

· 地基与基础 ·



基于土-水特征曲线试验的非饱和土强度预测*

贾升安^{1,2}, 李春阳^{1,2}, 黄海峰³, 林智勇⁴

(1. 青海省水文地质及地热地质重点实验室, 青海 西宁 810008;

2. 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 青海 西宁 810008;

3. 四川成绵苍巴高速公路有限责任公司成都分公司, 四川 成都 641400;

4. 福建工程学院, 岩土工程研究所, 福建 福州 350118)

摘要: 港口地基土多为非饱和土, 不同基质吸力下的土体强度特性各异, 难以准确预测。以福建某港口地基工程非饱和粉质黏土为研究对象, 开展土-水特征曲线(SWCC)试验、饱和及非饱和三轴压缩试验。依据土水特征曲线中AB段近线性特征, 假设体积含水量与基质吸力对数值 $\lg(u_a - u_w)$ 线性相关, 以A、B点数据作为已知条件, 建立 $\lg(u_a - u_w)$ 与相对饱和度 S_e 的联系, 基于Vanapalli强度预测模型, 构建新的非饱和土强度预测模型, 并给出参数求解方法。引用相关文献中非饱和有机质粉土和膨胀土试验数据, 利用新建预测模型对3种非饱和土的强度进行预测, 并与传统预测方法进行对比。结果表明, 新建预测模型的强度辨识效果较好, 对非饱和粉质黏土、有机质黏土和膨胀土的强度预测具有一定的可行性和适用性。

关键词: 港口地基工程; 非饱和土; 土-水特征曲线(SWCC); 基质吸力; 强度预测

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0225-07

Strength prediction of unsaturated soil based on SWCC test

JIA Sheng-an^{1,2}, LI Chun-yang^{1,2}, HUANG Hai-feng³, LIN Zhi-yong⁴

(1. Qinghai Key Laboratory of Hydrogeology and Geothermal Geology, Xining 810008, China;

2. Qinghai Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Environmental Geology, Xining 810008, China;

3. Chengdu Branch of Sichuan Chengmian Cangba Expressway Co., Ltd., Chengdu 641400, China;

4. Institute of Geotechnical Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The foundation soil of port is mostly unsaturated soil. The strength characteristics of soil under different matrix suction are different and difficult to predict accurately. Taking unsaturated silty clay of a port foundation project in Fujian Province as the research object, we carry out soil-water characteristic curve test, saturated and unsaturated triaxial compression test. According to the near linear characteristics of section AB in the soil-water characteristic curve, we assume that the volume water content is linearly related to the matrix suction pair value, take the data of points A and B as the known conditions, and establish the relationship between matrix suction logarithm and relative saturation S_e . Based on the Vanapalli strength prediction model, we construct a new unsaturated soil strength prediction model, give the parameter solution method, and predict the strengths of three kinds of unsaturated soils by the new prediction model based on the test data of unsaturated organic matter silt and expansive soil in relevant literature, which is compared with the traditional prediction method. The results show that the strength identification effect of the new prediction model is good, and it is feasible and applicable to the strength prediction of unsaturated silty clay, organic clay and expansive soil.

Keywords: port foundation engineering; unsaturated soil; soil-water characteristic curve (SWCC); matrix suction; strength prediction

收稿日期: 2022-03-21

*基金项目: 福建省自然科学基金项目(2018J01626); 福建工程学院科研启动基金项目(GY-Z160063)

作者简介: 贾升安(1989—), 男, 工程师, 从事港口工程及水工环地质方面的研究。

港口地基土多为非饱和土，非饱和土为固液气三相体系，土体内部结构复杂，土体强度与基质吸力密切关联^[1]。非饱和土强度特性是土力学中的核心内容，建立普适性强的非饱和土强度预测方法具有十分重要的价值^[2]。

