

DOI: 10.11779/CJGE2014S2002

锚杆长度与边坡坡率对最优锚固角的影响

林 杭^{1, 2, 3}, 钟文文¹, 熊 威¹, 唐雯钰¹, 曹 平¹

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 山西省交通科学研究院黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006; 3. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室(兰州大学), 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 最优锚固角是锚固工程设计中的重要参数, 为了探讨锚杆长度和边坡坡率对于锚杆最优锚固角的影响, 采用FLAC3D 数值方法, 建立边坡模型, 通过数值计算发现锚杆长度和边坡坡率对最优锚固角影响较大, 研究结果表明:

①边坡安全系数随锚杆长度的增大呈现先增大后基本保持不变的趋势, 存在有效锚固长度, 锚杆倾角越大对应的有效锚固长度越小。②边坡安全系数随锚杆倾角的增大呈现先增大后减小的趋势, 存在最优锚固角; 并且最优锚固角随锚杆长度的增大而线性减小。③当锚杆倾角未达到最优锚固角之前, 边坡坡率对安全系数影响较小, 而当锚杆倾角达到或者超过最优锚固角, 边坡坡率的影响逐渐显现, 并且坡率越大所对应的最优锚固角也越大。

关键词: 数值分析; 安全系数; 锚固角; 锚杆长度; 边坡坡率

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)S2-0007-05

作者简介: 林 杭(1980-), 男, 福建福州人, 博士, 副教授, 主要从事岩石力学与岩土工程数值计算的研究。E-mail: linhangabc@126.com。

Effect of bolt length and slope rate on optimum anchorage angle

LIN Hang^{1, 2, 3}, ZHONG Wen-wen¹, XIONG Wei¹, TANG Wen-yu¹, CAO Ping¹

(1. School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha, 410083, China; 2. Key Laboratory of Highway Construction & Maintenance Technology in Loess Region, Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan 030006, China; 3. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China (Lanzhou University), Ministry of Education, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The optimum anchorage angle is the important parameter in the design of anchoring engineering. In order to study the effect of bolt length and slope rate on the optimum anchorage angle, a numerical model for slopes is established using FLAC^{3D}. It is found that the anchor length and the slope rate have great influence on the optimum anchorage angle. The results show that: (1) With the increase of anchor length, the factor of safety decreases at first and then remains stable, so there exists an effective length. The effective length decreases with the increase of anchorage angle. (2) The increase of anchorage angle will lead to the safety factor first to increase and then decrease, so there exists an optimum anchorage angle. The optimum anchorage angle will decrease linearly with the increase of bolt length. (3) When the anchorage angle is less than the optimum anchorage angle, the slope rate only has small impact on the safety factor. When the anchorage angle is the same as the optimum anchorage angle or larger than the optimum anchorage angle, the impact of the slope rate on the slope stability becomes more obviously, and the larger slope rate leads to the larger optimum anchorage angle.

Key words: numerical analysis; safety factor; anchorage angle; bolt length; slope rate

0 引 言

近些年来边坡垮塌、露天矿滑坡、公路工程高边坡等事故频繁发生, 因此如何保持边坡的稳定性越来越重要, 关系到人类生命财产安全以及工程本身的安全与效益。目前存在多种边坡的加固方式如挡土墙、抗滑桩、锚杆加固边坡等^[1-3]。采用锚杆加固岩土边坡是岩土工程领域的一个重要分支, 已得到了广泛的应用。锚杆加固边坡, 能充分发挥岩土体的自身稳定性, 改善岩土体的应力状态及力学参数^[4-6], 以保持稳定。

全长注浆锚杆具有对原岩的扰动较少, 施工速度快, 成本较低和安全可靠等优点, 因此在边坡工程中得到了广泛应用^[7]。尽管在边坡设计中已有大量采用锚固技术, 很多工程也取得了较好的加固效果, 但也有些工程因为设计失误等原因而造成边坡失稳。因此, 优

基金项目: 国家自然科学基金项目(51304240); 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放基金项目(KLTTLR-Y13-14); 西部灾害与环境力学教育部重点实验室开放基金项目(201201)
收稿日期: 2014-07-28

