

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.04.013

结构性吹填软土侧向变形真三轴试验研究

杨爱武^{1,2}, 于月鹏¹, 许再良³

- (1. 天津城建大学 土木工程学院; 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;
2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071;
3. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142)

摘要:为了研究吹填软土在侧向变形条件下的力学与结构特性,利用真三轴试验机以及WF应力路径试验仪进行了不排水条件下的侧向卸荷试验,并与常规三轴试验结果进行了对比分析。试验结果表明:与常规三轴剪切试验应力-应变关系曲线表现的硬化特性不同,真三轴卸荷试验表现出应变软化现象。随着初始围压的增大,土体由剪缩向剪胀变化。由于中主应力的影响,真三轴卸荷状态下土体的结构屈服应力值明显大于WF卸荷状态以及常规三轴试验下的数值,其随着中主应力系数 b_d 的增大而成非线性增长。真三轴侧向卸荷条件下土体抗剪强度指标大于WF卸荷条件,与常规三轴试验结果也明显不同,其内摩擦角增大,粘聚力减小。

关键词:侧向变形; 结构特性; 真三轴; 吹填软土; 卸荷; 中主应力

中图分类号:TU471.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)04-0081-06

Analysis of the Lateral Deformation of Structural Soft Dredger Fill with True Triaxial Test

Yang Aiwu^{1,2}, Yu Yuepeng¹, Xu Zailiang³

- (1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Key Laboratory of Soft Soil Characteristic and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300384, P. R. China;
2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, P. R. China;
3. Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, P. R. China)

Abstract: In order to study the mechanical properties and structural properties of soft dredger fill under lateral deformation. Based on true triaxial and WF stress path apparatus, lateral unloading undrained tests were carried out. The results derived from true triaxial test, WF stress path test and routine triaxial shear test were analyzed. The contrastive conclusions are as follows: The stress-strain curve of true triaxial unloading test shows a softening behavior, which is different from the hardening behavior for that of conventional triaxial shear test. With the increase of initial confined pressure, the dilatancy of soil transfers from shrinkage to expansion. The structural yield stress of the unloading soil with true triaxial test method is dramatically larger than that with the latter two tests due to the effect of intermediate principal, which exhibits a nonlinear growth as the coefficient of intermediate principal b_d stress jumps. The shear strength indexes of unloading soil with true triaxial test is larger than that with WF stress path test. Compared with the results of routine triaxial test, the internal friction angle of true triaxial test is bigger while the cohesion is smaller.

Key words: lateral deformation; structural properties; true triaxial test; soft dredger fill; unloading; the intermediate principal stress

收稿日期:2014-01-14

基金项目:国家自然科学基金(41372291,51179186)

作者简介:杨爱武(1971-),男,博士(后),教授,主要从事软土地基及土体微观结构研究,(E-mail)tulilab@163.com。

实际工程中常采用常规三轴试验所求参数进行设计,而基坑开挖过程其实是卸荷过程,此时中主应力不等于小主应力或大主应力,土体变形和强度受到的影响是不同的,因此,很有必要利用真三轴仪研究土体变形与强度特性^[1-2]。工程实践中除了以垂直方向变形的沉降,侧向变形也是大量存在的,如在基坑开挖侧向卸荷以及挡土墙后土体的侧向变形等。对土体的侧向变形问题,学者们对此做了相关研究工作,如 Yin 等^[3-4]对 CDG 进行了真三轴试验,得出中主应力对土体强度具有一定影响的结论。Prashant 等^[5]对超固结高岭土进行了不排水剪切试验,得出随着中主应力比的增大,破坏时应变减小的结论。梅国雄等^[6]利用真三轴仪对土体进行了侧向卸荷试验,根据试验结果得出中主应力提高初始强度,侧向卸荷条件下土体在较小应变下发生破坏。盛佳韧等^[7]对上海原状软土进行了排水剪切试验,结果表明原状软土抗剪强度、屈服和破坏点位置随着洛德角的增大而减小。何恰等^[8]进行了正常固结状态下重塑粉质粘土卸荷应力路径排水剪切真三轴试验,探讨了试验土体的强度变化规律,获得了卸荷土体参数。魏少伟等^[9]对海积粉质粘土进行了一系列 K。固结不排水卸荷试验,结果表明随着固结围压的增大初始切线卸荷模量增大。孙红等^[10]对上海淤泥质软土进行了真三轴试验,结果表明初始损伤应力门槛值随中主应力比的增大而增大。曾玲玲等^[11]取广州南沙典型软土进行了固结不排水剪切应力路径试验,研究表明侧向卸荷会造成剪应力增加、体应力减小,从而使土体产生剪胀趋势。杨爱武等^[12]对吹填软土进行了不固结不排水的真三轴试验,结果表明初始切线模量随着中主应力系数 b 值的增大而增大。虽然土体在侧向卸荷状态下中主应力对强度和变形影响的研究已经很多,但是考虑中主应力对土体结构性的影响还有大量工作要做^[13]。自然界中的土体实际上处于三维应力状态,且广泛存在结构性。本文拟采用真三轴试验的方法并结合 WF 应力路径仪与常规三轴试验,以天津滨海新区吹填场地土体为研究对象,模拟基坑开挖土体的实际应力路径,研究侧向变形条件下中主应力对变形、强度以及结构特性的影响,为吹填场地深基础工程实践提供理论支持。

