

コンクリートひび割れからの 漏水量予測に関する実験的研究

Experimental Study on Estimation of Leakage Discharge through Concrete Crack

柳 博文*・福原輝幸**・松岡 茂*

By Hirofumi YANAGI, Teruyuki FUKUHARA and Shigeru MATUOKA

The experiment on leakage through concrete crack was carried out to grasp the leakage characteristics. In this paper, a turbulent infiltration theory to estimate the leakage discharge through concrete crack was developed from several experimental results. The characteristics of the experiment was in good agreement with the calculated results by the present model when the crack width was more than 0.1mm and the Reynolds number was more than 50 ~ 60.

KeyWords : groundwater, leakage, infiltration, turbulent flow, concrete, crack, roughness

1. はじめに

コンクリートひび割れからの漏水は地下構造物、ダム、堤防や橋梁基礎の建設に当たって技術的に指摘されている。特に最近では地下構造物が地中深く建設されるようになり、地下水の漏水対策と漏水量予測が以前にも増して重要になっている。

ひび割れからの漏水は比較的古くから研究されているが、実験的には

(1) ひび割れ形状が複雑でかつひび割れ幅が小さいために、漏水量が正確に測定できない。

(2) 高圧下での漏水防止は難しい。

などの課題があり、合理的な漏水量予測は必ずしも確立されているとは言い難い。コンクリートひび割れからの漏水に関する理論的な取り扱い、岩盤の浸透流のそれと類似しており、Darcy則の層流浸透モデルが一般的である。ただし、どの程度の漏水量やひび割れ幅の範囲に対して、このモデルが適用できるかどうかの検討は、ほとんどなされていない。従来、層流浸透モデルの場合には、理論流速に係数を乗じることで実験値に適合するような統計的な処理

* 正会員 鉄建建設(株) 技術研究所 土木構造研究室
(〒286 成田市新泉9-1)

** 正会員 工博 福井大学助教授 工学部環境設計工学科
(〒910 福井市文京3-9-1)

方法が用いられている。例えば、Bandisら¹⁾は節理粗度係数、伊藤ら²⁾は係数 α を導入している。しかしながら、この場合、浸透が基本的に層流であるとしながらも、モデルに含まれる係数が実験値（実測漏水量）に適合するように複雑に変化するために、係数の物理的意味が不明瞭となり、上述したモデルが本当に層流浸透として考えてよいのかどうかという疑問が残る。他方、乱流浸透については古田島ら³⁾により岩盤割れ目の粗度と透水係数の関係が議論されている。またLouis⁴⁾はNikurade⁵⁾およびColebrook-Whiteの抵抗則⁶⁾のアナロジーを用いて、岩盤節理の浸透量を導いている。しかしながら透水係数に含まれるパラメータ（相対粗度、抵抗係数）の決定が容易でなく、コンクリートひび割れ浸透流に対するこのモデルの適用性についてはさらに検討する必要がある。

以上のように、現在のところコンクリートの比較的大きなひび割れからの漏水現象に関しては、理論的かつ実験的に解決すべき点が多い。そこで本研究は、比較的大きなひび割れからの漏水メカニズムを明らかにし、より汎用性の高いコンクリートの漏水量予測のモデル構築を目的として、その実験的および理論的な検討を行った。

2. ひび割れ浸透流モデル

2.1 モデルに含まれる仮定

ここで対象とするひび割れは、目視によりその長さや幅が確認できる程度の大きさを有するものであり、その状況を**Photo.1**に示す。ひび割れ表面には明確な凹凸（粗度）が観察される。このようなひび割れ状況に対して実用的な観点から、ひび割れ浸透の理論展開を図るために、ひび割れを**Fig.1**のような概念図で表現する。すなわち、ひび割れは粗度高さ k の均一粗度の平行壁（平均幅 $2D$ ）に置き換える。浸透流量のモデル化に際して、以下で述べる結果を踏まえて、次のような仮定を設ける。

