

論文 水和反応生成を伴うコンクリート中の水分移動モデルの構築に関する研究

内田 真就*1・茂木 淳*2・大下 英吉*3

要旨: 従来, コンクリート中の水分移動は単にバルク水としての移動の評価に留まっているが, コンクリート構造物の詳細な耐久性評価を行うに際しては, ひび割れ表面或いは細孔壁面に存在する未水和セメントとの水和反応を伴う水分移動モデルの構築が重要となる。本研究は, 水和反応生成を伴う水分移動モデルの構築を行うとともに, その定性的な評価を実施した。その結果, 最終的に水和反応生成過程の定量化が透水係数という1つの指標により表現することが可能となった。

キーワード: 水分移動, 水和反応度, 細孔空隙径, 透水係数

1. はじめに

今日, 様々な社会基盤となる構造物があるが, その主要な構造材料はセメント系材料である。そもそもセメント系材料には, 安価であり, いかなる形状にも適用できるという利点の反面, 必ずひび割れが発生するという欠点も存在する。

一般に, コンクリートは多孔質透水性材料であり, 長い年月が経過するとひび割れやマイクロ空隙内部に外部から有害物質が浸透することにより耐久性に大きな影響を及ぼす。すなわち, コンクリート構造物の耐久性評価或いは維持・管理を行う際, コンクリート中の微細構造組織やひび割れ内部における各種有害物質の移動性状が非常に重要な要因となるわけである。従来, 物質移動特性, 特に水分移動特性に関しては, バルク水としての移動のみの評価に留まっているが, 新たな維持補修方法の確立に際しては, 細孔表面或いはひび割れ表面に存在している未水和セメントとの水和反応生成を伴う水分移動モデルの構築が不可欠となってくる。このことはすなわち, 膨張セメントのようなケミカルプレストレス等を有するコンクリート構造物のひび割れ再生過程或いは, ひび割れ表面にセメン

トを塗布した状態において水分を外部から流入させることによるひび割れ再生過程に対しては, 表現可能なモデルの開発が重要となるわけである。

本研究では, コンクリート内部の細孔表面或いはひび割れ表面に存在している未水和セメントと水の水和反応を伴う水分移動モデルの構築を目的として, セメントと水の水和反応度と材齢, 水和反応度と細孔組織の変化を関連付け, 最終的に水和反応度を定量的に表現する指標として透水係数の変化を求めた。そして, 構築した解析モデルに基づいた数値シミュレーションを実施することにより, コンクリート供試体内部の流速および漏水性状を求めた。

2. 本研究での水和反応を伴うコンクリート中の水和反応度・細孔空隙径・透水係数の定義

2.1 水和反応生成を伴う水分移動モデル構築までの流れ

水和反応生成を伴う水分移動モデル構築までの概要をフローチャートとして図—1に示す。一般に, セメントと水の水和反応は, 材齢 28

*1 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

*2 中央大学 理工学部土木工学科 (正会員)

*3 中央大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)

