

DOI: 10.11779/CJGE20220112

双孔隙结构重塑非饱和膨胀土的抗剪强度特性

钱建固^{1,2}, 林志强^{1,2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对具有双孔隙结构(即集聚体间和集聚体内孔隙)及双峰持水曲线的内乡膨胀土压实样, 进行了一系列宽广吸力范围内非饱和土三轴剪切试验及峰值强度演化规律的研究。试验结果表明: 在净应力相同的条件下, 中低吸力下的应力应变关系为应变硬化, 伴随明显的剪缩变形; 高吸力下为峰值后软化, 在经历了 1%~3%的体积收缩变形之后开始出现剪胀。试样的脆性随吸力的增加而增长, 在中低吸力下呈桶形或中心鼓形的延性破坏模式, 在高吸力下发生应变局部化现象, 伴随着明显的剪切带出现。此外, 脆性增加了峰后软化的幅度, 表现为峰值偏应力与残余破坏状态之间的差值增大。基于区分毛细和吸附作用的双峰持水曲线(SWRC)模型, 针对内乡膨胀土与其它具有双孔隙结构及双峰 SWRC 的土体在毛细吸应力空间进行了峰值强度分析, 将吸力从孔隙应力尺度乘以毛细饱和度变为骨架应力尺度时, 其呈现的强度包络线为双折线特征。理论分析表明, 低吸力范围内, 双孔隙结构非饱和土的抗剪强度由饱和强度与毛细吸应力贡献; 高吸力范围内, 抗剪强度应由饱和强度、毛细吸应力与胶结作用提供。

关键词: 非饱和土; 双孔隙结构; 土体持水曲线; 抗剪强度; 毛细; 胶结

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)03-0486-09

作者简介: 钱建固(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土力学方面的研究。E-mail: qianjiangu@tongji.edu.cn。

Shear strength behaviors of unsaturated expansive soils with dual-porosity structure

QIAN Jiangu^{1,2}, LIN Zhiqiang^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A comprehensive set of experimental tests over a wide suction range and mechanism analysis are carried out to study the shear strength of Neixiang expansive soil with dual-porosity structure and bimodal soil-water retention curve (SWRC). Under the low and medium suction range, all the deviator stress versus strain curves show the strain-hardening behaviors with the shear contraction. Under the high suction range, the deviator stress versus strain curves show the post-peak strain softening stress-strain responses and the initial contraction of 1%~3% followed by the shear dilation. The specimens become stiffer with the increase of suction, and show a ductile failure mode with barrel shape or bulging at center under the low to medium suction ranges and strain localization with sliding surface under the high suction ranges. Also, the brittleness increases the amplitude of the post-peak softening, which is consistent with the increase of the difference between the magnitude of peak and the residual shear strength. Based on the bimodal SWRC considering capillarity and adsorption, the shear strength is analyzed and investigated in the capillary suction stress space for the soils with dual-porosity structure and bimodal SWRC. It is concluded that the strength shows the bi-linear characteristics if the capillary saturation has been used to upscale the suction from pore-scale stress to macroscopic one. The theoretical studies show that for the soils with double-porosity structure, the capillary suction stress under the low suction range can better characterize the macroscopic effective stress transferred between skeletons. The peak shear strength under the high suction range is provided by capillarity and closely related to the intra-aggregate cementation.

Key words: unsaturated soil; dual-porosity structure; soil-water retention curve; shear strength; capillarity; cementation

0 引言

非饱和土在世界各地的工程实践中均有涉及, 土体的抗剪强度随含水率或吸力的变化对岩土结构的稳定性至关重要^[1-3]。基质吸力与含水率或者饱和度之间

的关系被称之为土水特征曲线(soil-water characteristic

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877252)

收稿日期: 2022-01-24

curve, SWCC) 或者土体持水曲线 (soil-water retention curve, SWRC)。SWRC 是体现非饱和土力学本构关系特征的重要响应曲线, 其对土体的非饱和抗剪强度有显著影响^[4-7]。

不同非饱和土的微观测试分析表明^[8], SWRC 受到孔径分布特征的影响, 大致可区分为单峰 SWRC 和双峰 SWRC。Cai 等^[9]针对桂林红黏土联合轴平移技术、滤纸法和盐溶液蒸汽平衡法进行了宽广吸力范围内的持水特性试验, 结果表明压实样呈现双孔隙结构, 并具有双峰 SWRC, 而预固结试样呈现单一孔隙和单峰 SWRC。Satyanaga 等^[10]针对砂土和高岭土的混合物进行了一系列水力特性的测定试验, 指出具有双孔隙结构的土体不一定呈现双峰 SWRC, 但双峰 SWRC 出现的必要条件是具备双孔隙结构。已有数据表明间断级配土体、粗砂-砾石混合物以及压实黏土等易呈现双峰 SWRC。

过往的大量试验研究了抗剪强度随吸力的演化规律, 其中土样普遍为具有单一孔径结构或单峰 SWRC 的土体。如张俊然等^[11]利用轴平移技术和盐溶液蒸汽平衡法对吸力范围在 38 MPa 内的南阳膨胀土进行了一系列常吸力三轴剪切试验, 分析了峰值抗剪强度的演化规律并提出了预测模型; 张季如等^[12]对不同应力路径下钙质砂抗剪强度进行了试验研究与机理分析; 徐筱等^[13]对高吸力下黏性土的抗剪强度进行了三轴试验研究; Gao 等^[14-15]研究了不同制样方法和不同初始干密度对非饱和土应力应变关系的影响。试验结果和理论分析表明吸力和强度之间往往呈现非线性关系^[4, 16-17]。对于粗粒土, 利用 SWRC 将吸力乘以饱和度, 孔隙应力扩为宏观应力时, 强度包络线呈现直线特征, 这是因为此时的宏观应力是有效应力的一部分。对于细粒土, 毛细部分对剪切强度起主导作用^[6-7, 16, 18-19], 故而吸力乘以毛细饱和度才是骨架应力, 或者有效应力的一部分。已有大量研究表明, 结合上述有效应力, 极限剪应力的临界状态线可以由唯一的强度包络线表征, 即存在一组适用于饱和与非饱和状态的相同强度参数^[5-7, 20]。以上结论仅在具有单峰 SWRC 的土体中得到过验证。

