

## [2086] CFRP ロッド使用アンボンド PC ブロック梁 及びプレテンション梁の曲げ実験

正会員 ○山本邦夫 (運輸省港湾技術研究所)

正会員 大橋清一 (五洋建設技術研究所)

正会員 大即信明 (運輸省港湾技術研究所)

### 1. はじめに

炭素繊維強化プラスチックロッド（以下、CFRP ロッドと省略する）は、従来の PC 鋼材に比較して高い引張強度を有し、かつフレクセーションもそれほど大きくない[1]ことなどから、PC 用緊張材として有望な素材である。特に全く腐食しないことから、港湾環境においては、塩害対策として用いることが考えられる。

港湾施設において、桟橋上部工の塩害が問題である。この問題に対して、CFRP ロッドを用いて、2つの対策を考えた。すなわち、図-1 に示すように、桟橋床版を横締めしたプレキャスト PC 梁で製作することを前提として、(1)桟橋床版の横締め材として CFRP ロッドをアンボンド方式で用い、一部の梁が塩害を受けた場合、その梁のみを取り替えるもの、(2)梁自体を CFRP ロッドを用いたプレテンション梁（以下、プレテンシヨン梁と省略する）とするもの、である。

### 2. 本研究の目的

桟橋床版の設計では、床版を二方向の梁部材にモデル化し、その各々の梁の曲げ及びせん断に対する検討を行うことが必要である。本研究では、床版を一方向梁モデルに単純化し、その基礎的な力学的性質を把握することを目的とした。すなわち、(1)に対しては、床版の横締め方向に CFRP ロッドを用いたアンボンド PC ブロック梁（以下、ブロック梁と省略する）の力学的性質を把握すること、および有効プレストレスの長期の安定性を検討することを目的とした。(2)に対しては、プレテンシヨン梁の力学的性状、特に、トランクファーレンジス（伝達長）について検討することを目的とした。

### 3. 実験概要

#### 3. 1 試験体

プレテンシヨン梁（長さ 2.95m）、ブロック梁（長さ 5.0m、5 ブロック）の試験体の一覧を表-1 に示す。試験体は各々 5 体製作した。プレテンシヨン梁の断面寸法を図-2 に、ブロック梁の形状寸法を図-3 に示す。図-3 の平面図、側面図はともに緊張材の本数が 12 本のものであ

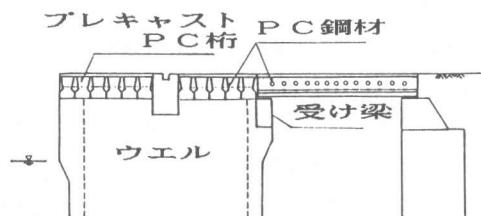


図-1 横桟橋（酒田港）

表-1 試験体の一覧

	Type	設計プレストレス (kgf/cm)	導入緊張力 $P_0$ (tf)	緊張材 本数 N
プレテンシヨン梁	A-1	25	2.74	2
	A-2	50	5.90	4
ブロック梁	B-1	13.5	27.0	6
	B-2	27.5	54.4	12

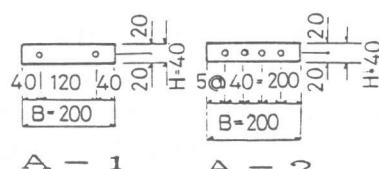


図-2 プレテンシヨン梁の断面形状

るが、緊張材本数が6本のものについてもスターラップ及び組立筋（上側のみ）の配置等は同じである。図に示すようにプレテン梁、ブロック梁の断面には緊張材を同一緊張力でかつ軸対称に配置している。

コンクリートの配合を表-2に示す。コンクリートの圧縮強度 ( $\sigma_{28}$ ) はプレテン梁で  $630 \text{ kgf/cm}^2$ 、ブロック梁で  $720 \text{ kgf/cm}^2$  であった。ブロック梁の接合部の目地材にはモルタルを用い、目地厚は  $5 \text{ mm}$  とした。接合面の表面処理は特に行わなかった。