化锚固设计以及选择合理的锚杆参数具有重要意义。以往一些学者进行了相关研究，如彭文祥等^[8]分析了锚杆长度对边坡稳定性的影响，并认为锚杆存在有效锚固长度；蒋明杰^[9]通过理论分析证明了最佳锚固角的存在等。但关于锚杆长度和边坡坡率的变化对最优锚固角的影响的研究还较少，因此，本文拟采用近些年来在岩土工程中广泛使用的数值模拟方法^[3, 8, 10-12]，建立分析模型，分别改变锚杆长度、锚杆倾角和边坡坡率，重点探讨锚杆长度和边坡坡率的变化对最优锚固角的影响。

1 数值模型与方法

1.1 边坡数值模型

如图 1 所示，建立 FLAC^{3D} 模型，共 4292 个节点、2050 个单元。坡高 10 m，坡脚至右边界的长度为 15 m，坡顶至左边界的长度为 30 m，坡脚至模型下部边界的高度为 30 m。选用 Mohr-Coulomb 模型描述岩土体的强度特征，弹性模量 50 MPa，泊松比 0.3，黏聚力与内摩擦角分别为 20 kPa 和 18°，重度为 20 kN/m³。边界条件为下部固定，左右两侧水平约束，上部为自由边界；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）^[13]满足 10⁻⁵ 的求解要求。采用强度折减法^[2, 12, 14]计算边坡整体的安全系数，并以计算是否收敛作为边坡失稳的判据。

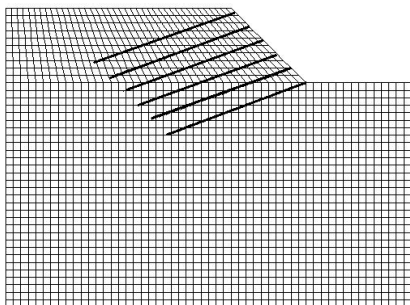


图 1 边坡数值模型

Fig. 1 Numerical model of slope

1.2 锚杆的 FLAC^{3D} 模型

本文选用 FLAC^{3D} 中的锚杆结构单元 cable 来模拟锚杆的力学行为，cable 结构单元主要由几何参数、材料参数和水泥浆特性来定义^[13]。锚杆构件为两点之间具有相同的横截面及材料参数的直线段，并且为弹、塑性材料，在拉、压中屈服，不能抵抗弯矩，锚杆的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 锚杆物理力学参数

Table 1 Parameters of anchor

| 横截面 面积 /mm ² | 弹性 模量 /GPa | 抗拉 强度 /MPa | 单位面积 上水泥浆 刚度/GPa | 单位长 度水泥 浆黏 结力/kPa | 周长 /mm | 摩擦角 /(°) |
|-------------------------------|------------------|------------------|------------------------|----------------------------|-----------|-------------|
| 706 | 200 | 210 | 1.0 | 30 | 502 | 27 |

2 锚杆长度对最优锚固角的影响

在如图 1 的数值计算模型中分别改变锚杆的长度、倾角，得到相应的边坡安全系数，从而进一步得出锚杆长度变化对最优锚固角的影响。以锚杆间距 2.0 m 为例，当锚杆倾角分别为 30°，35°，40° 时，在 6~26 m 范围内改变锚杆长度，计算边坡安全系数如图 2 所示。在一定范围内增加锚杆长度，锚杆长度越长边坡越安全，但达到一定长度后，锚杆长度增加起不到明显的效果，边坡安全系数基本保持稳定。说明在注浆锚杆加固边坡工程中，存在一有效锚固长度。并且不同的锚杆倾角对应不同的有效锚杆长度，在锚杆倾角为 30° 时，有效锚固长度约为 22 m；在锚杆倾角为 35° 时，有效锚固长度约为 16 m；在锚杆倾角为 40° 时，有效锚固长度约为 12 m；因此，可以看出锚杆倾角对于有效锚杆长度的影响较大，锚杆倾角越大对应的有效锚固长度就越小。