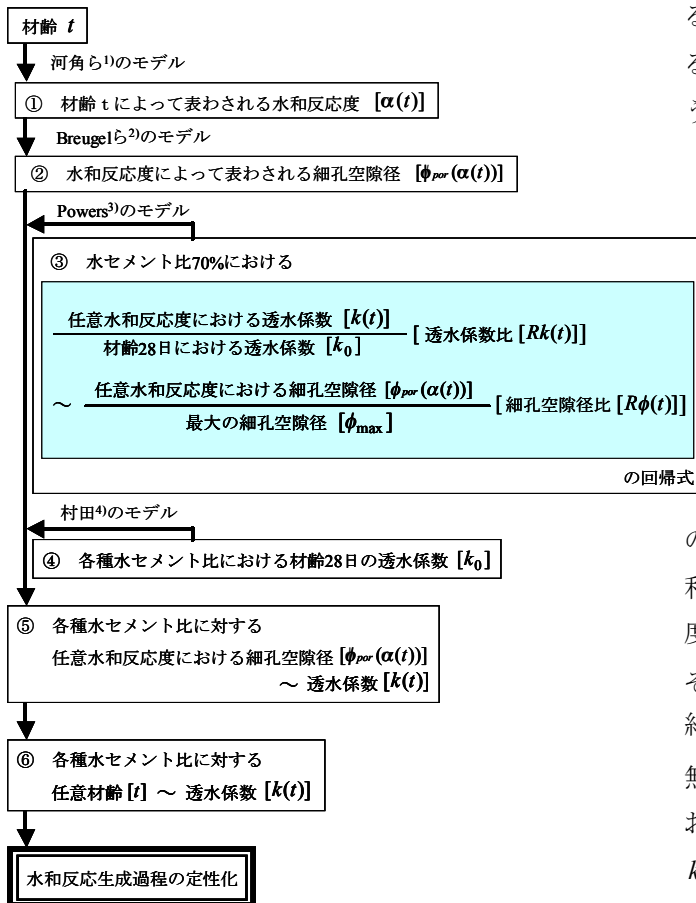


図-1 水分移動モデルの流れ

日の時点においてその反応度は約 1.0 になるが、本研究では、ひび割れ表面に存在する水和セメントの水分移動によるコンクリート部材外部への流出やひび割れ表面に堆積された各種の未反応微粉末等が水和反応を遅延させるもとと仮定して、材齢 500 日の時点において水和反応度が 1.0 となるように仮定した。

(1) 水和反応度と材齢

水和反応進行過程におけるセメント重量の変化を表わす河角ら¹⁾のモデルを基に、図-2で示すように水和速度を未水和水内のセメント重量に依存すると仮定することによって、セメントの水和反応度を材齢の関数として表わす。

(2) 細孔空隙径と水和反応度

水和反応度に依存する細孔組織の変化は、k. van Breugel²⁾のモデルによって細孔空隙径の変化として表わすことにする。すなわち、W/Cの違いを考慮に入れ、任意の水和反応度を用い

ることによって細孔空隙径を表わすことができる。ここで、細孔空隙径は、細孔空隙径分布のうち最も多く存在する細孔径である。

(3) 任意反応度における透水係数比と

細孔空隙径比 (W/C70%)

水和反応度によるセメントペースト組織の緻密さの程度を表わす指標として透水係数を定義する。仮に、材齢 28 日の時点で水和反応度が 100%と仮定すると、任意材齢における透水係数は、Powers³⁾のモデルで表現することができる。すなわち、Powers³⁾

のモデルに対して、上記①で算出した材齢～水和反応度の関係を適用することにより任意反応度における透水係数 $k(\alpha(t))$ が求まることになる。そして、上記②で算出した任意反応度における細孔空隙径 $\phi_{por}(\alpha(t))$ を最大細孔空隙径 ϕ_{max} で無次元化した細孔空隙径比と任意水和反応度における透水係数 $k(\alpha(t))$ を材齢 28 日の透水係数 k_0 で無次元化した透水係数比との関係を定義付けることができる。ここで、Powers³⁾のモデルは W/C70%に対するものであるため透水係数

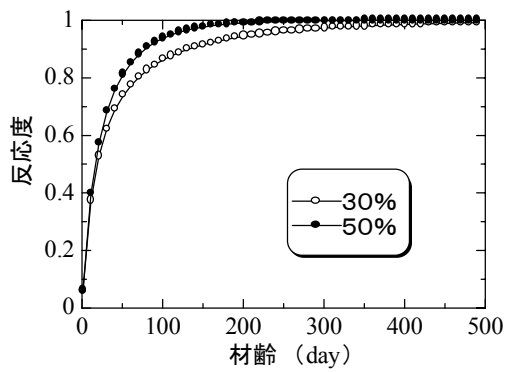
比と細孔空隙径比の関係は W/C70%に対応したものであるが、水和反応度に伴う細孔組織の緻密さの変化割合とそれによる透水係数の変化割合は W/C に無関係であるものと仮定する。

(4) 材齢 28 日における透水係数

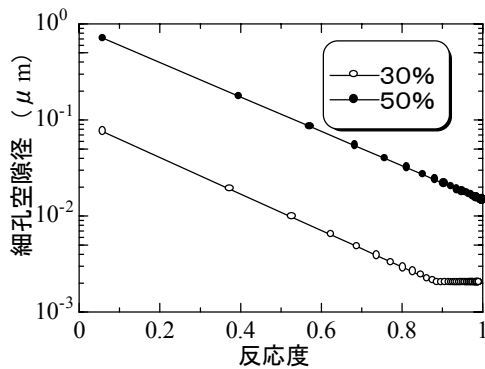
各種 W/C の材齢 28 日の時点における透水係数は、村田⁴⁾のモデルを用いた。村田⁴⁾は、材齢 28 日の硬化コンクリートに対する最大骨材粒径の違いによる透水係数と W/C の関係を報告している。

