

論文 極初期材齢におけるセメントペーストの収縮挙動に関する研究

山下 良平^{*1}・大下 英吉^{*2}

要旨：本研究は、加圧環境下、乾燥を受けるセメントペースト供試体の複合収縮挙動を明らかにすることを目的とした。これまでの研究で著者¹⁾らの構築したクリープ変形として捉えた統一的自己収縮モデルおよび自己収縮発生メカニズムに乾燥面を与え、その影響が自己収縮発生メカニズム、収縮挙動にどのような変化をもたらすか、収縮量測定実験により得られた結果から明らかにした。収縮量測定実験は、水セメント比、雰囲気気圧および開放面の有無をパラメータとして実施した。

キーワード：自己収縮、クリープ変形、乾燥収縮

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高強度化に伴い、水セメント比の小さいコンクリートが多用され、自己収縮や温度による体積変化がコンクリート構造物の初期欠陥や耐久性の観点から重要な問題となっている。打設から7日という極初期材齢のセメント系材料には、自己収縮や乾燥収縮、外力によるクリープ変形等が発生し、硬化後のコンクリートに大きな影響を及ぼす。また、多種の要因が混在するため極初期材齢の体積変化を複雑化しており、詳細な複合の収縮メカニズムは明らかにされていない。

著者らは、未だ発生メカニズムに基づく予測手法の確立がなされていない自己収縮に着目し、発生メカニズムのモデル化、解析的予測手法の構築を行ってきた。構築したモデルは自己収縮発生メカニズムを一種のクリープ変形として捉え、自己収縮存在下におけるクリープ変形挙動を各種雰囲気気圧のもとで評価した。その結果、わずかな雰囲気気圧でも変形が大きく、雰囲気気圧を比例的に増加させても変形量が比例的に増加しない、つまり、自己収縮と雰囲気気圧による変形の重ね合わせが成立しないことが確認された。このことはすなわち、外力や自重の影響は自己収縮存在下のコンクリートの変形挙動に大きく

影響を及ぼすこととなり、外力の影響を明らかにするとともに、自己収縮と外力によるクリープ変形を統一的に評価する必要があると考えた。そして、構築した自己収縮発生メカニズムに基づく解析的予測手法の加圧環境下における適用性評価を実験結果との対比により行い適用性を示した。

本研究では、自己収縮存在下におけるクリープ変形挙動として統一的に評価したセメントペーストの収縮挙動に乾燥の影響を与え、複雑な初期の複合収縮挙動を統一的に評価するための基礎的研究として、各種要因が収縮発生メカニズムに及ぼす影響、収縮量を明らかにすることを目的とした。

2. 複合収縮発生メカニズム

2.1 自己収縮発生メカニズム

既存の研究¹⁾における自己収縮発生メカニズムは、図-1に示すクリープ変形として捉えている。打設直後のコンクリートは、水和の進行とともに骨格が形成される(水和進行過程1)。形成された骨格は、未水和の状態よりも体積が減少するため骨格に収縮力が生じることとなる(水和進行過程2)。しかし、水和の進行により骨格に強度が発現しているため、収縮力が拘束され

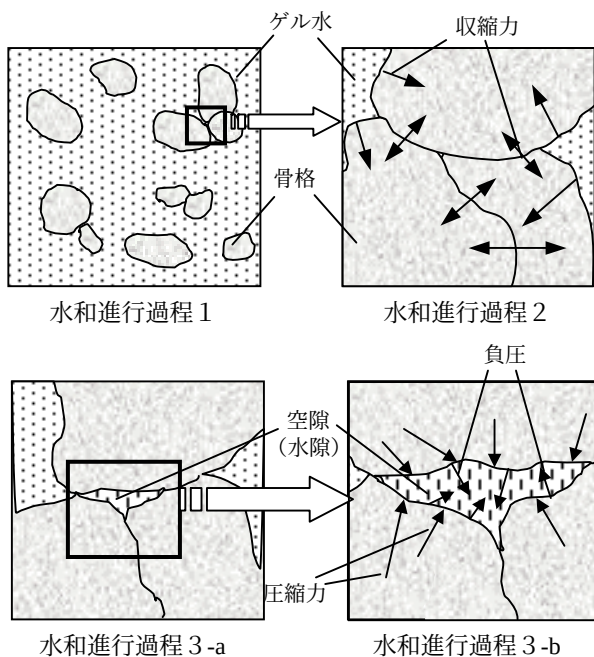
*1 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科教授 工博(正会員)

