

# 框架预应力锚杆支护边坡稳定性 及锚固参数灵敏度分析

王邓崕<sup>1</sup>, 刘东岩<sup>2</sup>, 叶帅华<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学设计院(集团)有限公司, 安徽 合肥 230000;  
2. 兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 灵敏度分析对于解决土木工程中众多参数的辨识问题具有重要作用。为了研究框架预应力锚杆支护边坡锚固参数对土质边坡在动力作用下稳定性安全系数的影响以及锚固参数对安全系数灵敏度的影响, 采用 Geo-Studio 有限元软件建立黄土地区框架预应力锚杆支护边坡的计算模型, 并通过采用全局差分法建立灵敏度近似计算的分析模型, 用以研究各锚固参数与灵敏度之间的关系。结果表明: 每一个支护参数都有一个最佳水平, 可以使安全系数达到最高值; 锚固参数对灵敏度的影响大小依次为锚杆水平倾角、水平间距、竖向间距以及锚杆长度。分析结果可为框架预应力锚杆支护结构的优化设计提供参考。

**关键词:** 框架预应力锚杆; 地震作用; 锚固参数; 支护边坡; 灵敏度; 安全系数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)05-0444-07

## Analysis of slope stability and sensitivity of anchoring parameters in slope supported by frame prestressed anchored bar

WANG Dengqun<sup>1</sup>, LIU Dongyan<sup>2</sup>, YE Shuaihua<sup>2</sup>

(1. Hefei University of Technology Design Institute (Group) Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Reduction, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** Sensitivity analysis plays an important role in addressing numerous parameter identification in civil engineering. In order to study the influence of anchoring parameters of frame prestressed anchor supporting slope on the stability safety factor of soil slope under dynamic action and the influence of anchoring parameters on the sensitivity of safety factor, the calculation model of frame prestressed anchor supporting slope in loess area was established by using Geo-Studio finite element software. The global difference method was used to analyze the model of approximate calculation of sensitivity to study the relationship between anchoring parameters and sensitivity. The results indicate that each support parameter has an optimal level that can maximize the safety factor. The impact of anchoring parameters on sensitivity is in the following order: horizontal inclination angle, horizontal spacing, vertical spacing, and length of anchored bar. These analytical findings can provide important reference for the optimization design of structures supported by frame prestressed anchored bar.

**Key words:** frame prestressed anchored bar; earthquake effects; anchoring parameters; supported slope; sensitivity; safety factor

## 0 引言

自 1550 年以来, 在我国西北地区发生过多次强震, 如 1556 年华县 8.0 级地震、1654 年天水 8.0

级地震、1695 年临汾 7.5 级地震、1718 年通渭 7.5 级地震、1920 年海原 8.5 级地震和 1994 年青海共和 5.4 级地震, 这些强震诱发了不同程度的黄土边坡失稳破坏, 并造成了重大的经济损失和人员伤

亡<sup>[1]</sup>。近些年来, 柔性支挡结构对边坡加固的效果较好, 由于地震带来的滑坡等次生灾害频繁发生, 较多学者利用柔性支挡结构对边坡和基坑进行支护, 以防止工程发生安全事故。

框架预应力锚杆支护结构作为柔性支挡结构, 具有体积小、质量轻、组装简便等优良特性, 广受研究学者的青睐, 其剖面图如图 1 所示。与此同时, 国内外的学者对有关锚杆加固边坡的稳定性影响进行了大量研究分析, 得出众多成果。

