乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率, 細孔構造の不均質性

INHOMOGENEOUS DISTRIBUTION OF THE MOISTURE CONTENT AND POROSITY FROM THE SURFACE LAYER TO INTERNAL PARTS OF DRIED CONCRETE

湯浅 昇*, 笠井 芳夫**, 松井 勇***

Noboru YUASA, Yoshio KASAI and Isamu MATSUI

Inhomogeneity at the surface layer of structural concretes was studied in terms of pore structures and moisture distributions associated with a drying immediately after the demolding.

(1) Weight losses became larger when the drying started earlier, and became smaller when the water-cement ratio became smaller particularly at 30 %. (2) The decrease of moisture content began with the surface layer after the demolding, which was observed, at the age of 28 days, within 5 cm from the surface without regards to the difference in the water-cement ratio. (3) When the drying started earlier, the surface layer has less bound water content than the internal parts. It became conspicuous when the water-cement ratio became smaller. (4) When the drying started earlier and the portion was located closer to the drying front, total pore volume and partial pore volume larger than a radius of 180 or 320 Å increased and the volume smaller than the radius decreased, which can be attributed to an interruption of hydration reactions. (5) The porosity of concrete subjected to drying is reflected the pore structure at the demolding age for a long term. When the drying started earlier and the portion was located closer to the drying front, coarser pores were likely to remain. At a temperature of 20 °C, it is preferable for concrete with a water-cement ratio of 60% to be cured in a wet condition until the age of 7-day.

Keywords: Structural concrete, Cover concrete, Moisture content, Porosity, Drying, Inhomogeneity

構造体コンクリート、かぶりコンクリート、含水率、細孔構造、乾燥、不均質性

1. はじめに

構造体コンクリートのせき板の脱型は、経済性の観点から施工を進めるため、セメントの水和が活発な若材齢で実施されることが一般的である。このような場合では、コンクリートはその表面より乾燥するため、表面に近い層では水和に必要な水分が不足すると予想される。その結果、表層程、内部に比し乾燥の影響を受けやすくコンクリートの含水率は低くなり、細孔構造は粗いまま残ると考えられる。これらの一連の現象は、コンクリートの強度発現、耐久性に多大な影響を及ぼし、コンクリートに施工される仕上げ材のふくれ、はがれ等の劣化にも深く関わっている。これまでに筆者の一人笠井が行った「コンクリートの初期性状に関する研究」^{1) 2)}をはじめ、多くの研究者により、養生と強度^{3) - 13)}または耐久性¹⁴⁾との関係についての研究が報告されている。しかし、これらの研究では、コンクリート表面から内部の方向に、その距離に応じて養生の影響度が相違し、含水状態や細孔の構造等が異なると予想されるにもかかわらず、それを明らかにせず、養生条件とそれに対する総体としての平均的な強度や耐久性を論じるに過ぎなかった。

本研究は、強度及び耐久性に関連するコンクリートの基礎物性である含水率、細孔構造について、乾燥の開始時期が内部不均質性に及ぼす影響及び不均質性の形成過程について考察するものである。

2. 既往の研究と本研究の範囲

構造体コンクリートの含水状態を、乾燥面からの深さ方向の距離を意識して観察した研究として、内部湿度を測定した椎名らの研究¹⁵⁾、埋め込み電極を用いて含水率を測定した田畑らの研究¹⁶⁾がある。ただし、これらの場合、含水状態を示すのにとどまっている。

また、コンクリートの乾燥表面からの深さ方向の細孔構造の相違

表-1 含水率、細孔構造の不均質性に及ぼす影響要因と筆者らが行ったこれまでの研究

区分	要因	筆者の既に発表した研究 (番号は参考文献に対応する)
直接的 要因	乾燥環境	脱型材齢 (乾燥開始材齢)
	温度 湿度 風速	18), 19) 及び本報告 } 今後報告予定
	再水和 環境	水・湿分の供給 不透湿材料による被覆
間接的 要因	材料・ 調合	今後報告予定 22), 23)
	設計条件	セメントの種類 水セメント比 単位水量 20), 25) 24) 及び本報告 20)
		部位 部材寸法 (部材厚さ)
		22), 23) 21)

本論文は参考文献18)及び19)の発表論文で検討した内容に実験を追加してまとめたものである。

* 日本大学生産工学部建築工学科 講師・博士(工学)

