

## 超高強度コンクリートの自己収縮低減によるプレテンションPCはりの 応力損失低減効果

(株)ピーエス三菱 正会員 博士(工学) ○鈴木 雅博  
広島大学大学院 正会員 工学博士 佐藤 良一  
(株)ピーエス三菱 正会員 修士(工学) 川畑 智亮

The effectiveness of reduction of autogenous shrinkage of ultra high-strength concrete(UHSC) in decreasing prestress loss in pretensioned prestressed concrete(PC) beams is experimentally investigated, in which four types of beams with high and low shrinkage are prepared. The experiment shows that the prestress loss due to autogenous shrinkage even before prestressing is significant and the use of expansive additive coupled with internal curing is effective in controlling prestress loss.

Key words : ultra high-strength concrete, shrinkage, prestress

### 1. はじめに

コンクリート構造物はライフサイクルコストを抑制した技術が求められるようになり、超高強度コンクリートをプレストレストコンクリート(以下PC)部材に適用した場合、高強度による低桁高化や硬化体の組織の緻密化による高耐久化から、こうした社会的要請に対する1つの方策になると考えられる。一方で、超高強度コンクリートは自己収縮ひずみが大きくなることが知られている<sup>1)</sup>。この自己収縮ひずみと鉄筋等の拘束によりひび割れに対するリスクが大きくなり、超高強度コンクリートを用いたRC部材のひび割れの報告<sup>2)</sup>や、せん断耐力を低下させるとの報告<sup>3)</sup>がなされている。このことから、超高強度コンクリートの高耐久・高強度の利点を発揮できなくなる可能性がある。こうした背景から、これまでに自己応力を低減するために小型供試体を用いた基礎試験を行い、廃瓦粗骨材、膨張材、および収縮低減剤を用いることにより拘束応力を大幅に低減できること<sup>4)</sup>を明らかにしてきた。しかしながら、この低収縮超高強度コンクリートは実規模のPC部材に関する有効プレストレスなどが明確になっていない。本論文は、実構造物への適用化を目的に、低収縮超高強度コンクリートを用いたプレテンションPC部材を作製し、プレストレスの低減量の把握を行った。

### 2. 実験概要

#### 2-1. 実験供試体

図-1にPC桁の形状寸法を示す。実規模のPC部材の有効プレストレスを把握する目的から部材寸法は、幅200mm(下端260mm)、桁高1050mm、桁長8700mmとした。PC鋼材の径は15.2mmとし、上段3本、下段8本を配置した。使用鋼材のJISに示す引張強度および降伏荷重を表-1に示す。同表には道路橋示方書のコンクリート橋編に示すPC鋼材の許容引張応力度をあわせて示す。PC鋼より線1本あたりの初期緊張力は180kNとし、全緊張力を1980kNとした。PC鋼材の応力損失を把握するため、図に示す位置でひずみを計測した。なお、以下で示すPC鋼材ひずみは、緊張時の荷重とひずみとの関係で算出した弾性係数が200kN/mm<sup>2</sup>となる校正係数を乗じた数値である。製作したPC桁は各配合で1体とした。

#### 2-2. 使用材料・配合・養生方法

本実験におけるコンクリートの使用材料を表-2に、配合を表-3に示す。配合は水結合材比0.15と

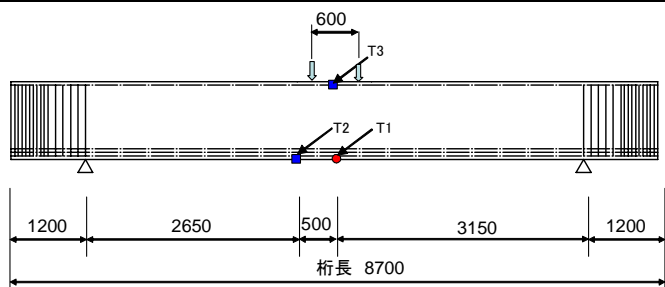
し、基準となる配合(B-15)、低収縮化を廃瓦粗骨材(粗骨材容積の20%置換)と膨張材(単位膨張材量 $10\text{kg/m}^3$ )と収縮低減剤で実施した配合(G20-EX10-R-15)、および膨張材(単位膨張材量 $20\text{kg/m}^3$ )と収縮低減剤で実施した配合(EX20-R-15)と一般的な設計基準強度 $50\text{N/mm}^2$ とするプレテンション部材を想定した水結合材比0.35とする配合(B-35)の全4種類とした。既往の研究により自己収縮ひずみの低減効果として図-2に、B-35以外の配合で実施した自己収縮ひずみの経時変化を示す。

