

DOI: 10.11779/CJGE201606013

宽广吸力范围内弱膨胀土的抗剪强度及其预测

张俊然^{1,2}, 孙德安², 姜彤^{*1}, 黄志全¹

(1. 华北水利水电大学河南省岩土力学与结构工程重点实验室, 河南 郑州 450045; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要: 在宽广吸力范围内对不同吸力的非饱和弱膨胀土进行了一系列吸力控制的三轴剪切试验。关于吸力的施加, 较低吸力采用轴平移技术; 高吸力采用蒸汽平衡法。试验结果表明: 在净应力相同的条件下, 试样的应力应变关系曲线随着吸力的增大而升高、剪缩量变小, 并且随着吸力的增大其偏应力-应变关系和体变明显地表现出类似超固结土的特性。主要原因是试样受到较大的吸力, 弱膨胀土试样失水收缩、孔隙比减小均明显, 使试样剪切过程中表现出类似超固结黏土的特性。在宽广吸力范围内, 吸力所引起弱膨胀性土体积收缩明显, 不可忽视。根据压汞试验结果确定的微观饱和度引入有效饱和度中, 再将试验结果与修正后的 Bishop 非饱和土强度公式的预测值进行比较, 证明了修正后的 Bishop 非饱和土强度公式在宽广吸力范围内可较为准确地预测非饱和弱膨胀土的抗剪强度。

关键词: 宽广吸力范围内; 弱膨胀土; 压汞试验; 抗剪强度; 预测

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)06-1064-07

作者简介: 张俊然(1984-), 男, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土力学的研究工作。E-mail: zhangjunran911@163.com。

Shear strength of weakly expansive soils and its prediction in a wide range of suction

ZHANG Jun-ran^{1,2}, SUN De-an², JIANG Tong¹, HUANG Zhi-quan¹

(1. Henan Province Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Structural Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A series of suction-controlled triaxial tests are conducted on unsaturated weakly expansive soils experiencing different suctions in a wide range of suction. With regard to the suction applied, the low and high suctions are imposed by using the axis translation technique and the vapor equilibrium method. The test results show that under the same net stress, the specimen experiencing larger suction shows a higher stress-strain relationship and small contractive volumetric strain shearing, and its deviatoric stress-strain relationship and volumetric strain behavior become more and more similar to deformation characteristics of overconsolidated soils with the increase of the imposed suction. The reason of the above phenomenon is that when the specimen experiences a larger suction, the weakly expansive soils shrink significantly due to the loss of water, and its void ratio decreases obviously, thus the specimen exhibits the deformation characteristics of overconsolidated soils during shearing. In a wide range of suction, the volume shrinkage of weakly expansive soils is significantly caused by the suction, and it cannot be ignored. In addition, on the basis of test data of the mercury intrusion porosimetry (MIP), the Bishop's equation for unsaturated soils is modified by introducing the concept of the effective degree of saturation. A comparison between the measured and the predicted results shows that the modified equation can predict the strength of unsaturated Nanyang weakly expansive soils well in a wide range of suction.

Key words: wide range of suction; weakly expansive soil; mercury intrusion porosimetry; shear strength; prediction

0 引言

膨胀土是典型的特殊土,它具有胀缩性、裂隙性和超固结性“三性”特征,主要原因是其颗粒中含有蒙脱石、伊利石或蒙-伊混层等强亲水性矿物,对气候变化特别敏感^[1]。由于膨胀土的胀缩导致工程灾害频发,如建筑物地基隆起、路基开裂、沟渠边坡失稳等。浅层膨胀土的吸力随季节气候变化而不断变化,影响着膨胀土的抗剪强度,进而影响着各种岩土工程结构

的稳定性。因此,研究膨胀土抗剪并提出合理的预测方法显得非常必要。

很多学者已对膨胀土的变形与大量的试验研究,如卢再华等^[2]对南阳市靳岗村原状膨胀土的变形、强

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11272194); 华北水利水电大学高层次人才基金项目; 河南省基础与前沿研究计划项目(132300410021); 河南省科技创新人才计划(154100510006)

收稿日期: 2015-07-31

***通讯作者**

度特性进行了非饱和三轴试验研究。龚壁卫等^[3]用压力板仪和直剪仪对湖北枣阳强膨胀土在干湿循环过程中的吸力变化和强度变化特征开展试验研究; 缪林昌等^[4]对南阳中膨胀性土在不同吸力状态下的强度特性进行了试验研究, 并提出了计算吸力强度的双曲线模型。詹良通等^[5]用可控制吸力的非饱和土直剪仪和非饱和土三轴仪对湖北枣阳中膨胀性土的变形、强度特性进行了试验研究。刘斯宏等^[6]对南阳膨胀土进行了不同竖向荷载作用下的浸水膨胀变形及其膨胀后试样的强度试验, 得到了膨胀完成后试样的抗剪强度指标与竖向荷载的变化规律。上述研究的膨胀土多属于中、强膨胀性土, 但关于弱膨胀性土研究相对较少。孔令伟等^[7]用可控制吸力的非饱和土三轴仪对荆门弱膨胀土的变形、强度特性进行了试验研究。工程建设中, 对中、强膨胀土一般进行地基处理, 但是关于弱膨胀土所引起的破坏未能引起足够的重视。如南水北调中线渠道穿过膨胀土地区的总长为 346 km, 其中强膨胀土占 6.1%, 中膨胀土占 24.6%, 弱膨胀土占 69.3%, 弱膨胀土分布于全线的大部分^[8]。实际工程中, 受沿线膨胀土分布条件和出于经济上的考虑, 常采用弱膨胀土填筑渠堤。为更好地解决工程建设及其后期维护中遇到的有关弱膨胀土工程问题, 开展吸力(或含水率)对弱膨胀土力学性质影响的试验研究是非常必要的。