1 真三轴试验

1.1 试验仪器

试验采用西安理工大学和西安智通自动化技术开发公司联合开发研制的 XGT-1 型微机控制真三轴试验机。真三轴试验机采用复合加载方式,大主

应力方向采用刚性加载,中主应力方向和小主应力方向采用柔性加载。

1.2 试验土样基本性质

试验所用土样取自天津滨海新区临港工业区经过真空预压处理的吹填场地,取样深度为 3.0~3.5 m。土体基本物理力学指标见表 1,无侧限应力-应变关系曲线见图 1。

表 1 吹填软土的物理力学指标

含水 量/%	天然密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙 比	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	压缩指数/ MPa^{-1}	压缩模量/ MPa
47.1	1.74	1.320	41.6	21.1	20.5	0.914	2.702

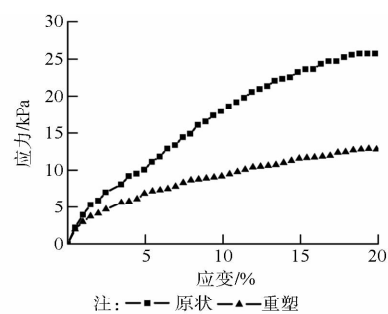


图 1 无侧限应力-应变关系曲线

由表 1 可以看出,现场吹填土为高含水量软土。由图 1 可以看出,原状土的无侧限抗压强度比重塑土的无侧限抗压强度大,即现场吹填土具有结构性。

1.3 试验方案

土体经过不同的固结过程、不同的剪切应力路径,会表现出不同的应力应变性状。Lamber^[14]于 1967 年首先提出应力路径的定义,即:应力路径是指“土单元从一种应力状态变到另一种应力状态时最大剪切应力点的轨迹”。此定义的提出为现场和试验室研究土的性质提供了一个合理方法。Lamber 于 1979 年再次撰文阐述了应力路径方法,并就工程中如何考虑应力路径的影响提出了具体的步骤。

深基坑工程,无论在开挖过程中还是在挡土结构施工阶段,土体受力主要是一个卸载过程。曾国熙等^[15]认为土体中各点的应力路径是变化的,对其进行全面的考虑是不可能的。因此有必要抓住几种主要的应力路径进行适量的室内试验以模拟土体实际受荷过程中的变形和强度特性。刘国彬^[16]认为基坑开挖过程中土体的应力状态可用图 2 所示的单元体代替,4 单元的应力路径为:单元 A,竖向卸荷的同时横向也卸荷;单元 B,竖向卸荷的同时横向加荷;单元 C 处于主动区,竖向荷载不变,横向卸荷;单元 D,保持原始应力状态。