養生方法は、打設4時間後から蒸気養生を開始し、3時間かけて養生温度を $20^\circ\text{C}$ とし、次の3時間で養生温度を $45^\circ\text{C}$ に加熱養生した。その後5時間 $45^\circ\text{C}$ を保持し、除冷した。材齢18時間でプレストレスを導入し、気中屋内暴露環境で約1年間養生した。その長期計測終了時の各配合の強度特性を表-4に示す。

廃瓦粗骨材(記号G瓦)は島根県江津産を使用した(写真-1)。G瓦はカオリン粘土( $\text{SiO}_2:65.7\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3:27.1\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3:2.9\%$ ,  $\text{K}_2\text{O}:1.8\%$ )を焼成して作製した瓦の不適合品を破碎したものである。G瓦は、破碎値19.60%であり骨材自体の強度が比較的高く、多孔性材料で吸水率が8.88%の材料特性があることから自己収縮ひずみを低減する内部養生材料にもなることから、低収縮超高強度コンクリートに適した材料である。

表-1 使用鋼材

鋼材の種類	規格	引張荷重(kN)	降伏荷重(kN)	許容引張応力度( $\text{N/mm}^2$ )		
				初期引張時	プレストレス導入直後	設計荷重時
15.2mm	SRPR7BL	261以上	222以上	1440	1295	1110



- : ひずみゲージ(FLK-2-10LT)2枚+熱電対
- : ひずみゲージ(FLK-2-10LT)2枚

図-1 実験供試体の形状寸法

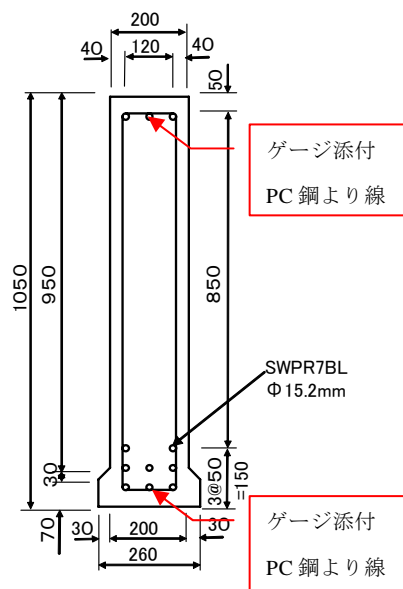


表-2 使用材料(コンクリート)

使用材料	種類	性質	記号
セメント	低熱ポルトランドセメント	密度 $3.22\text{g/cm}^3$ , 比表面積 $3510\text{cm}^2/\text{g}$	L
	早強ポルトランドセメント	密度 $3.14\text{g/cm}^3$ , 比表面積 $4560\text{cm}^2/\text{g}$	H
L+SF	シリカフェウムと低熱セメントのプレミックス $\text{SF}/(\text{SF}+\text{L}) = 0.103$	密度 $3.08\text{g/cm}^3$ , 比表面積 $6210\text{cm}^2/\text{g}$	SFLC
細骨材	砂岩砕砂(山梨県大月産)	表乾密度 $2.62\text{g/cm}^3$ , 吸水率 2.41% 粗粒率 2.95, 実積率 67.8%	S
粗骨材	輝緑岩砕岩(岩手県盛岡産)	表乾密度 $2.95\text{g/cm}^3$ , 吸水率 0.41% 粗粒率 6.57, 実積率 60.2%	G
	廃瓦粗骨材(島根県江津産)	表乾密度 $2.27\text{g/cm}^3$ , 吸水率 8.88% 粗粒率 6.41, 実積率 61.3%	G瓦
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP1
	消泡剤		SP2
	収縮低減剤	低級アルコール系	D
混和材	膨張材	密度 $3.05\text{g/cm}^3$ , 石灰系	RA
	シリカフェウム	密度 $2.24\text{g/cm}^3$ , 比表面積 $16.3\text{m}^2/\text{g}$	EX

