

論文 乾燥によるコンクリート組織の不均質化

郭度連*1・宇治公隆*2・國府勝郎*3・上野敦*4

要旨：コンクリートは，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は異なることになる。本研究では，所定の養生後，乾燥を受ける場合のコンクリートの細孔構造の変化を表面からの深さごとに調べた。その結果，乾燥を受けたコンクリートは，表面から深さによって組織の不均質化を生じること，また総細孔量中の50nm以下の細孔量の割合が大きいほど，乾燥による不均質化が著しい傾向にあることを明らかにした。

キーワード：乾燥，不均質化，細孔構造，養生条件

1. はじめに

コンクリートは，脱型後，気中に曝されて相対湿度が低下すると，飽和セメントペーストから水分が失われていくことにより内部含水率が低下し，水和が阻害される。その結果，コンクリートの表層から内部にわたり細孔構造の不均質化が生じることになる。コンクリートの細孔構造は，強度や耐久性などの品質特性を支配する重要なものであるが，細孔構造に対する乾燥の影響を詳細に検討した研究は数少ない。

本研究は，初期の湿潤養生期間によって水和の程度の異なるコンクリートが乾燥を受けることによって生じる細孔構造の変化を把握することを目的とし，所定の7種類の養生後，24週まで乾燥を受ける場合のコンクリートの細孔構造の変化を深さごとに考察した。また，別途行った拘束収縮ひび割れ試験から採取した供試体の細孔構造を深さごとに調査した。

2. 実験概要

2.1 配合および養生条件

本研究で使用したコンクリートの配合を表-1

に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し，目標スランプは8cm，空気量は4.5%とした。

供試体は，10 × 10 × 40cmの角柱供試体を用い，打設後24時間で脱型し，図-1に示す所定の養生を開始した。養生条件は，28日気中(28A)，3日/5日/7日水中養生後28日まで気中(3W28，

表 - 1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	G
50	44.2	171	342	786	998

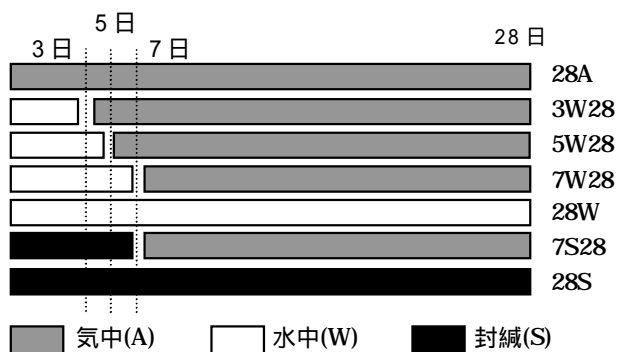


図 -1 養生方法

*1 東京都立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 工修 (正会員)
 *2 東京都立大学助教授 工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)
 *3 東京都立大学教授 工学研究科 土木工学専攻 工博 (正会員)
 *4 東京都立大学助手 工学研究科 土木工学専攻 (正会員)

5W28, 7W28), 28日水中養生(28W), 7日封緘養生後28日まで気中(7S28), 28日封緘養生(28S)の7種類である。なお, 材齢28日以降, 全ての供試体を気中養生とし, 12週, 24週で試験を行った。

水中養生は20 ℃の水中に, 気中養生は20 ℃, 相対湿度60%の恒温恒湿室内に, また封緘養生は脱型後ポリプロピレンシートで完全に密封して恒温室内に所定の材齢まで供試体を保存した。

所定の養生後, 気中に曝露する時点で, 図-2に示すように, コンクリートカッターを用いて10×10×40cmの角柱供試体を10×10×8cmに切断した。その後, 直ちに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供試体をシールし, 常に1面のみを開放面とした。

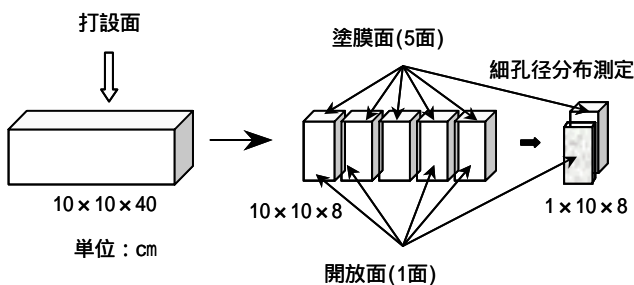


図-2 供試体の作製方法

2.2 細孔径分布

所定の養生直後(3, 5, 7, 28日)および材齢28日, 12週, 24週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 ~ 500 μmの水銀圧入式ポロシメータを用いた。測定材齢に達した供試体(10×10×8cm)は, 水を使わずにコンクリートカッターで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, 細孔径分布を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 乾燥による細孔構造の変化

