論文 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

山下 良平*1·劉 兆涛*2·大下 英吉*3

要旨:本研究は,クリープ変形として捉えた統一的な自己収縮モデルの構築を目的として いる。著者等が構築した自己収縮メカニズム^{1),2)}に基づくモデルを任意の水セメント比に も適用可能とするために,水和反応度に関連付けた水和反応進行過程における体積収縮モ デルを導入した。その結果,本研究で構築した自己収縮モデルの適用性が確認された。 キーワード:自己収縮,クリープ変形,水和反応度,水セメント比

1. はじめに

近年,コンクリートの高強度・高性能化によ リ,水セメント比の小さいコンクリートが多用 されている。それに伴い,自己収縮や温度によ る体積変化が無視しえないものとなり,多くの 研究や報告³⁾においてその影響が指摘されてい る。しかし,自己収縮に対する詳細な定性的予 測手法は確立されていないのが現状である。す なわち,自己収縮メカニズムを詳細に考慮する とともに定量的にも精度の良い解析手法の確立 は急務である。

従来の自己収縮評価モデルは,実験結果によ り得られた自己収縮ひずみを回帰しその中に各 種パラメータを導入したものが多く自己収縮メ カニズムに基づくモデルの構築は未だ十分とは 言い難い。一方,既往の研究^{1),2)}によると,自 己収縮のメカニズムは水和反応によって発生し たコンクリート内部の不安定応力によるクリー プ変形の一種であると指摘している。このメカ ニズムに基づくクリープ変形として捉えた自己 収縮解析モデルは,大気圧や外力によるクリー プと水和反応過程で起こる自己収縮を含めたク リープ現象を複合させたものであり,実験結果 との対比により1.0気圧環境下,減圧環境下お よび加圧環境下において1種類の水セメント比 において,その適用性が確認されており,各種 水セメント比,セメントの種類や任意の外力に も適用可能なようにその拡張が望まれる。

本研究では,統一的な自己収縮モデル構築を 目的として,著者等が構築したクリープ変形と して捉えた自己収縮モデルを任意の水セメント 比,およびセメントの種類に適用可能なように 拡張を行うとともに,その適用性を実験結果と の対比により評価した。

2. 既往の自己収縮モデル^{1), 2)}

2.1 水和発熱反応による自己収縮モデル

自己収縮の発生メカニズムは,図-1 に示す ようなクリープ変形と捉えている。打設直後の セメント・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

*1 中央大学 理工学部 土木工学科 (正会員)
*2 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)
*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)



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

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考えられる。

このようなメカニズムに基づいて著者らは, 自己収縮を上述のようなクリープ変形として捉 えた自己収縮モデルを構築し,著者等が開発し た水・コンクリート骨格連成解析手法に自己収 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 における自己収縮解析手法を構築した。

2.2 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^{1),2)} 上述した自己収縮モデルを考慮し,間隙水の 質量保存則と力の釣り合い式を同時に満足す る支配方程式の概要は,以下の通りである。

まず,間隙水の質量保存則は,次式のよう に表される。

$$-H\left\{\overline{p}\right\}-L^{T}\frac{d\left\{\overline{u}\right\}}{dt}-S\frac{d\left\{\overline{p}\right\}}{dt}-W\frac{d\left\{\overline{T}\right\}}{dt}$$

$$-\frac{d\left\{f_{p}^{hyd}\right\}}{dt}-\frac{d\left\{f_{p}^{vs}\right\}}{dt}+\left\{f_{p}^{ext}\right\}=0$$
(1)

次に、仮想仕事を用いた力の釣り合い式は, 次式で表すことができる。

$$K_{T} \frac{d \left\{ \overline{u} \right\}}{dt} - L \frac{d \left\{ \overline{p} \right\}}{dt} - A \frac{d \left\{ \overline{T} \right\}}{dt} - \frac{d \left\{ f \right\}}{dt} = 0$$
⁽²⁾

