

不均質材料の透水性に関するモデル化と その適用性評価

大下英吉¹・田辺忠顕²

¹正会員 工博 広島大学助手 工学部土木工学科 (〒739 東広島市鏡山1-4-1)

²正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

本研究は、コンクリートの水分移動モデルの詳細な構築を行うことを目的として、コンクリートが外力の作用により均質材料から不均質材料に変化するまでの統一的な水分拡散に関するモデル化の構築を行った。そして、実測値との比較により本モデルの適用性を示すとともに、クラック幅と透水係数との関係式を提案した。本モデルでは、コンクリートを骨材、セメントペーストとクラックバンドから成る複合材料として捉え、ひび割れ面における変位と動水勾配の不連続性をミクロレベルにおいて考慮した。さらに、本モデルは、若材齢コンクリートから硬化したコンクリートに至るまで適用可能な一般性のあるモデルとして構築を行った。

Key Words : water migration, composite material, crack width, permeability, crack band, leakage water, homogeneous material, nonhomogeneous material

1. はじめに

近年、大深度地下構造物や海洋構造物など新たなコンクリート構造の利用が注目されている。しかし、コンクリート構造物の水密性、特にひび割れ面からの漏水は、構造物の安全性や美観を損なうばかりでなく、構造機能や防食性能にも重大な影響を及ぼす。例えば、原子力発電所から生成される放射性廃棄物の処理施設の設計を考えてみれば、この種の問題点が一層明らかになる。このような問題は、均質あるいは不均質材料としてのコンクリートの水分移動問題であるが、水分移動はコンクリートを組織する空隙に均一に生じるというよりも、むしろマイクロあるいはマクロクラックなどの流れ易い特定のクラックを通って急速に広がっていくと考えられ、單一クラックに関する透水性の評価が、不可欠であるものと思われる。

均質材料としてのコンクリートの透水性に関する研究には、透水係数を実験的に評価した村田の研究¹⁾やT.C.Powersの研究²⁾などが挙げられる。村田は、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水セメント比の関係を報告している。また、T.C.Powersは、水セメント比が70%の硬化コンクリートに対する透水試験を行ない、材齢と透水係数との関係を報告している。両者の研究はいずれも、解析において均質材料としてのコンクリートに用いる初期透水係数を決定する際に、非常に有用で

あるものと考えられる。一方、不均質材料としてのコンクリートの透水性に関する研究には、一本の貫通ひび割れからの漏水量を実験式により表した石川³⁾、渡部⁴⁾あるいは伊藤ら⁵⁾の研究がある。石川、渡部、伊藤らは、供試体の形状寸法、水の粘性係数、ひび割れ定数および作用水圧の関数で、三者ともほぼ似た形をした漏水量の算定式を提案している。石川、渡部らは、低水圧下 (0.2kgf/cm^2 以下) における実験により算定式の妥当性を示していることに対して、伊藤らは高水圧下 (2.0kgf/cm^2 以下) における算定式の妥当性を示している。しかしながら、三者とも用いた供試体や実験方法の違いなどから、提案式はいずれも若干異なっており、またいずれの算定式においてもひび割れ定数なる不確定因子が含まれている。すなわち、現時点においては統一的な算定式は無いものと思われる。さらに、一般的のコンクリートのように、外力が作用した場合に発生するひび割れは離散型ひび割れであり、貫通ひび割れもあれば多数の表面ひび割れも存在する。したがって、上記の算定式を各ひび割れ幅に適用し、各々の和で総漏水量を定義することはできない。すなわち、ひび割れ幅と漏水量の関係式よりも、むしろひび割れの分布性状と透水係数の関係式の方が、解析的に総漏水量を予測する際に重要となってくるものと思われる。すなわち、均質部分およびひび割れ部分を同時に取り扱ったマクロ的透水係数の評価あるいは同時に取り扱える解析手法の開発が重要であると考え

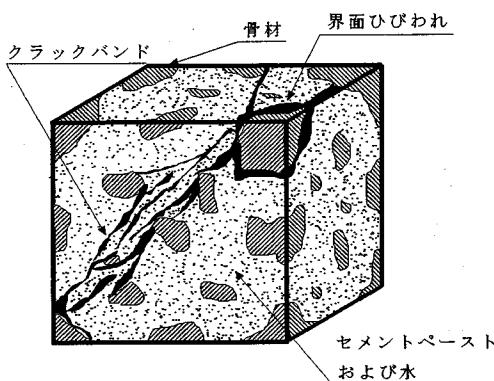


図-1 不均質材料としてのコンクリート

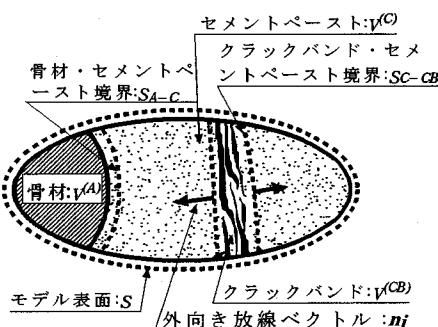


図-2 不均質コンクリートのモデル化

られる。

本研究では、まずコンクリートが均質材料から不均質材料に至るまでの統一的な水分移動に関する解析理論の構築を行った。これは、先に述べたコンクリートの均質部分やひび割れ部分の透水性状をマクロ的に評価し得るものである。そして、本解析理論を渡部の漏水量実験結果に適用し各ひび割れ幅に対する透水係数を解析的に評価し、本解析理論がひび割れ一本部分の局所的な透水性状も表し得ることを示した。そして、解析的に得られた透水係数を用いて、伊藤らが行った実験に対する漏水量の解析的評価を行い、適用性の検証を行うとともに、不均質材料としてのコンクリートのひび割れ幅と透水係数との関係式についても提案を行っている。

2. 不均質材料としてのコンクリートのモデル化

不均質材料としてのコンクリートは、図-1に示

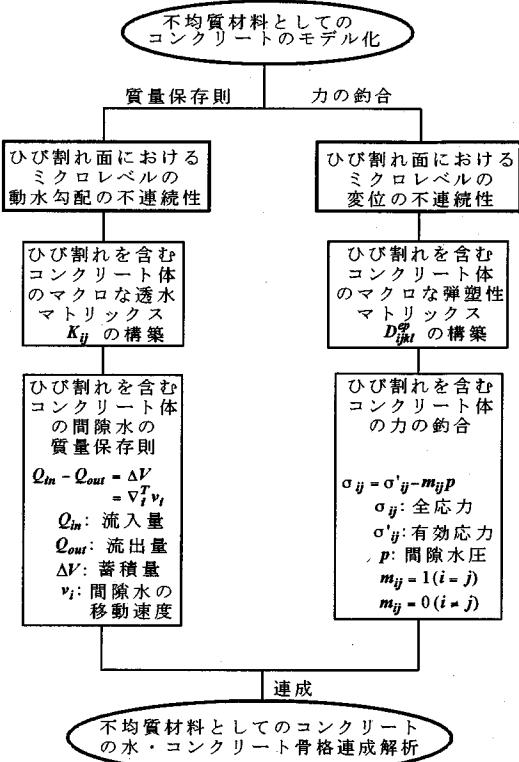


図-3 解析理論構築までの流れ

すように骨材、セメントベースト、液体、骨材とセメントベーストとの界面に生じるひび割れ群（界面ひび割れ）および破壊面を形成するクラックバンドの5成分から成る多孔質複合材料である。本研究では、不均質材料としてのコンクリートに対して、図-2に示すようなモデル化を行った。このモデル化においては、コンクリート内に発生するひび割れは、破壊面となるクラックバンドおよび界面ひび割れの2種類とした。なお、モデル化の際に使用する各成分を表す記号の定義は、骨材、セメントベースト、液体、界面ひび割れおよびクラックバンドに対して、それぞれA(Aggregate), C(Cement paste), W(Water), IC(Interfacial Crack), およびCB(Crack Band)とした。また、図-2に示す、 $V^{(A)}$, $V^{(C)}$, $V^{(CB)}$ はそれぞれ骨材、セメントベーストおよびクラックバンドの体積であり、 S , S_{A-C} , S_{C-CB} はそれぞれ構造体の全表面領域、骨材とセメントベーストとの境界領域面積、およびセメントベーストとクラックバンドとの境界領域面積を表している。そして、図-3に示すように、ひび割れ面における変位と動水勾配の不連続性をミクロレベルにおいて考慮することにより、ひび割れを含むコンクリート体の透水マトリックスおよび弾塑性マトリックスの構築を行い、最終的に、間隙水の質量保存則と力の釣合を連成させることにより不均質材料としてのコンクリートに関する解析理論の構築を行った。

(1) 透水特性に関する定式化

平均的なマクロな動水勾配増分 $d\bar{t}_i$ は、ミクロな動水勾配増分 $d\bar{t}_n$ により次式のように表すことができる。

$$d\bar{t}_i = \frac{1}{V} \int_V d\bar{t}_i dV \quad (1)$$

ここで、 V はコントロール体積である。式(1)は、図-1に示す各成分により次式のように表すことができる。

$$d\bar{t}_i = C_1 \cdot d\bar{t}_i^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{t}_i^{(C)} + C_3 \cdot d\bar{t}_i^{(CB)} + X_i \quad (2)$$

ここで、 C_1, C_2, C_3 は、それぞれコントロール体積に占める骨材、セメントペーストおよびクラックバンドの体積の割合である。 $d\bar{t}_i^{(A)}, d\bar{t}_i^{(C)}, d\bar{t}_i^{(CB)}$ は次式で示される骨材、セメントペーストおよびクラックバンドのミクロレベルの平均動水勾配増分を表している。なお、式中の α は骨材 A 、セメントペースト C 、クラックバンド CB である。

$$d\bar{t}_i^{(\alpha)} = \frac{1}{V^{(\alpha)}} \int_{V^{(\alpha)}} d\bar{t}_i^{(\alpha)} dV \quad (3)$$