図-3は, 7種類の初期養生終了時およびその後, 28日, 12週, 24週まで乾燥を受けた場合の細孔構造の変化を示したものである。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。なお, 測定は5回行い, それを平均しており, その供試体を代表する十分な精度であると考えられる。

3日水中, 5日水中, 7日水中, 28日水中の4種の養生(3W, 5W, 7W, 28W)についてみると, 水

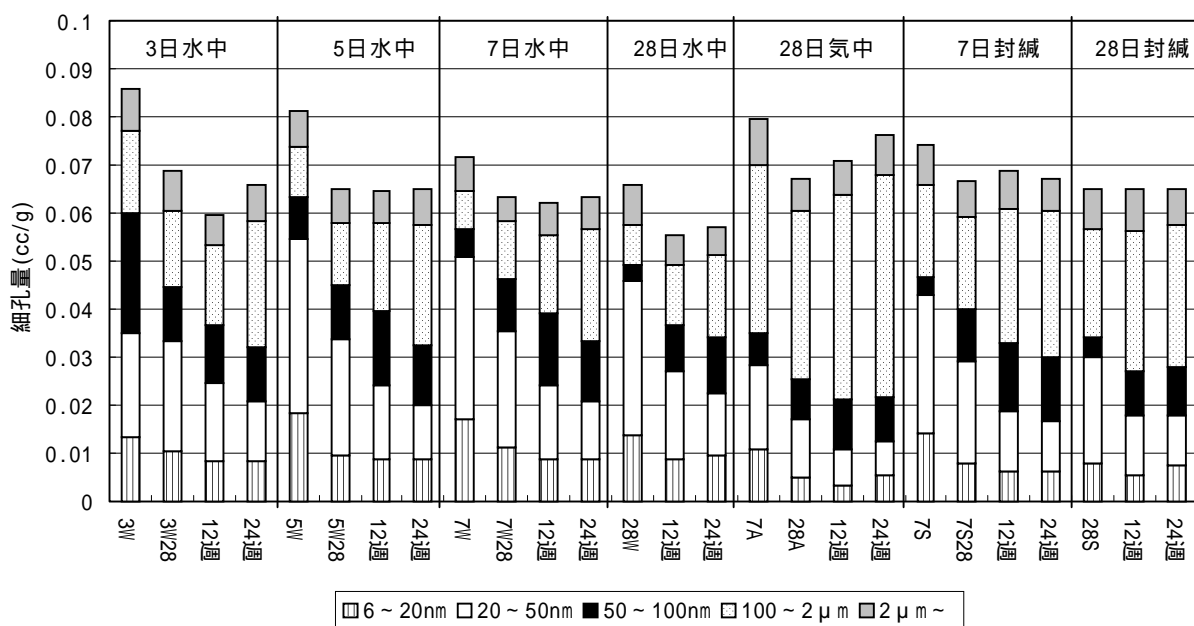


図-3 乾燥による細孔構造の変化

中養生日数の経過に伴い、総細孔量が減少している。セメントの水和が進むことによって、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の形成によって、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。また、水中、気中および封緘の各養生方法によって細孔径分布が変化し、特に、50nm～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、細孔径分布であると言われている¹⁾。水分の供給を十分に受けた水中養生28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28日の場合、50nm以上の大きな細孔が50%以上を占めており、湿潤の程度によってコンクリートの品質に大きな差異が生じることが推測される。

所定の湿潤養生後に乾燥を受けた場合、若干のばらつきはあるものの、養生直後に比べて総細孔量は減少する傾向がある。そして、いずれの養生条件においても、総細孔量中に占める50nm以上の大きな細孔の割合は、乾燥の進行によって増加することがわかる。

乾燥を受ける場合、総細孔量は減少するものの、細孔径による構成は粗大な径の側に移行することが明確に示された。

3.2 乾燥による組織の不均質化

所定の養生後、28日まで乾燥を受けた場合の細孔構造の深さ方向の変化を図-4に示す。図は、表面から1cmずつ5cmまでの範囲が示されている。

水中および封緘養生直後の組織は、水分の分布が一様であると考えられるので、表面から深さ方向で均質な細孔構造が形成されている²⁾。しかし、乾燥を受けることにより、養生方法、養生日数に関わらず、表面からの深さによって細孔構造が変化していることが認められる。表面からの水分の蒸発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³⁾。乾燥を受けることによって総細孔量は減少するものの、表層部(0～10mm)では50nm

