

論文 超高強度膨張コンクリートの自由変形と拘束応力に関する検討

鈴木 雅博^{*1}・丸山 一平^{*2}・尼丁 将太^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨：低熱ポルトランドセメントをシリカフェームで 10.6%置換した結合材を用い、水結合材比 0.15 のコンクリートの変形特性や拘束応力を把握するため、クリープ試験を実施した。本研究では、拘束応力の試験結果とクリープ試験結果を用いた解析を行い、超高強度コンクリートのクリープ特性を検討した。その結果、超高強度コンクリートのクリープ係数は水セメント比 0.3 のコンクリートとほぼ同等となった。拘束応力のクリープ解析結果は実験値より大きくなり、クリープ以外の応力緩和により応力が低減することなどが明らかになった。

キーワード：超高強度コンクリート、拘束応力、自由変形、膨張材、収縮低減剤

1. はじめに

超高層建築や橋梁桁高制限からコンクリートの高強度化が要求されており、近年の技術進歩により、圧縮強度 150MPa クラスの構造物の構築も可能となってきている。しかし、超高強度コンクリート(以下 UHSC と示す)は水和熱に起因した温度上昇量が高く、かつ、自己収縮ひずみも大きくなることが知られており、コンクリートが鉄筋や外部の拘束などを受けた場合にひび割れの可能性が高い。このことから、収縮ひずみにより発生する内部応力を適正に評価し、ひび割れ発生の有無を検討する必要がある。また、載荷前に生じている応力状態が、載荷後の挙動に影響を及ぼすことも知られており¹⁾、載荷前の内部応力の適正な評価は重要となる。こうした背景から、UHSC の収縮ひずみやクリープ特性の把握が必要となる。筆者らは、これまでに収縮ひずみや拘束応力の低減方法を検討²⁾してきた。変形特性を把握するために必要となるクリープ特性は MC90³⁾や終局クリープ係数やクリープの進行を載荷材齢と材齢 28 日のヤング係数との比で評価した修正 MC90⁴⁾などが提案されている。しかし、修正 MC90 では、圧縮強度 120MPa

以下の範囲であり、圧縮強度 120MPa を超える UHSC に用いた場合についての検討はほとんどないのが現状である。

そこで、本研究では、水結合材比 0.15 の UHSC の若材齢時におけるクリープ試験を行い、その結果を用いた解析結果と拘束応力供試体の試験結果とを比較し、変形性状の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントには、低熱ポルトランドセメント(記号 L, 密度 3.22g/cm³, 比表面積 3540cm²/g, C₃S 30.2%, C₂S 49.2%, C₃A 4.0%, C₄AF 9.2%)を使用した。混和材には、シリカフェーム(記号 SF, 密度 2.23g/cm³, 比表面積 18.6m²/g), 標準使用量 20kg/m³ の石灰系低添加型膨張材(記号 EX, 密度 3.08 g/cm³)を使用した。なお、セメント種類 L と混和材 SF を混合する配合では、L の重量の 10.6% を混和材 SF にあらかじめ置換したプレミックス材(記号 SFLC, 密度 3.08g/cm³, 比表面積 6330cm²/g)を使用した。収縮低減剤(記号 RA)には、低級アルコール系を使用した。細骨材には、山梨県大月産の砕砂(表乾密度 2.62g/cm³, 吸水率

*1 (株)ピーエス三菱 技術本部技術研究所材工研グループ グループリーダー 工修 (正会員)

*2 名古屋大学大学院 環境学研究科都市環境学専攻 助教授 博士(工学) (正会員)

*3 広島大学 工学部第四類環境グループ

*4 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 教授 工博 (正会員)

表-1 配合表

配合名	(W+RA)/ (SFLC+ EX)	単位量(kg/m ³)						SP/(SFLC*+ D**/(SFLC*+ EX)	D**/(SFLC*+ EX)
		W	SFLC*	EX	S	G	RA	EX)	EX)
SFLC	0.15	155	1033	-	451	940	-	0.027	0.00002
SFLC-E-R	0.15	149	998	35	450	940	6	0.030	0.00002

