

DOI: 10.11779/CJGE201807006

双尺度渐进展开计算黏土渗透率影响因素研究

周力沛¹, 唐晓武^{1*}, 程冠初², 孙祖峰³

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 宁波大学建筑工程与环境学院, 浙江 宁波 315211;
3. 华电电力科学研究院, 浙江 杭州 310030)

摘要: 在岩土工程中, 可采用双尺度渐进展开法反演计算土体渗透率, 其表征单元体 (REV) 的选取直接影响计算的准确度。以海洋黏土渗透率为例, 对 REV 颗粒形状、排列方式、建模维度以及对土体实际性状代表性等因素进行对比分析。通过 4 种正多边形模型对比、圆形颗粒正对排布与交错排布对比、3D 与 2D 模型对比, 计算结果均与实测值存在较大偏差, 而各对比模型彼此间差别不大, 说明颗粒形状、排列方式与模型维度对计算准确度影响甚微。而在考虑黏土颗粒多呈扁平状, 以及颗粒表面存在强结合水膜的情况下, 采用椭圆颗粒结合水膜单元模型 (E-W 模型), 其计算准确度大大提高, 并且能够在孔隙比较小时减小结合水膜带来的计算误差, 说明 REV 能否充分表示土体实际几何和物理特性是计算准确度的主要影响因素。E-W 模型对高岭土与伊利土渗透率的计算同样有较高的准确度, 因此可将其用作双尺度渐进展开法对黏土渗透率的计算 REV 模型。

关键词: 多尺度; 多孔介质; 渗透率; 反演计算; 表征单元体

中图分类号: TU442 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)07-1205-07

作者简介: 周力沛(1987-), 男, 博士, 主要从事渗流计算、桩基工程、土遗址保护技术等方面的科研。E-mail: zhoulipeiwushuang@hotmail.com。

Influencing factors for calculating clay permeability using asymptotic expansion method

ZHOU Li-pei¹, TANG Xiao-wu¹, CHENG Guan-chu², SUN Zu-feng³

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 3. Huadian Electric Power Research Institute, Hangzhou 310030, China)

Abstract: The determination of representative elemental volume (REV) directly affects the calculating accuracy in permeability calculation for clay using the asymptotic expansion method in geotechnical engineering. Using the sea clay as an example, the influencing factors are studied and compared. By contrasting the results of 4 different types of regular polygon models, and different unit arrangements which are parallel and staggered and different models in 2D and 3D, the calculated permeabilities show large deviations to the measured ones but little differences among each model. It is illustrated that the shape, arrangement and dimensions of the models have little influences in the calculating accuracy. The proposed elliptical particle combined with water film model (E-W model), which takes the consideration of the flattened shape of clay particles and the strong bound water wrapping around them, well improves the accuracy. The representativeness of the physical characteristics of the clay particles is the main influencing factor of REV. The calculated permeabilities of kaolin and illite clay also exhibit high accuracy, which shows that the E-W model can be widely used in the permeability calculation for clay using the asymptotic expansion method.

Key words: multi-scale; porous medium; permeability; inversed calculation; representative elemental volume

0 引言

在岩土工程中, 土体的渗透率是非常重要的参数。而双尺度渐进展开法作为研究均质和非均质材料连续介质力学模型的重要方法, 可在少量试验基础上, 求得较为准确的渗透率, 兼顾实用性与经济性。而如何提高渗透率计算的准确性, 成为渗流分析中亟待解决

的问题。均质化尺度扩展理论是获取均质以及非均质材料连续介质力学模型的一类方法。此类方法的主要思想即为对于既定的物理现象, 从局部问题入手, 经

基金项目: 浙江省文物保护科技创新项目 (2013010)

收稿日期: 2017-04-13

*通讯作者 (E-mail: tangxiaowu@zju.edu.cn)

过数学理论推导, 进而得出全局宏观问题。现有研究表明均质化理论在复合材料领域应用广泛, 例如 Andreassen 等^[1]利用均质化思想, 以简短而独立的 Matlab 程序实现了一种复合材料弹性张量的计算方法, Keip 等^[2]研究了有限应变条件下, 电活性材料的一种可计算双尺度均质化结构。

