

論文

[1064] 真空乾燥法によるコンクリートの乾燥収縮試験とその予測モデル

正会員○下村 匠（東京大学土木工学科）

陳 丙学（東京大学大学院）

正会員 小沢一雅（東京大学土木工学科）

1. はじめに

コンクリートは、材令初期においては、水和反応にともない微視的構造が変化し、硬化後においても、環境作用により水分、塩分などの物質が内部を移動し、それらがコンクリートの品質を経時的、位置的に変化させる。したがって、コンクリートの耐久性能を制御するためには、使用材料、配合、形状などの初期条件と、経時的に変化する環境、すなわち境界条件から、コンクリートの内部状態の経時変化を合理的に予測し、その結果に基づいてひびわれなどの欠陥の発生ならびに物質移動に対する抵抗性を予測することが有効であるといえる。コンクリートの内部ではさまざまな現象が連成して進行するため、個々の現象の構成則だけでなく、現象間に存在する相互依存性を考慮した予測システムを構築する必要がある[1]。

本研究は、このようなコンクリートの状態変化を総合的に予測するシステムの一部となる、硬化後における乾燥収縮を対象としたものである。

2. 実験装置の概要

本研究では、コンクリートおよびモルタル供試体を図-1に示すような真空乾燥試験装置により乾燥させた[2]。使用した真空ポンプの性能は、真空度0.1Pa、回転数450rpm、排気速度約50ℓ/minであり、デシケータの容量は約20ℓである。本試験方法は実環境に比べ特殊な乾燥条件（気圧10mmHg）を供試体に与えることになるが、一定条件のもとで促進的に乾燥収縮の試験を行なえる利点がある。

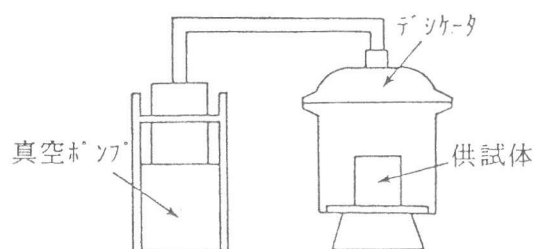


図-1 真空乾燥試験装置

3. 乾燥収縮の構成則

本研究ではコンクリートの乾燥収縮の構成則を、材料の微小構成要素における含水状態と長さ変化の関係から記述することを試みた。

まず、コンクリート中の含水状態を表現する量が必要であるが、本研究では、次のような無次元量 ϕ （以下含水パラメータという）を用いた。

$$\phi(x, y, z, t) = \frac{Wf}{W - Wc} \tag{1}$$

ここに、 $\phi(x, y, z, t)$ は含水パラメータであり位置と時間の関数である。 Wf は単位体積あたりの自由水量、 W は単位体積あたりの初期水量つまり練り混ぜ水量、 Wc は単位体積あたりの結合水量である。ここで、自由水とはコンクリート中において移動可能な水分、結合水とはセメントの水和

によって水和生成物の中に取り込まれ移動不可能となった水であり、材令が十分経過した時点においては一定量となる。実際にはコンクリート中の水分の存在形態は複雑であり、存在箇所、拘束されている程度などさまざまであると考えられるが、ここでは110°Cの乾燥炉において離脱し得る水分を移動可能な水分、すなわち自由水として扱った。

含水パラメータ ϕ を式(1)のように定義することにより、打ち込み時より水分の出入りがないときに $\phi = 1$ となり、乾燥収縮の構成則において『打ち込み時より水分の出入りがないとき乾燥収縮による変形成分は0』という仮定の導入が容易になる。本仮定は、コンクリートの種々の変形成分、すなわち水分状態による成分、温度による成分、硬化収縮による成分、応力による成分などを、将来それぞれの構成則より独立に求め、それらを重ね合わせることを意図して設けた。

