

コンクリートひび割れからの 漏水メカニズムと漏水量予測

松岡 茂¹・福原輝幸²・柳 博文³

¹正会員 鉄建建設(株)技術研究所土木構造研究室長(〒286 成田市新泉9-1)
²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)
³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)

本研究では、コンクリートひび割れからの漏水メカニズムを明らかにするために漏水実験を行い、漏水量予測の理論的な検討を行った。この実験から比較的大きなひび割れ幅の範囲では、ひび割れ幅が大きくなるに従い、浸透流速の特性は層流理論から逸脱するようになり、乱流浸透モデルにより良好に再現できることが示された。さらに現実に近い地下トンネルを想定し、本研究で得られた成果を基に、トンネルからの漏水量特性を例示した。

Key Words : turbulent flow, leakage, crack, roughness, infiltration, concrete

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、堤防や橋梁の基礎の建設に当たって技術的に指摘されている課題の一つである。コンクリート中の水分移動は、(i)ポーラスな母材を通じての浸透、(ii)ひび割れ浸透、(iii)継手部の浸透に分類でき、通常は(ii)と(iii)が問題となりやすい¹⁾。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、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がたい。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同じであり、Darcy則の層流浸透モデルが一般的である。ただし、漏水量が多い場合におけるこのモデルの適用限界や信頼性は明確でない。したがって、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方法が用いられている。例えば、Bandis等²⁾は節理粗度係数、伊藤等³⁾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Louis⁴⁾が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はさらに検討する必要がある。KimbrellとMiller⁷⁾はダムサイトでの花崗岩、片麻岩、玄武岩および砂岩の透水性に関する野外試験および屋内試験より、非線形な浸透流が透水係数の測定に重要な役割を果たすことを指摘している。

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

(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

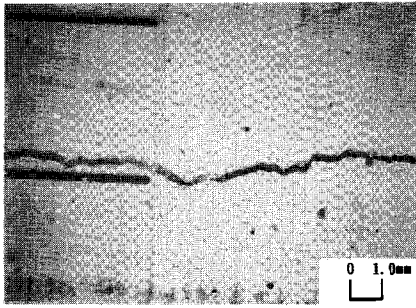


Photo. 1 State of concrete crack

明確な凹凸（粗度）があり、その高さは間隙の半幅と同程度あるいはそれ以下である。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、以下のような仮定を設ける。

- a) ひび割れ中の流れは乱流である。ただし、粗度要素で囲まれた部分は死水領域とみなし、漏水量に関与しない。
- 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) 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、流れ域すなわち厚さ $2(D-k)$ 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。

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

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

ここで、上述した k は壁面における凹凸の高さ 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、 $-\bar{u}w$ 、 \bar{w}^2 はレイノルズ応力、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。

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

ここに、 P_0 : 流れ域と死水域の境界 ($z=k$) 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

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

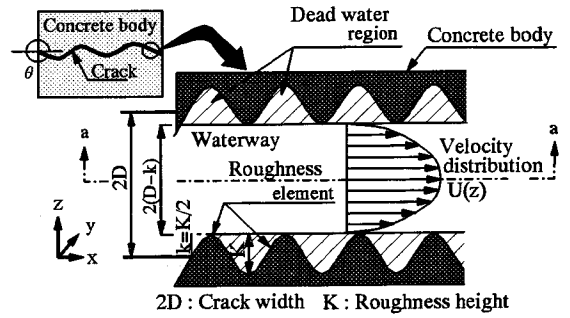


Fig.1 Infiltration model in concrete crack

を得る。式(1)を流れの領域 $[k, z]$ で積分すると

$$\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial z} - \rho \bar{u}w = \int_k^z \frac{dP_0}{dx} dz - \rho g z \sin \theta + C \quad (5)$$

となり、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。

$$\tau = \tau_0 + \left(\frac{dP_0}{dx} - \rho g \sin \theta \right) (z - k) \quad (6)$$

ここに、

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)_{z=k} \quad (7)$$

は、流れの境界 ($z=k$) におけるせん断応力である。

もう一方の流れの境界 ($z=2D-k$) におけるせん断応力 τ_1 は式(6)より、以下ようになる。

$$\tau_1 = \tau_0 + 2 \left(\frac{dP_0}{dx} - \rho g \sin \theta \right) (D - k) \quad (8)$$