本文在宽广吸力范围内对不同吸力下的南阳弱膨胀土进行了一系列的三轴剪切试验, 探讨不同吸力对非饱和膨胀土抗剪强度与变形特性的影响。此外对该膨胀土进行压汞试验, 通过引入有效饱和度的概念^[9-10], 用修正 Bishop 非饱和土强度公式预测非饱和南阳膨胀土的强度, 并进行了试验结果与预测值的比较。

1 土样基本物理指标及试样孔隙尺寸分布特征

1.1 土样基本物理指标

试验所用的膨胀土取自南水北调中线南阳段的南阳市卧龙区卧姜沟乡, 取土深度约为 4 m。其基本物理指标如表 1 所示。表中最大干密度和最优含水率是根据击实试验得到的。南阳膨胀土颗粒分布曲线如图 1 所示。按照《膨胀土地区建筑技术规范》^[11]的分类, 试验土为低膨胀性膨胀土。根据颗粒分布曲线及塑性指数, 可知南阳膨胀土为低液限黏土(CL)。采用击实法制作三轴试样, 控制土样初始含水率为 $w_0=22\%$ 左右, 用三开模进行制样, 分 5 层击实。试样初始高度为 80 mm 左右, 直径 39 mm 左右。初始饱和度约为

72%, 初始孔隙比 0.80 左右。

表 1 南阳膨胀土基本物理指标

Table 1 Basic physical properties of Nanyang expansive soils						
颗粒 比重	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性 指数 I_P	最大干 密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最优含水 率 $w_{\text{opt}}/\%$	自由膨胀 率 $\delta_f/\%$
G_s						
2.74	38.8	17.2	21.6	1.69	18.2	53.8

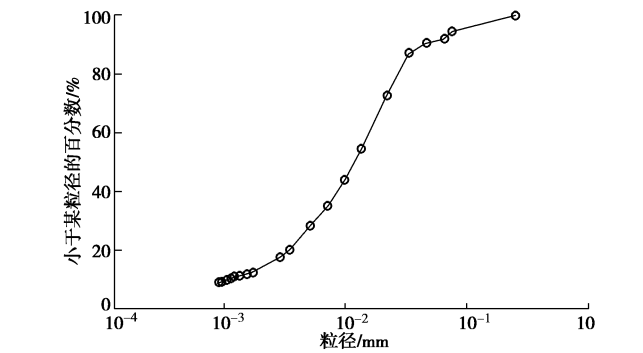


图 1 南阳膨胀土的颗粒分布曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curve of Nanyang expansive soils

1.2 孔隙尺寸分布特征

压实样的孔隙可分为两种: ①存在于土颗粒组成团粒间的大孔隙, 它们之间的连通性好, 对土体的渗透性、压缩性都有重要的影响; ②团粒内孔隙, 它的特点是分散性较大, 但是孔隙孔径很小, 各孔隙之间的连通性较差。试样中的水分首先进入团粒内的小孔隙, 小孔隙饱和后再填充团粒间的大孔隙。处于团粒内小孔隙的水, 可认为对非饱和土的抗剪强度不产生影响, 只有大孔隙中的水对非饱和土剪切强度产生作用。因此土体的宏观饱和度 S_{m} (即团粒间的孔隙水) 参与非饱和引起的强度贡献, 而土体的微观饱和度 S_{m} (团粒内的孔隙水) 可认为不产生非饱和引起的强度, 计算非饱和土强度时饱和度中应扣除微观饱和度^[9-10]。

对初始孔隙比相同 ($e_0=0.80$) 而经受过的吸力 s 不同 (210, 800 kPa) 的南阳膨胀土压实样进行了压汞试验, 结果如图 2 所示。图 2 (a) 表明随着吸力的增加 (干燥的过程) 团粒间的孔隙 (宏观孔隙) 体积减少, 而团粒内的孔隙 (微观孔隙) 体积基本不变。Romero 等^[12]也得到同样的试验结果。Alonso 等^[10]对大量试验结果总结得到: 应力和吸力路径主要改变击实试样的宏观孔隙体积, 而微观孔隙体积变化不大。根据上述结论和图 2 (a) 所示的孔径与孔径分布密度关系, 确定团粒内的孔隙 (微观孔隙) 的最大直径为 200 nm 左右; 因此从图 2 (b) 可知, 压实南阳膨胀土的微观孔隙占总孔隙的比率 (小于 200 nm 的微观体积除以总孔隙体积) 约为 21.2%, 即微观饱和度 $S_{\text{m}}=21.2\%$ 。

