

コンクリートの毛管浸透試験方法に関する研究

METHOD OF TESTING CAPILLARY INFILTRATION OF CONCRETE

越川 茂雄*・荻原 能男**

By Shigeo KOSHIKAWA and Yoshio OGIHARA

The phenomenon of water being sucked up is focused on with the objective of establishing a testing method for capillary infiltration in concrete. Capillary flow inside concrete is first analytically studied, and together with showing that the physical property values for evaluating watertightness of concrete are final infiltration height Z_e and capillary infiltration coefficient K_c , methods of obtaining these by simple means are presented.

The reliabilities of the capillary infiltration property and test values are discussed comparing with the cases of other permeability test methods to indicate that the capillary infiltration test can be a useful method of conveniently testing watertightness of concrete.

Keywords: capillary infiltration, final infiltration height Z_e , capillary infiltration coefficient K_c , watertightness

1. 緒 言

コンクリート中の水の流れは表面張力による毛管流れと圧力勾配を伴う流れに大別される。

従来、コンクリートの透水試験方法として、圧力勾配を伴う流れに基づくアウトプット方法およびインプット方法が広く用いられている^{1),2)}。しかし、これらの透水試験においては、試験の手順や試験装置の取扱いが煩雑であること、アウトプット方法の場合は、一般に、試験に長時間を要すること等の不便があり、また、いずれも試験値のばらつきが大きい。

これに対し、ここに提案する毛管浸透試験方法は、試験装置、試験方法がきわめて簡単で試験値のばらつきも小さい。毛管浸透試験における流れの機構は水の表面張力に起因する推進力によるものであって、アウトプット方法やインプット方法とは根本的に相違するが、コンクリートの水密性ならびに耐久性評価のための有力な手法の1つになるものと考えられる。

コンクリートの毛管浸透試験方法は RILEM の暫定

規準³⁾に示されているが、これを解析的に検討した例は全くなく、コンクリート中の毛管流れの挙動や水密性評価のための物性値とその求め方等、未解決の点が多い。

本研究は、コンクリートの毛管浸透試験方法の確立を目的として、水の吸い上がり現象を取り上げ、まず、コンクリート中の毛管流れを解析的に検討し、コンクリートの水密性を評価するための物性値を明らかにするとともに、これらを簡便に求める方法を提示した。

次に、試験方法の詳細を確定するために、供試体の製造方法、供試体における水の浸透高さの測定方法および測定期間、供試体の材令および乾燥度の影響、試験時の環境温度および湿度の影響等につき検討し、標準的な試験方法(案)を提示した。またこの方法によって得られた毛管浸透性および試験値の信頼度を他の透水試験方法の場合と比較して論じている。

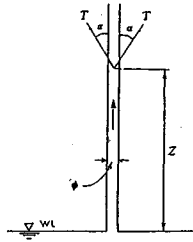
2. コンクリート中の毛管流れの解析と水密性評価のための物性値の求め方

コンクリートが多数の鉛直毛細管から成る多孔体と仮定し、最も一般的な底面からの液体の吸い上がり現象を取り上げる。

毛管浸透流の単純モデルとして、図-1に示す鉛直上向きに立てた1本の毛細管内の一次元流れを考えると鉛

* 正会員 日本大学専任講師 生産工学部土木工学科
(〒275 習志野市泉町1-2-1)

** 正会員 工博 山梨大学教授 工学部土木環境工学科
(〒400 甲府市武田4-3-11)



図—1 鉛直毛細管モデル

直毛細管における浸透流の運動方程式は式 (1) となる。

$$\rho \frac{\pi}{4} \phi^2 Z \frac{d^2 Z}{dt^2} = \pi \phi T \cos \alpha - \pi \phi Z \tau_0 - \rho g \frac{\pi}{4} \phi^2 Z \dots\dots\dots (1)$$

- ここに、 ρ ：液体の密度 (g/cm³)
- g ：重力の加速度 (cm/s²)
- ϕ ：毛細管の内径 (cm)
- Z ：浸透高さ (cm)
- T ：表面張力 (dyne/cm)
- α ：接触角 (rad)
- τ_0 ：壁面抵抗力 (dyne/cm²)

最終浸透高さを Z_e とすれば

$$Z_e = \frac{\pi \phi T \cos \alpha}{\rho g (\pi/4) \phi^2} = \frac{4 T \cos \alpha}{\rho g \phi} \dots\dots\dots (2)$$

壁面抵抗力は、毛管浸透流が層流であるとして、Hagen-Poiseuille の式を適用すれば、式 (3) となる。

$$\tau_0 = \rho g \frac{\phi}{4} I_p = \frac{8 \mu}{\phi} U_m \dots\dots\dots (3)$$

- ここに、 I_p ：動水勾配
- U_m ：管内の平均流速 (cm/s)
- μ ：液体の粘性係数 (poise)

次に、毛管浸透流はゆっくり上昇するから、式 (1) における慣性力項を無視し、式 (2) および (3) を代入すれば、鉛直上向き浸透流の基礎方程式 (4) が得られる。

$$Z_e - \frac{32 \mu}{\rho g \phi^2} Z \frac{dZ}{dt} - Z = 0 \dots\dots\dots (4)$$

また、式 (4) において、 $Z = Z_e/2$ における浸透流の上昇速度を V_0 とすると、

$$V_0 = \left(\frac{dZ}{dt} \right)_{Z=Z_e/2} = \frac{\rho g \phi^2}{32 \mu} \left(\frac{Z_e - Z}{Z} \right)_{Z=Z_e/2} = \frac{\rho g \phi^2}{32 \mu} \dots\dots\dots (5)$$

V_0 を平均浸透速度とよぶ。

次に、コンクリート中の毛細管の総断面積を A' 、コンクリート断面積を A 、空隙率を ϵ とし、Hagen-Poiseuille 式および Darcy 則を利用して毛管流れを多孔体の流れに変換する。

