

FRP 材料の PC 構造物への適用性に関する研究

片 脇 清*
西 崎 到**

はじめに

最近、開発が進んでいるアラミド繊維、カーボン繊維等の新素材は、自動車、航空機、あるいは宇宙工学等の様々な分野で実際に利用され、その用途の広がりには著しいものがある。土木、建築の分野においても、これらを有効に利用することによって新しい用途を創出したり、あるいは従来の技術の改良、近代化、効率化に貢献するところが極めて大きいと思われる。

著者らはこれらの材料のプレストレストコンクリート構造物への利用法のひとつとして、緊張材への利用の可能性について調べる目的で、物性試験、実物大試験桁の試作および載荷試験等を行っているので、結果の一部を紹介する。

1. 繊維材料の物性に関する実験的研究

現在開発されているアラミド繊維、カーボン繊維の代表的な物性を表-1に示す。

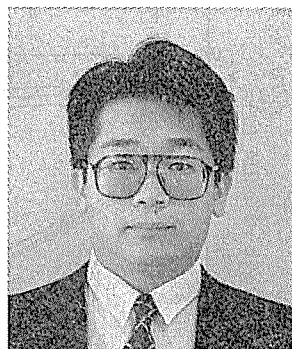
これらの繊維を PC 緊張材として利用するには、その

表-1 主な繊維材料の物性・特長

名 称	アラミド 繊維 (A社製)	アラミド 繊維 (B社製)	カーボン 繊維	カーボン 繊維
繊維の種類	パラ系	パラ系	ビッチ系	PAN系
繊維の直径(μ)	12	12	7	7
引張強度(kg/mm ²)	282	310	370	370
弾性係数(kg/mm ²)	1.3×10 ⁴	0.71×10 ⁴	2.4×10 ⁴	2.4×10 ⁴



* Kiyoshi KATAWAKI
建設省土木研究所化学研究
室長、工博



** Itaru NISHIZAKI
建設省土木研究所化学研究
室研究員

まま利用するよりも、これらの繊維を用いた高分子樹脂との複合材料 (FRP) として利用するのが、成形が容易になることをはじめ、多くの長所があるため効果的である。FRP の形状は、ロッド状のものとストランド状のもの二つに大別できる。これまではロッド状に成形したものについての研究が中心であった。これは、繊維の引張強度を有効に利用できる形状であるが、剛性が大きい曲げにくく、緊張材として実構造物に適応する場合には、その配置形状が制約されたり運搬等の取扱い性にも困難がある等の欠点がある。

一方、最近開発された細径のロッドをより合わせてストランドとしたものは、PC 鋼より線とほぼ同等の曲げやすさを有し、かつコンクリートとの付着性も良好であるが、加工上のロス等により複合材としての強度は、素材よりかなり低くなるというデメリットが予想される。表-2 は現在 PC 緊張材用として開発されている、主な AFRP, CFRP (アラミド、カーボン繊維補強プラスチック) の組成をまとめたものである。

さて、筆者らの行った試験によれば、これらの FRP 材料の強度特性は、表-3 に示すとおりである。表-3 から、AFRP ロッドと CFRP ロッドは強度的には PC 鋼材とほぼ同等と考えられる。しかし、試験数の約半数はこれらの強度を確認できずにこの強度以下で定着部分で破断した。これは、使用した定着具の定着効率が低いことを示すと同時に、極端な異方性複合材を完全に定着することが困難であることを示しており、PC 鋼材と著しく異なる点である。

以上のようなことから複合材の実構造物への適用を考える際は、複合材の真の強度とは別に、複合材の種類と使用する定着具の性能から定まる“実用強度”を設けな

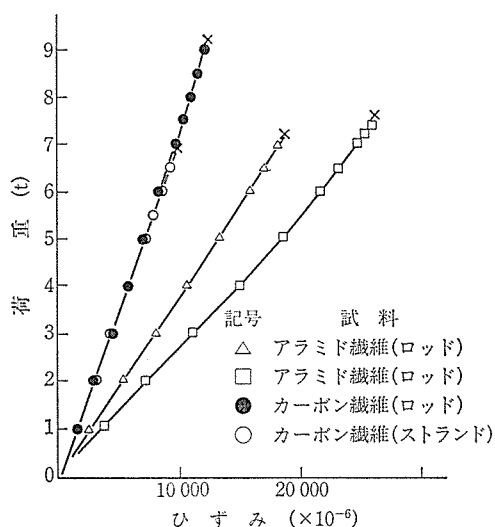
表-2 主な FRP 材料の組成

名 称	AFRP (A社製)	AFRP (B社製)	CFRP	CFRP
形 状	ロッド状	ロッド状	ロッド状	ストランド状
呼 径	φ8	φ8	φ8	φ10.5
マトリクス	熱硬化性 エポキシ樹脂	ビニールエ テル	熱硬化性 エポキシ樹脂	熱硬化性 エポキシ樹脂
繊維混入率 (%)	65	65	65	65

