

DOI: 10.11779/CJGE201405004

考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数方程

蔡国庆^{1,2}, 盛岱超², 周安楠³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院岩土工程系, 北京 100044; 2. 澳大利亚纽卡斯尔大学岩土科学与工程研究中心, 纽卡斯尔 2308;
3. 澳大利亚墨尔本皇家理工大学土木、环境及化工学院, 墨尔本 3001)

摘要: 基于饱和度随孔隙比变化的增量关系以及利用非饱和土土水特征曲线(SWCC)预测渗透系数的方法, 建立了一种考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数间接预测方法。在非饱和土 SWCC 方程基础上, 该方法只需增加一个参数, 即可对某一种土在不同初始孔隙比条件下的相对渗透系数进行预测, 通过与试验结果的对比, 证实了所建立的预测模型的正确性。

关键词: 非饱和土; 土水特征曲线; 渗透系数; 初始孔隙比

中图分类号: TU441.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2014)05-0827-09

作者简介: 蔡国庆(1983-), 男, 江苏镇江人, 讲师, 主要从事非饱和土本构关系及多场耦合等方面的研究工作。E-mail: guoqing.cai@bjtu.edu.cn。

Approach for predicting the relative coefficient of permeability of unsaturated soils with different initial void ratios

CAI Guo-qing^{1,2}, SHENG Dai-chao², ZHOU An-nan³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. ARC Centre of Excellence for Geotechnical Science and Engineering, The University of Newcastle, Newcastle 2308, Australia; 3. School of Civil, Environmental and Chemical Engineering, Royal Melbourne Institute of Technology (RMIT), Melbourne 3001, Australia)

Abstract: A simple approach is proposed to quantify the effect of the initial void ratio on the relative coefficient of permeability for unsaturated soils based on the incremental relationship between the degree of saturation and the initial void ratio and the prediction of the permeability function for unsaturated soils by use of the soil-water characteristic curve (SWCC). For a given soil and the SWCC equation, only one additional parameter is introduced, which can be conveniently calibrated by the conventional SWCC tests. The relative coefficient of permeability for the same soil with different initial void ratios can be predicted by this approach. The proposed approach is validated through experimental data from the literatures in which both the SWCCs and the coefficients of permeability with different initial void ratios are measured.

Key words: unsaturated soil; soil water characteristic curve; coefficient of permeability; initial void ratio

0 引言

渗流问题是土力学的三大基本问题之一。随着理论研究的深入和实际工程的发展, 非饱和土渗流问题在岩土工程及环境岩土工程中受到越来越多的重视, 例如降雨引起的土质边坡饱和度及渗透性变化, 并最终导致的滑坡灾害; 地基基础或路基中压实土的固结及膨胀土的隆起; 土质堤坝的防渗; 垃圾填埋场、核废料处置库周边地下水中的污染物的迁移等^[1-4]。现有的这方面成果多集中于对饱和土渗流的研究。

对于可压缩的饱和土, 其渗透系数主要受到孔隙比的影响; 对于不可压缩的非饱和土而言, 其渗透系数是饱和度或吸力的函数。而实际工程中遇到的土体, 往往既可压缩又处于非饱和状态, 因此其渗透系数将

同时受饱和度和孔隙比的影响, 是它们共同的函数。岩土工程界较早地认识到了可压缩饱和土的渗透系数随孔隙比而变化的规律^[5-7]。不考虑变形的影响, 研究非饱和土渗透系数随饱和度/吸力的变化规律, 则起源于土壤学^[8-9]。对可变形非饱和土渗透系数的研究, 则大都是对试验结果的简单数值模拟或回归^[10-13], 缺乏理论基础。Mitchell 等^[14]将 Taylor 的可变形饱和土渗透理论推广至非饱和土, 并针对压实黏土开展了相应的试验研究。Laliberte 等^[15]研究了密度对非饱和土渗透系数的影响, 最后得出密度对非饱和土固有渗透系

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208031, 51278047); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB732100)

收稿日期: 2013-09-10

数影响较大的结论。Lloret 等^[16]将渗透系数随孔隙比和饱和度变化的方程相乘, 建议了一个针对可变形非饱和土的渗透系数方程。Chang 等^[17]通过引入表示孔隙比和饱和度影响的因子, 来考虑这两者的影响。Huang 等^[18]建立了一个针对可变形非饱和土的渗透系数方程, 并通过对粉土开展的一系列三轴渗透试验, 验证了其所建立模型的正确性。张雪东等^[19-20]以毛细管模型和概率统计理论为基础, 研究了变形对非饱和土土水特征曲线及渗透系数的影响。胡冉等^[21-22]从土体孔隙分布对土水特征曲线的影响出发, 假定变形后的孔隙分布函数可以从参考状态的孔隙分布函数经过平移、缩放得到, 在此基础上, 建立了考虑土体变形和滞回特性的土水特征曲线模型, 并以此建立了考虑变形效应的非饱和土相对渗透系数的修正 Mualem 统计模型。

渗透系数是研究饱和/非饱和土渗流的关键参数, 与饱和土相比, 对非饱和土渗透系数的实验测定要困难得多, 尤其是在低饱和度情况下, 土中的水极难排出, 因此通过实验室试验直接测试非饱和土渗透系数将耗费大量时间。利用饱和土渗透系数和非饱和土土水特征曲线, 从理论上间接预测非饱和土渗透系数, 已被证实为一种既准确又简便的方法, 并且得到了众多研究者的广泛应用^[23-27]。

本文首先分析比较了预测非饱和土渗透系数的 3 种间接方法, 即经验模型、宏观模型和统计模型。然后, 基于 Sheng 等^[27]、Zhou 等^[28]提出的考虑初始孔隙比影响的非饱和土土水特征曲线模型, 推导给出了考虑初始孔隙比影响的非饱和土渗透系数方程及求解方法, 建立了一种利用饱和渗透系数和非饱和土土水特征曲线来对不同初始孔隙比条件下的非饱和土渗透系数进行预测的方法。最后, 对模型参数进行标定, 并将模型预测结果和试验结果进行对比, 验证了本文所提出的预测方法的合理性。

