

論文 コンクリート内部に存在する鉄筋とコンクリート界面における統一 的透水係数の構築

森本 康熙^{*1}・小野 貴史^{*2}・大下 英吉^{*3}

要旨：著者らは、鉄筋とコンクリート界面における透水係数に及ぼす鉄筋軸に対するコンクリートの打設方向、鉄筋径、水セメント比および材齢の影響に関する実験を行い、これらの要因により透水係数は指数的に相違すること、またその性状がコンクリート構造物の劣化性状に大きな影響を及ぼすことを指摘している。本研究では、上述した既往の実験データおよび既往のコンクリートの透水係数を包囲的に整理することにより、コンクリートの打設方向と本研究の範囲内における任意の水セメント比、鉄筋径および材齢に対して統一的な透水係数予測式の構築を行った。

キーワード：水セメント比、打設方向、鉄筋径、透水係数

1. はじめに

近年、コンクリート構造物にとってコンクリート内部の各種物質移動など様々な要因による早期劣化が大きな問題となっている。耐久性や強度の面において高い水密性をもつことが要求されるコンクリート構造物における問題点を評価するにあたり、早期劣化の要因のひとつとして透水問題が挙げられる。

一般に、多孔性材料であるコンクリートは安定して水分を内部に保持することができ、空隙中に存在する水分の予測はコンクリートの品質を定量評価する上で非常に重要である。また、コンクリート打設時において非常に粗な空隙が形成されるコンクリート中の鉄筋近傍部或いは打ち継ぎ面における各種有害物質の移動現象は、コンクリートの初期欠陥の要因となり、長期品質に大きな影響を及ぼす。したがって、空隙中の水分形態と密接に関連することとなる各種物質移動現象すなわちコンクリートの劣化現象を追跡するにあたり、コンクリート中の鉄筋近傍領域における水分移動性状の定量評価は必要不可欠であるといえる。

著者ら¹⁾は、鉄筋近傍における透水性状の定量的評価を行うことを目的として、鉄筋軸に対するコンクリートの打設方向、水セメント比、鉄筋径および材齢をパラメータとした透水試験を行い、これらの要因がコンクリート中の鉄筋近傍部の透水性に及ぼす影響を実験的に評価した。鉄筋近傍の透水性状は、コンクリート実質部の透水性状とは全く異なり、特に、鉄筋軸に対してコンクリートを水平方向打設した場合、透水係数が指数的に大きくなるとともに、その程度は材齢とともに大きくなることが確認された。したがって、これらの性状を統一的に評価可能な手法が重要となる。

本研究では、コンクリート中に存在する鉄筋近傍における水分の移動性状を統一的に評価する手法の構築を目的として、各種水セメント比、任意の鉄筋径、および材齢をパラメータとした統一的透水係数予測式を構築した。

2. 著者らの既往の研究¹⁾

著者らの既往の研究¹⁾においては、表 - 1 に示すように、各種水セメント比、各鉄筋径、材

*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)

表 - 1 透水試験結果 (青木ら²⁾)

W/C(%)	材齢(日)	打設方向	鉄筋径	透水係数(cm/s)
60	7	鉛直	無し	30.1×10^{-11}
60	7	鉛直	D25	10.9×10^{-10}
60	7	鉛直	D13	86.7×10^{-11}
60	7	水平	D25	29.7×10^{-10}
60	7	水平	D13	20.9×10^{-10}
60	14	鉛直	無し	23.6×10^{-11}
60	14	鉛直	D25	46.6×10^{-11}
60	14	鉛直	D13	35.9×10^{-11}
60	14	水平	D25	25.0×10^{-10}
60	14	水平	D13	17.2×10^{-10}
60	35	鉛直	無し	30.9×10^{-12}
60	35	鉛直	D25	72.3×10^{-12}
60	35	鉛直	D13	42.8×10^{-12}
60	35	水平	D25	12.3×10^{-10}
60	35	水平	D13	81.0×10^{-11}
50	7	鉛直	無し	78.0×10^{-12}
50	7	鉛直	D25	68.5×10^{-11}
50	7	鉛直	D13	55.5×10^{-11}
50	7	水平	D25	17.7×10^{-10}
50	7	水平	D13	14.4×10^{-10}
50	14	鉛直	無し	42.8×10^{-12}
50	14	鉛直	D25	25.7×10^{-11}
50	14	鉛直	D13	18.0×10^{-11}
50	14	水平	D25	17.0×10^{-10}
50	14	水平	D13	11.4×10^{-10}
50	35	鉛直	無し	10.7×10^{-12}
50	35	鉛直	D25	56.6×10^{-12}
50	35	鉛直	D13	34.7×10^{-12}
50	35	水平	D25	96.6×10^{-11}
50	35	水平	D13	57.0×10^{-11}