- a) ひび割れ中の流れは乱流とし、粗度要素で囲まれた部分は便宜的に死水域と見なす。
- b) ひび割れ奥行き（ y ）方向には一様な二次元流れであり、かつひび割れ中央（ $a-a$ 断面）について流速は対称である。

2.2 基礎方程式

Fig.1および上述したa)およびb)の仮定に従うとき、厚さ $2(D-k)$ の平行壁間の流れに対する平均流方程式は（ x ）方向および厚さ（ z ）方向について、それぞれ次式で与えられる。

$$x: \rho g \sin \theta - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \rho \frac{\partial \overline{uw}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$z: -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho \frac{\partial \overline{w^2}}{\partial z} - \rho g \cos \theta = 0 \quad (2)$$

ここで、上述した k は粗度高さ K の1/2、すなわち、 $k=K/2$ である。式(1)中、 μ ：粘性係数、 ρ ：水の密度、 U ： x 方向の平均流速、 u ： x 方向の変動流速、 w ： z 方向の変動流速、 P ：圧力、 g ：重力加速度である。また、 θ は図に示すようにひび割れの傾きであり、 $\overline{uw}$ 、 $\overline{w^2}$ はReynolds（レイノルズ）応力および乱れエネルギーである。まず、式(2)を z で積分すると次のようになる。

$$P + \rho \overline{w^2} + \rho g z \cos \theta = P_0 \quad (3)$$

ここに、 P_0 ：粗度表面上の圧力であり x 方向のみの関数と考える。また流れも x 方向に一様であるとすれば

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{dP_0}{dx} \quad (4)$$

を得る。式(1)を流れの領域 $[k, z]$ で積分し、式(4)を考慮すると、せん断応力分布は次のように表される。

$$\tau = \tau_0 + \left(\frac{dP_0}{dx} - \rho g \sin \theta \right) (z - k) \quad (5)$$

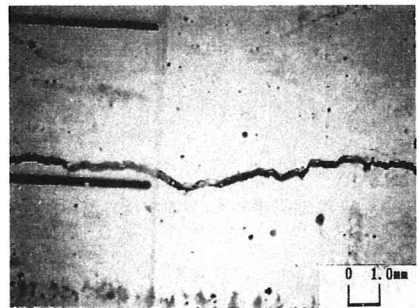


Photo.1 State of concrete crack

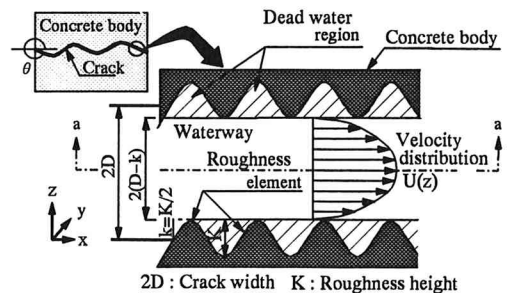


Fig.1 Infiltration model in concrete crack

Table 1 Mix proportion of concrete used in this experiment

Maximum size (coarse aggregate) (mm)	Air content (%)	Water cement ratio W/C (%)	Sand percentage s/a (%)	Weight per unit volume (kg/m ³)				
				Water W	Cement C	Admixture F	Fine aggregate S	Coarse aggregate G
20	1.5	49.5	55	183	370	65.7	938	769

Admixture : Fly ash

ここに、

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)_{z=k} \quad (6)$$

は、粗度表面せん断応力（浸透域と死水域の境界に作用するせん断応力も含む）である。

もう一方の粗度表面 ($z=2D-k$) におけるせん断応力 τ_1 は、仮定b) より τ_0 の絶対値に等しく、式(6)から粗度表面せん断応力は次のように与えられる。

$$\tau_0 = -\tau_1 = -\left(\frac{dP_0}{dx} - \rho g \sin \theta \right) (D-k) \quad (7)$$