现对非饱和土强度预测已有较多的研究成果，如 Bishop 等^[3]最早基于非饱和有效应力原理，建立强度预测方法，Schrefler^[4]、Lamborn^[5]、Aubeny 等^[6]进行了改进，张俊然等^[7]在此基础上，将微观饱和度 S_m 引入强度计算中，得到新的预测方法。Fredlund 等^[8]最先基于双应力状态变量理论，将净轴向应力 $(\sigma - u_a)$ 和基质吸力 $(u_a - u_w)$ 同时作为状态变量，提出强度预测方法，Vanapalli 等^[9]在此基础上对相对饱和度进行改进，Garven 等^[10]建议以塑性指数替代 $\tan \varphi'$ (φ' 为饱和状态下土体的内摩擦角)，Wang 等^[11]在 Fredlund 等的研究基础上，采用颗粒级配进行修正。

本文结合福建某港口基础工程，以基坑内非饱和黏性地基土为研究对象，开展土水特征曲线试验、饱和及非饱和三轴压缩试验。结合前人研究，基于 Vanapalli 强度预测模型，构建新的非饱和土强度预测模型，并给出参数求解方法，可为非饱和地基土的强度预测及港口地基稳定性研究提供参考。

1 土-水特征曲线

土-水特征曲线(SWCC)是体现土体含水量(或饱和度)与吸力之间的关系曲线。SWCC 包含脱湿和吸湿两部分曲线，这两部分曲线共同组成了一个滞回环，在脱湿过程中，随着吸力增加，孔隙水排出，大孔隙先于小孔隙排水，大孔隙中排水速率高于小孔隙，对小孔隙形成气压，达到水-气平衡交界。而吸湿过程中，水首先缓慢渗入小孔隙，填满小孔隙后再流入大孔隙，这说明同一基质吸力对应多个含水量。本文讨论非饱和土脱湿问题，SWCC 如图 1 所示。其中 θ 、 θ_r 、 θ_s 分别为体积、残余、饱和含水量； $(u_a - u_w)$ 为基质吸力； A 点为进气值，所对应横、纵坐标值分别为 $(u_a - u_w)_b$ 、 θ_s ；

B 点为残余含水率，所对应横、纵坐标值分别为 $(u_a - u_w)_r$ 、 θ_r 。当 θ 达到 A 点时，土体内开始进气；当 θ 增至 B 点时， θ 的小范围变化会引起 $(u_a - u_w)$ 的较大范围波动，这是由于土体内含水量被压缩到近乎极限的程度，由此 A 、 B 特征点也是非饱和土理论中的研究重点^[12]。

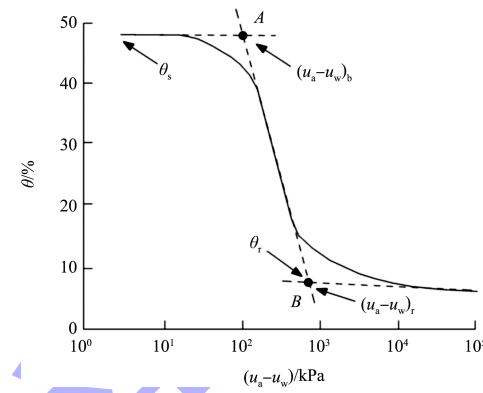


图 1 SWCC

针对 SWCC 的模拟，目前已有较多模型，其中 van Genuchten^[13] 和 Fredlund 等^[14] 提出的模型较经典，分别为式(1)(2)：

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{u_a - u_w}{a} \right)^b \right]^f} \quad (1)$$

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{u_a - u_w}{a} \right)^b \right] \right\}^f} \quad (2)$$

式中： a 、 b 和 f 为相关参数。

2 非饱和土强度预测

2.1 基于非饱和有效应力原理的强度预测

当土体由饱和状态向非饱和转化时，基质吸力的增加促进土体抗剪强度增大，而基质吸力随着含水量的不同而发生变化，因此可知非饱和土抗剪强度与 SWCC 之间蕴含某种关联。目前非饱和土强度计算主要有两种思路，即基于非饱和有效应力原理和基于双应力状态变量理论。

