

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.06.003

红粘土侧向卸荷真三轴试验及其力学特性分析

周远忠^{1,2}, 刘新荣¹, 余瑜¹, 戴自然²

(1. 重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 贵州师范大学材料与建筑工程学院, 贵阳 550001)

摘要:采用刚柔复合型真三轴仪,模拟基坑实际开挖过程,进行了三向主应力不同的单面侧向卸荷真三轴试验,分析了侧向卸载和竖向加载条件下红粘土的应力-应变关系、变形破损过程及其强度参数随基坑开挖的变化特点。根据红粘土强度参数在基坑开挖过程中的变化特点和工程实践确定强度折减系数,采用双强度折减法对土体强度参数进行分步折减,并选用 FLAC^{3D} 程序和摩尔-库伦模型对红粘土深基坑工程开挖的力学过程进行数值模拟。结果表明,加卸载条件下红粘土变形破损的力学机制完全不同,土体强度参数随基坑开挖深度的增大而减小,变化的范围、幅度和速度以递增方式变化。在相同竖向荷载条件下,开挖过程的土体较受压过程的土体更易变形破损而失稳。

关键词:红粘土;侧向卸载作用;深基坑开挖;强度折减;数值模拟

中图分类号:TU446

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)06-017-08

Lateral unloading true triaxial test and analysis of mechanical properties for red clay

ZHOU Yuanzhong^{1,2}, LIU Xinrong¹, YU Yu¹, DAI Ziran²

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. College of Material and Construction Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: The actual excavation process of the deep foundation pit is simulated by single sided lateral unloading true triaxial test by using rigid-flexible compound true triaxial apparatus. The stress-strain relation, breakage process and change characteristics of the soil strength parameters are analyzed under lateral unloading and vertical loading conditions during the excavation of the pit. Then the reduction factor is determined according to the change characteristics of the red clay strength parameters during the excavation and experience in engineering practice. The soil strength parameters are reduced with double strength reduction methods step by step. The mechanical process for the excavation of the red clay pit is simulated by using FLAC^{3D} procedures and Mohr-Coulomb model. The results show that the mechanical mechanism of the deformation and breakage process for red clay under lateral unloading condition is

收稿日期:2013-12-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50334060);中央高校基本科研业务费科研专项基金资助项目(CDJZR12200018);贵州省联合科研基金资助项目(黔科合J字 LKS[2013]38号)

作者简介:周远忠(1970-),男,副教授,重庆大学博士研究生,主要从事红粘土深基坑与边坡工程研究,(Tel)13985510592;(E-mail)monkey592@126.com。

刘新荣(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65120727;(E-mail)liuxrong@126.com。

completely different from that of vertical loading. Soil strength parameters decrease while the depth of the excavation increases and the changes in range, magnitude and speed are changed incrementally. In the same vertical load condition, the soil under excavation condition is more deformable and easy to breakage compared to that under pressure conditions, which leads to the instability.

Key words: red clay; lateral unloading impact; deep foundation pit excavation; strength reduction; numeral simulation

随着高层建筑日益增多,深基坑工程安全事故不断发生,深基坑工程的安全问题成为影响城市地下空间开发和利用的关键问题,是近年国内外学术研究的热点问题。解决深基坑工程安全问题的核心是如何分析和评价整体稳定性,而基坑整体稳定性取决于土体的物质结构条件和工程力学条件,因此,只有通过模拟深基坑工程施工过程进行相关试验,分析基坑土体在开挖过程中的力学特性,选择合适的本构模型,确定计算参数,进行工程稳定性计算,才能得出合理的评价结果。

