コンクリート部材の乾燥収縮挙動の推定に関する研究

岐阜大学大学院工学研究科　学生会員　○中村　恭香　　森川　友博　　川上　寛正
岐阜大学工学部　　正 会 員　　小澤　満津雄　森本　博昭

1.　はじめに

乾燥収縮は構造物の諸性能を，直接，あるいは間接的に低下させる原因となるため，解析手法の確立は重要である。本研究では，コンクリートの乾燥収縮挙動の解析において必要となるコンクリートの相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係（以下，乾燥収縮ひずみ特性と記す）を実験により明らかにし，乾燥収縮ひずみの合理的な評価式を提案する。さらに，本研究の提案式，JCI のコンクリート構造物のクリープならびに収縮による時間依存変形研究委員会[1] および CEB－FIP MODEL CODE 1990 の収縮ひずみ予測式[2] を用い乾燥収縮挙動の推定を行い，実験結果と比較し推定精度の検証を行う。

2.　乾燥収縮ひずみ特性とその評価式の提案

2.1　微視的構造に基づく熱力学的収縮モデルの提案

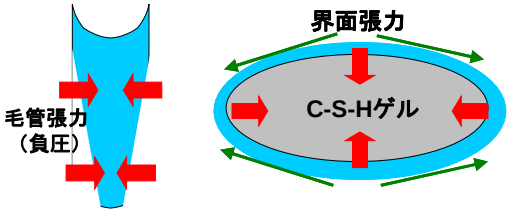
従来のモデルは，図―1（a）に示す毛管張力モデルに基づき，毛細管凝縮理論（Kelvin の式）により界面の曲率半径r_sと平衡蒸気圧P_v/P_{v0}の関係を次式で表している。

$$ln\frac{P_v}{P_{v0}} = -\frac{2\gamma M_w}{RT\rho_L}\frac{1}{r_s} \qquad (1)$$

ここで，P_v:水蒸気の分圧（Pa），P_{v0}:飽和水蒸気圧（Pa），γ: 液体の表面張力（N/m），M_w : 水の分子量（kg/mol），R : 気体定数（J/mol· K），T : 絶対温度（K），ρ_L : 液状水の密度（kg/m³），r_s : 気液界面の形成される曲率の半径（m）である。また，気液両相の圧力差（収縮駆動力）ΔP は，次式によって表されると仮定する。

$$\Delta P = P_G - P_L = -ln\frac{P_v}{P_{v0}}\cdot\frac{RT\rho_L}{M_w} \qquad (2)$$

ここで，P_G : 気相の全圧（Pa），P_L : 液相の圧力（Pa）



（a）毛管張力モデル　（b）界面張力モデル

図―1　収縮モデル

である。しかし Kelvin の式の適用範囲は曖昧であり，コンクリート空隙中においてメニスカスが形成されていない場合，適用範囲外となる。そこで本研究では，次式のような，図―1 (b) に示す界面張力モデルに基づいた，界面の状態方程式による乾燥収縮評価式を検証する。

$$\phi_{lg}\left[A_{lg} + 2A_{sg}\cos\theta_w\right] = -\frac{RT\ln(h)}{\nu}\cdot V_w \qquad (3)$$

ここで，ϕ_{ij} : 界面張力，A_{ij} : 界面の面積，θ_w : 接触角，R : 気体定数，　ν : 水分子の比容積，h : 相対湿度，V_w : 吸着水の体積である。(3) 式において両辺を体積の次元で除すると応力の次元となり，これをΔP（収縮駆動力）とすると，界面張力に起因する駆動力は次のように表すことができる。

$$\sigma_s = A_s\Delta P \qquad (4)$$

ここで，σ_s : 界面張力に起因する駆動力（Pa），A_s : 収縮駆動力の作用程度に関する係数である。

本研究では，液状水の逸散による毛細管凝縮に起因する駆動力の影響を，コンクリート内部の相対湿度の関数として暫定的に評価する。内力に対する変形は，毛細管凝縮に起因する駆動力による細孔組織の変形を，複雑な非線形性のおおよその平均値として位置づけられる線形変形係数E_sを導入し，構成関係を以下のように設定する。

$$\varepsilon_{sh} = \frac{\sigma_s}{kE_s} \qquad (5)$$

ここで，ε_{sh} : 乾燥収縮ひずみ，E_s : 毛細管凝縮に対する変形係数(Pa), k : 乾燥開始材齢に関する補正係数である。

2.2　実験概要

実験は**表―1** に示す供試体を用い，コンクリート内部の相対湿度と長さ変化の計測を行い，乾燥収縮ひずみ特性を明らかにする。

表―1　供試体種類

W/C (%)	寸法 (mm)	乾燥開始材齢 (日)	28日圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)
57	30×30×300	7	36.5	28.4
57	30×30×300	3	36.5	28.4
45	30×30×300	7	50.5	33.4

キーワード　乾燥収縮，毛管張力モデル，界面張力モデル
連絡先　　〒501-1193　岐阜市柳戸1-1　　岐阜大学工学部　　ＴＥＬ058-293-2411

2.3　実験結果

本研究により得られた収縮駆動力の作用程度に関する係数である A_s の W/C=57%についての算定結果を図―2 に示す。図より A_s は，供試体内部の相対湿度が低下するに伴い減少していることがわかる。

