

## 上海软土非饱和压缩特征

叶为民<sup>1,2</sup>, 朱悦铭<sup>1</sup>, 陈宝<sup>1</sup>, 叶斌<sup>1</sup>

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 教育部城市环境可持续发展联合研究中心, 上海 200092)

**摘要:** 通过室内吸力控制的非饱和 1 维压缩试验, 获得了上海软土在不同吸力下的压缩—回弹—再压缩曲线, 进而获取了非饱和土 2 个重要压缩性指标——回弹指数和压缩指数; 分析探讨了基质吸力对非饱和土强度的影响, 并采用 Alonso 弹塑性模型对试验实测数据进行了拟合分析, 获取了前期固结压力随基质吸力的变化关系曲线。试验结果表明, 随着基质吸力的增加, 土的压缩性不断降低; 当前吸力条件下, 孔隙比随竖向压力变化曲线阶段特征明显, 包括弹性阶段、弹塑性阶段以及回弹与再压缩阶段; 非饱和压缩过程中, 前期固结压力随基质吸力减小而减小, 土的孔隙比与基质吸力和竖向应力之间呈曲面关系。

**关键词:** 上海软土; 非饱和土; 压缩试验; 吸力

**中图分类号:** P 642.3

**文献标识码:** A

### Compressibility of Shanghai Unsaturated Soft Soil

YE Weimin<sup>1,2</sup>, ZHU Yueming<sup>1</sup>, CHEN Bao<sup>1</sup>, YE Bin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Center for Urban Environment and Sustainable Development of the Ministry of Education, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on one-dimensional compression tests, compression-rebound-compression curve and the compression index and rebound index of Shanghai soft soil were obtained. At the same time, the influences of suction on the strength of the unsaturated soil were analyzed. Then the test results were simulated with Alonso elastic-plastic model, and the pre-consolidation pressure versus suction (loading-collapse curve) curve was fitted. Results show that the compressibility of the soil decreases while the matric suction increases. For certain suctions,  $e$ - $\lg p$  curve clearly step phases in elastic, elastic-plastic and rebound-recompressed phases. With compression of unsaturated soil, the pre-consolidation pressure decreases with suction decreases. There is a surface among pore ration,

suction and vertical stress.

**Key words:** Shanghai soft soil; unsaturated soil; compression test; suction

非饱和土的压缩与渗透性能比饱和土复杂得多<sup>[1-2]</sup>。国外从 20 世纪 30 年代开始研究非饱和土问题, 但由于难度大, 故进展缓慢。1941 年 Boit 对含有封闭气泡的非饱和土提出了一般性固结理论, 建立了以有效应力( $\sigma - u_w$ )和孔隙水压力  $u_w$  表达的本构方程( $\sigma$  为总应力), 将应力和应变联系起来。Bishop 根据 Mohr-Coulomb 破坏准则提出了非饱和土的抗剪强度公式, 其合理性曾为许多学者所接受, 但由于公式中参数取值的影响因素众多, 且吸力的值也较难以测定, 因而限制了其在工程实践中的应用。1978 年, Fredlund 基于双应力状态变量建立了非饱和土抗剪强度表达式<sup>[3]</sup>, 将非饱和土视为 4 相系, 即在水、气、土粒之外增加了水气分界面作为第 4 相, 称为收缩膜。选用净应力( $\sigma - u_a$ )和基质吸力( $u_a - u_w$ )作为应力状态变量( $u_a$  为孔隙气压力), 分别得到了土结构的本构方程、液相的本构方程以及气相的本构方程。20 世纪 90 年代初, Alonso 根据压缩试验和三轴试验结果提出了非饱和土的弹塑性本构模型, 定义 LC (loading collapse) 屈服线来描述前期固结压力随吸力变化的规律。随后, 国外许多学者还从不同角度相继推导出了非饱和土变形以及孔隙水流和气流的耦合方程<sup>[4]</sup>。

在试验研究方面, 扈胜霞等对原状黄土进行了非饱和固结试验, 得到了非饱和原状黄土的土水特性和压缩特性<sup>[5]</sup>。陈正汉等研制出国内第 1 台非饱和土固结仪和第 1 台非饱和土直剪仪。这 2 种仪器都采用内置荷载传感器和数据自动采集系统, 既可