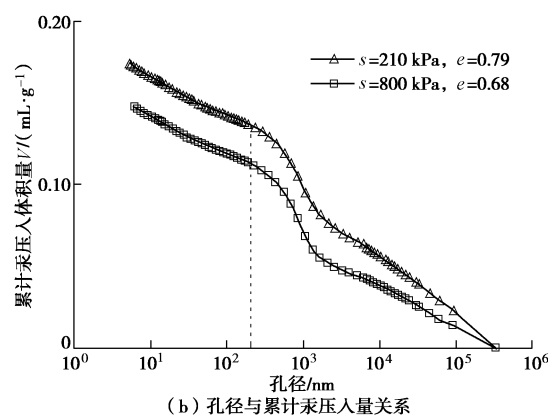
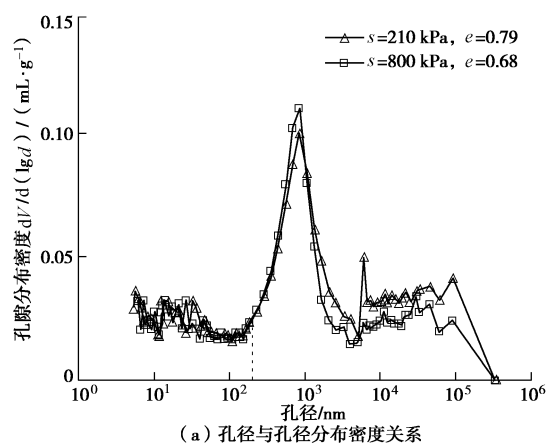


图 2 南阳膨胀土的压汞试验结果

Fig. 2 MIP test results of Nanyang expansive soils

2 非饱和土的三轴试验方法

试验用吸力可控制的 GDS UNSAT 非饱和土三轴仪进行，其压力室的底座嵌着进气值 500 kPa 的陶土板，采用轴平移技术可控制或量测试样的吸力。试样直径 38 mm，高 80 mm。采内室顶端开敞的双压力室量测非饱和土试样的体积变化。试验前进行标定试验，以消除非饱和土三轴试验系统中体变量测的系统误差。吸力平衡的标准为^[13]每天进出水量小于 0.1 cm³，总体积变形稳定的标准为每天体积变化量小于 0.2 cm³。当同时满足吸力平衡和总体积变形稳定的标准，认为这一阶段完成。剪切采用轴向等应变速率控制模式。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^[14]。

2.1 试验应力路径

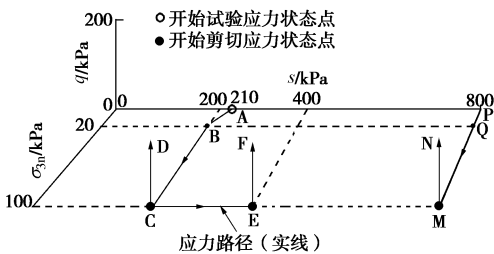
为了在宽广吸力范围内研究不同吸力对非饱和土抗剪强度与变形特性的影响，对初始状态相同而施加不同吸力的试样进行了一系列等净围压和等吸力的三轴剪切试验。当要加的吸力大于三轴仪陶土板进气值（500 kPa）时，采用饱和盐溶液蒸汽平衡法对试样施加高吸力，吸力平衡后把试样装在非饱和土三轴试验仪上。高吸力试样底面与陶土板用一层橡皮膜隔开，

以防止试样从陶土板中吸水，平衡和三轴剪切过程中使得试样含水率保持不变。许多试验结果表明高吸力阶段，含水率不变条件下土样的密度变化对吸力影响很小，因此剪切过程中即使试样体积有所变化，常含水率试验可认为是等吸力试验^[15-16]。表 2 为试验用到的两种饱和盐溶液及其对应的相对湿度以及吸力值^[17]。高吸力平衡环境温度控制在 20℃，同时配制的盐溶液中有盐晶体析出，以保证盐溶液的饱和状态，吸力平衡时间约 3 个月。

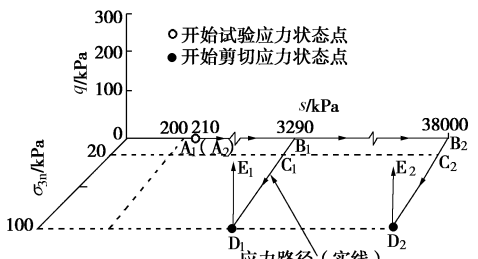
表 2 饱和盐溶液及其对应的相对湿度和吸力值(20℃)

Table 2 Saturated salt solution and corresponding suctions (20℃)

