

# 報告 連続繊維補強材を用いた PC はりの促進暴露試験

中井 裕司\*1・渡部 寛文\*2・西村 次男\*3・魚本 健人\*4

**要旨:** 著者らは、連続繊維補強材(CFRM)と PC 鋼より線を緊張材としたプレテンションはりを用いて乾湿と温度により外力を加える促進暴露を行なった。CFRM は、コンクリートと異なる線膨張係数と加水分解のリスクを有するが、促進暴露試験の結果、CFRM を緊張材とした部材は、PC 鋼より線を用いた部材より安定したプレストレスが残存し、暴露試験後も想定どおりの部材性能を有することが分かった。

**キーワード:** 連続繊維補強材, 促進暴露試験, プレテンションはり, 緊張力, 付着, 線膨張係数

## 1. はじめに

連続繊維補強材 (CFRM) は、1988 年以来、主として緊張材用途で日本国内において 350 件余りの構造物に適用されており、これまでに劣化の報告は無い<sup>1)</sup>。また、官学産で行った大規模な暴露試験においても CFRM の劣化は認められていない<sup>2)</sup>。一方、CFRM の線膨張係数がコンクリートと異なること、結合樹脂および有機系繊維が加水分解することから、コンクリートとの付着劣化の問題が指摘されている<sup>3)</sup>。

本研究の目的は、CFRM および PC 鋼より線を緊張材に適用したプレテンション部材に対して乾湿と温度の繰返し外力を与え、経時的な劣化性状を明らかにすることにある。外力は、2 つの方法で与えた。1 つは、飛沫帯と内陸部における計画 15 年間の自然暴露試験である。2 つ目は、試験槽を用いて温度と水量をコントロールすることによる促進暴露試験である<sup>4)</sup>。

本論は、この内、促進暴露試験で 150 サイクルと 300 サイクルの暴露後における静的載荷試験の結果を報告する。

## 2. 試験体の諸元

### 2.1 使用材料

使用した緊張材の材料特性を表-1 に示す。用いた CFRM は、アラミドで Technora<sup>®</sup>、カーボンで CFCC<sup>®</sup> である。線膨張係数は、PC 鋼より線(Steel)の場合コンクリートと同程度あるのに対して、CFRM の場合マイナスもしくはゼロである。また、アラミド、カーボン、PC 鋼より線の比率で、引張強度は約 1:0.75:1、ヤング率は約 1:2:4 である。

使用したコンクリートの配合を表-2 に示す。これはプレテンション部材用の配合であり、水セメント比が 0.372、12 時間の蒸気養生で 35N/mm<sup>2</sup> の圧縮強度を目標

表-1 緊張材料の特性値

Material	Aramid	Carbon	Steel
Designation	Technora	CFCC	SWPR-7A
	φ6.0	φ10.5	φ9.3
Nominal cross section area (mm <sup>2</sup> )	32.5	79.1	51.6
Nominal diameter (mm)	6.4	10.0	9.3
Guaranteed capacity (kN)	56.9	104	88.8
Tensile Capacity (kN)	62.5	114	103
Young's modulus (kN/mm <sup>2</sup> )	46	104	197
Elongation (%)	3.8	1.2	7.1
Thermal expansion coefficient (x10 <sup>-6</sup> /°C)	-3	0.6	12

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	S/A (%)	Air (%)	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Fine A. (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse A. (kg/m <sup>3</sup> )	S.P. (kg/m <sup>3</sup> )
37.2	41.0	2.0	430	160	731	1060	4.73

表-3 コンクリートの材齢と圧縮強度の関係 (N/mm<sup>2</sup>)

	Age	Ave.
Introduce prestress	1 day	38.2
Initial loading	2 months	65.6
End of 150 cycles exposure	44 months	81.2
End of 300 cycles exposure	102 months	78.7

\*1 前田工織 (株) 環境事業本部 部長 (正会員)

\*2 川田建設 (株) 技術部

\*3 東京大学 生産技術研究所 (正会員)

\*4 芝浦工業大学 工学部土木工学科 教授 (正会員)

