

若材齢時から乾燥を開始したコンクリートの含水状態および細孔空けき組織

橋 田 浩
(技術研究所)

§ 1. はじめに

本報告は、下地コンクリート面に施工される仕上げ材のはく離、ふくれといった欠陥の発生にコンクリート中の含水状態が大きく関与しているとの前提のもと、仕上げ材施工前の乾燥過程におけるコンクリート内部の水分挙動を把握することを目的とした研究の一部であり、実際の施工現場を考慮して、若材齢時から乾燥を開始したコンクリートを対象としている。

乾燥環境に曝されるコンクリート中の水分挙動に関しては、主に乾燥収縮問題の観点から、Bazantら¹⁾、阪田ら²⁾をはじめとして多くの研究者³⁾⁴⁾が、水分拡散係数の含水率依存性を考慮した数値解析による予測手法を示している。Bazant¹⁾は、コンクリート中の空けき相対湿度(以下、空けき湿度)を水分移動のポテンシャルとして拡散方程式を解いている。一方、阪田ら²⁾、Nilsson³⁾、永松⁴⁾らの解析手法は、Bazantらに準じたものであるが、空けき湿度を含水量または脱水量に置き換えて拡散方程式を解いている。コンクリート中の主な水分移動は水蒸気拡散によるものと考えられることから、Bazantらが示した手法は合理的といえるが、若材齢時の飽水状態に近いコンクリートの含水量に対してはその適合性に問題が残る。また、若材齢時からの乾燥を対象とした場合、コンクリート内部の空けき湿度と含水量は一対一で対応しなくなるため、含水量や脱水量を水分移動のポテンシャルとすることには矛盾が生じる。このように、既往の解析手法では、若材齢時からの水分状態を十分にシミュレートできるとは言い難く、また、その挙動を検討するための実験データも少ない。空けき湿度と含水量が一対一で対応しなくなるのは、セメントの水和反応によりコンクリートの空けき組織が変化し、かつ、コンクリート内部で水和の進行度が異なってくるため空けき組織が不均一になるためである。すなわち、若材齢時からの乾燥によるコンクリート内部の水分状態の変化は、空けき組織の変化にも強く反映される。

このような観点から、本報告は、若材齢時から乾燥を開始したコンクリートの内部水分状態ならびに細孔空けき組織の変化を実験により明らかにし、先に示した解析手法³⁾に改良を加えた数値シミュレーションによる考察を加え、水分挙動ならびに空けき組織の変化のメカニズムを把握することを目的としている。

なお、コンクリートの水分移動特性は、本来、空けき組織のような微視的特性から説明しうるものである。また、水分逸散に伴う乾燥収縮メカニズムも、空けき中の水の表面張力に起因する毛管力による材料変形であると考えられている。したがって、本報告内容は、仕上げ材下地としての観点からだけでなく、若材齢時からのコンクリートの乾燥収縮や内部応力状態を理解するための一資料としても有用と考えられる。

§ 2. 実験概要

2.1 試験体

試験体とするコンクリートは、水セメント比60%、目標スランブ18cmのプレーンコンクリートとし、各測定項目用の型枠に打込んだ。コンクリートの調合を表-1に示す。

2.1.1 空けき湿度測定用試験体

コンクリート中の空けき湿度測定試験体には、150φ×150mmの塩化ビニル製シリンダーに底板を取り付けた型枠を使用した。この型枠にはあらかじめ上端から6、15、45、75、135mmの位置に金属棒を差し込んでおき、コンクリート硬化後金属棒を引き抜いて13φ×60mm(上端から6mmの孔は5×25×60mm)の湿度測定孔とした。また、コンクリート打込み前に型枠内面に打ち継ぎ

W/C (%)	水 (kg/m ³)	セメント (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)	粗骨材 (kg/m ³)	スランブ (cm)	空気量 (%)
60	187	312	788	1068	18	1