饱和盐溶液	相对湿度/%	吸力/MPa
K ₂ SO ₄	97.6	3.29
NaCl	75.5	38.00



(a) 最大吸力通过轴平移技术施加



(b) 最大吸力通过蒸汽平衡法施加

图 3 应力路径

Fig. 3 Stress paths

表 3 不同试验的具体应力路径

Table 3 Detailed stress paths of different tests

试验 编号	具体应力路径	剪切前所经历的吸力值
		s/kPa
1	A→B→C→D	210→200
2	A→B→C→E→F	210→200→400
3	A→P→Q→M→N	210→800
4	A ₁ →B ₁ →C ₁ →D ₁ →E ₁	210→3290
5	A ₂ →B ₂ →C ₂ →D ₂ →E ₂	210→38000

三轴试验的应力路径如图 3 所示，各次试验对应的具体应力路径详见表 3。图 3 中 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 为偏应力， $s = u_a - u_w$ 为基质吸力， σ_{3n} 为净围压。试样初始状态为图 3 (a) 中的 A 和图 3 (b) 中的 A₁ 和 A₂。采用轴平移技术量测得到试样初始吸力约为 210 kPa。共进

行了 5 个不同吸力的非饱和土三轴试验, 包括较低吸力的试验 (试验 1~3), 较高吸力的试验 (试验 4 和试验 5), 各个试样的初始状态见表 4。各试样的初始状态大致相同, 其三轴剪切过程中的净围压均相同。因此试验结果可在宽广吸力范围内比较研究不同吸力对非饱和和膨胀土应力应变关系及抗剪强度的影响。

表 4 土样击实后的初始状态

Table 4 Initial states of specimens after compaction			
试验编号	初始含水率 $w_0/\%$	初始孔隙比 e_0	初始饱和度 $S_r/\%$
试验1	21.48	0.803	72.21
试验2	21.47	0.796	72.40
试验3	21.29	0.800	72.88
试验4	21.36	0.806	72.63
试验5	21.34	0.808	72.35

2.2 试验的具体过程

如图 3 (a) 所示, 试验 1, 2 的试样, 从初始状态的 A 点开始, 首先施加 20 kPa 的总围压(A→B)。预固结后, 施加 $\sigma_{3n}=100$ kPa 和 $s=200$ kPa 进行固结稳定和吸力平衡(B→C)。点 C 吸力平衡和变形稳定后, 试验 1 直接进行三轴剪切试验, 剪切时保持 $s=200$ kPa 和 $\sigma_{3n}=100$ kPa 恒定(C→D)。而试验 2 保持 $\sigma_{3n}=100$ kPa, 将吸力增加到 $s=400$ kPa 进行吸力平衡 (C→E); 当吸力平衡稳定后, 在保持 $\sigma_{3n}=100$ kPa 条件下试验 2 开始三轴剪切试验, 剪切时保持 $s=400$ kPa (E→F)。

试验 3 剪切过程的目标吸力 800 kPa, 因非饱和土三轴仪陶土板的进气值是 500 kPa, 无法直接施加吸力。因此, 先用装有进气值 1.5 MPa 陶土板的压力板仪将吸力增加至 $s=800$ kPa 进行吸力平衡 (轴平移技术) (图 3 (a) 中 A→P)。吸力平衡后用游标卡尺、天平分别测量试样的尺寸和质量。随后将试样装到三轴仪上, 依次施加 20 kPa 和 100 kPa 总围压 (P→Q 和 Q→M) 进行平衡; 当稳定后开始三轴剪切试验, 剪切过程中保持含水率不变和 $\sigma_{3n}=100$ kPa (M→N)。

如图 3 (b) 所示, 试验 4, 5 的试样从初始状态的点 A_1, A_2 开始, 分别放入底部装有硫酸钾和氯化钠饱和盐溶液的密闭干燥器中进行吸力平衡 (蒸汽平衡法) ($A_1 \rightarrow B_1$ 和 $A_2 \rightarrow B_2$)。吸力平衡后用游标卡尺、天平分别测量试样的尺寸和质量。随后将试样装到三轴仪上, 依次施加 20 kPa 总围压 ($B_1 \rightarrow C_1$ 和 $B_2 \rightarrow C_2$)。预压固结后, 施加 100 kPa 总围压 ($C_1 \rightarrow D_1$ 和 $C_2 \rightarrow D_2$) 进行固结; 当固结稳定后, 在保持 $\sigma_{3n}=100$ kPa 进行三轴剪切。剪切过程中不允许试样吸水或排水, 认为保持 $s=3290$ kPa 和 $s=38000$ kPa ($D_1 \rightarrow E_1$ 和 $D_2 \rightarrow E_2$)。

对于, 试验 3~5, 试验后量测的试样重量与装样时的几乎相同, 证实试验过程中试样含水率能保持不

变, 从而达到了吸力不变的目标。

3 试验结果与讨论

图 4 表示了试样从初始状态点 A、 A_1 和 A_2 到剪切前 (试验 1~5 分别对应点 C, E, M, D_1 和 D_2) 的吸力加载路径及其饱和度的变化情况。