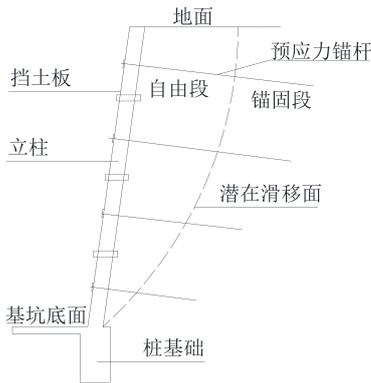


图 1 框架预应力锚杆支护结构剖面图

Fig. 1 Profile of structure supported by frame prestressed anchored bar

周勇等<sup>[2]</sup>结合了黄土地区具体的工程实例, 考虑了框架和锚杆对黄土边坡稳定性的影响, 利用全局差分法研究了设计参数对边坡的安全系数以及灵敏度的影响。言志信等<sup>[3]</sup>将黄土边坡作为研究对象, 对 cable 单元建模和剪应力提取方法做了修正和改进, 运用 FLAC 3D 模拟系统软件分析和研究了地震作用下锚固参数变化对岩体边坡锚固界面剪应力和锚杆锚固机理的影响, 对锚杆加固的设计改进具有高价值的指导作用。朱宏伟等<sup>[4]</sup>在锚杆支护能有效加强边坡动力稳定性的基础上对锚杆支护的边坡进行了稳定性验算, 得到了边坡稳定性与锚杆长度成正相关的结论, 并利用有限元模拟软件进行了锚固参数对边坡动力稳定性影响的研究, 分析了锚杆长度、锚杆倾角和锚杆间距对支护边坡稳定性的影响。张明聚等<sup>[5]</sup>研究了土钉支护参数对加固边坡稳定性的影响, 并设计了大型振动台试验, 研究了不同支护参数下的边坡动力反应特征, 得出了土钉支护边坡灾害性的破坏将会发生在边坡坡腹处, 坡脚和坡顶的损坏变形相对较小的结论。叶帅华等<sup>[6]</sup>设计并完成了框架锚杆支护黄土边坡的大型振动台模型试验, 在不同的波型、加速度峰值以及持时地震波

的工况下, 分别研究了黄土边坡模型的动力响应特征变化。郑颖人等<sup>[7]</sup>利用大型振动台试验研究支护边坡的动力响应规律, 同时对支护边坡的预应力锚索进行了动力响应分析研究。ABDEL MASSIH 等<sup>[8-9]</sup>基于可靠度理论研究地震作用下边坡的稳定性问题。

综上所述, 已有学者对柔性支挡结构支护边坡进行了相应的研究, 取得相当多的成果, 但是目前关于在地震作用下锚固参数对边坡稳定性的影响以及锚固参数对灵敏度影响的研究还有所欠缺, 因此本文对上述部分进行研究, 并探讨了框架预应力锚杆支护边坡的最优设计, 希望对今后的框架预应力锚杆支护边坡抗震设计提供一些借鉴。

## 1 锚固边坡稳定性系数及计算

### 1.1 稳定性计算

采用圆弧滑移面条分法计算支护结构安全系数, 同时考虑土体的力学指标和预应力锚杆的作用, 并假定以下条件<sup>[10-12]</sup>:

- (1) 土质均匀且各向同性;
- (2) 土坡滑动面形状为圆弧形;
- (3) 边坡最危险滑移面通过坡脚。

框架预应力锚杆结构的内部整体稳定性分析简图如图 2 所示。圆弧滑动面圆心为  $O(x, y)$ , 安全系数可以定义为滑动面上的抗滑力矩总和与下滑力矩总和的比值:

$$F_s = \frac{M_R}{M_S} \quad (1)$$

$$M_R = R \sum_{i=1}^n c_{ik} l_i s + sR \sum_{i=1}^n (w_i + qb_i) \cos \theta_i \tan \varphi_{ik} + R \sum_{j=1}^m T_{Rj} \cos(\alpha_j + \theta_j) + T(H + H_0) + \Delta R + R \sum_{j=1}^m T_{Rj} \sin(\alpha_j + \theta_j) \tan \varphi_{jk} \quad (2)$$

$$M_S = \left[ s\gamma_0 \sum_{i=1}^n (w_i + qb_i) \sin \theta_i \right] R \quad (3)$$

式中:  $F_s$  为内部整体稳定性安全系数;  $M_R$  为滑动面上的抗滑力矩总和;  $M_S$  为滑动面上的下滑力矩总和;  $n$  为土条数;  $m$  为锚杆排数;  $\gamma_0$  为支护结



