

# 压实黄土强度和变形各向异性的试验研究

鲁洁, 杨朝旭, 王铁行

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 为研究各向异性对压实黄土强度和变形特性的影响, 分别对由垂直向和水平向切取的压实黄土试样, 进行了不同围压、不同干密度和不同含水率下的真三轴剪切试验。试验结果表明: 相同围压、干密度下, 垂直向和水平向的应力-应变曲线有明显差异, 垂直向试样的轴向应变小于水平试样。轴向应变差异随着干密度和轴向压力的增大而增大, 随着含水量和围压的增大而减小; 侧向应变差异随着干密度和轴向压力的增大而增大, 随着围压的增大而减小。初始变形模量 $E_i$ 在垂直方向大于水平方向, 抗剪强度在垂直方向大于水平方向。

**关键词:** 压实黄土; 各向异性; 真三轴试验; 强度; 变形

中图分类号: TU444

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)05-0676-05

## Experimental research on strength and deformation anisotropy of the compacted loess

LU Jie, YANG Zhaoxu, WANG Tiehang

(School of Mechanics and Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to study the effect of anisotropy on the strength and deformation characteristics of compacted loess, the strength and deformation anisotropy of compacted loess were studied by true triaxial tests with the different confining pressure, dry density and the moisture content. The test results show that under the same stress and dry density, there are significant differences between the vertical samples and the horizontal samples, and the axial strains of vertical samples are greater than the horizontal samples. The differences of axial strain increase with the increasing of dry density and axial stress, and decrease with the increasing of confining pressures and the moisture content. The differences of lateral strain increase with the increasing of dry density and axial stress, and decrease with the increasing of confining pressures. The initial deformation modules of the vertical samples are higher than that of the horizontal samples. The shear strength of compacted loess in the vertical direction is larger than that in the horizontal direction.

**Key words:** compacted loess; anisotropy; true triaxial tests; strength; deformation

黄土高原沟壑纵横, 近年来, 高填方工程日益增多, 如延安70 km<sup>2</sup>填沟造城工程、兰州填沟造城工程、吕梁机场高填方工程等。此类工程中存在大量高填方边坡工程, 其稳定性分析目前均按照各向同性土体考虑, 存在明显弊端。填方土体为分层压实土体, 每层土体压实均沿竖向施加压实能量, 层状压实土体具有明显各向异性, 其各向异性较原状土层更为显著。

很多国内外学者对土的各向异性问题进行研究, 在土体结构性、软土各向异性、水泥土各向异性等方面取得了一些研究成果<sup>[1-9]</sup>, 但这些研究中多数均以原状土为研究对象, 有关压实黄土的各向异性研究目前尚显不足, 难以把握压实黄土强度和变形的各向异性差异。

对高填方黄土边坡而言, 其潜在滑动面沿不同方向发育(曲面), 考虑压实黄土不同方向的强度差异将使稳定性分析结果更加科学合理。考虑压实黄土不同方向的变形差异有利于提高高填方黄土

边坡变形预测精度。对压实黄土强度和变形的各向异性问题进行研究具有重要意义。基于此, 本文通过真三轴试验对压实黄土强度和变形的各向异性问题开展研究工作。

## 1 试验方案及试验方法

试验采用西安理工大学研制的真三轴仪<sup>[10]</sup>, 它是一种水平向柔性、竖向刚性的刚柔复合型真三轴仪,  $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 为柔性加载, 仪器主要由固定支座、压力室主体、伺服步进电机控制的液压加载系统和计算机数据采集系统等几部分组成。

对于一定含水量和干密度的压实土体, 沿竖向施加轴压与沿水平向施加轴压会得到不同的结果。为了比较垂直向与水平向施加轴压的强度与变形差异, 分别制备垂直样与水平样进行试验研究。垂直样是土样高度(大主应力方向)沿压实土体竖向的土样, 水平样是土样高度(大主应力方向)沿压实土体水平向的土样。