从图 4 (a) 可知, 试验 1, 2 试样经历过相同的应力加载路径 (A→B→C), 其饱和度变化基本相同; 随后在净应力相同的条件下, 试验 1, 2 试样经历不同的吸力 (C 和 C→E)。试验 3 试样首先用轴平移技术控制吸力进行脱湿 (A→P)。随后对试验 3 试样施加总围压 20 kPa (P→Q) 和 100 kPa (Q→M) 的过程, 其饱和度均稍有增加。从图 4 (b) 可知, 试验 4, 5 试样的饱和度变化具有相同的趋势, 从初始状态 A_1, A_2 开始进行高吸力的脱湿过程 ($A_1 \rightarrow B_1$ 和 $A_2 \rightarrow B_2$), 随后对试验 4, 5 均施加总围压 20 kPa ($B_1 \rightarrow C_1$ 和 $B_2 \rightarrow C_2$) 和 100kPa ($C_1 \rightarrow D_1$ 和 $C_2 \rightarrow D_2$) 过程, 其饱和度均有稍微增加。

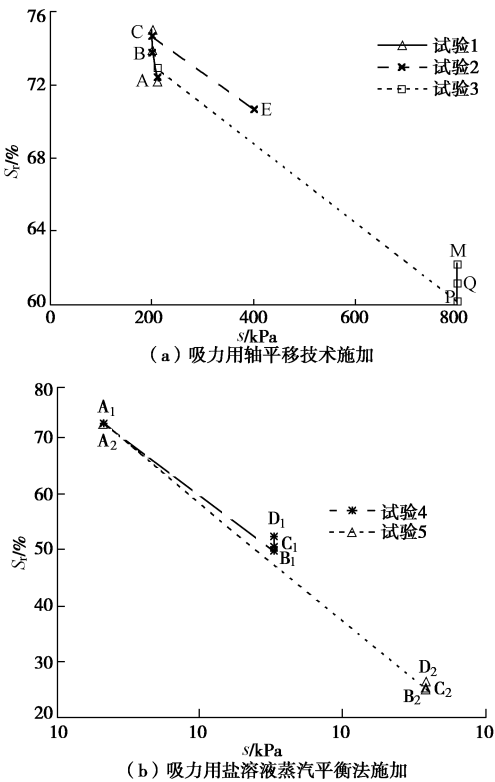


图 4 剪切前各个试样的饱和度变化

Fig. 4 Variation in degree of saturation before shearing

试验 1~5 试样剪切时的吸力分别为 200, 400, 800, 3290, 38000 kPa, 其开始剪切时的饱和度分别为 75.0%, 70.7%, 62.2%, 52.4%和 26.5%。上述结果表明, 在净围压相同条件下, 在宽广吸力范围内试样的饱和度随着吸力增大而减小。

图 5 表示了试样从初始状态点 A、 A_1 和 A_2 到剪

切前(试验1~5分别对应点C, E, M, D₁和D₂)的吸力加载路径及其孔隙比的变化情况。

从图5(a)可知, 试验1, 2试样经历过相同的应力加载路径(A→B→C), 其孔隙比变化基本相同; 随后在净应力相同的条件下, 试验1, 2试样经历不同的吸力(C和C→E)。试验3试样首先用轴平移技术控制吸力进行脱湿(A→P), 随后对试验3试样施加总围压20 kPa(P→Q)和100 kPa(Q→M), 其孔隙比均稍有减小。从图5(b)可知, 试验4, 5试样的孔隙比变化趋势相同, 从初始状态A₁, A₂开始进行高吸力的脱湿(A₁→B₁和A₂→B₂), 随后对试验4, 5均施加总围压20 kPa(B₁→C₁和B₂→C₂)和100 kPa(C₁→D₁和C₂→D₂), 其孔隙比均有稍微减小。

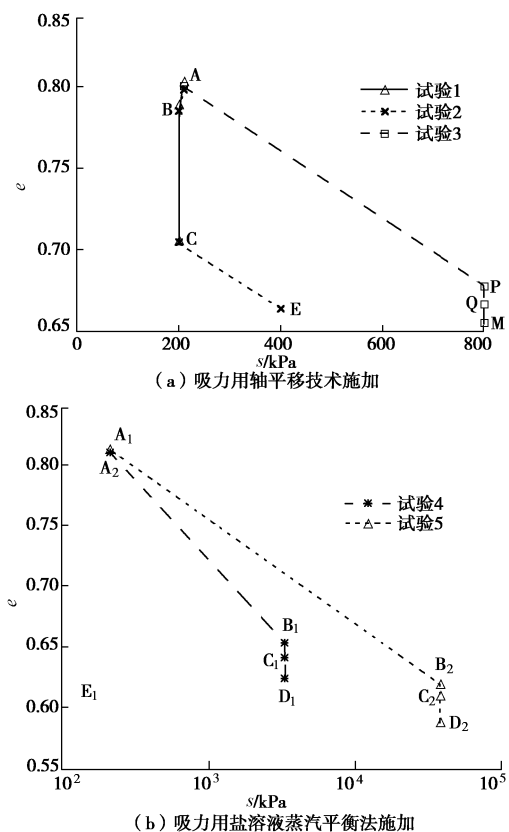


图5 剪切前各个试样的孔隙比变化

Fig. 5 Variation in void ratio before shearing

试验1~5的试样在剪切时的吸力分别为200, 400, 800, 3290, 38000 kPa, 开始三轴剪切时的孔隙比分别为0.706, 0.664, 0.655, 0.619, 0.583。上述结果表明, 在净应力相同条件下, 膨胀土试样的孔隙比随着吸力增大而减小。试样(试验1~5)处在相同净应力条件下进行三轴剪切试验, 而剪切时的吸力不同。可用于研究宽广吸力范围内不同吸力对非饱和膨胀土的应力应变关系和强度的影响。