收稿日期: 2010-07-02

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划 (2006BAJ27B02-02); 国家自然科学基金 (41030748, 40802069); 上海市地质工程重点学科 (B308)  
第一作者: 叶为民 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为环境地质及非饱和土力学。E-mail: ye\_tju@tongji.edu.cn

控制竖向压力,又可控制基质吸力<sup>[6]</sup>.钱春香等对饱和和黏土的固结特性进行了试验研究<sup>[7]</sup>.火映霞等对原状路基土进行了 1 维次固结试验研究,讨论了次固结系数,蠕变速率和时间关系<sup>[8]</sup>.魏海云等通过对高饱和度土的压缩和固结特性进行研究,建立了高饱和土的排水固结方程,深入分析了荷载作用下高饱和度土的排水固结特性<sup>[9]</sup>.叶为民等通过试验研究了上海软土的土水特征与非饱和三轴强度<sup>[1,10]</sup>.但是少有文献对上海软土的非饱和和压缩特性进行研究.

本文采用非饱和固结试验设备,对上海第④层软土开展了室内非饱和固结试验研究,并据以分析探讨了其非饱和和压缩特性.

## 1 上海软土非饱和和压缩试验

### 1.1 试验设备

本试验仪器为解放军后勤工程学院研制的 FGJ-20 型非饱和固结仪<sup>[6]</sup>.该仪器主要由台架、试样盒、气压室、加载系统、排水系统、位移量测系统、孔压和荷载量测系统等部件组成.其中,加载系统与常规固结仪相同.与常规固结仪相比,非饱和土固结仪增设了压力室,可以施加气压,控制试样基质吸力.吸力控制采用轴平移控制技术.在该仪器上横梁上设置百分表,以测量土体的竖向位移.

### 1.2 试验土样

本试验用土取自上海某工程现场.根据该项目地质资料,土样为地下上海地区典型的第④层灰色黏土.试样的基本物理力学性质指标见表 1.

表 1 试样的基本物理力学性质指标

Tab.1 Basic physical and mechanical properties of tested soil

天然含水量/ %	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	颗粒密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	孔隙比	液限
47.55	1.67	2.74	1.42	20

试验开始时,首先采用环刀切取原状土试样,尺寸为直径 61.8 mm、厚 20 mm,并采用抽气饱和法对土样进行饱和.

### 1.3 试验方法

本次试验共完成了 4 只试样的吸力控制的非饱和和排水压缩试验,控制吸力分别为 140, 200, 400 和 500 kPa.对基质吸力为 140 和 200 kPa 的试样,在竖向应力逐级增加到 1 200 kPa 时,进行回弹试验;对基质吸力为 400 和 500 kPa 的土样,在竖向应力的加

载过程中,分别在竖向应力为 400, 800 和 1 200 kPa 时进行回弹试验.

## 1.4 试验步骤

### 1.4.1 饱和陶土板

在非饱和固结仪的土样容器中,注入脱气水(近满),关闭进水阀门,拧紧固结仪上盖;打开排水阀,施加气压 300~400 kPa,直到排水阀门有较多的水排出;冲洗陶土板下积聚的气泡,打开进水阀,让无气水流过陶土板下面的螺旋槽冲洗 30 s,关闭进水阀门;释放容器中气压至零,移开固结仪上盖,用洗耳球吸走土样容器中的余水,注入无气水(近满);重复以上步骤,直到排水阀有连续的水流出,排除气压,移走压力室上盖.

### 1.4.2 装样

用洗耳球吸走容器中的余水,再用湿毛巾擦去容器盒壁上及陶土板上附着的水;放入土样,上面放一铜质透水板,再放置试样帽和钢球;拧紧压力室上盖.

### 1.4.3 固结试验

打开排水阀,按试验方案先施加气压,并保持恒定,2 周后,再加砝码施加第一级法向荷载.让试样在恒吸力下固结,直到土样压缩变形 2 h 小于 0.01 mm 为止.通常每加一级荷载,需要 2 d 时间来稳定.在此期间,每隔 8~10 h,冲洗陶土板下积聚的气泡;按上述方法施加下一级法向应力.