2.3 浸透流速分布

マクロ的にひび割れ内の浸透流を平行粗面乱流とみなし、流速分布は以下のような対数則に従うものとする。

$$\frac{U}{u_*} = \frac{\ln(z/k)}{\kappa} \quad (8)$$

ここに、 κ : カルマン定数(=0.4)、 u_* : 摩擦速度である。式(8)は仮定a) より $k \leq z \leq D$ の範囲で有効である。平均流速 U_m は、 $(D-k)$ よりも実際に測定可能な見掛け上のひび割れ半幅 D を用いて表す方が実用的である。すなわち、

$$U_m = \left\{ u_* \int_k^D \ln(z/k) dz / \kappa \right\} / D = \frac{u_* \left[(D/k) \{ \ln(D/k) - 1 \} + 1 \right] / \kappa}{(D/k)} \quad (9)$$

摩擦速度 u_* は式(7)を用いて、次式で与えられる。

$$u_* = [\tau_0 / \rho]^{1/2} = \left[\frac{-(dP_0/dx - \rho g \sin \theta) D \{ 1 - (k/D) \}}{\rho} \right]^{1/2} = u'_* (1 - k/D)^{1/2} \quad (10)$$

$$u'_* = [IDg]^{1/2} \quad (11)$$

$$I = \frac{d}{dx} \left(\frac{P_0}{\rho g} \right) - \sin \theta \quad (12)$$

ここに、 I : 動水勾配である。式(10)、(11)を式(9)に代入することにより、平均浸透流速 U_m は動水勾配、ひび割れ幅、および粗度高さの関数として、式(13)のように表される。

$$U_m = \frac{1}{\kappa} \{ ID(1 - k/D)g \}^{1/2} \frac{[(D/k) \{ \ln(D/k) - 1 \} + 1]}{(D/k)} \quad (13)$$

平均流速 U_m は、式(13)から動水勾配 I の1/2乗に比例し、ひび割れ半幅 D の1/2乗に比例することがわかる。なお、以下ではこのモデルを乱流浸透モデルと呼称する。

3. 漏水実験

Table 1は、コンクリートの配合表を示す。なお、粗骨材の最大骨材寸法は、20mmとした。供試体寸法は、横800mm × 縦1200mm × 厚さ400mmとした。供試体は材令1日で引張力を作用させてひび割れを発生させ、材令2日で実験を行った。ひび割れ幅は0.05mm～1.0mmまでは0.1mm刻みで、その後は0.5mm刻みで2.5mmまで測定した。水圧はそれぞれ1kgf/cm² (0.098MPa) ～ 7kgf/cm² (0.686MPa) の範囲にわたり変化させた。

Fig.2は実験装置を示す。供試体は材令1日で油圧ジャッキを用いて引張力を導入し、ひび割れを発生させた。ひび割れ発生後は止水板外側のひび割れのコーキングを行い、周辺からの水漏れを防止した。ひび割れ幅の測定は、供試体中央部に設置した4台の高感度型変位計により行い、ひび割れ幅の調整は50 t の油圧ジャッキと両端のP C鋼棒により行った。ひび割れ幅を一定に保持した後、供試体に清水を加圧してひび割れ部分からの漏水量を測定した。ひび割れからの漏水量は、加圧後漏水量がほぼ一定になってから15秒～30秒毎に電子天秤(器械精度：1g)により測定され、これを5分～10分程度続けた。また各実験ケースごとに水温を測定し、実験終了後供試体を撮影した画像を用い

