

クリープ変形として捉えた自己収縮モデルの構築とその適用性評価

大下英吉¹・濱中 隆²・渡邊智紀²

¹正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²学生会員 中央大学大学院 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

本研究は、クリープ変形として捉えたセメント・コンクリートの自己収縮モデルの詳細な構築を目的として、著者らが構築した水・コンクリート骨格連成解析手法に自己収縮の影響を考慮したモデルの導入を行った。そして劈開気圧をパラメータとした自己収縮の測定実験を行い、実験結果との比較により本モデル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自己収縮に及ぼす大気圧あるいは劈開気圧の影響が非常に大きいことが認められた。また、構築した解析手法の0.5気圧下および0.3気圧下での早強、普通セメントへの適用性が確認できた。さらに、現在の自己収縮実測値の問題点を指摘すると共に、自己収縮に含まれる劈開気圧によるクリープ特性の影響評価を行った。

Key Words : autogenous shrinkage, chemical shrinkage, pore water pressure, effective stress, visco-elastic, hydration reaction, thermal expansion coefficient

1. はじめに

セメント・コンクリートの自己収縮に関する研究は、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¹⁾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²⁾、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ニスカスが生じ、硬化体はその負圧によって収縮する³⁾と考えられている。しかしながら、セメント・コンクリートは、内部空隙（水隙）である気・液相および、骨格である固相から成る2相あるいは3相多孔質材料であり気・液相に負圧が発生すれば、それに釣り合う圧縮応力が固相に生じることになる。現存の自己収縮メカニズムでは、気・液相の負圧のみを考慮し、骨格の圧縮応力は無視したものであり、2相あるいは3相多孔質材料としてのセ

メント・コンクリートの応力性状を詳細に評価したものであるとは言い難い。すなわち、気・液相および固相の応力性状を詳細に評価した2相あるいは3相多孔質材料としてのセメント・コンクリートの自己収縮モデルの構築が必要となるわけである。

このように、セメント・コンクリート内部の初期応力性状は、水和発熱反応により形成される内部空隙（水隙）に発生する負圧と骨格に発生する圧縮応力であり、このような応力性状は、言わば、不安定な応力状態である。なぜならば、外力がゼロの場合の安定な応力性状とは、内部空隙（水隙）および骨格ともゼロの応力状態であるからである。すなわち、自己収縮の発生メカニズムは、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自己変形と考えることができるであろう。言い換えれば、水和発熱反応による一種のクリープ現象である。自己収縮の発生メカニズムを上述のような現象によるクリープ変形として捉えると、現在計測されている自己収縮は、水和発熱反応によるクリープ変形と1.0大気圧によるクリープ変形に大別することができる。特に、後者のように1.0大気圧という比較的小きな応力であっても、水和発熱進行過程において生じる上述のような不安定応力状態下にある物質に対しては、安定応力状態へと移行する駆

動力となるため、変形に及ぼす影響は非常に大きいものと推測される。この代表例が高強度コンクリートであり、非常に小さな外力であっても、非常に大きなクリープ変形を生じるわけである⁴⁾。セメント・コンクリートの場合、その断面内の任意箇所において含水率が異なることや境界条件が異なることにより、負圧の程度あるいは圧縮応力の程度、すなわち不安定応力の程度が異なるため、1.0大気圧という小さな応力であろうとも、自己収縮挙動をより複雑なものとしているであろう。すなわち、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、1.0大気圧の外力によるクリープ変形も同時に測定しているわけである。したがって、1.0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、水和発熱反応によるクリープ変形としての自己収縮および不安定応力状態にあるセメント・コンクリートに1.0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1.0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、1.0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1.0大気圧によるクリープ変形による自己変形として捉えることにより、1.0大気圧（雰囲気気圧）による外力は自己収縮にどのような影響を及ぼしているのか、雰囲気気圧が変化した場合に自己収縮はどのような挙動を示すのか、自己収縮に含まれる外力によるクリープ成分の完全分離は可能であるか、そして自己収縮と外力による変形との重ね合わせが成り立つかどうかを明らかにする目的で、まず、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構築および著者らが開発した水・コンクリート骨格連成解析手法に構築した自己収縮モデルを導入することにより、2相あるいは3相多孔質材料としてのセメント・コンクリートの自己収縮解析手法の構築を行い、実験結果との対比により構築したモデルの適用性を評価した。そして、1.0大気圧の影響を除去した自己収縮、すなわち水和発熱反応のみによる自己収縮と1.0大気圧によるクリープ変形との完全分離を行い、実測された自己収縮に含まれる1.0大気圧によるクリープ変形の影響評価および1.0大気圧よりも小さな外力あるいは大きな外力が作用した場合のクリープ変形の影響評価も実施した。実験は、若材齢時の各種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気圧の影響を評価した。

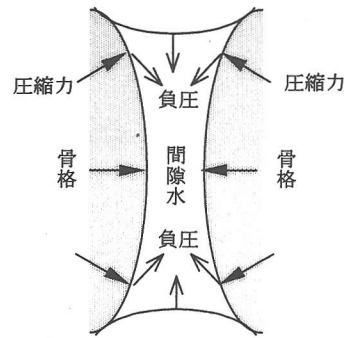


図-1 不安定初期応力状態

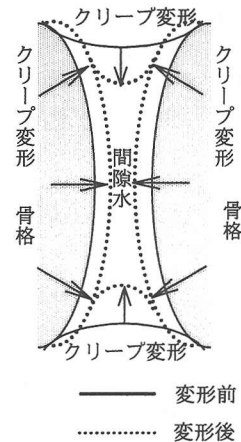


図-2 不安定初期応力状態による変形

2. 水和発熱反応によるクリープ変形としての自己収縮ひずみ

水和発熱反応過程におけるセメント・コンクリート内部の応力状態は、図-1に示すように、内部空隙（水隙）の負圧と骨格の圧縮力という不安定な初期応力状態である。ここで、初期応力状態とは、水和過程で生じる上述の潜在的な応力であり、勿論、水和発熱反応の進行とともに変化するものである。

今、外力をゼロと仮定すると、安定な応力状態は両物質の応力ともゼロであり、同図に示すように、不安定な初期応力状態から安定な応力状態へと移行するために両物質間で応力のやり取りが生じることになる。すなわち本研究では、図-2に示すように、両物質の応力状態が不安定から安定に移行する過程で生じるクリープ現象が自己収縮であると捉えた。このような水和発熱過程に