针对基坑开挖卸荷的土力学问题,Lolson 等^[1]指出要重视土的应力路径对土体稳定性的影响,沈珠江^[2]强调要建立结构性本构模型进行计算。梅国雄等^[3-4]通过真三轴和普通三轴试验模拟基坑开挖过程中侧向卸荷应力路径,对粉质粘土、软粘土进行了一系列真三轴试验,结果表明,不同应力路径的试验结果差别较大。邵生俊等^[5-7]开发出刚柔复合型真三轴试验装置,并针对黄土的结构性力学特性进行了大量试验,表明土体结构性对其力学特性有较大影响。Soga 等^[8-14]对粘性土的本构模型和强度折减法应用进行了大量研究,采用强度折减法计算边坡安全系数。郑颖人等^[15-16]对强度折减法的应用进行了积极的推广,使其更加广泛和实用。陈波,周远忠等^[16-17]对红粘土微观结构的力学效应进行了研究,并采用 FLAC 计算软件^[18-19]进行基坑工程稳定性计算。由于真三轴试验过程中存在应力主轴旋转、加载不均匀、侧向卸载实现困难等问题,目前通过真三轴试验进行基坑工程稳定性研究中主要存在 2 个问题:一是如何更合理地反映基坑开挖过程中变形破损的力学机理;二是如何进行特殊土深基坑整体稳定性评价。

红粘土是一种具有特殊结构的粘性土,为探讨红粘土在开挖卸荷过程中变形破损的力学机理,笔者取原状红粘土进行三向主应力不同的真三轴单面侧向卸载试验,对比加载和卸载条件下土体变形的应力-应变曲线,分析土体侧向卸载对土体强度参数的影响,采用强度折减法对基坑整体变形失稳的力学过程进行数值模拟,分析红粘土深基坑稳定性。

1 真三轴试验

1.1 试验方案

从施工现场取原状硬塑红粘土,制成 70 mm×70 mm×70 mm 的立方体土样,采用西安理工大学自主研发的刚柔复合型真三轴仪(XGT-1A)进行非等向固结,控制方式为应变控制,模拟基坑开挖时的实际应力路径(如图 1 所示)。试验时先按照试验方案设计的荷载进行加载,当加载完成后,保持试样固结至少 10 h,然后进行卸载试验。试验时通过控制加载阀门使 σ_1 、 σ_2 保持固结时的应力状态不变,而 σ_3 则采用一侧应力保持不变,另一侧逐步减小的方法进行侧向卸载,测试系统自动采集土样卸载过程中应力、应变、孔隙压力等数据。试验时根据不同的应力比 b 值设计围压和竖向压力,以应变达到 15% 为试验结束标准,试样固结时的初始应力状态的具体应力组合情况如表 1 所示。

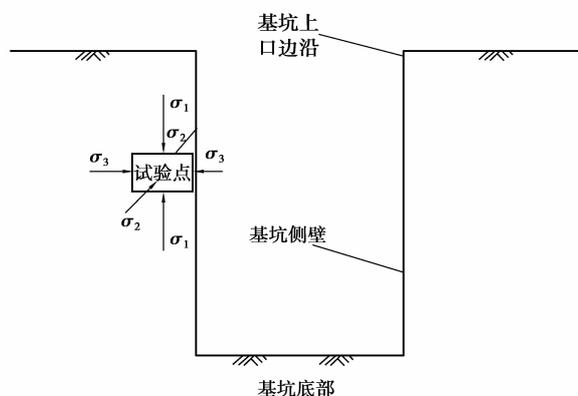


图 1 基坑开挖单面侧向卸荷试验原理示意图

表1 试验方案

| | kPa | | | | | | |
|------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| σ_1 | 50 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 |
| σ_2 | 30 | 50 | 60 | 90 | 120 | 150 | 150 |
| σ_3 | 30 | 50 | 60 | 90 | 120 | 150 | 150 |

1.2 试验装置

由于目前真三轴试验大多数是将基坑长边中点处的剖面假设为应变平面,试验时实质上是固定某一侧面的变形,使其应变不发生变化,但实际上这并不符合实际情况,对试验结果有较大影响,文中采用西安理工大学自主研制的刚柔复合型真三轴仪(XGT-1A),对试样采用液压三维柔性加载,系统自动记录和显示测试结果。试验装置图2所示。

1.3 试验样品

试验土样取自贵阳市城中心的某工地,现场取原始状态红粘土密封后固定,尽量不使土样受到挤压,并保持含水量稳定,用专门的包装材料包装运输到试验室,再制作成70 mm×70 mm×70 mm的立方体土样,放入保湿缸中养护至少24 h后备用。根据试验方案共采用试验样品6组,每组选用3个相同试样。试验样品如图3所示。