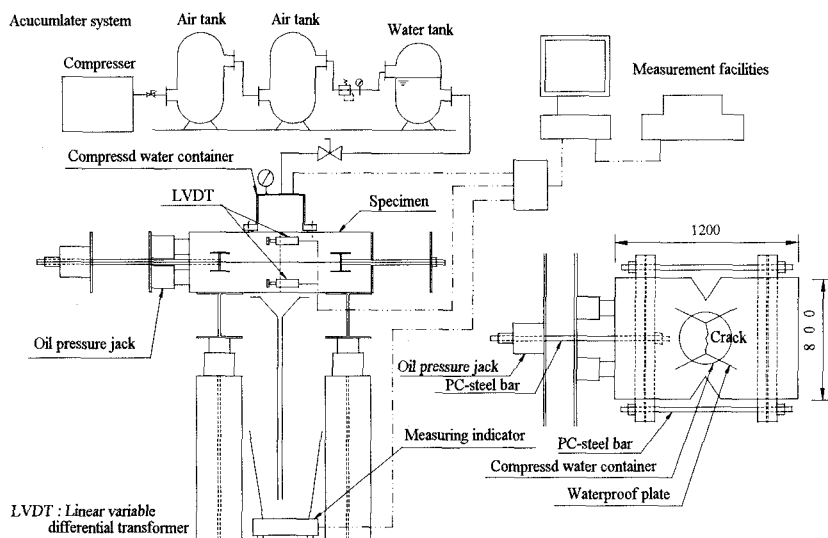


Fig. 2 System of experimental apparatus for measuring leakage discharge and for controlling crack width of concrete

て、ひび割れ長さを測定した。

4. 実験結果および考察

Fig. 3は $P=1\text{kgf/cm}^2$ (0.098MPa, $I=25$), $P=3\text{kgf/cm}^2$ (0.294MPa, $I=75$), 6kgf/cm^2 (0.588MPa, $I=150$) における平均流速の実験値とひび割れ幅の関係を示す。図中の曲線は、一般的に用いられている層流モデル⁷⁾を $P=6\text{kgf/cm}^2$ (0.588MPa, $I=150$) の条件下で計算した結果である。平均流速 U_m はひび割れ幅 $2D$ の2乗に比例するので放物線状に増加する（下に凸の分布）。しかしながら実験結果では、ひび割れ幅が大きくなるに従い平均流速は逆に上に凸のような形状を呈しながら非線形的に増加しており、層流浸透から乱流浸透への移行が認められる。

Fig. 4はReynolds (レイノルズ) 数 ($=U_m 2D/\nu$, 以下 Re と表す) と、今回の実験値から求められた平均流速 U_m と式 (11) で定義された u_*' の比 U_m/u_*' の関係を示す。同図から明らかなことは、 $Re=50\sim 60$ を境として、これより Re が大きいとデータのばらつきが小さく、 $Re<50\sim 60$ ではデータのばらつきが大きいことである。 $Re<50\sim 60$ のデータは、ひび割れ幅0.1mm未満 (●印) が主である。一方、 $Re\geq 50\sim 60$ のデータは、主にひび割れ幅0.2mm以上 (□印) に属する。また、ひび割れ幅0.1mm～0.2mm (△印) では Re が約10～50程度の結果も見受けられるが、データのばらつきは●印に比べて小さく、□印と同程度である。

Photo .2は代表的なひび割れの状況を示す。Photo .2(a)はひび割れ幅0.15mm、(b)はひび割れ幅0.14mm、(c)はひび割れ幅0.38mmのひび割れ状況を示している。(a)のように、ひび割れ幅が比較的小さい範囲では、不連続なひび割れが観察されるが、(c)のようにひび割れ幅が大きくなると、不連続な状況は見られない。ただし、(b)のようにひび割れ幅が小さいところでも、連続的なひび割れも観測される。