* : SFLC は低熱ポルトランドセメントとシリカフュームとのプレミックス材** : D は消泡剤

表-2 拘束試験体試験条件

配合名	D13(%)	D16(%)	D22(%)
SFLC	0.620	1.09	2.09
SFLC-E-R	0.639	1.02	2.07

2.53%, 粗粒率 2.53, 実積率 54%), 粗骨材には、岩手県盛岡産の砕石(最大寸法 20mm, 表乾密度 2.94g/cm³, 吸水率 0.38%, 粗粒率 6.19, 実積率 59.9%)を使用した。

2.2 配合

配合を表-1に示す。検討する配合は2種類とし、水結合材比は全て15%とし、単位水量と単位粗骨材量は同一量とし、それぞれ155, 940kg/m³とした。配合名SFLCはセメント種類SFLC単体の配合、配合名SFLC-E-RはSFLCに膨張材と収縮低減剤を混入した配合とした。膨張材量は標準使用量の1.75倍とし、結合材に含めることとした。収縮低減剤は、標準使用量6kg/m³とし、単位水量に含めることとした。

2.3 試験方法

(1) 試験条件

自己応力と自己収縮試験およびクリープ試験の養生条件は全面を厚さ0.05mmのアルミ箔テープで覆い、温度20°C, 60%R.H.の室内にて静置した。本試験では予備試験において3本の測定結果にほとんど差が生じなかったことから本試験では各試験条件で1体とした。

(2) 20°C封緘養生の自己応力・自己収縮試験

自己収縮応力の作製方法と測定方法はJCI「コンクリートの自己応力試験方法(案)」⁵⁾に準拠した。脱枠は材齢2日で実施した。供試体の寸法は収縮ひずみ供試体では100×100×400mmとし、拘束応力供試体では125×125×1200mmとした。

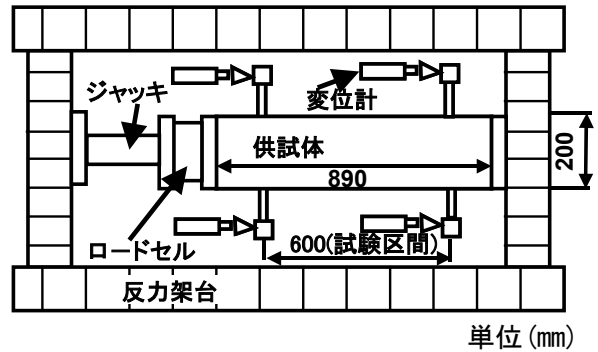


図-1 試験状況

埋設する鉄筋はD13, D16, D22の3種類とし、中央100mmの区間はリブとふしを取り除いた円形断面とした。表-2に拘束試験供試体の鉄筋比を示す。

(3) クリープ試験

UHSCの自己収縮ひずみは若材齢時に発生し、そのひずみに起因して拘束応力が発生する。このため、材齢1日以下での若材齢時のクリープ特性の把握も必要となる。このため、本試験では若材齢時においても荷重可能となる横置きでのクリープ試験機を用いることとした。図-1にクリープ試験状況を示す。フレームを反力架台として500kNジャッキにて供試体に荷重し、荷重変動を±5%となるように静的コントローラにて調整した。供試体の寸法は200×200×890mmとし、測定区間長を600mmとした。表-3に荷重時有効材齢を示す。また、同表には、荷重時のヤング係数(以下 $E_c(t_0)$)と有効材齢28日のヤング係数($E_{c,28}$)係数比、荷重時圧縮強度試験および荷重時自己応力と荷重時圧縮強度との比をあわせて示す。

(4) 測定方法

自己応力試験で使用した鉄筋はあらかじめ「荷重とひずみ」と「鉄筋温度とひずみ」の関係を試験により求め、自己応力算出に反映した。

自己収縮ひずみの測定は、供試体中央部に埋設した低弾性型(弾性係数:約 40MPa)の埋込みひずみ計によって測定した。コンクリートの温度変化に伴う体積変化はコンクリートの中心部に設置した熱電対にて測定した温度変化を JCI 案⁵⁾に準拠し、線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として補正した。圧縮強度試験と静弾性係数試験はそれぞれ JIS A 1108, および JIS A 1149 に準拠して実施した。試験材齢は(終結時間+3 時間), 1, 3, 7, 28, 56 および 91 日とした。

クリープ試験は、同一断面のクリープ供試体と無載荷供試体を同時に作製した。両供試体の体積変化にともなうひずみ量は等しいことから、「クリープひずみ+弾性ひずみ」の算出は、クリープ供試体のひずみから無載荷供試体のひずみを差し引くことにより行った。この試験の計測は試験区間 600mm の変位を精度 1/500mm の変位計を用いて行った。