流量 Q は

$$Q = U_m A' = U_m \epsilon A = \frac{\rho g \phi^2}{32 \mu} \epsilon A I_p = K_c A I_p \dots\dots\dots (6)$$

$$K_c = \frac{\epsilon \rho g \phi^2}{32 \mu} = \epsilon V_0 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 K_c ：毛管浸透係数 (cm/s)

式 (2) および式 (7) に示すように、最終浸透高さ Z_e および毛管浸透係数 K_c は液体の密度、粘性係数、表面張力および接触角、多孔体の空隙率等の物理量から構成され、いずれもコンクリートの毛管浸透性を表わす物性値であって従来加圧透過、加圧浸透に対する水密性を表わす物性値として用いられている透水係数や拡散係数に対応するものとして提案するのである。

最終浸透高さ Z_e および毛管浸透係数 K_c はこれを実験的に求めることができるが、一般に 7 日～10 日を要する。そこで式 (7) を用いて式 (4) を書きかえる。

$$Z_e - \frac{\epsilon}{K_c} Z \frac{dZ}{dt} - Z = 0 \dots\dots\dots (8)$$

毛管浸透試験の初期における n 個の浸透高さの測定値を用い、空隙率 ϵ があらかじめ判明しているとして、式 (8) から最終浸透高さ Z_e および毛管浸透係数 K_c を推定することができる。すなわち、吸引開始後の経過時間 t_i における浸透高さの測定値を Z_i とすれば、差分化した浸透速度は、

$$U_i = \left\{ \left(\frac{Z_i - Z_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right) + \left(\frac{Z_{i+1} - Z_i}{t_{i+1} - t_i} \right) \right\} / 2 \dots\dots\dots (9)$$

となり、 $(n-2)$ 組の U_i が得られる。これを式 (8) に代入して、

$$Z_e - \frac{\epsilon}{K_c} Z_i U_i - Z_i = 0 \dots\dots\dots (10)$$

$(n-2)$ 組の連立式に、最小二乗法を適用して最終浸透高さ Z_e および毛管浸透係数 K_c を算定することができる。

3. 毛管浸透試験方法の検討

毛管浸透試験の標準的方法を確立することを目的として、供試体の製造方法、試験装置、浸透高さの測定方法および測定期間、供試体の養生材令および乾燥度、試験時の環境温度および湿度の影響等について実験的に検討した。

(1) 使用材料およびコンクリートの配合

セメントは普通ポルトランドセメントであって、その物理的性質を表—1 に示す。

細、粗骨材はそれぞれ鹿島産陸砂および青梅産碎石 2005 であり、これらの物理的性質を表—2 に示す。

混和剤はリグニンスルホン酸塩とポリオール複合体を主成分とする AE 減水剤である。

実験に用いたコンクリートおよびモルタルの配合は表

表—1 セメントの物理的性質

| 種 類 | 比 重 | 粉 度 度 (cm^2/g) | 凝 結 試 験 | | | 安 定 性 |
|--------------|------|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------|
| | | | 水 環 (h-m) | 始 凝 (h-m) | 凝 結 (h-m) | |
| 普通ポルトランドセメント | 3.16 | 3230 | 27.8 | 2-28 | 3-31 | 良 |

| フロー | 曲 げ 強 さ (kgf/cm^2) | | | 圧 縮 強 さ (kgf/cm^2) | | |
|-----|---|----|-----|---|-----|-----|
| | 3日 | 7日 | 28日 | 3日 | 7日 | 28日 |
| 250 | 35 | 48 | 72 | 138 | 234 | 412 |

表—2 骨材の物理的性質

| 骨 材 種 別 | 比 重 | 吸 水 率 (%) | 単 位 容 積 質 量 (kg/m^3) | 実 積 率 (%) | 粗 粒 率 |
|---------|------|--------------|---|--------------|-------|
| 細骨材 | 2.58 | 2.25 | 1770 | 69.5 | 2.64 |
| 粗骨材 | 2.66 | 0.89 | 1600 | 60.7 | 6.72 |

表—3 コンクリートの配合

| コンクリートの種類 | S/L (cm) | 空気量 (%) | W/C (%) | S/a (%) | 単 位 量 (kg/m^3) | | | | | |
|-----------|-------------|------------|------------|------------|----------------------------------|-----|-----|------|-------|---|
| | | | | | W | C | S | G | a | d |
| プレーン | 8 | — | 4.0 | 42.8 | 189 | 423 | 765 | 1050 | — | — |
| | | | 5.0 | 44.8 | 188 | 338 | 833 | 1053 | | |
| | | | 5.3 | 45.4 | 189 | 319 | 815 | 1049 | | |
| | | | 6.0 | 46.8 | 189 | 282 | 852 | 1041 | | |
| AE | 4 | 4 | 4.0 | 41.3 | 144 | 380 | 765 | 1116 | 0.800 | |
| | | | 5.0 | 43.3 | 144 | 388 | 829 | 1113 | 0.720 | |
| | | | 6.0 | 45.3 | 144 | 240 | 885 | 1087 | 0.800 | |
| | | | 8.0 | 48.1 | 186 | 208 | 924 | 1009 | 0.520 | |

表—4 モルタルの配合

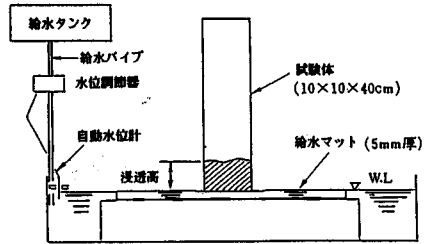
| W/C (%) | S/C | S/L (cm) | 単 位 量 (kg/m^3) | | |
|------------|-----|-------------|----------------------------------|-----|------|
| | | | W | C | S |
| 4.0 | 2.5 | 8 | 236 | 580 | 1478 |
| 5.0 | 3.4 | | 233 | 496 | 1585 |
| 6.0 | 4.3 | | 233 | 387 | 1668 |
| 7.0 | 5.0 | | 244 | 348 | 1740 |
| 8.0 | 5.6 | | 264 | 330 | 1851 |

