

# 論文 自己収縮に及ぼすクリープ特性に関する実験的研究

浜中 隆\*<sup>1</sup>・渡邊智紀\*<sup>2</sup>・田中敏嗣\*<sup>3</sup>・大下英吉\*<sup>4</sup>

**要旨：**本研究は1大気圧を減少させることにより，水和発熱反応によるクリープ特性としての自己収縮と1大気圧によるクリープ変形を完全に分離した実験を行い，その結果と既存の解析手法<sup>1)</sup>による結果とを比較し，その適用性評価を行った。その結果，セメントの種類によっては大気圧の影響が認められた。また，既存の解析手法の0.5気圧下での早強，普通セメントへの適用性が確認できた。

**キーワード：**自己収縮，水和発熱反応，線膨張係数

## 1. はじめに

セメント・コンクリートの自己収縮の研究は，水結合材比が小さく，単位結合材量の多い高流動コンクリートや高強度コンクリートの開発，進歩に伴って，現在多くの実績が積み重ねられており，既に土木学会コンクリート標準示方書において自己収縮を考慮した記述を行っている。この種のコンクリートに限らず，マスコンクリートにおいても，温度応力やひび割れに及ぼす自己収縮の影響は非常に大きく<sup>2)</sup>，その導入も検討されつつある。

現存の自己収縮メカニズムは，セメントの水和の進行により，毛細管水は非蒸発水およびゲル水として消費され，外部から水が供給されない場合には水和収縮により内部空隙が形成されていく。そのため空隙中の水にメナスカスが生じ，硬化体はその負圧によって収縮する<sup>3)</sup>と考えられる。しかし，大下ら<sup>1)</sup>の研究によると，自己収縮の発生メカニズムは，**図-1**に示すように，水和発熱反応により形成される内部空隙(水隙)の負圧と骨格の圧縮力という不安定な応力状態によるものであり，**図-2**に示す安定な状態に移行する現象に起因して生じる両物質間の応力

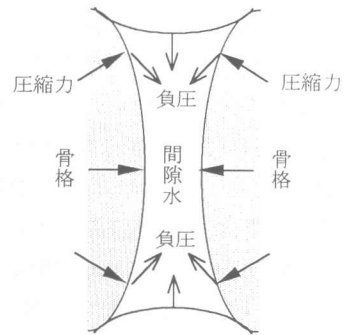


図-1 不安定初期応力状態

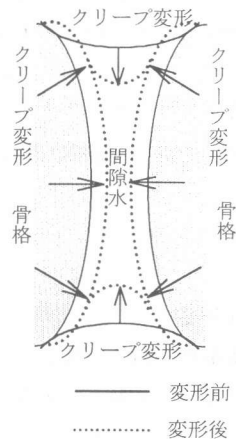


図-2 不安定初期応力状態による変形

\*<sup>1</sup>中央大学学生 理工学部土木工学科 (正会員)

\*<sup>2</sup>中央大学学生 理工学部土木工学科 (正会員)

\*<sup>3</sup>太平洋セメント 佐倉研究所コンクリート技術グループ (正会員)

\*<sup>4</sup>中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

緩和により発生する変形であり、このことはすなわち、水和発熱反応による一種のクリープ現象であると指摘している。このようなモデルに立脚すると、現存の自己収縮の実測値は、単に水和発熱反応によるクリープ変形としての値のみを測定しているのではなく、1大気圧の外力によるクリープ変形も同時に測定しており、自己収縮に及ぼす1大気圧の影響は非常に大きいという解析的評価を行っている。このことから鑑みると、1大気圧以外の新たな外力が作用した場合の変形特性に及ぼす自己収縮の影響を詳細に評価するためには、まず、不安定応力状態にあるセメント・コンクリートに1大気圧が作用することによるクリープ特性を詳細に評価しておく必要がある。このことはすなわち、水和発熱反応によるクリープ変形としての自己収縮と1大気圧によるクリープ現象との分離を行うことを意味しており、1大気圧以外の外力が作用した場合の自己収縮の影響を詳細に評価することにつながることは言うまでもない。

そこで本研究では、自己収縮を水和発熱反応によるクリープ変形として捉えた自己収縮モデルの妥当性に関する実験的検証を目的とした。実験は、若材齢時の各種種類のセメントペーストを対象として、周囲の気圧すなわち、雰囲気圧を徐々に減圧させることにより、自己収縮に及ぼす雰囲気圧の影響を評価した。さらに、実験結果に対する解析的評価を行い、自己収縮モデルの妥当性評価を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料および配合