さらに、 X_i は図-2に示す各境界における動水勾配の不連続量を表しており、ひび割れが発生していない場合には $d\bar{t}_i^{(CB)}$ とともにゼロとなる。式(2)の右辺第一～三項までのミクロレベルの平均動水勾配増分 $d\bar{t}_i^{(\alpha)}$ ($\alpha = A, C, CB$) は、全水頭増分 $dh^{(\alpha)}$ により次式で表される。

$$\begin{aligned} d\bar{t}_i^{(\alpha)} &= \nabla_i dh^{(\alpha)} = dh_j^{(\alpha)} \\ dh^{(\alpha)} &= dz^{(\alpha)} + \frac{dP^{(\alpha)}}{\gamma_w} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 α は A, C, CB であり、 γ_w は液体の単位体積重量である。式(3)、(4)を式(2)に代入すると、式(2)中の右辺第一～三項までの和は次式のようになる。

$$\begin{aligned} C_1 \cdot d\bar{t}_i^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{t}_i^{(C)} + C_3 \cdot d\bar{t}_i^{(CB)} &= \\ \frac{1}{V} \left(\int_{V^{(A)}} dh_j^{(A)} dV + \int_{V^{(C)}} dh_j^{(C)} dV + \int_{V^{(CB)}} dh_j^{(CB)} dV \right) \end{aligned} \quad (5)$$

そして、式(5)の右辺各項に次式で示す Gauss の発散定理

$$\int_V \nabla_i dh dV = \int_V dh_j dV - \int_S dh n_i dS \quad (6)$$

を適用し、図-2に示すようにクラックバンド表面における外向き法線ベクトル n_i を正とすると、式

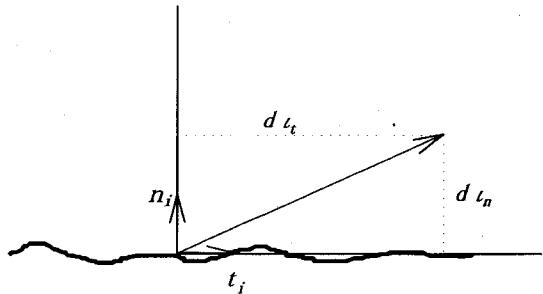


図-4 ひび割れ面における動水勾配成分

(5)は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} C_1 \cdot d\bar{t}_i^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{t}_i^{(C)} + C_3 \cdot d\bar{t}_i^{(CB)} &= \\ \frac{1}{V} \int_S dh n_i dS + \frac{1}{V} \int_{S^{A-C}} [dh]_A^C n_i dS + \frac{2}{V} \int_{S^{C-CB}} [dh]_C^{CB} n_i dS \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 S は図-2に示す全表面領域面積を表し、 S^{A-C}, S^{C-CB} はそれぞれ骨材とセメントペーストおよびセメントペーストとクラックバンド間の境界領域面積を表している。また、 $[dh]_A^C, [dh]_C^{CB}$ はそれぞれ骨材とセメントペーストおよびセメントペーストとクラックバンド間における全水頭の不連続量を表している。

また、式(7)の右辺第一項は、式(6)からわかるように平均的なマクロな動水勾配増分 $d\bar{t}_i$ を表しており、次式のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} d\bar{t}_i &= C_1 \cdot d\bar{t}_i^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{t}_i^{(C)} + C_3 \cdot d\bar{t}_i^{(CB)} - \frac{1}{V} \int_{S^{A-C}} [dh]_A^C n_i dS \\ &\quad - \frac{2}{V} \int_{S^{C-CB}} [dh]_C^{CB} n_i dS \end{aligned} \quad (8)$$

したがって、式(2)中の X_i は式(8)中の右辺第四、五項の和となる。いま、図-4に示すようにひび割れ面における動水勾配増分 $d\bar{t}_i$ を、次式のように定義する。

$$d\bar{t}_i = d\bar{t}_n n_i + d\bar{t}_t t_i \quad (9)$$

ここで、 $d\bar{t}_n, d\bar{t}_t$ はそれぞれひび割れ面に垂直および平行な動水勾配成分であり、 n_i, t_i はそれぞれひび割れ面に垂直および平行な単位ベクトルである。次に、全水頭の不連続量 $[dh]_A^C, [dh]_C^{CB}$ を次式のように仮定する。

$$\begin{aligned} [dh]_A^C &= V \cdot a \cdot \omega \cdot d\bar{t}_n \\ [dh]_C^{CB} &= V/2 \cdot b \cdot \omega \cdot d\bar{t}_n \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 a, b は不連続性すなわちひび割れ幅に依存する導水勾配の低減率の程度を表す材料定数である。また、 ω は損傷の程度を表すパラメータ⁶⁾ である。さらに、ひび割れ面に垂直な動水勾配成分 $d\bar{v}_i$ は、平均的なマクロな動水勾配増分 $d\bar{v}_i$ により次式のように定義できる。

$$d\bar{v}_i = d\bar{v}_i \cdot n_i \quad (11)$$

式(10), (11)を式(8)に代入し、全体積に占めるクラックバンドの体積は無視できる($C_3 = 0$)と仮定すると、式(8)は次式のようになる。

$$d\bar{v}_i = C_1 \cdot d\bar{v}_i^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{v}_i^{(C)} - A_{ij} d\bar{v}_j - B_{ij} d\bar{v}_j \quad (12)$$

ここで、ひび割れ面による動水勾配の不連続量の程度を表すマトリックス A_{ij}, B_{ij} は、それぞれ次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \int_{S^{A-C}} c \omega \gamma_{ij} dS \\ B_{ij} &= \int_{S^{C-CB}} d \omega \gamma_{ij} dS \\ \gamma_{ij} &= n_i n_j \end{aligned} \quad (13)$$

なお、次式に示すようにひび割れ面における面積積分に Micro Plane Model⁷⁾ を適用することにより、多数のひび割れが一度に考慮されることになる。

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \int_0^{2\pi} c \omega \gamma_{ij} A_i^{A-C} \Omega^{A-C}(\theta) d\theta \\ B_{ij} &= \int_0^{2\pi} d \omega \gamma_{ij} A_i^{C-CB} \Omega^{C-CB}(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 $\Omega^{A-C}(\theta), \Omega^{C-CB}(\theta)$ および A_i^{A-C}, A_i^{C-CB} は、それぞれ骨材とセメントペースト間に生じる界面ひび割れとクラックバンドにおける接触密度関数および単位ひび割れ平面当たりの全表面積である。このように、Micro Plane Modelをひび割れ面における面積積分に適用することにより、一本のひび割れのみでなく、何本ものひび割れにおける動水勾配の不連続量を一度に評価することが可能となる。

そして、式(12)の右辺第一、二項のミクロレベルでの平均動水勾配増分 $d\bar{v}_i^{(A)}, d\bar{v}_i^{(C)}$ に次式で示す Darcy の式

$$\begin{aligned} d\bar{v}_i^{(A)} &= K_{ij}^{(A)} d\bar{v}_j^{(A)} \\ d\bar{v}_i^{(C)} &= K_{ij}^{(C)} d\bar{v}_j^{(C)} \end{aligned} \quad (15)$$

を代入すると式(12)は次式のようになる。

$$\begin{aligned} d\bar{v}_i &= C_1 \cdot K_{ik}^{(A)-1} d\bar{v}_k^{(A)} + C_2 \cdot K_{ik}^{(C)-1} d\bar{v}_k^{(C)} \\ &\quad - A_{ij} d\bar{v}_j - B_{ij} d\bar{v}_j \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $K_{ij}^{(A)}, K_{ij}^{(C)}$ はそれぞれ骨材およびセメントペーストの透水マトリックスであり、 $d\bar{v}_i^{(A)}, d\bar{v}_i^{(C)}$ はそれぞれ骨材およびセメントペーストのミクロレベルの平均流速増分である。

また、式(16)中の動水勾配 $d\bar{v}_i$ の指標 i を j に変換すると次式のようになる。

$$\delta_{ij} d\bar{v}_j = C_1 \cdot K_{ik}^{(A)-1} d\bar{v}_k^{(A)} + C_2 \cdot K_{ik}^{(C)-1} d\bar{v}_k^{(C)} - A_{ij} d\bar{v}_j - B_{ij} d\bar{v}_j \quad (17)$$

そして、上式の右辺第三、四項を左辺に移項して整理すると次式のようになる。

$$Q_{ij} d\bar{v}_j = C_1 \cdot K_{ik}^{(A)-1} d\bar{v}_k^{(A)} + C_2 \cdot K_{ik}^{(C)-1} d\bar{v}_k^{(C)} \quad (18)$$

ここで、 Q_{ij} はひび割れによる動水勾配の低減率を表すマトリックスであり、次式のように表すことができる。

$$Q_{ij} = \delta_{ij} + A_{ij} + B_{ij} \quad (19)$$

いま、平均的なマクロな流速増分 $d\bar{v}_i$ とミクロレベルの平均流速増分 $d\bar{v}_i^{(\alpha)}$ ($\alpha = A, C$) との関係を次式のように定義する。

$$\begin{aligned} d\bar{v}_i^{(\alpha)} &= C_{ij}^{(\alpha)} d\bar{v}_j \\ \alpha &= A, C \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、 $C_{ij}^{(\alpha)}$ ($\alpha = A, C$) を流速集中マトリックスと呼ことにする。なお、平均的なマクロな流速増分 $d\bar{v}_i$ は、式(1), (2)と同じようにミクロな流速増分 $d\bar{v}_i$ やミクロレベルの平均流速増分 $d\bar{v}_i^{(\alpha)}$ を用いて次式のよう表すことができる。

$$d\bar{v}_i = \frac{1}{V} \int_V d\bar{v}_i dV = C_1 \cdot d\bar{v}_i^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{v}_i^{(C)} \quad (21)$$