以下に、材料の微小構成要素における含水パラメータ ϕ と自由収縮ひずみ ε_f の関係を導出する実験について述べる。実験は水セメント比40%と60%のモルタルについて行なった。配合を表-1に示す。供試体は各配合とも、図-2に示すように長さが16cmで断面寸法を変化させた5種類を作成した。供試体はいずれも材令1日で脱型し、材令28日まで20°C水中にて養生を行なった。材令28日より図-1に示す試験装置により乾燥を開始した。その後、適切な時間ごとに供試体を取り出し、重量とひずみ(基長100mm)を測定した。ひずみは含水パラメータ ϕ の供試体平均値 $\bar{\phi}$ が1のときに0となるように処理した。

測定値である供試体重量から得られるのは含水パラメータ ϕ の供試体平均値 $\bar{\phi}$ であり、また供試体内部において ϕ の分布に勾配がある場合、長さ測定から得られるのは自由収縮ひずみでなく内部的に拘束された成分を含むひずみである。しかしながら、断面寸法を変化させた種々の供試体について、実験から得られる供試体平均含水パラメータ $\bar{\phi}$ とひずみ ε の関係をプロットし、それらがひとつの曲線に収束するなら、それは供試体形状、寸法によらない、つまり材料の微小構成要素における含水パラメータ ϕ と自由収縮ひずみ ε_f の関係であると考えた。

表-1 モルタル供試体の配合

	Air (%)	単位量 (kg/m ³)		
		W	C	S
W/C=0.40	4.0	244	609	1369
W/C=0.60	4.0	286	477	1369

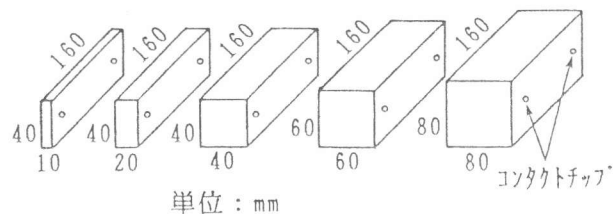


図-2 供試体の形状および寸法

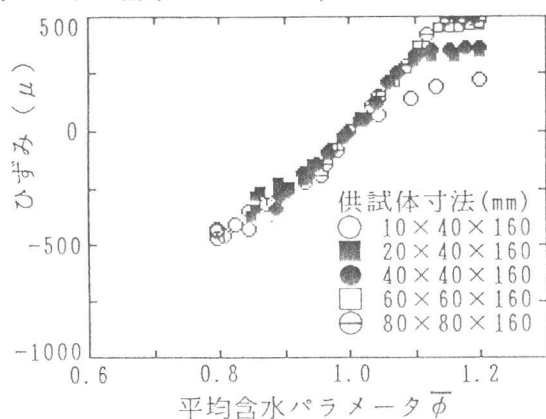


図-3 W/C=0.40モルタルの実験結果

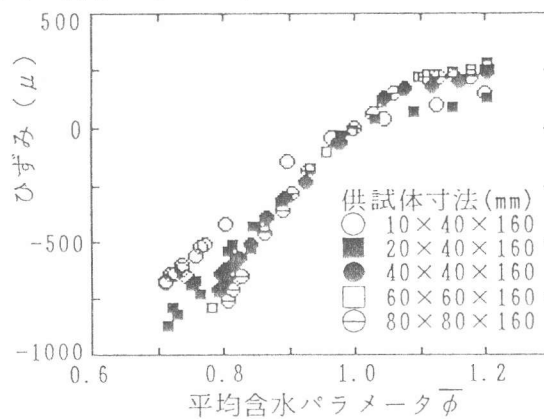


図-4 W/C=0.60モルタルの実験結果

実験結果を図-3、図-4に示す。水セメント比40%のケース、60%のケースのいずれも、各供試体の実験結果がほぼ1本の曲線に収束するといえる。当初は、断面寸法の違いにより内部の水分勾配が異なるため実験結果に差が生じると予想したが、本実験の範囲の寸法では、断面寸法による影響は小さいという結果を得た。しかしながら、両ケースとも断面寸法が最も小さい供試体については、やや特異な挙動を示している。これは、ペーストと砂の分布が内部と異なる表層部分の影響が大きく現われたためと考えられる。