对土体内部渗流现象的研究, 严格来说应该属于多孔介质传输动力学的研究领域^[3], 其研究重点是压强和流速在时间、空间上的分布规律^[4-5]。而双尺度渐进展开方法通过从局部孔隙尺度出发, 对控制方程渐进展开, 进而得到宏观尺度的特征描述^[6]。Wang 等^[7]针对混合土体复合地基, 提出了一种简化算法, 在假设微观上压强为均质的基础上, 采用数值计算方法模拟符合土体的特性。具体到土体渗流方面, Tang 等^[8]采用双尺度渐进展开方法从微观角度对 Navier-Stokes 方程进行分析, 在均质化基础上得出了渗透率多尺度计算方法。通过等效表征单元体 REV (representative elementary volume), 由土体一组孔隙比和渗透率的实测数据出发, 确定 REV 最优尺寸特征值, 进而实现对该土体不同孔隙比所对应渗透率的计算。

在 Sun 等^[9]利用双尺度方法对海洋黏土渗透率的反演计算中, 选取正方形颗粒作为 REV 模型, 并保持纵向间距不变, 调节横向间距得到不同的孔隙比, 进而反演对应的渗透率。该模型计算结果并不理想, 如取试验孔隙比最大值 $e_{\max}=1.91$ 时, 实测渗透率为 $4.97 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, 反演计算值为 $5.36 \times 10^{-17} \text{ m}^2$; 而当取试验孔隙比最小值 $e_{\min}=1.01$ 时, 实测渗透率为 $0.50 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, 反演计算值仅为 $0.21 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 。

双尺度渐进展开法 REV 模型的选取是决定渗透率计算准确度的关键所在, 因此本文仍以该海洋黏土为例, 从其颗粒形状、排列方式、模型维度、对土体实际性状代表性等方面来研究各因素对渗透率计算的影响, 并找到适合计算黏土渗透率的 REV 模型。

1 双尺度渐进展开方法

1.1 理论公式

双尺度渐进展开方法以均质化理论为基础, 需要将对宏观土体的研究转化对等效 REV 的分析。已有相关文献^[10-11]证明, 对于一种在统计学意义上均质的土体, 总能找到等价的 REV 来代表其形状, 其示意图如图 1 所示。其中 Ω_s 部分代表固体颗粒, Ω_f 部分代表孔隙空间, 孔隙内充满黏性不可压缩牛顿流体, 且孔隙中渗流为线性渗流, Γ 面则代表固体颗粒与孔隙间液体的交界面。

描述不可压缩黏性流体的运动方程 (即

Navier-Stokes 方程) 是理论流体力学的基本方程之一, 结合边界条件, 理论上讲 N-S 方程的解是存在的。但是直接描述复杂细微的黏性流体运动十分困难, 该方面的研究仍然是学科前沿性问题。

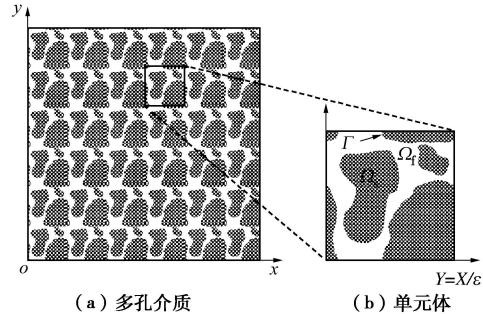


图 1 多孔介质及等效表征单元体示意图

Fig. 1 Sketch of porous media and unit cell

由于土体中渗流速度较慢, 可认为流体雷诺数较低, 此时多孔介质中的不可压缩流体满足 Navier-Stokes 方程, 连续性方程及边界条件: 在 Ω_f 内,

$$\eta \nabla^2 v - \nabla p = 0 \quad , \quad (1a)$$

$$\nabla \cdot v = 0 \quad , \quad (1b)$$

在 Γ 面上,

$$v = 0 \quad . \quad (1c)$$

式中, v 为速度矢量 (m/s), p 为压强 (Pa), η 为液体的动力黏度系数, 是反映流体黏滞性大小的度量 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)。

引入宏观尺度坐标变量 L 、微观尺度坐标变量 l 以及联系宏观尺度和微观尺度量纲为 1 的系数:

$$\varepsilon = \frac{l}{L} \quad . \quad (2)$$

通过渐进展开, 得到形式与 Navier-Stokes 方程形式类似的方程:

在 Ω_f 域内,

$$\eta \nabla_y^2 v^{(0)} - \nabla_x p^{(0)} - \nabla_y p^{(1)} = 0 \quad , \quad (3a)$$

$$\nabla_y v^{(0)} = 0 \quad ; \quad (3b)$$

在 Γ 面上,

$$v^{(0)} = 0 \quad . \quad (3c)$$

该方程可以看作是流体在表征单元体内部所满足的方程。对该方程的求解可得渗透率的计算公式:

$$k = -\frac{\eta}{\nabla_x p^{(0)}} \langle v^{(0)} \rangle \quad . \quad (4)$$

式中, k 为多孔介质渗透率 (m^2), 其求解过程可借助有限元软件来进行计算。

1.2 选取等效 REV

双尺度渐进展开方法假定多孔介质为均质, 然后对 REV 模型进行选取。具体到土体渗透率的计算,

可以选取方形边界单元, 其中放置某规则几何形状代表土颗粒单元, 即 Ω_s 域, 剩余部分为介质孔隙部分, 即 Ω_f 域, 作为渗流通道。确定 REV 相当于确定了颗粒的结构、孔隙连接方式以及边界条件。通过对单个 REV 中渗流的分析, 根据均质体的周期性, 即可将该 REV 无限扩展, 得到对整个多孔介质特征的描述。

1.3 等效 REV 特征尺寸的确定

一旦选定了 REV 模型, 在孔隙比一定的情况下, 渗透率就只与代表颗粒的几何形状尺寸(即颗粒的特征尺度值)有关。因此可根据少量实测数据(e_m , k_m)作为初始值, 利用 COMSOL 程序进行计算, 得到满足该初始值的最优颗粒特征尺度。具体过程为: ①首先人为给定某个 REV 中土颗粒的特征尺度, 此时整个 REV 的尺寸值可由初始孔隙比 e_m 计算得知; ②利用 COMSOL 计算此特征尺度下的土体渗透率 k_c , 与初始渗透率 k_m 进行对比, 并随对比结果调整步骤①中所选定的特征尺度值; ③重复步骤①和②, 直至步骤②中渗透率计算值和初始渗透率满足 $|k_c - k_m| < \varepsilon$, 即认为 REV 的最优特征尺度确定, 步骤③终止。其中 ε 为控制计算精度的极小量。

1.4 不同孔隙比下渗透率计算

在求得最优颗粒尺寸后, 保持该颗粒特征尺度不变, 通过调整颗粒间距的方法来实现孔隙比 e 的改变, 并以此来计算不同孔隙比下, 该种多孔介质所对应的渗透率 k_c 。

2 黏土渗透率计算的影响因素

为保证本文研究的可对比性, 黏土渗透率的反演计算数据选取与 Sun 等^[9]相同的高岭土^[12]、伊利土^[13]、海洋黏土^[14], 并通过对 REV 不同因素的分析不断修正, 使模型选取趋于准确。

2.1 颗粒形状影响

首先从最简单的情况出发, 在各向同性情况下, REV 形状选取应为正多边形, 区别在于正多边形边数不同。以海洋黏土为例, 采用圆形、正方形、正六边形、正八边形(分别简称为 Sph, Squ, Hex, Oct, 圆形可认为 $n \rightarrow \infty$ 的正多边形)4 种标准正多边形模型对其渗透率进行了反演计算。单元颗粒示意图如图 2 所示。

对于正多边形 REV, 可将边长(圆形颗粒为半径)作为其特征尺寸值, 确定该特征尺寸值需要一组实测值即可。

为探讨初始值的不同对计算结果的影响, 本文分别选取实测值中孔隙比最大值及其所对应渗透率($e_m=1.91$, $k_m=12.60 \times 10^{-17} \text{ m}^2$), 和孔隙比最小值及其所对应渗透率($e_m=1.01$, $k_m=1.08 \times 10^{-17} \text{ m}^2$)为初

始值, 分别计算得到这两组初始值各自对应的四种颗粒模型 REV 特征尺寸, 如表 1 所示。

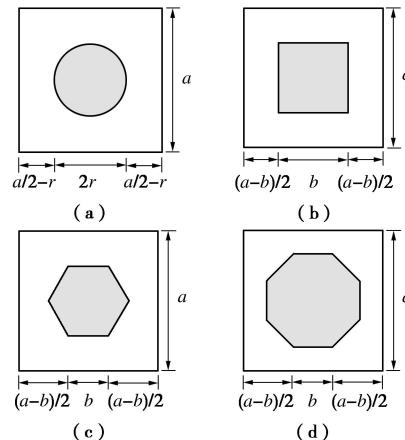


图 2 4 种标准模型示意图

Fig. 2 Sketch of 4 standard unit cell particles

表 1 4 种标准模型特征尺度计算值

Table 1 Results of characteristic length for 4 standard unit cell particles

e_m	$k_m/(10^{-17} \text{ m}^2)$	特征尺度计算值/ 10^{-8} m			
		Sph	Squ	Hex	Oct
1.91	12.60	4.305	7.533	4.877	3.546
1.01	1.08	2.952	4.951	3.276	2.433

