

論文 透気特性に基づくコンクリートの空隙構造同定と熱力学連成解析による耐久性予測

秋岡 洋平*1・石田 哲也*2・堀切 寛*3

要旨: 数値解析手法を用いて耐久性予測を行う場合、コンクリートの配合や養生・環境条件を適切に入力する必要がある。ただし既設構造物を対象とした場合、これらの情報を建設当初にまで遡って特定することが一般に困難である。本研究では、硬化コンクリートの品質を示す指標として透気特性に着目し、数値解析への入力情報として利用することを試みた。その結果、制御された実験室環境ではあるものの、配合条件や養生条件を入力せずとも、透気係数から推定されるセメント硬化体の空隙構造ならびに水酸化カルシウム量を入力することで、中性化進行を良好な精度で追跡可能であることを示した。

キーワード: 透気係数, 熱力学連成解析, 空隙構造, 中性化, 耐久性指標

1. はじめに

コンクリート構造物の耐久性は、コンクリートの配合、使用材料の種類、養生などに代表される施工条件、および供用期間中の環境条件に左右される。ここで、既に経年を受けた既設構造物を対象として、現時点から将来の劣化予測あるいは残存寿命を数値解析などにより予測を試みる場合、使用されたコンクリートの配合や施工条件あるいは供用中の環境条件を同定することが一般に困難である。

透気係数は、耐久性に強く関連するコンクリート内での物質移動特性を表す有効な指標である。塩化物イオン浸透や中性化進行は、透気係数を始めとする物質移動特性を示す指標との間に強い相関があることが知られている。また海外では実構造物の品質評価の手法の一つとしてトレント法などの非破壊試験が提案されており¹⁾、測定される透気係数から構造物内部の硬化コンクリートの品質がクラス分けされている。また透気係数などの材料特性を耐久性指標 (Durability Indicator) として定義し、構造物の耐久性や残存寿命を予測する先進的なフレームも提案されるに至っている²⁾。

著者らが所属する東京大学コンクリート研究室では、任意の環境条件下における各種コンクリート材料・構造の性能予測を目的に、熱力学連成解析システム (DuCOM) の開発を進めている³⁾。本研究では、実験で得られる透気係数の測定値を用いて空隙構造を表わす情報に変換し、それらを解析上の入力値とする事で構造物の性能予測を行う手法を提案する。これにより、実構造物等において実際に使用されたコンクリートの配合や養生・施工、ならびに環境履歴を知ることが困難なものであっても、透気係数から得られる空隙構造を入力値

とすることで、耐久性に関連する現象を数値解析により予測することが可能となる。与えられた配合や養生条件から水和反応、細孔構造形成、水分移動の連成を逐次精密に解くのではなく、硬化コンクリートの微細構造を出発点とした解析方法の提案である (図-1)。

まず様々な配合・養生環境下において、透気係数に関して実験値と解析値を比較することで、透気モデルの予測精度に関する検証を行う。続いて、透気係数という一指標から、毛細管空隙およびゲル空隙の空隙率と空隙分布の推定手法について提案すると共に、硬化体の空隙構造を入力値とした中性化進行予測を試みる。

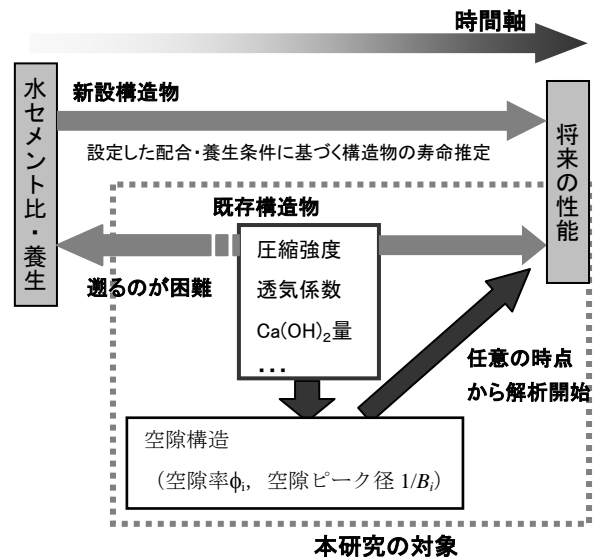


図-1 熱力学連成解析の概要と本研究の対象

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻修士課程 (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻修士課程