表-1 コンクリートの調合

用のエポキシ樹脂を塗布しておき、コンクリート硬化後の側面は完全にシールされるように工夫した。打込んだコンクリートは型枠のまま以後の養生を行った。

2.1.2 含水率測定用試験体

含水率測定用試験体には、100φ×150mmの塩化ビニル製シリンダーをあらかじめ30mmずつ5層に分割しておいた型枠を使用した(図-1)。型枠はコンクリートを打込みながら、各層に金網を挿入し、順次重ねて厳重にテーピングし、一体化した。これらの処置は、含水率測定の際にコンクリートをたがねで簡単に分割できるようにし、内部含水率分布の測定を可能にするために採用したものである。また、コンクリート側面のエポキシ樹脂によるシール処置は空げき湿度測定用試験体と同様である。

2.1.3 細孔空げき測定用試験体

細孔空げき測定用試験体には、100φ×150cmの塩化ビニル製シリンダーを型枠として使用した。

2.1.4 養生条件

それぞれの試験体は、コンクリート打込み後から0, 2, 7日の封かん養生時間をおき(0日は封かん養生なし)、その後40%RHまたは75%RHで型枠のまま仕上げ面のみを一面乾燥させた。したがって、養生条件は表-2に示す6種類となる。また、養生中の環境温度はすべて20℃とした。

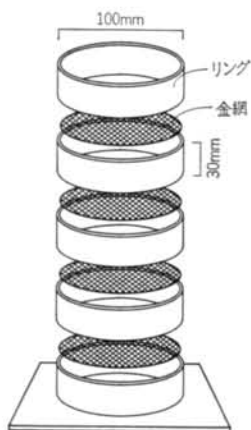


図-1 含水率測定用型枠

記号	養生および乾燥条件
0d-40	打込み直後から湿度40%RHで一面乾燥
2d-40	2日封かん養生後、湿度40%RHで一面乾燥
7d-40	7日封かん養生後、湿度40%RHで一面乾燥
0d-75	打込み直後から湿度75%RHで一面乾燥
2d-75	2日封かん養生後、湿度75%RHで一面乾燥
7d-75	7日封かん養生後、湿度75%RHで一面乾燥

表-2 コンクリートの養生および乾燥条件

なお、これらの試験体および養生条件は、デッキプレート上に打込まれるコンクリートスラブを想定したものである。

2.2 測定概要

2.2.1 含水状態の測定

空げき湿度は、一面乾燥開始後、定期的に3カ月まで測定した。測定には静電容量式薄膜センサによる湿度計(Vaisala社製)を用いた。この湿度計は、飽和塩を用いて簡単に校正が行なえ、0~100%RHの範囲で比較的精度良く湿度測定が行えるものである。

含水率分布は、乾燥開始後、1週間、1カ月、3カ月に試験体を分割し、105℃のオーブンで絶乾にして求めた。含水率は3試験体の平均として求めた。

2.2.2 細孔空げき分布の測定

乾燥開始後、1週および3カ月における細孔空げき径分布を水銀圧入ポロシメーター(Micromeritics社製)で測定した。測定細孔直径範囲は0.006~200μmである。試験体はカッターで表層(0~10mm)、中層(70~80mm)、底層(140~150mm)をそれぞれ1cm幅に切り出し、これを粉碎して2.5~5mm角のモルタルサンプルとして測定した。モルタルサンプルはアセトン洗浄した後、D-Dry処理する一般的な前処理を行ってから測定した。

§ 3. 測定結果および考察

3.1 含水状態について

各試験体の乾燥開始から1週間、1カ月、3カ月における空げき湿度分布を図-2に示す。45%RH環境の方が75%RHより明らかに乾燥が早い。3カ月程度の乾燥期間では底部の湿度にはそれ程の差はない。また、封かん養生時間による差異は小さく、2dと7dではほとんど同一の値を示している。次に、含水率分布を図-3に示す。表層部を除き、乾燥環境湿度の差はそれ程ないが、75%RH環境の方がわずかに内部まで含水率が高いようである。また、封かん養生時間が長いほど明確に含水率は高くなっており、乾燥期間によらず、2dは0dより約0.5wt%、7dは約1wt%含水率が高くなっている。このように、封かん養生時間が異なると空げき湿度と含水率の対応関係に変化が生じることがわかる。

