

全长粘结式锚杆拉拔试验的数值实现

舒谷生¹, 彭文祥², 何忠明³

1. 湖南城市学院土木工程学院力学教研室, 湖南益阳 413000
2. 中南大学地学与环境工程学院, 长沙 410083
3. 长沙理工大学交通运输工程学院, 长沙 410004

摘要 为实现土锚相互作用的数值模拟, 研究全长粘结式锚杆拉拔工况下的受力变形特征, 利用 FLAC 3D 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 接触面单元能较好地模拟土锚相互作用特征; ② 锚杆拉拔过程的峰值位移和极限拉拔力均与锚杆长度呈显著线性关系; ③ 锚杆极限拉拔力与锚杆直径同样呈线性关系; ④ 锚杆拉拔过程中, 周围土体受到一定影响, 其影响范围为: 深度 $2L$ (L 为锚杆长度), 水平约 $1.5L$ 。

关键词 全长粘结式锚杆; 拉拔性能; 数值分析; 变形特征

中图分类号 TU457

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)12-0047-04

Numerical Simulation of the Pull-out Test of Wholly Grouted Cable

SHU Gusheng¹, PENG Wenxiang², HE Zhongming³

1. Department of Mechanics, Department of Civil Engineering Hunan City University, Yiyang 413000, Hunan Province, China
2. School of Geoscience and Environmental Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
3. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China

Abstract A calculation model is built based on FLAG 3D for the numerical simulation of interaction between soil and cable. The mechanical deformation characteristics of soil mass and wholly grouted cable are studied under the pull-out condition, and the mechanical behaviors of cable, the response of soil mass, and the influence factors for pull-out performance are analyzed. It is shown that, (1) the interface element can do well in simulating the interaction between soil and cable; (2) the peak tensile force and the displacements under the peak tensile force are in a good linear relation with the cable length; (3) the peak tensile force increases with the increase of cable diameter linearly; (4) during the tension of cable, the surrounding soil is affected in a certain area, $2L$

(where L stands for cable length) in the depth direction, and $1.5L$ in the horizontal direction.

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

0 引言

锚杆作为岩土工程支护结构已得到广泛应用^[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^[4-8]。近年来, 随着计算机技术的发展, 采用数值仿真方法^[9-14], 可模拟不同工况下锚杆的各种响应, 能有效节省工程造价和工程时间。贺若兰等^[15]对拉拔工况进行全过程仿真分析, 再现锚杆、界面以及岩土体的力学特性随施工全过程发展的变化规律, 定量揭示了拉拔工况下全长粘结锚杆的工作机理; 苏霞等^[16]采用适用于进行非线性、非连续介质复杂机理研究的“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 个因素进行分析。本研究采用拉格朗日差分法, 利用土锚接触面单元模拟土锚相互作用特征, 进一步分析锚杆拉拔工况下的力-位移关系, 拟为工程实践提供参考。

1 土锚接触面的数值实现

采用 interface 接触面对土锚接触面进行模拟。其由一系列三角形单元组合而成, 每个三角形单元包含 3 个节点, 每个接触面的节点都有一相关联的特征面积, 可通过面积权重进行换算^[17]。一般来说, 接触面单元和实体单元的表面粘合在一

收稿日期: 2009-04-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878212)

作者简介: 舒谷生, 副教授, 研究方向为岩土工程、工程力学, 电子信箱: shugusheng@126.com

起,若实体单元为四边形平面组成,则将其拆分为2个三角形接触面单元。当发生接触时,节点的性质由法向刚度、切向刚度及滑动的相关性质决定。这种基本的接触关系通过接触面节点和实体单元外表面(目标面)建立起来,接触力的法向方向由目标面的法向方向决定。

图1为接触面节点的受力特征。在每一时步中,对于接触面节点和接触的目标面,首先计算相应的法向和切向速度,然后通过差分形式进一步计算法向力和剪切力;接触面的破坏模型符合Mohr-Coulomb拉剪强度准则,当剪应力或拉应力达到相应强度时,将会在接触的目标面上形成一有效法向应力增量。具体计算公式如下^[17]

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n u_n A + \sigma_n A \quad (1)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + k_s \Delta u_{si}^{(t+\Delta t/2)} A + \sigma_{si} A \quad (2)$$

式中, $F_n^{(t+\Delta t)}$ 为 $(t+\Delta t)$ 时步中的法向力; $F_{si}^{(t+\Delta t)}$ 为 $(t+\Delta t)$ 时步中的剪切力; u_n 为接触面节点插入目标面的法向渗透距离; Δu_{si} 为相对剪切位移增量; σ_n 为接触面的正应力; k_n 为法向刚度; k_s 为切向刚度; A 为界面的接触面积。

