

FRP 緊張材を用いた プレストレスト コンクリート構造

小林 一 輔*
 魚本 健 人**
 趙 力 采***



* Kazusuke KOBAYASHI
東京大学生産技術研究所



** Taketo UOMOTO
東京大学生産技術研究所



*** Ryokuche CHO
読売東京理工専門学校

1. はしがき

この数年来、我が国のみならず諸外国においても、融氷剤が多量に散布されているプレストレストコンクリート構造物や、海岸などの海洋環境下に設置されているプレストレストコンクリート構造物の緊張材(高張力鋼製)の塩分腐食が問題になっている。この緊張材の腐食が鉄筋コンクリート部材における鉄筋の腐食と根本的に異なる点は、鋼材自体の降伏点が著しく高いこと(通常 150 kgf/mm^2 程度)と、これに常時 $80\sim 90 \text{ kgf/mm}^2$ の引張応力度が作用している点であって、このために塩分腐食以外に応力腐食割れによる破断を招く恐れがある。このことはプレストレストコンクリート部材の崩壊につながる危険性が高いことを意味する。

筆者らは、このような厳しい腐食環境下に建設されるプレストレストコンクリート構造物の抜本的な防食策として、現在の高張力鋼製緊張材を、これとほぼ同等の引張耐力を有する FRP 製緊張材に置き換える方法を取り上げ、その実用化を目指した研究を 1980 年から進めている。本文は、筆者らの研究を中心として、一方向強化 FRP 緊張材の開発の現状と課題について述べたものである。

2. 内外における開発研究の過程

高張力鋼に代わり、一方向強化 FRP 材を緊張材として用いるプレストレストコンクリート構造に関する開発研究は、1950 年代から 1960 年代にわたり、米国、ソ連および英国において行われたが、実用化の見通しが得られるような段階にまで研究は進展しなかった。これらの国々が緊張材として FRP に着目した主な理由は、ガラス繊維が鋼材に比べて著しく高い引張強度を与える可能性を秘めていたからである。例えば、直径が $3 \mu\text{m}$ のモノフィラメントによる試験では 3620 kgf/mm^2 の引張強度が得られたという記録があり、これを集合してストランドやロービングとした場合でも 700 kgf/mm^2 程度の引張強度を得ることが可能であるとされたからである。

繊維の容積混入率を 60% とした場合の FRP 材の引張強度は、約 400 kgf/mm^2 となり、この値は冷間引抜鋼線の高強度品に相当する 200 kgf/mm^2 をはるかに上廻るのである。しかし、問題は FRP に持続荷重を加えた場合の引張強度の低下現象、すなわち静的疲労であった。持続荷重を無限に加えた場合の引張強度は短期荷重を受けた場合の約 65% に低下することが予想された。導入するプレストレスをその値の 70% とすれば、利用できる強度は短期強度の 40~50% にとどまることにな

る。

しかし、1970年代に入ってから西独において実用化を目指した研究が進められ、1980年にはデュッセルドルフ市郊外にスパンが6.50mの実験橋が建設され、1986年には橋長46.9mの2車線の道路橋（2径間連続桁）が同じくデュッセルドルフ市内に建設された。

西独グループの用いたFRP材は容積混入率が68%のガラス繊維とポリエステル樹脂から成る直径7.5mmの緊張材で、引張強度が150kgf/mm²、ヤング率は5100kgf/mm²である。西独における研究の進展は1970年代に英国で開発されたPultrusion方式と呼ばれるFRPの成形方法の導入によるものである。これは等断面のFRP製品を、一定の張力を加えつつ強化用繊維に成形するもので、この技術の開発により上記の静的疲労による荷重低下は大幅に改善されることになったのである。

高張力鋼の代わりに一方強化FRP材をプレストレストコンクリート用緊張材として用いることの利点は、その耐食性のほかに、コンクリートの時間依存性の塑性変形による応力損失が小さくなることである。例えば、GFRPのヤング率は鋼材の1/4程度になるので、上記の応力損失は著しく小さくなる。さて、緊張材としてFRP材を用いようとする際に解決を要する最大の課題は緊張・定着装置の開発である。FRP材は一方にのみ強化されているので、これを高張力鋼用の装置を用いて緊張すると、軸方向の引張応力と同時に横方向の圧縮応力とこれに伴うせん断応力を生じ、途中で破壊してしまうのである。

筆者らは、1980年に研究に着手したが^{2)~6)}、まず1本のFRP材の緊張・定着装置を本所の試作工場の協力を得て開発し、これを用いてガラス繊維、炭素繊維ならびにアラミド繊維によって強化した各種のFRP材の性能評価を行った。この結果と、上記の応力損失にかかわる繊維のヤング率の値を考慮してアラミド繊維を強化材と

して選定し、実用化を図る場合に必要な基本的な問題について検討を行った。また、1985年より、住友建設(株)と共同で実橋建設を目指した開発研究を進めている。

我が国においても、筆者らの研究以外に、1986年に高木らの研究⁷⁾が発表されており、1987年6月にはCFRP製緊張材による道路橋PC桁の載荷試験が公開され⁸⁾、実用化を目指した研究が行われるようになってきている。

