

損傷を受けたPCはりの炭素繊維シートによる曲げ耐力復元効果

東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻	学生会員	○永塚 優希
東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻		博(工) 松本 浩嗣
(株)富士ピー・エス 技術本部 土木設計グループ	正会員	博(工) 左東 有次
東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻	正会員	工博 二羽 淳一郎

Abstract : In this research, loading tests were conducted to investigate the effects of CFRP sheets on the flexural capacity of post-tensioned prestressed concrete beams with ruptured strands. The experimental parameters were with or without rupture of the strands and the number of layers of CFRP sheets. The maximum load of the specimen in which two of the four strands were cut but CFRP sheets were not provided, decreased to 35% of the control beam (CB). After cutting two of the four strands, the maximum load of the specimens, in which one layer, three layers and five layers of CFRP sheets were bonded, increased to 74%, 116% and 147% of that of the control beam, respectively. The significant strengthening effects on the flexural capacity were observed. In terms of the load-displacement behaviors, the member stiffness increased with the increase in the amount of CFRP sheets, indicating that deflections can be controlled by the CFRP sheets. Moreover, the calculation values agreed with the maximum loads observed in the experiment. Flexural capacities of post-tensioned PC beams with ruptured strands and strengthened by CFRP sheets can be evaluated by the ordinary sectional calculation.

Key words : Prestressed concrete, PC strands, CFRP sheets, Post-tensioned

1. はじめに

近年、ポストテンション式プレストレストコンクリート（以下：PC）橋梁構造物において、経年劣化などが原因で構造物内部のストランド（PC鋼材）が破断したという事例が報告されている。これを補強する方法として鋼板を用いる方法もあるが、金属板は単位質量が大きく、構造物の自重が大きくなり、また施工に重機が必要になるという問題点がある。本研究では、連続繊維シート工法のうち、耐久性が高く化学的变化に強く、軽量なため重機を必要とせず効率的な設計と工期の短縮が可能となる炭素繊維シート（以下：CFRPシート）に着目した。既往の研究¹⁾で、損傷を受けたプレテンション式PCはりのCFRPシートによる曲げ耐力復元効果については検討がなされているが、ポストテンション式ではまだ研究例が少ない。したがって、内部のストランドが破断した状態を模擬するために、作製したポストテンション式PCはり内部のストランドを切断し、その後CFRPシートを下面接着した。無補強試験体を含む計5本の試験体の載荷試験を行い、CFRPシートによる曲げ耐力復元効果を検討した。

2. 実験概要

図-1に試験体の概要図を示す。試験体はポストテンション式PCはりで、全長3.1m、載荷点から支点までの距離1.2m、コンクリートの設計基準強度は 50N/mm^2 とした。実際に得られたコンクリートの圧縮強度は $56\sim 65\text{N/mm}^2$ であった。表-2にPCストランド、圧縮鉄筋およびCFRPシートの材料特性値を示す。使用したストランドは公称断面積 98.71mm^2 、降伏強度 1600N/mm^2 の7本よりPC鋼線である。図-2に試験体断面図およびストランドに貼付したひずみゲージの位置を示す。表-3に試験体のコンクリートの計画配合を示す。スパン中央を箱抜きし、コンクリート打設後7日でシース内にストランドを配置し、 700N/mm^2 の緊張力を導入した。プレストレス導入時に用いた支圧板の寸法は $80\text{mm}\times 80\text{mm}$ 、