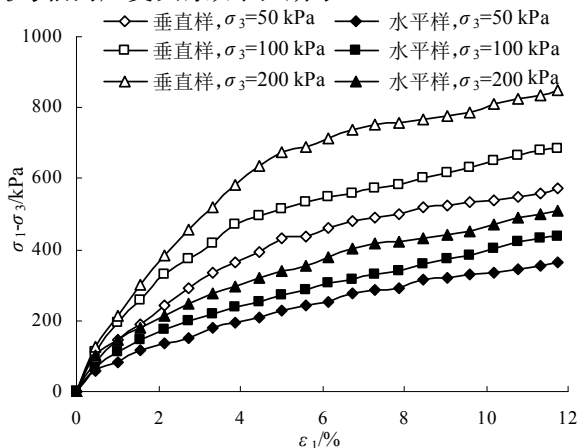
试验所用黄土液限30.48%, 塑限18.23%, 属粉质粘土. 试验土样尺寸为70 mm×70 mm×140 mm, 大主应力沿土样高度(140 mm)方向施加. 制样时, 先将黄土烘干, 过2 mm筛, 配至需要的含水量, 在保湿器静置12 h, 含水量误差控制在0.5%以内, 然后模拟施工压实条件, 采用分层压实法制备试样, 在室内将配置好的土体分3次放入模具, 从顶面竖直向施加荷载, 每层压实到规定高度, 将其表面凿毛, 再放下一层土, 依此循环进行, 直至最后一层压实完毕. 依此方法制备满足不同含水量、不同干密度要求的土样. 土样含水量、干密度及试验方案见表1.

表1 黄土土样及试验方案  
Tab.1 Loess samples and testing plan

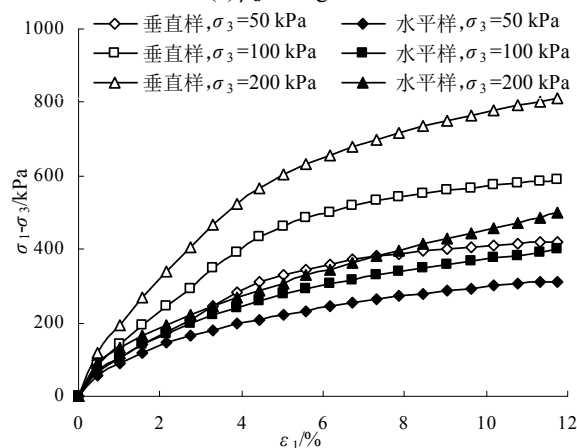
干密度/g·cm <sup>-3</sup>	含水量/%			围压/kPa			b值
1.5	15%	18%	21%	50	100	200	0
1.6	15%	18%	21%	50	100	200	0
1.7	15%	18%	21%	50	100	200	0

## 2 试验结果与分析

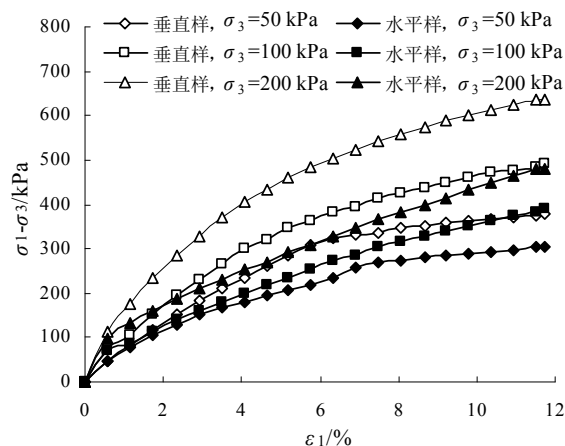
针对含水量15%的不同密度压实土样, 在不同等围压( $\sigma_2=\sigma_3$ )下进行了试验, 测试得到偏应力 $\sigma_1-\sigma_3$ 与轴向应变关系如图1所示.



(a)  $\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$



(b)  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$



(c)  $\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$

图1 主应力差与主应变关系曲线

Fig.1 Relationship curves of principal stresses difference and principal strain

由图1可知, 垂直样与水平样的变形量明显不同, 施加相同的围压与轴向压力, 垂直样的轴向应变明显小于水平样. 亦即: 对于含水量和密度一定的压实黄土, 其竖向抗变形能力明显优于水平向, 压实黄土存在明显变形各向异性.

在相同围压与轴向应力作用下, 为了比较垂直样与水平样的轴向应变差异 $\Delta\epsilon_1$ , 基于图1试验结果, 整理得到轴向压力与轴向应变差 $\Delta\epsilon_1$ 的关系如图2所示. 相同条件下, 轴向应变差随着轴向压力的增加呈指数性增长, 表明轴向变形差异随着轴向压力增加而增加.