3. 試験結果および考察

3.1 圧縮強度とヤング係数の発現

配合 SFLC と配合 SFLC-E-R の材齢 91 日の圧縮強度結果はそれぞれ 150, 152MPa となった。配合 SFLC と SFLC-E-R のヤング係数の経時変化を図-2 に示す。

3.2 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみの開始時点は凝結始発時間であるが、ここではコンクリート内部に発生する応力の基礎データを得ることを目的とした。図-3 に拘束応力の発現を配合 SFLC の鉄筋 D22 を例に練混ぜ時の水注入を原点とした場合の経時変化を示す。拘束供試体の拘束応力は、終結時間から応力が発生している。このことから、以後の検討では時間軸原点を終結時間とした。図-4 に各供試体の自己収縮ひずみの経時変化を示す。図中の○は配合 SFLC, △は配合 SFLC-E-R の 20°C 一定供試体の結果をそれぞれ示す。膨張材と収縮低減剤を混入した場合に収縮低減効果が認められたが、供試体 SFLC-E-R のひずみは材齢 100 日以降に後膨張を起こした。温度上昇量

表-3 載荷時圧縮強度とヤング係数比

載荷時有効材齢(日)	載荷時圧縮強度(MPa)	$E_c(t_0) / E_{c,28}^*$	載荷応力と圧縮強度との比
0.756	12.7	0.306	0.333
1.063	15.7	0.341	0.333
0.917	26.2	0.443	0.333
1.107	49.8	0.615	0.226
9.865	114	0.938	0.099

* $E_c(t_0)$: 載荷時有効材齢のヤング係数,
 $E_{c,28}$: 有効材齢 28 日のヤング係数を示す

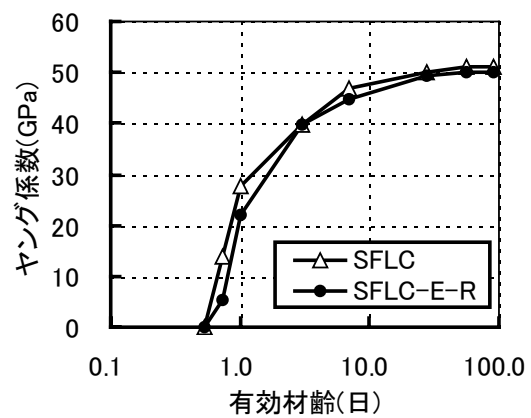


図-2 ヤング係数発現

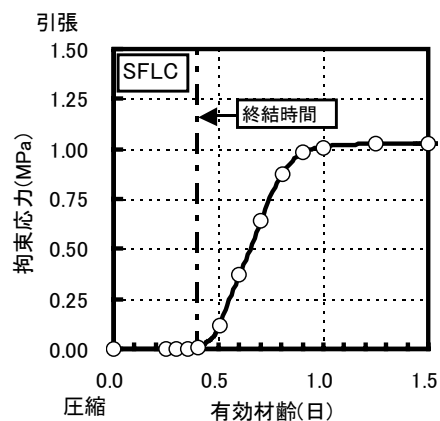


図-3 拘束応力の経時変化(注水原点)

が大きい場合には膨張材の水和反応が初期におき、この際に毛細管空隙とコンクリートの硬化が同時におきるのに対して、温度上昇量が小さい場合にはコンクリート硬化が終了した時点でも膨張材の水和が進行したため、膨張圧が増加

し、膨張材周辺にマイクロクラックの発生したことが推定される。このため、剛性が低下し、膨張ひずみが増加したと考えられるが、今後さらに検討していく必要がある。なお、後膨張については再現試験を行い、同様な結果となった。

3.3 クリープ試験

各載荷時材齢におけるクリープ係数の経時変化を図-5に示す。図中のマークは試験結果を、実線は後述する回帰曲線をそれぞれ示す。若材齢時の圧縮強度の発現が大きい状況下で所定の強度での載荷を迅速に行う必要がある。本試験で用いたクリープ試験装置は図-1に示すように横置きでジャッキと接続されているために、迅速に載荷でき、若材齢時のクリープ係数を測定するのに有効である。