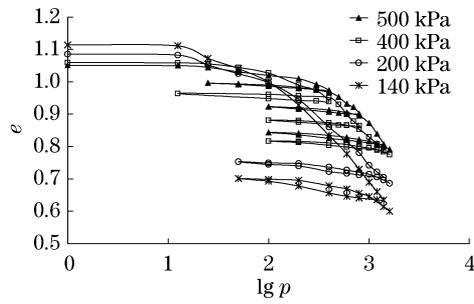
### 1.4.4 结束试验

卸除气压和砝码,卸除土样,关闭计算机,清洗土样容器及陶土板.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 吸力对上海非饱和软土压缩性的影响

不同吸力时,上海软土孔隙比  $e$  随竖向应力  $p$  的变化关系见图 1.图 1 表明,随着基质吸力的增加,土的压缩性不断降低;当前吸力条件下,  $e-\lg p$  曲线阶段特征明显:弹性阶段、弹塑性阶段以及回弹与再压缩阶段.基质吸力较低时(140, 200 kPa),压缩曲线由弹性加载阶段过渡到弹塑性加载阶段时会出现陡降(图 2),随后曲线斜率又趋缓.但是随着吸力的增大,陡降段与弹塑性加载阶段斜率趋于一致.考虑应力历史的沉降固结理论认为,对于正常固结土和欠固结土其固结压缩曲线不会出现陡降阶段,而超固结土则会出现陡降阶段<sup>[11]</sup>.

图 1 不同基质吸力下的  $e-lgp$  曲线Fig.1  $e-lgp$  curves for different suction

## 2.2 前期固结压力随吸力的变化规律

根据试验实测数据,采用卡萨格兰德提出的经验作图法得到上海软土前期固结压力随基质吸力的变化如图 2 所示.图 2 表明,非饱和和压缩过程中,前期固结压力随基质吸力减小而减小.

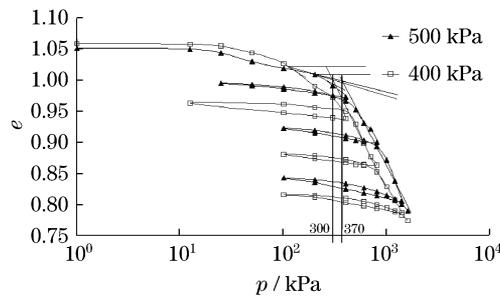


图 2 前期固结压力随基质吸力的变化

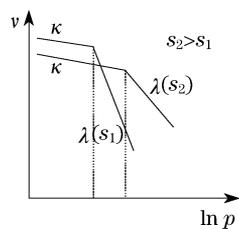
Fig.2 Relationship between pre-consolidation pressure and matric suction

根据 Alonso<sup>[4]</sup> 提出巴塞罗那模型(BBM)中前期固结压力计算公式

$$p_0/p_c = (p_0^*/p_c)^{\frac{\lambda(0)-\kappa}{\lambda(s)-\kappa}} \quad (1)$$

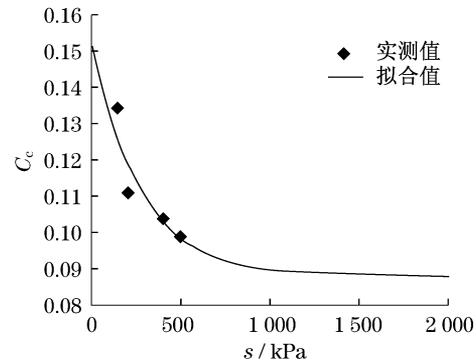
$$\lambda(s) = \lambda(0)[((1-r)e^{-\beta s}) + r] \quad (2)$$

式中:  $p_0$  为前期固结压力;  $p_c$  为参考应力;  $p_0^*$  为饱和条件下的先期固结压力;  $\lambda$  和  $\kappa$  分别为  $v-\ln p$  曲线中的压缩和回弹(图 3)指数;  $v$  是比体积,  $v = 1 + e$ ;  $\lambda(s)$  为随吸力  $s$  变化的压缩系数;  $\lambda(0)$  为饱和压缩系数;  $\beta$  为控制压缩指数随吸力增长速率的参数.