当轴向压力小于200 kPa时, 不同围压下的关系曲线几乎重合, 当轴向压力大于200 kPa时, 关系曲线的差异性迅速变大. 其他条件相同时, 水平样和垂直样的轴向应变差随着轴压的变化存在一个界限, 当轴压小于200 kPa时, 围压变化对轴向应变差影响较小; 当轴压大于200 kPa时, 围压变化对轴向应变差影响较大, 轴压越大, 围压变化对轴向应变差影响越大. 这一现象可以从能量角度作出解释, 当应力水平较低时, 不足以克服土体压实时的能量, 难以改变压实形成的土粒排列, 变形较小, 轴向应变差亦较小. 当应力水平较大足以克服土体压实时的能量, 改变了压实形成的土粒排列, 变形较大, 轴向应变差亦较大.

比较图2中不同密度土样的试验结果, 可以看出, 在相同应力条件下, 土体密度变化引起的轴向应变差变化较小, 表明在常见压实土体密度范围内, 密度不是影响轴向应变差的主要因素.

为验证以上结论, 进一步针对含水量18%、21%的不同密度土样, 在不同等围压( $\sigma_2=\sigma_3$ )下进行了试验, 试验结果揭示的规律与前述同, 不再赘述.

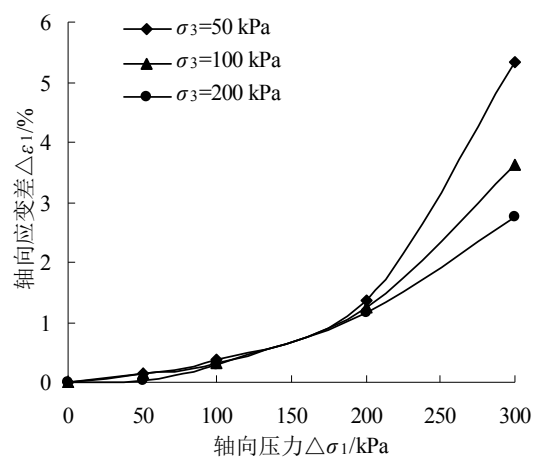
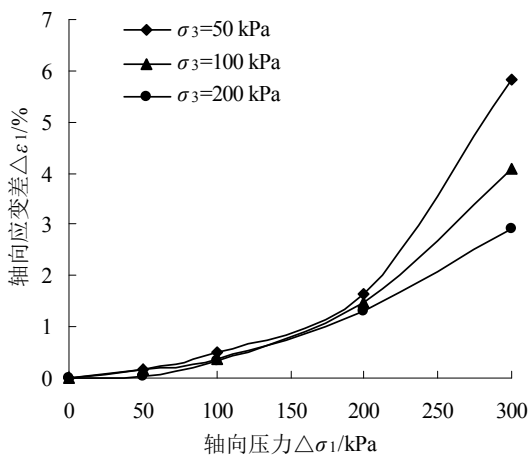
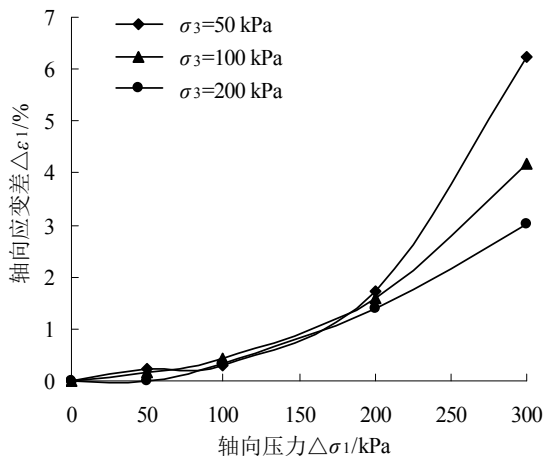
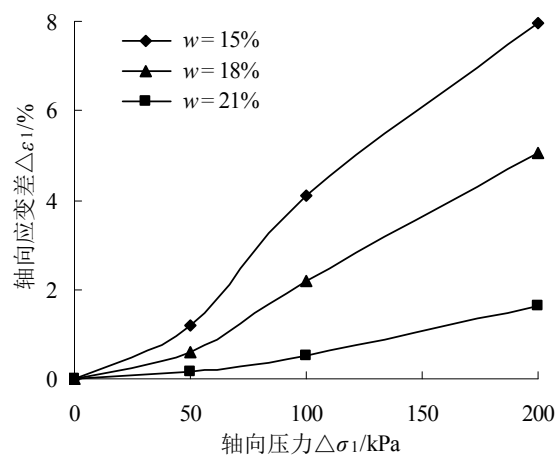
(a)  $\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$ (b)  $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ (c)  $\rho_d = 1.7 \text{ g/cm}^3$ 