近期对于具有双孔隙结构, 特别是具有双峰 SWRC 土体力学特性的相关试验在陆续开展。Zhao 等^[21]对间断级配粗粒土进行了低吸力段的三轴试验, 并将其应力应变行为分为 4 个阶段; Ng 等^[22]对具有双峰 SWRC 的压实黄土试样进行了一系列控制吸力的直剪试验。但上述土体的吸力-强度特性和具有单峰 SWRC 的土体能否统一还未有相关研究。

本文研究对象为同时具有双孔隙结构及双峰 SWRC 的土体 (不仅限于压实膨胀土)。联合轴平移

技术和盐溶液蒸汽平衡法在宽广吸力范围内对内乡膨胀土压实样进行了一系列的非饱和三轴剪切试验, 探讨不同吸力对土体应力-应变行为及抗剪强度的影响特性。采用双峰 SWRC 模型区别毛细和吸附的影响效应, 进而在毛细吸力空间 (毛细饱和度乘以吸力) 分析土体的非饱和峰值抗剪强度, 并利用双孔隙结构土体水力特性试验成果对峰值强度分析方法作评价与验证。

1 试验概述

1.1 试验材料

本试验选用膨胀土取自河南内乡县张岗村以西 200 m 处, 是内乡 220 KV 变电站拟选站址, 取土深度为地下 5 m 范围, 天然干密度为 1.69 g/cm³, 天然含水率为 22.74%。经过 X 射线衍射分析, 内乡膨胀土的主要矿物成分为石英、黏土矿物, 其次为斜长石和微斜长石。砂粒的含量为 9.97%, 粉粒含量为 56.77%, 黏粒含量为 33.26%。粒径大于 0.075 mm 的颗粒质量为总质量的 9.97%, 小于 50%, 按照土的工程分类标准可判断该土样为细粒土, 其它物理特性指标可见表 1。内乡膨胀土颗粒分布曲线如图 1 所示, 根据颗粒分布曲线及塑性指数, 可知其为低液限黏土 (CL)。

表 1 内乡膨胀土基本物理指标

Table 1 Index properties of Neixiang expansive soil

| 颗粒相对质量密度 | 液限/% | 塑限/% | 最大干密度/(g·cm ⁻³) | 最优含水率/% | 自由膨胀率/% |
|----------|------|------|-----------------------------|---------|---------|
| 2.74 | 45.1 | 25.3 | 1.70 | 21.2 | 59 |

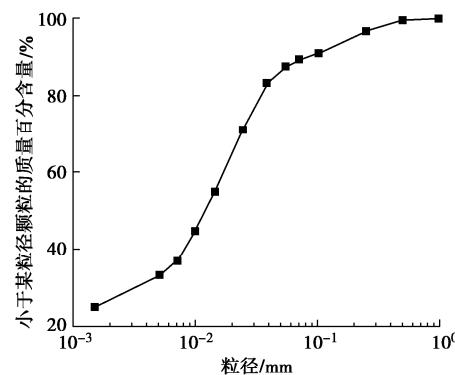


图 1 内乡膨胀土的颗粒分布曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of Neixiang expansive soil

1.2 孔隙分布与持水特性

较早开展的压汞试验表明^[23], 内乡膨胀土的重塑预固结试样具有单峰孔隙分布; 与之不同的是, 重塑压实样的微观结构为双孔隙结构, 由集聚体间的大孔隙和集聚体内的小孔隙组成 (如图 2 (a))。联合轴平移技术 (0~200 kPa)、滤纸法 (200~8 MPa) 和饱和盐溶液蒸汽平衡法 (3.29~198.14 MPa) 进行了宽广

吸力范围的持水特性试验^[23]。结果显示, 预固结样的持水曲线呈现单峰形态。压实样具有双峰持水曲线, 即由两段斜率陡峭的曲线组成(双“S”分布), 呈对数坐标下的两段半正态分布形式, 中间有明显过渡区或者平台段。同时曲线上包括两个进气值 AEV_1 和 AEV_2 (分别对应空气进入到集聚体间和集聚体内孔隙时的孔隙气压力) 以及两个残余饱和度 R_1 和 R_2 (如图 2 (b))。本文进行三轴试验的试样为内乡膨胀土压实样, 具有双孔隙结构和双峰持水曲线。

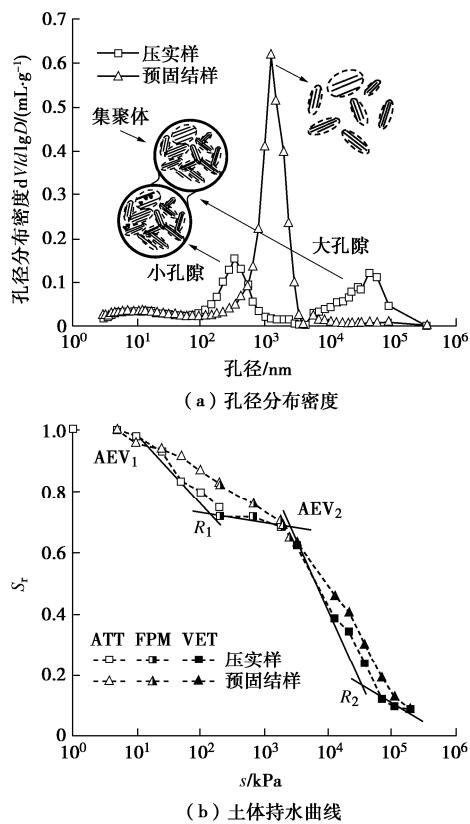


图 2 重塑压实样和重塑预固结样的孔径分布密度和持水曲线

Fig. 2 PSDs and SWRCs of compacted and reconstituted specimens

1.3 非饱和三轴试验方法

将自然风干土通过碎土机打碎, 过 2 mm 筛, 配制目标含水率为 24% 的湿土, 放入密闭容器中静置两周待水分均匀后取用。试验采用击实法在三开模中制样, 分为 6 层击实以保证均匀性, 每一层通过 175 g 的落锤从 300 mm 的高度落下。试样直径 38 mm, 高 76 mm, 并控制其初始干密度为 1.40 g/cm³。