緊張材はピッチ系の炭素繊維を用いた CFRP ロッドであり、プレテン梁には異形ロッド ( $\phi 8 \text{ mm}$ )、ブロック梁には丸ロッド ( $\phi 8 \text{ mm}$ ) を用いた。異形ロッドは  $\phi 8 \text{ mm}$  の丸ロッドに長さ  $3 \text{ mm}$ 、深さ  $1 \text{ mm}$  の凹みを  $31 \text{ mm}$  ピッチで加工したものである。表-3 に本実験で使用した CFRP 丸ロッドの物性を示す。なお、この物性値は本実験のブロック梁で使用した鋼製の2割りのクサビ定着体を用いて試験を行った実験値である。表-4 に本実験で用いた CFRP ロッドの  $100$  時間までのレラクセーション試験結果を示す。なお表中には  $1000$  時間および最終値 (30年) の推定値も示す。推定値は、CFRP ロッドの引張荷重と時間 (対数軸) との関係が 30 年後までも直線関係となると仮定して求めた。

### 3.2 載荷方法及び測定項目

プレテン梁の載荷は支点間距離  $30 \text{ cm}$  の 3 等分点載荷とした。部材中央から端部へ  $20 \text{ cm}$  ピッチで載荷位置を移動し、荷重 - たわみの関係より有効プレストレス力及び伝達長を求めた。試験は材令 2か月及び 6か月において実施した。

ブロック梁の載荷装置を図-4 に示す。載荷は支点間距離  $420 \text{ cm}$  の 3 等分点載荷とした。測定項目は接合部のひびわれ発生 (開口) 荷重、ひびわれ (開口) 幅、ひびわれ進行状況、コンクリート及び緊張材のひずみ、たわみ、破壊荷重である。各ケース、5 体のうち 3 体は破壊試験用に、残りの 2 体は、長期試験用と

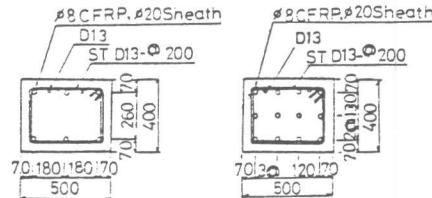
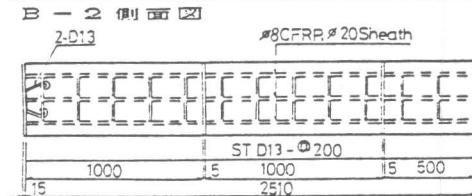
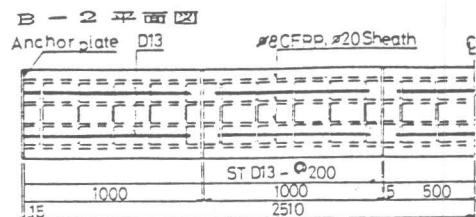


図-3 ブロック梁の形状寸法

表-2 コンクリートの配合

	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	スランプ (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				高性能 減水剤 A/E 剂
					W	C	S	G	
プレテン梁	630	8	10	39	195	500	780	878	5.00
ブロック梁	720	8	20	39	164	420	753	1088	4.200.34

表-3 ロッドの物性値

物性	CFRP ロッド
直径 (mm)	8.0
引張強度 $\sigma_u$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	146
弾性係数 E (kgf/mm <sup>2</sup> )	14600
破断時の伸度 (%)	1.0
繊維混入率 Vf (%)	64.7

表-4 レラクセーション率

持続荷重	レラクセーション率 (%)		
	100時間	1000時間	30年最終値
0.67Pu	2.61	2.80	3.65
0.56Pu	2.23	2.50	3.35
0.44Pu	1.91	2.10	2.76

1) 100時間、30年最終値；100時間からの推定値。  
2) Pu；本定着体を用いたロッドの破断強度。

して材令1年後の有効プレストレスを求めるために、ひびわれを発生させた後、屋外暴露した。なお、長期用試験体にはカールソン型ひずみゲージを各2箇所に配置し、コンクリートの乾燥収縮及びクリープを定期的に測定した。

