

DOI: 10.11779/CJGE201408019

预应力锚杆内力传递分布规律与时空效应

黄雪峰^{1,2}, 马龙¹, 陈帅强¹, 孔洋¹

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050; 2. 后勤工程学院建筑工程系, 重庆 400041)

摘要: 为了得到预应力锚杆在基坑开挖过程中受力分布特性, 结合西宁火车站综合改造项目, 对桩锚支护结构在不同阶段锚杆的受力特征进行现场内力测试试验, 试验测得了锚杆轴力和摩阻力随时间及空间分布规律, 分析了锚杆支护过程边坡潜在滑移面的动态演化规律, 探讨了预应力锚杆自由段与锚固段相互关系, 结果表明:未锁定时, 受力增加了预应力锚杆的初始应力, 对其受力不利, 应严格予以控制, 锁定后, 锚杆摩阻力沿锚固段渐进式减小, 摩阻力不断向后传递, 但摩阻力峰值并未出现改变; 锚杆锚固作用使得边坡潜在滑移面向深部转移, 同时, 滑移面剪出口沿坡脚向上转移, 剪出口位于距基坑底部约 $H/3$ 处; 预应力锚杆自由段长度越长受力越好, 但应以超出预估可能出现最终滑移面一定深度最为经济合理, 在满足锚固力要求的情况下, 锚固段长度存在一临界值, 超过临界值则浪费。

关键词: 预应力锚杆; 内力测试; 荷载传递; 滑移面; 时空效应

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2014)08 - 1521 - 05

作者简介: 黄雪峰(1960 -), 男, 博士, 教授, 主要从事特殊土与非饱和土、湿陷性黄土、桩基工程、基坑支护等方面的教学与研究工作。E-mail: hxfen60@163.com。

Distribution characteristics and time-space effects of internal force of prestressed anchor rod

HUANG Xue-feng^{1,2}, MA Long¹, CHEN Shuai-qiang¹, KONG Yang¹

(1. Department of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Department of Civil Engineering,

Logistic Engineering University, Chongqing 400041, China)

Abstract: This paper aims to study the distribution of forces along the prestressed anchor rod during the excavation of foundation pits. A filed experiment is carried out to investigate mechanical behavior of anchor rod through a comprehensive reconstruction project at Xining Railway Station. The temporal and spatial distribution of axial forces and frictional forces is obtained. The development of potential slip plane is analyzed, and the relation between free part and anchored part of the prestressed anchor rod is discussed. The results show that, if unanchored, the initial stress of the prestressed anchor rod will be increased which is unfavorable. If anchored, the shear stress decreases steadily along the anchored part and then transports backward, but the maximum shear stress doesn't change. The potential slip plane of slope moves deeper inward due to the effects of anchor rod. At the same time, the exit of the slip plane moves upwards from the foot of the slope, and locates at about one third the height from the bottom of the pit. On one hand, the prestressed anchor rod with a longer free length has better mechanical performance, however the one with a certain length that is enough to prevent the potential slip of slope is more economical and reasonable. On the other hand, the anchored length of the anchor rod, which provides sufficient anchoring force, is better to be short so that the anchor is economical and efficient.

Key words: prestressed anchor rod; internal force test; load transfer; slip plane; time-space effect

0 引言

随着中国城市化进程的进一步加快, 受土地资源缺乏及地面空间发展的制约愈加突出, 城市的发展越来越趋于向地下纵深延伸, 这意味着未来较长时间内将涌现大量深基坑工程, 凸显出深基坑工程在基础设施建中的重要地位^[1]。在中国西北地区, 地质条件主要以杂填土, 黄土、黏土以及泥岩为主, 地质条件较

好, 锚杆支护由于能较充分地调用和提高岩土体的自身强度和自稳能力, 大大缩小结构物体积和减轻结构物自重, 显著节约工程材料, 并有利于施工安全^[2], 锚杆支护在该地区得到广泛应用, 但锚固理论方面的研究还明显落后于工程实践。传统的一些规范和一些设计理论均假定剪应力沿锚杆均匀分布, 而国内外部

分学者通过理论分析、实验室模拟、数值分析以及现场实测分析等方法^[3-6],对锚固理论进行了较深入的研究,研究均表明,沿锚杆剪应力并不是均匀分布。但关于锚杆的系统研究仍较为缺乏,直接研究则更为少见,仍处于局部发现问题局部探讨解决的阶段^[7],本文基于西宁火车站基坑工程,以沿锚杆均匀布置钢筋应力计的方式,对工程现场锚杆的荷载传递规律做了一定的研究。

