

DOI: 10.11779/CJGE2018S1036

平行试样土水特征曲线及其力学性质的试验研究

杨 钢^{1, 2}, 杨 庆^{1, 2}, 李吴刚²

(1. 海岸和近海工程国家重点实验室(大连理工大学), 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学岩土工程研究所, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 基于压力板仪对相同制样参数的 8 个三轴试样进行 SWCC 试验, 对比试样土水特征曲线的差异, 并对试验完成后的 7 个有效三轴试样进行无侧限抗压强度试验。通过对比研究剪切力与剪切位移关系、峰值强度与饱和度关系等内容, 对试样的力学性质进行研究, 并通过饱和度时程曲线对其结果进一步分析。研究表明: 即便是相同条件制备的试样, 其 SWCC 之间也会存在差异性, 并与一定基质吸力范围相对应, 但随着基质吸力增大, SWCC 趋于一致; 在 SWCC 试验后, 由于高基质吸力下试样的平衡饱和度差异极小, 试样的峰值强度与平衡饱和度没有必然联系; 在一定基质吸力范围内, 饱和度时程曲线相近的试样, 最终的力学特性也相近, 考虑这一基质吸力范围对应的孔隙在试样中占主导地位, 因此这段时程曲线可以为试样均一性的研究提供一定思路。

关键词: SWCC; 压力板仪; 试样差异性; 无侧限抗压强度; 时程曲线

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0224-05

作者简介: 杨 钢(1979-), 男, 工程师, 主要从事非饱和土特性方面的科研。E-mail: foreignsteel@dlut.edu.cn。

Experimental research on soil water characteristic curve of parallel specimens and its influence on mechanical behavior

YANG Gang^{1, 2}, YANG Qing^{1, 2}, LI Wu-gang²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The drying tests on eight triaxial specimens with the same remolding condition are carried out for soil water characteristic curve (SWCC). The differences of SWCC are compared. The unconfined compressive strength tests on seven effective specimens after SWCC tests are carried out. The relationships of shear force-shear displacement, peak strength-saturation degree, and saturation degree-time are investigated for analyzing the mechanical behavior of specimens. The results show that there are significant differences for SWCC in a certain range of matric suction, and with the increase of matrix suction SWCC will tend to be uniform. After SWCCs tests are finished, differences of equilibrium saturation degree between parallel specimens are very small because of high matrix suction, and then the peak strength and equilibrium saturation degree do not have necessary connection. At a certain range of matric suction, the specimens with similar curves of saturation degree versus time have approximate mechanical behavior. Because the pore ranges corresponding to this range of matric suction play a leading role in the specimens, the uniformity of specimens will be studied by the corresponding curves of saturation degree versus time.

Key words: SWCC; pressure plate extractor; difference of specimen; unconfined compressive strength; time-history curve

0 引 言

尽管“吸力”这个概念在上世纪初就已在土壤物理学中出现^[1-3], 但是引入非饱和土研究却是在 20 世纪 50 年代^[4-5]。随着吸力概念出现的, 其与含水率(重力含水率、体积含水率、饱和度)之间的对应关系成为研究非饱和土的本构关系之一, 通常称之为土水特征曲线(SWCC)。其中“特征”一词, Nuth 等^[6]认为这表明 SWCC 是土的固有属性, 即对于某一确定的土而言, SWCC 应当是惟一的, 但大量试验研究证明土

水特征曲线的受到颗粒级配、矿物组成、孔隙结构、应力历史、温度等因素的影响^[7-10], 因此土水特征曲线试验结果并不唯一。除此之外, 平行试样的差异性也将导致 SWCC 结果不唯一, 这不光体现在原状试样上^[11], 重塑试样也同样存在^[12-14]。究其原因就在于试样通过控制初始干密度和初始含水率来保证试样孔隙

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572252); 辽宁省博士科研启动基金项目(201601055)

收稿日期: 2017-06-11

比的一致性, 但无法保证具有明显随机性的孔隙尺寸与分布的均一性, 这必然会影响孔隙连通性, 而孔隙连通性则会对 SWCC 造成严重影响^[15], 因此即便是同等条件下制作的重塑试样, 它们的 SWCC 也可能产生差异。

