

論文

[1108] 硬化モルタルの細孔径分布と水の浸透特性の関係

正会員○沼尾達弥 (茨城大学都市システム工学科)

正会員 福沢公夫 (茨城大学都市システム工学科)

陳 總宇 (茨城大学大学院)

堀辺 忍 (日立セメント開発部)

1. はじめに

コンクリートの硬化体中には、成因の異なる多くの細孔が存在している。その細孔を通り道として、水その他の物質が移動して、コンクリート構造物の耐久性に影響を与える。また、耐久性改善材料の一つである含浸塗料などの浸透が、コンクリートの状態の変化に影響されるのも、細孔分布の影響と考えられる [1]。

圧力勾配のない場合のコンクリートへの液体の浸透は、キャピラリーポアを通り道とした毛細管張力により浸透するものとして考えるのが一般的である [2,3]。しかし、毛細管浸透においては毛細管の径、毛細管体積などの細孔構造により、浸透特性に影響を受けるのは明らかであるが、コンクリートの細孔構造と浸透特性とを関連させた研究は見あたらない。

本研究は、上記のことを考慮して、水セメント比を変化させることによりモルタルの細孔構造を変化させ、水の浸透特性と細孔構造との関係について調べることを目的としている。

2. 実験方法

2.1 実験概要

実験は、①浸透方向と水の浸透特性との関係、②モルタルの細孔構造と水の浸透特性の関係について行った。②においては、水セメント比 (W/C) を30~70%に変えることにより、モルタルの細孔構造 (細孔径分布) を変化させた。

2.2 供試体の製作および成形方法

(1) 供試体：実験には40x40x160mmの角柱供試体を用いた。モルタル打設の際には、浸透面 (40x40mm) には、離型剤による浸透特性への影響を避けるため、塗布を行わなかった。

(2) 使用材料：セメントは普通ポルトランドセメント (比重3.15) を、細骨材には豊浦標準砂を用いた。

(3) 配合：モルタルは、砂/セメント比 (S/C)=1として決定した。その配合を表-1に示す。練り混ぜは、モルタル用強制練りミキサーを使用し、最初にセメントと骨材を約1分間練り混ぜた後、水を投入しさらに1分間練り混ぜた。

表-1 モルタルの配合

| W/C<br>(%) | 空気量<br>(%) | 単体量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |
|------------|------------|--------------------------|-----|-----|
|            |            | C                        | S   | W   |
| 30         | 4.3        | 998                      | 998 | 299 |
| 40         | 3.3        | 907                      | 907 | 363 |
| 50         | 2.0        | 832                      | 832 | 416 |
| 60         | 2.0        | 768                      | 768 | 461 |
| 70         | 1.2        | 713                      | 713 | 499 |

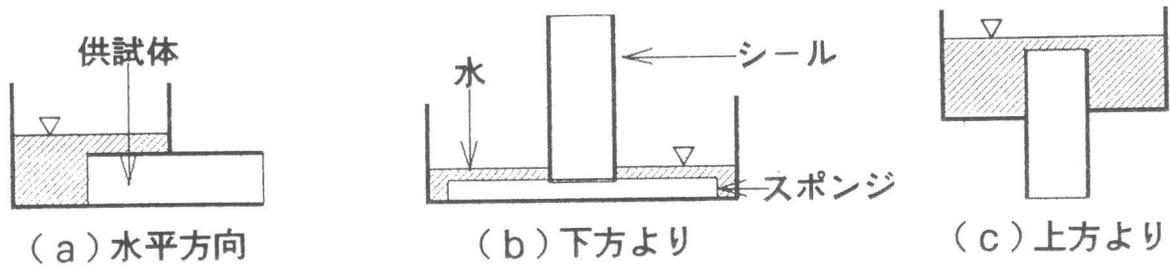


図-1 浸透方法

## 2.3 実験方法

### (1) 実験順序

供試体は、モルタル打設後2日で脱型し、水中または気中でそれぞれの所定の養生期間を行った後、乾燥炉（110℃、2日間あるいは60℃、7日間）で乾燥し、恒温恒湿室（20℃、60%RH）中で1日冷却した。その後浸透面以外の側面をシリコーン樹脂を用いてシールした後、水の容器に同様の樹脂により固定し、さらに、1日おいて浸透試験を行った。

