

土锚相互作用特征的数值实现方法及验证

彭文祥, 尹 泉

中南大学地学与环境工程学院, 长沙 410083

摘要 为探讨锚杆和土体的相互作用特征, 研究了锚杆单元的数值实现方法及其正确性。首先, 探讨了土锚相互作用机制, 建立了锚杆单元的数值实现方法; 然后, 进行锚杆锚固力的现场试验监测, 得到锚杆锚固力随时间的变化过程, 并将现场试验结果与数值模拟结果进行对比。结果表明, ① 随下部土方开挖, 锚杆锚固力不断增加, 土方开挖到底后, 锚固力基本趋于稳定; ② 数值计算得到的最大锚固力为 259.0kN, 试验结果为 229.4kN, 二者差别较小, 且数值计算得到的锚固力随时间变化规律与试验得到的结果较为相近, 验证了数值模型的正确性。

关键词 土锚特征; 锚杆; 数值模拟; 现场试验

中图分类号 U451

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)03-0066-04

Numerical Realization of Soil-cable Interaction Characteristics and Its Validation

PENG Wenxiang, YIN Quan

School of Geoscience and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The characteristics of soil-cable interaction as well as the numerical realization of the cable element and its validation are studied in this paper. The mechanism of the soil-cable interaction is analyzed and the numerical modeling is done for the cable element. In situ-monitoring tests are carried out to obtain the reinforcement force of the cable, the numerical calculation model is built for the reinforcement force and the results are compared. It is shown that (1) with the time, the reinforcement force of the cable increases gradually until the excavation of the foundation is finished, and then the reinforcement force will tend to be constant; (2) the maximum reinforcement force from the numerical calculation is 259.0kN and that from the in situ-test is 229.4kN, and similar relations between the reinforcement force and time are obtained. The analysis results validate the numerical model.

Keywords soil-cable characteristic; cable; numerical modeling; insitu-test

0 引言

基坑因开挖大量卸荷, 土体应力迅速释放, 周围土体在水平方向向基坑内产生位移, 在垂直方向产生沉降, 需进行一定的加固以保证基坑稳定, 不至于坍塌、滑移。锚杆支护作为一种基坑支护技术, 20 世纪 70 年代产生以来已经得到广泛应用^[1-3], 它能够合理利用土体自承能力, 发挥锚杆与土体的黏结作用, 具有造价低廉、施工迅捷等优点。在土体发生变形的条件下, 通过与土体接触界面上的黏结力或摩擦力, 锚

杆被动受拉, 并给土体以约束加固作用, 整个过程涉及复杂的力学机制^[4-5], 若采用简化的力学模型分析则不能反映基坑和土钉相互作用的实际情况。近年来, 随着计算机技术的快速发展, 利用数值计算方法研究岩土工程问题成为重要的研究方向^[6-8]。目前一些学者对锚杆数值单元进行了有意义的研究^[9-11], 如文献[9]利用数值计算方法, 探讨了边坡在全长注浆锚杆作用下的变形和应力情况; 文献[11]研究了全长黏结式锚杆拉拔工况下的受力变形特征, 利用 FLAC3D 建立数值模

收稿日期: 2009-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878212)

作者简介: 彭文祥, 博士, 研究方向为岩土工程, 电子信箱: pengwenxiangcsu@126.com

型,分析锚杆受力特征、土体响应,以及拉拔性能。但这些研究主要是应用锚杆单元,得到的结果未与试验的结果进行对比。因此,为了增加数值锚杆单元模型的说服力,本文首先探讨了锚杆单元的数值实现方法,然后进行锚杆锚固力的长期现场试验监测,并将得到的结果与数值模拟的结果进行对比,从而验证锚杆数值实现方法的正确性。

1 土锚相互作用的数值实现

锚杆与土体的黏结是锚杆能够发挥加固作用的基础,它不但与设置锚杆的施工方法有关,还与土的类型有关,相互作用是十分复杂的。从简化角度分析,锚杆与土体间存在着很强的黏结作用,其轴向能承受很大的拉拔力。采用双弹簧 cable 单元模拟锚杆(如图 1),通过锚杆-浆体界面和浆体-岩体界面之间相对位移,模拟锚杆、灌浆体及土体之间的相对滑动。当这两个界面之间产生了相对滑动,灌浆环的剪切特性即可通过一系列的锚索参数和灌浆体的参数来进行数值描述。在数值计算过程中,锚杆被分为许多小段的单元体,通过这些小段的积分得到锚杆整体的变形和应力状态。

