

基坑开挖土体卸荷特性研究进展

马晓文^{1,2}, 艾英钵^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 随着高层建筑、地铁、土坝等大型重要工程的建设和发展, 深基坑工程已成为岩土工程领域的重要课题。土体在开挖卸荷条件下的力学特性是确定深基坑工程模拟分析和设计计算特征参数的依据。长期以来, 深基坑工程数值分析与设计计算所采用的土体强度参数均为常规三轴加荷试验方法获得, 忽略了开挖中的实际应力路径。本文根据国内外文献资料, 主要就基坑开挖土体卸荷试验研究现状进行分析, 总结了基坑开挖土体常规三轴卸荷、 K_0 固结卸荷以及真三轴试验的研究成果, 简要论述了存在的问题及今后研究的方向。

关键词: 应力路径; 常规三轴卸荷; K_0 固结卸荷; 真三轴试验

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2011)S1-0182-05

作者简介: 马晓文(1985-), 男, 山西省孝义市人, 硕士研究生, 主要从事深基坑工程方向的研究工作。E-mail: mxwen78@163.com。

Review of soil behaviors under excavation unloading of foundation pits

MA Xiao-wen^{1,2}, AI Ying-bo^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With the construction and development of some large important projects, such as high-rise buildings, subways, earth dams and so on, deep foundation pit has been a critical question in geotechnical engineering. In unloading condition, the mechanical properties for a specified soil are the basis of determining parameters required to simulating analysis and design of deep foundation pit. For long time, parameters of shear strength of soil used in the design of foundation pit are obtained by means of the normal triaxial loading tests. Unloading condition in the excavation process is usually ignored. The research advances in soil behaviors under excavation unloading reported in the literature are reviewed. The research findings are summarized from the conventional triaxial unloading tests, K_0 consolidated triaxial unloading tests and true triaxial tests. The existing problems and potential research topics in this field are put forward.

Key words: stress path; conventional triaxial unloading; K_0 consolidation unloading; true triaxial unloading

0 引言

在我国, 许多沿海城市处于软土地带, 地下水位偏高, 土体强度较低, 深基坑开挖与软土工程地质条件的制约成为日益突出的矛盾。另外, 大量高层建筑、地下商场、地下车库等兴建在城市建筑密集的地区, 这些地区对基坑开挖引起的变形较敏感, 不恰当的工程作用会造成岩土环境的失衡, 如深基坑开挖造成场地周围地面沉降、裂缝以及对已建构筑物的影响。因此, 深基坑开挖的设计与施工问题已成为岩土工程的热点。

深基坑的开挖过程实质上是水平向卸荷过程, 其变形主要包括: ①坑壁土体向基坑内水平位移和坑底土体回弹变形等; ②坑壁土体内倾变形和基坑降水引

起的基坑周围土体沉降。这一过程使地基土的初始应力状态、地下水位发生了变化, 导致基坑周围地基土体的变形, 影响相邻建筑物、构筑物及地下管线的安全和正常使用。为保证基坑稳定, 满足变形控制要求, 确保基坑周围建筑物、构筑物及地下管线道路等的安全, 必须尽可能准确预估深基坑开挖引起的土体及支护结构的变形。所以, 模拟基坑开挖卸荷过程, 选择符合开挖过程应力状态的试验方法评析基坑开挖土体的工程特性显得非常重要。

本文根据国内外主要文献就基坑开挖引起的侧向

变形研究现状进行分析, 总结了模拟深基坑开挖的土体侧向卸荷变形特性的试验研究成果, 简要论述了存在的问题和今后的研究方向。

1 基坑开挖影响区域与土体应力路径分析

长条形基坑开挖可近似为平面应变问题, 按照基坑剖面的部位可将基坑影响区域划分成3个部分, 如图1所示, 在 $p-q$ 应力平面中进行应力路径分析, 其中, p 为平均正应力, q 为偏应力。 $p=(\sigma_1+\sigma_3)/2$, $q=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ 。

I区: 侧向卸荷区, 随着基坑的开挖, 水平向应力减小, 在静止土压力与主动土压力之间变化, 坚向应力基本保持不变, 即平均正应力 p 减小, 偏应力 q 增大, 其应力路径如图2中 AB 所示。

