

論文 セメント系材料の相対湿度変化を考慮した炭酸化・コンクリート骨格連成解析による変形挙動に関する研究

宮崎 慎也*¹・大下 英吉*²

要旨：コンクリートの炭酸化反応を引き起こす炭酸ガスの拡散と、反応による応力性状について、昨年度著者等が構築したモデルに炭酸ガスの拡散性状に影響を及ぼす水分の拡散を付加し、乾湿変化を受けながらの炭酸ガスの拡散と、反応による応力性状に関するシミュレーションを行った。その結果、乾燥過程および湿潤過程において、応力性状に違いが確認された。

キーワード：炭酸化, 拡散係数, 相対湿度, 炭酸ガス

1. はじめに

社会資本としてのコンクリート構造物には、その存在目的から半世紀以上の長期耐久性が求められる。鉄筋コンクリート構造物の供用期間以内に社会的な耐用年数を迎えてしまうことはまだしも、物理的な耐用年数を迎えてしまうことだけは避けなければならない。近年取り上げられている鉄筋コンクリート構造物の早期劣化問題を考えるだけでなく、現在でも健全に使用できる歴史あるコンクリート構造物にも起こっている中性化による劣化現象を評価する解析モデルの構築, およびシミュレーションは今後必要とされるものであろう。

従来の中性化に関する研究は、炭酸ガスの拡散係数或いは中性化深さに関することに重点が置かれていた。しかしながら炭酸化により組織が緻密になるばかりか収縮も生じるわけであり、特にコンクリートが乾燥しながら炭酸化した場合の炭酸化収縮量が 0.1% を超えるという報告例がある¹⁾。このような実測から推測されることは、従来乾燥収縮によって発生していたひび割れの中には、中性化による収縮すなわち炭酸化収縮も大きく関与していると言うことであり、炭酸化収縮によるコンクリートの変形性状或いは応力性状を詳細に評価することが急務である。

このようなことから、稲岡ら¹⁾は炭酸ガスの拡散、中性化と変形の連成解析手法の確立およびシミュレーションを行い、応力性状に及ぼす炭酸化反応の影響は非常に大きいと指摘している。しかしながら稲岡らの研究では、コンクリート断面内の湿度分布が一定状態に対して適用可能であり、乾燥を受けながら中性化した場合のコンクリートの変形, 或いは湿潤を受けながら中性化した場合のコンクリートの変形性状というようにコンクリート断面内の相対湿度が時々刻々と変化する場合の変形性状の評価が不可能である。

そこで本研究では、コンクリート断面内の相対湿度が時々刻々と変化する場合の炭酸化によるコンクリートの変形性状を評価可能なモデルの構築を目的として、稲岡らの炭酸化・変形連成解析手法をコンクリート内部の相対湿度依存型とした相対湿度依存型炭酸化・変形連成解析手法への拡張を行った。炭酸化・変形連成解析手法を相対湿度依存型とすることにより、コンクリートの乾燥過程, 或いは湿潤過程の変形性状が評価可能となるわけである。

2. 相対湿度依存型炭酸化・変形連成解析手法の確立

* 1 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

* 2 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

相対湿度依存型の炭酸化・変形連成解析手法は、炭酸ガスの拡散係数がコンクリート内部の相対湿度および細孔径分布に大きく依存するため、水分の拡散方程式、炭酸ガスの拡散方程式および力の釣合い式を同時に満足しなければならない。

2.1 水分の拡散方程式

本研究では炭酸化反応を相対湿度に依存させるため、コンクリート内部での水分拡散を考える。セメント系材料中での微細空隙壁面への吸着・脱着を考慮した水分の拡散モデルは氏家ら²⁾の研究により式(1)のように示され、これを用いることにした。

$$M \frac{\partial \phi_w}{\partial t} + D \phi_w - C = 0 \quad (1)$$

ここで、M、D、Cは次式とする。

$$M = \int_{V_e} N_e N_e^T dx dy$$

$$D = \int_{V_e} \lambda \left(\frac{\partial N^*}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{\partial N^*}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} \right) dx dy$$

$$C = \frac{2V_0(v_x - v_y)}{r_{\min}} \left[\sum_{k=1}^n \frac{A^k r^{kB+1} e^{-Ar^B}}{\left(k + \frac{1}{B}\right)!} \right] \quad (2)$$