としている。各材齢の圧縮強度を表-3 に示す。コンクリートの圧縮強度が長期間に渡って増進していることがわかる。

## 2.2 試験体の寸法、荷重方法と諸耐力

供試体は、断面が 100mm×100mm で、長さが 1500mm である。緊張材を断面中心に、付着割れ防止のためにφ50mm の SUS304 フープ筋を 30mm ピッチで周囲に配置した。緊張材の本数は、アラミドが 2 本を 1 組として、その他が 1 本を 1 組として用いた。断面図を図-1 に示す。供試体はプレテンション方式で製作した。緊張、コンクリート打設、蒸気養生、緊張力の部材への導入を 24 時間で行なった。

暴露試験前後の静的荷重は、図-2 に示すように、せん断スパン 0.4m の 4 点荷重とした。計測項目は、荷重・変位・ひび割れ幅である。

供試体の諸耐力とその算出にかかわる数値を表-4 に示す。全供試体の初期緊張力は、その緊張材の保証引張耐力の 62% とした。有効緊張力は、44 ヶ月経過時の見かけのリラクセーションと供試体の収縮ひずみを仮定して推測した。各緊張材の見かけのリラクセーションは、アラミド、カーボン、PC 鋼より線で、それぞれ 15%、1.75%、1.5% とした。収縮ひずみは、環境条件・部材寸法・プレストレス量が異なるが、内陸部に自然暴露している供試体における測定値 (約 900μ) とした<sup>5)</sup>。有効プレストレスの計算値は式(1)を用いた。

$$\sigma_{pe} = (1 - \gamma_t) \cdot \sigma_{pi} - E_f \cdot \varepsilon_s \quad (1)$$

where

$\sigma_{pe}$  : effective stress,  $\sigma_{pi}$  : prestressing stress,

$E_f$  : young's modulus,  $\varepsilon_s$  : shrinkage strain,

$\gamma_t$  : apparent relaxation rate

曲げひび割れ耐力は、有効プレストレスと曲げひび割れ強度を用いて算出している。ひび割れ再開耐力は、引張縁においてプレストレスによって発生する圧縮応力を打ち消すのに必要な曲げモーメントを発生させる荷重で、有効プレストレスを用いて算出している。有効プレストレスは、材齢 44 ヶ月における式(1)で得られる値を全ての供試体に対して用いている。曲げひび割れ強度

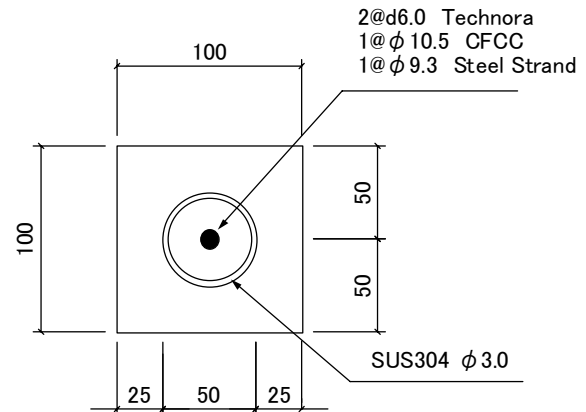


図-1 供試体の断面図 (mm)

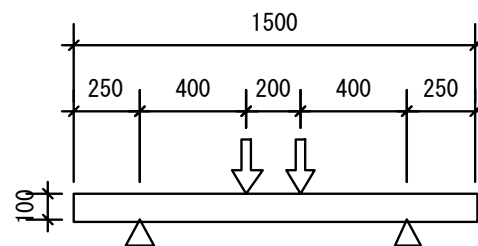


図-2 供試体の荷重方法図 (mm)

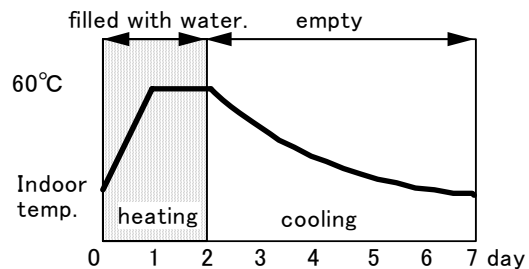


図-3 促進暴露試験装置の環境条件



写真-1 促進暴露試験状況

表-4 供試体の導入プレストレスと計算耐力

Material of specimens	Jacking force (kN)	Prestressing stress (MPa)	Effective stress (MPa)	Effective prestress ratio	Compressive stress due to prestressing (MPa)	Flexural strength (MPa)	Cracking capacity (kN)	Crack reopening capacity (kN)	Ultimate capacity $f_{ck}=80\text{MPa}$ (kN)
Aramid	68.5	1053.8	854.4	0.811	5.55	5.21	9.0	4.6	21.0
Carbon	61.6	778.8	671.5	0.862	5.31	5.21	8.8	4.4	23.9
Steel	59.2	1147.3	952.8	0.830	4.92	5.21	8.4	4.1	25.0

