

(104) 炭素繊維シートによるPC桁の補強実験

建設省 土木研究所 ○坂本 浩行
 建設省 土木研究所 西崎 到
 (株)ピー・エス 正会員 神内 隆行
 (株)ニューテック 松浦 栄

1. はじめに

鋼材を補強材としたコンクリート構造物にとって塩害は大きな問題であり、場合によっては鋼材の腐食膨張によりコンクリート断面の欠落につながることもある。

塩害を受けたプレストレストコンクリート(PC)桁の補修は、塩害を受けた他のコンクリート構造物の補修と同様に劣化したコンクリート部分を除去し鉄筋等の防錆処理を行いプレパックドコンクリートなどで断面修復を行う工法と、コンクリート塗装により海塩粒子の浸透を防ぐ表面被覆工法の組合せが一般的に行われている。しかし、塩害が激しくPC鋼線が部分的に腐食損傷をおこしているような場合では、塩害対策と補強効果を併せ持つような工法が求められている。

このような状況下、最近注目されている工法として軽量、高強度、耐食性良好という優れた性能を持つ炭素繊維を既存コンクリート構造物の補強材として用いる工法がある。この工法は既存RC部材の耐震補強¹⁾や道路床版の補強²⁾等を目的とした研究により、補強工法として有効であることが確認されており、実際の補強工事も行われている。さらに、PC桁の補強についても疲労試験を含めた実験が報告されている³⁾。

また、近年道路の交通量増大および車両重量増に伴い道路橋の耐久性が問題となっており、既存コンクリート構造物部材に対する効果的な補強方法が求められている。

本論では実大スケールのポストテンション大型試験体をシート状に加工した炭素繊維(以下炭素繊維シートと称す)で補強し、載荷試験により炭素繊維による補強効果を確認したので報告する。

2. 実験概要

実験は、塩害により一部のPC鋼材が消失し、また断面が一部欠落した状況を想定し断面欠落部分の修復を施したPC桁試験体をシリーズ1として先ず実施した。つぎにシリーズ1の結果を踏まえ一部のPC鋼材が消失しただけの状況を想定したPC桁試験体をシリーズ2として実施した。シリーズ1は無補強、補強各1体の2体、シリーズ2は無補強1体、補強3体の4体とした。表-1に試験体一覧を示す。

表-1 試験体一覧

試験体名	炭素繊維シート種類	貼り付け層数	スカーップ方向貼り付け	備考
S-101	—	—	—	シリーズ1 基準試験体
S-102	Aタイプ	2層	—	シリーズ1
S-201	—	—	—	シリーズ2 基準試験体
S-202	Aタイプ	2層	有り	シリーズ2
S-203	Aタイプ	3層	有り	シリーズ2
S-204	Bタイプ	3層	有り	シリーズ2

2.1 使用材料

表-2 に実験に使用した材料の物性を示す。炭素繊維シートについては炭素繊維のみの断面によって求めた物性を示した。使用したPC鋼材は、SWPR1 φ5 で引張強度 16,500 kgf/cm²、ヤング率 2.0×10^6 kgf/cm² である。

表-2 炭素繊維シート物性

炭素繊維シート種類	Aタイプ	Bタイプ
炭素繊維量	300 g/m ²	200 g/m ²
炭素繊維断面積	1.67 cm ² /m	0.95 cm ² /m
ヤング率	2.4×10^6 kgf/cm ²	6.5×10^6 kgf/cm ²
引張強度	35,000 kgf/cm ²	28,000 kgf/cm ²

2.2 試験体

図-1 に実験に使用した試験体の概要図を、図-2, 4 にシリーズ1の炭素繊維シート補強の概要図、詳細図を示す。図-3, 5 にシリーズ2の炭素繊維シート補強の詳細図を示す。