—3および表—4に示すとおりであって、コンクリートは粗骨材の最大寸法20mm、水セメント比を40, 50, 53, 60および80%とし、スランプ8cmとしたプレーンコンクリートおよび空気量を4%としたAEコンクリートである。モルタルは水セメント比およびスランプを上記と同様にしたプレーンモルタルである。

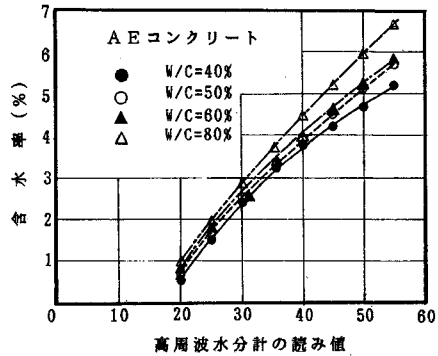
(2) 供試体の製造および養生

供試体の形状および寸法は、高周波水分計によって、浸透高さの測定が確実に行えるよう、 $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の縦打ち角柱形とした。供試体はコンクリートを3層に分けて詰め、各層をJIS A 1132に準じ、15回突き固めて製造した。

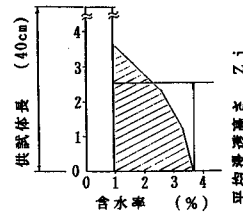
供試体は材令1日で脱型し、養生材令および乾燥度の影響を検討した場合を除いて、一般に材令7日まで $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中で養生した後、温度 $45 \pm 1^\circ\text{C}$ 、湿度約35%で14日間乾燥し、試験に供した。これは、14日以内



図—2 試験状況



図—3 高周波水分計の校正曲線



図—4 浸透高さおよび含水率の関係

の乾燥により供試体は定重量となることを確かめたからである。

(3) 試験装置

毛管浸透試験は、恒温恒湿機内に図—2に示す自動水位計を装着したステンレス製の水槽を設置し、水面に一致させた棚上に吸水マットを敷き、その上に供試体を鉛直に立てて行った。

(4) 浸透高さの測定方法

供試体への水の浸透は供試体製造時の底面からとし、浸透開始後3, 6, 9, 24, 30, 48時間および以後24時間間隔で浸透高さおよび浸透量(供試体の質量増加量)が一定となるまで測定した。

浸透高さの測定には水の誘電率を利用した高周波水分計を用いた。この水分計は測定深度3cm、含水率測定範囲0~10%、精度 $\pm 0.2\%$ の性能を有するものである。含水率と高周波水分計の誘電率の指数はコンクリートの配合によって相異し、両者の関係の一例は図—3のとおり

りである。

供試体の水の浸透部における含水率は図-4に示すように一様ではなく、一般に、供試体の下端近傍で最大値を示し、上方に行くに従い次第に減少した。これはコンクリートを構成する毛細管組織が一様でなく、毛細管の径や形状により、浸透高さが相違することによるものと思われる。しかし、解析的には一様な毛細管組織と仮定しているので、なるべく実験と理論との整合性が得られるよう供試体の下端における含水率をもつ様な仮想浸透高さを求め、これを平均浸透高さ Z_i とよび、浸透高さの測定値の基本とした。

ただし、浸透高さの最高値も腐食液の浸透などに対する耐久性評価のための実用上重要な基礎資料を与えるから、平均浸透高さとの関係を検討した。実験には水セメント比40~80%のプレーンおよびAEコンクリートを用いた。その結果、図-5に示すように、(浸透高さの最高値)/(平均浸透高さ)は浸透初期においてはばらつきがあるが、浸透時間48時間以後においては、いずれのコンクリートともほぼ一定の関係となることが認められた。たとえば、浸透時間48時間の場合1.70~2.00平均1.80、浸透時間7日では、1.70~1.97、平均1.85であって、平均浸透高さから最高値をおよそ推定することができる。

次に平均浸透高さおよび浸透量の経時変化を図-6に示す。実験に用いたコンクリートの配合は表-3に示す水セメント比40~80%のプレーンおよびAEコンクリートである。

図-6において、浸透時間の経過に伴う平均浸透高さ Z_i と浸透量 W_i の増加状況は大体同様な傾向を示しているので、測定が簡単な浸透量から、浸透高さの推定が可能かどうかを検討した。推定式として次式を用いた。

$$Z_{ic} = W_i / \epsilon A$$

ここに、 Z_{ic} ：平均浸透高さの計算値 (cm)

W_i ：浸透量 (cm³)

ϵ ：試験開始時の供試体の空隙率

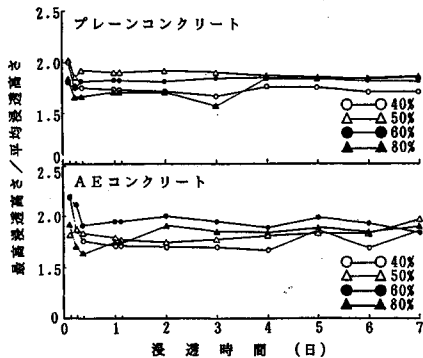


図-5 経過時間と最高浸透高さ/平均浸透高さの関係

A：供試体の断面積 (cm²)

