

養生条件によるコンクリートの組織変化と 中性化を支配する細孔径の評価

郭度連¹・宇治公隆²・國府勝郎³・上野敦⁴

¹学生会員 工修 東京都立大学大学院 博士課程 工学研究科土木工学専攻
(〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

E-mail:kwakdoyeon@hotmail.com

²正会員 工博 東京都立大学大学院 助教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

³フェロー会員 工博 東京都立大学大学院 教授 工学研究科土木工学専攻 (同上)

⁴正会員 東京都立大学大学院 助手 工学研究科土木工学専攻 (同上)

コンクリートの細孔構造は、圧縮強度、塩化物イオン浸透性、中性化進行速度、乾燥収縮等の品質特性に影響を及ぼし、構造物の耐久性を支配する。また、コンクリートは一般に若材齢において脱型が行われ、外部環境に曝されるので、コンクリートの表層と内部では、細孔構造は異なることになるものと考えられる。そこで本研究では、養生条件の相違による細孔構造の深さ方向の変化と細孔構造に支配されると考えられる圧縮強度及び中性化進行速度について検討した。その結果、中性化進行速度に影響を及ぼす細孔径は40nm以上の細孔量であることがわかった。また、養生日数、養生方法等の養生条件に関わらず、細孔構造により、中性化進行速度が評価できる可能性があることがわかった。

Key Words : *compressive strength, carbonation speed, curing condition, pore size distribution, pore volume*

1. はじめに

コンクリートは、セメントの種類、配合条件、養生方法、養生期間等によって異なる細孔構造を有する。特に、コンクリート構造物が所要の強度及び耐久性を発揮できる緻密な構造を持つためには、水和進行過程の初期段階で十分な養生が必要である。

土木学会コンクリート標準示方書では、湿潤状態に保つ期間として、普通ポルトランドセメントの場合5日間以上、早強ポルトランドセメントの場合3日間以上、高炉セメントやフライアッシュセメントの場合7日間以上を標準としている¹⁾が、多くの場合、示方書の規定養生日数が守られているとは言い難いのが現状である。一般に、水和の途中にある若材齢において脱型が行われ、環境の温度および湿度の条件下に曝されることになり、コンクリートの表層部と内部の組織構造も異なることになる^{2),3)}。また、養生方法および養生期間によってもコンクリートの細孔構造は異なるものになる⁴⁾。しかしながら、コンク

リートの品質特性を支配する細孔構造の面から養生の影響を検討した研究は数少ない。

本研究では、コンクリートの性質が、その細孔構造によって決定されるという認識のもとに、養生条件の相違による強度発現および中性化の性状を調べるとともに、使用セメントの種類および養生条件の相違による細孔構造の深さ方向の変化について考察した。

従来から中性化による細孔構造の変化に関する研究は数多く行われているが^{5),6)}、中性化に影響を与える細孔径・細孔構造に関する研究はほとんどない。コンクリートにおける炭酸ガスの拡散浸透は、毛細管空隙の存在に依存する。したがって、中性化の進行メカニズムに支配的な影響を与える細孔径が存在するということが、容易に推察できる。

本研究では、中性化に影響を及ぼす細孔径の評価及び細孔構造による中性化進行速度の評価を目的として、養生条件の異なる7種類のコンクリートの中性化促進試験並びに細孔径分布の測定を行った。

表-1 使用材料

材料	種類	品質
結合材 (B)	普通ポルトランドセメント(OP)	密度 : 3.16g / cm ³ , 比表面積3320cm ² /g
	早強ポルトランドセメント(HP)	密度 : 3.14g / cm ³ , 比表面積4470cm ² /g
	高炉スラグ微粉末(BFS)	密度 : 2.91g / cm ³ , 比表面積4160cm ² /g
細骨材	奥多摩産砕砂+富津産山砂	表乾密度 : 2.63g / cm ³ , 吸水率1.47%, 実積率64.6%, F.M2.62
粗骨材	奥多摩産砕石	表乾密度 : 2.65g / cm ³ , 吸水率0.73%, 実積率61.6%, F.M6.79, 最大寸法20mm

表-2 コンクリートの配合

記号 ^(注)	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	BFS	S	G
OPC	50	44.2	171	342	0	786	998
HPC	50	44.2	171	342	0	785	997
BFS	50	44.2	171	171	171	780	991

注) OPC : 結合材としてOPを使用, HPC : 結合材としてHPを使用.
BFS : 結合材としてOPとBFSを質量比50 : 50で混合して使用.

2. 実験概要

(1) 配合および養生条件

本研究で使用した材料を表-1に, コンクリートの配合を表-2に示す. コンクリートは3水準で, 単位結合材量を342kg/m³, 水結合材比を50%の一定とし, 高炉スラグ微粉末の置換率は50%とした. 目標スランプは8cm, 空気量は4.5%とした.

供試体は, 打設後24時間で脱型し, 所定の養生を開始した. 図-1に養生方法を示す. 養生日数は28日を基本として, OPCの場合, 28日気中(28A), 3日, 5日, 7日水中養生後28日まで気中(3W28, 5W28, 7W28), 28日水中(28W), 7日封緘後28日まで気中(7S28), 28日封緘(28S)の7種類がある. また, HPCおよびBFSの場合は3日, 7日水中養生後28日まで気中, 28日水中の3種類がそれぞれあり, 総計13種類について試験を行っている. そして, OPCの7種類は, 材齢28日以降, 引き続き促進中性化試験を行った.

水中養生は20℃の水中で, 気中養生供試体は20℃, 相対湿度60%の恒温恒湿室内で, また封緘養生は脱型後完全密封して恒温室内で所定の材齢まで養生を行った. なお, 材齢3, 5, 7, 28日において, 各供試体の圧縮強度および細孔径分布の測定を行った.

