

文章编号: 1674—8247(2020)01—0032—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.01.006

## 基于局部强度折减法的桥梁墩台滑坡加固设计

肖朝乾 付正道 王智猛

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**当桥梁墩台基础设置在滑坡上时,存在滑坡虽未达到剪切破坏极限状态,但墩台基础已产生过大变形的可能。因此,对于此类存在变形敏感结构物的滑坡,设计时除分析滑坡的整体稳定性外,更应注重墩台基础受力与变形的计算,以确保墩台基础水平位移控制在容许范围内。为此,本文提出采用针对滑动面的局部强度折减法来计算滑坡和墩台的变形,并与整体强度折减法进行对比分析。研究表明:整体强度折减法显著放大了滑坡水平位移和滑坡推力,局部强度折减法能够很好地解决整体强度折减法求解滑体剪切变形失真的问题,能真实地反映滑体的剪切变形分布规律。同时,本文还给出了桥梁墩台滑坡加固设计的关键步骤,可为以结构物变形控制为主的滑坡加固设计提供参考。

**关键词:**局部强度折减法;桥梁;墩台;滑坡;结构变形

中图分类号:U445.55<sup>+</sup>9 文献标志码:A

## Reinforcement Design of Landslide at Bridge Pier or Abutment Foundation Based on Local Strength Reduction Method

XIAO Chaoqian FU Zhengdao WANG Zhimeng

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** When the bridge pier or abutment foundation is set on the landslide, there exists a case although the landslide has not reached the shear failure limit state, but it is possible that the excessive deformation has occurred at the foundation of pier or abutment. For landslides with deformation-sensitive structures, in addition to analyzing the overall stability of the landslide, more attention shall be paid to the calculation of stress and deformation of the pier or abutment foundation to ensure that the horizontal displacement of the pier or abutment foundation is controlled within the allowable range. Therefore, the local strength reduction method for the sliding surface is proposed to calculate the deformation of landslide and pier or abutment, and compared with the overall strength reduction method. The results show that the overall strength reduction method can significantly amplify the horizontal displacement and thrust of the landslide, and the local strength reduction method can well solve the problem of shear deformation distortion of the sliding mass by the overall strength reduction method, and can truly reflect the distribution law of shear deformation of the sliding mass. At the same time, this paper also gives the key steps of the reinforcement design of the landslide at the pier and abutment foundation, which can provide the reference for the reinforcement design of the landslide with deformation-sensitive structure.

**Key words:** local strength reduction method; bridge; pier and abutment; landslide; structure deformation

收稿日期:2020-01-10

作者简介:肖朝乾(1976-),男,教授级高级工程师。

引文格式:肖朝乾,付正道,王智猛. 基于局部强度折减法的桥梁墩台滑坡加固设计[J]. 高速铁路技术,2020,11(1): 32 - 37.

XIAO Chaoqian, FU Zhengdao, WANG Zhimeng. Reinforcement Design of Landslide at Bridge Pier or Abutment Foundation Based on Local Strength Reduction Method [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 32 - 37.

我国西南地区铁路沿线山势起伏较大,高陡边(滑)坡分布广泛,桥隧比例往往高达80%~90%以上。线路通常无法完全绕避滑坡灾害,致使许多桥梁墩台基础设置于滑坡上,给桥梁结构和行车安全带来重大威胁<sup>[1]</sup>。

滑坡上的桥梁墩台基础和抗滑桩归属于被动桩。被动桩和土体之间的相互作用是一个十分复杂的三维空间问题,且受桩、土变形特征和强度参数影响<sup>[2]</sup>,传统解析方法难以考虑结构与土体之间的相互作用和协调变形,故众多学者借助数值模拟开展相关研究。张建华、詹永祥等人<sup>[3-4]</sup>将滑坡简化为水平场地,通过在模型边界施加滑坡推力或水平位移,研究了桩土的相互作用机理。但这类非耦合分析方法需要事先获得被动桩周围的滑坡推力或水平位移,这通常难以准确预测<sup>[5]</sup>。