実験には、W/C=30%、4×4×16cmの形状寸法をしたセメントペースト供試体を用い、使用するセメントの種類は、早強ポルトランドセメント、普通ポルトランドセメント、ビーライトセメントの3種とした。なお、混和剤はいずれも無添加とした。また、各セメントの比重、凝結始発時間は、表-1に示す通りであり、凝結始発時間はピカー針装置にて測定した。

表-1 比重、凝結始発時間

	比重	凝結始発時間(分)
早強セメント	3.13	179
普通セメント	3.15	275
ビーライトセメント	3.18	349

### 2.2 実験方法

実験は $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $40 \pm 5\% \text{R.H.}$ の1.0気圧下(大気圧下)および0.5気圧下で行い、それぞれ凝結始発から材齢7日までの変形量(実測ひずみ)の測定を行った。

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型枠に打設し、仕上げ面は打設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-3に示す恒温室内のチャンバーに静置した。実測ひずみの測定は、あらかじめ供試体両端にセットした鋼製のボルトに変位計を当てて行った。そして、打設後24時間で発泡スチロール型枠から脱型し、水分の

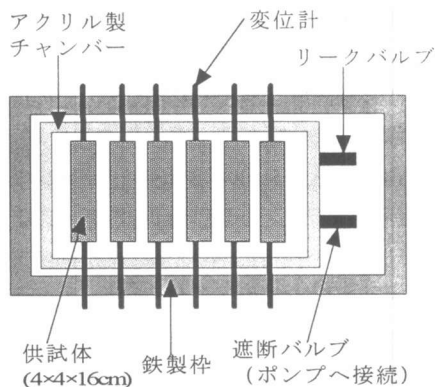


図-3 実験装置上面図

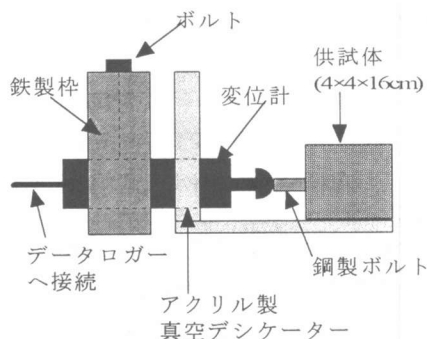


図-4 実験装置側面図

逸散を防ぐため供試体全表面をアルミ箔テープでシールした後、再び測定を開始した。0.5気圧下の実験は、チャンパー内の空気をポンプによって吸引し、リーク弁を調節することにより一定気圧および、一定温度を保った。なお、実験はそれぞれの雰囲気圧に対して同種類のセメントペースト供試体を2本用い、結果はそれらの平均値とした。

チャンパーはアクリル製チャンパー、ポンプは直結型油回転真空ポンプを用い、変位計は高感度変位計(1/1000mm)を使用した。セメントの水和熱及び減圧等によるチャンパーの変形を、変位計に伝えないようにするため、変位計とチャンパーの接する部分は粘性の高いグリスで埋め、図-4に示すように変位計本体はチャンパーの外側に鋼製の枠を設け鋼製のボルトで固定した。

自己収縮ひずみは、実測ひずみに対して、供試体に埋設された熱電対によって計測された温度による補正を行い算出した。なお、線膨張係数は、1.0気圧下において温度上昇時に全てのセメントの種類に対して $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ <sup>3)</sup>の一定値とした。温度下降時では自己収縮ひずみの殆ど生じない区間を対象に、早強、普通セメント

に関して、図-5に示す実測ひずみ～温度関係を回帰することにより $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とし、ピーライトセメントに関しては、図-6に示す実測ひずみ～温度関係を回帰することにより $15 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とした。また、0.5気圧下においては、全てのセメントの種類に対して、図-7に示す実測ひずみ～温度関係を回帰することにより $13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の一定値とした。

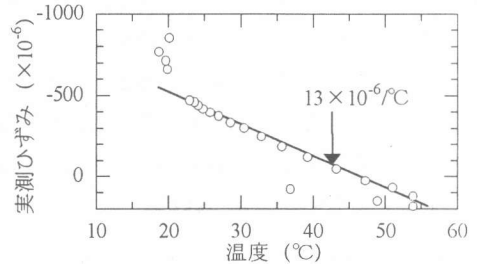


図-7 実測ひずみ～温度関係(0.5気圧下)

また、セメントペーストのヤング係数の測定には、 $\phi 5 \times 10$  cmの供試体を用いた。ヤング係数測定用供試体の処理方法は、脱型後直ちにアルミ箔テープでシールした後、恒温室内に静置した。なお、ヤング係数の測定材齢は、材齢12時間、1日、2日、3日、5日、7日であり、その結果は表-2に示す通りである。