ここで、Mは質量マトリックス、Dは拡散マトリックス、Cは吸脱着項、 ϕ_w は相対湿度、tは時間、 λ は水分移動に関する拡散係数、 V_0 はセメントペースト内の空隙率、 v_x 、 v_y は吸脱着速度、 r は細孔径、 r_{\min} は空隙量が最大となる細孔径、AおよびBは材料定数である。

2.2 炭酸ガスの拡散方程式

反応物質である炭酸ガスの拡散性状を定める。本解析では、炭酸ガスを次式のFickの法則に従って拡散していくものと仮定した。

$$\frac{\partial \phi_{CO_2}}{\partial t} = \text{div}(D_i \text{grad} \phi_{CO_2}) + Ri$$

ここで、 ϕ_{CO_2} は炭酸ガス濃度、 D_i はコンクリートにおける炭酸ガスの拡散係数、 Ri は反応項を示す。式(2)に全ひずみの変化、有効応力変化による固体粒子の変化、炭酸化反応による体積

収縮変化から最終的に式(3)が得られる。

$$-H \bar{\phi}_{CO_2} - W \frac{d\bar{u}}{dt} - S \frac{d\bar{\phi}_{CO_2}}{dt} - df' = 0 \quad (3)$$

ここで、H、W、Sおよびdfは次式とする。

$$H = \int_{\Omega} (\nabla N^T) \lambda_{(\phi_w, \xi_{(h)})} \nabla N d\Omega$$

$$W = \xi_{(h)} \int_{\Omega} N^T m^T B d\Omega$$

$$S = \int_{\Omega} N^T m^T \frac{\partial \varepsilon^{hyd}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \phi_{CO_2}} m N d\Omega + \int_{\Omega} N^T N d\Omega$$

$$df = (1 - \xi_{(h)}) \int_{\Omega} B^T D_s m \frac{\partial \varepsilon^{hyd}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} d\Omega$$

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、 $\bar{\phi}_{CO_2}$ は炭酸ガスの節点濃度、 \bar{u} は節点変位ベクトル、 $\lambda_{(\phi_w, \xi_{(h)})}$ は炭酸ガスの拡散係数、 $\xi_{(h)}$ は炭酸化による空隙率の変化、 ε^{hyd} は炭酸化による体積収縮ひずみ、hは炭酸化反応率である。

炭酸ガスの拡散係数を式(4)に示す。Papadakisの研究³⁾を参考に、炭酸化による空隙率の変化とコンクリート内部における相対湿度の変化を同時に考慮することができる拡散係数を用いた。

$$\lambda(\xi_{(h)}, \phi_w) = 1.64 \times 10^{-6} \cdot \xi_{(h)}^{1.8} \cdot \left(1 - \frac{\phi_w}{100}\right)^{2.2} \quad (4)$$

[m²/sec]

2.3 力の釣合い式

セメントペーストの固体相のみの弾性係数 D_s に炭酸化反応による空隙率の変化を考慮した弾性係数は稲岡らの研究から、式(5)となる。

$$D_T = (1 - \xi_{(h)}) D_s \quad (5)$$

この空隙の変化を考慮した弾性係数を用いることによって、有限要素法によって離散化された力の釣り合い式が式(6)のように与えられる。

$$k_T \frac{d\bar{u}}{dt} - L \frac{d\bar{\phi}_{CO_2}}{dt} - \frac{df}{dt} = 0 \quad (6)$$