位于滑坡上的桥梁墩台基础,其所受荷载主要由岩土体强度参数劣化引起。此类滑坡的蠕滑变形机制是岩土体强度参数的降低,与强度折减法的原理基本一致。强度折减法通常对整个坡体进行折减,将极限状态下的折减系数定义为安全系数,最初被用于无桩情况下边(滑)坡的稳定性分析<sup>[6-7]</sup>。部分学者对强度折减法在设置抗滑桩情况下的应用进行了探索。Wei等人<sup>[8]</sup>以简单均质边坡为例,研究了设置抗滑桩加固对滑动面附近土体塑性区的影响,并以边坡安全系数为求解目标,给出了抗滑桩的最优设桩位置。刘怡林等人<sup>[9]</sup>对抗滑桩加固后的均质边坡和含软弱夹层边坡的稳定性进行了对比分析,探讨了桩距、桩径比及桩身刚度对边坡稳定性的影响。现阶段,滑坡的防治多以安全系数为控制目标,利用抗滑桩对滑坡的滑动破坏进行有效支挡,并未考虑敏感结构(如桥梁墩台基础)的变形控制问题<sup>[10-11]</sup>。

当桥梁墩台基础设置在滑坡上时,存在滑坡虽未达到剪切破坏的极限状态,但墩台基础就已产生过大变形的可能。因此,除分析滑坡的稳定性外,更要注重墩台基础的受力与变形计算,以便将墩台基础水平位移控制在容许范围内。也有一些学者利用强度折减法计算抗滑桩的受力和变形。年廷凯等人<sup>[12]</sup>通过分析边坡的安全系数、抗滑桩的内力响应等,对比了圆形和矩形截面抗滑桩的加固效果。吴应祥等人<sup>[13]</sup>提出了一种抗滑桩设计的可靠性分析方法,在有限元强度折减法中,引入描述岩土体物理力学参数和荷载随机性的数学模型,确定滑坡推力和抗滑桩内力的设计值。

但抗滑桩的内力、变形与周围土体的剪切变形有关,若对整个滑坡的强度参数进行折减,必将放大滑坡的水平位移场,据此得到的桩身内力和变形的准确性值得商榷。应用强度折减法计算滑坡上桥梁墩台基础或抗滑桩的内力与变形的关键,在于能否准确模拟滑坡的真实变形情况。

为此,本文提出采用局部强度折减法计算滑坡上被动桩(包括桥梁墩台基础和抗滑桩)的内力和变形。以简单滑坡为研究对象,对整体与局部强度折减的差异进行对比,并给出桥梁墩台滑坡加固设计的关键步骤,为以结构变形控制为主的滑坡加固设计提供参考。

## 1 局部强度折减与整体强度折减

强度折减法是由 Zienkiewicz 等人<sup>[14]</sup>在1975年提出的,其本质是将土体的抗剪强度参数(内摩擦角 $\varphi$ 和黏聚力 $c$ )按一定比例进行调整,然后采用调整后的内摩擦角 $\varphi'$ 、黏聚力 $c'$ 对坡体进行稳定性分析。

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{K}\right) \quad (1)$$

$$c' = \frac{c}{K} \quad (2)$$

式中: $K$ ——折减系数。

按照上述方法对整个滑坡区域进行折减,用来搜索最危险滑动面、求解最小安全系数是合理的。但正如前文所言,采用整体强度折减法得到的水平位移场较实际偏大。

目前,针对局部折减法的研究已取得了一定的成果,并就折减范围达成了初步共识,即围绕可能出现塑性破坏的区域进行折减<sup>[15-19]</sup>。土体的抗剪强度参数与塑性应变的大小有关,二者基本呈负相关。室内试验及现场测试结果表明,滑体位移可看作垂直滑动面方向均匀分布<sup>[20-21]</sup>,滑动面附近土体的剪切变形远大于上部滑体,因而该区域土体抗剪强度的降低尤为显著。本文选择滑面(带)附近的薄土层作为滑坡的局部折减区域,并以一个简单滑坡算例,分析局部强度折减与整体强度折减的差异。

滑坡的几何尺寸和对应数值模型如图1所示。A、B、C、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub>为选取的位移监测点,其中A、B、C位于坡体表面,B<sub>1</sub>位于滑体中部,B<sub>2</sub>位于滑动面。滑坡岩土体主要参数如表1所示。按平面应变进行分析,底面为固定边界,约束左右面水平方向位移,约束所有节点的 $y$ 向(垂直滑坡断面方向)位移。滑动面采用