なお,式(1),(2)におけるマトリックスお よびベクトルの詳細は文献4)を参照された い。

最終的に,式(1),式(2)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。

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 & -\begin{bmatrix} H \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{cases} \begin{bmatrix} u \\ p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} K_T \\ -\begin{bmatrix} L \end{bmatrix}^T & -\begin{bmatrix} L \end{bmatrix} \\ \frac{d \begin{bmatrix} u \\ p \end{bmatrix} \\ \frac{d \begin{bmatrix} p \\ dt \end{bmatrix} \end{cases} = \begin{cases} \frac{d \{f\}}{dt} + A \frac{d \begin{bmatrix} T \\ p \end{bmatrix}}{dt} \\ W \frac{d \begin{bmatrix} T \\ dt \end{bmatrix} - \frac{d \{f_p^{vs}\}}{dt} + \frac{d \{f_p^{hyd}\}}{dt} - \{f_p^{ext}\} \end{cases}$$
(3)

式(3)に, [µ], [p]を未知数として境界条件を与 えることで先に示した水和進行過程における空 隙の負圧の程度と骨格の圧縮力が求まるととも に,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わけである。

3.統一的自己収縮モデルの構築

3.1 任意の水セメント比における水和反応率 本研究では,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

-450-

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は,次式で表される。

$$\frac{\eta \gamma_p}{\rho_w} \frac{dC_H}{dt} \tag{4}$$

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。

セメントの反応率は,図-2に示す笠井ら⁵⁾ により求められたセメントの各鉱物組成の水和 反応率を基に同定を行うこととした。

図 - 2 に示す各鉱物の水和反応率は,20 の 一定温度条件下で求められており,材齢の関数 で表されている。しかし,セメントの水和反応 率は水和発熱量に依存しているため,水和発熱 の影響を反映させるために Maturity で整理して 用いることとした。その際,同図のW/C=40%, 60%の各鉱物組成の水和反応率を表す曲線に大 きな差異がないことから,任意の水セメント比 における各鉱物組成の水和反応率を一義的に評 価した。また,セメントの反応率は次式に示す 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。

$$hyd (M)_{cem} = hyd (M)_{C3S} \cdot w_{C3S} + hyd (M)_{C2S} \cdot w_{C2S} + hyd (M)_{C3A} \cdot w_{C3A} (5) + hyd (M)_{C4AE} \cdot w_{C4AE}$$

ここで, *hyd*(*M*)は, 任意の Maturity におけ る反応率,添え字*cem*,*C*3*S*,*C*2*S*,*C*3*A*,*C*4*AF*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。セメ ントの各鉱物組成の水和反応率を Maturity で表 したものが図-3である。同図の各鉱物組成の 水和反応率の近似式を表 - 1 に示す。任意の水 セメント比の温度履歴から Maturity を算出し, 表 - 1 に示す近似式に導入することによって任 意の水セメント比による水和反応率が同定され る。Maturityの算出には次式を用いた。

$$M = \sum \left\{ (\theta_t + 10) \Delta t \right\}$$
(6)

