

論文 炭素繊維で補強された PC 実桁の力学的特性について

葛西康幸^{*1}・北園英明^{*2}・内田裕市^{*3}・小柳 洽^{*4}

要旨：TL-20 荷重の設計により、交通量の多い道路橋で 27 年間供用され、鉄道高架事業に伴い不必要となって撤去されたプレテンション I 桁に対し、B 活荷重対応を目的として各種炭素繊維で補強を行った供試体を製作した。これらの桁に対し静的曲げ載荷試験およびモーメント-曲率関係の解析を行い、炭素繊維で補強された PC 実桁の力学的特性、各種炭素繊維補強材による補強効果について比較検討を行った。

キーワード：炭素繊維，補強，力学的特性，載荷試験，B 活荷重

1. はじめに

近年、道路橋示方書¹⁾の改訂に伴い、旧活荷重対応で設計された鉄筋コンクリート (RC) およびプレストレストコンクリート (PC) 製の既設橋梁に対し、新活荷重に対応させるための各種補強工事が行われている。PC 橋の補強工法には、外ケーブルや炭素繊維を用いた工法などがあるが、炭素繊維による補強工法は RC の場合に比べ実験例が少なく、また、PC 桁に炭素繊維補強工法を用いた場合の設計手法も確立されていない。さらに、旧活荷重で長年月供用された実桁について、炭素繊維補強材を用いて新活荷重対応の補強を行った場合の効果や、補強桁の力学的特性については十分に把握されていない。

著者らは、TL-20 荷重で設計され、交通量の多い道路橋として 27 年間供用されたプレテンション I 桁について、B 活荷重対応を目的とした炭素繊維補強設計を行い、各種補強による供試体を製作し、無補強を含めた供試体について静的曲げ載荷試験を行ってきた^{2),3)}。本論文では、それらの結果より、各種炭素繊維補強材で補強された PC 実桁の力学的特性とその補強効果について検討を行った。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

本試験では、スラブ橋から取り出したプレテンション I 桁の、①無補強桁 (NS)、②炭素繊維シート補強桁 (CFS)、③高弾性炭素繊維シート補強桁 (HMCFS)、④炭素繊維プレート補強桁 (CFP) の 4 体について、破壊に至る静的な曲げ載荷試験を行った。なお、補強桁は TL-20 荷重で設計された桁を B 活荷重対応に補強したものであり、各補強桁の補強レベルは同等である。供試体種別および供試体の断面形状をそれぞれ表-1、図-1 に示す。また、補強材として用いた各種炭素繊維の規格値と試験値を表-2 に、接着剤の規格値を表-3 に示す。

2.2 コンクリートおよび PC 鋼材の物性値 試験終了後の供試体より採取した、コンクリ

表-1 供試体種別

供試体種別	呼び名	補強方法および補強量
無補強桁	NS	—
炭素繊維シート補強桁	CFS	炭素繊維シート 幅300mm, 8層
高弾性炭素繊維シート補強桁	HMCFS	高弾性炭素繊維シート 幅300mm, 3層
炭素繊維プレート補強桁	CFP	炭素繊維プレート 幅48mm, 厚さ2mm, 6枚並列

*1 ㈱安部工業所技術本部技術部水道技術課 修(工) (正会員)
 *2 ㈱安部工業所技術本部技術部メンテナンス課課長補佐 (正会員)
 *3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)
 *4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

ートおよび PC 鋼材の強度試験結果を表-4 に示す。コンクリートおよび PC 鋼材の強度については、27 年間の供用による設計値・規格値に対する劣化はみられず健全な状態であった。

2.3 炭素繊維補強桁の設計手法

B 活荷重対応の設計荷重に対して、ここでは以下に示すような、コンクリートに発生する引張応力度を許容引張応力度以下とする PC 部材としての設計を行い補強材量を決定した。なお、終局荷重に対しては、炭素繊維補強桁の終局状態の考え方が不明確な部分が多いため、ここでは考慮していない。

