

坑侧土体卸荷的侧向应力 - 应变关系研究

梅国雄¹, 陈浩¹, 卢廷浩², 殷宗泽²

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 利用平面应变仪对坑侧土体进行 k_0 固结 - 侧向卸荷的试验研究, 指出经过侧向卸荷过程的土样抗剪强度指标与常规三轴压缩试验结果明显不同; 得出侧向卸荷土体的侧向应力 - 应变间也呈双曲线关系, 据此运用邓肯 - 张建模思路, 推导出反映坑侧土体侧向卸荷实际应力路径下的侧向应力 - 应变关系模型, 模型预测与试验结果吻合较好。

关键词: 土力学; 基坑开挖; 平面应变试验; 侧向卸荷; 侧向应力 - 应变关系

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 3108 - 05

RESEARCH ON LATERAL STRESS-STRAIN RELATION ON SIDE OF FOUNDATION PIT WITH LATERAL UNLOADING

MEI Guoxiong¹, CHEN Hao¹, LU Tinghao², YIN Zongze²

(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu 210009, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Taking soil on the side of foundation pit excavation with k_0 consolidation-lateral unloading plane strain experiment on plane strain apparatus, the testing results indicate that the shear strength indices of soil are obviously different between the lateral unloading and routine triaxial tests. Experimental analyses show that curves of lateral stress-strain under lateral unloading are also similar to a hyperbolic type. The lateral stress-strain relation of actual stress path and lateral unloading soil on the side foundation pit is deduced using Duncan-Chang model. Results between experimental data and model predicated are coincided very well.

Key words: soil mechanics; foundation pit excavation; plane strain experiment; lateral unloading; lateral stress-strain relation

1 引言

在研究基坑隆起、坑侧土体侧向位移以及周边地表沉降等变形特性时, 多假设为平面应变情况, 其变形 $\varepsilon_z \approx 0$ 方向上的中主应力 σ_z 不等于小主应力或是大主应力。而通常采用的三轴试验是在轴对称的应力条件下进行的, 在压缩和拉伸试验中的中主

应力等于小或大主应力, 由此得到的试验结果应用于平面问题的计算分析必然会产生较大的误差^[1~3]。

基坑开挖过程其实是土体的卸荷过程, 其变形特性具有独特的规律。庄心善等^[4~10]对卸荷条件下基坑土体的变形特性进行研究, 但其研究的是偏应力与轴向应变间关系, 而对坑侧土体卸荷时实际应力路径下的侧向应力与侧向应变研究较少^[11, 12]。因此, 本文将利用平面应变仪进行坑侧土体侧向卸荷的试

收稿日期: 2008 - 12 - 17; 修回日期: 2009 - 03 - 21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50608038); 江苏省自然科学基金项目(BK2007582); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20070294002)

作者简介: 梅国雄(1975 -), 男, 2002 年于河海大学岩土工程研究所获博士学位, 现任教授、博士生导师, 主要从事土体固结、本构关系和基础工程等方面的教学与研究工作。E-mail: meiguox@163.com

验研究,并用邓肯-张建模思路^[13]推导出坑侧土体卸荷条件下的侧向应力-侧向应变关系,并将模型预测结果与试验结果进行比较。

2 侧向卸荷试验研究

试验取用南京江浦区一深基坑工程的粉质黏土。该试样的常规物理力学性质见表 1。

表 1 土的基本物理力学性质

Table 1 Basic physico-mechanical properties of the soil

土粒 名称	干密度 ρ_d ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	重度 γ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	土粒			含水 率 $w/\%$	压缩 率 a/MPa^{-1}	压缩 模量 E_p/MPa
			相对 密度 d_s	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$			
粉质黏土	1.52	19.17	2.73	32.9	19.2	20.2	0.4	5.2

2.1 常规三轴试验

为了便于比较,先采用原状土做了一组固结不排水的常规三轴试验,其应力-应变关系曲线如图 1 所示。依据试验结果可得出粉质黏土的黏聚力 $c=25.27 \text{ kPa}$ 、内摩擦角 $\varphi=28.76^\circ$ 。