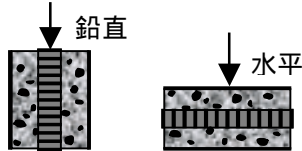


図 - 1 打設方向

齢および図 - 1 に示す鉄筋軸に対するコンクリートの打設方向をパラメータとした透水試験を実施し、測定された各コンクリート供試体の鉄筋近傍部において、圧入された水の浸透深さをを用いて透水係数を算出した。上述した各要因が鉄筋近傍部の透水性状に及ぼす影響に関しては、透水係数は鉛直方向打設時と比べ水平方向打設時は非常に大きくなること、鉄筋径が大きいほど大きな値を示すこと、これらの傾向は水セメント比の違いに拘わらず同一の現象となることが示された。

3. 統一的透水係数予測モデルの構築

3.1 モデル構築までの流れ

鉄筋近傍における統一的透水係数予測モデル

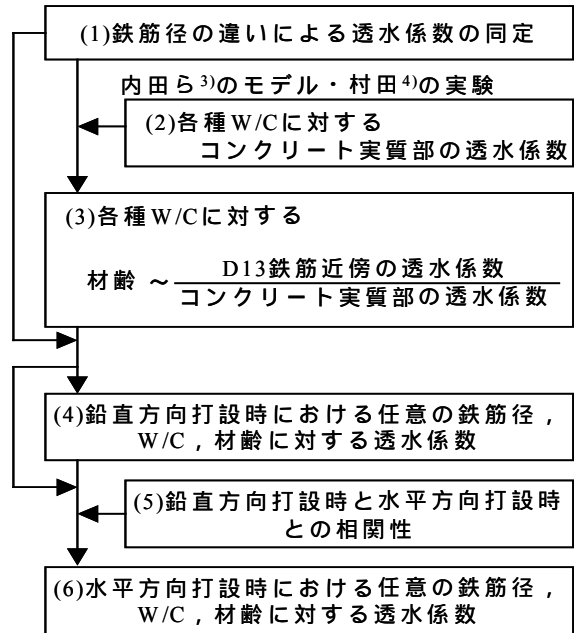


図 - 2 モデル構築までの流れ

は、コンクリート実質部の透水係数を既知量として、本研究の範囲内における任意の材齢と鉄筋径および鉄筋軸に対するコンクリートの打設方向に対して表現可能なものであり、モデル構築までの流れを図 - 2 に示すとともに以下で各概要を簡単に説明する。

(1) 鉄筋径の違いによる透水係数の同定

鉛直方向打設時において D13 鉄筋近傍および D25 鉄筋近傍コンクリートの透水係数の関係から、任意の径を有する鉄筋近傍コンクリートの透水係数を材齢の関数として同定する。

(2) コンクリート実質部の透水係数

内田ら³⁾のモデルに対し、村田⁴⁾の実験結果を適用することにより、上述した各種 W/C に対するコンクリート実質部の透水係数を材齢の関数として同定する。

(3) 各種 W/C に対する鉛直方向打設時の D13 鉄筋近傍コンクリートの透水係数

コンクリート実質部の透水係数に対する鉛直方向打設時における D13 鉄筋近傍コンクリートの透水係数の比から、各種 W/C に対する本研究の範囲内における任意材齢の D13 鉄筋近傍の透水係数を同定する。

(4) 鉛直方向打設時の透水係数

上記(3)に示す材齢 ~ 透水係数比に上記(1)

に示す鉄筋径による透水係数の関係を適用し、さらにコンクリート実質部の透水係数を適用することによって鉛直方向打設時において本研究の範囲内における任意の W/C、鉄筋径および材齢に対する透水係数を同定する。

(6) 水平方向打設時の透水係数

鉛直方向打設と水平方向打設時の鉄筋近傍における透水係数の関係を求め、両打設方向の相関性を調べることにより水平方向打設時において本研究の範囲内における任意の W/C、鉄筋径および材齢に対する透水係数を同定する。