Bishop 最早提出基于非饱和有效应力原理计算抗剪强度的思路，建立的计算公式为：

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi' \quad (3)$$

式中： τ_f 为非饱和土抗剪强度； c' 、 φ' 分别为土体

饱和状态下的黏聚力、内摩擦角; σ 为法向应力; u_w 为孔隙水压力; u_a 为孔隙气压力; χ 为与非饱和程度有关的参数。

Schreflerl、Lamborn 在 Bishop 的基础上, 分别采用饱和度 S_r 、含水率 θ 替代 χ , 为:

$$\begin{cases} \tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + S_r(u_a - u_w)] \tan\varphi' \\ \tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \theta(u_a - u_w)] \tan\varphi' \end{cases} \quad (4)$$

Aubeny 等假设 χ 受 θ 和 S_r 共同影响, 提出:

$$\tau_f = \begin{cases} c' + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)/\theta] \tan\varphi' & (S_r = 100\%) \\ \left\{ (\sigma - u_a) + \left[1 + \frac{S_r - 85}{15}(1/\theta - 1) \right] (u_a - u_w) \right\} \cdot \tan\varphi' + c' & (85\% < S_r < 100\%) \\ c' + [(\sigma - u_a) + (u_a - u_w)] \tan\varphi' & (S_r \leq 85\%) \end{cases} \quad (5)$$

张俊然将微观饱和度 S_{rm} 引入到强度计算中, 得到:

$$\tau_f = c' + \left[(\sigma - u_a) + \frac{S_r - S_{rm}}{1 - S_{rm}} (u_a - u_w) \right] \tan\varphi' \quad (6)$$

式(4)~(6)皆是基于式(3)改良而来, 对 χ 有更深刻的理解和定义, 得到新的计算方法。

2.2 基于双应力状态变量理论的强度预测

随着研究的深入, Fredlund 等最早提出双应力状态变量理论, 该理论假设 $(u_a - u_w)$ 等同于外部荷载, $(u_a - u_w)$ 与外部荷载同属状态变量, 故将 $(\sigma - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 同时作为状态变量, 由此预测土体抗剪强度, 计算公式为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan\varphi' + (u_a - u_w) \tan\varphi_b \quad (7)$$

式中: φ_b 为受吸力控制的内摩擦角。

Vanapalli 等在式(7)的基础上进行改进:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan\varphi' + \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) (u_a - u_w) \tan\varphi' \quad (8)$$

Garven 等建议以塑性指数 I_p 修正含水率, 则有:

$$\begin{cases} \tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan\varphi' + \theta^{f(I_p)} (u_a - u_w) \tan\varphi' \\ f(I_p) = -0.0016I_p^2 + 0.0975I_p + 1 \end{cases} \quad (9)$$

Wang 等在式(7)的基础上采用颗粒级配修正 φ_b , 得到:

$$\tau_f = \left\{ 1 + \left[\frac{d_{60}(u_a - u_w)}{\gamma C_2} \right]^{\frac{C_1}{\lg C_u} + 1} \right\}^{\frac{-C_1}{C_1 + \lg C_u}} \cdot (u_a - u_w) \tan\varphi' + (\sigma - u_a) \tan\varphi' \quad (10)$$

式中: C_u 为不均匀系数; C_1 为参数, 近似取 1.07; C_2 为参数, 近似取 12.07; d_{60} 为过筛质量占 60% 的粒径; γ 为水表面张力。

式(8)~(10)皆是基于式(7)改良而来, 对 φ_b 进行修正和完善, 丰富了非饱和土强度预测计算范畴。

2.3 新的非饱和土抗剪强度预测方法

式(3)(7)是目前非饱和土抗剪强度预测的基础, 但 χ 和 φ_b 均存在无法通过试验确定的缺陷; 式(4)(8)结构较简单, 计算参数可通过试验确定, 但存在误差可能较大的问题^[15]; 式(6)中微观饱和度 S_{rm} 难以精确得到; 式(5)(9)(10)结构形式复杂、参数众多、计算繁琐, 不便于指导工程实践, 由此新的非饱和土强度预测方法的建立应同时兼顾精度高和便于应用的特点。