3. FRP 緊張材の素材と製造

プレストレストコンクリート用緊張材として利用し得る一方強化FRP緊張材の繊維素材に要求される性質としては、従来の高張力鋼に比し引張強度が高く、耐食性に優れていること、ならびにFRP緊張材とした場合のリラクセーションが小さいことである。これらに該当する素材繊維としては、表-1に示す諸性質を有する炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維および高強度・高弾性の有機繊維などである。炭素繊維は、コンクリート構造に関連する耐水性、耐アルカリ性、耐海水性などの化学的抵抗性に優れているが、ガラス繊維は耐アルカリ性に関して若干難点がある。またケブラーおよびテクノラなどのアラミド繊維は、炭素繊維よりも軽くしかもこれと同等の強度を有するが、ヤング率は小さい。このことはアラミド繊維は炭素繊維よりも靱性が大きいことを意味し、炭素繊維系のFRPは破壊靱性や衝撃抵抗が劣るという欠点を有する。一方、アラミド繊維は炭素繊維と同様、化学抵抗性に優れているが、紫外線照射による強度低下の大きいことが弱点である。しかし、ガラス繊維の耐アルカリ性についての弱点もFRPとすることにより、また、アラミド繊維の紫外線照射による弱点もコンクリート構造中に使用されることにより解決されることになる。

表-1 各種高張力繊維の特性

諸 元	炭 素 繊 維				ア ラ ミ ド 繊 維			その他の有機繊維		ガ ラ ス 繊 維
	PAN系		ピ ッ チ 系		ケ ブ ラ ー		テクミロン	クラロン		
	高強度品	高弾性品	汎用品	高強度 高弾性品	ケブラー-49	ケブラー-29			テクノーラ	
引張強度 (kg/mm ²)	260~450	200~250	100	300~	280	280	310	150~350	70~150	250~350
弾性係数 (kg/mm ²)	20 000~ 24 000	35 000~ 45 000	4 000	40 000~ 80 000	13 000	6 300	7 700	8 000~ 10 000	1 100~ 3 700	7 000~ 8 000
伸 び (%)	1.3~1.8	0.4~0.6	2.5	0.4~0.6	2.3	4.0	4.4	3.0~6.0	7.0	4.5~6.0
密 度 (g/cm ³)	1.7~1.8	1.8~1.9	1.6	1.9~2.1	1.45	1.44	1.39	0.96	1.26~1.30	2.5
直 径 (μm)	7~8		10		12		12	50~100	14	12
価 格 (円/kg)	10 000~ 15 000	20 000~ 40 000	2 000~ 3 000	PAN系の 同等品より 安くなる	10 000	6 000	6 000	8 000	700/1 300*1	400
熱 分 解 温 度	3 000°C				600°C		500°C	140°C*2	240°C	800°C

(注) *1 700円は抄造用, 1300円はコンクリート補強用

*2 溶解温度

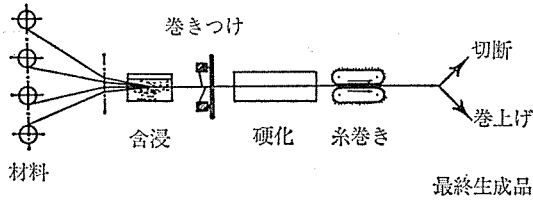


図-1 Pultrusion 方法の概念図

一方向強化 FRP 緊張材はこれらの繊維を、既に述べた Pultrusion 法 (図-1 参照) により、ビニルエステル、エポキシ系などの樹脂に含浸し、集束・成形したままの滑らかな表面のものと、コンクリートとの付着力を増すとともに取扱いやチャック部における損傷を防止するために、表面を軸直角方向にスパイラル状やメッシュ状に繊維強化したものも製造されている。

4. FRP 緊張材の諸特性

4.1 概要

FRP 緊張材をプレストレストコンクリート用緊張材として用いる場合、明確にしておかなければならない問題点としては、FRP 緊張材のヤング率、許容応力度ならびに見掛のリラクセーション率などである。現時点ではそれらの値を明確に定められないが、基礎資料となる各種 FRP 緊張材の引張特性と温度依存性およびリラクセーション特性を炭素繊維、アラミド繊維およびガラス繊維を用いた FRP 緊張材、すなわち CFRP、AFRP と GFRP について求めた結果に基づき、述べることにする。

4.2 FRP 緊張材の引張特性と温度依存性

FRP 緊張材の引張応力-ひずみ特性は、図-2 に示すように最大応力時までほぼ直線で近似することができる

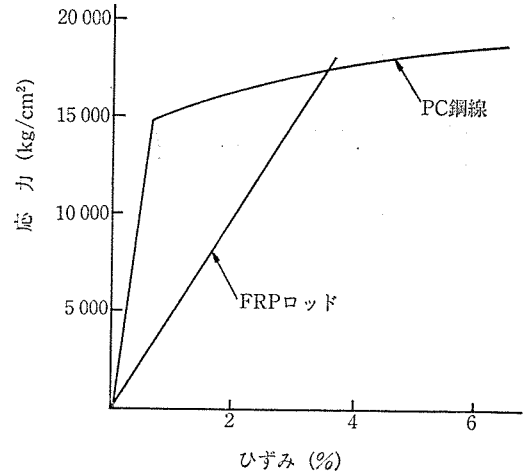


図-2 FRP 緊張材の引張応力-ひずみ曲線

表-2 FRP ロッドと繊維素材の破断時伸び

	繊維	FRP ロッド
アラミド繊維	4.2%	3.8%
ガラス繊維	4.0%	3.3%
炭素繊維	1.3%	1.7%

ことであって、ヤング率は高いが FRP 緊張材に比し相対的に低い伸び (1% 前後) で降伏し、その後は伸びが急激に増加する PC 鋼線と異なる。このことは、プレストレストコンクリート構造部材に用いた場合、荷重-たわみ性状が PC 鋼線を用いたものと異なってくることを示唆している。