2. 熱力学連成解析システム

2.1 熱力学連成解析モデル

熱力学連成解析システムは、水和反応、空隙構造形成、水分分布の各事象の連成計算を基礎とし、供用期間中の炭酸化進行⁴⁾、塩化物浸透、鋼材腐食などの長期劣化に関わる現象を追跡するものである。物質移動性を示すものとして、空隙構造に立脚した熱力学モデルから水分逸散量や透気係数が算出されるが、これまでに様々な条件に対して解析モデルは概ね良好に現象を追跡できることが示されている⁵⁾。

2.2 本研究の基盤となる解析モデル

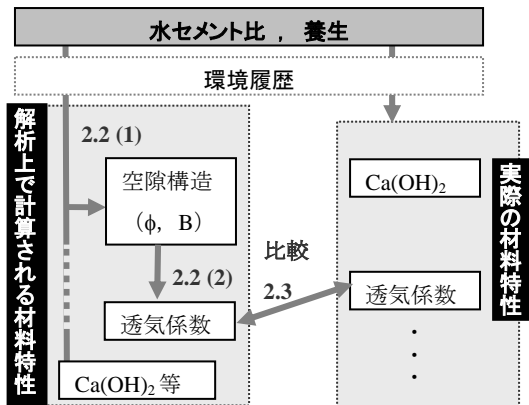


図-2 本研究で使用する解析モデルの全体像

ここでは、本研究で主に使用する解析モデルについて紹介する(図-2)。はじめに、物質移動性をはじめとする様々な材料特性に影響を及ぼす空隙構造モデルを紹介する。

(1) 空隙構造モデル

解析モデルにおいては、空隙の寸法・形態に応じて毛細管空隙、ゲル空隙、層間空隙に分類し、それらの集合として全体系での空隙構造を表現している。

$$\phi(r) = \phi_{cp} V_{cp}(r) + \phi_{gl} V_{gl}(r) + \phi_{lr} \quad (1)$$

ここで、 ϕ_{cp} 、 ϕ_{gl} 、 ϕ_{lr} ：それぞれ毛細管空隙、ゲル空隙、層間空隙の空隙率である。また $V_{cp}(r)$ 、 $V_{gl}(r)[m^3/m^3]$ はセメント硬化体中の毛細管空隙及びゲル空隙に対し細孔径分布を規定する関数であり、それぞれの空隙 i に対し、以下の様に定義できる。

$$V_i(r) = 1 - \exp(-B_i r) \quad (0 \leq V_i(r) \leq 1) \quad (2)$$

ここで、 $B_i[1/m]$ ：関数形状を決定するパラメータであり、その逆数は対象とする空隙のピーク径となる。これは毛細管空隙あるいはゲル空隙を円筒状と仮定した際の表面積の値 S より、次式にしたがって求めることが出来る。

$$S = 2\phi \int r^{-1} dV = 2\phi \int_{r_{min}}^{\infty} B \exp(-Br) d \ln r \quad (3)$$

ここで、 r_{min} は考慮する最小空隙半径である。

(2) 透気モデル

異なる寸法を有する空隙中を通過する物質の流束を、空隙分布モデルを用いて積分することにより、透過する物質の密度や粘性に影響されない材料固有の値である固有透過係数は、以下の式のように求めることができる。

$$k_{in} = \frac{1}{8} \left(\int_0^{\infty} r dA \right)^2 \approx \frac{\phi^2}{50} \left(\int_0^{\infty} r dV \right)^2 \quad (4)$$

ここで、 k_{in} ：固有透過係数[m²]である。しかし、実際の計測では透過する物質によって異なる固有透過係数が求まることが示されている⁶⁾。本研究では透気試験に基づく固有透過係数を扱うことより、これを固有透気係数と呼ぶこととする。

実験で得られる透気係数と固有透気係数の関係は、使用する気体の密度ならびに粘性を用いて、以下のように表現される。

$$k_{measure} = \frac{\eta}{\rho} k \quad (5)$$

ここで、 k ：実験で得られる透気係数[m/s]、 $k_{measure}$ ：測定値から計算される固有透気係数[m²]、 η ：気体の粘性[N/m²・s]、 ρ ：気体の密度[N/m³]である。