式(3)~(10)均与 SWCC 密切关联, 参考图 1 可理解, 当 $(u_a - u_w) < (u_a - u_w)_b$ 时, 土体近似为固液两相状态; 当 $(u_a - u_w) > (u_a - u_w)_r$ 时, 土体内水分大幅缩减, 可看作固气两相状态。非饱和土是固液气三相体系, 三相同时存在是土体最常见也是最复杂的状态, 故 SWCC 的重点为 $(u_a - u_w)_b$ 和 $(u_a - u_w)_r$, 即 AB 段。由于 AB 段在半对数坐标中为近直线段, θ 与 $\lg(u_a - u_w)$ 近线性相关, 故将其表示为:

$$\theta = m \lg(u_a - u_w) + n \quad (11)$$

式中: m 为 AB 段斜率; n 为 AB 段截距。

当 A、B 点数据代入式(11)可得:

$$\begin{cases} \theta_s = m \lg(u_a - u_w)_b + n \\ \theta_r = m \lg(u_a - u_w)_r + n \end{cases} \quad (12)$$

联立式(11)(12)可得:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = M \lg(u_a - u_w) + N \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} M = \frac{1}{\lg(u_a - u_w)_b - \lg(u_a - u_w)_r} \\ N = \frac{\lg(u_a - u_w)_r}{\lg(u_a - u_w)_r - \lg(u_a - u_w)_b} \end{cases} \quad (14)$$

变形式(13)可得：

$$\lg(u_a - u_w) = \frac{1}{M} \cdot \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} - \frac{N}{M} \quad (15)$$

以 Vanapalli 等的研究为基础，将式(15)代入式(8)可得：

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + S_e (10^{\frac{S_e - N}{M - M}}) \tan \varphi' \quad (16)$$

其中：

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (17)$$

式中： S_e 为相对饱和度。

式(16)即为本文新建非饱和土强度预测方法，该式与式(3)~(10)不同之处在于，该式主要依赖 A、B 特征点、式中无 $(u_a - u_w)$ 项、与 θ 直接相关，仅开展 SWCC 试验及饱和土力学试验，得到 c' 、 φ' 、 $(u_a - u_w)_b$ 、 $(u_a - u_w)_r$ 、 θ_r 和 θ_s 即可确定非饱和土 τ_f 。

3 非饱和土强度预测

3.1 SWCC 试验

本文结合福建某港口地基工程，取粉质黏土作为试验对象，所取土样级配曲线如图 2 所示，其基本物理参数为：相对密度 2.67，天然密度 1.71 t/m³，天然含水率 12.4%，孔隙比 0.45，液限 31.6%，塑限 14.3%。

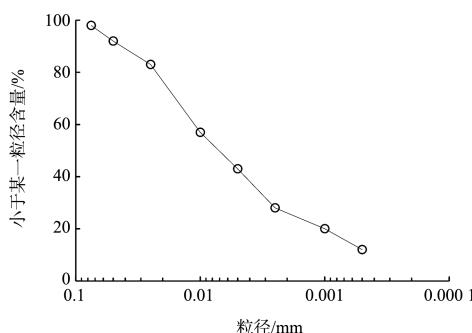


图 2 级配曲线

采用 GCTS 土-水特征曲线压力仪进行 SWCC 试验，得到粉质黏土的 SWCC，如图 3 所示。本文仅对脱湿曲线进行讨论。

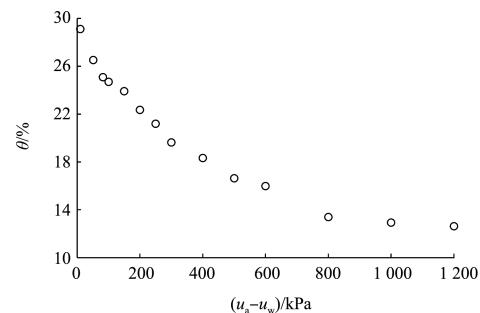


图 3 粉质黏土 SWCC

根据图 3 取 θ_s 为 29.1%，图 3 中的横轴为非对数坐标，利用式(1)拟合 SWCC，得到拟合曲线，并将横轴转化为对数坐标，如图 4 所示，由于图 3 中 $(u_a - u_w)$ 试验范围为 0~1 200 kPa，图 4 拟合时对 $(u_a - u_w)$ 范围拓展到 0.1~10 000 kPa。

