CFRP を使用する港湾 PC ホロー桁の実物大載荷実験

東京製綱	正会員	○榎本　剛
東京製綱		古瀬　徳明
港湾空港技術研究所	正会員	加藤　絵万
港湾空港技術研究所	正会員	岡崎　慎一郎
北海道大学大学院	フェロー会員	横田　弘

1．目的

優れた力学特性を有し，腐食しない CFRP を補強筋および緊張材に用いることでコンクリート構造物の力学性能や耐久性を向上させ，ライフサイクルコストを低減できる可能性がある．

そこで，本研究では，PC 桟橋の上部工を取り上げ，従来の炭素棒鋼に替えて CFRP 棒材を適用することを目的に検討を行った．CFRP 緊張材および補強筋を配置した実物大の PC ホロー桁を対象に載荷実験を行い部材の力学性能を評価した．その結果，従来の PC ホロー桁と同等の力学性能を有することを確認した．

2．供試体

2.1 概要

供試体は，実際の桟橋上部工の PC 主桁を実物大でモデル化したもの 1 体(Case-0)と，同一の諸元で PC 鋼より線の一部を CFRP 緊張材に置き替えたもの 1 体(Case-6)とした．

いずれの供試体の製作においても，国内 PC 製品工場の一般の PC 桁製造ラインを使用して行い，同一のコンクリート配合で，同一の打設・(蒸気)養生条件とした．

供試体の断面は，**図-1** に示すように，高さ 550mm, 幅 700mm であり, 長さは 9900mm とした．

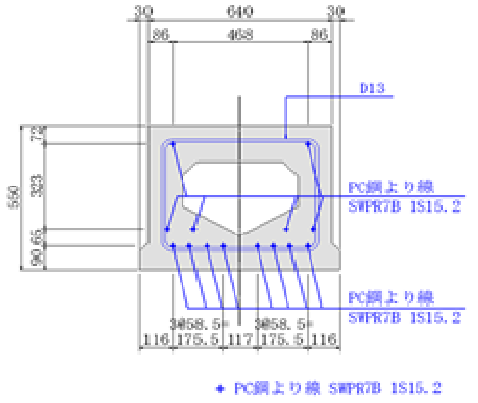
2.2 CFRP 供試体の特徴

CFRP を使用した供試体（Case-6）は，次の特徴を有するように設計した．

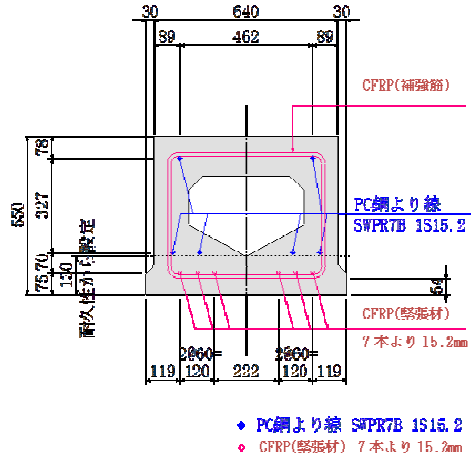
①設計供用期間 50 年と想定し，その間にコンクリート中の塩化物イオン濃度が発錆限界(ここでは 1.2kg/m^3)を超える位置の補強鋼材を CFRP に入れ替えた．その結果，最下縁側の緊張材およびせん断補強筋を CFRP とした．なお，支点連結部の補強筋については，下側筋は CFRP とし，上側筋は普通鋼材とした．

② 腐食の心配がないので，CFRP せん断補強筋の桁下縁側のコンクリートかぶりを 50mm とした．なお、桁の上面側は普通鋼材を用いコンクリートかぶりを 70mm とした．

③ ②に伴い，CFRP 緊張材の位置を桁下縁側から 75mm に配置し、比較材の緊張材配置と比べて偏心量を大きくした．



Case-0 比較供試体桁 ［PC 鋼より線］



Case-6 CFRP 使用供試体桁[CFRP + PC 鋼より線]

図-1　供試体の桁中央断面

キーワード　連続繊維補強材，CFRP，PC 桟橋，港湾構造物，維持管理
連絡先　〒103-8306　東京都中央区日本橋 3-6-2　東京製綱株式会社 TCT 推進本部　TEL．03-6366-7731

このように, 使用限界状態の最大載荷荷重(変動荷重)作用時の桁中央断面の応力状態が, 比較材供試体とほぼ同じになるように設計した.

