

## 新素材による PC 橋

—新宮橋の建設—

山	下	武	秋*
木	内	武	夫**
犬	飼	晴	雄**
岩	崎	達	彦***

## 1. はじめに

カーボン繊維、アラミド繊維などの繊維系新素材は、鋼材と同等以上の強度があり、かつ軽い、錆びない、非磁性という鋼材にはない性質を有しているため、最近、これを建設分野に取り入れ活用していくことが考えられ、基礎研究と並行して、実用化の研究が盛んに行われるようになってきた。

中でもモルタル、コンクリートの中に短繊維を分散・混入して造る繊維補強コンクリートは、曲げ強度、じん性を改善でき、部材厚が薄くなり軽量化に著しい効果があるため、高層ビルのカーテンウォールなどに使われるようになってきている。

また、ガラス、カーボンなどの繊維複合材を格子状に成形し、これによってコンクリートを補強する方法も、スラブ、壁などに適用されはじめている。

これらは、既に実用段階に入ったと考えられる繊維系新素材の使用例であるが、プレストレストコンクリートの分野でも、これらを緊張材として利用するための研究が10年ほど前より始まり、現在、実際の構造物への適用が待たれる技術段階になっている。

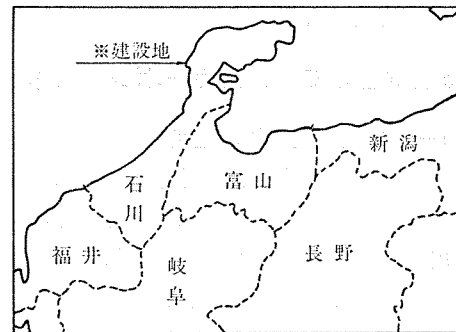
今回、このような従来の研究成果に基づいて、我が国で最初のカーボン繊維による PC 橋、新宮橋が建設された。

本文では、ここで使用されたカーボン繊維の性質と設計で用いた諸数値を中心に、その設計・施工について報告する。

## 2. 新宮橋の概要

カーボン繊維による最初の PC 橋は、図-1 に示すように日本海に面す能登半島の海岸線に建設された。

この地域は厳しい塩害環境下にあり、新宮橋は塩害を



※ 石川県羽咋郡富来町鹿頭地内

図-1 新宮橋位置

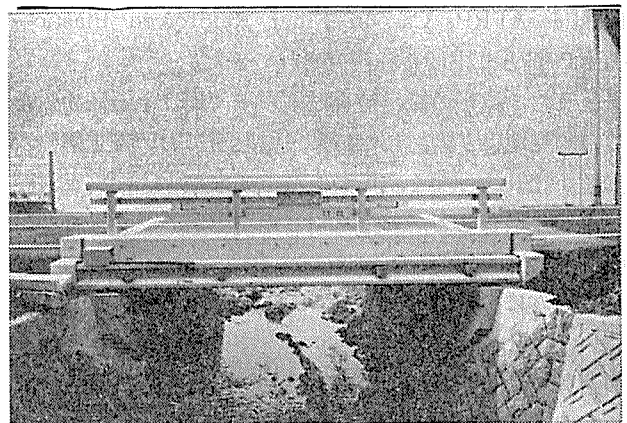


写真-1 新宮橋全景

被った旧 RC 橋の架け替え工事として計画され、昭和63年10月に竣工した(写真-1)。その概要を以下に示す。

- 1) 橋名：新宮橋
- 2) 位置：主要地方道深谷中浜線中羽咋郡富来町鹿頭
- 3) 橋長：6.1m，幅 7.0m
- 4) 形式：プレテンション方式 PC スラブ橋
- 5) 橋格：一等橋
- 6) 塩害対策区 I
- 7) 施主：石川県
- 8) 施工者：ピー・エス・コンクリート(株)

\* 石川県道路建設課

\*\* ピー・エス・コンクリート(株)

\*\*\* 東京製綱(株)

◇工事報告◇

9) 主要材料

主桁コンクリート	$\sigma_{ck}=500 \text{ kg/cm}^2$
場所打ちコンクリート	$\sigma_{ck}=240 \text{ kg/cm}^2$
緊張材	$\phi 12.5 \text{ mm}$ CFRP 7本より線
引張強度	$\sigma_{pu}=184 \text{ kg/mm}^2$
許容応力度	
i) 緊張作業時	$0.6 \sigma_p=110 \text{ kg/mm}^2$
ii) 導入直後	$0.55 \sigma_{pu}=101 \text{ kg/mm}^2$
iii) 設計荷重時	$0.45 \sigma_{pu}=83 \text{ kg/mm}^2$
鉄筋	SD 30 (エポキシ塗装鉄筋)

10) 破壊安全度：

- 1.3×(死荷重作用)+2.5×(活荷重作用)
- 1.7×(死荷重+活荷重作用)