図-4に測定結果から得られたコンクリート各層の含水率とそれに対応する空げき湿度の代表的なデータ群を示す。データは、封かん養生時間別に示してある。同図には Nilsson³⁾ が文献調査および自らの実験結果に基づ

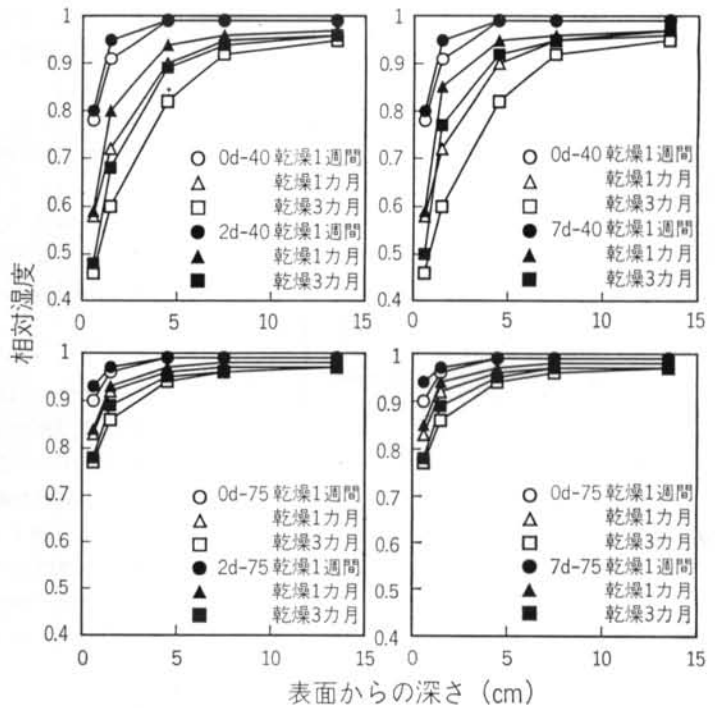
いて導出した相対湿度とその雰囲気中で平衡するコンクリートの含水率の関係を実線で示している。このような関係を示す曲線は水蒸気脱着曲線（平衡含水率曲線）と呼ばれる。今回の実験結果は、Nilsson の水和率 0.5 と 0.8 における 2 本の曲線の範囲にほぼ収まっている。水和率 0.5 は材齢 2 日、0.8 は材齢 28 日の水中養生したセメントの水和率に匹敵する。これらから、0d あるいは 2d の表層部は、若材齢時からの乾燥のために水和反応が阻害され、水和率 0.5 あるいはそれ以下に対応しているものと理解できる。また、底層部でも 0d は水和率 0.5 付近にあり、打込み直後からの乾燥では底層部まで水和が阻害されているものと推察できる。なお、水和率が低いと考えられる表層部が相対湿度 0.6~0.8 で水和率 0.8 の曲線に近づいている理由については、その部分のデータが少ないこともあり、現段階でははっきりしない。

封かん養生時間が異なると空げき湿度と含水率の対応関係に変化が生じるのは、養生水分条件が悪く水和の進行が阻害される（厳密には、後述するように、空げき組織の粗くなる）ほど同一空げき湿度で平衡する含水率が低いためであるといえる。