なお，供試体の設計においては，既存の設計・施工指針（案）等[1-3]を参照した.

炭素鋼の鋼材を使用せず，全ての緊張材と補強筋を CFRP とした実物大の PC 桁は，米国等において，いくつかの研究と実際の道路橋として建設した実施例がある[4-6]．しかし，部分的に CFRP を緊張材として適用した PC 桁，すなわち，緊張材として鋼材と CFRP という弾性係数の異なる材料を同一断面に適用した桁は，設計の考え方としてはあったものの，製作と載荷試験が実施されたのはこの研究が初めてである.

2.3 使用材料

供試体 Case-0 の緊張材は, PC 鋼より線 SWPR7B 1S15.2 であり，せん断補強筋としては SD345 の異形鉄筋の D13 および D16 を使用した．供試体 Case-6 の緊張材は, 直径 15.2mm のより線状 CFRP と PC 鋼より線 SWPR7B 1S15.2 を使用し，せん断補強筋には直径 7.5mm のより線状 CFRP と直径 10.5mm のより線状 CFRP を使用した．**表-1** に使用した PC 緊張材の主な仕様を示す.

コンクリートは，普通ポルトランドセメントを使用し，設計基準強度を 50N/mm^2 とした．コンクリートの材齢 24 日(Case-0)と 27 日(Case-6)に載荷試験を行った．それぞれの時点でのコンクリートの圧縮強度は 50.0N/mm^2 および 55.8N/mm^2 であった.

表-1　緊張材の仕様

項目		PC 鋼より線 SWPR7B 15.2 mm	CFRP 7 本より 15.2mm	備考
供試体番号		Case-0, 6	Case-6	
有効断面積(mm^2)		138.7	115.6	
引張荷重(kN)		261	270	
引張応力度(N/mm^2)		1850	2336	
初期引張応力度(N/mm^2)		1350	1800	
降伏荷重(kN)		222	－	
降伏点応力度(N/mm^2)		1570	－	
引張応力度の制限値 (N/mm^2)	使用限界状態 $0.7f_{fpu}$	1295	1635	※1
	緊張作業中 $0.8f_{fpu}$	1480	1869	
	緊張作業直後 $0.7f_{fpu}$	1295	1635	
弾性係数(kN/mm^2)		200	155	※2
単位重量(g/m)		1101	221	
リラクセーション率	PC 導入前	1.5	6.0	※3
	高温養生の影響	1.0	1.0	※4

※1 : 応力度の制限値(限界値)は「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)」を参照した.
※2 : 製品カタログ値より.
※3 : CFRP より線の見かけのリラクセーション率は「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)」を参照した.
※4 : PC 鋼より線と同等と考えた。CFRP より線の方が PC 鋼より線よりもリラクセーションに対する温度影響は小さい.

2.4 供試体の製作

CFRP 緊張材は，専用の接続金具を使用して接続した PC 鋼より線で製作アバットに緊張・固定した． CFRP と PC 鋼より線を緊張材として同一断面に有する Case-6 の緊張作業は，2 段階に分けて，それぞれの緊張材ごとに緊張する方法で行った．他の工程は，蒸気養生なども含めて，どちらの供試体も同様な条件で実施した．

３．載荷試験

3.1 試験方法

載荷試験は，図-2 に示すように，桁の支間長を 9600mm，曲げスパンを 1000mm とする 4 点曲げ載荷として行った．載荷は，次の 3 つのステップで行い，載荷荷重を 5kN ずつ増加させ，ロードセルで測定した載荷荷重とスパン中央のたわみ量を変位計で測定し，記録した．