表-3 配合

配合名	(W+SRA) / B <sup>2)</sup>	空気 量(%)	全粗骨材 容積(m <sup>3</sup> )	単位量(kg/m <sup>3</sup> )									SP/B <sup>1)</sup> (%)	D/B x100
				W	SFLC	H	EX	S	G	G瓦	SRA			
B-15	0.15	2	0.319	155	1033	-	-	447	941	-	-	1.9	0.002	
G20-EX10-R-15	0.15	2	0.319	149	1023	-	10	447	753	145	6	1.8	0.002	
EX20-R-15	0.15	2	0.319	149	1013	-	20	447	941	-	6	1.9	0.002	
B-35	0.35	2	0.319	155	-	443	-	872	1035	-	-	1.1	-	

- 1) SPは水結合材比0.15の場合SP1, 水結合材比0.35の場合はSP2を使用  
 2) Bは水結合材比0.15の場合SFLC+EX, 水結合材比0.35の場合はH



写真-1 廃瓦粗骨材

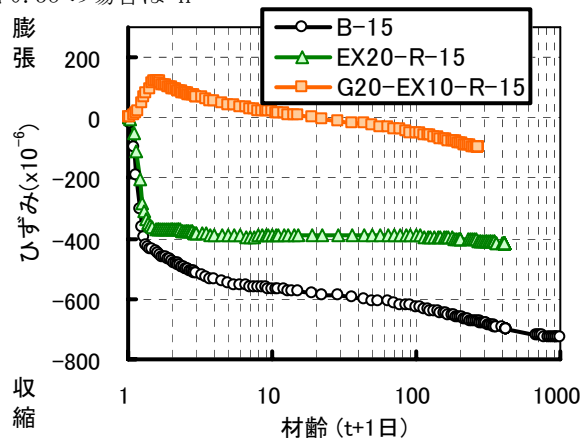


図-2 自己収縮ひずみ

表-4 長期計測終了時の強度特性

	B-15	G20-EX10-R-15	EX20-R-15	B-35
材齢 (日)	488	497	477	483
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	164	178	178	101
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	56700	54000	58500	48800
割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	4.75	5.41	6.41	3.92
単位容積質量 (t/m <sup>3</sup> )	2.60	2.56	2.63	2.49

### 3. 実験結果

#### 3-1. コンクリート打設終了からのプレストレスの変化

プレストレスの変化を検討するため、図-3に各PC桁の打設直後から測定終了までのPC鋼材ひずみの経時変化を示す。同図に示すT1, T2Aveは下段PC鋼材の2箇所計測したひずみの平均値を、T3は上段のPC鋼材ひずみを表す。ただし、B-35に関してはひずみゲージが損壊したため、T2を下段ひずみとして示している。プレストレスは導入直前までの収縮による緊張力の低減の差が明確で、水結合材比15%の配合に関して、収縮ひずみの低減を実施していない配合の緊張力が小さくなった。導入直前までのT3のPC鋼材ひずみの変化量はT1と比較して小さくなる傾向を示した。この理由として、下縁側のPC鋼材本数が上縁側より多いため、PC鋼材による自己収縮ひずみの拘束がより大きくなったことが考えられる。

時間経過によるPC鋼材の全ひずみ変化量に対する打設直後から導入直前までのひずみ変化量の割合がいずれも大きい。従来の設計では、この変化量が無視されてきたが、ここでは導入時までの自己収縮ひずみが有効プレストレスにどの程度影響するのかを検討する。