表—3 主な FRP 材料の強度特性

緊張材の名称	AFRP	AFRP	CFRP	CFRP	PC 鋼線	PC 鋼
	ロッド状 (A社製)	ロッド状 (B社製)	ロッド状	ストランド状		ストランド状
呼 径 (mm)	8	8	8	12.4	7	12.4
実 径 (mm)	7.8	8.04	7.9	12.2	—	—
断 面 積 (mm ²)	47.8	50.8	49.0	93.9	38.48	92.9
重 量 (g/m)	64.5	65.1	76.9	144.0	302.2	729.0
比 重	1.35	1.28	1.57	1.53	7.85	7.85
強 度 (kg/mm ²) ¹⁾	159	147	186	126	165	175
破断荷重 (kg) ¹⁾	7600	7400	9100	11800	6350	16300
弾性係数 (kg/mm ²) ¹⁾	8250	5570	15150	10700	20400	19800
破断時の伸び (%) ¹⁾	1.9	2.6	1.2	1.1	4.5 以上	6.5
実用強度 (kg/mm ²) ²⁾	146	138	153	112	165	175
実用破断荷重 (kg) ²⁾	7000	7000	7500	10500	6350	16300

1) 各緊張材にテーパー型、クサビ型(ロッド状)、樹脂充填型(ストランド状)の3種の定着具を装着し測定した値(室温にて測定)
 2) 実用的な値として今回提案する値



図—1 引張強度特性

ければならないであろう。表—3 の実用強度、実用破断荷重は、以上の強度試験結果を基に提案したものである。

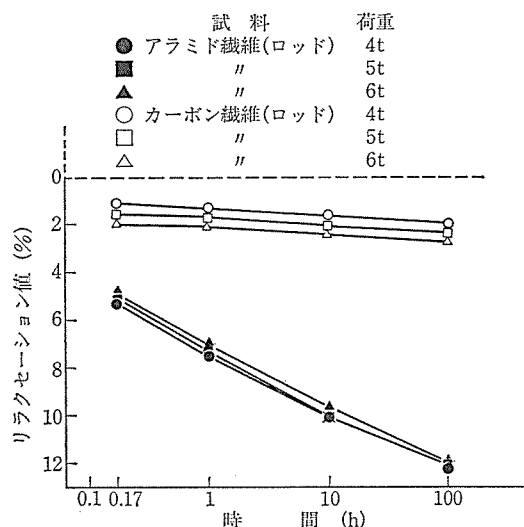
弾性係数は、強度試験時に荷重とロッド/ストランドのひずみの関係から求めたものである。図—1 に示すように、荷重-ひずみの関係は、いずれの場合も破断まで直線的で降伏現象は見られず、この点で PC 鋼材と異なる。また、弾性係数は CFRP ロッド、CFRP ストランド、AFRP ロッドの順で小さくなり、PC 鋼材の 3/4 から 1/4 である。AFRP ロッドのように弾性係数が極端に小さい場合は、緊張後のコンクリートの弾性変形、クリープ、乾燥収縮による緊張材の応力損失が少なくなるという面で有利であるが、反面緊張作業中の緊張材の伸びが従来の PC 鋼材の 4 倍以上となり、施工上不利な面が生ずる。この場合、従来とは異なる施工法(緊張ジャッキの構造、緊張方法、定着具、定着体の取扱い)が必要となる。CFRP は従来の PC 鋼材とほとんど同等に扱うことができると考えられる。

CFRP ロッドは、瞬間的にロッドが割裂すると同時

に、破断部のロッドの繊維がバラバラに飛散する激しい破断状況を呈した。CFRP ストランドは、よりが戻るにより破断時の衝撃を緩和するようであり、ロッドに比べ幾分おだやかな破断を示した。注意すると、破断の前兆であるキシミ音を聞き取ることもできる。AFRP ロッドも瞬間的割裂状況を呈すが、CFRP ロッドのような飛散状況を呈すことは少ない。