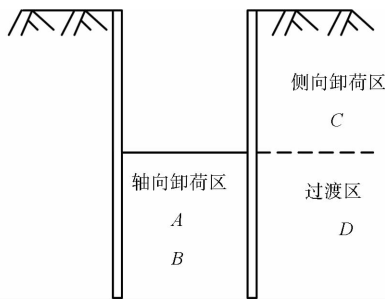


图 2 基坑开挖卸荷影响区域

基坑开挖过程中土体的应力路径如图 3 所示。AB 段表示基坑开挖过程中的侧向卸荷区, AB 与 AC 之间的区域表示过渡区域, AC 段表示轴向卸荷区域。

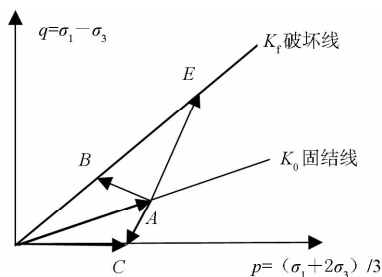


图 3 应力路径示意图

本文主要模拟基坑开挖过程中周边主动区土体的性质,对试样进行不固结不排水的真三轴侧向卸荷试验,试样为正方体,其尺寸为 70 mm×70 mm×70 mm,静止侧压力系数 $K_0=0.64$ 。具体的试验方案如下:对试样同时施加压力,使得 $\sigma_2=\sigma_3=30、40、50$ kPa,相对应的 σ_1 分别为 $\sigma_1=47、62、78$ kPa,恢复土样的天然应力状态。试验过程中 σ_1 方向保持应力不变, σ_2 方向刚性板加载保持应变为 0, σ_3 方向卸荷,直至卸荷至 0 或者土样破坏。为了便于比较,还利用吹填土做了 2 组与真三轴条件下相同 σ_3 的不固结不排水试验。第 1 组试验:常规三轴不固结不排水试验,采用与真三轴相同的围压。第 2 组试验:利用 WF 应力路径仪模拟基坑卸载,试验过程中静止侧压力系数 $K_0=0.64$,保持轴向应力不变,围压卸荷至 0 或者土样破坏。

2 试验结果与分析

2.1 常规三轴试验

图 4 为常规三轴的应力-应变关系曲线。由图可知,吹填土的应力-应变关系曲线属于逐渐硬化类型,即主应力差随着轴向应变 ϵ_1 的增加而增大,没有明显的峰值点,呈现硬化特性。

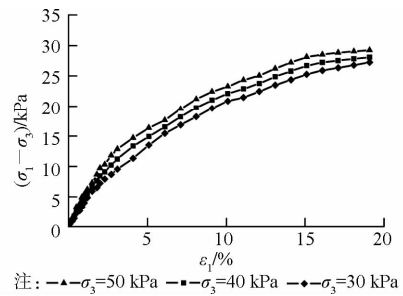


图 4 常规三轴试验的应力-应变曲线

2.2 WF 应力路径仪侧向卸荷试验

利用 WF 应力路径仪测得侧向卸荷不固结不排水条件下的 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 关系曲线(如图 5 所示)。由于本文所选用围压较小, $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 关系曲线表现为弱硬化现象。

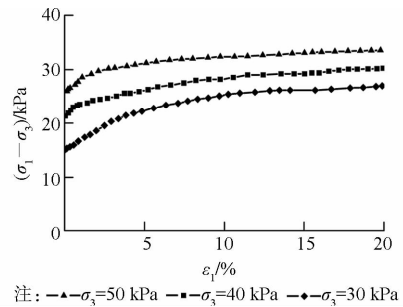


图 5 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \epsilon_1$ 关系曲线

2.3 真三轴卸荷试验

模拟主动区土体侧向卸荷不固结不排水试验,即保持轴向力不变,逐渐减小侧向应力,以 σ_1 为参考,故定义中主应力系数 $b_d = (\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ 。中主应力比 b 与中主应力系数 b_d 为互补关系,即 $b = 1 - b_d$ 。可见 b_d 可以从 0 变化到 1, $b_d = 0$ 对应的是三轴伸长试验, $b_d = 1$ 对应的是常规三轴压缩试验。

图 6 为中主应力系数与轴向应变 ϵ_1 的关系曲线。由图可知,中主应力系数随着围压的增大而增大,在同一围压下其值变化范围不大,基本保持稳定。在卸荷过程中中主应力随着小主应力的减小而减小,但其差值一直增大。

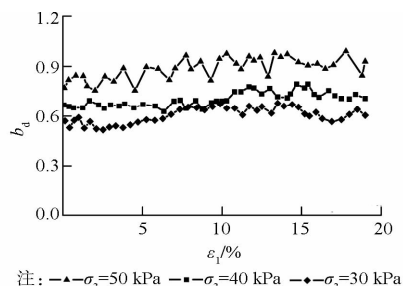


图 6 $b_d - \epsilon_1$ 关系曲线

图 7 为不同围压真三轴卸荷不固结不排水条件下 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线。由图可以知,用真三轴试验方法得到的应力-应变关系曲线表现出应变软化现象。另外由图 6、7 知,初始切线模量随着中主应力系数的增大而增大。 b_d 值增大,达到相同的应变需要的偏差应力越大。

