

# 不均質材料としてのコンクリートの均質化 透水係数に関する解析的研究

大下英吉

正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

本研究では、マイクロ或いはマクロレベルにおいて局所的に異なるコンクリートの透水係数をひび割れが存在する状態においても統一的に均質化することのできる詳細なモデルの構築を行うとともに、その適用性を評価した。ひび割れを有するコンクリートは、ひび割れ領域、非ひび割れ領域からなるものとし、ひび割れ面における動水勾配の不連続性をマイクロレベルにおいて考慮することにより透水係数の均質化理論の構築を行った。

*Key Words* : permeability, homogenization, pore water pressure, crack element, uncracked element, nonhomogeneous material, water migration

## 1. はじめに

コンクリートや岩盤のような不均質材料では、透水問題においては透水係数、熱伝導問題においては線膨張係数や熱伝導率などの材料物性値がマイクロ或いはマクロレベルにおいて異なる。したがって、有限要素法により解析する際には、構成する各材料の特性を考慮した解析領域の要素分割が必要となってくる。そのために、節点数や要素数が膨大なものとなる場合があり、時により解析が困難となる場合も生じてくるわけである。さらに、実構造物を厳密に解析する際には、マイクロ或いはマクロひび割れを忠実に捉えるためにひび割れ本数は膨大な量となり、解析の際の前準備や計算時間に長時間要することが予想される。

このようなことから、前報<sup>1)</sup>で報告した水分移動モデルは、微視的レベルでコンクリート中の水分移動を評価するものであったが、コンクリートの全体的な水分移動特性を予測するためには、巨視的レベルでの評価も必要と考えられる。このことはすなわち、ひび割れ幅毎に異なる透水係数を数値計算上で効果的な巨視的レベルで評価する方法、すなわち均質化手法を意味するものである。

小田<sup>2)</sup>は、クラックテンソルを用いて節理性岩盤をそれと等価な均質多孔質材料に置き換える方法を提案している。また、京谷<sup>3)</sup>、三井<sup>4)</sup>は、応用数学の分野で構築された均質化手法の一種である Homogenization法を梁構造物や熱伝導問題に適用し、その有用性を示している。しかしながら、小田らのクラックテンソルを用いた均質化手法は、ひび割れ面でのみ透水が生じるという仮定から得られているものであり、コンクリート材料のようにひび割れが生じていない部分でも透水が生じるような材料に対しては、その適用が困難である。また、京谷、三井らの Homogenization法は、微視的周期構造を有する材料に対して適用可能な方法であり、コンクリート材料に生じるひび割れのように周期性の無いものに対しては、その適用が困難である。

一方、コンクリート材料に対しては、透水係数の均質化に関する理論的研究は殆ど為されていないものの、実験的手法により均質化透水係数を算出している研究<sup>5)</sup>は数多い。その中で、透水係数の均質化は、時間当たりの注水量或いは漏水量を試験体全断面積と水頭の直線勾配を仮定した動水勾配で除すことにより求められている。この方法は、すなわち、ダルシー流れに従う間隙水がひび割れ部および非ひ

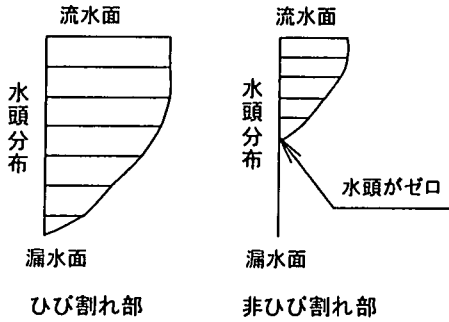


図-1 断面内の水頭分布

ひび割れ部のどの部位においても均一に流れ、しかも水頭の直線分布を仮定した上において成り立つものである。しかしながら、ひび割れを含むコンクリート体の水分移動は、コンクリートを組織する大小様々な径を持つ細孔内で均一に生じるというよりも、むしろマイクロ或いはマクロひび割れを通して急速に広がっていくものと考えられる。したがって、このようなひび割れを含むコンクリート内の水分移動は、不均一に生じるため、流れが生じていない部位に対してもダルシー則を適用する上述の方法は不適切である。また、流水断面内の水頭分布は、図-1に示すように、ひび割れ部では放物線分布を示し、非ひび割れ部ではある深さのところまで水頭がゼロとなる分布を示すというように各部位で異なった水頭分布或いは透水長さを示すため、それらを統一的に直線分布で近似した上述の方法には、定量的誤差が非常に大きいものと予想される。これにもまして重要な問題は、均質化透水係数を算出するためには、注水量或いは漏水量の実験を実施しなければならないということである。たとえそれらの実験を実施することにより均質化透水係数が算出できたとしても、その適用範囲はその実験供試体のみ限定され、ひび割れ性状などが異なった供試体に対しては適用が困難となるわけである。言い換えれば、拡張性を全く有していないことになる。このように、現時点においては、透水係数の均質化に関する精度良い評価手法は、全く確立されていないと言っても過言ではない。

本研究では、マイクロ或いはマクロレベルにおいて局所的に異なるコンクリートの透水係数をひび割れが存在する状態においても統一的に均質化するこ

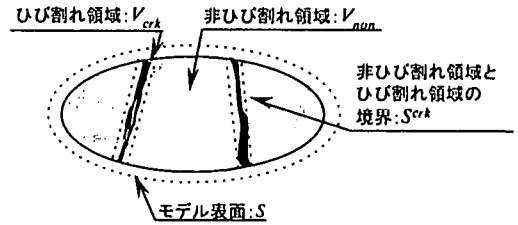


図-2 ひび割れを有するコンクリート体のモデル化

とのできる詳細なモデルの構築を行うとともに、その適用性を評価した。ひび割れを有するコンクリートは、ひび割れ領域、非ひび割れ領域からなるものとし、ひび割れ面における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透水係数の均質化理論の構築を行った。