### (2) 浸透試験の方法

水の浸透方向の影響をみるため、図-1に示すようにa水平方向、b上方、c下方より浸透させ、比較を行った。なお供試体表面は、薄膜等を除去するため、ワイヤブラシで磨いた。水量は、供試体に水圧が作用しないよう配慮した。

### (3) 浸透深さの測定方法

浸透深さは、所定の時間に供試体を取り出し、半割りして、写真-1のようにノギスで浸透部の中央部分を読み取り、浸透深さとした。

## 2.4 細孔径分布測定方法

細孔径分布は、水銀圧入式ポロシメータ（島津製作所製ポアサイザ9310型）を用いた。細孔分布測定用試料は、浸透試験中における水和反応の影響を避けるため、浸透面の反対面から採取した。7日間のD乾燥を行い約1gの試料をセルに入れて測定した。試験は2回行い平均値を測定値とした。なお、水銀の

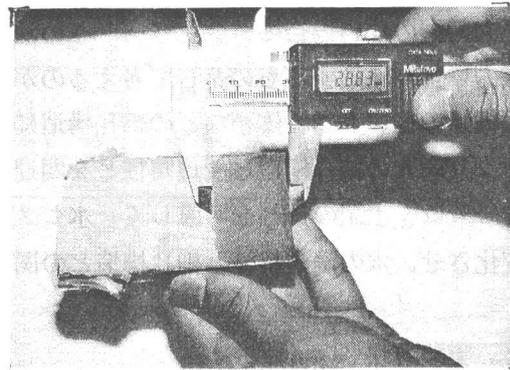


写真-1 浸透深さの測定方法

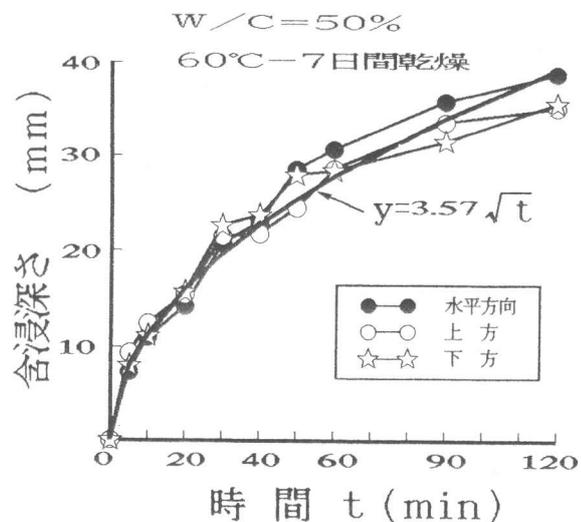


図-2 浸透深さと浸透時間の関係

表面張力は484dyn/cm、接触角は130度とした。なお、細孔直径測定範囲は0.006~500 $\mu$ mである。

### 3. 水の浸透方向と浸透性

図-2に水セメント比50%の供試体に3つの方法による浸透時間と浸透深さとの関係を示す。この図より、水の浸透深さの経時変化は、その方向によらずほぼ同一と考えられる。浸透時間が2時間の範囲においては、水の浸透性はその浸透方向により、大きな影響を受けないと判断される。このことは、水の浸透が、重力の影響を受けず、主として毛細管張力により浸透することを示すものといえよう。

また、図-2より、初期の時点では浸透速度は大きいのが、徐々に小さくなっていく傾向がみられる。毛細管浸透による浸透深さと時間の関係については、Washburnにより(1)式が導かれている[4]。この式は、水圧の影響のない場合の水の浸透深さ $l$ は、時間 $t$ の平方根に比例することを示している。

$$l = \frac{r}{2} \sqrt{\left(2 \frac{\gamma_L \cos \theta}{r} + \Delta P\right) \frac{t}{\eta}} \quad (1)$$