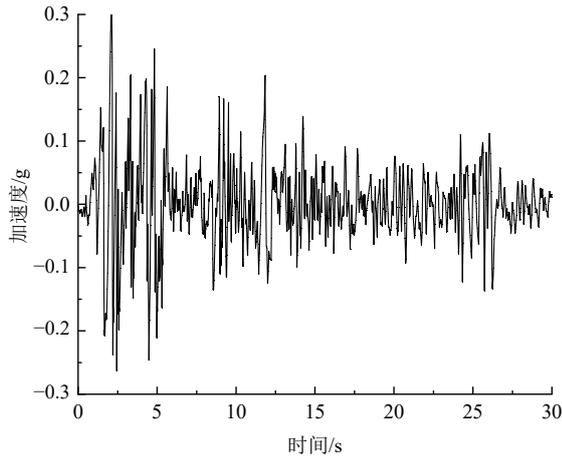


图4 EI-Centro波时程曲线

Fig. 4 Time history curve of EI-Centro wave

### 2.2 锚固参数及模拟设计

为了研究参数变化对锚杆支护边坡的动力特征影响, 根据以往学者的研究, 选取了对边坡稳定性影响较大的部分因素: 地震峰值加速度、锚杆的长度、锚杆预应力、锚杆水平和竖向间距。

根据本文的研究思路, 模型从上到下依次设置4根锚杆, 编号分别为锚杆A、锚杆B、锚杆C和锚杆D。当只有锚杆的长度作为变量时, 保持其他影响因素不变, 分析支护边坡的过程中锚杆轴力的变化和边坡土体的变形状况。锚杆水平和竖向间距的大小也直接关系到边坡支护工程的经济性和可靠性, 因此, 可通过选取工程中常用的5种锚杆水平和竖向间距值来研究锚杆间距对支护边坡的动力响应影响。采用不同的地震峰值加速度来研究边坡的位移状况、框架预应力锚杆的轴力变化状况以及对边坡稳定性的影响, 地震波选EI-Centro波, 持续时间为30 s, 分别输入地震峰值加速度0.10g、0.20g、0.30g进行不同水平地震作用下的边坡稳定分析。

利用 Geo-Studio 有限元软件对某一参数进行研究分析时, 应依次改变参数设计值而其他参数保持不变。

## 3 计算结果分析

### 3.1 地震峰值加速度对锚杆轴力影响分析

为了研究不同的峰值加速度对锚杆轴力变化的影响, 在锚杆长度均为12 m的情况下, 分别建立水平峰值加速度为0.10g、0.20g和0.30g的3个有限元模型, 分别得到锚杆D在不同峰值加速度作用下的轴力变化, 如图5所示。在地震作用过程中, 随着地震加速度峰值的不断变化, 锚杆的轴力也处于不

断变化的状态, 这是因为在地震过程中, 边坡土体随着地震作用产生一定的塑性变形, 最终伴随着计算结束而停止变化。这时边坡土体已产生永久位移, 从而导致地震作用后的锚杆轴力相比于地震前的锚杆轴力有所增加。当地震峰值加速度越大时, 边坡土体地震响应越为激烈, 故产生的永久位移越大, 因此使锚杆轴力增幅越大。

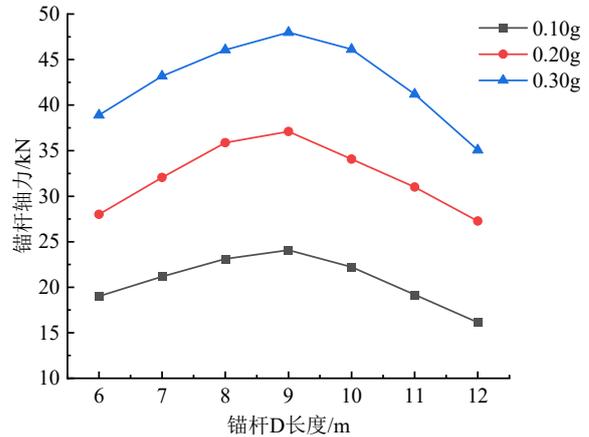


图5 锚杆D轴力随长度变化曲线

Fig. 5 Curves of axial force variation with length of anchored bar D

### 3.2 锚杆水平倾角影响

在边坡的抗震设计中, 锚杆水平倾角是主要影响因素, 因为它直接关系到工程的安全性和稳定性。选取合适的水平倾角参数设计值可以提高边坡的抗震性能, 同时也能影响到施工的难易程度。安全系数随锚杆水平倾角的变化曲线如图6所示, 从图6中可以看出, 当锚杆的水平倾角不断增大时, 安全系数呈现下降趋势, 可以分析出, 当锚杆的水平倾角增大时, 锚杆在水平方向上的锚固作用力逐渐减小。因此, 水平倾角选取15°左右时, 可以将锚杆的作用性能发挥到最大, 而且在这个倾角取值范围内方便施工。