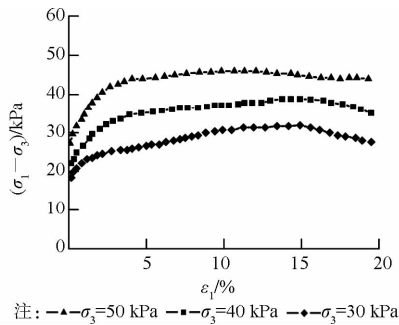


图 7 $(\sigma_1 - \sigma_3) - \varepsilon_1$ 关系曲线

图 8 为轴向应变 ε_1 与横向应变 ε_3 的关系曲线,本文选取 15% 为破坏应变^[17]。在试验过程中, σ_1 方向始终压缩, σ_3 方向始终膨胀。由图 8 可以看出,平面应变不排水状态下土体的 $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$ 曲线比较有规律,土体水平向膨胀的同时轴向逐渐缩小。当 $|\varepsilon_1| > |\varepsilon_3|$ 时, $\varepsilon_v > 0$, 土体剪缩;当 $|\varepsilon_1| < |\varepsilon_3|$ 时, $\varepsilon_v < 0$, 土体剪胀^[18]。卸荷过程中,土体未破坏时, σ_1 方向的应变大于 σ_3 方向的应变,土体表现为剪缩;达到破坏应变时, σ_1 方向的应变小于 σ_3 方向的应变,土体表现为剪胀。即随着应变的增大土体由剪缩向剪胀变化。由图 8 还可以看出,随着初始围压的增大,即中主应力系数的增大,水平方向的膨胀速率亦增大,此时由剪缩转变为剪胀的现象更为明显。

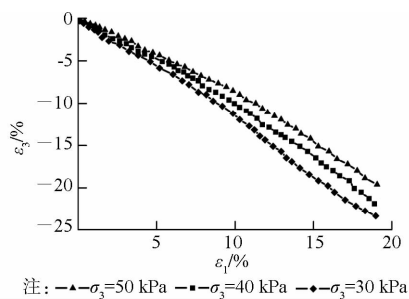


图 8 $\varepsilon_3 - \varepsilon_1$ 关系曲线

图 9 为孔隙水压力与轴向应变的关系曲线。采用侧向卸荷不固结不排水试验,恢复土样至天然状态时, σ_1 大于 σ_3 , 因此孔隙水压力初始值不为 0。由图 9 可知,孔隙水压力随着围压的增大而增大,随着应变的增大也亦增大。当土体未破坏时,孔隙水压力增大,此时 $\Delta u > 0$, 土体表现为剪缩;达到破坏应

变时, $\Delta u < 0$, 土体表现为剪胀。出现这种现象的原因:真三轴卸荷试验过程中控制 σ_2 方向的应变 $\varepsilon_2 \approx 0$, 颗粒的移动受到了较大的限制,膨胀变形只能在一个方向,在土体未发生破坏时,克服颗粒间咬合作用时需要更多的能量。刚开始卸荷时, σ_3 减小,试样轴向发生压缩变形,土体的密实度增大,颗粒之间的接触更加紧密,咬合力增强,相应的 σ_3 方向的应变较平面应力状态下小,在三维应力状态下剪切性状表现为剪缩。随着 σ_3 的继续减小, σ_1 与 σ_3 的差值越来越大, σ_3 方向的膨胀趋势越来越大,达到破坏应变时, σ_3 方向的膨胀量大于 σ_1 方向的压缩量,在三维应力状态下剪切性状表现为剪胀。

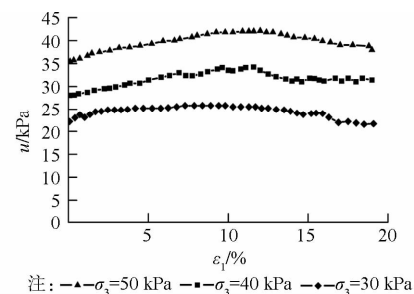


图 9 $u - \varepsilon_1$ 关系曲线

3 考虑中主应力影响的结构特性研究

对图 4、5、7 的试验数据进行处理,得到不同围压下的 $\varepsilon_1 - \lg p$ 关系曲线,如图 10 所示(图中圆圈表示结构屈服应力点, p 为偏应力,其大小为 $\sigma_1 - \sigma_3$)。当偏应力小于土的结构屈服应力时,由于结构的存在,抵抗变形的能力强,总的变形小,变形随应力变化亦小。当偏应力大于结构屈服应力时,土体结构遭到破坏,抵抗变形的能力逐渐降低,随着偏应力的继续增大,应变迅速增大至破坏。也就是说土体在结构屈服前后变形大小不一。由图 10 还可以看出,达到土体结构屈服应力时,卸荷状态对应的应变明显小于加荷状态。