图 3  $v-\ln p$  曲线Fig.3  $v-\ln p$  curve

根据本文实测数据,由式(2)可拟合得上海软土压缩指数与基质吸力之间的关系(图 4):

$$\lambda(s) = 0.152 \times [((1 - 0.578 1)e^{-0.003 614s}) + 0.578 1] \quad (3)$$

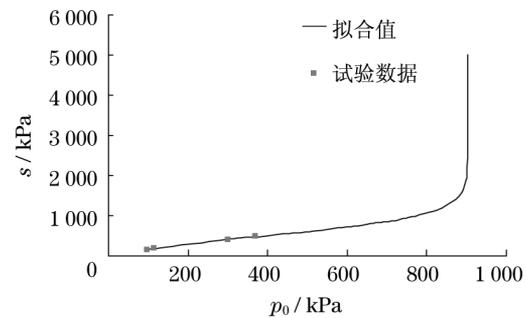
图 4 压缩指数  $C_c$  随基质吸力  $s$  之间的变化关系Fig.4 Relationship between compression index  $C_c$  and  $s$  suction

同时,由式(1),可得前期固结压力随基质吸力的变化关系

$$p_0 = 40^{\frac{0.152-0.012}{\lambda(s)-0.012}} \quad (4)$$

由于相应吸力所对应的回弹指数  $\kappa$  随吸力变化很小,故在计算中视其为常量,取各个吸力回弹指数的平均值;  $p_c$  为参考应力,为简化计算,本次拟合中取值为 1;  $p_0^*$  为饱和条件下的先期固结压力,参考魏道琛对上海前期固结压力研究结果<sup>[12]</sup>,取为 40 kPa.

根据式(3)和(4),便可求得上海软土前期固结压力随基质吸力之间的变化关系,如图 5.据此可以预测,随基质吸力逐渐增大,前期固结压力会趋于一个定值,即当基质吸力增加到某一定数值后,吸力的增大对土的强度贡献增幅越来越小.

图 5 前期固结压力  $p_0$  随基质吸力  $s$  变化Fig.5 Relationship between preconsolidation pressure  $p_0$  and suction  $s$ 

## 2.3 回弹指数随基质吸力变化关系

图 6 为回弹指数  $C_e$  随基质吸力的变化关系.该

图表明,竖向应力一定时,回弹指数先随吸力的增加而减小;当吸力大于 400 kPa 时,回弹指数反而有所上升.该结果与一些学者的试验结果有一定的一致性.

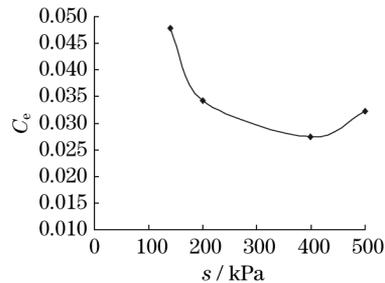


图6 回弹指数  $C_e$  随基质吸力  $s$  变化曲线

Fig.6 Effects of matric suction  $s$  on reconsolidation index  $C_e$ .

相同基质吸力条件下,随着竖向应力的增大,回弹指数增大(图7).这可能是由于竖向应力水平较低时,其对应的回弹应力差便相对较小,从而应变必然较高竖向应力时小.而在  $e-\lg p$  曲线上,由于竖向应力取对数,竖向应力变化虽然较大,但是取对数后不同竖向应力回弹时变化相差不大.从而出现竖向应力越高、回弹指数越大的情况.据图7中比较,基质吸力为 400 kPa 的斜率明显较基质吸力为 500 kPa 的高.即竖向应力增加对基质吸力高的土的强度影响小.且在吸力大于 400 kPa 时,回弹指数与竖向应力呈正比.

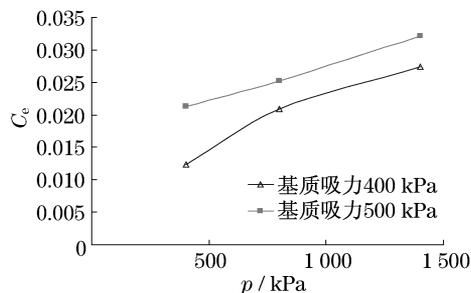


图7 回弹指数  $C_e$  随竖向应力  $p$  变化曲线

Fig.7 Effects of normal stress  $p$  on reconsolidation index  $C_e$ .