三轴试验采用 HKUST 双压力室的 GDS UNSAT 非饱和土三轴仪进行(如图 3), 其压力室的底座嵌着进气值为 500 kPa 的陶土板。差压传感器 (DPT) 和 HKUST 双压力室 (double-cell) 系统量测非饱和土试样的体积变化。试验前进行标定, 以消除非饱和土三轴试验系统中体变量测的系统误差。

为了实现全吸力范围抗剪强度的测定, 联合采用轴平移技术法(0~500 kPa)和饱和盐溶液蒸汽平衡法(3.29~198.14 MPa)进行宽广范围吸力的控制。低吸力试验中, 利用饱和陶土板的过水不过气的功能控制低吸力, 同时轴平移技术避免孔隙水气化。应力路径如图 4 所示, 从初始状态开始, 首先施加 $\sigma_{3n}=20$ kPa, $s=100, 200$ kPa 进行吸力平衡 (AB_i), 吸力平衡之后施加 $\sigma_{3n}=200$ kPa 进行固结平衡 (B_iC_i), 变形稳定之后在恒定围压和吸力值下进行控制应变速率的三轴排水剪切 (C_iD_i)。

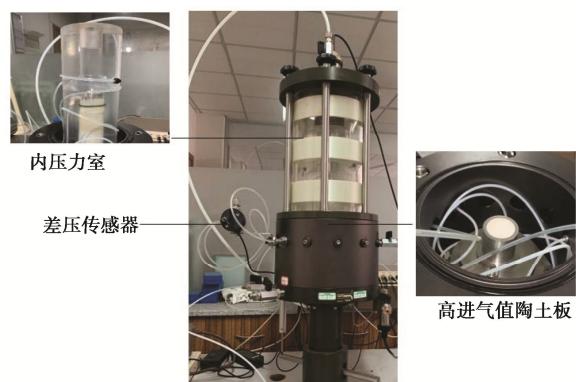


图 3 GDS 双压力室非饱和土三轴试验仪

Fig. 3 GDS double-cell triaxial apparatus for testing unsaturated soils with HKUST

高吸力试验中, 利用饱和盐溶液来控制密封干燥皿内空气的相对湿度^[13, 24-26], 从而控制土体的总吸力, 不同的饱和盐溶液对应的吸力值见表 2^[9, 25-26], 在不考虑渗透吸力的情况下, 总吸力近似等于基质吸力。依据每小时体积变化量小于 0.01 cm³的平衡标准^[11, 13-14], 该过程耗时 3~4 个月。吸力平衡后把试样装在非饱和土三轴试验仪上, 进行常含水率下的固结平衡和三轴剪切, 此时可认为是等吸力试验^[11, 13, 26]。试样顶部通过孔隙气压控制管路和大气连通, 试验中保证孔隙气压为 0。采用不透水塑料薄膜将陶土板和试样隔开, 保证含水率不变^[11, 13]。应力路径如图 4 所示(仅展示控制吸力为 3.29, 21.82 MPa 的路径), 从初始状态开始, 首先利用饱和盐溶液进行高吸力平衡 (AX_i), 吸力平衡之后施加围压 $\sigma_{3n}=200$ kPa 进行固结平衡 (X_iY_i), 变形稳定之后在恒定围压和常含水率下进行控制应变速率的不排水(排气)剪切 (Y_iZ_i)。

吸力平衡和固结平衡的标准根据进每 2 h 出水量小于 0.01 cm³ 和每 2 h 体积变化量小于 0.02 cm³确定。采取轴向应变控制三轴剪切加载模式。相关学者对宽广吸力范围内不同三轴剪切速率对峰值强度和体变的影响做了相关研究^[11, 27-28], 本试验选取轴向剪切速度约为 0.00192 mm/min, 保证剪切中孔隙水压完全消散。

表2 饱和盐溶液及对应的吸力值

Table 2 Saturated salt solutions and corresponding suctions

| 饱和盐溶液 | RH/% | 总吸力/MPa |
|--|------|---------|
| K_2SO_4 | 97.6 | 3.29 |
| $\text{Na}_2\text{SO}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ | 90.8 | 13.10 |
| KCl | 85.1 | 21.82 |
| NaCl | 75.5 | 38.00 |
| NaBr | 59.1 | 71.20 |
| K_2CO_3 | 43.2 | 113.50 |
| CH_3COOK | 23.1 | 198.14 |

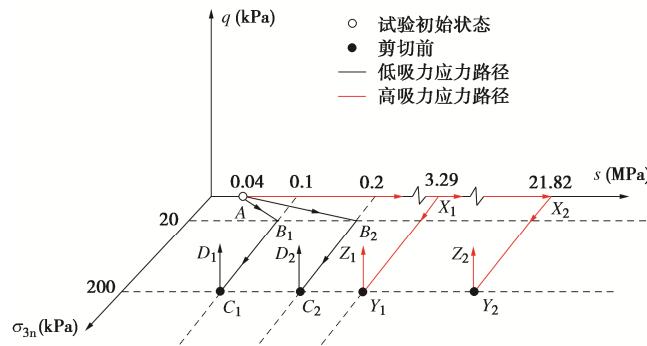


图4 宽广吸力范围内三轴试验应力路径示意图

Fig. 4 Stress paths for triaxial tests over a wide suction range

2 非饱和三轴试验结果

本文对重塑压实膨胀土样进行了不同吸力水平下的9组试验, 图5显示不同常吸力下, 三轴剪切过程中的应力应变关系和体变结果(压缩为正, 剪胀为负)。结果表明, 低吸力条件下($s=100 \text{ MPa}$, $s=200 \text{ kPa}$)以及中吸力条件下($s=3.29 \text{ MPa}$, $s=13.1 \text{ MPa}$), 应力应变曲线呈现硬化现象, 同时有明显的剪缩行为。随着吸力增加, 剪缩体变逐渐减小。