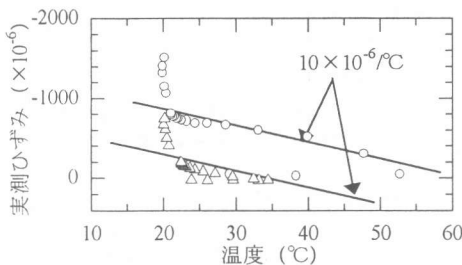


図-5 実測ひずみ～温度関係(早強、普通)

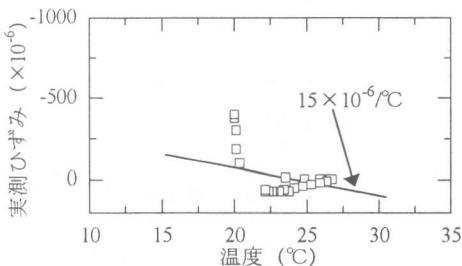


図-6 実測ひずみ～温度関係(ピーライト)

表-2 セメントペーストのヤング係数

材齢 Day	1.0気圧下(kN/mm <sup>2</sup> )		
	早強	普通	ピーライト
0.5	10.9	6.1	3.5
1	17.7	15.0	8.2
2	20.0	21.2	13.1
3	22.1	22.1	15.6
5	23.1	23.0	19.2
7	25.6	24.2	22.1

材齢 Day	0.5気圧下(kN/mm <sup>2</sup> )		
	早強	普通	ピーライト
0.5	14.7	7.4	4.3
1	21.2	15.6	7.6
2	24.6	18.1	12.2
3	25.0	21.2	16.2
5	25.5	22.2	17.4
7	26.1	24.3	19.2

### 3. 自己収縮に及ぼす雰囲気圧の影響

#### 3.1 温度履歴

セメントペースト供試体の温度履歴を図-8~10に示す。各図は、それぞれ早強、普通、およびビーライトセメントであり、図中に示す記号●、○はそれぞれ1.0気圧下、0.5気圧下における温度を示している。1.0気圧下と0.5気圧下での供試体の最高温度差は、早強、ビーライトセメントでは約10℃、普通セメントに至っては約20℃の差異があり、全てのセメント種類において、0.5気圧下での水和熱が1.0気圧下での水和熱に比べ高い温度を示す結果となった。この原因としては、減圧することにより供試体が膨張し、セメント粒子と水との接触面積が増大し、水和反応が促進され供試体内部の温度が上昇したものと考えられる。

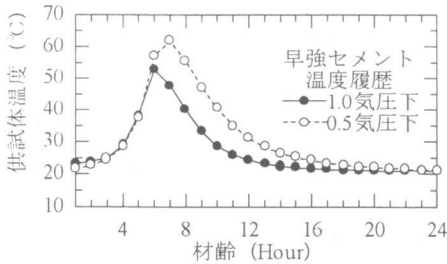


図-8 早強セメント温度履歴

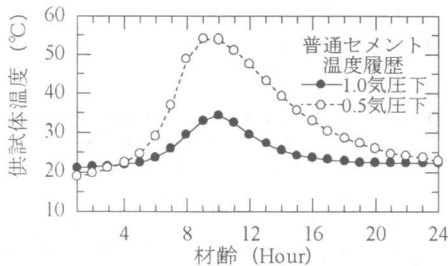


図-9 普通セメント温度履歴

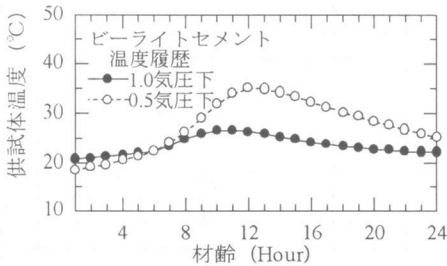


図-10 ビーライトセメント温度履歴

そこで本研究では、水和熱に対する影響を考

慮するため、測定値および解析値の比較、考察には積算温度を用いた。

### 3.2 自己収縮ひずみ

1.0気圧下と0.5気圧下での実験結果を比較したものを図-11~13に示す。図中の記号●は1.0気圧下、○は0.5気圧下の測定値である。なお、各中の点は1,2,3,5,8,12,18,24時間後、2,3,5,7日後の測定値である。