仮定b)より、 τ_0 と τ_1 の絶対値は等しく、式(7)を考慮して次式で与えられる。

$$\tau_0 = -\tau_1 = - \left(\frac{dP_0}{dx} - \rho g \sin \theta \right) (D - k) \quad (9)$$

(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。

$$\frac{U}{u_*} = \frac{\ln(z/k)}{\kappa} \quad (10)$$

ここに、 κ : カルマン定数 (=0.4)、 u_* : 摩擦速度である。式(10)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、

$$U_m = \left\{ u_* \int_k^D \ln(z/k) dz / \kappa \right\} / D \\ = \frac{u_* \{ (D/k) \{ \ln(D/k) - 1 \} + 1 \}}{(D/k)} \quad (11)$$

摩擦速度 u_* は式(9)を用いて、次式で与えられる。

$$u_* = [\tau_0 / \rho]^{1/2} = \left[\frac{-(dP_0/dx - \rho g \sin \theta) D \{ 1 - (k/D) \}}{\rho} \right]^{1/2} \\ = u_*' (1 - k/D)^{1/2} \quad (12)$$

$$u_*' = [Dg]^{1/2} \quad (13)$$

$$1 = \frac{d}{dx} \left(\frac{P_0}{\rho g} \right) - \sin \theta \quad (14)$$

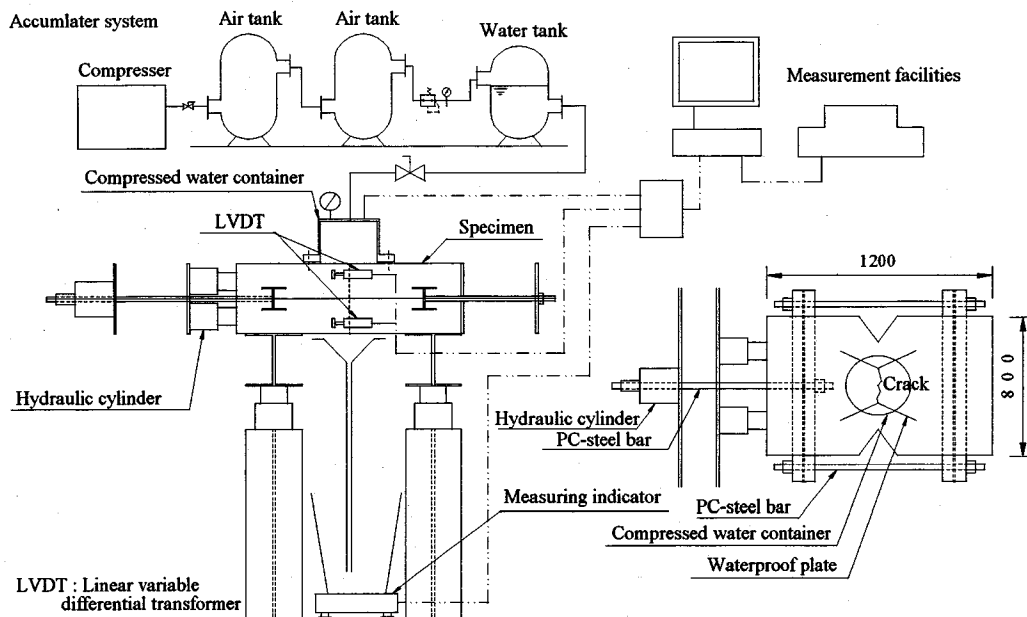


Fig.2 System of experimental apparatus

Table 1 Mix proportion

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、I : 動水勾配である。なお、 u_w' は壁面の凹凸がない（流れ域の厚さを2Dとする）ときの摩擦速度である。式(12)、(13)を式(11)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(15)のように表される。

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

平均流速 U_m は、式(15)からひび割れ半幅Dおよび粗度高さkが一定の場合、動水勾配Iの1/2乗に比例し、相対粗度k/Dおよび動水勾配Iが一定の場合、ひび割れ半幅の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

(1) 実験条件

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。

(2) 実験方法

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50tの油圧ジャッキと両端のPC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

