

論文

[1037] 高温下のコンクリートの水分逸散過程に及ぼす前養生条件の影響

正会員 三橋博三 (東北大学工学部)

正会員 ○沼尾達弥 (茨城大学工学部)

1. はじめに

コンクリート中の含有水量の増加及び減少は、コンクリートの膨張・収縮の直接的な原因となるばかりでなく、圧縮強度、ヤング係数又はクリープ挙動など他の力学的特性にも大きな影響を与える事が知られている<sup>1)</sup>。特に、コンクリートが高温下に曝される場合、100°C以上の高温下では勿論の事、100°C以下であっても、外部への逸散により含有水量の変化が著しく大きくなり、コンクリート中の含有水の逸散過程を考慮することなしに、その力学的挙動を説明することは困難となる。それ故、高温下のコンクリートの挙動を考える場合、含有水分の移動を適切に捉えることが重要な課題となっている。

しかし、コンクリート中の含有水の逸散過程は、温度及び細孔湿度の影響を強く受ける<sup>2)</sup>。また、水セメント比、骨材等のコンクリートの質によっても、逸散の傾向が異なることが報告されており<sup>3)</sup>、この過程は様々な要因によって影響を受ける複雑な現象である。

筆者らは、コンクリートの質の変化を材料定数を変えることによって対応し、かつ有限要素法を用いて非線形拡散方程式を解くことにより、この複雑な現象を常温から100°Cを越える範囲にわたって解析することが可能であることを示した<sup>4) 5) 6)</sup>。

本報告では、養生方法が異なる供試体を用いたSchwesinger (東独) の実験結果<sup>7)</sup>を、この解析手法を用いて解析し、養生方法の変化が、高温下のコンクリート中の水分逸散過程や、材料定数の一つである基準拡散係数に及ぼす影響についての検討結果を報告する。

表1 解析対象の概要

供試体No.		1	2	3	4	5	6
加熱温度 (°C) *		20~100	20~100	20~100	20~130	20~130	20~130
養生方法 (日)	水中(20°C)	28	7	7	28	7	7
	気中(20°C, 65%RH)	---	21	358	---	21	358
実験開始材令 (日)		28	28	365	28	28	365
加熱中の逸散水量(kg)		1.51	1.15	0.60	1.56	1.17	0.69
加熱期間 (時間)		180	120	150	120	140	85

\* 加熱温度は制御目標値である。

\* 加熱速度は、供試体中心で約5°C/hとして、供試体周辺から均等に電気ヒーターで加熱した。

## 2. 解析の対象

本研究に於ては、Schwesinger によって行われた実験的研究結果<sup>7)</sup>を解析の対象とした。この実験は、養生方法・期間を変えて作製された供試体を用いて、20°C~100°C及び20°C~130°Cの2種類の加熱温度で行われた。実験結果としては、加熱期間中の上昇温度及び逸散水量が報告されている。表1に、その実験の概要を示す。解析に用いた実験データは、報告された温度と逸散水量のグラフから、デジタイザーによって読みとったものを使用した。ここで用いた温度は、温度センサーにより測定された供試体中央部の温度である。

尚、実験に用いられた供試体は、水セメント比68%，直径150mm，長さ600mmの円柱供試体である。

## 3. 解析方法

一般に水分移動の解析には、拡散方程式が用いられてる。しかし、この方程式に含まれる拡散係数は、温度及び細孔湿度に強く依存する為、高度な非線形となる事が知られている。更に、この拡散係数は、材料の細孔構造等の特性に対応する材料定数によっても変化する。本解析に用いた拡散係数は、Bazant<sup>2)</sup>の式を温度の影響項について修正した、以下の関数によって評価した。

$$D(T, h) = D_1 \cdot f_1(h) \cdot f_2(T) \cdot f_3(T) \quad (1)$$

$$f_1(h) = a_0 + (1 - a_0) \left[ 1 + \left\{ \frac{(1-h)}{(1-h_c)} \right\}^n \right]^{-1} \quad f_3(T) = \exp \left\{ \left[ \frac{(T-273)}{90} \right]^{n_{T2}} \right\}$$

$$f_2(T) = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{n_{T1}} \exp \left\{ \frac{U}{R} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right\}$$