実験中に撮影したひび割れ状況写真から、ひび割れが不連続

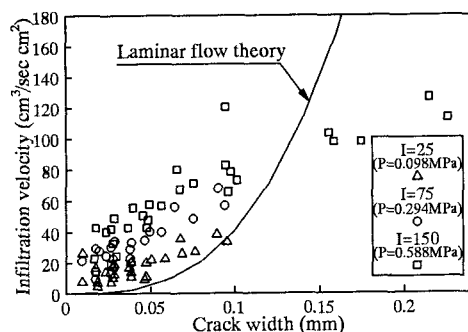


Fig. 3 Relation between average infiltration velocity and crack width

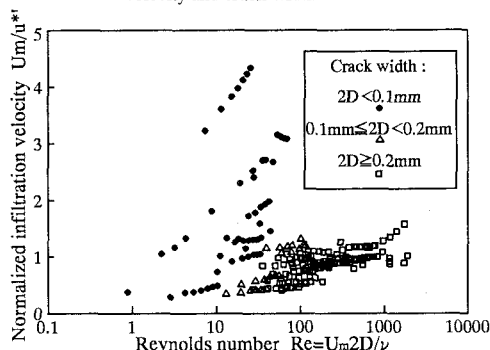


Fig. 4 Relation between Reynolds number and velocity and crack width

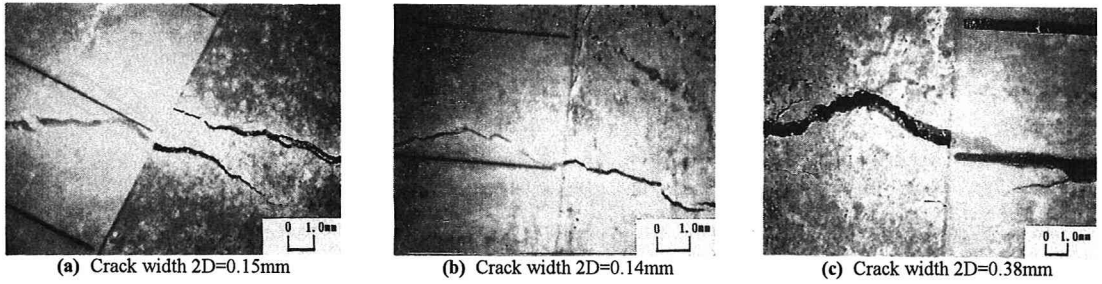


Photo. 2 Difference in crack form of concrete with crack width

となっている頻度をまとめたものをTable 2に示す。ひび割れ幅が0.1mm以下ではひび割れの目視が難しいため、写真のサンプルがとれなかった。しかし、ひび割れ幅0.1mm以上0.2mm未満の写真のサンプル（サンプル数 21）によれば、ひび割れの約50%が不連続な状態にあった。これに対し、ひび割れ幅0.2mm以上の写真サンプル（サンプル数59）では、2ケースを除く全ケースにおいてひび割れは全て連続していた。ちなみに、この2ケースのひび割れ幅は0.23mm程度であった。以上より、ひび割れ幅0.2mm以上のひび割れ漏水が本研究の対象となる。

ひび割れ状況の写真から画像処理により写真1枚当たり0.2mmピッチで50～60個のひび割れ幅を測定し、その頻度分布を表したものがFig.5である。Fig.5(a)は変位計測定値0.42mmに対して画像処理による平均値は0.41mm、(b)は変位計測定値0.38mmに対して画像処理による平均値は0.40mmである。変位計と画像処理の測定値の平均の誤差は1/50mm以下となり、両者はほぼ一致した値となる。また、ひび割れ幅の分布について分布型の適合度検定を行ったところ、正規分布に近いという結果を得た。ひび割れ表面には凹凸があるが、通常、変位計で測定しているひび割れ幅は平均ひび割れ幅にほぼ一致していると考えられる。そこで、Fig.1に示すような浸透モデルを適用するに当たり、平均ひび割れ幅2Dを変位計の測定値で置き換えても良いと考えられる。

