

論文 超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレテンション部材の構造性能

一宮 利通*1・曾我部 直樹*2・本田 智昭*3・日紫喜 剛啓*4

要旨: 高い圧縮強度と曲げ靱性を有するエトリングait生成系超高強度繊維補強コンクリートを開発し、実用化を進めている。本研究では、プレテンション部材への適用を想定し、その構造性能を実験的に検討した。その結果、通常のコンクリートの場合よりも伝達長が短くなること、既往の評価方法を用いて有効プレストレスを評価できること、部材の曲げおよびせん断耐力を既往の設計法で評価できることが確認された。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート, プレテンション部材, 有効プレストレス

1. はじめに

高い圧縮強度と曲げ靱性を有する超高強度繊維補強コンクリート(以下, UFC)が実用化され, 土木学会「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)」¹⁾(以下, UFC指針)においてその設計施工方法が示されている。UFCをプレストレストコンクリート部材として使用した場合, 構造物の軽量化に伴う施工の簡略化や下部工規模の縮小等の効果が期待できる。UFCを用いた部材では鉄筋を配置する必要がないことから施工上の制約を受けずに部材厚さを薄くできるため, その効果は高いと考えられる。

UFC部材は一般に工場製作されることから, プレテンション部材として利用されることが多くなると考えられる。その場合, UFCの蒸気養生中における収縮を鋼材が拘束することによってひび割れが生じないように, 蒸気養生前にプレテンションを導入することが想定される。しかし, UFCを用いたプレテンション部材の伝達長や有効プレストレスは明らかとなっていない。また, プレテンション部材では公称直径φ15.2mm以下のPC鋼より線が用いられるのが一般的であるが, より太径のPC鋼より線を使用することによってUFCの圧縮強度特性を活かした合理的な構造が実現できると考えられる。

本研究では, φ19.3mmのPC鋼より線を用いたプレテンション部材を対象として, 収縮およびクリープを把握するための材料物性試験, ならびにプレテンション導入実験を行い, 伝達長および有効プレストレスについて検討した。また, プレテンション部材の曲げおよびせん断破壊実験を行い, 耐力評価方法についても検討した。

2. 実験概要

2.1 UFCの配合と養生

本実験に用いたUFCの配合を表-1に示す。本UFCはエトリングait生成系のUFCであり, 200N/mm²級の圧縮強度が得られるものである。また, 公称長さが20mmと15mmの鋼繊維を混合したものを体積比で1.75%混入することによって, 15N/mm²程度の引張強度が得られる。養生としては, 20℃の気中養生を24時間行い(以下, 一次養生), 85℃の蒸気養生を24時間行う(以下, 二次養生)ことを基本とする。

表-1 UFCの配合

空気量 (%)	単体量(kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
	水	プレミックス 結合材	骨材	混和剤	
2.0	195	1287	905	32.2	137.4

水の単体量は混和剤の水分を含む

- *1 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造・材料グループ 主任研究員 工修 (正会員)
- *2 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造・材料グループ 研究員 工博 (正会員)
- *3 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造・材料グループ 研究員 工修 (正会員)
- *4 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造・材料グループ グループ長 工博 (正会員)

2.2 材料物性試験

(1) 収縮

養生中および養生後の収縮を検討するため、収縮試験を行った。収縮は、100mm×100mm×400mm の供試体の中央に低剛性タイプの埋込み型ひずみ計を埋め込み、UFC の凝結始発から経時変化を計測した。

(2) クリープ

クリープ試験には、直径 75mm、長さ 150mm の円柱供試体を用いた。試験は、二次養生終了後に 3 体の試験体を重ねて油圧ジャッキで一定荷重を継続载荷することによって行った。载荷応力度を 36N/mm²、72N/mm²および 100N/mm²とした 3 ケースについて試験を行った。クリープひずみは、試験体に貼付したひずみゲージで計測し、同一条件下の自由収縮ひずみを差し引くことによって求めた。