(1) 初期ひび割れ発生荷重まで単調載荷し除荷．
(2) PC 鋼より線の降伏相当荷重まで単調載荷し除荷．
(3) 破壊まで単調載荷．

なお，使用限界状態，すなわち変動応力作用時相当荷重(116 kN)載荷時までの挙動を主に検討した．

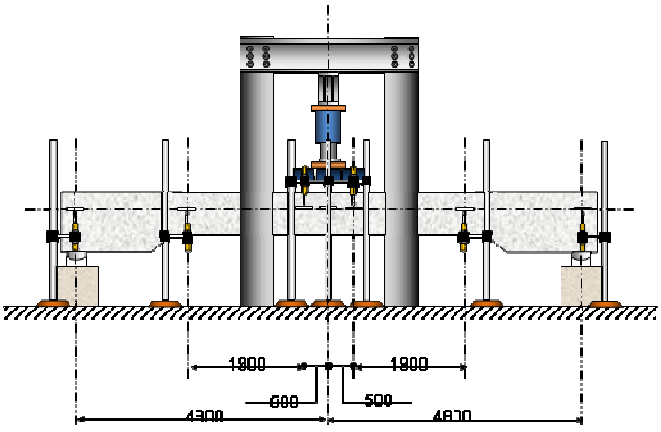


図-2 載荷試験方法

3.2 試験結果

供試体 Case-0 と Case-6 の初期ひび割れが発生する載荷荷重までの荷重－たわみ曲線を図-3 に示す．同図に示すように，Case-0 と Case-6 の荷重－たわみ曲線は，ほぼ一致した．

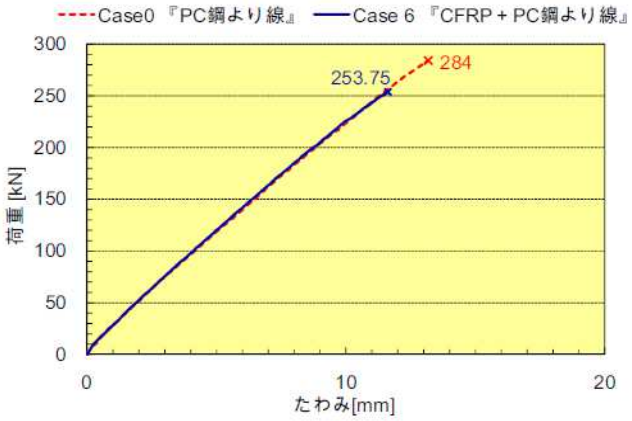


図-3 荷重－たわみ 曲線
（初期ひび割れ発生まで）

さらに，PC 鋼より線の降伏相当荷重まで単調載荷したあと除荷し，その後，桁の破壊まで単調載荷を行った際の荷重－たわみ曲線を図-4 に示す．Case-0 は，たわみ量が 147mm(載荷荷重 524.5kN)となるまで曲げ変形したあと，支間中央付近の桁上縁側のコンクリートが圧縮破壊した．Case-6 は，たわみ量が 197mm(載荷荷重 590.5kN)まで曲げ変形したあと，桁内部からの大きな音の発生とほぼ同時に支間中央付近の桁上縁側コンクリートが圧縮破壊した．