3. 緊張材として用いたカーボン繊維複合材

3.1 カーボン繊維複合材の選定

繊維系新素材を緊張材として利用する場合、極細な繊維をそのまま使うのは困難であり、樹脂で固めて複合材として使用するのが一般的である。従来、緊張材として有力な繊維複合材では、PC 鋼材と同等ないしはそれ以上の引張強度を有しているガラス繊維、アラミド繊維、カーボン繊維による複合材、すなわち、Grass Fiber Reinforced Plastic—GFRP, Aramid Fiber Reinforced Plastic—AFRP, Carbon Fiber Reinforced Plastic—CFRP がとり上げられ研究されてきた。

これら3種類の繊維複合材（以下“FRP”と記す）を技術的見地より検討した結果、現段階において未解決な問題が比較的少なく、かつ作業上従来のPC 鋼材と大差なく取り扱うことができるなどの理由から、新宮橋の緊張材としてCFRPを選定した。

ちなみにGFRPについては、耐アルカリ性が小さく、pH 12~13のコンクリート中に埋設する場合、その耐久性に問題があった。

また、図-2は、pH 13、温度60°Cのアルカリ液中に引張強度の約60%の初期引張応力を与えたCFRP

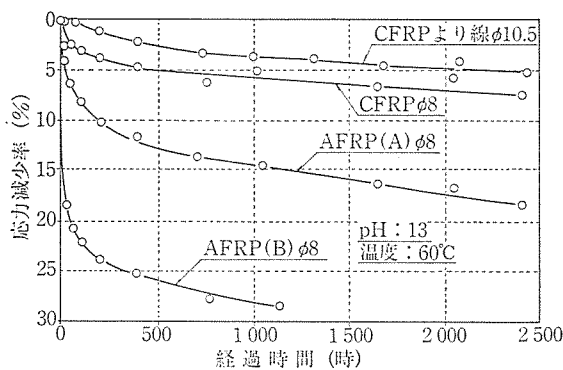


図-2 アルカリ液中の静的疲労促進試験

とAFRPの応力低下を経時的に測定したものであり、一種のリラクゼーション試験とも考えられるものである。

図-2から、AFRPはアルカリ環境下でのリラクゼーションが大きいと推定される。したがって、導入後のプレストレスの減少量もPC 鋼材より大きくなり、実際の設計に当たっては、PC 鋼材の場合に比べより正確にこれを推定する必要がある。また、使用性についても、弾性係数が小さいため緊張作業時の伸びはPC 鋼材の数倍となり、ロングライン方式によるプレテンション部材の緊張方法にも解決しなければならない問題があると考えられた。

3.2 CFRPより線の性質と適用性

CFRPには、丸棒状のロッドタイプと、PC 鋼より線に相当するより線タイプなどがある。

プレテンション部材の緊張材として使用する場合、CFRPとコンクリートとの付着強度が十分大きいことが不可欠であり、その表面が平滑なロッドタイプは不适当である。

一方、より線タイプは、よりによる若干の強度損失はあるが、本誌 Vol. 30, No. 5, 42 ページで報告したように、付着強度が大きくなり、その可撓性もPC 鋼より線と遜色なく、現段階では緊張材として最も適用性の大きいタイプと判断された。

新宮橋では、写真-2に示す東京製綱(株)が製造する径12.5mmのCFRP 7本より線を使用した。これは、従来の径12.4mmのPC 鋼より線に相当するものである。

CFRPより線は、多数のストランドプリプレグ(未硬化樹脂含浸一方向性カーボンファイバー)を特殊な方式で集束、ラッピング処理して線條体(PC 鋼より線の素線に相当する)を造り、これを複数撻合し、加熱により硬化・成形して造られる。

ラッピング処理によって、線條体の表面は図-3に示すような粗面状となり、付着効果をより高める。

このCFRPより線に使用されているカーボン繊維は、径7μのポリアクリロニトリルから造られるパン(PAN)系連続繊維で、引張強度が370kg/mm<sup>2</sup>、弾性係数が24000kg/mm<sup>2</sup>のものである。