高吸力条件下(s 为21.82, 38, 71.2, 113.5, 198.14 MPa), 应力应变曲线呈现峰值后软化现象, 试样开始在经历了1%~3%的体积收缩变形之后开始出现明显剪胀。在高吸力状态下($s=113.5 \text{ MPa}$, $s=198.14 \text{ MPa}$), 试样在较小应变的情况下很快达到峰值强度, 随后软化至大应变时偏应力急剧降低。

随着吸力的增加, 剪胀性逐渐增加(或剪缩性减弱)。应力应变曲线的峰后软化现象及体积剪胀现象可以归因于试样失水后孔隙比减小明显(特别是大孔隙收缩^[27])或过度固结的应力历史^[11]。

图5中应力应变关系存在峰值, 则峰值抗剪强度取偏应力最大值; 若应力应变关系不存在峰值, 则峰值抗剪强度取轴向应变为15%处的偏应力作为峰值抗剪强度(如图6)。在吸力 s 小于21.82 MPa时, 峰值和残余偏应力均增加, 特别是在吸力 s 介于200 kPa至21.82 MPa之间增幅较大。在吸力 s 大于21.82 MPa时, 峰值偏应力继续增加, 残余偏应力开始下降。这是由于在恒定围压条件下, 超过峰值剪应力的连续剪切形成的剪切带严重破坏了土体颗粒接触周围的空气

-水-气液面系统, 因此吸力对峰值强度的贡献往往大于残余状态。

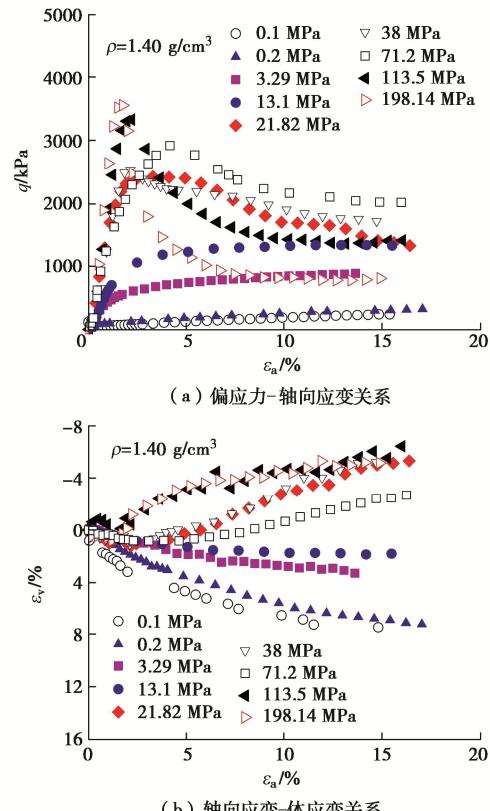


图5 三轴剪切过程中应力应变关系

Fig. 5 Relationship between deviator stress, volumetric strain and axial strain from triaxial shear tests

除了外部载荷外, 吸力的增加往往会在土体颗粒的接触点上施加表面张力以及吸附作用, 从而在土体颗粒之间产生额外的黏结, 使土壤结构变得更加坚硬, 在剪切过程中表现出脆性。以脆性指数评估土体脆性大小的方法如下^[29-30]:

$$I_B = \frac{q_{\text{peak}} - q_r}{q_r} \quad (1)$$

式中: q_{peak} 为峰值抗剪强度; q_r 为残余抗剪强度。

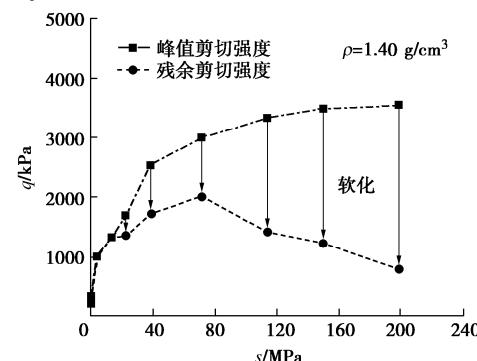


图6 不同吸力下内乡膨胀土峰值强度和残余强度

Fig. 6 Peak and residual deviator stresses at different suctions of Neixiang expansive soil

从图6, 7可以清楚地看到试件的脆性随吸力的增

加而增长, 表明剪切破坏后破坏区域逐渐过渡, 即在中低吸力下呈桶形或中心鼓形的延性破坏模式, 在高吸力下发生应变局部化现象, 并产生明显的剪切破坏面。此外, 脆性增加了峰后软化的幅度, 表现为图 6 中峰值偏应力与残余破坏状态之间的差值增大。

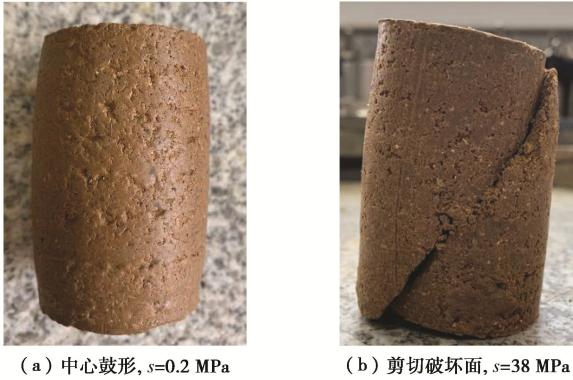


图 7 不同吸力下试样剪切后状态

Fig. 7 Typical failures of specimens at different suction states

3 峰值抗剪强度的分析与讨论

Bishop^[31]提出了经典的非饱和土有效应力公式:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + \chi s \delta_{ij} \quad , \quad (2)$$

式中: σ_{ij} 为总应力张量; u_a 为孔隙气压力; χ 为有效应力参数, s 为基质吸力; δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