3種の FRP 緊張材の破断時の伸びを繊維素材の場合と比較して示したものが表-2であるが、当然のことながら、その傾向はよく一致していることがわかる。この結果から明らかなように、CFRP は伸びが小さく脆性的な破壊を示すのに対して、AFRP は靱性が大きいと

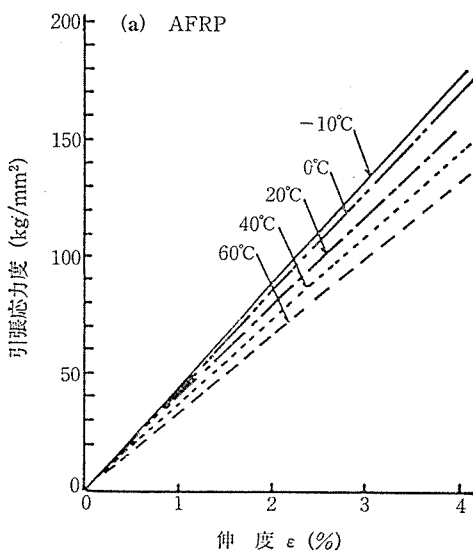


図-3(a) AFRP ロッドの引張応力度-伸度曲線

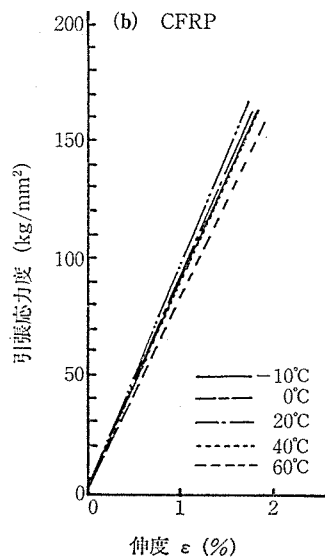


図-3(b) CFRP ロッドの引張応力度-伸度曲線

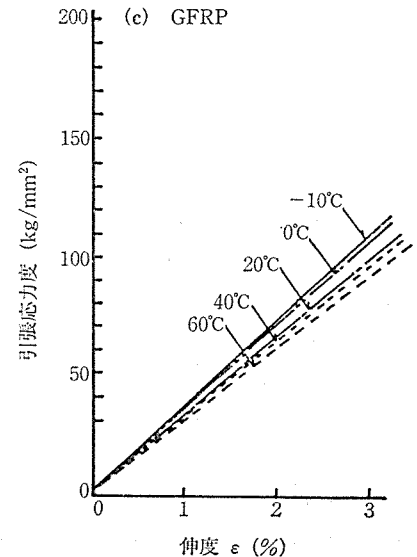
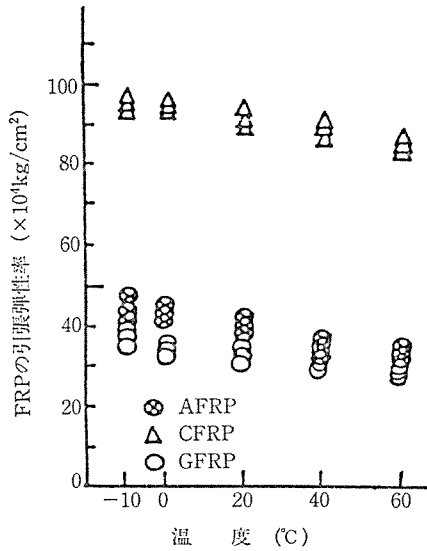
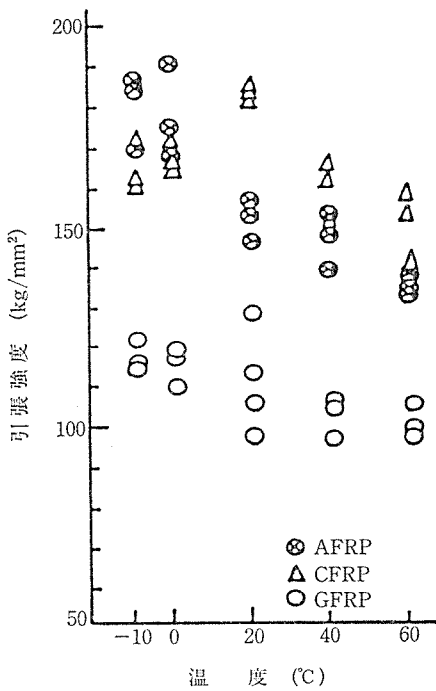