線條体の繊維混入率は65%で、マトリックスには熱

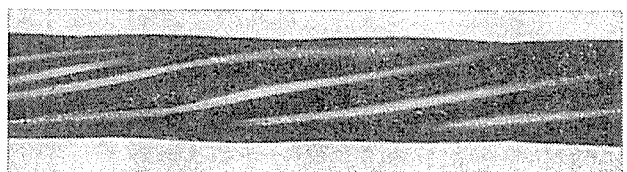


写真-2 φ12.5 CFRP 7本より線

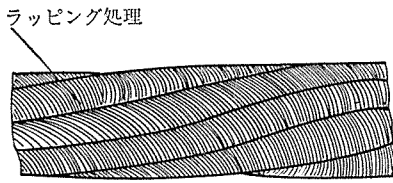


図-3 CFRP 7本より線の表面処理

表-1 CFRP より線の物性

項目	単位	CFRP 緊張材	PC 鋼材緊張材
種類		CFRP 7本より線	PC 鋼7本より線
記号		CFCC 1×7	SWRP 7A
断面			
呼び径	mm	φ12.5	φ12.4
公称断面積	mm <sup>2</sup>	76.0	92.9
公称単位重量	kg/km	158	72.9
品質規格値	引張荷重	kg 14000 以上 ( $\sigma_{pu} = 184 \text{ kg/mm}^2$ )	16300 以上 ( $\sigma_{pu} = 175 \text{ kg/mm}^2$ )
	降伏点荷重	kg (降伏点なし)	13900 以上 ( $\sigma_{py} = 150 \text{ kg/mm}^2$ )
	破断時の伸び	% 1.3 以上 ( $\epsilon_{pu}$ )	3.5 以上
	リラクゼーション率*	% 3.0 以下	3.0 以下
	弾性係数	kg/cm <sup>2</sup> 1.32~1.47×10 <sup>6</sup>	2.0×10 <sup>6</sup>
	線膨張係数	1/°C 0~0.6×10 <sup>-6</sup>	10×10 <sup>-6</sup>
摘要			JIS G 3536-1977 より抜粋

\* JIS G 3536 10 時間リラクゼーション試験

硬化性エポキシ系樹脂を使用している。

この CFRP 7本より線の諸物性を表-1 に示す。

同表の引張強度、破断時の伸びは、約 20 の試料の試験結果を次式により統計処理したものである。

$$X = \bar{X}(1 - 3V)$$

ここで、X：引張強度などの表中の値

$\bar{X}$ ：試料の平均値

V：変動係数

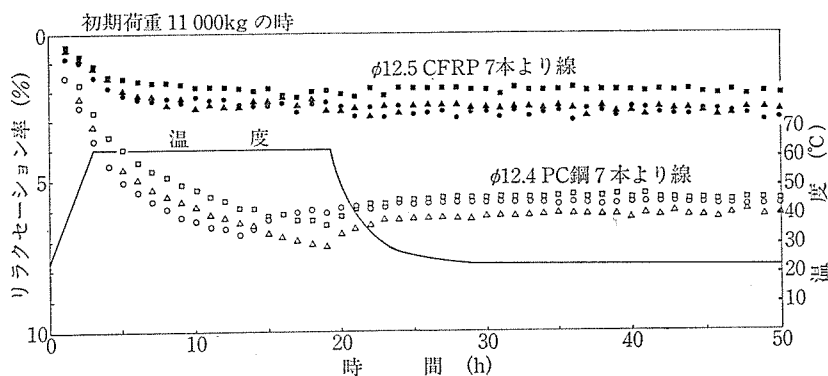


図-5 リラクゼーション試験

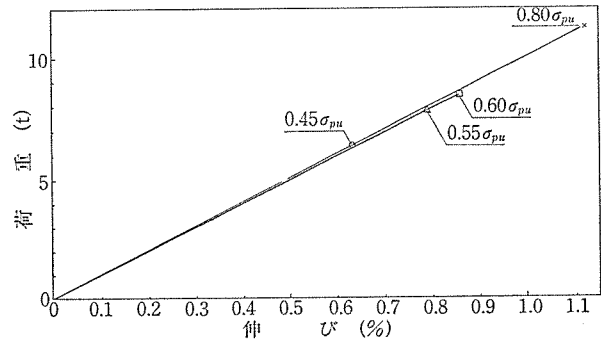


図-4 CFRP より線の荷重とひずみの関係



写真-3 海上曝露状況

上式から、表中の値は実際上の最低保障値と考えられる。なお、この時の変動係数は 4% 以下であった。

また、弾性係数についても同様な統計的処理により実際上の下限値と上限値を与えた。

図-4 は、CFRP より線の荷重と伸びの関係であるが、高応力後の残留変形もなく、CFRP より線は引張に対しほぼ完全な弾性体と考えられる。

図-5 は、CFRP より線と PC 鋼より線のリラクゼーションを比較したものであり、プレテンション部材の蒸気養生を考慮して、試験時の温度を初期の 20 時間だけ高温 (60°C) に保持して行った。これより CFRP より線のそれは、PC 鋼材より小さい (約 1/2) ことがわかる。

また、前述のとおり、コンクリート中の耐アルカリ性については全く問題がなく、耐食性についても写真-3 に示す海上曝露台に曝露した CFRP およびその部材とも、2 年経過した現在劣化の徴候は全く観察されていない。