## 2. 透水係数の均質化モデル

本研究では、ひび割れを有するコンクリートは、図-2に示すように骨材、セメントペーストおよび複数のクラックバンドから成るものと考え、クラックバンド面における動水勾配の不連続性をミクロレベルにおいて考慮して透水係数の均質化理論の構築を行った。

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  $d t_i$  により次式のように表すことができる。

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

ここで、 $V$  はコントロール体の全体積である。

式(1)は図-2に示す非ひび割れ領域における平均的なミクロな動水勾配増分  $d\bar{t}_i^{(non)}$  とひび割れ領域における平均的なミクロな動水勾配増分  $d\bar{t}_i^{(crk)}$  により次式のように表すことができる。

$$d\bar{t}_i = C_{non} d\bar{t}_i^{(non)} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} d\bar{t}_i^{(crk)} \right)_{no} + X_i \quad (2)$$

ここで、 $C_{non}$ 、 $C_{crk}$  は、それぞれコンクリートの全体積に対する非ひび割れ領域の体積および各ひび

割れ領域の体積の割合であり、次式により表すことができる。また、 $no$  はひび割れ領域番号であり、 $m$  はひび割れ領域の総数である。 $X_i$  は図-2に示す非ひび割れ領域とひび割れ領域間における動水勾配の不連続量である。

$$C_{non} = \frac{V_{non}}{V} \quad (3)$$

$$C_{crk} = \frac{V_{crk}}{V}$$

$V_{non}$  : 非ひび割れ領域の体積

$V_{crk}$  : 各ひび割れ領域の体積

さらに、平均的なマイクロな動水勾配増分  $d\bar{l}_i^{(non)}$  と各ひび割れ領域における平均的なマイクロな動水勾配増分  $d\bar{l}_i^{(crk)}$  は、それぞれ次式により表すことができる。

$$d\bar{l}_i^{(non)} = \frac{1}{V^{(non)}} \int_{V^{(non)}} d l_i^{(non)} dV \quad (4)$$

$$d\bar{l}_i^{(crk)} = \frac{1}{V^{(non)}} \int_{V^{(crk)}} d l_i^{(crk)} dV$$

ここで、 $d l_i^{(non)}$ ,  $d l_i^{(crk)}$  は、それぞれ非ひび割れ領域および各ひび割れ領域におけるマイクロな動水勾配増分である。

式(2)中の右辺第1, 2項の非ひび割れ領域と各ひび割れ領域の平均的なマイクロな動水勾配増分は、それぞれ全水頭増分  $dh^{(non)}$ ,  $dh^{(crk)}$  により次式で表される。

$$\begin{aligned} d\bar{l}_i^{(non)} &= \nabla_i dh^{(non)} \\ d\bar{l}_i^{(crk)} &= \nabla_i dh^{(crk)} \end{aligned} \quad (5)$$

なお、非ひび割れ領域およびひび割れ領域の全水頭増分  $dh^{(non)}$ ,  $dh^{(crk)}$  は、次式のようになる。

$$\begin{aligned} dh^{(non)} &= dz^{(non)} + \frac{dp^{(non)}}{\gamma_w} \\ dh^{(crk)} &= dz^{(crk)} + \frac{dp^{(crk)}}{\gamma_w} \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $dz^{(non)}$ ,  $dz^{(crk)}$  および  $dp^{(non)}$ ,  $dp^{(crk)}$  は、それぞれ非ひび割れ領域、ひび割れ領域における位置水頭増分および間隙水圧増分であり、 $\gamma_w$  は液体の単位体積重量である。

式(2)に式(5)を代入すると、式(2)中の右辺第1, 2項の和は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} C_{non} \cdot d\bar{l}_i^{(non)} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \cdot d\bar{l}_i^{(crk)} \right)_{no} = \\ \frac{1}{V} \left( \int_{V^{(non)}} dh_i^{(non)} dV + \sum_{no=1}^m \left( \int_{V^{(crk)}} dh_i^{(crk)} dV \right)_{no} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)の右辺の各項に Gauss の発散定理を適用し、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(7)は次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} C_{non} \cdot d\bar{l}_i^{(non)} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \cdot d\bar{l}_i^{(crk)} \right)_{no} = \\ \frac{1}{V} \int_S dh n_i dS + \frac{2m}{V} \sum_{no=1}^m \left( \int_{S^{crk}} [dh]_{non}^{crk} n_i dS \right)_{no} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $S^{crk}$  は図-2に示す各領域であり、非ひび割れ領域と各ひび割れ領域間の境界領域を表している。また、 $[dh]_{non}^{crk}$  は非ひび割れ領域と各ひび割れ領域間における全水頭の不連続量を表している。なお、式(8)中の右辺第1項は、平均的なマクロな動水勾配増分  $d\bar{l}_i$  を表しており、式(8)は次式のように書き直すことができる。

$$\begin{aligned} d\bar{l}_i = C_{non} \cdot d\bar{l}_i^{(non)} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \cdot d\bar{l}_i^{(crk)} \right)_{no} \\ - \frac{2m}{V} \sum_{no=1}^m \left( \int_{S^{crk}} [dh]_{non}^{crk} n_i dS \right)_{no} \end{aligned} \quad (9)$$

