

論文 表面エネルギー理論に基づいた局所的水分含有量の異なる セメント・コンクリートの乾燥収縮応力に関する解析的研究

渡辺 幸司*1・山口 智大*2・大下 英吉*3

要旨: 従来, 乾燥収縮は環境変化により部材レベルで捉えられていた。しかしながら, 環境変化によるコンクリートの乾湿変化は, コンクリート組織の緻密性により表面近傍において顕著となる。この場合, コンクリートの断面内において, 乾湿分布を生じ, その結果として内部拘束的な乾燥収縮ひずみ分布による応力が発生することになる。本研究では, 著者等¹⁾が過去に発表した表面エネルギー理論に基づいた乾燥収縮評価手法を, 乾湿変化によって局所的に水分含有量が異なるコンクリート部材に発生する乾燥収縮ひずみ分布による応力を評価可能なように拡張を行い, 応力性状の定性的評価について考察を行った。

キーワード: 乾燥収縮, 表面エネルギー, 乾湿分布, 内部拘束的応力

1. はじめに

コンクリートは, 無数の空隙を含む多孔体であり通常内部に水分を含んだ状態にある。そのため, 環境変化に伴いコンクリート内部の含水状態は変化し, その結果として体積変化を起こす。この体積変化の過程の中で, 乾燥収縮は, 一般のあらゆるコンクリート構造物において起こりえる現象であり, ひび割れの発生, 形状変化, 応力状態の変化をもたらすことにより, 耐久性をはじめとする構造物の諸性能を, 直接, 間接に, 場合によっては大きく低下させる。

従来, コンクリートの乾燥収縮は部材レベルで捉えられていた。しかし, 乾湿変化はコンクリート組織の緻密性により表面近傍において顕著になる。また, 各表面の乾燥条件が異なることなどによりコンクリートは断面内において乾湿分布を生じる。そのため, 各部分は自由な体積変化を起こすことはできず, 互いに拘束し結果として内部拘束的な乾燥収縮ひずみ分布による応力が発生することになる。そこで本研究では, 著者等が過去に発表した表面エネルギー理論に基づいた乾燥収縮手法を乾湿変化によって

局所的に水分含有量が異なるコンクリート部材に発生する乾燥収縮ひずみ分布による応力を評価可能なように拡張を行い, 応力性状の定性的評価について考察を行う。

2. 表面エネルギー理論に基づく変形挙動に関する支配方程式

2.1 熱力学に基づく表面エネルギーの変化量

熱力学に基づく単位面積あたりの表面エネルギーすなわち表面張力は, 等温状態を仮定することにより, 次式で示す Gibbs の吸着等温式により表すことができる。

$$\gamma = -\frac{n(s)RT}{A_s} \int_0^{\frac{p}{p_0}} \frac{1}{\frac{p}{p_0}} d\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (1)$$

ここで, γ は単位面積あたりの表面エネルギー(表面張力), R は気体定数, T は絶対温度, A_s は比表面積, P は気体の圧力, P_0 は飽和蒸気圧である。そして, コンクリートの供試体表面の相対湿度変化は次式により求められる。

$$\Delta H = H(n+1) - H(n) \quad (2)$$

*1 中央大学理工学部土木工学科 (正会員)

*2 中央大学理工学部土木工学科 (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)

ここで、 ΔH は相対湿度、 $H(n+1)$ は $(n+1)$ ステップの時点における相対湿度、 $H(n)$ は (n) ステップの時点における相対湿度である。また、単位面積あたりの表面エネルギーの変化量 $\Delta\gamma$ 、すなわち乾湿変化による固体の表面張力の変化は次式のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \Delta\gamma &= \gamma(n+1) - \gamma(n) \\ &= -\frac{RT}{MA_s} \int_{H(n)}^{H(n+1)} \frac{m}{H} dH \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 M は気体の分子量、 m は固体 1g あたりの吸着量である。なお、式(3)中の右辺に示す定積分項は、相対湿度と含水量の関係を数値積分することにより求められるわけである。