表-5に自己収縮がプレストレスの損失に及ぼす影響の要因分析結果を示す。プレストレス導入時までの自己収縮ひずみの影響を、①PC鋼材の拘束によるコンクリートに生じる引張応力すなわち自己収縮応力、②PC鋼材に蓄積された圧縮応力による導入直前の鋼材緊張力の低下、の観点からまとめている。後者は、緊張力の低下はプレストレスの低下を意味し、この低下は自己収縮によるものと評

価したものである。表に示す各数値は、収縮考慮では図-3のコンクリート打設からのP C鋼材ひずみの変化量を考慮し、収縮無視では導入直前までのP C鋼材ひずみの変化がないものとして算出した。( )内の数値は、収縮がない場合の桁下縁の導入応力に対する比率を示す。表の結果によれば、自己収縮の影響は、前者、後者でほぼ同程度であること、収縮低減の図らない超高強度コンクリート(B-15)では収縮がないとした場合の導入応力のおよそ20%(3.32N/mm<sup>2</sup>)の低下をもたらし(応力損失率20%)もっとも損失率が高いこと、廃瓦粗骨材で内部養生しかつ膨張材と収縮低減剤で収縮低減を図った場合(G20-EX10-R-15)は応力損失率9.2%(1.52N/mm<sup>2</sup>)と最も小さいこと、膨張材と収縮低減剤で収縮低減を図った場合(EX20-R-15)は応力損失率15.3%(2.48N/mm<sup>2</sup>)と特に低減効果が高くないが導入後の損失は比較的小さいこと、既存のP C用コンクリート(B-35)であっても12.9%(2.10N/mm<sup>2</sup>)の損失率があり、さらに導入後の損失が大きいことなどが明らかとなった。

これらの結果に基づき、導入直前までの自己収縮の影響をP C鋼材の本数を増加することにより補償するとすれば、収縮がない場合に対し、概略1.25~1.10倍の本数のP C鋼材が必要となる。ただし、鋼材の増加に伴う収縮の影響はないものとしている。本研究で用いた8本の鋼材数を収縮がない場合の基準本数とすれば、10本~8.8本必要ということになり、低収縮化は特に超高強度コンクリートにおいては、4本増加すべきところ(B-15)を1本に抑制でき(G20-EX10-R-15)、鋼材増加の抑制に有効といえる。なお、通常のP C桁の場合であっても1本強の鋼材増加が必要という結果になっており、これに対しては、クリープ、収縮等の設計用値やその他の方策で、経験的にひび割れに関わる安全性を確保してきたと考えられる。

