

距離 1.2m, コンクリートの目標圧縮強度は 50N/mm² とした。実際に得られたコンクリートの圧縮強度は 56~65N/mm²であった。表-1 に実験シリーズを示す。試験体は全部で 10 体あり, 実験パラメータはシリーズ i では CFRP シートの配置, シリーズ ii では CFRP シートの積層数である。

図-2 の下側に示すように, 切断した PC ストランドのスパン中央から 200mm および 700mm の位置と, 切断していない PC ストランドのスパン中央から 700mm の位置でより線 7 本のうち 3 本にひずみゲージを貼付し, 試験体内部の PC 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。断面修復モルタルの養生から 7 日目に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。なお, コンクリートの面取り半径は R=10mm 程度である。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 シートを貼付した。なお, 図-3 に示すように本研究では試験体下面の部材軸方向に 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, 試験体下面の部材軸方向に接着したシートと, 側面に下面のシートを半分に分けて接着した側面部材軸方向シートの合計の積層数である。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 PC ストランドは, 公称断面積 98.71mm², 引張強度 1945N/mm² の 7 本より PC ストランドである。表-3 に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 PC ストランドを配置し, 700N/mm² の緊張力を導入した。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 PC 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, 金属用カ

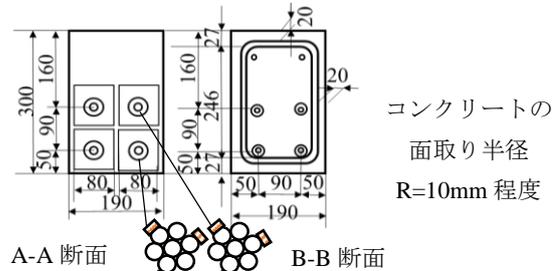


図-2 試験体断面図および PC ストランドに貼付したゲージ位置

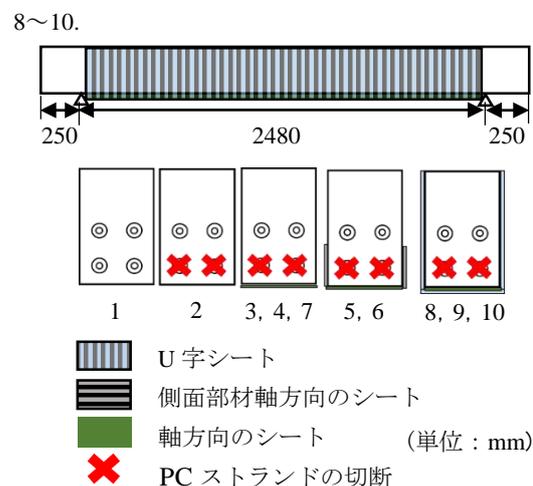
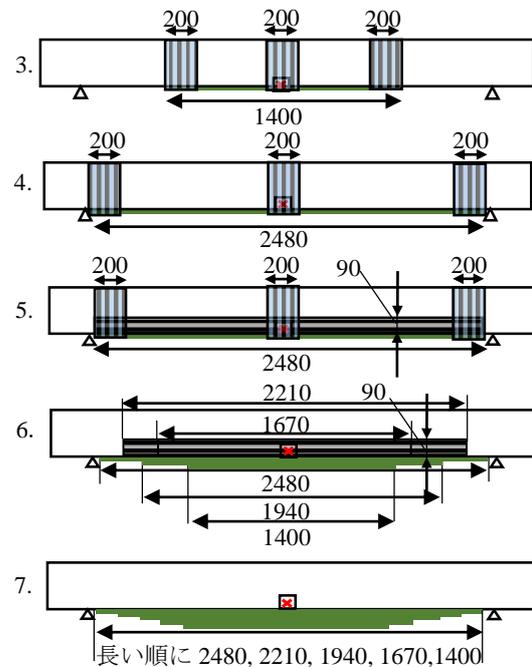