1 预应力锚杆内力测试试验

1.1 试验方案

本试验采用现场试验方法,对锚杆进行了全程内力测量,试验前对所有设备进行了标定。试验测试钢筋计沿锚杆均匀布置,锚杆钢筋计布置形式及尺寸如图1所示。M1锚杆距支护桩顶部1m,M2锚杆位于开挖面下5m处,测点1位于自由段,自由段长5m,测点2~7沿锚固段每隔2m均匀布置,锚固段长10m。

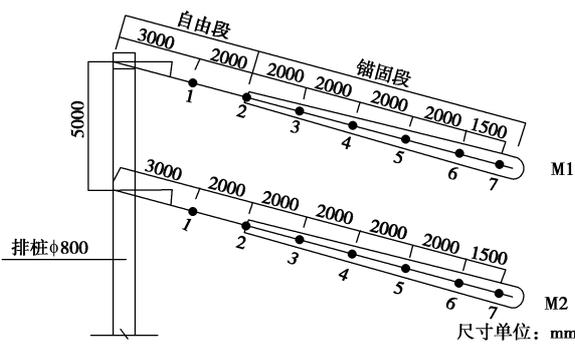


图1 钢筋计沿杆体及空间布置图

Fig. 1 Layout of steel bar meter along rod and space

试验锚杆钢筋计采用北京盛赛克科技开发有限责任公司生产的四通道CGJ-YB埋入式钢筋计如图2(a)所示,钢筋计采用低合金钢弹性体、钢材自补偿全桥组合式专用电阻应变计,能够消除钢筋弯曲应变、温度应变和引出电缆电阻变化和其他因素对测量轴向应变的干扰。测试仪器采用DH3816静态应变、温度测试系统,该系统具有高灵敏度,低漂移等特点,可自动恢复工作机箱状态,保证试验长期连续进行。

1.2 试件的制作安装

钢筋计之间连接采用套筒连接,保证钢筋计在轴心在同一条直线上,锚杆的自由段用PVC管包裹密封并涂抹红油防止锚杆腐蚀,每根钢筋计用引线引出,编号接入采集仪器,锚杆制作完毕后,人工将其轻放入孔中,避免钢筋计碰撞损坏,如图2(a)、(b)所示。

锚杆的设计采用 $\Phi 32$ II级钢筋,设计倾角为 15° ,实际施工倾角(见图2(b))约为 $5^\circ \sim 10^\circ$,沿锚杆每隔2m设置一道定位支架,灌浆材料采用1:0.6水泥砂浆,水泥强度等级为C35,注浆采用二次高压注浆,注浆压力初次注浆压力为0.4~0.6 MPa,二次注

浆压力为1~3 MPa,锚杆成孔采用机械成孔,孔径130 mm。



(a) 制作



(b) 安装

图2 钢筋计制作、安装

Fig. 2 Manufacture and installation of steel bar meter

2 试验结果与分析

2.1 未加预应力锚杆受力特性

(1) 轴力变化规律

开挖初期,锚杆未施加预应力,锚杆受力主要来自基坑开挖边坡土体向坑内滑移产生的滑移力,根据力的平衡原理,锚杆锚固体表面将产生抵抗土体向坑内滑移的力,将锚杆各深度各测点测得轴力绘于图3(a)、(b),由两图可知,锚杆轴力分布随开挖的进展呈现一定规律性,锚杆轴力变化特征有如下两个方面:随着开挖深度的增加及时间的推移,各点处锚杆的轴力不断增大;在此阶段,自由段锚杆轴力几乎为零,沿锚固段轴力先增大后减小。

对比图3(a)、(b)可以发现,M1锚杆轴力分布较M2锚杆轴力分布平缓均匀,M1锚杆最大轴力仅为M2锚杆的0.5倍,出现这一现象的主要原因:一方面是由于M2锚杆位于M1下部,土压力较大,受力较M1大;另一方面基坑开挖后,侧壁产生一定的滑移趋势,形成一条潜在滑移面,滑移面内部稳定土体中锚固体起到拉结作用,通过侧阻力,平衡滑移面外侧土体下滑力,抑制滑移体下滑,此时,M1锚杆处滑移面较M2锚杆滑移面深,测点承担力比较均匀,根据图4可知,M2锚杆处受力仅有测点2和测点3之间承担,致使M2锚杆受力分布差异较大。然而,对预应力锚杆而言,此阶段增加了其初始应力,受力是不利的,试验中,M2锚杆在施加预应力时,个别测点监测数据出现异常,超出锚杆极限承载力,已经损坏,因此,应当限制此阶段锚杆受力的产生,工程