ここで、 k_T 、Lは次式とする。

$$k_T = (1 - \xi_{(h)}) \int_{\Omega} B^T D_s B d\Omega$$

$$L = (1 - \xi_{(n)}) \int_{\Omega} B^T D_s \frac{\partial \varepsilon^{hyd}}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \phi_{CO_2}} d\Omega$$

ここで、 k_r 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である。

2.4 相対湿度依存型炭酸化・変形連成解析モデル

相対湿度の節点値 $\bar{\phi}_w$ 、節点変位ベクトル \bar{u} 、炭酸ガスの節点濃度 $\bar{\phi}_{CO_2}$ を未知数として、炭酸化による変形挙動を表現する支配方程式は、水分拡散を表す式(1)、炭酸ガスの拡散を表す式(3)、力の釣り合いを表す式(6)を連成させることにより次式のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} \Delta t D + M & 0 & 0 \\ 0 & -S - \Delta t H & -W \\ 0 & -L & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \bar{\phi}_w \\ \Delta \bar{\phi}_{CO_2} \\ \Delta \bar{u} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta t A - \Delta t D \bar{\phi}_{w(n)} \\ \Delta t H \bar{\phi}_{CO_2(n)} + \Delta t df \\ \Delta t f \end{Bmatrix} \quad (7)$$

このように炭酸ガスによる拡散と変形を相対湿度に依存させながら統一的に表すことのできるモデルが提案された。

3. 乾湿変化を受けるコンクリートの炭酸化による変形性状に関する数値シミュレーション

前章で構築した相対湿度を考慮した相対湿度依存型炭酸化・変形連成解析モデルを用いて、乾湿変化を受けるコンクリートの炭酸化による変形性状に関する数値シミュレーションを行う。

3.1 解析モデルと解析条件

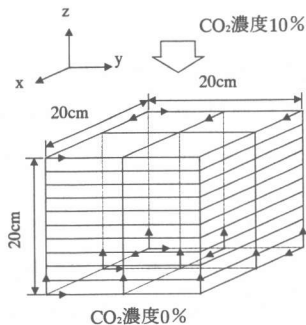


図-1 解析モデル

解析モデルは図-1 に示すように、20cm×20cm

×20cm の立方体形状のコンクリート供試体であり、その上面に濃度 10% の炭酸ガスを与えた。変位に関しては一軸状態、炭酸ガス濃度に関してはモデル底面を 0% とした。炭酸化は供給された二酸化炭素が水に溶解して反応が進行していくとされているが、本研究ではガスとしての二酸化炭素とコンクリートとの反応と仮定した。解析上での諸特性は表-1 に示す通りである。なお水分拡散に関しては、次節に示すことにした。

3.2 解析パラメータ

解析パラメータは、表-2 に示すように、コンクリートの乾燥過程および湿潤過程である。コンクリート内部の相対湿度を初期条件とし、境界条件との差異によって乾燥過程および湿潤過程を仮定した。炭酸ガスの拡散係数は、コンクリートの相対湿度および空隙径に依存する Papadakis の研究に基づくものとした。そして、比較のためにコンクリートの乾燥過程および湿潤過程ともに炭酸ガスの拡散係数が一定値である従来の解析モデルによるシミュレーションも実施した。この際の供試体名を水分拡散未考慮とした。炭酸ガスの拡散係数は相対湿度 50%、空隙率 0.20 の値を用いて式(4)に基づき算出し、 $1.702 \times 10 \text{cm}^2/\text{day}$ となった。

表-1 解析上での諸特性

ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	初期空隙率
20000	0.16	0.20

表-2 解析パラメータ (水分拡散考慮)

解析供試体	初期条件 (%)	境界条件 (%)
乾燥過程	70	30
湿潤過程	30	70

3.3 炭酸化反応と空隙率の時間変化

図-2, 3 に示すグラフは空隙率の時間変化である。記号○, △および▽は、それぞれ供試体の上面部, 中心部および下面部を表わしている。乾燥過程および湿潤過程における炭酸ガスの拡散係数の変化を図-4 に示す。まず、炭酸化初期における炭酸ガスの拡散係数は、乾燥過程に比