図-3 CFRP シートの配置 (側面図および断面図)

表-1 実験シリーズ

シリーズ	試験体名	PCストランドの切断の有無	シートの積層数	CFRPシートの配置
Ref.	1	無	0	図-3を参照
	2	有	0	
i	3	有	3	
	4	有	3	
	5	有	3(下2, 側1)	
	6	有	5(下3, 側2)	
	7	有	5	
ii	8	有	1	
	9	有	3	
	10	有	5	

ッターによって7本のより線の切断音を確認しながらPC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、「モルタル混和液」には練混ぜ水も含まれており、断面修復モルタルの圧縮強度は約35N/mm²であった。

3. 実験結果

3.1 荷重試験結果

静的4点曲げ荷重試験を行った。変位は変位計をスパン中央部と支承部にセットし、鉛直変位を測定した。まずシリーズiでは、下面軸方向シートが最も短い試験体3が最も最大荷重が小さく、下面軸方向に3層、側面に2層接着した試験体6が最も大きくなった。図-4に試験体1~7の荷重-変位曲線を示す。初期の曲げ剛性に着目すると、シリーズiの5体の試験体では、健全試験体1と比較し、顕著な差は見られなかった。

3.2 側面部材軸方向のCFRPシートの効果

写真-1に試験体4と試験体5の試験後の様子を示す。これら2体に用いたシートの積層数はどちらも3層である。CFRPシートを下面に2層接着し、残りの1層を側面に半分に分けて両側面に接着した試験体5の方が、最大荷重が小さくなった。一般に、シートの積層数が増加するとはく離しやすくなるという性質があるが、一方で側面のシートの幅(高さ)の1/2分だけ試験体の有効高さ

が減少するという欠点がある。図-5に、試験体5の荷重試験におけるひび割れ進行の過程を目視によって観察したものを示す。初めにスパン中央付近で(1)曲げひび割れが発生した後、(2)早い段階で側面のシートが軸方向に沿って急激に裂け、スパン中央からのシート剥離が生じた。シートの内側にかなり水平に近い斜めひび割れが発生し、シートの強度が存分に発揮できない状態になり、そのため今回側面のシートは耐力の向上にはあまり貢献できなかったものと考えられる。これは、同様の接着方法をプレテンションはりに適用した既往の研究結果⁹⁾とも一致している。写真-2に試験体6と試験体7を比較する。これら2体のシートの積層数はどちらも5層である。しかし、側面に2層、下面に3層接着した試験体6の方が、下面に5層接着した試験体7よりも最大荷重が大きいという、上記の試験体4および試験体5の結果とは逆の結果になった。図-4の試験体3~7の荷重-変位曲線上にCFRPシートの剥離発生点および試験体名の後の()内にはCFRPシートの剥離発生荷重をそれぞれ示す。試験体7は積層数を5層にしたにもかかわらず、CFRPシートの剥離発生荷重において積層数が3層の試験体と大きな差は見られなかった。これは一般に言われる剥離で強度が決まってしまったことによる影響であると考えられる。

図-6に試験体6の荷重試験におけるひび割れ進行の過程を目視によって観察したものを示す。最初は試験体5と同様に(1)曲げひび割れが発生し、(2)側面のシートが

表-2 材料特性値

コンクリート	早強セメント使用	目標圧縮強度 50N/mm ²
PCストランド	7本より, 1S12.7	引張強度 1945N/mm ²
		降伏強度 1702N/mm ²
		初期緊張力 700N/mm ²
		ヤング率 191kN/mm ²
鉄筋	圧縮鉄筋 D10 (SD295A)	降伏強度 380N/mm ²
	スターラップ D13 (SD345)	降伏強度 409N/mm ²
CFRPシート	高強度低弾性, 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	850	911	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