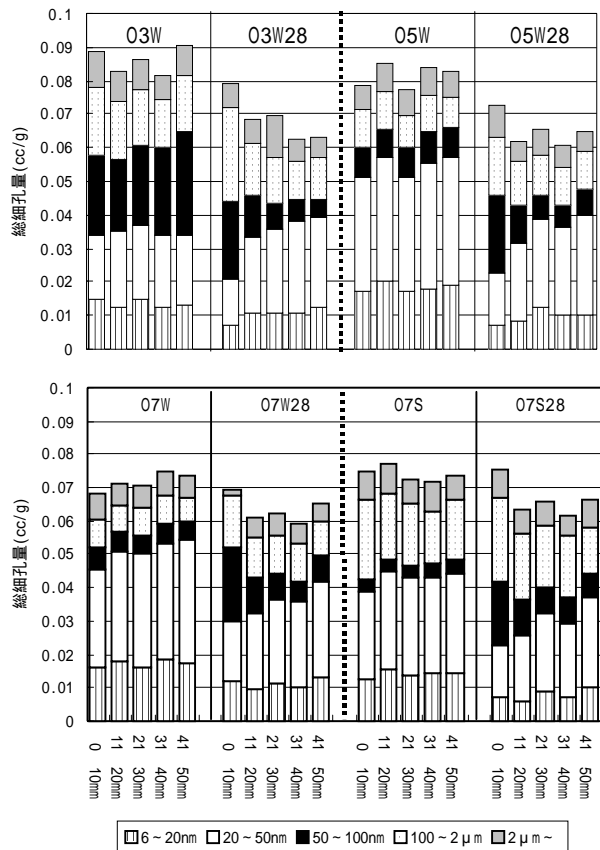


図 - 4 乾燥による不均質化

以上の大きな細孔の増加が顕著である。なお、この傾向は内部ほど小さくなる。このような乾燥にともなう細孔構造の不均質化は、内部の未乾燥領域における水和と表面からの乾燥が同時に進行することによって生じると考えられる。乾燥によって表層部の水和が阻害されることは予想できるが、50nm以上の大きな細孔の増加には、何らかの物理的要因を考える必要がある。

骨材と水和セメントペーストとの間で長さ変化が異なれば、多孔質で大きな収縮を生じるセメントペーストには、引張応力が生じてマイクロクラックが発生することになる。すなわち、コンクリートの内部組織には荷重の作用がなくてもマイクロクラックが存在する¹⁾。このマイクロクラックは、幅が数μm以下の微細なもので、ここに水銀が注入されれば、見掛け上、50nm以上の細孔量が増加する結果となる。また、コンクリートの乾燥に伴う含水率分布は不均一であり、乾燥収縮ひずみは、内部より表層の方が大きい

ことは自明である⁴⁾。言い換えれば、表層部には引張応力を生じることによってマイクロクラックが発生しやすく、50nm以上の細孔が増加することも考えられる。

なお、別途行った拘束収縮ひび割れ試験⁵⁾の試験体から採集した試料による細孔径分布の測定結果を図-5および図-6に示す。この試験体の形状寸法は、JSTM C 8202に準拠し、中央部の断面は、10cm × 10cmである。また、配合は、前述の表-1と同じである。拘束収縮ひび割れ試験は、7日間湿布養生後、相対湿度60%、温度20の恒温恒湿室で乾燥させ、ひび割れが発生した材齢17日の時点で試験体から試料を採集して深さごとに細孔径分布を測定した。拘束収縮ひび割れ試験の供試体においても、断面内の組織

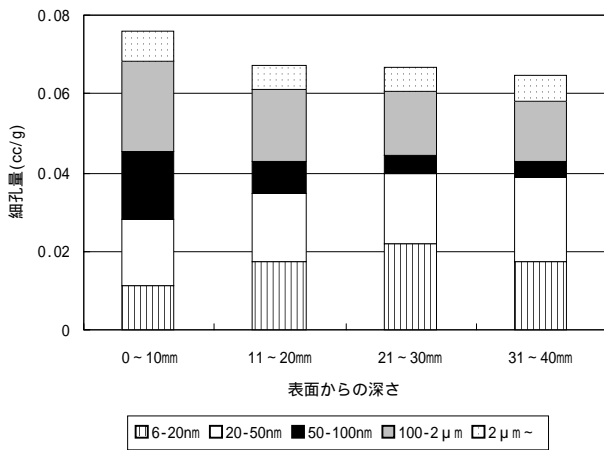


図-5 乾燥による不均質化(拘束収縮試験)