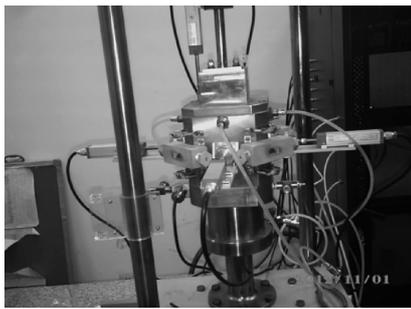


图2 试验装置



图3 试验样品

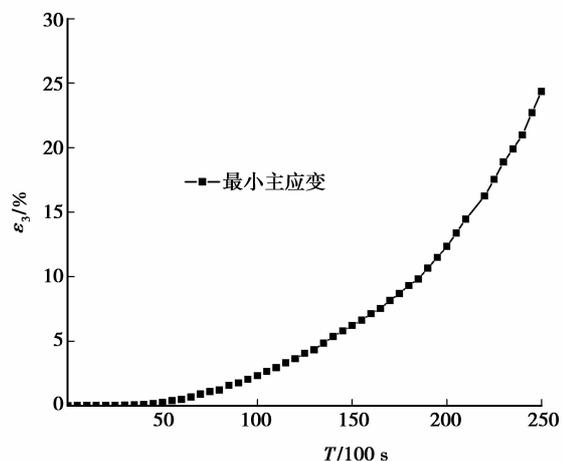
1.4 试验过程

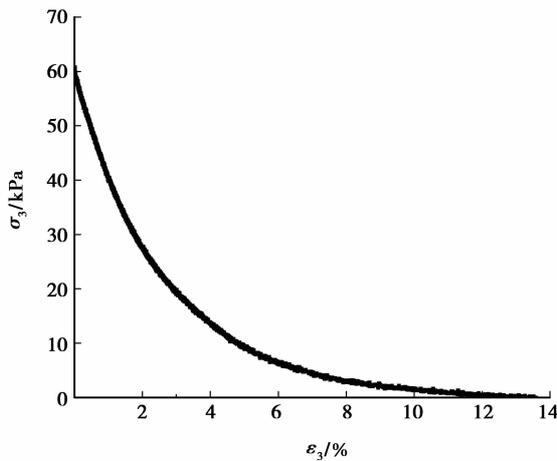
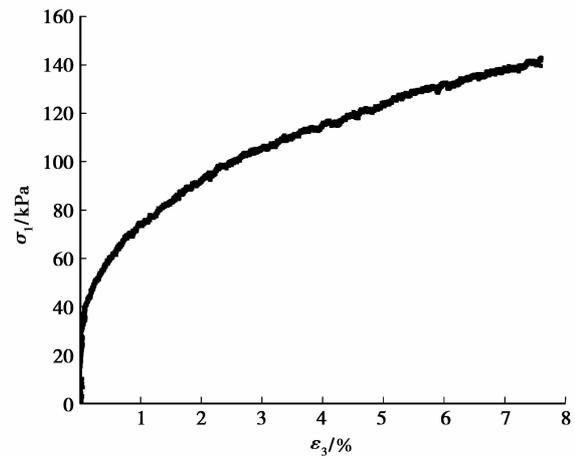
首先,检查加载胶囊的密闭性,加入一定量的加压液体,将准备好的试样用橡胶薄膜包好,放到真三轴仪的基座上。其次,将压力室密封,安装好相关传感器,将测试程序初始化,设定控制方式、加载方式及荷载大小等。然后,按照试验方案施加固结荷载,保持荷载不变进行固结。加载试验时,保持 σ_2 及 σ_3 的荷载为固结荷载不变,不断增加 σ_1 的值,直到达到其设计荷载值。单面侧向卸载试验时,固结完成后关闭 σ_1 、 σ_2 及 σ_3 一侧的加载阀门,而让 σ_3 另一侧的荷载按照设定方式逐渐减小。最后,当最小主应变达到12%时认为试样破坏,结束试验,卸除荷载、传感器等,取下土样,关闭电源,归类放好试验用具,将测试数据分类保存。竖向加载试验时,固结完成后关闭 σ_2 及 σ_3 的加载阀门,而让 σ_1 按照设定方式逐渐增大,当最大主应变达到15%时认为试样破坏,结束试验。