したがって、式(2)中の  $X_i$  は式(9)中の右辺第3項となる。

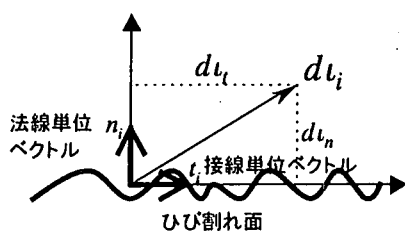


図-3 ひび割れ面における動水勾配増分

次に、図-3に示すようにひび割れ面における動水勾配増分  $d t_i$  を、次式のように定義する。

$$d t_i = d t_n n_i + d t_t t_i \quad (10)$$

ここで、 $d t_n, d t_t$  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。

いま、全水頭の不連続量  $[d h]_{non}^{crk}$  を次式のように仮定する。

$$[d h]_{non}^{crk} = V / (2m) \cdot \alpha \cdot d \bar{t}_n \quad (11)$$

ここで、 $\alpha$  は不連続性の程度を表す材料定数であり、特にひび割れ幅によって変化する。なお、本研究では $\alpha$ の値には、前報<sup>1)</sup>で算出されたひび割れ依存型の材料定数を適用した。

さらに、ひび割れ面に垂直な動水勾配成分  $d \bar{t}_n$  は平均的なマクロな動水勾配増分  $d \bar{t}_i$  により次式のように定義できる。

$$d \bar{t}_n = d \bar{t}_i \cdot n_i \quad (12)$$

式(9)に式(11)、(12)を代入し、平均的なマクロな動水勾配増分  $d \bar{t}_i$  は、各ひび割れ領域において等しいものと仮定すると、式(9)は次式のようになる。

$$d \bar{t}_i = C_{non} \cdot d \bar{t}_i^{(non)} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \cdot d \bar{t}_i^{(crk)} \right)_{no} - \beta_{ij} d \bar{t}_j \quad (13)$$

ここで、 $\beta_{ij}$  は次式により表すことができる。

$$\beta_{ij} = \sum_{no=1}^m \left( \int_S^{crk} \alpha n_i n_j dS \right)_{no} \quad (14)$$

式(13)中の動水勾配  $d \bar{t}_i, d \bar{t}_i^{(non)}, d \bar{t}_i^{(crk)}$  の指標  $i$  を  $j$  に変換すると、式(13)は次式のようになる。

$$d \bar{t}_i \delta_{ij} = C_{non} \cdot d \bar{t}_j^{(non)} \delta_{ij} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \cdot d \bar{t}_j^{(crk)} \delta_{ij} \right)_{no} - \beta_{ij} d \bar{t}_j \quad (15)$$

コンクリート内の流れが<sup>8)</sup>、次式に示す Darcy の法則に従うものと仮定すると、

$$\begin{aligned} d \bar{v}_i^{(non)} &= K_{ij}^{(non)} d \bar{t}_j^{(non)} \\ d \bar{v}_i^{(crk)} &= K_{ij}^{(crk)} d \bar{t}_j^{(crk)} \end{aligned} \quad (16)$$

式(15)は次式のようになる。

$$d \bar{t}_i \delta_{ij} = C_{non} \delta_{ik} K_{kl}^{(non)-1} d \bar{v}_l^{(non)} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \delta_{ik} K_{kl}^{(crk)-1} d \bar{v}_l^{(crk)} \right)_{no} - \beta_{ij} d \bar{t}_j \quad (17)$$

ここで、 $d \bar{v}_i^{(non)}, d \bar{v}_i^{(crk)}$  は、それぞれ非ひび割れ領域および各ひび割れ領域内の平均的なミクロな流速であり、 $K_{ij}^{(non)}, K_{ij}^{(crk)}$  は、それぞれ非ひび割れ領域および各ひび割れ領域の透水マトリックスである。なお、式(17)の右辺3項を左辺に移行して整理すると次式のようになる。

$$Q_{ij} d \bar{t}_i = C_{non} \delta_{ik} K_{kl}^{(non)-1} d \bar{v}_l^{(non)} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \delta_{ik} K_{kl}^{(crk)-1} d \bar{v}_l^{(crk)} \right)_{no} \quad (18)$$

ここで、マトリックス  $Q_{ij}$  は次式に示す通りである。

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

いま、平均的なマクロな流速増分  $d\bar{v}_i$  と非ひび割れ領域と各ひび割れ領域の平均的なミクロな流速増分  $d\bar{v}_i^{(non)}, d\bar{v}_i^{(crk)}$  との関係を表すように定義する。

$$\begin{aligned} d\bar{v}_i^{(non)} &= C_{ij}^{(non)} d\bar{v}_j \\ d\bar{v}_i^{(crk)} &= C_{ij}^{(crk)} d\bar{v}_j \end{aligned} \quad (20)$$

ここで、 $C_{ij}^{(non)}, C_{ij}^{(crk)}$  をそれぞれ非ひび割れ領域および各ひび割れ領域の流速集中マトリックスと呼ぶことにする。

式(18)に式(20)を代入し、各ひび割れ領域の平均的なミクロな流速増分は等しいものと仮定すると、式(18)は次式のようにになる。

$$Q_{ij} d\bar{v}_j = (C_{non} \cdot \delta_{ik} K_{kl}^{(non)})^{-1} C_{lm}^{(non)} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \cdot \delta_{ik} K_{kl}^{(crk)} \right)^{-1} C_{lm}^{(crk)} d\bar{v}_m \quad (21)$$

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  $d\bar{t}_i$  とを関係付けるコンクリート全体の透水マトリックス  $K_{ij}$  は、次式のようにになる。

$$K_{ij} = (C_{non} \cdot \delta_{ik} K_{kl}^{(non)})^{-1} C_{lm}^{(non)} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \cdot \delta_{ik} K_{kl}^{(crk)} \right)^{-1} C_{lm}^{(crk)} Q_{mj} \quad (22)$$