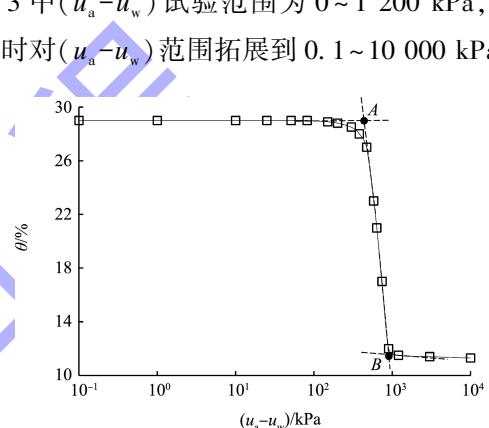


图 4 粉质黏土 SWCC 拟合修正结果

根据图 4 提取 SWCC 特征点 A、B，其中 $(u_a - u_w)_b$ 和 $(u_a - u_w)_r$ 分别为 367 和 952 kPa， θ_s 和 θ_r 分别为 29.1% 和 11.7%，由此得到式(14)中 M 和 N 分别为 -2.416 和 7.195，式(1)中的拟合参数 a 、 b 、 f 分别为 0.002、0.952 和 -0.758。

3.2 饱和及非饱和粉质黏土三轴压缩试验

以 29.1% 的含水率制备饱和土样，采用非饱和土三轴仪进行固结不排水三轴压缩试验，围压设为 100~400 kPa，饱和土三轴试验结果如图 5 所示。可以看出，饱和土的 c' 和 φ' 分别为 32.6 kPa 和 13.8°，这些参数将用于非饱和土强度预测。

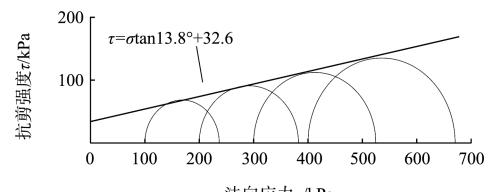


图 5 饱和土三轴试验结果

为验证式(16)的可行性和准确性, 比较非饱和土强度预测效果, 开展非饱和土固结不排水三轴压缩试验, 基质吸力($u_a - u_w$)和净径向围压($\sigma_3 - u_a$)由试验控制, 以($\sigma_3 - u_a$)为不同工况, 开展不同($u_a - u_w$)下的非饱和粉质黏土三轴压缩试验, 试验方案及强度参数见表 1。

表 1 非饱和粉质黏土试验方案及强度参数

试样编号	$(\sigma_3 - u_a)/kPa$	$(u_a - u_w)/kPa$	$(\sigma - u_a)/kPa$	τ_f/kPa
A-1		0	106.5	74.3
A-2		100	105.7	100.6
A-3	50	200	118.3	126.4
A-4		500	134.2	163.5
A-5		1 000	187.9	221.8
B-1		0	167.8	106.2
B-2		100	166.2	121.3
B-3	100	200	178.5	186.4
B-4		500	197.0	222.6
B-5		1 000	246.9	294.8

3.3 非饱和粉质黏土强度预测

θ 与($u_a - u_w$)通过图 4 进行转换, θ_r 和 θ_s 已确定, 根据式(17)可得到 S_e 。将 c' 、 φ' 、 S_e 、 M 、 N 和($\sigma - u_a$)代入式(16), 得到不同($\sigma_3 - u_a$)下的 $\tau_f - (u_a - u_w)$ 预测曲线, 同时将式(8)预测结果与之对比, 如图 6 所示。

