

論文 不均質材料の透水メカニズムに関するモデルの構築

大下英吉*1・田辺忠顕*2

要旨：本研究は、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手法の構築を目的として、筆者らが提案した不均質材料としての変形および透水に関する構成則の拡張を行った。そして、実測値との比較により本解析手法の適用性を示すとともに、ひびわれ性状と透水係数との関係式を提案した。

キーワード：均質材料、不均質材料、透水係数、漏水量、Post-Peak 領域、水分移動

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、特にひびわれ面からの漏水は、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して急速に広がっていくと考えられ、単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。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、一本の貫通ひびわれからの漏水量を実験式により表した石川[1]、渡部[2]あるいは伊藤ら[3]の研究がある。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わ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。

本研究では、まず不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[4]の拡張を行った。そして、渡部の漏水量実験結果に本解析理論を適用しひびわれ性状と透水係数を解析的に評価することにより、コンクリートが均質から不均質に至るまでの統一的な透水解析手法の提案を行った。さらに、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わ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透水に関する構成則

筆者らが提案した不均質材料としてのコンクリートの透水に関する構成則は、次式に示すように単に損傷の程度を表すパラメータ[5]のみの関数であった。

$$K_y = \left(C_1 \cdot K_h^{(A)-1} C_h^{(A)} + C_2 \cdot K_h^{(C)-1} C_h^{(C)} \right)^{-1} Q_y \quad (1)$$

*1 広島大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

*2 名古屋大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

なお、 Q_y はひびわ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。

$$Q_y = A'_y + B'_y + \delta_y, A'_y = \int_0^{2\pi} \omega \gamma_y A_i^{A-C} \Omega^{A-C}(\theta) d\theta, B'_y = \int_0^{2\pi} \omega \gamma_y A_i^{C-CB} \Omega^{C-CB}(\theta) d\theta, \gamma_y = n_i n_j \quad (2)$$

ここで、 C_1, C_2 はコントロール体の全体積に占める骨材およびセメントペーストの体積、 $K_y^{(A)}, K_y^{(C)}$ は骨材およびセメントペーストの透水マトリックス、 $C_y^{(A)}, C_y^{(C)}$ は骨材およびセメントペーストに関する流速集中マトリックスである。また、 ω は損傷の程度を表すパラメータ[5]、 $\Omega^{A-C}(\theta), \Omega^{C-CB}(\theta)$ 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われ群およびクラックバンドの接触密度関数、 A_i^{A-C}, A_i^{C-CB} はそれぞれ界面ひびわれ群およびクラックバンドの単位ひびわれ平面当りの全表面積である。

しかしながら、損傷の程度を表すパラメータのみでは Post-Peak 領域におけるひびわれ性状を評価することができないことが判明した。そこで本研究では、Post-Peak 領域におけるひびわれ性状を評価するため、次式に示すようにひびわれ性状を考慮した不連続性の程度を表す材料定数の導入を行った。

$$Q_y = A'_y + B'_y + \delta_y, A'_y = \int_0^{2\pi} c \omega \gamma_y A_i^{A-C} \Omega^{A-C}(\theta) d\theta, B'_y = \int_0^{2\pi} d \omega \gamma_y A_i^{C-CB} \Omega^{C-CB}(\theta) d\theta, \gamma_y = n_i n_j \quad (3)$$

ここで、 c, d は不連続性の程度を表す材料定数であり、ひび割れ幅に依存するものである。

このように、コンクリート中の水分移動特性は、不均質材料としてのコンクリートの透水に関する構成則を拡張し、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[6]に適用することにより、コンクリートが均質から不均質材料に至るまで統一的に解析により評価できることになる。しかしながら、コンクリート中に水分移動特性を詳細に評価するためには、(3)式中に示す不連続性の程度を表す材料定数 c, d を同定する必要があるものと考えられる。そこで、次章では本解析手法を渡部の漏水量実験結果[2]に適用することにより、ひびわれ性状と材料定数 c, d の同定を行うことにした。そして、材料定数の同定の際に得られるひびわれ性状と透水係数の関係も合わせて示すことにした。なお、ひびわれ性状と透水係数の関係は、漏水量予測に非常に重要な要因であるものと考えられる。

3. ひびわれ性状と材料定数、透水係数

渡部[2]の行った実験供試体のうち解析で対象としたモデルは、廃棄物の陸地処分用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-1に示す通りである。このAタイプ供試体は、正負曲げにより貫通ひびわれを導入したものであるため、ひびわ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、まず同図に示すように1/4部分を解析対象として、純引張により次式に