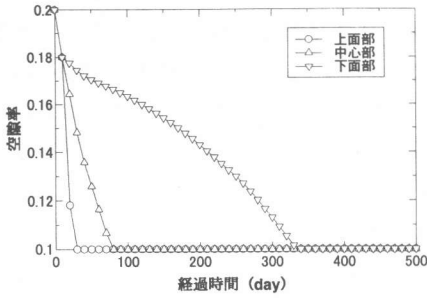


図-2 空隙率履歴(乾燥過程)

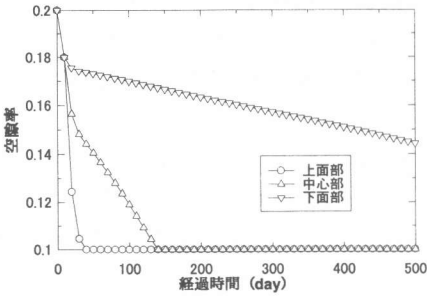


図-3 空隙率履歴(湿潤過程)

べ湿潤過程の方が大きい。これは、初期条件であるコンクリート内の相対湿度が、乾燥過程の方が大きいため、式(4)に従う拡散係数は小さくなることによる。そして、時間の経過とともに乾燥過程では、上部で緩やかな増加を示すことに対して、湿潤過程では、急激な低下を示す。これは、湿潤過程では相対湿度が増加することによるものであり、乾燥過程では、相対湿度の低下と後述する空隙率の低下によるものである。乾燥過程、湿潤過程ともに上部では、反応直後から空隙率が急激に低下することに対して下部に近づくほど空隙率の低下は小さく、乾燥過程の方が湿潤過程に比べて空隙率の低下が早い。これは上述のように、炭酸化反応の領域が広範囲に及ぶことによるものである。

次に乾燥過程では、上部の拡散係数は下部に比べて大きいことに対して、湿潤過程では、全く逆の傾向となっている。例えば、経過時間200日の時点において、乾燥過程では上部の拡散係数は中心部の約5倍と非常に大きい。さらに、上部の拡散係数は湿潤過程に比べ乾燥

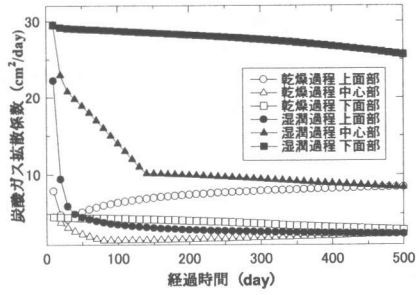


図-4 炭酸ガス拡散係数の履歴

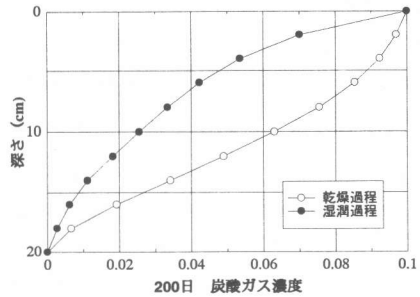


図-5 炭酸ガス濃度分布

過程の方が大きい。このような拡散係数の深さ方向による大小関係の相違は、乾燥過程では上部の相対湿度が低下することに対して、湿潤過程では逆に増加することによるものである。したがって、図-5に示す経過時間200日の炭酸ガス濃度分布から、乾燥過程では表面から十分な炭酸ガスが供給され、中心部へ移動することにより、表面部と中心部の濃度差は約3.5%と比較的小さい。湿潤過程では極めて僅かな炭酸ガスが供給されることにより、濃度差は約7.5%と比較的大きい。