平行试样的差异性不仅对 SWCC 产生影响, 还将对非饱和土的力学特性产生影响, 而这种影响主要来自于平衡饱和度的差异。由于气相的加入, 非饱和土试样中同时存在体积水和毛细水。Fisher^[16]认为毛细水仅在与颗粒接触的法向方向起作用, 因而起到加固土体的作用。Wheeler 等^[17]认为体积水的情况要复杂的多, 不仅会引起法向力, 还会产生切向力, 同时他也指出高饱和度的试样比低饱和度试样拥有更多的重力水和较少的毛细水, 因此试样会因毛细水与体积水所占比例不同而产生不同的力学性质。

本文对相同制样条件下的 8 个重塑三轴试样进行脱湿试验获取土水特性曲线, 进而对其中 7 个有效试样进行无侧限抗压强度试样, 分析试样力学性质的变化情况。通过土水特征曲线与抗剪强度的对比研究, 进一步分析两者之间的关系。

1 试验方案

1.1 试样制备

试验用土来自大连地区典型粉质黏土, 其天然含水率为 5.32%, 塑限为 12.5, 液限为 25.6, 塑性指数为 13.1, 其颗粒级配曲线如图 1 所示, 不均匀系数 $C_u=2$, 颗粒均匀, 级配不良。

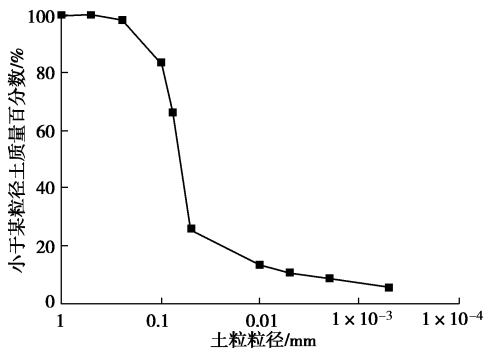


图 1 土的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve

三轴试样直径为 39.1 mm, 高度为 80 mm, 初始含水率为 17.5%, 初始干密度为 1.71 g/cm³, 初始孔隙比为 0.556。为防止试验过程中试样拿取受损, 同时尽量保证孔隙气压力从试样顶部开始侵入土体, 本次试验以亚克力材质制作重塑筒 (如图 2 所示), 重塑筒外径 45 mm, 内径 39.1 mm, 高度 80 mm。制样前需在

重塑筒内侧涂一薄层凡士林, 然后准确称量土样, 采用湿捣法, 分 5 层击实。由于重塑筒为完整圆筒, 因此改进的抽真空饱和流程如下:

- (1) 首先将饱和器置于抽气缸内盖紧抽真空, 当抽气缸内真空度达到极限 (接近一个大气压) 后, 保持真空度 1 h 左右。
- (2) 注入无汽水, 淹没试样约一半高度时, 停止注水, 继续抽真空 1 h 左右。
- (3) 再次注入无汽水, 直至水面淹没试样顶面, 用真空罐继续保持真空, 试样在抽气缸中静置 10 h 以上。

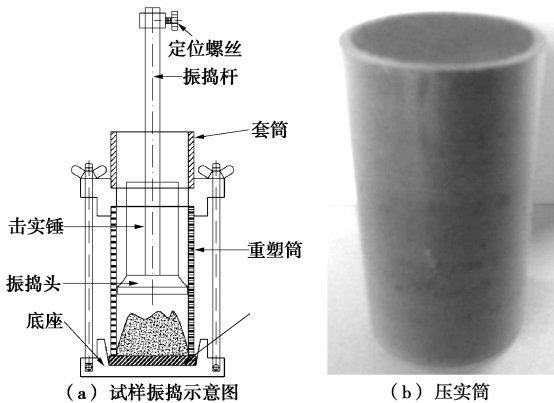


图 2 三轴制样

Fig. 2 Preparation of triaxial specimen

1.2 试验方法

计划对 8 个三轴试样进行脱湿试验, 获取土水特征曲线。试验由 10 kPa 开始至 450 kPa, 共施加 13 级基质吸力。然后对 8 个三轴试样进行无侧限抗压强度试验, 其相关参数如表 1 所示。

