

[1042] 高温下のコンクリートの水分逸散過程と乾燥収縮

正会員 三橋博三 (東北大学工学部)

正会員 O沼尾達弥 (茨城大学工学部)

1. はじめに

近年、原子力発電施設のプレストレストコンクリート圧力容器の開発や、鉄筋コンクリート構造物の火災時の挙動を調べる為、高温下のコンクリートの性質について数多くの研究がなされている。特に、高温下でのクリープ挙動に関する研究は、原子力発電施設の建設が具体的な課題となってきた1960年代後半から数多くの実験結果が報告されている。しかし、それらの結果は、実験の種類・条件・方法等によって大きく異なる為にバラツキが大きく、しかも実験によっては正反対の結果すら出ている。

コンクリートが加熱される場合、100℃以上の高温下では勿論の事、100℃以下であっても、コンクリート中の含有水分が弾性係数やクリープ挙動及び乾燥収縮等の力学的特性に大きく影響を及ぼし、このことが既往の実験結果のバラツキの主要な原因の一つと考えられる。それ故、高温下でのコンクリート中の含有水分の移動を適切に捉えることは重要な課題となっている。

特に乾燥収縮は、コンクリート中に含まれる水分が時間の経過と共に空中に散逸することにより引き起こされる為¹⁾、コンクリート中の含有水分の移動と密接に関係している。そのため、高温下でのコンクリートの挙動を解析する上で、水分逸散過程を把握しながら乾燥収縮変形を評価していくことが重要である。

本論文では、有限要素法を用いた非線形拡散方程式を解くことにより、コンクリートが100℃以上に加熱される場合も含め水分逸散過程をシミュレートし、既往の実験結果の二例を解析すると共に、その乾燥収縮変形の評価について報告する。

2. 解析方法

2.1 拡散方程式

本論では、図1に示す円柱供試体のような軸対称回転体を対象として解析を行った。式の変形などは既に報告しており²⁾、ここではその概要について以下に述べる。

一般に水分移動の解析には拡散方程式が用いられている。ここでは、内部からの湿度発生がなく、温度変化が極めて緩やかで供試体内の温度勾配がほぼ0と仮定できる場合を考える。この時、拡散方程式は(1)式となる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot (D \cdot r \cdot \frac{\partial h}{\partial r}) = 0 \quad (1)$$

ここに、h:細孔湿度、r:中心からの距離、

D:拡散係数

また、図1に示す任意点での細孔湿度は、

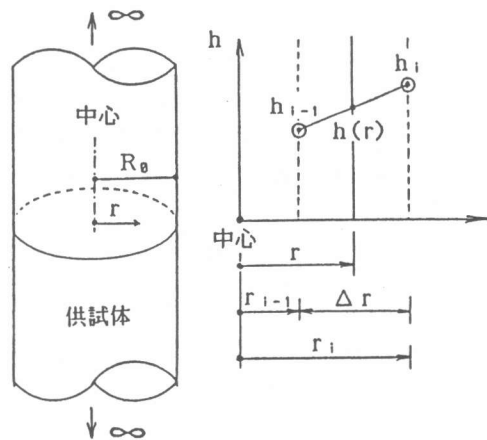


図1 供試体と任意点での細孔湿度

(2)式により表されるものとする。

$$h(r) = \left[1 - \frac{r - r_{i-1}}{\Delta r}, \frac{r - r_{i-1}}{\Delta r} \right] \{ h_{i-1} \} \quad (2)$$

ここに、 $\Delta r = r_i - r_{i-1}$

変分原理により、(1)式から(3)式を得る。

$$\int_V \delta h \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(D \cdot r \cdot \frac{\partial h}{\partial r} \right) \right\} dV = 0 \quad (3)$$

(2)式を用いて、(3)式の第一項、第二項を各々整理することにより(4)式の基礎方程式を得る。

$$[C] \{ \dot{h}(t) \} + [K] \{ h(t) \} = 0 \quad (4)$$

ここに、(C):Capacity Matrix, (K):Conductivity Matrix.

