

(60) ケーブルカンチレバー (FCC) 工法の緊張材に炭素繊維を適用するためのシステム開発

大成建設(株) 土木設計部 正会員 〇細谷 学
 大成建設(株) 土木設計部 正会員 田中茂義
 大成建設(株) 土木設計部 正会員 関 文夫

1. はじめに

各種連続繊維を樹脂で固めたFRP (Fiber Reinforced Plastics) 線材は、軽量、高強度でかつ耐腐食性に優れており、近年、鋼材に代わるコンクリート補強材として期待されている¹⁾。著者らは新素材の中でも、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) に注目して、PC構造物への適用に関して研究開発を進めてきた。特に、図-1に示すPC橋梁(つくでカントリークラブNo.8ホール橋)のケーブルカンチレバー(FCC)工法用緊張材としてCFRPを使用することを当面の目的とした。PC橋梁に関して、片持ち張出し施工に本格的に新素材を適用する事例は現在までのところない。

CFRP線材をPC橋梁の緊張材に適用する場合、塑性域がなく、脆性破壊する特性を設計及び施工上どう取り扱うかが問題となる。また、国内における新素材を用いた構造物のこれまでの施工例には、大容量マルチストランドタイプのポストテンション方式のものがなく、現状では、その緊張システム、緊張管理手法等が確立されていない。

本研究では、CFRP線材を緊張材として実用化するため、CFRPの性質を的確に把握し、設計及び施工管理上の基準となる値を得ることを目的とした。そして、実用化の上での諸問題に関して種々の実験を行い、設計手法及び施工管理手法を確立した。

本稿では、本研究で得られた設計手法及び施工管理手法を述べるとともに、これらの手法を確立するために行った実験について述べる。

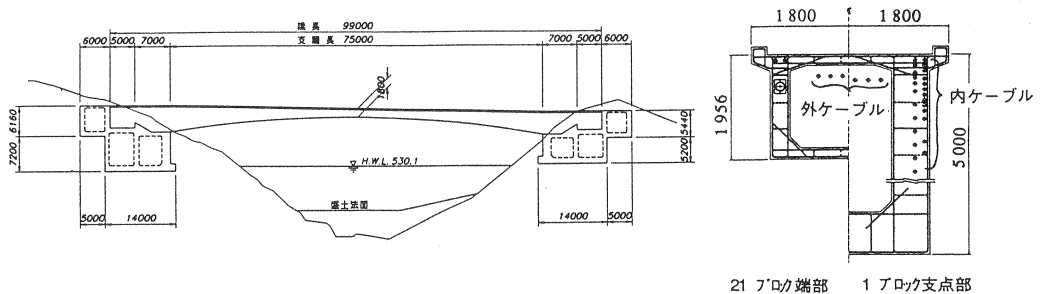


図-1 つくでカントリークラブNo.8ホール橋一般構造図

2. 設計手法

CFRP線材は、従来のPC鋼より線のような靱性のある材料とは異なり、脆性的な破壊形態をとる。CFRPを用いた構造物では、安全性の観点から終局時の破壊形態をコンクリートの圧壊として設計することが多い²⁾。しかし、この設計では線材量が増加し、不経済になることから、改善が要求されている。そこで、曲げ破壊耐力試験を実施し、その結果に基づき、CFRP線材の破断による設計を行った。

また、実橋に用いられるCFRP線材の引張強度($P_u=14.5\text{ t/本}$)は、線材を直線上に引張った強度試験をもとに定めており、線材をマルチタイプで曲げ上げ配置した強度試験は行われていない。この場合、線材相互間、線材とシース間の摩擦や横圧による外傷、トランペットシースの絞り部での線材の擦れ、曲げ配置による線材の捻れ状態での定着などによる強度低下が予想される。そこで、実橋と同じ状態(マルチタイ

ブ、曲げ上げ配置)での線材の破断耐力を検証した。

これらの実験結果より以下のように設計指針を設定した。

(1) 材料定数

つくでカントリークラブNo. 8ホール橋に用いる材料定数は、実験値に基づき、次の値とする。

使用線材	1×7 (7本より) $\phi 12.5$ mm	弾性係数	$E_p=1.4 \times 10^6$ kgf/cm ²
断面積	$A_p=76.0$ mm ²	線膨張係数	$\alpha=0.6 \times 10^{-6}$ /°C
引張強度	$\sigma_{pu}=190.8$ kgf/mm ² (14.5tf/本)	リラクゼーション率	3%
実破断強度	$\sigma_{pa}=215.8$ kgf/mm ² (16.4tf/本)		