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_1 < \sigma_t \quad (1)$$

ここに、

σ : 設計荷重時の桁下縁コンクリートの引張応力度

σ_0 : 補強前に桁下縁に発生している死荷重による引張応力度

σ_1 : 補強後に B 活荷重が作用したとき発生する桁下縁の引張応力度

$$\sigma_1 = M_1 / Z \quad (2)$$

M_1 : B 活荷重による支間中央での曲げモーメント

Z : PC 鋼材および炭素繊維補強材を考慮した換算断面の断面係数

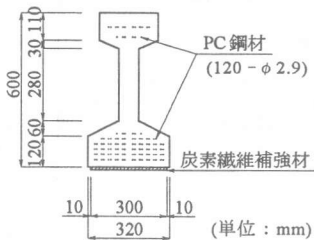


図-1 断面形状図

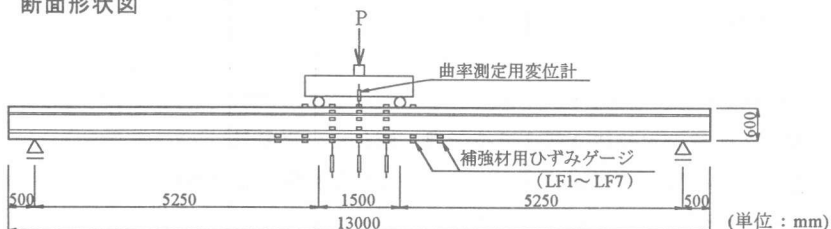


図-2 荷重試験側面図

σ_t : PC 部材としての許容引張応力度

2.4 炭素繊維補強材の接着方法

炭素繊維シートおよび高弾性炭素繊維シートの接着については、桁下面のサンダーによる下地処理後、プライマー塗布、パテ処理を行い、接着剤の下塗り、炭素繊維シートの貼付け、接着剤の上塗りを必要枚数繰返し貼付けた。炭素繊維プレートについては、同様の下地処理後、接着剤を塗り付け、炭素繊維プレートを手で押さえ付けて貼付けた。

2.5 荷重方法および測定項目

荷重試験には、定格荷重 1470kN の荷重試験機を用い、2 点集中(荷重スパン: 12.0m, 等曲げモーメントスパン: 1.5m)の静的荷重とした。

表-2 炭素繊維補強材の規格値と試験値

	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	厚さ (mm)
炭素繊維シート 規格値	3,400	2.30×10 ⁵	0.167
炭素繊維シート 試験値	3,942	2.54×10 ⁵	—
高弾性炭素繊維シート 規格値	1,900	6.40×10 ⁵	0.143
高弾性炭素繊維シート 試験値	2,894	6.66×10 ⁵	—
炭素繊維プレート 規格値	2,200	1.55×10 ⁵	2.0
炭素繊維プレート 試験値	2,204	1.52×10 ⁵	—

表-3 接着剤の規格値

	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)
炭素繊維シート用	29.4以上	39.2以上	—	—
炭素繊維プレート用	19.6以上	49.0以上	68.6以上	3,920以上

(共にエポキシ系)

表-4 コンクリートおよび PC 鋼材の強度試験結果

供試体種別	コンクリート				PC 鋼材 引張強度 (N/mm ²)
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	
設計値・規格値	49.1	—	3.92×10 ⁴	—	1,923
NS	59.4	3.90	3.41×10 ⁴	0.208	1,929
CFS	73.6	4.06	3.84×10 ⁴	0.207	1,929
HMCFS	63.2	4.14	3.75×10 ⁴	0.197	2,050
CFP	61.2	4.16	3.58×10 ⁴	0.193	1,961
平均値	64.4	4.07	3.65×10 ⁴	0.201	1,967

測定項目は、桁上下面および側面のひずみ、支間中央および荷重点下の変位等である。なお、対称荷重点に対するスパン中央の相対変位を、上フランジ側面に取り付けた鋼製ビームを介して高感度変位計により計測することで、等曲げモーメントスパン内の平均曲率を求めた。また、荷重ステップごとに、桁に発生したひび割れの状況を記録した。荷重試験側面図を図-2に示す。