式(2)を式(1)に代入し、毛細管空隙とゲル空隙が物質移動に関与するとして式(4)を解くことで、透気係数は空隙構造を示すパラメーター (ϕ_i , B_i) から以下のように求められる(式(6))。

$$k_{in} \approx \frac{\phi_{gl} + \phi_{cp}}{50} \cdot \left(\frac{\phi_{gl}}{B_{gl}^2} + \frac{\phi_{cp}}{B_{cp}^2} \right) \quad (6)$$

式(6)に示されているとおり、透気の経路としてゲル空隙の空隙率 ϕ_{gl} 、および毛細管空隙の空隙率 ϕ_{cp} を与えている。換言すれば、ゲルおよび毛細管空隙の全てが透気の経路となりうることを仮定しており、実験条件で言えば絶乾状態に相当する。不飽和空隙を対象とする場合、空隙率に各々の飽和度を乗ずればよいが、今回の検討の対象は後述するように絶乾状態のものを対象としたことから、以上の式を用いることとした。

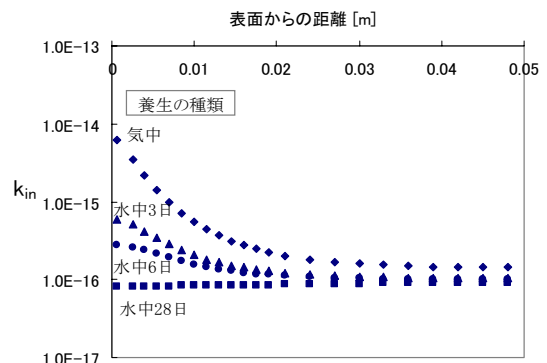


図-3 透気係数の算定値 (28日経過時, W/C55%)

コンクリートは養生等の影響を受け、特に早期脱枠など養生が不十分の場合には、水和が阻害されることで表面付近の空隙構造は粗大化する。

図-3は、解析の一例として、養生条件を水中3・6・28日、気中28日と変化させた場合の28日後透気係数の算定値を場所ごとにプロットしたものである。水中3・6日はその後28日経過時まで気中養生とした。同じ供試体内においても、養生の種類によって、透気係数の値が表面からの距離によって異なっている様子が表現されていることが分かる。

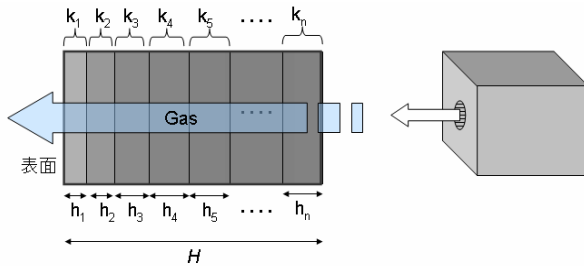


図-4 場所によってことなる透気係数の平均化

実験で計測される透気係数は、有限の厚みをもった供試体の平均的な透気性を示している。一方、FEMによる数値解析では、要素のガウス点ごとに透気係数が算出される。このとき、実験での測定値と比較するために、場所ごとに異なる透気係数を空間平均化する必要がある。本研究では、通過物質の流量が一定というダルシー則に基づいて、透気係数を平均化する手法を用いた(図-4)。厚さHの供試体から測定される透気係数を k_{int} とすると以下の通りになる。

$$k_{int} = \frac{H}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{k_i}} \quad (7)$$

ここで、 k_{int} : 供試体の固有透気係数[m²], h_i : 各箇所の厚さ[m], k_i : 各箇所での透気係数[m²]である。式(7)は h_i を十分小さくすることで、得られる解は収束するが、今回は表面付近の領域に対して1mmと設定した。

2.3 異なる養生・配合下での透気係数の比較検討

本節では2.2で記述した空隙構造モデルから透気係数を算出する解析手法を用いて、解析値と実験結果との比較を行う。

ここではDhirらが行った実験で、様々な配合と養生の下で測定した透気係数を解析の比較対象として取り上げ、熱力学連成解析における透気モデルの精度について検証する。実験では、水セメント比40%から70%までの5種類の配合(表-1)を持つコンクリートに対して、それぞれ1面に対して4種類の養生(表-2)を行い、105℃で絶乾状態に置いた後、直径100mm、厚さ50mm