1 非饱和土渗透系数预测方法

1.1 经验模型 (empirical equations)

所谓经验模型, 是在试验直接测出不同吸力 (或含水率) 时非饱和土渗透系数的基础上, 通过曲线拟合, 给出非饱和土渗透系数 k_w 与吸力 s (或含水率 θ_w) 的关系:

$$k_w = f(s) \quad \text{或} \quad k_w = f(\theta_w) \quad (1)$$

非饱和土的渗透系数随吸力 (或含水率) 的变化曲线, 与相应的土水特征曲线 (SWCC) 具有相似的形状, Leong 等^[29]认为这主要是因为非饱和土中液体的流动仅在液相中进行。需要指出的是, 虽然经验模

型的建立相对简单, 但需要以大量既费时又耗力的渗透试验为基础, 这使其应用存在较大局限。

1.2 宏观模型 (macroscopic models)

渗透系数宏观模型的建立主要基于以下认识: 被液体充满的孔隙可以由不同尺寸的连续的毛细管束来表示。在微观层面上, 不同尺寸的毛细管内的液体流动均可视为层流, 并且共同组成了土体内部液体整体的宏观流动, 对于一个由层流管组成的土体系统, 宏观模型认为流体的流动可近似由土体内部整体的平均流速、平均水力梯度、平均水力半径及平均渗透系数等宏观变量来描述, 而并不考虑不同毛细管 (或孔隙) 的尺寸及其分布的影响^[18, 24, 29]。

基于上述认识, Brooks 等^[24]推导给出了下列形式的非饱和土相对渗透系数 k_r 的表达式:

$$k_r = \left[\frac{S - S_r}{1 - S_r} \right]^2 \frac{\int_0^s dS/s^2}{\int_0^1 dS/s^2} \quad (2)$$

式中, 等号右端 $[(S - S_r)/(1 - S_r)]^2$ 为“迂曲度因子”项, 用来描述土体中的平均流速与实际流速之间、平均水力梯度和实际水力梯度之间均存在的差别, S_r 为残余饱和度, $S_e = (S - S_r)/(1 - S_r)$ 定义为有效饱和度; 等号右端 $(\int_0^s dS/s^2)/(\int_0^1 dS/s^2)$ 为“水力半径”项, 可以通过对土水特征曲线的积分得到。在双对数型坐标平面内, 有效饱和度 S_e 可以表示为吸力 s 的幂函数, 则非饱和土相对渗透系数的宏观模型可简化表示为

$$k_r = S_e^\delta, \quad (3)$$

式中, δ 为拟合参数。大部分宏观模型的 δ 为常数, 而为了考虑孔径分布对渗透系数的影响, Brooks 等^[24]、Mualem^[25]的宏观模型中的 δ 表示为孔径分布指数 λ 的函数。

虽然宏观模型与经验模型具有较为相似的表达式, 但其推导建立过程却不同, 经验模型仅是简单的试验结果的拟合, 依赖于对非饱和土渗透系数的直接测试, 而宏观模型则基于流体力学理论, 利用宏观变量并通过理论推导给出描述土体内部流动的近似表达式, 可以通过非饱和土土水特征曲线间接求解。

1.3 统计模型 (statistical models)

统计模型是基于不同尺寸的孔隙对渗透系数的不同贡献而建立的, 即充分考虑了土体内部的孔径分布及孔隙之间的相互连通性, 是一种已被证实的最为严格和有效地建立非饱和土渗透系数方程的间接方法。在统计模型中, 只要已知非饱和土的土水特征曲线及相应的饱和渗透系数, 即可方便求解出其相对渗透系数。统计模型的建立一般基于下列 3 个假设: ①土体

由一系列相互连通的、任意尺寸的孔隙组成, 孔径为 r 的孔隙的频率分布为 $g(r)$, 对于土体内任一横截面, 孔径为 r 的孔隙的断面面积的频率分布也为 $g(r)$, 也就是说, 土体内的任一横截面均具有相同的孔径分布; ②对于每一个孔隙而言, Hagen-Poiseuille 方程成立; ③基于 Kelvin 毛细模型, 非饱和土的土水特征曲线可以表征其孔隙分布函数。

通过对已有的统计模型进行总结, 可将其归纳为下面两类一般表达式:

$$k_r(\theta_w) = \Phi^x \left[\left(\int_0^{\theta_w} \frac{d\theta_w}{s^y} \right) / \left(\int_0^{\theta_s} \frac{d\theta_w}{s^y} \right) \right]^z, \quad (4)$$

$$k_r(\theta_w) = \Phi^x \left[\left(\int_0^{\theta_w} \frac{(\theta_w - \xi)}{s^y} d\xi \right) / \left(\int_0^{\theta_s} \frac{(\theta_w - \xi)}{s^y} d\xi \right) \right]^z. \quad (5)$$

式中, Φ 为迂曲度因子, 反映土体内孔隙迂曲度对渗透性能的影响, 对提高模型的预测能力具有重要作用, 一般可用归一化的体积含水率 Θ (定义为 $\Theta = (\theta_w - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$, θ_s , θ_r 分别为饱和体积含水率、残余体积含水率) 或有效饱和度 S_e 表示, ξ 为虚拟积分变量, x , y , z 为常数。Burdine^[30]模型, 相当于(5)式中取 $x = 2$, $y = 2$, $z = 1$; Mualem^[25]模型, 相当于(5)式中取 $x = 0.5$, $y = 1$, $z = 2$; CCG 模型^[23], 相当于(6)式中取 $x = 0$, $y = 2$, $z = 1$; 修正 CCG 模型^[26], 相当于(6)式中取 $x = 0$, $y = 0$, $z = 2$ 。下面将基于统计模型理论, 建立考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数方程。

2 预测模型的建立及求解

根据统计模型的思想, 为了计算某非饱和土样在孔隙比为 e 时的相对渗透系数, 首先应计算处于该孔隙比条件下的土水特征曲线, 此处采用 Sheng 等^[27]、Zhou 等^[28]提出的方法。Sheng 等^[27]、Zhou 等^[28]建立了常应力条件下有效饱和度 S_e 随孔隙比 e 变化需满足的关系:

$$\begin{cases} -\frac{S_e}{e} \leq \frac{dS_e}{de} \leq \frac{1-S_e}{e} \\ \frac{dS_e}{de} = 0 \quad (\text{当 } S_e = 1 \text{ 或 } S_e = 0 \text{ 时}) \end{cases}. \quad (6)$$