(2) 試験方法

a) 圧縮強度

圧縮強度試験は, JIS A 1108に基づきΦ10×20cmの円柱供試体を用いて行った.

b) 中性化深さ

OPC7種類について促進中性化試験を行った. 図-2に供

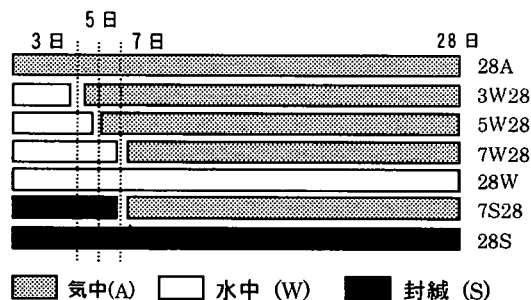


図-1 養生方法

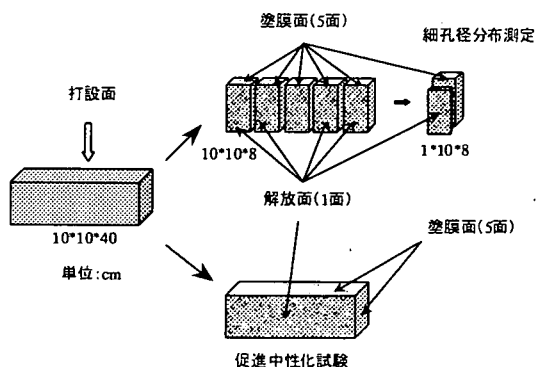


図-2 供試体の作製方法

試体の作製方法を示す。試験には、10×10×40cmの角柱供試体を用いた。所定の日数(3, 5, 7, または28日)の養生後、気中に曝される時点で、供試体の打設方向側面のうち1面を除いてエポキシ樹脂とシリコンでシールし、常に1面のみを解放面とした。所定の養生を終えたOPC7種類の供試体は、材齢28日に促進中性化実験槽に暴露した。

曝露環境は、二酸化炭素濃度7.0%、温度40℃、相対湿度50%である。所定期間(4, 12, 24および48週)に達した供試体は端部に近い箇所を軸方向に直角に割裂し、割裂面に1%フェノールフタレインアルコール溶液を噴霧し、中性化した部分(赤変していない部分)の深さを10点測定し、その平均を中性化深さとした。供試体は割裂後、再び割裂面に塗膜を施し、曝露を継続した。

c) 細孔径分布

図-2に示すように、細孔径分布測定には、10×10×40cmの角柱供試体を10×10×8cmに切断したものを供試体として用いた。切断は、所定の養生後、気中に曝される時点で水を使わずにコンクリートカッターで行った。

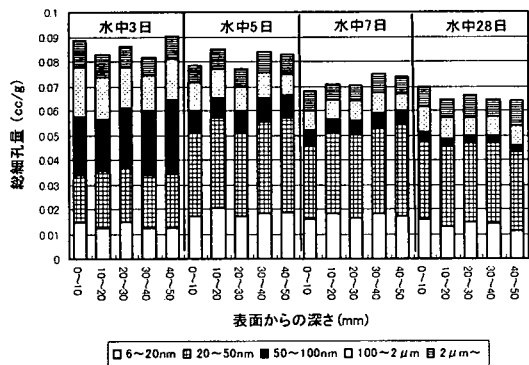


図-3 水和による細孔構造の変化 (OPC)

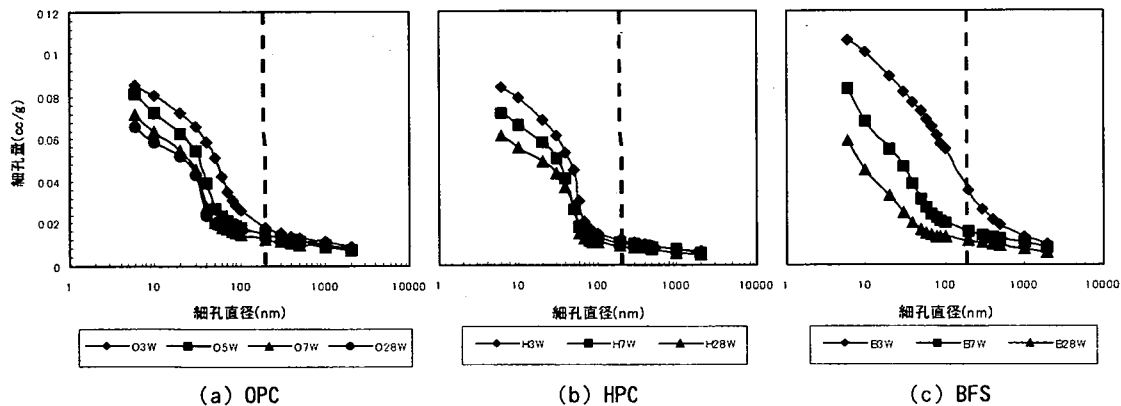


図-4 水和による細孔径分布の変化

供試体は、打設方向側面のうち1面を除いてエポキシ樹脂とシリコンでシールし、常に1面のみを解放面とした。そして、所定の材齢(3, 5, 7, 28日)で細孔径分布の測定を行った。

細孔径分布の測定には、測定範囲6nm~500μmの水銀圧入式ポロシメータを用いた。所定期間が経過したコンクリート(10×10×8cm)を表面から深さ方向の5cmまで1cmずつスライスし(1×10×8cm)、層ごとにモルタル分だけをはつき出して2.5mm以上5mm以下に砕き、アセトンに浸漬して水和の進行を停止した。その後、真空乾燥させ、測定に使用した。

3. 養生条件の相違による細孔構造の変化

(1) 養生期間の影響

図-3にOPCの水中養生期間ごとの細孔構造の変化を示す。図には、表面から5cmまで1cmごとの細孔構造の分布を示している。各養生期間とも、表面から深さ方向の違いは見られず、水中養生を行えば均質な細孔構造が形成されることがわかる。養生日数の経過にともない、セメントの水和が進むことによって、総細孔量は減少する。もともと水で占められていた毛細管空隙は、セメントの水和生成物で満たされることから、50nm以上の細孔が減少し、50nm以下の細孔が増加したと言える。しかし、100nm以上の大きな細孔は水和の進行に関わらず、あまり変化が認められない。