ここに、T:絶対温度、U:活性化エネルギー、R:ガス定数、 $T_0=293^\circ\text{C}$ 、

$D_1$ :20°C,100%RHでの基準拡散係数、h:細孔湿度(細孔に含まれる水分量の相対値)

$a_0, h_c, n, n_{T1}, n_{T2}$ :材料定数

また、右辺第一番目の関数は細孔湿度の影響を表し、第二番目の関数は熱力学的考察に基づく影響を、第三番目の関数は100°C前後からの含有水分の酸化による影響を表している。その他、本報告に用いる解析手法の詳細については既に報告しており<sup>4)5)6)</sup>、本論での紹介は省略する。尚、以上の解析に於ては、水分の移動を細孔湿度の変化過程としてとらえ、また含有水量と細孔湿度との間には、線形関係が成立するものと仮定して解析を行った。

解析の対象として取り上げた実験供試体に於ては、加熱前の養生期間や方法が異なっており、それらが高温下での水分逸散過程に影響を与えることが考えられる。本報告においては、加熱開始時の含有水分分布状態の変化、及び(1)式での材料定数の中から、基準拡散係数 $D_1$ の変化に着目して、その影響の解析を行うこととした。

しかし、Schwesingerによる実験結果の報告では、加熱時の温度変化及び逸散水量については述べられているが、水分逸散過程解析のための初期値を与える、前養生期間の逸散水量についての確かな情報は得られていない。そこで、各養生条件で養生された供試体の加熱前の湿度分布、逸散水量及び基準拡散係数 $D_1$ を次の様にして求めることとした。

①先ず100°C及び130°Cの加熱温度について、標準養生(水中養生28日間)による供試体の実験結果及び解析結果から材料定数を仮定する。②次に、各気中養生期間に対して、①によって得られた値を基に解析を行い、養生期間の湿度分布及び逸散水量の変化過程を求める。③求めた加熱前の湿度分布及び逸散水量を初期値として、各加熱温度に対して解析を行い、基準拡