在此基础上, Zhou 等^[28]基于对土体内部固、液、气三相的变形协调限制以及宏、微观孔隙水之间的差异性, 提出了一个能定量描述初始孔隙比对非饱和土土水特征曲线影响的方法, 给出了某一吸力值时满足关系式(6)的有效饱和度随孔隙比的演化方程:

$$\frac{dS_e}{de} = -\frac{S_e}{e} (1-S_e)^\zeta, \quad (7)$$

式中, ζ 为拟合参数, 在等应力条件下, 上式中的孔隙比 e 仅与初始状态有关, 即可退化为初始孔隙比 e_0 。

不难发现, 式(7)所建立的有效饱和度随初始孔隙比变化的增量关系, 可以应用于任意形式的土水特征曲线方程。选取某一初始孔隙比 e_i^{ref} 下的 SWCC (S_e^{ref}) 作为参考状态, 利用 Simpson 公式, 可对上式进行数值积分, 从而得到下列 $S_e - e_i$ 关系:

$$\frac{(S_e - S_e^{\text{ref}})}{6} \left[f(S_e^{\text{ref}}) + 4f\left(\frac{S_e^{\text{ref}} + S_e}{2}\right) + f(S_e) \right] = \ln \frac{e_i^{\text{ref}}}{e_i}, \quad (8)$$

式中, $f(x) = [x(1-x)^\zeta]^{-1}$ 。

当已知初始孔隙比为 e_i^{ref} 的参考状态时的 SWCC, 即可基于式(8)得到任意初始孔隙比 e_i 时的 SWCC。

当不同初始孔隙比时的 SWCC 已知时, 即可根据统计模型(即式(4)、(5)), 对其相应的渗透系数进行计算。Agus 等^[26]通过大量对比分析表明: 在众多统计模型中, Mualem 模型^[25]具有较好的预测能力, 其表达式为

$$k_r = \sqrt{S_e} \left[\left(\int_0^{S_e} s^{-1} dS_e \right) / \left(\int_0^1 s^{-1} dS_e \right) \right]^2. \quad (9)$$

本文亦以该模型为基础来预测非饱和土相对渗透系数, 并拓展至能考虑初始孔隙比的影响。但在求解过程中, 需要分 2 种情况分别考虑: ①对于土水特征曲线的积分解析表达式存在时, 可以通过式(4)或式(5)直接积分得到考虑初始孔隙比影响的渗透系数解析表达式; ②对于土水特征曲线表达式不能直接给出积分解析表达式时, 则需要通过数值积分的方法, 间接得出渗透系数的值。下面将针对上述 2 种不同情况, 分别建立考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数预测模型及其求解策略。

2.1 解析积分法

当统计模型采用 Mualem 模型, SWCC 方程采用 van Genuchten 方程时, 存在解析解, 具体积分过程如下:

van Genuchten^[31]建立的 SWCC 方程, 用有效饱和度 S_e 和吸力 s 可表示为

$$S_e = \left\{ 1 + \left(\frac{s}{a} \right)^b \right\}^{-c}, \quad (10)$$

式中, a , b , c 为拟合参数, 且有 $c = 1 - 1/b$, 由式(10)可分离得到吸力 s :

$$s = a(S_e^{b/(1-b)} - 1)^{1/b}. \quad (11)$$

将式(11)代入式(9), 并化简得

$$k_r = \sqrt{S_e} \left(\frac{\int_0^{S_e} \psi^{-1} dS_e}{\int_0^1 \psi^{-1} dS_e} \right)^2 = \sqrt{S_e} \left\{ \frac{\int_0^{S_e} \left[a \left(S_e^{\frac{b}{1-b}} - 1 \right)^{1/b} \right]^{-1} dS_e}{\int_0^1 \left[a \left(S_e^{\frac{b}{1-b}} - 1 \right)^{1/b} \right]^{-1} dS_e} \right\}^2 \\ = \sqrt{S_e} \left[1 - (1 - S_e^{b/(b-1)})^{1-1/b} \right]^2, \quad (12)$$

式中, 有效饱和度 S_e 受到孔隙比 e 的影响。

将式 (10) 代入式 (12), 即可得到用吸力 s 表示的形式:

$$k_r = \left[1 + \left(\frac{s}{a} \right)^b \right]^{(1-b)/2b} \left\{ 1 - \left[1 - \left(1 + \left(\frac{s}{a} \right)^b \right)^{-1} \right]^{1-1/b} \right\}^2. \quad (13)$$

式 (13) 即为考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数 k_r 解析表达式, 参数 a, b 受孔隙比影响, 在不同的初始孔隙比条件下 (即对应不同的 ζ 值) 有不同的值。

2.2 数值积分法

当统计模型无法给出上述积分的解析表达式时, 可进行数值积分求解, 此时所采用的 van Genuchten SWCC 表达式中的参数 a, b, c 相互独立。首先, 计算待求孔隙比条件下的 SWCC, 对式 (7) 离散化得到饱和度随孔隙比的每一步变化:

$$S_{r,i+1} = S_{r,i} - \frac{S_{r,i}(1-S_{r,i})^\zeta}{e_i} \Delta e, \quad (14)$$

其中, $S_{r,i}$, $S_{r,i+1}$ 分别是第 i 步、第 $i+1$ 步时的饱和度, e_i 是第 i 步时的孔隙比, Δe 是从第 i 步到第 $i+1$ 步的孔隙比增量, 即 $\Delta e = e_{i+1} - e_i$ 。因此, 孔隙比为 e 条件下的饱和度 $S_r(\psi, e)$ 可表示为

$$S_r(\psi, e) = S_{r0} - \sum_{i=1}^n \frac{S_{r,i}(1-S_{r,i})^\zeta}{e_i} \Delta e, \quad (15)$$