II区: 坚向卸荷区, 随着上部土体开挖, 上覆压力逐渐减小, 坚向应力减小; 水平向应力可能增加也可能减小, 随距离坑底拐角的远近不同而不同, 一般将土体单元体理想化为水平向应力 σ_h 保持不变, 其应力路径如图2中 ACE 所示。

III区: 为I区和II区的过渡区, 基坑开挖过程中, 土单元体水平及垂直方向应力都发生了变化, 主应力方向发生了转动。其应力路径界于 AB 和 ACE 之间。

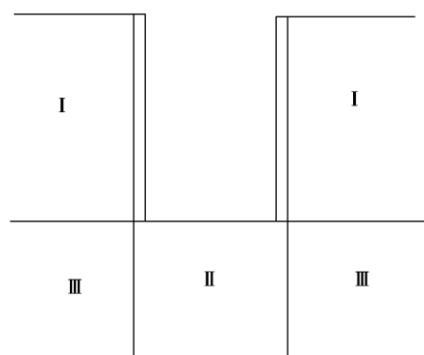


图1 基坑开挖卸荷影响区域

Fig. 1 Different influencing areas in excavation unloading of foundation pit

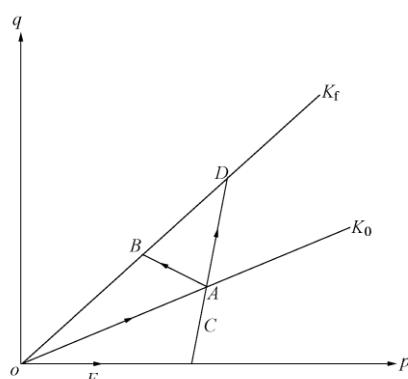


图2 应力路径示意图

Fig. 2 Sketch map of stress path

对基坑变形影响的显著区域是I区和II区, 其中I区是造成侧向变形的主体, II区一方面为支护结构提供反力, 同时也是基坑变形的一部分。

AB 路径为侧向卸荷的应力路径, ACE 路径为轴向卸荷的应力路径, 与常规试验的 AD 路径有不同的破坏点, 即破坏时应力状态是不同的, 从而也就有不同的应力应变关系。

2 基坑开挖应力路径试验研究

基坑开挖的不同阶段、不同部位的应力变化过程不同, 即土体卸荷的应力路径不同, 土体的应力应变关系也不同。长期以来, 人们习惯于常规的“加荷”土力学设计方法, 没有考虑基坑开挖的实际应力路径, 导致基坑支护结构设计的缺陷, 而且土体天然固结状态较符合 K_0 固结而非各向等压固结, 因此, 通过试验模拟基坑开挖土体的卸荷过程, 研究土体的卸荷特性, 确定土体的设计计算参数, 成为基坑工程稳定与变形设计计算的重点和难点。

早在60年代末, 国内外就有学者对不同应力路径的应力-应变关系进行了研究。Lambe^[1]最早提出了应力路径的方法; 曾国熙等^[2]的研究指出, 软黏土的应力-应变关系不但具有非线性特点, 而且受应力路径的影响, 正常固结饱和黏土的应力-应变曲线可以按双曲线拟合, 并可加以归一化; Lade和Duncan^[3]对砂土的试验研究表明, 起始和终了应力状态相同, 应力路径不同, 应力-应变曲线也不同; Nagaraj T S^[4]等人研制了自动进行不同应力路径试验的仪器, 并进行了一种较密砂土的不同应力路径的试验研究。

2.1 常规三轴卸荷试验

文献[5]通过常规三轴卸荷试验研究了黏性土和无黏性土卸荷体缩的原因, 卸荷体缩是某些土的固有特性, 与时间滞后、试样端部约束力无关; 卸荷体缩现象发生在各向异性较显著的土中, 压实的原生各向异性不足以导致卸荷体缩, 次生各向异性通过各向不均等应力的施加反映出来, σ_1/σ_3 超过2.6, 一般就会产生卸荷体缩, 各向等压固结试验中没有发现卸荷体缩。