式(2)的有效应力参数 χ 最初采用饱和度 S_r 加以量度, 这种做法由于高估了吸力对骨架应力的作用, 忽视了吸附吸力的存在^[5-7, 16, 18-20], 导致预测的峰值抗剪强度往往大于实际强度, 特别是对于细粒土以及低饱和度的情况。为此, 近来一些研究发现, 可将总饱和度 S_r 的量度替换成毛细饱和度 S_r^{cap} ^[5-7, 20, 32-33]以区分毛细和吸附不同作用的影响:

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + S_r^{\text{cap}} s \delta_{ij} \quad . \quad (3)$$

研究表明, 结合上述有效应力, 极限剪应力的临界峰值强度状态线可以由唯一的强度包络线表征^[5-7, 20] (如图 8 (a)), 即存在一组适用于饱和与非饱和状态的相同强度参数。唯一的强度包络线不仅在低吸力适用, 也在高吸力范围内得到了验证, 同时对于粗粒土和细粒土显示具有线性特征^[34]。

需要注意的是, 以上研究仅针对大量具有单峰持水曲线的土体, 而没有涉及具有双峰持水曲线的土体。这里利用笔者^[5, 20, 23, 32]提出的可以区分毛细和吸附饱和度的双峰持水曲线模型来计算毛细饱和度:

$$S_r^{\text{cap}} = (1 - \alpha) A + (\alpha - \frac{\alpha C(1 - B)}{1 - C(B - 1)}) B \quad , \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{\ln(s/s_{m1})}{\sqrt{2}\zeta_1} \right) \quad , \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{\ln(s/s_{m2})}{\sqrt{2}\zeta_2} \right) \quad , \quad (6)$$

$$C = \beta \left(1 - \frac{\ln s}{\ln s_d} \right) \quad . \quad (7)$$

式中: s_{m1} 为集聚体间中值孔径对应的基质吸力(kPa), s_{m2} 为集聚体内中值孔径对应的基质吸力(kPa); ζ_1 为表征集聚体间孔径分布宽度的无量纲参数, ζ_2 为表征集聚体内孔径分布宽度的无量纲参数, $\text{erf}(\cdot)$ 为误差函数; $\alpha = \theta_{s2}/\theta_{s1}$, θ_{s1} 为第一进气值对应的含水率, 即土材料完全饱和时的体积含水率, θ_{s2} 为第二进气值对应的含水率, 即集聚体内的饱和含水率; β 为表征吸附作用大小的材料参数; s_d 为干燥情况下的最大吸力, 取 $s_d = 10^6$ (kPa)。

参数 α 代表两种大小孔隙结构相对大小, 技术上可以根据压汞试验进行标定。参数 β 控制了吸附水在最大吸力处的变化速率, 可以通过检测吸附水含量的变化确定, 技术上可以通过核磁共振技术实现^[35]。参数 s_m (s_{m1} , s_{m2}) 代表中等孔径对应的吸力值, ζ (ζ_1 , ζ_2) 是对数坐标下孔径的标准差, 这些参数可以通过微观试验, 例如压汞试验进行测定^[36]。以上参数的标定方法都是基于相应的微观试验或者这些参数直接控制的测试结果来确定。然而, 在未进行微观试验的状况下, 模型参数可以通过对持水数据的拟合获得, 即基于非线性拟合 (详细的讨论见文献[37]) 的方法进行, 相同的参数标定流程见笔者对双峰持水曲线的建模过程^[23]。

图 8 (b) 表明, 利用相同的表征方法利用毛细饱和度将吸力从孔隙应力扩为宏观应力时 (参数见表 3, 其中 α , β , ζ_1 , ζ_2 为无量纲参数), 强度包络线由两条直线段组成, 这一强度特征的微观机理可解释为: 由于具有双峰持水曲线的土体常存在集聚体结构, 集聚体间大孔隙以毛细水占主导, 集聚体内小孔隙赋存吸附水。对于毛细水, 来源于空气-水弯液面提供的表面张力, 能够在骨架间进行应力传递, 完全贡献了第一段直线的强度; 吸附作用主要源于 3 种不同的物理化学机制^[38-40], 即离子水化、内表面水化及颗粒表面水化, 离子水化来源于原子尺度的电子力作用, 内表面水化和颗粒表面水化受到范德华力影响。此种物理化学作用虽不能形成骨架应力, 往往会产生额外的胶结作用, 从而增加土体的第二段抗剪强度^[27]。

Ng 等^[22, 27]对具有双峰 SWRC 的压实黄土试验进行了宽广范围的直剪试验; Satyanaga 等^[10]对砂土和高岭土不同配比的混合物 M3 (70%砂土、30%高岭土)、M5 (50%砂土、50%高岭土)、M6 (40%砂土、60%高岭土) 以及 M8 (20%砂土、80%高岭土) 利用轴平移技术进行了三轴剪切试验; 孙德安等^[42-43]对桂林红黏土进行了一系列土水特性试验和控制吸力的直剪试验, 测试土体的基本物理指标见表 4, 双峰 SWRC 的

模型参数见表3。基于土体持水特性和剪切试验的试验结果, 在毛细吸应力空间重新整理峰值抗剪强度值(如图9),结果显示强度随毛细吸应力的变化均由双段直线组成,第二段直线位于第一段直线的上方。这种现象的产生机理可同样归因于:对于具有双孔隙结构的土体,其持水曲线呈现双峰形态,高吸力下的峰值抗剪强度不仅由毛细作用形成的空气-水弯液面提供,还受到吸附作用引起的胶结作用增强。

表3 双峰持水曲线模型参数

Table 3 Parameters of bimodal water-retention curve

| 土体 | s_{m1}/kPa | s_{m2}/kPa | ζ_1 | ζ_2 | β | α |
|------------------------|--------------|--------------|-----------|-----------|---------|----------|
| 膨胀土 | 41.21 | 14500 | 1.05 | 0.74 | 0.95 | 0.70 |
| 黄土 ^[17,41] | 9.69 | 2097 | 1.00 | 1.24 | 0.20 | 0.59 |
| M3 ^[10] | 9.35 | 121.9 | 0.24 | 0.86 | 0.05 | 0.85 |
| M5 ^[10] | 14.22 | 135 | 0.19 | 0.77 | 0.05 | 0.87 |
| M6 ^[10] | 11.74 | 131.7 | 0.10 | 0.91 | 0.30 | 0.85 |
| M8 ^[10] | 0.53 | 28.12 | 0.23 | 1.34 | 0.38 | 0.84 |
| 红黏土 ^[42-43] | 68.74 | 9430 | 1.22 | 0.74 | 0.48 | 0.79 |