次に図―3 に，W/C=57%，乾燥開始材例 7 日について，実験により得られた相対湿度 80，60，40%における乾燥収縮ひずみと，JCI，CEB および本研究での提案式から算出した乾燥収縮ひずみ特性を示す。

図―3 より，各モデルの適用範囲内の条件で算出した結果，JCI 式では計測値に対して全体的に大きめの値を示し，CEB 式では全体的に小さめの値を示したが，両モデルの適用範囲内での推定精度の±40%[1] の範囲内である。また，本研究の提案式については，各パラメータを入力した結果，本研究のデータの範囲内では推定値の誤差は最大±13%となった。

3.　コンクリート部材の乾燥収縮挙動の推定

3.1　実験概要および解析概要

50×50×300mm，100×100×400mm，150×150×600mmの供試体について，本研究で算出した乾燥収縮ひずみ特性および JCI，CEB の予測式を用いて乾燥収縮挙動の推定を行い，さらに実験によりコンクリートの相対湿度および長さ変化を計測した。

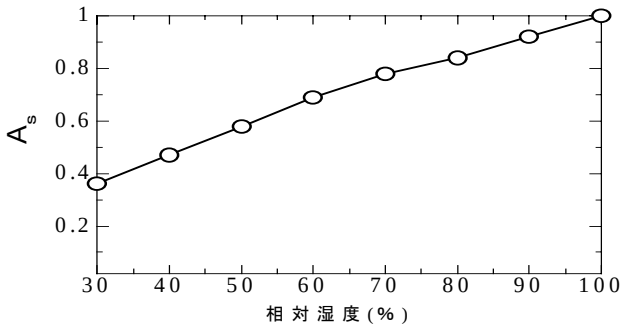
供試体はすべて W/C＝57%，乾燥開始材齢 7 日である。

解析は，供試体断面をモデル化し，水分移動解析により供試体中の相対湿度分布を算出する。水分移動に関する物性値である蒸発率 α は α=0.3（g/m^2･hr･mmHg）一定とし，透湿率 λ_P と湿気容量 $(dq/dP)_P$ は相対湿度の関数として評価した。算出された結果を前項で求めた乾燥収縮ひずみ特性に適用し，各供試体の乾燥収縮挙動の推定を行った。また，部材の収縮ひずみは，部材断面各部の収縮ひずみの平均値として評価した。

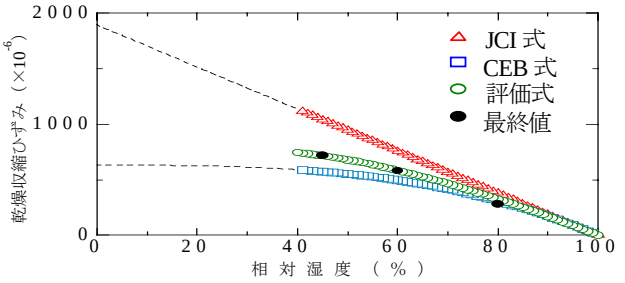
3.2　実験結果および解析結果

例として 50×50×300 の場合の結果を**図―4** に示す。乾燥開始初期の材齢 28 日ほどまでは，本研究の提案式および CEB 式は計測値と同程度の乾燥収縮ひずみを評価しているが，全体的に見ると，本研究による提案式が一番安定した予測結果を示している。またどの供試体においても，JCI 式においては大きく評価し，CEB 式においては小さく評価する傾向がみられた。

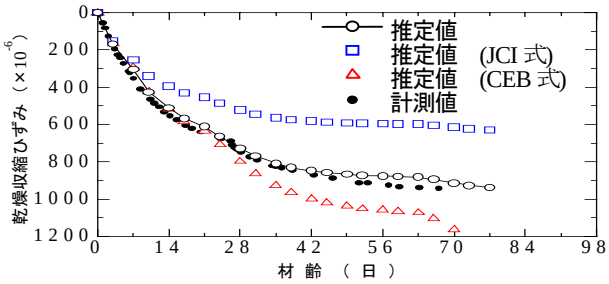
以上の結果から，水分移動解析により得られた部材中の相対湿度分布に，乾燥収縮ひずみ特性を適用すること



図―2　係数 A_s の算定結果（W/C=57%）



図―3　乾燥収縮ひずみ特性（W/C=57%　乾燥開始材齢 7 日）



図―4　乾燥収縮ひずみ経時変化（50×50×300）

で，コンクリート部材の乾燥収縮挙動を推定することが可能であることが明らかになった。

4.　まとめ

（1）界面の状態方程式に基づく乾燥収縮モデルについて，モデル中の収縮駆動力に関する係数である A_s を実験により同定した。その結果，コンクリート内部の相体湿度が低下するに伴い A_s も減少する傾向が得られた。

（2）部材の水分移動解析結果に本評価式を適用することで，乾燥収縮挙動の推定が可能であることを示した。

（3）JCI 式および CEB 式の誤差は，いずれも各式の予測精度範囲内の±40%以内にあるが，本研究の提案式では，より良好な挙動を捉えた結果が得られた。今後，評価式中の係数 A_s についての資料蓄積および物理的な意義付けについての検討が必要である。

【参考文献】

1）日本コンクリート協会：コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形研究委員会報告書，pp.101-121，2001

2）CEB：CEB－FIP MODEL CODE 1990，pp.57-58，1993