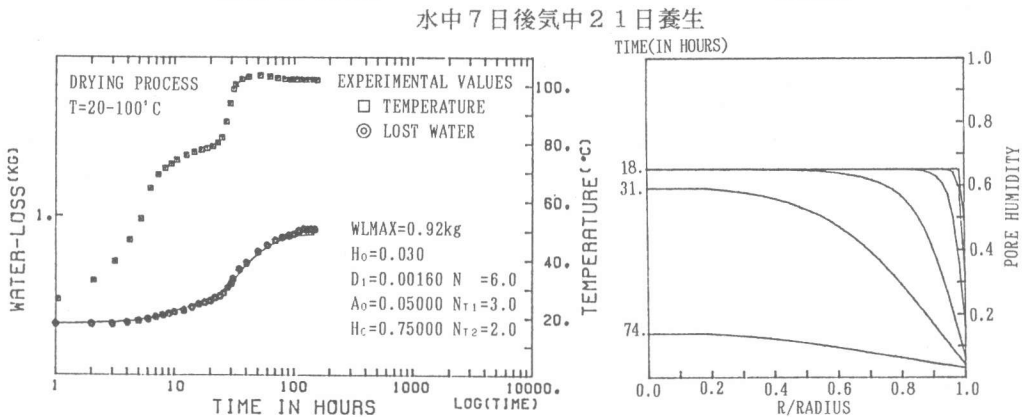
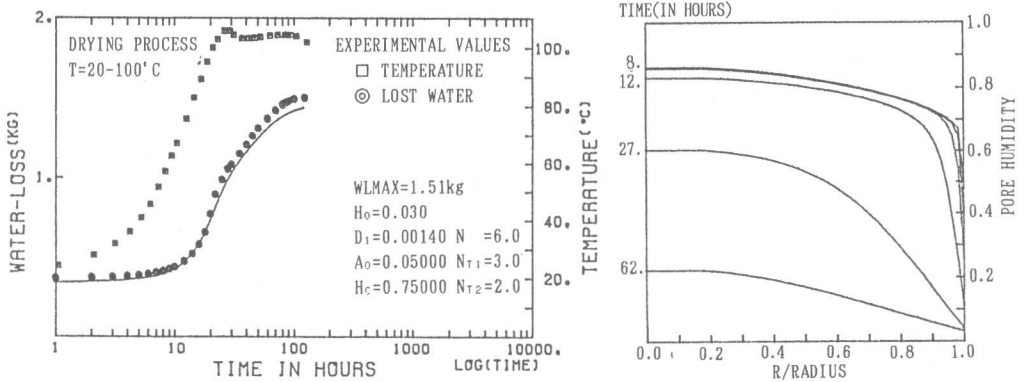
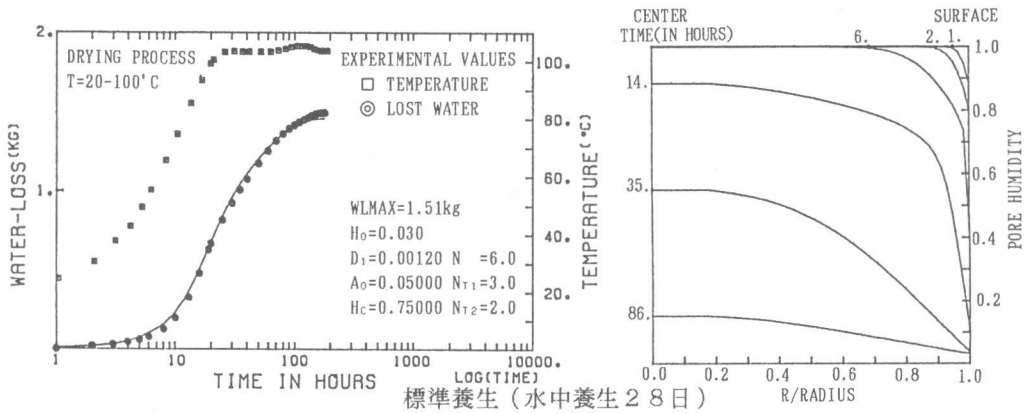


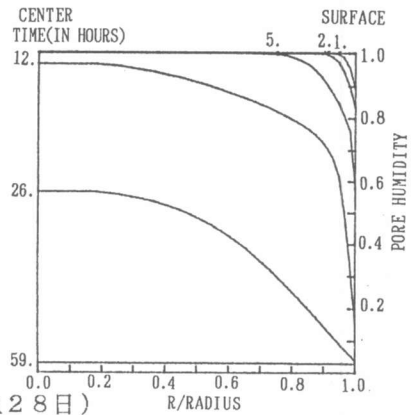
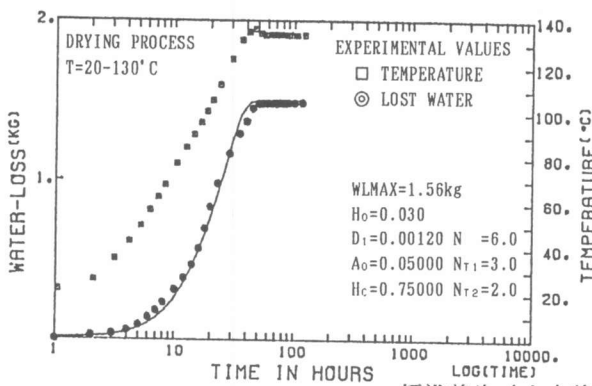
図1 水分逸散過程（100°C）