(5) 各種 W/C に対する任意水和反応度における細孔空隙径と透水係数

各種 W/C に対する任意水和反応度における細孔空隙径と透水係数の関係は、上記④に示す材齢 28 日の透水係数に上記③で示す透水係数比～細孔空隙径比の関係および上記②で示す水和反応度～細孔空隙径の関係を代入することにより求まる。



図一2 反応度～材齢関係



図一3 細孔空隙径～反応度関係

(6) 各種 W/C に対する任意材齢と透水係数

各種 W/C に対する任意材齢と透水係数の関係は、上記⑤で示す任意反応度における細孔空隙径～透水係数に上記②で示す材齢～水和反応度の関係を代入することによって求まる。

以上のような、解析モデル構築までの流れに従うことによって、最終的に水和反応生成過程の定量化が透水係数という1つの指標によって表わすことができるわけである。

2. 2 解析モデル構築における各要因

(1) 水和反応度と材齢

水和速度が未水和水内のセメント量に依存すると仮定することにより、 C_H (単位体積当りのセメント中で水和しているセメントの重量) は、次式のように表わすことができる。なお、次式は、一定温度という条件下におけるセメントの水和を支配している。

$$\frac{dC_H}{dt} = k_0(1-n_0)t^{-n_0}(W-\gamma_p C_H)(C-C_H) \quad (1)$$

ここで、

W , C , γ_p , t , k_0 および n_0 は、 1 m^3 あたりの水量(kg/m^3)、 1 m^3 あたりのセメントの重量(kg/m^3)、完全水結合比、材齢(day)および材齢定数である。

そして、 $t=0$ において $C_H=0$ という初期条件のもとにおいて、次式のように表わすことができる。

$W/C \neq \gamma_p$ のとき

$$C_H = \frac{1 - \exp[(\gamma_p C - W)k_0 t^{1-n_0}]}{1 - \gamma_p C/W \exp[(\gamma_p C - W)k_0 t^{1-n_0}]} C \quad (2)$$

$W/C = \gamma_p$ のとき

$$C_H = \frac{\gamma_p k_0 t^{1-n_0}}{1 + \gamma_p k_0 t^{1-n_0}} \quad (3)$$

水和反応の定義は、次式に示すように初期セメント量に対する水和セメント量の比として表わすことにした。

$$\alpha(t) = \frac{C_H}{C} = \frac{1 - \exp[(\gamma_p C - W)k_0 t^{1-n_0}]}{1 - \gamma_p C/W \exp[(\gamma_p C - W)k_0 t^{1-n_0}]} \quad (4)$$

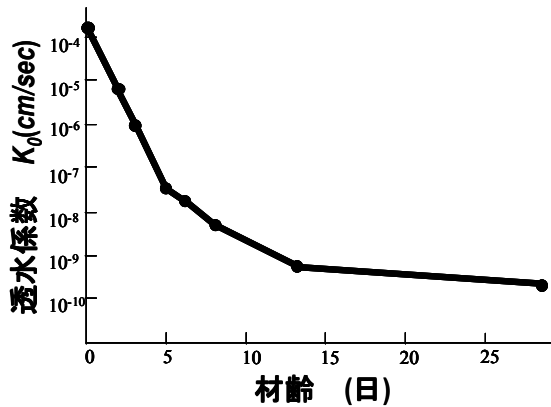
ここで、W/C30%および50%に対して上式を適用した結果を図一2に示す。同図からW/Cの大きい50%の方が反応度は速くなり、W/Cが大きいほどセメント量に対して、より多くの水量を得られるということが反応を速くさせるものである。

