

論文 PBO 連続繊維シート緊張接着による PC 桁の曲げ補強に関する検討

花森 信行^{*1}・呉 智深^{*2}・岩下 健太郎^{*3}・樋口 哲郎^{*4}

要旨：本研究では、緊張力を与えたPBO連続繊維シートを接着して曲げ補強した支間長10mのPC供試体（プレストレスを減少させたプレテンション方式の旧JIS, T桁）に対して、その補強効果を検証する実験を行った。シートに導入する緊張力、シート補強量、シート緊張前の含浸・硬化工程の有無をパラメータとして静的二点荷重試験を実施し、その破壊形式、破壊耐力、供試体のひび割れ特性に関して検討した。その結果、緊張接着補強の曲げに対する高い補強効果及び、ひび割れに対する高い抑制効果が実証された。また、緊張接着することで補強材の能力が十分に発揮されることも検証された。

キーワード：PBO連続繊維シート、緊張接着、ひび割れ抑制効果、曲げ補強、PC桁

1. はじめに

都市インフラの維持管理・防災能力を高めるために、補修・補強技術の高度化や革新的な構造施設の創造が期待されている。最近のコンクリート構造物の補強工法で、既設コンクリート構造物の表面に連続繊維シートをエポキシ樹脂を用いて貼り付け又は巻き付ける接着工法がある。主に橋梁やトンネルにおける耐震補強やコンクリート片剥落防止等を目的として行われていて、連続繊維シートをコンクリート表面に単純に樹脂で接着しているのが現状である。しかし、単純に接着する従来工法においては次のような問題が究明されている。1) 活荷重に対しては抵抗するが死荷重に対しては抵抗しない、2) 補強量を増加させたとしても構造物が終局状態に到達するまでに剥離が発生してしまい補強材の高い性能が有効に活用されないことが多い。このような問題を改善するための技術革新として、PC技術を応用した連続繊維シート緊張接着工法が考案され、炭素繊維シートを補強材として用いた研究（例えば1）、2）、3））が既に行われ、緊張接着工法の有効性が確認されている。しかし同時に、これまでの研究において炭素繊維シートに関する次のような問題点も

究明されている。1) 緊張前の含浸・硬化工程がないと高い緊張力を導入できないこと、2) エネルギー吸収能力が低いためコンクリートひび割れ箇所での破断がおりやすいことである。この様な炭素繊維における問題点を改善すべく、本研究では新たなFRP材として最近開発された炭素繊維シートと同等以上の強度や剛性を有し、同時に非常に高いエネルギー吸収性能を有するPBO連続繊維シート（以下：PBOシート）に着目し、補強材として活用することとした。

著者らはこれまでのPBOシートを用いた2mRC梁に関する研究⁴⁾において導入する緊張力レベル、シート補強量等をパラメータとして一連の実験を実施し、その破壊形式、破壊耐力、補強材特性、ひび割れ特性に関して検討を行い、PBOシート緊張接着工法の有効性を確認している。そこで大型供試体に関する研究実績も無いことから、本研究では、支間長10mのPC桁に関する実験を実施した。また、現在の実用されている桁の劣化・損傷状況の傾向を考慮して、プレストレスを減少させたプレテンション方式の旧JIS, T桁をモデル供試体として荷重試験を実施し検討した。

* 1 (株)安部工業所技術本部開発部（正会員）

* 2 茨城大学助教授 工学部都市システム工学科 工博（正会員）

* 3 茨城大学 大学院理工学研究科 都市システム工学専攻

* 4 (株)東邦アーステック建設事業本部調査設計部部長（正会員）

後、緊張力導入時のシート端部のせん断力集中による剥離対策として再接着法による端部定着を行った。再接着法とは、緊張接着時と同質の補強材（本実験ではPBOシート）で端部をU字型に定着する方法であり、接着剤には緊張接着に使用したエポキシ樹脂を用いた。また、定着範囲は下フランジからハンチ部の周りを長さ1mの範囲とした。⑧荷重とコンクリートひずみを管理しながら緊張力を解放して供試体に圧縮力を導入する。⑨シートを切断し完成とする。なお、載荷試験までの樹脂の養生期間は全ての供試体において1週間以上とした。