图2 不同围压下轴向应变差与轴向压力关系曲线

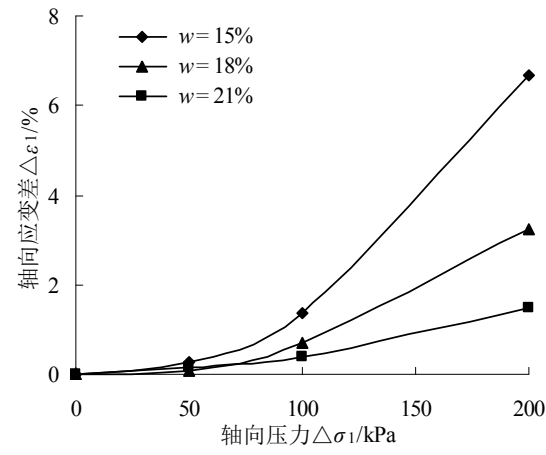
Fig.2 Relationship curves of axial stress difference and axial pressure under different confining pressure

为分析变形各向异性与含水量的关系,整理得到相同干密度 ( $\rho_d = 1.6 \text{ g/cm}^3$ ) 土样在不同含水量下的轴向压力与轴向应变差  $\Delta \epsilon_1$  关系如图3所示。

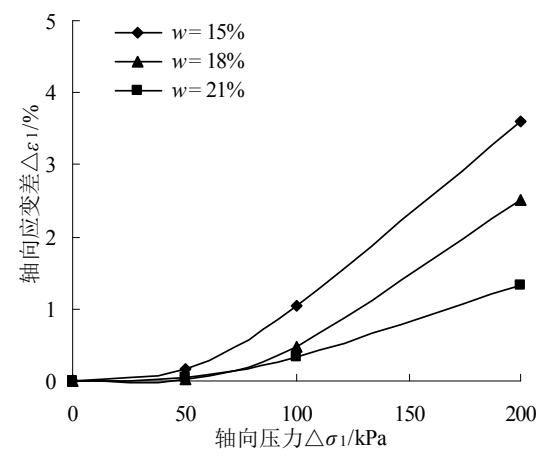
由图3可知,轴向应变差随着轴向压力的增加而增加,同一干密度土样在相同应力条件下,轴向应变差随着含水量的增加而变小,这表明水平样和垂直样轴向应变的差异性随着含水量的增加而变小。



(a) 围压50 kPa



(b) 围压100 kPa



(c) 围压200 kPa

图3 不同含水量土样轴向应变差与轴向压力关系曲线

Fig.3 Relationship curves of axial stress difference and axial pressure under different moisture content

为比较水平样和垂直样侧向应变差异,依据试验过程测得的侧向应变(含水量15%),得到轴向压力与侧向应变差  $\Delta \epsilon$  的关系如图4所示。

由图4可知,在相同围压条件下,侧向应变差随着轴向压力的增加而增加,当轴向压力小于100 kPa时,侧向应变差随轴压变化较小,轴向压力大于100 kPa时,侧向应变差随着轴向压力的变化较大。其