拡散係数Dは温度T及び細孔湿度hに強く依存する。そのため、上記の式は高度な非線形となる。そこで、(4)式をCrank-Nicolson法を用いて(5)式に変形してstep by step methodにより数値解析を行った。

$$(C) + \Delta \theta (K) \{ h(t_2) \} = (C) - \Delta \theta (K) \{ h(t_1) \} \quad (5)$$

ここに、 $\Delta \theta = \frac{\Delta t D_1}{2R_0^2}$, $\Delta t = t_2 - t_1$

R_0 :円柱供試体半径、 D_1 : $h=1.0$ での拡散係数、 t_1, t_2 :乾燥時間

また、 $h(t_1)$ は初期値又は前のステップで求められた湿度を、 $h(t_2)$ は $h(t_1)$ を基に(5)式により算出される湿度を表している。

拡散係数は含有水分の気化が生じる前後で急激に変化する。本論では、Bazantの式³⁾を修正し、拡散係数を温度と細孔湿度の関数として以下の様に仮定した。

$$D(T, h) = D_1 \cdot f_1(h) \cdot f_2(T) \cdot f_3(T) \quad (6)$$

$$f_1(h) = a_0 + (1 - a_0) \left(1 + \left\{ \frac{(1-h)}{(1-hc)} \right\}^n \right)^{-1}$$

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

$$f_3(T) = \exp \left\{ \left(\frac{T - 273}{90} \right)^{n_{T2}} \right\}$$

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

$a_0, hc, n, n_{T1}, n_{T2}$:材料定数

(6)式における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気化による影響を表している。

また、上式において細孔湿度hは次式により求めた。

$$h = \frac{h_{i-1}(t_1) + h_i(t_1) + h_{i-1}(t_2) + h_i(t_2)}{4.0} \quad (7)$$

尚、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実験結果との比較検討を行った。

2. 3 供試体表面での境界条件

供試体表面での水分の逸散を合理的に表現することは、乾燥過程の初期における水分逸散量を解析する上で重要な課題である。即ち、乾燥初期に於ける供試体表面の細孔湿度 $h(n)$ は、表面近傍の環境の湿度 h_{on} とは一致せず、時間の経過と共に h_{on} に近づくものと考えられる。

また、乾燥初期における水分逸散量は、供試体表面層部の細孔湿度の減少量によってほぼ支配される。従って、供試体表面の細孔湿度を最初から表面近傍の環境の湿度に一致させて解析することは、大きな誤差を生じる原因になる。

この問題については様々な報告がなされているが、Bazant等は、図2に示すように供試体厚さに仮想厚さ d を加えた仮想面を考えることで此の問題を扱っている³⁾。即ち供試体表面での水分移動率は、表面近傍の環境と供試体内でのGibb's free energyの差に依存しており、供試体と環境温度の差が無視でき、かつ移動率が小さいものとするとき式が得られるとしている。

$$d \vec{n} \cdot \text{grad} h = \ln(h / h_{e,n}) \quad (8)$$

ここに、 \vec{n} は表面での単位法線ベクトルであり、 d は長さのディメンジョンを持つ変数である。

上式により、単純に供試体厚さに d を加えた仮想面において、水分が完全移動すると考え、仮想面での湿度は $h_{e,n}$ に一致するとしている。また、実験結果との比較により、 d の値は0.75mm程度になると報告している。

ただし、この考え方は、供試体内の湿度分布が線形の場合、即ち、定常状態での議論であり、本論で扱っているような非線形の場合には、今後より詳細な検討が必要である。しかし、本論文での解析には、第一次近似値として上述の固定した仮想面を想定して解析を行った。

3. 解析の対象

本論文に於ては既往の研究の中から、Schwesinger⁴⁾、及び松井等⁵⁾による実験的研究結果を解析対象として取り上げた。以下前者を対象1、後者を対象2と呼ぶことにする。その概要を表1に示す。解析に用いた温度は、対象1に於ては温度センサーにより測定された供試体中央部の温度を、また対象2では、実験結果として示されている熱拡散係数の平均値を用いて、次元非定常熱伝導方程式により外部温度から推定した供試体中央部の温度を用いた。

尚、対象1に於ては、水分逸散過程と乾燥収縮変形過程の実験は別個に行われているため、水分逸散過程を解析してパラメータを推定し、これを用いて乾燥収縮変形の解析を行った。また、各々の対象における実験データは、報告された論文中的図よりデジタイザ等で読み取ったものを使用した。