中可以通过严格控制锚杆安装后预应力锁定时间和开挖深度来减小预应力锚杆的初始应力, 其中最重要是控制开挖深度。根据本次试验经验, 结合图 3 可以控制开挖深度为不大于 1.5 m, 能够有效地减小初始应力的大小。

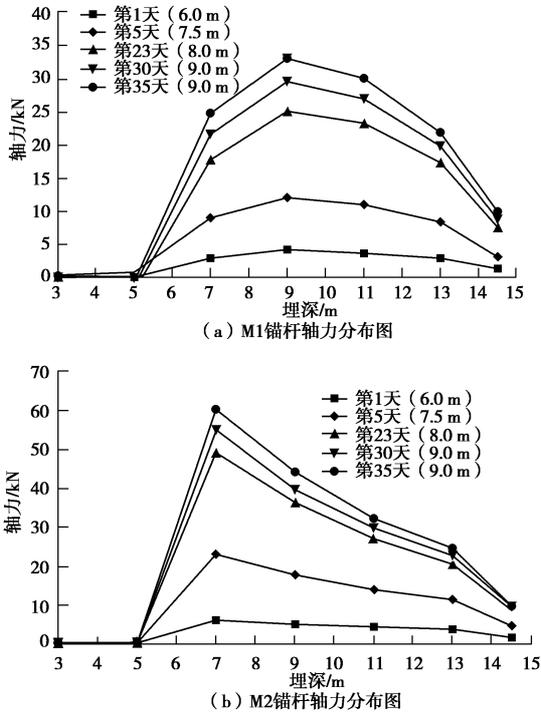


图 3 未施加预应力阶段锚杆轴力分布

Fig. 3 Distribution of axial force at stage without applying prestress

(2) 摩阻力变化规律

锚杆的摩阻力采用平均摩阻力, 由相邻两钢筋计间测得的应变值获得, 即

$$\tau_i = \frac{P_j - P_{j+1}}{\pi D \Delta x} \quad (1)$$

式中, τ_i 为第 j 点和第 $j+1$ 点间的平均摩阻力, D 为锚固体的直径, Δx 为两钢筋计间的距离, P_j , P_{j+1} 分别为第 j 和 $j+1$ 点钢筋计测得轴力。

根据式 (1) 计算摩阻力随时间的变化规律, 绘于图 4 (a)、4 (b) 中, 由图 4 可知, 随着时间的推移, 不同深度处锚杆摩阻力不断增大; 在锚固段, 存在一界限点使得锚固体的摩阻力方向相反, 该界限点处摩阻力为零, 该点即为“中性点”^[8], 在中性点以外 (靠近基坑壁面部分), 锚杆阻止岩土体向坑内滑动, 锚杆表面受到指向基坑壁面的剪力, 摩阻力为负值, 在中性点以内, 锚杆剪力指向与前者相反, 摩阻力为正值。

2.2 预应力对锚杆影响

(1) 轴力变化规律

假定锚杆在施加预应力前无初始变形 (平衡仪器), 以准确得到施加预应力对锚杆的影响, 试验结果如图 5 所示, 在施加预应力之后, 锚杆轴力发生应力重分布, 自由段锚杆轴力变为最大且基本呈均匀分布,

沿锚固段锚杆轴力逐渐衰减, 在锚杆根部轴力达到最小; 锁定后, 自由段处测得锚杆轴力即认为是锚杆所受预应力, 该段预应力在锁定第 1 天到第 2 天减小较快, 预应力损失较大, 之后, 锚杆轴力不断增大, 预应力损失主要发生在锁定第 1 天。