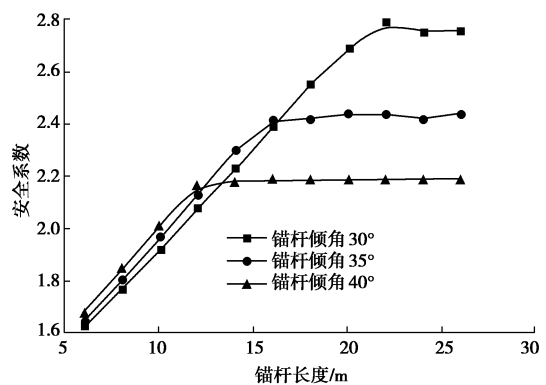


图 2 锚杆长度与安全系数的关系

Fig. 2 Relationship between anchor length and factor of safety

考虑锚杆倾角对边坡安全系数的影响，以及改变锚杆长度后最优锚固角的变化情况。选用锚杆垂直间距 2 m，由于锚杆倾角在接近水平位置时，注浆料容易泛浆从而影响锚杆承载力进而影响锚杆的加固效果，应予以避开，故选择锚杆起始倾角为 5°。记录不同锚杆长度下，锚杆倾角与安全系数的关系，如图 3，可知，在一定范围内边坡安全系数随锚杆倾角增大而增大，当锚杆倾角超过一定值后，锚杆倾角增大反而使安全系数减小，因此证明了最优锚固角 θ_{op} 的存在。并且从图 3 中可以看出安全系数与锚杆倾角关系曲线的斜率随锚杆长度的增大而不断增大，说明锚杆长度越长，边坡整体的安全系数随锚杆倾角变化的速度越快。当锚杆长度在 6~26 m 范围内变动时，记录最优锚固角的变化情况如图 4，可见，随着锚杆长度的增大最优锚固角逐渐减小，并且二者之间的关系近似线性关系。

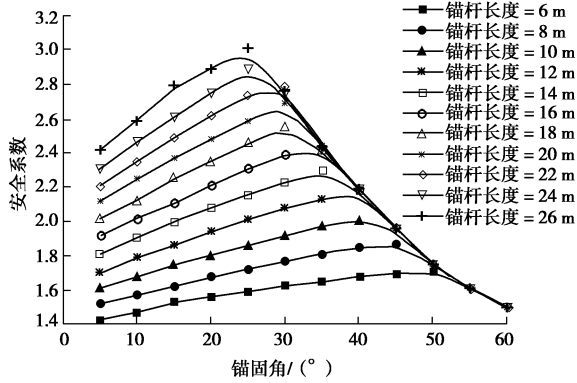


图 3 不同锚杆长度下, 锚杆倾角与安全系数的关系

Fig. 3 Relationship between anchorage angle and factor of safety under different anchor lengths

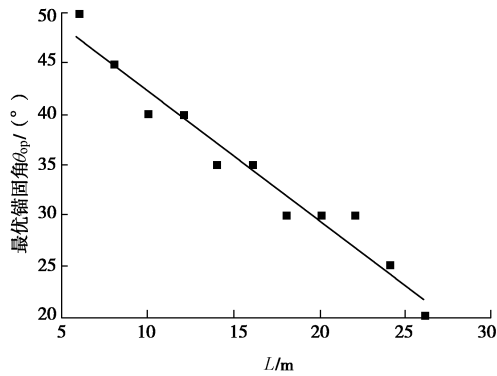


图 4 锚杆长度与最优锚固角的关系

Fig. 4 Relationship between anchor length and optimum anchorage angle

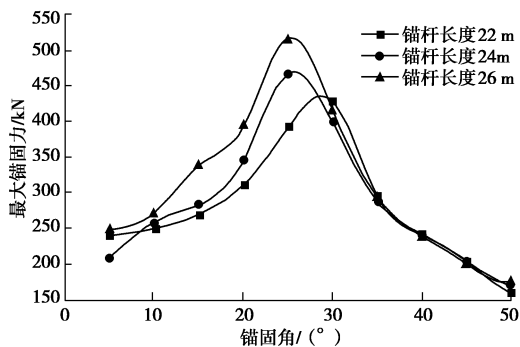


图 5 不同锚杆长度下, 锚杆倾角与最大锚固力的关系

Fig. 5 Relationship between anchorage angle and maximum anchorage force under different anchor lengths

以锚杆长度 $L=22, 24, 26$ m 为例, 分析锚杆倾角的变化对最大锚固力的影响。分析结果如图 5 所示, 可以得到: 在一定范围内随着锚杆倾角的增大, 锚杆的最大锚固力也逐渐增大, 但当锚杆倾角超过某一值时, 最大锚固力随锚杆倾角的增大反而降低, 这和锚杆倾角与安全系数的关系是一致的。当锚杆长度为 22 m 时, 锚杆倾角为 30° 时出现锚固力的最大值; 当锚