文献[6]通过对承德中密砂的各种类型的加荷-卸荷-再加荷试验研究发现: 卸荷体缩是很多土在剪切试验中表现出的一种变形特性, 其实质源于剪胀变形的可恢复性; 土体受到剪切荷载发生剪胀时, 土颗粒从位能较低的稳定状态变到不稳定的高位能状态, 剪应力卸除, 土颗粒力图回到原来位置, 体积缩小; 卸荷

体缩与试验应力路径和边界条件有关, 常规三轴卸荷试验卸荷体缩明显, 平面应变和真三轴试验中卸荷体缩不明显。文献[7]对承德密、松砂和黏土进行了不同围压下的常规三轴卸荷试验结果表明, 无论是有剪胀现象的密砂还是有剪缩现象的松砂和黏土都在卸荷时出现体缩, 并随着围压的增加, 卸荷体缩量呈下降趋势; 密砂的卸荷体缩体现了密砂剪胀的可恢复性, 松砂的卸荷体缩实质上是砂土的压密, 黏土的卸荷体缩表明其结构性随加载过程而遭破坏。

文献[8]将原状饱和黏性土进行常规三轴卸荷, 并与常规三轴和等 P 三轴加载试验进行对比得到如下结论: 相同偏应力条件下, 固结不排水常规三轴加载试验的应变小于常规三轴卸荷试验; 固结不排水条件下, 常规三轴加载试验和等 P 三轴加载试验保持为正孔压, 常规三轴卸荷试验观察到负孔压, 呈现剪胀特性; 固结排水条件下, 相同偏应力, 常规三轴卸荷试验的应变大于常规三轴加载试验, 试验过程中, 常规三轴加载试样的体变为负, 呈剪缩特性, 常规三轴卸荷试样的体变为正, 呈剪胀特性。

与常规三轴加载试验相比, 三轴卸荷试验得到的强度小于加载试验, 相同围压下破坏时的主应力差明显小于三轴加载试验, 说明土体在卸荷时更容易发生破坏; 卸荷试验过程中, 试样体积缩小, 孔隙水压力为负值, 呈剪胀特性; 加荷试验过程中孔压为正, 呈剪缩特性。这些现象表明, 卸荷过程使得土样发生了不同于加载试验的变化, 证明了不同应力路径的三轴试验结果不同的必然性。

2.2 K_0 固结三轴卸荷试验

一般情况下, 土体天然固结状态为 K_0 固结, 常规三轴试验中各向等压固结无法准确模拟土体的初始应力状态, 会对试验结果造成一定的影响, 因此, 土体在 K_0 状态下的卸荷试验能够更好地反映天然土体的卸荷特性。

文献[9]模拟基坑开挖应力路径, 分别进行原状软土 K_0 固结后的径向和轴向卸荷试验。研究表明: 软土的卸荷模量远大于常规三轴试验所获得的压缩模量或弹性模量; 初始卸荷模量与平均固结压力成线性关系。文献[10]在上述试验的基础上对软土的卸荷应力-应变关系特性进行了较深入的研究, 发现软土的应力-应变关系与应力路径密切相关, 卸荷应力-应变关系为双曲线形式, 曲线的起始坡度要比常规试验陡。

文献[11]用原状膨胀土进行了平面应变状态下的等主应力比卸荷试验模拟边坡开挖过程中土体的应力-应变特征, 认为膨胀土边坡开挖过程中, 应力应变关系具有明显的非线性, 剪切过程中, 泊松比 ν 基本保持不变, 该试验能较好地反映工程实际中坡体应力、

位移变化特征。文献[12]中, 原状黏土等应力比固结卸荷试验结果表明: 排水条件相同、应力路径不同, 所得的泊松比 ν 不同; 侧向卸荷下的切线弹性模量 E'_t 大于常规加载试验的切线弹性模量 E_t 。

文献[13]对武汉地区 20 个粉质黏土原状饱和试样分别进行 K_0 固结状态的轴向卸荷和径向卸荷试验, 得出如下结论: 土体卸荷应力-应变关系曲线分为压缩和伸长两种类型, 均可近似用双曲线来模拟; K_0 固结后的三轴卸荷试验与常规三轴试验比较, 应力应变关系虽都近似为双曲线, 但其弹性模量 E_t 不相同。