スパン中央方向に引き込まれ、(3)試験体下面のシートが剥離した。側面のシートを階段状に接着したことで、端部の剥離が防がれ、最大荷重が大きくなったと考えられる。

3.3 スパン全長にU字型に接着したCFRPシートの効果

図-7および表-6に、各試験体の最大荷重の実験値を示す。試験体2の最大荷重は、健全試験体1の約35%に低下したが、4本中2本のPC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8、試験体9、試験体10の最大荷重は、それぞれ健全試験体1の約74%、119%、150%となり、顕著な曲げ補強効果が確認された。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、図-8に示すように、最大荷重付近での荷重の変化の仕方に

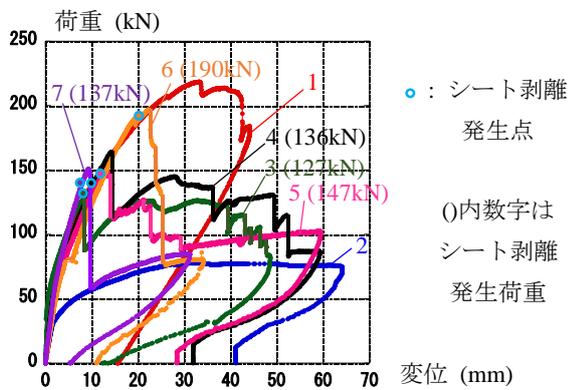


図-4 荷重-変位曲線 (シリーズ Ref.および i)



写真-1 荷重試験後の試験体 4 および 5

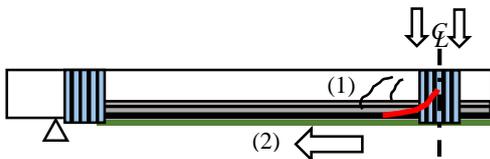


図-5 試験体 5 のひび割れの進行過程

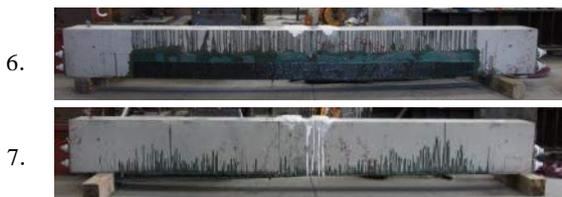


写真-2 荷重試験後の試験体 6 および 7

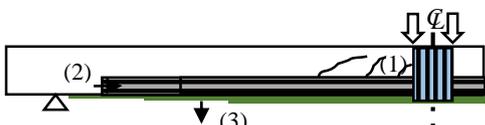


図-6 試験体 6 のひび割れの進行過程

違いが見られた。無補強試験体2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。一方シートを接着した試験体8、試験体9、試験体10は、外観からは軸方向のシートおよびU字シートの剥離は見られなかったが、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。最大荷重付近においてCFRPシートが内部で破断したのと考えられる。また終局時に着目すると、シートの積層数が増加する終局荷重は大きくなるが、終局時の変形性能が小さくなる傾向にある。これはAFRPシートを用いた既往の研究²⁾結果

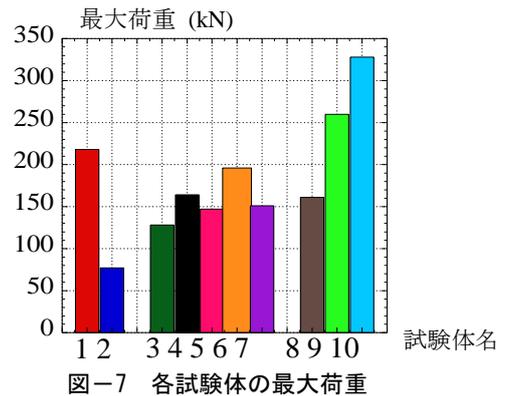


表-6 各試験体の実験値・状況

()内数字は健全試験体1との最大荷重の比

シリーズ	試験体名	ひび割れ発生荷重 P_{cr} (kN)	コンクリートの圧縮強度 f'_c (N/mm ²)	最大荷重 $P_{u,exp}$ (kN)	シートの剥離
Ref	1	81	65.0	218 (1.00)	-
	2	32	64.0	77 (0.35)	-
i	3	54	62.1	128 (0.58)	有
	4	48	63.3	164 (0.75)	有
	5	57	64.1	147 (0.67)	有
	6	62	64.4	196 (0.90)	有
	7	55	64.4	151 (0.69)	有
ii	8	49	62.0	161 (0.74)	無
	9	54	56.6	260 (1.19)	無
	10	65	59.6	328 (1.50)	無