ここで注意すべきことは、図-2に示す各境界において流速は連続的に変化するものと考え、また C_3 をゼロにしてあることである。式(21)に式(20)を代入すると、骨材とセメントペーストに関する流速集中マトリックスは次式のようになる。

$$C_1 C_{ij}^{(A)} + C_2 C_{ij}^{(C)} = I_{ij} \quad (22)$$

ここで、 I_{ij} は単位マトリックスである。

さらに、式(18)に式(20)を代入すると、式(18)は次式のようになる。

$$Q_{ij} d\bar{v}_j = \left(C_1 \cdot K_{ik}^{(A)-1} C_{kj}^{(A)} + C_2 \cdot K_{ik}^{(C)-1} C_{kj}^{(C)} \right) d\bar{v}_i \quad (23)$$

最終的に、平均的なマクロな流速増分 $d\bar{v}_i$ と平均的なマクロな動水勾配増分 $d\bar{h}_i$ を関係付けるコンクリートの透水マトリックス K_y は、次式のようになる。

$$K_y = \left(C_1 \cdot K_u^{(A)^{-1}} C_m^{(A)} + C_2 \cdot K_u^{(C)^{-1}} C_m^{(C)} \right)^{-1} Q_{mj} \quad (24)$$

なお、式(24)中に示される流速集中マトリックス $C_y^{(A)}, C_y^{(C)}$ は、式(24)と式(22)との連立方程式を解くことにより次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} C_y^{(C)} &= \left\{ C_2 \cdot \left(K_u^{(C)^{-1}} - K_{ik}^{(C)^{-1}} \right) \right\}^{-1} \\ &\quad \left(Q_{ij} - K_{im}^{(A)^{-1}} K_{mj} \right) K_y^{(A)} \\ C_y^{(A)} &= \left(I_{ij} - C_2 \cdot C_y^{(C)} \right) / C_1 \end{aligned} \quad (25)$$

なお、解析においては、式(25)で表される流速集中マトリックス中のコンクリートの透水マトリックス K_y に前ステップの値を代入して流速集中マトリックスを更新する。そして、得られた流速集中マトリックスを式(24)に代入し、新たなコンクリートの透水マトリックス K_y を求める。そして、構造体内部からの流出量と外力項としての流出量とが、釣合い状態になるまで修正Newton-Raphson法により収束計算を行う。

(2) 変形特性に関する定式化

平均的なマクロなひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_y$ は、ミクロなひずみ増分 $d\epsilon_y$ により、次式のように表すことができる。

$$d\bar{\epsilon}_y = \frac{1}{V} \int_V d\epsilon_y dV \quad (26)$$

式(26)は、図-1に示す各成分により次式のように表される。

$$d\bar{\epsilon}_y = C_1 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(C)} + C_3 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(CB)} + X_y \quad (27)$$

ここで、 C_1, C_2, C_3 は、それぞれコントロール体積に占める骨材、セメントペーストおよびクラックバンドの体積の割合である。また、 $d\bar{\epsilon}_y^{(A)}, d\bar{\epsilon}_y^{(C)}, d\bar{\epsilon}_y^{(CB)}$ は次式で表される骨材、セメントペーストおよびクラックバンドのミクロレベルでの平均ひずみ増分を表している。なお、式中の α は骨材 A 、セメントペースト C 、クラックバンド CB である。

$$d\bar{\epsilon}_y^{(\alpha)} = \frac{1}{V^{(\alpha)}} \int_{V^{(\alpha)}} d\epsilon_y^{(\alpha)} dV \quad (28)$$

$\alpha = A, C, CB$

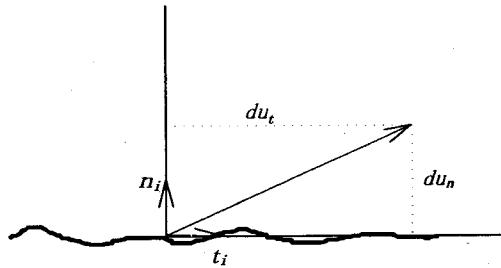


図-5 ひび割れ面における変位成分

さらに、 X_y は図-2に示す各境界におけるひずみの不連続量を表しており、ひび割れが発生していない場合には $d\bar{\epsilon}_y^{(CB)}$ とともにゼロとなる。式(27)中の右辺第一～三項までのミクロレベルでの平均ひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_y^{(\alpha)}$ ($\alpha = A, C, CB$) にひずみ～変位関係を代入すると次式のようになる。

$$C_1 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(C)} + C_3 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(CB)} = \frac{1}{V} \left\{ \frac{1}{2} \int_{V^{(A)}} (du_{ij}^{(A)} + du_{ji}^{(A)}) dV + \frac{1}{2} \int_{V^{(C)}} (du_{ij}^{(C)} + du_{ji}^{(C)}) dV + \frac{1}{2} \int_{V^{(CB)}} (du_{ij}^{(CB)} + du_{ji}^{(CB)}) dV \right\} \quad (29)$$

ここで、 $d\bar{u}_i^{(\alpha)}$ ($\alpha = A, C, CB$) は骨材、セメントペーストおよびクラックバンドのミクロな変位増分を表している。そして、式(29)の右辺の各項にGaussの発散定理を適用し、図-2に示すようにクラックバンド表面における外向き法線ベクトル n_i を正とすると式(29)は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} C_1 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(C)} + C_3 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(CB)} &= \frac{1}{V} \frac{1}{2} \int_S (du_i n_j + du_j n_i) dS + \\ &\quad \frac{1}{2V} \int_{S_{A-C}} ([du_i]_A^C n_j + [du_j]_A^C n_i) dS + \frac{1}{V} \int_{S_{C-CB}} ([du_i]_C^{CB} n_j + [du_j]_C^{CB} n_i) dS \end{aligned} \quad (30)$$

ここで、 S は図-2に示す全表面領域を表し、 S_{A-C} 、 S_{C-CB} は、それぞれ同図に示す骨材とセメントペーストおよびセメントペーストとクラックバンドの境界領域を表している。また、 $[du_i]_A^C, [du_j]_C^{CB}$ はそれぞれセメントペーストと骨材およびセメントペーストとクラックバンド間における変位の不連続量を表している。なお、式(30)の右辺第一項は、平均的なマクロなひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_y$ すなわち式(26)を表しており、式(30)は次式のようになります。

$$\begin{aligned} d\bar{\epsilon}_y &= C_1 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(C)} + C_3 \cdot d\bar{\epsilon}_y^{(CB)} - \frac{1}{2V} \int_{S_{A-C}} ([du_i]_A^C n_j + [du_j]_A^C n_i) dS \\ &\quad - \frac{1}{V} \int_{S_{C-CB}} ([du_i]_C^{CB} n_j + [du_j]_C^{CB} n_i) dS \end{aligned} \quad (31)$$

したがって、式(27)中の X_y は式(31)中の右辺第四、

五項の和となる。いま、図-5に示すようにひび割れ面における変位ベクトル増分 du_i を次式のように定義する。

$$du_i = du_n n_i + du_t t_i \quad (32)$$

ここで、 du_n, du_t はそれぞれひび割れ面に垂直および平行な変位成分であり、 n_i, t_i はそれぞれひび割れ面に垂直および平行な単位ベクトルである。式(32)を式(31)に代入し、全体積に占めるクラックバンドの体積は無視できる($C_3 = 0$)と仮定すると、式(31)は式(33)のようになる。

$$\begin{aligned} d\bar{\epsilon}_{ij} &= C_1 \cdot d\bar{\epsilon}_{ij}^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{\epsilon}_{ij}^{(C)} - A'_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} - B'_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} \\ &- \frac{2}{V} \int_{S^{C-CB}} [du_n]_c^{cb} \alpha_{ij} dS - \frac{1}{V} \int_{S^{C-CB}} [du_t]_c^{cb} \beta_{ij} dS \quad (33) \\ \alpha_{ij} &= n_j n_i \\ \beta_{ij} &= t_j n_i + n_j t_i \end{aligned}$$

ここで、 $[du_n]_A^c, [du_t]_A^c$ はそれぞれセメントペーストと骨材間におけるひび割れ面に垂直および平行な変位増分の不連続量であり、 $[du_n]_C^{cb}, [du_t]_C^{cb}$ はセメントペーストとクラックバンド間における変位増分の不連続量である。いま、上記に示した変位増分の不連続量を次のように定義する。

$$\begin{aligned} [du_n]_A^c &= V \cdot \omega_1 \cdot d\epsilon_n \\ [du_t]_A^c &= 2V \cdot \omega_2 \cdot d\epsilon_t \\ [du_n]_C^{cb} &= \frac{V}{2} \cdot \omega_1 \cdot d\epsilon_n \\ [du_t]_C^{cb} &= V \cdot \omega_2 \cdot d\epsilon_t \quad (34) \end{aligned}$$

ここで、 $d\epsilon_n, d\epsilon_t$ はそれぞれひび割れ面に垂直および平行なひずみ成分を表しており、 ω_1, ω_2 はそれぞれ次式のように仮定した。

$$\begin{aligned} \omega_1 &= e^{\left(\frac{de_n}{c}\right)} - 1 \\ \omega_2 &= e^{\left(\frac{de_t}{d}\right)} - 1 \quad (35) \end{aligned}$$

ここで、 c, d は不連続性すなわちひび割れによるひずみの局所化の程度を表す材料定数である。また、 ω_1, ω_2 は平均的なマクロなひずみ増分とミクロレベルにおけるひび割れ幅の関係を表すものである。さらに、ひび割れ面に垂直および平行なひずみ成分 $d\epsilon_n, d\epsilon_t$ は、平均的なマクロなひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_{ij}$ により、それぞれ次式のように定義できる。

$$\begin{aligned} d\epsilon_n &= d\bar{\epsilon}_{ij} \cdot n_i \cdot n_j \\ d\epsilon_t &= d\bar{\epsilon}_{ij} \cdot (t_i n_j + n_i t_j) / 2 \quad (36) \end{aligned}$$

式(34)～式(36)を式(33)に代入すると次式のようになる。

$$d\bar{\epsilon}_{ij} = C_1 \cdot d\bar{\epsilon}_{ij}^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{\epsilon}_{ij}^{(C)} - A'_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} - B'_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} \quad (37)$$