式中, 分别记参考状态时的孔隙比和饱和度为 e_0 和 S_{r0} , n 为步数, $n = (e - e_0) / \Delta e$ 。

当前孔隙比 e 条件下的有效饱和度为

$$S_e(\psi, e) = \frac{S_r(\psi, e) - S_r^{\text{res}}}{1 - S_r^{\text{res}}}. \quad (16)$$

至此, 式 (8) 可离散化为

$$k_r = \sqrt{S_e(\psi, e)} \left(\frac{\sum_{i=1}^N \left\{ \psi_i^{-1} [S_e(\psi_{i+1}, e) - S_e(\psi_i, e)] \right\}}{\sum_{i=1}^M \left\{ \psi_i^{-1} [S_e(\psi_{i+1}, e) - S_e(\psi_i, e)] \right\}} \right)^2, \quad (17)$$

式中, $\psi_{i+1} = \psi_i + \Delta \psi$, $\Delta \psi$ 为每一步的吸力增量, $N = (\psi - \psi_{i+1}) / \Delta \psi$ 代表从残余饱和度对应的吸力值 ψ_{i+1} 到当前吸力值 ψ 之间的计算步数, $M = -\psi_{i+1} / \Delta \psi$ 代表整个吸力区间的计算步数, 对绝大多数的土而言, ψ_{i+1} 的值可取 10^6 kPa。

至此, 考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数模型得以建立, 即式 (13)、(17)。

3 参数标定及模型验证

不同孔隙比条件下, 同时测试非饱和土 SWCC 和渗透系数的试验成果相对较少, 可用数据非常有限。Laliberte 等^[32]测试了不同初始孔隙比条件下 Touchet 粉砂壤土、Columbia 砂壤土和松砂的 SWCC 曲线干燥段及各自非饱和相对渗透系数, 得到了初始孔隙比对非饱和土 SWCC 曲线以及相对渗透系数的影响规律。试验用 3 种土均为重塑土样, 土中的液相采用某轻质烃油, 用其替代水作为液相的主要优点在于: 可以提高土骨架在试验过程中的稳定性; 在含有污染物的情况下, 烃油的湿润和界面特性均比水要更稳定。同时, 为了考虑上述烃油和水之间密度的差别, Laliberte 等^[32]对毛细压力值进行了修正。对土样风干、过筛, 装入制样筒进行振动, 以获得不同初始孔隙比的试样。

基于 Laliberte 等^[32]的试验结果, 采用 van Genuchten SWCC 模型, 分别对 Touchet 粉砂壤土、Columbia 砂壤土、松砂等 3 种不同类型的土进行了模型参数标定, 参数 a, b, c 与 ζ 的具体标定过程为: ①首先利用初始孔隙比为 e_0^{ref} 的参考状态时 SWCC 试验点, 基于 van Genuchten SWCC 方程式 (11), 标定出模型参数 a, b, c , 得到该状态下的 SWCC 方程和曲线; ②将 e_0^{ref} 状态下的 SWCC 曲线沿有效饱和度 S_e^{ref} 划分为 m 等份, 并利用步骤①中得到的 SWCC 方程计算出每一个 S_e^{ref} 所对应的吸力值 s^{ref} ; ③在 $0 \leq \zeta \leq 1$ 范围内给定一个 ζ 值, 利用式 (9) 计算出相同吸力下初始孔隙比为 e_0^* 时 SWCC 的有效饱和度 S_e^* , 并基于坐标点 (s^{ref}, S_e^*) 绘制 e_0^* 状态下的 SWCC 曲线; ④重新给定 ζ 值, 重复步骤③, 直至所得到的 e_0^* 状态下的 SWCC 曲线与试验点吻合, 选取此时的 ζ 值为参数标定值。利用标定后的模型, 基于数值积分法对不同初始孔隙比条件下的非饱和土 SWCC 和相对渗透系数进行了预测, 并与试验结果进行了比较。

3.1 Touchet 粉砂壤土

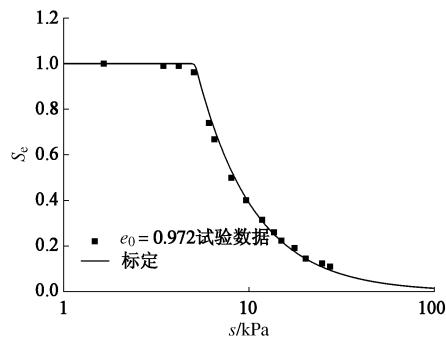
作为一种粗粒粉土, 试验所用的 Touchet 粉砂壤土含砂 32%, 粉土 53%, 黏土 15%, 土粒密度为 2.599 g/cm^3 。选取初始孔隙比为 0.972 为参考状态, 通过该状态下的 SWCC 拟合出参数 $a, b, c, S_r^{\text{res}}$, 然后通过初始孔隙比为 0.972 和 0.862 两个状态下的 SWCC 拟合出参数 ζ 。模型参数标定过程示于图 1, 标定结果示于表 1, 图 2 所示为初始孔隙比为 0.754 时 SWCC 的模型预测与试验数据比较, 初始孔隙比分别为 0.653, 0.733, 0.815, 0.916 四种情况下的非饱和相对渗透系数模型预测和试验数据比对示于图 3。结果表

明, 模型预测结果与试验数据吻合较好。

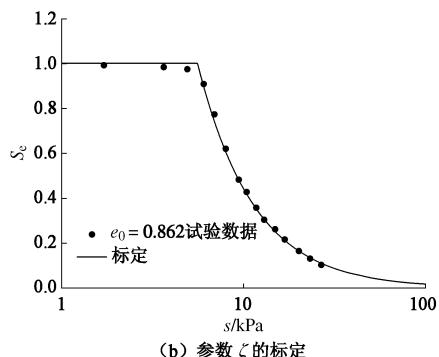
表 1 3 种土样的模型参数标定结果

Table 1 Model calibration for three different soils

	a	b	c	S_r^{res}	ζ
Touchet 粉砂壤土	5.15	112.42	0.0125	0.0	0.001
Columbia 砂壤土	3.11	10.49	0.1450	0.0	0.001
松砂	0.54	100.79	0.0450	0.0	0.001