おける両物質間での応力のやり取りによるクリープ現象を詳細に評価するためには、セメント・コンクリート骨格および間隙水の両者に、その現象を表現可能な何らかのモデルを導入しなければならない。

そこで本研究では、次式に示すBazantら⁵⁾が構築したDirichlet級数近似により増分型で表した粘弾性モデルを採用し、セメント・コンクリート骨格および間隙水の両者に導入することにした。

$$d\{\epsilon^{ve}\} = \frac{\Delta\sigma}{E''} + \Delta\epsilon'' \quad (1)$$

$$\frac{1}{E''} = \sum_{\mu=1}^N \frac{1-\lambda_{\mu}}{C_{\mu(r+1/2)}}$$

$$\Delta\epsilon'' = \sum_{\mu=1}^N \left\{ 1 - \exp(-\Delta y_{\mu}) \right\} \gamma_{\mu(r)}$$

$$\lambda_{\mu} = \left[1 - \exp(-\Delta y_{\mu}) \right] / \Delta y_{\mu}$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は、応力増分であり、 E'' は、Voigtモデルにおける剛性、 $\Delta\epsilon''$ は、前ステップまでの応力履歴により生じるクリープひずみ増分、 $C_{\mu(r+1/2)}$ は、バネ定数、 $\gamma_{\mu(r)}$ は、級数展開で生じてくる項、 Δy_{μ} は、遅延時間項である。

このような粘弾性モデルをセメント・コンクリート骨格および間隙水に導入することにより、両物質間における応力のやり取りによるクリープ現象が評価できるわけである。

3. 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

セメント・コンクリートは、凝結によりセメント硬化体が形成されると、水和の進行により空隙が硬化体中に形成される。これは、水和により形成される空隙（水隙）であり、これに凝結開始時点における収縮と自己収縮とを合わせたものが水和収縮³⁾と呼ばれている。このような空隙（水隙）の水和による形成すなわち水和の進行による体積収縮により、空隙（水隙）の負圧と骨格の圧縮力という不安定な初期応力状態を生じるわけであり、この体積収縮が水和発熱反応によるクリープ特性としての自己収縮を生じさせる原因と考えることができるであろう。したがって、水和による自己収縮を詳細に評価するためには、水和の進行による体積収縮を精度良く評価するとともに、その影響を水・コンクリート骨格連成解析手法^{6,7)}に導入しなければならない。

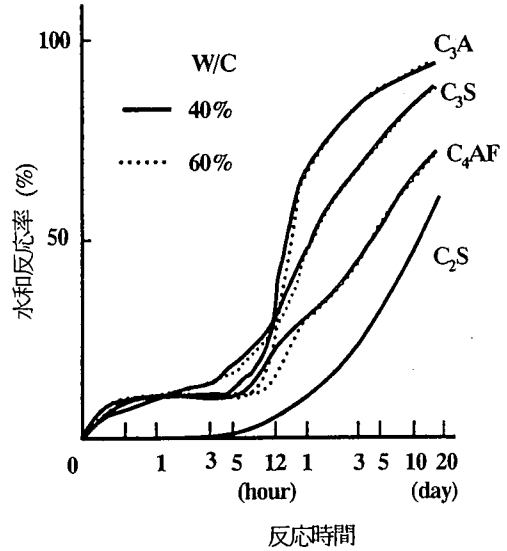


図-3 セメントの各鉱物組成の水和反応率⁸⁾

(1) 水和の進行による体積収縮

水和の進行による体積収縮は、次式のように表すことができる。

$$\frac{\eta \gamma_p dC_H}{\rho_w dt} \quad (2)$$

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比であり0.25~0.38の値（本解析では0.25）を取り、 ρ_w は、水の密度、 C_H は、単位体積当たりのセメント中で水和しているセメントの質量であり、セメントの反応率に比例する量である。笠井ら⁸⁾は、図-3に示すように、セメントの各鉱物組成の反応率を材齢の関数で実験的に求めている。そして、セメントの反応率は近似的ではあるが式(3)に示すように、各鉱物組成の反応率に含有率を乗じたもので表すことにする。ここで、 $hyd(t)$ は、各材齢での反応率、 w は含有率である。また、下添え字cem, C3S, C2S, C3A, C4AF は、それぞれセメント、エーライト、ビーライト、アルミネートおよびフェライトを表している。

$$\begin{aligned} hyd(t)_{cem} = & hyd(t)_{C3S} \times w_{C3S} + \\ & hyd(t)_{C2S} \times w_{C2S} + \\ & hyd(t)_{C3A} \times w_{C3A} + \\ & hyd(t)_{C4AF} \times w_{C4AF} \end{aligned} \quad (3)$$

なお、式(2)中の C_H は、式(3)に初期セメント質量を乗じることにより、各材齢下において算出される。

このように、セメントの反応率を各鉱物組成の反応率で記述することにより、体積収縮にセメントの種類による影響を考慮することができるわけである。

(2) 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

2相多孔質材料としてのセメント・コンクリートの支配方程式は、間隙水の質量保存則と力の釣り合い式を同時に満足しなければならない^{6),7)}。

まず、間隙水の質量保存則に自己収縮モデルおよび水和の進行による体積収縮を考慮すると、間隙水の質量保存則は次式のようなマトリクス形式で表すことができる。

$$-H\{\bar{p}\} - L^T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - S \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - W \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} - d\{g_p\} - \frac{d\{f_p^{vs}\}}{dt} + \{f_p^{ext}\} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $\{\bar{p}\}, d\{\bar{u}\}, d\{\bar{p}\}$ は、それぞれ節点変位ベクトル増分、節点間隙水圧増分である。また、ベクトル $\{g_p\}, \{f_p^{vs}\}, \{f_p^{ext}\}$ は、それぞれ水和による体積収縮量、クリープによる変形量および間隙水の流出による変形量であり、マトリクス H, L^T, S, W は、それぞれ気体と液体の混合体の移動に関するマトリクス、固体相の圧縮性に関するマトリクス、混合体の圧縮性に関するマトリクスおよび温度変化による固体相と液体相の圧縮性に関するマトリクスである。なお、各マトリクスおよびベクトルは、以下に示す通りである。

$$H = \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \bar{N} d\Omega, S = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{\xi}{k_f} \bar{N} d\Omega$$

$$L^T = \xi \int_{\Omega} \bar{N}^T \{m\}^T B d\Omega$$

$$W = \int_{\Omega} \bar{N}^T \{3(1-\xi)\alpha - 3\xi\mu\} \bar{N} d\Omega$$

$$f_p^{ext} = \int_{\Omega} \bar{N}^T q | \rho_w d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T \frac{k}{\rho_w} \nabla \rho_w z d\Omega$$

$$g_p = \int_{\Omega} \bar{N}^T \frac{V_c}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} C_H d\Omega$$

$$f_p^{vs} = \int_{\Omega} \{(1-\xi)\frac{V_c}{V} - \xi\} \{m\}^T \{\epsilon^{ve}\} d\Omega$$

