論文 乾湿変化と中性化を受けるコンクリートの変形性状に関する解析的 研究

宮崎 慎也*1・佐々木 崇*2・大下 英吉*3

要旨:前年度構築した炭酸化と乾燥収縮・湿潤膨張に関する連成モデル¹⁾について,炭酸 化反応の結果として生じる細孔構造の変化を考慮することにより,連成モデルの拡張を行 った。拡張したモデルを用いて,乾湿変化の後に炭酸化を受けた場合および乾湿変化と炭 酸化を同時に受けた場合の状態における変形性状について解析的に提示し,それらの差異 に関する検討を行った。その結果,拡張したモデルは,より定性的に炭酸化収縮と乾燥収 縮による変形挙動を捉えていることが確認できた。

キーワード:炭酸化,乾燥収縮,湿潤膨張,相対湿度

1. はじめに

一般に,自然環境下に供用されたコンクリー ト構造物は,多くの劣化要因によって複合劣化 を生じることになる。その劣化要因の一つに中 性化が挙げられる。中性化を起こす代表的な化 学反応が,大気中の二酸化炭素によって起こる 炭酸化反応であるが,この炭酸化反応はコンク リートが本来保持しているアルカリ性を低下さ せるだけでなく体積収縮を伴うことが知られて いる。

従来,中性化に関する研究は鉄筋腐食に密接 に関係することから中性化深さ等に重点を置く ものが多く,炭酸化収縮に関しては,乾燥収縮 を初めとする他の体積変化に比べて収縮量が小 さいことから,炭酸化による体積収縮に関する 研究は殆ど実施されていない。しかしながら, コンクリート標準示方書では設計段階において 考慮すべき収縮の一つに炭酸化収縮を挙げてい るばかりか,乾燥過程において炭酸化を生じた 場合の収縮量が,乾燥のみによる収縮に比べて 大きくなるという実験的検証結果²⁾および他の 体積変化による要因のみでは表現できない実現 象が存在するということから判断すると,炭酸 化に伴う体積変化を含む変形性状に関する研究 は重要であると考えられる。

著者等は,炭酸化収縮と水分量変化に伴う体 積変化である乾燥収縮および湿潤膨張による変 形性状に関するモデルの構築¹⁾を行った。本研 究では,構築したモデルについて,炭酸化の進 行が大気中の相対湿度の影響を大きく受けると いうことから,新たに相対湿度変化を考慮した 炭酸化反応率を導入し,また炭酸化による細孔 構造の変化をコンクリート内部の水分移動に導 入することにより,変形性状をより定性的に評 価できるように改良を施した。

これに基づき,乾湿変化の後に炭酸化を受けた場合および乾湿変化と炭酸化を同時に受けた場合の状態における変形性状を解析的に提示し, それらの差異に関する検討を行った。

- 2. 炭酸化と水分量変化に伴う体積変化による変形連成モデルの構築
- 2.1 炭酸化反応率
- (1) 炭酸化反応率

炭酸化収縮を算定するために用いる炭酸化反応率 h_(f,t) は,炭酸化の進行を表現する指標である。本来,炭酸化反応の進行は様々な水和生成物と二酸化炭素に由来する炭酸イオン等との化学反応によるものであり,複雑な過程を経るも

*1 東洋エクステリア(株) 商品本部 (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 (正会員)

のであるが,本研究での炭酸化反応の進行は二酸化炭素がガスとしてコンクリート内を拡散することにより,場所ごとに異なる二酸化炭素濃度f_{co2}と経過時間 t によって炭酸化反応がどの程度進行しているのかを指数関数によって表現することで仮定した。

$$C_{(f,t)} = C_1 \cdot e^{-C_2 \cdot f_{(t)} \cdot \frac{t}{t_0}}$$
(1)