2.2 乾燥収縮に関する3次元支配方程式

熱力学に基づく表面エネルギーの変化による乾燥収縮に関する3次元支配方程式は、外部仕事のエネルギーの変化量とひずみエネルギーの変化量の差を最小化することにより導かれる。セメント・コンクリート表面に相対湿度 ΔH を与えると、表面エネルギーの変化量 ΔW_{out} 、次式で表すことができる。

$$\Delta W_{out} = \gamma \Delta A + A \Delta \gamma \quad (4)$$

ここで、 A は全表面積、 $\Delta\gamma$ は単位面積あたりの表面エネルギー(表面張力の変化量)である。

一方、コンクリート供試体表面における乾湿変化により供試体内部には、式(5)に示すひずみエネルギー ΔW_{in} が生じることになる。

$$\Delta W_{in} = \int_V \{ \sigma \} \{ \Delta \epsilon \} dV \quad (5)$$

ここで、 $\{ \sigma \}$ は応力ベクトル、 $\{ \Delta \epsilon \}$ はひずみ増分ベクトルである。また、エネルギーの変化量 ΔW は式(4)と式(5)の差により次式で表すことができる。

$$\Delta W = \Delta W_{out} - \Delta W_{in} \quad (6)$$

そして、式(6)に最小仕事の原理を適用すると、表面エネルギー理論による乾燥収縮の支配方程式は次式で表すことができる。

$$\int_V [B]^T [D] [B] dV \{ \Delta u \} = \int_A \left(\gamma \frac{\partial \{ \epsilon \}}{\partial \{ u \}} \{ \delta \} + \Delta \gamma \frac{\partial \{ \epsilon \}}{\partial \{ u \}} \{ \delta \} \right) dA \quad (7)$$

ここで、 $[B]$ はひずみ～変位マトリックス、 $[D]$

は弾性マトリックス、 $\{ \Delta u \}$ は節点変位増分ベクトル、 $\{ \epsilon \}$ はひずみベクトル、 $\{ u \}$ は変位ベクトル、 $\{ \delta \}$ はクロネッカーデルタである。このように表面エネルギー変化に基づく乾燥収縮は、初期条件、境界条件および表面エネルギーの変化量を代入することにより求めることができる。

3. 乾燥収縮実測値への解析手法の適用¹⁾

下村ら²⁾が行ったセメント・コンクリート乾燥収縮実験に対して構築した乾燥収縮支配方程式を適用するためには、相対湿度とセメント・コンクリート中の水分含有量の関係が必要である。そこで、下村らが行ったセメント・コンクリートの水分含有量と乾燥時間の関係を求めた実験結果とセメント・コンクリート中の相対湿度と乾燥時間の関係を用いることにより、局所的に異なる水分含有量と相対湿度の関係を求める。

3.1 吸・脱着を考慮した相対湿度分布

本研究では、相対湿度と乾燥時間の関係を求める方法として、氏家ら³⁾によって構築された吸・脱着を考慮した水分拡散方程式を用いた。この支配方程式については、文献³⁾を参照頂きたい。なお、不飽和コンクリート中の水分拡散方程式を解析するにあたり、入力データは実験条件と一致させた。また、**図-1**に示すように、解析モデルは対称性を考慮することにより供試体の1/8部分とし、供試体の相対湿度の初期条件は100%、乾燥面における境界条件は、真空乾燥及び60%とした。

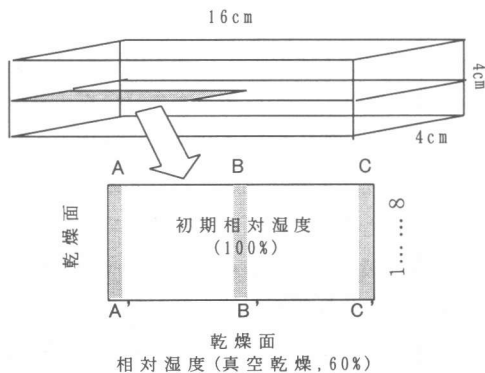


図-1 解析モデル

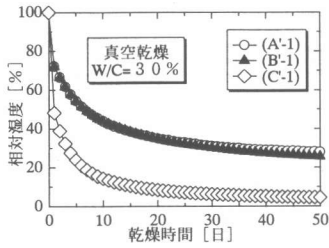


図-2 相対湿度と乾燥時間 (W/C = 30%)

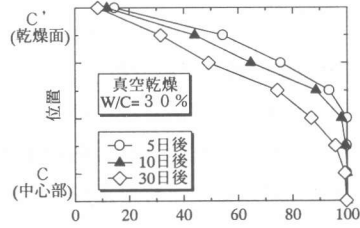


図-6 湿度分布 (W/C = 30%)

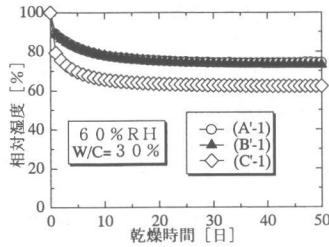


図-3 相対湿度と乾燥時間 (W/C = 30%)