### 3-2. 有効係数と応力損失

P C桁の設計においては、ひび割れ制御を積極的に図ることが可能であるプレストレスの導入とい

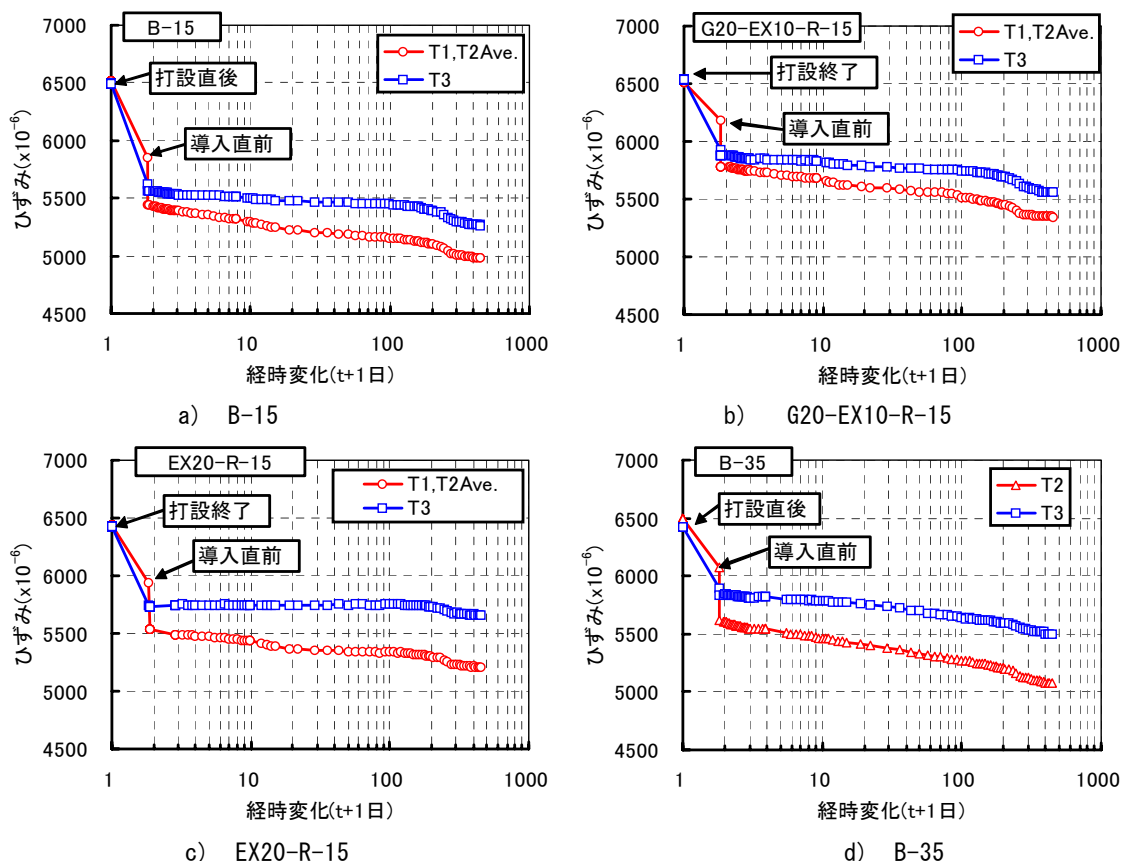


図-3 ひずみの経時変化

表-5 プレストレス損失の要因分析

	B-15		G20-EX10-R-15		EX20-R-15		B-35	
	収縮考慮	収縮無視	収縮考慮	収縮無視	収縮考慮	収縮無視	収縮考慮	収縮無視
自己収縮ひずみがPC鋼材の拘束により生じる桁下縁応力：①	-1.75 (-10.6%)	0	-0.8 (-4.8%)	0	-1.31 (-8.1%)	0	-1.11 (-6.8%)	0
自己収縮ひずみにより低下した鋼材緊張力(kN)/本	18.4 (=180.6-162.2)	0	9.5 (=180.7-171.2)	0	14.0 (=178.6-164.6)	0	14.0 (=180.0-168.3)	0
桁下縁の導入応力 (N/mm <sup>2</sup> )：②	14.87	16.44	15.79	16.51	15.08	16.25	15.28	16.25
緊張力低下による桁下縁の導入応力の低下量 (N/mm <sup>2</sup> )：③	-1.57 (-9.5%)	0	-0.72 (-4.4%)	0	-1.17 (-7.2%)	0	-0.99 (-6.1%)	0
収縮に起因してプレストレスを低減する引張応力の合計値：④=①+③	-3.32 (-20.1%)	0	-1.52 (-9.2%)	0	-2.48 (-15.3%)	0	-2.1 (-12.9%)	0
導入後のクリープ、収縮による緊張力低下による桁下縁の導入応力の低下量 (N/mm <sup>2</sup> )：⑤	-1.34 (-8.2%)	-1.34 (-8.2%)	-1.23 (-7.5%)	-1.23 (-7.5%)	-1.01 (-6.2%)	-1.01 (-6.2%)	-1.57 (-9.7%)	-1.57 (-9.7%)
全損失量 (N/mm <sup>2</sup> )：⑥=④+⑤	-4.66 (-28.3%)	-1.34 (-8.2%)	-2.75 (-16.7%)	-1.23 (-7.5%)	-3.49 (-21.5%)	-1.23 (-7.6%)	-3.67 (-22.6%)	-1.57 (-9.7%)
载荷直前の桁下縁のプレストレス (N/mm <sup>2</sup> )	11.78 (=16.44-4.66)	15.17	13.76 (=16.51-2.75)	15.28	12.76 (=16.25-3.49)	15.02	12.58 (=16.25-3.67)	14.68
全損失量を考慮した、収縮がない場合の導入応力に対する有効係数	71.7%	91.9%	83.3%	92.5%	78.5%	92.4%	77.4%	90.3%
④による損失応力を補償する為に要する下縁側PC鋼材量の増加率と本数	1.25 10.0	1.00 8*	1.10 8.8	1.00 8*	1.18 9.4	1.00 8*	1.15 9.2	1.00 8*
順位	4	3	1	1	2	2	3	4