杨树荣对路基土进行了非饱和回弹模数试验研究,发现回弹模数随基质吸力的增加而逐渐增加,而当吸力增加到一定值时,回弹模数随基质吸力增加而减小(图8)<sup>[13]</sup>.汪东林等采用非饱和土三轴仪对重塑非饱和低液限黏土的体积变化和含水率变化特性进行了试验研究,也认为回弹指数与基质吸力有一定的相关性,在不同基质吸力条件下,回弹指数变

化不大,但总体表现为随着基质吸力的增大而减小的趋势<sup>[14]</sup>.

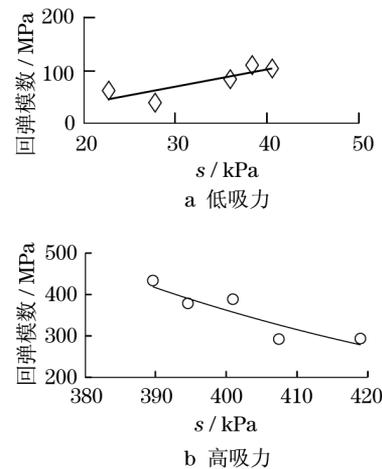


图8 土壤基质吸力与回弹模数的关系<sup>[13]</sup>

Fig.8 Effects of matric suction on resilient modulus<sup>[13]</sup>

#### 2.4 基质吸力、竖向应力与孔隙比间的变化关系

非饱和压缩过程中,上海软土的孔隙比随基质吸力和竖向应力的变化关系如图9所示.图9表明,非饱和压缩过程中,土的孔隙比与基质吸力和竖向应力之间呈曲面关系.图中,竖向应力为0(土样未开始压缩)时,土样孔隙比随基质吸力增加而减小.当对土样施加一定的竖向压力后,竖向应力为 1 400 kPa 时,土样孔隙比随基质吸力增加而增加.这是由于随基质吸力增大,土样强度增加,从而压缩性降低,即施加相同级数的竖向压力后,土样孔隙比变化幅度小,特别是压缩过程开始阶段,孔隙比与竖向压力之间的曲线曲率不断减缓.从而初始压缩时,基质吸力大的孔隙比小,而当竖向应力达到一定值后,随基质吸力增加孔隙比反而增大.

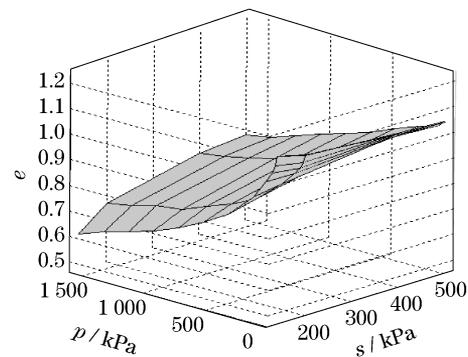


图9 孔隙比  $e$  与基质吸力  $s$ 、竖向应力  $p$  之间的变化关系  
Fig.9 Void ratio  $e$  versus suction  $s$  and normal stress  $p$

低吸力时,随着竖向压力的增加,土体被压缩,孔隙比呈曲线形式加速下降,且随着压力水平不断

提高,孔隙比下降速率不断降低;随基质吸力增大,孔隙比加速下降部分趋缓.基质吸力对土样强度有一定影响.

### 3 结论

(1) 随着基质吸力的增加,土的压缩性不断降低;当前吸力条件下, $e-\lg p$  曲线阶段特征明显,表现为弹性阶段、弹塑性阶段以及回弹与再压缩阶段.

(2) 基质吸力较低时,压缩曲线由弹性加载阶段过渡到弹塑性加载阶段时会出现陡降,随后曲线斜率又趋缓.但是随着吸力的增大,陡降段与弹塑性加载阶段斜率趋于一致.

(3) 非饱和压缩过程中,前期固结压力随基质吸力减小而减小.竖向应力一定时,回弹指数先随吸力的增加而减小;当吸力大于 1 400 kPa 时,回弹指数反而有所上升.

(4) 相同基质吸力条件下,随着竖向应力的增大,回弹指数增大.非饱和压缩过程中,土的孔隙比与基质吸力和竖向应力之间呈曲面关系.