ここで、 \bar{N} は間隙空気圧と温度に関する形状関数マトリクス、 ξ はコンクリートの間隙率、 k_f は液体と気体の混合体の体積弾性係数、 k はコンクリートの透水マトリクスである。 V, V_c は、それぞれコンクリート体の全体積およびセメントペーストの体積である。

次に、有効応力増分は、既往の研究^{7,8)}に自己収縮モデルおよび水和の進行による体積収縮を考慮すると、次式で表すことができる。

$$d\{\sigma'\} = [D_s^{ep} \{d\{\epsilon'\} - d\{\epsilon^{pr}\} - d\{\epsilon^{pr}\} - \frac{V_c}{V} d\{\epsilon^{ve}\} - \frac{V_c}{V} d\{\epsilon^{hyd}\}] \quad (5)$$

ここで、 D_s^{ep} は、固体相のみの弾塑性マトリクス、ひずみ成分の上付き添え字 pr, p, ve, hyd は、それぞれ全ひずみ、間隙水圧による骨格のひずみ、塑性ひずみ、粘弾性（自己収縮）ひずみおよび水和の進行による体積収縮ひずみを表している。また、 V, V_c は、それぞれコンクリート体の全体積およびセメントペーストの体積である。

いま、間隙水圧 p が存在する場合の全応力 $\{\sigma\}$ と有効応力 $\{\sigma'\}$ の関係は、次式により表すことができる。

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} - \{m\}p \quad (6)$$

$$\{m\} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

ここで、符号の定義は、応力に関しては引張を正、水圧に関しては圧縮を正としている。

そして、仮想仕事をを用いた力の釣り合い式は次式のマトリクスで表すことができる。

$$K_T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - L \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - A \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} - d\{\bar{f}\} = 0 \quad (7)$$

ここで、マトリクス K_T, L, A は、それぞれ接線剛性マトリクス、混合体の圧縮性の影響に関するマトリクスおよび温度の影響に関するマトリクスである。また、ベクトル $\{\bar{f}\}$ は、外力、水和による体積収縮およびクリープによる等価節点力を含むベクトルである。なお、各マトリクスおよびベクトルは、以下に示す通りである。

$$K_T = (1-\xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} B d\Omega$$

$$L = \xi \int_{\Omega} B^T \{m\} \bar{N} d\Omega$$

$$A = (1-\xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{m\} \alpha \bar{N} d\Omega$$

$$\begin{aligned} \{\bar{f}\} &= \int_{\Omega} N^T \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} N^T \{t\} d\Gamma + \\ (1-\xi) &\frac{1}{3} \frac{V_C}{V} \frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} \frac{C}{\rho_C} C_H \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{m\} \bar{N} d\Omega + \\ (1-\xi) &\frac{V_C}{V} \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} \{\epsilon^{ve}\} d\Omega \end{aligned}$$

そして、式(4)および式(7)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が次式のように求まるわけである。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{Bmatrix} \\ = \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} + A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \\ W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{f_p^{ve}\}}{dt} - \{f_p^{ext}\} + \frac{d\{g_P\}}{dt} \end{Bmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

すなわち、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. 解析的評価による自己収縮予測

本章では、本研究で構築した解析手法を用いることにより、早強、普通およびビーライトセメントを対象として、雰囲気気圧として1.0気圧、0.5気圧、0.3気圧、0.0気圧（水和発熱反応のみによる自己収縮量）および2.0気圧における自己収縮量の予測を行った。解析モデルは、図-4に示す4×4×16(cm)のセメントペースト供試体の1/8モデルであり、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。解析パラメータに関しては、表-1に示す通りである。なお、ヤング係数は0.5日の時点における値であり、この値を初期値とし、各解析ステップにおける値はマチュリティによる温度補正により外挿して求めた。

図-5～7は、それぞれ早強、普通およびビーライトセメントに対応する自己収縮予測値であり、図中の記号○、▲、△、●および□は、それぞれ0.0気圧、0.3気圧、0.5気圧、1.0気圧および2.0気圧の解析による予測値である。

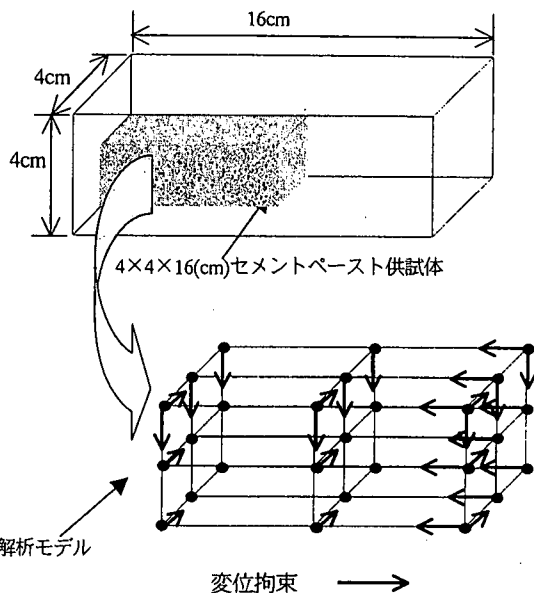


図-4 解析モデル

表-1 解析パラメータ

	早強セメント	普通セメント	ビーライト
ヤング係数 (kN/mm ²)	10.9	6.1	3.5
水の体積弾性係数 (kN/mm ²)	2.2		
透水係数 (cm/s)	1.05×10 ⁻⁷		

まず、図-5に示す早強セメントでは、雰囲気気圧を減少させることにより、自己収縮量は減少する傾向がみられる。また、1.0気圧と0.0気圧との解析値を比較すると、両者の差異は材齢とともに大きくなり、解析完了時において、1.0気圧での自己収縮量の約2/5に相当する約700μの差異が生じている。ここで、自己収縮は水和発熱反応によるクリープ変形であると捉えるならば、この2つの曲線の差が1大気圧によるクリープ変形であると考えられる。また、2.0気圧と0.0気圧の結果を比較すると、両者の差異は材齢とともに大きくなり、解析完了時において約1300μの差異を生じた。1.0気圧と2.0気圧との差異は、解析完了時において約600μとなり、早強セメントに関しては、比較的小さな外力でも自己収縮に及ぼす影響が非常に大きいことが予想される。