一方、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、平均的なマクロな流速増分  $d\bar{v}_i$  は、式(2)と同じように非ひび割れ領域および各ひび割れ領域の平均的なミクロな流速増分  $d\bar{v}_i^{(non)}, d\bar{v}_i^{(crk)}$  を用いて次式のように表すことができる。

$$d\bar{v}_i = C_{non} \cdot d\bar{v}_i^{(non)} + \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \cdot d\bar{v}_i^{(crk)} \right)_{no} \quad (23)$$

式(23)において、各ひび割れ領域の平均的なミクロな流速増分は等しいものと仮定すると、式(23)は次式のようにになる。

$$d\bar{v}_i = C_{non} \cdot d\bar{v}_i^{(non)} + C_{tcr} \cdot d\bar{v}_i^{(crk)} \quad (24)$$

ここで、 $C_{tcr}$  は次式に示すように、コンクリートの全体積に占める全ひび割れ領域の体積の割合である。

$$C_{tcr} = \sum_{no=1}^m (C_{crk})_{no} \quad (25)$$

式(24)に式(20)を代入すると、非ひび割れ領域とひび割れ領域の流速集中マトリックスの関係は、次式で表すことができる。

$$C_{non} C_{ij}^{(non)} + C_{tcr} C_{ij}^{(crk)} = I_{ij} \quad (26)$$

ここで、 $I_{ij}$  は単位マトリックスである。

したがって、式(22)中に示される流速集中マトリックス  $C_{ij}^{(non)}, C_{ij}^{(crk)}$  は、式(22)と式(26)との連立方程式を解くことにより、それぞれ次式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} C_{ij}^{(crk)} &= \left\{ \left( \sum_{no=1}^m \left( C_{crk} \cdot \delta_{ik} K_{kl}^{(crk)} \right)^{-1} \right)_{no} - C_{tcr} \cdot \delta_{ik} K_{kl}^{(non)} \right\}^{-1} (Q_{lq} - \delta_{ln} K_{no}^{(non)} \delta_{op} K_{pq}) K_{qj}^{-1} \\ C_{ij}^{(non)} &= \left( \delta_{ij} - C_{tcr} \cdot C_{ij}^{(crk)} \right) / C_{non} \end{aligned} \quad (27)$$

このように、均質材料としての透水係数が式(22)から求まることになる。実際の計算は、式(27)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し、式(22)から新たな均質化された透水マトリックスを求める。そして、このような一連のループが、現ステップでの漏水量と前ステップでの漏水量の差がある許容誤差範囲になるま

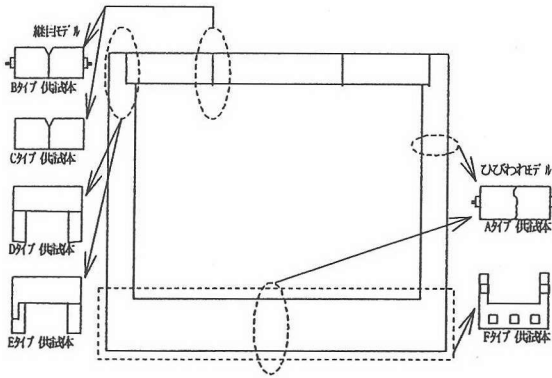


図-4 陸地処分用ピットのモデル化

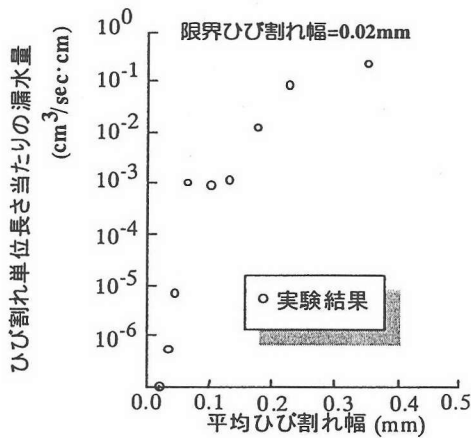


図-6 漏水量実験結果

で繰り返し行われ、漏水量の差が許容誤差範囲内になった時点の透水係数が均質化された透水係数である。すなわち、本解析手法は、初期条件、境界条件および材料特性値を代入することにより、均質化透水係数が自動的に求まるわけである。

### 3. 本解析手法による均質化透水係数

本章では、構築した均質化手法を漏水量実験結果に適用し、その適用性を評価することにする。

#### (1) 漏水量実験

渡部<sup>7)</sup>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-4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

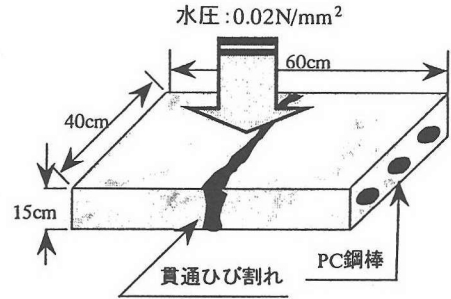


図-5 Aタイプ供試体の形状寸法

タイプ供試体のひび割れは、地震時に想定される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、鉛直方向の打ち継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継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-5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-6に示す通りである。同図は、図-5に示す供試体表面に0.02 N/mm<sup>2</sup>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 $\omega$ との関係を表している。同図から、供試体下面からの漏水量は、ひび割れ幅の増大とともに大きくなっており、漏水を生じない限界ひび割れ幅は0.02mmとなっている。

#### (2) 均質化透水係数の解析的評価

均質化透水係数の解析的評価は、渡部の行った実験供試体のうちAタイプ供試体であり、その形状は、図-5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り、ひび割れ幅は供試体の各断面に貼り付けた各コンタクトゲージの平均的な値である。また、水圧の作用方法は、供試体表面に0.02N/mm<sup>2</sup>の水圧が作用するようにヘッドタンクを上下させることにより実施さ

