

論文 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

山下 良平^{*1}・大下 英吉^{*2}

要旨：本研究は，著者らの研究¹⁾において構築した任意のセメント種類，W/C に適用可能なクリープ変形として捉えた統一的自己収縮モデルの加圧環境下への拡張を目的とした。自己収縮測定実験は，W/C，雰囲気気圧および載荷材齢をパラメータとした加圧環境下に各種セメントペーストを静置して実施し，各種パラメータが自己収縮挙動に及ぼす影響評価を行った。そして，実験結果との対比により解析モデルの適用性を評価するとともに，解析モデルの拡張を実験結果に基づき実施した。

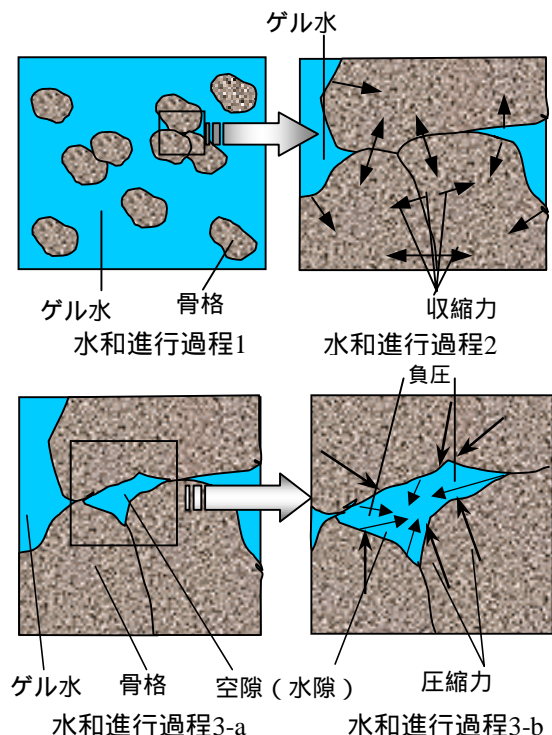
キーワード：自己収縮，クリープ変形，雰囲気気圧

1. はじめに

近年，極めて水セメント比の小さいコンクリートの多用により自己収縮や温度による体積変化の影響が無視しえないものとなり，多くの研究・報告においてその影響が指摘されている。

著者らは既存の研究¹⁾において自己収縮の発生メカニズムは，図 - 1 に示すクリープ変形と捉えている。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した。

この自己収縮発生メカニズムに基づくと現在測定されている自己収縮は，水和発熱反応による一種のクリープ現象に加えて，1.0 気圧の外力によるクリープ現象が加わったものと考えられる。1.0 気圧という比較的小さな外力であっても上述したような不安定応力状態下にある物質に対しては，安定な応力状態へと移行する駆動力



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 自己収縮ひずみメカニズム

*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)

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	3.15(g/cm ³)	
供試体寸法	40 × 40 × 160mm	
W/C	30%	50%
凝結始発時間	144 (分)	343 (分)

となるため、その変形特性に及ぼす影響は非常に大きく、コンクリートの自重、リフト打ちされたコンクリートの自重のように 1.0 気圧以上の外力が作用すれば変形特性に対し、より多大な影響を与えることが考えられる。このことはすなわち、クリープ変形として捉えた自己収縮存在下において、それらの外力が作用した際の変形性状を全クリープ変形性状として評価することになるわけである。

このような観点から、著者ら²⁾は自己収縮が顕著に生じる早強セメントを用いた各種加圧実験を行い、自己収縮に及ぼす雰囲気気圧の影響は、載荷材齢が短いほど、また加圧力が大きいほど顕著になることが明らかとなり、自己収縮に及ぼす外力の影響は非常に重要であることを指摘した。さらに、現在、主として用いられている普通セメントを用いたモルタル、セメントペースト或いはコンクリートに対しても上述の性状評価を行う必要があるとも指摘した。

そこで本研究では、加圧環境下にある普通セメントを用いたセメントペーストの自己収縮性状を詳細に評価することを目的として、W/C、雰囲気気圧および載荷材齢をパラメータとした自己収縮測定実験を実施し、普通セメントを用いたセメントペーストの自己収縮に及ぼす各パラメータの影響評価を行った。そして、実験的および解析的手法に基づいた雰囲気気圧作用時の自己収縮挙動メカニズムの解明も行った。