図-4は、OPC、HPC、BFSの細孔径分布の水中養生材齢3, 5, 7, 28日による変化を細孔径の累加曲線として示したものである。ここで示す値は、表面から5cmまでの各スライス5試料の測定値の平均であり、供試体の全体を代表した信頼性の高いものであると考えられる。

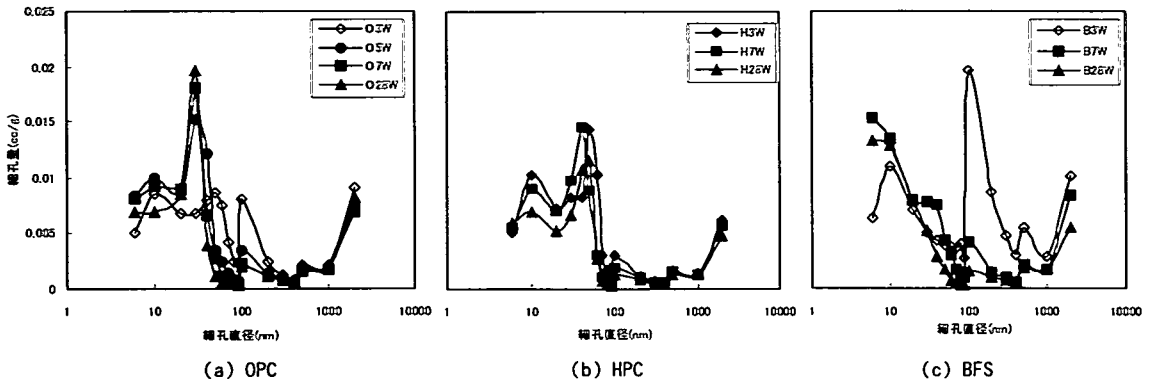


図-5 結合材別細孔径分布

結合材の種類に関わらず、水中養生期間の増加につれて総細孔量は減少することがわかる。しかし、OPCおよびHPCの場合には、材齢3～28日までの間で200nm以上の細孔量には変化が認められない。BFSの場合には、他と若干傾向が異なっているが、高炉スラグ微粉末の水和が比較的活発に生じていると考えられる材齢7日以降⁷⁾ではOPCおよびHPCと同様に200nm以上の細孔量には変化がない。水和により、水和生成物が大きな細孔を埋めていくことを考えると、大きい細孔よりも小さい細孔の減少が目立つことになる。すなわち、細孔径の大きさによらず同等の大きさの水和物が生成されると考えれば、見かけ上の細孔径の変化が顕著となるのが200nm程度の細孔径と考えられる。以上のことから、水和反応による細孔構造の主な変化は、結合材の種類に関わらずほぼ200nm以下で生じ、200nm以上の細孔量の減少は顕著ではないといえる。なお、この傾向は水結合材比50%での限定された挙動である可能性もあることから、今後、他の水結合材比での検討も必要である。

図-5に、細孔径ごとの細孔量分布を水中養生期間別に示す。OPCの場合、水中養生材齢3日では、細孔径50nm～200nmの間の大きな細孔が多いが、水中養生材齢5日以降は細孔径分布の変化が多少あるものの、ほぼ同じ傾向を示し、また、20nm～50nmの間の細孔範囲でピークが現れている。細孔構造を見る限り、OPCは水中養生材齢5日でおおむね組織が形成されると推測される。HPCの場合、水中養生材齢3日で細孔組織が形成され、その後の水中養生材齢7日、28日でもピークは変わらず、ほぼ同じ傾向である。BFSの場合、水中養生材齢3日では、ピークが100nm近傍で形成され、相当粗な組織であることがわかる。しかし、セメントの水和によって生成されたCa(OH)₂を刺激剤として反応する高炉スラグ微粉末の水和が、水中養生材齢7日では活発に生じ、100nm以上の細孔量が減少し、100nm以下に変わっている。7日から28日

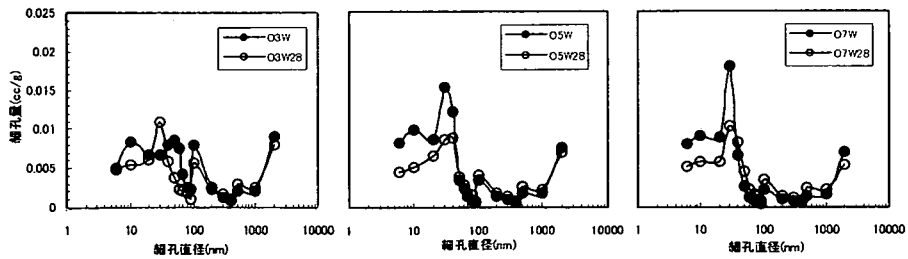
にかけては、細孔径当たりの細孔量は減少しているものの、全体的に同じ傾向を示しており、高炉スラグ微粉末を用いた場合の細孔組織は、水中養生材齢7日以降で形成されると推測される。また、細孔量のピークは、10nm以下の細孔径で現れ、高炉スラグの水和によって生じる水和物の大きさはポルトランドセメントの場合よりも小さいことが推察され、緻密な組織を有することがわかる。

コンクリート標準示方書(施工編)では、湿润状態に保つ期間を、普通ポルトランドセメントの場合5日間以上、早強ポルトランドセメントの場合3日間以上、高炉セメントやフライアッシュセメントの場合7日間以上を標準としている¹⁾。図-5に示した細孔組織の変化性状を見る限り、標準養生日数の規定は妥当であると考えられる。