1.5 试验结果与分析

整理试验数据,最小主应变与时间的关系曲线如图4所示,加卸载试验的应力-应变关系曲线如图5、图6所示。限于篇幅,其他图形未列出。

由图4可知,侧向卸载条件下,土体的最小主应

图4 图侧向卸载试验 $\varepsilon_3 - T$ 关系曲线

图 5 图侧向卸载试验 $\sigma_3 - \varepsilon_3$ 关系曲线图 6 图竖向加载试验 $\sigma_1 - \varepsilon_3$ 关系曲线

变随着时间的增加而增大,且前期增加缓慢,后期增加较快。图 5、图 6 表明,侧向卸载试验中,小主应变 e_3 随着小主应力 s_3 减小而增大,而在加载试验中,小主应变 e_3 随着大主应力 σ_1 的增大而增大,但卸载试验中小主应变 e_3 增大的梯度较加载试验小主应变 e_3 中增大的梯度大,2 种变化曲线均近似为双曲线。将 s_3 与 e_3 的关系曲线数据经软件进行非线性拟合处理后得到 s_3 与 e_3 的函数关系式

$$s_3 = s_0 + A_1 e^{-\frac{(e_3 - \varepsilon_0)}{k_1}} + A_2 e^{-\frac{(e_3 - \varepsilon_0)}{k_2}}, \quad (1)$$

式中: A_1 、 A_2 、 k_1 、 k_2 为拟合公式的试验参数,与土体类别和试验条件有关,非线性拟合后会得到一个取值范围,在此范围内根据试验条件经不同荷载组合方案的拟合曲线比较后综合取值,由于数值变化范围不是很大,文中按下限取值如下式

$$s_0 = 0.3452, \varepsilon_0 = 0.327437, A_1 = 13.13206, A_2 = 57.66155, k_1 = 1.24001, k_2 = 1.24001,$$

其中: σ_0 、 ε_0 分别为初始最小主应力和初始最小主应变。

2 力学特性分析

试验结果表明,在相同固结和围压条件下,竖向加载和单面侧向卸载条件下的应力-应变关系曲线变化方向相反,说明了 2 种试验条件下的本构关系具有本质区别:竖向加载试验时,在不断增大的竖向应力产生的剪切作用力下,土样达到了土体本身的抗剪强度而破损,而在单面侧向卸载条件下,土样在竖向荷载持续作用而侧向荷载不断减小的过程中应变不断增大,土体中剪应力不断增大并逐渐达到抗剪强度,其微观结构不断损伤,土体强度参数不断减小,直到屈服和破坏。可见采用加载试验建立的本构模型难以反映基坑开挖过程中土体的实际变形破损情况。

在基坑开挖过程中,开挖一侧土体的应变不断增大到土体屈服和破坏的过程反映了土体强度参数逐渐减小的过程,如果不采取支护措施控制土体变形,土体中剪应力不断增大并逐渐达到其抗剪强度,土体强度参数将随着开挖深度不断增加而逐渐减小,直到土体变形过大而破坏,导致基坑整体失稳,发生安全事故。由于土体强度参数变化时间与基坑开挖时间存在相关性,随着时间增大,最小主应变将随之不断增大,同时土体的强度参数将不断减小,以单面侧向卸载试验的应变-时间曲线的的数据点作为参考点,结合以往三轴试验得到的粘聚力变化较内摩擦角变化快且变化幅度大的特点和工程实践经验,剔除变异数据点,并作适当调整,使曲线更能表达土体强度参数变化的渐进性,通过相关绘图软件绘制而成 2 种不同试验条件下土体强度参数随时间变化关系曲线,如图 7 所示,竖向加载试验与侧向卸载试验的土体强度参数均随着时间增加而减小。在相同时间内,侧面单向卸载试验的土体强度参数较竖向加载试验的土体强度参数减小的幅度更大,变化的速度更快。假设侧面单向卸载试验的土体强度参数大小与竖向加载试验的土体强度参数大小之比为 k ,在基坑开挖模拟过程中,可以根据开挖进程和工程实际经验,确定竖向加载和单面侧向卸载应力路径条件下土体强度参数值之比 k ,并将其作为开挖过程中土体强度参数的折减系数,将库伦准则式(2)修改为式(3),