一方、図-6、7に示す普通およびビーライトセメントでは、いずれの雰囲気気圧の結果に対しても大きな差異は見られなかった。

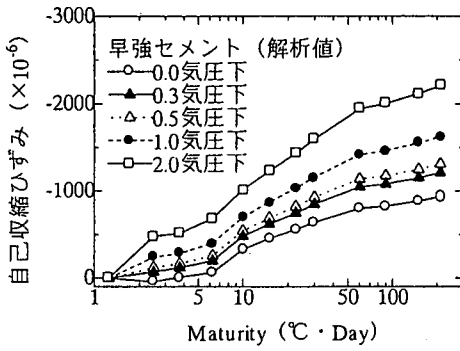


図-5 早強セメント解析予測値

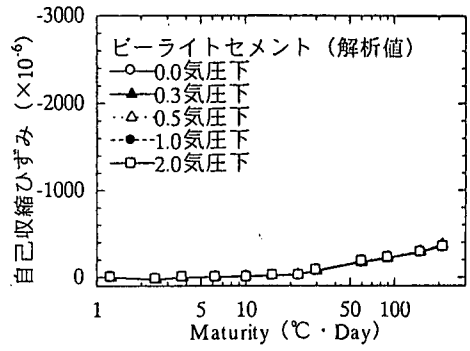


図-7 ビーライトセメント解析予測値

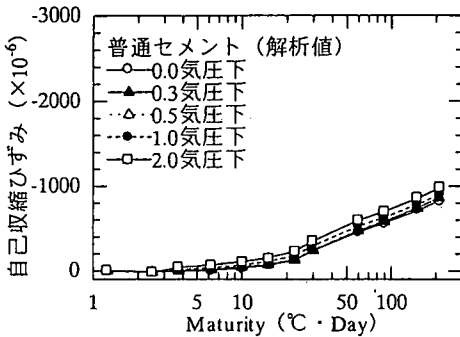


図-6 普通セメント解析予測値

表-2 密度、凝結始発時間

	密度	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

このことから推測すると、早強セメントのように自己収縮量が比較的大きなセメントでは、自己収縮に及ぼす雰囲気圧によるクリープ変形の影響が大きくなるとともに、1.0気圧以外の外力が作用した時の変形特性にも大きな影響を及ぼすことが予想される。すなわち、水和発熱進行過程において、微細組織が緻密なほど、言い換えれば、内部空隙（水隙）の負圧や骨格の圧縮応力が大きいほど、不安定初期応力状態の程度が大きくなることにより、雰囲気圧によるクリープ変形の影響が大きいわけである。勿論、水結合材比が小さく、単位結合材料が多い高流動コンクリートや高強度コンクリートでは、言うに及ばない。このように、不安定初期応力状態の程度によっては、1.0気圧あるいは2.0気圧という比較的小さな外力であっても、その外力によるクリープ変形は無視し得ないほどの大きな影響を及ぼすことが予想される。

5. 自己収縮モデルの適用性評価実験

自己収縮に及ぼす雰囲気圧の影響評価を行うために、1.0気圧下、0.5気圧下および0.3気圧下における自己収縮

ひずみ量の測定実験を行った。そして、本研究で構築した解析手法と実験結果の比較により、水和発熱反応によるクリープ変形と捉えた自己収縮モデルの適用性評価を実施した。ここで、本解析手法が実験結果を精度良く評価できるならば、自己収縮は水和発熱反応によるクリープ変形であることは言うまでもない。言い換えれば、内部空隙（水隙）に発生する負圧と骨格に発生する圧縮応力という不安定初期応力状態から安定な状態へ移行する現象に起因して生じるクリープ変形ということになる。

(1) 実験概要

a) 使用材料および配合

実験には、W/C=30%、4×4×16(cm)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。練混ぜは、ホバート型モルタルミキサーを使用し、3分間中速（自転周期120～130rpm、公転周期37～38rpm）で行った。また、各セメントの密度、凝結始発時間は、表-2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。

b) 実験方法

実験は20±2℃、40±5% R.H.の1.0気圧下（大気圧下）0.5気圧下および0.3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。なお、供試体は、まず凝結始発時間までは1.0気

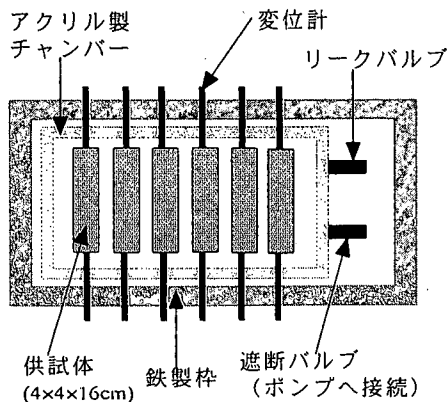


図-8 実験装置上面図

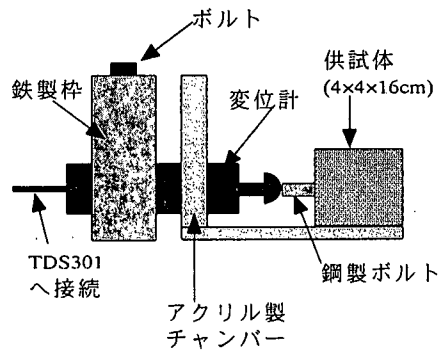


図-9 実験装置側面図

圧下に静置し、凝結始発時間以後1.0気圧下、0.5気圧下、0.3気圧下に静置し、実験を行った。

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-8に示す恒温室内のチャンパーに静置した。実測ひずみの測定は、あらかじめ供試体両端に埋め込んだ(埋め込み長10mm)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気圧下および0.3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CDP-

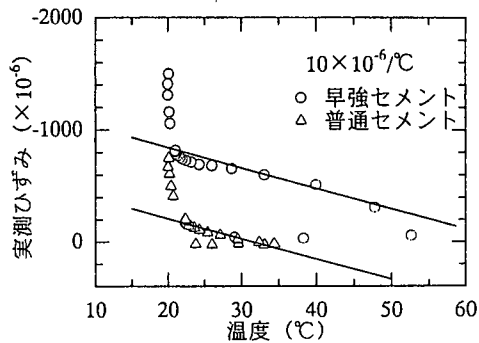


図-10 実測ひずみ～温度関係 (早強, 普通)