(a) van Genuchten 模型参数 $a, b, c, S_r^{\text{res}}$ 标定



(b) 参数 ζ 的标定

图 1 Touchet 粉砂壤土的模型参数标定
Fig. 1 Model calibration for Touchet silt loam

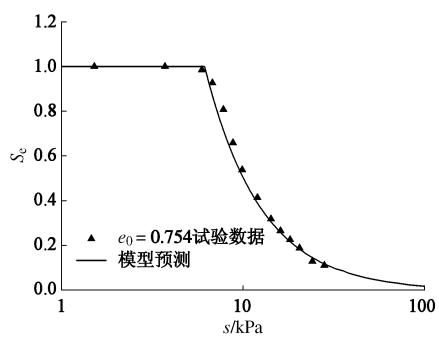
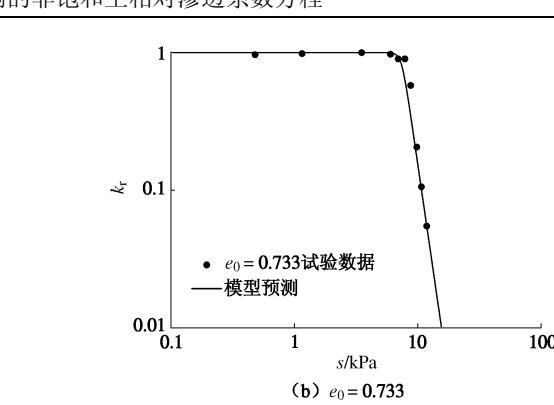
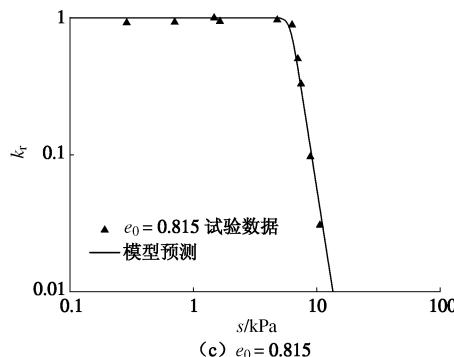


图 2 Touchet 粉砂壤土 SWCC 的模型预测与试验结果对比
Fig. 2 Comparison between measured and predicted SWCCs for Touchet silt loam

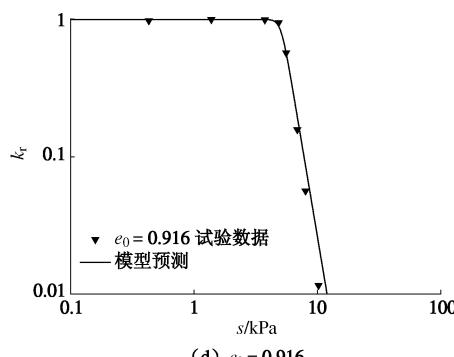
3.2 Columbia 砂壤土



(b) $e_0 = 0.733$



(c) $e_0 = 0.815$

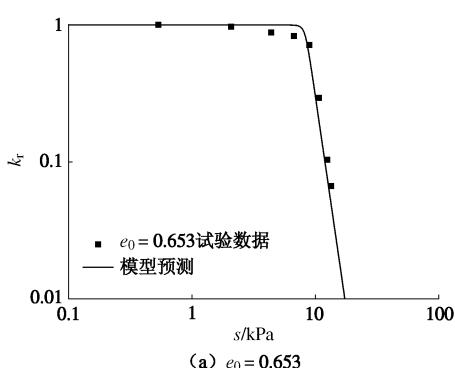


(d) $e_0 = 0.916$

图 3 Touchet 粉砂壤土相对渗透系数 k_r 的模型预测与试验结果对比
Fig. 3 Comparison between measured and predicted relative coefficients of permeability k_r for Touchet silt loam

3.2 Columbia 砂壤土

Columbia 砂壤土的组成为 54% 砂, 35% 粉土和 11% 黏土, 其土粒密度为 2.664 g/cm^3 。此处利用了初始孔隙比为 1.193, 1.075, 0.984 时的 SWCC 试验结果以及初始孔隙比为 0.815, 0.890, 0.942, 1.114 时的相对渗透系数试验结果。初始孔隙比为 1.193 被选为参考状态, 并用以标定 van Genuchten SWCC 模型参数, 初始孔隙比为 1.075 时的 SWCC 被用来标定参数 ζ 。模型参数标定过程示于图 4, 标定结果示于表 1, 图 5 所示为初始孔隙比为 0.984 时 SWCC 的模型预测与试验数据比较, 初始孔隙比分别为 0.815, 0.890, 0.942 和 1.114 四种情况下的 Columbia 砂壤土非饱和和相对渗透系数模型预测和试验数据比对示于图 6, 模



(a) $e_0 = 0.653$

型预测结果与试验数据吻合较好。

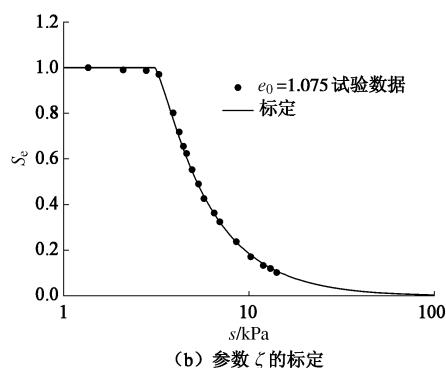
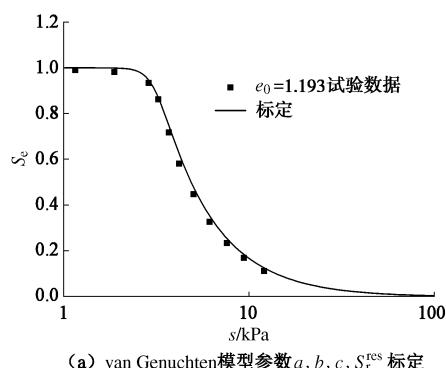


