

細骨材容積比が水和発熱反応過程におけるモルタルの線膨張係数に及ぼす影響に関する研究

中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 学生会員 ○内堀 学
中央大学 理工学部土木工学科教授 工博 正会員 大下 英吉

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の高耐久化に伴い高強度コンクリートや高流動コンクリートの使用が増えている。しかしながら、その種のコンクリートは水結合材比が大きいため水和発熱量や自己収縮量が大きくなり、ひび割れ等の初期欠陥を誘発するという事例も多い。従って、それらのひび割れの検討には初期材齢の自己収縮や温度応力などの影響を考慮する必要があることから、遷移材齢時における研究が必要不可欠である。遷移材齢時に激変するセメント・コンクリートの物性値は水和発熱反応、雰囲気温度や相対湿度の影響を大きく受けるため、その影響を詳細に考慮した物性値の同定が必要である。特に、自己収縮や温度応力などの初期性状においては遷移材齢時の線膨張係数が重要な要因である。

著者らは既往の研究²⁾において、水和発熱反応過程における水和反応度に依存したセメントペーストの線膨張係数の評価式を報告している。しかしながら、細骨材や粗骨材等の線膨張係数の異なる材料が混入するモルタルやコンクリートの水和発熱反応過程における線膨張係数については未解明のままである。

そこで本研究では、任意量の細骨材と粗骨材が混入されたモルタルやコンクリートの線膨張係数の評価式の構築を目的とし、水・コンクリート骨格連成解析手法を用いることで、線膨張係数をパラメータとした自由収縮ひずみを出力できるようにし、実測の自由収縮ひずみを逆解析することで水和発熱反応過程における線膨張係数を同定した。

2. 実験概要

2.1 実験パラメータ及び配合

測定実験には、 $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$ の形状寸法をした試験体を用いた。使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。実験パラメータとしてW/Cを30%、40%、50%、60%とし、それぞれの細骨材容積比Vs/Vmを30%、40%、50%と変化させた。表-1に実験パラメータおよび配合を示す。なお、セメントの密度は $3.16(\text{g}/\text{cm}^3)$ 、細骨材の密度は $2.56(\text{g}/\text{cm}^3)$ である。

表-1 実験パラメータおよび配合

W/C (%)	Vs/Vm (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)
30	0	487	1622	0
40	0	558	1396	0
50	0	612	1225	0
60	0	655	1091	0
30	30	341	1136	768
40	30	391	977	768
50	30	429	857	768
60	30	458	764	768
30	40	292	973	1024
40	40	335	837	1024
50	40	367	735	1024
60	40	393	655	1024
30	50	243	811	1280
40	50	279	698	1280
50	50	306	612	1280
60	50	327	546	1280

2.2 実験方法

図-1に実験概要図を示す。恒温恒湿室内において凝結始発より材齢72時間まで1時間ごとに試験体の変形量測定を行った。恒温恒湿室内は室内温度を30℃、相対湿度を60%で一定に保った。

試験体は、型枠による拘束を防ぐために発泡スチロール製型枠に打設し、水分の逸散を防ぐために打設後直ちにアルミ箔テープで全型枠面をシールし、恒温恒湿室内においてチャンバーに静置した。自由収縮ひずみの測定は、凝結始発時においてあらかじめ試験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。打設後24時間までは発泡スチロール製型枠に打設したままで測定を行い、打設後24時間で発泡スチロール製型枠から脱型し、水分の逸散を防ぐため試験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。

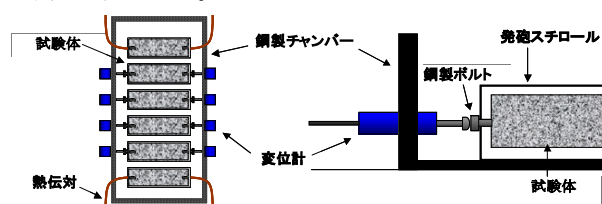


図-1 実験概要図

3. 水和反応による体積収縮を考慮した水・コンクリート骨格連成解析手法

3.1 多孔質材料の支配方程式

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、力の釣り合い式および間隙水の質量保存則を同時に満足するものでなくてはならない。

まず、間隙水の質量保存則は次式のように表される。

$$-H\{\bar{p}\}-L^T\frac{d\{\bar{u}\}}{dt}-S\frac{d\{\bar{p}\}}{dt}-W\frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \\ -\frac{d\{f_p^{hyd}\}}{dt}-\frac{d\{f_p^{vs}\}}{dt}+\{f_p^{ext}\}=0 \quad (1)$$

