

V-2

非定常水分拡散解析に基づくコンクリートの乾燥収縮の評価

北海道大学工学部 ○学生員 横原隆志
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 大沼博志
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 名和豊春

1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は、コンクリート中の水分が移動して表面から蒸発することによって生じ、コンクリート構造物にひびわれが発生する主要な原因の一つとなっている。このひびわれ発生を判定するためには、乾燥収縮ひびみを測定あるいは算定することが必要となる。そこで、本論文は、乾燥収縮ひびわれの発生を解析的に評価する第一段階として、非定常水分拡散解析によって求めたコンクリート中の水分変化と乾燥収縮試験で得られたひびみの時間変化との関係から、解析的に乾燥収縮ひびみを得ることができないか検討したものである。

2. 乾燥収縮試験

2.1 試験概要

乾燥収縮試験に用いたセメントは、普通ポルトランドセメントで、比重 3.16、比表面積 3130cm²/g、フライアッシュは比重 2.15、比表面積 3010cm²/g、膨張材は水和熱抑制型で、比重 2.71、比表面積 2800cm²/g であった。細骨材は利根川産天然砂（細砂）と鹿沼産碎砂（粗砂）を 4:6 の割合で混合し、その粗粒率(FM)は 2.63 であった。また、粗骨材の最大寸法は 20mm であり、鹿沼産の碎石であった。混和剤として、AE 減水剤をセメント重量の 0.25% 使用し、またさらに AE 剤を同様に 0.004% 使用した。コンクリートの配合を表-1 に示す。これらの 4 種のコンクリートは、実際の地中送電用覆工コンクリートに使用したものである。

供試体の寸法は 10×10×40cm の角柱であって、コンクリートは 2 層に分けて充填し、各層はテープルバインダーレータによって締固めた。供試体は 24 時間後に脱型し、あらかじめ埋め込まれた金属板にゲージアラウンドを接着した。ひびみ測定の標点距離は 300mm とした。供試体の養生は、脱型後直ちに基長を測定し、以後温度 20±1°C、相対湿度 95±5% の恒温保存箱中で湿潤養生した。湿潤養生 60 日後より、温度 20±1°C、相対湿度 60±5% の気中において、以後 182 日間にわたり、乾燥収縮ひびみを測定した。この養生条件及び乾燥開始材齢

表-1 乾燥収縮試験に用いたコンクリートの配合

コンクリート種別	粗骨材の最大寸法(mm)	スランプの範囲(cm)	水・結合材比(%)	空気量の範囲(%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	膨張材 E	混和剤 A
普通コンクリート(1)	20	17±2.5	62.9	5.5±1	46.5	188	299	—	795	925	—	75
普通コンクリート(2)	20	17±2.5	66.0	5.5±1	46.5	188	285	—	800	931	—	72
フライアッシュコンクリート	20	17±2.5	57.9	5.5±1	46.0	173	239.2	59.8	793	942	—	61
膨張コンクリート	20	17±2.5	61.8	5.5±1	46.5	185	269	—	796	927	30	68

Evaluation of Shrinkage of Concrete based on Unsteady Water Diffusion Analysis
 by T.Sakakibara, H.Ohnuma and T.Nawa

は、地中送電用シールドの覆工コンクリートに合わせたものであり、通常のコンクリートとは異なっている。

また、4種類のコンクリートの材齢28日における圧縮強度はJISA1108に準拠して求めたものであり、普通コンクリート(1)は 24.9N/mm^2 、普通コンクリート(2)は 24.8N/mm^2 であった。また、フライッシュコンクリートは 23.2N/mm^2 、膨張コンクリートは 24.8N/mm^2 であった。

2.2 試験結果

乾燥開始後を基準とした乾燥収縮曲線を図-1に示す。

乾燥開始182日間後の乾燥収縮ひずみは、普通コンクリート(1)で 503×10^{-6} 、普通コンクリート(2)で 686×10^{-6} を示し、またフライッシュコンクリートは 548×10^{-6} であった。一方、水和熱抑制型膨張材を混和した膨張コンクリートは、 554×10^{-6} の収縮ひずみが測定された。

ただし、湿潤養生60日後において、普通コンクリート(1)と(2)は $40 \sim 50 \times 10^{-6}$ の収縮ひずみが生じたが、フライッシュコンクリートはほとんど生じなかった。一方、膨張コンクリートは打設1日で 148×10^{-6} の膨張ひずみが生じ、60日後においても約 100×10^{-6} の膨張ひずみが残留した。