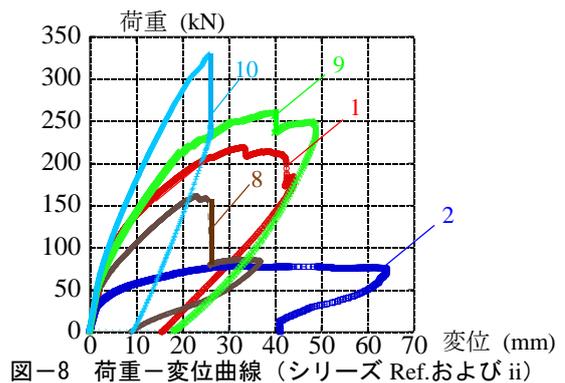


図-8 荷重-変位曲線 (シリーズ Ref.および ii)

ひずみ (με)

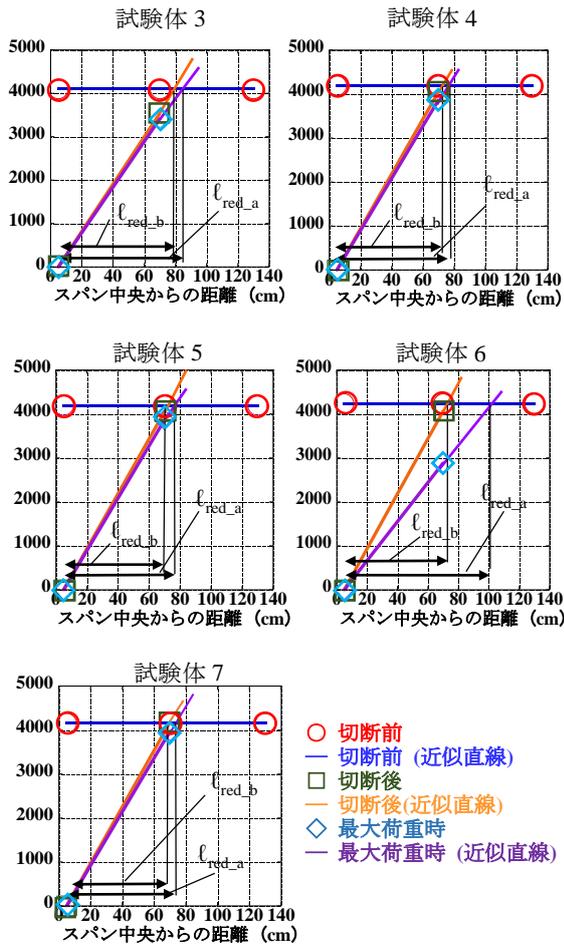
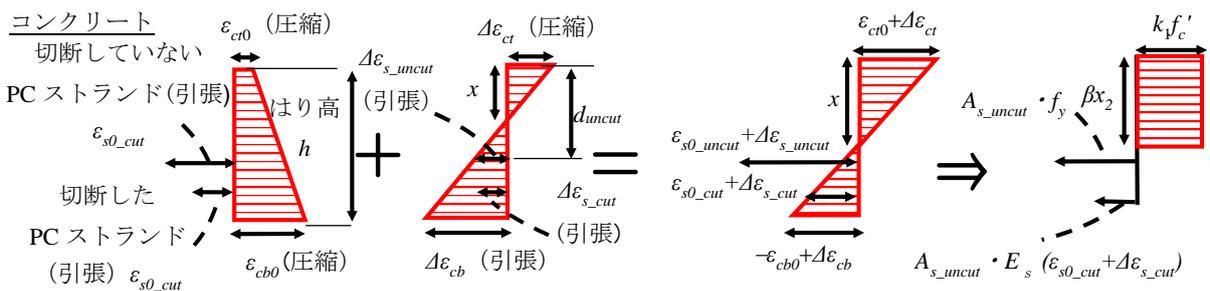