** 日本大学生産工学部建築工学科 教授・工博

*** 日本大学生産工学部建築工学科 教授・工博

Lecturer, Dept. of Architecture and Architectural Eng., College of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., College of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., College of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

表-2 コンクリートの調合と空気量、スランプ、強度の実測値

W/C (%)	単位水量 (kg/m³)	質量(kg/m³)			混和剤(cc/m³)		空気量 (%)	スランプ (cm)	圧縮強度(MPa)			
		セメント	細骨材	粗骨材	No.70	No.303A			1日	3日	7日	28日
30	185	616	545	976	-	6160	4.3	21.4	23.9	38.2	49.2	53.1
40		463	671	976	2315	-	4.6	15.6	12.1	24.5	33.6	40.6
60		308	838	939	770	-	4.7	21.1	4.86	13.3	19.4	28.8
80		231	865	976	577.5	-	4.5	20.3	2.81	7.37	11.7	15.6

図-1 試験体の形状寸法

を観察した研究には、地濃らの研究¹⁷⁾がある。この中では、脱型時期（乾燥開始材齢）、水セメント比の影響を検討しており、脱型時期が早い程、水セメント比が大きい程、表層部と内部の細孔量に大きな差がみられることを示している。しかし、この研究における実験対象は、 $4 \times 4 \times 16$ cmのセメントペースト試験体（ 4×4 cmの側面を乾燥面）であり、観測した範囲は乾燥表面から最大37mmに限られ、含水状態については言及していない。

表-1は、乾燥による含水率、細孔構造の不均質性の形成に及ぼす各種影響要因を整理したものである。右欄に示した参考文献番号は、これらの要因がコンクリートの含水率、細孔構造の不均質性に及ぼす影響を検討した筆者らの研究である。本研究は、これまでに発表した内容^{18) 19)}に実験及び検討を加え、第1に、脱型材齢（乾燥開始材齢）、水セメント比の要因を考察し、第2に含水率、細孔構造の経時変化を検討し、不均質性の形成過程を考察するものである。

なお、含水率、細孔構造の不均質性とコンクリートの強度、耐久性及び仕上材の劣化との関係については、別に報告する。

3. 乾燥開始時期（材齢）が不均質性に及ぼす影響

3.1 実験概要

(1) 実験計画

ここでは水セメント比（30、40、60、80%）の異なるコンクリートについて、乾燥開始材齢（1、3、7、28日）を変え、乾燥表面から深さ方向の層ごとに、乾燥に伴うコンクリートの含水状態（材齢1日～材齢1年）、細孔構造（材齢28日時点）を観察し、これらの不均質性について考察するものである。

(2) コンクリートの材料、調合及び打込み

M社製普通ポルトランドセメント（比重3.16）、大井川水系川砂（表乾比重2.62、粗粒率2.83）、大井川水系川砂利（表乾比重2.66、粗粒率6.96）及び化学混和剤を使用し、表-2に示した調合表に基づき、水セメント比4種類のコンクリートを練り混ぜた。実験は柱等の鉛直部材を想定したもので、試験体は $10 \times 10 \times 40$ cmの型枠を用いて作製した（図-1）。表-2に、使用したコンクリートの圧縮強度（20℃、封緘養生）を示す。

(3) 乾燥（養生）条件

打込み後、試験体を温度20℃、相対湿度60%、ほぼ無風の恒温恒湿室内に静置し、材齢1、3、7日において、試験体の側面（ 10×10 cm）2面を開放し、材齢1年まで乾燥させた（図-1）。

(4) 含水率の測定

含水率は、図-1に示す位置に、筆者らが開発したセラミックセンサ²⁶⁾を埋め込み、材齢1年まで非破壊的に随時測定した。

図-2 材齢と質量変化率の関係

(5) 結合水率の測定

600℃強熱減量をセメントの水和物中に非蒸発水として取り込まれた結合水量とし、これをセメントの水和の目安とするため、硬化セメントペースト部分の結合水率として整理した。測定用試料は材齢28日目にそれぞれの試験体を乾燥面から0～1、2～3、4.5～5.5、9.5～10.5、19.5～20.5cmの部分に切断し、2.5～5.0mmの粒度に調整した後、アセトン処理及びD-dry処理を行って作製した。