他条件相同时, 围压越大, 侧向应变差越小, 围压变化引起的侧向应变差异随着轴压的增大而增大。

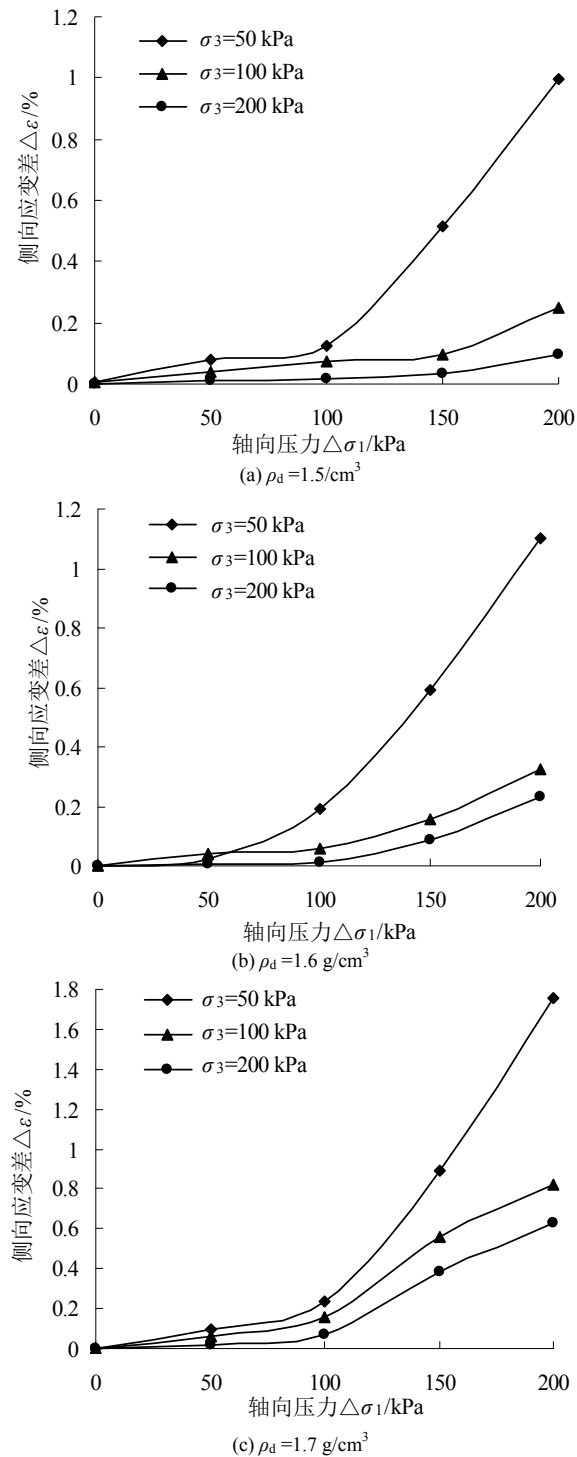


图4 侧向应变与轴向压力关系曲线

Fig.4 Relationship curves of lateral strain and axial stress  
由图1可知, 在轴向应变小于4%条件下, 应力应变曲线基本呈直线变化, 其斜率定义为初始变形模量。

试验测得不同围压条件下初始轴向应变模量如表2所示。由表2可知: 垂直样和水平样的初始变形模量有显著差异性。对于同一切取方向的试样, 初始变形模量 $E_i$ 随着围压或干密度的增加而增加,

随着含水量的增大而减小。相同含水率、相同围压下, 压实黄土垂直样的初始变形模量 $E_i$ 较大, 水平样的初始变形模量 $E_i$ 较小, 也就是说, 压实黄土垂直样的抗压缩能力大于水平样的抗压缩能力。

表2 试样的初始变形模量						
Tab.2 Initial deformation modulus of test samples						
		干密度 /g·cm <sup>-3</sup>	围压/kPa	初始变形模量/MPa		
				w=15%	w=18%	w=21%
垂 直 样	1.5		50	11.21	10.6	9.01
			100	17.76	16.05	14.47
			200	23.47	19.80	18.01
	1.6		50	18.45	15.29	15.24
			100	20.88	17.42	16.47
			200	23.42	20.45	19.12
	1.7		50	20.41	17.76	16.77
			100	26.81	21.51	18.76
			200	27.25	25.49	23.42
水 平 样	1.5		50	9.53	8.62	4.46
			100	10.28	10.03	7.35
			200	14.16	14.01	8.62
	1.6		50	10.55	9.26	7.35
			100	14.16	14.01	8.62
			200	16.50	15.24	12.29
	1.7		50	10.33	8.62	8.33
			100	15.48	11.96	11.27
			200	17.73	14.03	12.23

设定试验结束条件为轴向应变达到12%, 定义此应变条件为破坏条件, 则根据轴向应变达到12%的大小主应力, 依据土体极限平衡条件, 得到抗剪强度指标如表3所示。

表3 试样抗剪强度指标

Tab.3 Shear strength indexes of test samples				
取样方向	含水量/%	干密度/g·cm <sup>-3</sup>	C/kPa	φ/(°)
垂 直 样	15%	1.5	66.8	27.53
		1.6	82.6	29.44
		1.7	87.6	31.35
	18%	1.5	54.28	25.44
		1.6	67.56	28.29
		1.7	81.16	30.47
	21%	1.5	48.25	21.23
		1.6	52.02	22.47
		1.7	58.17	25.07
水 平 样	15%	1.5	56.95	21.82
		1.6	68.88	22.7
		1.7	75.38	26.96
	18%	1.5	50.37	17.91
		1.6	55.15	20.78
		1.7	63.73	24.39
	21%	1.5	37.27	16.73
		1.6	41.45	18.75
		1.7	48.32	19.67