のサイズにおいて透気係数を測定している。

解析では、所定の初期配合と養生条件をそれぞれ入力し、解析によって求められる空隙構造パラメータを式(6)に代入することで透気係数を算出した。

表-1 コンクリートの配合

No.	W/C	単位量 (kg/m ³)	
		C (OPC)	W
N1	40	490	195
N2	47	400	190
N3	55	340	185
N4	62	300	185
N5	70	265	185

表-2 脱型後のコンクリートの養生 (28日まで)

- E1 水中養生 (20℃)
- E2 6日水中後、気中 (20℃, RH55%)
- E3 3日水中後、気中 (20℃, RH55%)
- E4 気中 (20℃, RH55%)

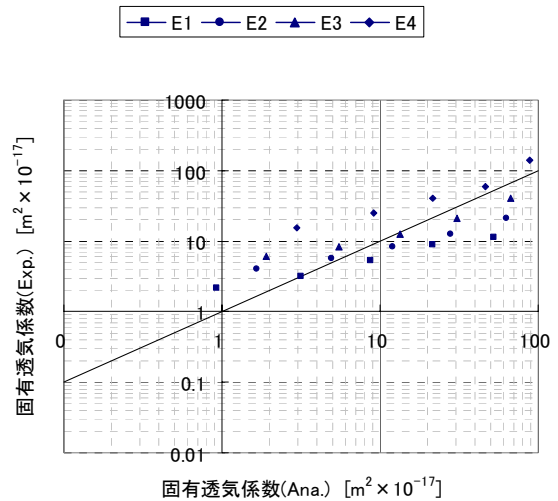


図-5 固有透気係数について実験値と解析値の比較

解析値と実験値の比較を図-5に示す。横軸が解析、縦軸が実験によって求められる固有透気係数である。総じて良好に実験結果を再現できていることが分かる。特に、異なる水セメント比および養生条件に対して、透気係数の変化が良好に再現されている。しかしながら、同一の養生条件に対して相互に透気係数を比較した場合、両者の相関関係を示す直線の勾配がやや小さく、水セメント比が小さい場合は透気係数を過少、水セメント比が大きい場合は過大評価をする傾向があることが分かった。また同一の配合条件に対して見た場合、養生の変化による透気係数の変化も適切に評価できていることが

分かった。

固有透気係数の小さい領域では実験値と解析値おいての多少の相違が見られた。一つの原因として、物質移動と空隙連結性などの要因が過小評価されていることが考えられる。今回の研究では透気係数の精度が核となるため、特に水セメント比40%以下の供試体を対象とする場合、今後必要に応じてモデルの高度化が必要になると考えられる。

3. 透気係数を指標とした熱力学連成解析

3.1 透気係数の解析への適用

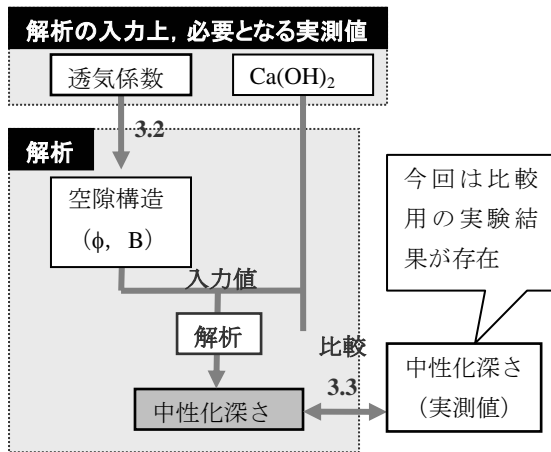


図-6 透気係数から中性化進行予測の流れ

熱力学連成解析を用いて解析を行う際には、コンクリートの配合・養生条件や、供用期間中の環境条件を入力する。しかしながら、冒頭で述べたように、既設構造物を解析対象に設定した場合、これらの情報を特定することが困難であることが多い。

ただし本解析システムは、硬化後のコンクリートの空隙構造を既知の固定値として、数値解析を行うことも可能である。塩化物浸透解析を行う場合には各空隙率 ϕ_i とその空隙分布パラメータ B_i 、また中性化進行解析を行う際には、それらの空隙情報に加えて水酸化カルシウム量を与えればよい。前章までにおいて熱力学連成解析システムが透気係数を良好に表現できていることが確認された。本章では、図-6の流れにより、まず実験で得られる透気係数から、解析上において物質移動性を計算するのに必要である各空隙率 ϕ_i とその空隙ピーク径 B_i を導き出す手法について検討する。これにより、初期材料や養生が分からなくても、硬化体の微細構造を出発点とした予測が可能となる。本論文では一例として、実際に算出された空隙構造を入力し、中性化深さの進行が所定の精度で予測可能か否か検討することとする。