2.3 プレストレス導入実験

プレテンション部材の伝達長および有効プレストレスについて検討するため、プレストレス導入実験を行った。試験パラメータを表-2 に、試験体の概要を図-1 に示す。

試験体は断面が 100 mm×100 mm、長さが 2000 mm の UFC の中心に鋼材を配置したものを 2 体ずつ用いた。PC 鋼より線には、φ19.3mm (試験体 S19) と、φ15.2mm (試験体 S15) を用いた。試験体 S19 では、伝達長が試験体長の半分以上になることが懸念されたため、片側で圧着グリップを用いて機械的に定着した。試験体は、水平な状態で PC 鋼より線を緊張して鋼製フレームに固定し、UFC を打設して製作した。一次養生後緊張力を解放してプレストレスを導入し、直ちに二次養生を行った。プレストレス導入時における UFC の圧縮強度は約 40N/mm²であった。

計測は、PC 鋼より線の素線にひずみゲージを貼付し、緊張時、プレストレス導入直後および二次養生終了後の鋼材ひずみを計測した。ひずみゲージの間隔は付着への影響に配慮して最小間隔を 200mm とし、それぞれ 2 体の試験体で異なる位置で計測した。

表-2 プレストレス導入実験ケース

試験体	PC鋼より線	規格降伏荷重 P_y (kN)	緊張力 $0.9P_y$ (kN)	導入直後の想定応力度 (N/mm ²)
S19	SWPR19L φ19.3	387	348	27
S15	SWPR7BL φ15.2	222	200	17

降伏荷重：0.2%永久伸びに対する荷重

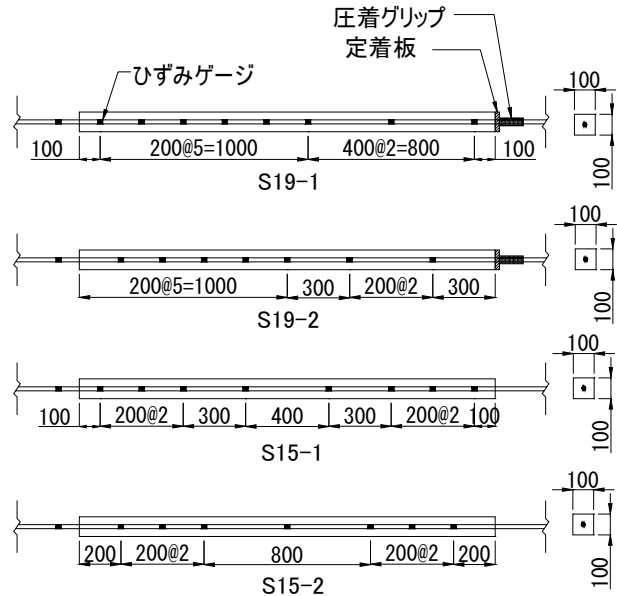


図-1 試験体の概要

2.4 曲げおよびせん断実験

実験条件を表-3 に、試験体の概要を図-2 に示す。試験体は、プレストレスを導入した梁とし、曲げ実験では 1 体 (試験体 MPC)、せん断実験では異なる軸圧縮応力度の試験体 2 体 (試験体 SPC1 および SPC2) とした。試験体 MPC はウェブ幅 100mm、高さ 305mm の T 型断面、試験体 SPC1 および SPC2 はウェブ幅 50mm、高さ 280mm の I 型

表-3 曲げおよびせん断実験ケース

項目	試験体			
	MPC	SPC1	SPC2	
破壊形態	曲げ	せん断		
UFC	圧縮強度 (N/mm ²)	201.2	201.2	196.4
	曲げ強度 (N/mm ²)	28.4	28.4	27.1
	換算引張強度 (N/mm ²)	13.4	13.4	12.9
	ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	9.1	9.1	9.2
	ヤング係数 (kN/mm ²)	44.9	44.9	43.5
	平均軸圧縮応力度 (N/mm ²)	6.0	7.0	4.5
PC鋼材	種類	SWPR19 φ19.3		
	降伏荷重(規格値) (kN)	427(387)		
	引張荷重(規格値) (kN)	480(451)		
	ヤング係数 (kN/mm ²)	193		