(2) 許容応力度

CFRP線材はリラクゼーションの影響の小さい材料であること、及びCFRP線材の破断耐力試験の結果とをもとに、次の値に設定した。

引張強度	$\sigma_{pu}=190.8$ kgf/mm ²
プレストレス中	$0.65 \sigma_{pu}=124.0$ kgf/mm ²
プレストレス直後	$0.60 \sigma_{pu}=114.5$ kgf/mm ²
設計荷重時	$0.55 \sigma_{pu}=104.9$ kgf/mm ²

(3) プレストレスの計算に必要な係数

プレストレスの計算に必要な係数は以下の値とし、線材メーカーによる実験及び試験緊張より安全率を考慮して決定された。なお、使用するシーはホリフレンスとする。

摩擦係数	$\mu=0.3, \lambda=0.004$
セットロス(引戻し量)	$\Delta=6$ mm

ねじ式の定着方式を採用したため、セットロスは生じないが、プレストレスを有効に導入するために、6mm程度引き戻し操作を実施する。

(4) 破壊抵抗曲げモーメントの算定方法

曲げ破壊耐力試験の結果より、終局荷重作用時の部材断面の破壊抵抗曲げモーメント算定方法は、次の規定により算定するものとする。

- 1) 維ひずみは中立軸からの距離に比例する。
- 2) コンクリートの引張強度は無視する。
- 3) コンクリートの圧縮応力度の分布は、道示2.2.4に従うものとする。
- 4) 鉄筋及びCFRP線材の応力度-ひずみ曲線は、図-2の通りとする。

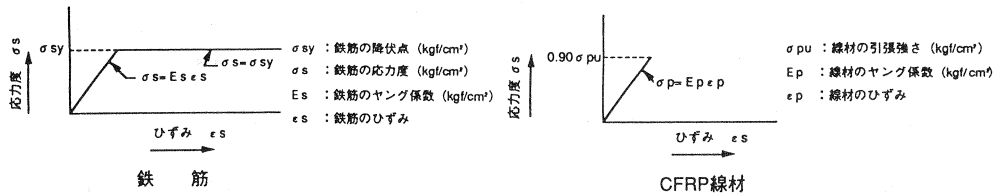


図-2 鉄筋及びCFRP線材の応力度-ひずみ曲線

- 5) 破壊抵抗曲げモーメントの算定時に、線材が破断した場合は、線材の破断時をもって 最大破壊抵抗曲げモーメントとする。

(5) CFRP線材の配置

道示4.4.6に準じる。なお、以下の項目については、注意を要する。

1) CFRP線材を曲線状に配置する場合の線材の曲げ半径及び曲げ角度は、次の値とする。

曲げ半径：8.0m以上 曲げ角度：10度以下

2) 桁の端支点等でせん断力が著しく変化する場所では、急激な曲げ配置は避ける。

(6) CFRP線材の定着

道示4.4.7に準じる。

なお、数多くの定着具を同一面内に配置する場合、各定着具の必要最小間隔は図-3のように定める。

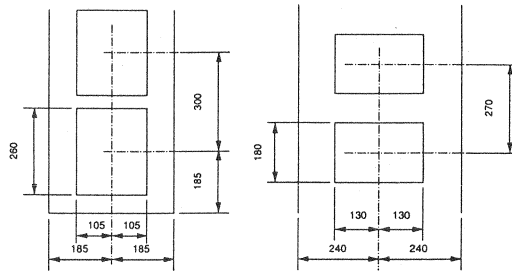


図-3 定着具の必要最小間隔

(7) 定着具付近の補強

道示4.4.8に準じる。

なお、本橋においては、CFRP線材定着具付近のコンクリートの補強には格子状の鉄筋を用いる(図-4)。

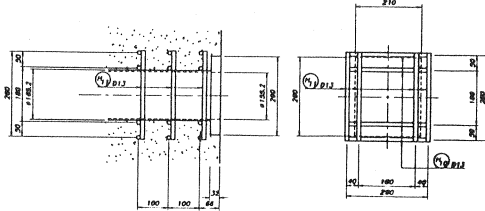


図-4 内ケーブル定着部補強配筋図

3. 設計手法確立のための実験

(1) 供試体の概要

供試体の寸法は、

実橋のウェブ幅を

想定して、高さ

70cm、幅37cm、

長さ700cmの梁と

した(図-5)。コ

ンクリートの設計

基準強度は

400kgf/cm²とし、早

強ポルトランドセ

メントを用いた。緊張

材にはCFRP線材

1×7 φ12.5mm 6本マ

ルチタイプを使用し、曲げ上げ配置

(R=8m、曲げ上げ角度α=10度)