3.4 ひずみ履歴に関する評価

図-6は乾燥過程、湿潤過程でのx方向ひずみの時間履歴を上部、中心部、下部について示したものである。

時間の経過とともに炭酸化反応の進行により収縮ひずみは増大していき、本解析範囲内におけるひずみ量は乾燥過程の方が湿潤過程よりも大きいことがわかる。このような定性的現象は、実現象と同一であり、本解析モデルの適用性が評価される。しかしながら、本解析モデルには

乾燥収縮の影響が考慮されていないため、実験結果に対する本解析モデルの定量的適用性評価は、今後の課題である。

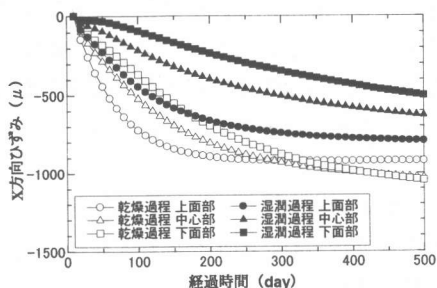


図-6 X方向ひずみ履歴

3.5 乾燥過程・湿潤過程における応力性状

(1) 応力分布

図-7 に示す乾燥過程では、炭酸化初期である炭酸化材齢 50 日において、引張応力は上面部で最大となり深さとともに低下している。このような断面内の応力分布は、図-4 に示すように炭酸ガスの拡散係数が高相対湿度の影響により小さいため、上面部の炭酸化収縮を下部のコンクリートが拘束することによるものである。そして、炭酸化材齢の経過とともに断面内の引張応力は徐々に圧縮側に移行する。これは、3.3 節に示したように炭酸化領域が広範囲に及ぶことにより図-6 に示す断面内のひずみ分布の差異が小さくなることによるものである。したがって、図-9 に示す応力履歴は、各断面部分ともに徐々にゼロに漸近する傾向を示す。しかしながら、本解析結果は変位に関して一軸状態を仮定した部材断面内のひずみ分布すなわち内部拘束的な応力である。すなわち、図-6 に示す全断面とも比較的大きな炭酸化収縮ひずみが、鉄筋或いは岩盤により拘束された場合には、非常に大きな引張応力が生じることになるわけである。図-7 の応力分布からひび割れ性状の予測を行うと、初期に表面ひび割れが発生するものと考えられる。

一方、図-8 に示す湿潤過程では、乾燥過程とは異なり炭酸化材齢の経過とともに中心部では引張応力、下面部では圧縮応力が大きくなる

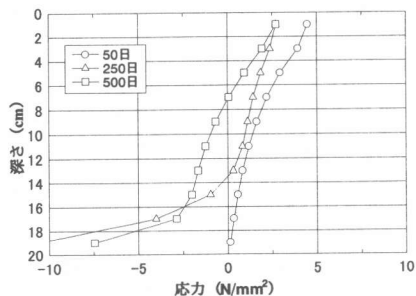


図-7 応力分布 (乾燥過程)

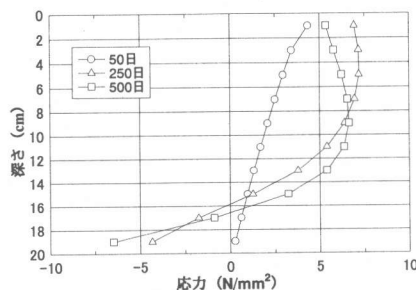


図-8 応力分布 (湿潤過程)

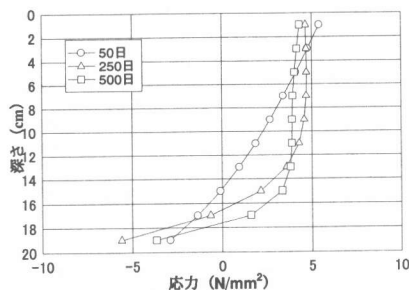


図-9 応力分布 (水分拡散未考慮)