降伏荷重：0.2%永久伸びに対する荷重

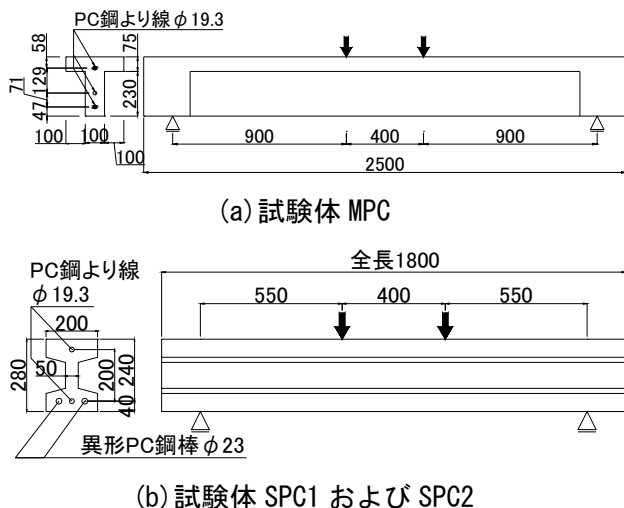


図-2 曲げおよびせん断試験体の概要

断面とした。PC 鋼より線にはφ19.3mm を用い、緊張力は規格降伏荷重の0.9倍の348kNとした。試験体 MPC に配置した PC 鋼より線 3 本のうち中央の 1 本は緊張しないで補強鋼材として配置した。試験体 SPC1 および SPC2 では、曲げ降伏が先行しないように异形 PC 鋼棒 φ23mm を緊張せずに 2 本配置して補強した。プレストレス導入実験と同様、一次養生後プレストレスを導入し、直ちに二次養生を行った。

荷重は、試験体を単純支持して 2 点荷重で行い、単調に荷重を増加させた。荷重開始から終了まで、荷重荷重をロードセルにより、試験体中央のたわみを変位計により計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 材料物性試験

(1) 収縮

凝結始発からの収縮の経時変化を図-3 に示す。一次養生中の収縮ひずみは約 320×10^{-6} 、二次養生中の収縮ひずみは約 380×10^{-6} であり、合計で約 700×10^{-6} であった。二次養生終了以降の収縮ひずみは 50×10^{-6} 以下と非常に小さかったが、これは、収縮のほとんどが水和反応に伴う自己収縮であったためと考えられる。

(2) クリープ

単位応力あたりのクリープひずみの試験結果、ならびに土木学会コンクリート標準示方書²⁾(以

下、示方書) に示される圧縮強度の影響を考慮した予測式による予測値を図-4 に示す。なお、示方書の圧縮強度の適用範囲は 80N/mm^2 以下である。

72N/mm^2 および 100N/mm^2 の応力を作用させた供試体のクリープひずみは示方書の予測式に圧縮強度の実測値 206N/mm^2 を代入して予測した値の約 75%であった。 36N/mm^2 の応力を作用させた供試体のクリープひずみはそれよりも若干小さい値であった。

これらの値は、圧縮強度が 40N/mm^2 の普通強度コンクリートのクリープひずみを示方書により算定した値と比較すると 5 分の 1 程度であり、非常に小さいものであった。なお、圧縮強度が約 150N/mm^2 で鋼繊維が混入されていない超高強度コンクリートでは、約 50N/mm^2 の応力を作用させた場合のクリープひずみが示方書で予測した値の約 70%であったと報告されており³⁾、今回得られた値はこれと同じ傾向を示した。