図-3(c) GFRP ロッドの引張応力度-伸度曲線



図—4 各種 FRP ロッドの弾性係数の温度依存性



図—5 各種 FRP ロッドの引張強度の温度依存性

言えるようである。図—3(a), (b) および (c) はそれぞれ AFRP, CFRP および GFRP 緊張材の引張応力度-伸度曲線に及ぼす環境温度 (-10°C~60°C) の影響を示したものである。いずれの FRP 緊張材の場合にも、環境温度が低くなるにつれ曲線の傾きが大きくなり、また破断時伸びもやや小さくなる傾向がある。これらの曲線の傾きはヤング率 (引張弾性率) を示すものであって、図—4 のように環境温度が低くなるにつれヤング率は高くなる。例えば、常温 (20°C) での AFRP 緊張材 (繊維の容積百分率: 63%) のヤング率は $43.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ (混合則による計算値の 93%) であって、

PC 鋼線の約 1/5 である。

一方、FRP 緊張材の引張強度の温度依存性は、図—5 に示すとおりである。常温 (20°C) の結果から明らかなように CFRP (183 kg/mm^2), AFRP (152 kg/mm^2), GFRP (114 kg/mm^2) の順に強度が低い。これらの値は一般に用いられる高張力鋼の引張強度とほぼ同等な値であるが、CFRP や AFRP の場合には 160 kg/mm^2 級の冷間引抜 PC 鋼材に匹敵する強度を有している。しかし、ヤング率における場合と同様に、引張強度も環境温度が高くなるにつれ、強度が低くなる特性を持つ。

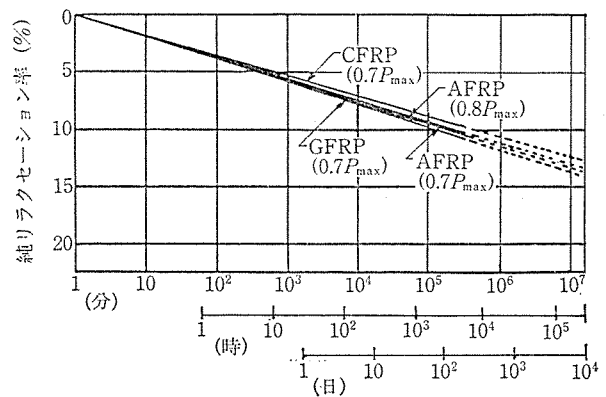
以上のように、FRP 緊張材は一般の FRP と同様に繊維よりもマトリックスである合成樹脂の影響に起因すると考えられる引張強度やヤング率の温度依存性を有するので、明確な値のヤング率や許容応力度を定めるためには数多くのデータを集積する必要がある。なお、FRP 緊張材は、繊維が同一でも用いる合成樹脂と繊維との附着性能によって引張特性が異なり、現時点では引張強度が相当に改善されたものが製造されている。

4.3 FRP 緊張材の純リラクセーション率

初期荷重をそれぞれの最大引張荷重の 70~80% に相当する荷重として、CFRP, AFRP および GFRP 緊張材の常温時の純リラクセーション率と時間との関係を示したものが図—6 である。

いずれの繊維を用いた場合でも、FRP 緊張材の純リラクセーション率と時間 (対数表示) との関係が直線関係にあることは、一般に用いられる PC 鋼材の場合と同様である。また、図—6 から明らかなように、もしこの関係が 30 年後までも成立すると仮定した場合、FRP 緊張材の純リラクセーション率は約 14% 程度であることになる。一般の PC 鋼棒の純リラクセーション率は約 7% 程度、また PC 鋼線の場合には約 15% 程度であることから、FRP 緊張材の純リラクセーション率は PC 鋼線とほぼ等しく、PC 鋼棒の約 2 倍である。

なお、GFRP および CFRP は引張荷重を負荷した後、



図—6 純リラクセーション率と時間との関係 (20°C)

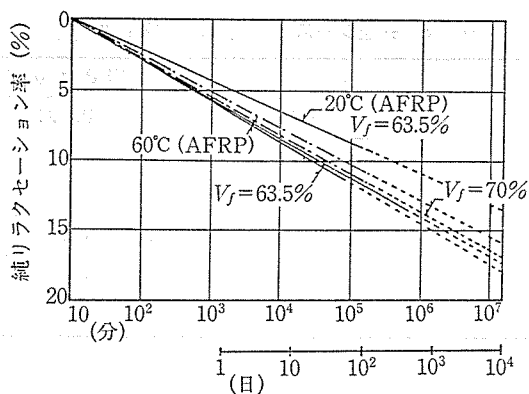


図-7 AFRP ロッドの純リラクゼーション率と時間との関係 (60°C)

緊張材自体にチャックや測定用治具の取付けなどによっても局部的破断が生じることが多く見受けられた。このことはこれらの緊張材をプレレストコンクリート部に適用した場合、シーソとの接触部における緊張材の破断が懸念される。

筆者らは前述の引張特性と温度依存性およびリラクゼーション試験等の結果より、脆性的挙動を示す他のFRP緊張材に比し靱性が大きいアラミド繊維を用いたAFRPを選定し、さらに検討を加えることにした。