表1 解析対象の概要

	供試体	W/C	加熱温度	測定内容
対象1 ⁴⁾	直径:150mm 長さ:600mm	6.8%	20℃~132℃ (供試体中央)	水分逸散量
				供試体変形量
対象2 ⁵⁾	直径:150mm 長さ:450mm	5.5%	20℃~175℃ 上昇率:2℃/h	水分逸散量 供試体変形量

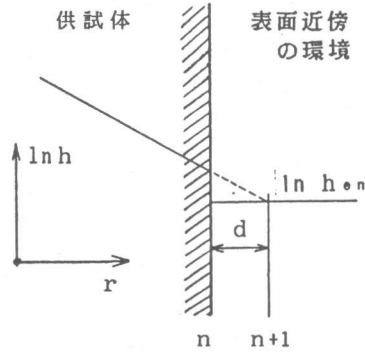


図2 表面近傍の湿度分布

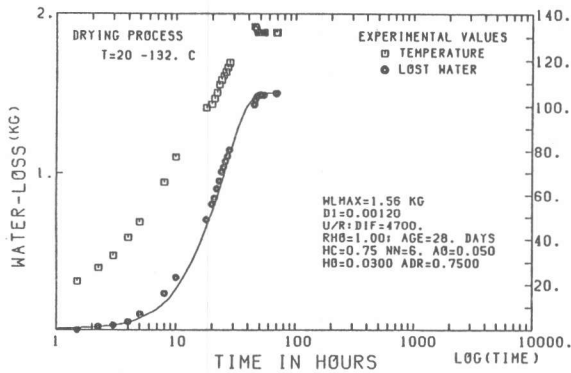


図3 水分逸散過程 (対象1)

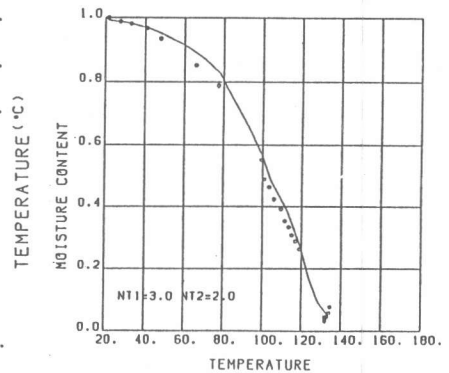


図4 温度と細孔湿度の関係 (対象1)

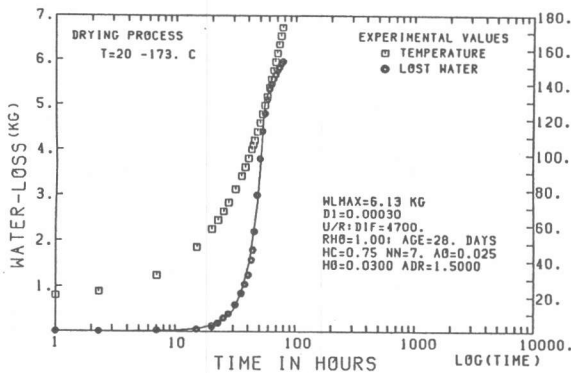


図5 水分逸散過程 (対象2)

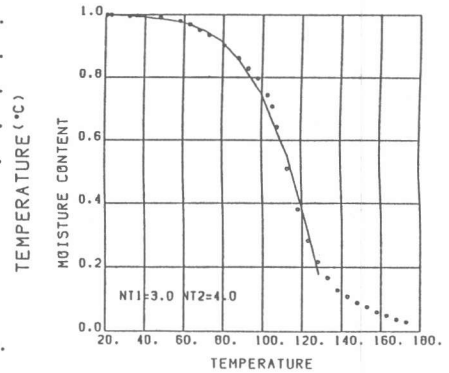


図6 温度と細孔湿度の関係 (対象2)

3. 解析の結果

3.1 水分逸散過程

水分逸散過程における、解析結果と実験結果の比較を図3～8に示す。図3、5は水分逸散過程を、図4、6は細孔湿度と温度との関係を示している。また、図7、8は供試体中の湿度分布の変化過程をシミュレートした結果を各対象について示している。

以上の図から、その実験方法が異なるにも拘らず、20～130℃の範囲で実験結果と解析結果とは良い一致を示している。また、材料定数として用いられたパラメータは実験結果との対応から求められたものであるが、対象1および対象2に於ける基準拡散係数D1は、各々0.0012、0.0003となった。W/Cの相違を考慮すると、その比が4であることはほぼ妥当な値と思われる。