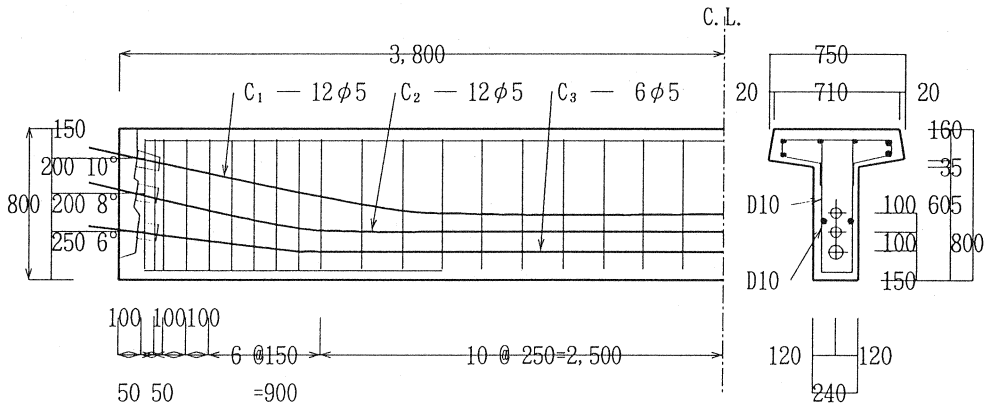


図-1 試験体概要図

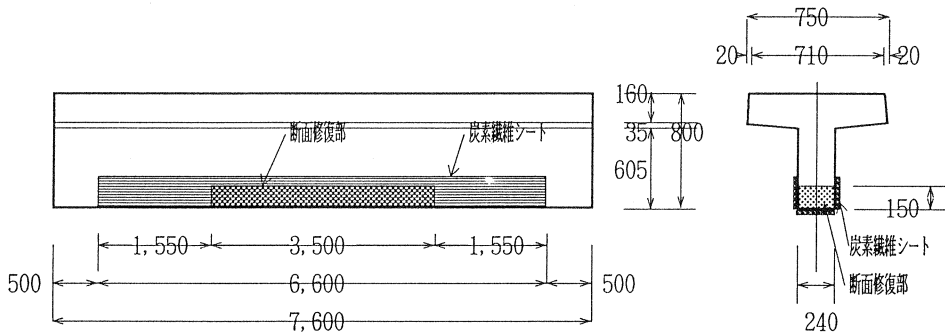


図-2 炭素繊維シート補強 概要図 (シリーズ1)

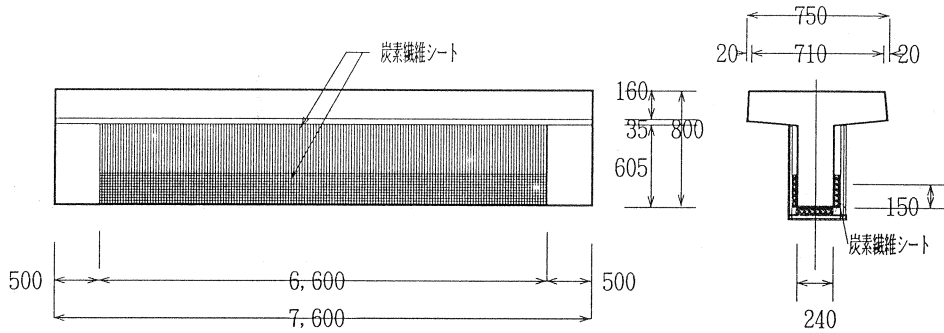


図-3 炭素繊維シート補強 概要図 (シリーズ2)

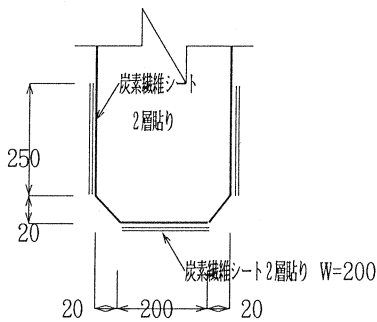


図-4 炭素繊維シート詳細図 (シリーズ1)

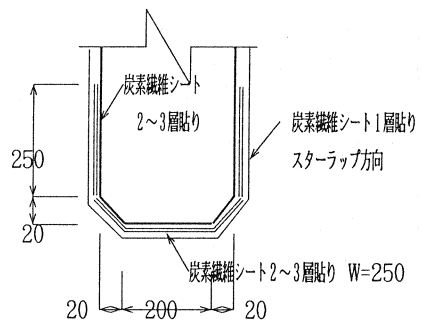


図-5 炭素繊維シート詳細図 (シリーズ2)