#### 4. アンボンドPC梁の断面応力の解析

アンボンドPC梁の断面応力解析は、付着のある場合と異なり、平面保持の仮定が成立しないため困難である。本研究では、

ひびわれ(開口)発生前に対しては一般的な方法[2]を用いて計算したが、ひびわれ発生以後に対しては適切な方法が提案されていないので、以下の仮定に基づく計算により断面応力の解析を行った。

計算上の仮定は、(1)コンクリート断面は平面保持、(2)梁上縁のコンクリートのひずみは考へている断面の曲げモーメントに比例する、の2つとした。なお、(2)の仮定の妥当性については多くの問題があるが、今回は十分な検討を行うことができなかった。この計算方法を用いて以下のアンボンドPC梁(一体梁)の断面応力の解析を行い、アンボンドPCブロック梁の実験値と比較し、曲げ性状を検討した。

#### 5. 実験結果及び考察

##### 5.1 プレテンション梁

###### (1) 伝達長

図-5は材令2か月時のTypeA-1, A-2の部材端からの距離と有効プレストレス力の関係である。図中の記号の黒塗りはA-1(緊張力小)、白塗りはA-2(緊張力大)を示す。実験値のばらつきはあるものの、両者とも部材端からの距離 $x=100\text{cm}$ で緊張力が一定となり、伝達長は100cm程度と考えられる。図-6は材令6か月時のTypeA-2の場合である。材令6か月における伝達長は、材令2か月時と等しく

100cm程度である。つまり材令2か月から材令6か月までにおいては、伝達長の時間的な変化はほとんどなく、安定している。一方、従来の設計では、異形PC鋼線(表面形状凸)、PC鋼より線に対しては、伝達長 $L_t = 65\phi$ ( $\phi$ :鋼線直径)としており、表面平滑なPC鋼線または異形PC鋼線(表面形状凹)に対しては、 $L_t = 100\phi$ としている[3]。 $\phi 8\text{mm}$ の場合、前者は $L_t$

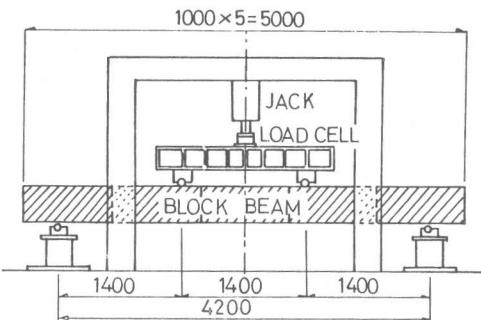


図-4 ブロック梁の載荷装置

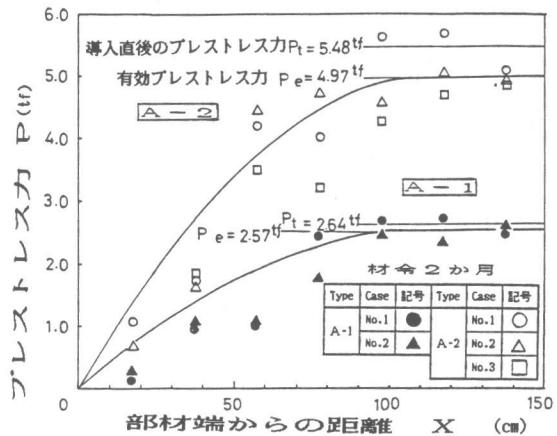


図-5 材令2か月時のCFRP梁の伝達長

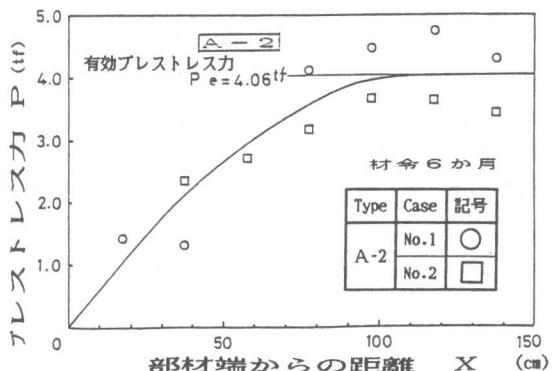


図-6 材令6か月時のCFRP梁の伝達長

= 52cm、後者はLt = 80cmとなる。本実験で用いたCFRP異形ロッド（表面形状凹）の伝達長の実験値は、通常のPC鋼より線の設計値に比べ、約2倍と大きかったものの、表面形状凹の異形PC鋼線の設計値に対しては1.25倍であった。