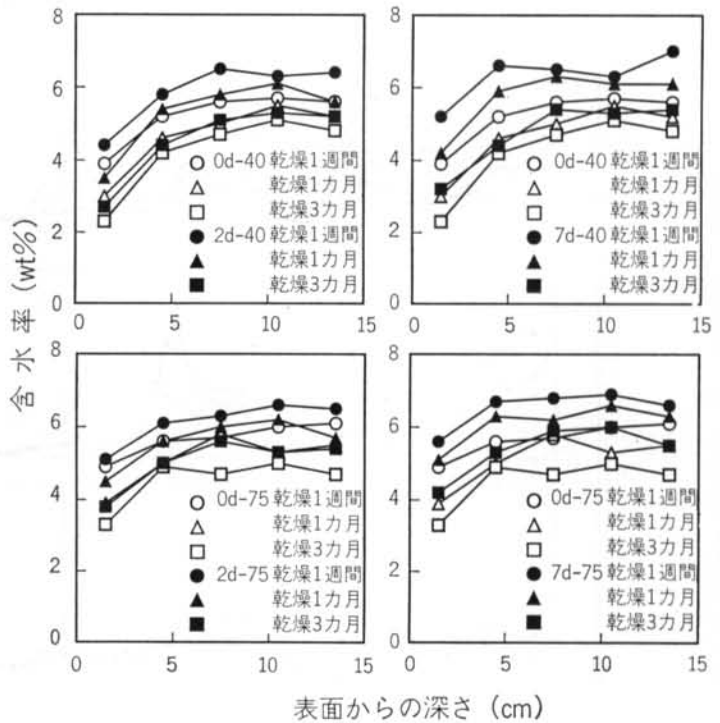
3.2 細孔空げき分布について

図一 5 に各試験体の乾燥開始後 1 週および 3 カ月における表層、中層、底層それぞれの細孔径分布（微分細孔容積曲線）を示す。いずれのサンプルも 10 μ m 以上の細孔量は少なく、大差がなかったため図示していない。

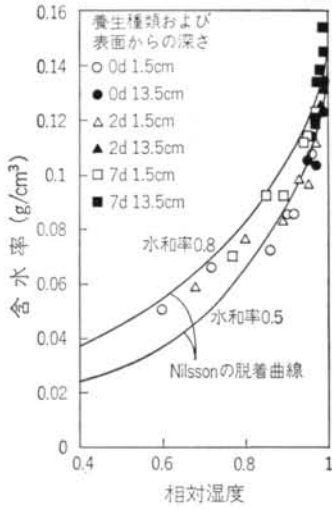
細孔径分布をみると、封かん養生時間が短いほど、乾燥面に近いほど顕著に空げき組織が粗くなっており、7d と比べ、0d は底層部まで、2d は中層部まで水和の粗害により空げき組織が粗くなっているのが認められる。一方、乾燥環境湿度による空げき組織変化の差異は、0d を除き、あまり認められな



