

(125) 炭素繊維補強したPCI桁の破壊特性について

(株)安部工業所 技術本部技術部 ○正会員 北園 英明  
 同 上 正会員 西尾 浩志  
 岐阜大学 工学部 土木工学科 正会員 内田 裕市  
 同 上 正会員 小柳 治

1. はじめに

平成5年の示方書の改訂に伴い、TL-14荷重をA活荷重対応へ、TL-20荷重をB活荷重対応へとする橋梁の補強工事が増えつつある。これらに用いられる方法のひとつとして、炭素繊維シートを桁の下面および側面に貼り付ける補強工事がある。

本研究は、①27年間供用されたプレテンションI桁の耐力調査、②プレテンションI桁の無補強桁、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耐力比較、③補強によるプレテンションI桁の力学的特性の把握を目的として、実際に27年間交通量の多い道路橋として供用したPCスラブ橋からプレテンションI桁(JIS A 5313-S113-1959)を取り出し、そのプレテンションI桁の無補強桁、炭素繊維シートにて補強した桁および炭素繊維プレートにて補強した桁に対して、破壊に至る静的繰返し載荷試験を行ったものである。

以下に試験概要、試験結果および解析結果を述べる。

2. 試験概要

本研究では、次の種類の桁に対して載荷試験を行った。

- ①無補強桁
- ②桁下面に幅300mmの炭素繊維シートを8層貼り付けた桁
- ③幅48mmの炭素繊維プレートを横に6列並べて貼り付けた桁

なお、②、③については、設計荷重をTL-20からB活荷重に変更することを想定している。炭素繊維シートおよび炭素繊維プレートの諸元を表-1に、

表-1 炭素繊維シートおよび炭素繊維プレートの諸元

	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	厚み (mm)
炭素繊維シート 目付量 300g/m <sup>2</sup>	35,000	2.35×10 <sup>6</sup>	0.167
炭素繊維プレート	24,490	1.59×10 <sup>6</sup>	2.0

接着剤の諸元を表-2に、供試体の形状、補強材貼り付け位置および変位ならびにコンクリート表面ひずみの計測位置を図-1に示す。

載荷方法については、定格荷重150tfの載荷試験機を使用し、スパンは、12.0m、等曲

表-2 接着剤の諸元

	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )
炭素繊維シート (エポキシ樹脂)	450以上	300以上	580以上	21,000 以上
炭素繊維プレート (エポキシ樹脂)	500以上	200以上	700以上	40,000 以上

げモーメント区間が1.5mの2点集中載荷とした。静的繰返し載荷重ステップ概念図を図-2に示す。載荷の制御方法については、曲げひび割れ発生荷重までは荷重制御にて行い、それ以降については載荷時はた

わみ制御、除荷時は荷重制御にて行った。等曲げモーメント区間の曲率については、両載荷点に対するスパン中央の相対たわみ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(1/1000mm)により計測し求めた。また、ひび割れ調査は、無補強桁については、たわみ量30mm、60mm時に行い、補強桁については、たわみ量30mm、50mm時に行った。