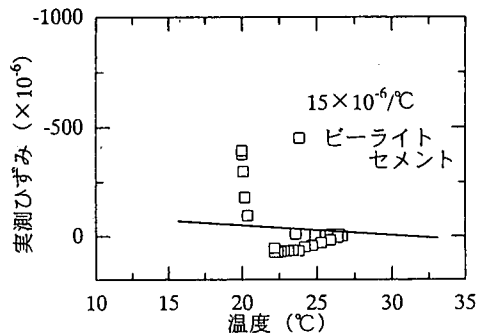


図-11 実測ひずみ～温度関係 (ビーライト)

10 (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-9に示すように変位計本体はチャンパーの外側に鋼製の杵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うことにより算出された。なお、線膨張係数は、1.0気圧下においては温度上昇時では全てのセメントの種類に対して $20 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の一定値とした。温度降下時では、温度ひずみと自己収縮ひずみは同じ収縮方向であるため、実測ひずみが殆ど生じていない区間においては自己収縮の影響は無視できるものと考えられる。すなわち、温度降下時においては、温度ひずみが殆ど生じていない区間における、実測ひずみ～温度関係の勾配が線膨張係数となるわけである。このような観点から、早強および普通セメントに関しては、図-10に示す実測ひずみ～温度関係を回帰することにより $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、ビーライトセ

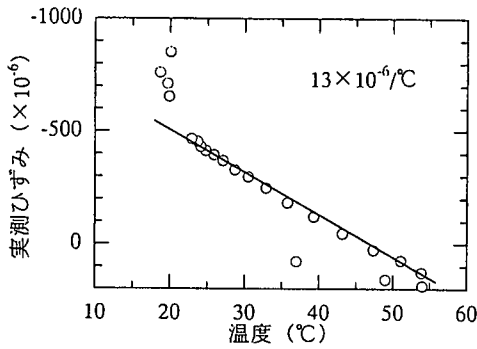


図-12 実測ひずみ～温度関係 (0.5気圧下)

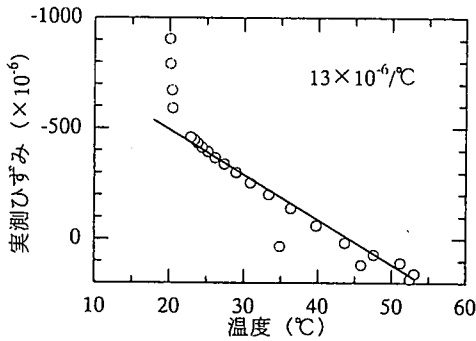


図-13 実測ひずみ～温度関係 (0.3気圧下)

表-3 セメントペーストのヤング係数

材齢 Day	1.0気圧下 (kN/mm ²)		
	早強	普通	ビーライト
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

メントに関しては、図-11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気圧下および0.3気圧下においては、温度上昇時および温度下降時とも全てのセメントの種類に対して、実測ひずみ～温度関係における勾配はほぼ同じ結果が得られたため、代表として普通セメントの実測ひずみ～温度関係を図-12、図-13に示す。線膨張係数は、図-12、図-13に示す実測ひずみ～温度関係を回帰することにより、0.5気圧下および0.3気圧下においては $13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の一定値とした。

また、セメントペーストのヤング係数の測定には、

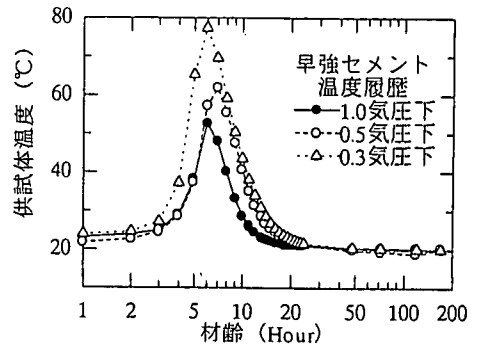


図-14 早強セメント温度履歴

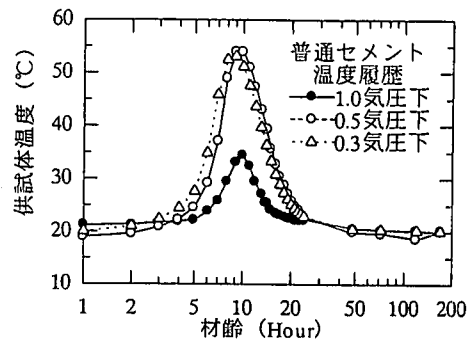


図-15 普通セメント温度履歴

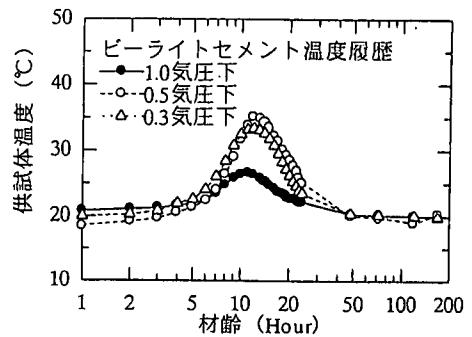


図-16 ビーライトセメント温度履歴

$\phi 5 \times 10\text{cm}$ 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。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、1.0気圧下での結果は表-3に示す通りである。なお、0.5気圧下、0.3気圧下におけるヤング係数は、その条件