2. 4 供試体仕様

本実験における供試体の仕様を表-2に示す。標準モデルをNo.4供試体（33%3層無含浸硬化）として導入緊張力、シート補強量、緊張前含浸の有無、緊張接着回数を変化させた供試体をそれぞれ製作した。

3. 載荷試験

3. 1 計測に関する詳細

静的二点載荷試験における載荷一般図を図-4に示す。また計測に関する詳細は以下の通りである。変位は載荷位置と支間中央部、支点部の各変位を計測した。また、支間中央部桁側面のコンクリート表面のひずみ及び桁下面に緊張接着した補強材のひずみをひずみゲージを用いて計測した。さらに、パイ型変位計をPC鋼材と同位置に配置して、等曲げモーメント区間内のPC鋼材位置でのひび割れ幅を計測した。支間中央計測点及び桁下面計測点位置を図-5、図-6に示す。また、本供試体は引張鉄筋が配置されていないためPC鋼材と同位置にφ6mmの丸鋼を配置して、これにひずみゲージを取り付けPC鋼材位置での引張鋼材のひずみとした。

3. 2 載荷方法

載荷方法については載荷荷重20.0kN毎に載荷していき予想ひび割れ発生荷重付近からひび割れ観測を行った。ひび割れ発生直後は荷重を一時ホールドしひび割れの進展状況を供試体に記録した。

表-2 供試体仕様

No.	供試体名	補強種類	緊張前含浸	端部定着	備考
1	PC-S0-1	無補強	—	—	—
2	PC-S3-0	無緊張3層	—	再接着	再接着
3	PC-S3-33	33%緊張3層	○	再接着	2or1層2回緊張接着
4	PC-S3-33-D*	33%緊張3層	×	再接着	2or1層2回緊張接着
5	PC-S3-45-D*	45%緊張3層	×	再接着	3層1回緊張接着
6	PC-S4-45-D*	45%緊張4層	×	再接着	2層2回緊張接着

