

全长黏结式锚杆拉拔性能数值分析

胡贺松¹, 彭振斌²

1. 广州市建筑科学研究院有限公司, 广州 510440
2. 中南大学地学与环境工程学院, 长沙 410083

摘要 为了研究全长黏结式锚杆拉拔工况下的应力变形特征, 利用 FLAC3D 建立数值模型, 分析锚杆受力特征、土体响应, 以及拉拔性能的影响因素。结果表明, (1) 锚杆轴力分布沿杆体逐渐减小; (2) 随着加载的进行, 破坏沿锚杆体迅速传递, 最终导致锚杆整体破坏; (3) 土体受到锚杆摩擦阻力的影响, 存在被锚杆拉出的趋势; (4) 随着围压的增大, 荷载-位移曲线在破坏前的线性特征更加显著, 锚杆的破坏荷载也逐渐增大, 采用指数方程对其关系进行拟合能得到较高的精度; (5) 围压的增加能够增大锚杆与周围土体之间的黏结力, 但是存在一极限值, 当围压增加到一定程度后, 并不能提高锚杆的锚固力。

关键词 全长黏结式锚杆; 拉拔性能; 数值分析; 变形特征

中图分类号 TU473

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.11.008

Numerical Analysis on Pull-out Characteristic of Wholly Grouted Cable

HU Hesong¹, PENG Zhenbin²

1. Guangzhou Institute of Building Science Co. Ltd., Guangzhou 510440, China
2. School of Geology and Environment Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract In order to study the mechanical deformation characteristic of soil mass and wholly grouted cable under the pull-out condition, a numerical calculation model is founded by FLAC3D, the mechanical characteristic of cable, response of soil mass, and influence factors for pull-out characteristic are analyzed. The analysis results show that: (1) the axial stress of cable reduces along shaft; (2) during the loading procedure, the failure propagates rapidly along cable shaft, and eventually leads to the whole failure of cable; (3) the soil mass tends to be pulled out by cable with the friction force between cable and soil mass; (4) with the increase of surrounding stress, the curve of loading-displacement before failure phase displays even more obviously linear characteristic, meanwhile the failure load of cable becomes larger and larger, and the entire relationship between failure load of cable and surrounding stress can be fitted by the exponential equation with high precision; (5) the increase of surrounding stress can lead to the increase of cohesion between cable and surrounding soil mass, however with a limited magnitude; therefore when surrounding stress increases to some degree, the anchor force of cable can not be increased anymore.

Keywords wholly grouted cable; pull-out characteristic; numerical analysis; deformation characteristic

0 引言

锚杆在岩土工程支护结构中已得到广泛应用^[1-3], 对其进行拉拔试验是获得锚固力等重要参数的主要途径, 一些学者采用试验对其进行了分析^[4-8]。近年来在计算机技术的推动下, 数值仿真方法在岩土工程中得到广泛应用^[9-14], 其可模拟不同工况下锚杆的各种响应, 在节省工程造价和工程时间方面具有明显优势, 但目前对于这方面的数值分析还较少, 其中贺若兰等^[15]对拉拔工况进行全过程仿真分析, 再现锚杆、界

面及岩土体的力学特性随施工全过程发展的变化规律, 定量揭示这一工况下全长黏结锚杆的工作机制; 苏霞等^[16]采用适用于进行非线性、非连续介质复杂机制研究的“岩石破裂过程分析”(RFPA)系统, 用正交试验方法进行了一系列数值试验, 对影响锚杆拉拔力的6个因素进行了分析研究。本文在前人基础上, 采用拉格朗日差分法模拟, 针对锚杆拉拔工况下的应力变形特征作进一步分析, 以期得到一些有意义的结论为工程实践提供参考。

收稿日期: 2010-04-19; 修回日期: 2011-03-22

基金项目: 广东省科技计划项目(2004B36001028)