図2 細孔湿度の変化過程（100°C）

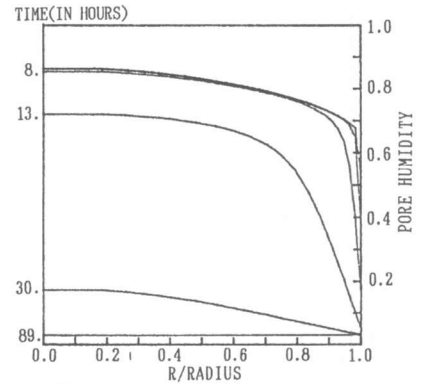
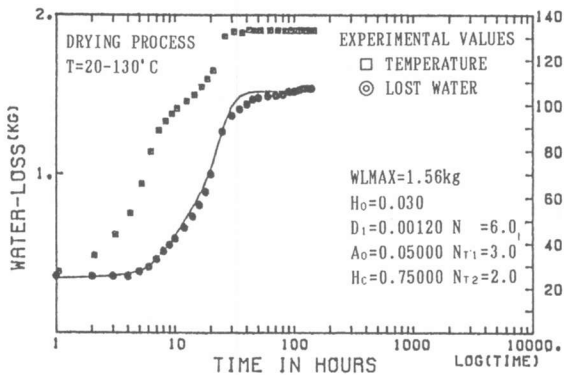
散係数を実験結果との対応から求める。④③で求めた基準拡散係数に変化があれば、この拡散係数を用いて②から繰り返し同様な解析を行う。基準拡散係数に変化がなければ終了とする。

#### 4. 解析結果及び考察

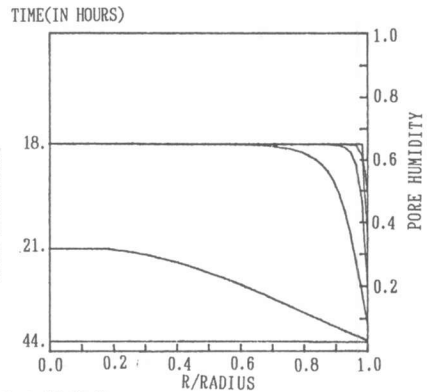
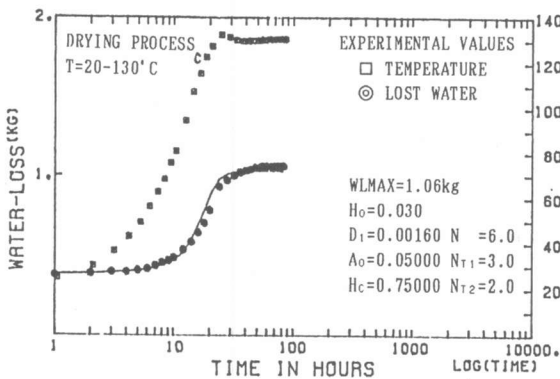
前章の解析方法によって求めた水分逸散過程、及び細孔湿度の変化過程を図1～4に実線で示す。図1, 3は、20°C～100°C及び20°C～130°Cの加熱温度での水分逸散過程を、各養生方法の供試体について示している。同様に、図2, 4は細孔湿度の変化過程をシミュレートした結果を示している。



標準養生（水中養生28日）



水中7日後気中21日養生



水中7日後気中35日8日養生

図3 水分逸散過程（130°C）

図4 細孔湿度の変化過程（130°C）

これらの図より、標準養生、及び7日間水中養生後21日間気中養生を行ったものについては、養生期間から一貫して解析できることが示された。しかし、7日間水中養生後35日間気中養生を行ったものについては、他のものと比較して、著しく少ない総逸散水量を得た。

この大きな差異は、本解析においては、含有水分量と細孔湿度との関係を、線形関係が成立するものと仮定して解析を行っている事に起因していると考えられる。即ち、常温における含有水分量と細孔湿度は、図5に示す含有水と湿度の平衡関係である水分特性曲線<sup>3)</sup>で表される様な非線形関係にある。それ故、常温での乾燥期間が長期化し、平衡状態に近づくほど線形仮定による解析誤差は大きくなる。その結果、長期間気中養生中を行った場合、総逸散水量の解