しかし、100℃以上における拡散係数の増加を表すパラメータ n_{T2} は、対象1、2各々2.0、4.0となり、基準拡散係数の場合と逆の関係を示した。更に、前述した供試体境界での仮想厚さdは、対象1では0.75mm、対象2では1.5mmとすることで実験結果との一致を示した。この原因としては、供試体の表面状態や実験方法等の影響などが考えられるが、詳細には分らなかった。

尚、105℃以上の高温に於ては、コンクリート内部からの化学的結合水の分離等による水分の発生を考慮する必要がある。本解析に於ては、130℃程度迄で計算を打ち切った。今後、水分特性曲線や内部からの水分発生等の影響を解析に取り入れると共に、パラメータの評価方法について検討する必要がある。

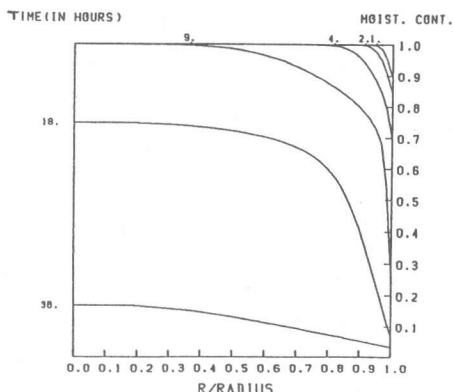


図7 細孔湿度分布の変化過程 (対象1)

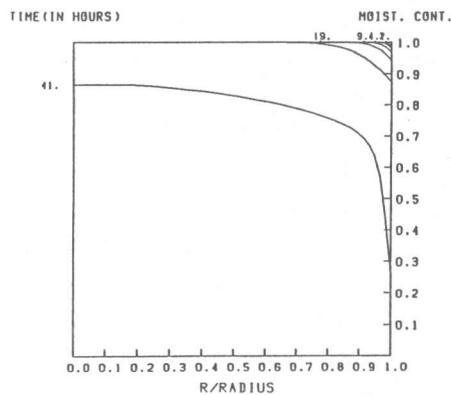


図8 細孔湿度分布の変化過程 (対象2)

3.2 乾燥収縮変形

高温下でのコンクリートの変形は、

①コンクリート中の湿度分布によって生じる内部応力によるひずみ, ②水分の逸散によって生じる収縮ひずみ, ③熱膨張によるひずみ, の重ね合わせによって生じると考えられる。

各実験により報告されている熱膨張係数を用いて、熱膨張ひずみの影響を取除くこととして、ここでは①②のみを含んだ乾燥収縮変形について、前記の水分逸散過程の解析結果を基に、その定性的な評価を試みた。

まず、湿度分布によって生じる内部応力による自己釣合いを定性的に表すものとして、図9に示すように各乾燥時間での平均湿度を求め、平均湿度より高い湿度の部分に圧縮が、またそれより低い部分では引張りが働くものと仮定した。即ち、圧縮応力の変化過程を示すものとして高湿度部の湿度の合計を、また供試体表面での引張り応力の変化を表すものとして平均湿度と供試体表面湿度との差を算出した。更に、水分逸散による収縮の傾向を示すものとして、各時間での逸散水量を用いた。尚用いた逸散の値は対象1では計算値、対象2では実験値である。

以上の結果をまとめて、対象1について

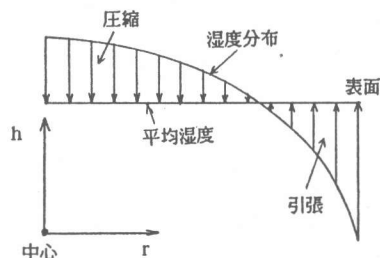


図9 供試体内の湿度分布及び内部応力の過程

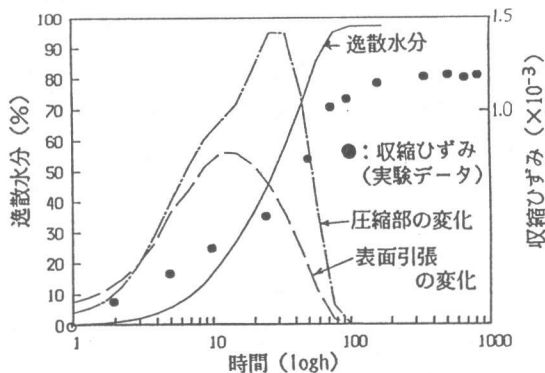


図10 逸散水分と収縮ひずみ (対象1)