次に、CFRP より線の疲労についてであるが、疲労のデータは少なく、現在、次のものが得られて

◇工事報告◇

いる。

下限応力が引張強度の7%で上限応力が57%（応力振幅 92 kg/mm<sup>2</sup>）の場合、あるいは下限応力 43%、上限応力 64%（応力振幅 39 kg/mm<sup>2</sup>）の場合は、いずれも200万回の繰返し回数によって破断しなかったが、下限応力 36%、上限応力 71%（応力振幅 66 kg/mm<sup>2</sup>）では200万回以下で破断した。

この結果から、疲労強度に関しては、応力振幅よりも最大応力の影響が大きいこと、また200万回疲労強度は引張強度の60%程度であることが推定できそうである。

現在、S-N 曲線を得るための試験を実施中である。

プレテンション部材での試験例として、（財）JR 総合技術研究所とピー・エス・コンクリート（株）が行ったものがある。

この試験は、径 10.5 mm の CFRP より線を使用したプレテンション梁（断面 200×100 mm、長さ 2500 mm）を用い、スパン 2100 mm、純曲げ区間 700 mm の2点荷重で行われた。

試験時の緊張材の引張応力度は 101 kg/mm<sup>2</sup>（引張強度の約 55%）と推定され、最初、その増加応力度が 15 kg/mm<sup>2</sup> になる荷重で約 575 万回繰返した。その後、応力増加を 25 kg/mm<sup>2</sup> と大きくし、さらに 200 万回繰返した。しかし、この PC 梁は破壊せず、また異状現象も全く観測されなかった。

CFRP より線の疲労に関する試験例は、ここで述べたものが主たるものであり十分とはいえないが、通常、プレテンション桁での緊張材の引張応力度は、100～110 kg/mm<sup>2</sup> で、その応力変動も 10 kg/mm<sup>2</sup> 程度であることを考慮すると、新宮橋の場合には CFRP の疲労は問題にならないと考えられた。

CFRP より線が PC 鋼より線と著しく異なる性質の1つとして線膨張係数があり、CFRP より線のそれは 0～0.6×10<sup>-6</sup>/°C と極めて小さく、温度変化に対して殆んど伸縮しない材料である。このためプレテンション部材では、温度変化によって CFRP より線およびコンクリートには拘束応力が発生するとともに、この両者間の付着が消失することが危惧された。

しかし、CFRP より線の付着強度は、引抜き試験などによって 20～40 kg/cm<sup>2</sup> と推定され、30°C の温度変化に対して付着が消失する“付着切れ”区間は、端部の数センチと計算された。これはプレストレス導入時の伝達長区間（“付着切れ”が生じている）60 cm に比べると極めて小さいものであり、実用上殆んど問題にならないと考えられる。

このことを実験的に確認するために、“温度サイクル

試験”が行われた。

この試験は、プレテンション梁（断面 150×150 mm、長さ 2500 mm）を温度環境室に静置し、室温を -10°C から +50°C まで 50 回昇降させ（1日当り1回）、その後室温（20°C）にもどし、CFRP より線のひずみ量の変化を測定したものである。

試験の結果、“付着切れ”現象が進展するような明確な徴候は観測されなかった。また、このプレテンション梁の荷重試験によっても、部材のひびわれ耐力、破壊耐力の低下は認められなかった。

以上述べたように、CFRP より線は、プレテンション部材の緊張材として、基本的に適用性があることが認められた。

### 3.3 CFRP より線の設計用数値の決定

前項で述べた CFRP より線の諸物性およびこれを使用した部材の諸性状などから、新宮橋で使用する PC 桁の設計は、従来と同様に、「道路橋示方書・同解説」（日本道路協会編）に基づき、緊張材についてのみ特別に考慮することによって、所要の安全度を確保できることが明らかとなった。

CFRP より線の緊張材としての許容応力度については、2章で示した値とした。この許容応力度は、前節で述べた各種試験や部材製作において経験した CFRP より線の引張応力度の範囲内になるように定めたものである。

CFRP より線に関する各種試験での引張応力レベルと設定した許容応力度の関係を図-6 に示す。

また、部材の終局状態を検討するための応力度とひずみの関係を図-7 とし、弾性係数を 1.4×10<sup>4</sup> kg/mm<sup>2</sup> とした。

CFRP より線の見掛けのリラクゼーション率は、図-5 から PC 鋼より線より小さいと推定できるが、長時間リラクゼーション試験のデータがまだ十分でないなどの事情から、新宮橋の設計では前記示方書に従った。

件名	引張応力度 (kg/mm <sup>2</sup> )			
	50	100	150	200
a) 緊張材の強度試験				→
b) リラクゼーション試験		→		
c) 緊張材の疲労試験		→		
d) 部材の疲労試験		→		
e) 伝達長試験		→		
f) アルカリ液中の静的疲労試験		→		
g) プレテン部材の製作(導入直後-破壊時)		→		
h) ポステン部材の製作(導入直後-破壊時)		→		
i) 引張強度および許容応力度	0.45σ <sub>tn</sub>	0.55σ <sub>tn</sub>	0.60σ <sub>tn</sub>	σ <sub>tn</sub>