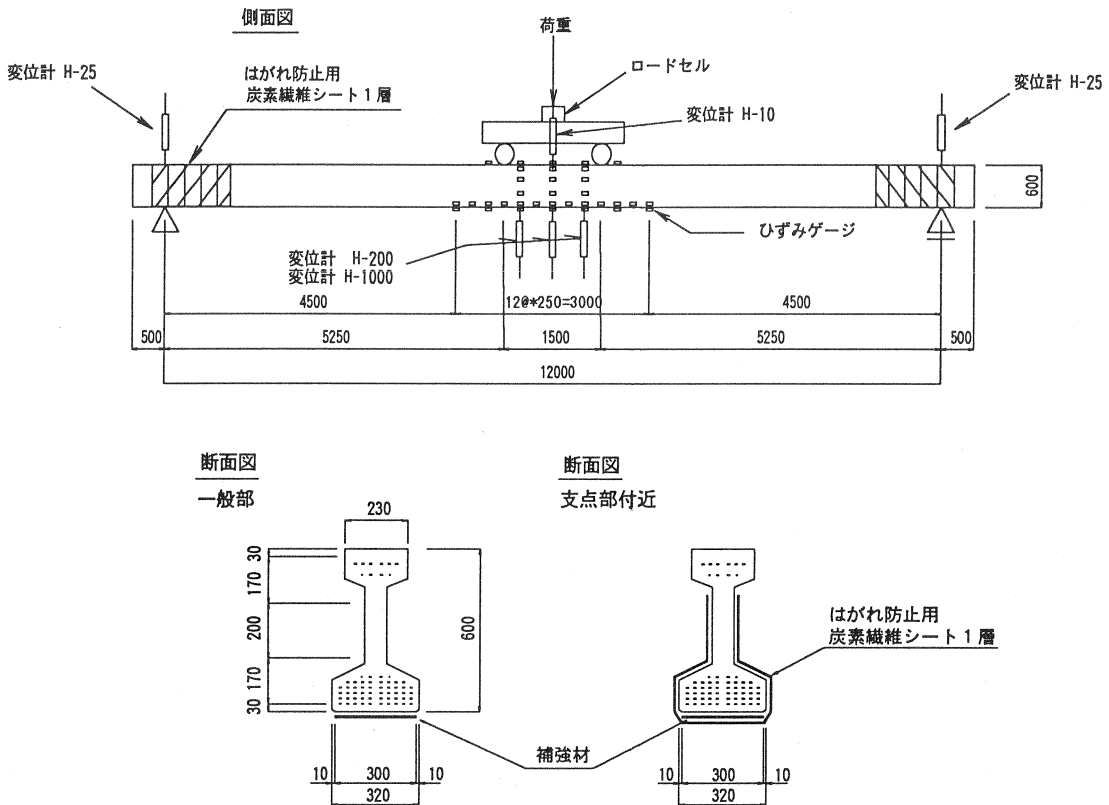


図-1 供試体の形状および補強材貼付図

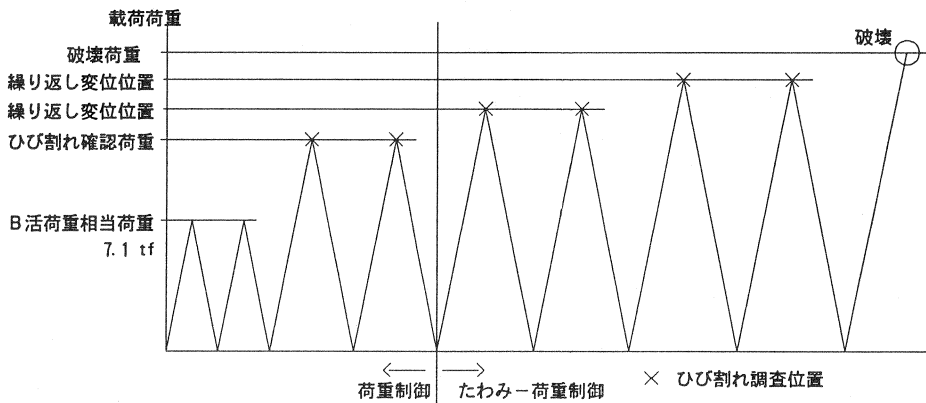


図-2 载荷ステップ概念図

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 曲げひび割れ発生荷重および破壊荷重

試験結果一覧を表-3に示す。ここで示す設計相当荷重とは、TL-20荷重およびB活荷重が載荷されたときの中央断面の曲げモーメントに相当する荷重であり、曲げ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る。

曲げひび割れ発生荷重は、全ての供試体について、設計相当荷重以上であった。なお、炭素繊維シート補強桁の曲げひび割れ発生荷重は、無補強桁の約1.2倍に増加し、曲げひび割れ発生荷重に対する補強効果が確認された。

破壊荷重は、無補強桁が20.4tf、炭素繊維シート補強桁が28.9tf、炭素繊維プレート補強桁が27.1tfであった。無補強桁の破壊荷重は、設計時の破壊抵抗曲げモーメント相当荷重とほぼ一致した。これより、本PCI桁は27年間供用した現在においても設計荷重に対して十分な耐力を保有していることが確認できた。また、炭素繊維シート補強桁の破壊荷重は、無補強桁の1.42倍、炭素繊維プレート補強桁の破壊荷重は無補強桁の1.33倍に増加した。これにより、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終局耐力に関する補強効果を確認することができた。