文献[14]利用三轴仪对基坑开挖过程中土体的 K_0 固结-侧向卸荷过程进行模拟, 同时与常规三轴试验结果进行对比分析, 结果表明: 在应力应变关系曲线上, 卸荷试验的破坏主应力差明显小于压缩试验; 卸荷试验的土体黏聚力小于压缩试验中的土体黏聚力; 卸荷内摩擦角小于压缩内摩擦角。文献[15]上述试验的基础上, 获得土体变形参数, 并对某工程实例进行了有限元分析, 结果表明: 用侧向卸荷三轴试验的土体参数计算得到的土体水平位移与实际数据更吻合。

文献[16]由北京某基坑现场取得的土料制备重塑土样进行室内应力控制三轴卸荷试验, 得到卸荷状态下粉土的应力-应变关系均表现为较好的双曲线函数关系, 而且, 侧向固结压力越大, 强度值越大; 卸荷过程中, 随剪切应力的增大和剪切应变的发展, 土样呈现剪胀趋势并在后期产生较大的负孔隙水压力; 在不排水条件下, 由于负孔隙水压力的存在, 使土样的表观强度略有增大。

与常规三轴加载试验相比, K_0 固结-侧向卸荷试验所得到的切线弹性模量 E'_t 大于常规加载试验的切线弹性模量 E_t ; 卸荷试验的土体黏聚力、内摩擦角小于加载试验中的土体黏聚力、内摩擦角小于压缩内摩擦角; 通过 K_0 固结侧向卸荷三轴试验得到的土体参数进行有限元计算, 得到的土体水平位移与实际数据更吻合。

2.3 真三轴试验

普通三轴仪只反映出土样在轴对称应力状态下的强度和变形规律。而真三轴仪能够对土样独立地施加三向不等的主应力, 并测量 3 个主方向上的主应变。因此, 不少研究者使用真三轴仪模拟土体在真实状态的应力路径。

文献[17]用日本生产的 DTC-268 型真三轴仪对膨胀土进行了平面应变卸荷试验, 结果显示, 泊松比随侧向压力的卸除, 从起始值 1.0 逐渐减小为 0.5, 再减小到小于 0.5, 土的体积由剪缩过渡到剪胀。

文献[18]对标准砂和风干黏土的击实试样进行了真三轴应力应变关系的试验研究, 结果发现: 轴向加

荷时侧向变形可能出现压缩。文献[19]保持小主应力、中主应力不变, 在大主应力方向加荷, 对粉砂进行了真三轴试验, 结果表明: 在特定的应力路径下排水剪切, 小主应力方向膨胀, 泊松比可以大于 0.5 甚至大于 1; 中主应力方向首先压缩, 之后膨胀, 泊松比可以小于 0。

文献[20]模拟基坑开挖过程中基坑周边土体的应力路径, 利用真三轴仪对武汉地区具有代表性的粉质黏土进行固结不排水和排水真三轴卸荷试验, 得出: 真三轴卸荷不排水试验所得的试样应力-应变关系曲线随着固结压力的增加由应变硬化型转变为应变软化型, 排水试验的应力-应变关系曲线在不同围压下均成应变硬化型。在相同围压下, 排水极限强度明显高于不排水强度。文献[21]在上述试验的基础上进行了进一步的分析认为: 真三轴卸荷不排水试验的应力-应变关系曲线不符合 Duncan-Zhang 模型, 但该试验曲线在低围压下基本符合 Lade-Duncan 弹塑性模型, 在高围压下偏差较大; 而卸荷排水试验的应力-应变关系曲线与不排水条件下 Lade-Duncan 弹塑性模型曲线吻合较好。

与常规三轴加荷试验相比, 真三轴试验中, 保持小主应力、中主应力不变, 在大主应力方向加荷时侧向变形可能出现压缩, 加荷试验没有表现这种变形特性; 而且真三轴卸荷不排水试验的应力-应变关系曲线随着固结压力的增加由应变硬化型转变为应变软化型, 无论排水与否, 试验曲线基本符合 Lade-Duncan 弹塑性模型, 均不符合 Duncan-Zhang 模型。