試験体は幅 750mm, 桁高 800mm, 桁長 7,600mmのT型PC桁であるが、シリーズ1は塩害による損傷を想定して中央部の3.5mは下端より150 mmまでコンクリートが欠落した断面となっている。また、3段に配置したPC鋼材 C_1 , C_2 , C_3 のうち C_3 は腐食減量によるプレストレスの消失を想定して半分のPC鋼材量とした。

断面欠損部は載荷試験に先立ちプレパックドコンクリートによる断面修復を行った。S-101 はそのまま載荷試験を行い、S-102 はウエブの下面および側面に炭素繊維シートをそれぞれ2枚貼り付けた。ウエブ側面にも炭素繊維シートを貼り付けた理由は、T型PC桁の場合ウエブ下面の幅が小さいので貼り付け面積を大きくするためである。シリーズ2は炭素繊維シートのヤング率および補強量をパラメータとし、曲げ補強材を拘束する目的でスターラップ方向に高強度タイプの炭素繊維シートを1層貼り付けた。S-204 は高弾性炭素繊維の影響を把握することが目的であり、S-202 と炭素繊維量を一致させている。

2.3 実験装置

実験は図-6に示すように4点曲げにより行った。測定項目は、荷重、桁たわみ、コンクリートひずみおよび炭素繊維シートひずみである。また、目視によりひびわれ状況の観察も行った。炭素繊維シートのひずみはウエブ下面については20cm毎にひずみゲージを貼り付け計33カ所、ウエブ側面については中央部の両側に各3カ所貼り付けた。

2.4 荷重方法

荷重はS-101の場合まずひびわれ発生まで荷重した後に除荷し、再び荷重し破壊に至るまで行った。S-102はS-101のひびわれ発生荷重まで荷重した後に除荷し以降再び荷重し破壊に至るまで行った。シリーズ2は荷重開始から破壊に至るまで単調荷重とした。

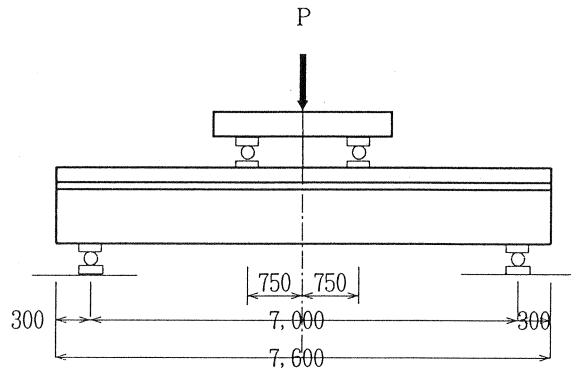


図-6 荷重方法

3. 実験結果および考察

表-3に試験結果一覧を、図-7に荷重～たわみ関係を示す。実験時のコンクリートの強度はシリーズ1で $\sigma_c = 520 \text{ kgf/cm}^2$ 、シリーズ2で 610 kgf/cm^2 であった。

表-3 試験結果一覧

試験体名	ひびれ荷重 (tf) (中央部たわみ mm)	最大荷重 (tf) (中央部たわみ mm)	曲げ補強炭素繊維シート 最大ひずみ	炭素繊維シート 破壊状況
S-101	13.0 (3.7)	40.3 (214.0)	—	—
S-102	21.0 * ¹ (5.9)	57.0 (63.0)	$9,800 \times 10^{-6}$	コンクリートとの界面剥離
S-201	19.9 (3.1)	45.1 (165.0)	—	—
S-202	22.5 * ¹ (7.0)	69.6 (84.2)	$13,400 \times 10^{-6}$	破断
S-203	21.0 * ¹ (4.1)	79.1 (75.9)	$11,100 \times 10^{-6}$	破断
S-204	22.0 * ¹ (3.3)	45.2 (196.5)	$3,000 \times 10^{-6}$	破断

*1 P- δ 曲線からの推定値

3.1 荷重～たわみ関係

S-101 : 13.0tfにて曲げひびわれが発生し、以降荷重の増加とともに中央部のたわみも増大した。35tfあたりより急激にたわみが増加し最終的には40.3tfにてフランジ部分のコンクリートが圧壊して最大荷重が決定した。この時の中央部のたわみ量は214.0 mmであった。