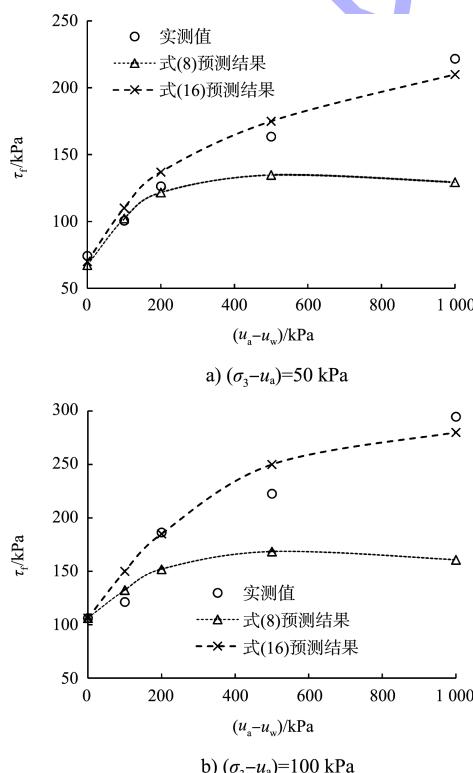


图 6 $\tau_f - (u_a - u_w)$ 预测曲线

由图 6 可知, 式(16)对于非饱和粉质黏土抗剪强度的预测效果较好, 决定系数 R^2 为 0.973 6, 能较为准确描述非饱和粉质黏土在不同($u_a - u_w$)下的剪切力学特性。式(8)对非饱和粉质黏土强度预测的 R^2 平均值为 0.732 6, 对于该土体($u_a - u_w$)在 0~200 kPa 范围内的预测能力相对较好, R^2 平均值为 0.942 7, 但对于($u_a - u_w$)超出 200 kPa 的范围预测效果差, R^2 平均值仅有 0.650 8, 由此说明式(8)难以准确描述非饱和粉质黏土的强度特性。

3.4 新的强度预测方法的适用性

为验证新强度预测方法对其他类型非饱和土的适用性, 引用文献[16]中有机质粉土及文献[17]中膨胀土相关数据, 通过式(1)拟合修正 SWCC, 其结果如图 7 所示。

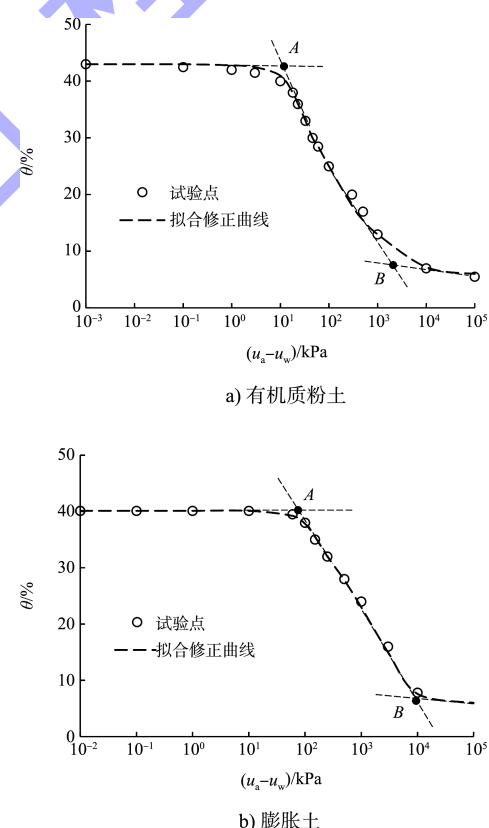


图 7 SWCC 拟合修正结果

在图 7 中, 提取有机质粉土和膨胀土的 A、B 特征点, 确定($u_a - u_w$)_b、($u_a - u_w$)_r、 θ_r 和 θ_s , 从而得到 S_e 、 M 、 N 。通过式(8)(16)预测两种类型非饱和土的强度, 得到 $\tau_f - (u_a - u_w)$ 预测曲线, 如图 8 所示。