3.3 自己収縮応力結果と解析結果

3.4.1 解析方法

解析方法は、終結時間から自己収縮ひずみの変動や若材齢時からのクリープによる応力緩和を評価するため、Step by step 法⁴⁾を用いた。

クリープは $E_c(t_j)/E_{c,28}$ により算出する修正MC90法⁴⁾を用いて評価した。クリープ関数を式(1)に示す。図-5の結果を用いて、回帰することにより、 ϕ_0 と β_H が求まる。図-6に $\phi_0 - E_c(t_j)/E_{c,28}$ と $\beta_H - \phi_0 - E_c(t_j)/E_{c,28}$ を示す。

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \left(\frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + (t - t_0)/t_1} \right)^{0.3} \quad (1)$$

ここで、 $\phi(t, t_0)$:クリープ係数、 ϕ_0 :クリープ係数の終局値、 β_H :クリープ進行速度を表す係数、 t :有効材齢(日)、 t_1 :1日、 t_0 :載荷時有効材齢(日)をそれぞれ示す。図より、 ϕ_0 と β_H が式(2)と(3)となる。

$$\phi_0 = 3.87(E_c(t_0)/E_{c,28} - 1)^2 + 1.16 \quad (2)$$

$$\begin{cases} 0 < E_c(t_0)/E_{c,28} < 0.260 \\ \beta_H = 0.000001 \\ 0.260 < E_c(t_0)/E_{c,28} \\ \beta_H = 48.615(E_c(t_0)/E_{c,28} - 0.260) - 0.02 \end{cases} \quad (3)$$

図-6に普通ポルトランドセメントと早強ポ

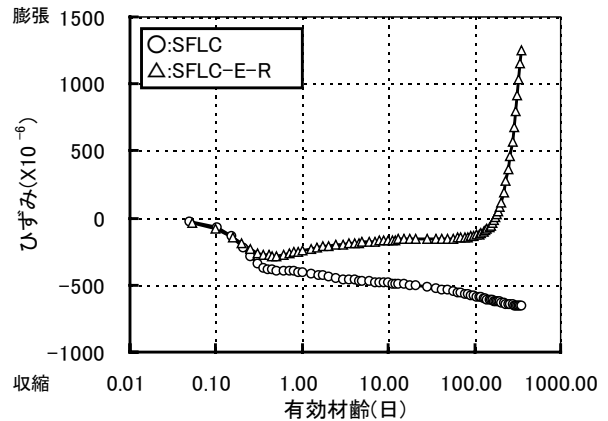
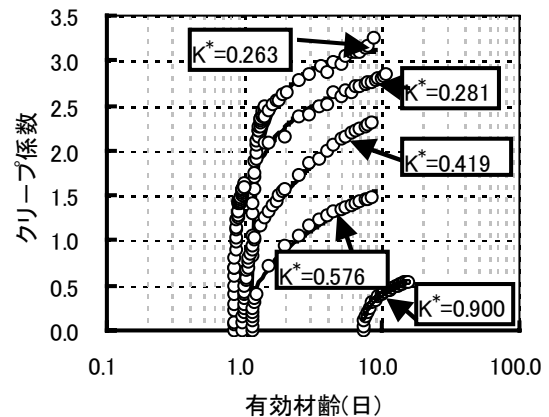


図-4 自己収縮ひずみの経時変化



* : $K = E_c(t_0)/E_{c,28}$ を示す

図-5 各載荷材齢の経時変化

ルトランドセメントを用いた水結合材比 0.3 の回帰曲線を点線⁴⁾で示す。文献との比較において、UHSCの ϕ_0 はほぼ等しくなったが、 β_H は同一の $E_c(t_0)/E_{c,28}$ に対して大きくなる結果となった。この結果は、若材齢時のシリカフェーム混入コンクリートでは、未水和セメント粒子周囲に形成される空隙のために変形拘束が低下し、クリープ変形が大きくなるとする報告⁶⁾と合致しない結果となった。この点については、さらに検討が必要と考える。図-7に式(1)から(3)を用いて算出したクリープ係数を示す。解析は図-2、図-4のヤング係数と収縮ひずみの試験値と図-7のクリープ係数を用いて算出した。なお、本解析では引張クリープと圧縮クリープは等しいとした点とコンクリートと鉄筋の線膨張係数をそれぞれ $10 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、 $11.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ と仮定した。