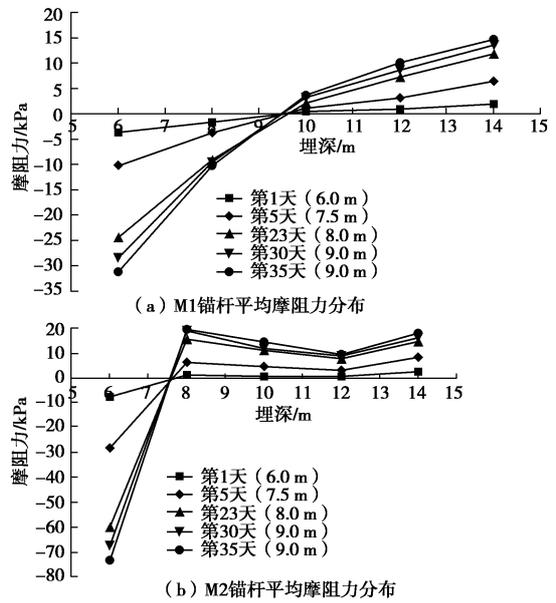


图 4 未施加预应力阶段锚杆摩阻力分布

Fig. 4 Distribution of shear stress at stage without applying prestress

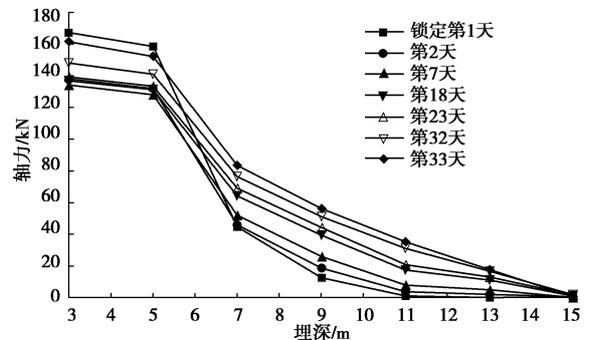


图 5 M1 锚杆施加预应力阶段轴力分布

Fig. 5 Distribution of axial force of M1 at stage of applying prestress

(2) 摩阻力变化规律

锁定后, 摩阻力呈现一定的规律性变化, 如图 6 所示, 施加预应力后锚杆摩阻力沿埋深方向渐进式减小, 摩阻力最大值位于锚固段的端部, 在锚固段根部达到最小; 锚杆摩阻力主要分布在锚固段的前 1/3 段, 摩阻力最大为 140 kPa, 承担最大荷载比例约为 78%, 而后 2/3 段摩阻力分布较小, 最大摩阻力最大为 30 kPa, 承担最大荷载比例仅为 18%, 远小于极限摩阻力; 随着时间及外荷载的增加, 锚固体端部与土体变形过大, 摩阻力降低, 摩阻力向后传递, 摩阻力分布逐渐趋于均匀, 但全过程中摩阻力峰值有所降低并未出现转移。

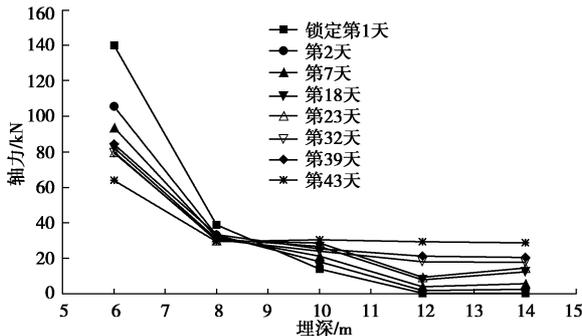


图6 施加预应力后 M1 锚杆摩阻力分布

Fig. 6 Distribution of shear stress of M1 at stage of applying prestress

由此可见, 预应力锚杆的摩阻力分布于传统的均匀分布假设并不相同, 采用传统的均匀分布假设指导预应力锚杆设计和施工显然是不合理的, 因此, 研究预应力锚杆荷载分布规律非常必要。

3 滑移面的演化规律

传统计算滑移面的方法均假设滑移面剪出口位于坡脚位置, 受地层条件、锚固作用等的约束, 剪出口并不一定出现在坡脚位置。在未施加预应力时, 锚杆受力反映了开挖状态下支护坡体内部潜在滑动形式, 根据锚杆受力特点, 可以确定滑移面位置^[9], 中性点位置为滑移面位置, 从图 4 (a)、(b) 可知, 滑移面在 M1 锚杆处约为 9.5 m, 在 M2 锚杆处约为 7.5 m, 中性点位置不同, 在空间上表现为滑移面位置不同, 基于圆弧滑移面法, 确立滑移面模型如图 7 曲线 2 所示, 同时, 利用 MIDAS 软件提供的强度折减法 (SRM), 对未支护边坡稳定性进行分析, 滑移面如图 7 曲线 1 所示, 边坡未进行任何支护时, 滑移面面积较小, 剪出口位置基本位于坡脚处, 施加锚杆后, 边坡滑移面向深部土体转移, 滑移面面积增大, 剪出口位置向上部移动, 剪出口位置位于距基坑底部 $H/3$ 区域。