3.2 透気係数からの空隙構造同定

式(6)に示されるように、透気係数という一つの指標か

ら未知数である4つの空隙パラメータを求めるためには、他の条件や仮定が別途必要となる。以下ではそれについて述べる。

図-7は、前章で示した様々な初期配合・養生条件において、毛細管空隙とゲル空隙に対して取り得る ϕ および B の範囲を示したものである。図示される通り、ゲル空隙と毛細管空隙の空隙ピーク径($=1/B_i$)は大きく異なり、1オーダー以上の差を有する。従って、式(6)における ϕ_{cp}/B_{cp}^2 の項に対して、 ϕ_{gl}/B_{gl}^2 が十分小さく無視できるため、式(7)に示される固有透気係数の測定値と空隙構造との関係は、以下のように近似することが出来る。

$$k_{measure} \approx \frac{\phi_{gl} + \phi_{cp}}{50} \cdot \frac{\phi_{cp}}{B_{cp}^2} \quad (8)$$

また図-7より、ゲル空隙率は配合や環境条件や材齢の経過によって変化するが、概ね0.1前後の値をとることが分かる。ゲル空隙はC-S-Hゲルに内包される空隙などであるため、今回のように普通セメントのみを使用し、かつ極端な温度履歴を受けない場合には、モデルの算定値に変化が見られない。すなわち、ゲル空隙率 ϕ_{gl} は0.08~0.12の間であり、毛細管空隙の変化に比べて変動が小

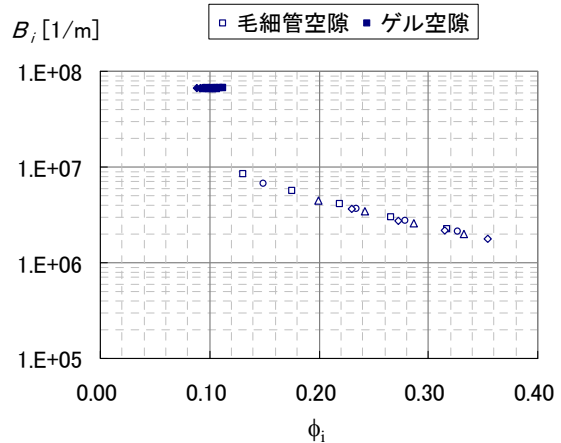


図-7 毛細管・ゲル空隙それぞれの ϕ と B の関係

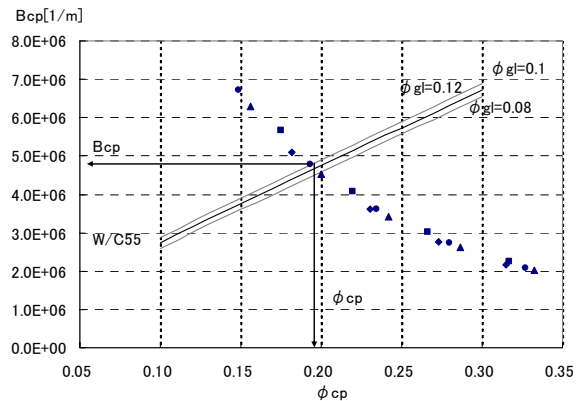


図-8 ϕ_{cp} と B_{cp} の関係とその同定手法

さい。また図-8の実線は、式(8)に基づき得られた関係式であり、ある透気係数(実験値)をとる場合において、 ϕ_{gl} として0.08, 0.10, 0.12を与えたものである。また点集合は、図-7に示した毛細管空隙における ϕ と B の関係をプロットしたものである。点集合と実線の交点がある透気係数を満たす ϕ_{cp} と B_{cp} を示していることになる。図示されるとおり、 ϕ_{gl} の変化は算出される ϕ_{cp} , B_{cp} の値に対してあまり影響しないことが分かる。毛細管空隙が物質移動の主な経路となっていることを示しているのである。そのため今回の検討においては、第一次近似として $\phi_{gl}=0.10$ の一定値を与えた式(9)。これによって、透気係数を得ることが出来れば、物質移動現象や耐久性を支配する毛細管空隙の空隙構造を同定することができるのである。

$$k_{measure} \approx \frac{0.1 + \phi_{cp}}{50} \cdot \frac{\phi_{cp}}{B_{cp}^2} \quad (9)$$

