

文章编号:0559-9350(2017)06-0702-08

基于微观孔隙通道的饱和/非饱和土渗透系数模型及其应用

陶高粱^{1,2}, 孔令伟²

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 从微观角度揭示土体变形对饱和/非饱和渗透系数的影响机理, 建立相应的预测方法, 对于饱和/非饱和土的渗流分析及水力耦合研究具有重要的科学意义。利用流体力学理论, 建立了微观孔隙通道渗透系数与等效孔径的关系, 在此基础上, 结合毛细理论建立了饱和/非饱和渗透系数与土-水特征曲线的关系模型, 并利用已有试验数据验证了模型的合理性。结合该模型与变形条件下土-水特征曲线预测方法, 对变形条件下武汉黏性土饱和/非饱和渗透系数进行预测, 结果表明黏性土在压缩变形条件下: 饱和渗透系数呈数量级的减小, 预测值与实测值均吻合较好; 双对数坐标下, 非饱和相对渗透系数在进气值之后随基质吸力增加而减小, 不同初始孔隙比条件下其斜率近似不变, 整体呈现“毛刷型”分布, 相同基质吸力条件下, 初始孔隙比越小, 相对渗透系数越大; 非饱和渗透系数, 进气值之前近似为饱和渗透系数, 进气值之后随基质吸力增大而减小, 不同初始孔隙比的变化线近似重合。

关键词: 变形黏性土; 饱和/非饱和渗透系数; 微观孔隙通道; 土-水特征曲线;

中图分类号: TV139.14

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slx.20160993

1 研究背景

研究表明, 定量描述土体变形对饱和/非饱和渗透性系数的影响规律, 是建立考虑水力、力学特性相互影响的土体本构模型, 进行非饱和土流固耦合分析等研究的基础。非饱和黏性土在外荷载作用下发生固结变形, 而固结变形又通过微观结构的改变来实现, 其中主要表现在孔隙结构的改变, 孔隙结构的不断变化又使饱和/非饱和渗透系数不断改变^[1]。可见, 预测变形条件下饱和/非饱和渗透系数需从微观孔隙角度出发。

对于变形条件下的饱和渗透系数, 目前一般通过建立与孔隙比的经验关系进行预测^[2-3], 这种方法对相关机理研究不够深入, 鲜有见到从微观角度预测变形条件下的饱和渗透系数的理想方法, 本文从微观孔隙通道的概念提出了变形条件下饱和渗透系数预测方法, 并验证其有效性。

对于变形条件下的非饱和渗透系数, 目前同样以经验法预测为主^[4-5]。如前所述, 需要从微观角度揭示变形对非饱和渗透系数影响机制、并建立相应的理论预测方法。非饱和渗透系数与饱和渗透系数的比值为非饱和相对渗透系数。因此, 可从微观角度分别预测变形条件下的饱和渗透系数与非饱和相对渗透系数, 然后将二者相乘, 最终形成基于微观角度的非饱和渗透系数预测方法。

变形条件下非饱和相对渗透系数预测, 需要解决两方面问题。其一, 需要预测变形条件下的

收稿日期: 2016-09-19; 网络出版日期: 2017-06-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170619.1520.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51209084, 41372314, 51409097); 湖北省科技厅自然科学基金项目(2015CFB297, 2014CFB591); 湖北省教育厅科研计划项目(D20161405); 优秀中青年科技创新团队项目(T201605)

作者简介: 陶高粱(1979-), 男, 湖北浠水人, 副教授, 博士后, 主要从事土体孔隙结构及非饱和土研究。

E-mail: tg11979@126.com

通讯作者: 孔令伟(1967-), 男, 湖北通山人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事特殊土体领域研究。