は、コンクリートの圧縮強度を 65MPa として、2002 年制定コンクリート標準示方書に規定されている引張強度の 1.4 倍と仮定している。この仮定は、供試体寸法が現行示方書の曲げひび割れ強度式の適用範囲外であるが、曲げひび割れ強度に関する諸係数を準用した。

曲げ耐力は、コンクリートの圧縮強度を 80MPa として上縁圧縮ひずみが 3500 $\mu$  に到る曲げモーメントを算定している。

### 3. 促進暴露試験の方法

#### 3.1 促進暴露試験装置

促進暴露試験装置は、水循環式タンクである。図-3 に示すような水温と干満が設定されており、タンク内の供試体に 1 週間で 1 回の外力を与えるように自動運転している。水温は加熱機で最高 60℃ まで上昇し、自然放熱で室内温度まで低下する。干満は水位をポンプで制御している。この外力により緊張された CFRM とコンクリートの線膨張係数の差による付着切れと CFRM の加水分解を促進させることを目的とした。タンクへの供試体の設置状況を写真-1 に示す。

#### 3.2 促進暴露試験の回数と評価方法

促進暴露試験のパラメータを表-5 に示す。供試体は 3 グループに分類される。第 1 文字目の A は促進暴露を、第 2 文字目の [A,C,S] は緊張材の種別を、第 3 文字目の [Control,1,2,3] は促進暴露回数に対応している。静的荷重試験は、促進暴露の回数に応じて、処女荷重、2 次荷重、3 次荷重を行なっている。なお、基準供試体の A[A,C,S]Control は、千葉県内陸部の自然暴露場にて材齢 44 ヶ月まで保管した。

処女荷重は、暴露試験の前に供試体に曲げひび割れを生じさせる目的で行なった。曲げひび割れ耐力の約 1.5 倍の荷重 13.5kN まで単調に荷重、ひび割れ本数とクラックゲージによるひび割れ幅を測定した。

2 次荷重は、促進暴露試験 150 サイクル経過後、基準供試体を含む全ての供試体に対して行なった。初めに 13.5kN まで荷重、次に、各供試体の計算曲げ耐力の 80% まで荷重した。その後、各材料の基準供試体

A[A,C,S]Control と各材料 1 体 A[A,C,S] 1 を破壊まで荷重した。残る供試体 A[A,C,S] [2,3] は促進暴露試験に戻した。

3 次荷重は、合計 300 サイクル経過後、CFRM 供試体各 2 体、PC 鋼より線供試体 1 体に対して、13.5kN、次に、計算曲げ耐力の 80%、最後に破壊までの 3 ステップで荷重した。

例えば、AA1 は、150 回の促進暴露を受けたアラミドを緊張材で、2 次荷重後に破壊試験を実施した供試体を示す。

2 次荷重以降の曲げひび割れ幅は 50mm スパンの  $\pi$  ゲージで測定した。

### 4. 試験結果と考察

#### 4.1 暴露試験後の外観と内部状況

供試体は、緊張材の定着部の付着割裂や、促進暴露載

表-6 荷重試験結果の一覧 (kN)

Loading No.	Cracking load			Ultimate load
	Initial	Second	Third	
AAControl	9.9	4.24	-	22.1
AA1	10.1	5.51	-	22.1
AA2	13.2	5.35	3.94	22.6
AA3	10.1	6.22	5.82	22.8
AA.calc	9.0	4.60		21.0
ACControl	10.6	4.25	-	24.6
AC1	10.1	7.06	-	26.5
AC2	10.1	6.57	6.00	25.7
AC3	10.1	6.27	6.18	26.7
AC.calc	8.8	4.40		23.9
ASControl	9.7	0.00	-	16.5
AS1	10.1	5.76	-	23.5
AS2	10.1	6.09	4.18	23.6
AS.calc	8.4	4.10		25.0

\*1 ひび割れ再開荷重は、荷重とひび割れを跨ぐように設置した  $\pi$  ゲージ変位の関係において、荷重 1.5kN までの割線勾配に対して、変位が 0.002mm 軟化側にシフトした時点の荷重とした<sup>5)</sup>。

表-5 促進暴露試験のパラメータ

Name of specimen	Initial loading	Exposure to 150 cycles	Second loading	Test to failure	Exposure to 300 cycles	Third loading	Test to failure	Quantity
A[A,C,S]Control			yes	yes				3
A[A,C,S]1	yes	yes	yes	yes				3
A[A,C,S][2,3]*	yes	yes	yes		yes	yes	yes	5

Initial letter designates type of exposure: A = Accelerated.