S-102 : 炭素繊維シートで補強したS-102はP- δ 曲線より判断して21.0tfにて曲げひびわれが発生し、以降荷重の増加とともに中央部たわみも増加したがS-101に比べたたわみ量は非常に少なかった。また、桁は弾性的な挙動を示した。57tfにて最大荷重に達した後、ウェブ下面の炭素繊維シートが軀体より引き剥がされ荷重が約49tfまで低下した。この時の中央部のたわみは63.0mmであった。ウェブ側面に貼り付けた炭素繊維シートはこの時点では健全な状態であった。荷重を継続したところ荷重が54tfまで上昇した時点で片面の下半分の炭素繊維シートが破断、引き続き残り全体の炭素繊維シートが破断し荷重が低下した。この時の中央部のたわみは76.0mmであった。さらに荷重を続けたところ41.6tfたわみ量 210mmでフランジ部分のコンクリートが圧壊した。

S-201 : 19.9tfにて曲げひびわれが発生、その後は荷重の増加とともに中央部のたわみも増加した。40tfた

わみ量50mm以降はたわみの増加が大きくなり45.1tfたわみ量165mmにて上部フランジのコンクリートが圧壊して最大耐力が決定した。
 S-202：P- δ 曲線より判断して約22.5tfにて曲げひびわれが発生、この時のたわみ量は約7mmであった。その後荷重を継続したところほぼ弾性的な挙動を示した。69.6tfにて最大荷重を記録した直後に炭素繊維シートが破断し荷重の低下とたわみの急激な増加が見られた。

炭素繊維シートの剥離は中央のモーメント均一区間での付着切れを除き発生しておらず炭素繊維シートのスターラップ方向貼り付けによる剥離防止対策は有効であった。

S-203：P- δ 曲線より判断して約21.0tfにて曲げひびわれが発生、この時のたわみ量は約4mmであった。その後はほぼ弾性的な挙動を示した。79.1tfにて最大荷重を記録した直後に炭素繊維シートが破断し、ほぼ同時に上部フランジのコンクリートも圧壊し、荷重の低下とたわみの急激な増加が見られた。また、支持点付近ではせん断ひびわれも観察された。荷重の低下は約43.0tfまでであり、S-201とほぼ同様であった。S-202と同様に炭素繊維シートの剥離防止対策は有効であった。

S-204：P- δ 曲線より判断して約22.0tfにて曲げひびわれが発生、この時のたわみ量は約3mmであった。その後荷重を継続したところS-202、S-203と比較して急勾配ではあるがほぼ弾性的な挙動を示した。44.0tfにて炭素繊維シートが破断し荷重が低下した。この時のたわみは約20.0mmであった。その後荷重を継続したところ、S-201と同様にたわみのみが増大し45.2tfにて上部フランジのコンクリートが圧壊した。

S-204は炭素繊維シートの破断までの桁剛性の向上は顕著であった。

たわみについて

S-101とS-102とを同荷重時のたわみで比較すると、S-102はS-101に対して1/2～1/3に減少しており剛性が2～3倍に向上したことになる。これは、材料の弾性係数および断面積により求められる剛性では説明が出来ない。理由としては、炭素繊維シートのひびわれ拘束効果により桁の剛性が向上したものと思われる。この傾向はシリーズ2の試験体についても同様である。

3.2 荷重～ひずみ関係

図-8にS-102の桁高方向の荷重とコンクリートおよび炭素繊維シートのひずみ関係を示す。

荷重が低い段階では側面の炭素繊維シートのひずみは不安定であるが、これは断面修復部が桁と一体の挙動とならないためと考えられるが、荷重が上昇するとともに炭素繊維シートのひずみは安定している。これは、炭素繊維シートの定着部が断面修復部の外側にあるため炭素繊維シートの動きが桁全体の動きと同調するようになったためと考えられる。