图 4 Columbia 砂壤土的模型参数标定

Fig. 4 Model calibration for Columbia sandy loam

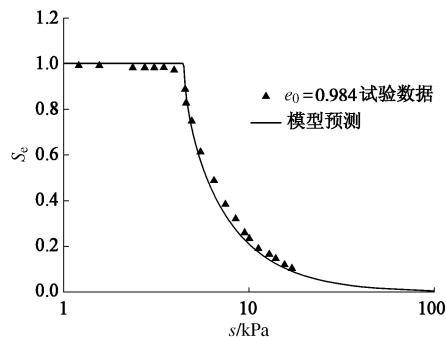


图 5 Columbia 砂壤土 SWCC 的模型预测与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between measured and predicted SWCCs for Columbia sandy loam

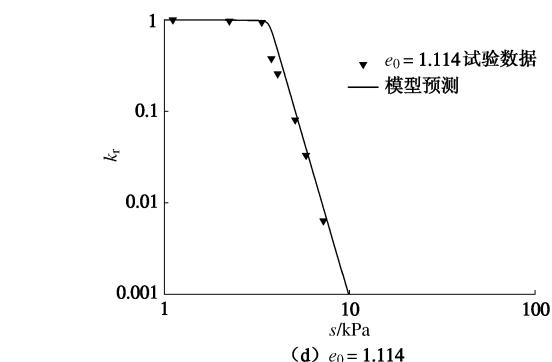
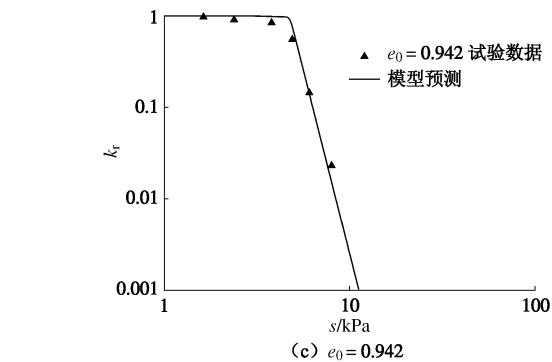
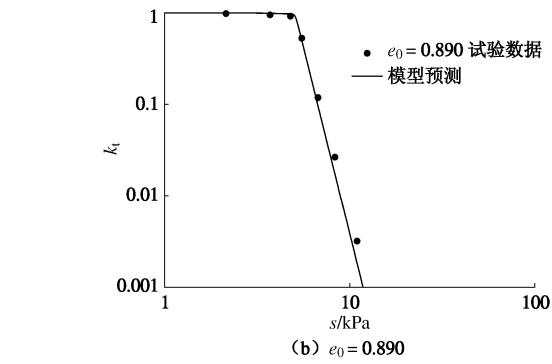
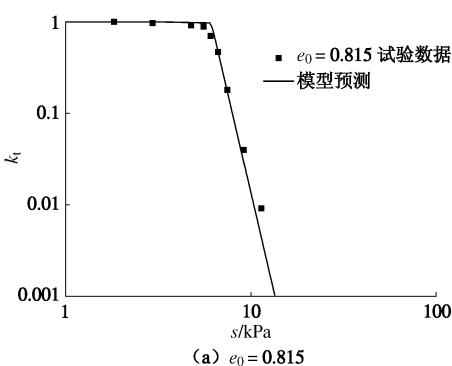


图 6 Columbia 砂壤土相对渗透系数 k_r 的模型预测与试验结果对比

Fig. 6 Comparison between measured and predicted relative coefficients of permeability k_r for Columbia sandy loam

3.3 松砂

此处所用松砂含砂 90%，含粉土 6%，含黏土 4%，土粒密度为 2.706 g/cm^3 。对 SWCC，土样初始孔隙比分别为 0.802, 0.783, 0.770，其中 $e_0 = 0.802$ 时的 SWCC 被选为初始状态，并以此拟合出 van Genuchten SWCC 模型参数 a , b , c , S_r^{res} ，而 $e_0 = 0.783$ 时的 SWCC 则用以标定参数 ζ 。参数标定过程示于图 7，标定结果见表 1。图 8 所示为初始孔隙比为 0.770 时 SWCC 的模型预测与试验数据比较，初始孔隙比分别为 0.715, 0.767 和 0.799 三种情况下松砂的非饱和相对渗透系数模型预测和试验数据比对示于图 9，模型预测结果与试验数据基本吻合。

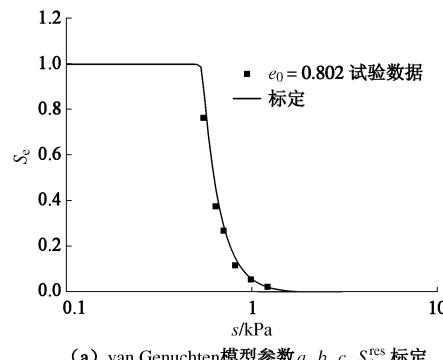
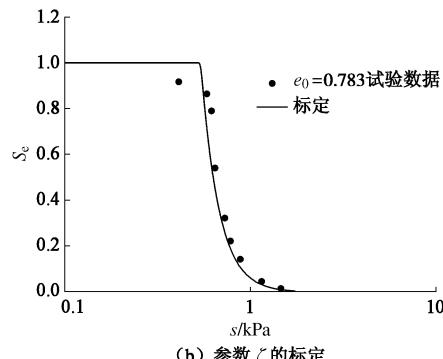
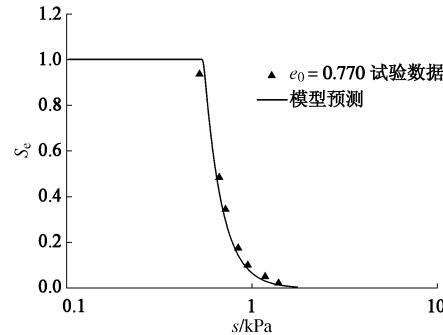
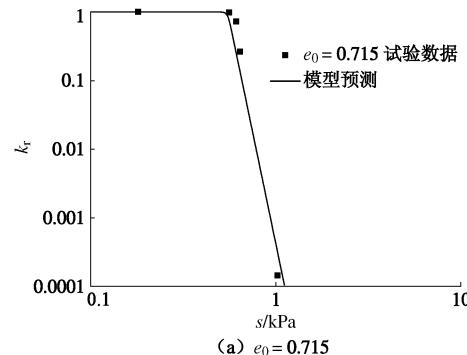
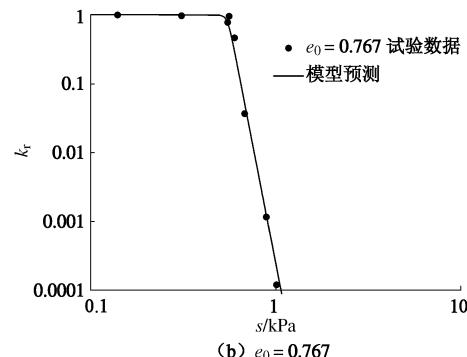
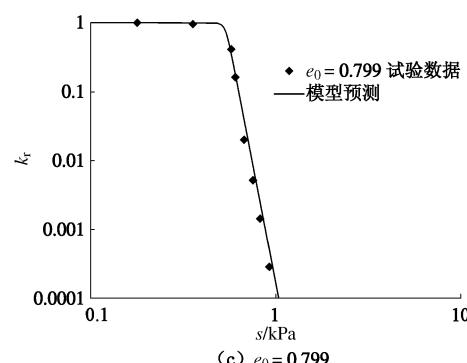
(a) van Genuchten模型参数 $a, b, c, S_r^{\text{res}}$ 标定(b) 参数 ζ 的标定图 7 松砂的模型参数标定
Fig. 7 Model calibration for loose sand