此试验边坡滑移面位置不同主要原因是锚杆锚固作用以及桩身的阻挡作用使得土体之间围压增大, 根据莫尔-库仑准则^[10]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{1 - \sin \varphi} (c \cos \varphi + \sigma_3 \sin \varphi) \quad (2)$$

抗剪强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 与围压 σ_3 之间为线性关系, 随着围压 σ_3 增大, 土体的抗剪强度将增加, 滑移面向深部转移, 此时滑移面的面积增加, 抗滑力增大, 边坡土体更稳定, 不宜滑出。随着时间及荷载的进一步增加, 锁定锚杆后, 边坡土体的滑移面重新分布, 见图 6, 滑移面在 M1 处位于 8.5 m 处, 滑移面前移, 分析产生该现象的原因是, 锁定后, 外部施加的预应力能克服一定下滑力, 使下滑土体面积减小, 同时, 预应力的作用使得排桩变形减小, 对边坡内部土体起到

一定压密效果, 土体颗粒之间咬合力增加, 起到一定加固作用。

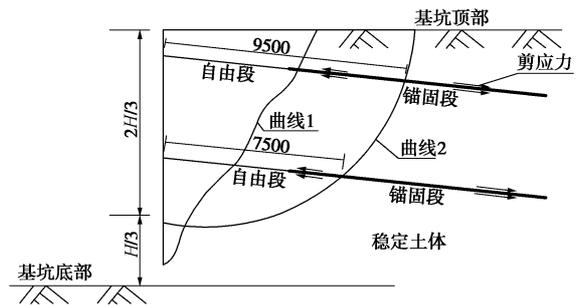


图7 滑移面分布图

Fig. 7 Distribution of slip plane

笔者等^[11]对某黄土地区边坡土压力进行测试, 得出土压力最大位置位于距基底约 $H/3$ 处, 王曙光^[12]对某大厦深基坑及某高层住宅基坑工程事故分析, 支护桩均在距基坑底部约 $H/3$ 处被水平切断, 说明基坑角部土体和下部桩身对坡脚有明显的约束作用, 角部土体和下部桩身改善了土体的应力状态, 使得在坡脚处并未出现破裂面, 破裂面位置出现在距基坑底部约 $H/3$ 处, 综上所述, 距基坑底部 $H/3$ 区域为基坑边坡剪力最大位置, 应引起重视。

4 自由段与锚固段的关系

近年来, 国内外对于锚固类结构的研究主要针对锚固段, 取得了一定的成果, 对于自由段长度的研究则甚少, 规范^[13]仅对自由段最小长度及超过潜在滑移面最小深度进行了规定。根据图 6 分析, 锁定后, 预应力锚杆在埋深 8.5 m 前摩阻力不断降低, 8.5 m 后摩阻力不断增加, 前端摩阻力分布变化较大, 这对锚固体受力和长期稳定性是不利的, 造成在锚固前期, 锚杆锚固力几乎完全由端部摩阻力承担, 锚固后期, 端部锚固体与土体产生较大变形, 端部摩阻力不断降低, 摩阻力向后传递, 锚固力主要由根部锚固体承担, 造成摩阻力分布不均, 另外, 对实际工程而言, 最大滑移面也是不确定的, 人为因素影响较大, 自由段太短, 锚固段前端容易位于不稳定土层中, 预应力大部分被不稳定土体消耗掉, 预应力损失较大, 自由段长度越长, 锚固体就会位于更稳定土体中, 预应力损失越小, 锚杆承受拉力越大, 桩身变形越小, 但预应力太长则不经济。因此, 结合近几年多项大型深基坑支护设计经验, 笔者提出预应力锚杆设计自由段长度越长受力越好, 但应以超出预估可能出现最终滑移面一定深度最为经济合理, 在满足锚固力要求的情况下, 锚固段长度存在一临界值, 超过临界值则浪费。对于本次试验锚杆, 设计锚杆总长 15 m, 自由段长 5 m, 锚固段长 10 m, 满足工程需要并不是问题, 但受力并不是最合理的。