试样脱湿平衡采用美国 Soilmoisture 公司压力板仪, 高进气陶土板最大进气值为 500 kPa。压力板仪的孔隙水压力默认为零, 因此施加的孔隙气压力即为当前的基质吸力。由于压力板仪未配备数据采集系统, 试样的失水变化需通过记录试样质量来计算, 因此采用 Sartorius 精密天平称量试样, 其称量范围为 610 g, 称量精度为 0.01 g。试样每次放入压力板仪前, 需用细毛刷子蘸无气水轻刷高进气陶土板表面, 在其表面覆盖一层无气水膜, 使得试样放回后与高进气陶土板紧密接触, 保证孔隙连通性。整个试验过程中, 每 24 h 记录一次数据, 并规定每级基质吸力至少量测 10 d。根据文献[12]和文献[13], 当 24 h 内失水质量小于试样体积的 0.05%, 即认为试样平衡。平衡后的试样根据式 (1) 计算当前饱和度。

$$S_r = \left[1 - \frac{(1+e)}{\rho_w e V} (M_{sat} - M_i) \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中 M_{sat} 为饱和土质量; M_i 为平衡过程中每次称量试样质量; ρ_w 为水的密度; V 为试样总体积。

表 1 试样参数

Table 1 Parameters of specimens			
试样编号	干密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和含水率 / %	450 kPa 基质吸力下的 平衡饱和度/%
S01	1.711	19.90	41.13
S02	1.709	20.32	40.61
S03	1.715	20.17	40.24
S04	1.711	20.13	40.27
S05	1.714	20.20	40.21
S06	1.710	20.12	39.84
S07	1.712	20.01	40.57
S08	1.713	20.32	39.94

无侧限抗压强度试验在应力 - 应变控制式三轴剪切渗透试验仪内中完成 (见图 3), 剪切速率采用 0.1 mm/min, 通过体变装置, 测量试样在剪切过程中的总体变。



图 3 应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪

Fig. 3 Stress-strain controlled triaxial shear permeation test apparatus

2 土水特征曲线试验分析

根据试验结果, 可认为 1 kPa 基质吸力下试样未发生排水, 因此将 1 kPa 基质吸力作为 SWCC 的起点, 可在半对数坐标系下完整表达 SWCC。在试验过程试样 S06 在中部产生横向裂纹, 其原因在文献[13]中已讨论, 因此该试样的 SWCC 结果未在本文考虑, 相应也未进行无侧限抗压强度试验。

图 4 显示了 7 个三轴试样的 SWCC。图 5 显示了在各级基质吸力下, 平行试样间平衡饱和度的最大差值。从图 4 中可以看出, 在 20 kPa 基质吸力时, 7 个试样的饱和度开始出现较大差异, 随后差异持续存在,

直到 150 kPa 基质吸力之后时, 差异开始逐渐减小。对比图 5 所示结果的可以看出自 20 kPa 基质吸力后, 差值随着基质吸力的增加而减小, 即便在 350 kPa 基质吸力平衡后, 差值减小趋缓, 但数据显示差值的确是减小。上述分析表明, 随着基质吸力增加, SWCC 曲线差异将逐渐减小而趋于一致。这一情况与文献 13 和[14]中的结果相一致, 符合 Jotisankasa 等^[18]认为在高吸力下, 土水特征曲线对土体结构的依赖将减小, 而更趋于均匀的结果。