図-9 切断前後の PC ストランドのひずみ分布

表-7 荷重によるPCストランドのひずみの変化量

試験体	ピーク時, スパン中央から 20cm 地点		$\Delta\epsilon_{s_cut} / \Delta\epsilon_{s_uncut}$ (%)
	切断した PC ストランドのひずみ $\Delta\epsilon_{s_cut}$ (με)	切断していない PC ストランドのひずみ $\Delta\epsilon_{s_uncut}$ (με)	
1	41	526	7.7
2	119	2202	5.2
3	32	1026	3.1
4	71	1554	4.6
5	79	824	9.5



(a) プレストレスによるひずみ分布 (b) 荷重によるひずみ変化分布 (c) 実際のひずみ分布 (d) 力・応力分布
図-10 曲げ破壊時の断面計算

と同様の傾向にある。

3.4 切断したPCストランドのひずみ分布

(1) 荷重試験前

切断したPCストランドのひずみが荷重によってどのように変化するかを検討するため、以下のような仮定に基づいてひずみの減少区間 $l_{red,b}$ を算出した。図-9に各試験体の荷重試験前の切断したPCストランドのひずみの分布を示す。シリーズiの試験体3~7において、荷重試験前に切断したPCストランドのスパン中央から70cmの点のひずみを測定した。その後、スパン中央から5cmのひずみを0とする境界条件の下で近似直線を引き、切断前と切断後のひずみ分布を表した2直線の交点の値を求め、スパン中央から5cmの点からこの交点までの長さをそれぞれひずみの減少区間とした。その結果、表-7に示すように、スパン中央から20cmの地点の最大荷重時における切断したPCストランドのひずみは、切断していないPCストランドのひずみの3.1%~9.5%のひずみとなった。

(2) 最大荷重時

図-9の「最大荷重時」のひずみ分布のグラフに荷重試験後において変化したひずみ分布の減少区間 $l_{red,a}$ を示す。スパン全長にわたって下面軸方向シートを接着した場合でも剥離が生じたことを考慮すると、少なくともひずみの減少区間全長分は連続的にU字型シートを接着する必要があったと考えられる。図-10に試験体の曲げ破壊時の断面計算の方法を示す。プレストレス導入時のコンクリートのひずみ分布は上縁、下縁において台形分布を仮定し、荷重によるコンクリート下縁および切断していないPCストランドのひずみの変化量は完全着の仮定に基づき、式(1)、式(2)を用いて中立軸の位置を求めることができるものとする。

$$\frac{\Delta\epsilon_{ct}}{x_1} = \frac{\Delta\epsilon_{s_uncut}}{d_{uncut} - x_1} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\epsilon_{ct}}{x_1} = \frac{\Delta\epsilon_{cb}}{h} \quad (2)$$

終局荷重の算出式で用いられる k_1 , β および ϵ_{cu} の値はコンクリート標準示方書³⁾に定められた、式(3)、式(4)および式(5)で与えられるものとする。

$$k_1 = 1 - 0.003f'_c \quad (3)$$

$$\beta = 0.52 + 80\varepsilon_{cu} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{cu} = \frac{155-f'_c}{30000} \leq 0.0035 \quad (5)$$