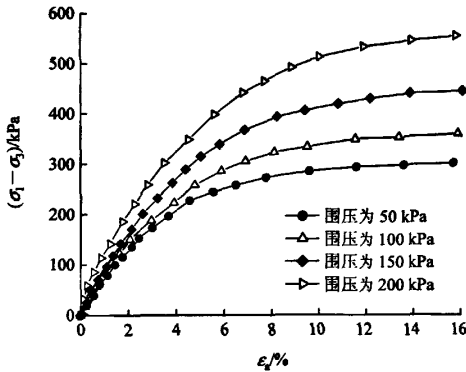


图 1 常规三轴试验的应力-应变曲线

Fig.1 Curves of stress-strain with routine triaxial test

2.2 k_0 固结的平面应变试验

本次试验所采用的平面应变仪主要由压力室、试样制备部件、压力试验机、土工试验数据采集系统和输出系统等组成。试样尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。故在此试验中称“围压”已不太合适,改称“ σ_{30} ”,其中 σ_{30} 为初始固结时小主应力值。主要试验数据由土工试验数据采集系统自动采集。

因试验条件的限制,平面应变试验采用此原状土的重塑土样,具体的重塑土样制作方法及试验过程的具体操作按土工试验标准(GB/T 50123 - 1999)

的规定进行。试验过程及试验数据整理结果如下:

第一组:先让土样在 $\sigma_{30}=50, 75, 100, 125, 150 \text{ kPa}$ 下等向固结,然后清除初始应变,保持 $\varepsilon_2=0$ 和侧向应力 σ_3 不变,在不排水条件下进行竖向 σ_1 方向加荷至破坏,所得的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线如图 2 所示。

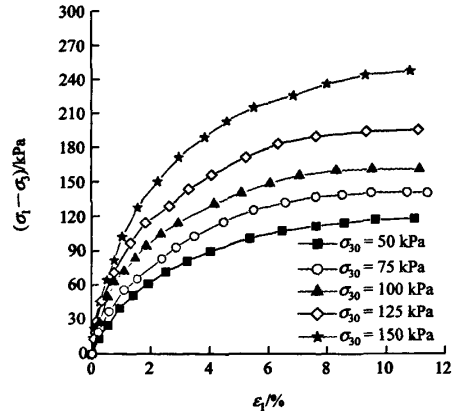


图 2 平面应变竖向加荷时 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig.2 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3)$ vs. ε_1 with plane strain of vertical loading

第二组:先让土样在 $\sigma_{30}=100 \text{ kPa}$ 、不同 k_0 ($k_0=0.50, 0.65, 0.80, 0.90$) 状态下固结,然后清除初始应变为 0,保持 $\varepsilon_2=0$ 和侧向应力 σ_3 不变,在不排水条件下进行竖向 σ_1 方向加荷至破坏,得 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 曲线如图 3 所示。

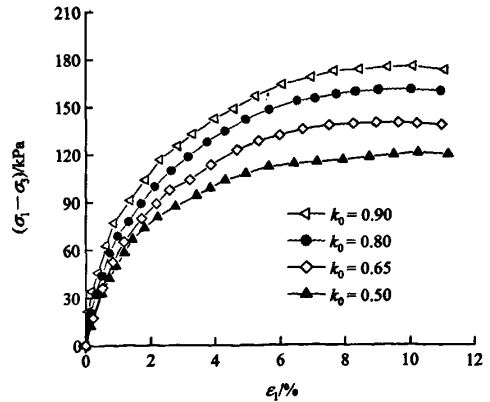


图 3 $\sigma_{30}=100 \text{ kPa}$ 时竖向加荷的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线

Fig.3 Curves of $(\sigma_1 - \sigma_3)$ vs. ε_1 with vertical loading when $\sigma_{30}=100 \text{ kPa}$