厚さ 16mm の後付型である。緊張方法は片引きとし、緊張端にはナット付き定着グリッパ、固定端に標準グリッパを用いた。緊張前にストランドにひずみゲージを貼付するため、ひずみゲージ設置位置のシースは半割りできる構造とし、グラウト材がシース外に漏出するのを防ぐためにテープを巻いた。表-4 にグラウトの配合を示す。ひずみゲージのリード線は、半割りした部分からシース外に取り出した。また、半割りした部分のシースを取り除くことで、箱抜き部におけるグラウトの充填状況を確認した。グラウト養生後に箱抜き部分のシースを取り除き、ストランドを切断した後、モルタルパウダーおよびモルタル混和液からなる断面修復モルタルを用いて箱抜き部分を充填した。断面修復モルタルの配合を表-5 に示す。なお、表-5 の「モルタル混和液」には練混ぜ水も含まれている。図-2 の右側に示すように、切断した2本のストランドのスパン中央から 200mm の位置のより線7本のうち3本(計 6 か所)にひずみゲージを貼付した。グラウトを十分に充填するためにシースに通すひずみゲージのリード線を 3 本に限定し、試験体内部のストランドを切断するためにスパン中央部を箱抜きして打設し、養生した。モルタルの養生から 7 日目以降にディスクグラインダーでコンクリート表面と隅角部を研磨し、大きな穴はパテで埋めた。プライマーを塗布した翌日に、エポキシ樹脂を塗布し、ローラーブラシを用いて空気を除去しながら CFRP シートを接着した。

表-1 に実験ケースを示す。実験パラメータはストランドの切断の有無とCFRPシートの積層数である。なお、図-3 に示すように本研究では試験体底面の部材軸方向にCFRPシートを接着した後、断面周囲にU字型にさらにCFRPシートを接着しているが、表-1 中の「シートの積層数」は試験体底面の部材軸方向に接着したシートの積層数である。