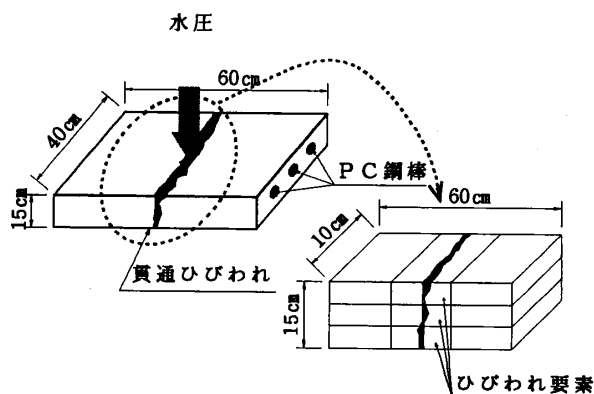


図-1 渡部の実験供試体に対する解析モデル

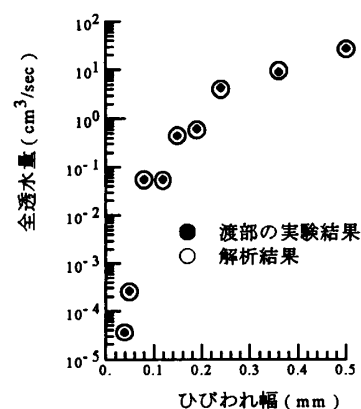
示す変位増分の不連続量[4]のトータルが所定のひびわれ幅になるまで変位制御により変位を導入する。そして、所定のひびわれ幅となった時点で解析モデルの表面に0.02MPaの水圧を作用させ、下面からの漏水量を求める。この漏水量は、均質材料としての透水係数（初期透水係数）と(3)式中の材料定数 c, d とにより一義的に決定される。すなわち、(3)式からわかるように、透水係数は不連続性の程度によって初期透水係数から徐々に変化することになる。したがって、解析により評価される透水係数は、特に解析入力値である材料定数 c, d によって変化するため、実験結果と解析結果との漏水量が等しくなるまで c, d を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において材料定数 c, d が同定されたことになり、さらにひびわれ幅に対応した透水係数が解析的に評価されたことにもなる。なお、本解析においては、材料定数 c, d は同じ値を取るものとした。

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－1に示す通りである。なお、表中の初期透水係数およびP C鋼棒に関する材料定数は推定値であり、その他の材料定数は実測値である。

表－1 解析に用いた材料定数

コンクリート						P C 鋼棒	
圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	初期透水係数 (cm/sec)	内部摩擦角 (°)	初期粘着力 (MPa)	降伏応力 (MPa)	弾性係数 (MPa)
57.6	6.2	3.6×10^4	1.67×10^{-11}	29.0	3.9	950.0	2.0×10^5

まず、0.02MPa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－2に示す。同図は、平均ひびわれ幅 ω と全漏水量 Q との関係を表している。どのひびわれ幅においても(3)式中の材料定数 c, d 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、各ひびわれ幅に相当する材料定数 c, d 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、各ひびわれ幅に相当する透水係数が精度良く求められたと同時に、材料定数 c, d が同定されたわけである。そこで、ひびわれ幅毎に同定された材料定数および透水係数の解析的評価の結果を次に示すことにする。



図－2 全漏水量の解析的評価（渡部の実験結果[2]との比較）

3. 1 ひびわれ性状と材料定数

(3)式中の透水の不連続量の程度を表す材料定数 c, d が、渡部の漏水量実験結果を解析的に評価することにより、ひびわれ幅毎に同定されたわけである。材料定数 c, d とひびわれ幅関係は、図－

3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示されており、また本研究においては材料定数 c, d は同じ値を取るものとした。この図から、ひびわれ幅に固有な材料定数 c, d は、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \log c &= 0 & 0.0 \leq \omega < 0.015(\text{mm}) \\ \log c &= 6.005 \cdot \log \omega + 10.953 & 0.015 \leq \omega < 0.24(\text{mm}) \\ \log c &= 1.141 \cdot \log \omega + 7.938 & 0.24(\text{mm}) \leq \omega \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 c は不連続生の程度を表す材料定数であり、 ω はひびわれ幅である。なお、本研究では $c=d$ である。

上式は、次節で示す透水係数の適用性が評価されれば、ひびわ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、上式で示すひびわれ幅を変数とした材料定数を(3)式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われ幅の変化にともなう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。