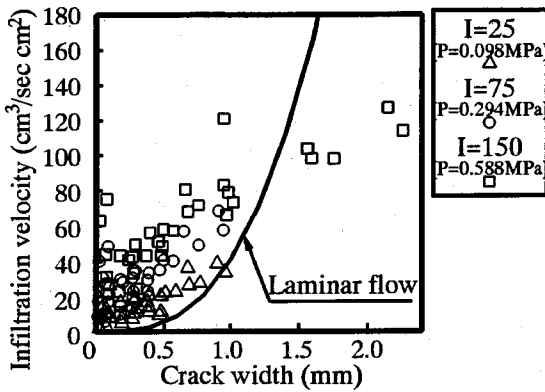


Fig.3 Relation between average infiltration velocity and crack width

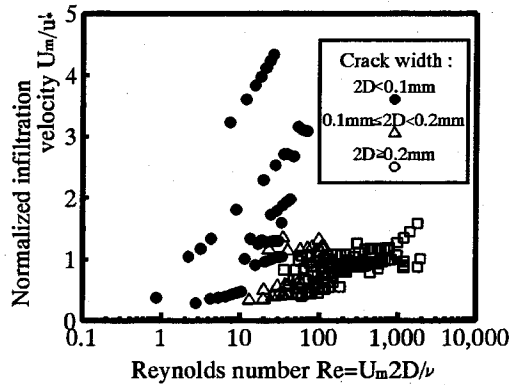


Fig.4 Relation between Reynolds number and normalized infiltration velocity U_m/u_*'

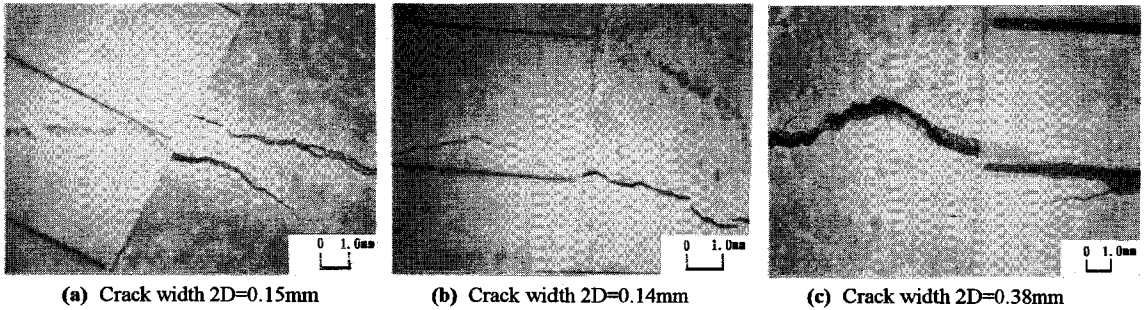


Photo. 2 Concrete crack of the difference in crack width

Table 2 Percentage of the discontinuance crack

Crack width (mm)	Number of sample	Percentage of the discontinuance crack (number)
$0.1 \leq 2D < 0.2$	21	47.6% (10)
$2D \geq 0.2$	59	3.4% (2)

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、ひび割れ長さを実測した。なお、実験中はひび割れ幅を高感度型変位計により測定し、一定の幅を保持していることを確認している。

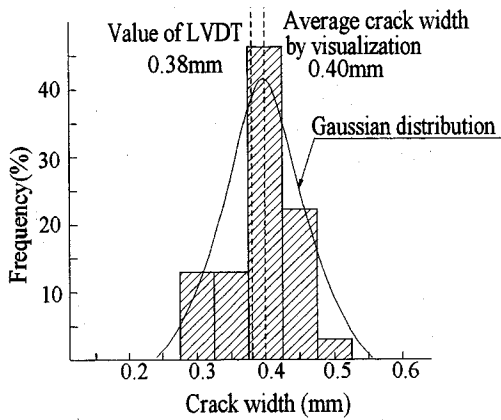
4. 実験結果および考察

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⁸⁾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

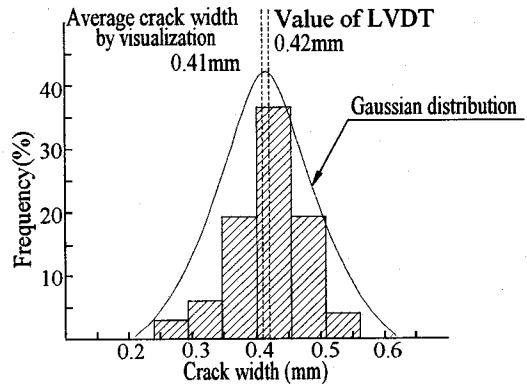
例するので放物線状に増加する(下に凸の分布)。しかしながら、実験結果では、ひび割れ幅が大きくなるに従い平均流速は上に凸のような形状を呈しながら非線形的に増加しており、層流浸透から乱流浸透への移行が認められる。