在计算时根据开挖分步情况和工程实际调整竖向加载试验得到的土体强度参数,选择 M-C 本构模型,计算基坑安全系数,实现对深基坑的稳定性评价。

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi, \quad (2)$$

$$\tau' = ck(t) + \sigma \tan \varphi k(t). \quad (3)$$

基坑开挖过程中土体强度参数变化在基坑开挖结束后一定时间内尚未完全趋于稳定,但基坑开挖的过程实际上同时也是强度参数变化时间的增大和开挖深度不断增加的过程,可以近似认为土体强度参数变化与开挖深度相关,故将库伦准则式(3)修改为式(4),使计算更为方便。

$$\tau' = ck(H) + \sigma \tan \varphi k(H), \quad (4)$$

其中: c 为土的粘聚力; φ 为土的摩擦角; k 为加卸载土体强度参数之比; t 为基坑开挖时间; H 为基坑开挖深度。

式(3)、(4)表明在基坑开挖过程中土体强度参数的变化是时间或开挖深度的函数。

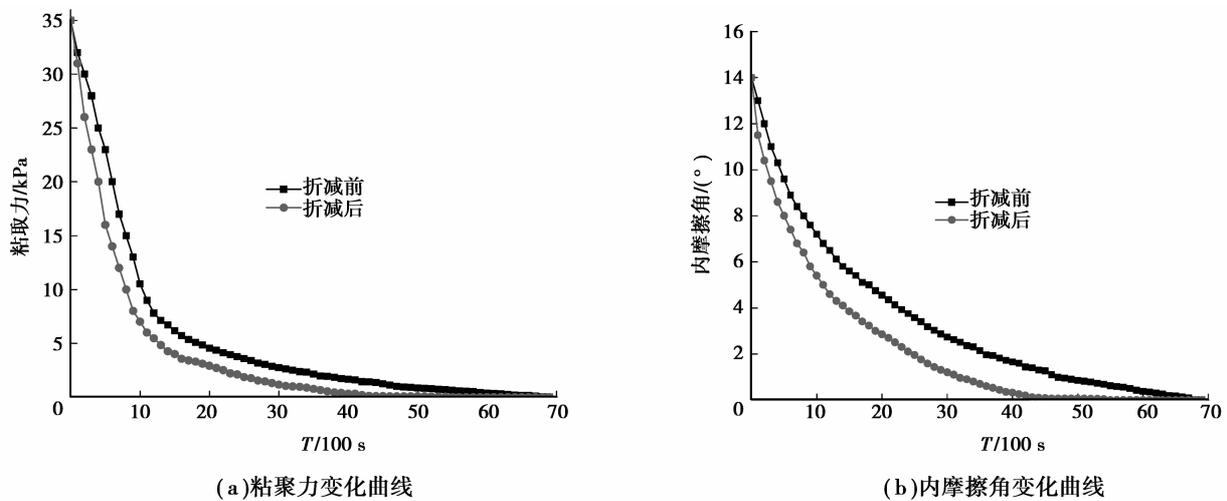


图 7 加卸载试验强度参数变化曲线

3 数值模拟

3.1 计算方法

在计算过程中考虑深基坑在开挖过程中应力路径和土体结构性的影响,采用 FLAC^{3D} 程序,选用 M-C 本构模型,根据侧向卸载真三轴试验结果,采用双强度折减法对土体强度参数进行折减,得到折减后的强度参数。根据基坑实际开挖尺寸和岩土条件整体建模,分步开挖,分步折减,每步开挖结束并经自重力平衡后,记录不同开挖深度下不同观测点的位移,计算基坑开挖后的安全系数,再继续下一步开挖,直到开挖至坑底。在实际模拟施工的计算过程中,把开挖后的基坑侧壁视为边坡,分 6 步开挖,每步开挖深度为 2 m,待形成初始地应力场后将位移清零,计算安全系数,根据不同开挖深度条件下各观测点的位移和安全系数的变化趋势来分析基坑稳定性变化规律。