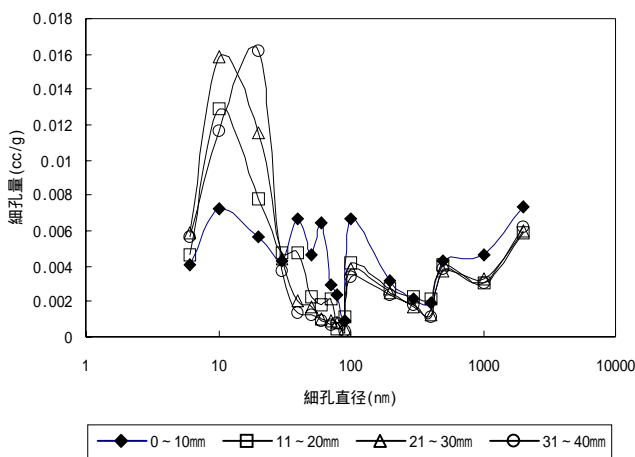
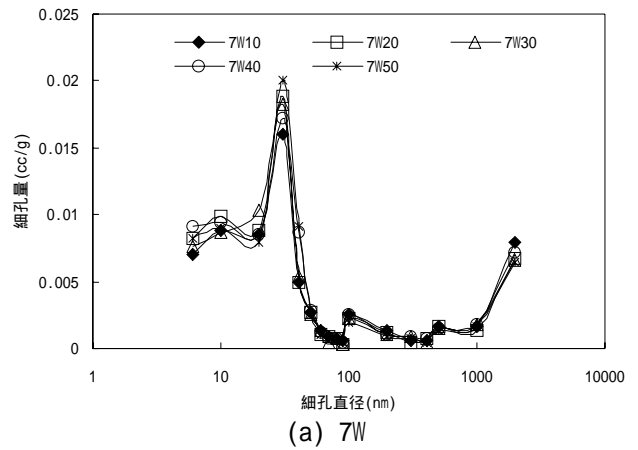
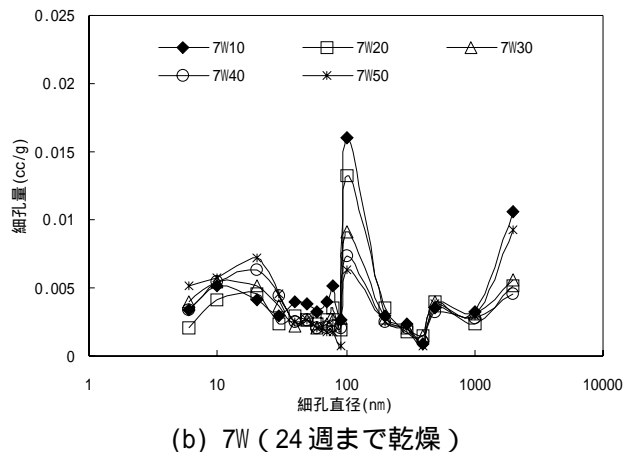


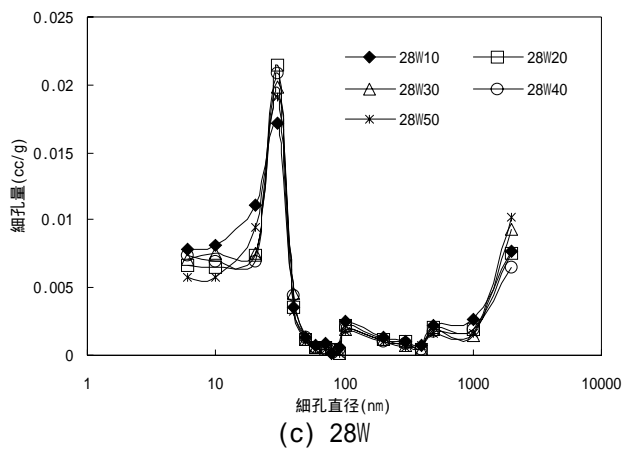
図-6 細孔径別細孔量(拘束収縮試験)