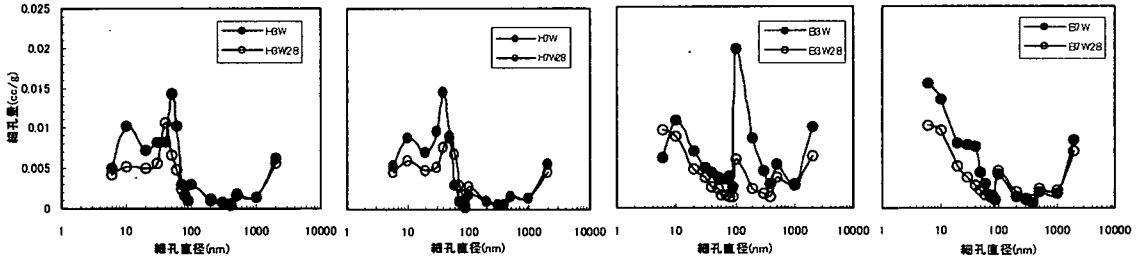
また、前述のように水和反応による細孔構造の主な変化は結合材の種類に関わらず200nm以下で顕著であることが図-5からもあらためて確認できる。

(2) 乾燥の影響

水中養生後に、乾燥を受けた場合の細孔構造の変化性状を調べるため、所定の水中養生日数直後およびその後引き続き材齢28日まで乾燥を受けた場合の細孔径分布を図-6に示す。ここで用いたデータは、表面から深さ方向5cmまでの5スライスの試料の測定値を平均し、表面近傍5cmを代表する細孔構造として扱っている。表面からの乾燥による水分の蒸発、それに伴う含水率の低下によってセメントの水和が阻害されることはよく知られている⁹⁾。前述のように、水中養生を行った場合には、200nm以下の細孔が減少することが明らかになったが、初期の水中養生後に乾燥を受けた場合の細孔構造の変化は、若干異なる傾向を示している。細孔組織がある程度完成されたときみなされるOPCの水中養生5日以降28日までの乾燥によって、70nm程度以上の細孔は変化せず、70nm以下の細孔が減少することがわかる。また、HPCの場合には水中養



(a) OPC



(b) HPC

(c) BFS

図-6 乾燥を受けた場合の細孔径分布

生3日以降、BFSの場合には水中養生7日以降において、OPCと同様に、70nm以下の細孔が減少している。このことから、初期の水中養生後に乾燥を受ける場合、表面からの水分の蒸発によって比較的大きな径の細孔中の水分は失われ、70nm以下の微細な空隙でのみ水和が進むと推察される。

図-7に、OPCを用いた場合の材齢7日および28日における細孔構造を養生方法ごとに示す。養生方法による総細孔量に大きな差は見られないが、細孔径による構成は、各養生方法で大きな違いが認められる。特に、100nm~2μmの範囲の細孔量の違いが顕著である。圧縮強度、劣化因子の浸透性、体積変化などに影響を与えるのは総細孔量ではなくて、細孔径分布であると言われている⁹⁾。水分の供給を十分に受けた水中養生7日の場合、50nm以上の大きな細孔が少ないことがわかる。一方、気中養生7日の場合、50nm以上の大きな細孔が50%以上を占めている。また、内部ほど50nm以上の大きな径は減り、50nm以下の小さな径が増加しており、表面からの乾燥によって深さ方向の不均質化が表れている²⁾。これは、表面付近のみが乾燥の影響を受け、内部では水和が進んでいることを意味する。この傾向は材齢28日においてさらに顕著となる。水中養生あるいは封緘養生のような水分の分布がある程度一定である養生方法では、均質な組織構造が形成されるが、気中養生では水分の分布が一定ではなくなり¹⁰⁾、深さ方向の不均質化が現れることになる。なお、水和過程

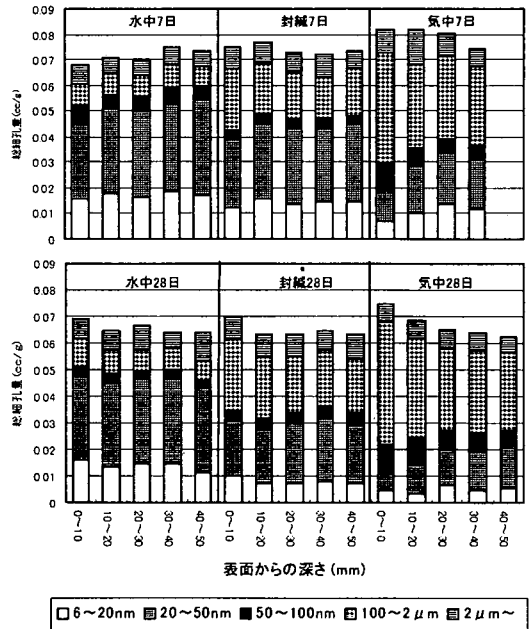


図-7 養生方法の相違による細孔構造の変化 (OPC)

において乾燥を受ける場合の深さ方向の不均質化に関しては、今後乾燥収縮特性と関連付けて検討する必要があると考えられる。

4. 細孔構造と圧縮強度

コンクリートでは、細孔量と圧縮強度には反比例の関係があることがよく知られている⁹⁾。強度はコンクリートの固体部分で発揮され、空隙は強度を損なう働きをする。荷重を作用させたときの応力集中とそれに伴う局部的破壊は、大きな毛細管空隙やマイクロクラックから始まる。

図-8にコンクリートの圧縮強度と細孔構造の関係を示す。図には、所定の養生(水中、封緘、気中)後および28日まで乾燥を受けた場合のすべての結果をプロットしている。養生材齢28日までの比較的初期段階の結果であるが、いずれの結合材に対しても良好な相関関係が認められ、本研究結果は既往の研究結果に一致するものとなった。図より細孔量と圧縮強度の間には逆比例の関係があり、同量の細孔量では高炉スラグ微粉末、普通ポルトランド、早強ポルトランドの順に圧縮強度が大きくなることがわかる。