图 8 松砂的 SWCC 模型预测与试验结果对比

Fig. 8 Comparison between measured and predicted SWCCs for loose sand

通过对上述 3 种不同类型土样, 其模型预测与试验结果基本吻合, 从而使本文所提模型得到验证。对于不同初始孔隙比条件下的 k_r - s 曲线: 一方面, 非饱和土相对渗透系数 k_r 随着吸力 s 的增大而减小, 结合考虑土水特征曲线给出的 $s - \theta_w$ (或 $s - S_r$) 关系, 还可得出 k_r 随含水率 θ_w (或饱和度 S_r) 的增大而增大; 另一方面, 在吸力到达进气值之前, 非饱和土相对渗透系数几乎不受初始孔隙比的影响, 而当吸力超过进气值之后, 随着初始孔隙比的增大, 非饱和土相对渗透系数随吸力的变化曲线向下移动, 即在相同的吸力或含水率条件下, 孔隙比大的非饱和土土样具有较低的相对渗透系数。从 3 种不同类型土样的预测结果还可发现, 初始孔隙比对粉砂壤土和砂壤土的

渗透系数影响较大, 而对砂土的影响则相对较小。

(a) $e_0 = 0.715$ (b) $e_0 = 0.767$ (c) $e_0 = 0.799$ 图 9 松砂相对渗透系数 k_r 的模型预测与试验结果对比Fig. 9 Comparison between measured and predicted relative coefficients of permeability k_r for loose sand

4 结 论

(1) 基于饱和度随孔隙比变化的增量关系及利用非饱和土 SWCC 预测渗透系数的方法, 建立了一种考虑初始孔隙比影响的非饱和土相对渗透系数间接预测方法。在非饱和土 SWCC 方程基础上, 该方法只需再增加一个参数, 即可对某一非饱和土在不同初始孔隙比时的相对渗透系数进行预测。

(2) 模型预测结果表明, 非饱和土的相对渗透系数既受到流相指标 (含水率或吸力) 的影响, 同时也受到固相指标 (孔隙比) 的影响。非饱和土相对渗透系数随着吸力的增大而减小 (随含水率的增大而增

大), 同时随初始孔隙比的增大而减小。

目前, 国内外关于不同孔隙比条件下的非饱和土相对渗透系数的试验研究成果较为缺乏, 值得进一步开展相关研究。

参考文献:

- [1] SHENG D C. Review of fundamental principles in modelling unsaturated soil behaviour[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, **38**(6): 757–776.
- [2] 陈正汉, 孙树国, 方祥卫, 等. 非饱和土与特殊土测试技术新进展[J]. *岩土工程学报*, 2006, **28**(2): 147–169. (CHEN Zheng-han, SUN Shu-guo, FANG Xiang-wei, et al. Recent advances of the measuring technology for unsaturated soils and special soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, **28**(2): 147–169. (in Chinese))
- [3] 赵成刚, 李 舰, 刘 艳, 等. 非饱和土力学中几个基本问题的探讨[J]. *岩土力学*, 2013, **34**(7): 1825–1831. (ZHAO Cheng-gang, LI Jian, LIU Yan, et al. Discussion on some fundamental problems in unsaturated soil mechanics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(7): 1825–1831. (in Chinese))
- [4] 孙德安. 非饱和土的水力和力学特性及其弹塑性描述[J]. *岩土力学*, 2009, **30**(11): 3217–3231. (SUN De-an. Hydro-mechanical behaviours of unsaturated soils and their elastoplastic modeling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(11): 3217–3231. (in Chinese))
- [5] KOZENY J. Über kapillareleitung des wassers im boden[J]. Akademie der Wissenschaften Wien. 1927, **136**(2A): 271–306. (KOZENY J. Capillary line of water in soils. [J]. Academy of Sciences, Vienna, 1927, **136**(2A): 271–306. (in Germany))
- [6] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1948.
- [7] LAMBE T W, WHITMAN S E. Soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1969.
- [8] BUCKINGHAM E. Studies on the movement of soil moisture[R]. United States: Department of Agriculture, Soil Bulletin 38, 1907.
- [9] CHILDS E C. The use of soil moisture characteristics in soil studies[J]. *Journal of Soil Science*, 1940, **50**(4): 60–64.
- [10] STAPLE W J, LEHANE J J. Movement of moisture in unsaturated soils[J]. *Canadian Agricultural Science Journal*, 1954, **34**: 329–342.
- [11] BARDEN L, PAVLAKIS G. Air and water permeability of compacted unsaturated cohesive soil[J]. *Journal of Soil Science*, 1971, **22**(3): 302–317.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] MITCHELL J K, HOOPER D R, CAMPANELLA R G. Permeability of compacted clay[J]. *Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1965, **91**(SM4): 41–65.
- [15] LALIBERTE G E, COREY A T, BROOKS R H. Properties of unsaturated porous media[R]. Fort Collins: Colorado State University, 1966.
- [16] LLORET A, ALONSO E E. Consolidation of unsaturated soils including swelling and collapse behavior[J]. *Géotechnique*, 1980, **30**(4): 449–477.
- [17] CHANG C S, DUNCAN J M. Consolidation analysis for partly saturated clay by using an elastic-plastic effective stress-strain model[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods Geomechanics*, 1983, **7**(1): 39–55.
- [18] HUANG S Y, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1998, **35**(3): 411–425.
- [19] 张雪东, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 土体密实状态对土–水特征曲线影响规律研究[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(5): 1469–1474. (ZHANG Xue-dong, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing, et al. Research on influence of soil density on soil-water characteristic curve[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(5): 1469–1474. (in Chinese))
- [20] 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. (ZHANG Xue-dong, ZHAO Cheng-gang, LIU Yan. Probability based model for influence of deformation on hydraulic conductivity function of unsaturated soils[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, **18**(1): 132–139. (in Chinese))
- [21] 胡 冉, 陈益峰, 周创兵. 基于孔隙分布的变形土土水特征曲线模型[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(8): 1451–1462. (HU Ran, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. A water retention curve model for deformable soils based on pore size Distribution[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*,