表中のマイナスは引張応力を意味する。( )内の数値は収縮がない場合の桁下縁の導入応力に対する比率

8\*：本研究のPC桁下縁側の鋼材本数で、収縮がない場合を基準本数とした

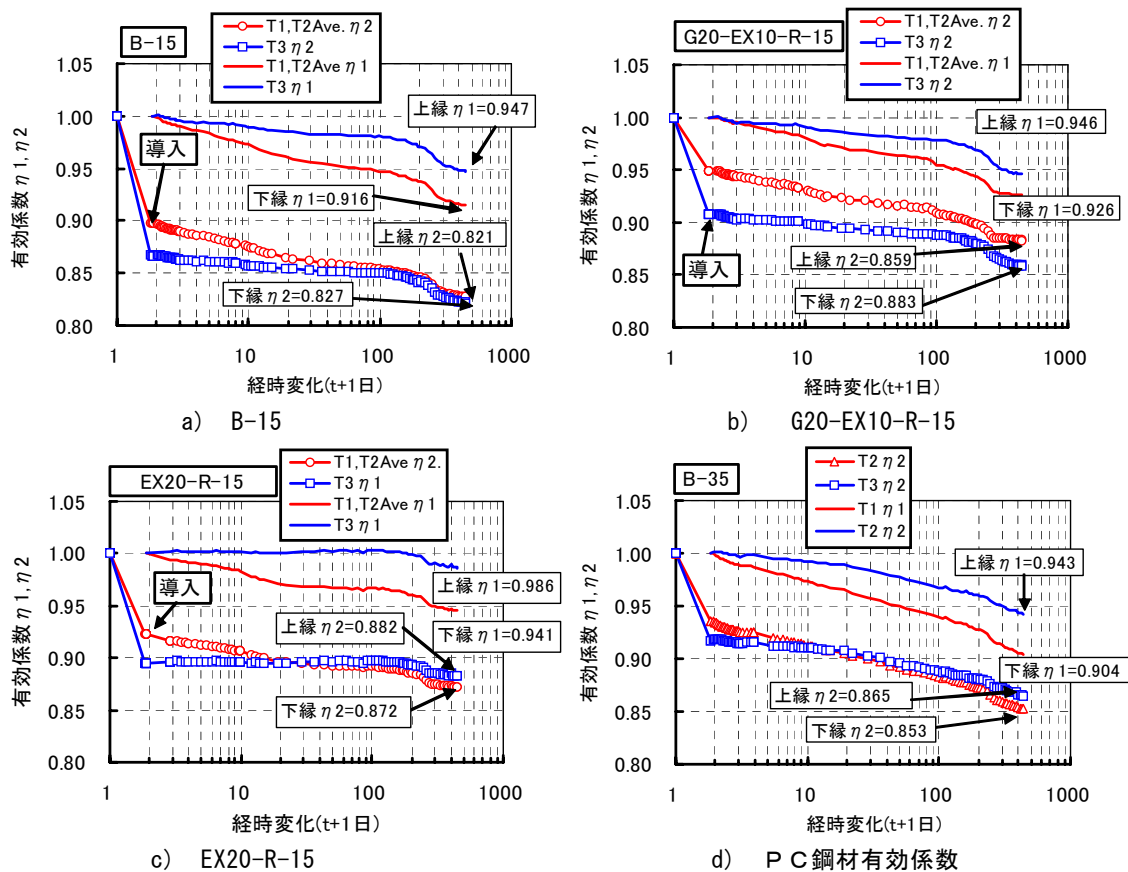


図-4 PC鋼材有効係数

う性質上、プレストレスの損失設計は極めて重要である。従来、この損失はプレストレス導入後のクリープと収縮ひずみにより生じるとし、この影響を式(4.5)で定義される有効係数により評価されてきた。しかし、導入までのコンクリートの収縮にともなうPC鋼材ひずみへの影響が無視できないことから、この変化量を考慮した式(4.6)に示す有効係数と新たに定義し、評価することとした。ただし、PC部材のプレストレス導入による弾性変形にともなうPC鋼材ひずみの変化量は、プレテンション方式では損失をもたらすものの弾性計算で容易に評価できることやポストテンション方式では検討対象にならないため、式(4.6)の有効係数ではこの影響を無視し、コンクリートの経時変化にともなう収縮ひずみとクリープによるPC鋼材の変化のみを評価することとした。

$$\eta_1(\text{従来式}) = \varepsilon_{pe}(t - t_p) / \varepsilon_{pt} \quad (4.5)$$

$$\eta_2 = \{\varepsilon_{pi} - \varepsilon_{as,p}(t) - \varepsilon_{cr,p}(t)\} / \varepsilon_{pi} \quad (4.6)$$

ここで、 $t$ はコンクリート打設終了からの経時変化、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$ は有効係数、 $\varepsilon_{pe}(t)$ は経過時間 $t$ のPC鋼材ひずみ、 $t_p$ は導入までの経過時間、 $\varepsilon_{pt}$ は導入直後のPC鋼材ひずみ、 $\varepsilon_{pi}$ は初期のPC鋼材ひずみ、 $\varepsilon_{as,p}(t)$ はコンクリートの自己収縮ひずみに伴うPC鋼材ひずみの変化量、 $\varepsilon_{cr,p}(t)$ はクリープ変形に伴うPC鋼材ひずみの変化量を示す。