した。また、シースには波型のポリ

エチレン管を用いた。配筋について

は、軸方向筋の下2段は、各供試体

の配筋量を変えるためD13~D25を

用い、その他の軸方向筋にはD13を

用いた(図-6)。スターラップには

D16を用いて、250mmピッチとし

た。供試体数は緊張材の素材、引張

鉄筋量、終局時の破壊形態を変え

て、表-1のように5体とした。な

お、実験の全体状況を図-7に示す。

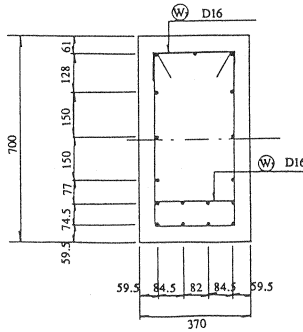


図-6 供試体断面図

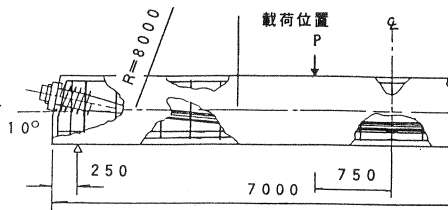


図-5 供試体一般図

表-1 供試体の種類

供試体番号	緊張材の素材	引張鉄筋径	破壊形態
C-1	CFRP	D 25	コンクリートの圧壊
S-1	CFRP	D 13	CFRP線材の破断
S-2	CFRP	D 16	CFRP線材の破断
S-3	CFRP	D 19	CFRP線材の破断
P-2	P C	D 16	P C線材の降伏

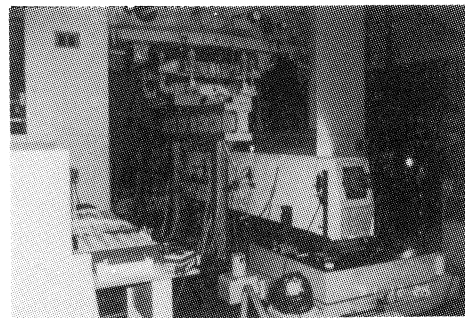


図-7 実験装置全体状況

(2) CFRP線材の破断耐力試験

実験は2度行い、左右に取り付けたジャッキで線材が破断するまで両引きし、緊張導入力及び線材の伸び量を計測した。図-8は荷重-伸び関係を示している。CFRP線材には塑性域がないという特性をよく示しているが、破断時の引張荷重は71.7tf (0.82Pu) 及び68.9tf (0.79Pu) となり、2度とも破断保証強度 (87.0tf) を下回った。これより、曲げ上げて使用すると強度が低下し、引張強度は0.80Pu程度になることが認められた。

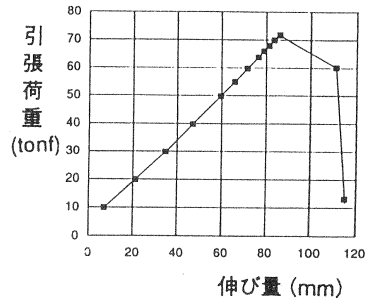


図-8 CFRP線材破断時の荷重-伸び曲線

(3) 曲げ破壊耐力試験

引張部材をCFRP線材と鉄筋との複合構造とすれば、終局時の破壊形態を線材の破断として設計しても、鉄筋による靱性効果を期待でき、終局時の脆性的な破壊が緩和されると推測される³⁾。本実験では、上記の検証を行うことを主目的とし、配筋量の差による耐力の比較及び従来のPC鋼より線との耐力の比較を行った。なお、導入緊張力は0.65Puとし、グラウト (普通ポルトランドセメント 設計基準強度 200kgf/cm²) を注入した。

表-2に曲げ破壊荷重の実測値と計算値を示す。計算に使用したCFRP線材の引張強度には、実破断強度 (Pa) と破断保証強度 (Pu) の2つを用いて計算した。P-2 (PC鋼材使用) は、実測値と計算値がほぼ一致しているが、CFRP線材を用いた供試体は、Paによる計算値の約90%の荷重で破壊した。また、Puによる計算でも、実測値が計算値を少し下回った。

表-2 曲げ破壊荷重

供試体番号	計算値 (t)		実測値 (t)
	Pa 使用	Pu 使用	
C-1	99.56	99.24	92.20
S-1	60.47	57.60	55.06
S-2	70.79	68.00	63.76
S-3	81.10	77.49	75.59
P-2	72.23		70.04