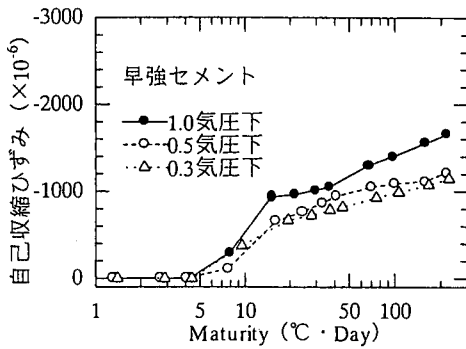


図-17 早強セメント実測比較

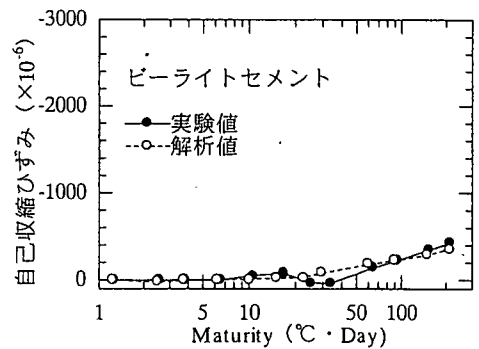


図-19 ビーライトセメント実測比較

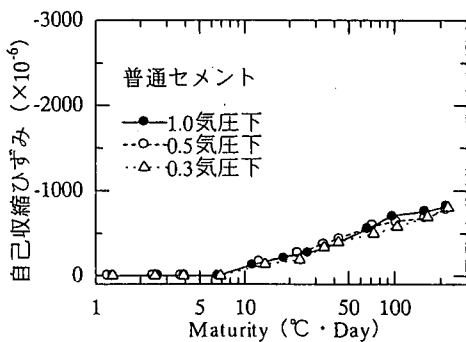


図-18 普通セメント実測比較

下での測定が困難であるため、1.0気圧下でのヤング係数に温度補正を行って導出した。

(2) 自己収縮に及ぼす雰囲気圧の影響

a) 温度履歴

セメントペースト供試体の温度履歴を図-14~16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●、○および△は、それぞれ1.0気圧下、0.5気圧下および0.3気圧下における温度を示している。

0.5気圧での供試体の最高温度は、1.0気圧下に比べ、早強、ビーライトセメントでは約10℃、普通セメントでは約20℃高く、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。また、0.3気圧下での供試体の最高温度は、1.0気圧下に比べ、普通およびビーライトセメントでは、それぞれ10℃および20℃高い結果となったが、0.5気圧下における供試体の最高温度と殆ど差異はない。一方、早強セメントでは、約25℃の差異を生じ、0.5気

圧下における供試体の最高温度と比べて約15℃高い結果となった。この原因としては、雰囲気圧を減圧することにより供試体がわずかながら膨張するわけである。この現象を熱力学的に考えると供試体の膨張により水分子の運動が活発になりセメント粒子のすみずみへと移動することになる。したがって、セメント粒子と水との接触面積が増大することにより、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。

そこで本研究では、水和熱に対する影響を考慮するため、マチュリティーにより自己収縮ひずみを整理することとした。

b) 自己収縮ひずみ

1.0気圧下、0.5気圧下および0.3気圧下での実験結果を比較したものを図-17~19に示す。図中の記号●は1.0気圧下、○は0.5気圧下、△は0.3気圧下の測定値である。

図-17, 19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1.0気圧下に比べて、計測完了時において、早強セメントでは約500μ、ビーライトセメントでは約400μ小さな値となっている。また、0.3気圧下においても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、1.0気圧下の自己収縮ひずみと比べ、計測完了時において、早強セメントでは約600μ、ビーライトセメントでは約300μ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、自己収縮量に及ぼす減圧の影響は非常に大きいということが実験的評価からも明らかとなった。これは、前章に示した解析的評価から判断すると、特に早強セメントでは、微細組織が緻密であるため内部空隙(水隙)の負圧や骨格の圧縮応力が大きく、不安定応力状態の程度が大きいことによるものである。したがって、減圧することに

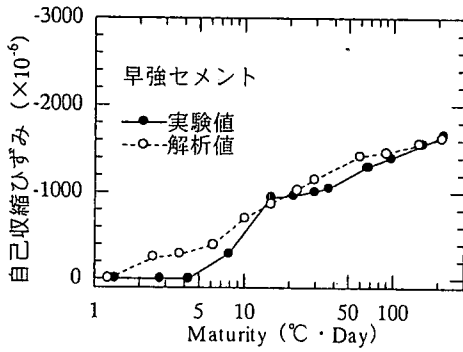


図-20 早強セメント (1.0気圧下)

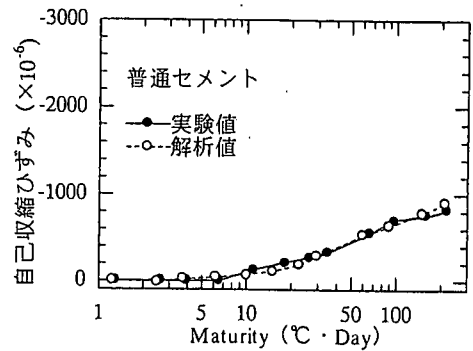


図-21 普通セメント (1.0気圧下)

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。なお、ビーライトセメントに関する現象評価は、次節にて行うことにする。

一方、図-18に示す普通セメントでは、1.0気圧下、0.5気圧下および0.3気圧下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、内部空隙(水隙)の負圧や骨格の圧縮応力の程度が小さいため、不安定応力状態の程度は小さくなる。したがって、減圧による影響は殆ど生じないものと考えられる。

なお、図-19に示すビーライトセメントにおいて、減圧開始以後実測ひずみが一度膨張しているが、これは減圧開始時に骨格である水和生成物が十分に硬化していないため、減圧の影響により膨張したと考えられる。

次節では、実験結果と解析結果との対比により、構築した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。

(3) 自己収縮に関する解析的評価

a) 解析パラメータ

解析モデルは、前章に示すモデルを用いた。解析に用いるパラメータは、セメントペーストのヤング係数、水の体積弾性係数および透水係数であり、それらの値は表-1に示す通りである。なお、セメントペーストのヤング係数は、実測値である表-2の値をそのまま用いた。

b) 自己収縮モデルの適用性評価

図-17~19に示す実験結果と本研究で構築した解析手法による結果とを比較したものを図-20~28に示す。ここで、図-20~22は1.0気圧下、図-23~25は0.5気圧下、図-26~28は0.3気圧下における早強、普通およびビーライトセメントの結果であり、各図中の記号●は実験値、○は解析値である。

まず、図-20~22に示す1.0気圧下では、構築した解

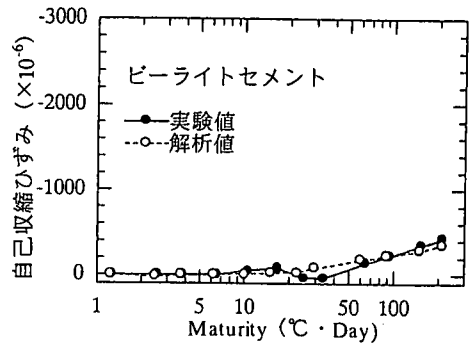


図-22 ビーライトセメント (1.0気圧下)

析モデルは実験結果を非常に精度よく評価しており、解析モデルの適用性評価が確認できる。自己収縮は、セメントの凝結開始後徐々に増加し、本解析範囲内の最大値は早強セメントで約1600 μ 、普通セメントで約900 μ 、ビーライトセメントで約400 μ である。解析結果は、このような傾向も精度良く評価していることが確認できる。