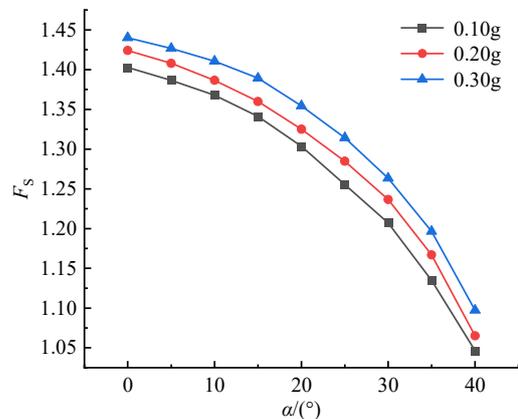


图6 安全系数随锚杆水平倾角的变化曲线

Fig. 6 Safety factor variation curves with horizontal inclination angle of anchored bars

### 3.3 锚杆水平间距影响

安全系数随锚杆水平间距的变化曲线如图7所示,当增加锚杆水平间距时,边坡土体单位面积锚固力减小,故相应的安全系数减小。但在实际工程中,并不能以减小锚杆的水平间距,即在同一排锚固点处增加锚杆的数量来达到增加边坡稳定性的目的。因为在工程中,在满足边坡稳定性的前提下,还要兼顾施工的便利性和经济性,应将锚杆水平间距设置在一个合理取值范围内,以达到设计最优化的目的。

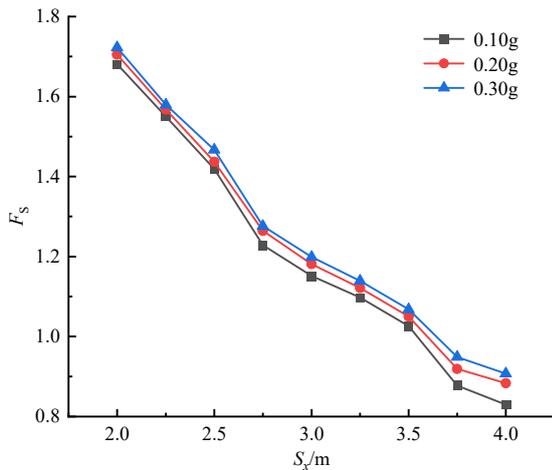


图7 安全系数随锚杆水平间距的变化曲线

Fig. 7 Safety factor variation curves with horizontal spacing of anchored bars

### 3.4 锚杆竖向间距影响

安全系数随锚杆竖向间距的变化曲线如图8所示,随着锚杆竖向间距值 $S_y$ 的不断增大,安全系数 $F_s$ 呈现不断变大的趋势。由图8分析可知,当锚杆竖向间距值为2.5 m左右时,可使锚杆发挥出最大作用。

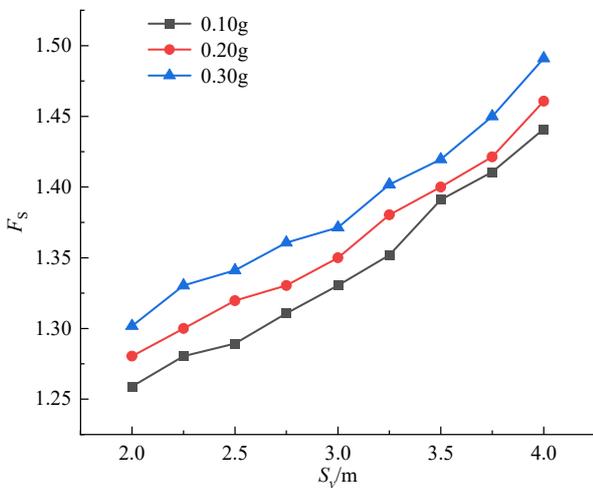


图8 安全系数随锚杆竖向间距的变化曲线

Fig. 8 Safety factor variation curves with vertical spacing of anchored bars

### 3.5 锚杆长度影响

图9为安全系数随锚杆长度的变化曲线,由图9可知,增加锚杆的长度可以有效提高安全系数,但是受地下管道系统及相邻建筑物的影响,并不能一味以增加锚杆长度来达到提高安全系数的目的,还要兼顾锚杆桩孔难以钻孔成型等施工难易程度方面的问题。因此,在满足安全性的前提下要做到既能满足工程需要,也不与周围环境发生矛盾,合理选取锚杆长度进行边坡支护。