ここで、ひび割れ面によるひずみの不連続量の程度を表すマトリックス A'_{ij}, B'_{ij} は、それぞれ次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} A'_{ijkl} &= \int_{S^{A-C}} (\omega_1 \alpha'_{ijkl} + \omega_2 \beta'_{ijkl}) dS \\ B'_{ijkl} &= \int_{S^{C-CB}} (\omega_1 \alpha'_{ijkl} + \omega_2 \beta'_{ijkl}) dS \\ \alpha'_{ijkl} &= n_i n_j n_k n_l \\ \beta'_{ijkl} &= (t_i n_j + n_i t_j)(t_k n_l + n_k t_l) / 2 \quad (38) \end{aligned}$$

なお、式(14)と同じように複数のひび割れを一度に考慮するために、ひび割れ面における面積積分に Micro Plane Model を適用すると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} A'_{ijkl} &= \int_0^{2\pi} (\omega_1 \alpha'_{ijkl} + \omega_2 \beta'_{ijkl}) A_i^{A-C} \Omega^{A-C}(\theta) d\theta \\ B'_{ijkl} &= \int_0^{2\pi} (\omega_1 \alpha'_{ijkl} + \omega_2 \beta'_{ijkl}) A_i^{C-CB} \Omega^{C-CB}(\theta) d\theta \quad (39) \end{aligned}$$

なお、上式中の $\Omega^{A-C}(\theta), \Omega^{C-CB}(\theta)$ および A_i^{A-C}, A_i^{C-CB} は、式(14)中のものと同じである。

式(37)の右辺第一、二項のミクロレベルの平均ひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_{ij}^{(A)}, d\bar{\epsilon}_{ij}^{(C)}$ に次式で示す応力～ひずみ関係

$$\begin{aligned} d\bar{\sigma}_{ij}^{(A)} &= D_{ijkl}^{(A)} d\bar{\epsilon}_{kl}^{(A)} \\ d\bar{\sigma}_{ij}^{(C)} &= D_{ijkl}^{(C)} d\bar{\epsilon}_{kl}^{(C)} \quad (40) \end{aligned}$$

を代入すると式(37)は次式のようになる。

$$d\bar{\epsilon}_{ij} = C_1 \cdot D_{lmn}^{(A)-1} d\bar{\sigma}_{mn}^{(A)} + C_2 \cdot D_{lmn}^{(C)-1} d\bar{\sigma}_{mn}^{(C)} - A'_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} - B'_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} \quad (41)$$

ここで、 $D_{ijkl}^{(A)}, D_{ijkl}^{(C)}$ はそれぞれ骨材の弾性マトリックスおよびセメントペーストの弾塑性マトリックスであり、 $d\bar{\sigma}_{ij}^{(A)}, d\bar{\sigma}_{ij}^{(C)}$ はそれぞれ骨材およびセメントペーストのミクロレベルでの平均応力増分である。また、式(41)中のひずみ成分の指標 i, j を、それぞれ k, l に変換すると次式のようになる。

$$\delta_{ik} \delta_{jl} d\bar{\epsilon}_{kl} = C_1 \cdot D_{lmn}^{(A)-1} d\bar{\sigma}_{mn}^{(A)} + C_2 \cdot D_{lmn}^{(C)-1} d\bar{\sigma}_{mn}^{(C)} - A'_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} - B'_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} \quad (42)$$

そして、上式の右辺第三、四項を左辺に移項して整理すると次式のようになる。

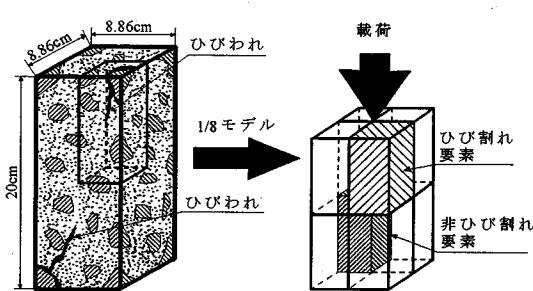


図-6 数値シミュレーションの解析モデル

$$\begin{aligned} Q_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} &= C_1 D_{ijkl}^{(A)-1} d\sigma_{mn}^{(A)} + C_2 D_{ijkl}^{(C)-1} d\sigma_{mn}^{(C)} \quad (43) \\ Q'_{ijkl} &= R_{ijkl} + A_{ijkl} + B_{ijkl} \end{aligned}$$

いま、平均的なマクロな応力増分 $d\bar{\sigma}_y$ とミクロレベルでの平均応力増分 $d\bar{\sigma}_y^{(\alpha)}$ ($\alpha = A, C$)との関係を次式のように定義する。

$$d\bar{\sigma}_y^{(\alpha)} = C_{ijkl}^{(\alpha)} d\bar{\sigma}_{kl} \quad (44)$$

$\alpha = A, C$

ここで、 $C_{ijkl}^{(\alpha)}$ を応力集中マトリックスと呼ぶことにする。なお、平均的なマクロな応力増分 $d\bar{\sigma}_y$ は、式(26), (27)と同じようにミクロな応力増分 $d\sigma_y$ やミクロレベルの平均応力増分 $d\bar{\sigma}_y^{(\alpha)}$ ($\alpha = A, C$)を用いて次式のように表すことができる。

$$d\bar{\sigma}_y = \frac{1}{V} \int d\sigma_y dV = C_1 \cdot d\bar{\sigma}_y^{(A)} + C_2 \cdot d\bar{\sigma}_y^{(C)} \quad (45)$$

ここで注意すべきことは、図-2に示す各境界において応力は連続的に変化するものと考え、また C_3 をゼロにしてあることである。式(45)に式(44)を代入すると、骨材とセメントペーストに関する応力集中マトリックスは次式のようになる。

$$C_1 C_{ijkl}^{(A)} + C_2 C_{ijkl}^{(C)} = I_{ijkl} \quad (46)$$

ここで、 I_{ijkl} は単位マトリックスである。

また、式(43)に式(44)を代入すると、式(43)は次式のようになる。

$$d\bar{\sigma}_y = (C_1 \cdot D_{ijkl}^{(A)-1} C_{stop}^{(A)} + C_2 \cdot D_{ijkl}^{(C)-1} C_{stop}^{(C)})^{-1} Q'_{ijkl} d\bar{\epsilon}_{kl} \quad (47)$$

最終的に、平均的なマクロな応力増分 $d\bar{\sigma}_y$ と平均的なマクロなひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_y$ とを関係づけるコンクリートの弾塑性マトリックス D_{ijkl} は、次式のようになる。

表-1 数値シミュレーションに用いた材料定数

圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	初期透水係数 (cm/sec)	内部摩擦角 (°)	初期粘着力 (kgf/cm ²)
140.0	5.2×10^4	1.67×10^{-8}	29.0	35.0

$$D_{ijkl} = (C_1 \cdot D_{ijkl}^{(A)-1} C_{stop}^{(A)} + C_2 \cdot D_{ijkl}^{(C)-1} C_{stop}^{(C)})^{-1} Q'_{ijkl} \quad (48)$$

なお、式(48)中に示される応力集中マトリックス $C_{ijkl}^{(A)}, C_{ijkl}^{(C)}$ は、式(48)と式(46)との連立方程式を解くことにより次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} C_{ijkl}^{(C)} &= \left\{ C_2 \cdot \left(D_{ijkl}^{(C)-1} - D_{ijkl}^{(A)-1} \right) \right\}^{-1} \left(Q'_{ijkl} - D_{ijkl}^{(A)-1} D_{stop} \right) P_{ijkl}^{-1} \\ C_{ijkl}^{(A)} &= \left(I_{ijkl} - C_2 \cdot C_{ijkl}^{(C)} \right) / C_1 \end{aligned} \quad (49)$$

解析においては、式(49)で表される応力集中マトリックス内のコンクリートの弾塑性マトリックスに、前ステップの値を代入し応力集中マトリックスを更新する。そして、得られた応力集中マトリックスを式(48)に代入し、新たなコンクリートの弾塑性マトリックスを求める。そして、構造体の内力と外力とが釣合い状態になるまで修正Newton-Raphson法により収束計算を行う。

このように、ひび割れたコンクリートや岩盤などのような不均質材料に関する変形および透水特性を表す定式化が構築されたわけである。実際の計算は、筆者らが構築したコンクリート中の水分移動に関する解析理論⁸⁾に上述の定式化を組み込むことにより実施される。本解析理論は、透水係数が場所によって異なったり、外力の作用とともにあるいは損傷の程度とともに透水係数が変化する、すなわちひび割れ幅の変化とともに透水係数が変化するものである。さらに、均質材料の透水係数、弾性係数などの弾性状態としての初期条件および塑性域におけるセメントペーストの内部摩擦角や初期粘着力を入力するのみで、材料が均質から不均質になった場合の透水係数やひび割れ幅の変化とともに透水係数の変化あるいは不均質材料内の水分移動特性が自動的に求まるものであり、このような水分移動問題に対する解析理論は構築されていないものと思われる。本解析を厳密に実行するには、式(10)および式(32)中の4つの材料定数 a, b, c, d を同定する必要があるが、それは4, 5章において行うことにして、次章では本解析理論を用いて材料が均質から不均質になった場合の透水係数の変化や不均質材料内の水分移動特性を簡単なモデルを用いて解析的に評価することにする。