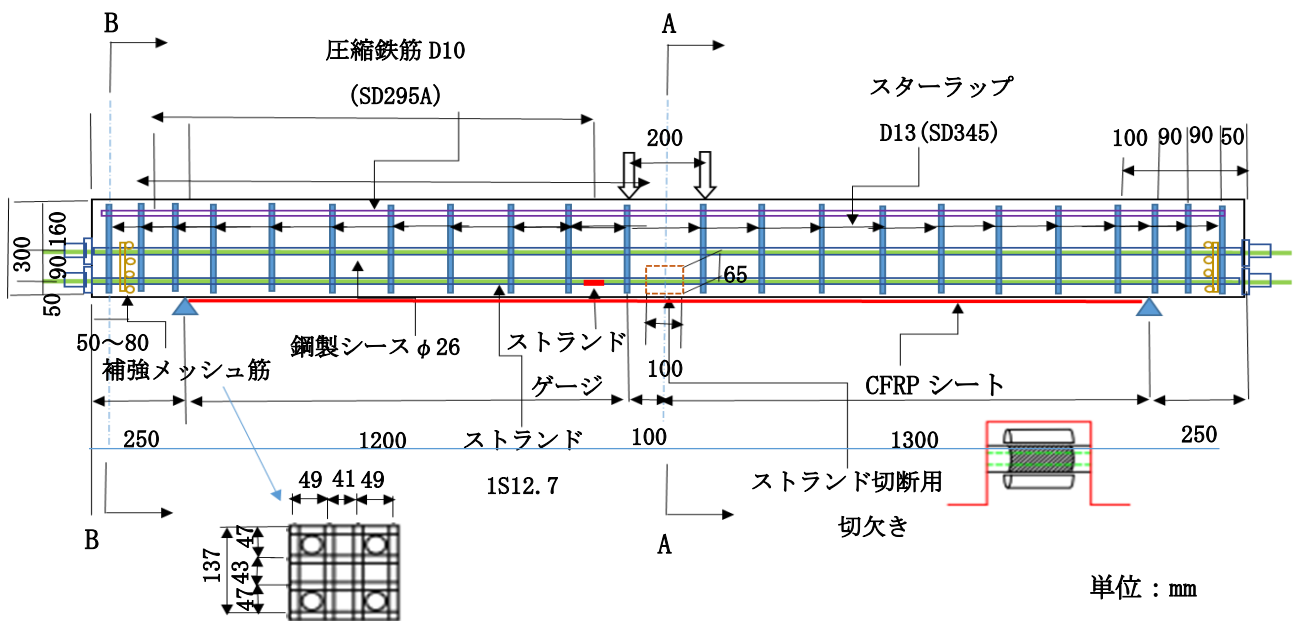


図-1 試験体概要

表-1 実験ケース

試験体名	切断したストランドの本数	シートの積層数
CB	0	0
DB2	2	0
DB2-1U	2	1
DB2-3U	2	3
DB2-5U	2	5

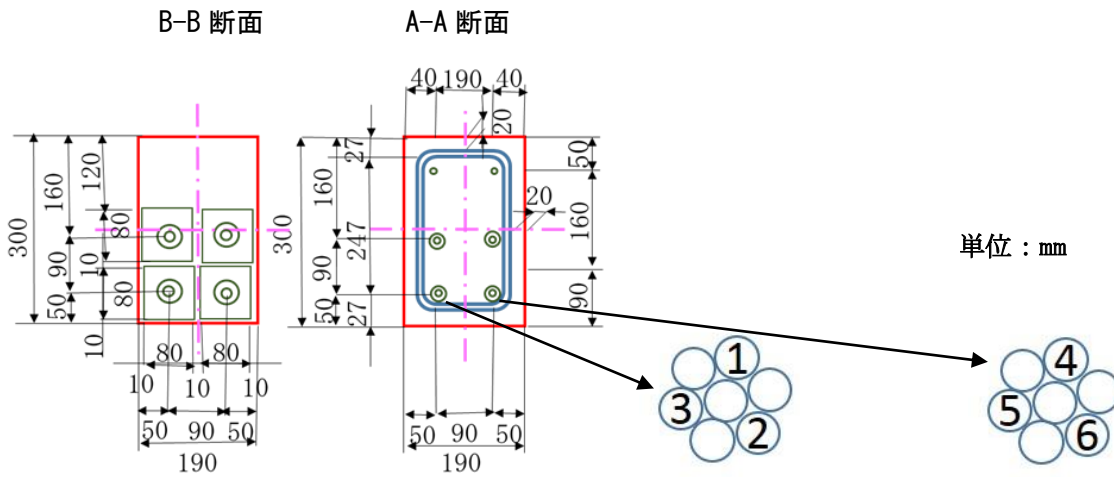
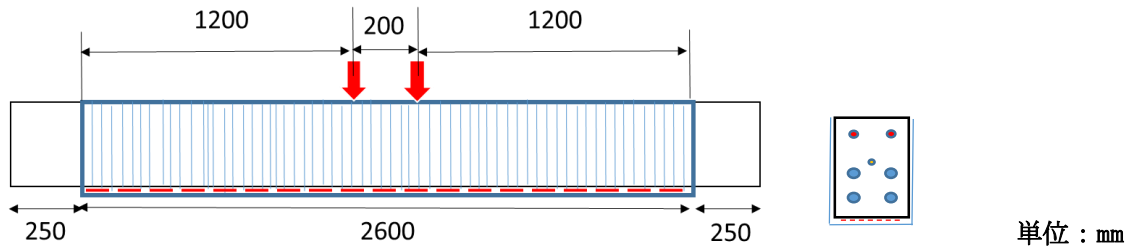


図-2 断面図およびストランドに貼付したひずみゲージの位置



— : 軸方向のシート, — : U型のシート

図-3 補強方法 (左:側面図, 右:断面図)

表-2 材料特性値

コンクリート	早強セメント使用	設計基準強度 50N/mm ²
PCストランド	1S12.7	引張強度 1850N/mm ²
		降伏強度 1600N/mm ²
		初期緊張力 700N/mm ²
鉄筋	圧縮鉄筋D10 (SD295A)	降伏強度 373N/mm ²
	スターラップD13 (SD345)	降伏強度 414N/mm ²
CFRPシート	高弾性, 1方向シート	厚み 0.333mm
		引張強度 3400N/mm ²
		ヤング率 230kN/mm ²