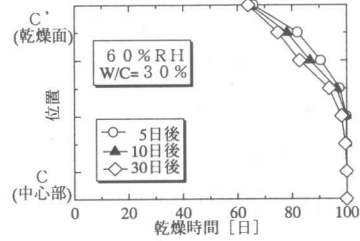


図-7 湿度分布 (W/C = 30%)

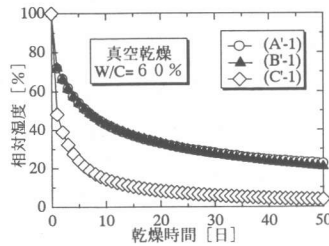


図-4 相対湿度と乾燥時間 (W/C = 60%)

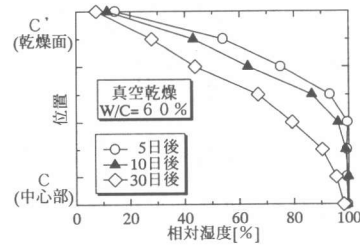


図-8 湿度分布 (W/C = 60%)

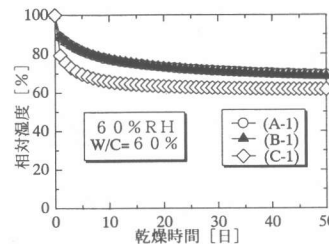


図-5 相対湿度と乾燥時間 (W/C = 60%)

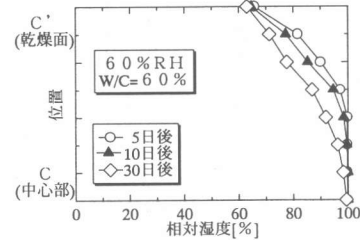


図-9 湿度分布 (W/C = 60%)

図-2～図-5はそれぞれの条件における相対湿度と乾燥時間の関係を表したものである。また、図-6～図-9は、図-1に示すC-C'断面における相対湿度分布である。この図からも明らかに供試体表面の相対湿度を60%よりも真空乾燥のほうが水分が拡散しやすいため供試体内部における相対湿度の変化が見られる。

また、W/Cによる相対湿度の変化は図-6と図-8の30日後の分布より、W/Cが60%のほうがより拡散していることが分かる。

これらの結果に、下村らが行った実験から得られた水分含有率と乾燥時間の関係を導入することにより、局所ごとの水分含有量と相対湿度の関係がわかる。なお、乾燥収縮支配方程式を

解析する手法については文献¹⁾を参照頂きたい。

3.2 断面内の乾燥収縮ひずみ分布

乾燥収縮現象を解析するにあたり、解析モデルは図-1と同様であり、境界条件は図-10に示すように1軸状態を仮定し、材料定数は実験条件と同様である。

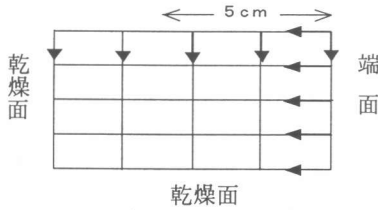


図-10 乾燥収縮解析モデル

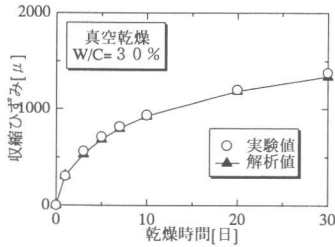


図-11 収縮ひずみと乾燥時間(供試体MS 7)

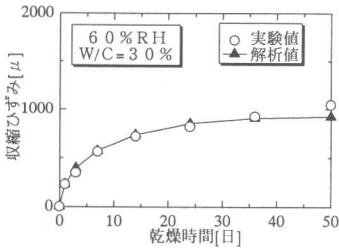


図-12 収縮ひずみと乾燥時間(供試体M S M)

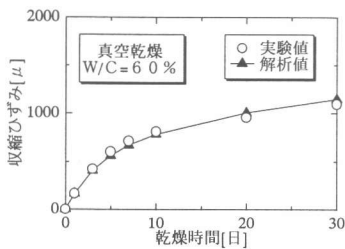


図-13 収縮ひずみと乾燥時間(供試体L 7 7)

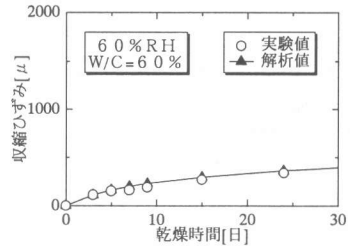


図-14 収縮ひずみと乾燥時間(供試体L 7 C)