3.2 工程概况

某高层建筑工程,场地位于贵阳市,地上 38 层,地下 4 层,基坑平面形状为长方形,长度为 80 m,宽度为 40 m,建筑物建筑面积 115 600 m²,建筑地面高度 126.00 m。建筑物为框剪结构,基础形式为箱桩复合基础,即地下室为箱形基础,柱下采用桩基础。基坑长为 80 m,宽为 40 m,深度为 12 m,坑底为 5 m 厚中风化石灰岩,该层不发生变形。实际基坑开挖范围为 80 m×40 m×12 m。

3.3 模型建立

模型选用天然红粘土基坑开挖,每边取 10 m 边界,计算域为 100 m×60 m×17 m,正方形网格,网格宽度为 1 m。其中 X 方向长度为 60 m,Y 方向长度为 100 m,Z 方向长度为 17 m。基坑采用 6 步开挖,实际开挖深度 12 m。开挖前的模型及网格划分如图 8 所示,开挖后的整体网格模型如图 9 所示。假设除自重应力

外无其它荷载作用,选用摩尔-库伦本构模型,模型参数选用具有强结构性的红粘土参数,具体见表 2、表 3 所示。



图 8 深基坑整体网格模型

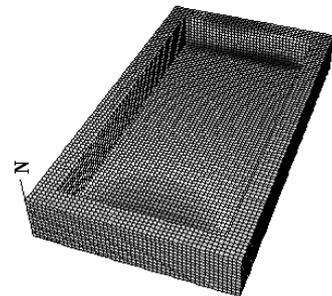


图 9 深基坑工程开挖整体模型

表 2 模型参数(折减前)

| 体积模量(K)/MPa | 剪切模量(G)/MPa | 密度/(g · cm ⁻³) | 粘聚力/kPa | 摩擦角/(°) | 含水量/% |
|-------------|-------------|----------------------------|---------|---------|-------|
| 40 | 15 | 1.70 | 35 | 14.0 | 32.5 |

表 3 模型参数(折减后)

| 体积模量(K)/MPa | 剪切模量(G)/MPa | 密度/(g · cm ⁻³) | 粘聚力/kPa | 摩擦角/(°) | 含水量/% |
|-------------|-------------|----------------------------|---------|---------|-------|
| 40 | 15 | 1.70 | 28 | 11.20 | 32.5 |

3.4 模拟结果分析

将数值模拟计算过程中记录各观测点的位移数据整理,得到沿垂直于基坑长边的水平线上不同水平距离的观测点土强度参数折减前后的水平位移及不同深度的安全系数结果如图 10、图 11 所示。

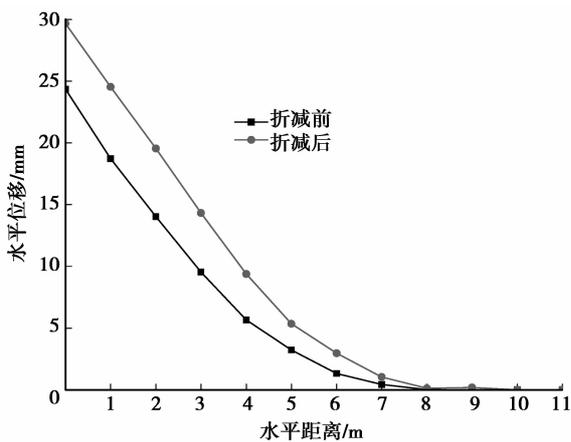
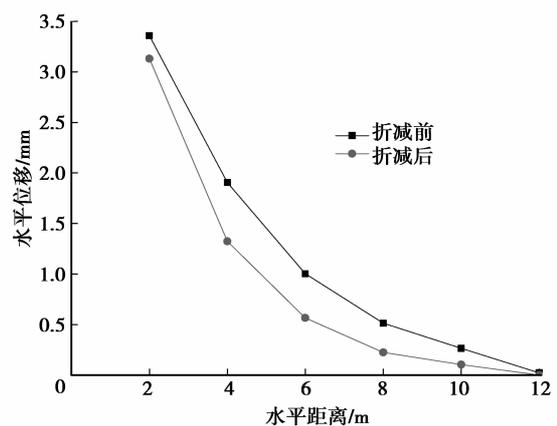
图 10 不同水平距离的水平位移(开挖深度 $H=4$ m)