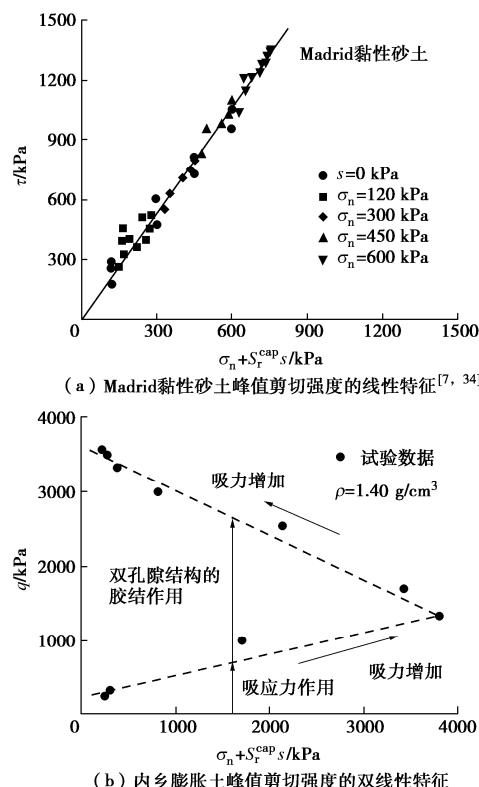


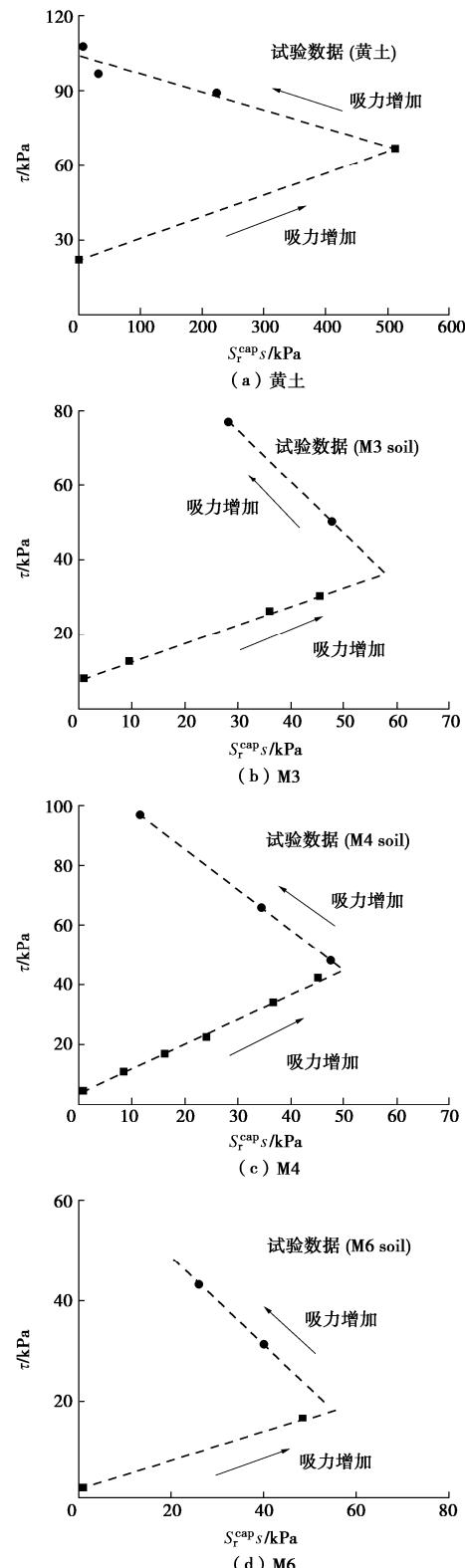
图8 Madrid黏性砂土和内乡膨胀土峰值剪切强度特征
Fig. 8 Peak shear strength behaviors for Madrid clayey sand and Neixiang expansive soil

表4 具有双峰持水曲线土体的基本物理指标

Table 4 Physical properties of soils with bimodal SWRC

| 土体 | 液限/% | 塑限/% | 最大干密度/(g·cm ⁻³) | c/kPa | $\phi/^\circ$ |
|------------------------|------|------|-----------------------------|-------|---------------|
| 黄土 ^[17,41] | 36.0 | 19.0 | 1.30 | 0 | 27.7 |
| M3 ^[10] | 36.8 | 21.6 | 1.85 | 5.00 | 34.0 |
| M5 ^[10] | 46.7 | 27.4 | 1.75 | 9.00 | 26.0 |
| M6 ^[10] | 48.9 | 28.2 | 1.59 | 12.00 | 26.0 |
| M8 ^[10] | 57.8 | 33.6 | 1.45 | 16.00 | 25.0 |
| 红黏土 ^[42,43] | 77.8 | 42.1 | 1.52 | 1.57 | 32.1 |

试验数据和理论研究表明,对于具有双孔隙结构的土体,在集聚体间(低吸力范围),用毛细饱和度乘以吸力将吸力从孔隙应力扩为宏观应力时,能更为合理地量度吸力对有效应力的贡献;在集聚体内(高吸力范围),此时除毛细吸应力贡献峰值抗剪强度之后,还受到结构重组和胶结作用的影响(铁和锰氧化物的胶结^[27])。后续研究需要考虑双孔隙结构以及胶结作用对抗剪强度的影响特性。