図-7は、日照によるコンクリート表面が高温となった場合を想定した60°Cの条件下において、最大引張耐力の70%から90%の初期荷重をかけたAFRPの純リラクゼーション率と時間との関係を示したものである。図から明らかなように、60°Cの場合も純リラクゼーション率の推定値は常温時の14%に比して大きく、約17%となっている。また図に一例を示したように、繊維混入率が70%に比し、63.5%のAFRP緊張材の純リラクゼーション率はやや大きい値を示す。

これらの結果より、AFRPは20°Cから60°Cではほぼ安定したリラクゼーション特性を示すが、引張特性と同様に温度依存性を有している。

4.4 FRP 緊張材の疲労特性

AFRP 緊張材を用いて、下限応力を静的引張強度の

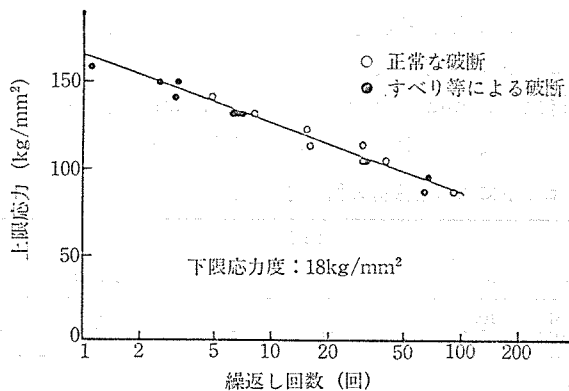


図-8 疲労試験結果

10% として行った疲労試験では、図-8 に示すように100万回疲労強度が静的引張強度の約45%という結果が得られている。この値はPC鋼線とほぼ同等であるが、緊張材表面のスパイラル状補強繊維と軸方向繊維との間でのすべりによって、緊張材が破断している例が見られた。緊張材の補強繊維と軸方向繊維の付着を改善すれば、疲労特性が向上するものと思われる。

5. FRP 緊張材の緊張・定着装置

FRP 緊張材が通常の高張力鋼製緊張材に用いられている装置を用いて緊張できないことは、2. で述べたとおりである。筆者らは、管接着型、スエージング加工型および圧縮摩擦型等の種々の方法を検討し、写真-1 および写真-2 のような高性能の緊張・定着装置を開発した。

写真-1 はクサビ定着具であって、外部コーンとその内部に同一テーパ状接合面を持ち、中心部にFRP緊張材を挿入・把持する半円溝をうがった2つ割りチャックから成っている。この治具を用いて行った引張試験結果によれば、FRP緊張材の混合則による理論引張強度の約95%以上のものが常に得られており、破断箇所も緊張材中央部で生じるという良好な結果であった。

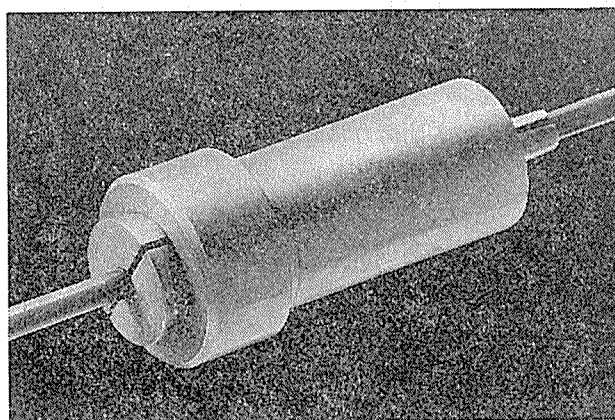


写真-1 クサビ定着具

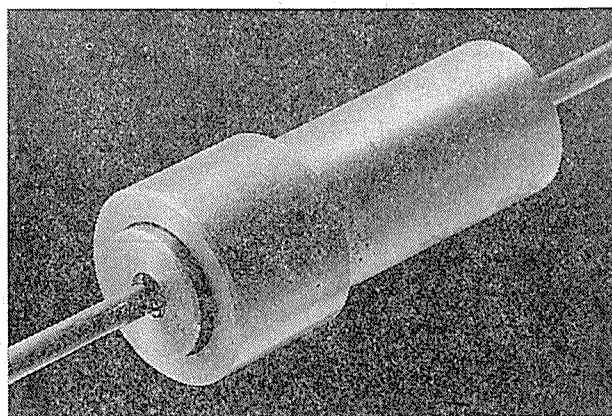


写真-2 摩擦定着具

一方、写真—2 は、FRP 緊張材を挿入した状態での摩擦定着具であって、前述したクサビ定着具と同様に、円錐形状に内部をくり抜いた内部コーンに摩擦定着用 2 つ割りチャックを装填した後、外部コーンに挿入した状態で FRP 緊張材を挿入するものである。FRP 緊張材の緊張・定着は、緊張装置で FRP 緊張材を緊張することにより、まずクサビ定着具の 2 つ割りチャックが外部コーンに入り込んで緊張材を定着し、所定の荷重まで緊張した後、摩擦定着具の内部コーンを押し込んで定着するという手順となる。開発したこれらの装置は、セット量（定着時のすべり量）および緊張材引張応力度の減少が非常に少ない状態で FRP 緊張材を緊張・定着することが可能であり、プレストレストコンクリート梁試験では、梁の破壊時まで全くすべりもなく正常に機能することを確認している。筆者らは、現在、多数本（7～8 本）の FRP 緊張材を同時に緊張・定着する装置を開発し、大型梁の実験に供している。