以上のような流れにより、鉄筋近傍における統一的な透水係数の予測モデルを構築する。

3.2 鉛直方向打設時における鉄筋近傍の統一的透水係数評価式

(1) 任意径の鉄筋近傍における透水係数評価式(D13 鉄筋近傍の透水係数に基づく)

図 - 3 は、D13 鉄筋近傍に対する D25 鉄筋近傍の透水係数比と材齢との関係を示したものであり、材齢の経過にともなう D13 鉄筋近傍に対する D25 鉄筋近傍コンクリートの透水係数の変化は、ほぼ一定である。すなわち、鉄筋径の違いによる透水係数の相違は、ある材齢までは透水係数が鉄筋径の違いによらず一定であると仮定すると、その材齢までの透水係数はコンクリート実質部の透水係数と仮定することができる。

D13 鉄筋近傍コンクリートの透水係数 k_{D13} と D25 鉄筋近傍コンクリートの透水係数 k_{D25} との関係は、鉄筋の単位表面積当たりの透水係数として次式により表わすことができる。

$$\frac{k_{D13}}{(\pi D13)^\alpha} = \frac{k_{D25}}{(\pi D25)^\alpha} \quad (1)$$

ここで、 α は材齢 t と関連付けるパラメータであり、W/C には依存しないものとし、次式のようにする。

$$\alpha = 0.2596 \ln t - 0.1767 \quad (2)$$

ここで、上述した透水係数が鉄筋径によらず一定となる材齢は、式(2)がゼロになるときであり、1.975 日となる。そして、このときの透水

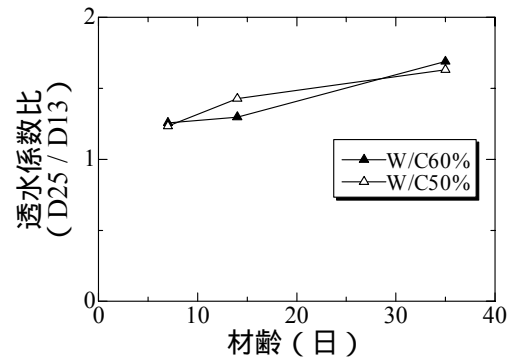


図 - 3 材齢～鉄筋径による透水係数比

係数が、材齢 1.975 日の時点におけるコンクリート実質部の透水係数と仮定することができる。

また、式(1)から、任意の鉄筋径 D における鉄筋近傍コンクリートの透水係数 k_D は、D13 鉄筋近傍コンクリートの透水係数 k_{D13} を基準とし、透水係数比 $Rk_D(t)$ として表わした次式により求めることができる。

$$Rk_D(t) = \frac{k_D}{k_{D13}} = \left(\frac{D}{D13} \right)^\alpha \quad (3)$$

式(3)において、D13 鉄筋近傍コンクリートの透水係数を代入することにより、任意の鉄筋径における鉄筋近傍コンクリートの透水係数を予測することができる。

(2) 各種水セメント比と任意材齢におけるコンクリート実質部の透水係数評価式

一般に、コンクリートは W/C が小さいほど透水係数は小さくなるという性質があるとともに、コンクリートの配合によらず透水係数の減少率と材齢の関係は一定であると仮定すると Powers ら⁵⁾の実験結果が適用可能となる。したがって、鉄筋近傍コンクリートの透水係数を評価する場合、コンクリート実質部の透水係数との相関性を調べる必要があることから、ここでは前項で行った任意径を有する鉄筋近傍コンクリートの透水係数の評価と関連付けるために、各種 W/C における材齢 1.975 日の時点でのコンクリート実質部の透水係数を予測する。内田ら³⁾は、Powers ら⁵⁾による実験結果を回帰することにより、W/C70%に対する任意材齢における