表-3 試験結果一覧

		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
TL-20荷重相当荷重	荷重 (tf)	5.9		
B活荷重相当荷重	荷重 (tf)	7.1		
JIS A 5313-1959 破壊試験荷重	荷重 (tf)	19.5	—	—
曲げひび割れ発生時	荷重 (tf)	9.8	11.6	10.0
	変位 (mm)	19.2	21.0	19.0
	モーメント (tf・m)	25.7	30.5	26.3
	曲率 ( $\times 10^{-3}/m$ )	1.3	1.5	1.3
剛性変化点	荷重 (tf)	12.2	13.8	13.3
破壊時	荷重 (tf)	20.4	28.9	27.1
	変位 (mm)	157.0	144.8	134.8
	モーメント (tf・m)	53.6	75.9	71.1
	曲率 ( $\times 10^{-3}/m$ )	16.2	11.7	11.5

#### 3.2 破壊に至る挙動

供試体の破壊に至る挙動については、いずれの供試体についても曲げひび割れ発生後、曲げひび割れが進展、その後、載荷点外側の曲げひび割れが載荷点方向に向かうせん断ひび割れに進展し、最後に載荷点外側近傍のコンクリート上面が圧壊するという挙動を示した。なお、供試体に貼り付けた炭素繊維シートおよび炭素繊維プレートには、はがれおよび切断は見られなかった。

供試体破壊時の変位量は、無補強桁が157.0mm、炭素繊維シート補強桁が144.8mm、炭素繊維プレート補強桁が134.8mmであった。補強した桁については、変位量が無補強桁に比較して減少し、破壊荷重が増

加した。炭素繊維シートおよび炭素繊維プレートによる補強には変位の拘束効果があることが確認された。写真-1に炭素繊維プレート補強桁の荷重 17.5tf、たわみ量 50mm の時のひび割れ発生状況写真を示す。

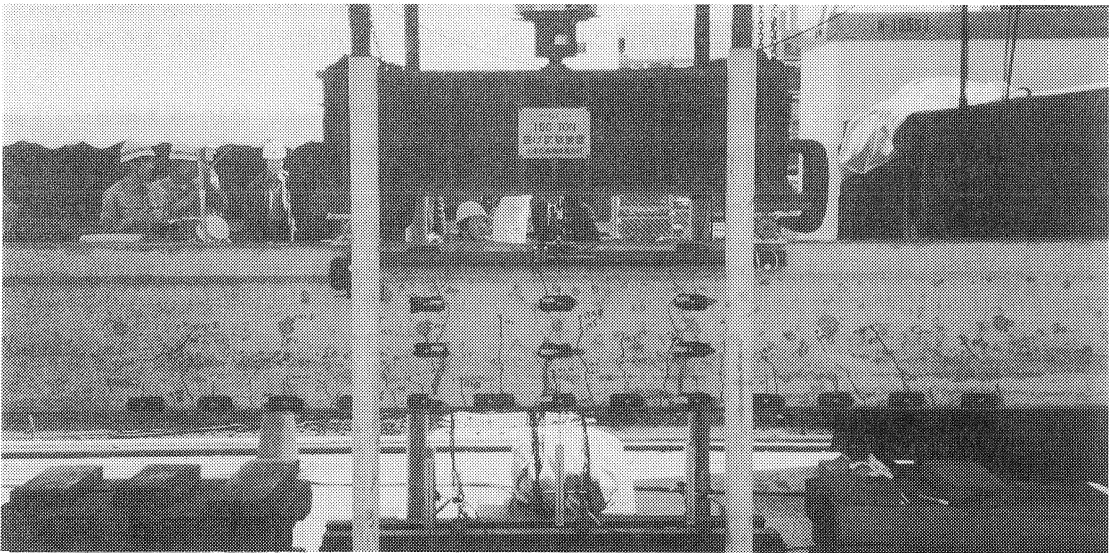


写真-1 ひび割れ状況写真(炭素繊維プレート補強桁)

### 3.3 荷重-中央点たわみ曲線およびモーメント-曲率曲線

図-3に荷重-中央点たわみ曲線、図-4に荷重-中央点たわみ曲線の包絡曲線、図-5に等曲げモーメントスパン内で実測したモーメント-曲率曲線および図-6にモーメント-曲率曲線の包絡曲線を示す。