(2) 細孔空隙径と水和反応度

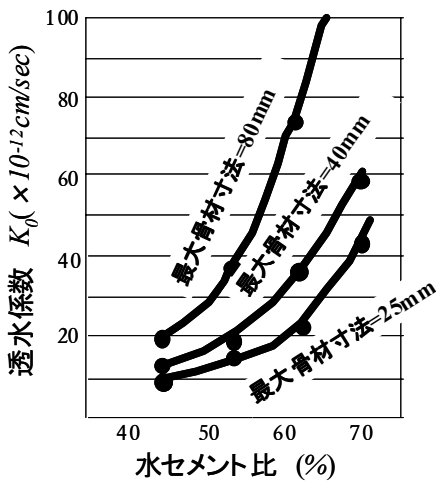
コンクリートは、水和反応過程において組織が緻密になることによって強度が発現し、組織の緻密さの程度は、次式に示す細孔空隙径で表わすことにする。

$$\phi_{por}(\alpha(t)) =$$

$$\phi_0 \exp \left[\frac{V}{a} \frac{\rho_{ce}}{\rho_w + \rho_{ce} \cdot \omega_0} (\omega_0 - 0.3375 \alpha(t)) \right] \quad (5)$$



図—4 Powers による実験結果



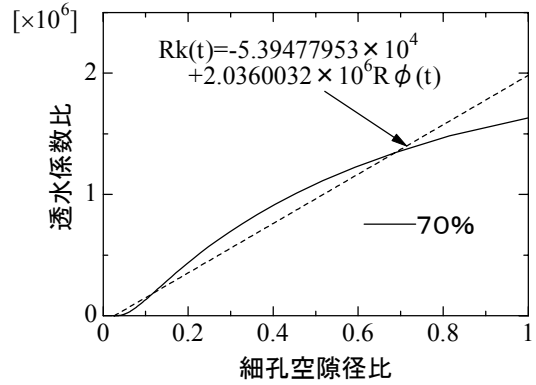
図—5 村田による実験結果

ここで、 $\phi_{por}(\alpha(t))$, ϕ_0 , V , a , ρ_{ce} および ω_0 は、各反応度における細孔径分布が最大となる細孔空隙径 (μm) (以下、細孔空隙径と称す)、各 W/C における最小細孔空隙径 (μm)、供試体の全体積 (cm^3)、細孔空隙係数、セメントの密度 (g/cm^3) および水セメント比 (g/cm^3) である。

W/C30% および 50% に対して上式を適用した結果を図—3 に示す。同図から細孔空隙径は、水和反応度とともに指数的に小さくなる。

(3) 透水係数比と細孔空隙径比

Powers³⁾ は、W/C70% のコンクリートに対して材齢をパラメータとした透水実験を行い、図—4 に示す透水係数と材齢の関係を求めている。任意材齢における透水係数を同定するには、図—4 を回帰することにより近似式を導出する



図—6 細孔空隙径比～透水係数比関係

必要があり、その近似式を次式に示す。

材齢 90 日以前

$$k(t) =$$

$$3.029 \times 10^{-4} \exp(-8.016 \times 10^{-9} - 9.569 \times 10^{-2} t)$$

材齢 90 日以降

$$k(t) =$$

$$3.029 \times 10^{-4} \times 10^{(-19.319 \cdot \exp(-15.28/t) - 9.043)}$$

(6)

そして、図—5 に示す村田⁴⁾の実験結果により、材齢 28 日の時点における透水係数 k_{28} により上式に示す任意材齢時の透水係数 $k(t)$ を無次元化した透水係数 $Rk(t)$ が次式である。

$$Rk(t) = \frac{k(t)}{k_{28}} \quad (7)$$

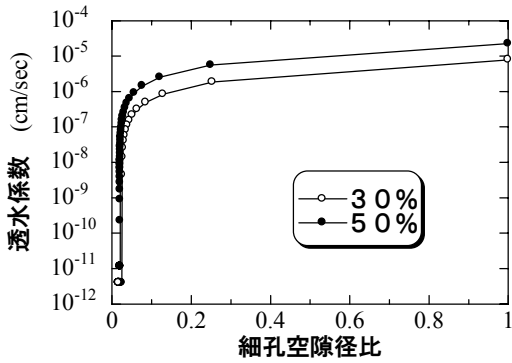
また、水和反応度に依存した細孔空隙径である式(5)に水和反応度と材齢の関係である式(4)を代入し、材齢 1 日の時点における細孔空隙径 ϕ_{\max} により無次元化した細孔空隙径比 $R\phi(t)$ が次式である。