2.4 存在的主要问题

(1) 常规三轴试验无法真实反映基坑开挖所引起的土体应力状态的改变; 常规三轴卸荷试验虽能模拟基坑部分区域卸荷时的应力路径, 但各向等压固结无法准确模拟天然土体的初始应力状态, 最终会给试验结果带来一定的影响。

(2) K_0 固结卸荷试验能较好地反映天然土体的初始应力, 模拟基坑开挖卸荷的应力状态; 然而基坑在开挖过程中有可能排水, 也有可能不排水, 或者是不完全排水, 需根据具体情况而定, 使得排水条件与基坑开挖过程相一致。

(3) 相比较而言, 真三轴试验更能模拟土体在真实状态的应力路径, 但由于真三轴仪发展起步较晚, 仪器本身存在一些无法解决的问题, 如难以保证棱角处受力状态, 难以完全消除边角效应等等。

3 结论与展望

(1) 常规三轴卸荷试验发现卸荷体缩是各向异性

土体的固有特性, 随着围压的增加, 卸荷体缩量呈下降趋势; 卸荷体缩与试验应力路径、边界条件有关, 平面应变试验和真三轴试验的卸荷体缩不明显。

(2) 土体 K_0 固结卸荷试验的应力-应变关系为双曲线, 与常规压缩试验相比较, 卸荷试验的初始切线模量明显小于压缩试验初始切线模量, 卸荷试验的破坏主应力差也远远小于压缩试验破坏主应力差, 说明卸荷条件下, 土体更容易引起破坏。另外, 经过卸荷试验后, 土体的黏聚力及内摩擦角均小于压缩试验。

(3) 真三轴卸荷不排水试验的应力-应变关系曲线随着固结压力的增加由应变硬化型转变为应变软化型, 排水试验的应力-应变关系曲线在不同围压下均成应变硬化型。在相同围压下, 排水极限强度高于不排水强度。

(4) 真三轴仪能够对土样独立地施加三向不等的主应力, 并测量 3 个主方向上的主应变, 能更好地反映出土体在卸荷状态下的应力应变特性, 但真三轴试验起步晚, 试验研究少, 仪器本身难以保证棱角处受力状态, 难以完全消除边角效应等等。因此, 这方面有待做进一步的研究。

(5) 基坑开挖卸荷对土体应力应变关系的影响问题较为复杂, 不同地区、不同类别的土体应力应变关系受卸荷影响的程度不同, 因此, 有必要对更多的土体的进行卸荷试验研究。

参考文献:

- [1] LAMBE T W. Stress path method[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division ASCE, 1967, **93**(SM6): 309 - 331.
- [2] 曾国熙, 潘秋元, 胡一峰. 软黏土地基基坑开挖性状的研究[J]. 岩土工程学报, 1958, **10**(3): 13 - 22. (ZENG Guo-xi, PAN Qiu-yuan, HU Yi-feng. The behavior of excavation in soft clay ground[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1958, **10**(3): 13 - 22. (in Chinese))
- [3] LADE P V, DUNCAN J M. Stress-path dependent behavior of cohesion-less soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1976, **102**(GT1): 42 - 48.
- [4] NAGARAJ T S M K, SRIDHARAN A. Incremental Loading device for stress path and strength testing of soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1981, **4**(2): 35 - 46.
- [5] 矫德全, 陈愈炯. 土的各项异性和卸荷体缩[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(4): 9 - 15. (JIAO De-quan, CHEN Yu-jiong. Anisotropy and volume-contraction of soil due to axial unloading in CD test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(4): 9 - 15. (in Chinese))

[6] 李广信, 郭瑞平. 土的卸荷体缩与可恢复剪胀[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(2): 158 - 161. (LI Guang-xin, GUO Rui-ping. Volume-contraction in unloading of shear tests and reversible dilatation of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(2): 158 - 161. (in Chinese))