*は無含浸状態で緊張

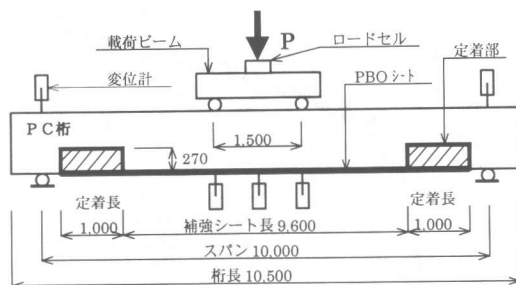


図-4 載荷一般図

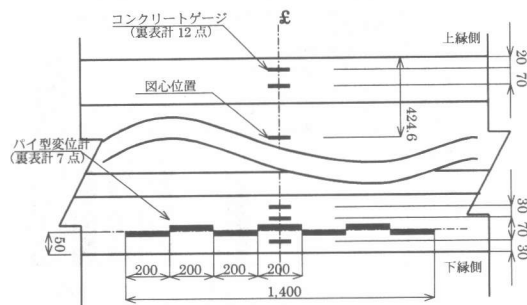


図-5 支間中央計測点

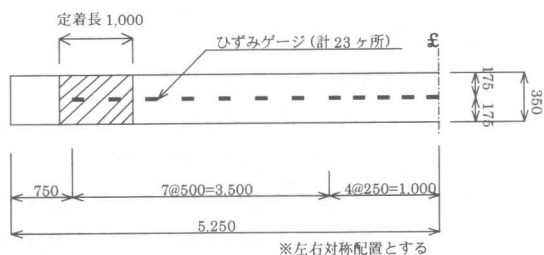


図-6 桁下面計測点

その後、次のステップまで載荷を再開し、最終的に補強材の剥離が定着部まで進展するか又は、補強材が破断するまで載荷を続け、引張材降伏後は変位制御で載荷を行った。

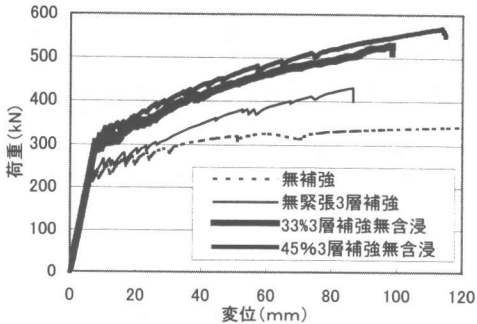
4. 結果と考察

4. 1 導入緊張力による曲げ補強効果の向上

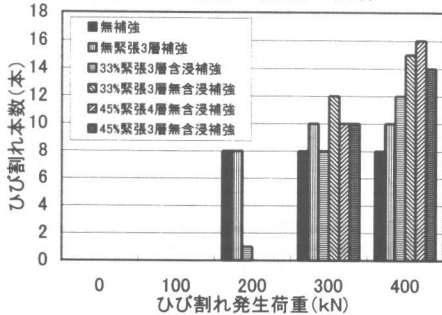
導入緊張力の変化に伴う補強効果を検証するために、無補強、無緊張3層補強、33%緊張3層補

表－３ 実験結果一覧

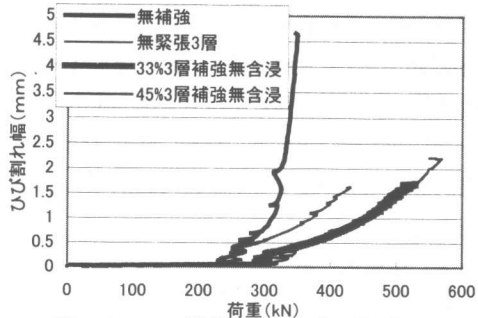
	初期ひび割れ荷重 (kN)	鉄筋降伏荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	破壊時のシート歪(μ) 〔 〕内は緊張ひずみ	破壊モード
無補強	240	314	340	—	曲げ破壊
無緊張3層	240	405	430	8982	シート中央部からの剥離破壊
33%緊張3層含浸・硬化	295	485	485	12349 (4730)	シート中央部からの剥離破壊
33%緊張3層無含浸・硬化	305	433	524	14003 (4730)	シート中央部からの剥離破壊
45%緊張3層補強	320	525	568	17864 (6438)	シート中央部破断破壊
45%緊張4層補強	332	505	562	13210 (6297)	シート中央部からの剥離破壊



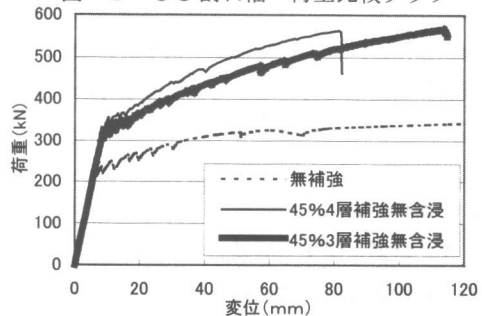
図－７ 荷重－変位の関係



図－９ ひび割れ本数



図－８ ひび割れ幅－荷重比較グラフ



図－１０ 荷重－変位比較グラフ

強、45%緊張3層補強を施した4種類の供試体について比較検討した。表－3に実験結果の一覧を示した。まずは初期ひび割れ荷重に関して述べる。図－7に荷重－変位の関係を、図－8にひび割れ幅－荷重の関係をそれぞれ示す。無補強と無緊張3層補強の結果を比較すると、シートの剛性がPC供試体の剛性に比べ非常に小さいため、結果に差異がみられないが、33%緊張3層補強と無緊張補強の結果を比較すると、初期ひび割れ荷重が27%増加していることがわかる。また、45%緊張3層補強は、33%緊張3層補強に対して初期ひび割れ荷重が5%増加している。次に、鉄筋降伏荷重に関してだが、初期ひび割れ荷重と同様に導入緊張力の増加に伴い鉄筋降伏荷重も増加していることがわかる。さらに、破壊荷重に関しても、無補強時に対して、無緊張3層補強で28.5%の増