骨格内部に空隙が発生することになる(水和進行過程 3-a)。発生した空隙(水隙)は負の圧力を持っているため、その負圧に釣り合う力として空隙(水隙)外部の骨格に圧縮力が発生することになる(水和進行過程 3-b)。すなわち、水和進行過程 3-b に示すような内部空隙(水隙)の負圧と骨格の圧縮力という状態が不安定初期応力状態である。今、外力をゼロと仮定すると、安定な応力状態とは両物質の応力ともゼロであり、上述のような不安定初期応力状態から安定な応力状態に移行する過程でクリープ現象が生じることになる。すなわちこのクリープ現象がゼロ応力下における自己収縮であるととした。

2.2 加圧環境下における自己収縮発生メカニズム

2.1 で示した自己収縮発生メカニズムは通常大気圧下であり、1.0 気圧の外力が自己収縮を引



水和進行過程 1：骨格の形成
 水和進行過程 2：水和収縮による骨格の収縮の発現
 水和進行過程 3-a：骨格の強度発現による内部空隙の発生
 水和進行過程 3-b：空隙周辺の応力状態

図－1 自己収縮発生メカニズム

き起こす大きな駆動力となっている。

雰囲気気圧（外力）は図－1の水和進行過程 3-a で発現した空隙（水隙）の持つ負圧を打ち消す働きをし、安定な応力状態へ移行する過程で生じるクリープ変形量を大きくする。

2.3 加圧環境下・乾燥面を与えた自己収縮発生メカニズム

乾燥面を与えた自己収縮発生メカニズムのモデル化に際し、乾燥収縮が毛細管張力理論に基づくものと仮定する。

打設直後、水分の移動が自由に行われ、骨格の形成前から水分が逸散することで W/C が低下し、内部組織構造が緻密化する。骨格の形成により空隙内部に外部からの水分の流入が遮断されてからは、水和反応により空隙内の水分が消費され、空隙内の相対湿度の低下により、毛細管張力が発生する。毛細管張力は空隙径の小さいものほど大きく、乾燥による内部組織構造の緻密化で小さくなった空隙は乾燥を受けないものに比べ、大きい毛細管張力（空隙の負圧）を生じる。水隙の負圧が高まることで図－1 水和進行過程 3-b に示した空隙周りの不安定応力状態の程度が増し収縮量が增大する。外力を受ければその分、上述したクリープ変形の駆動力の程度が高まるので収縮量は外力を受けないものより大きくなる。

W/C が比較的大きければ、内部組織構造が疎で、空隙径が大きいため負圧が小さく、自己収縮量は小さい。しかし、空隙径が大きいということは、乾燥による水分を逸散しやすく、乾燥収縮が長期にわたり発生しやすいこととなる。

3. 収縮量測定実験

3.1 実験概要

(1) 使用材料およびパラメータ

自己収縮測定試験には 40×40×160mm の形状寸法をしたセメントペーストを対象とした。使用材料は表－1 に示す通りであり、実験パラメータは、表－2 に示すように W/C、雰囲気気圧および開放面の有無である。本研究における加圧

表－１ 使用材料

使用セメント	普通ポルトランドセメント	
密度	3.16 (g/cm ³)	
供試体寸法	40×40×160(mm)	
W/C	30%	50%
凝結始発時間	144(分)	343(分)