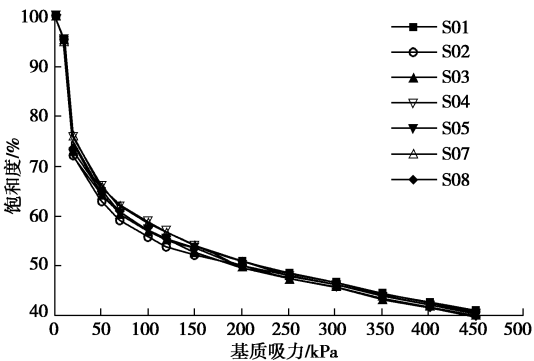


图 4 相同初始条件下的 7 个三轴试样的 SWCC

Fig. 4 SWCCs of seven triaxial specimens with same original condition

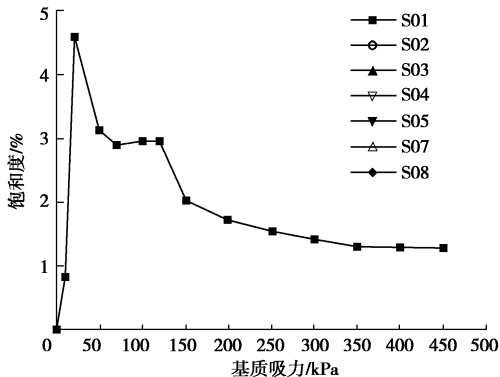


图 5 各基质吸力下平衡饱和度最大差值

Fig. 5 Maximum differences of equilibrium saturation degree under different matrix suctions

此外, 从图 5 中可以看出在 20~150 kPa 基质吸力范围内这种平衡饱和度差值变化最为明显; 而从图 4 来看, 如果将平衡饱和度取均值, 那么从 20 kPa 到 150 kPa 基质吸力, 试样的平衡饱和度由 95.26%降低到 53.47%, 这表明该段基质吸力对应的孔隙总和占据了试样总孔隙的 41.79%。显然在这个基质吸力范围内, 由于大量孔隙的存在, 极易产生大小分布不均, 连通性有差异的情况, 因而受其影响的平衡饱和度也会产生明显的差异。

3 无侧限抗压强度试验分析

3.1 剪切力与剪切位移关系

图 6 显示了 7 个三轴试样在无侧限抗压强度试验下的剪切力与剪切位移关系曲线。从图 6 中可以看出在这些平行试样间的剪切力与剪切位移曲线没有完全一致的情况, 特别是试样 S02 的剪切力与剪切位移曲线差异明显, 表明即便的严格制作的平行试样, 在脱湿平衡后依然存在力学性质的差异。在引言的论述中, 一般认为这种力学性质的差异都是由平衡饱和度差异引起的, 文献[19]的试验结果也表明在相同基质吸力下, 饱和度较小的试样具有较高的峰值强度。为此需对峰值强度与平衡饱和度关系进行分析。

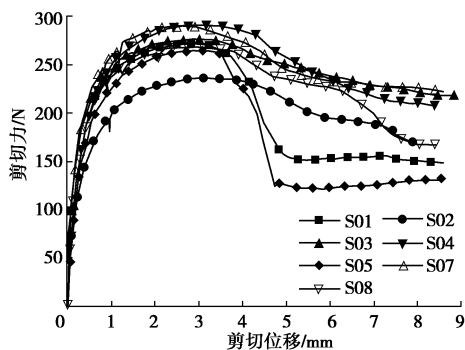


图 6 剪切力 - 剪切位移关系曲线

Fig. 6 Curves of shear stress versus horizontal displacement

3.2 峰值强度与饱和度关系

从图 7 所示的峰值强度与平衡饱和度关系图来看, 本次试验结果未体现出平衡饱和度与峰值强度之间的规律性。从表 1 的数据与文献 19 中的相关数据来看, 在两次试验中, 平行试样间的平衡饱和度差异程度明显不同。在本文中, 450 kPa 基质吸力下平行试样间的平衡饱和度相差极小, 因而平衡饱和度未能成为控制峰值强度的主导因素。

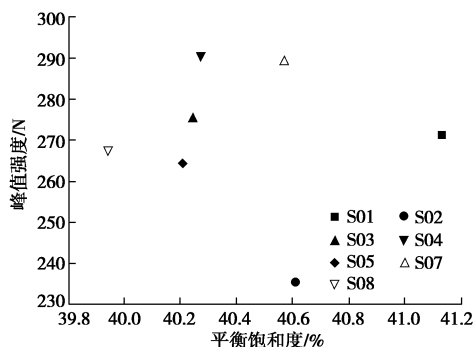


图 7 峰值强度与平衡饱和度关系图

Fig. 7 Relationship between peak strength and equilibrium saturation degree

此外, 将图 7 所示的峰值强度按相近情况进行划分, 可分为 3 组: 试样 S04 和试样 S07 一组, 试样 S01、试样 S03、试样 S05 和试样 S08 一组, 试样 S02 一组。对比图 6 所示结果可以发现, 第一组中试样 S04 和试