ひずみ量は中立軸からの距離にほぼ比例しており、通常のRC計算法が適用できることを示している。

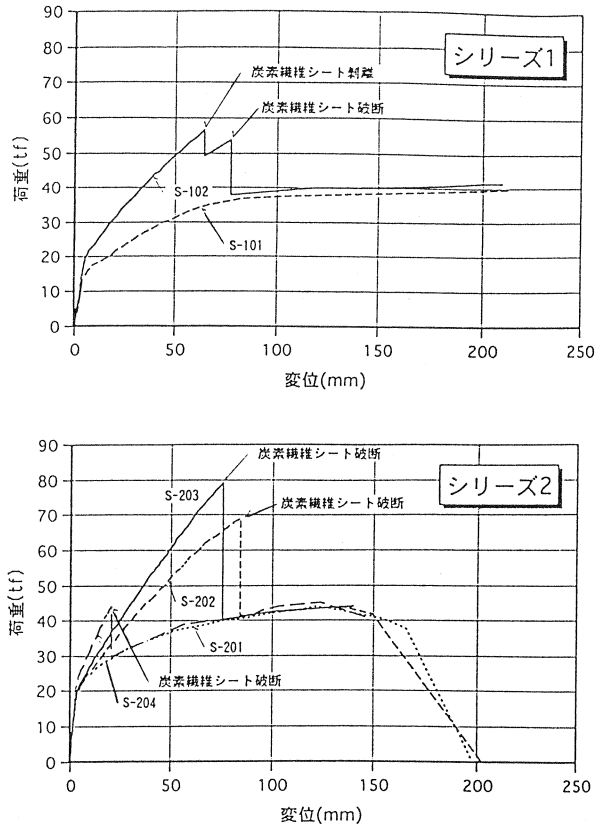


図-7 荷重～たわみ関係

4. まとめ

PC桁に炭素繊維シートを貼り付けた試験体の実験により以下に示す知見が得られた。

- ①炭素繊維シート貼り付けは十分に補強効果があり、その補強効果は通常のRC計算により求められる。また、炭素繊維シートの補強量を増加すると耐力も増加する。
- ②ウェブ側面への補強はウェブ下面への補強と同様に効果があり、破壊試験を行った場合スターラップ方向の巻きつけを施さないときには下面から側面へと破壊位置が移行し段階的な破壊となる。
- ③スターラップ方向の巻きつけを施すと炭素繊維シートとコンクリート界面の剝離防止に有効であり、破壊荷重も増加する。この場合は下面と側面の炭素繊維シートの破壊がほぼ同時となる。
- ④炭素繊維シート貼り付けは桁のたわみ抑制に大きな効果がある。特に、高弾性の炭素繊維シートを用いた場合は桁のたわみ抑制効果は顕著である。

今後は、炭素繊維シートによるたわみ改善効果の解明が課題である。

謝辞

炭素繊維シートを提供いただいた三菱化学㈱に深謝いたします。また、同社谷木謙介氏、藤田崇氏には実験に協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1)小嶋克朗他：炭素繊維の巻付けによる既存鉄筋コンクリート部材の耐震補強，コンクリート工学年次論文報告集Vol. 11, No.1, PP. 861-866, 1989
- 2)森成道 他：炭素繊維シートによる床版下面補強効果に関する研究，橋梁と基礎Vol. 29, No.3, PP. 25-32, 1995. 3
- 3)岡野素之他：シート状炭素繊維を貼付けて補強した既存部材の耐久性に関する試験、土木学会第46回年次学術講演会、V-214、PP. 444-445、1991. 9

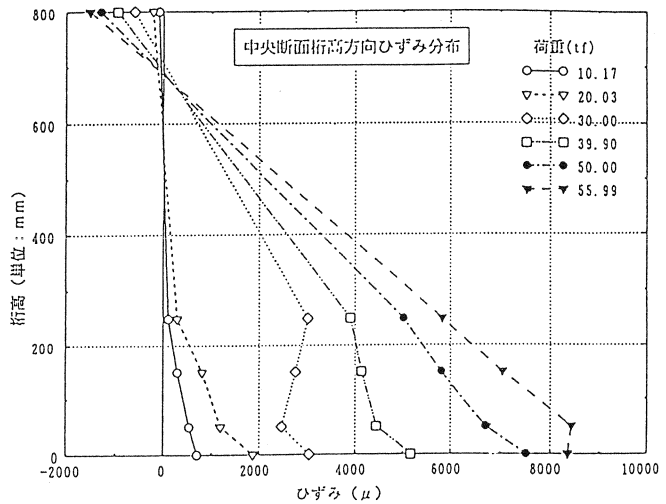


図-8 桁高方向の荷重～ひずみ関係 (S-102)