式(1)に示す $C_{(f,t)}$ は炭酸化未反応率であり, 全水酸化カルシウムに対する残存水酸化カルシ ウムの割合を表す。係数 C_1 , C_2 を反応速度定数, t_0 を反応完了時の日数とする。本研究では中性 化促進試験を想定してモデルを構築している。 反応速度定数 C_1 および C_2 は実験により求める 必要があるが,今回は C_1 = 1.0, C_2 = 10.0 とし て仮定した。 t_0 については Verbeckの研究²⁾を 参考に 50 日とした。そして,炭酸化反応率 $h_{(f,t)}$ は炭酸化未反応率 $C_{(f,t)}$ を用いることにより,次 式のように表すことができる。

$$h_{(f,t)} = 1.0 - C \tag{2}$$

また,炭酸化反応が低湿度環境では反応に必要な水が少ないこと,高湿度環境では二酸化炭素が十分に拡散できないことから進まないことが確認されている。本研究では上述の現象を連続的に評価可能な次式を炭酸化未反応率Cに導入し,炭酸化反応率h_(f,t)を湿度依存型とした。

$$C_{RH} = 1/\exp\left(\frac{\left(1.0 - 2 \cdot \boldsymbol{f}_{w}\right)^{2}}{\boldsymbol{f}_{w}^{2}}\right) \quad 0 < \boldsymbol{f}_{w}$$
(3)

ここで, f_w は相対湿度であり f_w =0%では C_{RH} =0.0とする。

最終的に湿度依存型炭酸化反応率*h*_(*f*,*t*) は次 式のようになる。

$$h_{(f,t)} = 1.0 - C_1 \cdot e^{-C_2 \cdot C_{RH} \cdot f_{(t)} \cdot \frac{t}{t_0}}$$
(4)

(2) 炭酸化収縮

本研究では炭酸化反応率 $h_{(f,t)}$ から炭酸化収 縮ひずみ e^{hyd} を算定する。Verbeckの研究²⁾に基 づき,最も炭酸化収縮が大きくなる相対湿度 50%時の収縮量 e_{max} を用いて次式で示す。

$$\boldsymbol{e}^{nya}(\boldsymbol{f},t) = \boldsymbol{e}_{\max} \cdot \boldsymbol{h}_{(\boldsymbol{f},t)}$$
(5)

ここで,最大収縮量 **e**_{max} 0.10% とした。

2.2 炭酸化に伴う細孔構造の変化

一般に,炭酸化反応により全細孔量の減少お よび細孔径分布の変化が起こることが知られて いる。全細孔量の減少割合は,式(1)で示した炭 酸化未反応率C_(f,t)を導入することにより,次式 のようになる。

$$\mathbf{x}_{(h)} = \mathbf{x}_0 (C - 0.1) \quad 0.6 < C < 1.0$$

$$\mathbf{x}_{(h)} = 0.5\mathbf{x}_0 \qquad C \quad 0.6 \tag{6}$$

ここで, X₀は初期空隙率である。

次に,炭酸化による細孔構造の変化を表現す る。一般に炭酸化反応に伴い,全空隙量が低下 し細孔径分布が変化することが知られている。 本研究では,式(7)に示す空隙分布関数 f_(r)を用 いることにより,その変化割合を表現すること にした。次節以降で述べる水分拡散方程式およ び水分量変化に伴う体積変化について,炭酸化 による細孔構造の変化を考慮することができる。

$$f_{(r)} = \frac{\mathbf{x}_0 \cdot r \cdot \exp(-A_{(h)} \cdot r^{B_{(h)}})}{r_{\min(h)}}$$
(7)

ここで, r は細孔半径, r_{min(h}は空隙量が最大と なる細孔半径である。材料定数 A_(h), B_(h)は材料 固有のものであり,炭酸化反応による緻密さの 程度を表すものである。

本研究では,炭酸化反応に伴う細孔構造の緻 密化を表現するために,式(7)で示した細孔空隙 分布関数に,炭酸化反応率 $h_{(f,t)}$ によって変化す る材料定数 $A_{(h)}$, $B_{(h)}$ および $r_{min(h)}$ を用いること により表現する。図 - 1は,式(7)で示した空隙 分布関数について,炭酸化反応率別に表したも のである。図中に示す中性化前(h=0.0)および 中性化後(h=0.4)のデータは実験結果³⁾を式(7) により近似したものである。任意の炭酸化反応 率における材料定数 $A_{(h)}$, $B_{(h)}$ および $r_{min(h)}$ は, 上述の中性化前および中性化後の実験結果より 同定された材料定数を用いて線形補間すること により次式のように仮定した。

$$A_{(h)} = -0.475 h + 0.42$$

$$B_{(h)} = 0.55$$

$$r_{\min} = 125 h + 20$$
(8)