样 S07 的剪切力 - 剪切位移关系曲线的确比较相近; 而第二组中试样 S01 和试样 S05 的剪切力 - 剪切位移关系曲线相似, 试样 S01 和试样 S05 的剪切力 - 剪切位移关系曲线较为接近。为了对这 3 对试样的剪切力 - 剪切位移关系做进一步研究, 下面将引入饱和度时程曲线作对比分析。

3.3 饱和度时程曲线分析

图 8 显示了 7 个三轴试样的饱和度时程曲线, 从图中可以看出 10 kPa 基质吸力和 200~450 kPa 基质吸力范围内, 7 个平行试样的时程曲线非常接近, 没有显著差异。但在 20~150 kPa 基质吸力范围内存在明显区别, 并且存在与 3.2 中分组相似的情况。对比图 6 和图 8 可以发现, 在这一范围内试样 S04 和试样 S07 的时程曲线基本一致, 而两个试样的剪切力 - 剪切位移关系曲线也相近; 试样 S01、试样 S03、试样 S05 和试样 S08 的时程曲线在这一范围内逐渐趋于一致, 而这 4 个平行试样也具有相近的峰值强度。显然这一范围的基质吸力平衡对试样的力学性质具有显著影响。

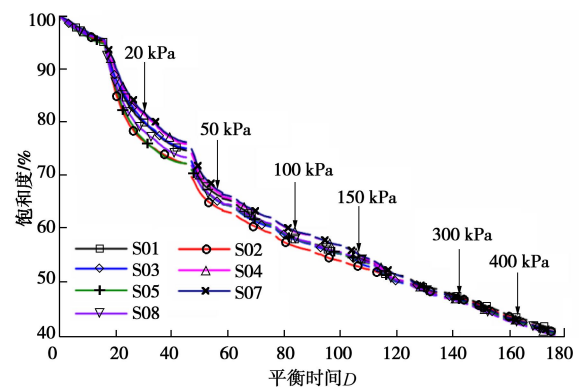


图 8 每日饱和度时程曲线

Fig. 8 Curves of saturation degree versus time

研究表明^[20]土中的孔隙可以采用毛细管模型考虑。若将土粒视作等粒圆球则土颗粒排列的最松散堆积形式和最紧密堆积形式如图 9 所示。由于三轴试样采用振捣密实, 因此根据最紧密堆积形式的几何尺寸计算土粒粒径 R , 则 20 kPa 基质吸力对应的土粒粒径为 0.189 mm, 150 kPa 基质吸力对应的土粒粒径为 0.013 mm。对比图 1 所示的颗粒级配曲线可以发现, 这正对应于颗粒级配曲线的剧烈变化阶段, 即这个粒径范围内的土粒在试样中占主导地位, 那么其所形成的孔隙也必然占主导地位, 而时程曲线则在一定程度上代表了孔隙的分布, 考虑到对应的剪切力 - 剪切位移关系曲线的相近情况, 因此在 20~150 kPa 基质吸力范围内的时程曲线则可以为试样均一性的研究提供