図一 2 空げき湿度分布の測定結果



図一 3 含水率分布の測定結果



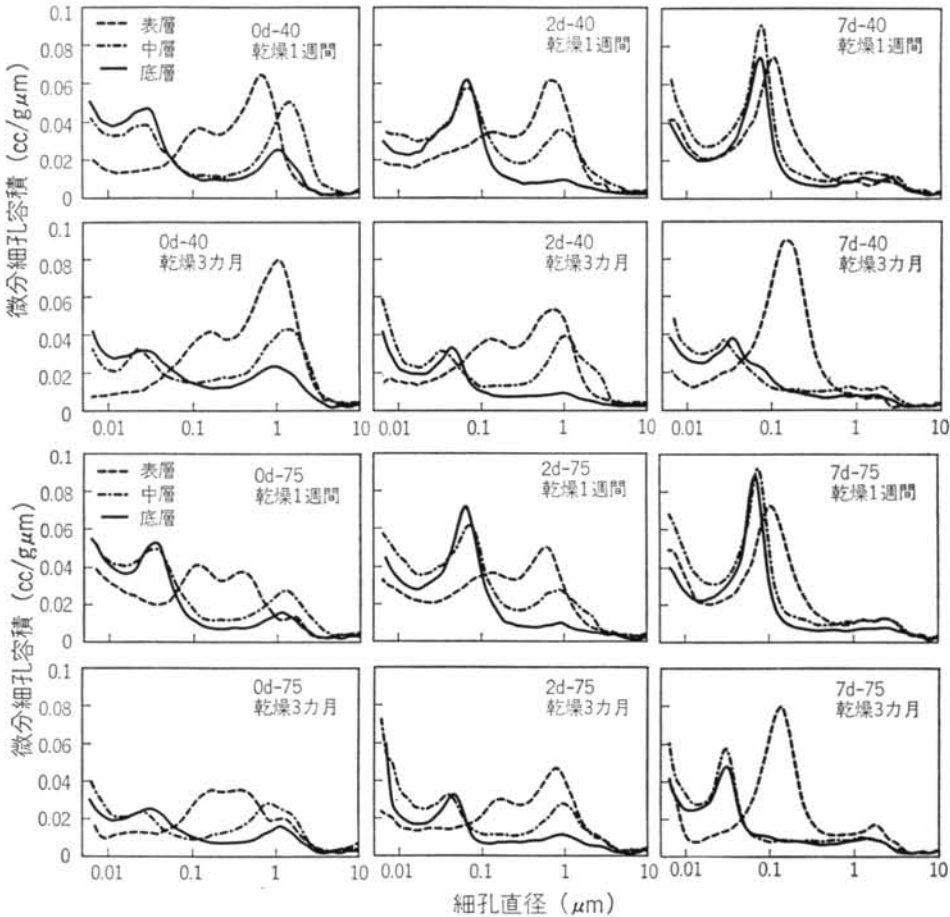
図—4 空けき湿度と含水率の関係および Nilsson³⁾ の水蒸気脱着曲線

い。また、1週と3カ月の分布を比較すると、中層や底層では、直径が0.1~0.2 μm 以上の部分についてはほとんど変化がなく、それ以下の径の細孔が材齢とともに密実化しているのがわかる。また、表層に関しては全細孔径において1週から3カ月までの間の変化はほとんど無い。

ところで、毛细管は、ある程度になると水蒸気が凝縮し液水で満たされている。このような毛细管凝縮は Kelvin 半径 r_k で表される。

$$r_k = -\frac{2\gamma M}{\sigma RT \ln(p/p_s)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 γ は水の表面張力、 M は水の分子量、 ρ は水の密度、 R は気体定数、 T は絶対温度、 p/p_s は水蒸気の相対圧である。温度20 $^{\circ}\text{C}$ における Kelvin 半径と相対湿度の関係を図—6に示す。この関係から、相対湿度0.98では液水で満たされている細孔の最大直径は約0.1 μm 、0.99では0.2 μm となる。中層や底層では乾燥開始



図—5 乾燥開始後1週および3カ月における細孔径分布(微分細孔容積曲線)

後1週時点での空げき湿度は0.98~1.0であり、したがって、0.2~0.1 μm より小さな径の細孔はまだ水隙となっていてと考えられ、その部分のみ材齢に伴いさらに密実になっている。一方、表層部は、この時点ですでに40% RH環境で空げき湿度約0.8、75% RH環境で約0.94であり、これらの数値はそれぞれ0.01 μm 、0.03 μm の細孔径まで水隙であることを示している。図-5を改めてよく見ると、その直径より小さい細孔量はわずかではあるが減少しており、密実化が認められる。細孔組織中の水和反応ならびに組織の密実化は、液水で満たされている細孔中でのみ進行する現象と考えられ⁶⁾、本測定結果はそのことに合致している。このように、水和進行中のコンクリートの細孔空げき組織の変化は、空げき湿度変化ならびに Kelvin 半径により定性的に説明できる。すなわち、空げき組織の密実度は、単純な材齢や水和率ではなく、水和の進行度と乾燥の進行度の重ね合わせで種々異なる。図-5から、水和率が低い時期に空げき湿度が1.0未満になると直径0.1~5 μm の細孔量が多く、組

織の粗いコンクリートになると考えられる。

また、3.1で述べた湿度と含水率の対応関係に変化が生じる理由も、微視的には、Kelvin 半径と細孔空げき分布状態から説明できる。すなわち、養生水分条件が悪い部分ほど細孔空げきが粗くなり、同一湿度で凝縮している小さな径の細孔量が少ないために含水率が低いといえる。

§ 4. 含水状態の数値解析

ここでは、先に示した解析手法⁹⁾に改良を加えた数値シミュレーションにより若材齢時から乾燥を開始したコンクリートの水分挙動について検討する。解析手法の基本となる部分は、Bazant らの手法¹⁾を踏襲している。改良部分は、水蒸気脱着曲線（以下、脱着曲線）の考え方、乾燥開始直後の含水量の取り扱いに関する考え方の2点であるので、その部分について以下に述べ、その他のシミュレーション条件については割愛する。