3. 2 ひびわれ性状と透水係数

透水係数の解析的評価を図-4に示す。同図は、平均ひびわれ幅 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、ひびわれ幅が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、ひびわれ幅が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-5である。この図から、透水係数は初期透水係数に比べ、ひびわれ幅が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。そして、ひびわ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。

$$\begin{aligned} \log(K/K_0) &= 0 & 0.0 \leq \omega < 0.015(\text{mm}) \\ \log(K/K_0) &= 6.349 \cdot \log \omega + 11.580 & 0.015 \leq \omega < 0.24(\text{mm}) \\ \log(K/K_0) &= 2.570 \cdot \log \omega + 9.238 & 0.24(\text{mm}) \leq \omega \end{aligned} \quad (5)$$

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、横軸すなわちひびわれ幅と上式との交

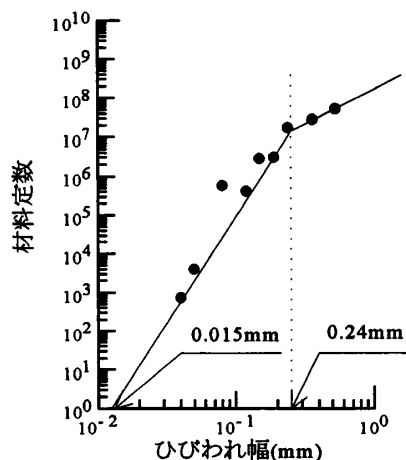


図-3 材料定数とひびわれ幅

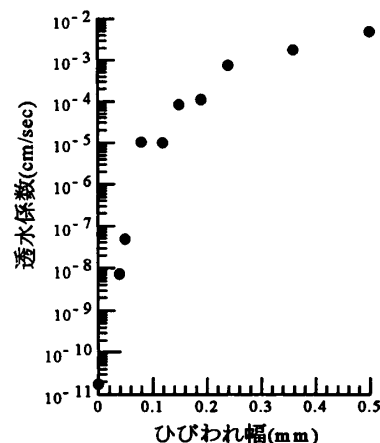


図-4 透水係数～ひびわれ幅関係

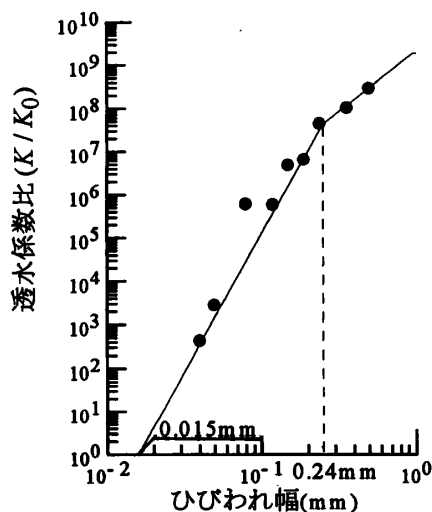


図-5 透水係数比～ひびわれ幅関係

点は漏水を生じない限界ひびわ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 0.015 mm 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、上述の限界ひびわれ幅は硬化したコンクリートに対するものであり、若材令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、ひびわれが発生していない場合でも漏水が生じる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[6]においても 0.2mm 前後のひびわ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、そのひびわれ幅よりも小さい場合にはひびわ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。このように、渡部の漏水量実験結果からひびわれ幅に固有の材料定数 c, d の同定およびひびわれ幅と透水係数との関係が解析的に評価されたわけである。そこで次節では、解析的に得られたひびわれ幅と透水係数との関係を用いて伊藤らの漏水量実験を解析的に評価し、その適用性の検討を行うことにする。このことは、すなわち同定された材料定数 c, d の妥当性の評価を行うことにもなる。

4. 透水係数の適用性評価

伊藤ら[3]が行った漏水量実験に対する解析的評価を前節で解析的に得られたひびわれ性状と透水係数の関係を適用して行い、各ひびわ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 c, d は前節で述べた渡部の実験から同定したものを用いている。

伊藤らの実験で用いた供試体は、図-6に示す形状寸法をしており、ひびわ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、ひびわれ幅は供試体の各断面に貼りつけたコ

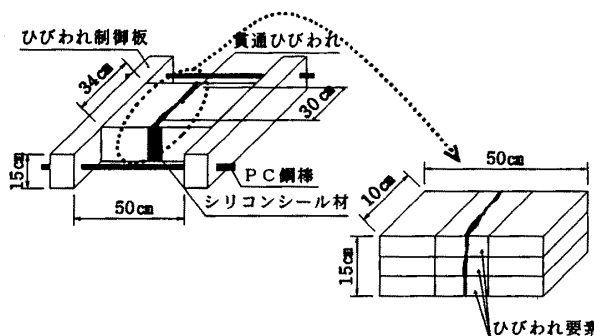


図-6 伊藤ら[3]の実験供試体

ンタクトゲージの平均的な値であり、同図に示すように供試体の外側に配置された P.C. 鋼棒によって平均的なひびわ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、まず同図に示すように供試体の 1/3 部分を解析対象モデルとする。そして、非ひびわれ要素およびひびわれ要素の透水係数を(5)式から決定し、供試体表面に 0.005MPa および 0.2MPa 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透水係数を除き、表-1に示す値と同じであるとした。また、透水係数は非ひびわれ要素に関しては表-1に示す初期透水係数と同じ 2×10^{-11} (cm/sec) とし、ひびわれ要素に関しては(5)式から各ひびわれ幅に対する透水係数を算出した。