2. 加圧環境下にある自己収縮挙動

2.1 実験概要

(1) 使用材料

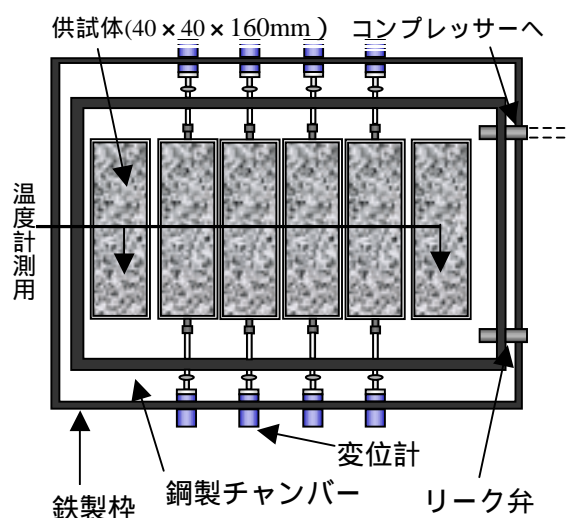
自己収縮測定実験は、40 × 40 × 160mm の形状寸法をしたセメントペースト供試体を用いた。

なお、使用材料は表 - 1 に示す通りであり、混和剤は無添加とした。

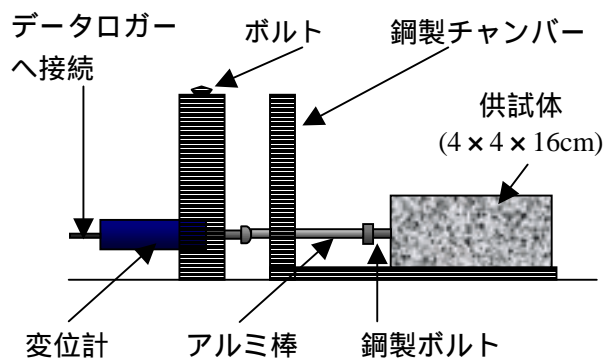
(2) 実験方法

測定は、20 ± 2 °C、40 ± 5% R.H. の環境下で実施し、測定間隔は、材齢 1 日までは 1 時間毎、それ以降の 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にセメントペーストを発泡スチロール製の型枠に打ち込んだ。仕上げ面は、打ち込み後直ちに水分の逸散を防ぐためにアルミ箔テープでシールし、図 - 2 の(a)、(b)に示す恒温室内の鋼製チャンバーに静置した。そして、打設から 24 時間後に脱型し、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た。実測ひずみの測定は、同図に示すようにあらかじめ供試体両端に埋め込んだ(埋め込み長 10mm)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



(a) 実験装置上面図



(b) 実験装置側面図

図 - 2 実験装置図

(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。

(3) 実験パラメータ

実験パラメータは、表 - 2 に示すように、載荷材齢、雰囲気気圧および W/C とした。雰囲気気圧が自己収縮に及ぼす影響評価として、普通セメントを対象に載荷材齢を凝結始発時間とし、雰囲気気圧を 1.0, 2.0, 3.0 気圧の 3 種類のパラメータとした自己収縮測定実験を行った。また、自己収縮挙動に載荷材齢が与える影響評価として、載荷材齢を凝結始発時間、材齢 24 時間の 2 種類のパラメータとした自己収縮測定実験も行った。さらに、W/C の違いによる影響も確かめるため、2 種類の W/C で実験を行った。なお、表 - 2 に示す載荷材齢 24 時間における雰囲気気圧は 24 時間の時点で 2.0, 3.0 気圧に上昇させる事を示す。