破断時の伸びは、AFRP ロッド(B社)が 2.6% であった。この値は、PC 鋼材に比べかなり小さく、これらを緊張材として使用する場合、特にコンクリートとの付着を前提とした場合は、構造物の破壊耐力に微妙な影響を与えるものと考えられる。しかし、付着のないケーブルとして使用する場合には、ほとんど PC 鋼材と同等に扱うことができると考えられる。

図—2 にリラクセーションの特性を示す。常温 20°C における 100 時間までのリラクセーション試験によるもので、荷重を 4.0t、5.0t、6.0t の 3 条件について測定したものである。CFRP ロッドは作用応力が強度の



図—2 リラクセーション

66% までの範囲では作用応力の影響は見られず、そのリラクゼーション率も 3% 以下で、PC 鋼材に比べてかなり小さいといえる。一方 AFRP も、強度の 66% までの範囲での作用応力の影響が見られないのは CFRP と同様であるが、そのリラクゼーション率は約 12% であり、CFRP の 4 倍であった。

緊張材としてはリラクゼーション率が小さいことが望ましいことから、この点では CFRP は有利である。AFRP はリラクゼーション率は PC 鋼材と同等と考えられるが、コンクリート構造物に適用した場合の見かけのリラクゼーション率は、PC 鋼材の場合 3~5% に減少するのに対し、弾性係数の小さい AFRP ではそれほど減少しない点で注意を要する。以上の物性に関する検討から、CFRP、AFRP の PC 緊張材への適用性としては、以下のように考え方をまとめることができよう。

- a) CFRP は、破断時の伸びが小さいことを除けば、強度、弾性係数、リラクゼーション率等、PC 鋼材と同等に取り扱うことができる。
- b) AFRP は、破断時の伸びが CFRP の 2 倍であり、コンクリート部材の破壊に対して有利であるが、弾性係数が小さく、リラクゼーション率が大きいこと等の点で PC 鋼材と異なり、その取扱いに特別な注意が必要となる。
- c) ロッド状の FRP については、より優れた定着方法、定着具の開発が望まれる。

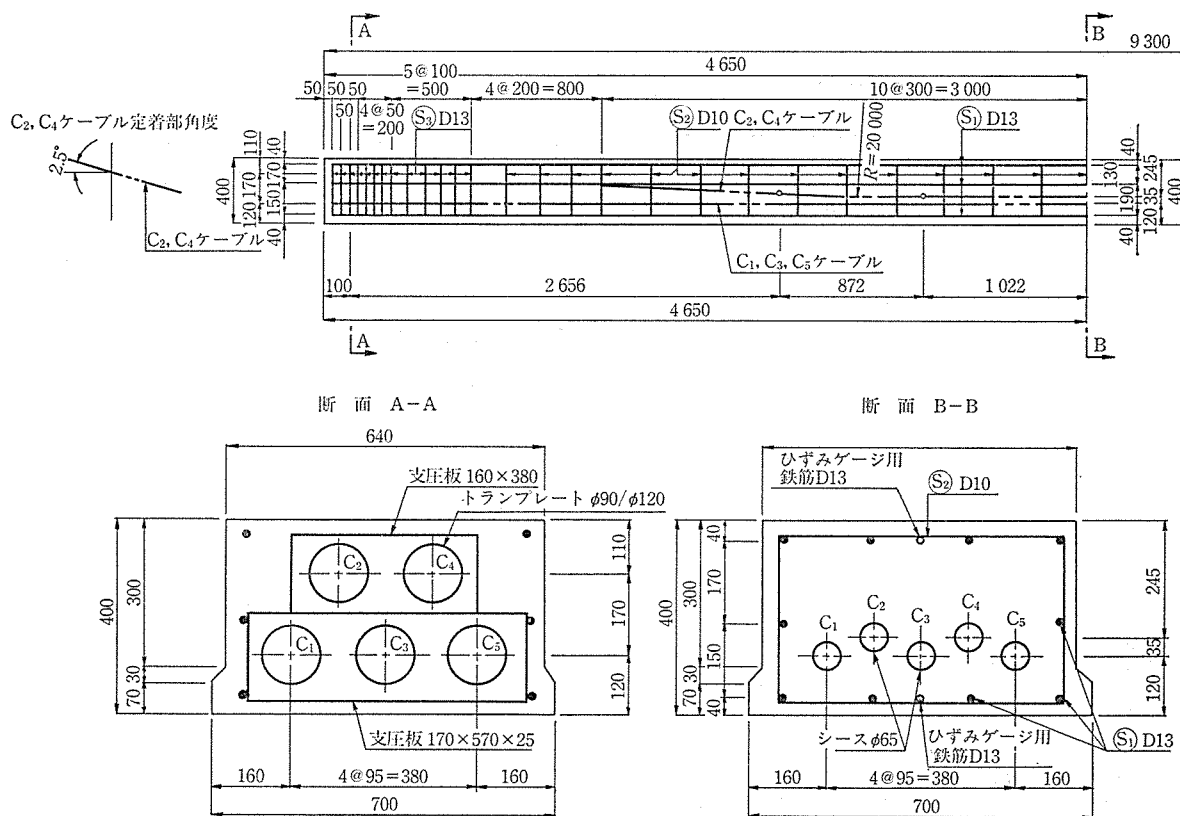
法、定着具の開発が望まれる。

2. CFRP を緊張材に用いた PC 桁の載荷試験

前章の物性試験で用いた CFRP スtrand を PC ケーブルに用いて実物大の試験桁を造り、載荷試験を行ったものである。図—3 および表—4 にそれぞれの供試体の形状・寸法・諸元を示す。供試体の数量は計 3 体である。すべての供試体とも桁長を 9.3 m とし、断面を 0.40

表—4 供試体の諸元

供 試 体		A	B	C
桁 長 (m)		9.3	9.3	9.3
断面 (高さ×幅 (上縁)) (m)		0.4×0.64	0.4×0.64	0.4×0.64
使 用 リ ン ゴ ン ト	圧縮強度 (kg/cm ²)	583	645	—
	引張強度 (kg/cm ²)	—	—	—
	弾性係数 (×10 ³ kg/cm ²)	2.64	2.95	—
使 鉄 用 筋	種 類	—	—	—
	降 伏 点 (kg/cm ²)	—	—	—
使 用 材	種 類	CF ロッド	CF ストラ ンド	PC 鋼より 線
	呼 び 径 (mm)	8	12.5	12.4
	実 径 (mm)	7.9	12.2	—
	断 面 積 (mm ²)	49.0	93.9	92.9
	比 重	1.57	1.53	7.85
	破 断 強 度 (kg/cm ²)	186	126	175
	弾性係数 (×10 ³ kg/cm ²)	1.52	1.07	1.98
	破断時の伸び (%)	1.20	1.10	6.50
緊張力 (合計値、桁中央) (t)		194.2	186.1	199.0



図—3 供試体の形状・寸法 (3 体共通)

×0.64 m とした。これらの形状・寸法は、CFRP 材を用いた PC 桁の実橋梁への適用性をみるため、建設省標準設計「プレテンション方式 PC 単純中空床版橋」におけるスパン 8.9 m の桁の形状・寸法に合わせた。また、曲げ破壊耐力、緊張力、せん断補強鉄筋量もなるべくそれに合うように設定した。3 体の供試体のうち、供試体-A, B にそれぞれ呼び径 8 mm, 12.5 mm の CFRP ロッドおよびストランドを緊張材として配置した。供試体-C には CFRP を用いた PC 桁と通常の PC 鋼材を用いた PC 桁の耐荷挙動の差異を調べるために、呼び径 12.4 mm の PC 鋼より線を緊張材として配置した。使用したコンクリートは、早強ポルトランドセメントであり、その圧縮強度は供試体-A が 583 kg/cm²、供試体-B が 645 kg/cm² である。これらの圧縮強度は、載荷実験直前に行った 10×20 cm のシリンダーの圧縮試験結果である。また、試験した鉄筋は、すべて SD 30 の異形鉄筋であり、その降伏点はミルシートによった。

図-3 に示すようにいずれの供試体にも、上段 2 本、下段 3 本の計 5 本のケーブルを配置した。1 本のケーブルに含まれる緊張材の本数は、供試体-A では 8 本、供試体-B では 6 本、供試体-C では 4 本である。ケーブルの配置では下段の 3 本のケーブルを直線状に配置し、上段の 2 本のケーブルを桁端面での定着具の取り付けが可能となるように、桁中央より 1.002~1.894 m の区間が半径 20 m の円弧で桁端面で角度が 2.5° になるように曲げ上げて配置している。各緊張材の緊張作業は、50 t のジャッキを用いて片引きで行った。また、緊張材の定着は図-4 に示すような断面を有する定着具を用いて、クサビ方式で行っている。そして、これらの作業の後、圧縮強度が 266 kg/cm² (材令 28 日) のセメントグラウトをシースと緊張材の間に充填した。

このようにして製作した供試体をスパン 8.9 m の単純桁として、2 点集中載荷方式で静的に行った。載荷点はスパン中央から各 0.5 m 左右に離れた点である。載荷実験では、次に示す荷重に対する各供試体の耐荷正常を確認するために、段階的に載荷と除荷を繰り返した。

- ① 設計荷重 (設計曲げモーメントが生じる荷重)
- ② 曲げひびわれ発生荷重
- ③ 曲げひびわれ再開荷重
- ④ 曲げひびわれ発生荷重の 2 倍の大きさの荷重
- ⑤ 破壊荷重

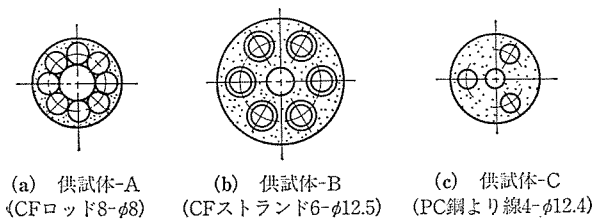


図-4 定着具 (マルチケーブル用) の断面

表-5 実験結果 (最大荷重等) (単位: t)

供 試 体 (使用緊張材)		A (CF ロッド)	B (CF スト ランド)	C (PC 鋼よ り線)
曲 げ ひびわれ 発生荷重	実測値 P_{cm}	11.0	11.0	12.0
	理論値 P_{ct}	13.7	13.2	13.3
	P_{cm}/P_{ct}	0.90	0.80	0.83
曲 げ ひびわれ 再開荷重	実測値 P_{crm}	8.0	8.0	8.6
	理論値 P_{crt}	8.7	8.3	8.4
	P_{crm}/P_{crt}	0.92	0.96	1.02
最大荷重	実測値 P_{mm}	32.4	30.1	33.0
	理論値 P_{mt}	32.8	32.0	30.9
	P_{mm}/P_{mt}	0.99	0.94	1.07

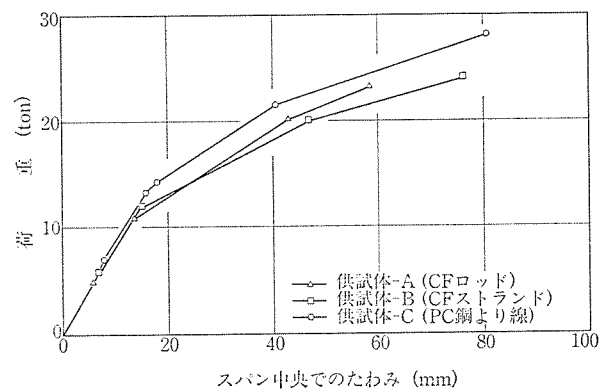


図-5 荷重とスパン中央でのたわみの関係

各載荷の段階において、供試体の鉛直たわみ、鉄筋や緊張材のひずみ、およびコンクリート表面のひずみ等を測定するとともに、 π ゲージを用いてスパン中央付近の代表的なひびわれの幅の測定を行った。

主な実験結果を表-5 に示す。破壊耐力は供試体-C に比べ供試体-A, 供試体-B は若干小さい値になっている。また、荷重とスパン中央でのたわみの関係を図-5 に示すが、ここでも供試体-C に比べ供試体-A, 供試体-B は若干小さい値になっている。これらは、緊張材の付着強度の低下などの原因が考えられるが、実用上ほぼ十分な強度を有するといえる。

3. あとがき

FRP の PC 桁への適用性については、物性試験の結果や、実物大模型を造り、十分な耐力を持つことを確認できたことなどから、有望であると考えている。今後は疲労や耐久性等の長期的な信頼性についての問題が課題となろう。なお、本実験の結果の一部は、CFRP を用いた日本初の実橋である新宮橋 (石川県) の建設にも反映されている。

【昭和 63 年 6 月 10 日受付】