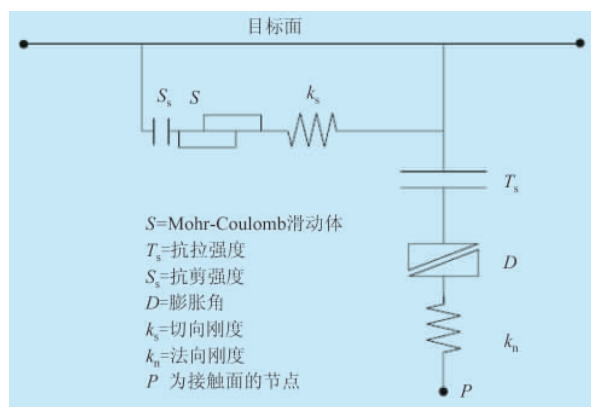


图1 接触面节点受力特征

Fig. 1 Mechanical characteristics of interface node

2 数值计算模型

采用FLAC 3D建立锚杆拉拔试验的数值计算模型,如图2所示。土体采用Mohr-Coulomb弹塑性模型。试验过程中,锚头采用位移加载方式,位移大小为 1.0×10^{-3} mm/时步。土体参数为:弹性模量50.0 MPa,泊松比0.3,粘结力50 kPa,内摩擦角22°,容重19.0 kN/m³;锚杆参数为:体积模量13.9 GPa,剪切模量10.4 GPa,容重25.5 kN/m³;锚杆与土体的粘结法向刚度为 1.0×10^8 N/m²,切向刚度为 1.0×10^8 N/m²,粘结力20 kPa,内摩擦角15°。

3 计算分析

固定锚杆整体直径为8 cm。分别改变锚杆长度,得到相应的锚杆拉拔力与锚头位移之间的关系(图3),以及锚杆长度与极限拉拔力Q之间的关系(图4)。图3显示,随着拉拔过程的进行,锚头位置的拉拔力不断增大。拉拔初期,力-位移曲线呈

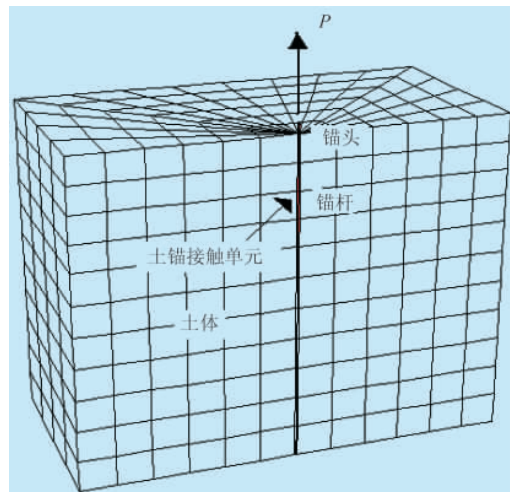


图2 锚杆拉拔试验计算模型

Fig. 2 Calculation model for cable pull-out test

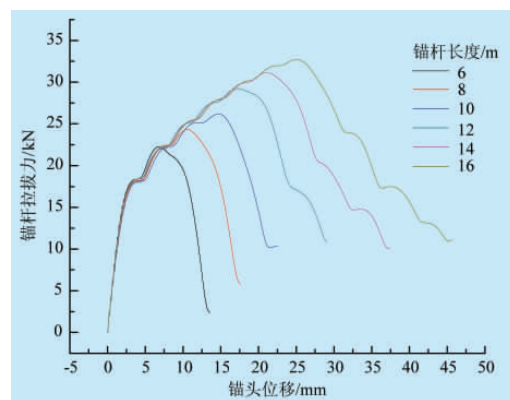


图3 锚杆拉拔力的变化过程

Fig. 3 Variation of the cable tensile force

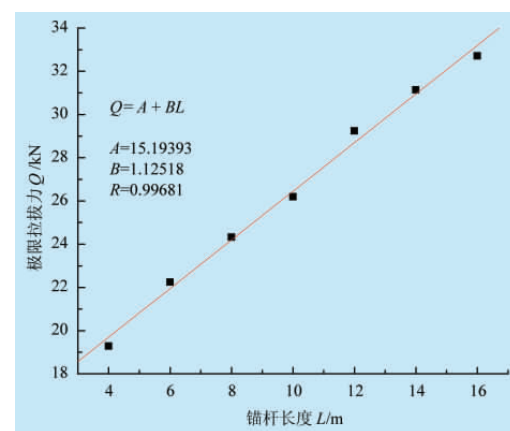


图4 锚杆极限拉拔力与锚杆长度的关系

Fig. 4 Relationship between peak tensile force and cable length

现明显的线性特征,锚杆主要发挥静摩擦力作用;当锚头位移达到4 cm左右时,各曲线出现非线性特征,此时锚杆部分出现滑移。在滑移部分,不同锚杆长度对应的曲线斜率基本相同。这是由于虽然锚杆长度不同,但单位长度内土锚间的摩擦作用相同,且拉拔力逐渐达到极限拉拔力Q。极限拉拔力对应的锚头

位移随着锚杆长度的增加而增加, 对应锚杆长度 6~16 m 的峰值位移分别为: 22.20、24.17、26.03、29.30、31.16、32.79 mm, 可见峰值位移与锚杆长度的关系呈线性特征。