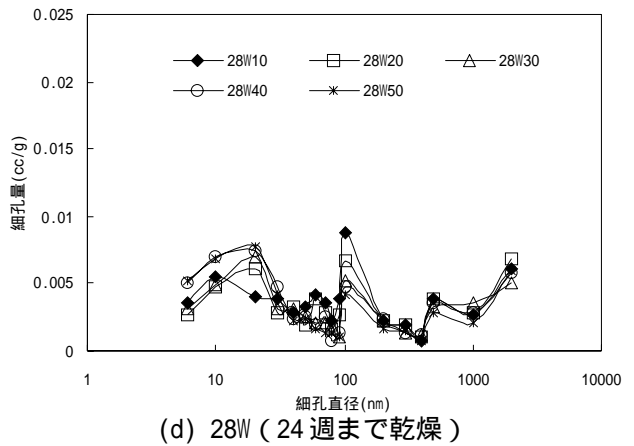
(a) 7W



(b) 7W (24 週まで乾燥)



(c) 28W



(d) 28W (24 週まで乾燥)

図-7 乾燥による細孔径ピークの変化

の不均質化が認められる。表面から内部に行くに従って、総細孔量はわずかであるが、減少している。また、50nm以上の細孔量は内部から表面に行くほど増加しており、特に表層部の0～10mmの試料では細孔構造の粗大化が顕著である。

7日間湿布養生した本供試体の養生直後では、前述のように深さに拘らず均質な細孔構造を有しているものと推察されるが、ひび割れ発生後のコンクリートの細孔構造は、図-6に示すように、表面からの深さによって変化したものとなっている。0～10mmの表層部の細孔径分布には、卓越したピークが認められないが、11～40mmの部位では、10～30nmの間で細孔径のピークが現れている。乾燥前の均質な細孔構造における10～30nmのピークが、乾燥によってより大きな径の方へシフトすることによって50nm以上の細孔量が卓越したと考えられる。実際の構造体コンクリートにより近いと考えられる拘束収縮試験からも不均質化が生じていることが確認された。

乾燥による細孔構造の変化をさらに詳しく調べるため、水中養生7日および28日の細孔構造と、それぞれの養生後24週まで乾燥させた場合の細孔直径ごとの細孔量の変化を図-7に示す。この図で凡例の10、20などの数字は表面からの深さ(mm)を表している。

水中養生7日および28日では深さによらず均質で一定の細孔径分布を示している。細孔径のピークは両者とも30～40nmの間で現れている。24週まで乾燥を受けると、その細孔径のピークが無くなり、100～200nmの細孔径が卓越するという変化が認められる。また、その卓越する細孔量は表面部(印)が多く、表面から内部に行くに従って、少なくなっている。すなわち、水中養生直後の細孔構造は、乾燥によって粗大な空隙組織に変化しているのである。

28日間水中養生後24週まで乾燥させた供試体の場合、その卓越量が7日間水中養生後24週まで乾燥させた供試体に比べて少なくなっているが、これは乾燥開始時の強度および弾性係数が7