### (2) 有効プレストレス力

表-5にプレテンシングの有効プレストレス力及び $\eta = Pe/Pt$ （有効プレストレス力／導入直後のプレストレス力）の実験値と計算値を示す。有効プレストレス力の計算値の算定は、土木学会の設計式[4]を用い、導入直後のプレストレス力より各材令でのコンクリートの乾燥収縮及びクリープによる緊張力の低下量を考慮して求めた。なお、緊張材のレラクセーションによる緊張力の低下量は、緊張材の応力比（導入直後の引張力／引張強度）が0.32と小さいため、無視した。これは

(1) 一般のPC鋼材においては、緊張材の応力比（導入直後の引張力／引張強度） $\leq 0.5$ であると、レラクセーションは極めて小さく、その影響は無視できること[5]、(2) 本実験及び文献[1]より、CFRPロッドのレラクセーション率はPC鋼線のそれとほぼ同等であること、による。 $\eta$ は、材令2か月では実験値0.91～0.97に対して、計算値が0.84～0.90となり、また、材令6か月では実験値0.74に対して計算値が0.75となり、材令2か月、6か月ともに計算値と実験値は概ね等しい。したがって、CFRPロッドを用いたプレテンシングの材令にともなう有効プレストレス力の変化は、概ね土木学会の式で計算できる。

### (3) 破壊性状

プレテンシングの破壊は、コンクリートの圧縮破壊によるものであった。

## 5.2 ブロック梁

### (1) ひびわれ及び破壊性状

ブロック梁のひびわれは曲げ区間のブロックとブロックの接合部で発生した。梁の破壊は、緊張材の破断によるものであった。また、破壊付近でも梁の荷重-たわみ曲線は塑性変形を示さず、脆性的な破壊性状を示した。なお、破壊時梁の上縁コンクリートひずみは曲げ区間の接合部で最大となり、 $1000 \sim 1600 \times 10^{-6}$ であった。

表-7にブロック梁のひびわれ及び破壊荷重の試験結果を示す。なお、表中には前述のように一体梁と仮定して得られた計算結果も併せて示す。なお、ひびわれ荷重の計算は、モルタル目地とコンクリートブロックの間の付着がほとんどないので、コンクリートの曲げ引張強度を0として求めた。ひびわれ荷重については、計算値は、実験値に対して $1.00 \sim 1.09$ でほぼ等し

表-5 プレテンシングの有効プレストレス力

Type	導入直後の プレス トレス 力 $P_t(\text{tf})$		材令2か月		材令6か月	
			有効プレス トレス 力 $Pe(\text{tf})$	$\eta = Pe/P_t$	有効プレス トレス 力 $Pe(\text{tf})$	$\eta = Pe/P_t$
A-1	2.64	実験値	2.57	0.97	-	-
		計算値	2.36	0.90	-	-
A-2	5.48	実験値	4.97	0.91	4.06	0.74
		計算値	4.62	0.84	4.09	0.75

表-7 ブロック梁のひびわれおよび  
破壊試験結果

Type	試験体 No.	実験値 ひびわれ の目視荷 重 (tf)	計算値 ひびわれ 荷重 (tf)	(ひびわれ荷重 - 一体梁の 計算値) 実験値(平均)	(破壊荷重 - 一体梁の 計算値) 実験値(平均)
B-1	1	1.1 10.6			
	2	2.1 9.4			
	3	0.9 9.7			
	4	0.7			
	5	0.8			
	平均値	1.1 9.9			
B-2	6	3.1 16.7 (1.1, 1.5)	1.1 9.5	1.00	0.96
	7	3.1 17.1 (4.0, 0.7)	1.1 9.0	1.09	1.10
	8	4.3 18.1 (1.5, 1.1)	3.8 19.0		
	9	3.5			
	10	0.7			
	平均値	3.5 17.3 (1.2, 4.1)			