表-3 コンクリートの計画配合

セメント C (kg/m ³)	水 W (kg/m ³)	細骨材 S (kg/m ³)	粗骨材 G (kg/m ³)	減水剤 EX1 (kg/m ³)	AE剤 EX2 (kg/m ³)
423	163	847	908	4.02	5.08

表-4 グラウトの配合

セメント C (kg/m ³)	水 W (kg/m ³)	混和剤 EX (kg/m ³)	水セメント比 W/C (%)
1309	576	13.1	44

表-5 断面修復モルタルの配合

モルタルパウダー C (kg/m ³)	モルタル混和液 EX (kg/m ³)
1913	287

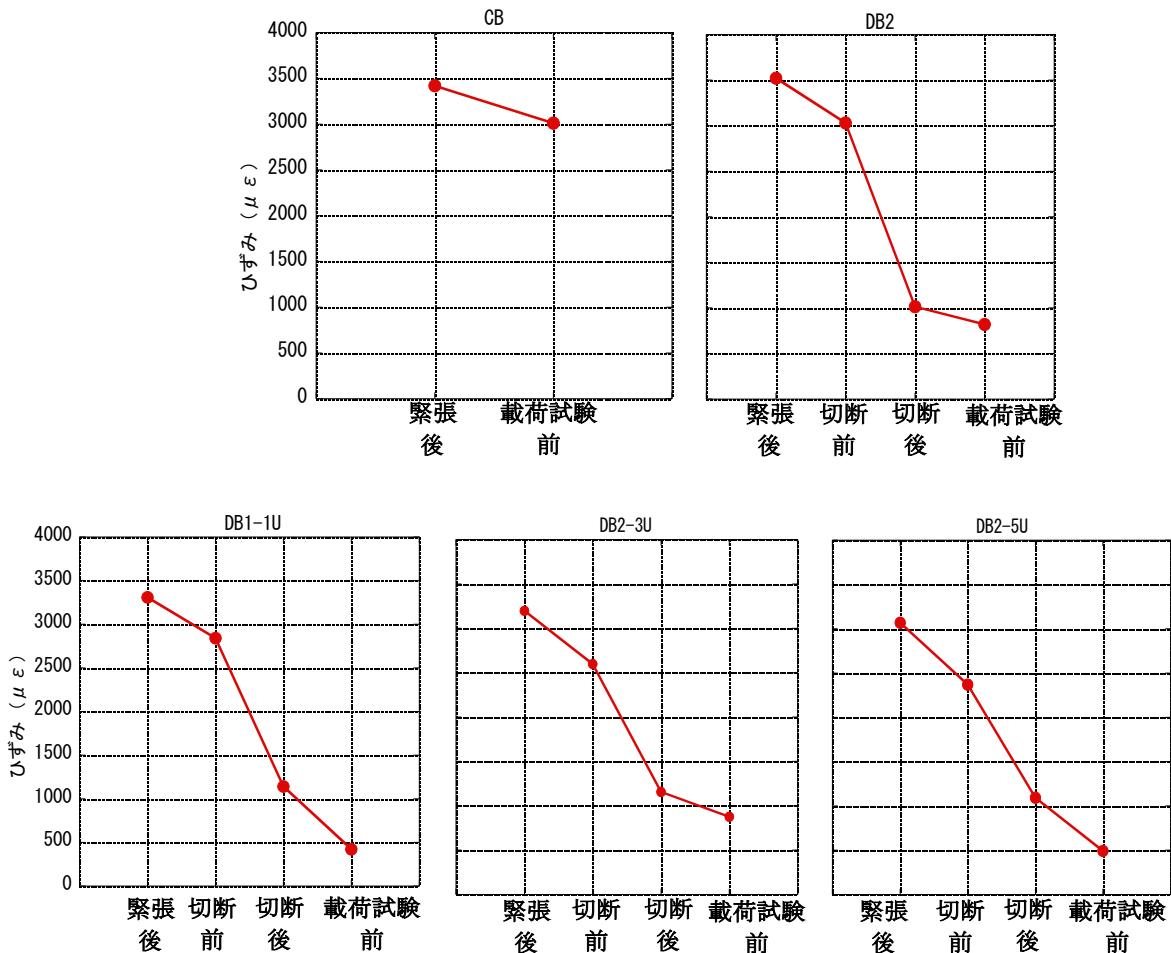


図-4 緊張後，切断前後，载荷試験直前のストランドのひずみ

3. 実験結果と考察

3.1 切断したストランドのひずみ変化

スパン中央から 200mm の位置における，切断したストランドのひずみ変化を図-4 に示す。初期緊張力としては $700\text{N}/\text{mm}^2$ を導入したが，ストランドの切断直後には切断前の 30~45% 程度のひずみが残留しており，切断によって定着部が壊れたり試験体が飛散することはなかった。これはシーす内のグラウトとストランドの付着によるものと考えられる。一方，载荷試験直前のひずみに着目すると，ストランドを切断していない CB におけるひずみは緊張後のひずみからほとんど減少していないが，ストランドを切断した試験体 DB2，DB1-1U，DB2-3U，DB2-5U では载荷試験前の段階のひずみの残留量はストランド切断後の 35~80% 程度に低下していた。これは，ストランドの切断後，時間の経過に伴ってストランドにすべりが発生し，プレストレスが解放されたためであると考えられる。

3.2 载荷試験結果

静的4点曲げ载荷試験を行った。変位は変位計をスパン中央と支承部にセットし，鉛直変位を測定した。表-6 に各試験体の载荷試験結果を示す。表中の計算結果は，各試験体の载荷試験同日に行った円柱供試体の一軸圧縮試験より得られた圧縮強度を用いた断面計算により求めたものである。計算において，プレストレスにより導入されている切断していないストランドの初期ひずみには，载荷試験直前にひずみゲージで測定して得られた実測値を用いている。