实际上, 当接触面上的剪力过大以至于接触面产生屈服时, 锚杆与土体之间会产生滑移。滑移可能在锚杆表面或粘结材料与土体的接触面上产生, 此时锚杆表面上的剪力可由接触面的屈服剪力求得。该屈服剪力可由拉拔试验求得, 也可由 Mohr-Coulomb 公式计算得到。

锚杆与粘结材料接触面的屈服剪力为

$$\tau_{bi} = c_{bi} + \sigma_{bi} \tan \phi_{bi} \quad (3)$$

其中, c_{bi} 、 σ_{bi} 、 ϕ_{bi} 分别为锚杆与粘结材料接触面上的粘结力、法向应力和内摩擦角。

对应的锚杆表面剪力为

$$\tau_b = \tau_{bi} \quad (4)$$

粘结材料与土体接触面的屈服剪力为

$$\tau_{mi} = c_{mi} + \sigma_{mi} \tan \phi_{mi} \quad (5)$$

其中, c_{mi} 、 σ_{mi} 、 ϕ_{mi} 分别为粘结材料与土体接触面上的粘结力、法向应力和内摩擦角。

图 4 为锚杆极限拉拔力与锚杆长度之间的关系, 由图 4 可知, 两者呈显著的线性关系, 通过线性拟合得到的相关系数为 0.996 81, 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。

固定锚杆长度为 12 m, 分别改变锚杆直径于 2~14 cm, 得到锚杆直径 D 与极限拉拔力之间的关系, 如图 5 所示。由图 5 可知, 随着锚杆直径的增大, 极限拉拔力也逐渐增大, 这是由于增加锚杆直径能有效增加土锚接触面面积, 同时增加相互间的摩擦力; 极限拉拔力 Q 呈显著的线性增长, 且二者关系的拟合相关系数为 0.989, 属于高度相关。

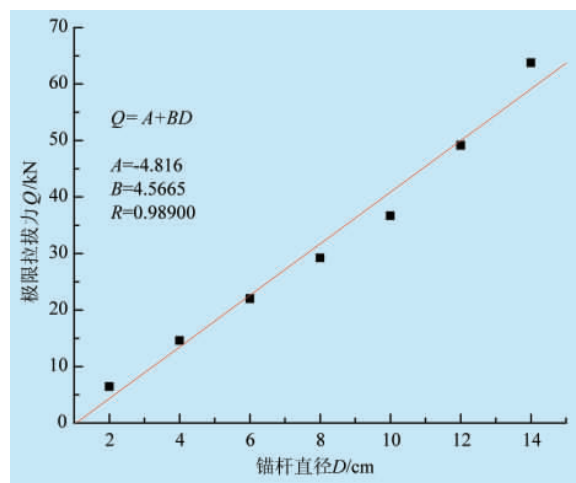


图 5 锚杆极限拉拔力与锚杆直径的关系

Fig. 5 Relationship between peak tensile force and cable diameter

图 6 为锚杆拉拔破坏后, 土体的位移分布情况。由图 6 可知, 锚杆周围土体的变形最大, 沿锚杆深度位移不断增大,

锚杆尾端周围土体的位移最大。锚杆对土体的影响范围为深度 $2L$, 水平约为 $1.5L$ 。

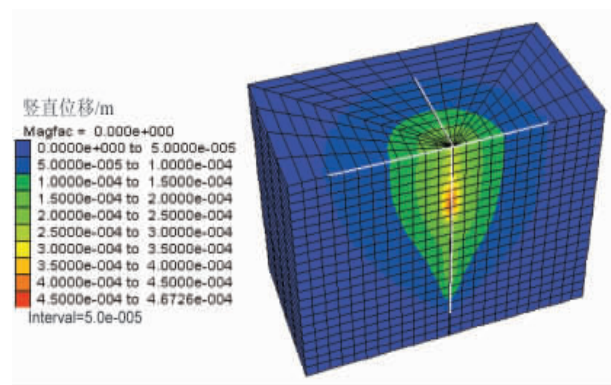


图 6 锚杆周围土体的影响范围

Fig. 6 Affected area of the surrounding soil

4 结论

- 1) 接触面单元能较好地模拟土锚相互作用特征。
- 2) 锚杆拉拔过程的峰值位移和极限拉拔力均与锚杆长度呈显著线性关系。
- 3) 锚杆极限拉拔力与锚杆直径同样呈线性关系。
- 4) 锚杆拉拔过程中, 周围土体受到一定影响, 其影响范围为: 深度 $2L$ (L 为锚杆长度), 水平约 $1.5L$ 的范围。

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 Qipin. *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] 陈少峰, 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: 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]. *Int J Rock Mech Sci and Geomech Abstr*, 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*, 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: 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: 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*, 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] Itasca Consulting Group. User's guide [M]. Minnesota: Itasca consulting group, 2002.

(责任编辑 代丽)

时间: 2010年5月17-21日
地点: 中国·北京

25th
International
Symposium on
Ballistics



第25届国际弹道大会

25th International Symposium on Ballistics

主办: 中国兵工学会
协办: 南京理工大学

电话: 010-68963154
<http://www.isb2010.com>