作者简介: 胡贺松, 高级工程师, 研究方向为岩土工程监测、检测及施工, 电子邮箱: hesonghu79@126.com

1 锚杆数值单元

本文采用双弹簧 cable 单元模拟锚杆^[17-18],该法模拟了锚杆、灌浆体与土体之间的相对滑动,即通过对锚杆-浆体界面和浆体-土体界面之间相对位移的模拟实施。当这两个界面之间产生了相对滑动,灌浆环的剪切特性通过一系列的锚索参数和灌浆体的参数进行数值描述。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。

锚杆单元的轴向力 F_i^a 由其轴向位移 u_{bi} 得到:

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

式中, $u_{bi} = u_i^k n_i = (u_x^{[2]} - u_x^{[1]})n_1 + (u_y^{[2]} - u_y^{[1]})n_2 + (u_z^{[2]} - u_z^{[1]})n_3$; $u_i^{[m]}$ 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。假设砂浆材料为理想弹塑性体,在锚杆和砂浆交界面及砂浆和围岩交界面上产生相对位移时,锚杆剪力为

$$\frac{F_s^a}{L} = K_s^a u_{bs} \quad (2)$$

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_{bs} 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 , 有下列关系:

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

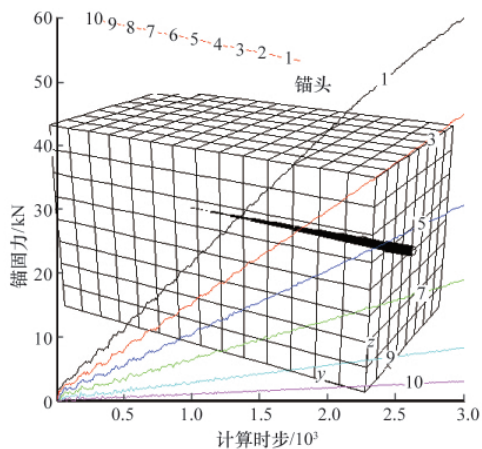
式中, k_g 为砂浆剪切刚度。

灌浆体-土体界面上的最大剪应力取决于灌浆体的 k_g 。通常来说,浆体的 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下列关系:

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

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可由



(a) 拉拔加载初期

(a) Initial phase of pull-out

下式计算:

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

式中, Δu 为浆体和土体两个界面的相对位移。

2 数值计算模型

采用 FLAC3D 建立锚杆拉拔试验的数值计算模型,如图 1,其中模型土体长 4m,宽 4m,高 7m, V 表示锚杆拉拔方向;土体采用弹性模型。试验过程中,锚杆端部采用位移加载方式,每步位移 1.0×10^{-3} mm;土体参数,弹性模量 20.0MPa,内摩擦角 25° ,泊松比 0.3;锚杆参数为,长度 5m,弹性模量 100GPa,泊松比 0.25,截面积 706.5 mm^2 ,周长 314mm,锚杆与土体的黏结刚度 $1.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$,砂浆黏结力 15 kPa ^[18]。计算收敛准则为不平衡力比率(节点平均内力与最大不平衡力的比值)^[17]满足 10^{-5} 计算精度的求解要求。