5. 細孔構造と中性化

(1) 中性化に影響を及ぼす細孔径

図-9に養生方法、養生期間が異なるOPC7種類の供試体の48週までの促進中性化試験結果を示す。セメントの水和の進行にともなって水和生成物であるCa(OH)₂は増加する⁷⁾。Ca(OH)₂とCO₂との反応である中性化速度は、養生日数の増加につれて、また気中、封緘、水中養生の順で小さくなるがわかる。

セメント硬化体中の毛細管空隙は、連続的な網目状に形成されているといわれており、表層に存在する毛細管空隙から二酸化炭素が拡散することによって中性化が進行する。Darr, G. M. and Ludwig, U. は平均自由行程理論を用いて、ガスが自由に通過できる直径が50~100nmの

範囲にあることを示している¹¹⁾。二酸化炭素はコンクリートの毛細管空隙中を自由に移動するのであるが、実際の空隙中には、外気湿度と平衡状態にある水膜が存在するので、ガスの拡散が大幅に抑制される。空隙が水で満たされている場合の液相拡散速度は、気相中での拡散速度の10⁻³倍¹²⁾、あるいは10⁻⁴~10⁻⁵倍¹³⁾にも減少することが指摘されている¹⁰⁾。したがって、水で満たされている空隙では二酸化炭素の侵入は無いと考えても差し支えない。促進中性化試験の環境によって、その温度および湿度で細孔中の水分の有無が決まるため、炭酸ガスの侵入できる径が含水状態に支配される可能性がある。水蒸気圧(相対湿度)と凝縮の生じるメニスカスの半径との関係は、式(1)に示すKelvin式によって表わされる。

$$\ln P/P_0 = -2\gamma M \cos \theta / (RT\rho) \cdot 1/r \quad (1)$$

ここに、P:蒸気圧、P₀:飽和蒸気圧、T:絶対温度(K)、

γ:水の表面張力(0.07336N/m)、

θ:接触角(0°)、r:水面の曲率半径

M:水の分子量(0.01802kg/mol)、

R:気体定数(8.31441J/mol・K)、

ρ:水の密度(1000kg/m³)

式(1)に本実験の条件である温度40°C、相対湿度50%を適用すると、2.9nm以上の細孔では水は凝集していないことになる¹⁰⁾。これには、平衡に至る時間的な影響も考慮する必要があるが、現段階ではコンクリート内部の空隙中の相対湿度を測定する適当な方法がなく、確認は困難である。本実験では、促進中性化試験の所定条件の環境に4~48週にわたって貯蔵していることもあり、また中性化に影響を及ぼす細孔径が上記の計算値に近似した値でなければ、細孔中の水分の有無が試験結果に及ぼす影響は無視できるものと考えた。以上のことから、炭酸ガスの拡散を支配する細孔径が存在するものと考えて、