この試料を用いて、結合水率を次の手順によって求めた。

- ① 試料の質量 W_0 (g)を測定した後、試料を600℃で1時間強熱し、デシケーター内で冷却の後、質量 W_i (g)を測定する。
- ② 強熱後の試料を10%塩酸溶液中で2時間攪拌し、セメントペースト部分を溶解させ、再び600℃で1時間強熱し、デシケーター内で冷却の後、質量を不溶残分質量 W_{ns} (g)として測定する。
- ③ 式(1)により試料の溶解率 WR_s (セメントペースト率(g/g))を、式(2)により結合水率 WR_h (g/g)を求めた。

$$\text{溶解率 } WR_s = \frac{\text{試料の質量 } W_0 - \text{不溶残分質量 } W_{ns}}{\text{試料の質量 } W_0} \quad (1)$$

$$\text{結合水率 } WR_h = \frac{\text{試料の質量 } W_0 - \text{強熱後の試料質量 } W_i}{\text{試料の質量 } W_0 \times \text{溶解率 } WR_s} \quad (2)$$

(6) 細孔構造の測定

結合水測定用試料を水銀圧入法による細孔構造の測定(測定範囲: 半径 $30\text{Å} \sim 3.2 \times 10^6\text{Å}$)に供した。結果は、鑛田らに従い、測定された細孔量 $V_{mp}(\text{cc/g})$ から式(3)を用いて、有効細孔量 $V_{ep}(\text{cc/g})$ として整理した²⁷⁾。有効細孔量は、コンクリート中の硬化セメントペーストに対応する指標である。

$$\text{有効細孔量 } V_{ep} = \frac{\text{試料の細孔量 } V_{mp}}{\text{溶解率 } WR_s} \quad (3)$$

図-3 水セメント比、乾燥開始材齢が質量含水率分布に及ぼす影響

3.2 実験結果及び考察

(1) 質量変化

図-2は、試験体の打込み時質量（材齢1日目に測定）に対する質量変化率を示したものである。質量変化率は、水セメント比が80、60％の場合、乾燥開始直後より著しく減少し、材齢が1年経過した後も質量の低下がみられる。これらの試験体では、乾燥開始材齢が早い程、質量減少率は大きい、その差は材齢の経過とともに小さくなっている。一方、水セメント比30％の場合、乾燥開始直後の変化量が少ないばかりでなく、材齢の経過とともに質量の減少がほとんどみられない。

(2) 含水率分布の変化

図-3は、水セメント比及び乾燥開始材齢ごとに含水率分布の経時変化を示したものである。どの試験体も乾燥開始とともに、乾燥面に近い部分から比較的急激に含水率が低下する傾向を示している。材齢28日（○印）において、含水率が内部に比べ低下する範囲は、水セメント比によらずおおむね表層5cmまでである。現在一般に市販されている普通ポルトランドセメントは、材齢28日を過ぎると、水和が鈍くなる傾向があることを考慮すると、内部に比べ水和が阻害されると予想される範囲は、乾燥面から5cmまでと考えられる。ただし、例えば水セメント比60、80％、乾燥開始材齢が1日の試験体のように、水セメント比が大きく、乾燥の開始が早いと、表層から5cmより深い部分の含水率も、乾燥面からの距離に応じてなだらかに変化している。

また、長期的には、含水率分布は乾燥開始材齢による相違があまりみられなくなり、表面からの距離に応じて、周囲の温・湿度に対して平衡した含水率に収束する傾向にある。本実験の場合、1年間、20℃、相対湿度60％の環境に静置した結果、含水率は、表層部(0.5cm)で水セメント比、乾燥開始材齢によらず2.2％前後、中心部(20cm)では、水セメント比が大きくなるにつれて含水率も大きく、水セメント比30％で4.6％前後、水セメント比80％で5.5％程度である。

ところで、乾燥開始前にも表層から内部にわたり均一に含水率の低下がみられる。この現象は、水セメント比が小さくなる程顕著であり、水和により自己乾燥（自由水が水和物に取り込まれ減少し、見かけ上乾燥する現象）したものである。従って、ここで述べている含水率の低下は、乾燥面からの水分蒸発と水和による自由水の減少が複合した結果である。なお、これらのことを考慮に入れた場合、図-2で示した試験体全体の質量の減少量と、図-3で示した含水率分布から推定される質量減少量は、概ね合致することが確認できた。