\* < > は、中央部ブロック下縁のひびわれ荷重である。

かった。また、破壊荷重については、計算値とブロック梁の実験値との比は0.96~1.10で、両者は概ね一致した。

### (2)ひびわれ状況

試験後のひびわれ状況を図-7に示す。Type B-1、B-2いずれの試験体においても最初のひびわれは曲げ区間の接合部に発生し、荷重の増加によりひびわれは梁上部に拡がり、上段緊張材位置で梁の軸方向に進展した。また、Type B-2(緊張力大)の供試体においては、中央部ブロックの下縁にひびわれがみられた。接合部の軸方向のひびわれは、中央部ブロックと両側ブロックの接合面の開口により、中央ブロック上部に偏心軸力が作用したためと考えられる。

### (3)荷重-たわみ曲線

図-8にブロック梁の接合部A(D)点、B(C)点の荷重-たわみ曲線を示す。また、図中には一体梁の計算結果も付記した。ブロック梁の接合部のたわみ曲線はひびわれ発生までは弾性計算より求めたたわみ量( $E_c = 4.0 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ )とほぼ一致し弾性的挙動を示している。一方、一体梁のたわみの計算値とブロック梁のたわみの実験値とを比較するとすべての荷重範囲で一体梁のたわみ計算値はブロック梁のたわみの実験値より小さい。このたわみ量の差は、一体梁の断面応力の解析方法にも問題はあるが、そのほか、ブロック梁の接合面の開口に起因する(また、回転変形の違いによる)たわみ量の増加分が考えられる。

### (3)有効プレストレス力

図-9に長期用試験体(Type B-2)の緊張力導入時からの材令とコンクリートの乾燥収縮およびクリープによる圧縮ひずみ増加量の関係を表す。図中、実測値はカールソン型ひずみゲージより求めた。計算値の算定は前出の土木学会の設計式による。なお、試験体は緊張力導入から3か月までは室内放置し、3か月以降は屋外で暴露した。実測値はプレストレス導入から4か月までは室内状態(相対湿度40%と仮定)の計算値に、それ以降は屋外状態(相対湿度70%と仮定)の計算値にほぼ一致する。

図-10はType B-2の場合の緊張力導入直後からの材令と $\eta = P_e/P_t$ (有効プレストレス力/導入直後のプレストレス力)の関係を示す。有効プレストレス力の算定には前出の土木学会