図-11, 12に示す早強、ビーライトセメントでは、1.0気圧下と0.5気圧下での自己収縮ひずみを比較すると、凝結開始から時間が経過するにつれて、すなわち、減圧開始から時間が経過するにつれて自己収縮量の差異を生じており、0.5気圧下では計測完了時において、早強セメントで約300μ、ビーライトセメントで約400μ小さな値となっている。このことから、早強、ビーライトセメントでは、自己収縮量におよぼす減圧の影響は非常に大きいといえる。これは、早強セメントは、水結合材比が小さいため内部空隙(水隙)の負圧が大きく、不安定応力は大きくなる。その結果、減圧することによって、より安定な応力状態へと移行するため、自己収縮ひずみ量も減少すると考えられる。ビーライト

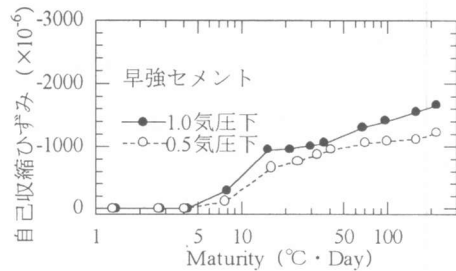


図-11 早強セメント実測比較

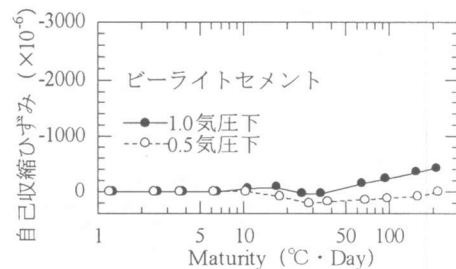


図-12 ビーライト実測比較

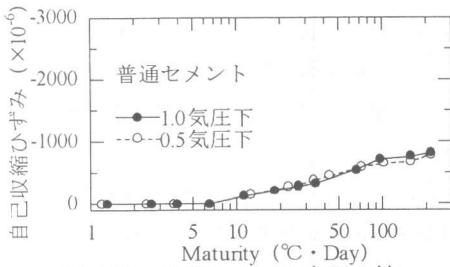


図-13 普通セメント実測比較

セメントについては4.3節で述べることにする。

一方、図-13 に示す普通セメントでは、1.0気圧下と0.5気圧下の両者における自己収縮ひずみ量に差異が生じていない。これは、早強セメントに比べ水和の進行が遅いためセメント組織の緻密度が低くなり、そのため毛管直径も比較的大きくなり、内部空隙(水隙)の負圧が小さくなるため、不安定応力は小さくなる。その結果、減圧による影響が小さいと考えられる。

次章では、実験結果との対比により、自己収縮モデルの適用性を評価するとともに、自己収縮メカニズムについて解析的検討を行う。

#### 4. 自己収縮に関する解析的評価

##### 4.1 解析理論

セメント・コンクリートを2相多孔質材料と考え、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支配方程式として、次式に示す大下ら<sup>1)</sup>が構築した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を採用した。

$$\begin{Bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & -[H] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u\} \\ \{p\} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} [K_T] & -[L] \\ -[L]^T & -[S] \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{u\}}{dt} \\ \frac{d\{p\}}{dt} \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} \frac{d\{f\}}{dt} + A \frac{d\{f\}}{dt} \\ W \frac{d\{f\}}{dt} - \frac{d\{f_p^{cr}\}}{dt} + \frac{d\{f_p^{hyd}\}}{dt} - \{f_p^{ext}\} \end{Bmatrix}$$

ここで、節点変位ベクトルと節点間隙水圧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わけである。

#### 4.2 自己収縮モデルの適用性評価

図-11~13 に示す実験結果と、大下ら<sup>1)</sup>の構築した解析手法による結果とを比較したものを図-14~19 に示す。解析手法による自己収縮ひずみの算出には表-2 に示したヤング係数を用いた。ここで、図-14~16 は1.0気圧下、図-17~19 は0.5気圧下における早強、普通、ビーライトセメントである。

1.0気圧下では大下ら<sup>1)</sup>の構築した解析手法は実験結果を非常に精度よく評価しており解析手法の適用性評価が確認できる。

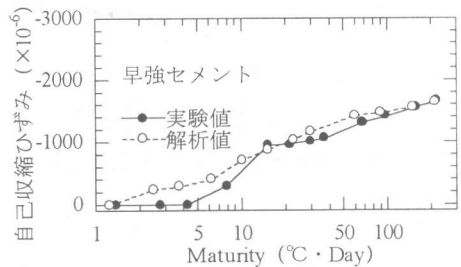


図-14 早強セメント(1.0気圧下)