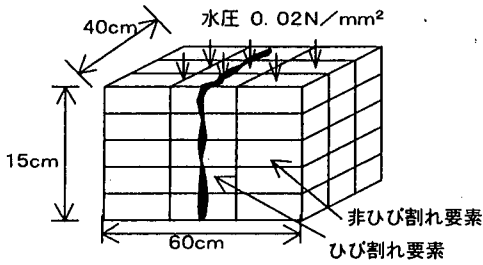


図-7 Aタイプ供試体の解析モデル

れた。この供試体に対する解析方法は、まずAタイプ供試体の全体を解析領域として、図-7に示す解析のモデル化を行った。この解析モデルは、貫通ひび割れを表わすひび割れ要素（ひび割れ領域の総数：15、ひび割れ方向：水圧作用方向に対して $0^\circ$ ）とその周辺部の非ひび割れ要素からなっており、モデル表面に $0.02\text{ N/mm}^2$ の水圧を作用させることにより均質化透水係数とそれに対応する漏水量が求まることになる。この際、解析に用いる材料定数は、表-1に示すように、実験から得られたものであり、非ひび割れ要素の透水係数（初期透水係数 $K_0$ ）は、図-8に示す村田<sup>8)</sup>の透水実験結果から所定の水セメント比に対する透水係数を算出し、図-9に示すT.C.Powers<sup>9)</sup>の透水実験結果から外挿により材齢14日の時点での透水係数を求めた。なお、算定方法は、次式に示す通りである。

$$K_0 = 10 \times 10^{-12} \quad \times 1.67$$

(村田の実験)      (Powersの実験)

$$= 1.67 \times 10^{-11} \text{ cm/sec} \quad (28)$$

一方、ひび割れ要素の透水係数は、ひび割れ幅に依存するため、次式に示す大下らの式<sup>7)</sup>を用いて所定のひび割れ幅に対応する値を求め、それを適用した。

$$\log(K/K_0) = 0 \quad 0.0 \leq \omega < 0.015(\text{mm})$$

$$\log(K/K_0) = 6.349 \cdot \log \omega + 11.580 \quad 0.015 \leq \omega < 0.24(\text{mm}) \quad (29)$$

$$\log(K/K_0) = 2.570 \cdot \log \omega + 9.238 \quad 0.24(\text{mm}) \leq \omega$$

表-1 解析に用いる材料定数

圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ )	初期透水係数 ( $\text{cm/sec}$ )
57.6	6.18	$3.6 \times 10^4$	$1.67 \times 10^{-11}$

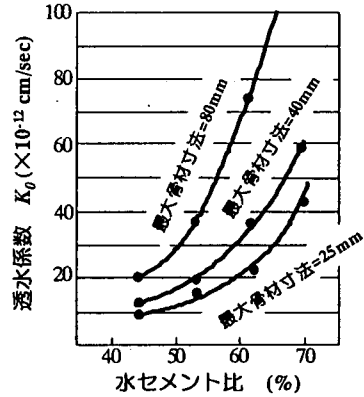


図-8 村田の透水実験結果

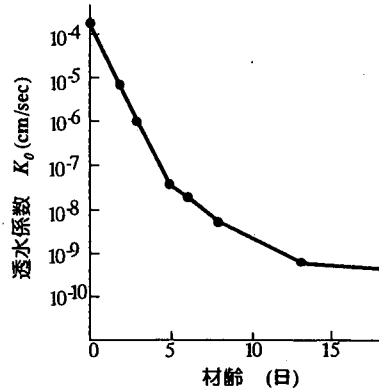


図-9 T.C. Powersの透水実験結果

ここで、 $K$ は不均質材料としてのひび割れ要素の透水係数であり、 $K_0$ は均質材料としての非ひび割れ要素の透水係数（初期透水係数）であり、本研究では $1.67 \times 10^{-11}(\text{cm/sec})$ である。また、 $\omega$ はひび割れ幅である。

渡部の実験結果に対する均質化透水係数の解析的評価で用いたひび割れ幅毎の透水係数は、表-2に示す通りであり、ひび割れ幅の増大とともに透水係数は大きくなっていることが分かる。

上述が一連の解析方法であるが、本モデルは式(22)および式(27)から分かるように、収束計算を必要とするわけである。実際の計算は、式(27)で示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に前ステップの値を代入して流速集中

表-2 ひび割れ幅に依存する透水係数

透水係数 ×10 <sup>9</sup> (cm/sec)	ひび割れ幅(mm)								
	0.04	0.05	0.08	0.12	0.15	0.19	0.24	0.36	0.50
	8.46×10 <sup>9</sup>	3.49×10 <sup>1</sup>	6.89×10 <sup>2</sup>	9.05×10 <sup>3</sup>	3.73×10 <sup>4</sup>	1.67×10 <sup>5</sup>	7.38×10 <sup>5</sup>	2.09×10 <sup>6</sup>	4.86×10 <sup>6</sup>

表-3 均質化透水係数解析結果

透水係数(cm/sec)	ひび割れ幅(mm)				
	0.04	0.05	0.08	0.12	0.15
本均質化手法 $K_{homo}$	1.59×10 <sup>-9</sup>	7.59×10 <sup>-9</sup>	1.54×10 <sup>-6</sup>	2.53×10 <sup>-6</sup>	1.65×10 <sup>-5</sup>
漏水量からの逆算 (式(30)) $K_{exp}$	1.18×10 <sup>-9</sup>	8.62×10 <sup>-9</sup>	1.80×10 <sup>-6</sup>	1.80×10 <sup>-6</sup>	1.50×10 <sup>-5</sup>