4.1 湿気拡散方程式および水蒸気脱着曲線

Bazant らが示している乾燥に伴うコンクリート中の空げき湿度 H は次式に従う。

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(D \text{grad } H) + \frac{\partial H_d}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで D は拡散係数であり、 H_d は水和による湿度低下（自己乾燥）である。(2)式の拡散は湿気勾配によるものなので、乾燥開始時の初期値としては $H=1.0$ を与えることになる。また、含水率は計算された空げき湿度と脱着曲線より求める。

脱着曲線については、本解析では図-7のように仮定した。この曲線は、相対湿度1.0近傍を除き、図-4の Nilsson の曲線を3次曲線で近似したものであり、水和率が高いほど脱着曲線は上方に移動する。相対湿度1.0近傍では水和率に関わらず脱着曲線は1本の直線とみなす。乾燥および自己乾燥の進行に伴い含水状態はその直線に沿って変化するが、ある水和率となった時点の含水状態が水和率の3次曲線の値と等しくなるとはその曲線が脱着曲線となるものである。また、4.2で述べるように、相対湿度1.0に対しては、含水率0.16 g/cm^3 を与えている。すなわち、本解析では、相対湿度1.0を切った時点（今回の解析では0.99付近）での水和率で、言い換えれば、図-5の0.2 μm 程度以上の細孔空げき状態で脱着曲線が決定すると仮定していることになる。