また、図-23~28に示す0.5気圧下および0.3気圧下においても、早強および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、解析モデルの適用性評価が確認できる。0.5気圧下においては、早強セメントの自己収縮量は、マチュリティー約25 $\text{°C} \cdot \text{Day}$ (材齢12時間)以降において緩やかな増加を示しており、測定範囲内での最大値は約1300 μ 、普通セメントでは、マチュリティー約6 $\text{°C} \cdot \text{Day}$ (材齢5時間)以降において緩やかな増加を示しており、測定範囲内での最大値は約900 μ である。

また、0.3気圧下においては、早強セメントの最大値は約1200 μ 、普通セメントの最大値は約900 μ 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

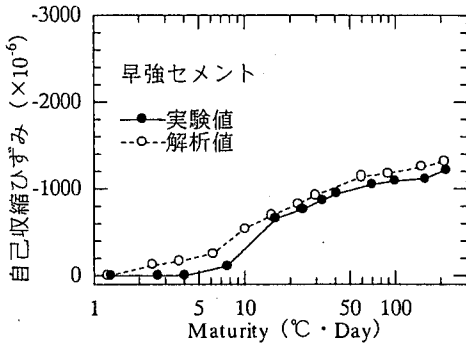


図-23 早強セメント (0.5気圧下)

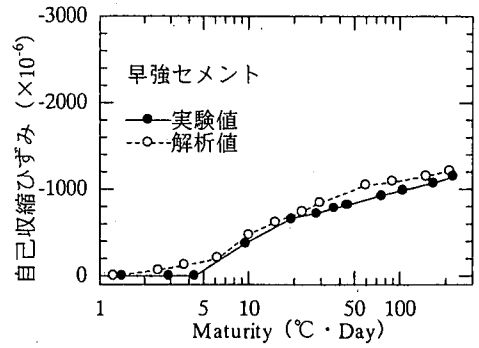


図-26 早強セメント (0.3気圧下)

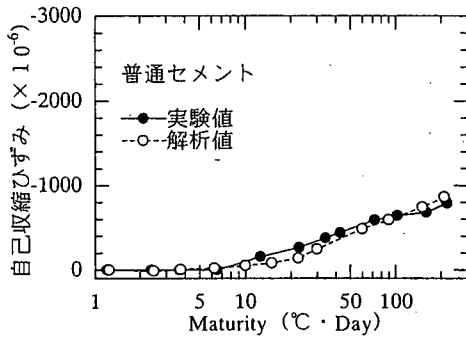


図-24 普通セメント (0.5気圧下)

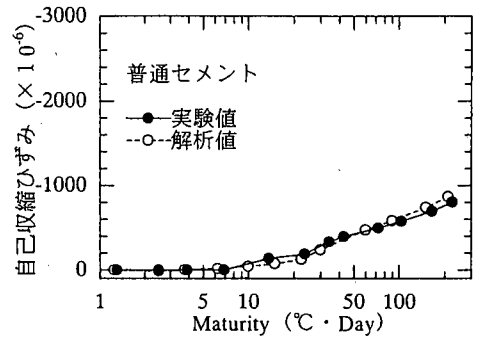


図-27 普通セメント (0.3気圧下)

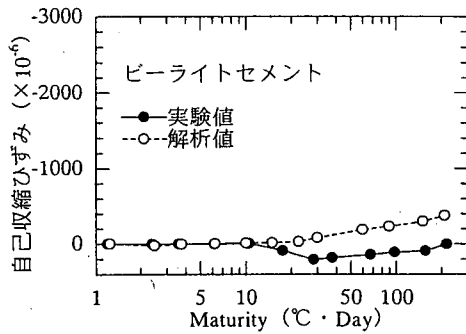


図-25 ビーライトセメント (0.5気圧下)

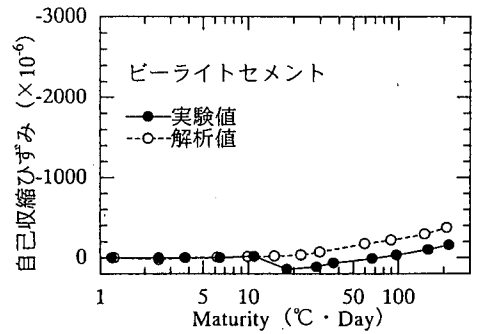


図-28 ビーライトセメント (0.3気圧下)

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、および0.3気圧下に関しては全く異なった挙動を示している。

c) 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、0.5気圧下および0.3気圧下における早強および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

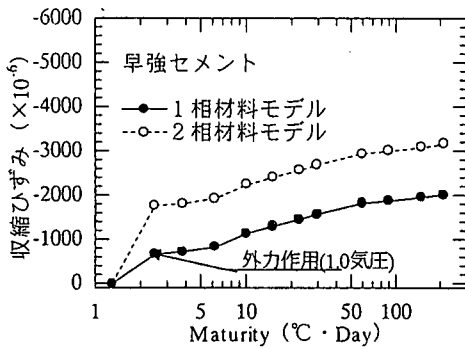


図-29 早強セメント重ね合わせ

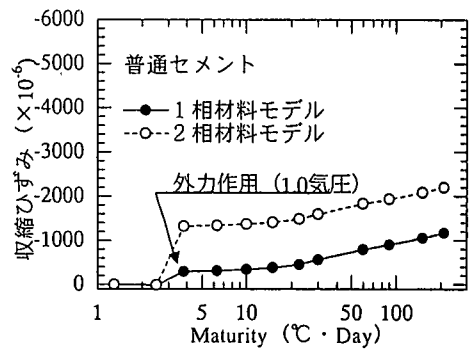


図-30 普通セメント重ね合わせ

格の圧縮応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。

したがって、図-5および6に示す0.0気圧下における自己収縮が水和発熱反応のみによるクリープ変形であり、また、1.0気圧下と0.0気圧下との差が、1.0気圧という外力によるクリープ変形であるということが再確認される。