4本中2本のストランドを切断した試験体 DB2，DB1-1U，DB2-3U，DB2-5U の切断したストランドは無視して計算した。また，CFRPシートの部材断面積は軸方向に接着したシートの厚さと積層数を乗じた値とし，シートのひずみは断面内のひずみ分

布に関する平面保持の仮定に従うものとした。また、シートとコンクリートの界面には完全付着を仮定した²⁾。表-6に示すように、最大荷重の実験値と計算値には高い整合性が見られた。図-5に、各試験体の最大荷重の実験値を示す。4本中2本のストランドを切断した無補強試験体DB2の最大荷重は、健全な試験体CBの約35%に低下したが、4本中2本のストランドを切断した後にCFRPシートを1層、3層、5層を接着した試験体DB2-1U、DB2-3U、DB2-5Uの最大荷重は、それぞれ健全試験体CBの約74%、116%、147%となり、顕著な曲げ補強効果が確認された。また、図-6に示す荷重-変位曲線に着目すると、シートの接着により部材剛性が増加していることから、たわみの抑制効果も期待できると考えられる。なお、シートを接着した補強試験体と無補強試験体とでは、最大荷重付近での荷重の変化の仕方に違いが見られた。無補強試験体であるDB2では、ポストピークにおいて荷重がほぼ一定を保持したまま変位が増加した。計算において、DB2は最大荷重時にストランドが降伏すると判定されており、実験において最大荷重後に荷重がほぼ一定のまま変位が増加したという事実と整合する。一方、シートを接着した試験体DB2-1U、DB2-3U、DB2-5Uにおいては、最大荷重に達した直後に大きな破断音が認められ、急激な荷重低下が生じた。特にDB2-1Uに関しては、最大荷重直後に荷重が半分程度まで低下している。CFRPシートの破断ひずみ $\epsilon_{fu}=0.0148$ に対し、計算上のCFRPシートのひずみ $\epsilon=0.0157$ であったことから、最大荷重付近において、実際にCFRPシートが内部で破断したものと考えられる。このように、載荷試験直前のストランドのひずみを用いることでCFRPシートにより曲げ補強を行ったポストテンション式PCはりに対して、最大荷重をかなり正確に計算できることが明らかになった。