水分計で測定した平均浸透高さ Z_i と浸透量 W_i より算出した浸透高さの計算値 Z_{ic} との比を表-5に示す。

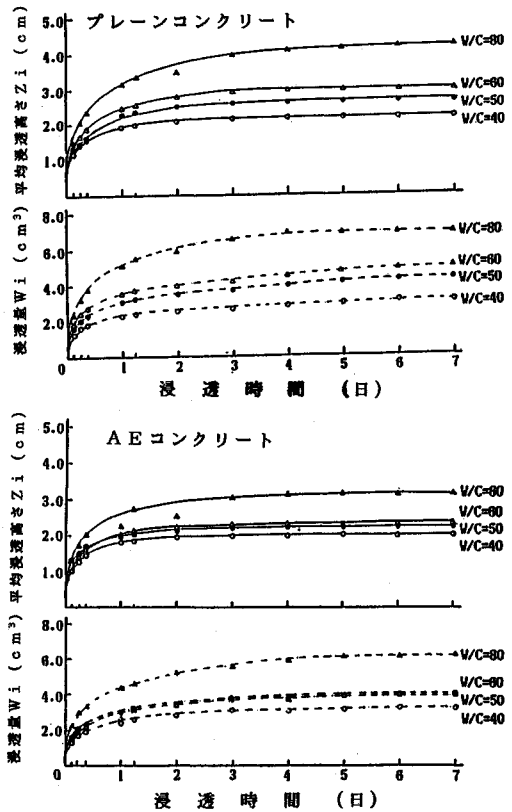


図-6 平均浸透高さおよび浸透量の経時変化

表-5 平均浸透高さの計算値と実測値との関係

| 平均浸透高さの計算値と実測値との比 (Z_{ic}/Z_i) | | | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 種類 | プレーンコンクリート | | | | AEコンクリート | | | | |
| | w/c (%) | 40 | 50 | 60 | 80 | 40 | 50 | 60 | 80 |
| ϵ (%) | 5.59 | 7.42 | 8.44 | 11.6 | 6.17 | 7.36 | 8.65 | 11.1 | |
| 浸透時間 | 3時間 | 2.02 (2.08) | 1.91 (1.77) | 1.69 (1.68) | 1.35 (1.32) | 1.68 (2.06) | 1.63 (1.59) | 1.51 (1.57) | 1.36 (1.49) |
| | 6時間 | 1.92 (1.63) | 1.89 (1.64) | 1.76 (1.54) | 1.37 (1.22) | 1.85 (1.84) | 1.90 (1.72) | 1.37 (1.41) | 1.44 (1.41) |
| | 9時間 | 2.03 (1.58) | 1.97 (1.67) | 1.63 (1.54) | 1.37 (1.28) | 1.95 (1.83) | 1.83 (1.66) | 1.53 (1.41) | 1.55 (1.38) |
| | 24時間 | 2.03 (1.49) | 2.01 (1.50) | 1.73 (1.41) | 1.39 (1.22) | 2.15 (1.69) | 2.05 (1.69) | 1.40 (1.20) | 1.72 (1.50) |
| | 48時間 | 2.17 (1.40) | 2.07 (1.42) | 1.74 (1.36) | 1.33 (1.18) | 2.49 (1.75) | 2.28 (1.69) | 1.81 (1.43) | 1.42 (1.56) |
| | 4日 | 2.45 (1.28) | 2.33 (1.37) | 1.90 (1.31) | 1.51 (1.18) | 2.66 (1.84) | 2.53 (1.59) | 1.92 (1.25) | 1.81 (1.37) |
| 6日 | 2.89 (1.17) | 2.43 (1.32) | 2.16 (1.31) | 1.40 (1.05) | 2.85 (1.60) | 2.58 (1.55) | 2.14 (1.21) | 1.83 (1.28) | |

注) () 内の値は供試体へ浸透した環境湿分を除いて算出した浸透高さとの比

表一5の上欄は、試験開始時の供試体重量に対する各経過時間における重量の増加量から計算した Z_{ic}/Z_i の値であって、1.3~3.0と相当に大となっている。検討の結果、この主要因は浸透試験中に供試体が環境湿分を吸収することによることが明らかとなったので、同時に作成したダムー供試体により試験時の湿分の吸収量を補正した。その結果が表一5の下欄であって、平均浸透高さの計算値 Z_{ic} と実測値 Z_i との差は縮小し、浸透時間24時間以後の Z_{ic}/Z_i は1.1~1.8、平均1.4となっている。しかし、計算値と実測値との間になお、最大約80%の差があり、そのうえこの差は配合条件等による特別な傾向は認められない。これは主としてコンクリートの空隙機構が複雑なため、浸透量の測定値から浸透高さを推定することは実際上困難であって、水分計によって浸透高さを直接測定することが必要である。