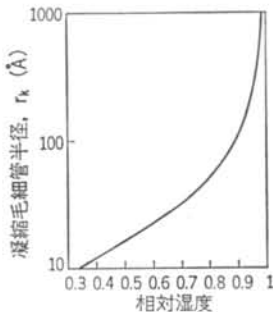


図-6 相対湿度と Kelvin 半径の関係

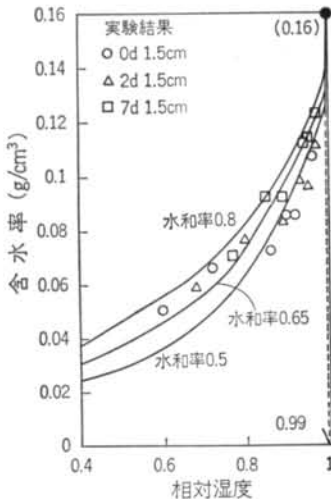


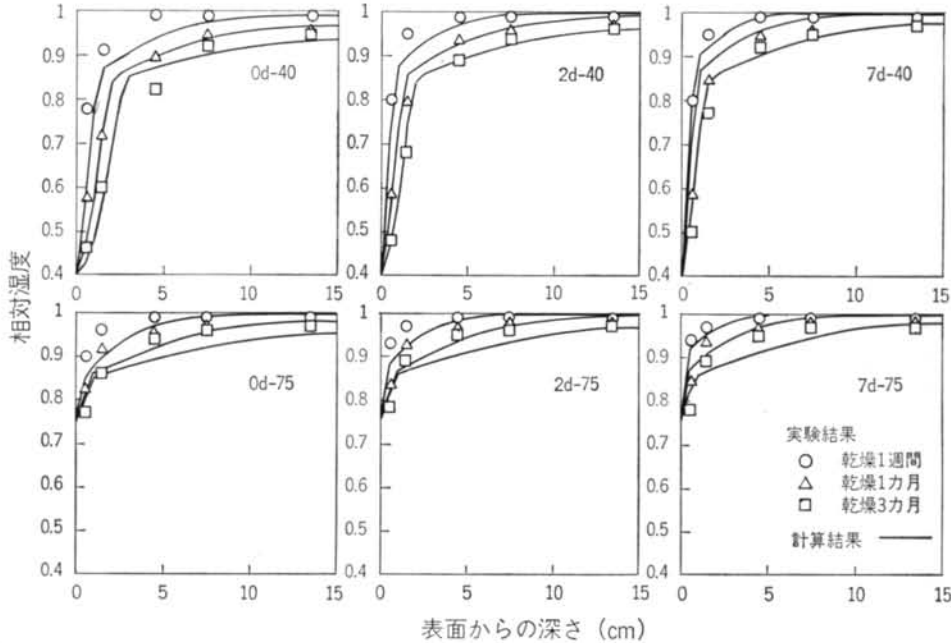
図-7 数値計算に用いた水蒸気脱着曲線

4.2 乾燥開始直後の含水量の取り扱い

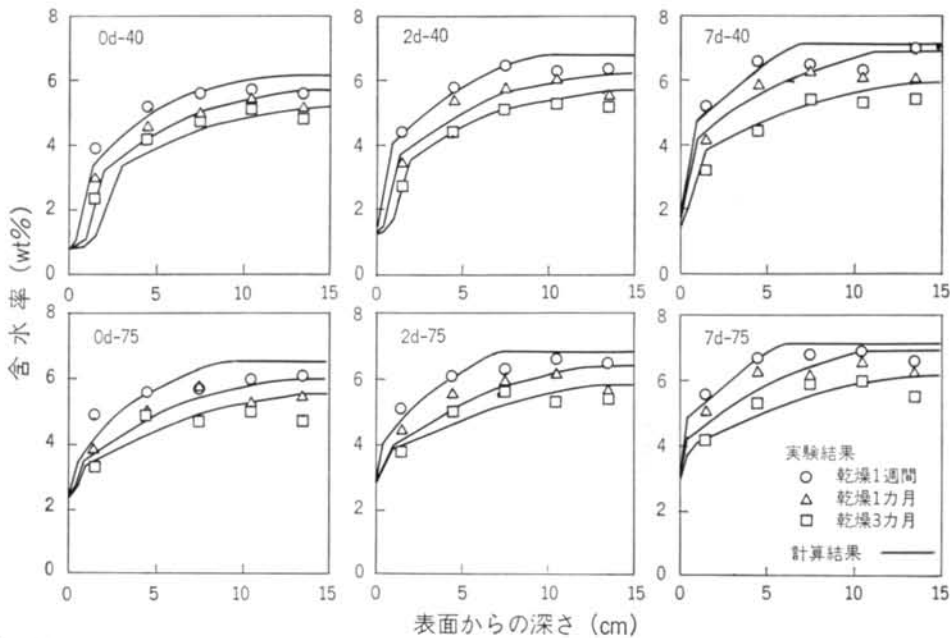
今回のコンクリートの場合、練り混ぜ時の単位水量は骨材中の水量も含め約 0.21 g/cm^3 であり、7dの乾燥開始時のコンクリートの含水率は自己乾燥により約 0.16 g/cm^3 となる、7dの場合、この含水率 0.16 g/cm^3 に対して初

期空げき温度 1.0 を与えるのは妥当であろう。しかし、0dの場合、含水率 0.21 g/cm^3 に対して初期空げき温度 1.0 を与えるのは乱暴である。また、乾燥初期の水分移動が湿気拡散によると考えるのも現実的でない。

そこで、乾燥開始直後の含水状態の変化については次



図—8 空げき温度分布の計算値と実測値の比較



図—9 含水率分布の計算値と実測値の比較

のように仮定する。すなわち、乾燥開始直後は、環境湿度に応じてコンクリート表面から水分が蒸発し、液水が非常に自由に移動できると考えてコンクリート全体の水分は瞬時に均一化するものと仮定する。その蒸発量は水の自由表面からの蒸発量と同じと仮定する。含水率が 0.16 g/cm^3 となった時点で初期空げき温度 1.0 を与え、(2)式に従って湿気拡散するものとする。この間、相対湿度は 1.0 が保たれ、水和は順調に進行するものと仮定する。この仮定による計算結果では、0d-40は乾燥開始後 0.7 日、0d-75は 1.2 日、2d-40は 0.3 日、2d-75は 0.7 日で含水率が 0.16 g/cm^3 となる。これらの値は、乾燥開始後1日の実際の重量減少と比較しても大きな矛盾はない。これらの検討から、図-7において相対湿度 1.0 に対しては、含水率 0.16 g/cm^3 を対応させることとする。

4.3 計算結果

含水状態の計算結果を実測値と比較して図-8、図-9に示す。空げき温度分布も含水率分布も全体的には実験結果とかなり合致しており、3.1で述べた含水状態の特徴を良く再現している。これは、湿度計算に関しては、Bazantらの解析手法、および4.2で述べた仮定の妥当性を、含水率計算においては、図-7の脱着曲線の仮定の妥当性を示すものと考えられる。