ここに、 $l$  : 浸透深さ、 $r$  : 毛細管半径、 $\gamma_L$  : 表面張力、 $\theta$  : 接触角、 $\Delta P$  : 毛細管両端の圧力差、 $t$  : 時間、 $\eta$  : 粘度である。

そこで、得られたデータを(2)式を用いて最小自乗法により $a$ を求めた。その一例を図2に併せて示した。

$$l = a\sqrt{t} \quad (2)$$

ここで、 $l$  : 浸透深さ、 $a$  : 浸透係数、 $t$  : 時間である。

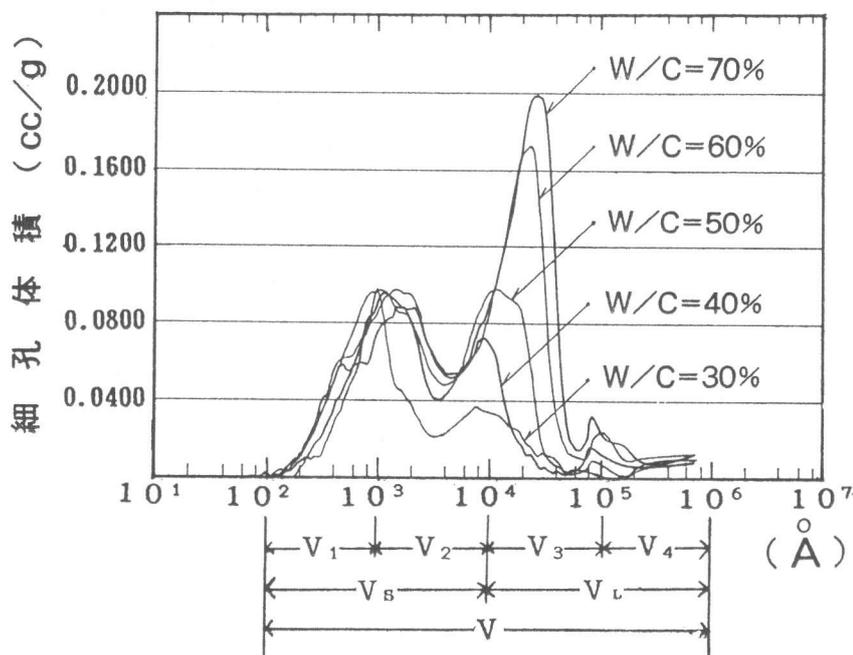


図-3 細孔径分布測定結果

#### 4. 細孔径分布と浸透係数の関係

4. 1 水セメント比と浸透係数、全細孔体積および平均細孔径との関係

水セメント比を30~70%に変化させたときの細孔径分布の測定結果を図-3に示す。図-4に、水セメント比と浸透係数、全細孔体積および平均細孔径との関係を示す。これより、浸透係数と全細孔体積とは、ともに水セメント比が増加するにつれて増加している。両者の関係を図-5に示す。単回帰分析の結果、回帰直線として(3)式が求められた。この直線の寄与率は $R^2=0.940$ であり、分散分析の結果も有意と判定された。

$$a = -1.069 + 35.83V \quad (3)$$

ここに、 $a$  : 浸透係数 ( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1/2}$ )

$V$  : 全細孔体積 ( $\text{cc} \cdot \text{g}^{-1}$ )

#### 4. 2 細孔径が浸透性に及ぼす影響

浸透性と細孔径の関係に対する影響を明らかにするため、細孔径を $V_1$  (細孔径 $10^2 \sim 10^3 \text{ \AA}$ の細孔体積、単位 $\text{cc/g}$ 、以下同様)、 $V_2$  ( $10^3 \sim 10^4 \text{ \AA}$ )、 $V_3$  ( $10^4 \sim 10^5 \text{ \AA}$ )、 $V_4$  ( $10^5 \sim 10^6 \text{ \AA}$ )と区分し、その影響を検討した。