図-3と図-5中の計測値を比較すると、ほぼ同形状の曲線である。なお、図-3および図-5の履歴曲線より載荷時と除荷時の軌跡の囲む面積が小さく、残留たわみが非常に小さいことが分かる。これらの現象は、プレストレストコンクリート構造物の特色であり、除荷後の残留たわみが小さいという優れた構造特性を確認できた。また、図-4および図-6から、曲げモーメント-曲率曲線において、曲線の勾配が急激に変化する点を剛性変化点として、表-3および図-6に示す。これより、桁を補強することにより剛性変化点の荷重が大きくなることが明らかとなった。

### 3.4 コンクリートおよびP C鋼材の物性値

コンクリートの物性値については、供試体よりコアを採取し、圧縮強度、引張試験、静弾性係数およびポアソン比について測定した。P C鋼材の物性値については引張強度を測定した。表-4に各物性値の設計値・規格値および実測値を示す。各物性値の実測値は、すべてが設計値・規格値を上回っており、27年間の供用による問題はみられない。

## 4. 解析結果

各桁に対して、モーメント-曲率を解析により算定した。解析は、断面における平面保持の仮定と、断面に作用する圧縮応力と引張応力との釣り合い条件をもとに、切断法<sup>1)</sup>を用いて算出した。コンクリートの圧縮応力-ひずみ曲線およびP C鋼材の応力-ひずみ曲線は、土木学会示方書をもとにし、コンクリートの終局ひずみは $2500\mu$ とし、引張軟化は岡村・前川<sup>2)</sup>モデルを用いた。なお、解析に用いた値を表-4中に示し、解析結果を図-7および図-8に示す。