表－２ 実験パラメータ

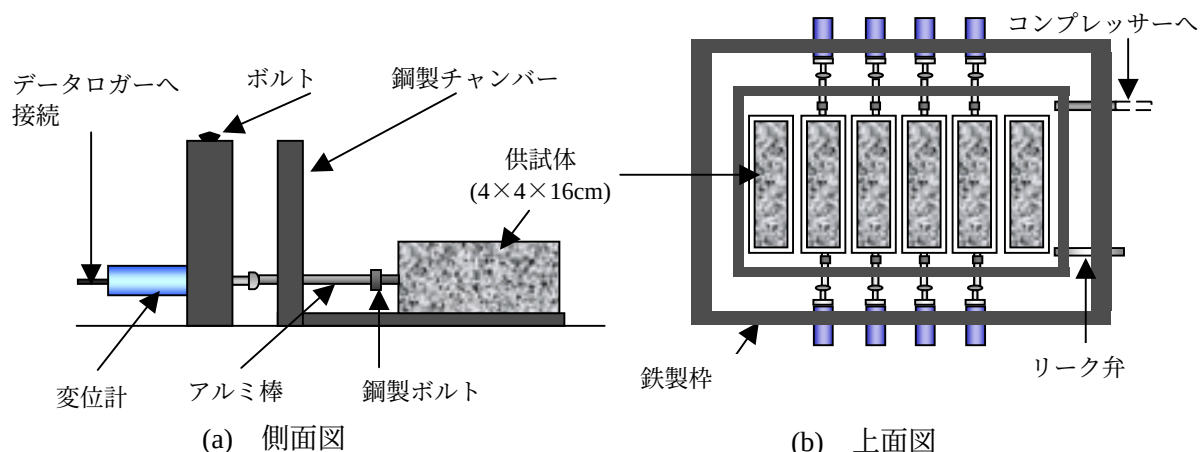
供試体番号	W/C	雰囲気圧	開放面の有無
1	30%	1.0atm	有
2			無
3		2.0atm	有
4			無
5		3.0atm	有
6			無
7	50%	1.0atm	有
8		2.0atm	有
9		3.0atm	有

実験の载荷期間は、外力が自己収縮に最も影響を及ぼす初期の、凝結始発時間から材齢 24 時間までであり、雰囲気圧は 1.0 気圧を保持したものと 2.0 気圧、3.0 気圧へと加圧したものである。なお、凝結始発時間はビカー針試験により測定した。

(2) 実験方法

測定は、20℃±2℃、60±5%R.H.の恒温恒湿室

で実施し、測定間隔は材齢 1 日までは 1 時間毎、材齢 7 日までは 1 日毎に行った。供試体は、型枠による拘束を防ぐため発泡スチロール製型枠に打ち込み、開放面無しの実験では、均した後直ちに水分の逸散を防ぐため仕上げ面をアルミ箔テープでシールした。開放面有りの実験では、仕上げ面を均すのみとし、開放面を 60%R.H.の乾燥状態とした。供試体は全て図－２に示すチャンバー内に静置し、打設後 24 時間の時点で脱型し、開放面無しの実験では水分の逸散を防ぐために全面をアルミ箔テープでシールし、開放面有りの実験では、打設直後から開放している 1 面以外の面をアルミ箔テープでシールした。実測ひずみの測定は、凝結始発時間から同図に示すようにあらかじめ供試体両端に埋め込んだ鋼製のボルトにアルミ棒を当て、チャンバーの外側から変位計(1/1000mm)を当てて行い、変位計本体はチャンバーの外側に鋼製の枠を設け鋼製のボルトで固定した。同図のように鋼製ボルトと変位計の間にアルミ棒を設置した理由は、変位計を加圧されたチャンバー内に設置した場合に、変位計に誤作動が生じるためである。なお、加圧環境下における測定実験は、コンプレッサーを用いてチャンバー内に空気を送り込み、チャンバー側面にあるリーク弁を調節することにより一定気圧を保った。载荷は供試体の凝結始発時間から開始し、材齢 24 時間の脱型時に 1.0 気圧へと減圧し終了する。その後材齢 7 日までは 1.0 気圧環境下にて測定を行った。



図－２ 実験装置図

(3) 自己収縮ひずみ算出方法

自己収縮ひずみの算出は、実験により得られた自由収縮ひずみから温度による補正を行うことにより実施した。なお、自己収縮ひずみは凝結始発時間を基長として整理した。温度は供試体内部にあらかじめ埋設した熱伝対により計測し、温度補正に用いた線膨張係数は渡邊ら²⁾の構築した式(1)を用いた。

$$\begin{aligned} 17 \leq x \leq 28 & \quad \ln y = a - bx \\ & \quad (a = 5.90, b = 0.14) \quad (1) \\ 28 < x & \quad y = 7.0 \end{aligned}$$

ここで、 x, y はそれぞれセメントの水和反応率(%), 線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) である。セメントの反応率は式(2)に示すように各鉱物の水和反応率に含有率を乗じたもので表した。

$$\begin{aligned} hyd(M)_{cem} = & hyd(M)_{C3S} \cdot w_{C3S} \\ & + hyd(M)_{C2S} \cdot w_{C2S} \quad (2) \\ & + hyd(M)_{C3A} \cdot w_{C3A} \\ & + hyd(M)_{C4AF} \cdot w_{C4AF} \end{aligned}$$