図-6 CFRP より線の試験時応力度と許容応力度

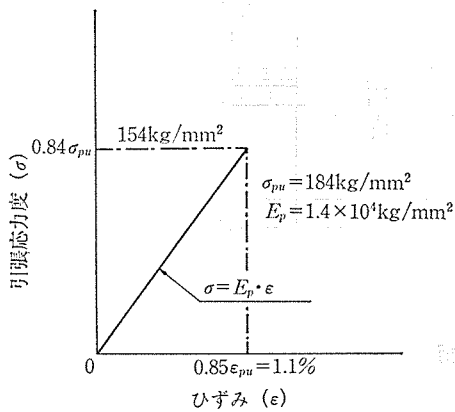


図-7 破壊抵抗曲げモーメント計算用応力-ひずみ曲線

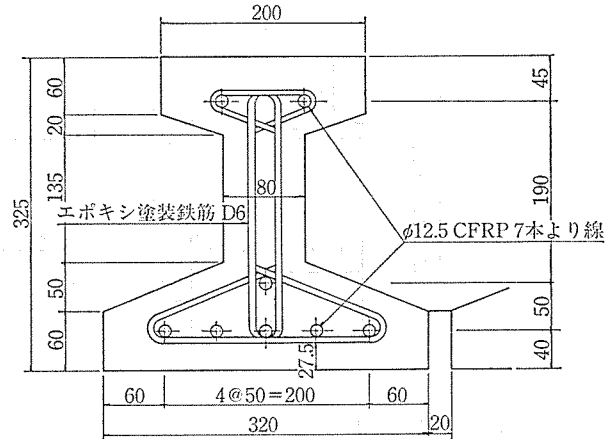


図-9 PC 桁の断面

#### 4. PC 桁の設計

新宮橋の構造は、スパンが小さい ( $l=5.760$  m) ところから、図-8 に示す中埋め合成床版形式が選ばれた。

PC 桁の断面には、JIS A 5313 のS 106-325 のI形断面を採用し、3章で設定した緊張材の許容応力度に基づいて、径 12.5 mm の CFRP より線 8 本が図-9 のように配置された。

スターラップには、耐食性材料としてその評価が確立されているエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いた。

また、PC 桁の横締め用ケーブルには、塩害対策上必

要なかぶりを十分確保できるなどの理由から、径 23 mm の PC 鋼棒を使用した。

設計で計算された CFRP より線の代表的応力状態は以下であった。

- i) 死荷重作用時  $76.8 \text{ kg/mm}^2$
- ii) 死荷重+活荷重作用時  $78.6 \text{ kg/mm}^2$
- iii) 死荷重+活荷重+温度変化 ( $\pm 30^\circ\text{C}$ )  
 $78.6 \pm 3.4 = 82.0 \text{ kg/mm}^2$   
 $75.2 \text{ kg/mm}^2$