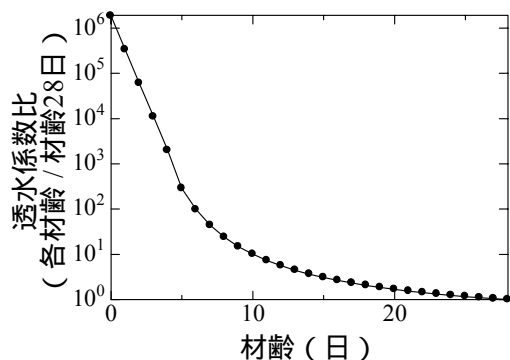


図 - 4 材齢～透水係数比

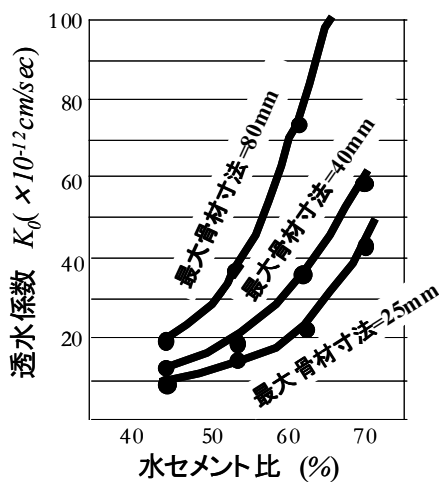


図 - 5 水セメント比～透水係数 (村田⁴⁾)

透水係数を同定するモデルを示している。図 - 4 は内田ら³⁾のモデルにおいて、材齢 28 日の透水係数に対する各材齢の透水係数の比を表したものであり、図 - 5 に示す村田⁴⁾の実験結果を基に上述した透水係数比に適用し、任意材齢における各種 W/C の透水係数を求めることができる。これにより材齢 1.975 日の時点における各種 W/C に対する透水係数 $k_{1.975}$ は次式のように表わすことができる。

$$k_{1.975} = 3 \times 10^{-7} \exp\{6.7721(W/C)^3\} \quad (4)$$

(3) D13 鉄筋近傍の透水係数評価式 (コンクリート実質部の透水係数に基づく)

各種 W/C と材齢における D13 鉄筋近傍コンクリートの透水係数 k_{D13} を前項により求めた材齢 1.975 日の時点でのコンクリート実質部の透水係数 $k_{1.975}$ により無次元化した透水係数比と材齢の関係は、図 - 6 のようになる。そして、

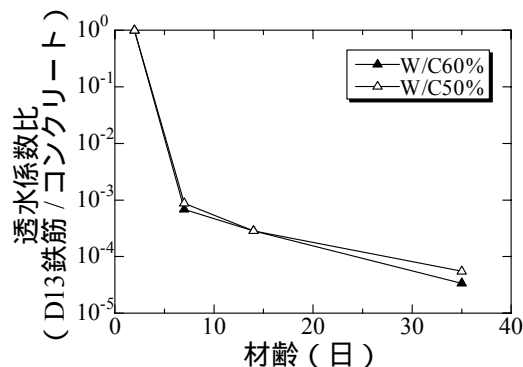


図 - 6 材齢～透水係数比

図 - 6 を回帰することにより、透水係数比 $Rk_v(t)$ は、次式のように表わすことができる。

材齢 1.975 日から 7 日まで

$$Rk_v(t) = \frac{k_{D13}}{k_{1.975}} = \exp\{-1.59(W/C)^{0.18} \times (t - 1.975)\}$$

材齢 7 日以降

$$Rk_v(t) = \frac{k_{D13}}{k_{1.975}} = \exp\{-7.562(W/C)^{0.18} - 0.102(t - 1.975)\} \quad (5)$$

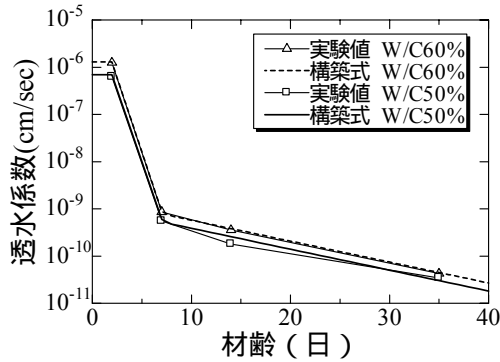
式(5)に各種 W/C と材齢および式(4)から算出される材齢 1.975 日におけるコンクリート実質部の透水係数 $k_{1.975}$ を代入することにより、本研究の範囲内における任意の材齢と W/C における透水係数を同定することができる。