第三组:先让土样在 $\sigma_{30}=100 \text{ kPa}$ 、不同 k_0 ($k_0=0.50, 0.65, 0.80, 0.90$) 状态下固结完成,然后清除初始应变为 0,保持 $\varepsilon_2=0$ 和竖向应力 σ_1 不

变, 不排水条件下进行侧向(σ_3 向)卸荷破坏或卸至应力为 0。所得的侧向应力 σ_3 - ε_3 关系曲线如图 4 所示。

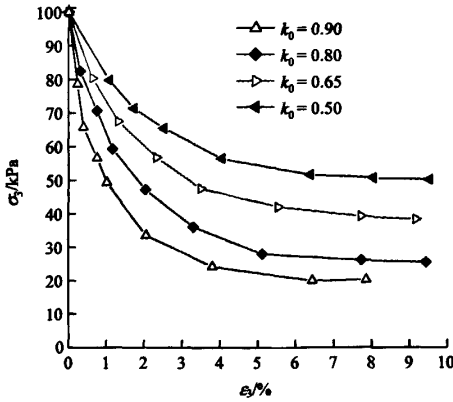


图 4 $\sigma_{30}=100$ kPa 时侧向卸荷的 σ_3 - ε_3 关系曲线
Fig.4 Curves of σ_3 vs. ε_3 with lateral unloading when $\sigma_{30}=100$ kPa

2.3 试验结果分析

图 2 所示的平面应变试验时土体破坏时应力强度随着初始固结时小主应力值的增加而增加, 与图 1 所示的常规三轴压缩试验土体破坏时应力强度随着围压增加而增加的规律类似。说明此次平面应变试验方法是可行的。

图 2~4 曲线规律比较一致, 在不同的应力路径下土体的应力-应变曲线形状相似, 呈现明显的非线性。

由图 3, 4 可知: 随着固结应力比 k_0 的增加, 应力-应变曲线初始坡度逐渐由缓变陡。固结应力比 k_0 对土体破坏时主应力强度有影响, 其值会随 k_0 增加而增加。而土体随着初始固结应力的增加也有上述类似的现象(见图 2)。固结应力比 k_0 越小时, 土样加卸载越容易破坏, 土样破坏时的应变值偏小。对于固结的平面应变加荷试验, 其剪切破坏时的主应力差值明显大于侧向卸荷的剪切破坏值。

笔者认为此处采用图 4 中曲线来研究坑侧土体卸荷时的侧向应力与其应变关系, 比采用以往的偏应力增量与轴向应变间的曲线更直接、合适。因为对这组卸荷试验的 σ_3 - ε_3 与 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - ε_3 曲线性态一致, 而从 σ_3 - ε_3 可以更直接看到侧向卸荷时侧向应力与其应力方向上应变的关系。

3 卸荷土体的侧向应力-应变关系研究

3.1 侧向应力-侧向应变关系推导

由图 4 可见, 侧向卸荷应力路径上 σ_3 - ε_3 关系仍呈双曲线关系, 经坐标对称变换和平移后得到的 $(\sigma_{30} - \sigma_3)$ - ε_3 关系曲线不会改变曲线的性态, 即 $(\sigma_{30} - \sigma_3)$ - ε_3 间亦呈双曲线关系, 即

$$\sigma_{30} - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_3}{a + b\varepsilon_3} \quad (1)$$

式中: a , b 为与土的性质有关的试验参数。

限于篇幅, 这里只选取图 4 中 $k_0=0.65$ 时的曲线转换成 $\varepsilon_3 / (\sigma_{30} - \sigma_3)$ - ε_3 关系, 如图 5 所示, 发现有较好的线性关系, 另外其他 3 个不同 k_0 状态相同 $\sigma_{30}=100$ kPa 下的试验结果也有类似的规律。