表-2に、区分した細孔径の体積 $V_i$ と浸透係数 $a$ および $V_i$ 相互の相関係数の表すなわち、相関係数行列を示す。これより、浸透係数 $a$ と $V_1 \sim V_4$ とは、それぞれ相関係数のあること、とくに $V_3$ との関係の大きいことがわかる。また、 $V_1$ と $V_2$ 、 $V_3$ と $V_4$ の間に相関係数がある。このような場合は、多重共線性がある回帰式が得られる可能性が高いので、細孔直径が $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔体積 $V_S$  ( $V_1$ と $V_2$ の和)と $10^4 \sim 10^6 \text{ \AA}$ の細孔体積 $V_L$  ( $V_3$ と $V_4$ の和)を説明変数として多重回帰分析を行った。

表-3に相関係数行列を示す。F値が2.0以上の変数を選択する変数選択法により重回帰分析を行った結果、 $V_4$ のみを説明変数とする(5)式に示す回帰式が得られた。寄与率は、 $R^2=0.957$ あり、また表-4の分散分析表に示すように回帰式は有意であった。

このように、モルタルへの水の浸透特性に影響

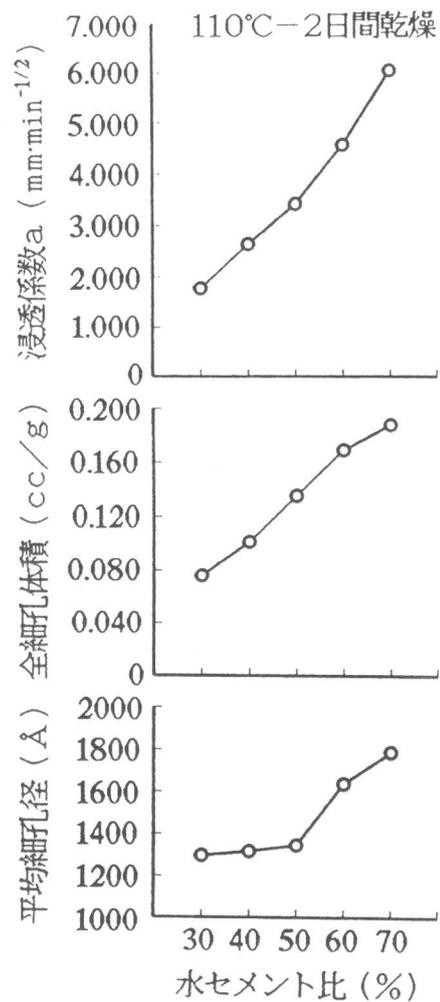


図-4 浸透係数、全細孔体積および平均細孔径

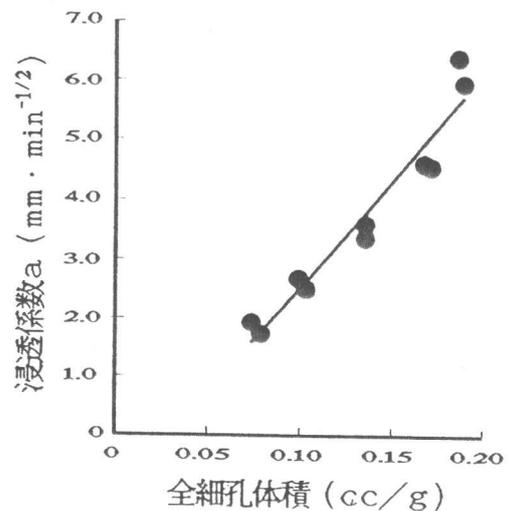


図-5 浸透係数と全細孔体積との関係

表-2 相関係数行列その1

| 変数名   | V <sub>1</sub> | V <sub>2</sub> | V <sub>3</sub> | V <sub>4</sub> |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| V <sub>1</sub> (10 <sup>2</sup> ~10 <sup>3</sup> Å) | 1.000          |                |                |                |
| V <sub>2</sub> (10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup> Å) | 0.823**        | 1.000          |                |                |
| V <sub>3</sub> (10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup> Å) | 0.594          | 0.548          | 1.000          |                |
| V <sub>4</sub> (10 <sup>5</sup> ~10 <sup>6</sup> Å) | 0.254          | 0.400          | 0.700*         | 1.000          |
| a (浸透係数)  | 0.606*         | 0.633*         | 0.975**        | 0.748*         |