E-mail: lwkong@whrsm.ac.cn

土-水特征曲线(SWCC), 如: 张雪东等^[6]和张昭等^[7]分别以概率论方法及“水土体积比”的概念建立变形土 SWCC 预测的经验模型, Zhou 等^[8]建立了常应力条件下有效饱和度与孔隙比的关系, 陶高粱等^[9]从微观孔隙角度揭示了变形对 SWCC 影响的内在机理、提出了相应预测方法。其二, 需要建立 SWCC 与非饱和土相对渗透系数的关系, 目前主要依托 CCG 模型^[10]、Mualem 模型^[11]以及 Burdine 模型^[12]等进行计算。理论上, 结合上述两个方面已有研究成果, 就可以预测变形条件下的非饱和土相对渗透系数, 张雪东等^[13]和蔡国庆等^[14]在这方面做出了有益的尝试。需要指出, 上述变形条件下 SWCC 预测方法, 文献[9]是在进行微观孔隙试验基础之上提出的, 预测方法简单, 便于实际工程应用, 因此, 从微观角度预测变形条件下的 SWCC, 本文采用文献[9]的方法。此外, CCG 模型、Mualem 模型以及 Burdine 模型的计算结果相差较大, 对于某一特定的土体, 上述模型中的一个可能较为合适, 但对于另外一种土体, 若仍然采用该模型, 预测误差可能大到不能接受。因此, 新模型值得研究, 但该方面的研究工作近年来进展较慢。再者, 用概率论方法建立的孔隙通道模型, 相关计算较为繁琐, 且只考虑到孔隙纵向连通的可能性, 而实际上孔隙通道横向也可能连通。若将“SWCC”视作反映孔隙通道的间接指标, SWCC 试验某级压力下排出水的体积可看作该级孔隙通道的总体积, 相关计算将大大简化。

基于这一理念, 本文结合流体力学理论、毛细理论建立了基于微观孔隙通道的饱和/非饱和渗透系数的预测新模型, 以已有试验数据为基础验证了该模型的合理性。结合该模型和文献[9]提出的变形条件下 SWCC 的预测方法, 本文最终成功完成了变形黏性土饱和/非饱和和渗透系数的预测, 并得出了相应的结论。本文提出的变形条件下非饱和和渗透系数预测方法, 是以“变形条件下饱和和渗透系数预测方法”、“变形条件下 SWCC 预测方法”以及“变形条件下非饱和和相对渗透系数预测方法”为基础建立的, 在解决这几个问题时均从微观孔隙角度出发。

2 基本理论及模型

2.1 微观孔隙通道渗流模型 假设土体由海量的连通孔隙通道组成, 如图 1 所示, 这些连通孔隙通道的等效孔径大小不一, 当基质吸力较小时, 等效孔径较大的孔隙通道先排水(如图 1 中的大孔隙通道), 等效孔径较小的通道仍然充满水分(如图 1 中的较大孔隙通道和小孔隙通道), 而这些通道正是非饱和土渗流发生的主要通道。

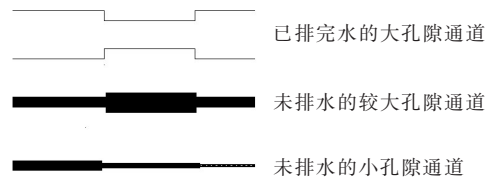


图 1 基本流段示意

对于每一通道而言, 水分在连通孔隙通道流动时满足达西定律:

$$k = \frac{v}{J} \quad (1)$$

式中: v 为通道断面流体平均流速; J 为水力坡度, $J=h_w/l$, l 为研究长度; h_w 为水头损失, $h_w=h_f+h_j$, 其中 h_f 为沿程损失, h_j 为局部损失, 其表达式为:

$$h_j = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式中: ζ 为与孔隙尺寸相关的常数; g 为重力加速度, 根据流体力学的达西公式, 沿程损失为:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

式中: λ 为沿程阻力系数; d 为连通孔隙通道等效直径, 而一般土中水流速度较慢, 常处于层流状态, 层流中阻力系数为:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

其中雷诺数为,

$$Re = \frac{\rho dv}{\mu} \quad (5)$$

式中： ρ 为密度； μ 为黏度。

由式(3)一式(5)可得：

$$h_f = \frac{32\mu l}{\gamma d^2} v \quad (6)$$

式中： γ 为重度。

比较式(2)与式(6)，式(2)表明局部损失 h_j 与流速平方成正比，而沿程损失 h_f 与流速一次方成正比，砂土、粉土、黏土中渗流速度一般都小于 10^{-3} m/s，分析表明局部损失远小于沿程损失，因此渗流研究时本文忽略局部损失。

那么式(1)可变为：

$$k = \frac{vl}{h_f} \quad (7)$$

由式(6)、式(7)组合可知：

$$k = \frac{\gamma d^2}{32\mu} \quad (8)$$

将海量的连通孔隙通道的渗透系数叠加起来便是饱和土的渗透系数，可表示为：

$$k_s = \frac{Q}{AJ} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\gamma d_i^2}{32\mu} \times A_i J}{AJ} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\gamma d_i^2}{32\mu} \times A_i}{A} \quad (9)$$