对图 10 的数据进行处理,得到结构屈服应力与围压的关系曲线(如图 11 所示)。随着围压的增大,无论是卸荷还是加荷状态,土体的结构屈服应力都在增大,相同围压下,由于中主应力的影响,真三轴卸荷状态下土体的结构屈服明显大于 WF 卸荷状态,且其值随着中主应力系数的增大而成非线性增长。由图 11 还可以看出,基坑开挖卸荷的实际应力状态下土体结构屈服应力明显高于常规三轴加荷状态下土体的结构屈服应力。

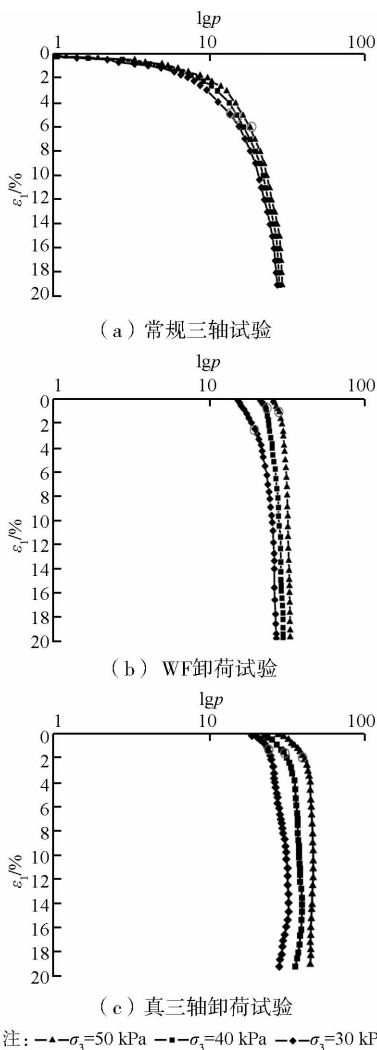


图 10 $\epsilon_1 - \lg p$ 关系曲线

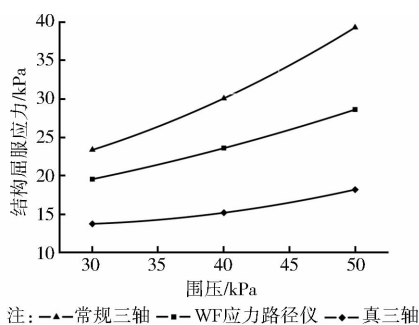


图 11 结构屈服应力与围压关系曲线

4 不同试验条件下抗剪强度指标研究

表 2 为不同试验条件下吹填软土抗剪强度指标。3 种试验条件下抗剪强度指标是经过不同的应力路径而测出:常规三轴试验的抗剪强度指标为加荷至土样破坏而测出;WF 试验的抗剪强度指标是保持轴向力不变,围压减小至零或土样破坏而测出;真三轴的抗剪强度指标是保持大主应力不变,中主

应力方向应变为 0,小主应力卸荷至零或土样破坏而测出。对比结果发现,由于中主应力的影响,侧向卸荷过程中限制中主应力方向应变的内摩擦角明显大于不限制其应变的情况。出现这种现象的原因是:卸荷过程中,限制中主应力方向应变为 0,土颗粒只能沿着小主应力方向运动,颗粒之间的接触与结合状态更为紧密,克服颗粒间咬合作用时需要更多的能量,使得其内摩擦角增大。2 种侧向卸荷状态下土体黏聚力明显小于加荷状态。实际工程中主要应用常规三轴的参数,在基坑开挖设计时应考虑真实路径下土体的抗剪强度指标,采用合理的参数设计,减少不必要的材料浪费。

表 2 不同试验条件下土体抗剪强度指标(C、 ϕ)值

试验条件	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\phi/(^\circ)$
常规三轴	10.3	3.8
WF 应力路径仪	6.5	8.1
真三轴	7.2	11.9

5 结 论

1)真三轴侧向卸荷过程中, σ_1 方向始终压缩, σ_3 方向始终膨胀。随着应变的增大,土体由剪缩转变为剪胀。随着初始围压的增大,即中主应力系数的增大,土体由剪缩转变为剪胀的现象更为明显。