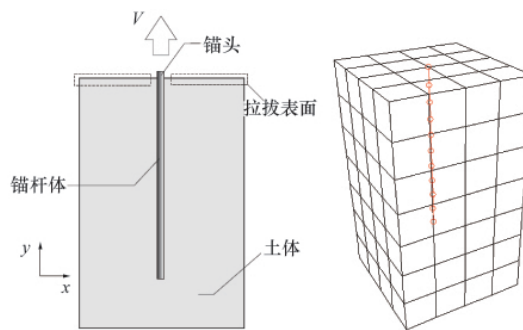


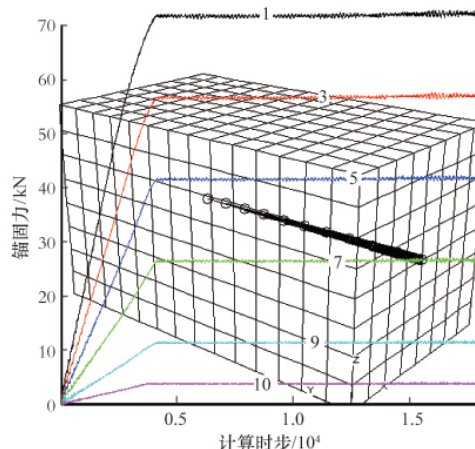
图 1 锚杆拉拔试验计算模型

Fig. 1 Calculation model for cable pull-out test

3 计算结果与讨论

3.1 锚杆轴力分布

图 2 为拉拔初期和末期锚杆轴力图,以及随着加载的进行锚杆轴力的变化情况,其中各曲线为锚杆不同部位随加载过程的变化情况。



(b) 拉拔加载末期

(b) Last phase of pull-out

图 2 拉拔过程中锚杆轴力图

Fig. 2 Axial stress of cable during pull-out procedure

从图2可以看出,锚杆轴力分布均为锚头处最大,沿着锚杆体逐渐减小,与文献[11]得到的现场监测趋势相同;并且加载初期随着锚头位移的增大,荷载呈线性不断增大,当位移达到某一值时,锚杆各部位轴力均达到最大值,各部位最大值沿杆体逐渐减小,并且曲线的斜率也沿杆体逐渐减小。另外,从图中还可以看出,在加载初期,锚杆仅在锚头位置发生滑移破坏,而随着加载的进行,破坏沿锚杆体迅速传递,最终导致锚杆整体破坏。

实际上,当接触面上的剪力过大以至于接触面产生屈服时,锚杆与土体之间就会产生滑移。滑移可能在锚杆表面或黏结材料与土体的接触面上产生,此时锚杆表面上的剪力就可以由接触面的屈服剪力求得。该屈服剪力是已知的,可由拉拔试验求得,也可由Mohr-Coulomb公式计算。

锚杆与黏结材料接触面的屈服剪力为

$$\tau_{bi} = c_{bi} + \sigma_{bi} \tan \phi_{bi} \quad (6)$$

其中, c_{bi} 、 σ_{bi} 、 ϕ_{bi} 分别为锚杆与黏结材料接触面上的黏结力、法向应力和内摩擦角。对应的锚杆表面剪力为

$$\tau_b = \tau_{bi} \quad (7)$$

黏结材料与土体接触面的屈服剪力为

$$\tau_{mi} = c_{mi} + \sigma_{mi} \tan \phi_{mi} \quad (8)$$

式中, c_{mi} 、 σ_{mi} 、 ϕ_{mi} 分别为黏结材料与土体接触面上的黏结力、法向应力和内摩擦角。

3.2 土体响应分析

图3为锚杆拉拔过程中,土体的沿锚杆方向的位移响应,从图中可以看出,土体受到锚杆摩阻力的影响,存在被锚杆拉出土体表面的趋势,土体的最大位移为1.3mm,远小于锚头的位移。土体最大位移位于锚杆头部,并形成枣核状位移云图,呈现不断向外扩散的趋势。

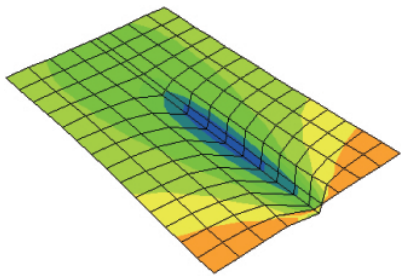


图3 土体沿锚杆方向变形趋势

Fig. 3 Soil deformation trend along cable shaft

3.3 围压对极限锚固力的影响

图4为锚杆拉拔过程中,锚头位移 S 与拉拔荷载 Q 的关系。从图中可以看出,随着拉拔位移的增大,锚杆所发挥的锚固力逐渐增大;并且当土体围压较小时,荷载-位移关系曲线呈现非线性特征,而随着围压的增大,荷载-位移曲线在破坏前的线性特征逐渐显著。随着围压 σ_m 的增大,锚杆的破坏荷载逐渐增大,如图5所示。采用指数方程对其关系进行拟合能得到较高的精度,可见围压的增加能够增大锚杆与周围土体之间的黏结力,但是存在一极限值,当围压增加到一定程