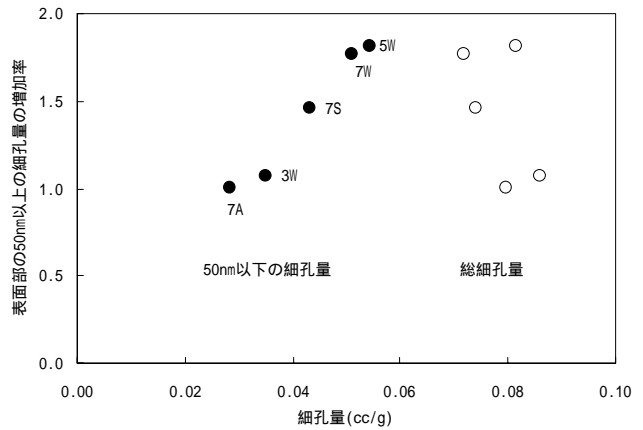


図-8 不均質化に影響を及ぼす細孔径

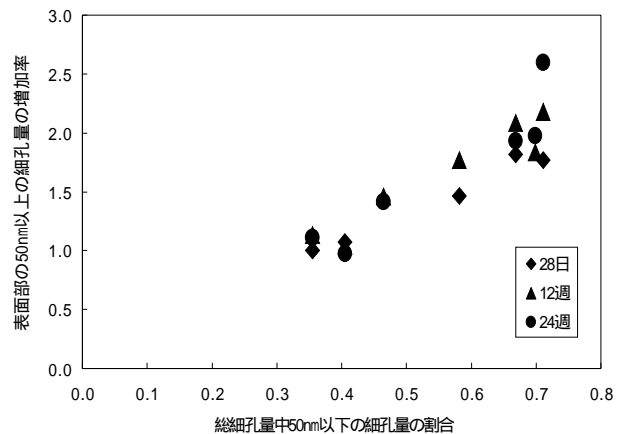


図-9 50nm以下の細孔量と不均質化

日水中養生の供試体より28日水中養生の供試体が大きく、変形に対する抵抗性が高いことに起因するものと推測される。

3.3 不均質化を支配する細孔径

乾燥による細孔構造の変化は、表層部(0～10mm)で顕著であることから、湿潤養生直後の表層部における50nm以上の細孔量に対する乾燥28日後の50nm以上の細孔量の増加率に着目して、乾燥にともなう不均質化を支配する細孔径を検討することとした。

総細孔量および50nm以下の細孔量に対する増加率の関係を図-8に示す。この図から乾燥にともなう50nm以上の細孔量の増加率は、総細孔量には無関係であるが、50nm以下の細孔量とは、明瞭な相関関係が認められる。すなわち、乾燥を受ける前の細孔径分布において、50nm以下の小

さい細孔が多いほど、乾燥にともなう細孔構造の粗大化が顕著となるといえる。50nm以上の大きな空隙にある自由水は、水和生成物と物理化学的な結合をしていないので、それが失われてもわずかな収縮しか生じないと言われている¹⁾。また、コンクリートに大きな収縮を生じさせる応力は、50nm以下の微細な毛細管中に存在する水や固体表面間の狭い空間に閉じ込められている吸着水の逸散によって生じるといわれている。ところで、養生条件の相違により、総細孔量および50nm以下の細孔量は大きく異なる。総細孔量が同じであっても50nm以下の細孔量が同じとは言えず、また細孔特性によって弾性係数等の力学特性も変化するので、ペーストの変形抵抗性は養生条件によって変化すると考えられる。このようなことから、乾燥前の総細孔量に対する50nm以下の細孔量の割合と、乾燥にともなう表層部における50nm以上の細孔量の増加率との関係を図-9に示す。乾燥を受ける前のコンクリートの組織が微細化している(50nm以下の細孔の占める割合が大きい)ほど、乾燥にともなう50nm以上の細孔の増加率が大きくなる傾向が認められる。

コンクリートは、養生期間、養生方法により、細孔構造に相違が生じる。一方、乾燥を受けた場合に、表面から深さ方向の不均質化が生じ、不均質化を支配する細孔特性は、総細孔量ではなく、50nm以下の小さい細孔である。また、コンクリートの品質、性能に大きな影響を及ぼすと考えられる50nm以上の細孔量の乾燥にともなう増加は、乾燥前の50nm以下の細孔量の割合と高い相関関係があり、総細孔量に対する50nm以下の細孔量の割合が大きいほど、乾燥による不均質化が著しい傾向にある。

4. まとめ

所定の養生後に乾燥を受けるコンクリートの細孔構造の変化を深さごとに調べ、以下の知見を得た。

(1) コンクリートが乾燥を受ける場合、内部の

未水和領域では水和反応によって総細孔量が減少するのに対し、表面付近では乾燥にともなう細孔が粗大化するという不均質化が生じることが明らかになった。

- (2) 乾燥により総細孔量は減少するものの、細孔径分布は粗大な径の側に移行する。
- (3) 不均質化を支配する細孔特性は、総細孔量ではなく、50nm以下の小さい細孔である。また、総細孔量に対する50nm以下の細孔量の割合が大きいほど、乾燥による不均質化が著しい傾向にある。

参考文献

- 1) P.kumar Metha and Paulo J.M Monteiro : CONCRETE-Microstructure, Properties and Materials-, The McGRAW-Hill Companies.INC, pp.28, pp32-34, pp.39, 1985
- 2) 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
- 3) 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量, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.167-173, 2000
- 4) J.K.Kim and C.S.Lee : Prediction of Differential Drying Shrinkage in Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.28, No.7, pp.985-994, 1998
- 5) コンクリートの拘束収縮ひび割れ試験方法(案), JSTM C 8202, 1999
- 6) 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
- 7) 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