(3) 結合水率分布

表-3は、材齢28日における結合水率の分布を示したものである。乾燥開始材齢が早い程、乾燥面に近い程、内部に比べ結合水率は小さい結果を示している。結合水率を材齢28日まで封緘状態を保った（無乾燥）試験体に対する割合で考えると、

乾燥開始1日の表層0～1cmでは、水セメント比30％でおよそ70％、水セメント比40％でおよそ80％である。水セメント比80％では、乾燥の開始が結合水率に及ぼす影響よりも試験のばらつきの方が大きく、乾燥面からの深さ方向の差異はほとんどない。水セメント比が小さい程、乾燥に伴う結合水率の低下が大きいといえる。

(4) 細孔構造

図-4は、材齢28日における細孔径分布を示したものである。同一試験体内において、乾燥面からの深さ方向に細孔径分布の相違をみると、乾燥面に近い程、細孔が大きな径に偏るとともに全体の細孔量は増大する。乾燥開始材齢が早い程、水セメント比が大きい程、これらの傾向は顕著にあらわれている。

各試験体の総有効細孔量は表-3の通りであり、図-5に、乾燥面からの距離と総有効細孔量の関係を示す。総細孔量はこれまでの多くの研究からも水セメント比によって大きく変化することが知られているが、本実験による結果は、乾燥を受けた場合、無乾燥の場合に比べ、乾燥開始材齢が早い程、また乾燥面に近い程、総細孔量は多くなることを示している。この総細孔量が増加する範囲は乾燥面から、水セメント比30％では高々2cm、水セメント比40％及び60％では高々5cm、水セメント比80％では高々10cmである。水セメント比30％で乾燥開始材齢1日の表層0～1cmの総有効細孔量は、水セメント比40％の無乾燥の場合とほぼ等しく、また水セメント比60％で乾燥開始材齢1日の表層0～1cmは、水セメント比80％の無乾燥の場合とほぼ等しい。これは、性能上要求される水セメント比の規定

表-3 結合水率、総有効細孔量、メディアン半径、（材齢28日）

W/C (%)	乾燥開始材齢 (日)	乾燥面からの深さ (cm)	結合水率 (g/g)	総有効細孔量 ($\times 10^{-4}$ cc/g)	メディアン半径 (Å)	W/C (%)	乾燥開始材齢 (日)	乾燥面からの深さ (cm)	結合水率 (g/g)	総有効細孔量 ($\times 10^{-4}$ cc/g)	メディアン半径 (Å)
30	1	0～1	0.154	1599	386	40	1	0～1	0.162	2208	637
		2～3	0.180	1272	299			2～3	0.187	1966	350
		4.5～5.5	0.201	1241	251			4.5～5.5	0.215	1674	238
		9.5～10.5	0.196	1180	236			9.5～10.5	0.214	1645	239
		19.5～20.5	0.190	1128	237			19.5～20.5	0.212	1576	235
	3	0～1	0.159	1400	364		3	0～1	0.172	2062	715
		2～3	0.183	1211	278			2～3	0.200	1716	385
		4.5～5.5	0.180	1177	247			4.5～5.5	0.217	1673	233
		9.5～10.5	0.178	1172	286			9.5～10.5	0.206	1609	228
		19.5～20.5	0.182	1151	228			19.5～20.5	0.206	1616	244
	7	0～1	0.171	1307	423		7	0～1	0.196	1744	444
		2～3	0.175	1297	257			2～3	0.215	1707	291
		4.5～5.5	0.184	1261	248			4.5～5.5	0.220	1688	230
		9.5～10.5	0.183	1206	298			9.5～10.5	0.223	1659	240
		19.5～20.5	0.179	1177	245			19.5～20.5	0.213	1568	250
	無乾燥	0～1	0.184	1290	244		無乾燥	0～1	0.196	1531	328
		2～3	0.188	1210	240			2～3	0.213	1644	276
		4.5～5.5	0.183	1183	243			4.5～5.5	0.214	1620	233
		9.5～10.5	0.188	1285	266			9.5～10.5	0.211	1645	200
		19.5～20.5	0.187	1191	238			19.5～20.5	0.209	1627	217
60	1	0～1	0.194	3644	1631	80	1	0～1	0.204	5033	2654
		2～3	0.211	2651	1535			2～3	0.197	4849	1536
		4.5～5.5	0.212	2541	561			4.5～5.5	0.211	4646	562
		9.5～10.5	0.215	2624	307			9.5～10.5	0.205	3691	350
		19.5～20.5	0.214	2631	358			19.5～20.5	0.197	3609	358
	3	0～1	0.186	3340	1740		3	0～1	0.211	4435	1740
		2～3	0.206	2646	867			2～3	0.199	4256	867
		4.5～5.5	0.207	2557	543			4.5～5.5	0.207	4214	372
		9.5～10.5	0.208	2588	317			9.5～10.5	0.199	3699	317
		19.5～20.5	0.208	2669	229			19.5～20.5	0.215	3661	329
	7	0～1	0.185	2969	1086		7	0～1	0.193	4055	1086
		2～3	0.204	2754	534			2～3	0.204	3880	619
		4.5～5.5	0.207	2576	321			4.5～5.5	0.202	3794	321
		9.5～10.5	0.205	2575	275			9.5～10.5	0.204	3666	275
		19.5～20.5	0.204	2540	272			19.5～20.5	0.190	3654	272
	無乾燥	0～1	0.201	2691	203		無乾燥	0～1	0.193	3751	286
		2～3	0.203	2580	221			2～3	0.193	3779	282
		4.5～5.5	0.205	2840	244			4.5～5.5	0.196	3779	251
		9.5～10.5	0.198	2653	217			9.5～10.5	0.197	3682	290
		19.5～20.5	0.204	2653	229			19.5～20.5	0.201	3655	286