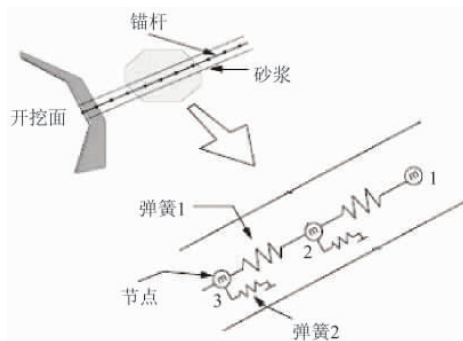


图 1 锚杆单元

Fig. 1 Cable element

锚杆单元的轴向力 F_i^a 可由其轴向位移 u_{ia} 得到

$$F_i^a = K_i^a u_{ia} \quad (1)$$

式中, $u_{ia} = u_i^k n_i = (u_x^{[2]} - u_x^{[1]}) n_1 + (u_y^{[2]} - u_y^{[1]}) n_2 + (u_z^{[2]} - u_z^{[1]}) n_3$, $u_i^{[m]}$ 为锚杆单元 m 节点在 i 方向上的位移, n_i 为锚杆轴线的方向余弦, K_i^a 为锚杆的轴向刚度。

采用位于节点处的锚杆、砂浆、岩土体系统描述其间的剪切行为,如图 2 所示。

假设砂浆材料为理想弹塑性体,在锚杆和砂浆界面及砂浆和围岩交界面上产生相对位移时,锚杆剪力为

$$F_s^a / L = K_s^a u_{is} \quad (2)$$

式中, F_s^a 为砂浆体内产生的剪切力(沿锚杆单元和网格之间的交界面), u_{is} 为锚杆和岩土界面之间的相对位移, L 为有效锚固长度, K_s^a 为锚杆的剪切刚度。

对于灌浆体内部任意点上的相对剪切位移 u' 和剪应力 F' , 有关系

$$F' = k_g u' \quad (3)$$

式中 k_g 为砂浆刚度。

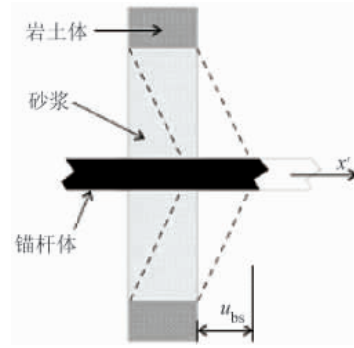


图 2 锚杆变形模型

Fig. 2 Deformation of cable model

灌浆体-岩体界面上的最大剪应力取决于灌浆体的剪切刚度 k_g 。通常来说,浆体的剪切刚度 k_g 可以从拉拔试验直接获得。另外,剪切刚度和剪切模量也有关系

$$k_g = \frac{2\pi G}{\ln(1+2t/D)} \quad (4)$$

式中, G 为浆体的剪切模量, t 为灌浆环的厚度, D 为锚杆直径。

经过推导,单位长度上浆体-土体界面上的剪应力为

$$\tau_s = \frac{G \Delta u}{(D/2+t) \ln(1+2t/D)} \quad (5)$$

式中 Δu 为浆体和土体界面的相对位移。

2 锚杆单元的试验验证

2.1 工程地质条件

某综合楼地上 13 层,地下室 3 层;基坑长 64.00m,宽 56.00m,占地面积约 3600.00m²,开挖深度 12.70m。

场区地层层序及其特征见表 1。

采用挖孔排桩+预应力锚杆支护,其基坑支护设计如图 3 所示。喷锚支护段上锚杆水平间距与垂直间距均为 2.0m,锚杆向下倾角为 20°。

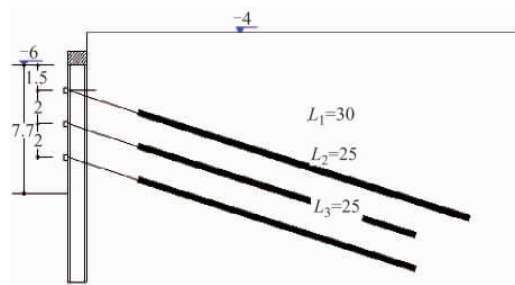


图 3 基坑锚杆布置图(单位:m)

Fig. 3 Section plane of foundation reinforced by cables (unit: m)

2.2 锚杆锚固力的监测情况

根据锚杆的锚固机制,锚杆张拉与验收试验中,应既能检验锚杆灌浆体与周围岩土体之间的黏结力,又能检验锚杆体与灌浆体之间的黏结力,所以锚杆张拉应在最内层锚杆体

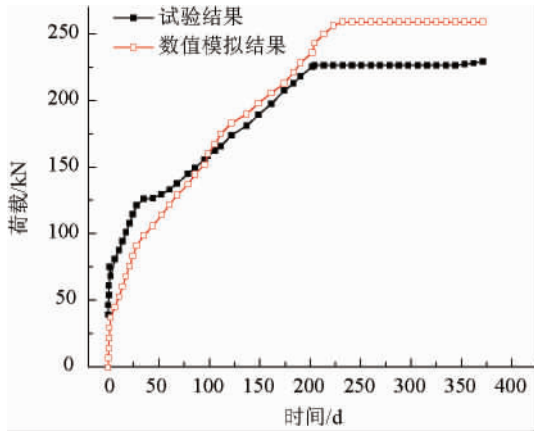


图 5 锚固力变化对比图

Fig. 5 Comparison of cable reinforcement force variation

介质的理想弹塑性体,而实际土体较为复杂,含有多种介质,故数值模拟过程中锚杆所受到的周围土体的握裹力较实际情况大。数值计算得到的锚固力随时间变化的关系与试验得到的结果较为相近,从而验证了数值模型的正确性。