図-3、図-4より回帰される材料の微小構成要素における含水パラメータ ϕ と自由収縮ひずみ ϵf の関係は非線形性を呈するが、ここでは図-5に示す3直線によりモデル化した。

$$\epsilon f = \begin{cases} M1 \cdot 0.1 & (1.1 \leq \phi) \\ M1 \cdot (\phi - 1) & (0.9 \leq \phi \leq 1.1) \\ M2 \cdot (\phi - 0.9) - M1 \cdot 0.1 & (\phi \leq 0.9) \end{cases} \quad (2)$$

ただし $M2 = 1.5 \cdot M1$

3直線の概形を決定する定数M1は、水セメント比40%のケースでは $M1 = 0.003$ 、水セメント比60%のケースでは $M1 = 0.002$ とすれば、本実験結果にほぼ一致する。

式(2)はモルタルによる実験より得たものであるため、コンクリートに適用するには、粗骨材の影響を考慮する必要がある。最も単純なモデル化として、ここではコンクリートをモルタルと粗骨材、2種の弾性体の複合材であると考え、次式によりコンクリートの自由収縮ひずみを求めた。

$$\epsilon fc = \epsilon fm \left(Vm + Vg \frac{Em}{Eg} \right) \quad (3)$$

ここに、 ϵfc :コンクリートの自由収縮ひずみ、 ϵfm :モルタルの自由収縮ひずみ、 Vm :モルタルの容積率、 Vg :粗骨材の容積率、 Em :モルタルの弾性係数、 Eg :粗骨材の弾性係数である。

4. コンクリート中の水分移動

コンクリート中の水分移動現象は、位置と時間の関数である含水パラメータ $\phi(x, y, z, t)$ を用い、次のような支配方程式によって記述できるとした[3]。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = K(\phi) \nabla^2 \phi \quad (4)$$

ここに、 $K(\phi)$ は拡散係数であり含水パラメータ ϕ に依存する。境界条件は次式により与えた。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} + \beta(\phi)(\phi - \phi_0) = 0 \quad (5)$$

ここに、 $\beta(\phi)$ は表面係数であり含水パラメータ ϕ に依存する。 n は外向き法線であり、 ϕ_0 は境界での相対湿度によって与える。

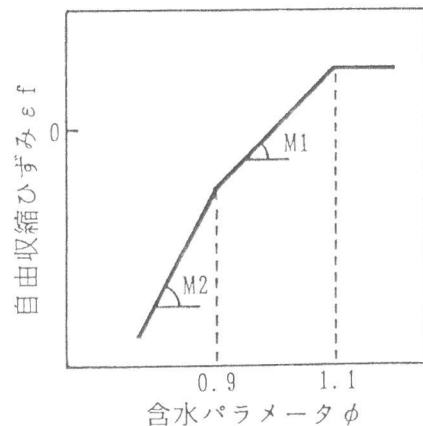


図-5 含水パラメータ ϕ と自由収縮ひずみ ϵf の関係

コンクリート中の水分移動は、液体での移動、気体での移動、液体と気体の相変換をとともなうと考えられる。しかし、ここではそれらの現象をマクロに扱うことを考え、コンクリート内部での水分移動特性を表現する拡散係数 $K(\phi)$ 、境界での特性を表現する表面係数 $\beta(\phi)$ の含水パラメータ ϕ に対する依存特性によってコンクリート中特有の水分移動特性を表現した。ここでは図-6に示す依存特性曲線を用いた。