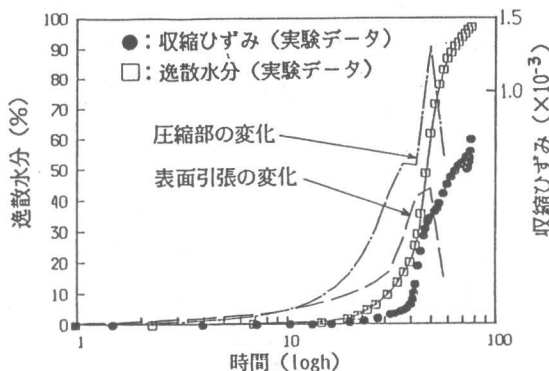


図11 逸散水分と収縮ひずみ (対象2)

ては図10に、対象2については図11に示した。これらの図より次のような傾向が示された。

まず、図10では乾燥初期から湿度分布による内部応力が発生しており、逸散水量の増加傾向よりも早く収縮が生じている。しかし、引張応力のピーク付近からは、逸散水量の増加傾向とほぼ同じ割合で乾燥収縮が進行していることが分かる。また、図11に於ては、逆に逸散水量の増加傾向よりも遅れて収縮が生じている。その後、内部応力のピーク前までは急激に収縮が進むが、内部応力のピーク付近でその勾配に変化が生じ、収縮の進行がゆるやかとなる。

以上から、その乾燥初期の収縮傾向に相違がみられるものの、乾燥過程半ばの内部応力のピーク付近で収縮傾向に変化が生じるという共通の傾向を示していることが分かる。乾燥初期の収縮傾向の違いは、温度上昇率等の違いによるものと思われるが、詳細な検討はできなかった。また、乾燥収縮は、水分の逸散により生じた湿度分布が、自己釣合い系にある内部応力を引き起こしながら進行するが、特に供試体表面での引張応力はひび割れを発生させ、その結果内部応力が解放される為、乾燥収縮に大きく影響を与える。この様にして供試体に生じたひび割れにより、特に対象2では表面に生じた引張応力がピークを過ぎた後、その収縮傾向に変化が生じたものと思われる。

4. 結論

コンクリート中の含有水分の逸散過程は、温度及び細孔湿度の影響を強く受け著しく非線形な現象である。それに対して、有限要素法を用いた非線形拡散方程式を解く事により、常温から100℃を越える範囲にわたって水分逸散過程を解析する事が可能である事を示した。特に、供試体表面に一定の厚さ d を持つ仮想面を考慮することにより、解析結果は乾燥初期も含めて実験結果とよい一致を示した。このことは、供試体表面に於ける水分逸散の条件を何等かの形で考慮する必要があることを示している。今後、合理的な境界条件の表現の検討が必要である。

また、材料定数として用いたパラメータの値は、実験結果の対応から求められたものであり、これらの値とコンクリートの特性との関係についても、最適パラメータ値の推定方法の導入等により定量的に検討する必要がある。

更に、高温下での収縮変形に対する、湿度分布によって生じる内部応力及びコンクリート表面でのひび割れ等の影響についても定性的に考察を行った。今後は更に検討を重ね、水分の散逸において収縮を生じさせる機構等を考慮して、より定量的な評価を行うことが重要である。

5. 参考文献

- 1) U. Schneider, "コンクリートの熱的性質", 森永繁監訳, 技報堂出版, p.130, 1983年.
- 2) 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, Vol141, 1987, pp.495-498.
- 3) Z.P. Bazant, L.J. Najjar, "Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete", Materials and structures, Vol.5, 1972, pp.3-20.
- 4) P. Schwesinger, "Drying Process of Concrete at Elevated Temperatures", Technical Report at Architecture and Building College of Weimar, 1986.
- 5) 松井宏 他, 高温と外荷重とを受けるコンクリート構造物に関する研究 その1~4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1985, pp.869-876.