6. プレストレストコンクリート構造

プレストレストコンクリート構造物を設計・施工するためには、所要のプレストレスをコンクリートに与え、構造体として必要な耐荷力および諸特性を有することが重要である。その際問題となるのは、コンクリートに所要のプレストレスを導入するための方法とプレストレスの減少量の把握、ならびに、プレストレストコンクリート構造物としての耐荷力および特性を明らかにすることである。しかし、プレストレスの導入および定着方法については前述の 5. で説明済みであることから、ここではプレストレスの減少量とプレストレストコンクリート構造としての耐荷力と特性について記述する。

6.1 プレストレスの減少

プレストレストコンクリート構造物は、その構造体としての耐荷力や特性が導入されたプレストレスによって決定されるといっても過言ではない。しかし、コンクリートに導入されるプレストレスは種々の原因で減少するため、どのように、またどの程度減少するかを明らかにしなければならない。一般に、プレストレスの減少を起こす原因としては、主に次のものが考えられている。

- 1) 緊張材とシースの摩擦
- 2) 応力導入時のセットによる引張力の減少
- 3) プレストレス導入後の緊張力の経時変化

PC 鋼材の場合には既に明らかにされているため、以下に FRP 緊張材を用いた場合のプ

表—3 各種シースと緊張材の摩擦係数 (μ)

緊張材	PC 鋼線			FRP ロッド			
	シース	メタル	P.V.C	P.E 黒	メタル	P.V.C	P.E 黒
摩擦係数	曲率(ラジアン)						
	0.583	0.0784	0.174	0.0404	0.154	0.238	0.0484
	0.395	0.1020	0.236	0.0414	0.182	0.215	0.0433
	0.199	0.1540	0.217	0.0517	0.118	0.226	0.0621
	平均	0.1115	0.209	0.0445	0.151	0.226	0.0513

レストレスの減少について PC 鋼材と比較して説明する。

(1) 緊張材とシースとの摩擦

鋼製フレームを用い、FRP 緊張材 および PC 鋼線と各種シースとの摩擦係数の測定結果を表—3 に示す。

PC 鋼材と FRP 緊張材とを比較するといずれのシースを用いた場合でも、FRP 緊張材を用いた方が 1 割から 3 割大きな値を示している。また、PC 鋼材および FRP 緊張材のいずれの場合にも、シースの違いによる摩擦係数 (μ) は、ポリエチレン製、鋼製、塩化ビニル製シースの順に摩擦係数が大きくなっている。

通常、PC 鋼材とシースとの摩擦係数は 0.2～0.6 と言われており、土木学会の「コンクリート標準示方書」では μ を 0.3 とすることになっているが、FRP 緊張材を用いたプレストレストコンクリート構造物を設計・施工する場合には、PC 鋼材とあまり変える必要がないと言えよう。ただし、シースの耐食性および摩擦係数を考慮すると鋼製シースよりも上記の硬質ポリエチレン製シースを用いることが望ましい。

(2) 応力導入時のセットによる引張力の減少

表—4 は、PC 鋼材と FRP 緊張材を用いた場合のプレストレス導入時のセットによる引張力の減少の違いを示したものである。この表から明らかなように、FRP 緊張材は PC 鋼材に比べセットによる引張力の減少が少なく、プレストレストコンクリート構造物を設計・施工するうえでより望ましい。

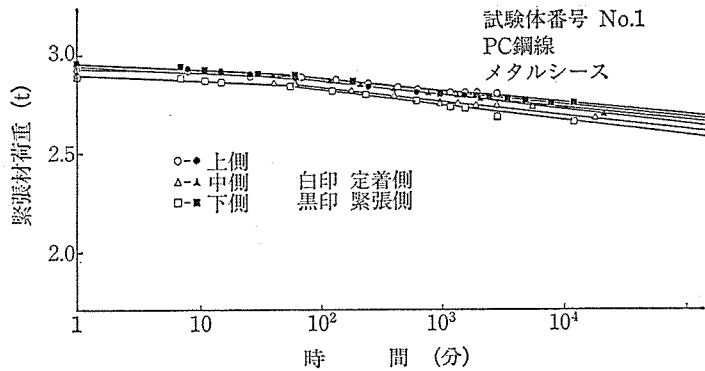
セットによる引張力の減少量から摩擦抵抗がないとしてセット量（定着装置でのずれ変形量）を求めると PC 鋼材は 1.8 mm、FRP 緊張材は 1.4 mm となり、通常用いられている PC 鋼材のセット量（2～4 mm）より小