[7] 李广信, 武世锋. 土的卸荷体缩的试验研究及其机理探讨[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 47 - 50. (LI Guang-xin, WU Shi-feng. Experimental research on volume-contraction of soil under unloading and examination of its mechanism[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 47 - 50. (in Chinese))

[8] 常银生. 黏性土应力路径的试验研究与分析[D]. 南京: 南京工业大学, 2005. (CHANG Yin-sheng. Experimental study and analysis of stress path for cohesive soil[D]. Nanjing: University of Technology, 2005. (in Chinese))

[9] 刘国斌, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 18 - 23. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading modulus of the Shanghai soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 18 - 23. (in Chinese))

[10] 刘国斌, 侯学渊. 软土的卸荷应力 - 应变特性[J]. 地下工程与隧道, 1997(2): 16 - 23. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Unloading stress-strain characteristics of the soft clay[J]. Underground Engineering and Tunnel, 1997(2): 16 - 23. (in Chinese))

[11] 张于龙. 平面应变条件下膨胀土等主应力比卸荷试验研究[J]. 工程勘察, 1997(2): 8 - 10. (ZHANG Yu-long. Unloading test of equivalent stress ratio under plane strain of expansive soil[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 1997(2): 8 - 10. (in Chinese))

[12] 葛卫春. 基坑侧向卸荷应力路径及挡墙侧向变形研究[D]. 南京: 河海大学, 2001. (GEI Wei-chun. Research on lateral unloading stress path and wall deformation for foundation pit[D]. Nanjing: Hohai University, 2001. (in Chinese))

[13] 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]. 岩土力学报, 2003, 24(1): 17 - 20. (HE Shi-xiu, HAN Gao-sheng, ZHUANG Xin-shan, 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))

[14] 童华炜, 邓祎文. 土体 K_0 固结 - 卸荷剪切试验研究[J]. 工程勘察, 2008(5): 13 - 16. (TONG Hua-wei, DENG Yi-wen. The experimental study on the K_0 consolidation-lateral unloading of the soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2008(5): 13 - 16. (in Chinese))

[15] 童华炜. 考虑卸荷应力路径的基坑开挖土体变形研究[J]. 建筑科学, 2008, 21(7): 35 - 38. (TONG Hua-wei. Researches on soil deformations in foundation pit excavation by triaxial unloading path test[J]. Building Science, 2008, 21(7): 35 - 38. (in Chinese))

[16] 聂庆科, 胡建敏, 黄茂生. 卸荷条件下粉质黏土变形性状研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(3): 354 - 359. (NIE Qing-ke, HU Jian-min, HUANG Mao-sheng. Deformation characteristics of slty clay from controlled-stress unloading tests[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(3): 354 - 359. (in Chinese))

[17] 刘祖德, 孔官瑞. 平面应变条件下膨胀土的卸荷变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 68 - 73. (LIU Zu-de, KONG Guan-rui. Unloading deformation test under plane strain of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 68 - 73. (in Chinese))

[18] 朱俊高, 卢海华, 殷宗泽. 土体侧向变形性状的真三轴试验研究[J]. 河海大学学报, 1995, 23(6): 28 - 33. (ZHU Jun-gao, LU Hai-hua, YIN Zong-ze. Lateral deformation of soil in true triaxial test[J]. Journal of Hohai University, 1995, 23(6): 28 - 33. (in Chinese))

[19] 徐志伟, 殷宗泽. 粉砂侧向变形特性的真三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 626 - 629. (XU Zhi-wei, YIN Zong-ze. Study on deformation characteristic of silt by true triaxial test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 626 - 629. (in Chinese))

[20] 赵鑫. 深基坑开挖卸荷土体试验研究及有限元分析[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2006. (ZHAO Xin. Experimental study on unloading soil of deep foundation pit and finite elements analysis[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2006. (in Chinese))

[21] 何怡, 董晓梅, 庄心善. 基坑开挖卸荷土体的本构模型真三轴试验研究[J]. 建筑科学, 2009, 25(5): 55 - 59. (HE Yi, DONG Xiao-mei, ZHUANG Xin-shan. Study on true triaxial experiment of constitutive model for excavation unloading soil mass[J]. Building Science, 2009, 25(5): 55 - 59. (in Chinese))