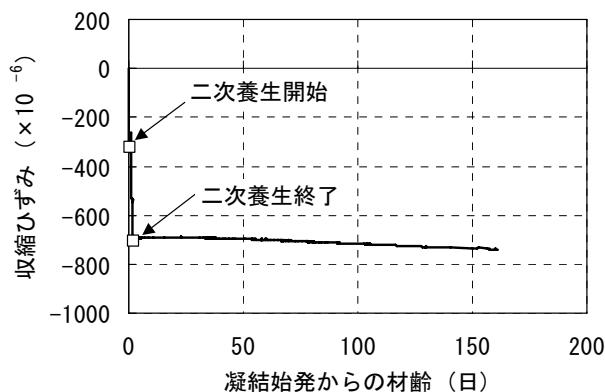


図-3 凝結始発からの収縮ひずみ

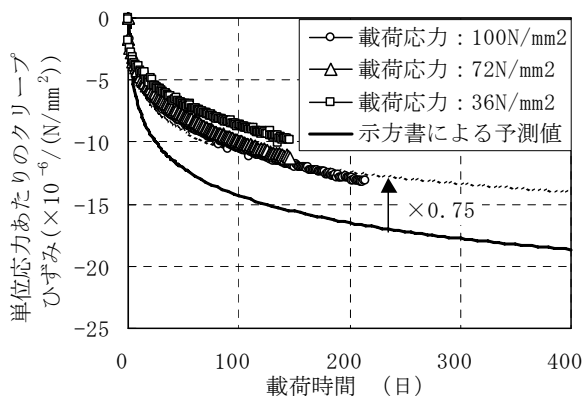
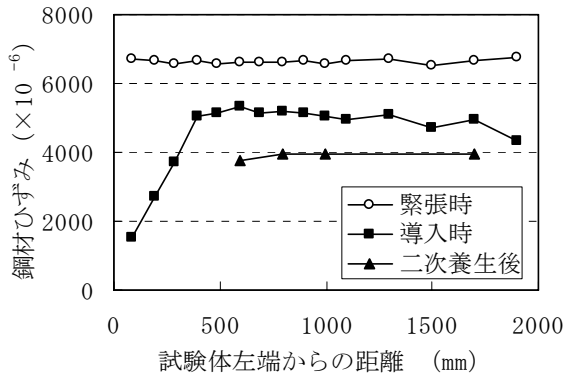


図-4 クリープひずみ

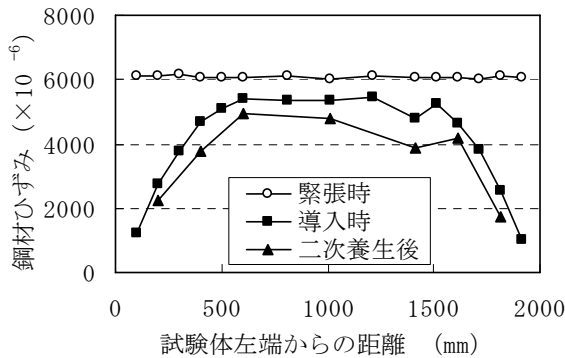
3.2 プレストレス導入実験

(1) 伝達長

PC 鋼材のひずみ分布の経時変化を図-5 に示す。試験体 S15 および S19 でそれぞれ2体ずつ試験したが、図-5には異なる位置で計測した2体のひずみ分布をひとつに重ねたものを示す。



(a) 試験体 S19



(b) 試験体 S15

図-5 ひずみ分布の経時変化

プレストレス導入時の伝達長はPC鋼より線の径に関わらず500~600mm(試験体 S19 で約 25φ, 試験体 S15 で約 35φ)であった。また、試験体 S19 ではひずみゲージが計測不能となったため十分なデータが得られなかったが、試験体 S15 では伝達長は二次養生後も同程度であった。

普通強度コンクリートのプレテンション部材の設計に用いられる伝達長は安全側に設定された値ではあるが、φ15.2mmで65φ, φ19.3mmで90φである⁴⁾。また、圧縮強度が約150N/mm²で鋼繊維が混入されていない超高強度コンクリー

トを用いて、材齢2日で圧縮強度が75N/mm²に達したときに同様な試験を行っているが、伝達長はφ15.2mmで30φと報告されている³⁾。プレストレス導入時におけるUFCの圧縮強度は40N/mm²程度であったが、UFC部材における鋼より線の伝達長は普通強度コンクリートに比べると小さい値であり、超高強度コンクリートを用いた場合と同程度の値であった。

(2) 有効プレストレス

二次養生終了以降の収縮およびクリープは非常に小さいため、ここでは、二次養生終了までの有効プレストレスについて検討する。なお、短期間の実験であるため、PC鋼材のリラクゼーションは無視することとした。

プレストレスの損失として鋼材ひずみの減少の実験値および予測値を表-4に示す。実験値は試験体中央部のひずみが一定となった区間における平均値である。予測値はUFCのひずみ変化の予測値から、鋼材とUFCの力の釣り合いおよびひずみの適合条件を考慮して求めたものである。UFCのひずみ変化の予測値は、収縮については実測値を、クリープについては示方書に示されるコンクリートの圧縮強度の影響を考慮した予測式をそのまま用いて求めた。このときの載荷開始材齢時の圧縮強度は40N/mm²を用いた。弾性短縮および一次養生中の収縮による損失を算定する際のUFCのヤング係数は、別途行った試験で求めた圧縮強度とヤング係数の関係から算定し、20kN/mm²とした。また、PC鋼より線のヤング係数は、別途行った引張試験による素線のひずみと鋼材応力度の関係から求めた見かけの