由表3可知,  $c_v/c_h > 1$ ,  $\varphi_v/\varphi_h > 1$ , 故垂直样的强度参数与水平样的强度参数有差异性, 且垂直样的较大. 粘聚力随着干密度的增大而增加, 随着含水率的增大而减小; 内摩擦角随着干密度的增加而增加, 随着含水率的增加而减小. 粘聚力增减较快, 内摩擦角变化相对较慢. 当切取方向与压实面垂直时, 其剪切破坏面与压实面成  $45^\circ + \varphi_1/2$ ; 当切取方向与压实面一致时, 其剪切破坏面和压实面成  $45^\circ - \varphi_2/2$ . 一般土的内摩擦角  $\varphi < 45^\circ$ , 即有  $(45^\circ + \varphi_1/2) > (45^\circ - \varphi_2/2)$ . 故剪切破坏面越接近压实面时, 其抗剪强度越弱, 即: 压实黄土垂直样的强度大于水平样的强度.

### 3 结语

本文分别以由垂直向和水平向切取的压实黄土土样为研究对象, 进行了不同围压、不同干密度和不同含水率下的真三轴剪切试验. 试验结果表明: 相同围压、干密度下, 垂直向和水平向的应力-应变曲线有明显差异, 垂直向试样的轴向应变小于水平试样. 轴向应变差异随着干密度和轴向压力的增大而增大, 随着含水量和围压的增大而减小; 侧向应变差异随着干密度和轴向压力的增大而增大, 随着围压的增大而减小. 初始变形模量  $E_i$  在垂直方向大于水平方向, 抗剪强度在垂直方向大于水平方向.

### 参考文献 References

- [1] 谢定义. 讨论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.  
XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering 2001, 23(1): 3-13.
- [2] CASAGRANDE A, CARRILLO N. Shear failure of anisotropic materials[J]. Boston Society of Civil Engineering Journal(JA), 1944, 31(2): 74-87.
- [3] WHITTLE A J, KAVVADAS M J. Formulation of MIF-E3 constitutive model for over consolidated clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(1): 173-198.
- [4] CALLISOTO L, CALABRESI G. Mechanical behavior of a natural soil clay[J]. Geotechnique, 1998, 48(4): 495-513.
- [5] 宋新江, 徐海波, 王永雷, 等. 水泥土各向异性变形特性研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1619-1626.  
SONG Xinjiang, XU Haib, et al. Study of characteristics of cement-soil anisotropic deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1619-1626.
- [6] 管林波, 周建, 张勋, 等. 中主应力系数和主应力方向对原状黏土各向异性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增2): 3872-3877.  
GUAN Linbo, ZHOU Jian, ZHANG Xun, et al. Study of influence of parameters of intermediate principal stress and principal stress direction on anisotropy of intact clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 29(s2): 3872-3877.
- [7] 温晓贵, 张勋, 周建. 考虑各向异性的原状软黏土微观结构变化机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(J): 28-37, 38.  
WEN Xiaogui, ZHANG Xun, ZHOU Jian. Changing mechanism of microstructure of intact soft clay considering anisotropy[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 27-32, 38.
- [8] 童朝霞, 周少鹏, 姚仰平, 等. 测定各向异性砂土抗剪强度特性的新型直剪装置及初步应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2579-2580.  
TONG Zhaoxia, ZHOU Shaopeng, YAO Yangping, et al. An improved direct shear apparatus for shear strength of anisotropic sands and its primary application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2579-2580.
- [9] 罗开泰, 聂青, 张树炜, 等. 人工制备初始应力各向异性结构性土方法探讨[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2815-2820, 2834.  
LUO Kaitai, NIE Qing, ZHANG Shuyi, et al. Investigation on artificially structured soils with initial stress-induced anisotropy[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2815-2820, 2834.
- [10] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研究与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1172-1179.  
SHAO ShengJun, LUO Aizhong, DENG Guohua, et al. Development of a new true triaxial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1172-1179.

(编辑 桂智刚)