图6为试验1~5试样在 $\sigma_{3n}=100$ kPa和不同吸力条件下, 三轴剪切过程中的应力应变关系及体变。由图可知, 剪切时吸力值越大, 非饱和试样的应力应变

关系曲线越高, 而剪缩体变越小。尤其吸力为38 MPa的试验5试样的应力应变关系及体变特性具有明显的超固结黏土特征, 应力应变关系曲线出现峰值后降低, 试样先稍剪缩后剪胀。其主要原因是试样受到较大的吸力, 弱膨胀土试样失水收缩、孔隙比减小明显, 使试样剪切过程中表现出类似超固结黏土的变形特性。

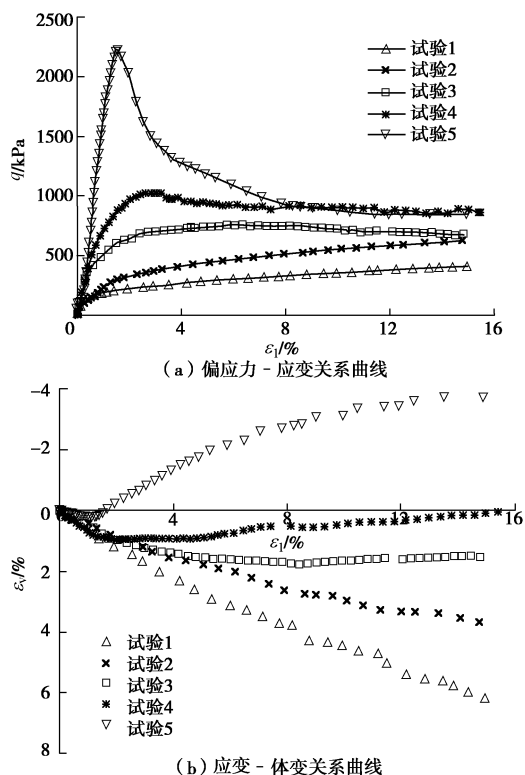


图6 各个试样在常吸力剪切过程中的应力应变关系

Fig. 6 Stress strain behaviors under constant suctions during shearing

4 宽广吸力范围内膨胀土强度的预测

4.1 非饱和南阳膨胀土强度的确定

由于本研究仅进行了相同净围压和不同吸力条件下的三轴剪切试验, 根据文献[2, 5]通过试验得到的结论: 非饱和膨胀土的有效内摩擦角 φ' 近似等于饱和状态下的有效内摩擦角, 随吸力变化不大。另外对初始孔隙比 $e_0=0.80$ 的饱和试样进行了三轴排水剪切试验, 得到饱和试样围压分别等于100, 200, 400 kPa条件下的排水剪切试验结果, 如图7所示。可得到抗剪强度指标 $c'=11$ kPa, $\varphi'=23.2^\circ$ 。根据图6(a)可确定在净围压等于100 kPa和不同吸力条件下试样破坏时的偏应力如图8所示。强度破坏标准为: ①应力应变关系有峰值取峰值的值; ②应力应变关系无峰值取轴向应变为15%所对应的值。其中对数坐标中的 $s=1$ kPa的值用 $s=0$ kPa代替。试验结果表明, 剪切破坏时非饱和和弱膨胀土的偏应力随着吸力的增加呈非线性增加。

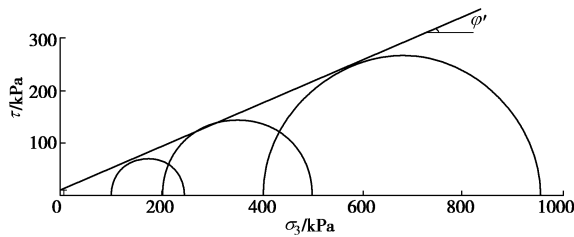


图7 饱和南阳膨胀土的三轴试验结果

Fig. 7 Results of triaxial tests on saturated Nanyang expansive soils

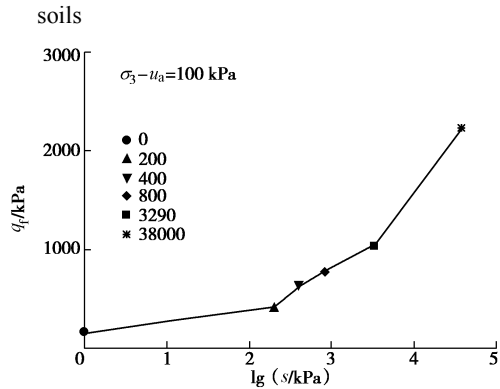


图8 破坏时非饱和南阳膨胀土偏应力的实测值

Fig. 8 Measured deviatoric stresses of unsaturated Nanyang expansive soils at failure