ただし、実現象を再現していないいくつかの点を指摘できる。湿度計算において、0d, 2dの乾燥1週では表層部の値が小さい点、-75シリーズでは乾燥1カ月および3カ月の中層部の値が小さい点、0d-40の乾燥3カ月では表面から5cm付近の値が実際より大き過ぎる点などである。これらの相違が生じる原因は、拡散係数の水和率依存性、または含水率依存性の仮定に実際との差異があるためと推測されるが、現状では特定できない。

次に、脱着曲線の決定時、すなわち、空げき温度が 0.99 付近になった時点での水和率分布の計算結果を図-10に示す。この水和率分布は、養生種類、および深さ方向での差異が明確に表れており、図-5の細孔径分布の測定結果によく対応している。すなわち、その水和率を細孔空げきの密実度に置き換えれば、表層、中層および底層という深さ方向で細孔の密実度が異なること、封かん養生時間が長いほど細孔の密実度が高いこと、2dおよび7dについては乾燥環境湿度の差異がほとんどないこと、0dについては乾燥環境湿度の差異がある程度表れていること、などがそのまま対応している。したがって、

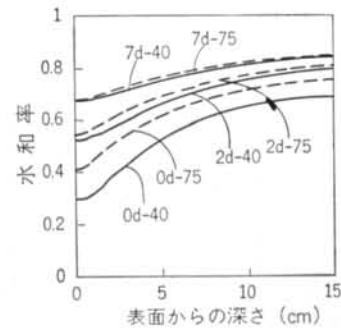


図-10 空げき温度が 0.99 付近になった時点での水和率分布の計算結果

若材齢時から乾燥を開始したコンクリートの細孔空げき組織の密実度は、コンクリートの空げき温度が 1.0 未満となる、例えば 0.99 になる時の水和率に強く依存していると考えられることができる。

§ 5. 結論

本報告では、若材齢から乾燥を開始したコンクリートの内部水分状態、および細孔空げき組織の変化を実験ならび数値解析により検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1, 乾燥過程でのコンクリートの空げき温度分布は、乾燥開始前の封かん養生時間による差異は小さい。一方、含水率は封かん養生時間が長いほど高い値を示す。
- 2, 封かん養生時間により空げき温度と含水率の対応関係が異なるのは、コンクリートの水蒸気脱着曲線が水和率により異なるためであり、微視的には、養生時間が長いほどコンクリートの空げき組織が密実になるためである。
- 3, 若材齢から乾燥を開始したコンクリートの細孔空げき組織は、水和の進行度と乾燥の進行度の重ね合わせで種々異なり、その密実度はコンクリートの空げき温度が 1.0 未満、例えば 0.99 となる時の水和率に強く依存している。

謝辞 本報告の実験部分は、東京工業大学工業材料研究所助教授、田中享二氏、および田中研究室の学生諸君の協力を得た。また、数値計算には東京工業大学のワークステーションを使用させて頂いた。ここに、慎んで謝意を表します。

<参考文献>

- 1) Bazant, Z.P. & Najjar, L.J.: "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete" *Materials and Structure*, Vol.5, No.25, (1972)
- 2) 阪田憲次, 蔵本 修: "乾燥に伴うコンクリート中の水分逸散と乾燥収縮に関する研究" 土木学会論文報告集第316号 (1981年)
- 3) Nilsson, L-O.: "Hygroscopic Moisture in Concrete-drying, Measurements & Related Material Properties" Report TVBM-1003, Lund Sweden (1980)
- 4) 永松静也, 佐藤嘉昭: "非線形拡散方程式によるコンクリートの脱水量の分布に関する研究" セメント技術年報35 (1981年)
- 5) 橋田 浩, 田中享二, 小池迪夫: "打設直後からの乾燥途中におけるコンクリートの含水状態" 日本建築学会構造系論文報告集, 第412号 (1990年)
- 6) Neville, A.M.: "コンクリートの特性" 技報堂出版