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。

$$K_T\frac{d\{\bar{u}\}}{dt}-L\frac{d\{\bar{p}\}}{dt}-A\frac{d\{\bar{T}\}}{dt}-\frac{d\{f\}}{dt}=0 \quad (2)$$

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2)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、多孔質材料の支配方程式(3)が得られる。

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

3.2 水和の進行による体積収縮

水和反応による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共に、その影響を水・コンクリート骨格連成解析手法に導入しなければならない。水和反応による体積収縮ひずみを次式のように表す。

$$\frac{\eta\gamma_p}{\rho_w} \cdot \frac{dC_H}{dt}$$

ここで、 η は水和反応によりゲル空隙となる割合、 γ_p はセメントの完全結合水量(本研究では0.25)、 ρ_w は水の密度、 C_H は単位体積当たりのセメントの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。

セメントの反応率は水和発熱による影響を考慮するため、笠井らによって求められた各鉱物組成の反応率を **Maturity** により整理し、含有率を乗じたもので近似的に表した。

4. 線膨張係数の同定

2章の自由収縮測定実験の結果に対して、水・コンクリート骨格連成解析手法を用い、線膨張係数の同定を行った。解析に際して、解析モデルは4×4×16(cm)の形状寸法をした試験体の8分の1を取り出し、8要素に分割したもので、境界条件は全面非排水とした。解析パラメータは線膨張係数であり、ヤング係数、温度は実験結果をそのまま適用した。また、ポアソン比を0.25、水の体積弾性係数を2.2(kN/mm²)、透水係数を1.05×10⁻⁵(cm/s)とした。

図-2はW/Cが60%のセメントペーストおよび細骨材容積比30%のモルタルの自由収縮ひずみの実測値および解析値であり、凝結始発時間からの経時変化を示したものである。同図(a)、(b)はそれぞれセメントペースト、モルタル

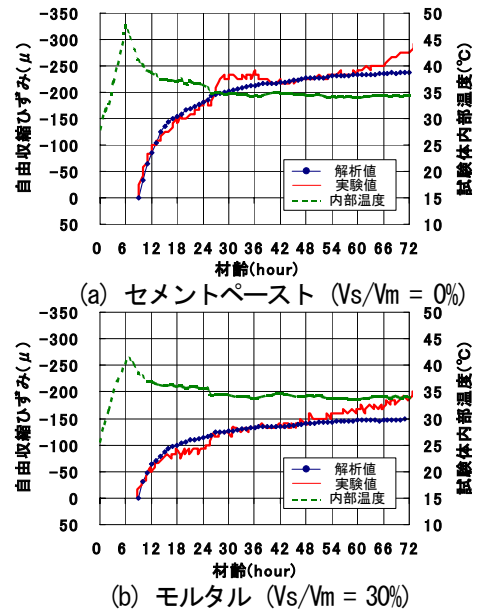


図-2 W/C60%の自由収縮実験および解析結果

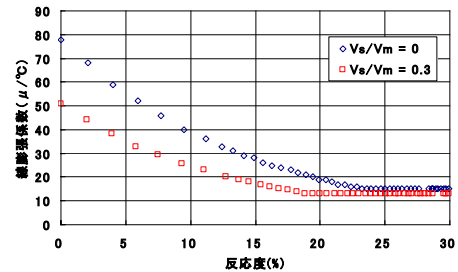


図-3 W/C60%における水和反応率と線膨張係数の関係
に対応しており、縦軸正方向を膨張ひずみとした。図中における点線は試験体の内部温度の平均値である。

図-3は図-2の実験結果について、解析により同定された線膨張係数と水和反応度の関係を示したものである。セメントペースト、モルタル共に水和反応度が23%程度までは線膨張係数は大きな減少傾向を示すが、それ以降ではほぼ一定値となっている。同じ水和反応度におけるセメントペーストとモルタルの線膨張係数の違いは、セメントペーストよりもモルタルの方が小さくなっている。これは細骨材の混入により線膨張係数が小さくなったためであると考えられる。また、その差異は水和反応度に応じて小さくなっていき、セメントペーストは15μ/°C、モルタルは13μ/°Cの一定値となった。一般に硬化後のセメントペーストの線膨張係数は15~18μ/°Cであり、また、本研究に用いられた細骨材の線膨張係数が9μ/°Cであることから、一定値となったセメントペーストとモルタルの線膨張係数の差異は細骨材の混入によるものであると考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 邊智智紀、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