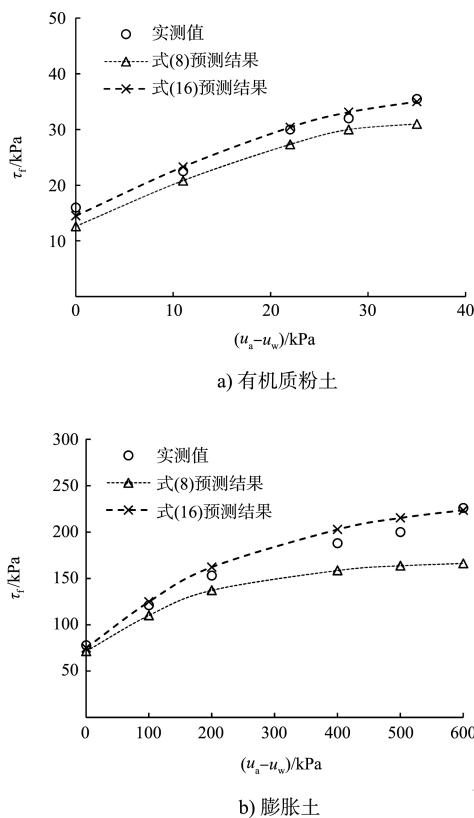


图 8 两种类型非饱和土的 $\tau_f - (u_a - u_w)$ 预测曲线

图 8 中, 式(16)对有机质粉土和膨胀土强度预测的 R^2 平均值分别为 0.992 5 和 0.986 3, 能较为准确地描述这两种非饱和土的强度特性。而式(8)对两种土强度预测的 R^2 平均值分别为 0.965 2 和 0.844 3, 预测值低于实测值, 预测效果相对较差。

综合粉质黏土、有机质黏土和膨胀土的强度预测结果, 发现式(8)在 0~200 kPa 的 $(u_a - u_w)$ 范围内, 强度预测能力尚可, 但当 $(u_a - u_w)$ 超过 200 kPa 时, 强度预测的误差较大。总体而言, 式(8)的强度预测值总是低于实测值, 在工程实践中采用式(8)预测非饱和土强度得到的参考值低于实际, 偏于危险, 而式(16)对于 3 种土体非饱和强度均有较好的辨识效果, 且该公式相对简单、参数易得, 针对非饱和土具备一定的可行性和适用性, 但由于非饱和土还有黄土、泥炭土等较多土体类型, 本文所建预测模型对其他类型非饱和土的适用性待进一步研究。

4 结语

1) 依据非饱和土 SWCC 中 AB 段按近线性特征, 假设体积含水量 θ 与基质吸力对数值 $\lg(u_a - u_w)$ 线性相关, 以 A、B 点数据作为已知条件, 建立 $\lg(u_a - u_w)$ 与相对饱和度 S_e 的联系。基于 Vanapalli 强度预测模型, 构建新的非饱和土强度预测方法。

2) 采用 van Genuchten 模型对粉质黏土、有机质黏土和膨胀土 SWCC 进行拟合修正, 拟合效果较好, 从中提取 A、B 特征点, 获得强度预测所需参数。

3) 本文开展饱和及非饱和粉质黏土三轴压缩试验, 其中饱和土三轴试验用于获得计算参数 c' 和 φ' , 非饱和土三轴试验用于得到不同 $(u_a - u_w)$ 下的强度值, 与本文新的强度预测方法得到的预测值进行对比。结果表明, 新方法的预测能力较强, 能较好地辨识非饱和粉质黏土强度特性。

4) 引用相关文献中非饱和有机质粉土和膨胀土试验数据, 通过本文预测方法判断强度值。综合 3 种类型土的预测结果可知, 传统 Vanapalli 强度模型对 0~200 kPa 基质吸力范围的强度预测尚可, 超过 200 kPa 后预测效果较差, 新的强度预测方法的辨识能力总体较好, 对非饱和粉质黏土、有机质黏土和膨胀土的强度预测具有一定的可行性和适用性。

