

V-231 コンクリートの細孔構造と収縮特性

東京大学工学部 正会員 下村 匠
 大韓民国鉄道庁 陳 丙学
 東京大学工学部 正会員 小沢一雅

1. はじめに

コンクリートは内部の含水状態の変化によって長さ変化が生じるが、とりわけ乾燥にともなう収縮は、しばしば構造物の耐久性を大きく左右するひびわれの原因となるため、その予測と制御が重要である。コンクリートの乾燥収縮を合理的に予測するためには、材料の収縮特性、すなわち含水状態と自由収縮量の関係が必要である[1]。本研究では、コンクリートの微細構造をモデル化することにより、収縮特性を合理的に説明することを試みた。

2. 硬化セメントペーストの細孔モデル

コンクリートの水分移動特性や収縮特性を直接に支配しているのは、コンクリート中の硬化セメントペースト部分の構造であると考えられる。ここでは、セメント硬化体を『径が連続的に分布する細孔が一様に存在する連続体』と仮定し、径の分布形が次のような連続関数により表現できるとした。(図-1)

$$V(r) = A \{1 - \exp(-B r^C)\} \quad (1)$$

ここに、 $V(r)$ はセメントペースト単位体積における半径0から r までの細孔の累積容積、 r は細孔半径、 A 、 B 、 C は分布形状を決定する定数である。

累積細孔容積分布が上式で表わされるとすると、細孔径分布、すなわち細孔容積の分布密度関数は次のようになる。(図-2)

$$\frac{dV(r)}{dr} = A B C r^{C-1} \exp(-B r^C) \quad (2)$$

コンクリート中の移動可能な水分をここでは自由水と定義する。自由水の逸散すなわち乾燥は、セメントペースト中の径の大きな細孔より順次起こると仮定すると、飽水状態からのペースト単位体積あたりの逸散水量 w_d と、その時点において自由水の存在している細孔の最大径 r_d は次のような関係にある。(図-2)

$$w_d = \int_{r_d}^{\infty} \frac{dV(r)}{dr} dr \quad (3)$$

また、残存している自由水量 w_f は次式により与えた。

$$w_f = w_0 - w_d \quad (4)$$

ここに、 w_0 は飽水時の自由水量であり、総細孔量すなわち $V(\infty)$ ($= A$) と密接に関連していると推察されるが、ここでは、別途行なった飽水時の重量と絶乾重量を測定する実験の結果をもとに w_0 を与え、パラメータ A とは独立に扱った。さらに本研究では、硬化セメントペーストの乾燥収縮は、細孔壁に作用する毛細管張力による材料の変形であると仮定した。まず、自由水の存在している細孔の最大径が r_d であり、単位体積あたりの残留水量が w_f であるとき、水の表面張力を γ として、硬化セメントペーストには次のような内部応力 σ が作用するとした[2]。

$$\sigma = w_f \frac{2\gamma}{r_d} \quad (5)$$

式(5)によって表わされる内部応力 σ によって生じる弾性変形が乾燥収縮による変形成分であるとした。

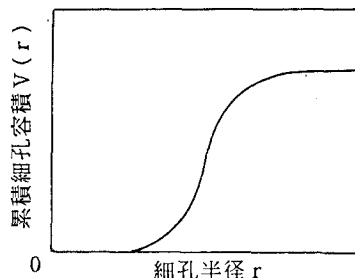


図-1 ペースト単位体積あたりの累積細孔容積

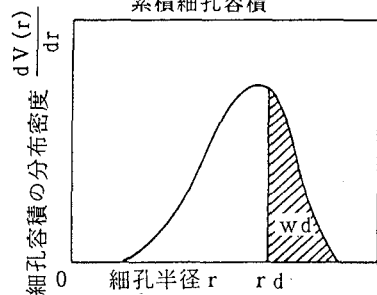


図-2 細孔容積の分布密度

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{6}$$

ここに、 ε は乾燥収縮ひずみ、 E は弾性係数である。以上により、自由水の存在している細孔の最大径 r_d を媒介として、逸散水量 w_d と、乾燥収縮ひずみ ε の関係を定式化することができた。つまり細孔構造の特性を表現する $dV(r)/dr$ と、材料の収縮特性である $w_d-\varepsilon$ 関係を関係づけたことになる。