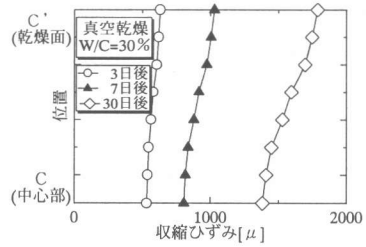


図-15 ひずみ分布(供試体MS 7)

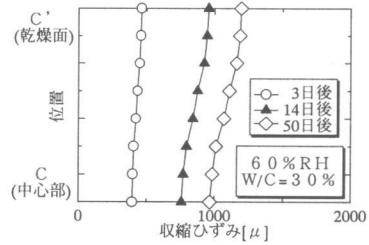


図-16 ひずみ分布(供試体M S M)

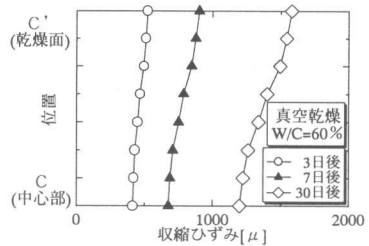


図-17 ひずみ分布(供試体L 7 7)

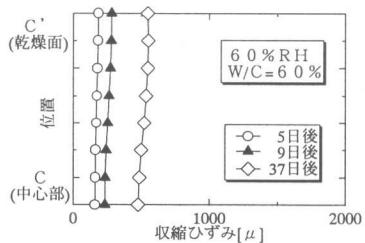


図-18 ひずみ分布(供試体L 7 C)

図-11～図-14は、供試体ごとの収縮ひずみに関する実験結果と解析結果の比較である。なお、実験結果のひずみは中心であるC-C'断面から5cmの位置における断面内のひずみの平均値である。全体的に実験結果と解析結果は、非常に近い値を示している。

また、図-15～図-18は、各供試体のC-C'断面における各乾燥時間ごとの収縮ひずみ分布である。これらの図を見てみると供試体内部よりも外側、つまり乾燥面に近づくにつれて収縮ひずみの値が大きくなっているのが分かる。また、時間の経過とともに3次曲線的な分布を示している。乾燥条件の違いによる収縮ひずみの値は、水分分布と同様にその差が見られる。また、水セメント比の違いによっても拡散性状が異なるため収縮ひずみの値にもその差が見られる。

3.3 乾燥収縮ひずみ分布による内部拘束的応力の評価

乾燥収縮ひずみによる内部拘束的応力は、ひずみ分布により発生する。したがってひずみ分布による内部拘束的応力は、次式により表すことができる。

$$\sigma = E_c (\varepsilon_{av} - \varepsilon_{sh}) \quad (8)$$

ここで、 σ は内部拘束的応力、 E_c はコンクリートの弾性係数、 ε_{sh} は各部分の乾燥収縮ひずみ、 ε_{av} は平均ひずみであり、次式で示す断面内の平均ひずみである。

$$\varepsilon_{av} = \frac{1}{A} \int_A \varepsilon_{sh} dA \quad (9)$$

ここで、 A は供試体の断面積である。

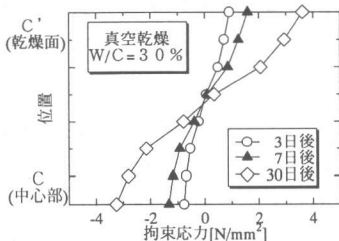


図-19 拘束応力分布(供試体MS7)

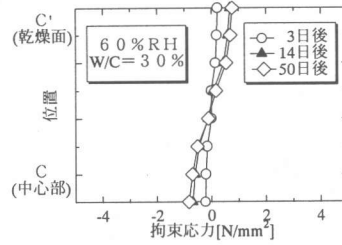


図-20 拘束応力分布(供試体MSM)

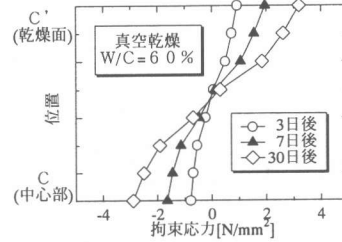


図-21 拘束応力分布(供試体L77)

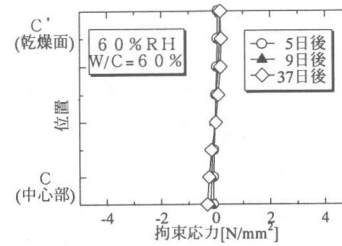


図-22 拘束応力分布(供試体L7C)