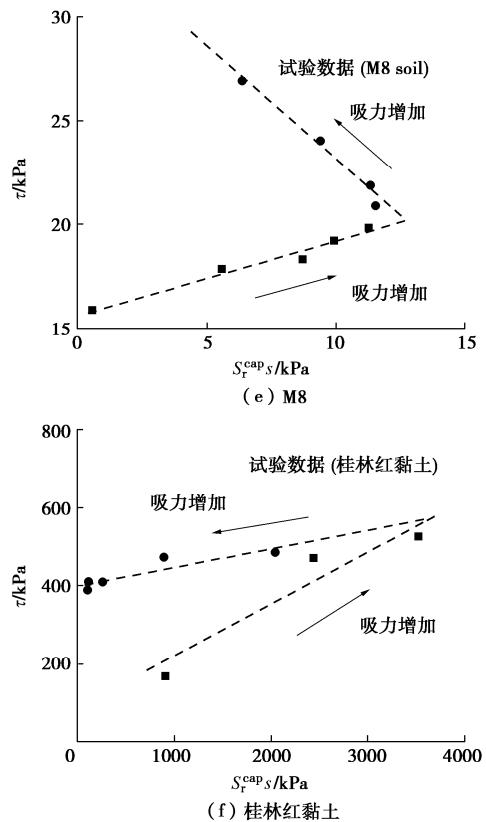


图 9 具有双孔隙结构和双峰 SWRC 土体的非饱和峰值强度特性 (毛细吸应力-剪应力/偏应力空间)

Fig. 9 Unsaturated shear strengths of soils with dual-porosity structure and bimodal SWRC

4 结 论

本文针对具有双孔隙结构及双峰 SWRC 的非饱和重塑膨胀土的抗剪强度开展了试验及理论研究。联合轴平移技术和盐溶液蒸汽平衡法对宽广吸力范围内膨胀土压实样进行了一系列的非饱和三轴剪切试验。同时对峰值抗剪强度在毛细吸应力空间 (毛细饱和度乘以吸力与偏应力) 进行了分析讨论。得到以下 4 点结论。

(1) 中低吸力下的应力应变关系为应变硬化, 伴随着剪缩行为, 试样呈现中心鼓形的延性破坏模式; 高吸力下为应变软化, 伴随着剪胀现象, 试样有明显的破坏剪切带。

(2) 脆性随吸力的增加而增长, 表现为峰后软化的幅度增大, 即峰值抗剪强度与残余抗剪强度之间的差值增大。

(3) 毛细吸应力能更为合理地揭示吸力对剪切强度的贡献, 在毛细吸应力-强度空间, 双孔隙结构非饱和土 (不仅限于压实膨胀土) 均呈现双段线性的强度特征。

(4) 低吸力范围内, 双孔隙结构非饱和土的抗剪强度由饱和强度与毛细吸应力贡献; 高吸力范围内,

抗剪强度应由饱和强度、毛细吸应力与胶结作用提供。

参 考 文 献:

- 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-272. (CHEN Zhenghan. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 201-272. (in Chinese))
- FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: Wiley, 1993
- SHENG D C, ZHOU A N, FREDLUND D G. Shear strength criteria for unsaturated soils[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2011, 29(2): 145-159.
- 翟钱, 戴国亮, 赵学亮. 土-水特征曲线对非饱和砂土抗剪强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(7): 1341-1349. (ZHAI Qian, DAI Guoliang, ZHAO Xueliang. Effect of soil-water characteristic curve on shear strength of unsaturated sandy soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(7): 1341-1349. (in Chinese))
- 林志强, 钱建固, 时振昊. 毛细-吸附作用下考虑孔隙比影响的单/双峰土体持水曲线模型[J]. 岩土力学, 2021, 42(9): 2499-2506. (LIN Zhiqiang, QIAN Jiangu, SHI Zhenhao. Modeling unimodal/bimodal soil-water retention curves considering the influence of void ratio under capillarity and adsorption[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(9): 2499-2506. (in Chinese))
- ZHOU A N, HUANG R Q, SHENG D C. Capillary water retention curve and shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(6): 974-987.
- KONRAD J M, LEBEAU M. Capillary-based effective stress formulation for predicting shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(12): 2067-2076.
- 高游, 孙德安. 单峰和双峰土水特征曲线基本参数的确定[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1884-1891. (GAO You, SUN Dean. Determination of basic parameters of unimodal and bimodal soil water characteristic curves[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1884-1891. (in Chinese))
- CAI G Q, ZHOU A N, LIU Y, et al. Soil water retention behavior and microstructure evolution of lateritic soil in the suction range of 0~286.7 MPa[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15(12): 3327-3341.