(5) 浸透高さの測定期間

図一6に示すように、最終浸透高さを実験により確認するためには、試料の水セメント比により、7~10日間以上と相当に長時日を要する。

表一6 初期測定期間と算定した最終浸透高さおよび毛管浸透係数の関係

| | コンクリートの種類 | 水セメント比 (%) | 浸透時間 Ze | | | | 実測値 He |
|-------------------------------------|-----------------|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | 24h | 30h | 48h | 72h | |
| 最終浸透高さ Ze (cm) | プレコンクリート | 40 | 1.55 (0.75) | 1.87 (0.90) | 1.93 (0.93) | 1.98 (0.98) | 2.07 (1.00) |
| | | 50 | 2.20 (0.94) | 2.33 (0.88) | 2.73 (1.04) | 2.73 (1.04) | 2.62 (1.00) |
| | | 60 | 2.50 (0.84) | 2.56 (0.86) | 2.89 (0.97) | 2.96 (0.99) | 2.88 (1.00) |
| | | 80 | 5.03 (1.19) | 3.37 (0.80) | 4.01 (0.95) | 4.14 (0.98) | 4.23 (1.00) |
| | Aコンクリート Eコンクリート | 40 | 1.65 (0.78) | 1.87 (0.89) | 1.97 (0.94) | 2.00 (0.96) | 2.09 (1.00) |
| | | 50 | 1.93 (0.84) | 2.04 (0.89) | 2.17 (0.95) | 2.19 (0.96) | 2.29 (1.00) |
| | | 60 | 1.96 (0.82) | 2.17 (0.90) | 2.30 (0.96) | 2.33 (0.97) | 2.41 (1.00) |
| | | 80 | 2.62 (0.82) | 2.73 (0.86) | 2.78 (0.87) | 2.89 (0.91) | 3.19 (1.00) |
| ()内の平均値 | | | 0.87 | 0.87 | 0.95 | 0.97 | 1.00 |
| 毛管浸透係数 Kc x 10 ⁻⁶ (cm/s) | プレコンクリート | 40 | 3.98 (2.58) | 1.96 (1.27) | 1.77 (1.15) | 1.66 (1.08) | 1.54 (1.00) |
| | | 50 | 1.82 (1.00) | 1.25 (0.69) | 1.79 (0.98) | 1.81 (0.96) | 1.82 (1.00) |
| | | 60 | 4.55 (1.71) | 2.94 (1.11) | 2.96 (1.11) | 2.79 (1.05) | 2.66 (1.00) |
| | | 80 | 3.46 (0.84) | 3.23 (0.79) | 4.75 (1.16) | 4.38 (1.07) | 4.10 (1.00) |
| | Aコンクリート Eコンクリート | 40 | 5.24 (2.38) | 2.53 (1.15) | 2.50 (1.14) | 2.35 (1.07) | 2.20 (1.00) |
| | | 50 | 5.38 (2.06) | 3.04 (1.16) | 3.05 (1.17) | 2.93 (1.12) | 2.81 (1.00) |
| | | 60 | 6.34 (1.99) | 3.61 (1.13) | 3.47 (1.09) | 3.37 (1.06) | 3.19 (1.00) |
| | | 80 | 8.09 (1.79) | 6.39 (1.42) | 5.08 (1.13) | 4.52 (1.06) | 4.51 (1.00) |
| ()内の平均値 | | | 1.79 | 1.09 | 1.12 | 1.06 | 1.00 |

注1) Ze欄の()の値は Z_e/H_e
 注2) Kc欄の()の値は浸透時間7日間より算出したKcとの比

2.において、浸透高さの初期の測定値から式(10)を用いて最終浸透高さ Z_e および毛管浸透係数 K_c を算出する方法について述べた。そこで初期の測定値から算出した最終浸透高さ Z_e とその実測値 H_e とを比較し、両者が実用上差異がないと認められる初期測定期間について検討した。すなわち、初期の測定期間を試験開始後24, 30, 48および72時間として算定した最終浸透高さの推定値と実測値との比 Z_e/H_e を求め、所要の測定期間を決定した。

表一3に示す水セメント比40~80%のプレーンおよびAEコンクリートについて、求めた Z_e/H_e を表一6に示す。

表一6によれば、 Z_e/H_e は測定期間を24時間とした場合0.75~1.19、平均0.87、30時間とした場合0.80~0.90、平均0.87、48時間とした場合0.87~1.04、平均0.95および72時間とした場合0.91~1.04、平均0.97となっている。また毛管浸透係数の値は測定期間を7日間として算出した値に比して、24時間とした場合、平均1.79、30時間とした場合、平均1.09、48時間とした場合、平均1.12および72時間とした場合平均1.06となり、ばらつきも測定期間が48時間以上であれば小なることが認められた。

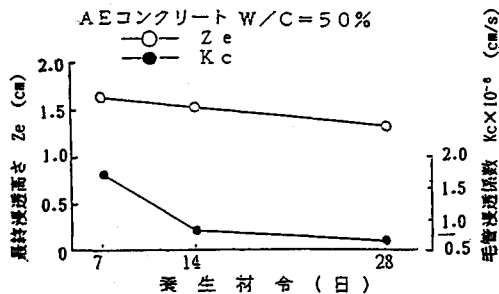
以上のことは初期における浸透高さの測定期間を48時間または72時間とすれば実用上満足に最終浸透高さおよび毛管浸透係数を算定できることを示している。

(6) 養生材令の影響

供試体の水中養生期間を材令7日、14日および28日までとして、養生材令が最終浸透高さおよび毛管浸透係数に及ぼす影響を検討した。供試体の乾燥条件はいずれも45°C、14日間である。

実験に用いたコンクリートは表一3に示す水セメント比50%のプレーンコンクリートであって、実験結果は図一7に示すとおりである。

図一7において、最終浸透高さおよび毛管浸透係数は材令とともに減少した。すなわち、養生材令14日および28日における最終浸透高さは7日の場合の約90%



図一7 養生材令が最終浸透高さおよび毛管浸透係数に及ぼす影響

および80%，また、毛管浸透係数は45%および40%であって、材令に伴う毛管浸透性の改善は、セメントの水和の進行によるもので透水係数および拡散係数と材令との関係に対して従来認められている傾向と同様であった²⁾。

(7) 供試体の乾燥度の影響

毛管浸透作用は、気液の界面に生じる表面張力に起因するから、コンクリートの毛管浸透性はその乾燥度（表乾質量-気乾質量/容積）に大きく影響されると考えられる。これを確かめるために材令7日まで水中養生した供試体を20°Cで3か月間、45°Cで14日間および110°Cで5日間ほぼ定重量となるまで乾燥し、試験に供した。実験に用いたコンクリートは表-3に示す水セメント比53%のブレンコンクリートであり、乾燥後の乾燥度は乾燥温度を20°C、45°Cおよび110°Cとした場合、それぞれ4.8%、7.4%および13.3%であった。