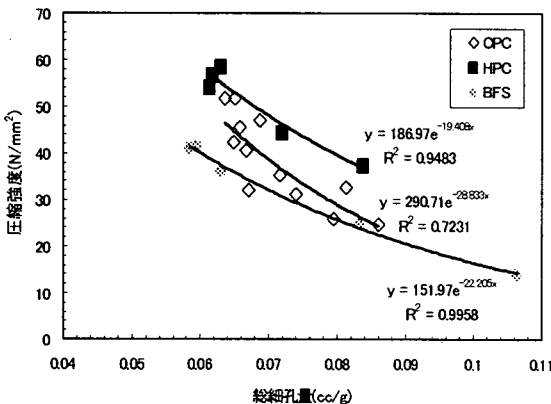


図-8 細孔構造と圧縮強度

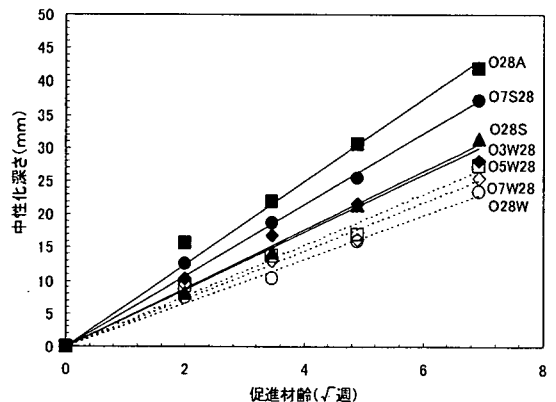


図-9 中性化深さ

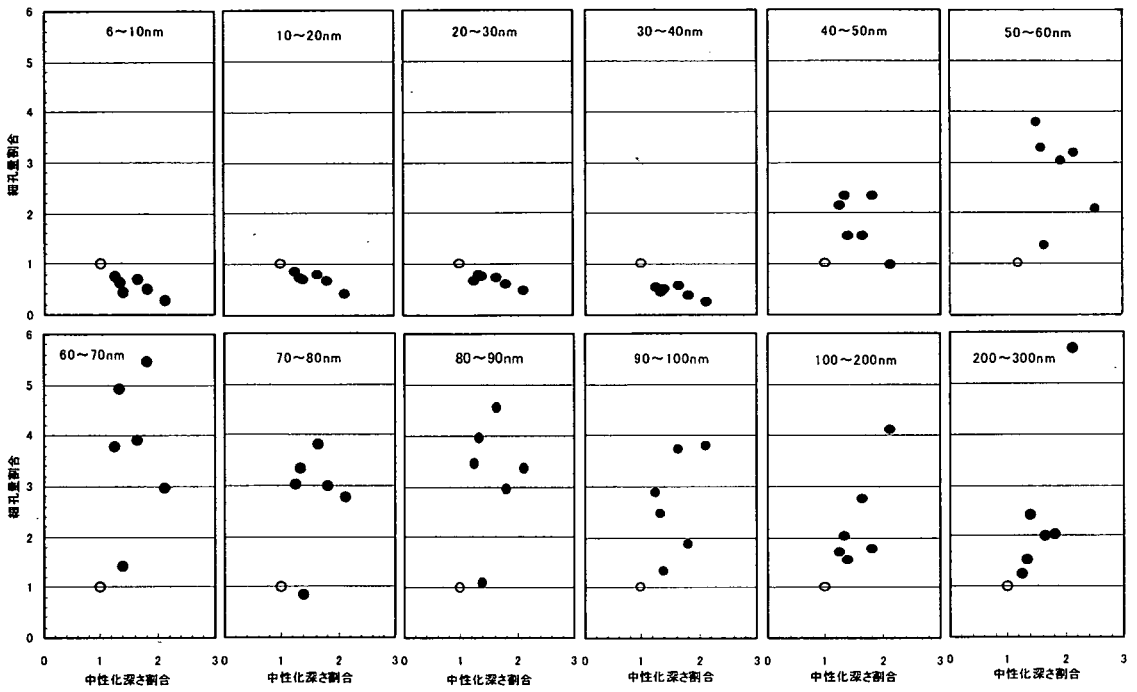


図-10 中性化に影響を及ぼす細孔径（その1）

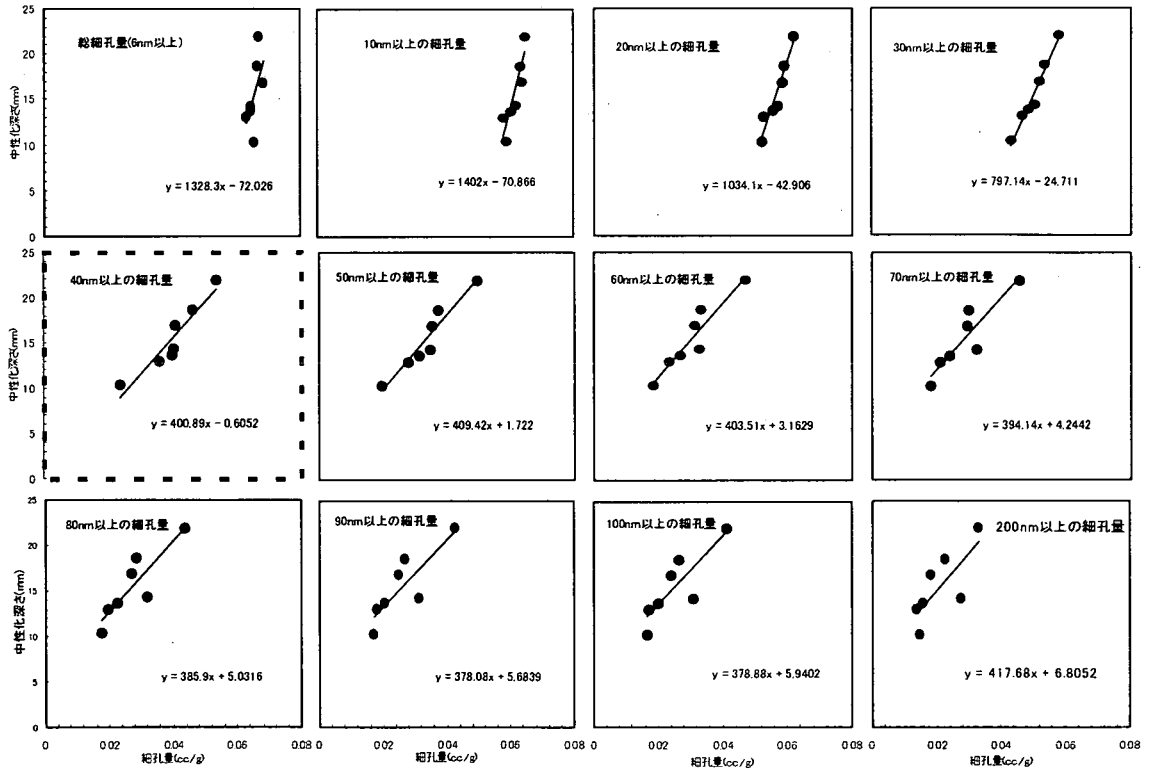


図-11 中性化に影響を及ぼす細孔径（その2）

促進中性化深さに影響する細孔径を検討する。

図-10は、28日間水中養生を行った普通セメント使用の供試体(O28W)の中性化促進材齢12週における中性化深さおよび各細孔径の範囲ごとの細孔量をそれぞれとし(図中の白丸)、他の条件の供試体の中性化深さの割合および細孔量の割合の関係を示したものである。なお、O28Wの細孔構造は本実験の範囲でもっとも緻密であり、中性化速度ももっとも小さいものである。中性化深さは、影響を及ぼす範囲の径の細孔量が増えるほど大きくなると考えられるにもかかわらず、6~40nmの細孔範囲に対応する4つの図においては、右下りの傾向を示している。しかし、40nm以上の細孔範囲に対応する図においては、細孔量割合が増加することによって中性化深さも増加している。言い換えれば、6~40nmの間の細孔量は中性化進行に大きな影響を与えず、40nm以上の細孔量が中性化進行を支配しているといえる。

図-11は、所定の径よりも大きな細孔量と促進材齢12週の中性化深さの関係を示したものである。この図の近似直線の第2項は、縦軸の切片であり、各々のグラフの細孔量に含まれていない細孔量の影響度であると考えることができる。例えば、50nm以上の細孔量のグラフの場合、Y軸の切片は、50nm以上の細孔量が0の時の中性化深さであり、50nm以下の細孔量の影響度であると考えることができる。Y軸切片の値がマイナスとなる場合は、中性化進行に影響を与える細孔径の評価が成り立たないことになる。総細孔量、10nm以上、20nm以上、30nm以上の4つのグラフでは、Y軸切片の値が明らかにマイナスとなり、細孔直径6~40nmの範囲の細孔は、中性化に関与していないものと考えられる。前述した中性化進行にもっとも影響を及ぼすと評価した40nm以上の細孔量の場合、Y軸の切片の値はわずかなマイナス値であるが、この値は許容誤差の範囲であると考えられる。なお、細孔径が大きくなるほど、Y軸の切片は大きくなっている。以上のことから直線近似による評価は妥当であり、中性化に影響を与える細孔径は、40nm以上の細孔量であると考えられる。