表-4 鋼材ひずみの減少と有効係数

	S19		S15	
	実験値	予測値	実験値	予測値
(A) 収縮(一次養生時)	—	252	—	276
(B) 弾性短縮	—	1337	—	791
(A) + (B)	1439	1589	681	1067
(C) クリープ	—	465	—	310
(D) 収縮(二次養生時)	—	300	—	328
(C) + (D)	1164	765	563	638
合計	2603	2354	1244	1705
有効係数	0.60	0.64	0.79	0.72

ヤング係数を用いた（試験体 S19 で 215kN/mm^2 、試験体 S15 で 227kN/mm^2 ）。

プレストレス導入直後までの損失（表-4 中の (A) + (B)）は UFC の弾性短縮と一次養生中の収縮によるものであり、試験体 S19 では概ね予測できているが、試験体 S15 では過大評価されている。二次養生中の損失（表-4 中の (C) + (D)）は二次養生中のクリープひずみと収縮によるものであり、試験体 S19 で過小評価されているが、試験体 S15 では概ね予測できている。緊張時の鋼材ひずみに対する二次養生終了時の鋼材ひずみの比で求められる有効係数は、試験体 S19 で若干過小評価され、試験体 S15 で過大評価されている。

試験体 S19 と S15 で傾向が異なったのは、強度が十分に発現するまでの付着作用の違い、導入プレストレスが大きいことによるクリープの予測値とのずれ、 $\phi 19.3$ の PC 鋼より線が 3 層よりのため芯線のすべりの影響等が考えられる。今後、これらの影響について定量的に評価するための検討が必要である。

3.3 曲げ実験

試験体 MPC の荷重と試験体中央変位の関係を図-6 に、破壊状況を写真-1 に示す。

実験では、載荷荷重 120 kN で曲げひび割れが発生し、荷重の増加とともに微細なひび割れの本数が増加した。最大荷重 416 kN に達した後、上縁の UFC が圧縮破壊して荷重が徐々に低下した。

UFC 指針に従ってモデル化した UFC の応力ひずみ曲線を用いて解析した結果を図-6 および図-7 に併せて示す。ただし、圧縮強度は実測値を、引張強度は別途行った試験で求めた引張強度と曲げ強度の関係を用いて曲げ強度から換算した値を用い、材料係数は 1.0 とした。また、 $\phi 19.3\text{ mm}$ の PC 鋼より線については、規格引張強度の 0.7 倍を折れ点とするバイリニア曲線でモデル化した⁴⁾。解析は、断面をファイバー要素に分割し、平面保持を仮定した断面内の力の釣り合いにより求めた。なお、載荷直前における PC 鋼より線

の初期ひずみは計測できなかったため、緊張力が同じであるプレストレス導入実験で得られた値を用いた。

解析で得られた終局耐力は 425 kN であり、精度よく予測できているといえる。荷重変位曲線については、最大荷重に達する前の剛性が若干大きく評価されているため、UFC または鋼材の応力ひずみ曲線を再評価する必要があると考えられる。