一方、ピーライトセメントは、低発熱セメントであるため骨格の強度発現が早強あるいは普通セメントに比べて極めて小さい。さらに、アルミネートC3Aの占める割合が全鉱物組成の約3%であり、上述の他の種類のセメントに比べても少ない。水和の進行により形成される空隙は、水和生成物の体積収縮を周囲にある、既に強度を持った骨格である水和生成物によって拘束されることにより生成されるわけである。このことから考えると、ピーライトセメントにおいては、形成される空隙量も少なく、その内部に存在する空隙水の負の応力状態も骨格が十分に強度を発現していないことから、他のセメントに比べ小さいことになる。すなわち、ピーライトセメントにおける初期応力状態は、早強あるいは普通セメントとは異なり、空隙水の負圧および骨格の圧縮力ともにほとんどゼロであるという状態になる。したがって、本研究の実験測定期間内における自己収縮の発生は殆ど無く、解析結果との比較においても異なった挙動を示していると考えられる。

6. 自己収縮と外力による変形の重ね合わせ

本章では、水和発熱反応によるクリープ変形と外力による変形との重ね合わせの原理が成り立つかどうかにつ

いての検討を行う。検討方法は、0.0気圧下における自己収縮すなわち水和発熱反応によるクリープ変形にセメント・コンクリートを骨格のみからなる1相材料と仮定した従来の解析手法に外力(1.0気圧)を作用させた場合のクリープ変形および弾性変形を重ね合わせた結果(以下、1相材料モデル)とセメント・コンクリートを骨格と空隙(水隙)から成る2相材料と仮定した本構築モデルにおいて1.0気圧の外力を考慮した自己収縮解析値と2相材料と仮定した場合の外力(1.0気圧)による弾性変形を重ね合わせた結果(以下、2相材料モデル)との比較により行った。対象としたセメントは、本研究で構築したモデルの適用性が評価された早強および普通セメントである。ここで、前章までの議論から判断すると、本モデルすなわちセメント・コンクリートを2相材料と捉えて構築した自己収縮モデルを水・コンクリート骨格連成解析手法に導入することにより得られた値は、真値として捉えることができるであろう。なお、解析モデルおよび解析条件は、前章と全く同じである。

1相材料モデルと2相材料モデルとの比較を図-29および図-30に示す。各図は、それぞれ早強および普通セメントであり、図中に示す記号●は1相材料モデルの重ね合わせの結果、記号○は2相材料モデルの重ね合わせの結果である。まず、図-29に示す早強セメントにおいて、解析完了時において、1相材料モデルと2相材料モデルとの差異は約1200 μ あり、水和発熱反応によるクリープ変形とセメント・コンクリートを1相材料として捉えた場合の外力(1.0気圧)による変形の重ね合わせは成り立たないものと考えられる。また、図-30に示す普通セメントにおいても、両者の差異は約1000 μ 生じており、水和発熱反応によるクリープ変形と外力による変形との重ね合わせは成り立たないものと考えられる。2相材料モデルでは、セメント・コンクリートを水和発熱進行過程において生じる内部空隙(水隙)の負圧

と骨格の圧縮応力という不安定初期応力状態にあるとして捉えているため、1.0気圧というわずかな外力が作用しても、それが駆動力となり安定な応力状態へと移行することにより変形が増進するわけである⁶⁾。すなわち、外力作用時の変形が1相材料モデルに比べて非常に大きくなるわけである。なお、この現象を1相材料モデルに導入すれば、1相材料モデルにおいても、自己収縮と外力による変形の重ね合わせが成り立つものと推測される。

このように、水和発熱反応によるクリープ変形と従来のセメント・コンクリートを1相材料と仮定した状態での自己収縮と外力(1.0気圧)による変形との重ね合わせは困難であり、重ね合わせが成り立つためには、セメント・コンクリートを2相多孔質材料として捉え、外力作用時における内部空隙(水隙)に発生する負圧と骨格に発生する圧縮応力という不安定初期応力状態から安定応力状態へと移行する現象、すなわちその過程で生じる急激な変形を増進を考慮しなければならないわけである。

7. 結論

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構築およびそれを導入した水・コンクリート骨格連成解析手法の構築を行うとともに、その妥当性に関する実験的検証を行った。そして、構築した解析手法と雰囲気圧をパラメータとした自己収縮実測結果との比較により、その適用性評価を行った。また、本解析手法により、1.0大気圧の影響を除去した自己収縮すなわち水和発熱反応のみによる自己収縮とクリープ変形との完全な分離を行うとともに、実測された自己収縮に含まれる1.0大気圧によるクリープ変形の影響評価および1.0大気圧より小さな外力あるいは大きな外力が作用した場合のクリープ変形の影響評価も実施した。本研究により得られた結果を以下にまとめる。

(1) 微細組織が緻密なセメントに関しては、大気圧によるクリープ変形は大きく、自己収縮実測結果に大きな影響を及ぼしている。

(2) 自己収縮の発生メカニズムは、内部空隙(水隙)の負圧と骨格の圧縮応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。

(3) 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は、早強および普通セメントにおいては、自己収縮実測結果を精度良く評価可能なものである。

(4) セメント・コンクリートを1相材料と仮定した状態での自己収縮と外力による変形との重ね合わせは、困難である。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書, 土木学会.
- 2) Schrage, I., Mangold, M. and Sticha, J.: An Approach to High-Performance Concrete in Germany, 4th 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.
- 4) 楊楊, 佐藤良一, 今本啓一, 許明: 高強度コンクリートの自己収縮応力の予測, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp757-762, 1997.
- 5) Bazant, Z. P. and Wittmann, F. H., ed.: Creep and Shrinkage in Concrete Structures, John Wiley & Sons, 1982.
- 6) 大下英吉, 田辺忠顕: 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/V-29, pp.29-41, 1995.
- 7) 大下英吉, 田辺忠顕: 不均質材料の透水性に関するモデル化とその適用性評価, 土木学会論文集, No.526/V-29, pp.63-77, 1995.
- 8) 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.

(1999.3.5 受付)

DEVELOPMENT OF AUTOGENOUS SHRINKAGE MODEL ASSUMING TO BE CREEP PHENOMENON AND ITS APPLICABILITY

Hideki OSHITA, Takashi HAMANAKA and Tomonori WATANABE

The experimental and analytical study on the autogenous shrinkage of cement paste, of which mechanism is assumed to be creep phenomenon due to the transition process from the unstable stress state to the stable stress state, were performed. In the analysis, the autogenous shrinkage model which is assumed to be creep phenomenon was developed and then the developed model was introduced to the coupled model with the liquid and solid phase of cement and concrete as a two phase porous permeable material. The applicability of the developed models was estimated compared with the experiment results. In the experiment, the autogenous shrinkage tests with the parameter of the atmospheric pressure (1.0atm, 0.5atm and 0.3atm) were performed and then the effect of the parameter on the autogenous shrinkage was discussed.