一定思路。

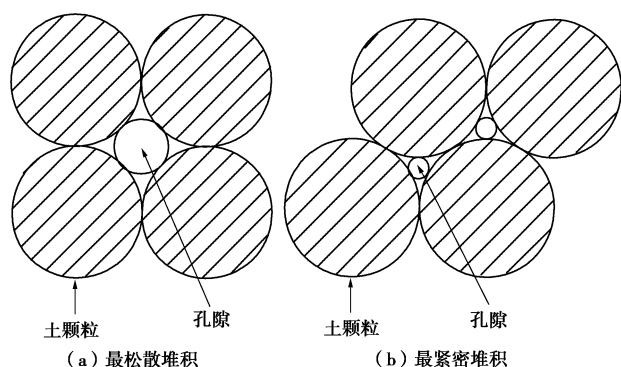


图9 两种典型土颗粒排列形式

Fig. 9 Two typical packing systems of ball-shaped particles

上述分析尚难以对最终峰值强度的变化做出解释。但在这一基质吸力范围内，峰值强度最大的试样 S04 和试样 S07，其时程曲线明显较高，即相应的饱和度较高，考虑此时的孔隙情况最为复杂，那么在后续的平衡过程中试样 S04 和试样 S07 可能会存在较多的独立毛细水情况，因此在进行无侧限抗压强度试验时，尽管平行试样间的平衡饱和度差异不大，但是这两个试样的强度最高，而其他试样的强度也会因毛细水含量的不同导致差异。

4 结 论

通过对 8 个平行三轴试样中 7 个有效试样的土水特征曲线试验以及对试验后的试样进行无侧限抗压强度试验，对试样的土水特征曲线差异以及对非饱和和土力学性质的影响进行研究，相关结论如下：

(1) 20 kPa 到 150 kPa 基质吸力范围对应的孔隙总和占据了试样总孔隙的 41.79%，因此极易产生孔隙大小分布不均，孔隙连通性有差异的情况，导致土水特征曲线存在差异，但随着基质吸力增大土水特征曲线将趋于一致。

(2) 相同条件下制作的平行试样，其非饱和和土力学性质存在明显差异，但在土水特征曲线试验后，由于高基质吸力下平行试样间的平衡饱和度差异极小，因此平衡饱和度与峰值强度没有必然关系。

(3) 在 20 kPa 到 150 kPa 基质吸力范围，饱和度时程曲线相近的试样，最终力学特性也相近，考虑这一基质吸力范围对应的孔隙在试样中占主导地位，因此这段时程曲线可以为试样均一性的研究提供一定思路。

参考文献：

[1] BUCKINGHAM E. Studies of the movement of soil

moisture[M]. Washington D C: United States Department of Agriculture, Bureau of Soil, 1907.

[2] GARDNER W, WIDTSOE J A. The movement of soil moisture[J]. Soil Science, 1921, **11**(3): 215 - 232.

[3] RICHARDS L A. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators[J]. Journal of Agricultural Research, 1928, **37**: 719 - 742.

[4] CRONEY D, COLEMAN J D. Soil thermodynamics applied to the movement of moisture in road foundations[C]// Proceedings of the Seventh International Congress for Applied Mechanics London: Modern Book Co., Ltd., London, 1948: 163 - 177.

[5] BISHOP A W. The principle of effective stress[J]. Teknisk Ukeblad, 1959, **106**(39): 859 - 863.

[6] NUCH M, LALLOUI L. Advances in modeling hysteresis water retention curve in deformable soils[J]. Computers and Geotechnics, 2008, **35**(6): 835 - 844.

[7] MILLER C J. Impact of soil type and compaction conditions on soil water characteristic[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002, **128**(9): 733 - 742.

[8] 龚壁卫, 吴宏伟, 王 斌. 应力状态对膨胀土 SWCC 的影响研究[J]. 岩土力学, 2004, **25**(12): 1915 - 1918. (GONG Bi-wei, CHARLES W W Ng, WANG Bin. Influence of stress states on soil-water characteristics of expansive soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(12): 1915 - 1918. (in Chinese))

[9] 汪东林, 栾茂田, 杨 庆. 重塑非饱和黏土的土-水特征曲线及其影响因素研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(3): 751 - 756. (WANG Dong-lin, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Experimental study of soil-water characteristic curve of remolded unsaturated clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(3): 751 - 756. (in Chinese))

[10] 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): 1463 - 1468. (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): 1463 - 1468. (in Chinese))

[11] 陈 伟, 孔令伟, 郭爱国, 等. 吸力对弱膨胀土强度贡献的试验研究与预测分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(7): 1783 - 1787. (CHEN Wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Experimental study and predictive analysis of contribution of matrix suction to shear strength of weak expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(7): 1783 - 1787. (in Chinese))

(下转第 72 页)