ここで,Mは Maturity, θ_t は材齢tにおける 供試体温度, Δt は時間増分である。

水和反応率の同定に伴い 式(4)により水和反応による体積収縮が同定されるわけである。

すなわち,任意の水セメント比における水和 による自己収縮が詳細に評価され,その影響を 水・コンクリート骨格連成解析手法に導入した。



図 - 2 セメントの各鉱物組成水和反応率



図 - 3 セメントの各鉱物組成の水和反応率

C3S	$M \le 6.25$	$hyd(M)_{C3S} = 7.3353 \exp(0.1589M)$			
	$6.25 \le M \le 15.0$	$hyd(M)_{C3S} = 5.7209\ln(M) + 9.5906$			
	$15.0 \le M \le 30.0$	$hyd(M)_{C3S} = 1.333M + 5$			
	$30.0 \le M \le 90.0$	$hyd(M)_{C3S} = 18.109\ln(M) - 16.74$			
	$90.0 \le M \le 300.0$	$hyd(M)_{C3S} = 0.071M + 59.682$			
	$300.0 \le M$	$hyd(M)_{C3S} = 8.8968\ln(M) + 28.17$			
C2S	$M \le 3.75$	$hyd(M)_{C2S} = 0.08M + 1.0$			
	$3.75 \le M \le 10.0$	$hyd(M)_{C2S} = 0.8809 \exp(0.1045M)$			
	$10.0 \le M \le 22.5$	$hyd(M)_{C2S} = 5.5492\ln(M) - 10.361$			
	$22.5 \le M \le 90.0$	$hyd(M)_{C2S} = 11.557\ln(M) - 29.154$			
	$90.0 \le M \le 450.0$	$hyd(M)_{C2S} = 18.847\ln(M) - 62.533$			
	$450.0 \le M$	$hyd(M)_{C2S} = 19.104\ln(M) - 63.182$			
	$M \leq 3.75$	$hyd(M)_{C3A} = 10.0$			
	$3.75 \le M \le 10.0$	$hyd(M)_{C3A} = 5.0902 \exp(0.1765M)$			
C3A	$10.0 \le M \le 22.5$	$hyd(M)_{C3A} = 34.528\ln(M) - 48.838$			
CJA	$22.5 \leq M \leq 60.0$	$hyd(M)_{C3A} = 15.965\ln(M) + 8.8746$			
	$60.0 \le M \le 300.0$	$hyd(M)_{C3A} = 9.6575\ln(M) + 35.578$			
	$300.0 \le M$	$hyd(M)_{C3A} = 2.9483\ln(M) + 73.115$			
C4AF	$M \le 3.75$	$hyd(M)_{C4AF} = 10.0$			
	$3.75 \leq M \leq 10.0$	$hyd(M)_{C4AF} = 7.9157 \exp(0.0645M)$			
	$10.0 \leq M \leq 22.5$	$hyd(M)_{C4AF} = 12.332\ln(M) - 13.394$			
	$22.5 \le M \le 90.0$	$hyd(M)_{C4AF} = 12.708\ln(M) - 14.504$			
	$90.0 \le M \le 300.0$	$hyd(M)_{C4AF} = 16.935\ln(M) - 33.299$			
	$300.0 \le M$	$hyd(M)_{C4AF} = 10.924\ln(M) + 0.6283$			

表 - 1 各鉱物組成の反応率近似式

3.2 構築モデルの適用性評価

(1) 解析モデルと解析条件

解析モデルは,図-4に示すように4×4×16 (cm)の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。

(2) 解析パラメータ

解析条件は表 - 2 ~ 4 に示す通りである。な お,実験では自己収縮ひずみが測定されるので はなく,ひずみ成分に温度ひずみの影響が加味 された自由収縮ひずみが測定されるわけであ る。したがって精度良い自己収縮ひずみを同定 するためには,温度ひずみを精度良く評価する 必要がありそれを次項で説明する。

(3) 実験に基づく自己収縮ひずみ

水セメント比=30,40,50,60%とした著者 らの実験の結果⁶⁾である自由収縮ひずみ測定値





表-2 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 ⁻⁶	

表 - 3 ヤング係数

材齢	ヤング係数(kN/mm ²)					
(day)	30%	40%	50%	60%		
0.17	2.1					
0.29	4.8	4.4				
0.33	5.5	5.1	4.7			
0.37	6.2	5.8	5.4	5.2		
0.50	8.1	7.7	7.4	7.2		
0.62	9.9	9.3	9.1	8.9		
0.75	11.5	10.9	10.7	10.5		
0.87	13.0	12.4	12.2	12.0		
1.00	15.3	14.9	13.7	13.5		

表-4 実験パラメータ

使用 セメント	普通セメント (混和材無添加品)				
水セメント比	30%	40%	50%	60%	
密度 (g/cm ³)	3.15				
凝結始発時間 (分)	265	423	488	572	
セメント量 (kg/m ³)	1620	1394	1226	1090	

から自己収縮ひずみを求めることとする。自由 収縮ひずみは,自己収縮ひずみと温度ひずみの 和であると仮定すると自己収縮ひずみは,温度 ひずみを差し引くことにより算出されるわけ であり,それを精度良く同定するためには,線 膨張係数を詳細に評価しなければならない。