3. 本解析理論による数値シミュレーション

(1) 解析モデルと解析条件

解析モデルは、図-6に示すように $8.86 \times 8.86 \times 20\text{cm}$ の形状寸法をした角柱供試体の1/8とした。こ

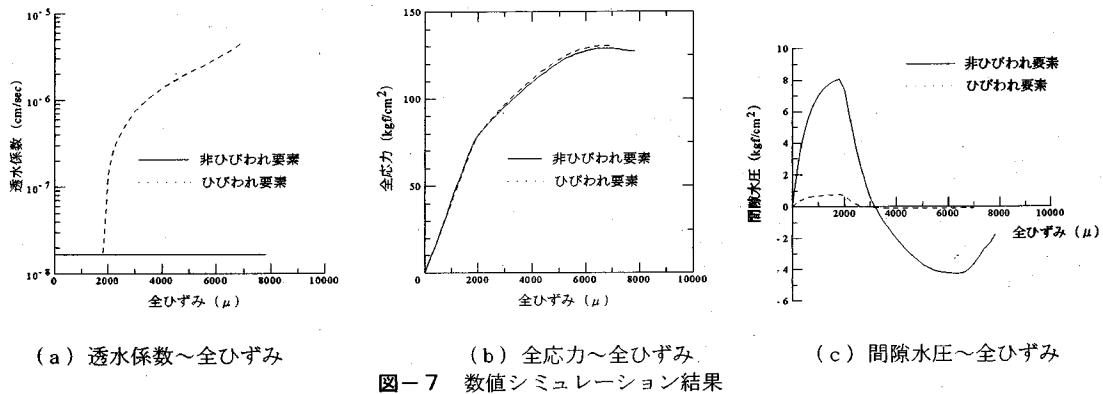


図-7 数値シミュレーション結果

の角柱供試体には、同図に示すように表面ひび割れが存在し、解析モデルにおいてもこのひび割れを考慮したものとなっている。また、載荷は一軸状態で軸方向に圧縮載荷され、モデル表面の水圧はゼロである。境界条件は、変位に関しては一軸状態、間隙水圧に関しては排水状態とした。なお、コンクリートは水で完全に飽和されているものと仮定した。

コンクリートの圧縮強度、弾性係数、初期透水係数および塑性域におけるセメントベーストの内部摩擦角や初期粘着力⁶⁾などの材料定数は、表-1に示す通りであり、弾性係数はクリープの影響を考慮した有効弾性係数である⁸⁾。なお、式(10)中の材料定数 a, b は 10^3 、式(35)中の材料定数 c, d は 10^{-6} とした。このような解析モデルおよび解析条件を用いて、材料が均質から不均質になった場合の透水係数の変化や不均質材料内の水分移動特性を解析的に評価することにする。

(2) 透水係数の変化および水分移動特性

図-6に示す解析モデル上面に荷重が載荷された時のコンクリート内部、すなわち非ひび割れ要素とひび割れ要素における応力特性と間隙水圧特性について透水係数の変化を基に検討を行う。解析結果を図-7に示す。同図の(a)は、ひび割れ要素および非ひび割れ要素における透水係数～全ひずみ、(b)は全応力～全ひずみおよび(c)は間隙水圧～全ひずみ関係をそれぞれ表している。

図-7 (a), (b) に示すように、コンクリートが塑性状態となる約 1800μ のひずみから、ひび割れ要素の透水係数が放物線的に大きくなり、本解析の範囲内では最終的に $4.0 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ であり、初期透水係数の約 200 倍となっている。このひび割れ要素における透水係数の変化が、特に同図(c)に示す間隙水圧に影響を及ぼしている。すなわち、間隙水圧はコンクリートが塑性状態となる約 1800μ において最大となり、その後は透水係数の増大および破壊面となるひび割れ幅の増大による塑性体積膨張の影響により急激に低下し、負圧となる。そして、塑性体積膨張および透水係数の増大の程度あるいは排水条件に

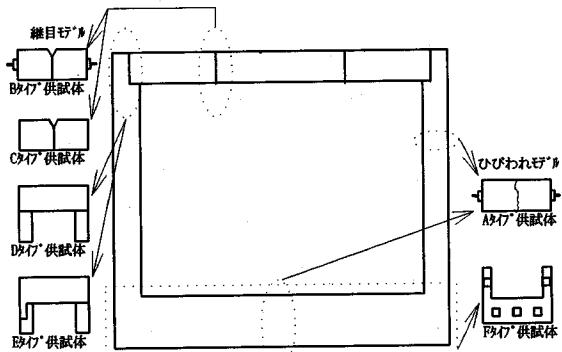


図-8 陸地処分用ピットのモデル化
(渡部の実験)

より、同図に示すように負の間隙水圧は最大値を示した後、徐々に低下する。

このように、本解析理論を用いることにより均質材料の透水係数、弾性係数などの弾性状態としての初期条件および塑性域におけるセメントベーストの内部摩擦角や初期粘着力を入力するのみで、材料が均質から不均質になった場合の透水係数の変化や不均質材料内の水分移動特性が自動的に求まることになる。しかしながら、本解析を厳密に実行するには、式(10)および式(35)中の材料定数 a, b, c, d を同定する必要がある。そこで次章からは、それら材料定数の同定ならびにひび割れの分布性状と透水係数の関係を本解析理論を用いて解析的に評価することにする。

4. 既往の漏水量算定式

(1) 渡部の漏水量実験

渡部は、発電所廃棄物陸地貯蔵・処分用コンクリートピットの打ち継目や外力により発生するひび割れ面からの漏水量の定量的評価を行う目的で、ピット各部を図-8に示すようなモデル化を行い、各タイプの供試体に対して漏水量の測定を行った。Aタイプ供試体のひび割れは、地震時に想定される

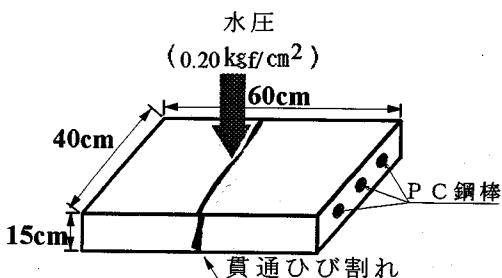


図-9 Aモデル供試体の形状寸法
(渡部の実験)

荷重によって発生するひび割れを模擬したもので、ひび割れは正負曲げによって発生させた。Fタイプ供試体のひび割れは、ピット下部の地盤が不同沈下を起こしたケースを模擬したもので、正の曲げを与えることによりひび割れを発生させた。また、B、Cタイプ供試体は、鉛直方向の打ち縫目を模擬したものであり、D、Eタイプ供試体は水平方向の打ち縫目を模擬したものである。本研究では、供試体を貫通しひび割れ幅が各断面でほぼ同じである、Aタイプ供試体を解析対象にした。Aタイプ供試体は、図-9に示すような形状寸法をしており、ひび割れ面と直交方向にPC鋼棒が配置されている。

Aタイプ供試体に対する漏水量実験結果は、図-10に示す通りである。同図は、図-9に示す供試体表面に $0.2\text{kgf}/\text{cm}^2$ の水圧を作用させた場合におけるひび割れ単位長さ当たりの漏水量 Q とひび割れ幅 ω との関係を表している。なお、図中の○は実験結果、実線、破線および一点鎖線は、それぞれ下式に示す渡部、石川および伊藤らの提案式をプロットしたものである。

$$Q = K \times \omega^3 \quad : \text{石川の提案式} \quad (50)$$

$$Q = K \times (\omega - \omega_0)^{32} \quad : \text{渡部の提案式} \quad (51)$$

$$Q = K \times (\omega - \omega_0)^3 \quad : \text{伊藤らの提案式} \quad (52)$$

$$\text{ここで, } K = \frac{P}{12\eta D\sigma}$$

Q : 漏水量($\text{cm}^3/\text{sec}\cdot\text{cm}$)

ω : ひび割れ幅(cm)

ω_0 : 漏水を生じないひび割れ幅(cm)

P : 作用水圧(kgf/cm^2)

η : 水の粘性係数($\text{kgf}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$)

D : 流路長(cm)

σ : ひび割れ定数

渡部の提案式は、石川の提案式を漏水量を生じない限界ひび割れ幅を考慮した回帰式である。なお、石川の提案式は、平行板内の流れが層流であると仮定した時に、ナビアーストークスの運動方程式から理

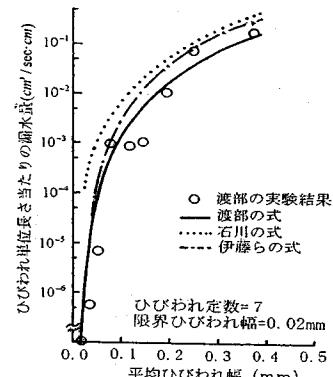


図-10 渡部の漏水量実験結果

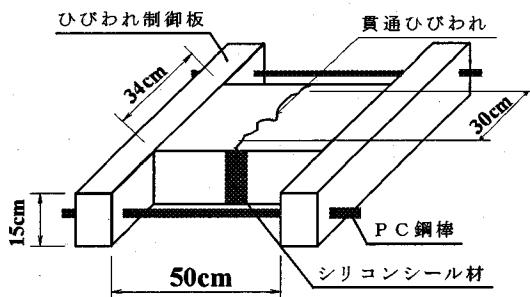


図-11 伊藤らの実験供試体

論的に得られた解を、ひび割れ定数で除したものである。このひび割れ定数は、渡部の実験においては、約7であると報告されている。図-10から、渡部の提案式は必ずしも実験結果を精度良く評価しているとは言えず、特にひび割れ幅が 0.1mm 以下においては実験結果と提案式とで大きな差異が認められる。一方、石川の提案式は実験結果に対して全体的に高めの評価をしており、特にひび割れ幅が 0.05mm 以下においては、式中に漏水を生じない限界ひび割れ幅を考慮していないことにより大きな差異が認められる。また、伊藤らの提案式は石川、渡部の提案式のほぼ中間的な値となっており、実験結果に対して全体的にやや高めの評価式となっている。なお、伊藤らの提案式は、石川の提案式に漏水を生じない限界ひび割れ幅を考慮したのみであるため、ひび割れ幅が大きくなるに従い石川の提案式に漸近する。

(2) 伊藤らの漏水量実験

伊藤らは、大深度地下空間の利用やウォーターフロント開発が盛んに提案されていることにともなって、コンクリート構造物の水密性の問題は重要であることに着目し、従来の低水圧($0.2\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下)実験に対して高水圧($2.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ 以下)下での漏水量測定実験を行った。実験供試体は、図-11に示す形状寸法をしており、材齢14日において正負曲げによりひび割れを発生させ、供試体の外側面に配置した