また、切断したPCストランドの項を考慮していない場合および考慮した場合の終局耐力 M_{u_with} および $M_{u_without}$ は、それぞれコンクリート標準示方書⁴⁾の設計式に基づいて以下の計算式(6)および(7)によって求めた。

$$M_{u_with} = k_1 f'_c \cdot \beta x_2 \cdot b \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta x_2}{2} \right) + A_s f_y \left(\frac{h}{2} - d_{uncut} \right) + A_s E_s (\varepsilon_{s0_cut} + \Delta\varepsilon_{s_cut}) \left(\frac{h}{2} - d_{cut} \right) \quad (6)$$

$$M_{u_without} = k_1 f'_c \cdot \beta x_2 \cdot b \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{\beta x_2}{2} \right) + A_s f_y \left(\frac{h}{2} - d_{uncut} \right) \quad (7)$$

終局計算過程においては、切断したPCストランドについては完全にはないものとして扱ったが、このひずみの変化量が終局耐力の計算値にどの程度影響を与えるのか式(6)および式(7)の計算によって検討した。その結果、表-8が示すように切断したPCストランドが終局耐力に寄与するひずみ量は6~12%程度であることがわかり、計算結果に与える影響は小さいことが分かった。また、切断したPCストランドはシートの剥離や破断にともなって載荷試験によるひずみの増減が引張側、圧縮側に变化するが、切断していないPCストランドは除荷するまではシートの剥離や破断によらず一定の割合で増加するという挙動の違いが見られた。したがって、破断した部分から離れたPCストランドでは引張力を受け持つことができるものと考えられる。

3.5 平面保持の仮定の成立の検証

シリーズ i のスパン中央から 20cm の地点において、

表-8 切断したPCストランドの項(式(7)の3項目)の有無による終局荷重の違い

試験体	考慮有り M_{u_with} (kN)	考慮無し $M_{u_without}$ (kN)	$M_{u_with} / M_{u_without}$
3	116.3	104.6	1.11
4	148.9	139.0	1.07
5	144.4	134.7	1.06
6	142.2	126.0	1.12
7	172.3	159.6	1.07

表-9 CFRP シートとコンクリート下面のひずみ

試験体	シートひずみ $\Delta\varepsilon_{CFRP}$ ($\mu\varepsilon$)	コンクリート 下面のひずみ $\Delta\varepsilon_{cb}$ ($\mu\varepsilon$)	$\Delta\varepsilon_{CFRP} / \Delta\varepsilon_{cb}$
3	663	621	1.06
4	841	741	1.13
5	777	705	1.10
6	1173	1115	1.05
7	760	700	1.09

載荷によって増加するコンクリート上縁のひずみおよび切断していないPCストランドのひずみから、コンクリート下面のひずみの変化量を算出し、その値を試験体下面に接着したCFRPシートのひずみの値を比較したものを表-9に示す。なお、シートとコンクリート界面には完全付着を仮定した。その結果、両ひずみの値は5~13%程の差異であり、平面保持の仮定が成立していることが確認できた。

4. 結論

本研究では、接着したCFRPシートの積層数、配置およびPCストランドの切断の有無を実験パラメータとして、ポストテンション式PCはりの載荷試験を実施した。以下に、本研究で得られた結論を述べる。

- 1) U字型にCFRPシートをスパン全長にわたって接着した場合には、PCストランドが破断したポストテンション式PCはりの下面に外部接着した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) 損傷が著しいと考えられる箇所にも局所的であっても、CFRPシートで補強するとスパン全長にわたってU字型に補強したはりと曲げ剛性に顕著な差は見られなかったことを確認した。
- 3) 切断したPCストランドにおいても、切断箇所からある程度離れた位置では、載荷試験によってひずみは増加する。これを耐力計算の式に含めても、最終的な計算結果に与える影響は小さい。

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, pp.25-38, 2014.
- 2) 鈴木健太郎, 岸徳光, 三上浩, 澤田純之: CFRPシート下面接着PC梁の耐荷性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1537-1542, 2008
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書【構造性能照査編】第6章, pp.60-61, 2002
- 4) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[設計編: 標準], 2012