式中： Q 为总流量； A_i 为第 i 级孔隙通道横截面积； A 为分析土样横截面总面积。

2.2 基于SWCC的渗透系数预测 土-水特征曲线(SWCC)表征土体含水率与基质吸力的关系，基质吸力越高，土体含水率越低。SWCC试验常以轴平移技术进行测量，试验时所施加的压力较小时，如图1所示，大孔隙通道先排水，压力较大时，较小孔隙通道才开始排水。所以，SWCC实质反映了微观孔隙通道的分布特性，某级压力下排出的水的体积可视作对应的孔隙通道的总体积。基于这一思路，可解决式(9)中孔隙通道等效直径 d 难以直接测量的实际问题。

根据毛细理论，体积含水率表示的SWCC与孔隙通道的关系可描述为：

$$\psi_i = \frac{4T_s \cos\alpha}{d_i} \quad (10)$$

$$\theta_i = V(\leq d_i)/V_T \quad (11)$$

式中： d_i 为第 i 级孔隙通道等效直径； ψ_i 为相应于 d_i 的基质吸力； θ_i 为相应于基质吸力 ψ_i 的体积含水率； $V(\leq d_i)$ 为等效直径小于等于 d_i 的孔隙通道累计体积； V_T 为分析土样总体积； T_s 为表面张力； α 为接触角，温度一定时 $4T_s \cos\alpha$ 为常数。

假设第 i 级孔隙通道实际长度与土样长度 l 比值为 p_i ，则实际长度为 $p_i l$ ，若相应第 i 级孔隙通道总体积为 $\Delta\theta_i V_T$ ，则相应通道的横截面积为：

$$A_i = \frac{\Delta\theta_i V_T}{p_i l} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)有：

$$k_s = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\gamma d_i^2}{32\mu} \times \frac{\Delta\theta_i V_T}{p_i l A} = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\gamma d_i^2}{32\mu} \times \frac{\Delta\theta_i}{p_i} \quad (13)$$

结合式(10)与式(13)，可得：

$$k_s = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\gamma T_s^2 \cos^2\alpha}{2p_i \mu} \times \frac{\Delta\theta_i}{\psi_i^2} \quad (14)$$

图2假设了不同等效孔径的孔隙通道曲线，其中粗线表示较大孔隙通道，细线表示较小孔隙通道，据图2可假设 p_i 近似为常数(图2只是理想的假设模型，实际情况可能存在一定区别)，则式(14)可简化为：

$$k_s = \sum_{i=1}^{i=n} k_c \times \frac{\Delta\theta_i}{\psi_i^2} \quad (15)$$

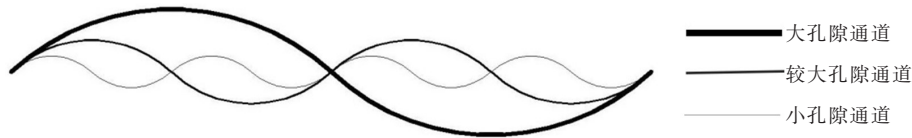


图2 不同等效孔径的孔隙通道曲线示意

上式可写成微积分形式为：

$$k_s = k_c \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \frac{d\theta}{\psi^2(\theta)} \quad (16)$$

式中： $k_c = \gamma T_s^2 \cos^2 \alpha / (2p_i \mu)$ ，对于同一土样，该值为常数； θ_{\max} 、 θ_{\min} 分别为最大(饱和)及最小体积含水率。

假设总孔隙通道有 n 级，现只有 $1 \sim m$ 级通道充满水 ($m < n$)，则此时的非饱和相对渗透系数为：

$$k_r(\theta_{i=m}) = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} \frac{\Delta\theta_i}{\psi_i^2}}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta\theta_i}{\psi_i^2}} \quad (17)$$

上式改写为微积分的形式有：

$$k_r(\theta) = \frac{\int_{\theta_{\min}}^{\theta} \frac{d\theta}{\psi^2(\theta)}}{\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \frac{d\theta}{\psi^2(\theta)}} \quad (18)$$

因此，饱和渗透系数模型有式(15)、式(16)；非饱和相对渗透系数模型有式(17)、式(18)。必须指出，上述模型将 SWCC 视作反映孔隙通道尺度分布的间接指标，实质上还参考了文献[9]的理念，即认为：某级孔隙通道中的水排出后该级孔隙通道的体积才发生失水收缩变形，因此相应的 SWCC 可忽略收缩体变的影响。此外，上述公式中含水率要求采用体积含水率的形式。若没有压缩变形(本文变形均指压缩变形)，在忽略收缩体变的影响下，不同基质吸力下体积含水率与质量含水率、饱和度的换算公式是一定的，这时也可以采用质量含水率或饱和度进行代替。