注) \*危険率5%で有意, \*\*危険率1%で有意

表-3 相関係数行列その2

| 変数名   | V <sub>S</sub> | V <sub>L</sub> |
|---|----------------|----------------|
| V <sub>S</sub> (10 <sup>2</sup> ~10 <sup>4</sup> Å) | 1.000          |                |
| V <sub>L</sub> (10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup> Å) | 0.591          | 1.000          |
| a (浸透係数)  | 0.656*         | 0.978**        |

注) \*危険率5%で有意, \*\*危険率1%で有意

表-4 回帰に関する分散分析表

| 要因 | 平方和 (x10 <sup>-8</sup> ) | 自由度 | 分散 (x10 <sup>-8</sup> ) | 分散比      | F <sub>0.01</sub> |
|----|--------------------------|-----|-------------------------|----------|-------------------|
| 回帰 | 22.24                    | 1   | 22.24                   | 171.08** | 11.3              |
| 残差 | 1.01                     | 8   | 0.13                    |          |                   |
| 計  | 23.25                    | 9   |                         |          |                   |

する。細孔直径は、広い範囲にわたっているが、その影響は、10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup>Åの比較的大きめの細孔が影響することがわかる。

$$a = 1.339 + 47.4 V_L \quad (5)$$

ここに、a : 浸透係数 (mm·min<sup>-1/2</sup>)

V<sub>L</sub> : 10<sup>4</sup>~10<sup>6</sup>Åの細孔体積 (cc·g<sup>-1</sup>)

また、式(1)を用いて、cosθ=1と仮定し、γ<sub>L</sub>=72.5dyne/cm、η=1.04cpとして、みかけの細孔径rを求めたところ、5.0x10<sup>4</sup>~6.0x10<sup>5</sup>Åとなり、ほぼV<sub>L</sub>の範囲内となった。

## 5. 結論

水セメント比を30~70%まで変化させたモルタルに、水圧が生じない状態で浸透係数を測定し、モルタルの細孔構造との関係を求めた本研究の結果から次のことがいえよう。

(1) 水平より、上方よりおよび下方よりの3方向から浸透させたときの時間と浸透深さの関係には差が認められなかった。また、浸透深さは、時間の平方根に比例した。このことから、水圧のない状態でのモルタルへの水の浸透は、主として毛管張力による毛細管浸透によるものと考えられる。

(2) 浸透深さを時間の平方根で除した値を浸透係数とするとき、浸透係数は、水セメント比が大きいほど大きい。また、全細孔体積も、水セメント比の大きいほど大きい。単回帰分析の結果、浸透係数と全細孔体積との間には、直線関係があることが確認され、(3)式の回帰式が得られた。

(3) 細孔径を、 $10^2 \sim 10^4 \text{ \AA}$ の細孔体積 $V_s$ と $10^4 \sim 10^6 \text{ \AA}$ の細孔体積 $V_L$ にわけて、それらを説明変数として重回帰分析を行った結果、(5)式のように $V_L$ のみを説明変数とする(5)式が得られた。細孔径のうち、大きめの細孔が水の浸透特性により大きな影響を与えるものと考えられる。

(4) 毛細管浸透に関するWashburnの式に、浸透深さのデータを代入して求めた見かけの径は、 $5.0 \times 10^4 \sim 6.0 \times 10^5 \text{ \AA}$ であり、(3)で述べた径の範囲にある。

### 【参考文献】

- 1) 沼尾達弥、福沢公夫、岩松幸雄：含浸塗料の含浸深さに及ぼす各種要因の影響、コンクリート工学年次講演会論文集、Vol.8、pp.401-404、1986
- 2) 越川茂雄、伊藤義也：コンクリートの毛管浸透油性に関する研究、土木学会年講、Vol.46、p.190-191、Sep.1991
- 3) Paul, D.R., Fowler, D.W.: Surface Impregnation of Concrete Bridge Decks with Polymers, J1. of Applied Polymer Science, Vol.19, pp.281-301, 1975
- 4) Washburn, E.W.: The Dynamics of Capillary Flow, Physical Review, Vol.17, No.3, pp.273-283, Mar.1921