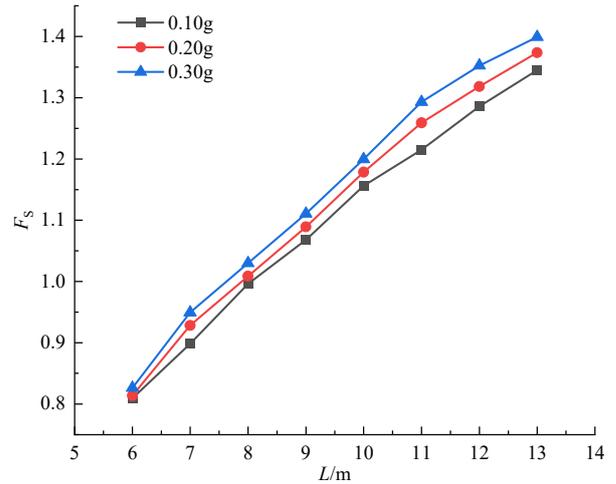


图9 安全系数随锚杆长度的变化曲线

Fig. 9 Safety factor variation curves with length of anchored bars

## 4 锚固参数灵敏度分析

锚固参数灵敏度分析如图10所示,相对于其他锚固参数,锚杆水平倾角的灵敏度绝对值增大趋势较为明显。锚杆水平倾角 $\alpha$ 在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 时,灵敏度绝对值增大较为突出,锚杆水平倾角 $\alpha$ 在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 时,灵敏度绝对值变化较为平缓,在锚杆倾角到达 $15^\circ$ 之后,灵敏度变化率呈现减小的趋势。因此,可以判断锚杆水平倾角在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 的这个阶段,相对于其他阶段来说,锚杆对水平倾角的变化相对不敏感。灵敏度绝对值随着锚杆水平间距 $S_x$ 和锚杆竖向间距 $S_y$ 的逐渐增大而变大,说明边坡安全系数对小间距数值变化较为敏感。关于锚杆长度 $L$ 变化的灵敏度系数也一直处于 $0.06 \sim 0.07$ 这一个数值段,说明在一定范围内增加锚杆长度对提高安全系数有作用,但超过这个范围时增加锚杆长度对边坡稳定性变化没有太大意义。

图10中还可以看出,锚杆水平倾角和锚杆水平间距变化对锚固边坡稳定性影响较为明显,锚杆竖向间距和锚杆长度的影响则不是很明显。通

过观察曲线的变化率, 锚杆水平倾角和锚杆水平间距的灵敏度大于锚杆长度和锚杆竖向间距, 即参数灵敏度的大小依次为: 锚杆水平倾角 $\alpha >$  锚杆水平间距 $S_x >$  锚杆竖向间距 $S_y >$  锚杆长度 $L$ 。

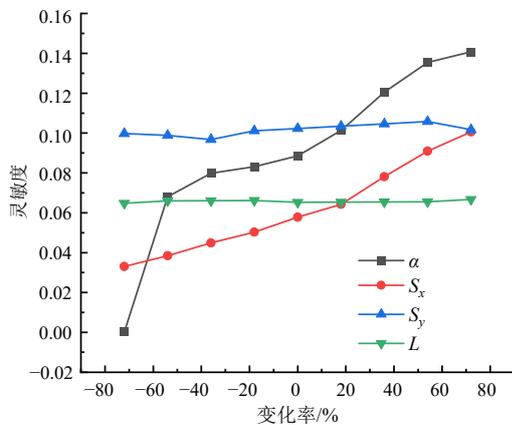


图 10 锚固参数灵敏度分析结果

Fig. 10 Sensitivity analysis results of anchoring parameters

## 5 结 论

(1) 在框架预应力锚杆的设计与施工中, 可参考上述锚固参数对安全系数和灵敏度的影响, 综合考虑各个方面, 在保证满足工程需要, 即满足工程安全性的前提下, 对锚固参数精确取值以达到最优设计。

(2) 为发挥出锚杆最佳性能, 建议将预应力锚杆的水平倾角限定在 $5^\circ \sim 15^\circ$ 的范围内。

(3) 为了提高边坡的稳定性, 在一定范围内可以通过增加锚杆的长度来达到目的, 但不能一味增加锚杆长度, 还要兼顾周围环境以及施工条件。

(4) 通过上述分析, 建议将锚杆竖向间距的取值设置为 2.2 m 左右的范围, 这个取值既满足了工程安全性, 又能最大程度发挥出锚杆加固边坡的作用, 优化了抗震设计, 且方便施工。

## 参考文献

[1] 黄润秋, 许强. 中国典型灾难性滑坡[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
HUANG Runqiu, XU Qiang. Catastrophic Landslides in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.