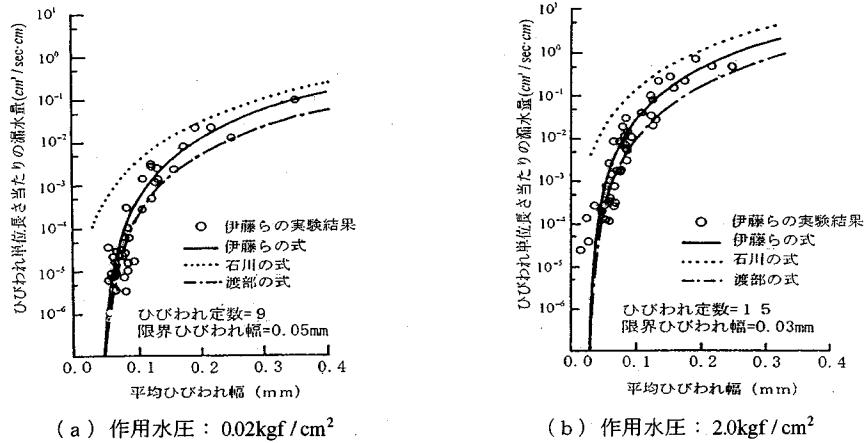


図-12 伊藤らの漏水量実験結果

PC鋼棒によってひび割れ幅の制御を行った。

実験結果は、図-12に示す通りであり、同図(a)は供試体表面に 0.05kgf/cm^2 の水圧、同図(b)は 2.0kgf/cm^2 の水圧を作用させた場合における、ひび割れ単位長さ当たりにおける漏水量 Q と平均ひび割れ幅 ω との関係を表している。なお、各図中の○は実験結果、実線、破線、および一点鎖線は、それぞれ伊藤ら、石川、および渡部の提案式をプロットしたものである。同図から、供試体表面に作用する水圧が $0.05, 2.0 \text{kgf/cm}^2$ の結果とも、実験結果を回帰した伊藤らの提案式が、他の提案式に比べ最も精度良く実験結果を評価している。一方、石川の提案式は渡部の実験結果でも見られたように、全体的に実験値よりも高めの評価をしており、特に同図(a)では 0.1mm 以下、同図(b)では 0.05mm 以下において実験結果と提案式とで大きな差異が認められる。また、渡部の提案式は同図(a)、(b)ともに平均ひび割れ幅が大きくなるに従い実験結果とは差異が生じてくる。

(3) 各提案式の比較

本章(1)、(2)節で述べたように、石川の提案式は全体的に実験結果に対して高めの評価をしており、特にひび割れ幅が小さくなるに従って大きな差異が認められた。一方、渡部の提案式は伊藤らの実験結果に適用すると、石川の提案式とは逆に全体的に実験結果に対して低めの評価をしているが、ひび割れ幅が約 0.1mm 以下においては限界ひび割れ幅を式中に導入していることにより、比較的実験結果を良く評価している。また、伊藤らの提案式は、石川、渡部の提案式のほぼ中間的な値となっており、三者の提案式の中では最も実験結果を良く評価している。

三者の提案式で注目すべき点は、各提案式ともほぼ同じ形をしており、さらにどの式中にもひび割れ定数という材料定数が含まれていることである。このひび割れ定数は、ひび割れの凹凸による水の流路長の増大あるいは摩擦抵抗の増加を示す定数である

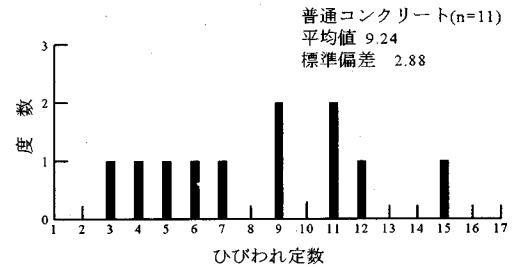


図-13 ひび割れ定数の評価³⁾

と定義されている。伊藤らの実験によれば、図-12の(a)、(b)に示すように、作用水圧が大きくなるに従いひび割れ定数は 9 から 15 へと大きくなる傾向を示している。しかし、渡部の実験では作用水圧が伊藤らの実験のほぼ中間的な値であるにも関わらず、ひび割れ定数は 7 であり伊藤らの実験で用いた値よりも小さくなっている。したがって、このひび割れ定数の選定の仕方により、漏水量の予測値は大きくも小さくなるものと考えられる。すなわち、実測値が無い作用水圧下において漏水量を予測する際には、ひび割れ定数は不確定因子となり、その同定が非常に困難であるものと考えられる。このことは、図-13に示す石川の実験結果³⁾から、より明確になるものと思われる。同図は、全く同じコンクリートを用いて推定したひび割れ定数の分布状況を示したものであり、ひび割れ定数は 3 ~ 15 という非常に広範囲に渡ってばらついており、その選定あるいはひび割れ定数なる不確定因子を含んだ算定式に大きな問題点があることを示している。本研究では、このような不確定因子を無くすとともに、特にひび割れ幅が主要因であると考えられる透水係数に着目し、渡部の漏水量実験結果を基に透水係数とひび割れ幅との関係を解析的に評価すると同時に、得られた透水係数を用いて伊藤らの漏水量実験の解析的評価を行ない、その適用性を検討することとした。

表-2 解析に用いる材料定数

コンクリート						PC鋼棒	
圧縮強度 (kgf / cm ²)	引張強度 (kgf / cm ²)	弾性係数 (kgf / cm ²)	初期透水係数 (cm / sec)	内部摩擦角 (°)	初期粘着力 (kgf / cm ²)	降伏応力 (kgf / cm ²)	弾性係数 (kgf / cm ²)
576.0	61.8	3.6×10^5	1.67×10^{-11}	29.0	39.0	9500.0	2.0×10^6

5. 透水係数の解析的評価と適用性の評価

均質材料としてのコンクリートの透水係数は、主に水セメント比、最大骨材寸法や材齢などの材料的性質により大きく変わり、これらの材料的性質はいずれもコンクリート内の連続した最大空隙径を決定する主要因である。すなわち、均質材料としてのコンクリートの透水係数は、コンクリート内の流路によりほぼ決定されるものであると考えられる。また、不均質材料としてのコンクリートの透水係数もまた、上述した材料的性質に加え、主にひび割れ幅やひび割れ面における粗度によってほぼ決定されるものと考えられる。このようなことから、渡部、伊藤らの漏水量実験はひび割れ幅に応じた透水係数を予測する際に非常に有用な基礎データとなる。そこで本章では、まず図-10に示す渡部の漏水量実験結果に2章にて示した解析理論を適用し、ひび割れ幅に応じた透水係数を解析的に評価することにした。そして、解析的に得られた透水係数を用いて、図-12に示す伊藤らの漏水量実験に対する解析的評価を行ない、ひび割れ幅に対する透水係数の適用性の評価を行うことにした。

(1) 透水係数の解析的評価

渡部の行った実験供試体の内、本解析で対象としたものは、4章(1)節において述べた図-8のピットモデルのうちAタイプ供試体であり、その形状寸法は図-9に示した通りである。このAタイプ供試体は、正負曲げにより貫通ひび割れを導入したものであるため、ひび割れ幅は供試体の各断面に貼りつけた各コンタクトゲージの平均的な値である。このAタイプ供試体の漏水量測定値に対する解析方法は、まず図-14に示すようにAタイプ供試体の1/4部分を解析対象として、純引張により式(34)に示す変位増分の不連続量のトータルが所定のひび割れ幅になるまで変位制御により変位を導入する。そして、所定のひび割れ幅となった時点で図-14に示す解析モデルの表面に0.2kgf/cm²の水圧を作成させ、下面からの漏水量を求める。この漏水量は、均質材料としての透水係数(初期透水係数)と式(10)中の材料定数a,bとにより一義的に決定される。したがって、解析により評価される透水係数は、解析入力値である材料定数a,bによって変化するため、実験結果と解析結果との漏水量が等しくなるまでa,bを色々変えながら解析を行う。そして、実験結果と解析結果との漏水量が等しくなった時点がひび割れ幅に対応した透水係数を与えるものである。さらに、材料定数a,bは解析中においては常に一定であり、

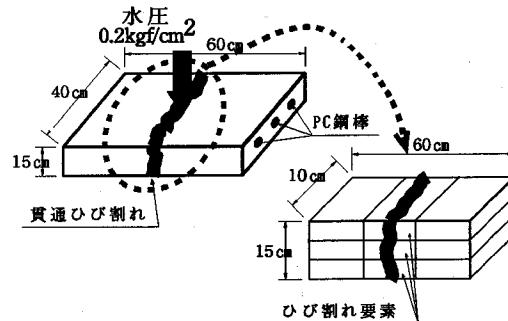


図-14 渡部の実験供試体に対する解析モデル

ひび割れ幅に固有な値である。なお、導水勾配の低減率の程度a,bあるいはひずみの局所化の程度c,dを表す材料定数は、骨材とセメントペースト界面とセメントペーストとクラックバンド界面において厳密的には異なるが、ひび割れ発生以後においては両界面の間で大きな差異はないものと考えられることにより、材料定数a,bおよびc,dは両界面において等しいものとした。また、材料定数c,dは、一軸圧縮試験結果を解析的に評価することによりほぼ 10^{-6} の一定値となり、本研究においてはその値を用いることとした。このような不均質材料の透水係数あるいは漏水量を求める上記のような一連の解析は、本解析理論を筆者らが構築した均質材料としてのコンクリート中の水分移動に関する解析理論⁸⁾に適用して、不均質材料まで解析対象とした拡張された理論を用いることにより実施される。ここで、筆者らが構築した均質材料としてのコンクリート中の水分移動に関する解析理論を簡単に説明する。筆者らは、CSHゲルや骨材粒子を弾性体として考え、それらの混合材料では各粒子間の相対的な位置変化により、材齢とともに間隙が減少するような粘塑性硬化材料としてコンクリートのモデル化を行った。そして、そのモデルに対してコンクリート内の間隙水の質量保存則と力の釣合い式とを満足する連成方程式を立て、節点変位と節点間隙水圧とを未知数として連成方程式を解くことにより、コンクリート中の水分移動特性が理論的に求まるものである。なお、塑性モデルにはDrucker-Pragerタイプ⁶⁾を用いており、破壊曲面は応力空間において式(10)に表れた損傷パラメータとともに変化するものと仮定した。なお、この解析理論は筆者らが行ったコンクリート内部に発生する間隙水圧の測定実験⁹⁾において、その適用性が示された。