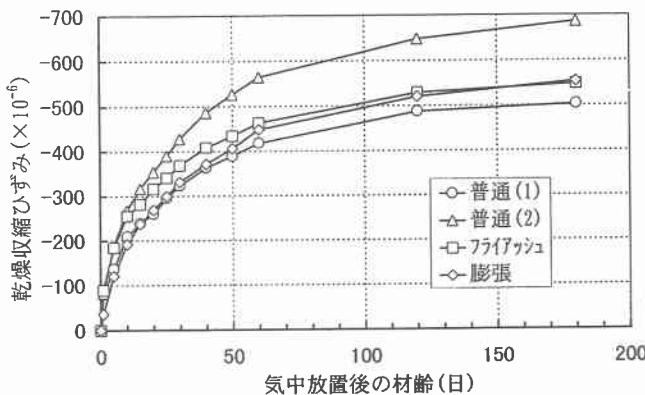


図-1 各種コンクリートの気中放置後の乾燥収縮曲線

3. 有限要素法による非定常水分拡散解析

3.1 非定常水分拡散方程式

コンクリート中の水分移動は水蒸気の拡散に因るものであり、浸透流はコンクリート中の含水量に無関係であると仮定するならば、水分移動は拡散方程式によって表すことができる。線形非定常の水分拡散の支配方程式は二次元問題の場合には、次式によって表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y}) \quad (1)$$

また、等方性($D_x = D_y = D$)を仮定すると次式のようになる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

境界条件には、表面の湿度が周囲の湿度と等しいとする固定境界条件と、表面の蒸発速度が内部と外表面の湿度差に比例するものとする水分伝達境界条件の2種類がある。

$$(a) \text{ 固定境界条件: } C = C_a \quad (3)$$

$$(b) \text{ 水分伝達境界条件: } D_n \frac{\partial C}{\partial n} + h(C - C_b) = 0 \quad (4)$$

ここで、 x, y は座標 (cm)、 C は単位体積当たりの水分量 (g/cm^3)、 D_x, D_y は x, y 方向の水分拡散係数 (cm^2/day)、 h は外部流体への水分伝達率 (cm/day)、 C_a は固定境界上の単位体積当たりの水分量 (g/cm^3)、 C_b は外部流体の単位体積当たりの水分量 (g/cm^3)、 t は時間 (day) とする。また、初期条件は次式で与えられる。

$$C(x, y, t = 0) = C_0 \quad (5)$$

3.2 解析方法および解析結果

乾燥収縮試験におけるひずみの測定は、 $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$ の供試体の中央部表面で行われているので、平面保持の仮定から、測定されたひずみは断面内の平均ひずみである。また、ひずみ測定区間では端面の水分移動の影響をほとんど受けないので、二次元問題としてよい。

この乾燥収縮試験では、供試体の重量変化あるいはコンクリート中の含水量の分布は測定していないので、Pickett の論文¹⁹から、水分拡散係数 (D) を $0.23\text{cm}^2/\text{day}$ に、水分伝達係数 (h) を $0.18\text{cm}/\text{day}$ に仮定した。実験室の気温は 20°C であり、相対湿度 60% があるので、外部空気の単位体積当たりの水分量は $1.04 \times 10^{-5}\text{g}/\text{cm}^3$ である。また、初期水分量は $0.3\text{g}/\text{cm}^3$ とした。これらの条件で図-2 に示すような要素分割に対して非定常水分拡散解析を行い、コンクリート供試体の水分量の経時変化を求め、図-3 に示した。この図から、コンクリート内部の水分移動は、はじめにコンクリート表面付近から起こり、乾燥期間の経過につれて、次第に内部に及ぶことがわかる。特に、角部では X と Y の両水分伝達の影響を受けて、早期に水分移動が生じる。