(4) 温度補正

自己収縮は、供試体に埋設した熱電対で計測された温度による補正を行い算出した。

温度補正には、著者らの研究³⁾により求められた式(1)に示す線膨張係数を用いた。

$$17 \leq x \leq 28 \quad \ln y = a - bx$$

$$(a = 5.90, b = 0.14) \quad (1)$$

$$28 < x \quad y = 7.0$$

ここで、 x, y はそれぞれ水和反応度(%), 線膨張係数 ($\times 10^{-6} /$) である。

2.2 各パラメータが自己収縮挙動に及ぼす影響

(1) 自己収縮挙動に及ぼす雰囲気気圧の影響

自己収縮挙動に及ぼす雰囲気気圧の影響評価として、W/C=30, 50%の普通セメントにおける雰囲気気圧をパラメータとした自己収縮測定結果を図 - 3 (a), (b)に示す。なお、自己収縮ひずみ測

表 - 2 実験パラメータ

載荷材齢	雰囲気気圧	W/C
凝結始発時間	1.0, 2.0, 3.0 気圧	30%
		50%
24 時間	1.0 2.0 気圧	30%
	1.0 3.0 気圧	50%

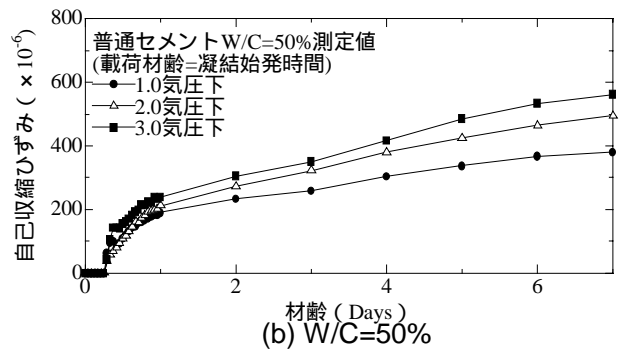
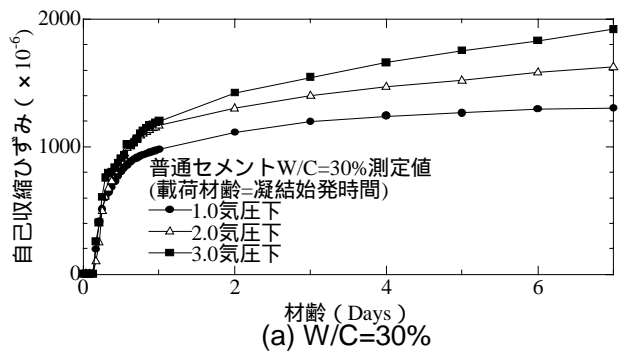


図 - 3 雰囲気気圧の影響
(載荷材齢=凝結始発時間)

定値は凝結始発時を基長として整理した。既存の研究¹⁾でも示されているが、(a), (b)を比較すると、W/C=30%のセメントペースト供試体の自己収縮が、W/C=50%に比べ大きな自己収縮を生じていることがわかる。自己収縮ひずみはいずれの W/C においても凝結始発(加圧開始時)から急激に増加し、その後、緩やかに増加する傾向を示している。

1.0 気圧下, 2.0 気圧下の測定結果を比較すると、W/C=30%の測定結果では材齢が 1 日までの極初期から差異を生じ、材齢 7 日の時点での差異は約 300×10^{-6} であり、1.0 気圧下の自己収縮すなわち一般に定義されている自己収縮に対して約 25% 大きな値となっている。また、W/C=50%の測定結果では、材齢 1 日以降において差異が生じ、材齢 7 日の時点での差異は約 100

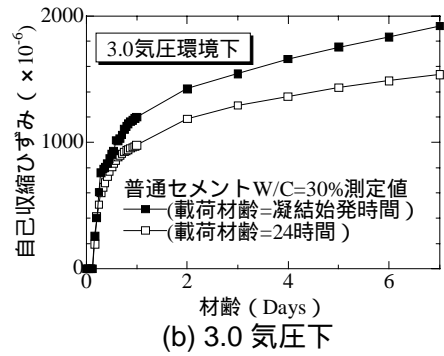
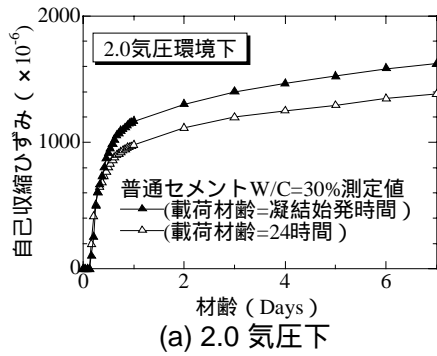