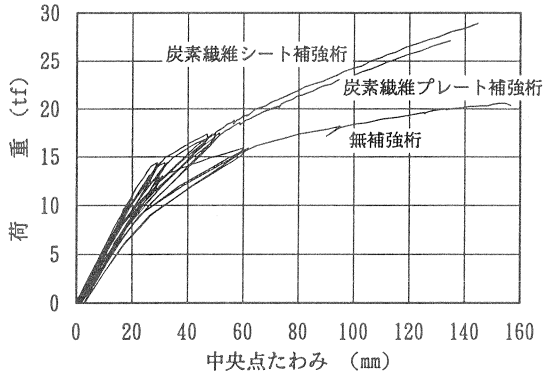


図-3 荷重-中央点たわみ曲線

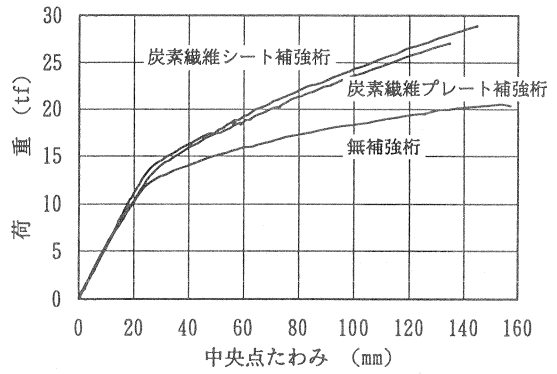


図-4 荷重-中央点たわみ曲線の包絡曲線

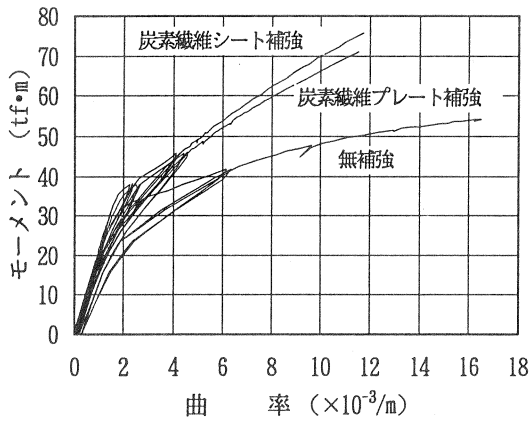


図-5 モーメント-曲率曲線

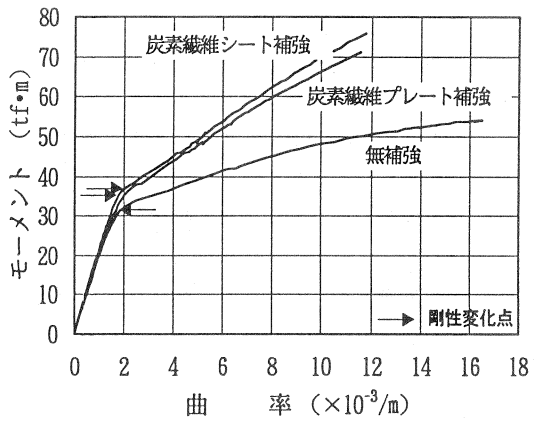


図-6 モーメント-曲率曲線の包絡曲線

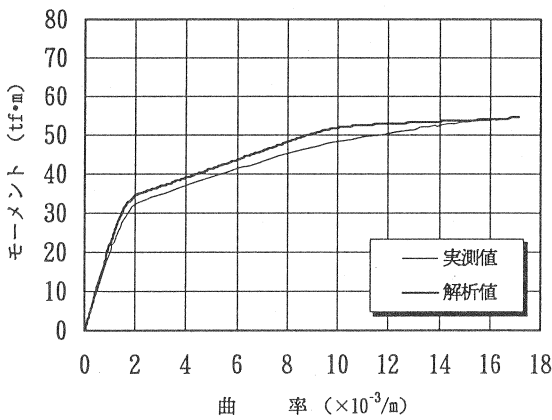


図-7 無補強桁のモーメント-曲率曲線  
解析値および実測値

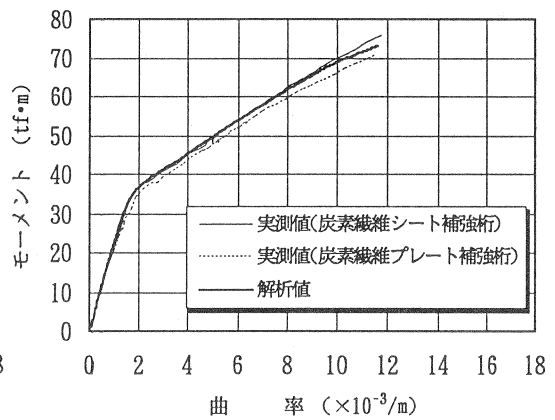


図-8 補強桁のモーメント-曲率曲線  
解析値および実測値

表-4 各物性値の設計値・規格値および実測値

	コンクリート				PC 鋼材
	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比	引張荷重 (kgf)
設計値・規格値	500	—	400,000	—	1,288
無補強桁	606	39.8	347,600	0.208	1,300
炭素繊維シート補強桁	751	41.4	391,500	0.207	1,300
炭素繊維プレート補強桁	624	42.4	364,500	0.193	1,321
解析に用いた値	660	41.2	368,000	—	1,307

## 5. まとめ

本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- ① 27年間交通量の多い道路橋として供用されたプレテンションI桁の曲げひび割れ発生荷重および破壊荷重は、設計相当荷重に対して、十分な耐力を保有し、現在においても安全性が確認された。
- ② 本実験の方法により、精度の高いモーメント-曲率曲線を計測することができた。
- ③ プレストレストコンクリート構造物特有である、除荷後の残留たわみが小さい構造特性を確認でき、履歴曲線の囲む面積が小さい荷重-中央点たわみ曲線およびモーメント-曲率曲線を得た。
- ④ 炭素繊維シート補強は、曲げひび割れ発生荷重に対して補強効果があることが確認された。
- ⑤ 炭素繊維シートおよび炭素繊維プレートによる補強は、終局荷重に対して補強効果があることが確認された。
- ⑥ 桁を補強することにより、剛性変化点の荷重が大きくなることが明らかとなった。
- ⑦ 解析により得られたモーメント-曲率曲線と計測値とはよく一致した。

### <謝辞>

三菱化学(株)高橋啓介氏、張ヶ谷浩一氏ならびに東レ(株)平田亮氏には、炭素繊維シートおよび炭素繊維プレート提供等、本試験に多大な協力を頂きました。ここに記して謹んで謝意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 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。
- 2) 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。