ここで、 $hyd(M)$ は、任意の Maturity(積算温度)における水和反応率であり、添え字 cem , $C3S$, $C2S$, $C3A$ および $C4AF$ はそれぞれセメント、エーライト、ビーライト、アルミネート、フェライトを表している。Maturity に対する各鉱物の水和反応率は図-3に示す通りであり、同図は笠井ら³⁾の研究により同定された時間に

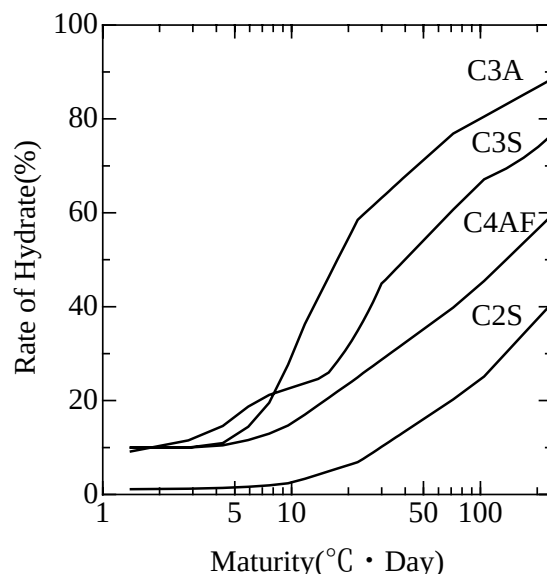


図-3 各鉱物組成の水和反応率

対する各鉱物組成の水和反応率を Maturity で整理したものである。

3.2 開放面が自己収縮挙動に及ぼす影響評価

開放面の有無(乾燥)が自己収縮に及ぼす影響評価として $W/C=30\%$ の各雰囲気圧環境下で測定した開放面有り無しの実験結果(供試体番号1~6)を図-4(a)~(c)に示す。(a), (b)および(c)はそれぞれ 1.0 気圧, 2.0 気圧および 3.0 気圧の同一環境下で測定された開放面有り無しを比較するグラフである。図中の●, ▲および■が開放面無し, ○, △および□が開放面有りを表す。

同図からいずれの雰囲気圧においても、開放面の有無に関わらず自己収縮は急激に増加し、その後材齢約 1 日の時点から緩やかな増加を示す。開放面の有無による自己収縮ひずみの差異

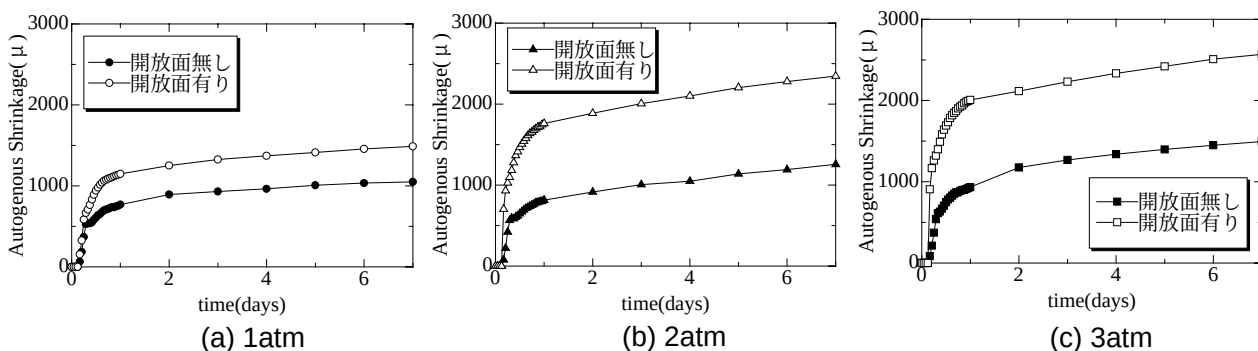


図-4 開放面有無比較 (普通セメント $W/C=30\%$ 実験値)

は、開放面有りが開放面無しに比べて大きな値である。この傾向は、凝結直後から材齢約1日の時点までにおいて顕著であり、その後の材齢においては、開放面の有無による自己収縮ひずみ増分に差異はない。すなわち、W/C=30%の場合、2.3で示した理論に基づくと、空隙径が乾燥の影響を受け、より小さくなり、自己収縮ひずみを急激に増大させた。そして、材齢の経過とともに自己収縮の影響は小さくなり、乾燥収縮によるひずみが顕著になると思われるが、W/C=30%では、開放面の有無による自己収縮ひずみ増分の差異を生じなかった。その詳細はW/Cの影響と関連させ後述する。