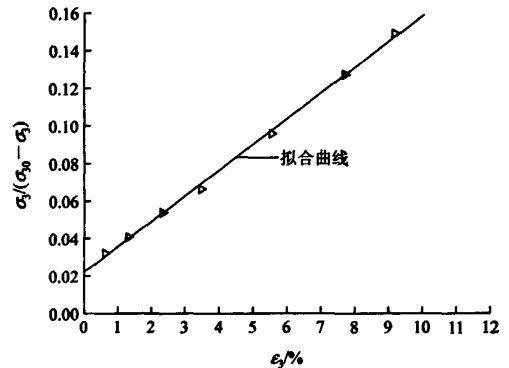


图 5 $\varepsilon_3 / (\sigma_{30} - \sigma_3)$ - ε_3 关系曲线
Fig.5 Relationship curves of $\varepsilon_3 / (\sigma_{30} - \sigma_3)$ - ε_3

由式(1)可得

$$a = \left(\frac{\varepsilon_3}{\sigma_{30} - \sigma_3} \right)_{\varepsilon_3 \rightarrow 0} \quad (2)$$

$\left(\frac{\varepsilon_3}{\sigma_{30} - \sigma_3} \right)_{\varepsilon_3 \rightarrow 0}$ 是曲线 $(\sigma_{30} - \sigma_3)$ - ε_3 的初始切线斜率的倒数, 该初始斜率即为土体在侧向卸载条件下的初始切线弹性模量^[12~14], 记为 E_t , 即

$$E_t = \frac{1}{a} \quad (3)$$

在这里考虑 E_t 与初始竖向应力 σ_{10} 间关系, 点绘 $\lg(E_t / p_a)$ 和 $\lg(\sigma_{10} / p_a)$ 的关系, 近似为一直线, 如图 6 所示。其中 σ_{10} 为初始固结的竖向应力值, 而 p_a 为大气压力, 引入 p_a 是为了使纵横坐标化为

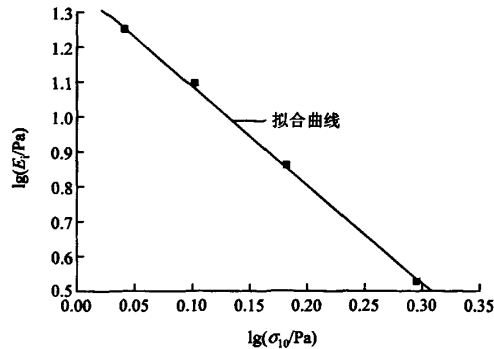


图 6 $\lg(E_1/P_a)-\lg(\sigma_{10}/P_a)$ 的关系曲线
Fig.6 Curves of $\lg(E_1/P_a)-\lg(\sigma_{10}/P_a)$

无因次量。设直线的截距为 $\lg K$, 斜率为 n , 于是有:
 $\lg(E_1/P_a)=\lg K-n\lg(\sigma_{10}/P_a)$, 由此可得

$$E_1=Kp_a\left(\frac{\sigma_{10}}{P_a}\right)^{-n} \tag{4}$$

由式(1)可见, 当 $\varepsilon_3 \rightarrow \infty$ 时

$$b=\frac{1}{(\sigma_{30}-\sigma_3)_{\varepsilon_3 \rightarrow \infty}}=\frac{1}{(\sigma_{30}-\sigma_3)_u} \tag{5}$$

这里用 $(\sigma_{30}-\sigma_3)_u$ 表示当 $\varepsilon_3 \rightarrow \infty$ 时 $\sigma_{30}-\sigma_3$ 的值, 也就是 $\sigma_{30}-\sigma_3$ 的渐近值。实际上, ε_3 不可能趋向无穷大, 在达到一定值后试样就破坏了, 或者小主应力减小到 0 为止。类似地引入破坏比 $R_f = \frac{(\sigma_{30}-\sigma_3)_f}{(\sigma_{30}-\sigma_3)_u}$ 。而破坏时的应力 $(\sigma_3)_f$ 可以取为朗肯主动土压力值, 即

$$(\sigma_{30}-\sigma_3)_f=P_{a0}-P_{a3} \tag{6}$$

式中: P_{a0} 为 k_0 固结后的初始小主应力值, 即等于 σ_{30} ; P_{a3} 为朗肯主动土压力值。所以有

$$b=\frac{R_f}{P_{a0}-P_{a3}} \tag{7}$$

由式(1), (2)和(7)可得

$$\sigma_3=\sigma_{30}-\frac{Kp_a\left(\frac{\sigma_{10}}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_3(P_{a0}-P_{a3})}{P_{a0}-P_{a3}+Kp_a\left(\frac{\sigma_{10}}{P_a}\right)^{-n}\varepsilon_3R_f} \tag{8}$$