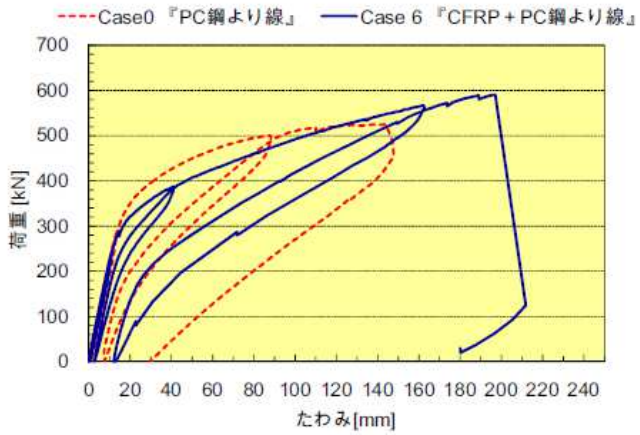


図-4 荷重－たわみ 曲線
（供試体曲げ破壊まで）

４．考察

図-3 に示したように，使用限界状態である最大載荷荷重(116kN)作用時までの荷重－たわみ曲線がほぼ一致したことから，緊張材が CFRP であっても，所定の載荷荷重作用時において桁断面の応力状態を合わせる設計を行うことで，同様の曲げ性能を有する PC ホロー桁を製作できることが確認できた．

また，図-4 に示したように，初期ひび割れ発生後は，いずれの桁も同様に載荷荷重に対するたわみ量の増加量が大きくなり(荷重－たわみ曲線の傾きが小さくなり)，最終的に桁が破壊するまでに，いずれの桁も大きなたわみ変形を呈することが確認できた．このことは，材料そのものとしては降伏点を持たず，引張破断時まで塑性変形をしない CFRP を緊張材に使用した場合も，PC 桁としては十分に大きな変形性能を有する設計ができることを示していると言える．

載荷試験直前の緊張材のひずみから算出した導入プレストレス量を参考に，それぞれの供試体について初期ひび割れ荷重とその時点のたわみ量，および終局状態での載荷荷重を算出した結果を表-2 に示す．

同表には，載荷試験結果で得られた値も並記している．計算値は試験値とおおむね一致しており，従来の PC 桁に適用されている計算法を CFRP を用いた PC 桁にも適用できると言える．

５．まとめ

CFRP を PC 桁の緊張材および補強筋に使用した場合，従来の PC 鋼より線を使用した場合と同等の曲げ性能を有する桟橋用 PC ホロー桁を設計できることが確認できた．今後，ライフサイクルコストの低減と併せた設計施工の考え方を整理したい．

表-2　計算値と試験結果の比較

Case-0[比較供試体桁：緊張材が「PC 鋼より線」]

項目		計算値	試験結果
初期ひび割れ	載荷荷重（kN）	245.4	284.0
	たわみ量（mm）	14.8	13.2
終局状態	載荷荷重（kN）	505.5	524.5
	たわみ量（mm）	－	147.1
	桁の破壊状態	桁上縁側コンクリート圧縮破壊	桁上縁側コンクリート圧縮破壊

Case-6[CFRP 桁：緊張材が「CFRP＋PC 鋼より線」]

項目		計算値	試験結果
初期ひび割れ	載荷荷重（kN）	215.3	253.8
	たわみ量（mm）	12.8	11.62
終局状態	載荷荷重（kN）	460.7	590.5
	たわみ量（mm）	－	197.1
	桁の破壊状態	桁上縁側コンクリート圧縮破壊	異音発生と同時に，桁上縁側コンクリート圧縮破壊

参考文献

1)土木学会：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)，コンクリート・ライブラリー第 88 号，1996.9

2)沿岸開発技術研究センター：CFRP を補強材または緊張材として用いた PC 桟橋の設計･施工の手引き(案)，1993.3

3)ACC 倶楽部：連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物設計･施工マニュアル(案)，5 訂版，2003.10

4) Grace, N. F., Enomoto, T., Abdel-Sayed, G., Yagi, K. and Collavino, L.: Experimental Study and Analysis of a Full-Scale CFRP/CFCC Double-Tee Bridge Beam, PCI Journal, Vol.48, No.4, pp.120-139, 2003.7

5) Grace, N. F., Navarre, F. C., Nacey, R. B., Bonus, W., Collavino, L.: Design-Construction of Bridge Street Bridge – First CFRP Bridge in the United States, PCI Journal, V. 47, No. 5, pp. 20-35, 2002. 9-10

6) MDOT Video News Release: https://www.youtube.com/watch?v=CHG9vOvix3g