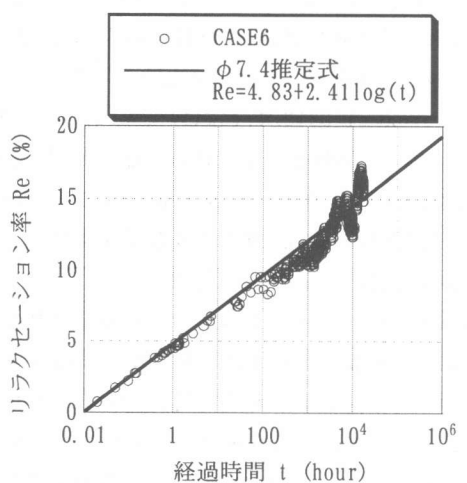


図-7-6 試験結果 (CASE6)

変化を示す。なお、図-7中の推定式は、著者らが過去に実施したリラクゼーション試験より得られたφ7.4AFRPロッドに関するリラクゼーション率の推定式¹⁾である。

図-7より、リラクゼーション率はAFRPロッドの場合と同様、経過時間の対数にほぼ比例した。さらに、全試験ケースにおいて、リラクゼーション率は経過時間に伴い波打つように増加している。これは鋼管とアラミド繊維の熱膨張係数が異なるため、気温の変動により生じた緊張力の変動であることが分かっている¹⁾。導入緊張力が0.5~0.7Puの範囲内では、導入緊張力によりリラクゼーション率に差は殆ど認められない。この場合、1000時間後におけるリラクゼーション率は約12%である。導入緊張力を0.4Puとした場合、リラクゼーション率は他の試験ケースよりも大きくなる傾向を示した。しかしながら、実施工における導入緊張力は0.6~0.7Puであるので、設計上は導入緊張力によりリラクゼーション率に差はないとして取り扱える。

また、図-7よりAFRPストランドのリラクゼーション率はφ7.4AFRPロッドの推定式より概ね小さい値を示している。この推定式でAFRPストランドのリラクゼーション率を評価すれば、安全側の値が与えられることになる。従って、AFRPストランドのリラクゼーション率の推定式は、式(1)のφ7.4AFRPロッドの推定式で代表することとした。

$$Re=4.83+2.41\log(t) \quad (1)$$

ここで、 t は経過時間(hour)を、 Re は時刻 t におけるリラクゼーション率(%)を表す。式(1)によれば、100万時間後のリラクゼーション率の推定値は19.26%となる。

以上より、AFRPストランドのリラクゼーション率は、φ7.4AFRPロッドのリラクゼーション率の推定式で代表できることが分かった。また、AFRPロッドのリラクゼーション率は、φ7.4mmの方がφ6.0mmよりもやや大きいものの、ロッド径による差はあまりな

いことが分かっている¹⁾。連続繊維補強材のリラクゼーション率は、補強材の形状にはあまり関係なく、母材繊維固有の値を示すものと考えられる。

5. まとめ

AFRPストランドのリラクゼーション特性について実験的に明らかにし、リラクゼーション率の推定式を提案した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) AFRPストランドのリラクゼーション率は、経過時間の対数に比例する。
- (2) AFRPストランドのリラクゼーション率は、φ7.4AFRPロッドの推定式である式(1)で評価することができる。
- (3) AFRPストランドのリラクゼーション率は、1000時間において約12%、100万時間(約114年)における推定値は約19%である。

今後の課題として、AFRPストランドのクリープ試験および疲労試験を実施し、材料物性について明らかにするとともに、設計式の提案を行うことが挙げられる。AFRPロッドとともに、実構造物への利用を進めていきたい。

【参考文献】

- 1) 松元香保里ほか：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19、No.1、pp.1261-1266、1997.6
- 2) 中井裕司ほか：アラミドストランドのブレンション緊張材への適用性の検討、住友建設技術研究所所報、No.22、pp.35-40、1995.11
- 3) 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
- 4) 定着用膨張材による定着法マニュアル～連続繊維補強材の引張試験編～(案)、膨張材による定着法研究会、1993.11