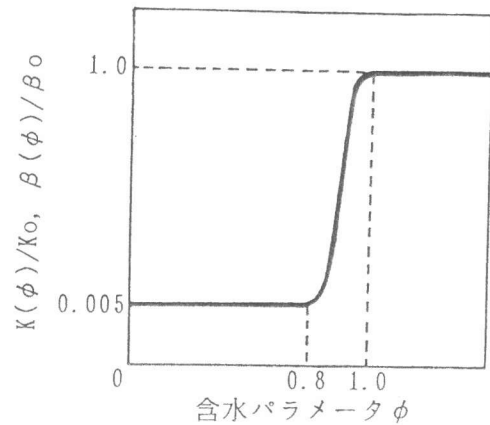


図-6 $K(\phi)$, $\beta(\phi)$ と ϕ の関係

5. 1次元方向に乾燥を受けるコンクリートの解析と検証実験

前述の乾燥収縮の構成則と水分移動モデルを組み合わせて、1次元方向に乾燥を受けるコンクリートおよびモルタルの変形の経時的变化の解析を行ない、実験結果と比較した。

供試体の形状および寸法を図-7に示す。供試体は材令1日で脱型し、材令28日まで20℃水中にて養生を行なった。1次元方向の乾燥を実現するために、供試体は打ち込み面を除く5面をエポキシ樹脂系塗料によりシールした後、図-1に示す試験装置により乾燥を開始した。その後、適切な時間ごとに供試体を取り出し、重量と側面3カ所におけるひずみ（基長100mm）を測定した。

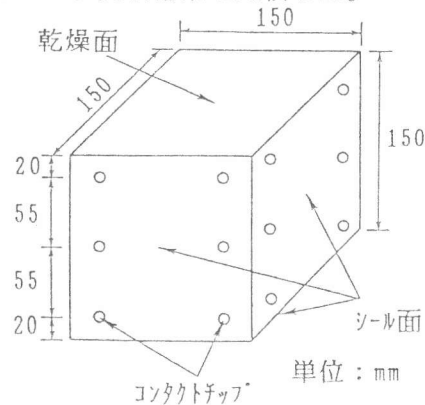


図-7 供試体の形状および寸法

解析手順を以下に示す。

- ①測定値である供試体重量の経時的变化が実験結果と一致するように、水分移動モデルの材料特性値である拡散係数の代表値 K_0 と表面係数の代表値 β_0 を同定する。
- ②水分移動モデルを1次元陽的差分法を用いて解くことにより、含水パラメータ $\phi(y, t)$ の深さ方向の分布を計算する。位置の刻みは0.75cm、時間の刻みは60分とする。
- ③含水パラメータ $\phi(y, t)$ の分布と、式(2), (3)より、自由収縮ひずみの分布 $\epsilon_f(y, t)$ を計算する。

④三角形一次要素を用いた2次元有限要素法により変形分布、応力分布を計算する。解析対象領域および要素分割を図-8に示す。変形、応力解析にあたっては、材料の応力-ひずみ-時間に関する構成則が必要となるが、ここでは線形弾性体、かつ時間に非依存とする。なお、③、④の手順は50時間ごとに行なう。また、3次元を2次元に移行する際には平面応力状態を仮定する。

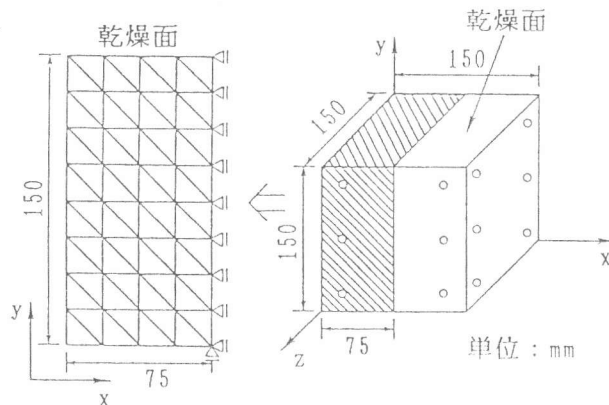


図-8 要素分割図

水セメント比40%、単位水量167kgのコンクリートを用いた場合の実験結果と解析結果を示す。

まず、供試体の重量減少量の経時変化が実験結果と一致するように、仮定・修正をくりかえして、水分移動モデルの材料特性値である拡散係数の代表値 K_0 と表面係数の代表値 β_0 を同定した。図-9はそのときの材料定数値を用いて、水分移動モデルにより計算した供試体の重量減少量の経時変化を、実験結果とあわせてプロットしたものである。図-10は計算の結果得られる含水パラメータ ϕ 、深さ方向の分布とその経時変化を示したものである。