2)中主应力的存在,使土体的结构屈服应力增大。真三轴卸荷状态下土体的结构屈服应力明显大于 WF 卸荷状态,且其值随着中主应力系数的增大而成非线性增长。

3)真三轴侧向卸荷条件下土体抗剪强度指标大于 WF 卸荷条件,与常规三轴试验结果也明显不同,其内摩擦角增大,粘聚力减小。

参考文献:

[1] Yong R N, Mckyes E. Yield and failure of a clay under triaxial stresses [J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, 1971, 97(1): 159-176.

[2] Lade P V, Wang Q. Analysis of shear banding in true triaxial tests on sand [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 128(8): 762-768.

[3] Yin J H, Kumruzzaman M. The stress-strain-strength behaviour of a completely decomposed granite soil using a new advanced true triaxial testing system [C]// The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), India, 2008:1571-1575.

[4] Yin J H, Cheng C M, Kumruzzaman M, et al. New

- mixed boundary, true triaxial loading device for testing three-dimensional stress-strain-strength behavior of geomaterials [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 47(24): 1-15.
- [5] Prashant A, Penumadu D. Effect of intermediate principal stress on overconsolidated kaolin clay [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(3): 284-292.
- [6] 梅国雄, 卢廷浩, 陈浩, 等. 考虑初始应力的坑侧土体真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2079-2082.
Mei G X, Lu T H, Chen H, et al. True triaxial experiment of foundation pit considering initial stress [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2079-2082.
- [7] 盛佳韧, 武朝军, 叶冠林, 等. 上海黏土强度特性真三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(1): 47-52.
Sheng J R, Wu C J, Ye G L, et al. Strength property of Shanghai clay in true triaxial tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(1): 47-52.
- [8] 何怡, 董晓梅, 庄心善. 基坑开挖卸荷土体的应力应变及抗剪强度分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(7): 93-96.
He Y, Dong X M, Zhuang X S. Analysis of stress-strain and shear strength of unloading soil in pit excavation [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(7): 93-96.
- [9] 魏少伟, 郑刚, 刘畅. 滨海新区浅层软土卸荷变形性状试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(5): 77-82.
Wei S W, Zheng G, Liu C. Experimental studies on unloading deformation properties of soft clay in Binhai New Area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(5): 77-82.
- [10] 孙红, 赵锡宏. 软土初始损伤门槛值的真三轴试验研究[J]. 水利学报, 2002(7): 93-97.
Sun H, Zhao X H. Study on initial damage threshold of soft soil by true triaxial tests [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(7): 93-97.
- [11] 曾玲玲, 陈晓平. 软土在不同应力路径下的力学特性分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1264-1270.
Zeng L L, Chen X P. Analysis of mechanical characteristics of soft soil under different stress paths [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1264-1270.
- [12] 杨爱武, 杜东菊, 李佐良, 等. 考虑中主应力影响的吹填土结构强度研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 70-73.
Yang A W, Du D J, Li Z L, et al. A study of the structure strength of dredger fill considering the effect of intermediate principal stress [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(2): 70-73.
- [13] 邵生俊, 陶虎, 许萍. 黄土结构性力学特性研究与应用的探讨[J]. 岩土力学, 2011(Sup2): 42-50.
Shao S J, Tao H, Xu P. Discussion on research of mechanical characteristics of loess considering structural behavior and its application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011(Sup2): 42-50.
- [14] Lamber T W. Stress path method [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(SM6): 309-331.
- [15] 曾国熙, 潘秋元, 胡一峰. 软粘土地基基坑开挖性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1988, 10(3): 13-22.
Zeng G X, Pan Q Y, Hu Y F. The behavior of excavation in soft clay ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 10(3): 13-22.
- [16] 刘国彬. 软土卸荷变形特性的试验研究[D]. 上海: 同济大学, 1995.
- [17] 中华人民共和国水利电力部. SDS01-79 土工试验规程[S]. 北京: 水利出版社, 1981.
- [18] 史萍, 何世秀, 范东凯. 侧向减载土体变形的平面应变试验[J]. 工业建筑, 2009, 39(6): 88-91.
Shi P, He S X, Fan D K. Test study of real three axle on crossrange unloading deformation of clay [J]. Industrial Construction, 2009, 39(6): 88-91.

(编辑 郭飞)