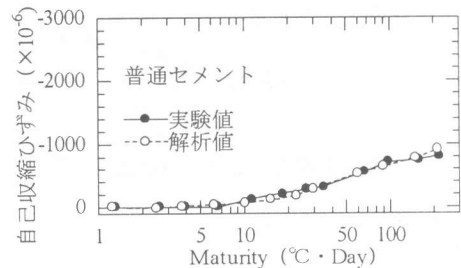


図-15 普通セメント(1.0気圧下)

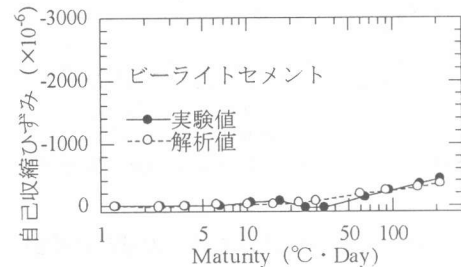


図-16 ビーライトセメント(1.0気圧下)

また、0.5気圧下でも早強、普通セメントについては、実験結果を非常に精度よく評価して

おり解析手法の適用性評価が確認できる。0.5気圧下での早強セメントの自己収縮量の増加は、材齢12時間以後徐々に緩やかになっており、最大値は約1300 $\mu$ 、普通セメントでは、材齢5時間以後の増加が緩やかになっており、最大値は900 $\mu$ である。解析結果はこのような傾向も精度よく評価していることが確認できる。一方、ビーライトセメントに関しては、1.0気圧下では実験結果を精度良く評価しているが、0.5気圧下に関しては異なった挙動を示している。

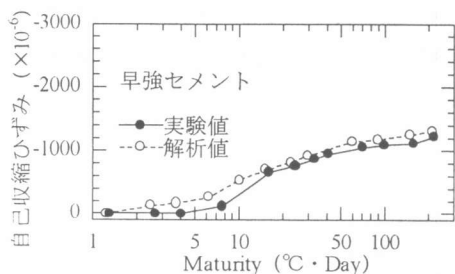


図-17 早強セメント (0.5気圧下)

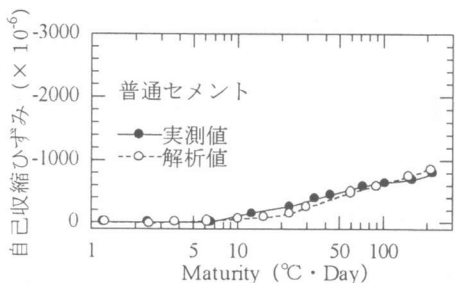


図-18 普通セメント (0.5気圧下)

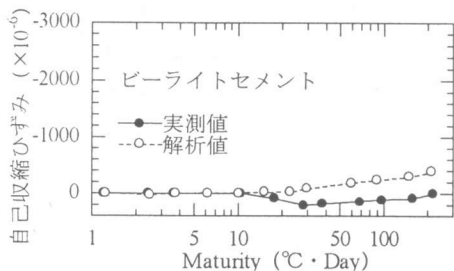


図-19 ビーライトセメント (0.5気圧下)

#### 4. 3 自己収縮メカニズムの解析的検討

前節に示した、1.0気圧下および0.5気圧下における早強、普通セメントの精度良い解析的評価から判断すると、自己収縮は、内部空隙(水隙)の負圧と骨格の圧縮力という不安定な応力

状態から安定な状態に移行する現象に起因して生じる、両物質間の応力緩和により発生するクリープ現象として捉えることが可能であると考えられる。

一方、ビーライトセメントにおいては、自己収縮ひずみが殆ど生じていないという実験結果から判断すると、内部空隙(水隙)に負圧が殆ど生じていないものと考えられる。すなわち、ビーライトセメントに関する自己収縮のメカニズムは、内部空隙(水隙)の負圧と骨格の圧縮力という不安定な応力状態から安定な応力状態に移行する現象に起因して生じるクリープ現象として捉えることが不可能であると考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、自己収縮を水和発熱反応によるクリープ変形として捉え自己収縮ひずみにおよぼす雰囲気圧の影響を評価し、さらに既存の解析手法の適用性評価を行った。その結果を以下にまとめる。

- 1) 早強セメントは、雰囲気圧を減圧することにより、自己収縮ひずみが大きく低下した。
- 2) 自己収縮のメカニズムは内部空隙(水隙)の負圧と骨格の圧縮力という不安定な応力状態から安定な状態に移行する現象に起因して生じる、両物質間の応力緩和により発生するクリープ現象として捉えることが可能である。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) Schrage, I., Mangold, M. and Sticha, J.: An Approach to High-Performance Concrete in Germany, 4<sup>th</sup> CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Supplementary Papers, pp.493-511, 1992.
- 3) 自己収縮研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1996