図 - 4 荷材齢の影響 (W/C=30%)

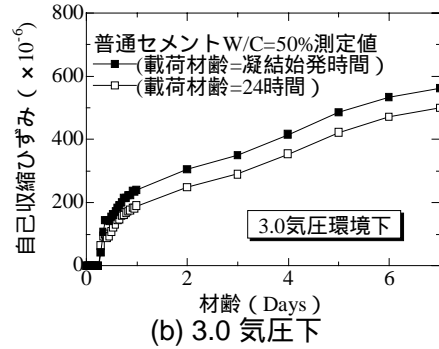
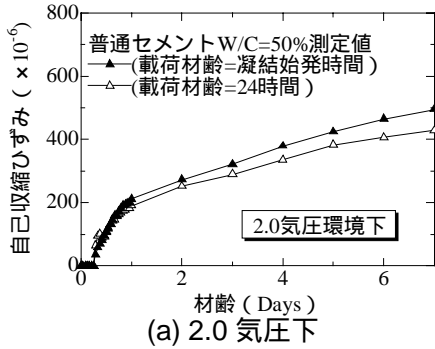


図 - 5 荷材齢の影響 (W/C=50%)

$\times 10^{-6}$ であり 1.0 気圧下の自己収縮に対して約 26% 大きな値となっている。このことから、W/C=50%の結果は W/C=30%の結果に比べると雰囲気気圧の影響は小さな値を示しているものの、一般の自己収縮に対する割合は若干ではあるが大きいことがわかる。一方、1.0 気圧下と 3.0 気圧下を比較した場合、1.0 気圧下と 2.0 気圧下の比較とほぼ同様の材齢で差異が確認できる。

(2) 自己収縮挙動に及ぼす荷材齢の影響

自己収縮挙動に及ぼす荷材齢の影響評価として、図 - 4, 5 の(a),(b)にそれぞれ 2.0 気圧下、3.0 気圧下の荷材齢の異なる実験結果を示す。

荷材齢 24 時間の実験結果は、荷材齢が凝結始発時間の実験結果に比べ自己収縮ひずみは小さいことがわかる。また、荷材齢による自己収縮ひずみの差異は雰囲気気圧が大きいほど大きくなっている。これは、極初期材齢に外力が作用することにより、不安定な初期応力状態から安定な応力状態へ移行する過程の駆動力の程度を大きくするためであると考えられる。

以上のことから、早強セメントに比べ、自己収縮の程度が小さい普通セメントにおいても自

己収縮挙動に及ぼす外力の影響が大きいことが示された。また、比較的水セメント比の大きい材料に対しても外力の影響が確認できた。

3. 既存の自己収縮モデル¹⁾

3.1 自己収縮モデルを導入した水・コンクリート骨格連成解析手法⁴⁾

2 相多孔質材料としてのセメント系材料の支配方程式は、間隙水の質量保存則と力の釣り合い式を同時に満足する必要がある。そして、間隙水の質量保存則の式と仮想仕事をを用いた釣り合い式を連成させることにより、自己収縮モデルを導入した 2 相多孔質材料の支配方程式は式(2)のようになる。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} + A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \\ W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{f_p^{ve}\}}{dt} - \{f_p^{ext}\} + \frac{d\{g_p\}}{dt} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

すなわち、節点変位ベクトル $\{\bar{u}\}$ と節点間隙水圧 $\{\bar{p}\}$ を未知数として境界条件を代入することにより、水和進行過程における内部空隙（水隙）

の負圧の程度と骨格の圧縮力が求まり、これを不安定初期応力としたクリープ変形が自己収縮として自動的に求まることになる。なお、式(2)におけるマトリックスおよびベクトルの詳細は文献5)に示す。

3.2 統一的自己収縮モデル

著者らは、既存の研究において任意のセメント種類、W/C に適用可能な統一的自己収縮モデルの構築を行った。水セメント比による水和反応度の違いを Maturity で整理し、水和反応率と関連付けることで任意の水セメント比における水和反応の進行度合いおよび水和反応による体積収縮を評価できるものとした。