$$R\phi(t) = \frac{\phi_{por}(\alpha(t))}{\phi_{\max}} \quad (8)$$

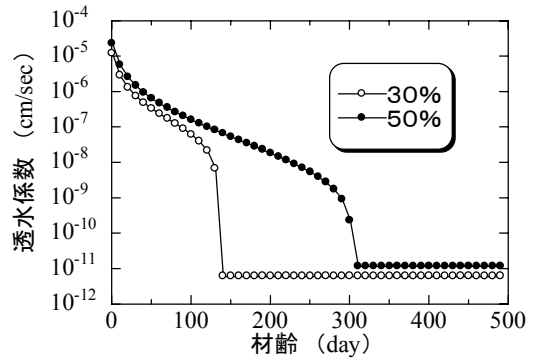
そして、式(7)と式(8)で表わすことができる透水係数比 $Rk(t)$ と細孔空隙径比 $R\phi(t)$ の関係は、図—6 に表わすことができ、同図の回帰式が次式で表わすことができる。

$$Rk(t) = \beta + \alpha \cdot R\phi(t) \quad (9)$$

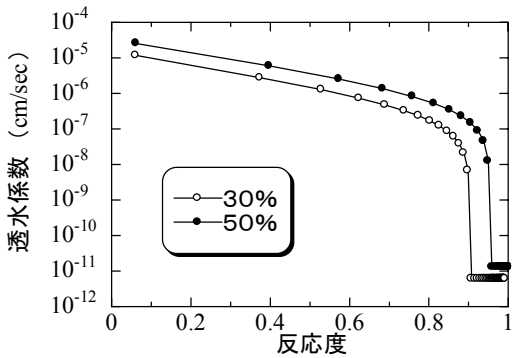
ここで、 α および β は、W/C には依存しないものとし、それぞれ $\alpha = 2.036 \times 10^6$ および



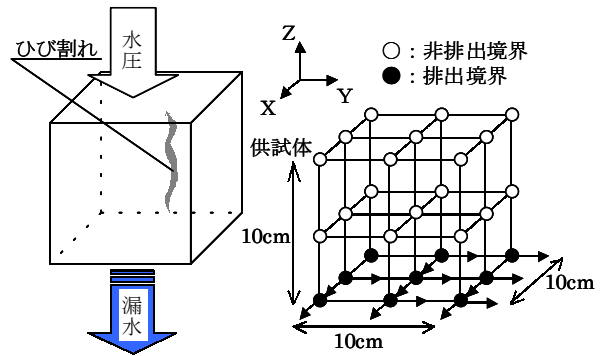
図一七 細孔空隙径比～透水係数



図一九 材齢～透水係数



図一八 反応度～透水係数



図一〇 解析モデル

$\beta = -5.394 \times 10^4$ である。

(4) 各種 W/C に対する細孔空隙径と透水係数

各種 W/C に対する任意材齢と細孔空隙径比における透水係数の関係は、式(9)に式(7)を代入することにより次式で表わすことができる。

$$k(t) = k_{28} (\beta + \alpha \cdot R\phi(t)) \quad (10)$$

式(10)に、村田⁴⁾の実験により得られる材齢 28 日の透水係数を代入することにより、各種 W/C の透水係数と細孔空隙径比が求まることになり、例として、30% および 50% の W/C に対して上式を図示したものが図一七である。

最終的に式(10)中の細孔空隙径比 $R\phi(t)$ に式(8)および式(5)を代入することにより、各種 W/C における透水係数と水和反応度の関係が得られるとともに、透水係数と水和反応度の関係に式(4)を代入することにより透水係数と材齢の関係が得られるわけである。なお、図一八および図一〇に W/C30% および 50% における透水係数と水和反応度および材齢の関係を示す。

以上のように、水和反応生成過程の定量化が

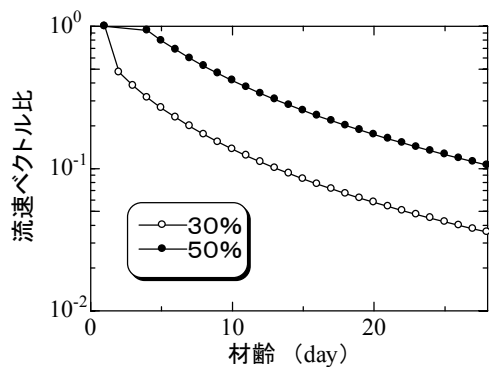
透水係数という 1 つの指標によって表わすことができたわけであり、水和反応生成を伴うコンクリート中の水分移動モデルが構築されたことになる。