相対粗度 k/D の値を一定と仮定するとき、式(13)より定義された平均流速 U_m は、

$$U_m = \alpha(DI)^{1/2} \quad (14)$$

のように表され、 α は

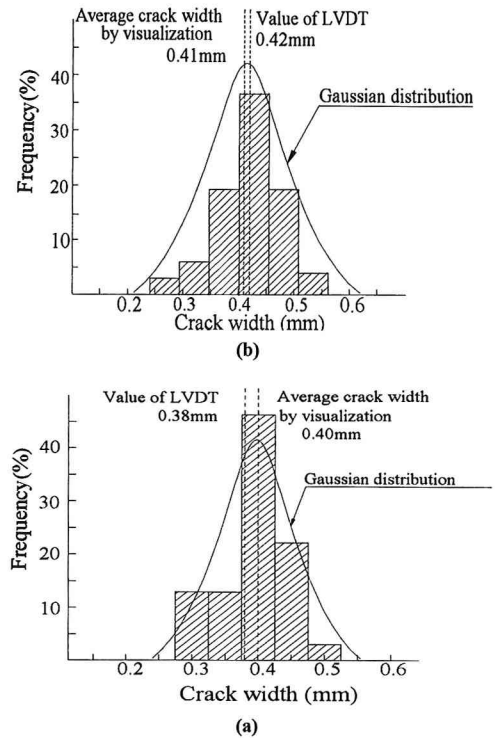
$$\alpha = \frac{1}{k} \{g(1 - k/D)\}^{1/2} \frac{[(D/k)\{\ln(D/k) - 1\} + 1]}{(D/k)} \quad (15)$$

である。 α の値は実験結果を基に最小二乗法により決定され、 $\alpha = 26.4$ （相関係数0.90）となる。このとき、相対粗度の値として $k/D = 0.34$ を得る。また、本実験に関しては、ひび割れ幅に関係なく k/D を一定値として乱流浸透モデルから漏水量を予測することができる。

ここで、ひび割れ幅が0.1mm以上について見てみると、ひび割れの不連続の頻度が約50%であるが、Fig.4の△印から判るように、結果に大きなばらつきは見られない。そこで、この範囲において乱流浸透モデルの式を適用して見ると、相関係数は0.87と若干下がるが、なお高い相関を有している。

Table 2 Frequency of the uncontinuanace crack

Crack width (mm)	Sample number	Frequency of the discontinuous crack (number)
$0.1 \leq 2D < 0.2$	21	47.6% (10)
$2D \geq 0.2$	59	3.4%(2)



(LVDV : Linear Variable Differential Transformer)

Fig.5 Frequency distribution of crack width

以上のことから、乱流浸透モデルによる漏水量の予測は、ひび割れ幅0.1mm以上でも実用上は可能であると考えられる。しかし、ひび割れ幅が0.1mm～0.2mmの範囲では、ひび割れの不連続があることから更なる検討が必要であろう。

層流浸透モデルによる伊藤らの研究報告^{8)～11)}を例にとり、伊藤らの式と圧力 $P=1\text{kgf/cm}^2$ (0.098MPa, $I=25$)、 3kgf/cm^2 (0.294MPa, $I=75$)、 6kgf/cm^2 (0.588MPa, $I=150$) の場合の実験値、および式(14)による計算結果をFig.6に示す。図中に示す放物線は、伊藤らがひび割れ幅0.05mm～1.00mmの実験結果から導いた漏水量予測式であり、 L_c はひび割れ長さ、 q は漏水量をそれぞれ示す。今回の実験結果は、ひび割れ幅が比較的小さい範囲では伊藤らが提案している近似式と適合性が良い。しかしながら、0.1mm～0.2mm以上のひび割れ幅($Re>50\sim60$)に対しては、本研究で提案した乱流浸透モデルが実験結果と良い一致を見ている。