図 - 1 炭酸化反応度を考慮した空隙分布

一般に,炭酸化反応によって細孔量が減少す ると言われている³⁾。しかしながら,炭酸化の 進行に伴う空隙分布の変化に関する詳細なデー タが無いことから,それぞれの反応度において 図-1で示したような空隙分布の遷移が起こる とは言えないが,空隙分布の遷移を表現する際, 材料定数を炭酸化反応度依存型として扱うこと で,空隙分布を定性的に表現することが可能で あると考えられる。

2.3 二酸化炭素の拡散

拡散現象を表すため,研究では Papadakis の 研究⁴⁾を参考に,二酸化炭素の拡散係数 **1**(*f*_w, **x**_(h)) を次式のようにした。

$$I(\mathbf{x}_{(h)}, \mathbf{f}_{w}) = 1.64 \times 10^{-6} \cdot \mathbf{x}_{(h)}^{1.8} \cdot \left(1 - \frac{\mathbf{f}_{w}}{100}\right)^{2^{2}} \quad (9)$$

式(9)の拡散係数を用いて,二酸化炭素の拡散に 関する方程式は次式のようになる。

$$-H\,\overline{f}_{co2} - W\frac{d\overline{u}}{dt} - S\frac{d\overline{f}_{co2}}{dt} - df' = 0 \qquad (10)$$

ここで, H は炭酸ガスの拡散に関するマトリックス, W は固体相の変形の影響に関するマトリックス, S は炭酸化反応による変形の影響に関するマトリックス, \overline{f}_{co2} は炭酸ガスの節点濃度, \overline{u} は節点変位ベクトルである。

2.4 コンクリート内部の水分移動

解析モデル内部の湿度分布を求めるため,次 式に示す水分の吸脱着現象を考慮した水分拡散 モデルを用いた。

$$M \frac{\partial f_{w}}{\partial t} + Df_{w} - C = 0$$
(11)
$$C = \frac{2V_{0}(v_{x} - v_{y})}{r_{\min(h)}} \cdot \left[\sum_{k=1}^{n} \frac{A_{(h)}^{k} \cdot r^{kR_{(h)}+1} \cdot e^{-A_{(h)}r^{R(h)}}}{\left(k + \frac{1}{B_{(h)}}\right)} \right]$$

ここで, *M* は質量マトリックス, *D* は拡散マト リックス, *C* は反応項であり, *A*_(h), *B*_(h) および *r*_{min(h)}は,式(8)で示した定数である。この材料 定数により,炭酸化反応度による細孔構造の変 化を水分の拡散に関して考慮可能となる。

2.5 水分量変化に伴う体積変化

本研究では,乾燥収縮による変形挙動を次式 に示す表面エネルギー理論に基づく乾燥収縮モ デルを参考にした。

$$\int_{A} \frac{\Delta}{\{\Delta u\}} dA = \int_{A} \left(\frac{\partial \{\boldsymbol{e}\}}{\partial \{u\}} \{\boldsymbol{d}\} + \Delta \frac{\partial \{\boldsymbol{e}\}}{\partial \{u\}} \{\boldsymbol{d}\} \right) dA$$
$$= -\frac{RT}{MA_{c}} \int_{f_{w}(n)}^{f_{w}(n+1)} \frac{\int_{0}^{t} v_{(f_{w})} dt}{f_{w}} df_{w}$$
(12)

 Δg は表面エネルギーの変化量である。式(12) において,式(8)で示した炭酸化により変化する 定数 $A_{(h)}$, $B_{(h)}$ および $r_{min(h)}$ を用いて求めた湿度 分布の影響を受けて,炭酸化と乾燥収縮との複 合的な変形性状が表現可能となる。

2.6 力の釣合い式

炭酸化収縮と乾燥収縮による力の釣合い式は 次式のようになる。

$$K_{T} = \frac{d\bar{u}}{dt} - L\frac{d\bar{F}_{CO2}}{dt} - \frac{df}{dt} = 0$$
(13)

$$df = \left(1 - \mathbf{x}_{(h)}\right) \left(\int_{\Omega} B^T D_S m \frac{\partial e^{hyd}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} d\Omega + \int_{\Omega} B^T D_S e^{shr} d\Omega \right)$$