加、33%緊張3層補強で54.1%の増加、さらに45%緊張3層補強では67.1%の増加が確認できる。これらの結果より、緊張力を導入することにより無緊張補強時と比べて初期ひび割れ荷重、および破壊荷重が増加し、導入する緊張力が增加するほどに耐力の向上が大きくなることがわかった。

4. 2 緊張力導入によるひび割れ抑制効果

ここでは、導入緊張力増加に伴うひび割れ抑制効果の検証をするために、ひび割れ幅と、ひび割れ本数及び、ひび割れ間隔に関して検討する。ひび割れ幅－荷重グラフを図－8に、ひび割れ本数－ひび割れ発生荷重グラフを図－9に、ひび割れ間隔を表－4にそれぞれ示す。図－8の荷重350kNにおいて比較すると、無緊張3層補強は無補強時に対して82.9%ひび割れ幅が減少、無緊張

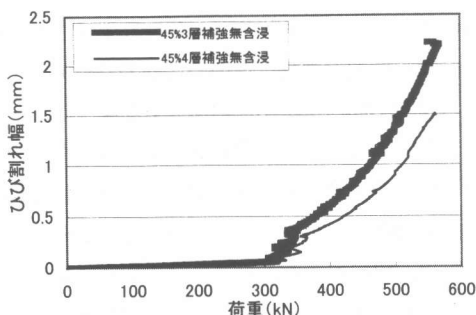


図-1 1 ひび割れ幅-荷重比較グラフ

3層補強に対して33%緊張3層補強は52.3%のひび割れ幅減少、45%緊張3層補強は66.5%のひび割れ幅の減少がそれぞれ確認された。よって、緊張力の導入によりひび割れ幅が抑制され、さらに、緊張力を上昇させるとひび割れ幅の抑制効果が向上することがわかった。

4. 3 補強材のひずみに関する検討

ここでは、導入緊張力とシートひずみとの関係について検討する。表-3より、導入緊張力が増加するにつれて破壊時のシートひずみが設計破断ひずみに近づき、破壊モードがシート剥離破壊からシート破断破壊へと変化し、破壊荷重も増加していることがわかる。この結果より、最適な緊張力を導入することでシートの能力を限界まで引き出せることがわかった。

4. 4 補強量と補強効果に関する検討

補強量の増加と補強効果に関して検証するために、45%緊張3層補強と45%緊張補強4層の実験結果を比較検討した。その結果を図-10に示す(実験結果は表-3を参照)。まずは初期ひび割れに関してだが、シート1層分の剛性増加では初期ひび割れ荷重に大きな差異は見受けられないが、破壊耐力、破壊靱性については、3層の方が破壊耐力、破壊靱性ともに高い結果を残した。また、破壊性状は4層では剥離破壊であり、3層では破断破壊となった。

次にひび割れ抑制効果に関して考察する。図-11より、45%緊張4層補強のひび割れ幅は、45%緊張3層補強を基準にして、ひび割れ幅が29.4%減少しており、また、表-4、図-9よ

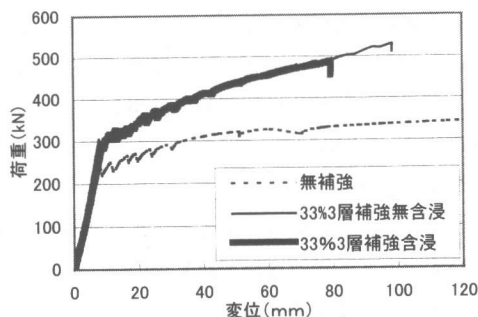


図-1 2 荷重-変位比較グラフ

り、剛性の増加によりひび割れ本数が増加していることが確認された。

表-4 ひび割れ間隔

ひび割れ間隔 (単位はcm)	
無補強	37.5
無緊張	35.0
33%緊張3層含浸	31.3
33%緊張3層無含浸	26.7
45%緊張3層補強	28.6
45%緊張4層補強	24.7