傾向を示している。これは、上述した図-5 に示すように中性化領域が上面近傍で卓越していることによるものである。したがって、初期に上面部において大きな引張応力が発生した後、徐々にその引張応力が内部に進行するため、ひび割れ性状は徐々に内部に進行するものと考えられる。

(2) 応力履歴

図-10, 11 および 12 は、それぞれ本モデルによる乾燥過程、湿潤過程および水分拡散未考慮での応力履歴である。各図とも、応力履歴性状は上面部および中心部において引張応力、下面

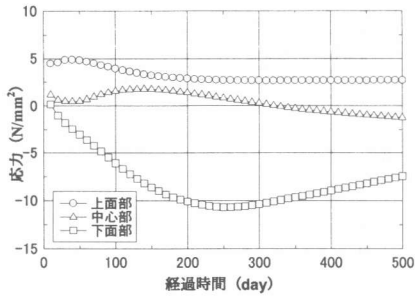


図-10 応力履歴 (乾燥過程)

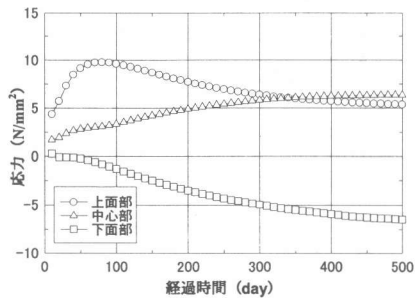


図-11 応力履歴 (湿潤過程)

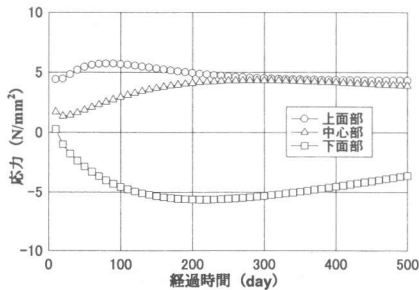


図-12 応力分布 (水分拡散未考慮)

部において圧縮応力が発生している。特に本モデルによる湿潤過程における応力履歴は、水分拡散未考慮の結果とほぼ同じような性状を示しており、反応初期において、上面部で引張応力が大きく、中心部においても引張応力が発生している。これは、図-4 に示す拡散係数の履歴からわかるように、炭酸ガスが初期の段階で広範囲に拡散し反応することによるものであり、時間の経過とともに増加する。一方、乾燥過程においては図-4 の拡散係数履歴に示すように、拡散係数は小さいものの、全断面においてほぼ同じ値となり、炭酸化反応がほぼ全断面で生じ

ることになる。この際、拡散係数の僅かな差異により、図-6 に示すひずみ分布が発生し、その分布により比較的小さな応力性状を示すことになる。しかしながら、本モデルに乾燥収縮の影響を考慮すると、上面部の引張応力および下面部の圧縮応力は定量的観点から推測すると、より大きな値となるものと思われる。

4. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると、以下のよう示される。

- 1) 炭酸化と変形および相対湿度との連成モデルの構築が行われた。
- 2) 炭酸化反応初期において、炭酸化面が引張応力状態となり、下端近傍は圧縮応力状態となり湿度条件によりその過程が大きくことなる。
- 3) 空隙率の変化は、その場所での炭酸化初期で急激に小さくなりその過程は湿度に依存する。
- 4) 応力性状に及ぼす炭酸化反応の影響は非常に大きく、湿度に依存する。
- 5) 炭酸化によるひずみは湿潤過程よりも、乾燥過程の方が大きい。
- 6) 本モデルの適用性評価には、今後の実験結果との比較検討が必要である。

参考文献

- (1) Verbeck, G.J. : Carbonation of Hydrated Portland Cement, ASTM STP No. 205, pp.17-36, 1958
- (2) 稲岡 利秀・大下 英吉 : セメント系材料の中性化・変形連成解析による変形挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第22巻, 第2号, pp.769-774, 2000
- (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
- (4) Papadakis, V.G., et.al : Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete ACI Materials Journal, Vol.8, No.2, pp.186-196, 1991