図-4 乾燥開始材齢が細孔径分布におよぼす影響 (材齢28日)

をその養生と関連させて考える上で興味深い結果である。

表-3には、更にメジアン半径 (測定中の累加細孔量において全体の50%に相当する細孔半径を示すもので分布の偏りを示す特性値) を併記している。無乾燥の場合、水セメント比により若干の差はあるが、その半径は200~300Åの範囲である。一方、乾燥を受ける場合、この無乾燥の場合の水セメント比間の相違に比べ、乾燥開始材齢及び乾燥面からの距離がメジアン半径に及ぼす影響は大きく、乾燥開始材齢が早い程、乾燥面に近い程、メジアン半径は大きくなっている。この現象は水セメント比が大きい程著しい。

図-6は、細孔径分布において、乾燥を受けた場合に増える細孔径と減る細孔径を検討するため、無乾燥コンクリートに対する乾燥コンクリートの相対細孔径分布 (乾燥コンクリートの有効細孔量-無乾燥コンクリート有効細孔量) を示したものである。乾燥を受けたコンクリートは、無乾燥のコンクリートに比べ、半径180Åもしくは320Å以上の細孔が増加し、逆に半径180Åもしくは320Å以下の細孔が減少している。これらは乾燥に伴い水和が阻害された結果と理解でき乾燥によって、半径180Åもしくは320Å以上の細孔がそれ以下の細孔に移行 (緻密化) せず、残存することを意味している。乾燥開始材齢が早い程、乾燥面に近い程この細孔の増減量は大きく、増加する細孔は大きな径に及ぶ。また、これらの現象は、水セメント比が大きい程著しく、その場合乾燥面より深い層まで達する。

鉄筋コンクリート構造物の耐久性の低下は、小さい径の細孔に比べ大きい径の細孔の量が関与すると考えられる。以上の結果から、

図-5 総有効細孔量分布 (材齢28日)

大きい径の細孔を少なくするためには、若材齢に乾燥させない養生が必要であり、それは水セメント比が大きい程特に大切であることがわかる。

4. 細孔構造の不均質性の形成

4.1 実験概要

図-6 乾燥により増減する細孔径分布 (材齢28日)

(1) 実験計画

ここでは、水セメント比60%のコンクリートについて、乾燥開始材齢（1、3、7日、無乾燥）を変え、乾燥面から深さ方向の層ごとに、材齢3年の含水率を示すとともに、細孔構造の経時的な変化（材齢1日～材齢3年）を観察し、乾燥開始前後におけるコンクリートの細孔構造の形成過程を考察する。

(2) コンクリートの材料、調合及び打込み

表-2に示した水セメント比60%のコンクリートを用いて、3.1(2)項と同様に作製した。ただし、作製時期がずれているので、厳密には材料のロット等は、同一ではない。