杆长度为 24 m, 锚杆倾角为 25° 时出现锚固力的最大值; 当锚杆长度 26 m, 锚杆倾角为 25° 左右时出现锚固力的最大值, 这与上述得到的锚杆长度与最优锚固角的关系基本相同, 从而表明锚固力的最大值往往与最优锚固角是同时出现的, 两者对应的锚杆倾角基本相同。

3 边坡坡率对最优锚固角的影响

选用相同的岩土体物理力学参数和锚杆物理力学参数, 并保持坡高不变, 分别建立边坡坡率 R_p 为 0.4 (1:2.5), 0.6 (1:1.6666), 0.8 (1:1.25), 1.0 (1:1.0) 的数值模型, 如图 6。选用锚杆长度 20 m, 锚杆垂直间距 2 m, 在 0.4~1.0 范围内改变边坡坡率, 得到相应的锚杆角度与安全系数的关系, 从而进一步得出边坡坡率与最优锚固角的关系, 如图 7 所示, 同样存在最优锚固角 θ_{op} , 对比不同坡率的安全系数, 可以看出, 当锚杆倾角为 5° 时, 各坡率对应的安全系数均大致相同; 当锚杆倾角为 10° 时, 坡率为 0.4 的安全系数与其他坡率出现差别 (坡率为 0.4 的最优锚固角为 10°), 而此时坡率为 0.6, 0.8 和 1.0 的安全系数继续保持大致相同; 若锚杆倾角继续增大, 如超过 20° , 25° 后, 各曲线相继出现差别; 可见, 当锚杆倾角未达到最优锚固角之前, 边坡坡率对安全系数影响并不明显, 安全系数基本上保持不变, 而当锚杆倾角达到或者超过最优锚固角, 边坡坡率的影响逐渐显现。

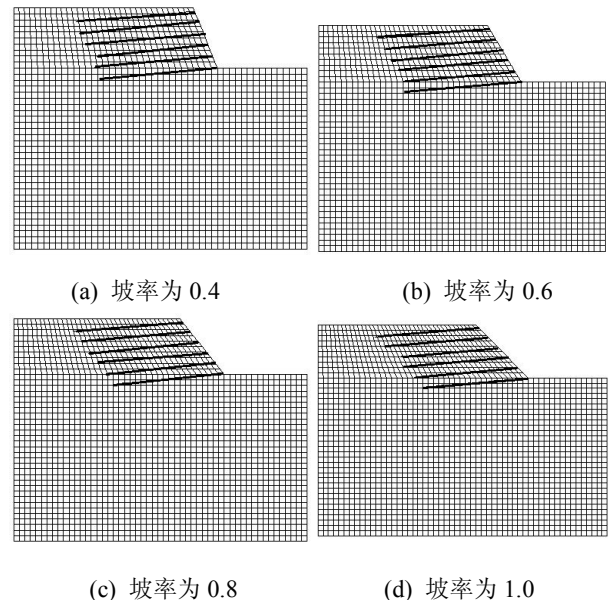


图 6 不同边坡坡率对应的数值模型

Fig. 6 Numerical model of slope with different slope rates

记录边坡坡率与最优锚固角的关系, 如图 8, 随着边坡坡率的增大 (即边坡角度的降低) 最优锚固角也逐渐线性增大, 采用线性方程拟合得到的相关系数

为 0.95, 即二者关系为高度相关。因此, 在实际工程中应根据不同的边坡角度, 选择不同的锚杆安装角度以达到优化设计, 节约工程成本, 保证安全。

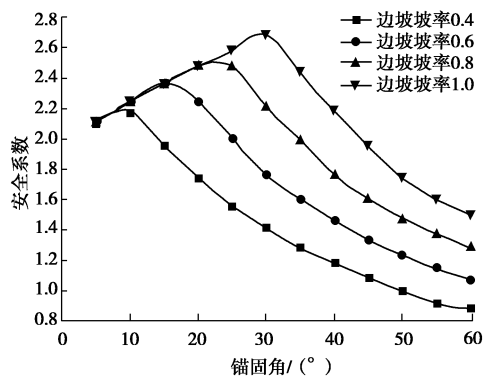


图 7 在不同的边坡坡率下, 锚杆角度与安全系数的关系
Fig. 7 Relationship between anchorage angle and factor of safety under different slope rates