透水係数(cm/sec)	ひび割れ幅(mm)			
	0.19	0.24	0.36	0.50
本均質化手法 $K_{homo}$	2.70×10 <sup>-5</sup>	1.54×10 <sup>-4</sup>	3.59×10 <sup>-4</sup>	1.26×10 <sup>-3</sup>
漏水量からの逆算 (式(30)) $K_{exp}$	2.07×10 <sup>-5</sup>	1.40×10 <sup>-4</sup>	3.02×10 <sup>-4</sup>	9.15×10 <sup>-4</sup>

マトリックスを更新し、式(22)から新たな均質化透水マトリックスを求め、それに対応する漏水量を算出する。このような一連の解析ループが、現ステップでの漏水量と前ステップでの漏水量の差が許容誤差範囲内になるまで繰り返して行われ、許容誤差範囲内になった時点の式(22)の透水係数が求める均質化透水係数になるわけであり、これと同時に漏水量も算出されるわけである。このように、本解析手法は、事前に材料特性値などの初期値に関する実験とひび割れ性状のみを代入することにより、均質化透水係数とそれに対応する漏水量が自動的に求まるわけである。

渡部の実験に対する本解析手法による均質化透水係数をひび割れ幅毎に表-3に示す。表中に示す均質化透水係数  $K_{homo}$  とは、本解析手法により算出したものであり、実験値から予測した透水係数  $K_{exp}$  とは、実験により得られた供試体下面からの漏水量を用いて、次式から算出した透水係数である。

$$K_{exp} = \frac{Q}{A \times B \times i} \quad (30)$$

A = 37cm, B = 60cm

ここで、 $Q$  は単位時間当たりの漏水量であり、 $A$  および  $B$  は供試体の漏水面の形状寸法であり、 $i$  は動水勾配である。なお、動水勾配  $i$  は、水の流水面から漏水面までの区間において水頭は直線分布であると仮定することにより、次の値となる。

$$i = \frac{200\text{cm}}{15\text{cm}} = 13.3$$

この手法により求めた透水係数は、1章でも述べたように、精度の良い均質化透水係数ではないが、ある程度の目安となる値であることは言うまでもない。

表-3に示すように、本解析手法による均質化透水係数は、どのひび割れ幅においても、式(30)から逆算した透水係数と近い値を示しており、本解析手法の適用性が、ある程度判断されるわけである。しかしながら、式(30)により逆算した透水係数は、非ひび割れ部およびひび割れ部ともに同様の水の流れを仮定し、さらに水頭の直線分布を仮定したものであるため、上述のように両透水係数が近い値を示したからといって、本解析手法の適用性が詳細に評価されたわけではない。すなわち、本解析手法の適用性を詳細に評価するためには、本解析手法によるモデル下面からの漏水量と実験による漏水量の比較検討により判断されなければならないわけである。