漏水量の解析結果を図-7に示す。図-7は、ひびわれ単位長さ当たりの漏水量と平均ひびわれ幅との関係を表しており、同図(a)は作用水圧が 0.002MPa の結果、同図(b)は作用水圧が 0.2MPa の結果である。なお、図中に示す○、●はそれぞれ伊藤らの実験結果および解析結果であり、実線、点線、一点鎖線は伊藤ら、石川、渡部の提案式をプロットしたものである。

解析結果は、実験結果あるいは伊藤らの提案式を非常によく評価していることがわかる。この

ことは、同定された材料定数およびひびわれ幅と透水係数の関係が、各ひびわ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。一方、石川の提案式は、漏水を生じない限界ひびわれ幅を式中に考慮していないことにより、平均ひびわれ幅が小さくなるほど実測値との差異が大きくなっている。また、渡部の提案式は、実測値に比べ全体的に小さめの評価をしており、これはひびわれ定数なる不確定因子の影響であろう。しかし、渡部の漏水量実験結果には、ひびわ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われ定数なるものが含まれており、同定された材料定数および解析により得られた透水係数に既に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入力値として解析中に考慮しなくても(4)式中の材料定数や(5)式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ことになる。しかしながら、透水係数の適用性評価は伊藤らの実験に対してのみ確認されたものであり、今後多くの実験との対比により、その適用性の確認を行っていく必要があるものと考えられる。

5. 結論

本研究では、既往の漏水量実験結果に本解析理論を適用することにより、ひびわれによる不連続性の程度を表す材料定数が同定された。すなわち、これと同時にコンクリートが均質から不均質に至るまでの統一的な透水解析手法が確立されたとともに、不均質材料としてのコンクリートのひびわれ性状と透水係数との関係式が得られた。

参考文献

- 1) 石川広三：ひびわれからの雨漏りと外壁の雨仕舞、建築の技術と施工、No.258、1987
- 2) 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
- 3) 伊藤忠彦他：ひびわ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、1989、pp.412-413
- 4) 大下英吉、A.M.Farahat、石川靖晃、田辺忠顕：不連続面を有する弾塑性多孔質材料の変形挙動に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol15、No.1、1993、pp.573-578
- 5) 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
- 6) 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、1994、pp.650-651

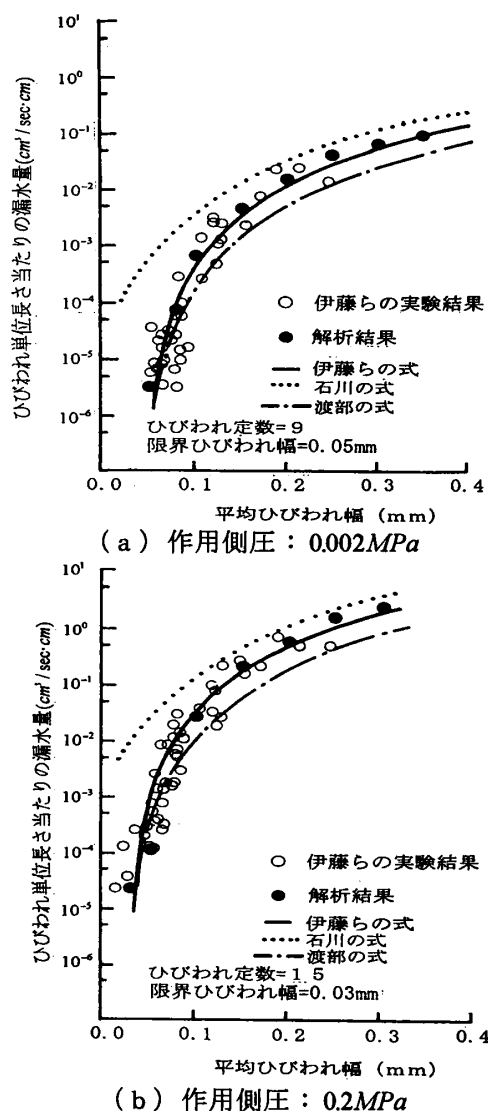


図-7 漏水量の実験結果と解析結果
(伊藤ら[3]の実験結果との比較)