5 结 论

(1) 在未施加预应力阶段, 锚杆的轴力沿锚杆方向先增大后减小, 在锚杆锚固段上存在一“中性点”, 使得在该点之前锚杆承受负摩阻力, 在该点之后锚杆承受正摩阻力。对预应力锚杆而言, 此阶段受力是不利的, 增加了预应力锚杆的初始应力, 应当予以控制, 工程中可以通过严格控制锚杆安装后预应力锁定时间和开挖深度来减小此阶段锚杆的受力, 其中最重要是控制开挖深度。

(2) 预应力使得锚杆的轴力和摩阻力均沿杆长方向逐渐减小, 在锚固段根部达到最小。随着时间的变化, 锚固体端部最先与土体产生较大变形, 端部摩阻力减小, 摩阻力向锚杆根部传递, 摩阻力峰值有所降低但并未转移。

(3) 锚固体的锚固作用使得土体抗剪强度及抗滑力增大, 潜在滑移面向深部土体转移, 边坡滑移更加困难。剪出口位置并不出现在坡脚位置, 而是出现在距基坑底部 $H/3$ 区域。

(4) 预应力锚杆设计自由段长度越长受力越好, 但应以超出预估可能出现滑移面一定深度最为经济合理, 在满足锚固力要求的情况下, 锚固段长度存在一临界值, 超过临界值则浪费。

参考文献:

- [1] 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会. 深基坑支护技术指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (Chinese Institution of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering—China Civil Engineering Society. Guide supporting technology of deep foundation pit[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese))
- [2] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7 - 12. (CHENG Liang-kui. Present status and development of ground anchorages[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 7 - 12. (in Chinese))
- [3] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 188 - 192. (ZHANG Ji-ru, TANG Bao-fu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 188 - 192. (in Chinese))
- [4] 陈广峰, 米海珍. 黄土地层中锚杆受力性能试验分析[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(1): 116 - 119. (CHEN Guang-feng, MI Hai-zhen. Experimental analysis of anchor's stress performance in collapsible loess layer[J]. Journal of Gansu University of Technology, 2003, 29(1): 116 - 119. (in Chinese))
- [5] 丁秀丽, 盛 谦, 韩 军, 等. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980 - 988. (DING Xiu-li, SHENG Qian, HAN Jun, et al. Numerical simulation testing study on reinforcement mechanism of prestressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 980 - 988. (in Chinese))
- [6] PHILLIPS S H E, Factors affecting the design of anchorages in rock[R]. London: cementation Research Ltd, 1970.
- [7] 曾宪明, 林大路, 李世民, 等. 锚固类结构杆体临界锚固长度问题综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3609 - 3625. (ZENG Xian-ming, LIN Da-lu, LI Shi-min, et al. Comprehensive research of critical anchorage length problem of anchorage structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3609 - 3625. (in Chinese))
- [8] 王明怒, 何修仁, 郑雨天. 全长锚固锚杆的力学模型及应用[J]. 金属矿山, 1983(4): 21 - 24. (WANG Ming-shu, HE Xiu-ren, ZHENG Yu-tian. The mechanics model of full length anchoring bolts and its application[J]. Metal Mine, 1983(4): 21 - 24. (in Chinese))
- [9] 周德培, 常 春. 软岩高边坡开挖过程中锚杆轴力分析[C]// 中国岩石力学与工程学会第五次学术大会论文集. 上海, 1998. (ZHOU Pei-de, CHANG Chun. Analysis for the axial force of bolt in excavation of high slope in weak rockmass[C]// Chinese Society for Rock Mechanics and Engineering, Shanghai, 1998. (in Chinese))
- [10] 王 仁, 黄文彬, 黄筑平, 等. 塑性力学引论[M]. 北京: 北京大学出版社, 2009. (WANG Ren, HUANG Wen-bin, HUANG Zhu-ping, et al. Plastic dynamics[M]. Beijing : Peking University Press ,2009. (in Chinese))
- [11] 黄雪峰, 李 佳, 崔 红, 等. 非饱和原状黄土垂直高边坡潜在土压力原位测试试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 500 - 506. (HUANG Xue-fen, LI Jia, CUI Hong, et al. Distribution characteristics of earth pressure for unsaturated intact loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4): 500 - 506. (in Chinese))
- [12] 王曙光. 深基坑支护事故处理经验录[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. (WANG Shu-guang. Foundation pit accident treatment experience record[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [13] JGJ 120—2012《建筑基坑支护技术规程》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. (JGJ 120—2012 China technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese))