

炭素繊維複合材による緊張材の実用化研究

犬 飼 晴 雄*

1. 緊張材用の炭素繊維複合材

繊維系素材による緊張材の研究が広範に行われているが、これは今後の社会ニーズに対応するためには、現在のPC鋼材だけでなく、これとは別の性質を持つ緊張材の必要性が認識されてきたからと考えられる。

この中で、炭素繊維は破断時の伸びが小さいことを除くと、その強度特性、レラクセーション特性、化学特性などにおいて、PC鋼材以上に緊張材として適する性質を基本的に有しているため、現在最も実用化がしやすい材料の一つと考えられる。

技術革新の目覚ましい今日、炭素繊維以上に適する材料の改良、開発が行われるであろうが、ここでは炭素繊維を緊張材に利用するための実用化研究について述べる。

はじめに、前述の伸び能力が小さいことは、一見、緊張材の材料として重大な欠陥と考えられるが、これは炭素繊維には降伏現象がないためであり、材料の強度を十分利用できるという観点からすると、好ましい材料といえないこともなく、むしろ、このような材料を構造物にいかん利用するかという設計上の課題となろう。

さて、緊張材として炭素繊維を利用する場合には、取扱い上から繊維そのものを直接使用するのではなく、エポキシ樹脂などとの複合材として使用するのが一般的である。

その炭素繊維複合材（以下CFRP材と記す）の中では、PC鋼棒に相当するCFRPロッドとPC鋼より線

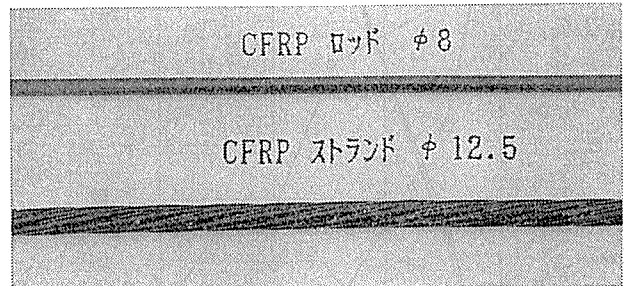


写真-1 CFRP ロッドと CFRP スtrand

に相当するCFRPスtrandが、現在、その主要なものである（写真-1）。

CFRPロッドは、以前から開発されていたものであり、良く知られているように、プルトルージョン法で製造される。一方、CFRPスtrandは最近開発されたもので、複数のスtrandプリプレグを特殊な方式で集束させ、まず細径にし、これらを撚り合せ、加熱により硬化・成形して作られる。

プルトルージョン法によるCFRPロッドの表面は必然的に平滑になり、したがってコンクリートとの付着強度はあまり期待できない。異形あるいは粗面状CFRPロッドが今後の製造上の課題であろう。

CFRPスtrandは、スtrandプリプレグの集束時に、細径の複合材表面を粗状にする工程が組み込まれており、撚りによる効果と相乗して付着強度を高めている。

このCFRPスtrandの出現によって、プレテンション工法での実用化が飛躍的に進んだといえる。

以下、この2種類のCFRP材によるプレテンション工法とポストテンション工法の実用化について記す。

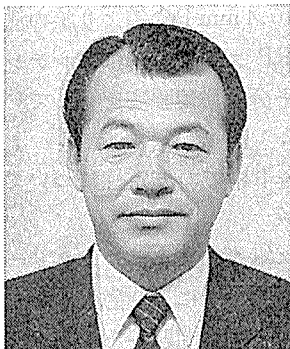
2. CFRP材のプレテンション工法での実用化

2.1 プレテンション部材に必要な緊張材

プレテンション工法では、CFRP材とコンクリートとの付着強度が十分あり、かつそれが長期にわたってコンクリート中で安定していることが不可欠である。

緊張材の付着の良否は、コンクリートに100%プレストレスを導入するのに必要な付着長さ“伝達長”によって判断するのが実際に即している。

図-1は、破断荷重(P_u)の約60%で緊張した $\phi 10.5$



* Haruo INUKAI

ピー・エス・コンクリート（株）本社技術部

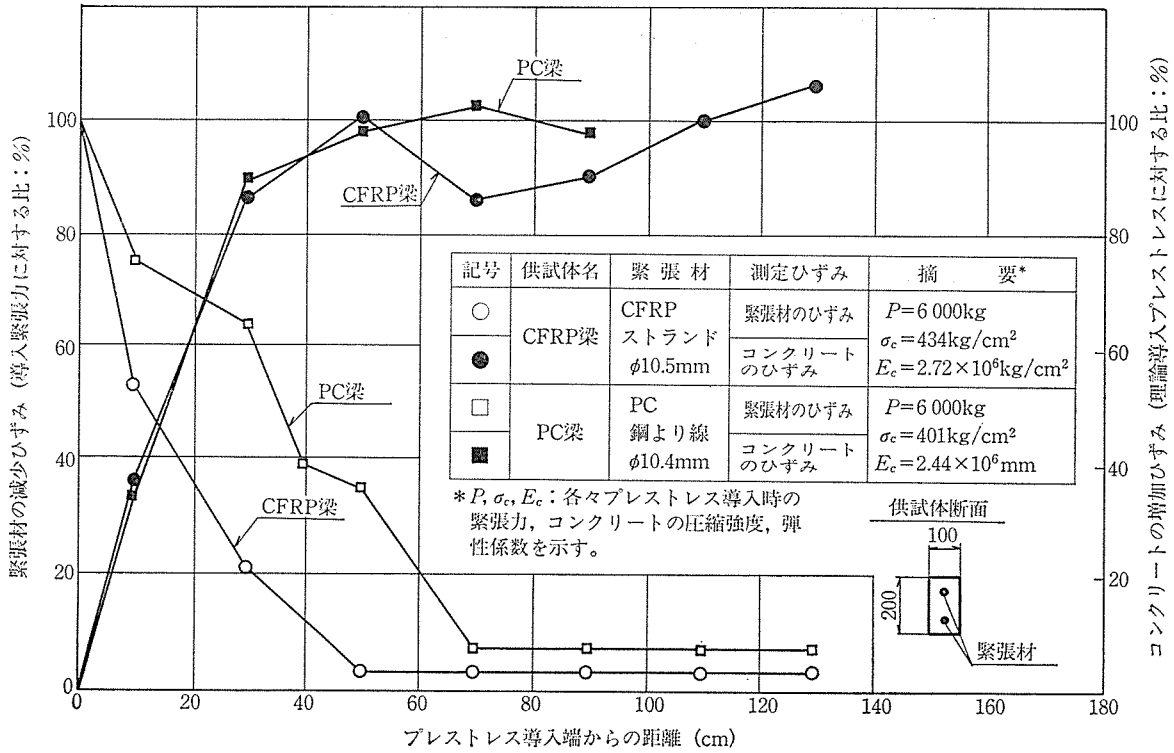


図-1 CFRP ストランドの伝達長

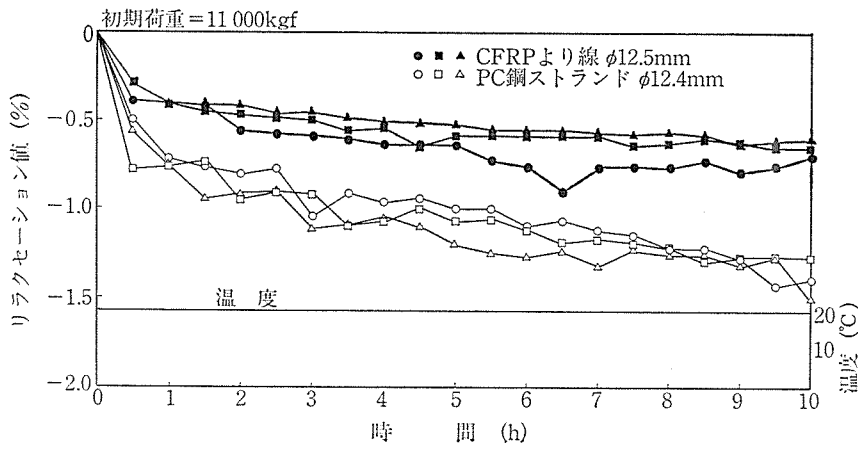


図-2 CFRP ストランドのリラクセーション率

mm CFRP ストランドをコンクリート硬化後に解放し、その時の CFRP ストランドとコンクリートのひずみ量の変化を測定したものである。

CFRP 材のひずみの減少量は、端部で大きく徐々に小さくなり、端部から約 70 cm 以上では減少していない。

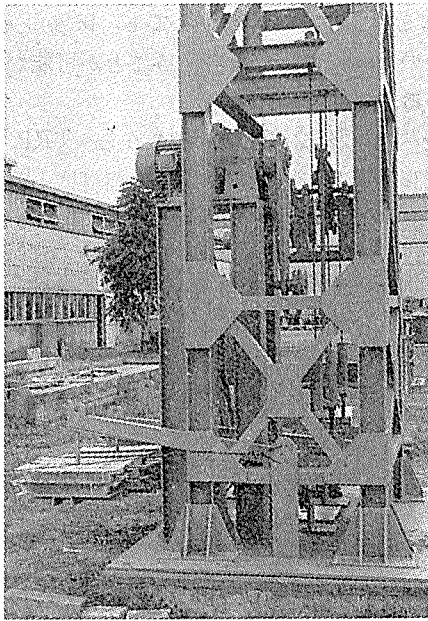
一方、コンクリートの圧縮ひずみの増加量は、端部から内部に向かって徐々に大きくなり、約 70 cm で、ほぼ一定値、設計導入プレストレスになっている。

この結果から、CFRP ストランドの伝達長は、初期引張荷重が 0.6 P_u の時、約 70 cm であることがわかる。

これは、図-1 に併記した φ10.4 mm PC 鋼より線の測定結果とほぼ同じであり、CFRP ストランドはプレテンション部材の緊張材として、十分な附着強度を有しているといえる。

次に CFRP 材のコンクリート中での安定性について記す。

繊維系素材の中には、ガラス繊維のようにコンクリート中に埋設された場合、そのアルカリにより劣化するものもあり、また繊維と樹脂の複合化に問題があると、持続荷重によって疲労するという“静的疲労”も危惧される。



写真—2 アルカリ液中の静的疲労試験

このような繊維系素材の劣化現象を検討するため、“アルカリ液中の静的疲労試験”がいろいろの方法で行われている。

写真—2 は、このための試験装置の一例であり、破断荷重の 60% の引張力を与えた CFRP 材を、pH 13 のアルカリ液中に置き、劣化状況を観察しているものである。

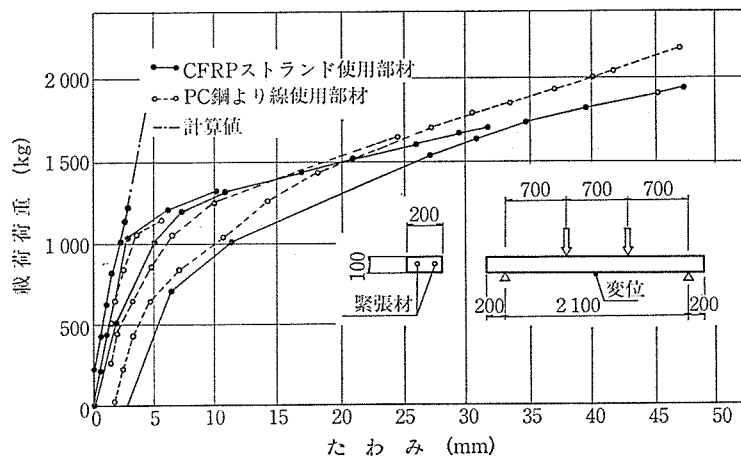
これらの試験結果から、CFRP 材の強度、弾性係数の低下は極めて小さいものであることがわかる。

また同一条件下でのリラクセーション率は、PC 鋼材と同等あるいはそれ以下であることが得られている（図—2）。

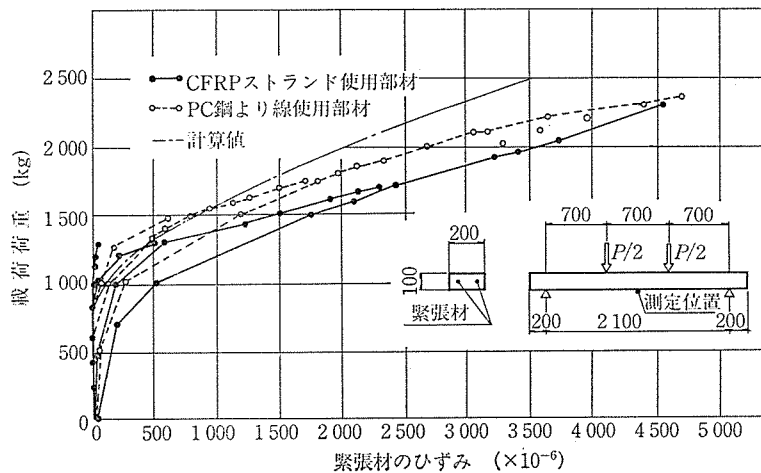
以上の試験結果は、CFRP 材をコンクリートに埋設してもその長期安定性に問題がないことを示すものである。

2.2 プレテンション部材の荷重性状

φ10.5 mm CFRP ストランドを用いてプレテンシヨ



図—3 CFRP 部材のたわみ



図—4 CFRP 部材の緊張材のひずみ

ン部材（断面 200×100 mm，長さ 2500 mm）を製作し，その荷重性状を調べた。

載荷試験は，スパン 2.1 m，純曲げ区間 70 cm の 2 点載荷で行った。

図—3 および 図—4 は，各々スパン中央点の試験 PC 部材のたわみと，緊張材のひずみについて示したものである。φ10.4 mm PC 鋼より線を用いた PC 部材についても併記している。

CFRP 材を使用した PC 部材の挙動は，ひびわれ発生前においては，部材の“全断面を有効”と仮定する理論と良く適合している。ひびわれ発生後においては，コンクリートの引張強度を無視した“ひびわれ断面”に基づく理論と同様な傾向を示し，またその変形が PC 鋼材を使用した場合より大きくなるのが注目される。変形については，CFRP 材の弾性係数が PC 鋼材の約 2/3 と小さいことに起因していると考えられる。残留変形についても小さく，PC 鋼材の場合と同様に，復元性が良好であることがわかる。

この CFRP 材を用いた PC 部材は，コンクリートの圧壊により破壊したが，その破壊荷重は，表—1 のように，緊張材とコンクリートとが付着によって一体化していると仮定する通常の方法による計算値と概ね一致した。このことは，CFRP 材の付着強度が十分大きいことを実証するものである。

また破壊時のたわみは，厳密には測定計器の保護のため測定されなかったが，少なくともひびわれ発生時の 20 倍以上，スパン比で 1/40 以上あり，これは部材の破壊を事前に予知できる量と考えられる。このことは，部材の破壊までの変形量は，緊張材自体の伸び能力に関係する以上に，図—5 に示すようなひびわれの発生に影響されるものと考えられ，したがって，伸び能力の小さい

表—1 CFRP 部材の破壊耐力

部材番号	緊張材	破壊荷重 (kg)	平均値 (kg)	理論値 (kg)	実測値/理論値	摘要
CFRP-No. 1	CFRP ストランド φ10.5	2300	2221	1900	1.16	コンクリートの圧壊
CFRP-No. 2		2141				
PC-No. 1	PC 鋼より線 φ12.4	2358	2331	2100	1.10	"
PC-No. 2		2308				

CFRP 材を緊張材として使用しても，破壊が突発的に起こらないように部材を設計することが可能なことを示唆している。

以上述べたように，CFRP 材のうち CFRP ストランドは，緊張材としてプレテンション部材に十分適用できるものであると考えられる。

3. CFRP 材のポストテンション工法での実用化

3.1 ポストテンション部材に必要な PC ケーブル

比較的細径の緊張荷重の小さいものを分散的に使用するプレテンション工法では，前述した CFRP ストランドを使用することによって，実際の PC 部材を製作することが現在既に可能な技術段階にあるといえる。

ところが，ポストテンション工法においては，実際の PC 部材を製作するためには，緊張容量の大きい PC ケーブルとその緊張・定着システムが不可欠となる。

しかし，一般に緊張材として使用する CFRP 材は，緊張方向だけが強化された異方性材料であるため，この CFRP 材の引張強度を 100% 利用でき，かつ実用的な大きさの定着装置を開発することは簡単でなく，細径の単線（シングルワイヤー）用のものについても完全に解決されていないのが現状である。

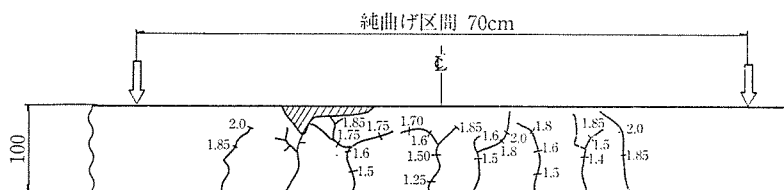
しかしながら，このような背景のもとで，最近，道路橋用試験 PC 桁に使用された定着装置は，定着効率こそ 100% ではないが，緊張容量の大きい PC ケーブルを実現した最初のものであり，ポストテンション工法の実用化に踏み出す一歩になると考えられるので，以下簡単に説明する。

3.2 マルチプルケーブル方式による緊張・定着システム

開発されたマルチプルケーブル方式は，一個の定着具



写真—3 8-φ8 CFRP ケーブル用定着具
右よりクサビ，ロックナット，アンカーヘッド



図—5 CFRP ストランド使用 PC 部材のひびわれ

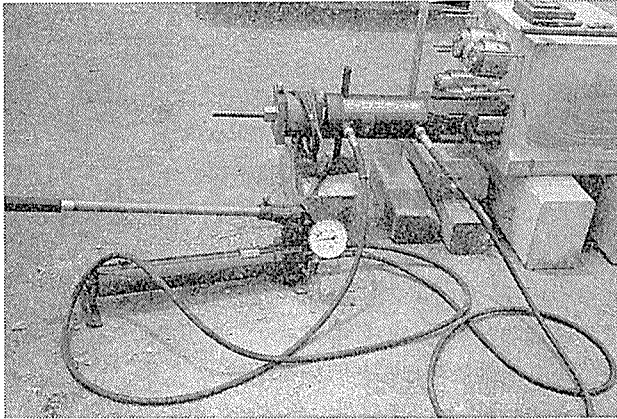


写真-4 マルチケーブルの緊張

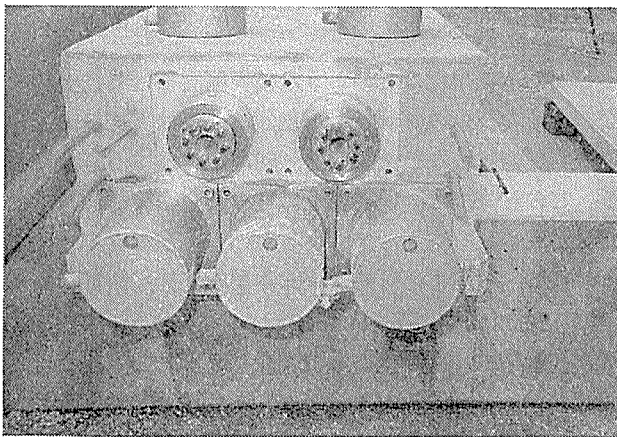


写真-5 8-φ8 CFRP ケーブルの定着状況

で複数の緊張材を同時に緊張・定着するものであり、1ケーブル当りの緊張材の本数を選ぶことにより、任意の緊張容量にすることができるものである。各緊張材はクサビにより固定される。写真-3 は、φ8mm CFRP 材 8 本用のマルチプルケーブル用定着装置である。

緊張は、所要長さの CFRP 材をアンカーヘッドのテーパー孔にそれぞれクサビで仮固定し、このアンカーヘッドにテンションロッドを接続して、写真-4 のように、センターホール型緊張ジャッキを用いて行う。

緊張に伴って、仮固定されていた緊張材は、クサビ作用によってアンカーヘッドに完全に固定される。

定着は、このアンカーヘッドをロックナットによって支圧板に固定する通常の方法で行われる(写真-5)。

以上の緊張・定着システムの作業性は、従来の PC 鋼材の場合と大差ないものであるが、これを保証するためには、個々の緊張材に対する一様なクサビ作用が必要となり、アンカーヘッドとクサビに高い加工精度が要求される。また、仮固定もこの目的で行われる。

仮固定のためのクサビ押し込み力は、緊張材の材質、径

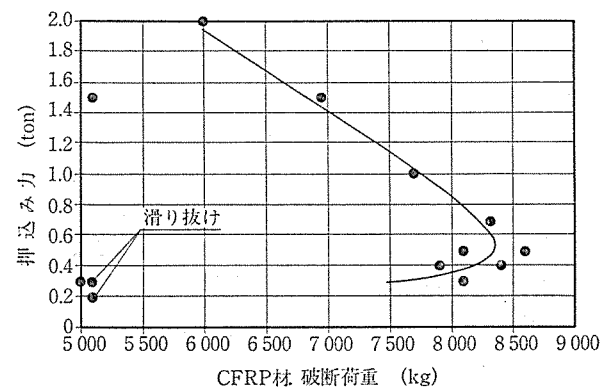


図-6 くさび押し込み力と破断荷重

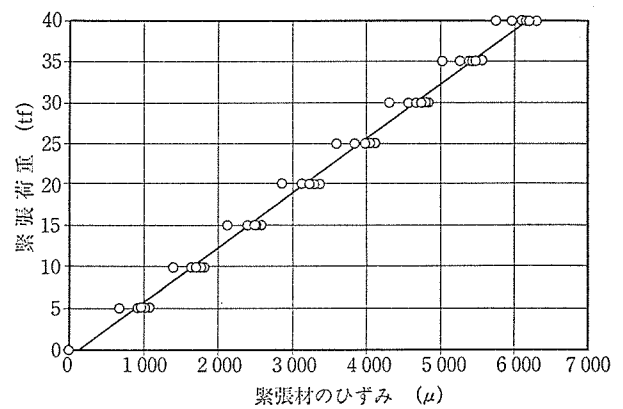


図-7 マルチプルケーブルの緊張材間のバラツキ

表-2 ポストテンション用 CFRP ケーブル諸元

ケーブル名称	緊張材	本数	重量 (g/m)	公称断面積 (mm ²)	弾性係数 (kg/mm ²)	保証強度 (kg/mm ²)	破断荷重 (kg)	許容緊張力導入直後 (kg)	摘要
1-φ8CFRPケーブル	CFRPロッド φ8mm	1	77	49	1.52×10 ⁴	153	7 500	5 000	◎
3-φ8CFRPケーブル	同上	3	231	147			22 500	15 000	⊗
8-φ8CFRPケーブル	同上	8	616	392			60 000	40 000	⊗
1-φ10.5CFRPケーブル	CFRPストランド φ10.5mm	1	105	59	1.40×10 ⁴	138	8 200	5 300	◎
1-φ12.5CFRPケーブル	CFRPストランド φ12.5mm	1	158	76			10 500	6 700	◎
6-φ12.5CFRPケーブル	同上	6	948	456			62 000	40 000	⊗

あるいはクサビ形状などに応じてその最適値を求める必要がある。図—6 はその一例である。

図—7 は、この緊張・定着システムによって、長さ 9 m のマルチケーブルを緊張した時の各緊張材間の引張力のバラツキを示すものであるが、実用上許容できる範囲と考えられる。

表—2 は、使用実績のある各種 CFRP 材の PC ケーブルの諸元である。表中の保証引張強度とは、この緊張・定着システムによる最低保証値であり、破断試験におけるクサビ近傍での破断例も含めた試験値から、次式により求めたものである。

$$\hat{\sigma}_u = \sigma_m - 3\sigma$$

ここで、 $\hat{\sigma}_u$: 保証引張強度

σ_m : 試験値の平均値

σ : 試験値の標準偏差

また同表中の許容緊張荷重は、緊張材に関してなされたリラクゼーション試験、アルカリ液中の静的疲労試験などや、PC 部材に関する静的、動的荷重試験など、各種の基礎試験で実施した緊張材の応力レベルを考慮し、それらを大きく超えない範囲で定めたものである。

以上述べたように、本方式によるポストテンション用 PC ケーブルは、実用性に重点を置いたものであるもので、実際の構造物に容易に適用することができるものと考えられる。

4. おわりに

CFRP 材を PC 構造物の緊張材として用いるための実用化研究は、プレテンション、ポストテンションのいずれの工法においても、実際の構造物に対応できる技術レベルに現在達しつつあると思われるが、技術課題もまだ多く残されている。

その中で、CFRP 材の長期曝露試験、繰返し温度サイクル試験などが現在進行中であり、やがて耐久性についてもより明確にされるとと思われる。

また CFRP 材の太径化、定着装置の耐食性化、非磁性化なども進められている。そして遠からず、ナット定着できる CFRP ロッドなども開発されるものと思われる。

しかし、実用化はこのような技術開発だけでは十分でなく、その技術の評価、規準化、あるいは実際の構造物での実証的試験などを通して、初めて進展するものである。この意味では、現在以上に官・民の密接な共同研究態勢が望まれる時期にきているものと思われる。

最後に、本実用化研究は、三菱化成(株)のピッチ系 CFRP ロッドと、東京製綱(株)のパン系 CFRP スtrandを使用して行ったものである。

【昭和 63 年 6 月 10 日受付】

◀刊行物案内▶

日本原子力発電敦賀 2 号機 PCCV

本書は、プレストレストコンクリート第 28 巻の特別号として発刊されたもので、我が国で初めて採用されたプレストレストコンクリート製原子炉格納容器(日本原子力発電(株)敦賀発電所 2 号機)に関して、その各種模型実験、設計・施工に至る各分野にわたり詳述した貴重な資料です。今後ますます多く採用されるであろう、この種 PCCV を取り扱う関係者にとって、必携の図書と確信します。

在庫限定につき、ご希望の方は至急代金を添え(現金書留かまたは郵便振替東京 7-62774)プレストレストコンクリート技術協会宛お申し込みください。

体 裁 : B 5 判 128 頁

定 価 : 3 000 円 送 料 : 150 円