ここで,マトリックス *K*_Tは剛性マトリックス, *L* は炭酸化反応による体積変化の影響に関する マトリックス,*d*f は外力項である。

2.7 支配方程式

式(10)で示した炭酸ガス拡散式,式(11)で示した水分拡散式,式(13)で示した乾燥収縮モデ

ルを考慮した力の釣合い式を連成させることで, 乾湿変化による体積変化を伴う炭酸化・変形連 成解析モデルは,次式のように表すことができ る。

 $\begin{bmatrix} \Delta t D + M & 0 & 0 \\ 0 & -S - \Delta H & -W \\ 0 & -L & K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \overline{f}_{w} \\ \Delta \overline{f}_{co2} \\ \Delta u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta t A - \Delta t D \overline{f}_{w(n)} \\ \Delta H \overline{f}_{co2(n)} + \Delta d f \\ \Delta t f \end{bmatrix}$ (14) ここで, \overline{f}_{w} は相対湿度の節点値, \overline{f}_{co2} は二酸 化炭素の節点濃度および \overline{u} は節点変位ベクトル であり, それぞれ未知数である。

- 3. 炭酸化と乾燥収縮による変形性状に関す る数値シミュレーション
- 3.1 解析モデルと解析パラメータ

本研究では,図-2のように4×4×16cm角 柱供試体を対照性から2×2×8cmの8分割を解 析対象とした。またモデル側面を乾湿面とし, 水分の逸散と二酸化炭素の侵入についての境界 条件を与えた。モデルの評価については,8分 割した供試体のX-Y平面について行った。 また,解析上の諸特性は表-1に示すとおりで ある。

表 - 1 解析上の諸特性

ヤング係数(N/mm ²)	20000
ポアソン比	0.16
初期空隙率	0.20
二酸化炭素濃度(%)	10



3.2 炭酸化と乾燥収縮の変形挙動に関する モデルの評価

本研究で構築した炭酸化と乾燥収縮による変 形挙動を表すことのできるモデルは,境界条件 の与え方によって,乾燥による収縮,炭酸化に よる収縮,乾燥後に炭酸化が生じた場合の収縮 および乾燥と炭酸化だ同時に生じた場合の収縮 を表現することができる。図-3は,初期相対 湿度100%に境界条件20,40,60,80%を与え, 乾燥状態においた場合の乾燥収縮ひずみ,炭酸 化収縮ひずみ,乾燥させた後に炭酸化を生じさ せた場合の収縮量および乾燥しながら炭酸化反 応を生じた場合の収縮ひずみを表すものである。



図 - 3 各種収縮ひずみ

は式(12)で示す乾燥収縮モデルによる乾燥 収縮ひずみ。 は構築したモデルによる一定湿 度下においての炭酸化収縮ひずみ。 は構築し たモデルによる乾燥収縮を生じさせた後に炭酸 化収縮を生じさせた場合の収縮ひずみ。 は構 築したモデルによる乾燥と炭酸化が同時に進行 していく場合の収縮ひずみを示したものである。

で示す一定湿度下での炭酸化収縮は式(3) の影響で,低湿度環境においては炭酸化の進行 が抑制されたことから,また高湿度環境におい ては二酸化炭素が十分に供給されないことから 収縮ひずみが大きくならない。湿度が適度に下 がっている相対湿度40%RHから60%RHの間 においては、式(9)で示す二酸化炭素拡散係数が 大きくなり、供試体内部に十分に二酸化炭素が 拡散し、式(3)の影響も小さいことから、炭酸化 収縮ひずみが大きくなる。このことは、原点付 近における二酸化炭素濃度の履歴を示す、図-4においても確認することができる。



図 - 4 各湿度の炭酸ガス濃度時間履歴

高湿度環境では二酸化炭素濃度が徐々に上昇 し,相対湿度50%RH時においては初期の段階 で二酸化炭素濃度が急激に上昇していることが 確認できる。また低湿度環境でも初期の段階で 二酸化炭素濃度が急激に上昇している。 で示 す乾燥の後に炭酸化を生じさせた場合は,乾燥 収縮と炭酸化収縮を加え合わせたものとして扱 っているため,低湿度環境では乾燥収縮が支配 的で 式(4)に示す相対湿度依存型の炭酸化反応 率が極めて小さくなるため炭酸化収縮は殆ど影 響しない。高湿度環境では乾燥収縮,炭酸化収 縮共にあまり大きくならず,相対湿度 40%RH 付近において炭酸化収縮が最も大きくなること から乾燥収縮と加え合わさると非常に大きくな る。 で示した炭酸化と乾燥を同時に受ける場 合では,相対湿度が下がることにより乾燥収縮 を生じ,それに伴い炭酸ガス拡散係数が大きく なることにより炭酸化も十分に進行する。しか し炭酸化が十分に進行するために細孔構造が緻 密化し,乾燥収縮を,起こしにくくなるため,