图 11 不同开挖深度的安全系数

由图 10 可知,在水平方向,不同位置观测点的水平位移在土强度参数折减前后差别较大,土体强度参数经不断折减后,其水平位移较未折减时大得多,影响的范围也较大,水平位移较大的部位主要分布在临近基坑边沿 2~3 m 范围内,但由于基坑的开挖卸载作用,在基坑边沿中部的水平位移会更大,且基坑长边中部的水平位移比基坑短边中部的水平位移大。因红粘土的结构强度较一般粘性土大,在相同工程条件下,同一位置的基坑边沿水平位移较其它粘土相对要小。距离坑边越远,水平位移大小差值越小,水平距离超过 6 m 以

后,水平位移折减前后的水平位移逐渐趋于一致。由图 11 可知,在 2 m 开挖深度以内,土强度参数折减前后的安全系数差别不大,且均大于 1,土体基本处于稳定状态,但基坑开挖深度超过 4 m 后,安全系数下降较快。在开挖深度达到 6 m 左右,土强度参数折减前后的安全系数差别最大,表明基坑开挖深度超过 4 m 后很快进入不稳定状态,当开挖到 6 m 时,土体将处于不稳定状态,如不进行及时支护,极可能出现基坑失稳而坍塌现象。

4 结 论

1) 加载试验建立的本构模型难以反映基坑开挖过程中土体的实际变形情况,而单面侧向卸载真三轴试验真实模拟基坑开挖过程,由此得到的卸荷应力-应变关系反映了基坑开挖过程中土体变形破损的力学过程。

2) 竖向加载时,不断增大的竖向应力产生的剪切作用力使土体达到了其本身的抗剪强度而发生破损,而在单面侧向卸载则使土体竖向荷载持续作用而侧向荷载不断减小,更易导致土中剪切应力在达到并超过其抗剪强度的过程中促进土体微观结构变形破损而最终逐渐整体失稳。

3) 将加载试验得到的土体强度参数进行折减,采用合适的计算软件和普遍应用的本构模型,不但能够模拟基坑开挖过程,而且能够更合理地反映深基坑土体变形破损的内在机制。

4) 由于红粘土本身的力学特性及下覆起伏不平的基岩的较强约束作用,红粘土深基坑危险位置一般在基坑长边中部剖面的中上部。在相同条件下,折减土体强度参数后计算的安全系数较小,而位移变化影响范围则相对扩大,基坑垂直开挖的相对可靠深度将减小。

参考文献:

- [1] Olson R E, Mesri G. Mechanisms controlling the compressibility of clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(6): 1863-1878.
- [2] 沈珠江. 土体结构性的数学模型—21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97.
SHEN Zhujiang. Mathematical model of soil structure characteristics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(1): 95-97.
- [3] 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 Guoxiong, LU Tinghao, CHEN Hao, et al. True triaxial experiment of foundation pit considering initial stress[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2079-2082.
- [4] 何世秀, 朱志政, 杨雪强, 等. 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, et al. A study of true triaxial test on lateral unloading of soil mass of foundation[J]. Journal of Rock and soil mechanics, 2005, 26(6): 869-872.
- [5] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1172-1179.
SHAO Shenjun, LUO Aizhong, DENG Guohua, et al. Development of a new true tri-axial apparatus [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 24(8): 1172-1179.
- [6] 邓国华. 真三轴条件下结构性黄土的强度变形本构关系研究[D]. 西安: 西安理工大学博士学位论文, 2009.
- [7] 陈昌禄, 邵生俊, 邓国华. 土的结构性参数与强度的关系及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(1): 328-334.
CHEN Changlu, SHAO Shenjun, DENG Guohua. Relationship between the soil structure and strength and its application in slope stability analysis [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(1): 328-334.
- [8] Soga K. Mechanical behavior and constitutive modeling of natural structured soils [M]. Berkeley: University of California, 1994.
- [9] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [10] Lambe T W. A mechanical Picture of shear strength in clay[C]. Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. University of Colorado, Boulder, Colorado, 1960, 555-580.
- [11] Ugai K. A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM [J]. Soils and Foundations, 1989, 29(2): 190-195.