(4) 統一的透水係数評価式

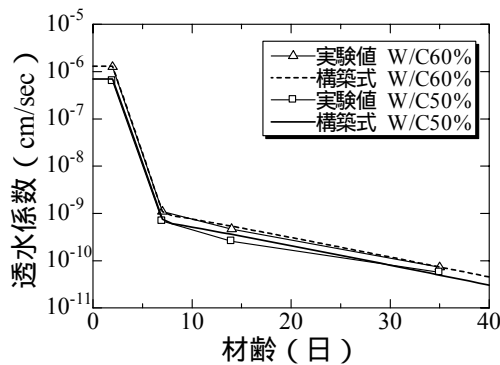
鉛直方向打設時において、本研究の範囲内における任意の W/C、材齢および鉄筋径に対する鉄筋近傍の統一的な透水係数 $k_v(t)$ の構築を行う。まず、式(4)と式(5)を乗ずることにより、各種 W/C と任意材齢における D13 鉄筋近傍コンクリートの透水係数 k_{D13} は次式となる。

$$k_{D13} = k_{1.975} \times Rk_v(t) \quad (6)$$

最終的に式(6)に式(3)を乗ずることにより、本研究の範囲内における任意の W/C、材齢および鉄筋径に対する鉄筋近傍の統一的な透水係数 $k_v(t)$ が、次式のように構築されることとなる。



(a) D13 鉄筋



(b) D25 鉄筋

図 - 7 材齢～透水係数（鉛直方向打設時）

$$k_v(t) = k_{1.975} \times Rk_v(t) \times Rk_D(t) \quad (7)$$

上述のように構築した統一的透水係数評価式に基づく材齢 1.975 日から 35 日までにおける推定値と実験結果との比較を図 - 7 に示す。なお、1.975 日までの材齢における鉄筋近傍コンクリートの透水係数は、コンクリート実質部の透水係数と同じであるとする。以上により、鉛直方向打設時における本研究の範囲内における任意の W/C、鉄筋径および材齢に対するコンクリート中の鉄筋近傍における透水係数の予測が可能となった。

3.3 水平方向打設時における鉄筋近傍の統一的透水係数評価式

材齢の経過にともなう透水係数の低下割合は、表 - 1 に示すように、鉛直方向打設時では非常に大きいことに対して、水平方向打設時には小さな値である。すなわち、水平方向打設時には鉄筋近傍における組織の緻密化が十分に進行せず、高い透水性をもつこととなる。本節

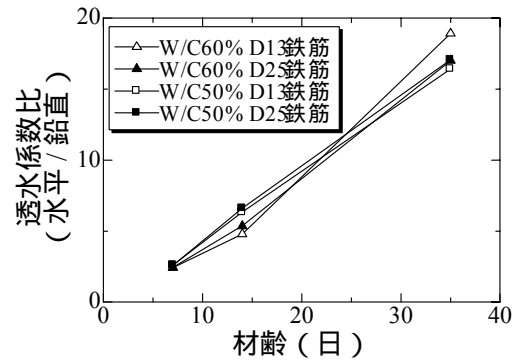


図 - 8 材齢～打設方向による透水係数比

では、水平方向打設時において統一的に評価可能な透水係数予測式を構築する。

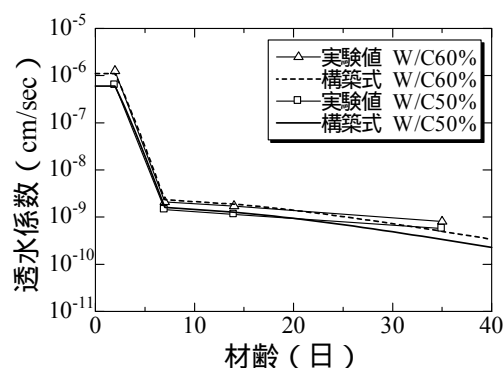
鉛直方向および水平方向それぞれのコンクリートの打設方向による鉄筋近傍の透水性に関連付けるために、鉛直方向打設時における透水係数に対する水平方向打設時における透水係数の比と材齢との関係を図 - 8 に示す。材齢の経過にともない、鉛直方向打設に対する水平方向打設の割合は、各 W/C および鉄筋径においてもほぼ直線的に大きくなる。したがって、図 - 8 を回帰することにより、鉛直方向打設に対する水平方向打設の透水係数比 $Rk(t)$ が次式のように表わすことができる。