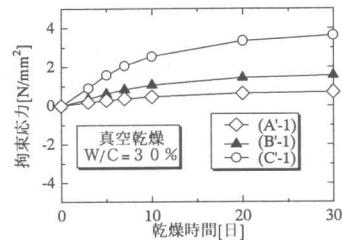


図-23 拘束応力と乾燥時間(供試体MS7)

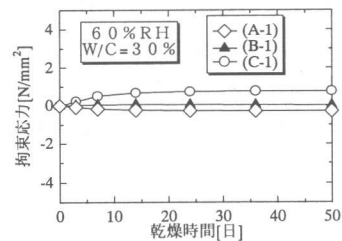


図-24 拘束応力と乾燥時間(供試体MSM)

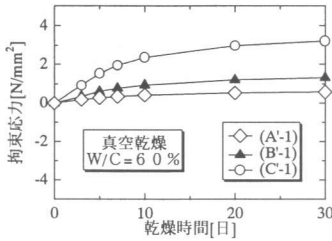


図-25 拘束応力と乾燥時間(供試体L77)

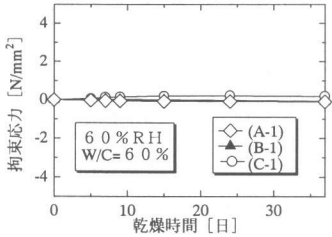


図-26 拘束応力と乾燥時間(供試体L7C)

図-19, 21 は供試体表面を真空乾燥させたときの断面 C-C' における各乾燥時間ごとの内部拘束的応力分布, 図-20, 22 は供試体表面を 60% に乾燥させたときの断面 C-C' における各乾燥時間ごとの内部拘束的応力分布である。また, 図-23, 25 は供試体表面を真空乾燥させたときの図-1 における A', B', C' における拘束応力と乾燥時間の関係を, 図-24, 26 は供試体表面を 60% に乾燥させたときにおける A', B', C' における拘束応力と乾燥時間の関係を示している。

図-19, 21 から供試体表面を真空乾燥させたときのほうが乾燥表面の引張応力が非常に大きい事が分かる。また, 水セメント比が 30% のときのほうが 60% のときと比べるとその応力が大きい。これは, 水セメント比 30% のほうが水分の拡散があまり大きくないので, 時間が経つにつれ乾燥面と中心のひずみの差が大きくなるためにひずみ分布に差が出たと考えられる。

図-20, 22 から供試体表面を 60% としたときは, 乾燥面と中心面の応力の差は小さく水セメント比による違いはあまり見られない。

図-23, 25 から供試体表面を真空乾燥させた

ときは, 乾燥面よりも中心面の応力のほうが大きい。これは, 乾燥面はひずみ分布がほとんど同じなのに対し, 中心面は時間の経過とともにひずみ分布に大きな差が出るためである。

図-24, 26 から供試体表面を 60% としたときはほとんどその値は変わらず 0 に近い。

以上のように, 本研究では局所的水分含有量の異なるコンクリートの乾燥収縮およびそれによる内部拘束的応力の定性的評価を行ったわけであるが, 乾燥収縮応力に関する定量的評価は, 詳細な実験との対比により行う必要がある。

4. まとめ

本研究では, 表面エネルギー理論に基づいた局所的水分含有量の異なるセメント・コンクリート乾燥収縮応力に関する解析的研究を行い, その応力性状の定性的評価を行った。以下に本研究で得られた結論を示す。

- (1) 局所的水分含有量の違いによりコンクリート部材に発生する乾燥収縮ひずみ分布を捉えるための解析手法の拡張を行った。
- (2) 乾燥収縮ひずみ分布による内部拘束的な応力性状について定性的な評価がされ, 著者らによる解析手法について拡張が行えた。

参考文献

- 1) 斎藤理浩・打越輝昌・大下英吉: 乾湿変化による乾燥収縮の解析的評価, コンクリート工学年次報告論文集, Vol.21, No.2, pp.715-720
- 2) 下村匠・小沢一雄・前川宏一: 細孔容積分布密度関数に基づくコンクリートの乾燥収縮モデル, コンクリート工学年次報告論文集, Vol.15, No.1, pp.435-440
- 3) 氏家大介・大下英吉: セメント系材料中の微細空隙壁面への水分の吸・脱着現象を考慮した拡散性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.709-714