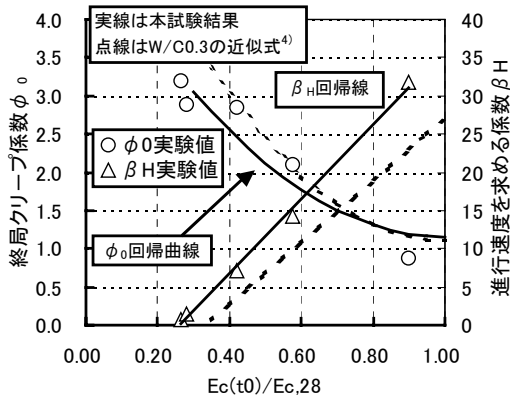


図-6 ヤング係数比と ϕ_0 および β_h の関係

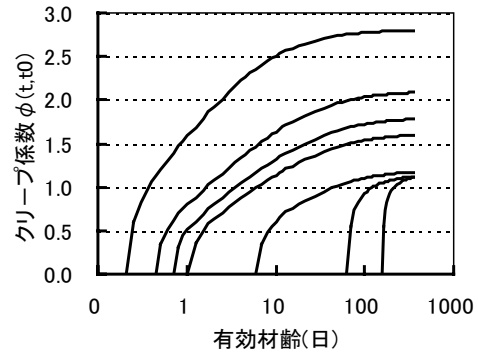


図-7 解析用クリープ係数

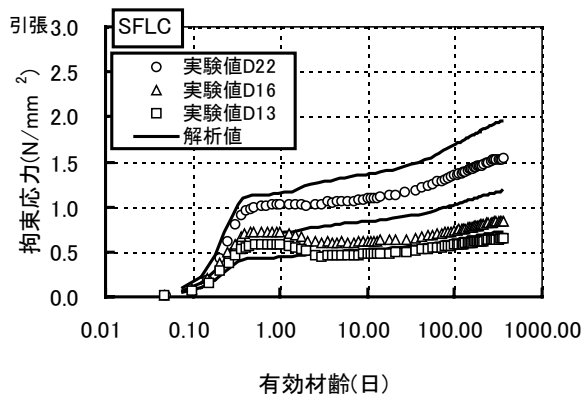


図-8 SFLCの拘束応力経時変化

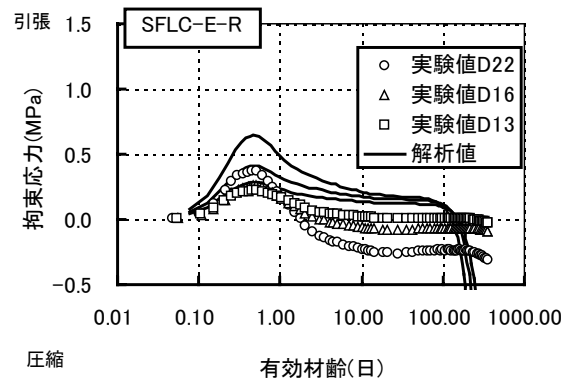


図-9 SFLC-E-Rの拘束応力経時変化

3.4.2 試験結果および考察

図-8に配合 SFLC における拘束応力の実験値と解析値の結果を示す。実験値は D22 を○、D16 を△および D13 を□のマークで示し、解析値は実線で示した。解析値と実験値は D13 の鉄筋は比較的良好に合致しており、クリープ関数が適正であったと考えられる。しかし、D16 と D22 においては、解析結果は実験値と比較して大きく評価する結果となった。これは、筆者らが、既に報告⁷⁾しているように鉄筋比 8.6%では鉄筋周囲のコンクリートに微細なひび割れが発生することを確認しており、このため、クリープ線形則の適用の範囲を超えたことなどが考えられ、さらに検討する必要があると考える。

図-9に配合 SFLC のクリープ関数を用いて配合 SFLC-E-R の拘束応力の解析した結果と実験値を示す。水結合材比 0.3 の膨張材と収縮低減剤を混入したコンクリートと無混入のコンクリ