Fig.4はReynolds(レイノルズ)数($=U_m 2D/\nu$, 以下 Re 数と表す)と、今回の実験値から求められた平均流速 U_m と式(13)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 数 $=50\sim60$ を境として、これより Re 数が大きいとデータのばらつきが小さく、 Re 数 $<50\sim60$ ではデータのばらつきが大きいことである。 Re 数 $<50\sim60$ のデータは、ひび割れ幅0.1mm未満(データ数48個、●印)が主である。一方、 Re 数 $\geq 50\sim60$ 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 数が約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。なお、ひび割れ幅は供試体両端で変位計により測定されたものである。(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



(a)



(b)

(LVDT : Linear variable differential transformer)

Fig.5 Frequency distribution of crack width

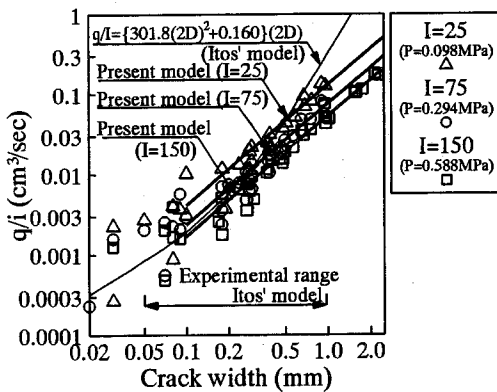


Fig.6 Comparison Itos' model with calculated and experimental result

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、ひび割れが不連続となっている箇所をまとめたものを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。コンクリートの引張りひび割れ進展(ひび割れとひび割れ幅の連続性)に関するHordijk等⁹⁾やPetersson¹⁰⁾の結果を参照すれば、ひび割れ幅が0.2mm以上ではコンクリート

中に1本のひび割れが連続していると考えられる。

以上より、水理学的に観ればひび割れ幅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、正規分布であるという結果を得た。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画像処理による平均ひび割れ幅とほぼ一致していると考えられる。そこで、Fig.1に示すモデル図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(15)より定義された平均流速 U_m は、

$$U_m = \alpha(DI)^{1/2} \quad (16)$$

のように表され、 α は

$$\alpha = \frac{1}{k} \{g(1-k/D)\}^{1/2} \frac{[(D/k)\{\ln(D/k) - 1\} + 1]}{(D/k)} \quad (17)$$

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。またこのとき、相対粗度の値として $k/D = 0.34$ を得る。結果的に、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。

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等の研究報告^{11)～13)}を例にとり、伊藤等の式と圧力 $P=1\text{kgf/cm}^2$ (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(16)による計算結果をFig.6に示す。図中に示す放物線は、伊藤等がひび割れ幅0.05mm～1.00mmの実験結果から導いた漏水量予測¹¹⁾である。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等の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 数 $>50\sim60$) 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。

5. トンネルモデルによる漏水量の計算例

Fig.7は、トンネル内への水分移動を模式化した図である。トンネル内への水分移動は、ひび割れからの漏水、コンクリート表面から浸透してくる水分、コンクリート表面での水の蒸発等がある。ここでは、乱流浸透モデルを用いてトンネルのひび割れからの漏水量とコンクリート母材を通じての浸透量に及ぼす、コンクリートおよび地山の透水係数、トンネルの深さ、ひび割れ幅の影響について検討した。そのためのトンネルモデルを、Fig.8に示す。トンネルは、内半径4m、覆工厚0.4mの円形とし、均一な透水性を持った単一地盤内にあるものとする。コンクリート母材を通じての単位面積当たりの漏水量 q は、佐藤¹⁴⁾の式を用いて計算される。すなわち、

$$q = \frac{2\pi k' P}{\ln\{(D'+R)/R\}} \quad (18)$$

となる。ここに、 D' :覆工厚、 R :内半径、 k' :コンクリートの透水係数、 P :トンネル覆工の外側表面に作用する圧力である。この圧力 P は次式で与えられる。

$$P = \frac{k_g H \ln\left(\frac{R+D}{R}\right)}{\ln(2H/R) + (k_g/k') \ln\{(D'+R)/R\}} \quad (19)$$