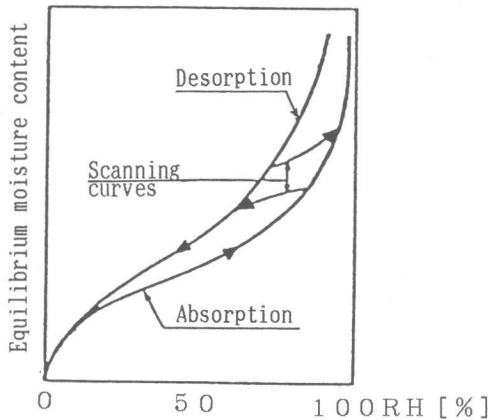


図5 水分特性曲線<sup>3)</sup>

析値が著しく少なくなったものと思われる。

そこで、358日間気中養生を行うものについては、標準養生供試体の結果より求められた総逸散水量から逆算して養生中の逸散水量を算出し、それを初期条件として水分逸散過程の解析を試みた。この方法により求めた水分逸散過程及び含有水分量と温度の関係を、他の養生方法の解析結果と重ね合わせて図示した(図6, 図7)。この図から、上記の方法で解析した358日間養生の結果は、加熱温度100°C及び130°Cいずれの場合も21日養生のものと同様な傾向を示す事が分かり、ほぼ妥当な結果になっていると思われる。

更に、これらの図から、加熱温度及び温度上昇率がほぼ同程度であれば、次の様な傾向を示すことが分かった。即ち、前養生中に乾燥を受けた供試体の乾燥過程では、標準養生のものに比べて、急激な上昇に至るまでの所要時間が乾燥期間に比例して長くなっている。しかし、標準養生供試体の逸散水量が、前養生による乾燥で逸散した水量とほぼ同程度に達する時点から、標準養生供試体の逸散水量の変化過程とほぼ同じ傾向を示すようになることが分かる。

次に、以上の解析に於て、実験結果との対応により求められた基準拡散係数  $D_1$  の値を表2に示す。全体としては、気中養生期間が長い程、基準拡散係数値が大きくなり水分が移動し易い傾向を示した。一般に、養生期間が長いほど水和水和が進行してより密実になると考えられるにもかかわらず、表2の傾向はこれと矛盾している。この原因は、気中養生期間中に、供試体表面に乾燥収縮ひび割れが発生し、乾燥期間が長い程その影響を受けて、水分が移動し易くなった為と思われる。また、7日間水中養生後21日間気中養生の供試体では、加熱温度100°C及び130°Cで若干異なる値を示したが、全体的には加熱温度による差異は極めて小さかった。