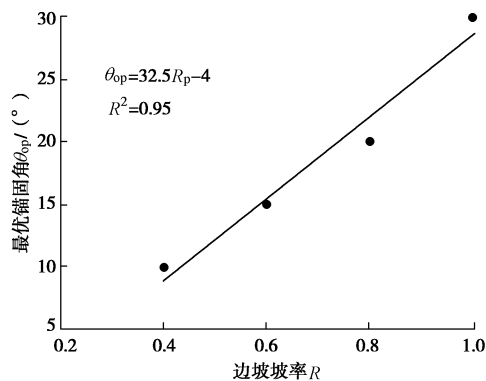


图 8 边坡坡率与最优锚固角的关系

Fig. 8 Relationship between slope rate and optimum anchorage angle

改变锚杆倾角, 分析边坡坡率变化对最大锚固力的影响, 数值计算结果如图 9 所示。从图 9 中可以看出, 当边坡坡率一定, 最大锚固力随锚杆倾角的增大整体变化趋势为先增大后减小, 与锚杆倾角和安全系数的关系相似, 存在锚固力的最大值。分析锚固力的最大值所对应锚杆倾角与边坡坡率的关系, 如图 10, 从中可以看出, 当边坡坡率为 0.4 时, 对应锚固力最大值的锚杆倾角为 10°; 边坡坡率为 0.6 时, 对应锚固力最大值的锚杆倾角为 15°; 边坡坡率为 0.8 时, 对应锚固力最大值的锚杆倾角为 15°; 边坡坡率为 1.0 时, 对应锚固力最大值的锚杆倾角为 30°。这与边坡坡率与最优锚固角的关系相似; 随着边坡坡率的增大 (即边坡角度的减小) 锚固力的最大值所对应的锚杆倾角也逐渐增大。可以理解为当锚杆安装的角度为最优锚固角时, 锚杆所承受的力最大, 因此最有效地提高了边坡安全系数和稳定性, 加固边坡的效果达到最优, 与实际情况相符。

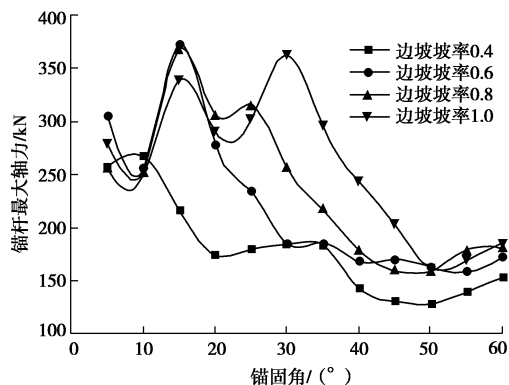


图 9 不同边坡坡率下, 锚杆倾角与锚杆最大轴力的关系
Fig. 9 Relationship between anchorage angle and maximum anchorage force under different slope rates

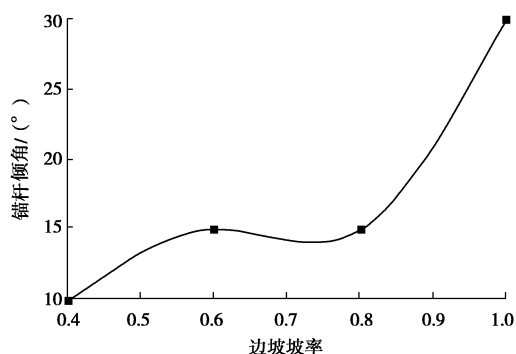


图 10 不同边坡坡率, 锚固力的最大值所对应的锚杆倾角
Fig. 10 Maximum anchorage force corresponds to anchorage angle under different slope rates

4 结 论

(1) 边坡锚固工程中, 在一定范围内随着锚杆长度的增大, 边坡安全系数逐渐增大; 而超过某一长度后, 锚杆长度的增大对边坡的安全系数几乎没有影响, 证明锚杆加固边坡存在一个有效锚固长度。并且有效锚固长度与安装的锚杆倾角有关, 锚杆倾角越大对应的有效锚固长度越小。

(2) 锚杆加固边坡存在最优锚固角, 边坡安全系数随锚杆倾角的增大呈现先增大后减小的趋势。最优锚固角与锚杆长度呈负相关的关系, 随着锚杆长度的增大最优锚固角逐渐减小。锚杆长度越长, 边坡整体的安全系数随锚杆倾角变化的速度越快。