[A,C,S] describes the tendon: A = Aramid; C = Carbon; S = Steel.

\*: AS is 2 only

荷によって損傷を受けているような外観変状は認められなかった。また、載荷試験後、解体調査した PC 鋼より線に腐食は認められなかった。したがって、本促進暴露荷重である高温と乾湿の繰り返しによってコンクリートや鋼材に生じる材料的な損傷を与えることは無かったと考えられる。

#### 4.2 処女載荷におけるひび割れ荷重

表-6 に載荷試験の主だった試験結果の一覧を示す。促進暴露載荷前の処女載荷におけるひび割れ荷重の計算値に対する割合を図-4 に示す。ひび割れ荷重は、計算値に対して 1.15~1.23 倍であり、各材料とも設計どおりの部材性能を有している。ひび割れ耐力レベルにおいては、導入されたプレストレスが全ての材料で有効に機能していることが分かる。

#### 4.3 2次載荷におけるひび割れ幅と本数

2次載荷で最初の 13.5kN 時における暴露載荷された各供試体におけるひび割れ幅の最大値の平均値と、基準供試体のひび割れ幅の最大値、および、ひび割れ本数の平均値を緊張材料毎にまとめたものを図-5 に示す。

CFRM を緊張材とした供試体は、基準供試体も暴露された供試体も同程度の最大ひび割れ幅を示している。一方、PC 鋼より線を緊張材とした供試体は、両者が異なる。促進暴露載荷を受けた供試体は小さいひび割れ幅であるのに対して、基準供試体はひび割れ幅が制御されていない。原因は、曲げひび割れ以降の荷重の増分により、PC 鋼より線の付着が劣化しスリップしたものと考えられる。つまり、この小型の PC 鋼より線を用いた供試体は、自然環境での乾燥や日照により著しい収縮が生じたために PC 鋼より線とコンクリートの付着が劣化したと考えられ、本促進暴露よりも基準供試体としての自然環境での保管のほうが厳しかったようである。

CFRM 供試体のうちアラミドはカーボンよりもひび割

れ幅が大きく、ひび割れ本数も多くなっている。これは緊張材料の引張剛性が 1:2.8 であること、使用したアラミド緊張材は、用いたカーボン緊張材より付着特性が優れているためと考えられる。