3.3 中性化解析結果

はじめに、コンクリートの配合、養生条件などを実験に即して入力する従来の解析を行い、中性化進行の精度をまず検証する。続いて、本論文で提案する手法により解析結果の検討を行う。前節の議論に基づき同定した空隙構造を入力条件として、中性化進行の予測を試みるものである。Dhirらは前述の透気係数の測定に加えて、同一条件下での中性化深さについても検討している⁹⁾。配合は表-1、養生は表-2を参照されたい。CO₂濃度4%、温度20°C、湿度50%において中性化促進試験を行っている。なお、入力として必要となる水酸化カルシウム量については、配合や養生条件から別途解析により算定される水酸化カルシウム量(365日経過時)を入力条件として用いた。実際の適用にあたっては入力値としての水酸化カルシウムを同定することが困難であることも予想されるため、水酸化カルシウム量の仮定値が解析に与える影響についても検討する。

(1) 従来手法による解析結果

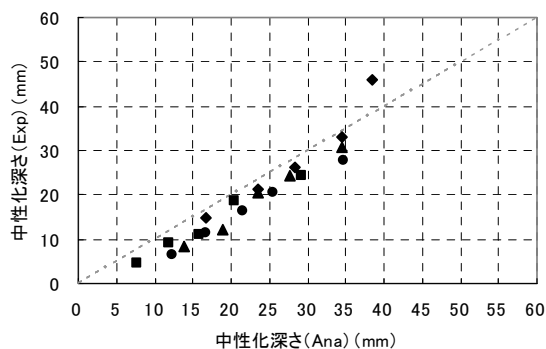


図-9 通常解析による算出される中性化深さ

まず、初期配合と養生条件を入力し、打設時からのコンクリートの熱力学現象の連成を逐一解いていく通常の解析手法について検討する。実験結果と解析結果の比較を図-9に示す。図示されるとおり、実験において測定された中性化深さを良好に追跡できていることが分かった。

(2) 透気係数から推定される空隙構造を用いた解析結果

次に、透気係数の測定結果から同定される空隙構造を用いて、任意の時点を出発点とした解析手法の精度について検証する。ここでは水酸化カルシウム量の情報は実験では得られていないので水酸化カルシウム量に関しては(1)の従来解析で算出された値を使用した。

図-10に示されるように、総じて良好な結果が得られているが、水セメント比が低くなるにつれて解析上で計算される中性化深さが若干大きめに出る傾向があることが分かった。水セメント比40%付近での透気係数の算出値と実験値との間の誤差が比較的大きかったことが原因と考えられる。

以上の結果から中性化現象は空隙構造と水酸化カルシウム量に大きく依存しており、両者に基づく数値解析の有効性が示唆された。同定するのが困難であることの多い初期配合や環境履歴が分からなくても、任意の時点における透気係数と水酸化カルシウム量という材料固有の情報を得ることが出来れば、その後の耐久性予測を行うことが可能となったといえる。

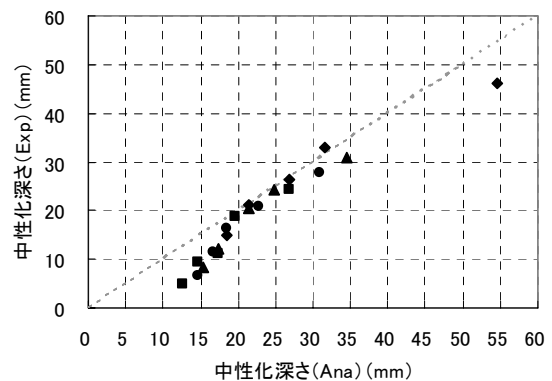


図-10 同定された空隙構造に基づく中性化解析結果

(3) 水酸化カルシウム量の影響

(2)の解析においては、水酸化カルシウム量については、実験条件である配合・養生条件を与えた解析により別途求めた値を使用している。ただし、本手法を実際に適用する場合、水酸化カルシウム量が今回の場合のように精度良く同定可能であるとは限らない。従って、水酸化カルシウム量が中性化進行に対してどの程度影響を与えているか検討を行う。水セメント比40%(N1)、および70%(N5)での水酸化カルシウム量はそれぞれ、98.6,