毛管浸透試験結果を乾燥度との関係で示せば図-8のとおりである。すなわち、供試体の乾燥度が増すほど予期したように最終浸透高さは大幅に増大し、たとえば、乾燥度約5%の場合の最終浸透高さに比べ、乾燥度を約7.5%および13%とした場合はそれぞれ1.5倍および4.5倍程度に達した。これに対し、毛管浸透係数は同品質のコンクリートであれば乾燥度にかかわらず、ほぼ一定値となることが示され、コンクリートの毛管浸透性を表わす基本物性値であることを示している。

これらの実験において乾燥温度20°Cの場合は定重量となるまでに長時日を要するばかりでなく、最終浸透高さの値が比較的小さく試験誤差が大となりやすいこと、また、乾燥温度を110°Cとした場合は供試体にひびわれの発生するおそれがあること等を考慮してRILEM規準の規格試験方法でも提案しているように供試体の乾燥条件は温度45°Cで14日間を標準とするのがよい。

(8) 試験時の環境温度および湿度の影響

試験時の環境として湿度を65%に一定とし、温度を10、20および30°Cに変化させた場合と、温度を20°C一定とし、湿度を50および65%とした場合の二通りとし、試験時の環境条件が毛管浸透試験結果に及ぼす影

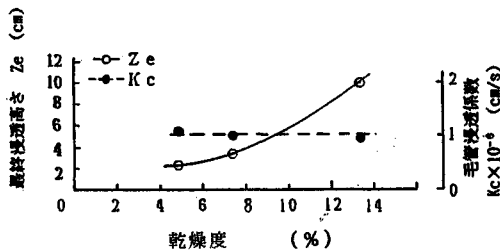


図-8 供試体の乾燥度が最終浸透高さおよび毛管浸透係数に及ぼす影響

響を検討した。この実験はモルタル試料について行い、配合は表-4に示す水セメント比40~80%のブレンモルタルである。

試験結果を図-9および図-10に示す。

図-9において最終浸透高さは試験時の環境温度によって変化していない。これに対し、毛管浸透係数は環

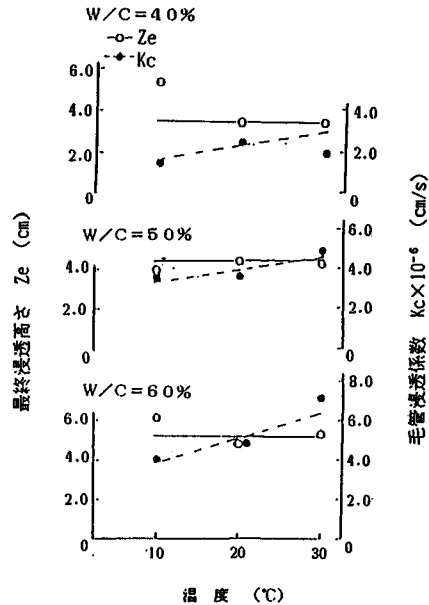


図-9 試験環境温度が最終浸透高さおよび毛管浸透係数に及ぼす影響

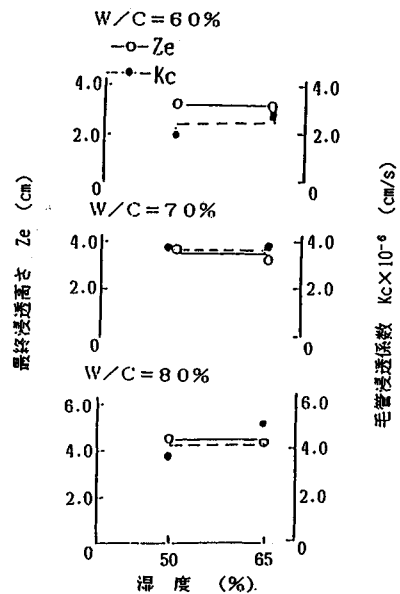


図-10 試験環境湿度が最終浸透高さおよび毛管浸透係数に及ぼす影響

境温度が高温になるに従い、若干大となっている。これは最終浸透高さに影響する要因である水の密度および表面張力は温度による変化がごく小さいのに対し、毛管浸透係数は理論上は水の粘性係数に反比例し、水の粘性係数は温度によって変化することによると思われる。

次に、図—10に示すように環境湿度50~65%の範囲では、最終浸透高さおよび毛管浸透係数に差異は認められなかった。ただし、80%程度以上の高湿度では供試体の吸湿により水の浸透部を水分計によって明確に測定することが困難となる。したがって、試験時の標準的な環境として、温度20°C、湿度はあまり厳格に制限する必要はなく、50~70%程度が適当と考えられる。

(9) コンクリートの毛管浸透試験方法の提案

以上の試験結果からコンクリートの毛管浸透試験の標準的な手順を次のように提案することができる。

- ① 供試体は10×10×40 cmの角柱とし JIS A 1132 に準じて作製する。
- ② 供試体の養生は材令7日まで20°Cの水中とし以後14日間45°Cで乾燥し、試験に供する。
- ③ 温度20°C、湿度50~70%の恒温室内に設置した水槽の水面上に吸水マットを介して、打ち込んだときの底面を下にして供試体を鉛直に立てる。
- ④ 浸透開始後3, 6, 9, 24, 30および48時間において、高周波水分計を用いて水の浸透高さを測定し、平均浸透高さを求める。
- ⑤ 式(10)に試験値を代入し最小二乗法を適用して、最終浸透高さ Z_0 および毛管浸透係数 K_c を計算する。

4. 他の透水試験方法との比較

従来、コンクリートの透水試験方法として各種の方法が提案されているが、このうちコンクリート中の水の流れの機構が解析的に明らかにされているアウトプット方法およびインプット方法の一種である浸透深さ方法を取り上げ、試料コンクリートの配合条件の影響や試験値のばらつきについて毛管浸透試験方法と比較検討した。