- [10] SATYANAGA A, RAHARDJO H. Unsaturated shear strength of soil with bimodal soil-water characteristic curve[J]. *Géotechnique*, 2019, **69**(9): 828-832.
- [11] 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. (ZHANG Junran, SUN Dean, JIANG Tong, et al. Shear strength of weakly expansive soils and its prediction in a wide range of suction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(6): 1064-1070. (in Chinese))
- [12] 张季如, 罗明星, 彭伟珂, 等. 不同应力路径下钙质砂力学特性的排水三轴试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, **43**(4): 593-602. (ZHANG Jiru, LUO Mingxing, PENG Weike, et al. Drained triaxial tests on mechanical properties of calcareous sand under various stress paths[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, **43**(4): 593-602. (in Chinese))
- [13] 徐筱, 赵成刚. 高吸力下黏性土的抗剪强度和体变特性[J]. *岩土力学*, 2018, **39**(5): 1598-1610. (XU Xiao, ZHAO Chenggang. Shear strength and volume change behavior of clay-rich soil at high suctions[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, **39**(5): 1598-1610. (in Chinese))
- [14] GAO Y, SUN D A, ZHU Z C, et al. Hydromechanical behavior of unsaturated soil with different initial densities over a wide suction range[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, **14**(2): 417-428.
- [15] GAO Y, SUN D A, ZHOU A N. Hydromechanical behaviour of unsaturated soil with different specimen preparations[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, **53**(6): 909-917.
- [16] GAO Y, SUN D A, ZHOU A N, et al. Predicting shear strength of unsaturated soils over wide suction range[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, **20**(2): 04019175.
- [17] 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.
- [18] ZHAI Q, RAHARDJO H, SATYANAGA A, et al. Estimation of unsaturated shear strength from soil-water characteristic curve[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, **14**(6): 1977-1990.
- [19] MALEKSAEEDI E, NUTH M. Evaluation of capillary water retention effects on the development of the suction stress characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, **57**(10): 1439-1452.
- [20] QIAN J G, LIN Z Q, SHI Z H. Soil-water retention curve model for fine-grained soils accounting for void ratio-dependent capillarity[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2022, **59**(4): 498-509.
- [21] ZHAO H F, ZHANG L M, FREDLUND D G. Bimodal shear-strength behavior of unsaturated coarse-grained soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **139**(12): 2070-2081.
- [22] NG C W W, SADEGHI H, JAFARZADEH F. Compression and shear strength characteristics of compacted loess at high suctions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, **54**(5): 690-699.
- [23] Qian J G, Lin Z Q, Shi Z H. Experimental and modeling study of water-retention behavior of fine-grained soils with dual-porosity structures[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, **17**(8): 3245-3258.
- [24] 孙德安, 张俊然, 吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土-水特征曲线[J]. *岩土力学*, 2013, **34**(7): 1839-1846. (SUN Dean, ZHANG Junran, LÜ Haibo. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(7): 1839-1846. (in Chinese))
- [25] SUN D A, GAO Y, ZHOU A N, et al. Soil-water retention curves and microstructures of undisturbed and compacted Guilin lateritic clay[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2016, **75**(2): 781-791.
- [26] ZHANG J R, NIU G, LI X C, et al. Hydro-mechanical behavior of expansive soils with different dry densities over a wide suction range[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(1): 265-278.
- [27] NG C W W, SADEGHI H, JAFARZADEH F, et al. Effect of microstructure on shear strength and dilatancy of unsaturated loess at high suctions[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2020, **57**(2): 221-235.
- [28] PATIL U D, HOYOS L R, PUPPALA A J. Suitable shearing rate for triaxial testing of intermediate soils under vapor controlled medium to high suction range[C]// IFCEE 2015. San Antonio, Texas. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2015.
- [29] BISHOP A W. The influence of progressive failure on the choice of the method of stability analysis[J]. *Géotechnique*, 1971, **21**(2): 168-172.

- [30] PATIL U D, PUPPALA A J, HOYOS L R, et al. Modeling critical-state shear strength behavior of compacted silty sand via suction-controlled triaxial testing[J]. *Engineering Geology*, 2017, **231**: 21-33.
- [31] BISHOP A. The principle of effective stress[J]. *Tek Ukebl* 1959, **106**: 859-863.
- [32] LIN Z Q, QIAN J G, ZHAI Q. A novel hysteretic soil-water retention model with contact angle-dependent capillarity[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2022, **22**(2): 060210371-7.
- [33] ZHOU A N, WU S S, LI J, et al. Including degree of capillary saturation into constitutive modelling of unsaturated soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2018, **95**: 82-98.
- [34] ESCARIO V, SÁEZ J. The shear strength of partly saturated soils[J]. *Géotechnique*, 1986, **36**(3): 453-456.
- [35] MA T T, WEI C F, YAO C, et al. Microstructural evolution of expansive clay during drying-wetting cycle[J]. *Acta Geotechnica*, 2020, **15**(2/3/4): 2355-2366.
- [36] SATYANAGA A, et al. Water characteristic curve of soil with bimodal grain-size distribution[J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, **48**: 51-61.
- [37] MARQUARDT D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1963, **11**: 431-441.
- [38] LU N. Generalized soil water retention equation for adsorption and capillarity[J]. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1963, **11**: 431-441.
- [39] LU N, GODT J W, WU D T. A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil[J]. *Water Resources Research*, 2010, **46**(5): W05515.
- [40] LU N, ZHANG C. Soil sorptive potential: concept, theory, and verification[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, **145**(4): 04019006.
- [41] NG C W W, SADEGHI H, HOSSEN S K B, et al. Water retention and volumetric characteristics of intact and re-compacted loess[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, **53**(8): 1258-1269.
- [42] 孙德安, 何家浩, 高游. 广吸力范围内压实红黏土的强度特性[J]. *岩土力学*, 2017, **38**(增刊2): 51-56. (SUN Dean, HE Jiahao, GAO You. Strength characteristics of compacted lateritic clay in a wide range of suction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, **38**(S2): 51-56. (in Chinese))
- [43] 孙德安, 高游, 刘文捷, 等. 红黏土的土水特性及其孔隙分布[J]. *岩土工程学报*, 2015, **37**(2): 351-356. (SUN Dean, GAO You, LIU Wenjie, et al. Soil-water characteristics and pore-size distribution of lateritic clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(2): 351-356. (in Chinese))

第十一届软土地基下工程岩土问题国际研讨会通知

第十一届软土地基下工程岩土问题国际研讨会 (IS-Macau 2024) 将于 2024 年 6 月 14~17 日 (周五至周一) 在中国澳门特别行政区举行。本次会议由澳门大学智慧城市物联网国家重点实验室 (IoTSC)、土木与环境工程系与国际土力学与岩土工程学会 (ISSMGE) TC204 共同举办。大会主席为澳门大学周万欢教授、东南大学徐涛副教授; 副主席为剑桥大学 Giulia Viggiani 教授; 秘书为澳门大学管铮博士。研讨会的主题为“智慧城市隧道与地下空间建设”，具体包括：软土基

本性质；本构与数值模型；软土地基处理新技术；大数据、人工智能和机器学习在隧道和地下工程中的应用；地下基础设施韧性与可持续发展；隧道与地下施工智能监测与可视化技术；观测法在地下工程中的应用；现场案例研究。

大会组委会诚邀业界专家学者、工程技术人员、管理人员和企业代表等拨冗莅临，共襄盛会！

会议网站: <https://is-macau2024.skliotsc.um.edu.mo>

咨询邮箱: ismacau2024@um.edu.mo

(会议组委会)