含水分布解析の結果に基づいて、変形と応力分布の解析を行なった。図-11はひずみの実験結果と解析結果をあわせてプロットしたものである。ひずみは乾燥開始時を0としてプロットしてある。また、ひずみの解析値は、ひずみ測定範囲に含まれる要素の水平方向ひずみを平均したものである。中央断面におけるひずみ ϵ_2 の測定値と解析値に若干差異がみられるものの、全体的傾向は比較的一致している。本解析法により、乾燥環境下における部材のひずみ分布の経時変化をほぼ妥当に予測し得るといえる。

図-12は解析により得られた応力の水平方向成分の、深さ方向の分布の経時変化を示したものである。応力分布の形状は定性的には合理的であるといえるが、乾燥表面付近に生じる引張応力の最大値が 50kgf/cm^2 近くに達しており、実際に生じている応力よりも大きく算出していると予想される。この原因は、材料の応力-ひずみ-時間関係を単純化して与えたためであると考えられる。

ひびわれの発生条件を応力により与えるならば、応力の予測は重要であり、応力の予測にあたっては、材料の応力-ひずみ-時間関係を精度の高い材料構成則に置き換える必要がある。

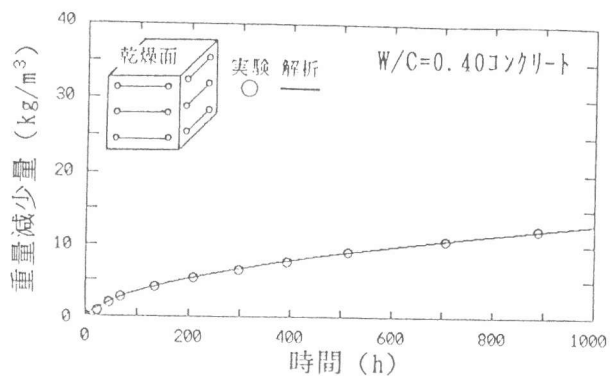


図-9 時間と重量減少量の関係

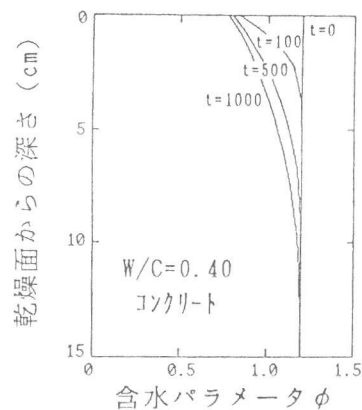


図-10 含水分布の経時変化

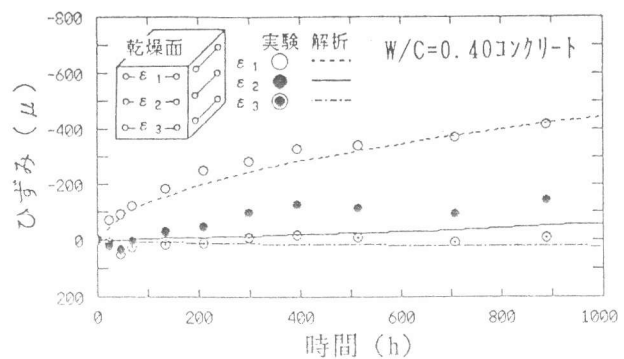


図-11 時間とひずみの関係

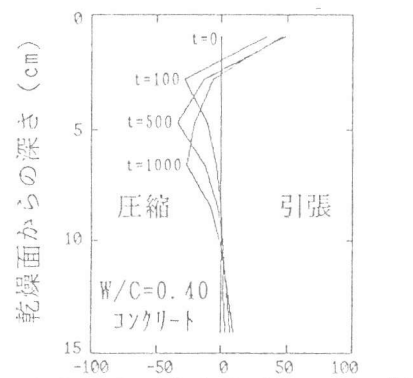


図-12 応力分布の経時変化

図-13は水セメント比60%、単位水量196kgのコンクリート、図-14は水セメント比40%、単位水量255kgのモルタルを用いて行なったひずみ分布の経時変化についての実験結果および解析結果である。いずれの場合も解析結果は実験結果とほぼ一致している。提案した乾燥収縮の構成則はモルタルによる実験結果から導出したものであるが、粗骨材を拘束材と考えることによってコンクリートに対しても適用可能であるといえる。