一般に若材齢時における線膨張係数は温度 上昇時において 20×10^{-6} / $^{\circ}C$,温度降下時にお いては 10×10^{-6} / $^{\circ}C$ とされているが,水和反応 とともに徐々に変化する。

一方,著者等⁶は実験的および解析的手法に 基づき線膨張係数を提案している。本来,セメ ントと水の水和発熱反応により形成されるセ メント水和物は,粘性流動体から固体へと変遷 する材料であり,その変遷度合いすなわち水和 反応度により,その線膨張係数は変化するもの である。したがって本研究では,式(7)に示す 線膨張係数により温度ひずみを算出すること とした。

$$17 \le x \le 28 \qquad \ln y = a - bx \\ (a = 5.90, b = 0.14) \qquad (7) \\ 28 < x \qquad y = 7.0$$

ここで, *x*, *y* はそれぞれ水和反応度(%), 線膨 張係数(×10⁻⁶/)である。水和反応度に関し ては図-3に示した Maturity で整理されたもの を用いた。

図 - 6 は実験によって得られた各種水セメン ト比を有するセメントペースト供試体の自由収 縮ひずみであり,図 - 5 に示す供試体の温度と 式(7)に示す線膨張係数から算出される温度ひ ずみを差し引くことにより,自己収縮ひずみは 図 - 7のように表すことができる。 (4) 任意の水セメント比における解析手法の 適用性評価

図 - 7 に示した自己収縮ひずみの実験値に対 して本構築モデルを適用した結果を図 - 8 に示 す。同図,(a)~(d)は,それぞれ水セメント比 30,40,50,60%の結果であり,各図中に示す記号 は実験結果, は解析結果である。

図 - 8 に示すように,本解析の範囲内におい て,本構築モデルは実験結果を比較的精度良く 評価しており,その適用性が確認できた。

同図(a),(b)に示す水セメント比 30,40%の場 合,比較的低水セメント比であるため,自己収 縮ひずみは比較的大きな値となり,材齢初期に おいて急激に増加した後,材齢とともに緩やか に増加するという傾向を本研究モデルでは精度 良く評価している。

一方,同図(c),(d)に示す水セメント比50,60% の場合,解析結果は凝結直後の挙動,全体の傾 向を良く示しているものの,本解析範囲内にお いて,解析値の最大値はそれぞれの水セメント 比において約 59 μ, 20 μ であり, 実験値の最大 値 141 µ, 88 µ に比べ小さな値となっている。 これは,水セメント比が大きくなるほど,水和 反応が緩やかに進行し,温度変化量が小さくな リ,水和発熱反応による体積収縮が解析に大き な影響を与えなかったためである。すなわち, 水セメント比が比較的大きい場合,水和発熱反 応による体積収縮を含めたより詳細な体積収縮 概念を導入する必要があるが、水セメント比 30%,40%に比べ自己収縮ひずみ自体が小さい ことを考慮すれば,自己収縮メカニズムに基づ く解析手法としての適用性は示されていると言





図-8 実験-解析比較

っても過言ではない。

4.まとめ

本研究では,既存の解析手法に水和反応度を 関連付けた体積収縮モデルを導入し,任意の水 セメント比にも適用可能な解析手法を確立した。

解析結果と実験結果との対比により得た結果 をまとめる。

- 1) 任意の水セメント比の自己収縮ひずみの定 性的かつ,定量的予測が可能となった
- 水セメント比が小さいほど、すなわち収縮 量が大きいほど、解析値が実験値を精度良 く表していることが確認できた。
- 水セメント比が大きくなるほど,実験値と 解析値の差異が全体の収縮量に比べ大きく なっている。しかし,収縮量自体が小さく, 挙動を良く表しているため,任意の水セメ ント比において本研究で構築した解析手法 の適用性が示された。

参考文献

1)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

- 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) 自己収縮研究委員会報告書,日本コンクリート工学協会,2002
- 4)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
- 5) 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
- 6)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