3. 試験結果

3.1 破壊性状

各供試体の破壊形態は、いずれの供試体も曲げひび割れ進展に伴うコンクリート上面の圧壊であった。炭素繊維シート補強桁および炭素繊維プレート補強桁については、破壊に至るまで補強材に破断やコンクリート面とのはがれはみられなかった。高弾性炭素繊維シート補強桁についても破壊時まではがれはみられなかったが、荷重荷重 160.8kN から破壊荷重に達する間に支間中央、両荷重点下の順に 3カ所においてシートが破断した。破断箇所においてはシートにコンクリートが付着して剥がれており、接着施工の問題はなかった。

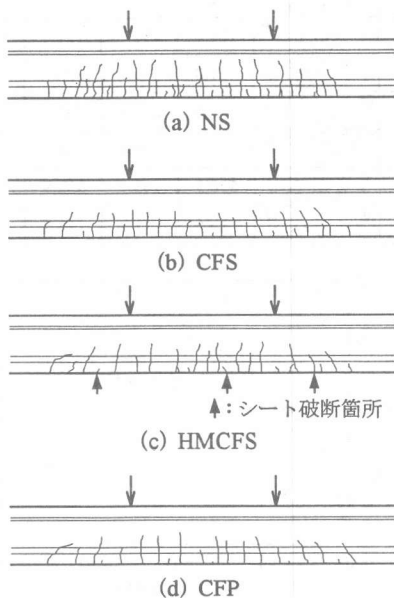


図-3 ひび割れ図(中央点たわみ 50mm 時)

3.2 ひび割れ状況

各供試体の中央点たわみが 50mm に達した時のひび割れ図を図-3に示す。無補強桁のひび割れは大きいもので上フランジ付け根付近(桁上縁より 200mm)まで達しているのに対し、補強桁では断面高さの 1/2 程度(桁上縁より 300mm)までしか進展していない。また、無補強桁のひび割れ間隔は 100mm 程度であるのに対し、各補強桁では 150~200mm と広い間隔となった。ひび割れ幅については、無補強桁に比べ補強桁は小さかったが、補強材による差異は顕著ではなかった。

3.3 桁内ひずみ分布

荷重試験結果から得られた、B 活荷重相当荷重 (P=69.6kN) 作用時の各供試体中央断面のひずみ分布を図-4に示す。各供試体ともひずみは桁上面から下面まで直線的に分布しており、炭素繊維補強材とコンクリート面にすべりは生じておらず、断面の平面保持が成立している。また、無補強桁と補強桁の顕著な違いはみられなかった。

3.4 荷重-変形状

各供試体の荷重試験結果一覧を表-5に、荷重-中央点たわみ曲線、モーメント-曲率曲線を図-5、図-6に示す。ここで、表-5に示すひび割れ発生荷重とは、目視によりひび割れが確認された荷重であり、剛性変化荷重とは、図-5、図-6に示す荷重-中央点たわみ曲線およびモーメント-曲率曲線の勾配が急激に変化する

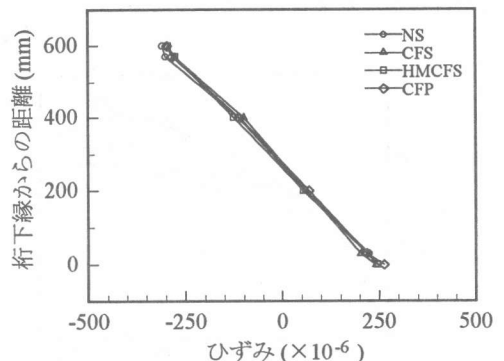


図-4 桁中央断面のひずみ分布 (B 活荷重相当荷重作用時)