促進暴露の有無にかかわらず、CFRM を用いた短いプ

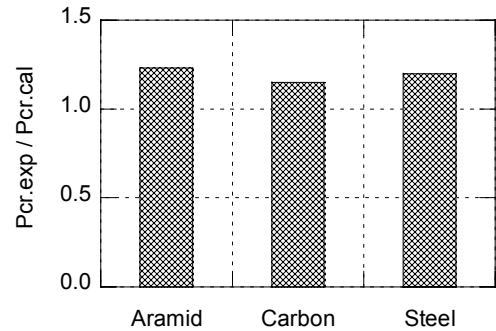


図-4 曲げひび割れ荷重と計算値の比較

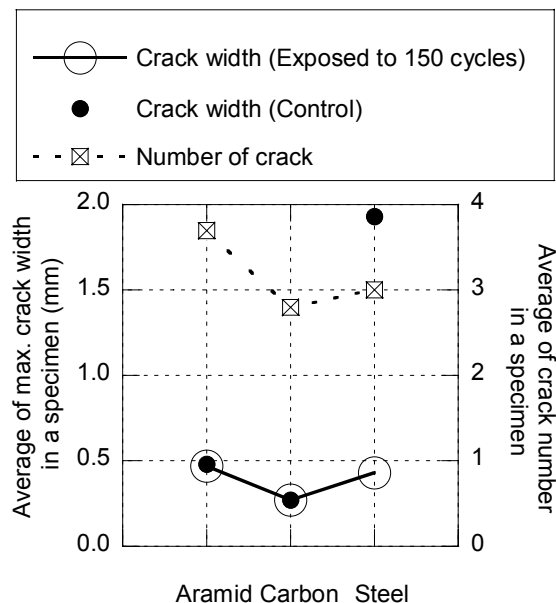


図-5 ひび割れ幅とひび割れ数の関係

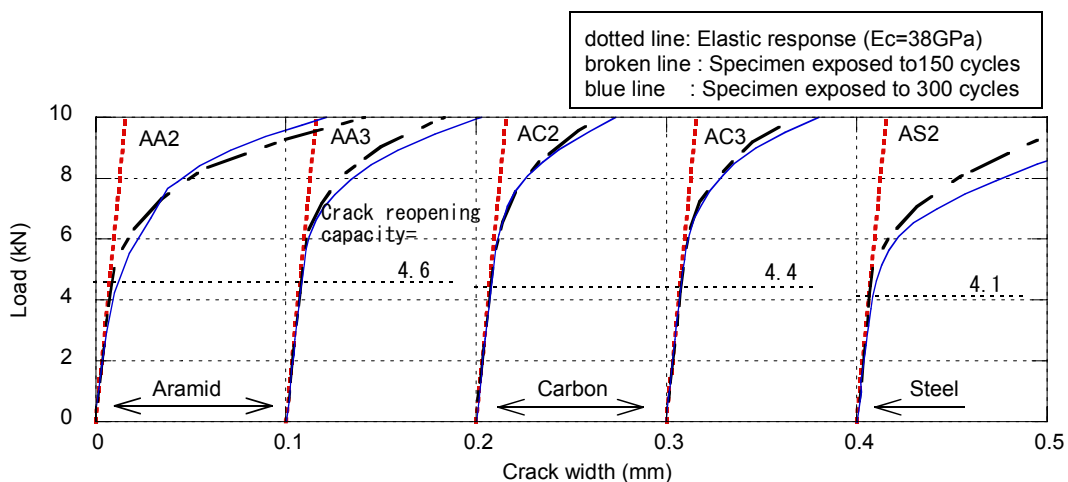


図-6 供試体毎の暴露載荷によるひび割れ再開荷重の変化

レテンション部材の曲げひび割れ後の特性は、PC 鋼より線を用いた部材よりも優れていることが分かる。

#### 4.4 暴露サイクルとひび割れ再開荷重について

プレストレストコンクリート部材の肝要は、プレストレスの安定維持である。ここでは、残存する有効プレストレスの評価を計算ひび割れ再開荷重と載荷試験で得られた荷重-ひび割れ幅の関係から推定することを試みた。

図-6 は、2 次と 3 次載荷を行った供試体 *A[ACS]/[23]* における最初のひび割れ再開荷重時付近の荷重-ひび割れ幅の関係と、コンクリートの弾性係数を 38GPa と仮定した場合の  $\pi$  ゲージのスパン 50mm に対する部材下端の弾性応答変位を点線で示したものである。なお、材齢 44 ヶ月における計算有効プレストレスを打ち消すひび割れ再開荷重を図中に付記した。

CFRM 供試体のひび割れ部開口変位は、計算ひび割れ再開荷重以上まで弾性応答変位と同等の剛性を有している。また、促進暴露回数が増加することによるひび割れ部開口変位の剛性の変化点と低下の程度も同程度であり、促進暴露の回数増による劣化は認められない。300 サイクル暴露後の *AA2* 供試体は、ひび割れ開口荷重が低く見えるが、ひび割れ開口後の剛性の低下は 150 サイクル暴露後に比較して少なく、有効プレストレスは計算どおりに残存していたものと考えられる。

一方、計算ひび割れ再開荷重の最も低い PC 鋼より線を用いた *AS2* 供試体は、ほぼ計算ひび割れ再開荷重相当からひび割れが開口し始めており、明らかに他の CFRM 供試体より劣っている。また、300 サイクル促進暴露載荷を受けた場合、ひび割れ再開荷重が低下しひび割れ幅も急激に広がっている。2 次載荷の影響で付着損傷し有効プレストレスが減少したものと考えられる。

表-6 のひび割れ再開荷重の一覧に示すように、基準供試体の *A[A,C,S]Control* すべてにおいて、ひび割れ再開荷重の低下傾向が認められる。供試体の 100×100mm 断面に生じるコンクリートの収縮がプレストレスの減少を生じさせた可能性があり、その影響を PC 鋼より線の供試体が著しかった可能性は否めない。