(3) 乾燥（養生）条件

打込み後、試験体を温度20℃、相対湿度60%のほぼ無風の恒温恒湿室内に静置し、材齢1、3、7日において、試験体側面（10×10 cm）2面を開放し乾燥させた。また、これらの他、試験体全面を封緘したまま同室内に静置する無乾燥試験体を加えた。

(4) 含水率の測定

3.1(4)項と同様に、セラミックセンサを用いて行った。

(5) 細孔構造の測定

材齢1、3、7、14、28日目及び3年目に、それぞれの試験体を乾燥面から0～1、1～2、4～5、19.5～20.5 cmの部分に切断した。以後の処理は3.1(6)項と同様に行った。

4.2 実験結果及び考察

(1) 材齢3年目の含水率分布

表-4は、材齢3年目の含水率分布を示している（同じ試験体ではないが、図-3に材齢1年までの結果が示されているので、ここでは

材齢3年目以外の結果を割愛した。なお、無乾燥の試験体の場合、図-3で本実験に対応するのは材齢28日までである）。乾燥を受ける場合、打込み後3年が経過しても表層含水率は低く、表層0.5 cm部分の含水率は2.5%程度であり、乾燥面から20 cmの中心部分は3.5%程度であった。無乾燥の試験体ではいずれの深さでもおよそ3%で均一な含水状態を示した。これらは乾燥による水分の蒸発だけでなく、水和に伴う自由水の減少、細孔構造による平衡含水率の相違²⁸⁾などが複合された結果と考えられる。

(2) 細孔構造の経時変化

a. 無乾燥（封緘養生）試験体の細孔構造の経時変化

封緘養生のまま無乾燥状態にある試験体は、細孔構造の内部不均質性がみられない。そこで、図-7は表層部0～1 cm部分のみ細孔径分布の経時変化を示したものである。

材齢経過に伴う変化は、次のとおりであった。

- ①材齢1日：半径3,200～5,600 Åを中心に極めて粗い径に細孔が分布している。
- ②材齢1日から材齢3日までの変化：見かけ上半径320 Å以下の細孔は変化しないが、半径320 Å以上の細孔が減少している。

表-4 材齢3年における質点含水率（単位：%）

乾燥開始 材齢	乾燥面からの深さ (cm)					
	0.5	1.5	4.5	7.5	10.5	20.0
1日	2.5	2.4	2.5	2.9	2.7	3.5
3日	2.3	2.2	2.7	2.9	2.8	3.5
7日	2.5	2.6	2.6	2.6	3.2	3.9
無乾燥	3.1	2.9	2.9	2.8	3.0	2.9

③材齢3日から材齢7日までの変化：半径560Å以上の細孔が減少し、半径56～560Åの細孔が増加している。

④材齢7日から材齢14日までの変化：半径180～1,000Åの細孔が減少している。

⑤材齢14日から材齢28日までの変化：半径180Å以下の細孔が若干減少している。

⑥材齢28日から材齢3年までの変化：材齢28日までの変化に比べ、細孔径分布の変化は小さい。若干半径180Å以下の細孔が少なくなる程度である。

以上の変化は、乾燥によってセメントの水和が阻害されない場合の、水和のみに起因した変化と理解できる。

b. 乾燥を受けた試験体の細孔構造の経時変化

図-8は、乾燥開始材齢及び乾燥面からの距離ごとに、細孔構造の経時変化を示したものである。

表層部(0～1cm)をみると、乾燥開始材齢1日の場合は、乾燥を開始しても材齢3日までに細孔量の減少がみられる。ただし、その細孔分布のピークは、材齢1日と同様、半径3,200～5,600Åの大きな径である。その後の細孔径分布の変化は、材齢の経過にもかかわらずわずかである。

乾燥開始材齢3日の場合、乾燥を開始した材齢3日から材齢7日の間に、乾燥開始材齢1日の場合に、乾燥を開始しても材齢1日から材齢3日にみられたような、著しい細孔量の減少はみられず、細孔の分布の変化も極めて緩慢である。これは、前者の場合、材齢1日から材齢3日までの期間はセメントの水和が活発であるため、材齢1日で乾燥を受けても水和は若干進むが、後者の場合、材齢3日から材齢7日の間は、セメントの水和が前者程活発でないためと思われる。また、乾燥開始材齢7日の場合、材齢7日まで封緘養生