$$Rk(t) = 0.4657t^{0.8914} \quad (8)$$

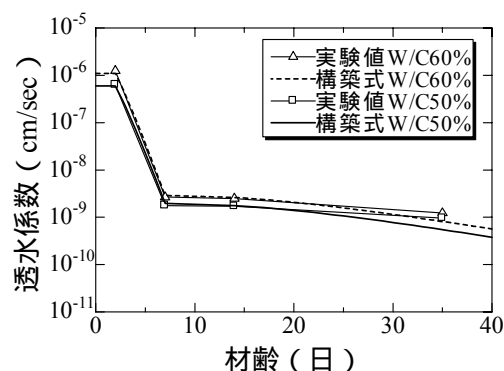
ここで、式(8)の値が 1.0 となる材齢は、3.22 日であり、それ以前においては打設方向に関わらず透水係数は等しくなると予測することができる。また、式(7)に式(8)を適用することにより、本研究の範囲内における任意の W/C、材齢および鉄筋径を有する水平方向鉄筋近傍の統一的な透水係数評価式 $k_H(t)$ は、次式のように表わすことができる。

$$k_H(t) = k_{1.975} \times Rk_v(t) \times Rk_D(t) \times Rk(t) \quad (9)$$

上述した統一的透水係数評価式に基づく材齢 1.975 日から 35 日までにおける推定値と実験結果との比較を図 - 9 に示す。なお、1.975 日までの材齢における鉄筋近傍コンクリートの透水係数は、コンクリート実質部の透水係数と同じ



(a) D13 鉄筋



(b) D25 鉄筋

図 - 9 材齢～透水係数（水平方向打設時）

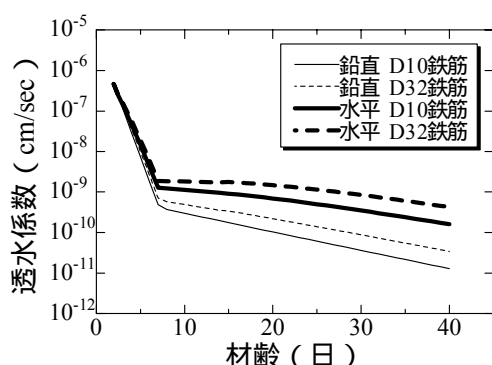


図 - 10 材齢～透水係数（W/C40%）

であるとする。次に、式(7)および式(9)のように構築された鉛直方向打設時および水平方向打設時の鉄筋近傍における統一的透水係数評価式を用いて、例として W/C40%、鉄筋径 D10 および D32 における、鉛直方向鉄筋近傍と水平方向鉄筋近傍の透水係数を図 - 10 に示す。

以上のように、鉄筋軸に対するコンクリートの打設方向と本研究の範囲内における任意の W/C、鉄筋径および材齢に対するコンクリート中の鉄筋近傍における統一的透水係数予測モデルが構築されたこととなった。また、材齢 7 日

以前においては、透水係数の変化が著しいことがわかる。したがって、材齢 5 日付近における透水性状評価についても、より詳細な結果を求めるにあたり必要となることが確認された。

4. まとめ

本研究では、コンクリートの透水性状を定量的に評価された既往の実験結果を包摂的に整理し、鉄筋軸に対するコンクリートの打設方向と、本研究の範囲内における任意の水セメント比、鉄筋径および材齢の影響により相違した透水係数に対して、統一的な予測モデルを構築した。本研究により得られた結果を以下に示す。

- 1) 鉄筋の単位表面積当たりの透水係数として考えることにより、任意の鉄筋近傍コンクリートの透水係数を同定することができた。
- 2) 材齢の経過にともなう透水係数の指数的な変化割合を考慮したコンクリート実質部の透水係数を用いることにより、鉄筋近傍コンクリートの透水係数を統一的に示すことができた。
- 3) 鉛直方向打設時と水平方向打設時との相関性から、それぞれにおいて各種 W/C、任意鉄筋径および材齢に対する鉄筋近傍コンクリートの透水係数の予測が可能となった。

参考文献

- 1) 上嶋宣裕，一ノ瀬晴幸，大下英吉：コンクリートの打設方向による鉄筋近傍の透水性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.23，No.2，pp.841-846，2001
- 2) 青木秀行，村上祐貴，大下英吉：水セメント比の違いによる鉄筋近傍の透水性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，pp.519-524，2002
- 3) 内田真就，茂木淳，大下英吉：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，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，pp.651-656，2002
- 4) 村田次郎：コンクリートの水密性の研究，土木学会論文集，No.77，pp.69-99，1961.11
- 5) Powers, P.C, Copeland, L.E., Hayes, J.C. and Mann, H.M : Permeability of Portland Cement Paste, ACI Journal, No.51-14, pp.285-298, Nov.1954