本文采用式(15)、式(17)进行计算。具体方法为：在已知 SWCC 的实测值的基础之上，从最小实测含水率 θ_L 至饱和含水率 θ_{\max} ，将 SWCC 划分为 n 段(最好等分，为方便计算也可采用实测值自然分段)，见图3。如图3所示，第 i 段的体积含水率改变量为 $\Delta\theta_i = \theta_{i+1} - \theta_i$ ，相应的等效基质吸力 $\psi_i = (\psi_a + \psi_b) / 2$ ，其中 ψ_a 、 ψ_b 为某级基质吸力段的上下界限基质吸力值，将其代入到式(15)或式(17)中，便可计算饱和渗透系数与非饱和相对渗透系数。

3 模型验证

为验证第2节提出的土体渗透系数预测方法的合理性，选取了已有文献代表性土类包括砂土及黏性土等，见如表1，参考文献中给出了土体的 SWCC 实测值及相对渗透系数实测值。采用式(17)及图3所示计算方法，基于 SWCC 实测数据计算不同基质吸力下的非饱和相对渗透系数，并与实测值进行对比分析，如图4所示。图4表明，式(17)预测值与实测值基本吻合，说明了式(17)的合理性。

4 变形条件下黏性土饱和/非饱和渗透系数预测

4.1 预测方法 第2.2节从微观角度建立的 SWCC 与饱和渗透系数的关系用式(15)、式(16)表示，与非饱和和相对渗透系数的关系用式(17)、式(18)表示，文献[9]从微观角度建立了变形条件下 SWCC 的预测方法，结合上述方法和公式便可从微观角度预测土体变形条件下的饱和和非饱和渗透系数，具体方法如下。首先需要通过试验获取土体变形前的饱和渗透系数与 SWCC。然后，根据文献[9]的方法，预测不同变形条件下质量含水率表示的 SWCC，结合压缩变形引起的孔隙比的变化，将 SWCC 转换为体积含水率的形式。最后，以上述试验及预测结果为基础，采用式(15)或式(16)预测不同变形条件下的饱和渗透系数，其中参数 k_c 近似认为是常数，其值可通过变形前的 SWCC 及饱和渗透系数实测结果计算获得；采用式(17)或式(18)预测不同变形条件下的非饱和相对渗透系数；将二者相乘，

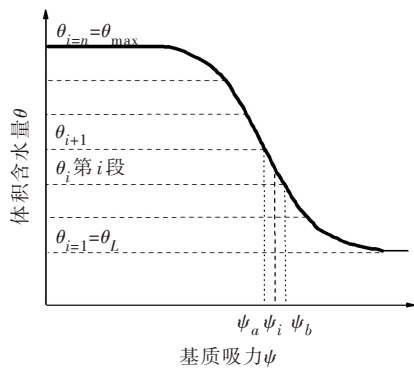
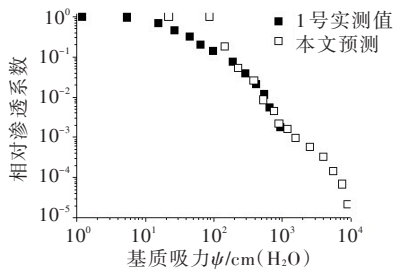


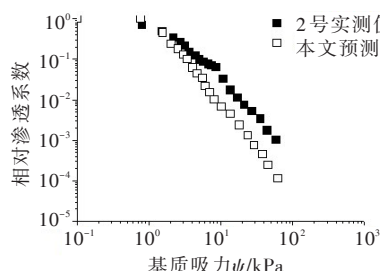
图3 SWCC分段示意

表1 土样类型及数据来源

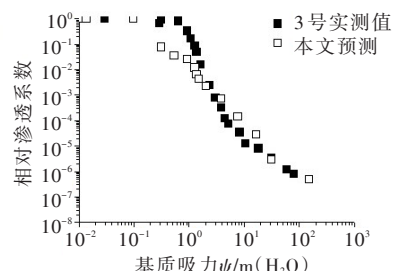
样本编号	土类	数据来源
1	Beit Netofa 黏性土	文献[15]
2	Yolo 轻黏土	文献[16]
3	Pachapa 细砂质黏土	文献[17]
4	Gilat 壤土	文献[17]
5	Touchet 粉砂壤土	文献[18]
6	砂壤土	文献[19]
7	Poederlee 壤质砂土	文献[20]
8	Superstition 砂土	文献[21]
9	Poederlee 砂土	文献[20]



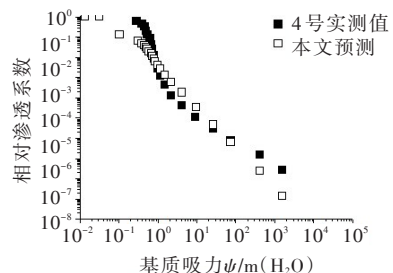
(a) Beit Netofa 黏性土



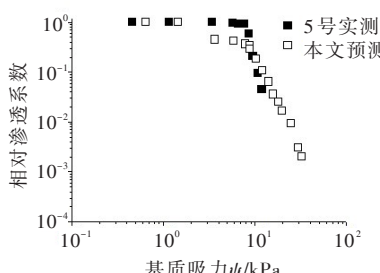
(b) Yolo 轻黏土



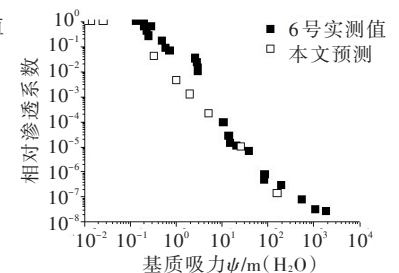
(c) Pachapa 细砂质黏土



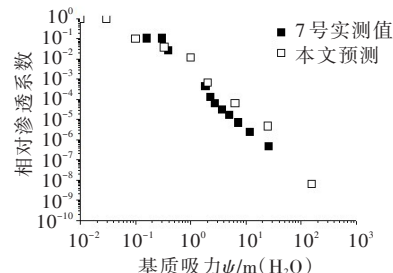
(d) Gilat 壤土



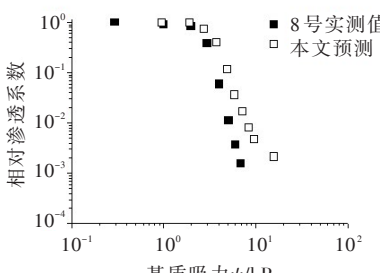
(e) Touchet 粉砂壤土



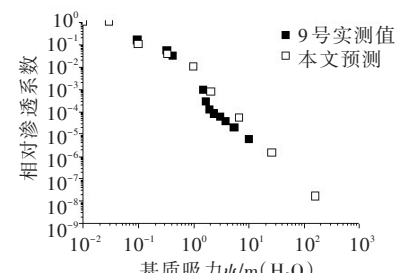
(f) 砂壤土



(g) Poederlee 壤质砂土



(h) Superstition 砂土



(i) Poederlee 砂土

图4 非饱和和相对渗透系数实测值与预测值

可获得相应的非饱和渗透系数。

4.2 变形条件下黏性土饱和渗透系数预测 黏性土水力特性(SWCC及饱和渗透系数)测量。土样取自武汉地区某深基坑底部黏性土,基本物理性质指标详见文献[9],制备2组平行试样,每组包含试样7个,孔隙比分别为1.12、1.04、0.96、0.90、0.83、0.72和0.61,一组用于SWCC测试,一组用于饱和渗透系数测量。SWCC测试采用压力板仪测量,测量结果转化为体积表示的SWCC,见图5(根据文献[9]分析,近似认为孔隙水排出后孔隙大小才发生改变,相应孔隙体积收缩量才在土体体积含水率上有所影响,因此本文不考虑收缩体变的影响)。饱和渗透系数采用变水头法测量,进行温度修正后的最终结果相对于孔隙比1.12、1.04、0.96、0.90、0.83、0.72和0.61分别为 2.806×10^{-4} 、 7.350×10^{-5} 、 3.655×10^{-5} 、 3.346×10^{-5} 、 2.409×10^{-5} 、 1.872×10^{-6} 和 7.510×10^{-7} cm/s。

首先根据测量的7组SWCC数据(图5)及初始饱和渗透系数($2.806 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)预测不同初始孔隙比土样的饱和渗透系数,计算时采用(15)式(不同变形量土体 k_e 取常值),具体方法见第2.2节和第4.1节。图6给出了预测结果及实测结果的比较,二者吻合较好,说明根据SWCC的变化预测黏性土饱和渗透系数的变化是可行的。

仅仅已知初始SWCC及初始饱和渗透系数预测任意变形量土样的饱和渗透系数。实际工程应用及理论分析往往不能提供任意变形量土样的SWCC,文献[9]提出了一种预测变形条件下SWCC的基本方法,在已知变形前SWCC实测值的条件下,采用该方法较为容易预测土体不同变形量的SWCC。在已知变形前($e=1.12$)的SWCC的条件下采用该方法预测了变形后的SWCC(质量含水率),并将结果转化为体积含水率的形式(如前文所述,不考虑收缩体变的影响),如图7所示。根据SWCC数据(图7)及初始饱和渗透系数($2.806 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$)预测了变形后不同孔隙比土样的饱和渗透系数,并与实测值进行比较,见图8。图8表明饱和渗透系数实测值与预测值基本吻合,说明在仅仅已知变形前的SWCC及饱和渗透系数的条件下,按照上述方法预测任意变形量土样的饱和渗透系数是可行的。

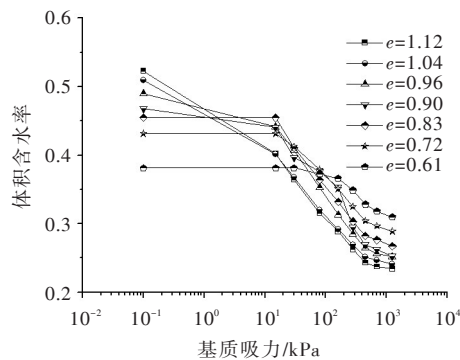


图5 不同变形量的黏性土SWCC实测

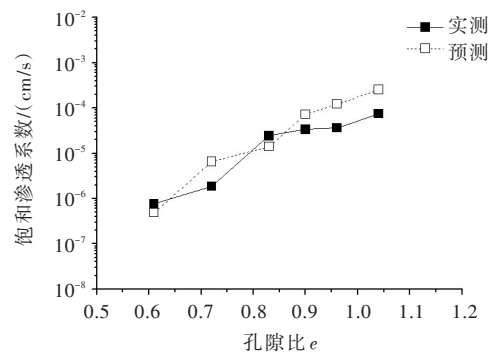


图6 根据实测SWCC预测饱和渗透系数

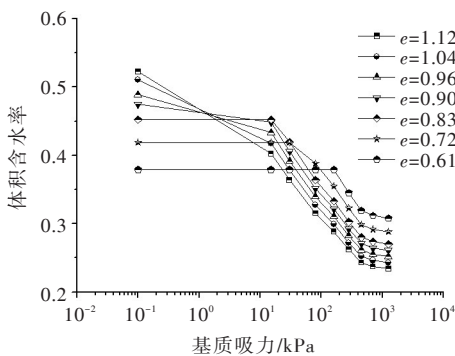


图7 不同变形量黏性土SWCC预测(其中 $e=1.12$ 为实测)

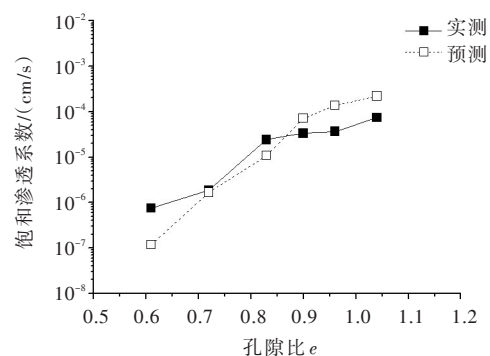


图8 根据预测的SWCC预测饱和渗透系数

4.3 变形条件下黏性土非饱和渗透系数预测 按照第4.1节的方法,结合式(17)非饱和相对渗透系数计算方法及文献[9]的SWCC预测手段,在仅仅已知变形前的SWCC($e=1.12$)的条件下便可预测任意变形量条件下非饱和相对渗透系数,预测结果见图9。图9表明在相同基质吸力条件下,孔隙比越小,黏性土非饱和相对渗透系数越大。相对渗透系数随基质吸力增加而减小,双对数坐标下,不同初始孔隙比土样的变化线近似平行。图9近似一“斜毛刷”。

以图9计算结果为基础,结合第4.2节预测的饱和渗透系数(图8)可计算不同初始孔隙比条件下黏性土的非饱和渗透系数,结果见图10。图10表明,双对数坐标下,在小于进气值的低吸力阶段,非饱和渗透系数~基质吸力曲线为一水平线,其值实际为饱和渗透系数(试样未开始排水),初始孔隙比越小该值越小;在大于进气值的高吸力阶段,基质吸力越大,非饱和渗透系数越小(土样开始排水),该阶段不同初始孔隙比土样非饱和渗透系数几乎重合,整体形状为“扫帚型”。

上述变形条件下黏性土非饱和渗透系数的变化规律与文献[9]所述变形条件下SWCC变化规律相似,都呈现“扫帚型”分布。根据这一规律,实际上,借鉴文献[9]提出的变形条件下SWCC预测方法,在预测不同初始孔隙比黏性土饱和渗透系数的基础上,可直接预测变形条件下非饱和渗透系数:即以饱和渗透系数值

作水平直线与最大初始孔隙比(变形前)下的曲线相交,交点处的横坐标便是进气值,进气值之前为相应饱和渗透系数,进气值之后的非饱和渗透系数与变形前相同。其预测结果和图10相似,本文不再赘述。

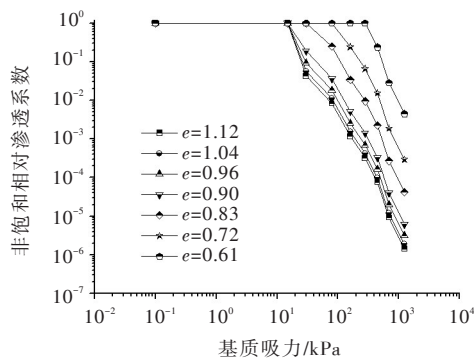


图9 不同初始孔隙比黏性土非饱和相对渗透系数预测值

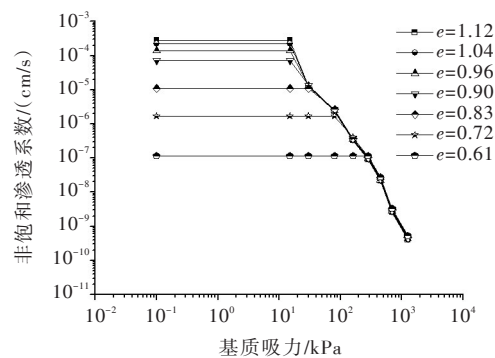


图10 不同初始孔隙比黏性土非饱和渗透系数预测值

5 结论

本文以微观孔隙通道为桥梁,将土-水特征曲线视作反映微观孔隙通道特性的间接指标,结合流体力学理论与毛细理论,建立了土-水特征曲线与饱和/非饱和渗透系数的关系模型。饱和土渗透系数模型可用式(15)或式(16)表示;非饱和土相对渗透系数模型可用式(17)或式(18)表示。模型预测的非饱和相对渗透系数与已有文献数据吻合较好,证明了式(17)的合理性。结合文献[9]中变形土体的土-水特征曲线预测方法,利用式(15)预测了武汉黏性土不同变形条件下的饱和渗透系数。尽管武汉黏性土饱和渗透系数在变形条件下呈现数量级的变化,但预测值均与实测值吻合较好。利用式(17)预测了武汉黏性土不同变形条件下的非饱和相对渗透系数,发现不同变形条件下非饱和相对渗透系数随基质吸力的变化规律在双对数坐标下可用“毛刷型分布”描述,即:进气值之前,为1;进气值之后,非饱和相对渗透系数随基质吸力增大而减小,相应斜率在不同初始孔隙比的情况下近似相等。结合预测的饱和渗透系数与非饱和相对渗透系数,计算了变形黏性土不同基质吸力条件下非饱和渗透系数,结果显示:进气值之前近似为相应的饱和渗透系数;进气值之后,非饱和渗透系数随基质吸力增大而减小,不同初始孔隙比条件下该变化线近似重合(这一结论目前只证明对黏性土适合)。

参 考 文 献:

- [1] 蔡国庆,尤金宝,赵成刚,等.双孔结构非饱和和压实黏土的渗流-变形耦合微观机理[J].水利学报,2015,46(S1):135-141.
- [2] MESRI G, KWAN L D O, FENG W T. Settlement of embankment on soft clays[J]. Proc. of settlement 94, ASCE Geotechnical Special Publication, 1994, 40: 8-56.
- [3] 邓永锋,刘松玉,章定文,等.几种孔隙比与渗透系数关系的对比[J].西北地震学报,2011,33(S1):64-66,76.
- [4] REICOSKY D C, VOORHEES W B, RADKE J K. Unsaturated water flow through a simulated wheel track[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(1): 3-8.
- [5] NIMMO J R, AKSTIN K C. Hydraulic conductivity of a sandy soil at low water content after compaction by various methods[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(2): 303-310.
- [6] 张雪东,赵成刚,刘艳,等.变形对土水特征曲线影响规律模拟研究[J].土木工程学报,2011,44(7):119-125.
- [7] 张昭,刘奉银,赵旭光,等.考虑应力引起孔隙比变化的土水特征曲线模型[J].水利学报,2013,44(5):578-585.
- [8] ZHOU A N, SHENG D C, CARTER J P. Modelling the effect of initial density on soil-water characteristic curves[J]. Géotechnique, 2012, 62(8): 669-680.
- [9] 陶高梁,张季如,庄心善,等.压缩变形影响下的土-水特征曲线及其简化表征方法[J].水利学报,2014,

- 45(10): 1239–1245 .
- [10] CHILDS E C, COLLIS–GEORGE G N . The permeability of porous materials[J] . Proceedings of the Royal Society A, 1950, 201(1066): 392–405 .
- [11] MUALEM Y . A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J] . Water Resources Research, 1976, 12(3): 513–522 .
- [12] BURDINE N T . Relative permeability calculation from pore size distribution data[J] . Journal of Petroleum Technology, 1953, 5(3): 71–78 .
- [13] 张雪东, 赵成刚, 刘艳 . 变形对非饱和土渗透系数影响规律模拟研究[J] . 工程地质学报, 2010, 18(1): 132–139 .
- [14] 蔡国庆, 盛岱超, 周安楠 . 考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数方程[J] . 岩土工程学报, 2014, 36(5): 827–835 .
- [15] RAWITZ E . The influence of a number of environmental factors on the availability of soil moisture to plants[D] . Hebrew Univ., Rehovot, Israel, 1965 .
- [16] MOORE R E . Water conduction from shallow water tables[J] . Hilgardia, 1939, 12: 383 – 426 .
- [17] MUALEM Y . A Catalogue of the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils[Z] . Technion, Israel Inst . of Technol., Haifa, Israel, 1976 .
- [18] BROOKS R H, COREY A T . Hydraulic properties of porous media[R] . Colorado State University Hydrology Paper, 1964 .
- [19] PACHEPSKY Y A, SHCHERBAKOV R A, VARALLYAY G, et al . On obtaining soil hydraulic conductivity curves from water retention curves[J] . Pochvovedenie, 1984, 10:60 – 72 .
- [20] NEMES A, SCHAAP M G, LEIJ F J, et al . Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0[J] . J . Hydrol ., 2001, 251(3/4):151 – 162 .
- [21] RICHARDS L A . Water conducting and retaining properties of soils in relation to irrigation[C]//Proceedings, International Symposium on Desert Research, Jerusalem, 1952: 523 – 546 .

A model for determining the permeability coefficient of saturated and unsaturated soils based on micro pore channel and its application

TAO Gaoliang^{1, 2}, KONG Lingwei²

(1. School of Civil, Architecture and Environmental Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: To reveal the influence mechanism of deformation on the saturated and unsaturated permeability and establish the corresponding prediction method from the micro perspective is of great significance for seepage analysis and hydro–mechanical coupling study of saturated and unsaturated soils. Using the fluid mechanics theory, the relation between the permeability coefficient and the equivalent pore–size of micro pore channel has been established. On this basis, by using the capillary theory, a new model was presented to determine the permeability coefficient of saturated and unsaturated soils from soil–water characteristic curve (SWCC), which was testified to be reasonable based on existing experimental data. Combining this model with prediction method of SWCCs of deformation soils, the saturated and unsaturated permeability coefficients of Wuhan deformation clay were predicted. The results show that the predictions of the saturated permeability coefficients are in good agreement with the experimental results, which decrease in orders of magnitude under compression deformation condition. In double logarithmic coordinate, unsaturated relative permeability coefficients decrease with the increase of matric suction for the suction stage greater than the air entry value, which has the approximately same slope for different initial void ratio and present as a “brush” profile. In condition of the same matric suction, the smaller initial void ratio is, the greater unsaturated relative permeability coefficient is. In the suction stage smaller than the air entry value, unsaturated permeability coefficient is approximately equal to the saturated permeability coefficient. In the suction stage greater than the air entry value, unsaturated permeability coefficient decrease with the increase of matric suction, which show the approximately coincident line in the condition of different initial void ratio.

Keywords: deformation clay; saturated and unsaturated permeability coefficient; micro pore channel; soil–water characteristic curve

(责任编辑: 韩 昆)