で示す乾燥の後に炭酸化を生じさせた場合に 比べ全体の収縮量は小さくなる。

Verbeck は乾燥しながら炭酸化が進行してい く場合の収縮ひずみが相対湿度 50%RH で最大 となるという実験結果²⁾を示しており,本研究 で示したモデルは実験結果と比べると定性的に 評価できると言える。

図-5に示すのは,モデルの原点付近と,境 界近傍の炭酸化反応度の時間履歴である。本研 究では,炭酸化反応度を相対湿度依存型とする ことによって,炭酸化の進行を高相対湿度下と 低相対湿度下においての進行の抑制をしている。 図 - 5 では,供試体の原点近傍において時間と ともに反応が進んでいく。これは,図-6にお いて反応が十分に進む適度な相対湿度が与えら れているためである。これにより図 - 3 で示さ れているように 相対湿度 40%RH から 60%RH 付近で炭酸化収縮が最大となるわけである。一 方,供試体の境界近傍付近では,相対湿度が著 しく低いため,炭酸化反応度はあまり上昇せず に経過時間初期で一定値となってしまう。供試 体が置かれる環境によっては,炭酸化の進行は 供試体内部で顕著に表れるということになる。 本来,炭酸化反応は各化学種によって進行して いくが,本研究では二酸化炭素の拡散のみにと どまっている。反応によって起こる収縮による 変形挙動を詳細に表すためには,炭酸化反応度 を拡散現象のみで捉える必要があるが、今後の 課題としたい。

図 - 7は供試体中心部のひずみ履歴である。 それぞれ,100%から20%,100%から40%および100%から80%まで50日間乾燥させた場合の 中心部のひずみ履歴である。

本研究では式(3)に示した相対湿度依存型炭酸 化反応度を用いることにより,高湿度下あるい は低湿度下における炭酸化反応の進行の違いを 表現している。100%から20%までの乾燥過程 では,初期において湿度が急激に下がることに より他の乾燥過程に比べて収縮ひずみの増大が 大きく,100%から80%の乾燥過程では湿度の



図 - 7 原点近傍ひずみ履歴

下がりが小さいため乾燥収縮量も小さいことか ら収縮ひずみは徐々に上昇していく。

経過時間 10 日以降,100%から 20%の乾燥過程 はほぼ一定値となる。これは湿度が下がりきっ たことにより乾燥収縮が生じず,炭酸化反応度 も上昇しないため,収縮量が落ち着いたことに よるものである。その後経過時間 25 日付近で 100%から 40%の乾燥過程が最も大きくなる。 炭酸化収縮が最もおこりやすい状態にあるため, この過程の収縮ひずみの増大は炭酸化収縮によ るものである。一方 100%から 80%の乾燥過程 では,乾燥収縮の増大が小さく,また二酸化炭 素の供給がゆっくりであるため,炭酸化収縮量 の増大も小さいものであるが,ゆっくりと収縮 していく。このように乾燥収縮と炭酸化が互い に相対湿度によって収縮ひずみを生じさせ,変 形性状に違いを生じさせていることがわかる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると,以下のように示される。

- (1)著者らが構築した炭酸化収縮と水分量変に 伴う体積変化に関するモデルに対して,精度 向上を目的とした改良を施した。
- (2)炭酸化反応度を相対湿度依存型とすること により、高湿度下および低湿度下における炭 酸化の進行を抑制することができ、定性的に 改良が施された。
- (3)炭酸化の進行によって生じる細孔構造の変化を相対湿度依存型の炭酸化反応度を用いて表現した。細孔構造の変化の詳細な過程が不明であるが,乾燥収縮との複合的な変形挙動に対して改良が施された。
- (4)定量的な評価ができるように実験データとの比較が必要である。

参考文献

- 宮崎慎也,大下英吉:乾湿変化と炭酸化に伴う体積変化による複合劣化に起因する変形性状に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.24,No.1,pp.723-728,2002
- Verbeck, G.J. : Carbonation of Hydrated Portland Cemend, ASTM STP No.205, pp.17-36, 1958
- 3) 日本コンクリート工学協会:炭酸化研究委員 会報告書,1993,4
- Papadakis, V.G., et.al : Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete, ACI Materials Journal, Vol. 188, No.2, pp. 186-196, 1991