55.9[kg/m³]と計算され、それぞれ今回の解析での最大・最小値に相当する。ここでは感度解析として、配合 N3の全ての養生条件に対して、最大・最小である各々の水酸化カルシウム量を入力値として解析を実施した。また、最も中性化の進行が遅い N1 (養生 E1) と、一番速い N5 (養生 E4) に対しても異なる水酸化カルシウム量を入力値としての解析を行った。

図-11 に示されるとおり、水酸化カルシウム量が中性化に与える影響は、中性化が早い供試体ほど大きいことが分かる。ただし、水酸化カルシウム量が 55.9～98.6[kg/m³]という今回試算された最大値と最小値を入力した範囲での議論であるため、別途水酸化カルシウム量をより少ない誤差で同定することができれば、実用上十分な精度で中性化進行の予測が可能となると考えられる。

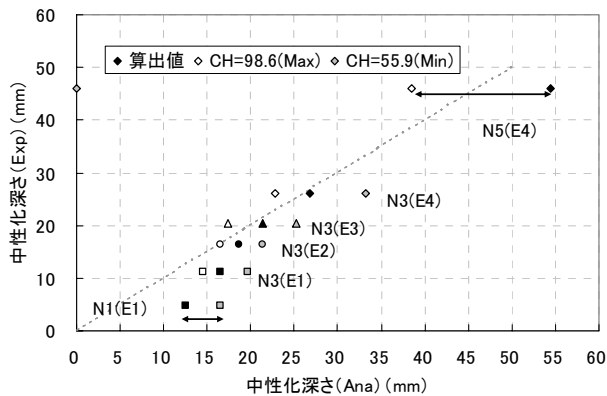


図-11 水酸化カルシウム量を変えた時の中性化解析

4. まとめ

熱力学連成解析モデルを用いた透気係数を実験値と比較した結果、様々な配合や養生条件に対して良好な精度で追跡できていることが分かった。その結果に基づき、実験で得られる透気係数から、セメント硬化体の空隙構造を同定する方法を提案した。さらに、透気係数から得た空隙構造と別途算定した水酸化カルシウム量を入力することで、中性化進行過程が追跡可能であることを示した。

今後、トレント法などの非破壊試験により得られる透

気係数を活用して、コンクリートの空隙構造を同定することが出来れば、本提案手法を活用することで任意の時点を出発点とした将来予測が可能になると思われる。非破壊試験と数値解析システムを融合させることによって、初期の配合や養生条件などの情報が利用できなくても、構造物の性能や残存寿命を予測することが可能になると考えている。

参考文献

- 1) Torrent, R., : A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site, *Materials and Structures*, vol.25, pp.358-365, 1992
- 2) Baroghel-Bouny, V.,: DURABILITY INDICATORS : RELEVANT TOOLS FOR PERFORMANCE-BASED EVALUATION AND MULTI-LEVEL PREDICTION OF DURABILITY, *Performance Based Evaluation and Indicators for Concrete Durability*, RILEM Proceedings PRO 47, pp.3-30, 2006
- 3) Maekawa, K., et al.: MODELLING OF CONCRETE PERFORMANCE, E&FN SPON, 1999
- 4) Ishida, T., Maekawa, K., Soltani, M., :Theoretically Identified Strong Coupling of Carbonation Rate and Thermodynamic Moisture States in Micropores of Concrete, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 2, No. 2, pp.213-222, 2004
- 5) 半井健一郎, 石田哲也, 李春鶴, 三浦廣高: 異なる養生下での各種コンクリート材料の空隙構造変化に基づく物質移動解析: コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.723-728, 2007
- 6) R. K. Dhir, P. C. Hewlett, Y. N. Chan: Near surface characteristics of concrete: intrinsic permeability, *Magazine of Concrete Research*, Vol.41, No.147, pp.87-97, 1989
- 7) R. K. Dhir, P. C. Hewlett, Y. N. Chan: Near-surface characteristics of concrete: prediction of carbonation resistance, *Magazine of Concrete Research*, Vol.41, No.148, pp.137-143, 1989