

V-278 粒状体モデルによる透水性コンクリートの透水係数の推算

（財）電力中央研究所 正会員 松井 淳

1. はじめに

透水性コンクリートは骨材の粒度分布が特異であり、粗骨材のみを用いているものが多く、これによりその透水係数の値が大きく変化する。従来は配合選定試験と共に透水係数を測定し、配合を決定していたが、用途の拡大を図るためには、適切な数学モデルに基づいた検討も必要である。本研究は、このような観点から骨材を2次元粒状要素とした粒状体モデルを構築し、配合設計の時点で透水係数を推定する手法の開発を目的に行った。

2. 解析モデルの作成

図-1に解析モデルの作成の手順を示す。このモデルでは粒子が骨材、間隙がコンクリート中の空隙及び硬化ペーストを表す。粒子モデルが所要の条件（間隙率等）を満たすために、粒状要素法⁽¹⁾を用いてパッキングを行った。この手順が妥当であることは既報⁽²⁾により確認している。これにより任意の粒度の骨材からなる、任意の大きさと形状を持つモデルを作成することができる。

解析モデルは、玉井の実験的研究⁽³⁾に対応させて作成し、骨材として6号骨材（粒径：13.0～5.0mm）、7号骨材（粒径：7.5～2.5mm）及び8号骨材（粒径：2.5～1.2mm）を用いた透水性コンクリートに対する解析モデルを作成した。

3. 粒状体内部の物質移動の定義

Satake⁽⁴⁾によるグラフ解析により粒状体内部の間隙を定量的に表し、粒状体内部の物質移動経路を定めた。これは、粒子の中心、接触及び間隙をそれぞれ節点、枝及び閉路によって置き換えたグラフ（置換グラフ）と閉路、枝及び節点に置き換えたグラフ（置換グラフの双対グラフ）によって表すものである。図-2にごく簡単な例を図解した。実線の図形が置換グラフ、点線の図形がその双対グラフである。置換グラフは一般には三角形以外の多角形を含んだグラフとなるが図中の一点鎖線のような対角線を補助線として加えることにより、全て三角形からなるグラフに修正することが可能である。この双対グラフではその枝が粒子を縫うように形成されている。よって、粒状体中を物質が移動する際の経路と定めることにした。今、この置換グラフ及びその双対グラフは、それぞれ計算幾何学において基本的な情報処理の役割を果たすDelaunay多角形及びVoronoi多角形に一致する。よって、実際

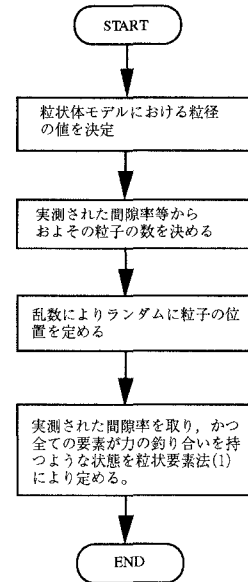


図-1 解析モデルの作成フロー

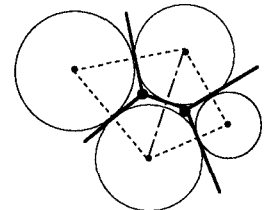


図-2 粒状体の置換グラフとその双対グラフ

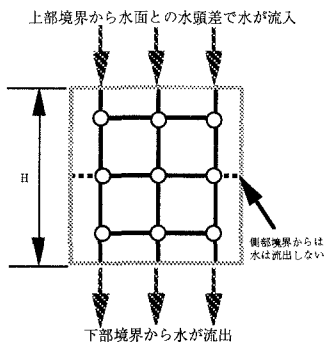


図-3 定水位透水試験のシミュレーション概念図

表-1 透水係数を定める2種類の予測式

	平均透水係数	平均局所透水係数
予測式	$K = \frac{\gamma_w R^2}{8\mu}$	$\bar{k} = m \left\{ \frac{\gamma_w r^2}{8\mu} \right\}$
円管半径	$R = \frac{(1-\alpha)S_v}{2\Sigma l}$	$r = \frac{(1-\alpha)s_v}{2\Sigma l}$
記号	γ_w : 水の単位体積重量 μ : 水の粘性係数（ポアズ） R : 管路の断面半径 S_v : 粒状体内部の間隙面積（領域面積と粒子の面積の総和の差） α : 間隙へのペーストの充填率 Σl : Voronoi 枝の長さの総和	γ_w : 水の単位体積重量 μ : 水の粘性係数（ポアズ） r : 当該間隙中の管路の断面半径 s_v : 当該間隙の面積 α : 間隙へのペーストの充填率 Σl : 当該間隙中のVoronoi 枝の長さの総和

注) $m(*)$ は、括弧内の対数平均をとるものとする。

に演算を行う際には、粒子の中心座標を母点(generator)として与え、それに対するVoronoi多角形を作成するフローで各解析モデルを作成した。

4. 管路網モデルによる透水係数の予測式の誘導

3. で定めたVoronoi多角形を管路網とし、粒状体内の水はこの管路網中を移動するものとした。簡単のため管路の断面は円形とした。また、流速、間隙共微小であると考えられることから水流は層流のPoiseuilleの法則に従うものとした。これから、表-1にあるような2種類の透水係数を定義した。平均透水係数は粒状体全体の空隙面積をVoronoi枝の長さの総和で除した値を管路の直径の値とし、これから透水係数を算出したものであり、透水係数の空間的な分布は考慮していない。局所透水係数は、空隙毎に空隙面積を空隙中のVoronoi枝の長さの総和で除して管路の直径の値を求め、同様に透水係数を算出したものである。この空隙の数に等しい透水係数の分布をその対数平均値で代表し、平均局所透水係数と称することにした。

また、管路網と電気回路網との類似性を利用した定常浸透流解析も、以下のような浸透方程式を解くことにより行うことができる（詳細な定式化については参考文献(2)を参照されたい）。

$$\{D_y D^T\} V = S \quad (1)$$

ここに、 D : Voronoi多角形の有向接続行列

V : 各節点の流量を表す列ベクトル

S : 各節点の水頭値を表す列ベクトル

y : 各Voronoi枝の流量と水頭差を関係づける行列

y は、具体的に以下のように表される。

$$y = [y_i] = \begin{bmatrix} k_i A_i \\ L_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 k_i : 管路 i の透水係数

A_i : 管路 i の断面積

L_i : 管路 i の始点と終点のx座標の差の絶対値

5. 解析結果

4. で定めた予測式による解析結果を図-4, 5, 6に示す。平均透水係数及び平均局所透水係数から推算した結果は比較的粒径の小さい骨材を用いた場合には数倍程度の精度で測定値に近づいている。定常浸透流解析の結果は、特に透水係数の空間分布を考慮した解析において、実測値よりも低い値が計算されている。解析結果を改善するためには、特に管路の管径や形状の決定をより厳密に決定する必要があると考えられる。

〔謝 辞〕

本研究を遂行するに当たり、Voronoi多角形を作成するため、東京大学工学部計数工学科杉原厚吉教授が開発されました「VORONOI2」を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

〔参考文献〕

- (1) 岸野, 土木学会論文集, No.406/Ⅲ-11, pp.97~106, 1989.6
- (2) 松井, JCI「自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望」に関するシンポジウム論文報告集, pp.21-24, 1995.11
- (3) 玉井, セメント技術年報, No.42, pp.591~594, 1988
- (4) Satake, M., Continuum Models of Discrete System (ed. A. J. Spencer), A. A. Balkema, pp.163-173 (1987)

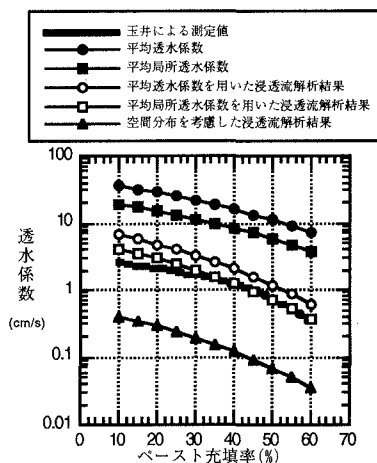


図-4 6号骨材を用いた透水性コンクリートの透水係数の解析結果

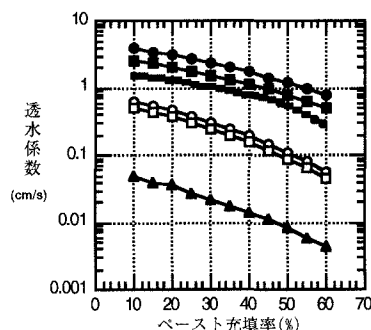


図-5 7号骨材を用いた透水性コンクリートの透水係数の解析結果

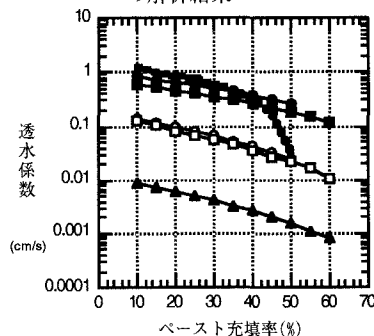


図-6 8号骨材を用いた透水性コンクリートの透水係数の解析結果