以这两组计算所得的特征尺寸, 分别对其余孔隙比所对应的渗透率进行计算, 并以试验孔隙比 e_m 为横坐标、以计算渗透率与实测渗透率的比值 k_c/k_m 为纵坐标, 结果分别如图 3, 4 所示。

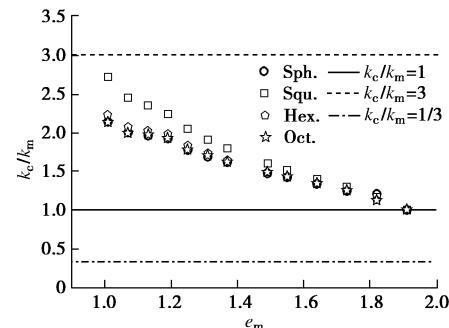


图 3 4 种标准模型对海洋黏土渗透率计算值与实测值的比较

$$(e_{\max}=1.91, k_m=12.60 \times 10^{-17} \text{ m}^2)$$

Fig. 3 Results of permeability calculation for sea clay using 4 models with ($e_{\max}=1.91, k_m=12.60 \times 10^{-17} \text{ m}^2$)

根据文献[15~17], 实测渗透率通常在真实值的 $1/3$ 到 3 倍之间, 图 3, 4 中, 虽然各个渗透率的计算值均在该误差范围内, 但规律性的误差也很明显。当选取最大孔隙比($e_{\max}=1.91$, $k_m=12.60 \times 10^{-17} \text{ m}^2$)为初始值时, 4 种模型计算结果均偏大; 而当选取最小孔隙比($e_{\max}=1.01$, $k_m=1.08 \times 10^{-17} \text{ m}^2$)为初始值时, 4 种模型计算结果均偏小。且与所选取初始孔隙比差

值越大的孔隙比, 相应渗透率的计算结果误差也越大。而对于, 某个特定的孔隙比, 这 4 种模型的渗透率计算结果虽各有不同, 但相差并不大。

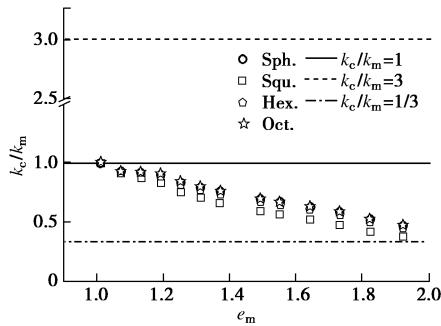


图 4 4 种标准模型对海洋黏土渗透率计算值与实测值的比较
($e_m=1.01, k_m=1.08 \times 10^{-17} \text{ m}^2$)

Fig. 4 Results of permeability calculation for sea clay using 4 models with ($e_m=1.01, k_m=1.08 \times 10^{-17} \text{ m}^2$)

计算结果说明正多边形颗粒模型的边数对计算的结果并无明显影响, 综合考虑建模和计算的简便性, 选取圆形颗粒来进行进一步的研究是合理可行的。

2.2 颗粒排布影响

对于各向同性土体, 其 REV 颗粒分布无外乎如下两种排列方式, 一种为颗粒正对形排列, 如图 2 (a) 所示, 另一种为颗粒对称交错形排列, 如图 5 所示, 图中正方形内部为 REV 区域, 且颗粒圆心组成的三角形 OAB 为等腰直角三角形 (简称为 Sph-Stag. 模型)。

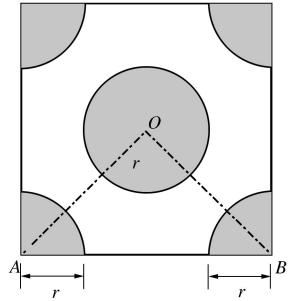


图 5 圆形颗粒对称交错排列模型示意图

Fig. 5 Sketch of unit cell particles with staggered arrangement

同样以 ($e_m=1.91, k_m=12.60 \times 10^{-17} \text{ m}^2$)、($e_m=1.01, k_m=1.08 \times 10^{-17} \text{ m}^2$) 为初始值, 计算相应的 REV 特征尺寸, 并进一步计算其余孔隙比所对应的渗透率。两种模型计算结果如图 6 所示。