る点での荷重である。

表-5 より、炭素繊維シート補強桁および高弾性炭素繊維シート補強桁のひび割れ荷重は、無補強桁に比べ約 1.1~1.2 倍大きくなったが、炭素繊維プレート補強桁については、無補強桁とほぼ同程度となった。剛性変化荷重については、いずれの補強桁についても無補強桁に比べ約 1.1 倍大きくなった。また、破壊荷重は無補強桁に比べ炭素繊維シート補強桁で約 1.4 倍、炭素繊維プレート補強桁で約 1.3 倍と大きくなったが、高弾性炭素繊維シート補強桁については無補強桁と同程度であった。

図-5、図-6 より、補強桁では剛性変化荷重は大きくなるものの、初期剛性すなわち剛性変化前の剛性に対する補強材の種類の影響はみられなかった。一方、剛性変化後の剛性は無補強桁に比べ炭素繊維シート補強桁および炭素繊維プレート補強桁の方が大きくなった。しかし、高弾性炭素繊維シート補強桁については、シートが破断するごとに剛性が低下し、破壊時の荷重および変形は無補強桁とほぼ同様になった。また、補強材破断時に荷重が低下するため、荷重-中央点たわみ曲線およびモーメント-曲率曲線はノコギリ型の形状となった。

4. モーメント-曲率関係の解析

本試験の供試体 4 体について、桁中央断面におけるモーメント-曲率関係の解析を行った。本解析は、コンクリートお

よび PC 鋼材の応力-ひずみ曲線をモデル化し、断面における平面保持の仮定と、力の釣り合い条件からモーメント-曲率関係を求めるいわゆるファイバーアナリシスである⁴⁾。コンクリートの応力-ひずみ曲線には、圧縮側については土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾に示されている 2 次放物線にモデル化し、引張側については岡村・前川モデル⁶⁾を用いた。PC 鋼材については、土木学会コンクリート標準示方書に示されているトリリニア型にモデル化した。なお、解析に必要な物性値については、表-2 中の試験値および表-4 中の平均値を用いた。

これらの解析により得られた結果と実測値との比較を図-7 に示す。無補強桁、炭素繊維シート補強桁、炭素繊維プレート補強桁の実測値と解析値はよく一致した。これに対し、高弾性

表-5 載荷試験結果一覧

供試体種別	NS	CFS	HMCFS	CFP	
TL-20 荷重相当					
荷重 (kN)		57.9			
B活荷重相当時					
荷重 (kN)		69.6			
JIS A 5313-1959 破壊時(規格値)					
荷重 (kN)		191.2			
ひび割れ発生時	荷重 (kN)	96.1	113.8	104.0	98.1
	中央点たわみ (mm)	18.9	20.8	19.7	19.3
	モーメント (kN·m)	252.0	298.6	272.9	257.4
	曲率 ($\times 10^{-3}/m$)	1.3	1.5	1.4	1.3
剛性変化点	荷重 (kN)	121.6	137.3	131.4	136.3
	中央点たわみ (mm)	25.8	26.7	26.9	29.6
桁破壊時	荷重 (kN)	202.0	283.4	203.0	265.8
	中央点たわみ (mm)	153.7	143.6	156.3	134.8
	モーメント (kN·m)	530.3	743.9	532.9	697.6
	曲率 ($\times 10^{-3}/m$)	16.5	11.7	18.7	11.5