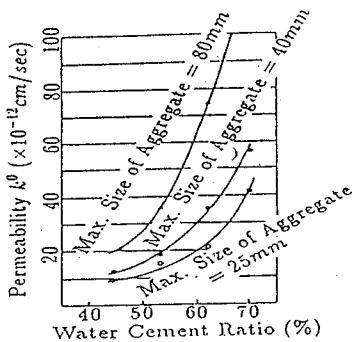


図-15 村田らの透水実験

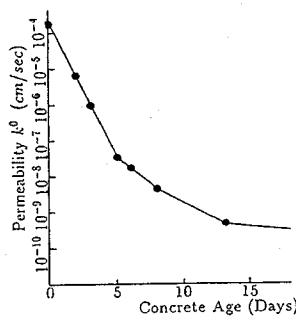


図-16 T.C. Powers の透水実験

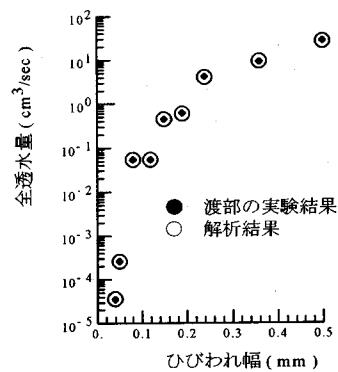


図-17 全漏水量の実測値と解析値

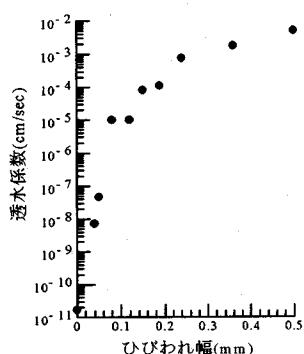


図-18 透水係数とひび割れ幅

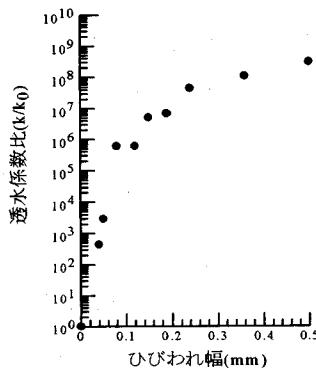


図-19 透水係数比とひび割れ幅
(縦軸: 対数表示)

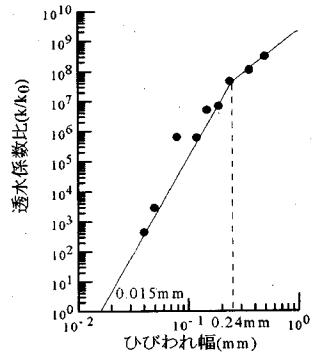


図-20 透水係数比とひび割れ幅
(縦軸, 横軸: 対数表示)

a) 解析に用いる材料定数

上記の解析を行うためには、コンクリートの圧縮強度、引張強度、弾性係数、初期透水係数、液体の体積弾性係数やP C鋼棒の降伏応力、弾性係数および塑性域におけるコンクリートの内部摩擦角や初期粘着力などの材料定数を定めなければならない。これらの材料定数は、表-2に示す通りである。コンクリートの圧縮強度および引張強度は、渡部の実験において示された値であり、コンクリートの弾性係数は、次式により推定したものである。

$$E_c = 15000 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (53)$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm^2)

塑性域におけるセメントペーストの内部摩擦角および初期粘着力は、三軸圧縮試験¹⁰⁾により求めた値を用いることにした。三軸圧縮試験は、 $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の形状寸法をした試験体に対して排水状態で行われ、その形状寸法および排水状態ということから内部空隙に発生する間隙圧（間隙水压+間隙空気压）は殆どゼロであると考えられる。また、本解析においても、図-14に示す形状寸法および間隙水の排水条件ということから、内部に発生する間隙水压は殆どゼロと考えられる。したがって、間隙水压

が内部摩擦角や初期粘着力すなわちセメントペースト骨格の結合力に及ぼす影響は殆どないものと考えて、本解析では内部摩擦角および初期粘着力には、三軸圧縮試験により求められた値、すなわち 29° および圧縮強度の $1/4$ を用いることにするが、初期粘着力に関しては、予めコンクリートの弾塑性解析を行い解析で得られるコンクリートの引張強度が渡部の実験において測定された 618kgf/cm^2 になるように初期粘着力を決定した。また、初期透水係数すなわち均質材料としてのコンクリートの透水係数は、図-15に示す村田らの透水実験結果と図-16に示すT.C.Powersの透水実験結果から、材齢28日における透水係数を推定した。

b) 透水係数の解析結果

まず、 0.2kgf/cm^2 の水圧が供試体表面に作用した場合の全漏水量に対する、渡部の実験結果および解析結果を図-17に示す。同図は、平均ひび割れ幅 w と全漏水量 Q' との関係を表している。どのひび割れ幅においても式(10)中の材料定数 a, b を的確に選定することにより、解析結果は実験結果を非常に良く評価していることがわかる。逆に言うと、各ひび割れ幅に相当する材料定数 a, b が的確に評価されていなければ、漏水量の実験結果と解析結果とが合わず、得られた透水係数は非常に精度の悪いもの

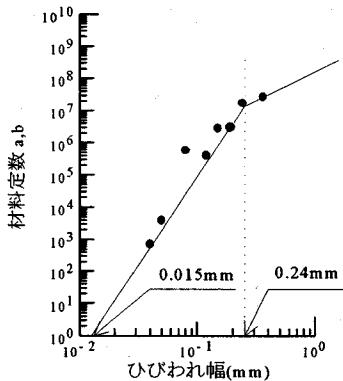


図-21 材料定数 a, b とひび割れ幅

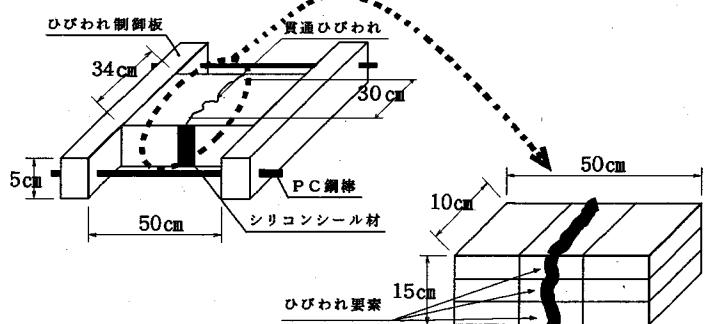


図-22 伊藤らの実験供試体に対する解析モデル

となる。このことに対し、同図の実験結果と解析結果との全漏水量が良く一致していることから、各ひび割れ幅に相当する透水係数が精度良く求められたことになる。透水係数の解析的評価を、図-18に示す。同図は、平均ひび割れ幅 ω と透水係数 K との関係を表しており、縦軸を対数表示で示したものである。この図から、透水係数は、ひび割れ幅が 0.1mm で約 10^{-5} cm/sec, 0.3mm で約 10^{-3} cm/sec であり、透水係数は放物線的に大きくなっている。なお、ひび割れ幅が 0.3mm における透水係数は、土質力学の分野では、ほぼ砂のような材料に近いものである。また、同図に示す各透水係数 K を初期透水係数 K_0 で無次元化（透水係数比 K/K_0 ）したものが、図-19である。この図から、透水係数は初期透水係数に比べ、ひび割れ幅が 0.1mm で約 10^6 倍、0.3mm で約 10^8 倍と非常に大きくなっていることがわかる。さらに、図-19に示す横軸を縦軸と同じように対数表示で表すと図-20のようになる。この図をみると、ひび割れ幅と透水係数比の関係は 3 本の直線、すなわち次式により表すことができる。

$$\begin{aligned} \log(K/K_0) &= 0 & 0.0 \leq \omega < 0.015(\text{mm}) \\ && 0.015 \leq \omega < 0.24(\text{mm}) \\ \log(K/K_0) &= 6.349 \cdot \log \omega + 11.580 & (54) \\ && 0.015 \leq \omega < 0.24(\text{mm}) \\ \log(K/K_0) &= 2.570 \cdot \log \omega + 9.238 & \\ && 0.24(\text{mm}) \leq \omega \end{aligned}$$

均質材料としてのコンクリートの漏水がほぼゼロであると仮定すると、横軸すなわちひび割れ幅と上式との交点は漏水を生じない限界ひび割れ幅を示しているものと考えられる。その値は、上式では約 0.015mm となっており、渡部の実験で得られた 0.02mm とほぼ同じである。なお、上述の限界ひび割れ幅は硬化したコンクリートに対するものであり、若材齢時には初期透水係数や含水率が硬化したコンクリートよりも非常に大きいため、均質材料のコンクリートの漏水はほぼゼロであるという仮定が成り

立たず、ひび割れが発生していない場合でも漏水が生じる¹¹⁾ ことに注意しなければならない。さらに、約 0.24mmにおいて直線の勾配が変わっていることがわかる。これは、実験条件は異なるが柳らの研究¹²⁾においても 0.2mm 前後のひび割れ幅が限界レイノルズ数に対応した値であるとの報告から、限界レイノルズ数に対応した値であるものと考えられる。なお、限界レイノルズ数に対応した値の持つ意味は、そのひび割れ幅よりも小さい場合にはひび割れ内の流れが層流であり大きい場合には乱流であることを示している。

c) 材料定数の同定

式(10)中の材料定数 a, b は、ひび割れ幅毎に上述の透水係数の解析結果において同定されたわけである。材料定数 a, b とひび割れ幅関係は、図-21に示す通りである。なお、図中の横軸および縦軸とも対数表示であり、本研究においては材料定数 a, b は同じ値であるものとした。この図から、ひび割れ幅に固有な材料定数 a, b は、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \log a &= 0 & 0.0 \leq \omega < 0.015(\text{mm}) \\ \log a &= 6.005 \cdot \log \omega + 10.953 & (55) \\ & 0.015 \leq \omega < 0.24(\text{mm}) \\ \log a &= 1.141 \cdot \log \omega + 7.938 & \\ & 0.24(\text{mm}) \leq \omega \end{aligned}$$

