コンクリート工学年次論文報告集 13-1 1991

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

正会員〇下村 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的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50 ℓ/minで あり、デシケータの容量は約20 ℓ 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¢(以下含水パラメータという)を用いた。

$$\phi(\mathbf{x},\mathbf{y},\mathbf{z},\mathbf{t}) = \frac{\mathbf{W}\mathbf{f}}{\mathbf{W} - \mathbf{W}\mathbf{c}} \tag{1}$$

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。実際にはコンタ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℃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φ=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 パラメータ々と自由収縮ひずみ 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℃水 中にて養生を行なった。材令28日まで20℃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 は含水パラメータタの供試体平均値⊽が1の ときに0となるように処理した。

#### 表-1 モルタル供試体の配合

	Air	単位	<b>t</b> (kg	(kg/m <sup>3</sup> )	
	(%)	W	С	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

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 $\phi$ の供試体平均値 $\overline{\phi}$ であり、また供 試体内部において $\phi$ 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 $\overline{\phi}$ とひずみ $\varepsilon$ 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 $\phi$ と自由収縮ひずみ $\varepsilon$ fの関係であると考えた。



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。

$$\varepsilon f = \begin{cases} M1 \cdot 0.1 & (1.1 \le \phi) \\ M1 \cdot (\phi - 1) & (0.9 \le \phi \le 1.1) \\ M2 \cdot (\phi - 0.9) - M1 \cdot 0.1 & (\phi \le 0.9) \\ \tau \tau \xi \cup M2 = 1.5 \cdot M1 \end{cases}$$

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40%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。

$$\varepsilon fc = \varepsilon fm (Vm + Vg \frac{Em}{Eg})$$
 (3)



(2)

図-5 含水パラメータ φ と 自由収縮ひずみ ε f の関係

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φ(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]。

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

ここに、K(φ)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。

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

ここに、β(φ)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、φoは境 界での相対湿度によって与える。

-393-

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 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(φ)、境界での特性を表現する表面係数 β(φ)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。



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変化の解析を行ない、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。



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変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Koと表面係数の代表値βoを同定する。

②水分移動モデルを1次元陽的差分解法を用いて解くことにより、含水パラメータφ(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 φ(y, t)の分布と、式(2),

(3)より、自由収縮ひずみの分布 *e* 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、y、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。



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的変化が 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Koと表面係数の代表値 βo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的変化を、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の、 深さ方向の分布とその経時的変化を示したも 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  $\varepsilon_2$ 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的変化をほぼ妥当に 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的変化を示 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<sup>2</sup>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-13は水セメント比60%、単位水量196 kg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的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 なっており、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的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