実験に用いたコンクリートは表—3に示す水セメント比40~80%のプレーンコンクリートであって、供試体は材令7日まで20°Cの水中で養生した後、45°Cで14日間乾燥し、各試験に供した。

(1) 透水試験方法

a) 毛管浸透方法

3.(9)に示したとおりである。

b) アウトプット方法

φ2 cmの、中心孔をもつφ15×30 cmの中空円筒形供試体の外側に試料コンクリートの配合に応じて5~25 kgf/cm²の水圧を加え、中心孔より流出する流出量がほ

ぼ一定となるまで試験を継続し、平均流出量を用い、次式から透水係数を算出した。

$$K = \frac{\omega_0 \ln(r_0/r_i) Q}{2 \pi h P_0}$$

ここに、 K ：透水係数 (cm/s)

ω_0 ：水の単位重量 (gf/cm³)

Q ：流出量 (cm³/s)

P_0 ：供試体の外側における水圧 (gf/cm²)

r_0 ：供試体の半径 (cm)

r_i ：供試体の中心孔の半径 (cm)

c) 浸透深さ方法

φ15×15 cmの供試体の一端面(打ち込み時の底面)に試料コンクリートの配合に応じて、2 kgf/cm²ないし10 kgf/cm²の水圧を24時間ないし、48時間加えた後、供試体を直径方向に割裂し、水の平均浸透深さを測定し、次式を用いて拡散係数を算出した。

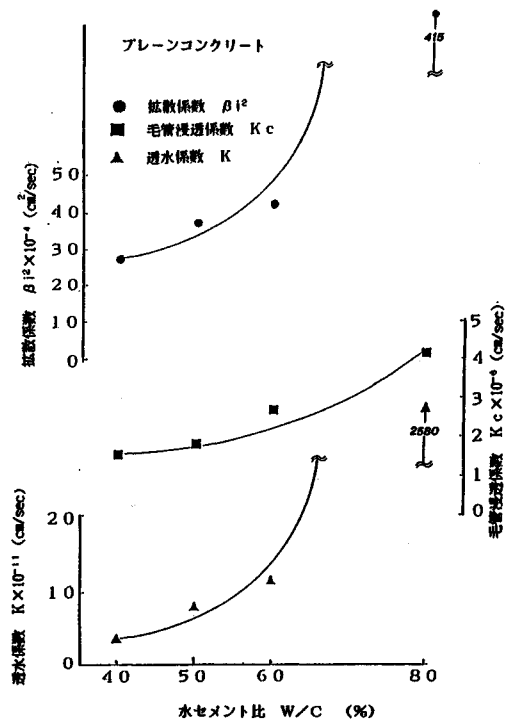
$$\beta_i^2 = \alpha \frac{D_m^2}{4 t \xi^2}$$

ここに、 β_i^2 ：コンクリート中の水の拡散係数 (cm²/s)

D_m ：平均浸透深さ (cm)

t ：水圧を加えた時間 (s)

α ：試験時間 t に関する係数で、 $t=24$ 時間の場合 $\alpha=130.5$ 、 $t=48$ 時間の場合 $\alpha=175.7$



図—11 他の透水係数との比較

表一七 水セメント比と透水係数、拡散係数および毛管浸透係数との関係

| 水セメント比 W/C (%) | 毛管浸透法 | | | | アウトプット法 | | インプット法 | |
|----------------------|----------------------|-------------|---|-------------|---------------------------------------|-------------|---|-------------|
| | 最終浸透高さ Ze (cm) | 変動係数 (%) | 毛管浸透係数 Kc×10 ⁻⁶ (cm/s) | 変動係数 (%) | 透水係数 K×10 ⁻¹¹ (cm/s) | 変動係数 (%) | 拡散係数 βi×10 ⁻⁴ (cm ² /s) | 変動係数 (%) |
| 40 | 1.80 | 6.8 | 1.77 | 3.2 | 3.21 | 25.2 | 25.0 | 20.4 |
| | 1.98 1.93 | | 1.72 1.77 | | 2.57 3.34 | | 22.4 27.8 | |
| | 1.85 (1.00) | | 1.85 (1.00) | | 4.54 (1.00) | | 28.3 (1.00) | |
| | 2.09 | | 1.74 | | 3.05 | | 35.5 | |
| 50 | 2.65 | 6.0 | 1.75 | 5.5 | 7.93 | 26.5 | 32.7 | 13.5 |
| | 2.68 2.73 | | 1.84 1.79 | | 7.01 7.65 | | 42.4 36.9 | |
| | 2.79 (1.41) | | 1.95 (1.01) | | 10.26 (2.29) | | 39.8 (1.33) | |
| | 2.80 | | 1.74 | | 5.40 | | 32.7 | |
| 60 | 2.75 | 3.5 | 2.90 | 3.2 | 10.80 | 20.0 | 47.5 | 13.5 |
| | 2.90 2.89 | | 2.87 2.96 | | 11.92 11.4 | | 37.6 43.8 | |
| | 2.92 (1.50) | | 2.99 (1.67) | | 14.18 (3.41) | | 50.0 (1.58) | |
| | 2.99 | | 3.08 | | 8.70 | | 40.0 | |
| 80 | 3.90 | 3.9 | 4.99 | 5.7 | 2560 | 18.2 | 384 | 17.6 |
| | 4.15 4.01 | | 4.95 4.75 | | 2260 2580 | | 408 415 | |
| | 3.85 (2.08) | | 4.65 (2.68) | | 3250 (772) | | 518 (14.9) | |
| | 4.14 | | 4.41 | | 2250 | | 349 | |

ξ: 水圧 P_0 に関する係数で $P=2 \text{ kgf/cm}^2$ の場合 $\xi=0.488$, $P=10 \text{ kgf/cm}^2$ の場合 $\xi=1.163$