[2] 周勇, 朱彦鹏. 黄土地区框架预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 1): 3115-3122.  
ZHOU Yong, ZHU Yanpeng. Sensitivity analysis of design parameters of grillage supporting structure with

prestressed anchor in loess region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3115-3122.

- [3] 言志信, 屈文瑞, 龙哲, 等. 地震作用下锚固参数对岩体边坡锚固界面剪应力分布影响分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2110-2119.  
YAN Zhixin, QU Wenrui, LONG Zhe, et al. Influences of anchorage parameters on distribution of shear stress at anchorage interface of rock slopes under earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2110-2119.
- [4] 朱宏伟, 项琴. 锚杆支护边坡动力响应规律及锚固参数影响[J]. 公路交通科技, 2011, 28(7): 30-34, 99.  
ZHU Hongwei, XIANG Qin. Dynamic response of anchored slopes and influence of anchoring parameters[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(7): 30-34, 99.
- [5] 张明聚, 吕琦, 李立云, 等. 土钉支护边坡动力性能参数分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1758-1763.  
ZHANG Mingju, LÜ Qi, LI Liyun, et al. Parametric analysis for aseismic behavior of soil nailing system[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1758-1763.
- [6] 叶帅华, 赵壮福, 朱彦鹏. 框架锚杆支护黄土边坡大型振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4240-4248.  
YE Shuaihua, ZHAO Zhuangfu, ZHU Yanpeng. Large-scale shaking table experiment of loess slope supported by frame anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4240-4248.
- [7] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1714-1723.  
ZHENG Yingren, YE Hailin, HUANG Runqiu. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1714-1723.
- [8] ABDEL MASSIH D S Y, SOUBRA A H, EL HACHEM E. Slope stability analysis in seismic areas by a reliability approach[C]//The 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. 2007.
- [9] ABDEL MASSIH D S Y, SOUBRA A H, HARB J, et al. Dynamic slope stability analysis by a reliability-based

- approach[C]//The 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 2010.
- [10] 董建华, 袁方龙, 董旭光. 深基坑新型支护结构力学特性分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(10): 99-110.  
DONG Jianhua, YUAN Fanglong, DONG Xuguang. Mechanical behaviors and analysis of a new supporting structure of deep foundation pit[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(10): 99-110.
- [11] 董建华, 董旭光, 朱彦鹏. 随机地震作用下框架锚杆锚固边坡稳定性可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(2): 41-47.  
DONG Jianhua, DONG Xuguang, ZHU Yanpeng. Reliability analysis on stability of slope reinforced by frame with pre-stress anchors under random earthquake action[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(2): 41-47.
- [12] 万林海, 余建民, 冯翠红. 软土复合土钉支护结构参数优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3342-3347.  
WAN Linhai, YU Jianmin, FENG Cuihong. Optimum design of parameters for composite soil nail wall in soft soil foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3342-3347.
- [13] 贾金青, 郑卫锋. 预应力锚杆柔性支护法的研究与应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1257-1261.  
JIA Jinqing, ZHENG Weifeng. Study and application of flexible retaining method with prestressed anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1257-1261.
- [14] 彭明祥. 土钉支护设计参数的灵敏度分析[J]. 工程勘察, 2003, 31(6): 8-10.  
PENG Mingxiang. Analysis on sensitivity of design parameters for soil nailings[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2003, 31(6): 8-10.
- [15] 周勇, 张磊. 深基坑土钉加预应力锚杆支护结构设计参数的灵敏度分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 106-112.  
ZHOU Yong, ZHANG Lei. Sensitivity analysis of design parameters of soil-nailing and prestressed anchor structure for deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 106-112.
- [16] 叶帅华, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆支护边坡地震动稳定性分析方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 1994-1998.  
YE Shuaihua, ZHU Yanpeng. Stability analysis of slope supported by frame with pre-stressed anchors under earthquake[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1994-1998.