- 2013, **35**(8): 1451 – 1462. (in Chinese))
- [22] 胡冉, 陈益峰, 周创兵. 考虑变形效应的非饱和土相对渗透系数模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(6): 1279 – 1287. (HU Ran, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. A relative hydraulic conductivity model for unsaturated deformable soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(6): 1279 – 1287. (in Chinese))
- [23] CHILDS E C, COLLIS-GEORGE G N. The permeability of porous materials[J]. Proceedings of the Royal Society A, 1950, **201**(1066): 392 – 405.
- [24] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[R]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- [25] MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, **12**(3): 513 – 522.
- [26] AGUS S S, LEONG E C, SCHANZ T. Assessment of statistical models for indirect determination of permeability functions from soil-water characteristic curves[J]. Géotechnique, 2003, **53**(2): 279 – 282.
- [27] SHENG D C, ZHOU A N. Coupling hydraulic with mechanical models for unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **48**(5): 826 – 840.
- [28] 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.
- [29] LEONG E C, RAHARDJO H. Permeability functions for unsaturated soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(12): 1118 – 1126.
- [30] BURDINE N T. Relative permeability calculation from poresize distribution data[J]. Journal of Petroleum Technology, 1953, **5**(3): 71 – 78.
- [31] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 892 – 898.
- [32] LALIBERTE G E, COREY A T, BROOKS R H. Properties of unsaturated porous media[R]. Colorado: Colorado State University, 1966.

第八届港口工程技术交流大会暨第九届工程排水与加固技术研讨会

随着我国港口工程和水利工程的大规模建设, 越来越复杂的地质条件对设计、施工以及处理技术和工艺提出了更高的要求。为总结近年来我国港口、水利等重大工程以及工程排水与加固领域的难点问题和创新成果, 促进新理论、新技术、新材料和新工艺的推广与应用, 为广大科研、管理、设计、施工、检测以及监理工作者提供交流平台, 中国土木工程学会港口工程分会、工程排水与加固专业委员会, 定于 2014 年 5 月 23 日~25 日, 在江苏省连云港市联合召开第八届港口工程技术交流大会暨第九届工程排水与加固技术研讨会, 敬请港口工程和岩土工程领域的研究人员和高校师生参加。

主办单位: 中国土木工程学会港口工程分会; 中国土木工程学会港口工程分会工程排水与加固专业委员会。

承办单位: 连云港港口集团有限公司; 水利部; 交通运输部 国家能源局南京水利科学研究院。

会议议题: (1) 港口工程领域: 航道泥沙运动特性; 绿色、低碳港口生产与运营技术; 港口工程建设与维护; 人工岛设计与施工技术; 重大工程案例和港工技术发展探讨。

(2) 工程排水与加固领域: 软土工程特性与理论; 超软土地基处理及围堤填筑技术; 岩土工程设计与加固技术; 新型土工合成材料研制与应用; 地基处理新技术、新方法; 重大工程实录及关键技术。

会议议题: (1) 大会特邀报告: 龚晓南 (中国工程院院士), 滨海岩土工程若干问题思考。

(2) 大会主题报告 (待增补): 吴澎 (设计大师), 离岸深水港建设关键技术与工程应用; 卢永昌 (设计大师), 港珠澳大桥隧道基础复合地基设计介绍; 程泽坤 (设计大师), 淤泥质海岸桶式基础结构设计理论及应用; 吕卫清, 港珠澳大桥建设关键技术; 沈雪松, 连云港深水港建设科技攻关; 陆永军, 围填海工程与河口海岸滩涂开发利用研究进展; 董志良, 面积超软弱土处理新技术与新进展; 娄炎, 排水板的应用与发展; 刘松玉, 气压劈裂真空排水预压法及多功能 CPTU 测试技术; 刘国楠, 地下室控制泄排水抗浮技术; 刘爱民, 超软黏土工程特性及地基处理技术; 王仙美, 江苏沿海建港关键条件。

会务联系: ①会议注册联系人及电话, 耿之周 (排水与加固学会), 025-85829563 (传真), 15850597239, 李海岗 (连云港港口集团), 0518-82386879, 82382906 (传真), 15961381089; ②厂商展览联系人及电话, 郑澄锋, 025-82389513, 82389517, 13851747826; ③港口工程分会联系人, 刘樱, 010-84199092, 13683519957, 地址: 北京市国子监 28 号中交水运规划设计院 (100007); ④工程排水与加固专委会联系人, 关云飞, 13770938628, 地址: 南京市虎踞关 34 号南京水科院岩土工程研究所 (210024); ⑤会议邮箱: PSJG2014@163.com。

(大会组委会 供稿)