(2) 実験結果および考察

実験結果を表一七および図一11に示す。これらの表および図において各透水試験方法による試験値は水セメント比が大となるほど大となり、大体同様な傾向を示している。しかし、曲線の傾きは若干相違するのであって、たとえば、水セメント比40%の場合の試験値に対し、水セメント比80%の試験値の比率は透水係数の場合約770倍、拡散係数の場合約15倍毛管浸透係数の場合約3倍となっているが、もともとこれらの試験方法における水の流れの機構が相違するので、図一11の各曲線の傾きなどにある程度の差異が生ずる。

アウトプット方法の場合は圧力勾配を伴う定常的な透過流であって、透水係数は単位圧力勾配のもとにおけるコンクリート中の透過流の速度を表わすものであり、浸透深さ方法の場合は大きい圧力勾配のもとで水およびコンクリートの実体部が弾性変形を起こし孔隙内に圧力水が次第に蓄積され供試体内の水圧の時間的および場所的変化の関係が拡散型の方程式で表現される浸透流である。

これに対し、毛管浸透試験の場合は水セメント比が大となるほど浸透高さが大となる。したがって、水柱の全重量が増すので吸引速度が緩和される。

次に、表一七に示すように、透水係数および拡散係数の試験値の変動係数は、それぞれ18.2~25.2% 平均22.5% および13.5~20.4%、平均16.3%であるのに対し、最終浸透高さおよび毛管浸透係数の場合は、それぞれ3.5~6.8%、平均5.1% および3.2~5.7%、平

均4.4%とかなり小さい。

以上のように各透水試験方法はそれぞれ特徴を有するから、構造物における透水現象に合致した方法を選定することが大切である。

毛管浸透試験方法は、真水、塩水、浸食液等の自然浸透に対する鉄筋コンクリートの耐久性設計のための重要な基礎資料を提供するものである。また、試験誤差が小さく、材料、配合条件とコンクリートの水密性との一般的な関係を簡易に試験できるきわめて有利な方法といえることができる。

5. 結 論

コンクリートの毛管浸透試験方法の確立を目的として行ったこの研究の範囲内で、得られた主要な成果を要約すれば以下のとおりである。

(1) コンクリートにおける鉛直毛管浸透流を解析的に検討した結果、最終浸透高さ Z_e および毛管浸透係数 K_c がコンクリートの水密性評価のための有用な物性値であることを明らかにし、これらの値を試験開始後48~72時間以内の測定値から満足に推定する方法を提案した。

(2) コンクリートの毛管浸透試験結果に影響する要因として、供試体の養生条件、試験時の環境温度、湿度について検討した結果

① 水中養生期間を材令14日および28日とした場合の毛管浸透係数は7日とした場合のそれぞれ約45% および約40% となり、透水係数および拡散係数と材令との関係に対して従来認められている傾向と同様であった。

② 試験前の供試体の乾燥度は最終浸透高さに大きく

影響し、材令7日まで水中養生した後、45°C、14日および110°C、5日間乾燥した場合の最終浸透高さは20°C、3か月乾燥した場合の約1.5倍および4.5倍となった。これに対し、毛管浸透係数は乾燥度にかかわらず一定であった。

- ③ 試験時の環境温度が10~30°Cの範囲では最終浸透高さにほとんど影響しないが水の粘性係数に密接に関連する毛管浸透係数は高温ほど若干増加した。

(3) 毛管浸透試験の手順、装置等について行った検討の結果、ならびに(2)に述べた実験結果等を参考にしてコンクリートの毛管浸透試験の標準的な方法を次のように提案した。

- ① 供試体は10×10×40 cmの角柱形とし、材令7日まで20°C水中で養生した後、45°Cで14日間乾燥する。
- ② 供試体の底面を下にして水面上に吸水マットを介して鉛直に立て、水の吸引を開始する。試験時の環境温度は20°C、湿度は50~70%の範囲とする。
- ③ 吸引開始後3、6、9、24、30および48時間を経て、高周波水分計を用いて平均浸透高さを測定し、式(10)を用いて最終浸透高さおよび毛管浸透係数を算定する。

(4) 毛管浸透試験結果と既往のアウトプット方法および浸透深さ方法による試験結果とを比較して検討した結果、元来、各透水試験方法におけるコンクリート中の水の流れの機構が異なるので、細部は相違するが材料、配合、養生条件等とコンクリートの水密性との関係の一

般的傾向は大体同様であった。また、透水係数および拡散係数の試験値の変動係数は今回の試験結果でも平均、約15~20%と、従来一般にいわれているように比較的大きい²⁾が毛管浸透試験による最終浸透高さおよび毛管浸透係数の場合は平均、約4~5%とかなり小さい。

したがって、毛管浸透試験方法はコンクリートの水密性を簡易に試験できる有力な方法になり得るものと考えられる。

謝 辞：本研究は東京都立大学名誉教授 村田二郎先生のご指導により行ったもので、ここに記して深甚なる感謝の意を表します。また、本研究遂行にご尽力、ご助言頂いた、本学 伊藤義也氏、大学院生 秋本 功氏(現・浦安市)、山岸 宏氏(現・日本舗道(株))ならびに山梨大学 宮沢直季氏、伊藤 強氏に深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 村田二郎：中空円筒形供試体を用いるコンクリートの透水試験方法，土木学会論文集，第63号，pp.1~7，1959.
- 2) 土木学会：コンクリートの水密性の研究，コンクリートライブラリー，第7号，1963.
- 3) RILEM Recommendation CPC 11.2：Absorption of Water by Capillarity，1977.
- 4) 井伊谷綱一：粉体工学ハンドブック，朝倉書店，1965.
- 5) 近藤連一 編：多孔材料，技報堂出版，1973.

(1990.7.13・受付)