ここに、 k_g :地山の透水係数、 H :地下水位表面から覆工外側表面までの鉛直距離である。

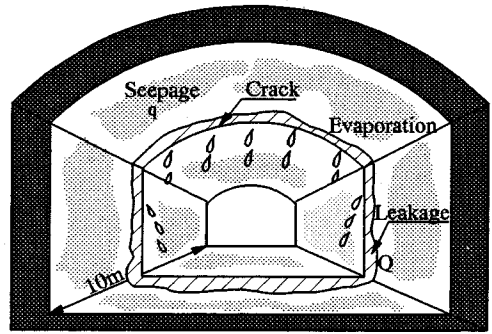


Fig.7 Tunnel with crack

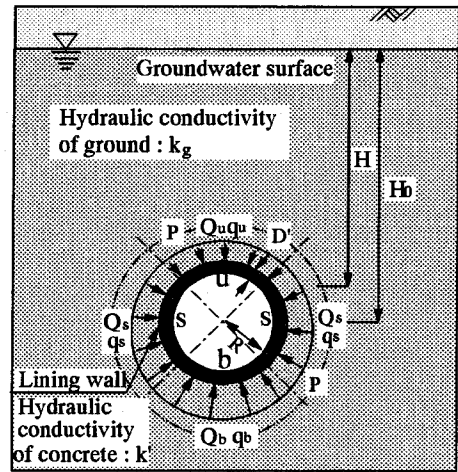


Fig.8 Tunnel model

一方、単位長さ当たりのひび割れからの漏水量 Q は、本研究で求めた式(16)の平均流速 U_m を用いて

$$Q = U_m 2D = \alpha(DI)^{1/2} 2D \quad (20)$$

と表される。トンネル内側は大気圧とすると、動水勾配 I は式(14)に等しい。

円周に渡る平均漏水量を簡便に算出するために、Fig.8のようにトンネルを上下側面の4等分に分割し、各部分の q , Q の代表値を q_u , q_b , q_s および Q_u , Q_b , Q_s で近似する。これらの値は、Fig.8の上部 u 、底部 b 、側方部 s に相当する位置で得られたものである。トンネル円周に渡る平均漏水量 \bar{Q} および \bar{q} は便宜的に次式でそれぞれ計算される。

$$\bar{Q} = (Q_u + 2Q_s + Q_b)/4 \quad (21)$$

$$\bar{q} = (q_u + 2q_s + q_b)/4 \quad (22)$$

ひび割れがトンネル長さ L 毎に1本あると仮定するとトンネル内への総漏水量 $\bar{Q} + \bar{q}$ は式(21)および式(22)より

$$\begin{aligned} \bar{Q} + \bar{q} &= (2\pi R')\bar{Q} + (2\pi R)L\bar{q} \\ &= 2\pi R'(Q_u + 2Q_s + Q_b)/4 \\ &\quad + 2\pi R'L(q_u + 2q_s + q_b)/4 \end{aligned} \quad (23)$$

で表される。ここに、 $R' = R + D'/2$ である。

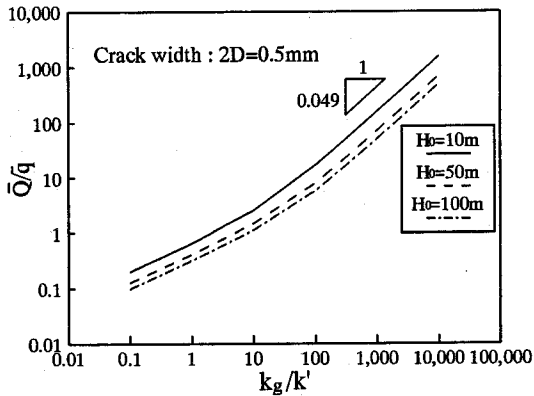


Fig. 9 Relation between \bar{Q}/\bar{q} and k_g/k'