表—4 セットによる緊張材の引張力の減少

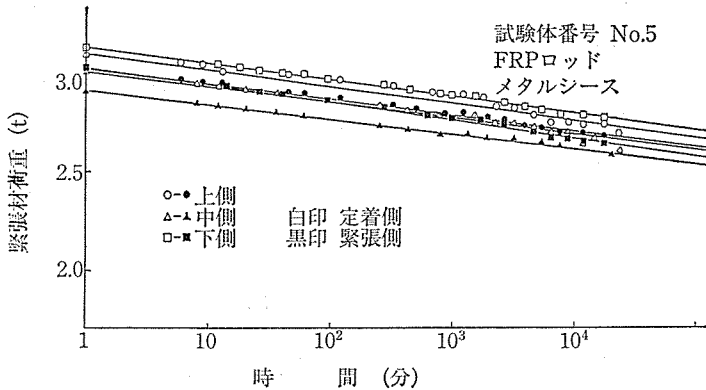
緊張材	PC 鋼線			FRP ロッド						
	試験体番号	No. 1	No. 2	平均	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
減少量 (kg)	329 309*	333 299*	331 304*	100 79*	71 70*	100 90*	108 100*	62 78*	62 71*	84 82*
減少応力 (kg/mm ²)	16.8	17.0	16.9	3.5	2.5	3.5	3.8	2.2	2.2	3.0

* は緊張側のロードセルによる定着前後の荷重減少量

さな値となっている。表—4 に示したように FRP 緊張材の方が PC 鋼材よりもセットによる引張力の減少が小さな値となったのは、セット量が小さいことと弾性係数が小さいことが原因である。



図—9 引張力の経時変化 (PC 鋼線)



図—10 引張力の経時変化 (FRP ロッド)

(3) 緊張材引張力の経時変化

プレストレス導入後の緊張材の引張力は、コンクリートのクリープ・乾燥収縮、緊張材のリラクセーション等によって時間の経過とともに減少する。図—9 および

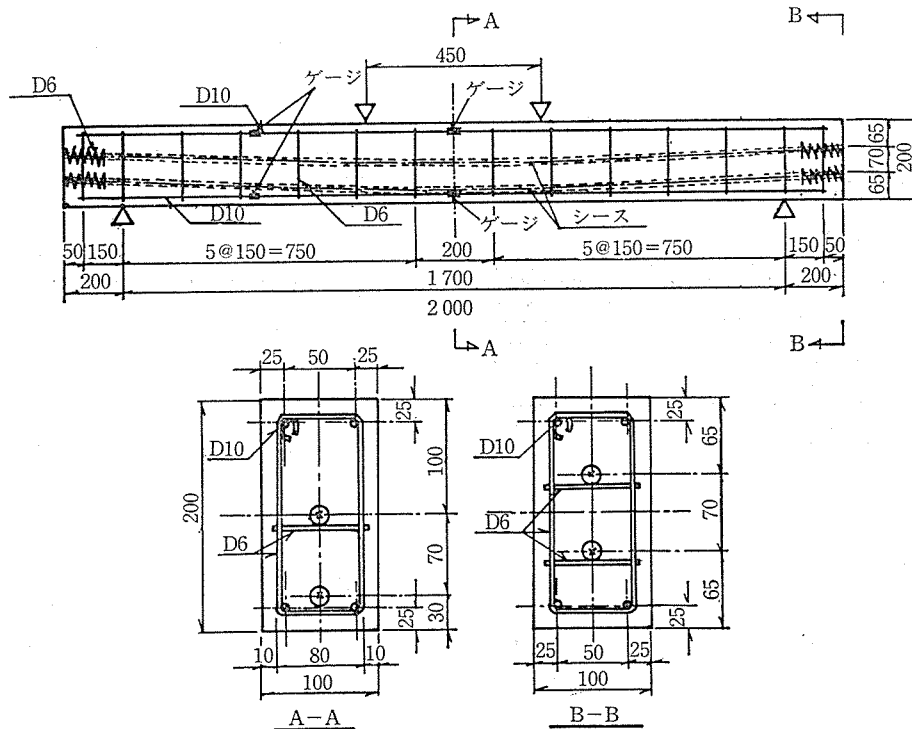
図—10 は PC 鋼材および FRP 緊張材を用いた場合に、プレストレス導入後の引張力の経時変化を測定した結果を示したものである。

これらの図から明らかなように、緊張材の引張力と対数表示した時間とはほぼ直線近似することができる。この直線関係が 30 年後まで成立すると仮定した場合、PC 鋼材で初期プレストレスの約 85%、FRP 緊張材で約 82% が有効プレストレスとして残存すると考えられる。これは FRP 緊張材の方が PC 鋼材に比べリラクセーション率が大きいためであるが、セットによる応力損失までを考慮にいと、FRP 緊張材は最大緊張応力の約 79%、PC 鋼材は約 77% となり、逆に FRP 緊張材の方が有利となる。