(3) 当锚杆倾角未达到最优锚固角之前, 边坡坡率对安全系数影响较小, 而当锚杆倾角达到或者超过最优锚固角, 边坡坡率越大 (即边坡角度越低), 安全系数就越大, 边坡越稳定。

(4) 边坡坡率越大 (即边坡角度越小), 所对应的最优锚固角越大。且锚固力的最大值往往与最优锚固角是同时出现的, 两者对应的锚杆倾角基本相同。

参考文献:

- [1] 熊智彪, 王启云. 某复杂平面基坑支护结构水平位移监测及加固[J]. 岩土力学, 2009, **30**(2): 572 - 576. (XIONG Zhi-biao, WANG Qi-yun. Monitoring horizontal displacements of support structure for a complicated planar foundation pit and its reinforcement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(2): 572 - 576. (in Chinese))
- [2] 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. Numerical analysis for the effect of cable length to the stability of slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(3): 470 - 474. (in Chinese))
- [3] 马 平, 申 平, 秦四清, 等. 深基坑桩锚与土钉墙联合支护的数值模拟[J]. 工程地质学报, 2008, **16**(3): 114 - 120. (MA Ping, SHEN Ping, QIN Si-qing, LIU Hongyan. Numerical simulation of pile-anchor and soil nailing wall composite support structure in foundation pit[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, **16**(3): 114 - 120. (in Chinese))
- [4] 杨 庆, 朱训国, 栾茂田. 全长注浆岩石锚杆双曲线模型的建立及锚固效应的参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(4): 692 - 698. (YANG Qing, ZHU Xun-guo, LUAN Mao-tian. Development of hyperbolic model for fully grouting rock bolt and parameters analysis for anchoring effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(4): 692 - 698. (in Chinese))
- [5] 泮晓华, 薛 雷, 涂杰楠, 等. 深基坑疏排桩锚与土钉墙水平联合支护数值模拟[J]. 工程勘察, 2010(11): 1 - 5. (PAN Xiao-hua, XUE Lei, TU Jie-nan, WANG Yuan-yuan, HAN Chao. Numerical simulation of scattered row pile-anchor and soil-nailed wall level composite support in deep foundation pit[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(11): 1 - 5. (in Chinese))
- [6] 郭小红, 王梦恕. 隧道支护结构中锚杆的能效分析[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2234 - 2239. (GUO Xiao-hong, WANG Meng-shu. Analysis of efficacy of rock bolt for tunnel support structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2234 - 2239. (in Chinese))
- [7] 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.
- [8] 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 Wen-xiang, ZHAO Ming-hua, YUAN Hai-ping, et al. Parameters analysis of grouted bolts by Lagrangian difference method[J]. Journal of Central South University, 2006, **37**(5): 1002 - 1007. (in Chinese))
- [9] 蒋明杰. 锚杆(索)最佳锚固角的取值分析[J]. 勘察科学技术, 2013(3): 29 - 31. (JIANG Ming-jie. Analysis on optimum anchorage angle of anchoring bars (ropes)[J]. Site Investigation Science and Technology, 2013(3): 29 - 31. (in Chinese))
- [10] 贺若兰, 张 平, 刘宝琛. 锚杆拉拔试验的理论和数值分析[J]. 岩土力学, 2006, **27**(增刊 2): 855 - 859. (HE Ruo-lan, ZHANG Ping, LIU Bao-chen. Theoretical and numerical analysis of bolt pull-out test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(S2): 855 - 859. (in Chinese))
- [11] IMRE B. Numerical slope stability simulations of the northern wall of eastern Candor Chasma (Mars) utilizing a distinct element method[J]. Planetary and Space Science, 2004, **52**(14): 1303 - 1319.
- [12] 刘金龙. 边坡稳定性及路堤变形与破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(7): 1511. (LIU Jin-long. Study on stability of slope and mechanisms of deformation and failure of embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(7): 1511. (in Chinese))
- [13] Itasca Consulting Group. Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, User Manual, Version 3.1[M]. Minnesota: Minnesota: Itasca Consulting Group, 2004.
- [14] 张鲁渝, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报, 2003(1): 21 - 27. (ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, et al. The feasibility study of strength-reduction method with FEM for calculating safety factors of soil slope stability[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(1): 21 - 27. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)