

(102) アラミド平板連続繊維補強材のプレストレストコンクリート実験橋への適用

西松建設(株) 正会員 ○湊 康裕  
 (株)安部工業所 正会員 横山 博司  
 宇部日東化成(株) 小野寺章夫  
 西松建設(株) 西 保

1. はじめに

近年、連続繊維補強材(FRP)は、高引張強度、耐食性、軽量、非磁性などの優れた性能によりプレストレストコンクリート(PC)構造物の緊張材としての研究がなされており、FRPのPC橋、海洋構造物などへの適用がなされている。今後、FRPは上述の優れた特性を生かして、様々な建設分野において使用されるものと考えられる。

本報では、アラミド平板連続繊維補強材(コンポーズロッド、以下ロッド)のプレストレストコンクリート橋への適用について報告する。本ロッドの特徴は、断面形状が平板であり、アラミド繊維が熱可塑性樹脂で被覆されていることがあげられる。ロッド表面の被覆には、凸凹加工が施されており良好なコンクリートとの付着を示すとともに、繊維を外傷から守る働きをしている。

実験橋への適用にあたり、ロッドのコンクリート構造物緊張材として必要な性能試験を実施し、本ロッドが緊張材として用いるのに十分な化学的および物理的性質を有することを確認した。以下に、ロッドを用いたPC橋の設計、PC桁の製作および建設について概説する。さらに、PC桁の製作時に計測した導入プレストレス量および橋と同様のPC桁を用いた曲げ試験の結果について報告する。

2. コンポーズロッド

ロッドは、図-1に示すようにアラミド繊維および熱硬化性樹脂からなり、熱可塑性樹脂で被覆されている。材質を表-1に示す<sup>1)</sup>。被覆の熱可塑性樹脂には凸凹などの加工が可能である。凸凹加工された表面被覆は、良好なコンクリートとの付着性を示すとともに、繊維を外傷から保護する役割を果たしている。ロッドの成形方法は、熱硬化性樹脂が含浸された繊維を、ダイスにより引抜成形する。次に、連続繊維補強材の表面を、押し出し装置の中で軟化した熱可塑性樹脂により被覆する。被覆は、クロスヘッドダイスにより継ぎ目なく連続的に作られる。この製造方法は、賦形の金型が不要で生産スピードが上るため、一般の引抜成形方法より経済的にロッドの生産を行うことが可能である。

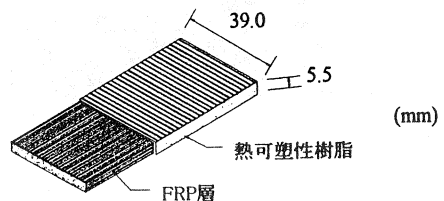


図-1 ロッドの断面

表-1 アラミドFRP概要

アラミド繊維	アラミド繊維(ケブラー49)
マトリックス	ビニルエステル樹脂
被覆樹脂	熱可塑性樹脂(AAS樹脂)
断面寸法	5.5mm×39.0mm(表面被覆含む)

表-2 ロッドの物理特性

繊維含有率	55%
破断荷重	196kN/rod
引張強度	1274N/mm <sup>2</sup>
ヤング係数	66kN/mm <sup>2</sup>
破断ひずみ	1.8%
付着強度(ロッドとコンクリートの間)	≥4.9N/mm <sup>2</sup>
付着強度(被覆と内部FRPの間)	9.8N/mm <sup>2</sup>

2.1.ロッドの特性

表-2にロッドの物理的特性を、表-3に耐アルカリ性を示す。

2.2.クリープ特性

図-2は、ロッドに20℃の恒温状態で引張強度の60%を載荷した場合のひずみ増加と時間の関係である。図

から、クリープひずみの増加は、引張強度の60% 載荷の弾性ひずみに対して、1000時間経過後で約4.0% であり、100万時間経過後は約6.5% であると推定される。

2.3. 見かけのリラクゼーション特性

本ロッドの、見かけのリラクゼーション率は、100万時間後に、約15.1% であると推定される。

2.4. 定着システム

平板ロッドの定着装置は、図-3 に示すようなくさび定着具である。PC 桁の製作時には、図-7 に示すようにくさび定着具を用いてロッドの定着を行った。

3. 実験橋の建設

実験橋は、岐阜県内のロッド製造メーカーの宇部日東化成(株)岐阜研究所敷地内に建設した。橋台は、場所打ちコンクリートである。図-4 に橋の全景を、表-4 に橋の設計条件を示す。

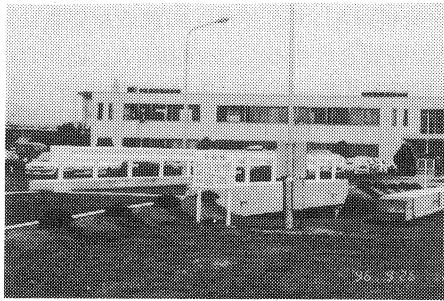


図-4 夢弦橋

3.1. 設計

PC 桁を用いたPC 橋は、B 活荷重対応のJIS A5313<sup>1)99.5</sup> プレストレストコンクリート床版橋と同一断面とした<sup>2)</sup>。PC 桁は、21本のFRPロッドを、同数のPC 鋼より線 (SWPR7B φ 12.7mm) の代わりに配置し、プレストレスの導入を行った。PC 桁の破壊形態は、緊張材の破断ではなく、曲げ圧縮コンクリートの圧壊によるものとした。図-5 に主桁構造図を示す。

アラミドFRPを用いたPC 桁の設計において、ロッドの見かけのリラクゼーション率がPC 鋼より線より大きいため、全体のプレストレス導入力はPC 鋼より線を用いた場合より大きくなった。

3.2. 建設

PC 桁は、プレストレスト工場の50m ベンチにおいて、1回に3本の桁を製作した。ロッドのベンチ上への配置は、取

表-3 耐アルカリ性

	40℃で浸漬	60℃で浸漬
	引張強度保有率(%)	
0日	100	100
60日*	97	100
180日*	96	90

\* pH13 アルカリ液 → Ca(OH)<sub>2</sub> + NaOH + KOH

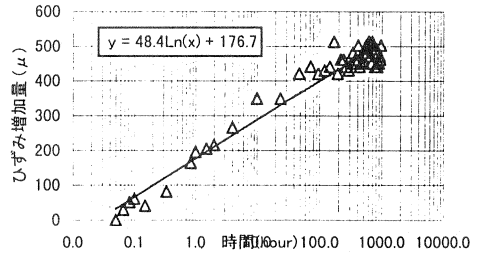


図-2 0.6Pu 載荷時のひずみの増加(20℃)

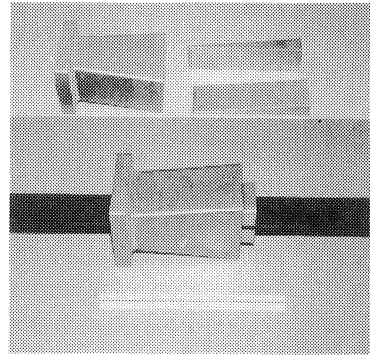


図-3 定着装置

表-4 設計条件

橋名	夢弦橋
橋	プレテンション方式PC 単純床版橋
橋種	プレストレストコンクリート道路橋
橋格	B 活荷重
橋長	10.540m
支間長	10.000m
全幅員	4.200m
斜角	90° 00'00"
緊張材	アラミドFRP
スターラップ	異形鉄筋 (D10)

扱いに十分注意して行った。図-6に、ベンチ上に固定された緊張材を示す。図-7にロッドの定着状況を示す。くさび定着具は、通常のPC鋼より線の定着具より若干大きくなっている。

PC桁製造時のロッド緊張に際して、アラミドFRPロッドのヤング係数は、PC鋼材の約1/3程度であるため、ベンチの必要な移動量は約750mmとなった。一方、ベンチは、普通のPC鋼材を緊張材として用いるように造られているため、ベンチ可動距離は約700mm程度である。そのため、はじめに各々のロッドを専用のジャッキを用いて約29.4kN(約150mmの引張り)で緊張してベンチに定着し、次いでベンチの移動により全ロッドの緊張(約600mmの引張り)を行った。製作した桁を橋台に設置し、アラミドFRPロッドを用いて桁5本の横締めを行い、くさび定着具で定着した。

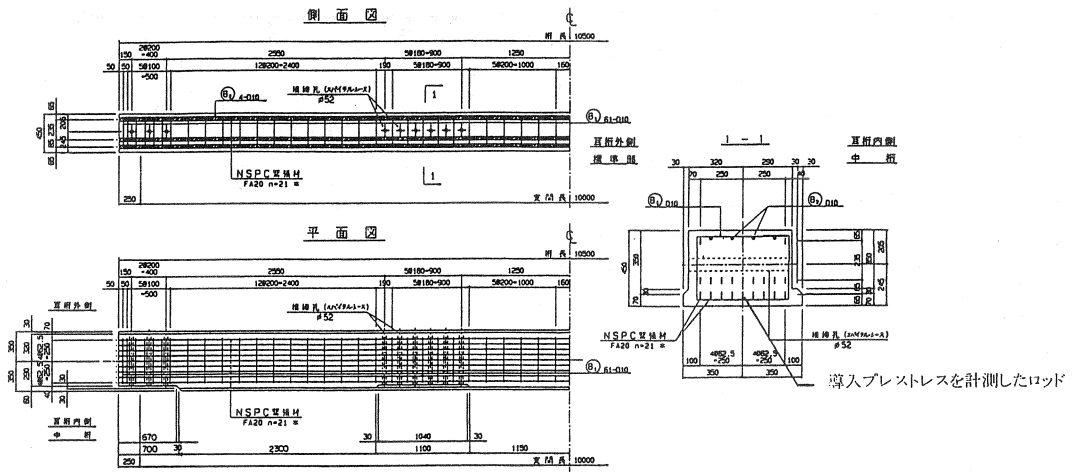


図-5 主桁構造図

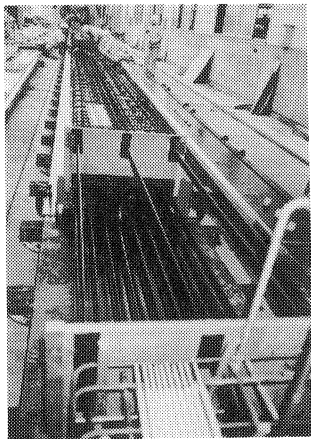


図-6 ベンチ上のロッド

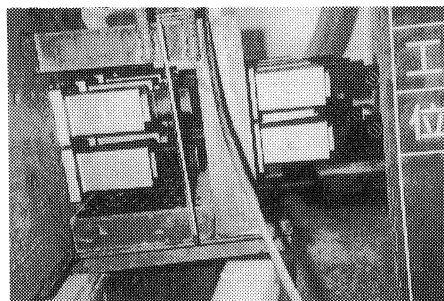


図-7 プレテンションベンチ上の定着具

#### 4. 導入プレストレスの計測

桁製作時に、導入プレストレスの計測を行った。計測は2本の桁について、図-5の桁断面図に示したロッドにひずみ計を張り付けて、ロッド緊張からプレストレス導入完了まで実施した。計測したひずみ

から求めたロッドの引張応力度と桁端部からの位置の関係を、設計値との比較で図-8に示す。図中▲、△印が計測値である。ここで、桁端部の設計値は、定着長をロッドの等価直径14mmの65倍(910mm)として、部材端部でプレストレスの分布が0となる2次放物線とした。

図中、プレストレス導入直後の引張応力度(△)は、定着長以外の区間の計測値の平均は、No.1桁で859 N/mm<sup>2</sup>、No.3桁で920 N/mm<sup>2</sup>になっており、設計値の815 N/mm<sup>2</sup>を上回った。また、定着長区間のロッド引張応力度は、No.1桁の端部から9,750mmの位置での計測値が計算値とほぼ等しい以外は、計算値を上回る引張応力度になっている。これらから、本ロッドを用いた桁のプレストレス導入は、定着長を含む桁全長において、設計値を下回ることなく所定のプレストレスの導入が行えたものと考えられる。

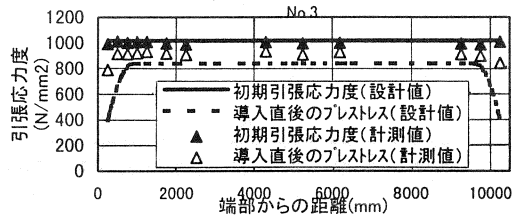
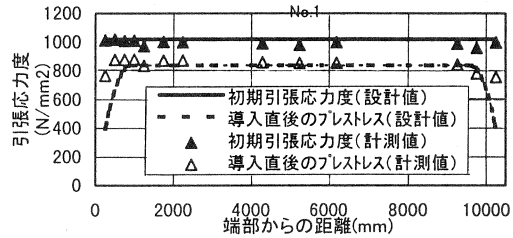


図-8 導入プレストレス量

5. PC桁の曲げ試験

5.1. 試験の概要

建設した橋と同じ桁で、表-5に示すような曲げ荷重試験を行った。試験は、各荷重まで載荷した後、約9.8kNまで除荷して次の荷重を行った。表に、各段階の荷重荷重および桁たわみを示した。桁の破壊は、設計どおり緊張材の破断ではなく、曲げ圧縮コンクリートの圧壊を呈した。

表-5 推定値と実験値

	荷重 (kN)	変位 (mm)		荷重条件	備考
		実験値	推定値		
1回目	68.6	7.6	8	設計荷重(D)*	
—	117.6	13.5	14.5	設計ひび割れ荷重	ひび割れ発生せず
3 "	176.4	20.9	—	D+2.5×D2	$P_{cr} = 196 kN$ にてひび割れ発生
4 "	215.6	29.1	—	D+3.0×D2	
5 "	319.5	—	167.2	推定破壊荷重	
最終	401.8	143.3	—	破壊	

\*:設計荷重(D)=死荷重(D1)+活荷重(D2)

5.2. ひび割れ発生荷重の検討

表-5に示すように、設計値から推定したひび割れ発生荷重は実験値よりも小さくなった。これは、設計でのコンクリートの最終的なクリープ・乾燥収縮および緊張材のリラクセーションを考慮した桁下縁の有効プレスト応力度  $f_{pc}$  および安全側の評価のコンクリート引張強度を用いてひび割れ荷重を推定したために、安全側のひび割れ荷重になったものと考えられる。そこで、改めて試験時に計測から得ら

れた  $f_{cpe}$ 、土木学会式による曲げ強度等を考慮してひび割れ荷重を求めた。

$$M_{cr} = (f_{cpe} + f_{ch}) \cdot Z = 532 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (1)$$

ここで、 $f_{cpe}$ : 桁下縁の有効プレスト応力度 =  $16.9 \text{ N/mm}^2$  ( $f_{cpe}$ は緊張材のひずみから推測)

$$f_{ch}: 0.42 f_c^{2/3} = 0.42 \times 58.8^{2/3} = 6.35 \text{ N/mm}^2$$

$$Z: \text{桁の断面係数} = 2.304 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \\ (= 2.304 \times 10^4 \text{ cm}^3)$$

得られたモーメント  $M_{cr}$  から、ひび割れ発生荷重は  $201 \text{ N}$  と計算され、実験値にほぼ一致した。

### 5.3. 荷重～たわみ曲線の検討

ひび割れ発生前は、桁全断面有効の曲げ剛性から荷重～たわみ曲線を求めた。ひび割れ発生後は、図-9に示すようにコンクリートの塑性を考慮した応力とひずみ分布を仮定して、ひび割れ発生後の低下した曲げ剛性  $(EI)_{cr}$  を求め、次いで、桁中央部のたわみを計算した。 $(EI)_{cr}$  は、以下の仮定より求めた。

$$(EI)_{cr} = \frac{M}{1/\rho} = \frac{M}{\varepsilon_c / x} \quad (2)$$

ここで、 $(EI)_{cr}$ : ひび割れ発生時の曲げ剛性

$M$ : 曲げモーメント

$\rho$ : 桁の曲率

$\varepsilon_c$ : 圧縮側コンクリートのひずみ

$x$ : 中立軸位置

計算した  $P \sim \delta$  曲線および設計値と実験値との比較を図-10に示す。

図に示すように、載荷開始から破壊に至るまで計算値は実験値とほぼ一致している。このことは、桁断面の応力～ひずみ分布は破壊に至るまで図-9に示すような挙動をしたものと考えられる。これから、桁は破壊に至るまで平面保持が成立し、緊張材はコンクリート断面と一体になり挙動したものと推定される。

### 5.4. 荷重と緊張材ひずみの関係

荷重と緊張材ひずみの関係を図-10に示す。純曲げ区間内およびその近傍で計測した緊張材ひずみはお互い近い値となった。一方、支点付近で計測した緊張材ひずみの変化量はほとんどなかった。

先述の計算から、桁中心および桁中心から3,000mmの位置の緊張材のひずみ増加量を取り出すと図中▲、●印のようになり、実測値(△、○)と比較的近い値になった。これらは、桁が破壊に至るまで、

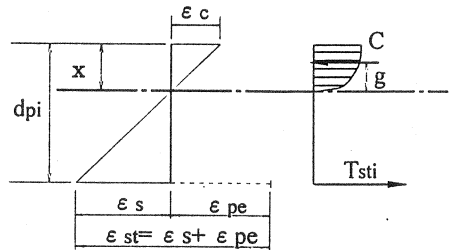


図-9 断面の応力とひずみ分布

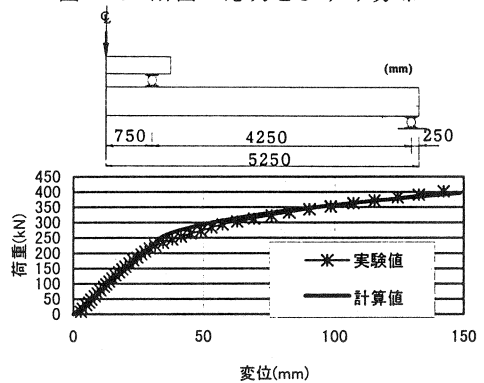


図-10 荷重～変位曲線

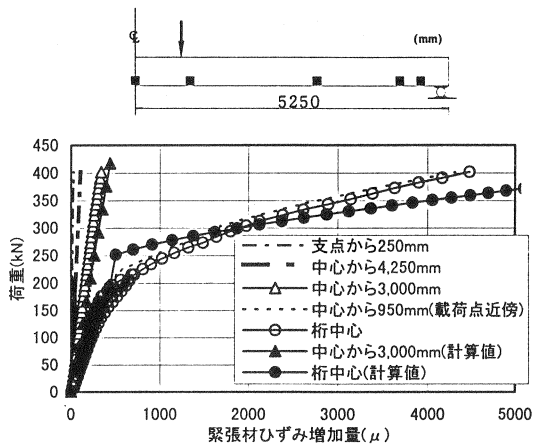


図-11 荷重～緊張材ひずみ曲線

桁の端部の緊張材はすべりを発生せず周辺コンクリートと一体に挙動していることを示すものと考えられる。

#### 5.5. 試験の結果

桁の曲げ試験結果より以下の事項が確認できた。

- ・桁は、設計どおり緊張材が破断に至らず、コンクリートの曲げ圧縮破壊を示した。これは、桁断面に対する補強緊張材量が多いことによるものである。
- ・試験による桁の破壊荷重は、推定値を上回った。
- ・平面保持の仮定に基づいて、桁の剛性評価から計算した荷重～たわみ曲線は実験値とほぼ一致した。
- ・荷重～緊張材ひずみ曲線は、桁が破壊に至るまで、緊張材とコンクリートは一体に挙動することを示している。

#### 6. まとめ

本報では、プレストレストコンクリート構造物の緊張材として、アラミドFRPの開発および実験橋への適用について述べた。桁製作時の緊張材のひずみ計測および桁の曲げ試験などから、以下の結論が得られた。

- (1) コンポーズロッドは、平板断面が特徴であり、良好なくさび定着性がある。PC構造物の緊張材として、十分な耐久性、化学的・機械的特性を有している。
- (2) 実大実験橋の建設により、コンポーズロッドに関する施工性について確認ができた。また、本実験桁の曲げ破壊試験により、桁は十分な力学特性を有することが確認できた。
- (3) コンポーズロッドを緊張材として用いる場合には、PC鋼材と異なる点が多く、設計・施工において、それらを考慮して検討する必要がある。今後は、現在計画中の供用試験およびその後の曲げ試験などにより、桁の長期性状に関する資料等をまとめる考えである。

#### 参考文献

- 1) Nishi, Kobayashi, Ito, Toda and Okada: Development of AFRP flat-rod for the prestressing tendon of the PC structure, Proceedings of the Third Japan Int. SAMPE Symposium, pp.235-240, 1993.
- 2) 土木学会コンクリートライブラリー：連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用、1992.
- 3) 土木学会コンクリートライブラリー：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)、1996.
- 4) 土木学会：構造力学公式集 昭和61年版、1994.