即坑侧土体在侧向卸载应力路径下的侧向应力 - 侧向应变的双曲线关系表达式。

在推导过程中分别计算出这组侧向卸荷下土样的参数 K , n , R_f 如表 2 所示。由此也可知, 侧向卸荷试验测得的土体抗剪强度指标与常规三轴试验测得的指标明显不同^[2, 9, 10]。

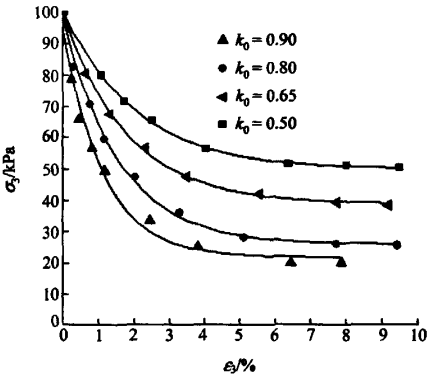
表 2 土样侧向卸荷试验参数

Table 2 Test parameters of the soil in lateral unloading

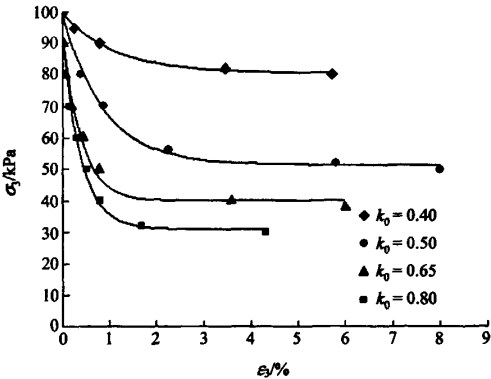
c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	K	n	R_f
30.63	24.61	58.7	0.95	0.83

3.2 模型预测与试验结果比较

采用模型计算出的曲线分别与上述侧向卸荷的试验数据和李 治^[15]的侧向卸荷试验数据进行比较, 如图 7 所示。



(a) 本文的侧向卸荷试验数据与预测曲线



(b) 李 治^[15]的侧向卸荷试验数据与预测曲线

图 7 侧向卸荷试验数据与预测曲线的比较

Fig.7 Comparison between predicated and test results under of lateral unloading

图 7 的试验数据和预测结果基本吻合, 初步说明本文导出的模型能够较好地描述坑侧土体卸荷时侧向应力 - 应变特性。

4 结 论

本文运用平面应变仪进行坑侧土体的 k_0 固结 - 侧向卸荷的试验, 得出卸荷土体的侧向应力 - 应变

间也呈双曲线关系, 据此用邓肯-张建模思路推导出卸荷土体的侧向应力-侧向应变关系模型。通过试验数据与预测结果的比较表明, 导出的模型能够较好地描述坑侧土体侧向卸荷时的实际变形特性。

参考文献(References):