3. 本構築モデルに基づくひび割れからの漏水性状

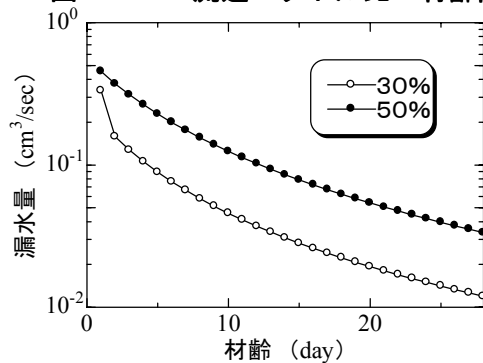
2 章における解析理論に基づいて、有限要素法によりセメント供試体内部の流速の変化および供試体底面部からの漏水量に対する解析的評価を行うことにより、水和反応生成を伴う水分移動性状の定性的評価を行う。

3.1 解析モデルと解析条件

解析モデルは、図一〇に示すように、W/C55%、10cm×10cm×10cm の形状寸法としたコンクリート供試体を 8 要素に分割したものであり、各要素は鉛直方向(z 方向)に対して、ひび割れ幅 0.13mm のひび割れを有する分布ひび割れ要素である。解析は、解析モデル上面に 2.0MPa の水圧を作用させ、要素内の流速ベクト



図—1 1 流速ベクトル比～材齢関係



図—1 2 漏水量～材齢関係

ルおよびモデル下面からの漏水量を算出した。なお、境界条件は、変位に関しては一軸状態、間隙水に関してはモデル下面のみを排出境界とした。解析パラメータはひび割れ表面に存在する未水和セメント量であり、ひび割れ表面で移動する水量に対して 30%および 50%の W/C を設定した。

3. 2 水和反応生成による漏水性状

まず、水和反応を生じない時点における流速ベクトルは、z 軸方向下向きに 0.00334(cm/sec) であり、その際に生じるモデル下面からの漏水量は 0.334(cm³/sec)である。これに対して、本研究で構築した水和反応生成を伴う水分移動解析モデルを適用した結果を図—1 1 および図—1 2 に示す。図—1 1 は、それぞれ上述した水和反応を伴わない流速ベクトルにより無次元化された流速ベクトル(以下、流速ベクトル比と称す)と時間の関係、図—1 2 は、モデル下面からの漏水量と時間の関係を表わしている。図中に示す記号○および●は、それぞれひび割れ表面における W/C30%および 50%の結果である。

流速ベクトル比については、図—1 2 で示し

ている材齢と透水係数の関係を反映した形状となった。このことから、以下に示すことが考えられる。透水係数は、水の流れに直接的な影響を与える。そのことから、本研究の目的でもあった細孔空隙径および水和反応度が水分移動の挙動に与える影響を確認することができる。また、漏水量については、流速ベクトルの影響を受けていることから、透水係数、細孔空隙径および水和反応度の影響を確認することができる。

なお、本解析モデルは、ひび割れ表面或いは細孔壁面上に存在する未水和セメントとバルクとして移動する水との水和反応を考慮しているわけであるが、ひび割れ或いは細孔組織の緻密化は単に未水和セメントや水量のみで表現できるのではなく、それぞれの組織の 3 次元的空間領域にも大きく関与するわけであり、これに関しては今後の課題としたい。

4. まとめ

コンクリート内部の細孔表面或いはひび割れ表面に存在している未水和セメントと水の水和反応生成を伴う水分移動モデルの構築を目的とした。以下に本研究で得られた結論をまとめる。
1)水和反応度、細孔空隙径および透水係数の関連付けを行うことによって材齢の変化による水和反応生成過程を考慮に入れた水分移動モデルが構築された。

参考文献

- 1)河角誠, 笠原清, 栗山武雄: 高温度下におけるコンクリートのクリープ(第3報)セメントの水和に及ぼす温度の影響, 電力中央研究所報, No.381025, 1981
- 2)K.van Breugel:Simulation of Volume Change in Hardening Cement-Based Materials,pp1-41 , pp.161-166, 1997.9
- 3)Powers,P.C, Copeland, L.E., Hayes, J.C.and Mann,H.M : Permeability of Portland CementPaste, ACIJournal, No.51-14, pp.285-298, Nov.1954
- 4)村田二郎: コンクリートの水密性の研究, 土木学会論文集, No. 77, pp. 69-96, 1961.11