3.3 雰囲気気圧が乾燥を受ける自己収縮に及ぼす影響評価

自己収縮に及ぼす雰囲気気圧の影響は、初期に载荷するほど、载荷が大きいほど、またW/Cが小さいほど顕著になることは既存¹⁾の研究で示されている。乾燥状態にあるセメントペーストの自己収縮に及ぼす雰囲気気圧の影響は図-5に示す通りである。同図はW/C=30%の実験結果であり、図中●、▲および■はそれぞれ1.0気圧下、2.0気圧下および3.0気圧下における開放面無しの結果、○、△および□はそれぞれ1.0気圧下、2.0気圧下および3.0気圧下における開放面有りの結果である。

1.0気圧下と加圧環境下を比較すると自己収縮ひずみは、雰囲気気圧が大きいほど大きな値を示

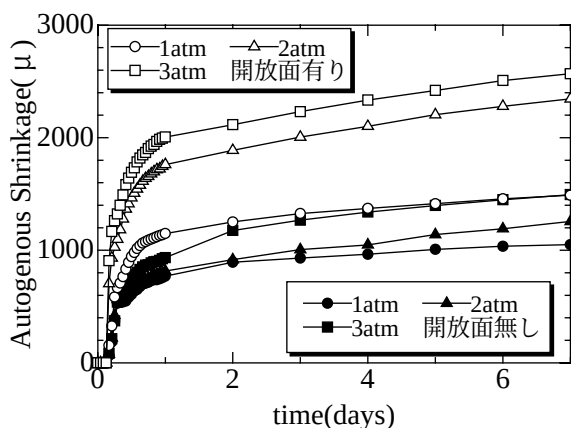


図-5 各雰囲気気圧の影響(W/C=30%実験値)

しており、その値は開放面有りが大きい。これは、3.2で示した乾燥の影響により負圧が高まり、そこに外力が働くため、乾燥を受けていないものより自己収縮ひずみが顕著に生じた。

3.4 W/Cの違いが収縮挙動に及ぼす影響評価

前節まででは、W/C=30%のセメントペースト供試体の自己収縮に及ぼす開放面の有無および雰囲気気圧の影響を示した。W/Cの違いが及ぼす影響を評価するために乾燥面を与えたW/C=50%の実験結果である供試体番号7~9を図-6に示す。図中の○、△および□は1.0気圧下、2.0気圧下および3.0気圧下の実験結果である。

図-5中の開放面有りの実験結果と図-6を比較すると、本研究の試験期間内ではW/Cの低いW/C=30%の方が大きな収縮量を生じていることがわかる。材齢約1日以降の収縮量の増加傾向を比較するとW/C=30%の収縮挙動が緩やかな増加傾向を示しているのに対し、W/C=50%はW/C=30%の増加傾向より大きな増加傾向を示した。このことは細孔組織構造が関係すると推測する。W/C=50%のように比較的W/Cの高いセメントペーストは2.3に示したように、細孔組織構造が疎であり、空隙径が大きく表面張力は小さいと考えられる。しかし、空隙径が大きいということは水分の逸散が容易であることを示し、乾燥収縮を比較的長い期間生じる。