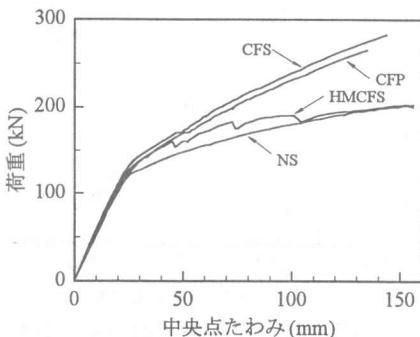


図-5 荷重-中央点たわみ曲線

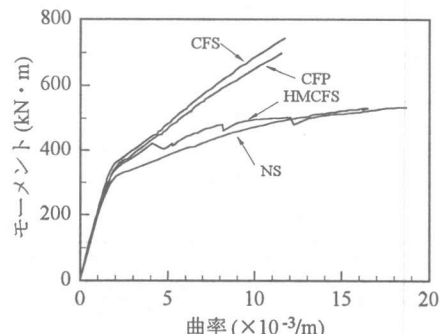


図-6 モーメント-曲率曲線

炭素繊維シート補強桁については、解析においては曲率が $9.5 \times 10^{-3}/m$ においてシートが破断し、その後は無補強桁と同じ性状を示しているが、実験においては解析よりも低い荷重レベルでシートが破断したため、解析値と実測値は異なる結果となった。なお、最初のシート破断荷重におけるシートの引張応力度は、解析では約 $800N/mm^2$ であり、高弾性シートの引張強度の規格値に対して約 40%であった。また、いずれの供試体についても、解析はコンクリートの圧縮縁ひずみが 2500×10^{-6} に達した時点で終了とした。解析終了時の PC 鋼材のひずみは、無補強桁および高弾性炭素繊維シート補強桁については約 1.2%、炭素繊維シート補強桁および炭素繊維プレート補強桁については約 0.9%であった。

5. 考察

各供試体のひび割れ性状から、炭素繊維で補強することによるひび割れ抑制に対する効果は大きいことがわかった。

また、断面の高さ方向のひずみ分布の測定結果より、桁断面に平面保持が成り立っており、平面保持を仮定し、炭素繊維を断面換算した方法での耐力算定が可能であることがわかった。ただし、ひび割れ荷重や初期剛性に対する補強効果は、明確には確認できなかった。これらについては今後さらに検討が必要であるが、剛性変化荷重については、いずれの補強桁も補強効果が明確に現れた。

炭素繊維シート補強桁および炭素繊維プレート補強桁については、剛性変化荷重および破壊荷重ともに無補強桁より大きくなるため、使用状態の荷重に対して設計した場合でも終局状態に至るまでその補強効果は維持されると考えられる。

高弾性炭素繊維シート補強桁については、剛性変化荷重は他の補強桁と同様に無補強桁より大きくなり、他の補強桁と差はないと考えられる。しかし、剛性変化荷重以降はシートの破断により、無補強桁とほぼ同様の性状となった。したがって、終局状態までは補強効果が維持さ