从图 6 中可看出, 颗粒正对 (Sph 模型) 和交错排列 (Squ-alt 模型) 两种模型对于同一初始值的计算结果并无太大差别; 但同样存在计算结果整体偏大 (取试验最大孔隙比时) 和偏小 (取试验最小孔隙比时) 的现象。这个结果说明模型颗粒的排列分布, 对于双尺度计算黏土渗透率的影响不大。

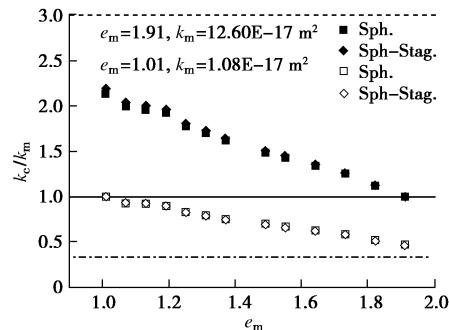


图 6 Sph 模型与 Sph-Stag. 模型对海洋黏土渗透率计算值与实测值的比较

Fig. 6 Results of permeability calculation for sea clay using Sph. model and Sph-Stag. model

2.3 2D 和 3D 模型对比

之前模型的建立均为二维等效模型, 而实际土体为三维立体结构, 因此采用图 7 三维 REV 来研究 2D 模型和 3D 模型的精度对比。其计算结果如图 8 所示。

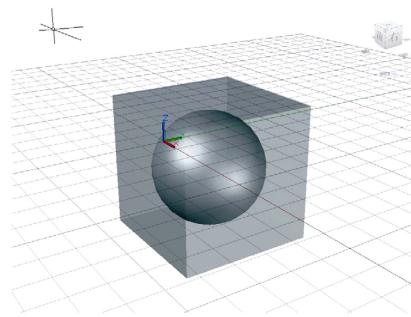


图 7 3D 球形颗粒模型示意图

Fig. 7 Sketch of 3D unit cell model with sphere particles

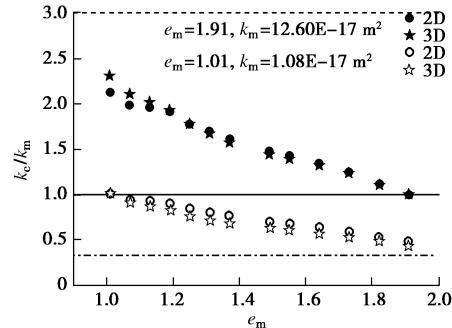


图 8 2D 模型与 3D 模型对海洋黏土渗透率计算值与实测值的比较

Fig. 8 Results of permeability calculation for sea clay using 2D model and 3D model

从图 8 可看出, 3D 模型 REV 精度与 2D 模型相比几乎没有差别, 并且同样有整体偏大或整体偏小的现象。然而, 3D 模型由于其建模及网格划分复杂程度高, 因此在反演计算时需要花费数倍于 2D 模型的时间, 如表 2 所示。(注: 本研究采用计算系统主要硬件

配置如下: CPU: Intel i5-6600K @3.5GHz, Motherboard: ASUS Z170-AR, RAM: Corsair DDR4 2400 8G×2)。

表 2 2D 模型与 3D 模型单次计算时间对比

Table 2 Durations of permeability calculation of 2D model and 3D model

模型类别	网格划分时间/s	求解自由度数	计算时间/s
2D	3	28821	3
3D	132	1231808	177

从表 2 可看出, 3D 模型单次计算所花费的时间是 2D 模型的数十倍, 并且建模过程也较 2D 更为麻烦和复杂。因此, 考虑到两者计算精度无本质差别, 在黏土渗透率双尺度反演计算时, 采用 2D 模型来作为 REV 即可, 无需采用耗时费力的 3D 模型。

2.4 REV 对土体实际形状代表性的影响

上文对 REV 的讨论均基于横纵向尺度相同的情况下展开的, 而众所周知黏土颗粒由于沉积原因大多呈片状结构, 且横向尺度一般大于纵向尺度。因此, 考虑将圆形颗粒修正为扁平状的椭圆形颗粒模型 (Ell Model), 如图 9 所示。

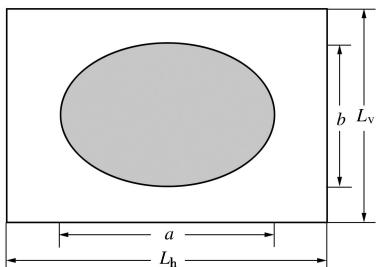


图 9 椭圆颗粒模型示意图

Fig. 9 Sketch of Ell Model

其中假设 REV 横纵向尺度比等于椭圆颗粒长轴、短轴尺度之比。与圆形颗粒相比, 椭圆形颗粒长短轴尺度则需要两组初始值来分别确定。在上文圆形颗粒的计算中, 选取孔隙比最大值作为初始值, 计算所得 REV 特征尺度偏大, 渗透率计算结果也整体偏大; 选取孔隙比最小值初始值, 所得 REV 特征尺度偏小, 渗透率计算结果也整体偏小, 说明 REV 的尺度应该介于上述两个特征尺度之间。简便起见, 将两者分别作为椭圆颗粒模型的长轴和短轴, 由此确定了 REV 的特征尺度。进而计算可得其他孔隙比所对应的渗透率, 同样地, k_c/k_m 的对比如图 10 所示。

从图 10 中可看出, 经过修正后的椭圆形颗粒, 渗透率计算精度较修正前有了大幅提高, 尤其是孔隙比较大时, k_c 计算精度很高, 而当渗透率较小时, k_c 仍存在偏大的现象。

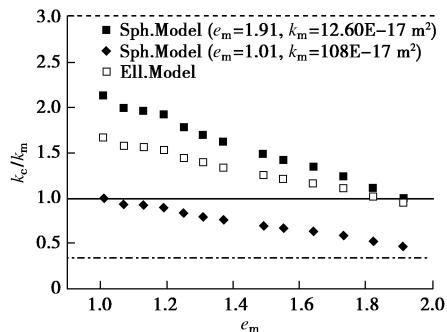


图 10 Sph 模型与 Ell 模型对海洋黏土渗透率计算值与实测值的比较

Fig. 10 Results of permeability calculation for sea clay using Sph. model and Ell. model

微观上, 土体颗粒表面一般存在有吸附水形式的非气态水, 而吸附水表现为颗粒表面的一层吸湿水膜(也称为结合水膜)。这层水膜是靠土体颗粒分子引力和静电引力的作用所吸附的水。其能量水平低, 几乎不能自由移动且没有溶解溶质的能力^[18], 表现出近乎于固态的性质。这层水膜的存在, 使得渗透区域变小, 在渗透率的测量中是作为土颗粒的一部分存在, 会使渗透率变小。但是在孔隙比的测量过程中, 这层结合水膜会因高温变为气态水, 因此会被算作孔隙的一部分。同时, 由于黏土颗粒颗粒尺寸很小, 比表面积较大, 因此在孔隙比很小时, 若将结合水膜忽略不计, 则会造成较大影响, 导致计算结果偏大。

因此, 考虑将椭圆颗粒模型做进一步修正, 采用椭圆颗粒-结合水膜单元模型 (E-W 模型), 如图 11 所示。该模型在椭圆颗粒模型基础上, 在颗粒表面附加一层结合水膜薄层, 该层水膜不计入孔隙比的计算, 但在渗透率计算中作为占用了渗透通道的固体部分考虑。在 REV 模型的几何关系上, 假设 E-W 中附加结合水膜后的椭圆颗粒, 其长、短轴之比, 等于修正前 Ell 模型中附加结合水膜前的土颗粒的长短轴之比。则水膜层厚度的计算可通过土体吸湿性指标来计算。

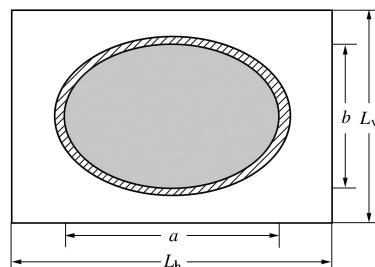


图 11 椭圆-水膜颗粒模型示意图

Fig. 11 Sketch of E-W model

仍以海洋黏土为例, 根据文献[19]中吸湿性指标, 可知对于海洋黏土, 1 cm³ 的土体颗粒约有 0.1 cm³ 的吸湿水。即附加结合水膜修正后的颗粒尺度为修正前

的 1.05 倍。进而可计算得附加结合水膜后的 E-W 模型计算所得海洋黏土渗透率的计算值与实测值的比较见图 12。

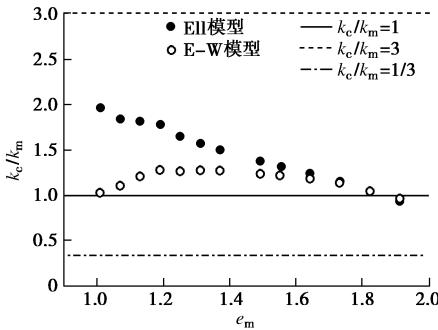


图 12 Ell 模型与 E-W 模型对海洋黏土渗透率计算值与实测值的比较

Fig. 12 Results of permeability calculation for sea clay using Ell model and E-W model

从图 12 中可看出, 相比修正前的 Ell 模型, E-W 模型计算结果有了大幅改善, 说明结合水膜的存在对于渗透率反演计算的影响确实存在, 并且当孔隙比较小时, 是不可忽略的。具体来看, 当孔隙比较大时, E-W 模型与 Ell 模型计算结果相差不大, 均有较高的准确度; 而当孔隙比很小时, 土体内结合水造成的计算误差也在 REV 附加了表面结合水膜的条件下大幅减小。同时, 由于土体内部不可避免地存在其他渗透率的影响因素, 如表面电荷的影响, 由于无法简单地由几何关系体现在模型的修正上, 因此对中间部分孔隙比的渗透率计算结果造成了一定程度的偏大。但整体看来, 采用经过修正的 E-W 模型, 同时选用最大孔隙比和最小孔隙比以及对应渗透率这两组数据来作为初始值, 确定 REV 特征尺度, 可以使中间部分孔隙比对应渗透率的计算值保持在一定准确度之内, 不会出现本文图 3 和图 4 这种随着孔隙比的增大或减小, 渗透率计算值误差越来越大且不收敛的情况。

2.5 E-W 模型计算高岭土和伊利土渗透率

同样地, 采用 E-W 模型对高岭土、伊利土也分别进行渗透率反演计算。引入高岭土和伊利土吸湿性指标^[19]可知, 考虑结合水膜的高岭土修正后的颗粒尺度为不考虑水膜时颗粒尺度的 1.12 倍, 考虑结合水膜的伊利土修正后的颗粒尺度为不考虑水膜时颗粒尺度的 1.10 倍。两者的渗透率计算结果如图 13, 14 所示。

可看出 E-W 模型对高岭土和伊利土同样有较好的计算准确度。孔隙比较大和较小时均有很高的准确度, 中间部分孔隙比由于其他原因的影响随略有偏大但仍处于误差范围之内。说明 E-W 模型有一定的普适性, 可在双尺度渐进展开模型对黏土的渗透率反演计算中作为表征单元体模型。

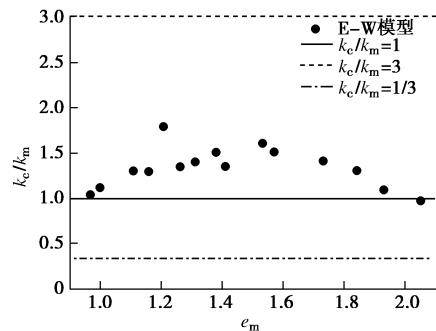


图 13 高岭土 E-W 模型渗透率计算值与实测值的比较

Fig. 13 Results of permeability calculation for kaolin clay using E-W model

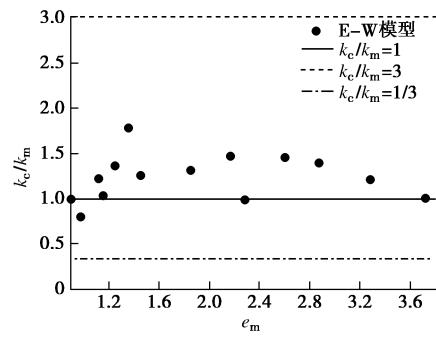


图 14 伊利土 E-W 模型渗透率计算值与实测值的比较

Fig. 14 Results of permeability calculation for illite clay using E-W model

3 结 论

(1) 双尺度渐进展开法作为计算黏土渗透率的有力工具, 其计算精度的关键在于 REV 的选取, REV 形状区别、颗粒排布、模型维度及对土体实际性状的代表性等因素均有不同程度的影响。

(2) 以海洋黏土渗透率计算为例的 REV 影响因素分析中, 标准正多边形模型的性状区别、颗粒排布以及计算选用模型的维数(2D 或 3D), 对渗透率的计算结果影响并不大, 均存在规律性误差, 需要针对其对土体实际特性的代表性来进行进一步修正以提高计算精度。

(3) 而在考虑黏土颗粒多呈片状结构、以及表面强结合水膜的实际性状, 将圆形颗粒修正为椭圆颗粒—结合水膜模型(E-W 模型)后, 其计算结果精确度大大提高。可见对土体颗粒实际性状的代表性为渗透率计算准确度的主要影响因素; 同时可看出, 在孔隙比较小时, 结合水膜对渗透率计算的影响不可忽略。

(4) 同样采用 E-W 模型, 对另外两种已有文献中高岭土和伊利土进行渗透率的反演计算, 均有较高的准确度, 一定程度上说明了 E-W 模型的普适性, 可以用在双尺度渐进展开法对黏土计算渗透率的反演计

算中。

(5) 在孔隙比较大和较小时, 土体渗透率计算精度分别由土体颗粒扁平化和土颗粒表面结合水起主导作用, 此时针对这两个实际特性所作修正后的 E-W 模型均保证了很高的计算准确度。而在此之间的孔隙比, 由于受到其他因素的影响, 造成了计算结果的偏大, 但整体仍然处于可控的误差范围之内, 足以满足实际工程中的需要。

参考文献:

- [1] ANDREASSEN E, ANDREASEN C S. How to determine composite materials properties using numerical homogenization[J]. Computational Materials Science, 2014, **83**: 488 - 495.
- [2] KEIP M A, STEINMANN P, SCHRODER J. Two-scale computational homogenization of electro-elasticity at finite strains[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2014, **278**: 62 - 79.
- [3] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. New York: Dover Publications, 1988.
- [4] 吉泽升, 朱荣凯, 李丹. 传输原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002. (JI Ze-sheng, ZHU Rong-kai, LI Dan. Principle of transmission[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002. (in Chinese))
- [5] 严宗毅. 低雷诺数流理论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002. (YAN Zong-yi. Theory of low reynolds number flows[M]. Beijing: Peking University Press, 2002. (in Chinese))
- [6] DASGUPTA A, AGARWAL R K. Orthotropic thermal conductivity of plain-wave fabric composites using a homogenization technique[J]. Journal of Composite Materials 1992, **26**(18): 2736 - 2758.
- [7] WANG J G, LEUNG C F, ICHIKAWA Y. A simplified homogenization method for composite soils[J]. Computers and Geotechnics, 2002, **29**: 477 - 500.
- [8] TANG X W, CHENG G C, CHEN Y M. An-easy-to implement multi-scale computation of permeability coefficient for porous materials[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2010, **130**(13): 274 - 279.
- [9] SUN Z F, TANG X W, CHENG G C. Inversion calculation of permeability coefficient with the multi-scale asymptotic expansion method[J]. Poromechanics V, ASCE, 2013: 2212 - 2221.
- [10] BELIAEV A Y, KOZLOV S M. Darcy equation for random porous media[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics 1996, **49**: 1 - 34.
- [11] ESPEDAL M S, FASANO A, MIKELIC A. Filtration in porous media and industrial application[M]// Lecture Notes in Mathematics. Berlin: Springer-Verlag, 2000.
- [12] TAVENAS F, JEAN P, LEBLOND P, et al. The permeability of natural soft clays part II: permeability characteristics[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, **20**(4): 645 - 660.
- [13] AL-TABBAA A, WOOD D M. Some measurements of the permeability of kaolin[J]. Géotechnique, 1987, **37**(4): 499 - 514.
- [14] MESRI G. Mechanisms controlling the permeability of clays[J]. Clays and Clay minerals, 1971, **19**: 151 - 158.
- [15] ASTM D2434. ASTM Annual book of standards[S]. Philadelphia: American Society for Testing & Materials, 2002.
- [16] ASTM D5084. ASTM Annual book of standards[S]. Philadelphia: American Society for Testing & Materials, 2002.
- [17] ASTM D5856. ASTM Annual book of standards[S]. Philadelphia: American Society for Testing & Materials, 2002.
- [18] 龚晓南. 高等土力学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996. (GONG Xiao-nan. Advanced soil mechanics[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1996. (in Chinese))
- [19] BRADY N C, WEIL R R. The Nature and properties of soils[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1974.