式(4.5)と式(4.6)で計算した結果を図-4に示す。図中の実線は収縮の影響を無視した従来の方法で求めたものである。分母のとり方が異なるため、図中の有効係数の値の持つ意味は必ずしも一致しないが、原因の如何に拘らず少なくとも時間経過に伴う損失という意味で、損失が起こる直前の値からの損失という観点から見れば、損失に及ぼす初期の自己収縮の影響は無視しえず、有効係数の低下は大きいといえる。

#### 4. まとめ

PC鋼材の緊張力はコンクリートの打設時にほぼ等しいが、プレストレス導入直前の緊張力は各配合で異なり、水結合材比15%の配合で比較した場合には収縮ひずみの低減を実施していない配合ほど緊張力が小さくなる。プレストレス導入直後からのプレストレスロスに関しては、各配合で差異がほとんど認められなかった。このことから、超高強度コンクリートの自己収縮ひずみの低減効果はプレストレス導入までの緊張力の低減に効果を発揮することが明らかになった。

#### 謝辞

本研究の一部は、平成19-20年度社団法人中国建設弘済会の技術開発に関する助成金「超高強度膨張コンクリートの適用によるプレストレストコンクリート桁の長寿命化とコスト縮減」(研究代表者：佐藤良一)として実施されたものであり感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 田澤榮一, 宮澤伸吾, 重川幸司: 水和反応による硬化セメントペーストのマクロな体積減少, セメント・コンクリート論文集, No. 45, pp. 122-127, 1991
- 2) 片寄哲務, 高森直樹, 西田浩和, 寺岡勝: 高強度コンクリートの若材齢における力学特性と自己収縮挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 497-502, 2006
- 3) R. Sato, H. Kawakane: "A New Concept for the Early Age Shrinkage Effect on Diagonal Cracking Strength of Reinforced HSC Beams", Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 6, No. 1, pp. 45-67, 2008. 2
- 4) 鈴木雅博, 丸山一平, 川畑智亮, 佐藤良一: 超高強度RCプリズムの自己応力低減に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 459-464, 2008