(無乾燥状態)を保ったため、小さい径に偏った細孔の分布は、その後の乾燥により、半径560Å以上の細孔はほとんど変化しないが、半径560Å以下の細孔は減少している。

ところで、どの乾燥開始材齢の試験体もこの半径560Å以下の細孔は、乾燥開始後も減少している。毛細管凝縮理論²⁹⁾によると、相対湿度98%の場合、半径550Å以下の細孔内は水で満たされると考えられる。また、乾燥を受けても細孔内は、試験体内部からの湿気移動により、湿度が高いと予想される。これらの結果、乾燥状態でも半径560Å以下の細孔は、水和により減少したものと思われる。

一方、乾燥面から深さ方向に細孔構造の経時変化をみると、乾燥面からの距離が大きくなるにつれて、乾燥後も水和が進行し、経時的に組織が緻密化している。これは、乾燥の影響があらわれるまで

図-7 無乾燥コンクリートの細孔径分布の経時変化

図-8 乾燥コンクリートの細孔径分布の経時変化

に時間差があり、また含水率の低下も表層に比べ緩慢であるためと考えられる。

以上、乾燥を受けたコンクリートは、長期にわたり乾燥開始時の細孔構造が反映されることがわかる。乾燥開始材齢が早い程、乾燥面に近い程、大きな細孔が残りやすい。大きな細孔を残さず、細孔量を減じるためには、半径560Å以上の細孔が少なくなる材齢7日までは、湿潤養生とすることが望ましい。長期的には半径560Å以下の細孔は、乾燥後も減少することが期待できる。

5. まとめ

本研究により、構造体コンクリートの脱型後の乾燥に伴う含水率、細孔構造の内部不均質性を検討した結果は、以下のとおりである。

- (1) 乾燥の開始が早い程、質量の減少は大きい。この減少は、水セメントが小さくなる程小さくなり、水セメント比30%の質量減少は極めて小さい。
- (2) 乾燥の開始とともに、乾燥面に近い部分から含水率が低下する。この低下は、材齢28日時点で水セメント比によらずおおむね乾燥面から5cmまでにみられる。含水率分布は、長期的には乾燥開始材齢によらず、表面からの距離と水セメント比に応じた周囲の温・湿度に平衡した含水率に収束する。
- (3) 乾燥開始材齢が早い程、表層部は内部に比べ、結合水率が低い。この低下は、水セメントが小さくなる程大きい。
- (4) 乾燥開始材齢が早い程、乾燥表面に近い程、乾燥に伴い水和が阻害されるため、半径180Åないし320Åより大きな径の細孔が多く、半径180Åないし320Å以下の細孔が少なく、総有効細孔量は多い。この現象は水セメント比が大きくなる程著しい。
- (5) 乾燥を受けたコンクリートは、長期にわたり乾燥開始時の細孔構造が反映され、乾燥開始材齢が早い程、乾燥面に近い程、大きな細孔が残りやすい。水セメント比60%のコンクリートの場合、20℃の温度下では材齢7日までは、湿潤養生とすることが望ましい。

【謝辞】

本研究は、平成4年度文部省科学研究費（奨励研究A：湯浅昇）及び平成6年度、平成7年度文部省科学研究費（一般研究C：代表笠井芳夫）の交付を受け、実施した研究によって構成されている。記して謝意を表する次第です。

【参考文献】

- 1) 笠井芳夫：極く早期脱型するコンクリートの強度に関する研究（その1）、日本建築学会論文報告集、No. 179、pp. 17-23、1971年
- 2) 笠井芳夫：極く早期脱型するコンクリートの強度に関する研究（その2）、日本建築学会論文報告集、No. 180、pp. 7-12、1971年
- 3) H. J. Gilkey: The Effect of Varied Curing Conditions Upon the Compressive Strength and Mortars and Concrete, Proc. ACI Vol. 22, pp. 395-436, 1926
- 4) H. J. Gilkey: The Mist Curing Concrete, Eng. News-Record, Oct. pp. 630-633, 1937
- 5) Effect of Air Drying on the Compressive Strength of Concrete, Concrete Laboratory Report, No. C-796, U. S. Bureau of Reclamation, Apr. 1955
- 6) W. H. Price: Factors Influencing Concrete Strength, Jour. of. ACI, Feb. pp. 418-432, 1951
- 7) T. Waters: The Effect of Allowing Concrete to Dry Before It has Fully Cured, Magazine of Concrete Research, No. 20,