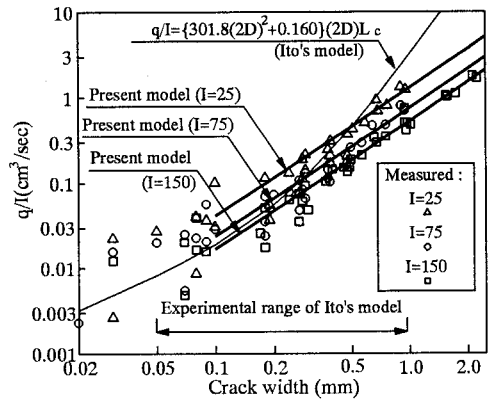


Fig.6 Comparison of Ito's model with calculated and experimental result

5. おわりに

本研究では、目視で確認できるような比較的大きなコンクリートひび割れからの漏水特性を実験的および理論的に検討した。以下に本研究で得られた成果を示す。

- (1) ひび割れ幅が0.2mm以上では、連続したひび割れとなることが確認された。しかしながら、ひび割れ幅が0.2mm未満の範囲では、ひび割れが不連続な状態が約50%現れ、従ってこの範囲内では、平均流速の算定方法または測定方法を今後検討する必要がある。
- (2) ひび割れ幅0.1mm～0.2mm以上では、ひび割れを均一粗度の平行壁に置き換え、相対粗度を一定とした乱流浸透モデルにより、漏水量を予測することができる。

実際問題となるひび割れ幅は0.1mm～0.2mm以上の比較的大きなものであり、漏水量の予測には本文で提案した乱流浸透モデルが実用的と考えられる。しかしながら、相対粗度に及ぼす骨材の最大寸法等のコンクリート配合の影響や粗度背後の死水域の決定方法は今後の課題となるであろう。

最後に、本研究に対して熊谷組の伊藤洋氏から貴重なコメントを頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) S.C.Bandis, A.Makurat and G.Vic : Predicted and Measured Hydraulic Conductivity of Rock joints, Publ Nor Geotek Inst, No.164, pp.13-23,1986.
- 2) 伊藤 一・小林隆志・菊池宏吉・加藤克行・百田博宣・伊藤雅之：節理内流れモデルによるルジオン試験の解釈、岩の力学国内シンポジウム講演論文集, Vol.7, pp.235-240, 1987.
- 3) 古田島信義・渡辺邦夫・佐藤邦明：岩盤クラック壁面凹凸の透水係数に与える影響、埼玉大学工学部地盤水理実験施設年報, Vol.7, pp.43-48, 1981.
- 4) C.Louis : A Study of Groundwater Flow in Jointed Rock and Its Influence on The Stability of Rock Mass, Imperial College Rept., London, No.10, Sept.1969.
- 5) Nikuradse, J. : Turbulente Strömung in nicht kreisförmigen Rohren , Ing. -Arch.I, 1930. pp.306-332,
- 6) Colebrook, C.F.and White,C.M. : Experiments with fluid friction in roughened pipes, Proc.Royal soc. A.Londen, 1937.
- 7) コンクリート工学協会編：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針, pp. 68～69, 昭和62年2月.
- 8) 伊藤 洋・坂口雄彦・西山勝榮・清水昭男：コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究, セメント技術年報 41, pp.217-220, 1987.12.
- 9) 西岡吉弘・坂口雄彦・伊藤 洋・藤原 愛：低濃度懸濁液の浸透充填によるひび割れ空隙の止水について、セメント系充填材に関するシンポジウム論文集, pp.89-94, 1992.12.
- 10) 蛭川友司・見坊東光・森 芳徳・伊藤 洋：海水が浸透するひび割れ中の鉄筋腐食に関する基礎研究, 土木学会論文集, Vol.19, No.466, pp.31-39, 1993.5.
- 11) 伊藤 洋・坂口雄彦・西山勝榮・福原輝幸：地下空間内外環境に係わるコンクリートの透水性評価について、都市地下空間利用における大深度地盤に関するシンポジウム発表論文集, Vol.4, pp.221-226,1993.11.