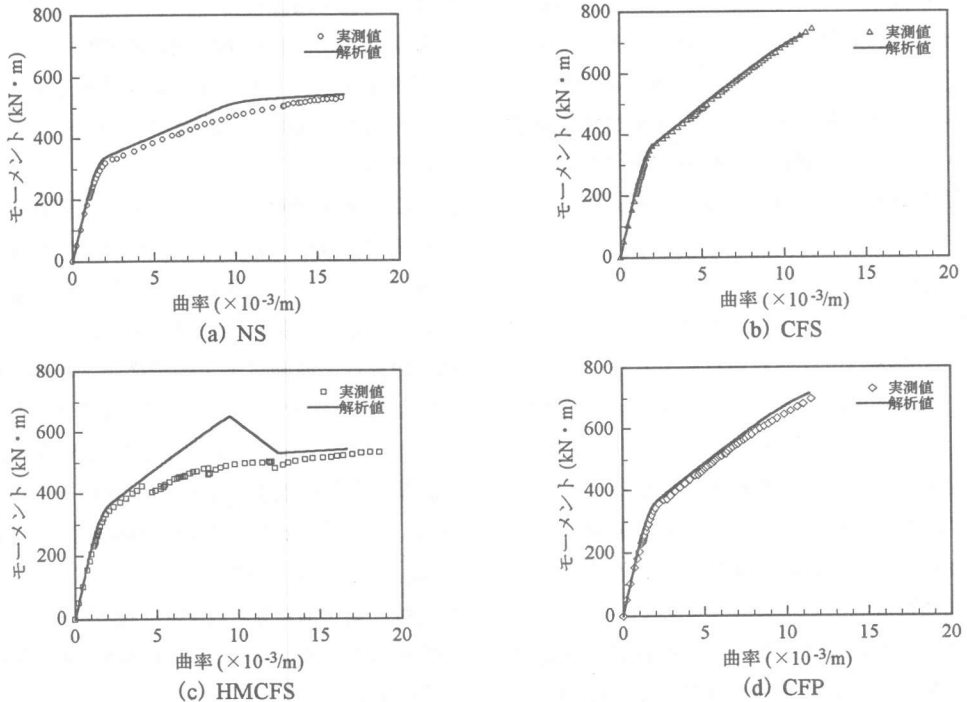


図-7 モーメント-曲率曲線の実測値と解析値の比較

れない。最初の高弾性炭素繊維シート破断時におけるシートのひずみ測定結果を表-6に示す。表-6より、高弾性炭素繊維シート破断時のひずみは、シートの引張強度ひずみに達していない。なお、高弾性炭素繊維シートに破断が生じたのは、ひび割れの進展に伴いひび割れ位置でシートに応力集中が生じたためではないかと考える。以上の点から、高弾性炭素繊維シートの場合、剛性変化荷重を大きくすることを目的とした補強であれば、標準タイプの炭素繊維シート数層分を1枚で補強できるため、施工の省力化・工期短縮を期待できる有効な補強材料であるが、終局荷重については向上しない点を考慮する必要がある。したがって、これらの炭素繊維補強材を用いて補強を行う場合には、剛性変化荷重、終局荷重等の補強目的を明確にし、それに適した方法により補強する必要がある。

本研究では、設計荷重に対してコンクリートに発生する引張応力度を許容値以下とするPC構造としての補強設計を行った。しかし、これらの設計手法では、標準タイプの炭素繊維シートや炭素繊維プレートの場合、炭素繊維の高強度という材料特性を活かしきれていないことが考えられる。したがって、炭素繊維補強材自体の破壊性状等を把握した上で、補強性能を明確にすれば、より合理的なPC桁に対する炭素繊維補強の設計手法が確立できるものとする。

6. まとめ

本研究で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 炭素繊維で補強することにより、ひび割れおよび変形が抑制される。したがって、剛性が変化する荷重レベルが大きくなる。
- (2) 平面保持を仮定し、炭素繊維を断面換算した方法により、炭素繊維補強桁の耐力算定が可能である。
- (3) 炭素繊維補強材を用いて補強を行う場合には、剛性変化荷重、終局荷重等の補強目的を明確にし、それに適した方法により補強する

表-6 高弾性炭素繊維シート破断時のひずみ

	荷重 (kN)	ひずみゲージ測定値(×10 ⁻⁶)						
		LF1	LF2	LF3	LF4	LF5	LF6	LF7
1回目破断	160.8	1135	1477	857	1213	1527	1452	1031
2回目破断	183.4	1770	2081	558	1370	2088	2062	1679
3回目破断	191.2	1590	57	446	-16	2177	2311	1934
引張強度ひずみ		2,969(規格値より算出)						

(ひずみゲージ番号は図-2参照)

必要がある。

- (4) 炭素繊維補強材自体の破壊性状等を把握した上で、補強性能を明確にすれば、より合理的なPC桁に対する炭素繊維補強の設計手法が確立できる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、三菱化学(株)、東レ(株)には、炭素繊維シートおよびプレートの提供をはじめ多大なご協力をいただいた。関係各位に深甚なる感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編，1996.12
- 2) 北園英明・西尾浩志・内田裕市・小柳 洽：炭素繊維補強したPCI桁の破壊特性について，第8回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.643-648，1998.10
- 3) 葛西康幸・北園英明・今尾勝治・西尾浩志：各種FRP補強したPC桁の破壊特性について，構造物の診断と補修に関する第10回技術・研究発表会論文集，pp.1-7，1998.11
- 4) 名和真一・浦瀬富夫・内田裕市・小柳 洽：PC鋼棒の応力-ひずみ曲線とPC曲げ部材の挙動に関する研究，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集第5部，pp.406-407，1997.9
- 5) (社)土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，pp.17-40，1996.3
- 6) 岡村 甫・前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，pp.27-60，1991.5