表-6 実験値と計算値の比較

試験体名	実験値			計算値			P _{u,exp} /P _{u,cal}	
	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ 発生荷重 (kN)	最大荷重 P _{u,exp} (kN)	破壊モード				
				シート 破断	圧縮鉄筋	ストランド		最大荷重 P _{u,cal} (kN)
CB	65.0	81.0	218.7	-	未降伏	未降伏	218.2	1.00
DB2	64.0	32.0	77.7	-	未降伏	降伏	77.8	1.00
DB2-1U	62.0	-	161.2	有	未降伏	未降伏	157.5	1.02
DB2-3U	56.6	-	260.7	無	未降伏	未降伏	260.8	1.00
DB2-5U	59.6	-	328.7	無	未降伏	未降伏	317.8	1.03

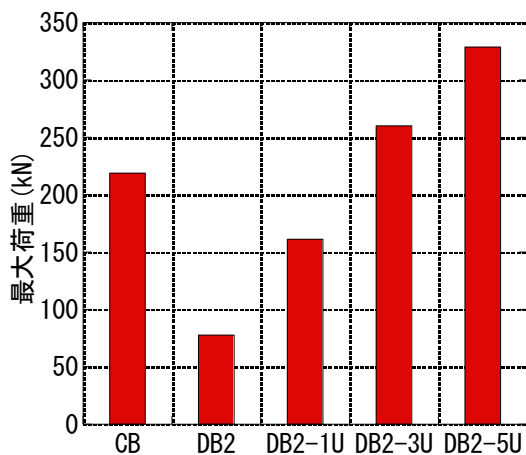


図-5 各試験体の最大荷重

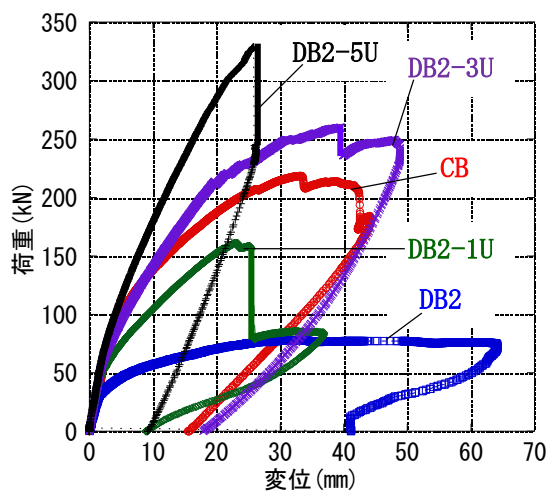


図-6 荷重-変位曲線

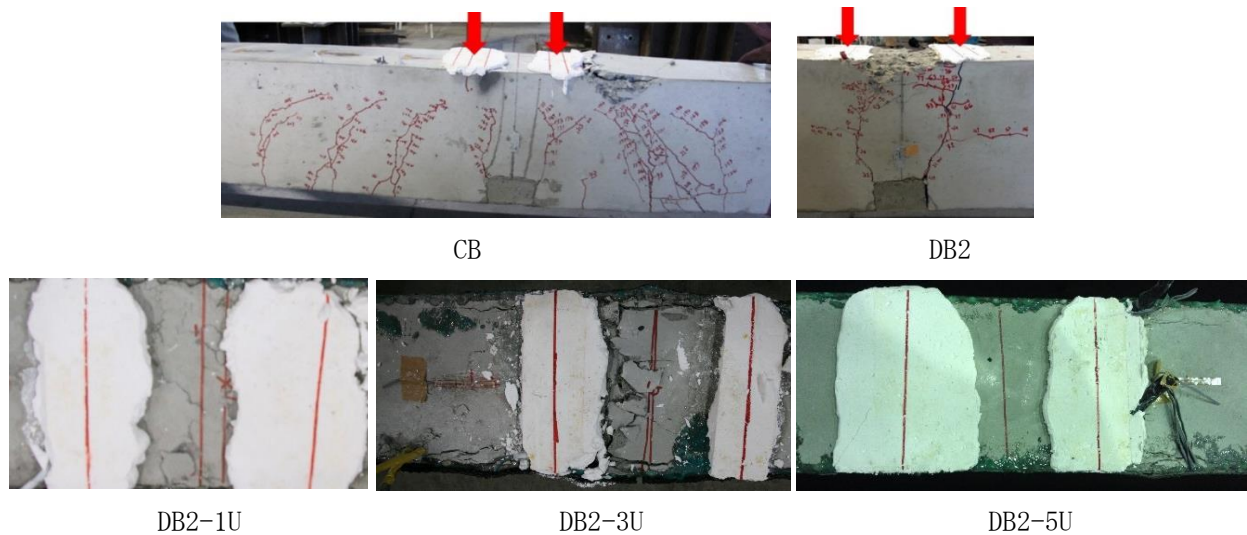


写真-1 載荷後試験体上面図写真

写真-1に、載荷試験後の各試験体の載荷点周辺の破壊状況を示す。CBとDB2ははり側面の写真でDB2-1U、DB2-3U、DB2-5Uははり上面の写真である。赤い矢印は載荷点の位置を示している。CB、DB2、DB2-1U、DB2-3Uに関しては、コンクリート圧縮縁が圧壊し、DB2以外は破壊モードはストランドの降伏を伴わない曲げ圧縮破壊であった。DB2-5Uに関しては、コンクリート上面に著しい損傷が見られなかったが、はりスパン中央から20cmの位置のコンクリートゲージの測定値と計算から求められるコンクリート圧縮縁破壊ひずみを比較すると、測定値が計算上の終局ひずみを18%上回っていた。