### 参考文献:

- [1] 叶为民,陈宝,卞祚麻,等.上海软土的非饱和三轴强度[J].岩土工程学报,2006,28(3):317.  
YE Weimin, CHEN Bao, BIAN Zuoxiu, et al. Tri-axial shear strength of Shanghai unsaturated soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 317.
- [2] Fredlund D G, Rahardjo H. Soil mechanics for unsaturated soils [M]. New York: Wiley-Interscience, 1993.
- [3] 张志红,赵成刚,邓敏.非饱和土固结理论新进展[J].岩土力学,2005,26(4):667.  
ZHANG Zhihong, ZHAO Chenggang, DENG Min. Recent development of consolidation theories of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 667.
- [4] Gens A A, Josa A. A constitutive model for partially saturated soils [J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 405.
- [5] 扈胜霞,陈正汉,王克宇.非饱和原状黄土的固结试验研究[C]//第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集.北京:科学出版社,2006:278-283.  
HU Shengxia, CHEN Zhenghan, WANG Keyu. Test study on consolidation characteristic of unsaturated and undisturbed loess [C]// Proceedings of the 9th National Rock Mechanics and Engineering. Beijing: Science Press, 2006: 278-283.
- [6] 陈正汉,扈胜霞,孙树国.非饱和土固结仪和直剪仪的研制及应用[J].岩土工程学报,2004,26(2):161.  
CHEN Zhenghan, HU Shengxia, SUN Shuguo. Development and application of consolidation apparatus and direct shear apparatus for unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(2): 161.
- [7] 钱春香,刘兵科,彭丽云.饱和黏土固结特性的试验研究[J].铁道建筑,2007(12):66.  
QIAN Chunxiang, LIU Bingke, PENG Liyun. Experimental study on consolidation feature of saturated clay [J]. Railway Engineering, 2007(12): 66.
- [8] 火映霞,王旭东,汪中卫,等.沿河公路饱和路基石的一维次固结特性试验研究[J].浙江建筑,2008(25):24.  
HUO Yingxia, WANG Xudong, WANG Zhongwei, et al. Experimental study on the one dimensional consolidation of the saturated river along roadbed soil [J]. Zhejiang Construction, 2008(25): 24.
- [9] 魏海云,詹良通,陈云敏.高饱和度土的压缩和固结特性及其应用[J].岩土工程学报,2008,28(2):264.  
WEI Haiyun, ZHAN Liangtong, CHEN Yunmin. Compressibility and consolidation of unsaturated soils with high degree of saturation and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 28(2): 264.
- [10] 叶为民,唐益群,崔玉军.室内吸力量测与上海软土土水特征[J].岩土工程学报,2005,27(3):347.  
YE Weimin, TANG Yiqun, CUI Yujun. Measurement of soil suction in laboratory and soil-water characteristics of Shanghai soft soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 347.
- [11] 沈珠江.理论土力学[M].北京:中国水利水电出版社,2000.  
SHEN Zhujiang. Theoretical soil mechanics [M]. Beijing: China Water Power Press, 2000.
- [12] 魏道堃,胡中雄.上海浅层地基土的前期固结压力及有关压缩性参数的试验研究[J].岩土工程学报,1980,2(4):13.  
WEI Daoduo, HU Zhongxiong. Experimental study of preconsolidation pressure and compressibility parameters of Shanghai subsoil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(4): 13.
- [13] 杨树荣,拱祥生,黄伟庆,等.不饱凝聚性路基土壤回弹模数之研究[C]//第二届全国非饱和土学术研讨会.杭州:[出版者不详],2005:425-435.  
YANG Shurong, GONG Xiangsheng, HUANG Weiqing, et al. Study on resilient modulus of unsaturated cohesive subgrade soils [C]// The 2nd National Symposium on Unsaturated Soil. Hangzhou: [s. n.], 2005: 425-435.
- [14] 汪东林,栾茂田,杨庆.非饱和重塑低液限黏土体积变化特征试验研究[J].水利学报,2008,39(3):367.  
WANG Donglin, LUAN Maotian, YANG Qing. Experimental research on volume change of unsaturated remolded clay with low liquid-limit [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 367.