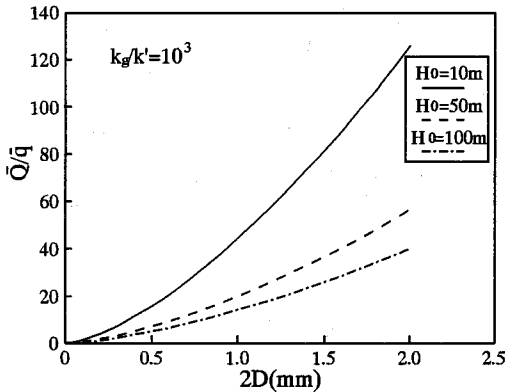


Fig. 10 Relation between \bar{Q}/\bar{q} and $2D$

Fig. 9は、地山とコンクリートの透水係数比 k_g/k' をパラメータとして、トンネル中心からの地下水位高さ $H_0=10\text{m}, 50\text{m}, 100\text{m}$ における \bar{Q}/\bar{q} の関係を示す。ここで、地山の透水係数 k は $10^{-9}(\text{m/s})$ とする。 k_g/k' が大きくなるにつれて、 \bar{Q}/\bar{q} は大きくなり、例えば $k_g/k'=10^2$ の場合、 \bar{Q}/\bar{q} は約6~16倍、 $k_g/k'=10^4$ の場合、490~1560倍となり、コンクリート母材を通じた平均漏水量はひび割れからの平均漏水量に比べると極めて小さくなる。コンクリートの透水係数は $10^{-12}(\text{m/s})$ 程度以下とされるので^{15), 16)}、一般的なトンネルでは、 k_g/k' は 10^3 程度以上と予想される。よって、トンネル内への漏水量は主としてひび割れによる漏水によって決定されると考えられる。

Fig. 10は、 $k_g/k'=10^3$ におけるひび割れ幅 $2D$ と \bar{Q}/\bar{q} の関係を示したものである。ひび割れ幅が大きくなるにつれては \bar{Q}/\bar{q} は徐々に増加している。これはコンクリート母材と通じたの漏水量 q はひび割れ幅 $2D$ に無関係であり、ひび割れからの漏水量 Q が式(20)からわかるように、ひび割れ半幅 D の $3/2$ 乗に比例しているためである。

Fig. 11に、 $k_g/k'=10^3$ 、 $2D=0.5\text{mm}$ における H_0/R と \bar{Q}/\bar{q} の関係を示す。地下水位が大きくなるにつれて \bar{Q}/\bar{q} は減少していく。この \bar{Q}/\bar{q} の減少はコンクリート母

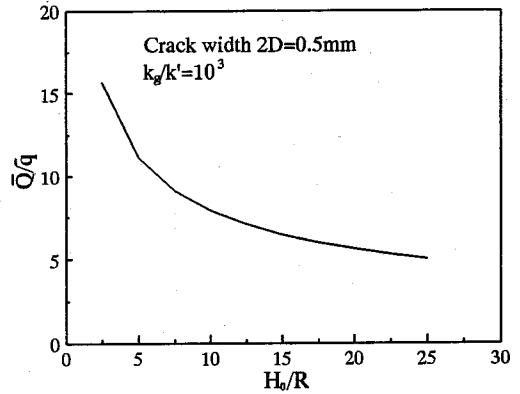


Fig. 11 Relation between $\bar{Q} + \bar{q}$ and H_0/R

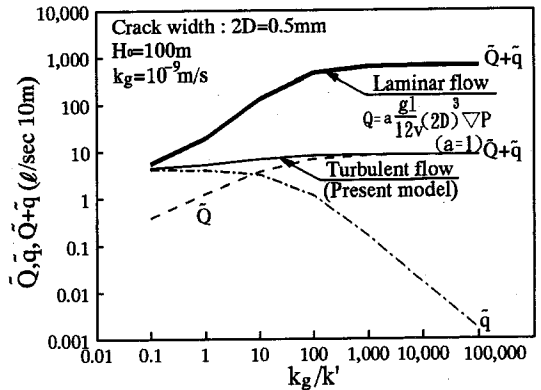


Fig. 12 Relation between $\bar{Q} + \bar{q}$ and k_g/k'