4.2 非饱和南阳膨胀土强度的预测

目前广泛使用的非饱和土的强度公式主要有两类: Bishop 公式^[18]和 Fredlund 公式^[19]。应用 Bishop 的有效应力, 可得到非饱和土强度公式为

$$\tau_f = c' + [\sigma - u_a + \chi(u_a - u_w)] \tan \varphi' \quad (1)$$

式中 c' 为有效黏聚力; σ 为法向总应力; φ' 为内摩擦角; u_a 为孔隙气压力; u_w 为孔隙水压力; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; χ 为有效应力系数。

处团粒内小孔隙水分被认为对非饱和土的抗剪强度不产生影响, 只有大孔隙中的毛细水对非饱和土抗剪强度产生贡献。因此土体的宏观饱和度 S_{rm} (即团粒间的孔隙水) 参与非饱和和引起的强度贡献, 而土体的微观饱和度 S_{sm} (团粒内的孔隙水) 应从饱和度中扣除^[9-10]。即用有效饱和度 $(S_r - S_{sm})/(1 - S_{sm})$ 代替有效应力系数 χ , 式 (1) 可修正为

$$\tau_f = c' + \left[\sigma - u_a + \frac{S_r - S_{sm}}{1 - S_{sm}} (u_a - u_w) \right] \tan \varphi' \quad (2)$$

用 Bishop 的有效应力, 三轴应力状态下的破坏准则可以表达为

$$q_f = c' \frac{6 \cos \varphi'}{3 - \sin \varphi'} + M(\bar{p} + \chi s) \quad (3)$$

式中 $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 为偏应力, σ_1 , σ_3 为分别大、小主应力; $\bar{p} = [(\sigma_1 + 2\sigma_3)/3] - u_a$ 为平均净应力; $M = 6 \sin \varphi' / (3 - \sin \varphi')$ 为 $\bar{p} - q$ 平面上破坏线的斜率, $s = u_a - u_w$ 。

用考虑微观饱和度 S_{sm} 的有效饱和度 $S_e =$

$(S_r - S_{sm})/(1 - S_{sm})$ 代替有效应力系数 χ , 式 (3) 可修正为

$$q_f = c' \frac{6 \cos \varphi'}{3 - \sin \varphi'} + M(\bar{p} + S_e s) \quad (4)$$

利用式 (3)、(4) 即可对南阳膨胀土的强度进行预测计算。公式中的 c' 和 φ' 可通过饱和土的强度试验测得, 微观饱和度 S_{sm} 可由图 2 所示的压汞试验结果确定, 本试验所用的压实南阳膨胀土样的 $S_{sm} = 21.2\%$ 。

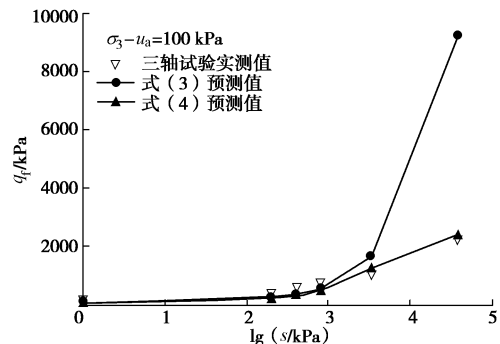


图9 破坏时非饱和南阳膨胀土偏应力的实测值与预测值比较

Fig. 9 Comparison between measured and predicted deviatoric stresses of unsaturated Nanyang expansive soils at failure

图 9 表示了用式 (3)、(4) 计算得到不同吸力时的偏应力与实测值的对比。利用式 (3) 时, 假定有效应力系数 χ 等于饱和度, 即 $\chi = S_r$, 也就是假定有效应力是平均骨架应力。从实测和预测的强度比较可知, 当吸力较高时, 式 (3) 的预测结果明显高于实测值。而用有效饱和度的预测公式 (式 (4)) 得到的预测值与实测值比较, 在宽广吸力范围内两者比较接近, 尤其是在高吸力情况下, 可以较好地预测非饱和弱膨胀土的抗剪强度。因此, 利用修正后的非饱和土强度公式 (式 (4)) 可较好地预测宽广吸力范围内非饱和和南阳弱膨胀土的抗剪强度。

5 结 论

本文在宽广吸力范围内对初始状态大致相同而不同吸力的弱膨胀土进行了一系列三轴试验, 得到以下 3 点结论。

(1) 相同净围压和不同吸力下的三轴剪切试验结果表明, 吸力越大, 剪切时的应力应变关系曲线越高, 而剪缩量越小。其主要原因开始剪切时试样的孔隙比随着吸力的增大而减小。