図-12に、40nm以上の細孔量と促進中性化材齢4週、12週、24週、48週の結果を示す。水中養生日数3日、5日、7日の順、また気中、封緘、水中養生の順に水和の進行程度は大きくなり、総細孔量中における40nm以上の細孔量が少なくなるため、中性化深さは小さくなるのがわかる。この結果から、中性化進行速度に支配的な影響を及ぼすのは、40nm以上の細孔量であると推測される。

(2) 中性化速度係数の評価

コンクリートの中性化に関しては、いわゆる \sqrt{t} 則から導き出される中性化速度係数が使われており、多くの論文で検討に用いられている¹⁰⁾が、中性化速度係数と養

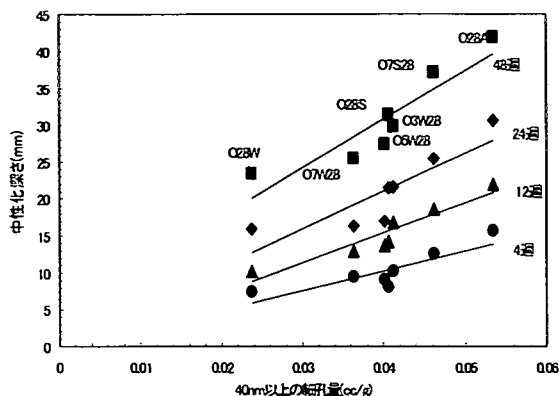


図-12 40nm以上の細孔量と中性化深さ

生条件との関係を定量的に扱ったものはほとんどない。このようなことから、本研究では養生条件の相違によって生じる細孔構造の変化を考慮した中性化速度係数の算定を試みた。

実験的に求められた中性化速度係数(b)は、コンクリートの結合材の種類、水結合材比、養生条件、曝露環境等の影響が総合的に反映された係数である。一方、細孔径分布は、結合材の種類、水結合材比、養生条件等により影響を受けて変化する。したがって、細孔径分布は、中性化を評価する場合の重要な評価指標となり、中性化速度係数の算定において、細孔径分布を用いるのは妥当である。但し、結合材によっては、生成される水酸化カルシウム量が増えるため、同等の細孔構造を有しても、中性化進行は異なることになる。普通ポルトランドセメントを用いた本研究の範囲では、前述のように、中性化速度に支配的な影響を及ぼすのは、40nm以上の細孔量であることが明らかになった。これらのことから、式(2)のように、養生期間、養生方法等の養生条件の相違から決まる40nm以上の細孔量で中性化進行速度を評価することができると考えられる。

$$b = f(PV_{40}) \quad (2)$$

ここに PV_{40} : 40nm以上の細孔量

中性化速度係数と40nm以上の細孔量との関係を求めると、図-13に示すように、高い相関が認められる。これを最小二乗法によって近似すれば、次の近似式が得られる。

$$b = 101.78X + 0.3627 \quad (3)$$

ここに X: 40nm以上の細孔量

第2項はY軸の切片であり、40nm以下の細孔量の影響

度と考えることができる。この近似式によって、養生条件の相違の結果生じる細孔量を決定することにより、中性化進行速度の予測が可能となる。

図-14は、本実験で実測した40nm以上の細孔量に基づいて式(2)で中性化速度を評価し、普通ポルトランドセメントを用いた養生条件の異なるコンクリートの中性化促進材齢における中性化深さの予測値と実測値との関係を図示したものである。若干のばらつきはあるものの、7種類の異なる養生方法に関わらず高い精度で、細孔構造に基づいた中性化進行速度の予測が可能であることを裏付けている。

本研究では、促進中性化試験における中性化深さと40nm以上の細孔量との関係を明らかにした。実環境においても中性化を支配する細孔径は変化しないものと考えられることから、40nm以上の径の細孔量に基づく実構造物の中性化深さを評価することができるものと考えられ

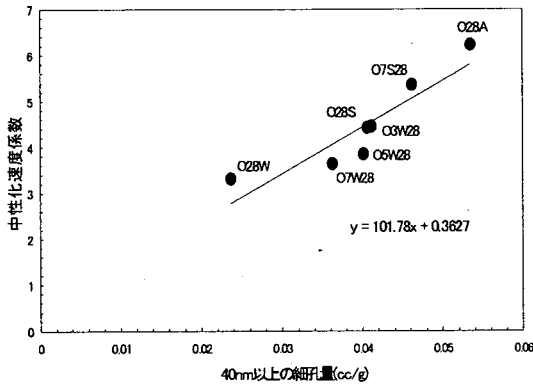


図-13 40nm以上の細孔量と中性化速度係数

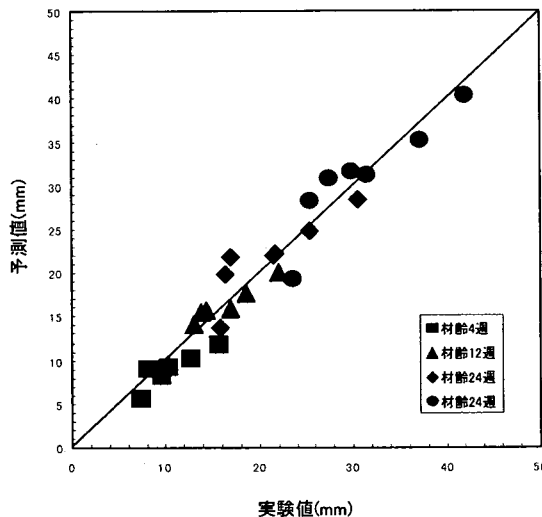


図-14 中性化深さの実測値と予測値の比較

る。

今後、本実験で行わなかった他の混和材、水結合材比の影響と細孔構造を把握することによって、また、時間履歴的関数である中性化による細孔構造の変化を検討することによって、促進実験環境だけでなく、実構造物の中性化進行速度予測も可能になると考えられる。