3. 実験による検証

モルタル供試体について、逸散水量 w_d と、乾燥収縮ひずみ ε を測定する実験を行ない、本モデルを用いて細孔径分布を同定する解析を行った。測定されるひずみが自由収縮ひずみとなるように、供試体は内部の水分勾配が小さいと考えられる小型のものとした。また、安定した条件下で促進的に乾燥させるために、真空乾燥試験装置を用いて実験を行なった[1]。解析は、収縮特性である $w_d-\varepsilon$ 関係が実験結果と一致するように、仮定・修正をくりかえして、定数 A 、 B 、 C を同定した。なお、弾性係数は圧縮強度より推定した値を用いた。

図-3は水セメント比40%と60%の供試体(寸法 $4 \times 4 \times 16$ cm)における、逸散水量 w_d と乾燥収縮ひずみ ε の関係である。図-4にこれらのケースにおける細孔径分布の同定結果を示す。水セメント比60%のケースは40%に比べてピークが径の大きい側にシフトしており、また総細孔量も多いという傾向を示している。

図-5は配合は同一であるが、一方は水中養生を行い、一方は材令初期に 110°C の乾燥炉において養生したケース(水セメント比54%、寸法 $5 \times 10 \times 15$ cm)についての $w_d-\varepsilon$ 関係であり、図-6はこれらのケースの細孔径分布の同定結果である。養生環境を変えることによって収縮特性は変化し、本モデルではそれが細孔構造の違いとなって現われている。

以上のように、本モデルにより細孔構造と収縮特性の関係を合理的に説明できることが確かめられた。今後は材料・配合・環境履歴から細孔構造を予測する手法を確立することが課題である。

【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, 陳 丙学, 小沢一雅: 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, コンクリート工学年次論文報告集 第13巻 (1991.6)
- [2] 後藤孝治, 酒井公式, 佐藤 健: セメント硬化体の乾燥収縮を低減する有機質混和剤, セメント・コンクリート No.442 (1983.12)

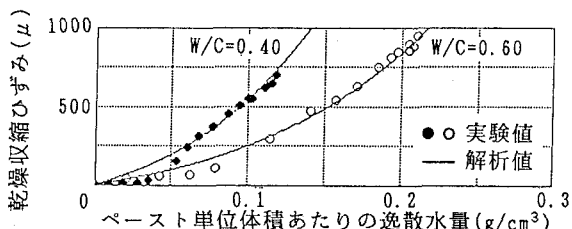


図-3 逸散水量 w_d と乾燥収縮ひずみ ε の関係

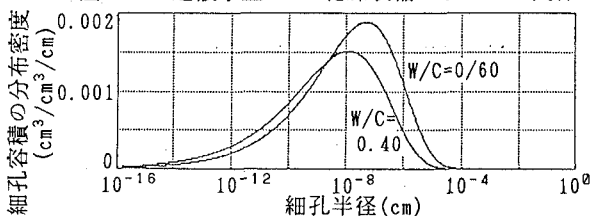


図-4 細孔径分布

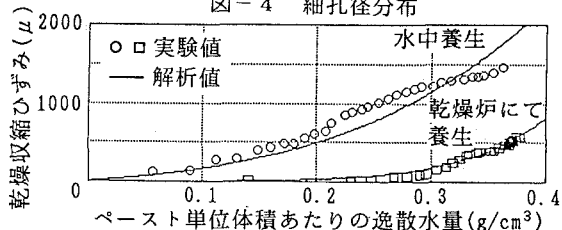


図-5 逸散水量 w_d と乾燥収縮ひずみ ε の関係

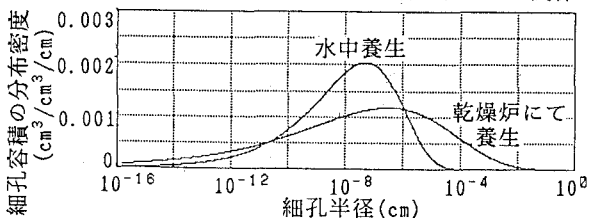


図-6 細孔径分布