#### 4.5 暴露サイクルと荷重変位の関係

基準供試体と 150 サイクル促進暴露載荷を受けた供試体の 2 次載荷、および、300 サイクル促進暴露載荷を受けた供試体の 3 次載荷の荷重-変位の関係を緊張材料毎に図-7 に示す。図中にそれぞれの供試体における限界状態の代表値として計算曲げひび割れ荷重と終局荷重を併記している。

CFRM を緊張材とした供試体は、それぞれの限界状態を満足していることを概観できる。対して、PC 鋼より線を用いた供試体は計算終局荷重を満足していない。また、

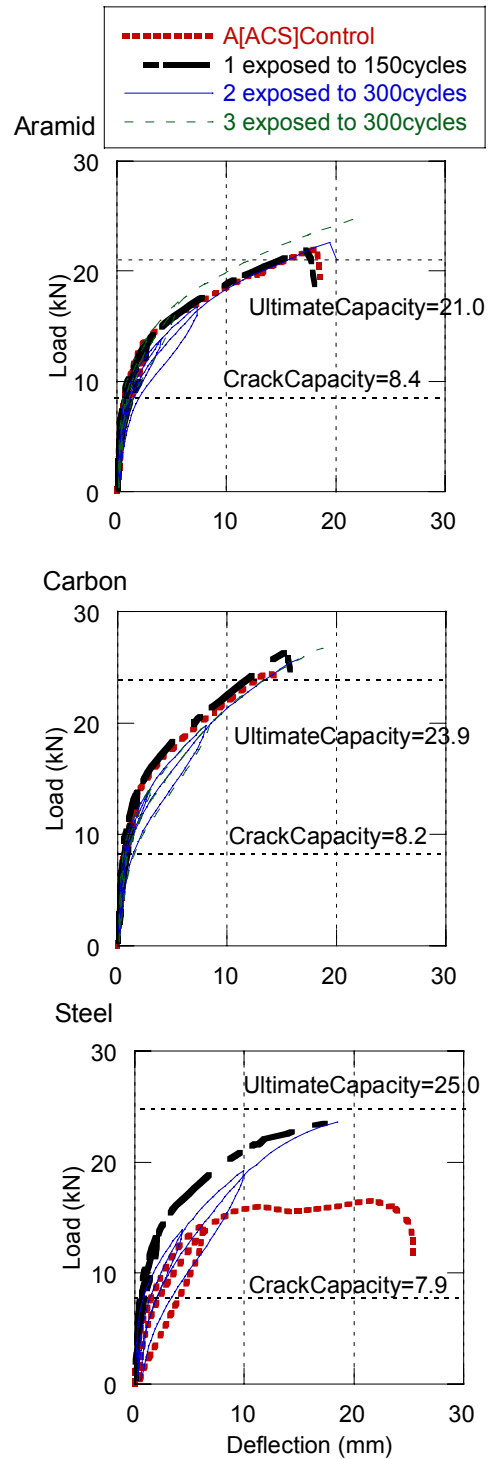


図-7 緊張材毎の荷重と変位の関係

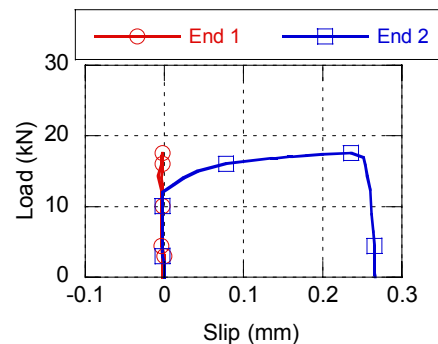


図-8 ASControl 供試体の緊張材のスリップ

CFRM を緊張材とした供試体は、促進暴露载荷を受けることにより荷重-変位関係が劣化していない。対して、PC 鋼より線を用いた供試体は、促進暴露の有無および回数増加によって荷重-変位関係の剛性が低下していることが分かる。

この原因は付着劣化による PC 鋼より線のスリップであると考えられる。ASControl 供試体の部材端における緊張材の荷重とスリップ変位の関係を図-8 に示す。曲げひび割れ開口後に曲げひび割れ幅が増大し、付着劣化が部材中央部から部材端に進行したものと考えられる。PC 鋼より線の定着長の不足も一因と思われるが、曲げひび割れ荷重が計算値以上であったので考えにくい。