しかしながら、本検証実験は構成則を導出した実験と同一の試験装置において乾燥を行っており、本実験結果からだけでは、乾燥条件が変化した場合の構成則の適用範囲については明らかではない。真空乾燥試験では促進的に乾燥収縮を起こさせるために、乾燥収縮に含まれる時間依存の変形成分が、実際の環境下における乾燥と異なる可能性があり、この点については今後検討が必要である。

また、本実験では配合条件として水セメント比、粗骨材量のみを考慮し、養生条件としては水中養生のケースのみを扱ったが、今後、使用材料、養生条件をさまざまに変化させた場合についても検討する必要がある。さらに、本解析では水分移動特性は実験結果より同定したが、今後は収縮特性だけでなく水分移動特性をも含めて、予測可能にして行きたい。

6. まとめ

本研究では、コンクリートおよびモルタルの乾燥収縮についての真空乾燥法による実験と、乾燥環境下における供試体の挙動の経時変化についての解析を行ない、その結果、微小構成要素における含水状態と自由収縮ひずみの関係と、コンクリート中の水分移動を定式化することにより、乾燥環境下における部材の変形を予測することは可能であることを明らかにした。

謝辞

本研究を進めるにあたり、東京大学岡村甫教授から貴重な示唆を頂きました。感謝致します。

参考文献

- 1) 下村 匠, 前川宏一: 沈下および収縮によるかぶりコンクリートの初期欠陥に対する時系列評価モデル, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.482-483, 1990.9
- 2) 山中克夫, 小沢一雅, 國島正彦: コンクリート構造物の耐久性能の定量的評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.487-492, 1989.6
- 3) Bažant, Z.P. and Najjar, L.J.: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, Matériaux et Constructions, Vol.5, No.25, pp.3-20, 1972

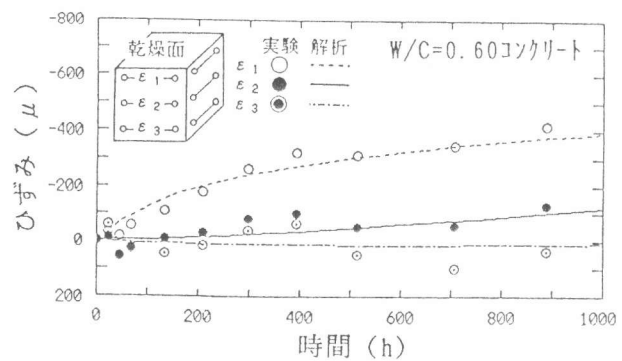


図-13 時間とひずみの関係

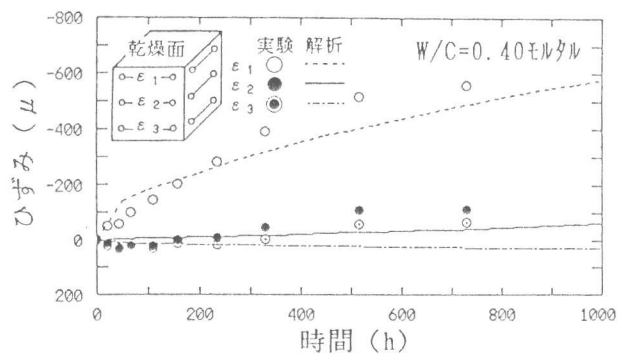


図-14 時間とひずみの関係