Vol. 7, pp. 79-82, 1955

- 8) 日本建築学会混合セメント用法研究委員会：混合セメントを用いたコンクリートの型枠存知期間と強度との関係に関する研究、セメント協会、セメント技術年報、No. 17, pp. 304-308、1963年
- 9) 渡辺嘉香、河野清、小林辰男：乾燥によるコンクリートの強度変化、セメント協会、セメント技術年報、No. 13, pp. 297-302、1959年
- 10) 児玉武三：不完全養生コンクリートの強さ、セメント協会、セメント技術年報、No. 15, pp. 238-242、1961年
- 11) 原田有、洪悦郎、右田健児、仕入豊和、後藤知以、淵上政美、椎名国雄：コンクリートの長期材齢にわたる強度性状、セメント協会、セメント・コンクリート、No. 250, pp. 2-9、1967年
- 12) セメント協会コンクリート専門委員会：各種セメントを用いたコンクリートの長期強度、セメント・コンクリート、No. 246, pp. 43-49、1967年
- 13) C. E. Burnet & M. R. Splinder: Effect of Time of Application of Sealing Compound on the Quality of Concrete, Jour. of ACI, Nov. 1952
- 14) 和泉意登志、寺田謙一、横須賀誠一、松浦光男、松尾忠、大岡督尚、田中久雄、真壁深：せき板の残置期間および初期養生が構造体コンクリートの品質に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、No. 449, pp. 35-45、1993年
- 15) 椎名国雄：コンクリートの内部湿度と変形、コンクリートジャーナル、Vol. 7, No. 6, pp. 1-11、1969年
- 16) 田畑雅幸、洪悦郎、鎌田英治：電極法によるコンクリート含水量の測定、日本建築学会学術講演概要集（構造系）、pp. 117-118、1976年
- 17) 地濃茂雄、平野隆、仕入豊和：養生条件とコンクリート表層部の細孔構造、セメント協会、セメント技術年報、No. 38, pp. 266-269、1984年
- 18) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：表層コンクリートの品質の検討（乾燥に伴う含水率分布と細孔構造の変化）、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp. 449-450、1993年
- 19) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：表層コンクリートの品質の評価（乾燥を受ける表層コンクリートの細孔構造の経時変化）、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp. 199-200、1994年
- 20) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：表層コンクリートの品質（その4セメント種類、単位水量の影響）、日本大学生産工学部第27回学術講演会、pp. 25-28、1994年
- 21) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：表層コンクリートの品質（部材厚の違いが内部不均質に及ぼす影響）、日本建築学会大会学術講演梗概集A-1、pp. 177-178、1995年
- 22) 佐藤弘和、湯浅昇、逸見義男、松井勇、笠井芳夫：仕上材を施す下地コンクリートの品質、日本建築学会大会学術講演梗概集A-1、pp. 1391-1392、1995年
- 23) 湯浅昇、田中享二、浅見勉、橋田浩：塗床を対象とした下地コンクリートの含水率分布及び細孔構造、日本コンクリート工学協会、コンクリート工学年次論文報告集第16巻第1号、pp. 675-680、1994年
- 24) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：構造体コンクリートの表層から内部の含水率及び細孔構造の不均質性、セメント協会セメント・コンクリート論文集No. 48, pp. 430-435、1994年
- 25) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇、露木尚光：各種セメントを用いたコンクリートの乾燥に伴う内部不均質、セメント協会セメント・コンクリート論文集No. 49, pp. 60-65、1995年
- 26) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案、日本建築学会構造系論文集、No. 498, pp. 13-20、1997年
- 27) 吉野利幸、鎌田英治、田畑雅幸、柳敏幸：空隙構造依存性に基づくコンクリート強度推定法に関する研究（第1報圧縮強度と空隙構造の関係、日本建築学会論文報告集、No. 312, pp. 9-17、1982年
- 28) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇：構造体コンクリートの含水率、細孔構造の不均質性、第21回セメント・コンクリート研究討論会論文告集、pp. 13-18、1994年
- 29) 近藤連一編著：多孔材料、pp. 47-48、1973年

(1997年9月9日原稿受理、1998年2月3日採用決定)