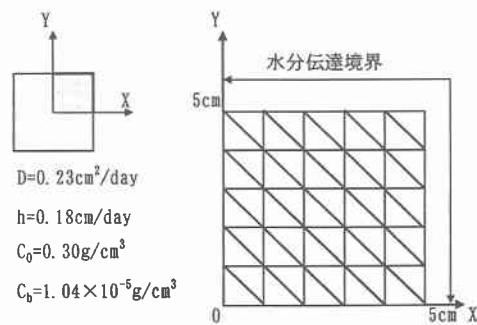


図-2 非定常水分拡散解析に用いた要素分割

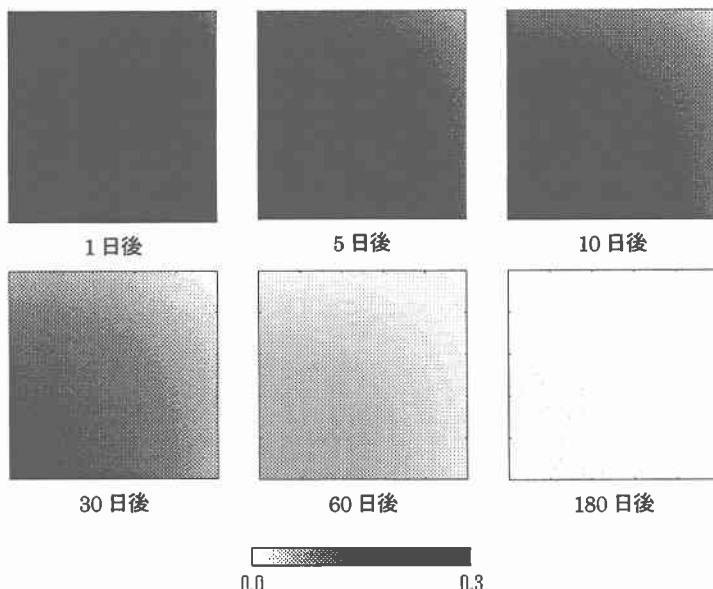


図-3 水分量の経時変化

4 水分変化量と乾燥収縮ひずみ

試験で得られた乾燥収縮ひずみ $\varepsilon_s (\times 10^{-6})$ と、解析で求まった平均的な水分量 $\Delta_c (\text{g/cm}^3)$ の関係を図-4 に示す。ここで、図-4 の直線の勾配は乾燥収縮係数 $\beta_c (\times 10^{-6}/\text{g/cm}^3)$ に相当する。この図から明らかのように、乾燥期間が 120 日間 ($\Delta_c = 0.294$) までは β_c はほぼ一定であると考えてよい。この乾燥期間における最大誤差は、 25×10^{-6} 程度であるものの、乾燥収縮ひずみと平均水分変化量との間には相当によい線形性のあることが明らかにされた。非定常水分拡散解析によって、各材齢における Δ_c が得られれば、次の関係式によって乾燥収縮ひずみを求めることができる。

$$\varepsilon_s = \beta_c \cdot \Delta_c = \beta_c \cdot (C - C_0) \quad (6)$$

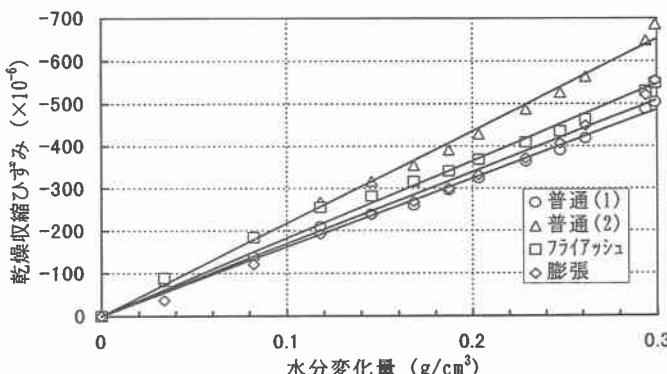


図-4 乾燥収縮ひずみと平均水分変化量の関係

5. まとめ

地中送電用覆工コンクリートに使用した 4 種のコンクリートについて、同一の養生条件に基づいた乾燥収縮試験を行い、非定常水分拡散解析と比較・検討した。

非定常水分拡散解析によって求めたコンクリート中の水分変化と、乾燥収縮試験から得られたひずみの時間変化は、全てのコンクリートで線形の関係にあることが明らかにされた。したがって、この勾配である乾燥収縮係数を用いることによって、解析的にコンクリートの乾燥収縮ひずみを算定することが可能である。

参考文献

- 1) G. Pickett : Shrinkage Stress in Concrete, ACI Journal, Vol. 17, No. 3, PP. 165~195, Jan. 1946.
- 2) J. Kasperkiewicz : Some Aspects of Water Diffusion Process in Concrete, Materials and Constructions, vol. 5, No. 28, PP. 209~214, 1972.
- 3) 山田和夫, 小林健, 山本俊彦 : 4 面乾燥状態にあるコンクリートの水分移動性状に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, No. 50, PP. 467~471, 1996.
- 4) 藤田忠司, 石田宏, 帷子國成, 小西俊之 : コンクリートの乾燥収縮に及ぼす配合の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, PP. 205~210, 1989.