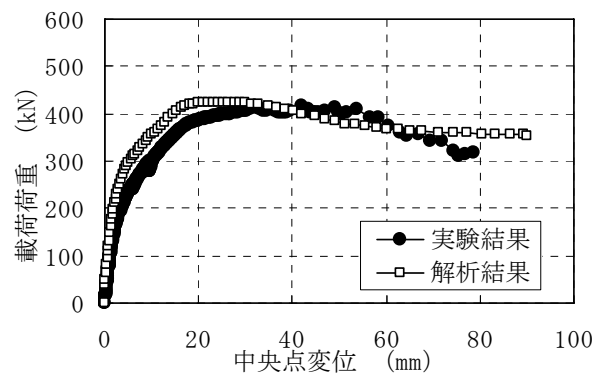


図-6 荷重変位関係（試験体 MPC）

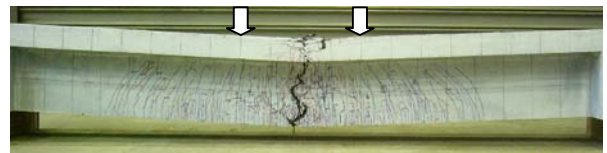


写真-1 試験体の破壊状況（試験体 MPC）

3.4 せん断実験

試験体 SPC1 および SPC2 の荷重と試験体中央変位の関係を図-7 に、試験体 SPC2 の破壊状況を写真-2 に示す。

試験体 SPC1 では荷重 200 kN で斜めひび割れが発生し、荷重の増加とともに斜めひび割れ本数が増加した。その後、最大荷重 611 kN に達したときに 1 本の斜めひび割れが拡大して荷重が急激に低下した。試験体 SPC2 でも同様な挙動を示し、斜めひび割れ発生荷重は 175 kN 、最大荷重は 586 kN であった。

表-5 に、せん断耐力の実験値と UFC 指針を用いた算定値の比較を示す。ただし、UFC の圧縮強度は実測値を、引張強度は曲げ強度から換算し

た値を用い、材料係数は1.0とした。UFC 指針の算定式は、「6.3.3 棒部材の設計せん断耐力」に掲載されている式（指針式）および「参考資料4 超高強度繊維補強コンクリートのせん断耐力」で提案されている式（参考式）の両方を用いた。

指針式ではせん断耐力が若干安全側に評価されており、参考式では精度よく評価できているといえる。太径のφ19.3mmを用いたプレテンション部材でも、これら UFC 指針の算定式を用いてせん断耐力を評価可能であることが確認された。

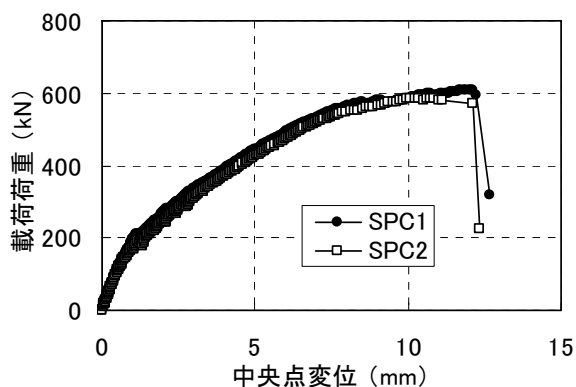


図-7 せん断試験結果



写真-2 試験体の破壊状況（試験体 SPC1）

表-5 せん断耐力の比較

試験体	実験値 (kN)	算定値 (kN)		実験値/算定値	
		指針式	参考式	指針式	参考式
SPC1	306	261	297	1.17	1.03
SPC2	293	246	280	1.19	1.05

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 収縮試験で得られた凝結始発からの収縮量は、一次養生中の収縮ひずみが約 320×10^{-6} 、二次養生中の収縮ひずみが約 380×10^{-6} 、合計で約 700×10^{-6} であり、二次養生終了以降の収縮ひずみは 50×10^{-6} 以下と非常に小さかった。
- 2) クリープ試験で得られた単位応力あたりのクリープひずみは、示方書による予測値の約 75% であり、普通強度コンクリートに比べて 5 分の 1 程度の値であった。
- 3) プレストレス導入実験により得られた伝達長は PC 鋼より線の公称直径の約 25 倍～35 倍であり、普通強度コンクリートの 3 分の 1 から半分程度であった。
- 4) 有効プレストレスは既往の算定方法で概ね予測できているといえるが、強度が十分に発現されるまでの付着作用の影響や芯線のすべりの影響、二次養生前のクリープの影響等についてさらに検討が必要である。
- 5) プレテンション部材の曲げ耐力は、UFC 指針の算定方法を用いて算定可能であることが確認された。
- 6) プレテンション部材のせん断耐力は、UFC 指針の算定方法で安全側に評価できること、また、UFC 指針の参考資料に示された算定方法で精度よく評価できることが確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)，2004
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 [2002 年制定] 構造性能照査編，2002
- 3) 日紫喜剛啓ほか：超高強度コンクリートのプレテンション部材への適用性に関する実験的研究，材料学会，vol. 53, No. 6, pp. 678-685, 2004. 6
- 4) 日本道路公団：PC 橋の耐久性向上に関する設計・施工マニュアル，2001