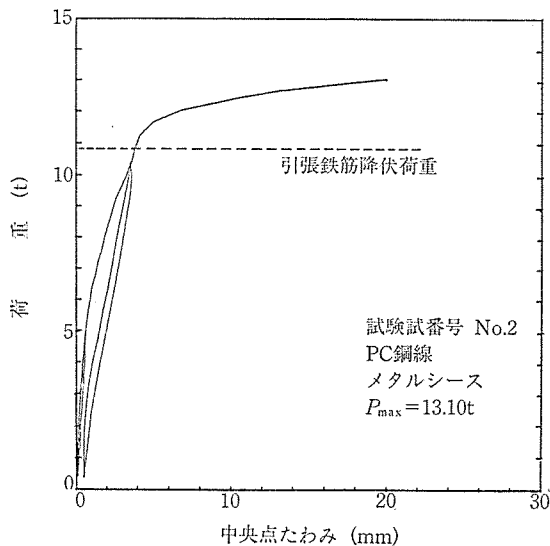
6.2 FRP 緊張材を用いたプレストレストコンクリート構造の特性

プレストレストコンクリート構造としては種々有るが、ここでは最も一般的でまた最も多く使用されている構造である梁構造について説明する。

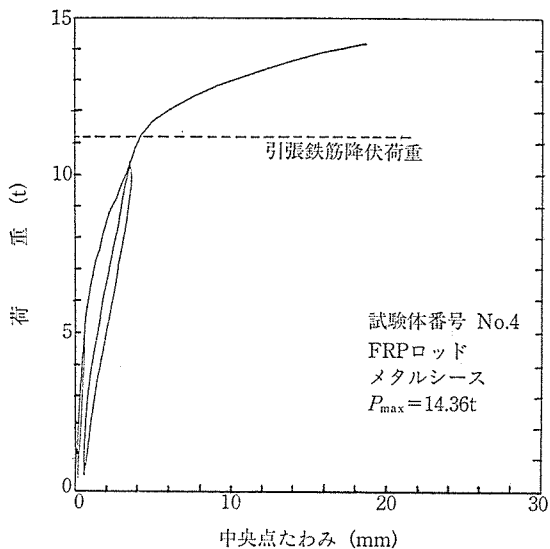
図—11 は、実験用に作製したポストテンション方式のプレストレストコンクリート梁である。また、図—12 および図—13 は、荷重—中央点たわ



図—11 緊張材を曲線配置した試験体配筋図



図—12 荷重-中央点たわみ曲線 (PC 鋼線)



図—13 荷重-中央点たわみ曲線 (FRP ロッド)

み曲線の一例を示したもので、それぞれ PC 鋼線および FRP 緊張材を使用している。

いずれの梁もほぼ同じプレストレス力を導入したものであり、ひび割れ荷重の 4.0 t までは弾性的挙動を示し、弾性計算より求めた変形量とほぼ一致した。引張鉄筋が降伏した後は、PC 鋼材を用いた場合には PC 鋼材の降伏にともなってたわみが急に増加しているが、FRP 緊張材を用いた場合には梁の破壊時まで荷重-たわみ曲線はほぼ一定の割合で増加している。これは緊張材の応力-ひずみ曲線の違いが明瞭に現れたものであると考えられる。

最大耐荷力は PC 鋼材を使用した場合に 13.10 t、

FRP 緊張材を使用した場合に 14.36 t となっているが、これは導入されたプレストレス力の違いに起因するもので、FRP 緊張材の場合にも PC 鋼材と同じ考え方が適用できることを示している。

7. あとがき

以上、筆者らの研究を中心に、プレストレスコンクリート構造用 FRP 緊張材の開発の現状と課題について説明したが、本文で明らかのように、FRP 緊張材は従来の PC 鋼材と同等以上の性能を有し、ほぼ同じ扱いをすることができる。既に、西ドイツでは実際の橋梁に試験的に適用されているが、我が国における今後の課題は、実構造物へ適用する場合に生じる設計・施工上の問題点の解明であるといえよう。

この緊張材は厳しい塩分環境下においても腐食する恐れがなく、有効プレストレスの減少が小さいことから、今日問題となっているコンクリート構造物の劣化を容易に防止する方法としてのみならず効率の良いプレストレスの利用など多くの利点を有している。今後、実構造物への FRP 緊張材の適用が進められれば、従来にない新しい建設用構造材料として高い評価を受けるものと思われる。

参考文献

- 1) Waaser, E und Wolf, R.: Ein neuer Werkstoff für Spannbeton, HLV-Hochleistungs-Verbundstab aus Glasfasern, beton, 1986, H.7
- 2) 小林一輔: コンクリート用補強材, コンクリート工学, 日本コンクリート工学協会, 1986.3
- 3) 小林一輔: 繊維強化複合材料プレストレスコンクリート用緊張材の開発研究, 昭和 59 年度科学研究費 (試験研究 2) 研究成果報告書
- 4) 小林一輔, 趙 力采: 繊維強化複合材料製プレストレスコンクリート用緊張材の開発研究(その 1), 生産研究, Vol. 36, No. 8, 1984.8
- 5) 小林一輔, 趙 力采, 西村次男: 繊維強化複合材料製プレストレスコンクリート用緊張材の開発研究(その 2), 生産研究, Vol. 37, No. 6, 1985.6
- 6) 石田, 小林, 趙, 則武: FRP ロッドを用いたプレストレスコンクリート構造に関する研究, 第 8 回コンクリート工学年次講演会 論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 657~660, 1986
- 7) 高木, 内藤, 佐藤: FRP ロッドを用いたプレストレスコンクリートはりの曲げ性状に関する研究, 第 8 回コンクリート工学年次講演会 論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 661~664, 1986
- 8) 大飼晴雄: CFRP 製緊張材による道路橋 PC げたの載荷試験 (ニュース), コンクリート工学, Vol. 25, No. 8, 日本コンクリート工学協会, 1987.8

【昭和 62 年 11 月 20 日受付】