6. 結論

本研究は、コンクリートの性質がその細孔構造によって決定されるという認識のもとに、養生方法、養生期間をパラメータとした場合の細孔構造を検討し、細孔径や細孔量が圧縮強度、中性化進行速度に与える影響を評価したものである。以下に、本研究で得られた結果を示す。

- (1) 水中養生を行えば、深さ方向に均質な細孔構造が形成されるが、気中養生では表面からの乾燥により、深さ方向の不均質化が生じる。
- (2) 水和反応による細孔構造の主な変化は、結合材の種類に関わらずほぼ200nm以下で生じ、200nm以上の細孔量の減少は顕著ではない。
- (3) 結合材の種類ごとに細孔構造の形成時期に差があり、コンクリート標準示方書に示される湿潤状態に保つ期間(普通ポルトランドセメントの場合5日間以上、早強ポルトランドセメントの場合3日間以上、高炉セメントやフライアッシュセメントの場合7日間以上)は、細孔構造の形成の観点から妥当である。
- (4) 中性化進行に支配的な影響を及ぼすのは、40nm以上の細孔量である。養生期間、養生方法などの養生条件に係わらず、中性化深さは40nm以上の細孔量と直線関係にある。
- (5) 養生条件の相違の結果生じる細孔構造により、中性化進行速度が評価できる。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書・耐久性照査型-[施工編], 1999.
- 2) 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦: 乾燥によるコンクリート組織の不均質化, コンクリート工学年次論文集 24-1, pp. 711-716, 2002. 6.
- 3) 湯浅昇, 笠井芳夫, 松井勇, 大川原修: 乾燥条件が微少セメントペーストの水和, 細孔構造及び強度に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, No. 505, pp. 15-21, 1998. 3.
- 4) 郭度連, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦: セメントおよび養生条件の相違による細孔構造の変化, 土木学会第56回年次学術講演会, pp. 580-581, 2001. 10.
- 5) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長瀧重義: 中性化によるコンクリートの微細組織の変化, 土木学会論文集, No. 420/V-13, 1990. 8.
- 6) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長瀧重義: コンクリートの中性化の

- 機構, コンクリート工学論文報告集, 11-1, 1989.
- 7) 國府勝郎, 村田芳樹, 高橋茂, 安斉浩幸: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇と水和性状に関する研究, 土木学会論文集 No. 369/V-9, pp. 39-48, 1988. 8.
- 8) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢に連続乾燥を受けるセメント硬化体の水和進行と内部水分量, セメント・コンクリート論文集, No. 54, pp. 167-173, 2000.
- 9) P.kumar Metha, Paulo J.M Monteiro: CONCRETE-Micro structure, Properties and Materials-, *The McGRAW-Hill Companies, INC*, pp.28, pp.44, 1985.
- 10) 伊代田岳史, 高羅信彦, 魚本健人: 初期養生時に乾燥を受けるセメント硬化体の水和反応と水分逸散特性, コンクリート工学年次論文集 22-1, 2000.
- 11) Darr, G.M. and Ludwig, U.: Determination of Permeable, *Materials and Structures*, Vol.6, No.33, pp.185-190, 1973.
- 12) Ying-yu, L. and Qui-dong, W.: The Mechanism of Carbonation of Mortar and the Dependence of Carbonation on Pore Structure, *Preceeding of Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability*, ACI SP100-98, pp.1915-1943, 1987.
- 13) Lawrence, C.D.: Transport of Oxygen through Concrete, *Proceedings of Concrete Society, Meeting on Chemistry and Chemically-Related Properties of Cement, Imperial College, London*, pp.277-293, 1984.
- 14) 日本コンクリート工学協会: 炭酸化研究委員会報告書, 1993. 3.
- 15) セメント協会: わかりやすいセメント科学, pp. 97, 1993. 3.
- 16) 例えば, 大賀宏行, 長瀧重義: 促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価, 土木学会論文集, No. 390/V-8, pp. 225-233, 1988. 2.
- 17) 土木学会: 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2) -コンクリート委員会腐食防食小委員会報告-, 2000. 12.
- 18) 小林孝一, 服部篤史, 宮川豊章: 石灰石微粉末または高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートにおける塩分浸透と鉄筋腐食, 土木学会論文, No. 613/V-42, pp. 175-187, 1999. 2.
- 19) 後藤孝治, 魚本健人: ポルトランドセメントの水和反応による硬化体細孔構造発達モデル化, 土木学会論文集, No. 520/V-28, pp. 203-211, 1995. 8.
- 20) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 硬化モルタルおよびコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討, コンクリート工学論文集, 第4巻, 第2号, pp. 1-8, 1993. 7.
- 21) Sidney, D.: Mercury porosimetry an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials, *Cement and Concrete Research* 30, pp.1517-1525, 2000.

(2002. 1. 7 受付)

EVALUATION OF PORE STRUCTURE DUE TO CURING CONDITIONS AND INFLUENCES OF PORE SIZE ON CARBONATION OF CONCRETE

Doyeon KWAK, Kimitaka UJI, Katsuro KOKUBU and Atsushi UENO

Concrete has a different pore structure according to cement type, curing condition and mix proportion. Different pore structures have a great influence on compressive strength, chlorides penetration, carbonation speed and drying shrinkage. Furthermore, pore structure will take a different form between surface and internal layer of concrete because of drying immediately after early age remodeling. The purpose of this study is to investigate the difference of pore structure on the depth owing to curing condition and its influence on carbonation and compressive strength of concrete. As a result, pore volume of 40nm or more have an influence on carbonation speed. And there is some possibility that carbonation speed is estimated by pore structure under any curing condition such as curing period and type.