なお、本研究では $a = b$ である

上式は、次に示す透水係数の適用性が評価されば、ひび割れ幅に対して厳密な材料定数の値を与えるものと考えられる。したがって、透水係数の適用性評価が確認されたものとすると、上式で示すひび割れ幅を変数とした材料定数を式(10)に適用することにより、材料が均質から不均質になった場合の透水係数やひび割れ幅の変化とともに透水係数の変化あるいは不均質材料内の水分移動特性が自動的に求まることになる。

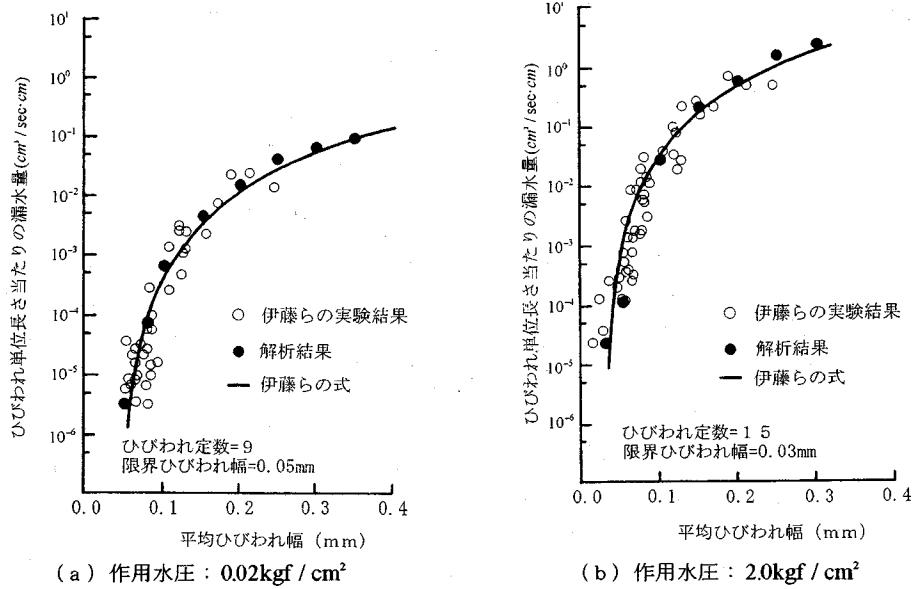


図-23 漏水量の実験結果と解析結果（伊藤らの実験との比較）

(2) 透水係数の適用性評価

渡部の漏水量実験ケースのうち、Aタイプ供試体表面に 0.2kgf/cm^2 の水圧を作用させた場合の漏水量の実験結果から、本解析理論およびコンクリート中の水分移動に関する解析理論を用いて、各ひび割れ幅に対する透水係数が解析的に評価できた。そこで本節では、伊藤らが行った漏水量実験に対する解析的評価を行ない、各ひび割れ幅に対する透水係数の適用性評価に対する検討を行うことにする。ここで、材料定数は前節で述べた渡部の実験から同定したものを使っている。

伊藤らの実験で用いた供試体は、4章(2)節で述べたが図-1-1に示す形状寸法をしており、ひび割れの導入は渡部の実験と同様に正負曲げによって行われた。したがって、ひび割れ幅は供試体の各断面に貼りつけたコンタクトゲージの平均的な値であり、図-1-1に示すように供試体の外側に配置されたPC鋼棒によって平均的なひび割れ幅の制御を行っている。この供試体に対する漏水量の解析方法は、まず図-2-2に示すように供試体の1/3部分を解析対象として、ひび割れ要素の初期透水係数に式(54)に示す各ひび割れ幅に対応する透水係数を用いて、供試体表面に 0.02kgf/cm^2 および 2.0kgf/cm^2 の水圧を作用させることによって解析を行う。この際、コンクリートは弾性体であると仮定することにより、解析に必要な材料定数はコンクリートの弾性係数、初期透水係数および液体の体積弾性係数のみである。なお、解析に用いた材料定数は初期透水係数を除き、表-2に示す値と同じであるとした。また、式(54)式中の K_0 は、表-2に示す値とした。

解析結果を図-2-3に示す。図-2-3は、ひび割れ単位長さ当たりの漏水量と平均ひび割れ幅との関係を表しており、同図(a)は作用水圧が 0.02kgf/cm^2

の結果、同図(b)は作用水圧が 2.0kgf/cm^2 の結果である。なお、図中に示す○は伊藤らの実験結果、実線は伊藤らの提案式をプロットしたものであり、●は解析結果を表している。

これらの図から、解析結果は実験結果あるいは伊藤らの提案式を非常に良く評価していることがわかる。このことは、解析により得られた透水係数すなわち式(54)が、ひび割れ幅に対して精度良く評価できているということを表しているものと考えられる。さらに、渡部の漏水量実験結果には、ひび割れ表面の凹凸や屈曲度、言い換えれば不確定因子であるひび割れ定数なるものが含まれており、解析により得られた透水係数においても、その要因が考慮されていることになる。したがって、不確定因子なるものを解析中に考慮しなくとも、式(54)で示される透水係数を用いることにより、漏水量を精度良く評価することができるようになる。しかし、式(54)で示される透水係数の適用性評価は、図-2-3に示す伊藤らの実験に対してのみ確認されたものであり、今後行われる実験に対して適用できるかどうかは、その実験結果との対比から確認していかなければならないものである。

6. 水コンクリート骨格連成解析手法の提案

5章の実験結果による2章の解析理論の適用性に基づいて、コンクリート中に均質部およびひび割れ部が混在する状態に対する水・コンクリート骨格連成解析手法を以下のように提案する。

本解析手法は、5章の実験結果により同定された材料定数を導入することにより、コンクリート中の均質部分およびひび割れ部分を同時に取り扱った漏

水量の予測や水分移動特性の評価が可能なものである。本解析は、均質材料の透水係数、弾性係数などの弾性状態としての初期条件および塑性域におけるセメントベーストの内部摩擦角や初期粘着力を入力するのみで、材料が均質から不均質になった場合の水分移動特性を自動的に求めることができる簡易な手法であるとともに、一般的コンクリートのように外力が作用した場合に生じる離散型ひび割れのように複雑なひび割れ形態をしたコンクリートにも適用可能なモデルである。

7. 結論

本研究では、コンクリートの水分移動モデルの詳細な構築を行うことを目的として、コンクリートが外力の作用により均質材料から不均質材料に至るまでの統一的な、水分移動に関するモデルの構築を行った。そして、本解析理論を筆者らが構築した均質材料としてのコンクリート中の水分移動に関する解析理論に適用して、不均質材料まで解析対象とした拡張された理論により、单一ひび割れ幅に対応した透水係数の変化の割合を表す関係式を解析的に評価するとともに、その適用性の評価を行った。以下に、結果をまとめる。

- (1) コンクリート中に均質部およびひび割れ部が混在する状態に対する、水・コンクリート骨格連成解析手法の確立が成された。
- (2) 本解析理論の構築により、ひび割れの分布性状と透水係数との関係式が得られた。

参考文献

- 1) J.Murata :Studies on The Permeability of Concrete, *Trans.*

- of JSCE*, No.77, Nov., pp.69-103, 1961.
- 2) T.C.Powers, L.E.Copeland, J.C.Hayes, and H.M.Mann :Permeability of Portland Cement Paste, *ACI Journal*, No.51-14, Nov., pp.285-298, 1954.
- 3) 石川広三：モルタル・コンクリート壁体の亀裂からの漏水について（第2報），日本建築学会大会学術講演概要集，pp.277-278, 1977.
- 4) 渡部直人：発電所廃棄物陸地貯蔵・処分用コンクリートピットの水密性に関する研究，電力中央研究所報告，U87023, 1987.
- 5) 伊藤忠彦他：ひび割れを有するコンクリートの高水圧下における漏水量について，土木学会年次学術講演概要集，第5部，pp.412-413, 1989.
- 6) Wu, Z. S. and Tanabe, T. :A Hardening-Softening Model of Concrete Subjected to Compressive Loading, *Journal of Structural Engineering*, Architectural Institute of Japan, Vol.36, pp.153-162, 1990.
- 7) A.M.Farahat :Development of Concrete Models Based on the Micromechanics of Granular Material, 名古屋大学工学部博士論文, 1992.
- 8) 大下英吉, 田辺忠顕：コンクリート内部に発生する間隙水圧の予測とその影響評価に関する解析的研究, 土木学会論文集(1995年11月号掲載決定)
- 9) 大下英吉, 田辺忠顕：コンクリートに発生する間隙水圧の実測とその影響に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.514/V-27, pp.75-84, 1995.
- 10) 井上健：若材齢コンクリートの変形挙動に関する研究, 名古屋大学大学院修士論文, 1990.
- 11) 石川靖晃：飽和透水性材料としての若材齢コンクリートの変形解析, 名古屋大学修士論文, 1993.
- 12) 柳博文他：コンクリートひび割れからの漏水量予測, 土木学会年次学術講演概要集, 第5部, pp.650-651, 1994.

(1994. 12. 2 受付)

MATHEMATICAL MODELING FOR PERMEABLE BEHAVIOR OF NON HOMOGENEOUS MATERIAL AND ITS APPLICABILITIES

Hideki OHSHITA and Tada-aki TANABE

The mathematical modeling for water migration of concrete of which properties are changes from homogeneous to non homogeneous material applied the external load, is presented in detail. Then applicability is confirmed by comparison with the experimental results, and the relationship between crack widths and permeabilities are investigated. In proposed model, concrete, which is composed of aggregate, cement paste, water, interfacial crack between aggregate and cement paste, and crack band, is considered as the composite material, and discontinuities for displacement and hydraulic gradient on cracks are considered in micro-level.