- [12] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. *Geotechnique*, 1999, 49(3): 387-403.
- [13] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction [J]. *Geotechnique*, 1999, 49(6): 835-840.
- [14] Tamotsu M, Ching S K. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique [J]. *Soils and Foundations*, 1992, 32(1): 59-70.
- [15] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用研究 [J]. *中国工程科学*, 2006, 8(12): 39-61.
ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, DENG Chujian, et al. Development of finite element limit analysis method and its applications to geotechnical engineering [J]. *Engineering Sciences*, 2006, 8(12): 39-61.
- [16] 陈波, 戚德印. FLAC^{3D} 在红粘土基坑中的应用 [J]. *贵州大学学报: 自然科学版*, 2009, 8(6): 118-122.
CHEN Bo, QI Deyin. Application of FLAC^{3D} in analysis of anchor in foundation [J]. *Journal of Guizhou University: Natural Science Edition*, 2009, 26(4): 118-122.
- [17] 周远忠, 刘新荣, 张梁, 等. 红粘土微观结构模型及其工程力学效应分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2012, 8(4): 726-731.
ZHOU Yuanzhong, LIU Xinrong, ZHANG Liang, et al. Study of micro-structure model of red clay and its engineering mechanical effect [J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, 8(4): 726-731.
- [18] Itasca Consulting Group Inc. *FLAC3D (Version 2.1) Users Manual* [C]. USA: Itasca Consulting Group Inc, 2002.
- [19] *FLAC^{3D}, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions Example Applications* [R]. USA: Itasca Consulting Group, Inc, 2002.

(编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 16 页)

- [12] Pershin Y V, Di Ventra M. Experimental demonstration of associative memory with memristive neural networks [J]. *Neural Networks*, 2010, 23(7): 881-886.
- [13] Kim K H, Gaba S, Wheeler D, et al. A functional hybrid memristor crossbar-array/ CMOS system for data storage and neuromorphic applications [J]. *Nano letters*, 2011, 12(1): 389-395.
- [14] Snider G S. Spike-timing-dependent learning in memristive nanodevices [C] // *Proceedings of 2008 IEEE International Symposium on Nanoscale Architectures*, June 12-13, 2008, Anaheim, CA, Piscataway: IEEE Press, 2008: 85-92.
- [15] Linares-Barranco B, Serrano-Gotarredona T. Memristance can explain spike-time-dependent-plasticity in neural synapses [J]. *Nature*, 2009: 1-4.
- [16] Cai W, Tetzlaff R, Ellinger F. A memristive model compatible with triplet rule for spike-timing-dependent-plasticity [EB/OL]. (2013-12-10) <http://arxiv.org/pdf/1108.4299.pdf>
- [17] Zamarreño-Ramos C, Camuñas-Mesa L A, Pérez-Carrasco J A, et al. On spike-timing-dependent-plasticity, memristive devices, and building a self-learning visual cortex [EB/OL]. (2011-03-17) [2014-02-12] <http://journal.frontiersin.org/Journal/10.3389/fnins.2011.00026/abstract>
- [18] Rocha M, Cortez P, Neves J. Evolutionary neural network learning [J]. / *Lecture Notes in Computer Science*, 2003, 2902: 24-28.
- [19] 周杰, 卢先正, 舒锐志, 等. BP 神经网络和遗传算法用于曲轴填充性能的优化设计 [J]. *重庆大学学报: 自然科学版*, 2012, 35(5): 52-56.  
ZHOU Jie, LU Xianzheng, SHU Ruizhi, et al. BP neural network and genetic algorithm for the filling properties optimization of crankshaft [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science)*, 2012, 35(5): 52-56.
- [20] 卢启衡, 冯晓云. 多维并行遗传算法在列车追踪运行节能优化中的应用 [J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(4): 39-44.  
LU Qiheng, FENG Xiaoyun. Application of multi-dimension parallel genetic algorithm to energy-saving optimum control of trains in following operation [J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(4): 39-44.

(编辑 詹燕平)