表-5 剥離破壊エネルギー算出結果

	33%3層含浸	33%3層無含浸
G _f	1.62N/mm	1.75N/mm

4. 5 接着前含浸が補強効果に及ぼす影響

接着前の含浸硬化が耐力に及ぼす影響を検証するために、33%緊張3層含浸補強と33%緊張3層無含浸補強の実験結果を比較検討した。荷重-変位曲線を図-12に示す。

初期ひび割れに関しては大きな差異は見受けられないが、破壊荷重を比較すれば、無含浸で緊張接着した供試体は含浸後に緊張接着した供試体に比べて破壊荷重が増加している。また、無含浸緊張接着供試体は破壊靱性が向上している。

これら結果に関して剥離破壊耐力の実験値から下式により計算した剥離破壊エネルギー G_f を比較検討した。その結果を表-5に示す。

$$P_{\max} = b_{cf} \sqrt{(2 \cdot G_f \cdot E_f \cdot t_{cf})}$$

(以下□内は単位)

ここで $P_{\max}$ はせん断付着最大耐力[N]、 b_{cf} は付着幅[mm]、 G_f は剥離エネルギー[N/mm]、 E_f は補強層ヤング率[N/mm²]、 t_{cf} はPBO連続繊維シー

トの厚み[mm]である。また、最大曲げモーメントによる曲げひび割れ発生位置とその周辺に生じる曲げひび割れとの間隔は、連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針⁷⁾より、一般に150～250mmとしてよいとの記述があるため200mmを採用した。

この結果、剥離破壊エネルギー G_f は無含浸状態で緊張接着した供試体の方が0.13N/mm大きく、接着力の向上が確認できる。

5. 結論

本研究で、PBO連続繊維シートを用いて緊張接着補強した支間長10mのPC桁に対する補強効果を検証した結果、以下の事が明らかとなった。

(1) 緊張力導入により無緊張補強時と比べて初期ひび割れ荷重、鉄筋降伏荷重及び破壊荷重が増加し、靱性が向上することがわかった。

(2) 緊張力導入により無緊張補強時と比べて、ひび割れ本数が増加し、ひび割れ幅及び、ひび割れ間隔がともに減少することから、引張応力を分散させる効果が大きいことがわかった。

(3) 導入緊張力が増加するにつれて破壊モードが剥離破壊から破断破壊に変化し、最適な緊張力を導入することでシートの能力を限界まで引き出せることがわかった。

(4) 無含浸状態で緊張接着した供試体は、含浸状態で緊張接着した供試体より接着性が改善され、接着耐力が向上することがわかった。

参考文献

- 1) 呉智深, 神田建他: FRPシート緊張接着によるコンクリート構造部材の補強法の提案コンクリート構造工学論文集, Vol.44A, PP.1299-1308, 1998.3
- 2) 呉, 松崎他: CFRPシート緊張接着による鉄筋コンクリート曲げ部材の補強効果に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.641/V-46, pp.153-165, 2000.2
- 3) 呉智深, 神田建: 繊維材緊張によるコンクリート部材の補強工法及び補強構造, 公開特開

平11-182061号公報

- 4) 呉, 岩下他: PBO連続繊維シート緊張接着によるRC曲げ部材の補強法に関する研究, 土木学会第55回年次学術講演会概要集
- 5) 吉澤, 呉他: 連続繊維シートとコンクリートの付着挙動に関する検討, 土木学会論文集, No.662, Vol.5-49, pp.105-119, 2000.
- 6) 呉, 黒川他: 梁部材におけるFRP面状補強材の界面接着・剥離メカニズムに関する研究, 構造工学論文集, Vol.46A/pp.1469-1478, 2000.3
- 7) 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針, 土木学会, コンクリートライブラリ101, 平成12年度3月版