度后,并不能提高锚杆的锚固力,本文计算模型中,通过拟合得到的相关系数 $R^2=0.98515$, 由围压影响的极限锚固力为265.9984kN。

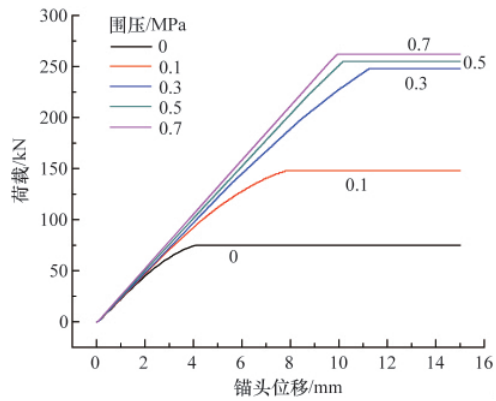


图4 荷载-锚头位移图

Fig. 4 Displacement diagram of loading cable head

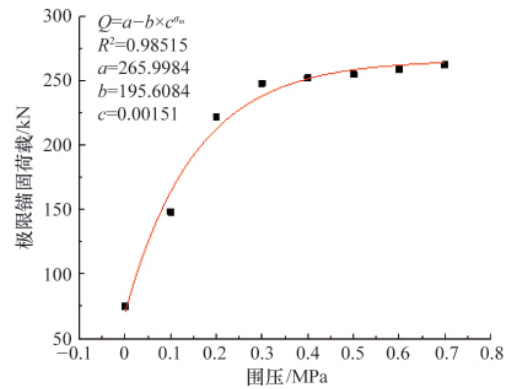


图5 锚杆极限锚固力-围压关系

Fig. 5 Relationship between limited anchor force and surrounding stress of cable

3.4 锚杆长度对极限锚固力的影响

图6为锚杆极限锚固力与锚杆长度之间的关系。

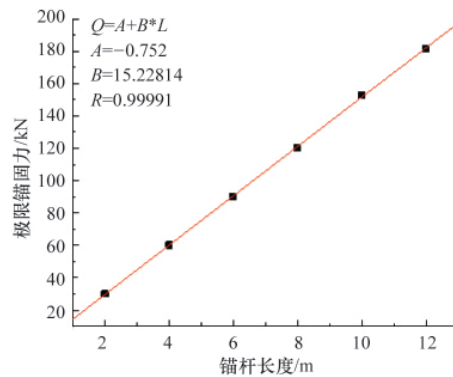


图6 锚杆极限锚固力-锚杆长度关系

Fig. 6 Relationship between limited anchor force of cable and its length

从图中可以看出,两者呈显著线性关系,通过线性拟合得到的相关系数为 $R=0.99991$,属于高度相关;说明通过增加锚杆的长度,能够有效增加锚杆支护系统的锚固力。不同锚

杆对应的荷载-位移曲线,如图7所示,在锚杆杆体没有破坏的情况下,随着锚杆长度的增大,锚杆的极限锚固力不断增大,荷载-位移曲线在达到峰值前逐渐有直线形态过渡到非线性形态。

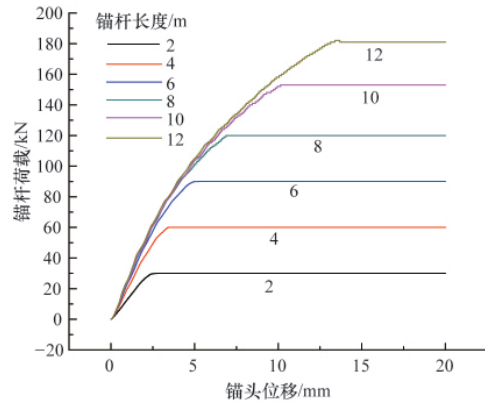


图7 不同锚杆长度下锚杆锚固力-锚头位移关系
Fig. 7 Relationship between anchor force and displacement of cable head with different length

4 结论

本文采用拉格朗日差分法模拟,对锚杆拉拔工况下的应力变形特征进行了分析,得到结论如下。

(1) 锚杆拉拔试验时,锚杆轴力分布为锚头处最大,沿着锚杆体逐渐减小,并且加载初期随着锚头位移的增大,荷载呈线性不断增大,当位移达到某一值时,锚杆各部位轴力均达到最大值,各部位最大值沿锚杆体逐渐减小。