水和による体積収縮項は、次式⁵⁾で表される。

$$\frac{d\{g_p\}}{dt} = \frac{\eta\gamma_p}{\rho_w} \frac{dC_H}{dt} \quad (3)$$

ここで、 η は水和反応によりゲル空隙となる割合、 γ_p はセメントの完全水結合材比、 ρ_w は水の密度、 C_H は単位体積あたりのセメント中で水和しているセメントの重量でセメントの反応率に比例する量である⁵⁾。

セメントの反応率は、笠井ら⁶⁾により求められたセメントの各鉱物組成の水和反応率を基に次式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すとし、これにより任意のセメント種類および水セメント比に対する水和反応率が求まることとなる。

ここで、 $hyd(M)$ は、任意の Maturity における反応率、添え字 $cem, C3S, C2S, C3A, C4AF$ はそ

$$\begin{aligned} hyd(M)_{cem} = & hyd(M)_{C3S} \cdot w_{C3S} \\ & + hyd(M)_{C2S} \cdot w_{C2S} \\ & + hyd(M)_{C3A} \cdot w_{C3A} \quad (4) \\ & + hyd(M)_{C4AF} \cdot w_{C4AF} \end{aligned}$$

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。各鉱物の水和反応率の近似式に関しては文献1)に記す。

4. 加圧環境下における既存の解析手法の適用性

本章では3.に示した既存の解析手法の加圧環

境下における適用性を2.と同様の载荷パラメータ、载荷時間を与えた解析結果と実験結果の対比により評価を行った。

4.1 解析モデル

解析モデルは、図-6に示す形状寸法をしたセメントペースト供試体の1/8部分を取り出し、8要素に分割したものである。境界条件は、変位に関しては一軸状態であり、間隙水に関しては全面非排水とした。なお、解析に用いた水の体積弾性係数、透水係数は、表-3に示す通りである。

4.2 適用性評価

図-7, 8に各種パラメータを用いた実験結果と解析結果の比較を表している。

これらの図から、解析結果は実験結果の極初期の急激な自己収縮ひずみの増加、その後の緩やかな増加傾向を良く表しており、定量的に判断しても解析結果は実験値を精度良く表している。よって、本解析範囲内において解析手法の適用性が示され、加圧環境下にある極初期材齢の自己収縮メカニズムに関しては外力が作用することにより、不安定な初期応力状態から安定な応力状態へ移行する過程の駆動力の程度を大きくすると考えられる。