- [1] 马险峰, 望月秋利, 温玉君, 等. 基于改良型平面应变仪的砂土特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1 749 - 1 754.(MA Xianfeng, AKITOSHI M, WEN Yujun, et al. Study of properties of sand based on improved plane strain test apparatus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1 749 - 1 754.(in Chinese))
- [2] 刘照媛, 袁远明, 闫谢旺. 模拟基坑开挖过程的三轴试验研究[J]. 工程勘察, 2005, (5): 1 - 3.(LIU Xiyuan, DOU Yuanming, YAN Shuwang. Triaxial experimental studies of simulated excavation process[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2005, (5): 1 - 3.(in Chinese))
- [3] 何世秀, 朱志政, 杨雪强. 基坑土体侧向卸荷真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 869 - 872.(HE Shixiu, ZHU Zhizheng, YANG Xueqiang. A study of true triaxial test on lateral unloading of soil mass of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(6): 869 - 872.(in Chinese))
- [4] 庄心善, 朱志政, 胡志志, 等. 基坑土体卸荷剪切模量真三轴试验研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(7): 55 - 58.(ZHUANG Xinshan, ZHU Zhizheng, HU Qizhi, et al. Study of true triaxial test of excavation soil mass of unloading shearing modulus[J]. Industrial Construction, 2005, 35(7): 55 - 58.(in Chinese))
- [5] 何世秀, 韩高升, 庄心善, 等. 基坑开挖卸荷土体变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(1): 17 - 20.(HE Shixiu, HAN Gaosheng, ZHUANG Xinshan, et al. Experimental researches on unloading deformation of clay in excavation of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(1): 17 - 20.(in Chinese))
- [6] 陈善雄, 凌平平, 何世秀, 等. 粉质黏土卸荷变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2 534 - 2 538.(CHEN Shanxiong, LING Pingping, HE Shixiu, et al. Experimental study of deformation behavior of silty clay under unloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(12): 2 534 - 2 538.(in Chinese))
- [7] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 天津市第一海相层粉质黏土卸荷变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1 237 - 1 242.(ZHENG Gang, YAN Zhixiong, LEI Huayang, et al. Experimental studies of unloading deformation properties of silty clay of first marine layer in Tianjin urban area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1 237 - 1 242.(in Chinese))
- [8] 庄心善, 赵鑫, 何世秀, 等. 排水条件下卸荷土体变形特性的真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1 387 - 1 390.(ZHUANG Xinshan, ZHAO Xin, HE Shixiu, et al. An experimental study of soil mass deformability subject to true triaxial loads during unloading under drainage[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1 387 - 1 390.(in Chinese))
- [9] 郑伟文. 基坑开挖应力路径试验与有限元变形分析的研究[硕士学位论文][D]. 广州: 广州大学, 2007.(ZHENG Yiwen. Study of stress path test for foundation excavation and deformation analysis by finite element method[M. S. Thesis][D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2007.(in Chinese))
- [10] 董华伟, 郑伟文. 土体 k_0 固结-卸荷剪切试验研究[J]. 工程勘察, 2008, (5): 13 - 16.(TONG Huawei, ZHENG Yiwen. An experimental study of k_0 consolidation-unloading shear with soil[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2008, (5): 13 - 16.(in Chinese))
- [11] 殷德顺, 王保田, 王云涛. 不同应力路径下的邓肯-张模型模量公式[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1 380 - 1 385.(YIN Deshun, WANG Baotian, WANG Yuntao. Tangent elastic modulus of Duncan-Chang model for different stress paths[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1 380 - 1 385.(in Chinese))
- [12] 施建勇, 雷国辉, 艾英妹, 等. 土压力变化规律的应力路径三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1 700 - 1 704.(SHI Jianyong, LEI Guohui, AI Yingbo, et al. Stress path controlled triaxial experimental study of lateral earth pressure behaviour[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 1 700 - 1 704.(in Chinese))
- [13] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.(YIN Zongze. Principle of soil mechanics[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007.(in Chinese))
- [14] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.(ZHENG Yingren, SHEN Zhujiang, GONG Xiaonan. Principals of plastic mechanics for geomaterials[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002.(in Chinese))
- [15] 李治. 模拟基坑应力路径的真三轴仪平面应变试验研究[硕士学位论文][D]. 南京: 河海大学, 2005.(LI Zhi. Plane strain experiment research of simulating stress path of excavation pit by the true triaxial cell[M. S. Thesis][D]. Nanjing: Hohai University, 2005.(in Chinese))