材を通じての漏水量 q が圧力 P に正比例する一方、 Q は P の $1/2$ 乗に正比例するために、 Q に比べて q の増分が大きいことに起因する。

Fig. 12は、トンネル内への総漏水量 $\bar{Q} + \bar{q}$ と k_g/k' の関係を一般的な層流の式⁸⁾および本乱流浸透モデルの式についてそれぞれ比較したものである。なお、図中の実線は $\bar{Q} + \bar{q}$ を、破線は \bar{Q} を、一点鎖線は \bar{q} をそれぞれ表す。また、 H_0 は 100m とする。本乱流浸透モデルで求めたトンネル内への総漏水量は k_g/k' が大きくなって大きな増加は見られない。この原因としては、

- (i) k_g/k' が大きくなるにつれて式(19)でわかるようにトンネル覆工外側表面に作用する圧力 P が増大するために \bar{Q} は増大する。ただし、圧力 P は k_g/k' の増大とともに一定値(静水圧値)に漸近することから \bar{Q} も一定値に近づく。
- (ii) \bar{q} は k_g/k' が大きくなるにつれて、当然のことながら減少する。

ためである。例えば、 $\bar{Q} + \bar{q}$ は $k_g/k'=10^3$ のときは約 $8 \text{ l}/10\text{m}\cdot\text{sec}$ となる。一方、層流の式では k/k' が大きくなるにつれて $\bar{Q} + \bar{q}$ は増加し、 $k_g/k'=10^3$ 付近から一定値(約 $640 \text{ l}/10\text{m}\cdot\text{sec}$)に漸近する。一般に透水係数比 k_g/k' は 10^3 以上あると考えられるので、

その際、層流の式から求まる総漏水量は、本乱流浸透モデルのその約80倍となり、おおよそオーダーの過大評価となる。

6. まとめ

本研究では、コンクリートひび割れからの漏水特性を実験的、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。
- (3) 一般に、トンネル内への総漏水量は、コンクリート母材を通じたの漏水量よりもひび割れからの漏水量により支配される。

実際問題となるひび割れ幅は0.1mm～0.2mm以上であり、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。しかしながら今回の解析は相対粗度を一定と考えているため、骨材の最大寸法等のコンクリート配合により値が変化することが考えられ、この点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) 伊藤 洋, 坂口雄彦, 西山勝栄, 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) C.Louis: A Study of Groundwater Flow in Jointed Rock and Its Influence on The Stability of Rock Mass, *Imperial ollege Rept.*, London, No.10, Sept.1969.
- 5) Nikuradse, J. Turbulente Strömung in nicht kreisförmigen Rohren, *Ing.-Arch.*, pp.306-332, 1930.
- 6) Colebrook, C.F. and White, C.M.: Experiments with fluid friction in roughened pipes, *Proc. Royal Soc. A. London*, 1937.
- 7) A. F. Kimbrell and W. O. Miller: Laboratory and Field Assessment of Non-linear pressure flow relationships, *28th US Symposium on Rock Mechanics/Tucson*
- 8) 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, 1987.
- 9) Hordijk, D.A., Reinhardt, H.W. and Cornelissen, H.A.W.: Fracture mechanics parameters of concrete from uniaxial tensile tests as influenced by specimen length, *In Fracture of Concrete and Rock (Eds. S.P. Shah and S.E. Swartz)*, Preprint SEM-RICEM Int. Conf., Bethel, 1987.
- 10) Petersson, P.E.: Crack growth and development of zones in plain concrete and similar materials, *Report TVBM-1006, Lund Inst. of Technology*, Sweden 1981.
- 11) 伊藤 洋, 坂口雄彦, 西山勝栄, 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 佐藤邦明: グラウトによるトンネル湧水量変化解析, トンネルと地下, Vol.11, No.10, pp.47-52, 1980.10.
- 15) 後藤幸正, 尾坂芳夫: ネビルのコンクリートの特性, 技報堂出版, pp.329-334, 1982.
- 16) 松尾新一郎編: 土中水—理論と対策—, 日刊工業新聞社, 1971.

(1994. 9. 26受付)

MECHANISM AND ESTIMATION OF LEAKAGE THROUGH CONCRETE CRACK

Shigeru MATUOKA, Teruyuki FUKUHARA and Hirofumi YANAGI

The experiment on the 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 the concrete crack was developed from the 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.

Then, to describe the leakage characteristics of deep underground structures, a tunnel model with real field scale and surroundings was proposed and the leakage of the tunnel model was estimated by the present model. The discharge calculated by the present model became less than that calculated by the laminar infiltration theory.