3 结论

1) 采用双弹簧 cable 单元模拟锚杆,可以模拟锚杆、灌浆体以及土体之间的相对滑动,即通过对锚杆-浆体界面和浆体-岩体界面之间相对位移的模拟来实施。当两个界面之间产生相对滑动,灌浆环的剪切特性即可通过一系列的锚索参数和灌浆体的参数进行数值描述。

2) 通过现场试验和数值模拟试验,探讨了锚杆锚固力随时间的变化过程,结果表明,随下部土方开挖,锚杆锚固力不断增加,土方开挖到底后,锚固力基本趋于稳定。

3) 数值计算得到的最大锚固力为 259.0kN,试验结果为 229.4kN,二者差别较小,且数值计算得到的锚固力随时间变化的关系与试验得到的结果较为相近,验证了数值模型的正确性。

参考文献 (References)

- [1] Cai F, Ugai K. Reinforcing mechanism of anchors in slopes: A numerical comparison of results of LEM and FEM [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2003, 27 (7): 549-564.
- [2] Soneji B B, Jangid R S. Influence of soil-structure interaction on the response of seismically isolated cable-stayed bridge [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(4): 245-257.
- [3] Guo R, Thompson P. Influences of changes in mechanical properties of an overcured sample on the far-field stress calculation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(7): 1153-1166.
- [4] 张乐文, 汪稔. 岩土锚固理论研究之现状 [J]. *岩土力学*, 2002, 23(5): 627-631.
Zhang Lewen, Wang Ren. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(5): 627-631.
- [5] Gurung N. 1-D analytical solution for extensible and inextensible soil/

rock reinforcement in pull-out tests [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, 19: 195-212.

- [6] 彭文祥, 赵明华, 袁海平, 等. 基于拉格朗日差分法的全长注浆锚杆支护参数优化[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2006, 37(5): 1002-1007.
Peng Wenxiang, Zhao Minghua, Yuan Haiping, et al. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2006, 37 (5): 1002-1007.
- [7] 郭群. 层状岩石强度特征及其数值实现 [J]. *科技导报*, 2008, 26(16): 68-71.
Guo Qun. *Science and Technology Review*, 2008, 26(16): 68-71.
- [8] 贺若兰, 张平, 李宁, 等. 拉拔工况下全长粘结锚杆工作机理 [J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2006, 37(2): 401-407.
He Ruolan, Zhang Ping, Li Ning, et al. *Journal of Central South University: Science and Technology Edition*, 2006, 37(2): 401-407.
- [9] 林杭, 曹平, 周正义. FLAC3D 模拟全长注浆锚杆的作用效果 [J]. *岩土力学*, 2005, 26(S2): 167-170.
Lin Hang, Cao Ping, Zhou Zhengyi. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26 (S2): 167-170.
- [10] Frimpong S, Li Y. Stress loading of the cable shovel boom under in-situ digging conditions[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2007, 14(4): 702-715.
- [11] 舒谷生, 彭文祥, 何忠明. 全长粘结式锚杆拉拔试验的数值实现[J]. *科技导报*, 2009, 27(12): 47-50.
Shu Gusheng, Peng Wenxiang, He Zhongming. *Science and Technology Review*, 2009, 27(12): 47-50.
- [12] Itasca Consulting Group. User's guide [M]. Minnesota: Itasca Consulting Group, 2002.

(责任编辑 代丽)

本期好玩的数学答案

我们先通过另一种思路分析一下数 3 的情况。

把 3 个 1 排成一行,那么 3 个 1 之间有两个间隔:

1_1_1

如果两个“_”处都填上“+”号,则可以得到 3 的和表示: $3=1+1+1$;如果第一个“_”处填上“+”号,而第二个“_”处不填,则可以得到 3 的和表示: $3=1+2$;如果第一个“_”处不填,而第二个“_”处填上“+”,则可以得到 3 的和表示: $3=2+1$;如果两个“_”处都不填,则可以得到 3 的和表示: $3=3$ 。

显然,在这 2 个“_”中填或不填“+”与 3 的和表示之间存在着——对应。因为对于这 2 个“_”中的每一个都有填与不填两种不同的选择,因此将 3 表示为若干个正整数之和的不同方法数应有 $2 \times 2 = 4$ 种。

现在把这种思路推广应用到任何正整数 n 的情况。

把 n 个 1 排成一行,共有 $n-1$ 个间隔。而 n 作为正整数之和的表示,与在这 $n-1$ 个间隔中填或不填上“+”之间存在着——对应。因为对于这 $n-1$ 个间隔中的每一个,都有两种不同的选择(填或不填上“+”),所以将 n 表示为正整数之和的不同方法数等于 2^{n-1} 。