参考文献:

- [1] 谢定义. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [2] 梁文鹏, 吴家琦, 谭晔, 等. 基于土水特征曲线的非饱和土强度预测[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(4): 333-338.
- [3] BISHOP A W, BLIGHT G E. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils[J]. Géotechnique, 1963, 13(3): 177-197.
- [4] SCHREFLER B A. The finite element method in soil consolidation: with applications to surface sub-sidence [D]. Swansea: Swansea University, 1984.

- [5] LAMBORN M J. A micromechanical approach to modelling partly saturated soils[D]. Austin: Texas A&M University, 1986.
- [6] AUBENY C, LYTTON R. Estimating strength versus location and time in high plasticity clays: FHWA/TX-03/2100-P1[R]. Austin: Texas Transportation Institute, 2003.
- [7] 张俊然, 孙德安, 姜彤, 等. 宽广吸力范围内弱膨胀土的抗剪强度及其预测[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 1064-1070.
- [8] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley-Interscience, 1993.
- [9] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction [J]. Canadian geotechnical journal, 1996, 33(3): 379-392.
- [10] GARVEN E A, VANAPALL S K. Evaluation of empirical procedures for predicting the shear strength of unsaturated soils[C]//ASCE. Proceedings of the 4th International Conference on Unsaturated Soils. Reston: ASCE, 2006: 2570-2581.
- [11] WANG J P, HU N, FRANCOIS B, et al. Estimating water retention curves and strength properties of unsaturated sandy soils from basic soil gradation parameters[J]. Water resources research, 2017, 53(7): 6069-6088.
- [12] 何彬. 基于非饱和土理论的改良膨胀土强度特性试验研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [13] 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.
- [14] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian geotechnical Journal, 1994, 31(4): 521-532.
- [15] AQTASH U A, BANDINI P. Prediction of unsaturated shear strength of an adobe soil from the soil-water characteristic curve[J]. Construction & building materials, 2015, 98: 892-899.
- [16] 孙树林, 王利丰. 饱和、非饱和有机质粉土抗剪强度的对比[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1932-1935.
- [17] 周葆春, 孔令伟, 陈伟, 等. 荆门膨胀土土-水特征曲线特征参数分析与非饱和抗剪强度预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1052-1059.

(本文编辑 王璁)

(上接第 214 页)

3) 仿真模型和实证结果表明, 在一定条件下, 通过仿真技术能为类似散装水泥码头装卸系统配置提供切实可行的参考方法。但散装水泥码头实际生产作业的运作流程更加复杂, 仿真模型未将所有的影响因素都考虑在内, 在未来研究中可进一步完善仿真模型, 考虑如筒仓选址、设备故障等因素对仿真结果的影响。

参考文献:

- [1] 李云军. 封闭式堆场煤炭码头物流系统建模与分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [2] 孟亚好, 张立斌, 褚广强. 散粮码头筒仓配置选型与优化[J]. 水运工程, 2014(8): 92-96.

- [3] 刘力卓, 王丹. 煤炭筒仓出仓模型仿真研究[J]. 物流工程与管理, 2016, 38(3): 128-129, 92.
- [4] 艾弯, 熊少飞. 筒仓煤炭码头装卸系统可靠性研究[J]. 港口装卸, 2016(2): 36-38.
- [5] 彭兴文. 散装水泥码头装卸工艺及筒仓选型研究[J]. 中国水运, 2020(8): 118-119.
- [6] 郑世武. 天津临港水泥中转库装卸工艺布局及筒仓选型[J]. 工程技术研究, 2020, 5(18): 13-14.
- [7] 中交第二航务工程勘测设计院有限公司. 河港总体设计规范: JTS 166—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [8] 张小亚. 港口散货矿石码头物流系统的仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.

(本文编辑 王传瑜)