5. まとめ

本研究では、普通セメントを用いたセメント

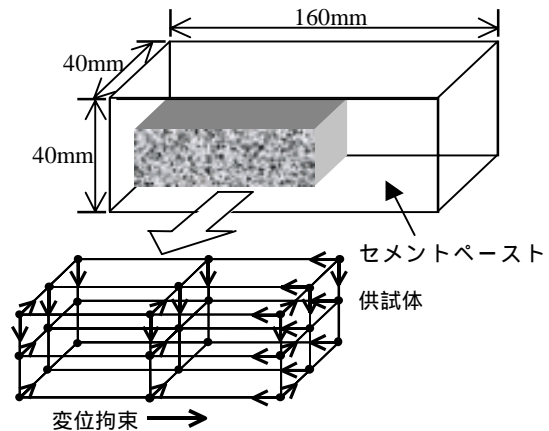


図-6 解析モデル

表-3 解析パラメータ

水の体積弾性係数(kN/mm ²)	2.2
透水係数(cm/s)	1.05 × 10 ⁻⁷

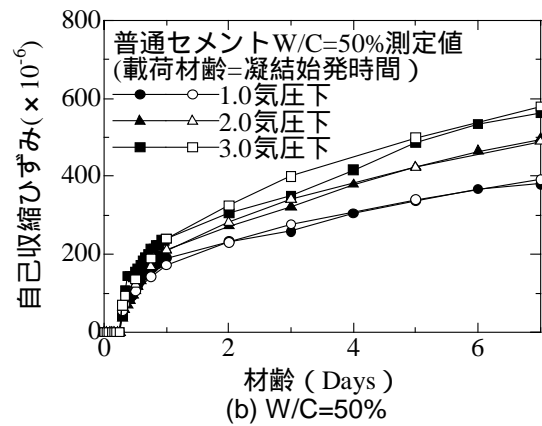
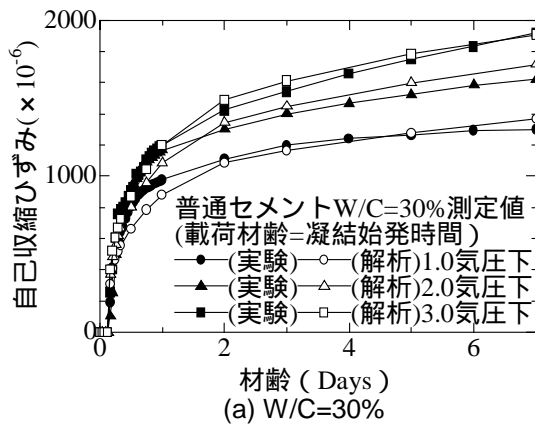


図 - 7 実験結果に対する解析的評価 (載荷材齢=凝結始発時間)

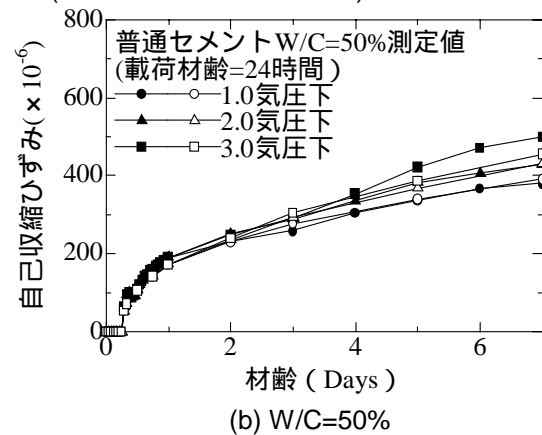
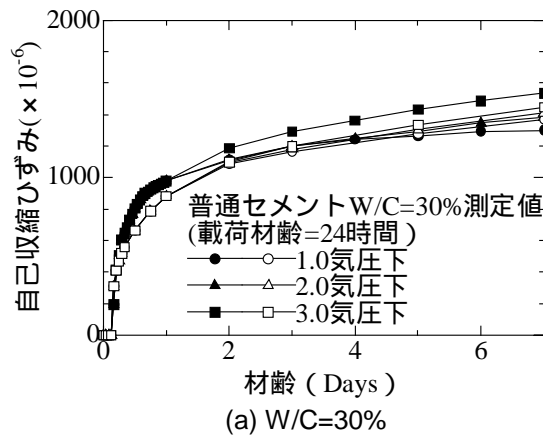


図 - 8 実験結果に対する解析的評価 (載荷材齢=24 時間)

ペーストに対し、W/C、雰囲気気圧、載荷材齢をパラメータとした加圧実験を行い、各種パラメータが自己収縮挙動に及ぼす影響評価を行った。また、既存の研究で構築した自己収縮解析手法の加圧環境下における適用性を実験結果との対比により評価した。その結果を以下にまとめる。

- 1) 自己収縮挙動に与える雰囲気気圧の影響として雰囲気気圧が大きいほど、自己収縮ひずみも大きな値をとり、その影響は載荷を極初期に受けるほど顕著に現れる。
- 2) 既存の研究で構築した解析手法は実験結果との対比により加圧環境下における自己収縮挙動を精度良く表しており、適用性が示された。また、雰囲気気圧作用時の自己収縮挙動メカニズムを明らかにした。

参考文献

- 1) 山下良平, 劉兆涛, 大下英吉: クリープ変形として捉えた自己収縮モデルの水セメント比依存型への拡張に関する研究, コンクリート工学

年次論文集, Vol.25, No.1, pp.449-454, 2003

- 2) 浜中隆, 佐々木美江, 大下英吉: 自己収縮存在下におけるセメント系材料のクリープ特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.739-744, 2001
- 3) 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
- 4) 大下英吉, 田邊忠顕: コンクリート内部に発生する間隙水圧の予測とその影響評価に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.526, vol29, pp.29-41, 1995
- 5) 加藤克規, 笠井哲郎, 大下英吉: 水和反応によるクリープ特性としての自己収縮に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.787-792, 1998
- 6) 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