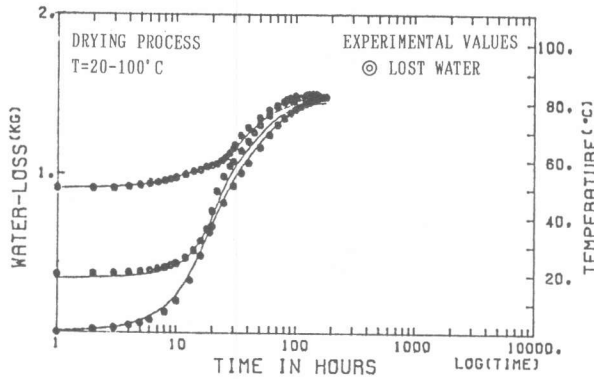
## 5. 結論

養生方法・期間が異なる供試体を用いた、高温下の水分逸散に関する実験結果の解析を行った。その結果以下の事が示された。

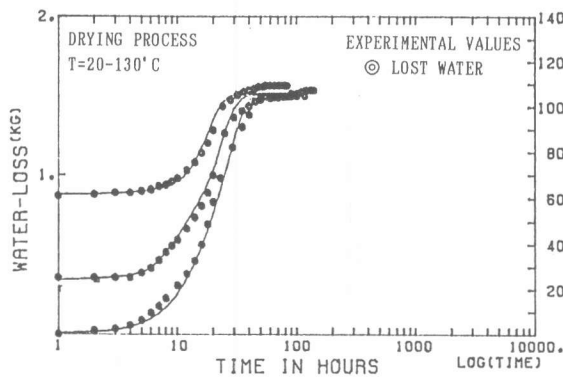
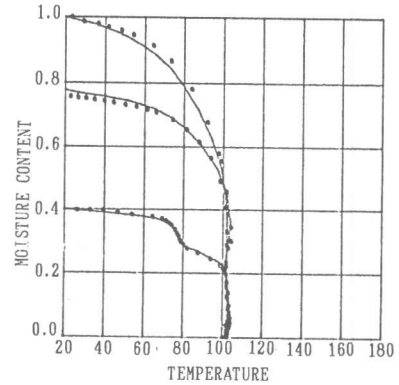
① 28日間水中養生、及び7日間水中養生後21日間気中養生を行ったものについては、本報告による方法で養生期間から一貫して解析できることが示された。しかし、気中養生が長期に渡るものについては、含有水分量と細孔湿度の非線形関係の影響により、誤差が大きくなった。今後、水分特性曲線及びその温度による影響等を実験的に調べることで、更にそれらを解析に取り入れることが必要である。

表2 基準拡散係数の結果(mm<sup>2</sup>/sec)

養生方法	加熱温度	
	100°C	130°C
28日間水中養生 (標準養生)	0.0012	0.0012
7日水中後 21日気中養生	0.0014	0.0012
7日水中後 358日気中養生	0.0016	0.0016



加熱温度 ( 1 0 0 ° C )



加熱温度 ( 1 3 0 ° C )

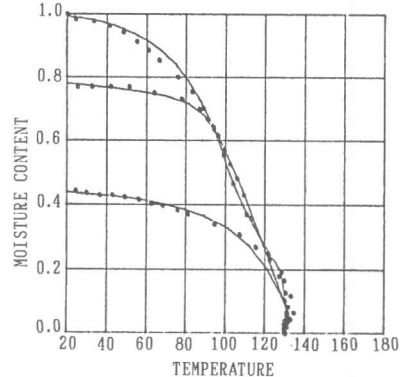


図6 水分逸散過程

図7 温度と含有水分量の関係

② 気中養生により加熱前に乾燥を受けた供試体の水分逸散傾向は、乾燥過程後半に於て、標準養生の供試体の傾向と一致する。

③ 気中養生期間が長い程、全体として基準拡散係数が大きく、水分が移動し易い傾向を示した。

【参考文献】

- 1) 例えば、F. H. Wittmann (三橋博三訳)，“コンクリートの内部構造と力学特性”，コンクリート工学，vol.21, No.3, 1983, pp.19-30.
- 2) Z.P. Bazant, L.J. Najjar, “Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete”，Materials and structures, Vol.5, 1972, pp.3-20.
- 3) L.-O. Nilsson, “Hygroscopic Moisture in Concrete - Drying, Measurements & Related Material Properties”，Report TVBM-1003, LUND SWEDEN, 1980, pp.38-66.
- 4) 三橋博三, F.H. Wittmann and P. Roelfstra, “高温下のコンクリートの水分逸散に関する理論的研究”，セメント技術年報, Vol41, 1987, pp.495-498.
- 5) 三橋博三, 沼尾達弥, “高温環境下でのコンクリートの含有水分逸散過程解析に関する基礎的研究”，東北大学建築学科, 第27号, 1988, pp.61-71.
- 6) H. Mihashi, T. Numao, “Diffusion Process and Shrinkage of Concrete at Elevated Temperatures.”, Trans. of J.C.I., Vol.10, 1988, pp.139-146.
- 7) P. Schwesinger, “Drying Process of Concrete at Elevated Temperatures.”, Technical Report at Architecture and Building College of Weimar, 1986.