仮に開放面の有無の差が乾燥による影響であ

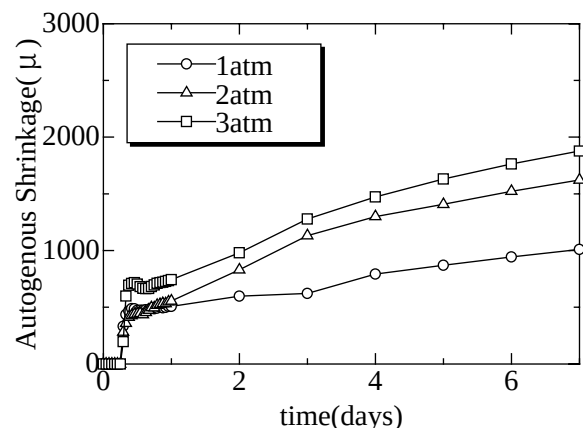
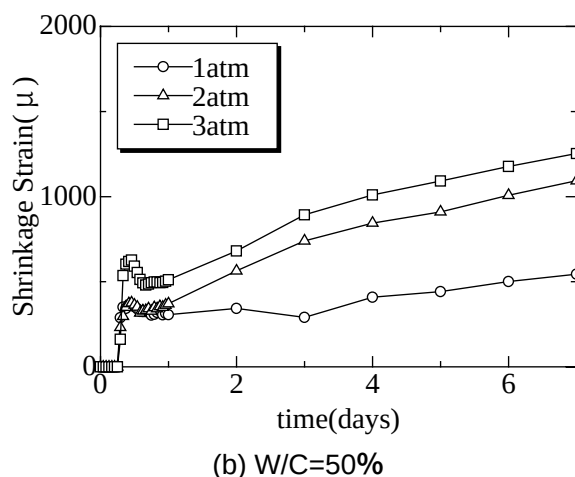
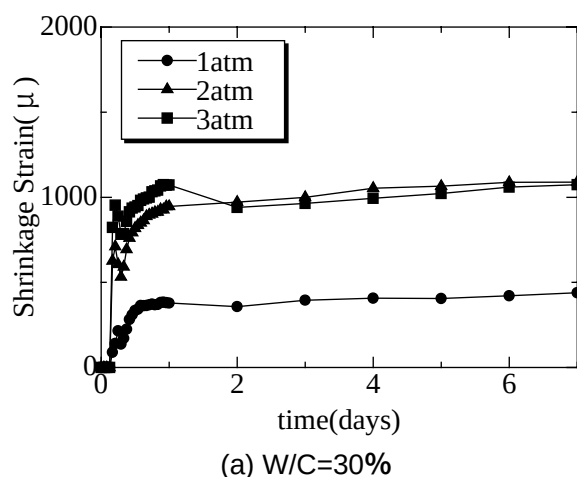


図-6 各雰囲気気圧の影響(W/C=50%実験値)



図－7 開放面有無の差

るものとして、各雰囲気圧の開放面有りの収縮量から開放面無しの収縮量を単純に差し引いたものを図－7に示す。同図(a), (b)はそれぞれW/C=30%, W/C=50%である。両グラフは乾燥収縮と乾燥が自己収縮に及ぼす影響の和を示しており、W/C=30%が材齢の経過とともに乾燥の影響が小さくなっているのに対し W/C=50%は大きくなっている。W/C の違いが乾燥による体積変化の生じ易さを表すと考えれば、極初期材齢の収縮挙動は自己収縮の影響が最も大きく、材齢の経過とともに収縮量が自己収縮から乾燥収縮へ依存性を高めていく結果であると考えられる。

4. まとめ

極初期材齢のセメントペーストの収縮挙動は多種の要因から引き起こされており、本研究では外力(雰囲気圧)、乾燥を条件として与えた場合の自己収縮発生メカニズムを仮定し、実験により得られた結果を考察し、仮定した複合収縮発生メカニズムの妥当性を確かめた。実験により得られた結果は以下の通りである。

- 1) 自己収縮ひずみが、急激に増加した後、緩やかな増加傾向をたどるのに対し、乾燥収縮は比較的長い期間生じる。(W/C, 空隙径に依存)
- 2) 载荷が収縮量に与える影響は、乾燥面の有無に関わらず、大きい外力を受ければ必ず

みも増大する。

- 3) 自己収縮存在下における乾燥収縮現象は、空隙形成時のセメントペーストに影響を及ぼし空隙径を小さくすることが考えられる。実験結果から、乾燥による自己収縮への相乗効果があるような結果を得たが、今後、細孔径分布との比較により明らかにする必要がある。

以上の得られた結果から、新たな解析モデルを構築し、極初期材齢における複合収縮挙動の解析的予測手法構築を今後の課題とする。

参考文献

- 1) 山下良平, 大下英吉: 極初期に加圧されたセメントペーストの自己収縮挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第26巻, 第1号, pp.465-471, 2004
- 2) 渡邊智紀, 服部大輔, 笠井哲郎, 大下英吉: セメント系材料の水和発熱反応度依存型としての線膨張係数に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.889-894, 2001
- 3) 笠井哲郎, 田澤栄一: 硬化収縮の測定によるセメントの水和度の簡易推定法, 広島大学工学部研究報告, Vol.37, No.1, pp.23-29, 1988