(2) 在加载初期,锚杆仅在锚头位置发生滑移破坏,而随着加载的进行,破坏沿锚杆体迅速传递,最终导致锚杆整体破坏。

(3) 土体受到锚杆摩擦阻力的影响,存在被锚杆拉出土体表面的趋势;土体最大位移位于锚杆头部,并形成枣核状位移云图,呈现不断向外扩散的趋势。随着拉拔位移的增大,锚杆所发挥的锚固力逐渐增大。

(4) 当土体围压较小时,荷载-位移关系曲线呈现非线性特征,而随着围压的增大,荷载-位移曲线在破坏前的线性特征逐渐显著。随着围压的增大锚杆的破坏荷载逐渐增大,采用指数方程对其关系进行拟合能得到较高的精度;围压的增加能够增大锚杆与周围土体之间的黏结力,但是存在一极限值,当围压增加到一定程度后,并不能提高锚杆的锚固力。

参考文献 (References)

[1] 杨松林,徐卫亚,黄启平. 节理剪切过程中锚杆的变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 3268-3273.
Yang Songlin, Xu Weiya, Huang Qiping. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(9): 3268-3273.

[2] 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.

[3] 陈妙峰,唐德高,周早生,等. 锚杆锚固机制试验研究 [J]. 建筑技术开

发, 2003, 30(4): 21-23.

Chen Miaofeng, Tang Degao, Zhou Zaosheng, et al. *Building Technique Development*, 2003, 30(4): 21-23.

- [4] Gurung N. 1-D analytical solution for extensible and inextensible soil/rock reinforcement in pull-out tests [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2001, 19(4): 195-212.
- [5] 朱焕春, 荣冠, 肖明, 等. 张拉荷载下全长粘结锚杆工作机理试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 379-384.
Zhu Huanchun, Rong Guan, Xiao Ming, et al. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(3): 379-384.
- [6] Li C, Stillborg B. Analytical models for rock bolts [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(8): 1013-1029.
- [7] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339-341.
You Chunan. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(3): 339-341.
- [8] Kaiser P K. Effect of the stress change on the bond strength of fully grouted cables [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts*, 1992, 29(3): 293-306.
- [9] 沈金瑞, 林杭. 多组节理边坡稳定性 FLAC3D 数值分析 [J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 29-33.
Shen Jinrui, Lin Hang. *China Safety Science Journal*, 2007, 17(1): 29-33.
- [10] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 1-7.
Song Erxiang. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1997, 19(2): 1-7.
- [11] 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.
- [12] 姜清辉, 周创兵, 罗先启, 等. 三维 DDA 与有限元的耦合分析方法及其应用 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 998-1001.
Jiang Qinghui, Zhou Chuangbing, Luo Xianqi, et al. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(8): 998-1001.
- [13] 黄晚清, 陆阳散. 粒体重力堆积的三维离散元模拟 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2139-2143.
Huang Wanqing, Lu Yangsan. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(12): 2139-2143.
- [14] Guo R, Thompson P. Influences of changes in mechanical properties of an overcored sample on the far-field stress calculation [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2002, 39 (7): 1153-1166.
- [15] 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, 2006, 37(2): 401-407.
He Ruolan, Zhang Ping, Li Ning, et al. *Journal of Central South University*, 2006, 37(2): 401-407.
- [16] 苏霞, 李仲奎. 锚杆拉拔力影响因素的数值试验研究 [J]. 工程力学, 2006, 23(2): 97-102.
Su Xia, Li Zhongkui. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(2): 97-102.
- [17] 彭文祥, 尹泉. 土锚相互作用特征的数值实现方法及验证 [J]. 科技导报, 2010, 28(3): 66-69.
Peng Wenxiang, Yin Quan. *Science and Technology Review*, 2010, 28(3): 66-69.
- [18] 林杭, 曹平. 锚杆长度对边坡稳定性影响的数值分析 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 470-474.
Lin Hang, Cao Ping. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(3): 470-474.

(责任编辑 岳臣)