ートではほぼ等しいクリープ性状を示すとする報告⁴⁾がある。解析値と実験値とは材齢初期において 0.2MPa の誤差となり傾向的に合致したが、長期的には合致しない結果となった。この理由として、膨張材を混入したことから、組織に空隙が生じ、結果として無混入のコンクリートより剛性が低下したため、クリープひずみが大きくなったため大きな応力緩和が生じたと考えられる。次に配合 SFLC と SFLC-E-R の拘束応力の実験値を比較すると「膨張材+収縮低減剤」を混入することにより、拘束応力の低減を図ることができた。しかし、図-4に示すように、材齢約 100 日から後膨張を起こす結果となった。しかし、拘束応力は後膨張を起こしているにも拘わらず、0MPa からの変動がなく、後膨張による急激な圧縮応力度の増加は生じない結果となった。さらに、計測を続け、圧縮応力度の増加がないかを確認する必要であり、この現象が生じ

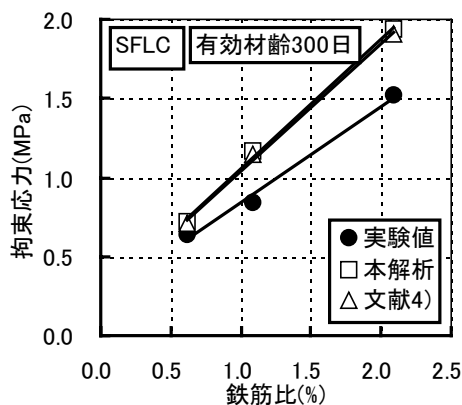


図-10 鉄筋比と拘束応力の関係

た理由を今後さらに検討していく必要があると考える。

図-10 に配合 SFLC の鉄筋比と有効材齢 300 日の拘束応力の実験値, 本解析および文献⁴⁾の関係を示す。本解析値と文献⁴⁾いずれにおいても, 鉄筋比が大きくなるにつれて, 実験値と解析値との差が大きくなる結果となった。このことから, コンクリート内部に発生する応力を精度よく推定するためには, クリープ特性の把握ばかりでなく, UHSC の特徴であるおおきな自己収縮ひずみに伴う拘束応力発生メカニズムについてさらに検討を加える必要があると考える。

4. まとめ

水結合材比 0.15 の超高強度コンクリートの若材齢時におけるクリープ試験を行い, 解析結果と拘束応力供試体の試験結果とを比較し, 以下のことが明らかになった。

- (1) 超高強度コンクリートのクリープ関数を新たに提案した。その関数を用いた解析は低い拘束応力供試体の応力測定値とよく合致した。ただし, このクリープ係数は膨張材を混入したコンクリートでは適用できない。
- (2) 超高強度コンクリートのクリープ係数の終局値は, 水結合材比 0.3 と比較した場合にはほぼ等しい結果となった。
- (3) 超高強度コンクリートは, 収縮ひずみに起因した拘束応力が高くなる可能性があるが, 実験値は解析結果より小さくなり, クリープ以

外の要因による応力緩和が予測される。

- (4) 膨張材と収縮低減剤を混入した超高強度膨張コンクリートのクリープ特性は無混入の超高強度コンクリートとは異なり, クリープ係数は大きくなる可能性がある。
- (5) 膨張材と収縮低減剤を併用することにより, 拘束応力の低減を図ることができたが, 材齢 100 日からひずみが後膨張した。

謝辞

本研究の一部は, 平成 16-18 年度日本学術振興会科学研究費(基盤(B)(2))「超高強度膨張コンクリートの開発と構造挙動評価の体系化」(課題番号: 16360220, 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) 谷村充ほか: 若材齢時長さ変化を考慮した R C 曲げ部材のひび割れ・変形の一般化評価方法, 土木学会論文集, No.760,V-63.No.1, pp.181-195, 2004
- 2) Suzuki, Masahiro, et al., : Temperature Effect on Shrinkage Stress in Expansive-Ultra High Strength Concrete, Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, p.p.627-632, 2005
- 3) CEB-FIP Model Code 1990
- 4) Ito, Hidetoshi, et al. : Early Age Deformation and Result Induced Stress in Expansive High Strength Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.2, pp.155-174, 2004
- 5) 日本コンクリート協会: 自己収縮研究委員会報告書, 1996 および 2002
- 6) 森下隆志ほか: 若材齢における高強度コンクリートの微視的構造が自己収縮拘束挙動におよぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, 2001, pp.709-714
- 7) 丸山一平ほか: 高強度コンクリートの健全性に関する検証, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 日本建築学会, pp.625-626, 2005