#### 4.6 定着長に対する考察

促進暴露試験に用いたプレテンションはりは全長 1500mm である。一般に、プレテンション緊張材の定着長は、用いたアラミド緊張材で 35φ (320mm)、カーボン緊張材と PC 鋼より線で 65φ (600mm)とされている。部材としての付着定着長の不足の問題であれば、カーボン供試体でも PC 鋼より線と同様の問題が生じる可能性があった。

同一環境に暴露された供試体で、PC 鋼より線供試体で著しくプレストレスの減少が生じていることは、CFRM の線膨張係数と加水分解のリスクより、付着に関する高いリスクを PC 鋼より線が有していると考えられる。

少なくとも本促進暴露の範囲内で、CFRM の上記リスクは生じなかった。

#### 5. まとめ

CFRM と PC より線を緊張材とした小型プレテンションはりに対して、温度と水分を荷重とした促進暴露試験の結果、以下の知見を得た。

- 1) 環境条件に関わらず部材の曲げひび割れ荷重は設計以上であった。
- 2) 促進暴露の有無にかかわらず、CFRM を用いた短いプレテンション部材の曲げひび割れ後の特性は、PC 鋼より線を用いた部材よりも優れている。
- 3) 促進暴露载荷によって、プレストレスは CFRM 緊張材を用いた部材では安定しており、PC 鋼より線を用いた部材では減少した。
- 4) CFRM の線膨張係数の小ささと結合材および有機繊維の加水分解等のリスクによるプレテンション部材の緊張材の付着劣化は、本研究の範囲内では生じなかった。

#### 6. 謝辞

本研究は、CFRM の建設分野への適用拡大のために、CFRM の長期耐久性の検証を行っている。すでに自然暴露試験も 10 年を経過したが、CFRM の具体的な損傷は

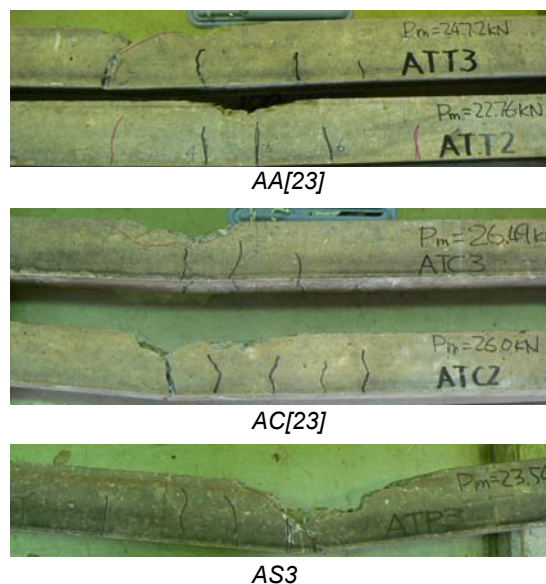


写真-2 供試体の破壊状況

認められていない<sup>4,5)</sup>。この研究が、CFRM の耐久性照査の資料になることを期する。なお、本研究は、建設用先端複合材技術協会(ACC)の寄付を受けて、東京大学生産技術研究所が実施したものである。

#### 参考文献

- 1) ACC: ACC Project using new materials, 2007.4
- 2) Fuminori TOMOSAWA, Teruyuki NAKATSUJI, Kozo KIMURA, Koji SAKA, Hiroyasu KAWAGUCHI: Evaluation of ACM reinforcement durability by exposure test, ASME, 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE98-4361), 1998
- 3) Rajan Sen, Mohsen Shahawy, Josas Rosas and Satya Sukumar: Durability of Aramid Fiber Reinforced Plastic Pretensioned Elements under Tidal/Thermal Cycles, ACI Structural Journal No.90-S11, pp.95-104, Jan./Feb.1999
- 4) Hiroshi NAKAI, Hiroshi SAKAI, Tsugio NISHIMURA, Taketo UOMOTO: Durability of aramid and carbon FRP PC beams under natural and accelerated exposure, FRPRCS-6, July 2003
- 5) 中井裕司, 酒井博士, 西村次男, 魚本健人: 各種連続繊維補強材を用いた PC はりの暴露試験の中間報告, コンクリート工学年次論文報告集, Vo1. 25, No. 1, pp. 335-340, 2003. 6