ここで注目すべき点として、活荷重による緊張材の増加応力度 ( $1.8 \text{ kg/mm}^2$ ) より、温度変化による拘束応力

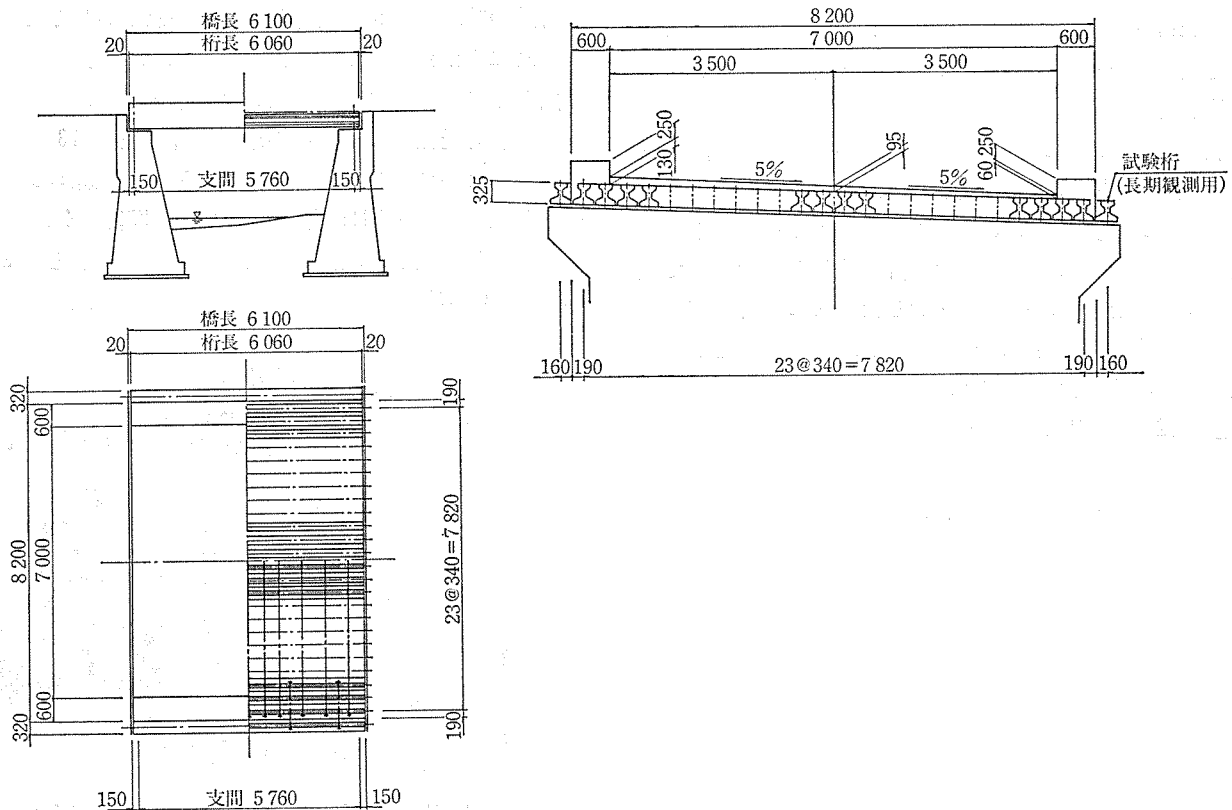


図-8 新宮橋一般図

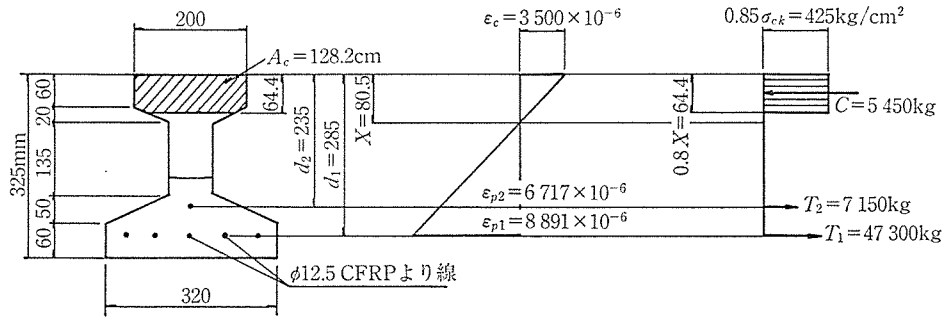


図-10 破壊時のPC桁

度 ( $\pm 3.4 \text{ kg/mm}^2$ ) が大きいことである。

PC 桁の破壊安全度の検討においては、CFRP より線に降伏現象がないところから、CFRP より線が破断する前に、上縁のコンクリートが圧壊する破壊形態となるように設計した。図-10 は破壊時の PC 桁の応力とひずみ分布である。この時の破壊抵抗曲げモーメントは  $13.13 \text{ t}\cdot\text{m}$  で、所要耐力 ( $11.22 \text{ t}\cdot\text{m}$ ) 以上になっている。

### 5. PC 桁の載荷試験

径 12.5 mm の CFRP より線を用いた新宮橋の PC 桁 (以下“CFRP 桁”と記す) について、荷重性状と所要の耐力があることを確認するために曲げ載荷試験を実施した。

この時、比較検討のために、CFRP より線だけを径 12.4 mm PC 鋼より線に置き換え、他はすべて CFRP 桁と同一の PC 桁 (以下“PC 桁”と記す) についても実施した。

載荷試験は、コンクリートの材令が 18 日の時、図-11 に示す中央部の 2 点に載荷して行った。載荷は、最初、スパン中央で CFRP 桁に設計曲げモーメントを発生させる荷重 (3.6 t、以下“設計荷重”と記す) まで段階的に荷重を加え、その後除荷した。次に設計荷重の 2 倍まで荷重を増加させ、再度除荷し、最終段階として試験桁の破壊まで荷重を加えた。

図-12 は、CFRP 桁と PC 桁のスパン中央のたわみを示したもので、設計荷重までの試験桁はいずれも計算と極めて良く一致した。また、設計荷重除荷後の残留た

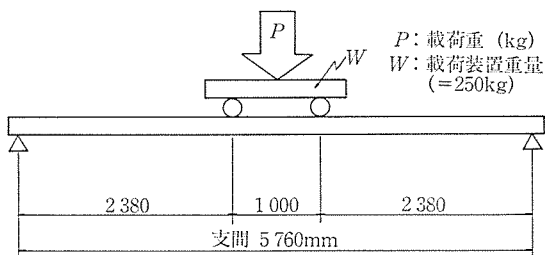


図-11 載荷方法

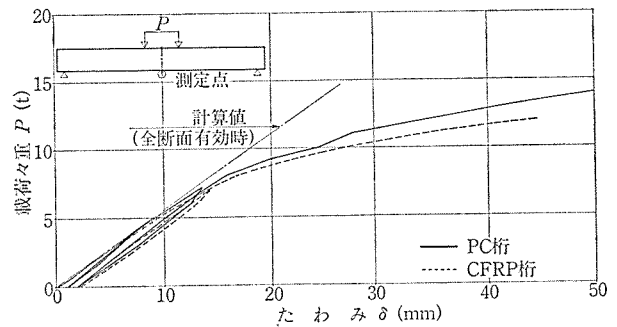


図-12 試験桁のスパン中央のたわみ

わみも約 1 mm と小さく良好な復元性を示した。

設計荷重までの CFRP 桁の挙動は、PC 桁と何ら変わることがないといえる。

設計荷重の 2 倍までの載荷過程で、CFRP 桁はその最大荷重の時、スパン中央部分にひびわれが発生した。ひびわれにもかかわらず残留たわみは 2 mm と小さく、依然として復元性に問題のないことを示した。

最終載荷過程では、荷重の増加に伴い図-13 のようにひびわれが伸長した。そして 13.5 t で上縁コンクリートが圧壊して CFRP 桁は破壊した (写真-4)。

ひびわれ荷重と破壊荷重の実測値と計算値を表-2 に示すが、CFRP 桁は 1~3% の範囲で良く一致した。こ



写真-4 CFRP 桁の破壊状況 (コンクリートの圧壊による)

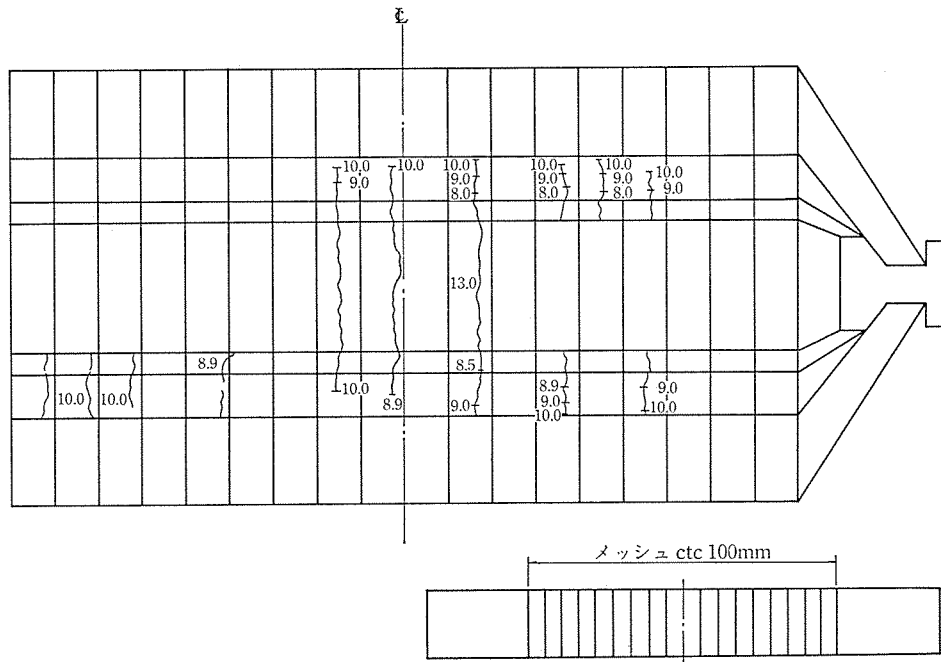


図-13 CFRP 桁のひびわれ

表-2 試験桁のひびわれ荷重と破壊荷重

	CFRP 桁			PC 桁		
	実測値	理論値	実測値 — 理論値	実測値	理論値	実測値 — 理論値
ひびわれ荷重 $P_c$ (kg)	7 200	6 970	1.03	9 100*	6 480	1.40
破壊荷重 $P_f$ (kg)	13 500	13 390	1.01	16 400	16 350	1.00

\* ひびわれの発見が遅れたためと考えられる。

のことより CFRP 桁には所定のプレストレスが導入され、かつ所要の破壊耐力があることが確認された。

CFRP 桁と PC 桁の挙動で注目されることは、図-12 において、ひびわれ発生後の CFRP 桁が PC 桁以上に大きく変形することである。これは CFRP より線の弾性係数が PC 鋼より線より小さいことに関係しており、緊張材として降伏現象をもたない、したがって破断時の伸びの小さい CFRP を使用した場合でも、その部材は破壊するまでに大きく変形することを示している。

以上のような載荷試験によって、新宮橋の CFRP 桁が十分な耐力を有することが実証された。

## 6. 施 工

CFRP 桁は、「JIS による PC けた橋の設計・製造便覧」((社)プレストレスト・コンクリート建設業協会)に基づき、ピー・エス・コンクリート(株)七尾工場で製作した。

CFRP より線は、桁 6 本分の長さに切断し、端末を樹脂ソケットで加工したものを用いた(写真-5)。

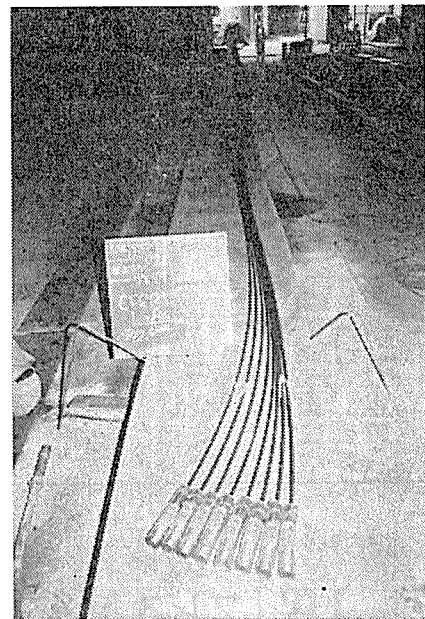


写真-5 CFRP より線の端末ソケット

緊張方法は、CFRP より線の両端、樹脂ソケット部で、PC 鋼より線とカップラーを使って接続し、この PC 鋼より線を同時緊張機に固定し、8 ケーブルを一度に緊張した。

工場で製作した RC 桁は、現場に運搬し架設されたが、迂回路がないため、旧 RC 床版橋の撤去を含め片側施工となった。工事は昭和 63 年 7 月に着手し、同年 10 月に完成した。

## 7. おわりに

建設された新宮橋においては、FRP の本格的実用化

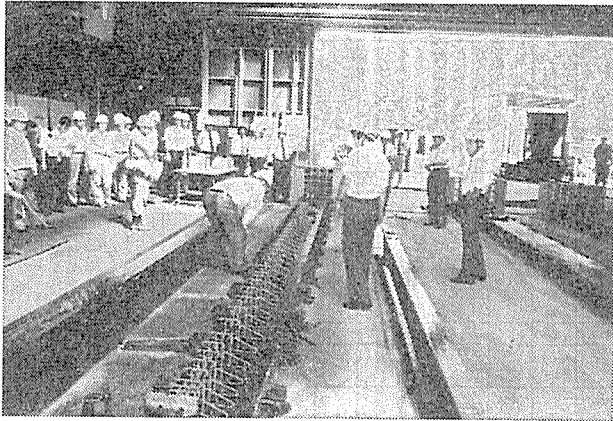


写真-6 CFRP 桁の製作 スターラップエポキシ  
塗装鉄筋 D6

に備え、耐久性に関するデータを収集する目的で、本橋の両側に長期観測用の CFRP 桁 2本が架設されている。これは、本体の横締めとは別の横締め PC 鋼棒により本体と一体化されていて、現在、CFRP やコンクリートのひずみなどを継続的に測定している。後年、この CFRP 桁を本体より取りはずし、耐力の変化などについても調

査することが計画されている。

新宮橋での CFRP は、コンクリート構造物の塩害対策として使用されたものであるが、今後、この種の耐食性用途として港湾・海洋での構造物や、別の用途として非磁性構造物などへの適用が考えられる。今回の経験や前述の長期観測データが、FRP の建設分野での活用に多少なりとも寄与できることを期待している。

最後に、CFRP を緊張材として新宮橋に適用するに当たって、これが我が国はもちろん、世界的にも最初の例であるため、十分な技術的検討が必要であった。このため石川県の要請により、建設省土木研究所を中心とした「新宮橋に関する設計・施工検討委員会」が設置された。この委員会では、従来の研究だけでなく、本文で述べた“温度サイクル試験”など新たな実験を追加するなどして技術的検討が加えられた。

このように、検討委員会の全般的御指導によって新宮橋は実現したものであり、ここに深く感謝申し上げる次第であります。

【1988 年 12 月 12 日受付】

◀刊行物案内▶

## FIP 「プレストレストコンクリート材料の極低温下挙動」 に関する技術水準報告書

体 裁：B5判 53 頁  
定 価：2500 円 送 料：300 円  
内 容：緒言、序論。1. 極低温化の構造物と荷重条件；極低温下の構造物、供用条件と荷重、危険状態と荷重、構造物の設計と材料特性。2. 低温下における材料の挙動；PC 鋼材、定着具用鋼材の種類と性質、鉄筋、極低温下のコンクリートとグラウト。3. 低温下での複合挙動；はじめに、低温下での付着、プレストレッシング・システムの挙動、注釈、PC の破壊靱性。4. 低温試験方法；鋼材の試験、コンクリートおよびグラウトの試験方法、定着部の試験、付着部の試験、付着に関する試験。