(2) 压汞试验表明, 随着吸力的增加 (干燥的过程) 团粒间的孔隙体积逐渐减少, 而团粒内的孔隙体积基本不变。可确定南阳膨胀土的微观饱和度 S_{sm} 约为 21.2%。

(3) 应用 Bishop 的非饱和土强度公式预测非饱和和南阳膨胀土的强度时, 用微观饱和度 S_{sm} 的有效饱和度代替有效应力系数 χ 的预测值与实测值比较接

近, 而用普通饱和度代替有效应力系数 χ 的非饱和土强度预测值与实测值相差较大, 特别是高吸力时相差数倍。因此用有效饱和度修正后的非饱和土强度公式可较好地预测宽广吸力范围内弱膨胀土的抗剪强度。

参考文献:

- [1] 孔令伟, 陈正汉. 特殊土与边坡技术发展综述[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(5): 141 - 161. (KONG Ling-wei, CHEN Zheng-han. Advancement in the techniques for special soils and slopes[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(5): 141 - 161. (in Chinese))
- [2] 卢再华, 陈正汉, 曹继东. 原状膨胀土的强度变形特性及其本构模型研究[J]. 岩土力学, 2001, **22**(3): 339 - 342. (LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, CAO Ji-dong. A study on strength and deformation characteristics and the constitutive model of natural expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, **22**(3): 339 - 342. (in Chinese))
- [3] 龚壁卫, 周小文, 周武华. 干—湿循环过程中吸力与强度关系研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 207 - 209. (GONG Bi-wei, ZHOU Xiao-wen, ZHOU Wu-hua. Test on suction and strength of expansive soil in adsorption-absorption cycle of moisture[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 207 - 209. (in Chinese))
- [4] 缪林昌, 崔颖, 陈可君, 等. 非饱和重塑膨胀土的强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 274 - 276. (MIAO Lin-chang, CUI Ying, CHEN Ke-jun, et al. Test on strength of unsaturated remolded expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 274 - 276. (in Chinese))
- [5] 詹良通, 吴宏伟. 非饱和膨胀土变形和强度特性的三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 196 - 201. (ZHAN Liang-tong, NG C W W. Experimental study on mechanical behavior of recompacted unsaturated expansive clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 82 - 87. (in Chinese))
- [6] 刘斯宏, 汪易森, 朱克生, 等. 有荷条件下南阳膨胀土强度试验及其应用[J]. 水利学报, 2010, **41**(3): 361 - 367. (LIU Si-hong, WANG Yi-sen, ZHU Ke-sheng, et al. Experimental study on strength characteristics of Nanyang expansive soil under loading and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, **41**(3): 361 - 367. (in Chinese))
- [7] 孔令伟, 周葆春, 白颢, 等. 荆门非饱和膨胀土的变形与强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(10): 3036 - 3042. (KONG Ling-wei, ZHOU Bao-chun, BAI Hao, et al. Experimental study of deformation and strength characteristics of Jingmen unsaturated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(10): 3036 - 3042. (in Chinese))
- [8] 包承纲, 郭熙灵, 程展林, 等. 南水北调(中线)工程若干岩土问题研究[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议. 北京, 2003: 120 - 132. (BAO Cheng-gang, GUO Xi-ling, CHENG Zhan-lin, et al. Geotechnical research in the middle route of South-to-North Water Transfer Project[C]//Proceeding of 9th National Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Academic-China Civil Engineering Society. Beijing, 2003: 120 - 132. (in Chinese))
- [9] ALONSO E E, PEREIRA J M, VAUNAT J, et al. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils[J]. Géotechnique, 2010, **60**(12): 913 - 925.
- [10] ALONSO E E, PINYOL N M, GENS A. Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling[J]. Géotechnique, 2013, **63**(6): 463 - 478.
- [11] GBJ 112—87 膨胀土地区建筑技术规范[S]. 1987. (GBJ 112—87 Technical code for buildings in expansive soil regions[S]. 1987. (in Chinese))
- [12] ROMERO E, DELLA VECCHIA G, JOMMI C. An insight into the water retention properties of compacted clayey soils[J]. Géotechnique, 2011, **61**(4): 313 - 328.
- [13] SIVAKUMAR V. A critical state framework for unsaturated soils[D]. Sheffield: University of Sheffield, 1993.
- [14] HO D Y F, FREDLUND D G. A multi-stage triaxial test for unsaturated soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1982, **5**(2): 18 - 25.
- [15] ROMERO E, VAUNAT J. Retention curves of deformable clays[C]//Proceedings of International Workshop on Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils. Trento: A A Balkema, 2000.
- [16] 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 - 1806. (SUN De-an, ZHANG Jun-ran, LÜ Hai-bo. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(7): 1839 - 1806. (in Chinese))
- [17] OIML R121 饱和盐溶液标准相对湿度值[S]. 2000. (OIML R121 The standard values of relative humidity for saturated salt solutions[S]. 2000. (in Chinese))
- [18] BISHOP A W. The principle of effective stress[J]. Teknisk Ukeblad, 1959, **106**(39): 859 - 863.
- [19] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, **15**(3): 313 - 321.