これらより、曲げ破壊耐力の算定には、実用上CFRP線材の引張強度をほぼ1.0Puと仮定できることが確認された。これは、破断耐力試験より得られた引張強度 (0.8Pu) に比べると高い値となっており、グラウトの有無によるものと思われる。ノングラウト状態では緊張されたCFRP線材が曲げ上げ部分で局部的に応力を受けるが、グラウトした状態では応力が広範囲に分散するためと考えられる。以上より、今回のCFRP線材の曲げ破壊耐力の算定では、グラウトを前提に、素線張力のばらつきも考慮して、CFRP線材の引張強度を0.9Puと仮定して良いものと思われる。

荷重と変形の関係を図-9に示す。S-1、S-2、S-3は、線材が破断した際に少し衝撃があったが、P-2と似た靱性のある破壊となり、鉄筋量が多いほど曲げ破壊耐力及び変形量が大きいのが分かる。しかし、C-1は、破壊耐力は大きい変形量は少なく、脆性的な破壊である。これらより、線材の破断による破壊でも、鉄筋量を調節すれば、かなりの靱性が期待できることが分かった。

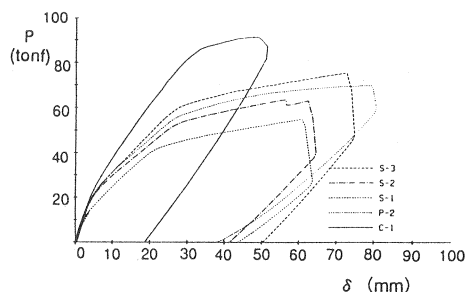


図-9 荷重-変形の関係

4. 施工管理手法

実橋では、緊張材としてCFRP線材を、シースとしてポリエチレン管シースを用いるものとした。そこ

で、試験緊張を行い、摩擦係数、見かけの弾性係数等を求め、CFRP線材の緊張管理手法を検討した。合わせて、緊張機器の施工性能の確認も行った。

また、ダイカスト端末(低融点合金を使ったくさび定着方式)の取り付けられたCFRP線材の挿入方法を工夫して、CFRP線材を曲げ上げ配置したシースに挿入すること及び架設に用いるシース径をなるべく細くすることを課題とした。そこで、CFRP線材の挿入試験を行い、挿入方法の妥当性を検討した。

これら諸実験の結果より以下のとおり施工管理手法を定めた。

(1) 緊張管理に用いる材料定数

つくでカントリークラブNo.8ホール橋に用いる緊張管理上の定数は、次の値とする。

使用線材	1×7 φ12.5 mm	見かけの弾性係数	$E_p=1.45 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$
断面積	$A_p=76.0 \text{ mm}^2$	見かけの摩擦係数	$\mu=0.1, \lambda=0.0013$
引張強度	$\sigma_{pu}=190.8 \text{ kgf/mm}^2$	セットロス(引き戻し量)	$\Delta=6 \text{ mm}$
実破断強度	$\sigma_{pa}=215.8 \text{ kgf/mm}^2$		

見かけの弾性係数は、基本的には上記の値(弾性係数は平均値)とするが、炭素繊維の場合、材料のばらつきが大きいので、各ロッド毎に弾性係数値を必ず確認し、緊張管理の際に補正するのが望ましい。

(2) 線材の架設

- 1) 架設される線材には、ダイカスト端末が取り付けられているため、6本一括にして結束するものとする。シースの内径は64.8mm以上となる。そこで、シース径を減少させ、架設時の断面欠損を少なくするため、ずらして挿入する方法を採用する。
- 2) 炭素繊維は外傷に対して非常に敏感な材料で、緊張前に衝撃力を受けると著しく強度が低下するおそれがある。架設時の線材の取り扱いには十分な配慮が必要である。

(3) 定着後の線材の配慮

- 1) ダイカスト定着体は急激な温度上昇(特に90℃以上)に対して、その定着性能が低下するため、マスコンクリート内で定着する場合などには、注意する必要がある。
- 2) ダイカスト定着体は振動、衝撃に対して定着効率が低下する可能性があるため、定着体にバイブレータ等が接触する場合などは配慮した方がよい。本橋の施工においては、バイブレーター接触防止キャップにより定着部を保護する。