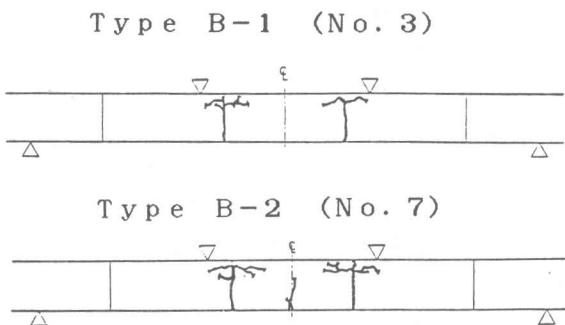


図-7 ひびわれ状況

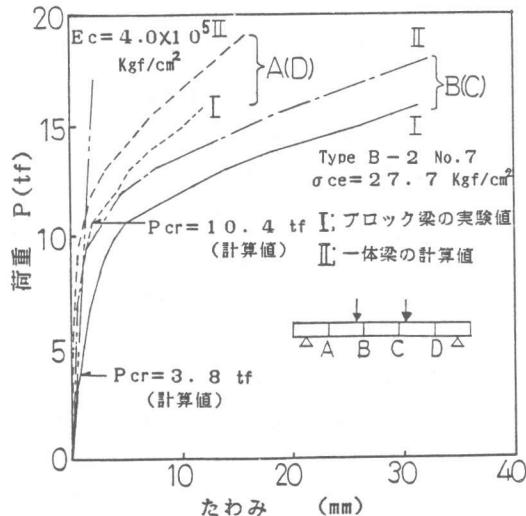


図-8 荷重-たわみの関係

の式を用いた。CFRPロッドのレラクセーション率は表-4に示した値を基に $\gamma = 3.52$ とした。図中、曲げ試験時にはCFRPロッドの $\gamma$ は0.95である。曲げ試験のひびわれ目視荷重より算出した $\gamma$ は0.98であり、試験より求めた $\gamma$ の方が大きくなつた。また図-10にPC鋼棒C種( $\phi 9.2\text{ mm}$ )を緊張材とした場合の材令と $\gamma$ との関係(計算値)も示した。両者の $\gamma$ はほぼ等しい。

## 6. 結論

桟橋上部工へのCFRPの適用の基礎研究として、プレテン梁及びブロック梁の曲げ実験を行つた。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) プレテン梁、ブロック梁とともに有效プレストレス力は、材令6か月の範囲で安定した。

(2) ブロック梁の破壊は緊張材の破断によるものであった。また、梁は脆性的な破壊性状を示した。

(3) CFRP異形ロッド(表面形状凹)を用いたプレテン梁の伝達長の実験値は100cm程度で、従来使われているPC鋼より線の伝達長の設計値の約2倍、またPC鋼線(表面形状凹)の伝達長の設計値の1.25倍と大きかった。一方、材令6か月までの伝達長の安定性は良好であった。

(4) 種々の仮定を設けてアンボンドPC一体梁の断面応力の解析を行い、アンボンドPCブロック梁の実験結果と比較を行つた。その結果、計算結果と実験結果は比較的一致した。

最後に、本研究の実施に当たり、御協力を頂いた、(財)沿岸開発技術研究センター、オリエンタルコンクリート(株)、ドーピー建設工業(株)、ピー・エス・コンクリート(株)、五洋建設(株)、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)の方々に謝意を表します。

## 参考文献

- [1] 小林一輔, 趙力采, 神吉正弥; 繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, 1984, pp.369~372
- [2] 岡田清, 神山一; プレストレストコンクリートの設計, 国民科学社, 1984, pp.106~372
- [3] 昭和61年制定コンクリート標準示方書設計編, 土木学会, 昭和61年, p.128
- [4] 昭和61年制定コンクリート標準示方書設計編, 土木学会, 昭和61年, pp.121~122
- [5] 百島祐信; コンクリートの乾燥収縮とクリープおよびPC鋼材のレラクセーション, コンクリートライブラリー第44号, プレストレストコンクリート標準示方書解説資料, 土木学会, 昭和54年7月, pp.49~56

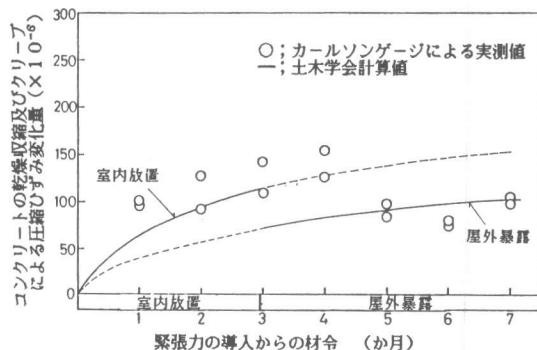


図-9 緊張からの材令とコンクリートの圧縮ひずみ変化量との関係

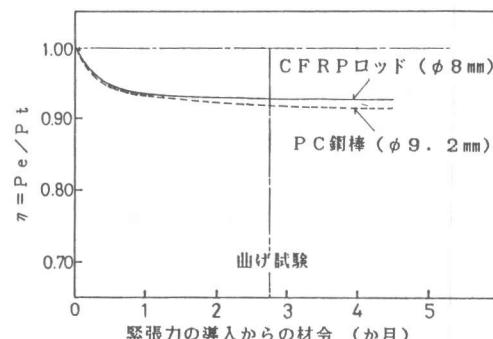


図-10 緊張からの材令と $\gamma$ との関係