したがって、DB2-5Uにおいても曲げ破壊が生じたものと考えられる。また、ひび割れは箱抜き部分の上部の隅からコンクリート上縁に向かって進展した。損傷試験体DB2ではこのひび割れが小さい荷重で発生し、コンクリート上縁まで進展することで、破壊が進行していくことを確認した。CFRPシートで補強することで箱抜き部分の上部の隅からのひび割れの進行を遅くできるものと推察される。

4. 結論

本研究で実施した、CFRPシートを下面接着したポストテンション式PCはりの載荷試験から得られた知見を以下に示す。

- (1) ストランドが破断したポストテンション式PCはりの底面に外部接着したCFRPシートの積層数が増加するにしたがって、曲げ耐力および部材剛性が向上し、顕著な曲げ耐力復元効果が確認された。
- (2) 載荷直前のストランドひずみの実測値を用いて、平面保持と完全付着の仮定に基づいて計算することでCFRPシートを下面接着したポストテンション式PCはりの曲げ破壊荷重を高い精度で算出することができる。

参考文献

- 1) Thi Thu Dung Nguyen, Koji Matsumoto, Yuji Sato, Asami Iwasaki, Tadahiko Tsutsumi and Junichiro Niwa: "Effects of Externally Bonded CFRP Sheets on Flexural Strengthening of Pretensioned Prestressed Concrete Beams Having Ruptured Strands", Journal of JSCE, Division E, Materials, Concrete Structures and Pavements, Vol.2, No.1, pp25~38, 2014.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編：特殊コンクリート】第10章，pp. 302～333，2012