(4) 緊張作業中の諸注意

炭素繊維は鋼材と性質が異なり、脆性的に破断する性質がある。そのため緊張中のジャッキ背面での作業、リングナットの定着作業等には、注意を要する。

5. 施工管理手法確立のための実験

(1) CFRP線材挿入試験

実橋では幅37cmのウェブに横2列に緊張材を配置する。ダイカスト部分6本を六角形状に束ねると、外径が最大で $3 \phi 21.6=64.8 \text{ mm}$ になるが(図-10)、ダイカスト部分を3本ずつ束ね、互いにずらして挿入する(図-11)ことで、シース径を内径φ60mm、外径φ70mmまで細くできた。この結果、鋼材のかぶりと鋼材間のあきを十分に確保し、かつ断面欠損を少なくすることができた。また、これまで曲げ上げ配置したシース内にCFRP線材を挿入した事例はなく、本橋が初

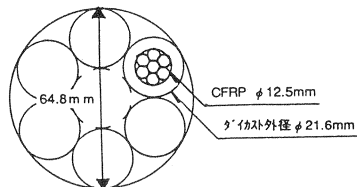


図-10 ダイカスト部を6本一括にまとめた断面

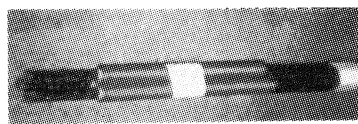


図-11 ダイカスト部を3本まとめた場合

めての試みとなった。そのため、シースに線材を支障なく挿入できることを実験により確認した。

実験の結果、不慣れな間は時間を要するが、慣れれば支障なく挿入できることが確認できた。

(2) 試験緊張

今回は、ポリエチレン管シース、CFRP線材を用いたため、従来のPC鋼より線を用いた緊張とは、摩擦係数(μ)、見かけの弾性係数(E_{CFRP})が異なる予想される。そこで、試験緊張を行い、 μ 、 E_{CFRP} を求めるとともに、緊張機器の施工性能の確認、CFRP緊張管理手法の検討を行った。試験方法は、「道路橋示方書施工便覧」に準拠し、供試体は、表-1のS-1、S-2、S-3を用いた。試験緊張結果を表-3に示す。摩擦係数は、 $\mu=0.0731$ 、見かけの弾性係数は、 $E_{CFRP}=1.479 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ であった。

表-3 試験緊張の結果

供試体番号	緊張端	摩擦係数 μ	見かけの弾性係数 $E_{CFRP} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
S1	右	0.1325	1.492×10^6
	左	0.1221	1.466×10^6
S2	右	0.0459	1.501×10^6
	左	0.0609	1.498×10^6
S3	右	0.0509	1.472×10^6
	左	0.0260	1.446×10^6
平均値		0.0731	1.479×10^6

6. まとめ

以下に本研究で得られた成果を示す。

- 1) CFRP線材のマルチストランドタイプの定着システムを開発し、これを用いた設計手法を確立した。これにより、CFRP線材の本格的PC橋梁への適用が可能となった。
- 2) 降伏域のない脆性的な性質をもつCFRP線材をPC橋梁の緊張材に適用するにあたって、引張耐力試験及び曲げ破壊耐力試験等を実施した。この結果から、引張鉄筋とCFRP線材を組み合わせることで、終局時の破壊形態を線材の破断として設計できるような設計手法を提案した。
- 3) 緊張材としてCFRP線材を用いたPC橋梁の施工管理手法のうち、摩擦係数による緊張管理手法、線材の架設方法等を考案した。
- 4) 上記1)～3)の結果をもとに、マルチストランドタイプのCFRP線材を片持ち張り出し架設されるPC橋梁に実用化することができた。

7. おわりに

本文では割愛したが、定着体の開発は東京製網(株)との共同研究により実施し、マルチストランドタイプの定着システム、緊張システム等を確立した。片持ち張り出し架設されるPC橋の緊張材として全面的に新素材(CFRP線材)を使用した事例はないため、設計・施工管理を適切に実施するための諸実験を重ねてきたが、本稿ではこれらの一部を報告している。今後の展望として、新素材の外ケーブル構造についても現在検討しており、本橋梁に同時に実用化する予定である。

本研究の成果を実用化した「つくでカントリークラブNo.8ホール橋」は、平成4年6月に着工され、現在鋭意施工中である。

《参考文献》

- 1) 箕作光一：PC橋をはじめとする土木分野へのFRP材の適用、コンクリート工学，Vol.29, No.11, 1991.11
- 2) 山下、木内、犬飼、岩崎：新素材によるPC橋—新宮橋の建設—、プレストレストコンクリート，Vol.31, No2, Mar.1989
- 3) 細谷、田中、関：CFRPと鉄筋の複合構造を適用したPC梁の曲げ破壊実験、土木学会第47回年次学術講演会概要集、平成4年9月