### (3) 均質化透水係数による漏水量評価

本解析手法の適用性を詳細に評価するためには、前節により得られた均質化透水係数による漏水量と実験による漏水量との比較検討を行わなくてはならない。

図-10は、前節で得られた均質化透水係数による漏水量の予測値と実験値を、ひび割れ幅毎に示し



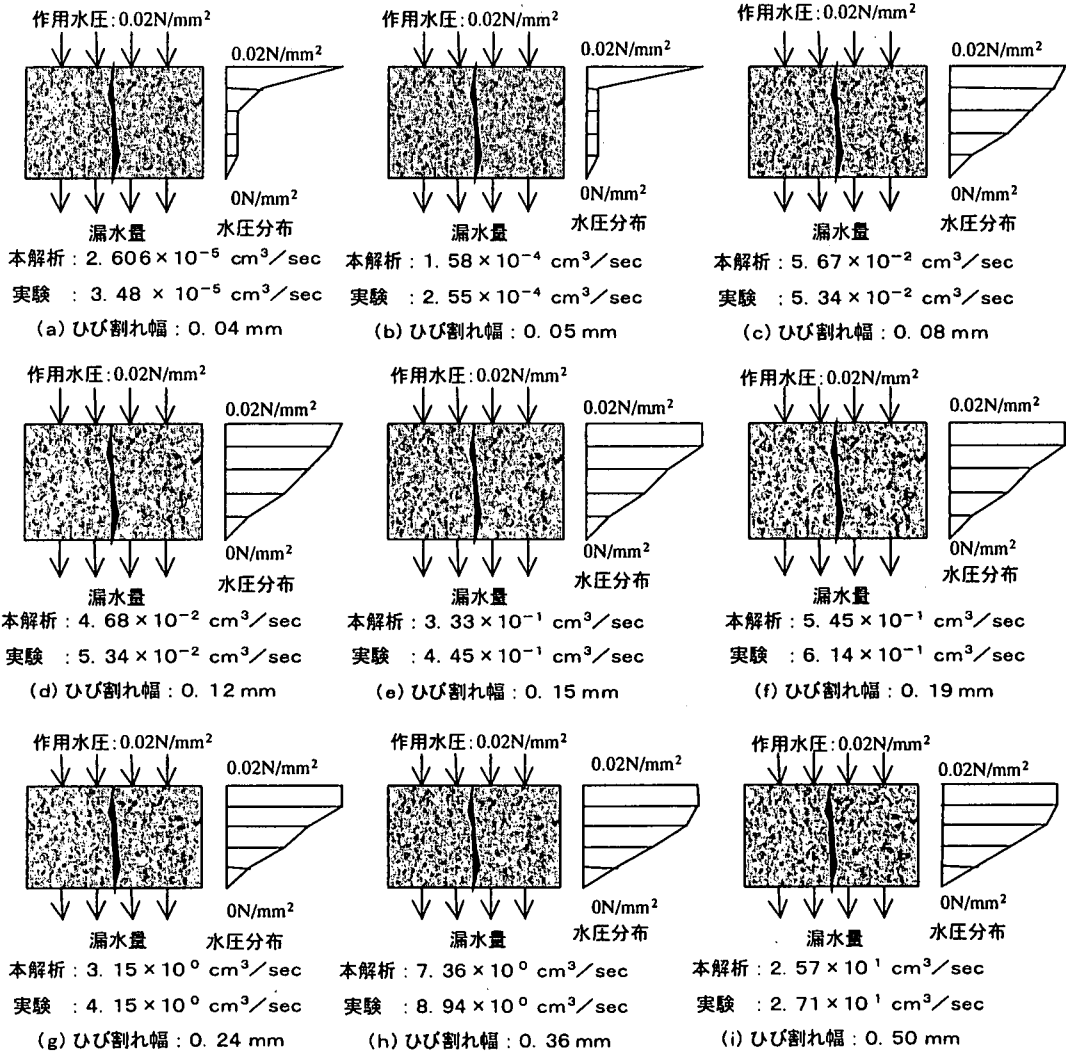


図-10 均質化透水係数による漏水量の予測値と実験値

たものである。また、図中には、本解析手法による断面内の水圧分布も併せて示している。

まず、均質化透水係数による供試体下面からの漏水量は、実験結果を非常に精度良く評価しており、構築した本解析手法の適用性が評価される。均質化透水係数は、ひび割れ幅の増大とともに大きくなり、それに対応して漏水量も大きくなっている。断面内の水圧分布は、ひび割れ幅が小さい場合には、下に凸の放物線分布を示し、ひび割れ幅の増大とともに徐々に上に凸の放物線分布に移行している。断面内の水圧分布を漏水量との対比から考察すると、漏水が殆ど生じない場合には、水圧分布は下に凸となり、

漏水量が多くなると上に凸の分布に変遷する。すなわち、ひび割れ幅が0.05mm~0.08mmの間において、急激に漏水が多くなる、言い換えれば水圧分布が下に凸から上に凸に変遷する変曲点が存在するものと考えられる。式(30)では、この分布を直線と仮定したわけであるが、実際には、下に凸或いは上に凸の放物線分布を示しており、この分布の相違が均質化透水係数と式(30)による透水係数の差異を生じている一つの要因と考えられる。

このように、本解析手法は、均質化透水係数および漏水量を精度良く評価することができ、事前にひび割れを有する供試体に対する実験を実施しなくと

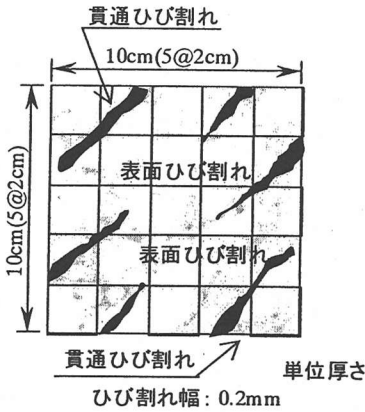


図-1 1 コンクリートのひび割れ性状

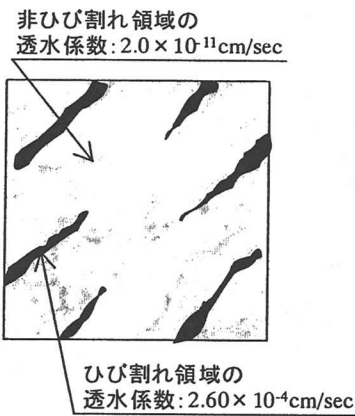


図-1 2 コンクリート内の透水係数分布

も、初期条件、境界条件および材料物性値を代入するのみで、精度の良い均質化透水係数およびそれに対応する漏水量が自動的に求まることが確認されたわけである。そこで次章では、複雑なひび割れ形態をしたコンクリート体の均質化透水係数を本解析手法により算出することにする。

#### 4. 複雑なひび割れ形態をしたコンクリートの均質化透水係数

##### (1) コンクリート内の透水係数分布

コンクリート内のひび割れ性状は、図-1 1 に示すものを仮定した。ひび割れ性状は、表面ひび割れおよび貫通ひび割れであり、全ひび割れとも、その幅が 0.2mm であり、水平方向に対して 45° の角度を為しているものと想定した。要素分割は同図に示

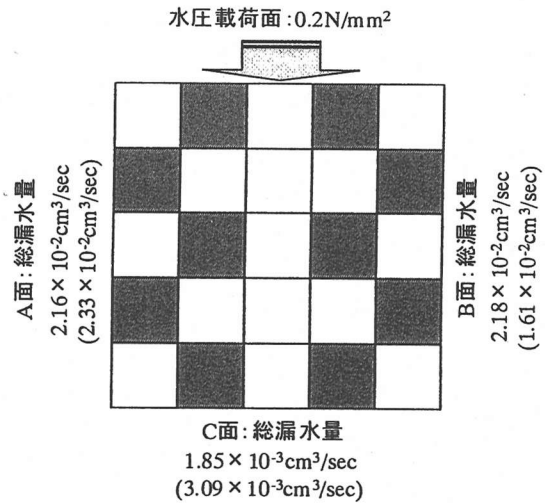


図-1 3 均質化透水係数による漏水量予測

すように、ひび割れが存在する部分にはひび割れ要素を導入し、コンクリート全体積に占める非ひび割れ領域とひび割れ領域の体積の割合は、0.6 および 0.4 とした。本来であれば、メッシュ依存性の影響評価が必要であるが、本研究では構築したモデルの妥当性の評価に重点を置くため、同図に示す 1 種類の要素分割に対してのみ解析を実施した。なお、解析は、要素厚さを単位と考えた 3 次元にて実施された。

このような複雑なひび割れ形態をしたコンクリート体に対して、図-1 2 に示すように、非ひび割れ領域における透水係数  $K_0$  は  $2.00 \times 10^{-11}$  (cm/sec)、と仮定し、ひび割れ領域における透水係数  $K$  は、ひび割れ幅を 0.2mm とすると式 (29) から  $2.78 \times 10^{-4}$  (cm/sec) となる。

また、本均質化手法の適用性も同時に評価するために、前報<sup>1)</sup>で報告した精度の良い漏水量予測を行うことができる水・コンクリート骨格連成解析手法に図-1 1 のモデルを適用し、得られた各面からの漏水量を厳密解と仮定した。

##### (2) 均質化された透水係数の予測

図-1 2 に示す透水係数分布をしたひび割れを有するコンクリートの均質化された透水係数は、2.03

$\times 10^{-5}$  (cm/sec)となり、同時に得られた各面における漏水量は図-13に示す通りである。この漏水量は、上面に水圧  $0.2 \text{ N/mm}^2$  を作用させた場合に生じる漏水量である。なお、図中には水・コンクリート骨格連成解析手法により得られた漏水量結果を括弧内で表している。すなわち、両解析結果を比較することにより、均質化された透水係数  $2.03 \times 10^{-5}$  (cm/sec) の妥当性および均質化手法の適用性が評価できることになる。

図-13から、各節点毎の漏水量は、水・コンクリート骨格連成解析結果（ひび割れ要素を用いた解析結果）と均質化された透水係数を用いた解析結果とは、当然のことながら異なる。すなわち、ひび割れ要素を用いた解析では、ひび割れ面において漏水量が多いことに対して、均質化された透水係数を用いた解析では、作用水圧面と各節点との水圧勾配が大きいほど漏水量は多くなるであろう。したがって、均質化された透水係数を用いた解析では、作用水圧面よりも離れるほど、すなわちC面に近いほど漏水量は小さくなる。

また、各面からの漏水量は、両解析結果でA面においては約7%、B面では約26%、およびC面では約80%の違いがある。このように、漏水が卓越している面においては両解析でほとんど差異はないが、漏水が少ない面においては両解析で大きな差異が生じている。しかしながら、本均質化手法では、漏水量が卓越している面からの漏水量が、ひび割れ要素を用いた解析結果とほぼ同じであることや、流れの傾向すなわち各面からの漏水量の大小関係が同じであることなどから、本均質化手法の適用性が確認されるものと思われる。

## 5. 結論

本研究では、マイクロ或いはマクロレベルにおいて局所的に異なるコンクリートの透水係数をひび割れが存在する状態においても統一的に均質化することのできる詳細なモデルの構築を行うとともに、その適用性を評価した。ひび割れを有するコンクリートは、ひび割れ領域、非ひび割れ領域からなるものとし、ひび割れ面における動水勾配の不連続性をマイクロレベルにおいて考慮することにより透水係数の

均質化理論の構築を行った。以下に、本研究から得られた結果をまとめる。

(1) ひび割れ部と非ひび割れ部における動水勾配の不連続性をマイクロレベルにおいて考慮することにより、マイクロ或いはマクロレベルにおいて局所的に異なるコンクリートの透水係数をひび割れが存在する状態においても統一的に均質化することのできる詳細なモデルの構築が行われた。

(2) 構築した透水係数の均質化手法は、実験結果との対比により、その適用性が評価された。

(3) 構築したモデルによる解析的評価により、ひび割れ内の間隙水圧分布は、ひび割れ幅により下に凸或いは上に凸の放物線分布となる。

(4) 構築した透水係数の均質化手法は、初期条件、境界条件および材料特性値を入力することにより、均質化透水係数およびそれに対応する漏水量が自動的に求まるものである。

## 参考文献

- 1) 大下英吉, 田辺忠顕: 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, 土木学会論文集, No.526/V-29, pp.63-77, 1995.
- 2) 小田国寛, 前波卓郎, 数納慎悟, 羽出山吉裕: クラックテンソルによる岩盤透水係数の評価, 第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.121-126, 1984.
- 3) 京谷孝史: Homogenization 法の梁構造物への応用, 第5回計算力学シンポジウム論文集, pp.249-256, 1991.
- 4) 京谷孝史, 渡嘉敷直彦: Homogenization 法による琉球石灰岩の力学特性評価について, 第2回地下き裂のキャラクターゼーションワークショップ論文集, pp.249-256, 1992.
- 5) 松田秀一, 藤川富夫, 京谷孝史, 三井康司: Homogenization 法の熱伝導解析への適用, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.435-444, 1994.
- 6) 坂口雄彦, 小西一寛, 藤原愛, 辻幸和: 中空円筒コンクリート構造物の長期透水性評価実験, コンクリート工学年次論文報告集, No.1/Vol.19, pp.643-648, 1997.
- 7) 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.
- 8) Murata, J.: Studies on The Permeability of Concrete, *Trans.*

of JSCE, No.77, Nov., pp.69-103, 1961.

- 9) Powers, T. C., Copeland, L. E., Hayes, J. C. and Mann,  
H. M. : Permeability of Portland Cement Paste, *ACI Journal*,  
No.51-14, Nov., pp.285-298, 1954.

(1998. 9. 8 受付)

## ANALYTICAL STUDY ON HOMOGENIZATION OF PERMEABILITY IN CONCRETE AS A NONHOMOGENEOUS MATERIAL

Hideki OSHITA

The analytical study on the development of the homogenization of permeability in concrete, which is composed of crack and uncracked region, was performed. The applicability of the proposed model was estimated due to the comparison with the leakage water experiments. Further, the homogenized permeability in concrete having the complex crack pattern was also estimated analytically. In the proposed model, concrete is composed of crack and uncracked region and then the discontinuity of hydraulic gradient on cracks are taken into account in micro-level.