薄层实体单元模拟,滑坡岩土体采用摩尔-库仑本构模型。

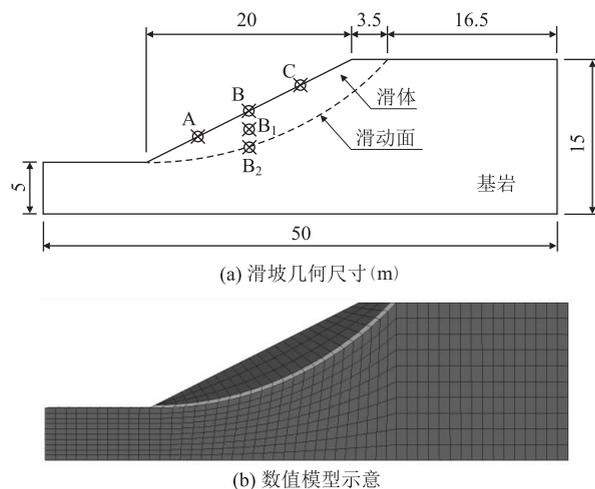


图 1 滑坡断面和数值模型网格划分图

表 1 数值模拟中岩土体的主要参数表

	重度 /(kN/m <sup>3</sup> )	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /kPa	剪切模量 /MPa	体积模量 /MPa
滑体	20	24	4.8	4	6.7
滑面	20	24	4.8	4	6.7
基岩	22	36	360	40	66.7

采用整体强度折减法和局部强度折减法得到的滑坡水平位移云图,如图 2 所示。从图 2 可以看出,不同折减方法获得的滑坡水平位移分布规律具有相似性,滑体、滑动面处水平位移与基岩处水平位移差异显著,滑动面以下基岩的水平位移基本为 0,水平位移较大区域位于滑坡中后部。局部强度折减法得到的水平位移最大值位于滑动面附近,而整体强度折减法得到的

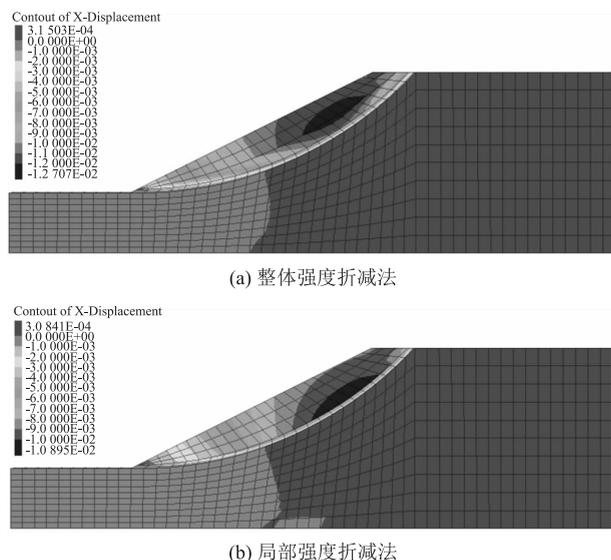


图 2 滑坡水平位移云图(m)

水平位移最大值位于滑体中部。出现这种现象的原因是,整体强度折减法对滑体整体强度进行折减,致使滑体部分出现位移增量。

从不同折减方法得到的水平位移值大小来看,采用整体强度折减法得到的水平位移最大值为 12.7 mm,采用局部强度折减法得到的水平位移最大值为 10.9 mm,二者相差 16.5%。定义  $k$  为局部强度折减法得到的水平位移与整体强度折减法得到的水平位移之比,5 个监测点的水平位移如表 2 所示。由表 2 可知,坡体表面水平位移沿滑动方向整体呈减小趋势。 $k$  值范围为 0.48 ~ 0.99,说明整体强度折减法得到的滑体剪切变形与局部强度折减法差异较大,这也将造成由滑体剪切变形引起的滑坡推力的明显差异。对比不同折减方法得到的 B、B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 水平位移分布规律可知:与整体强度折减法不同,局部强度折减法得到的土体水平位移沿滑体厚度方向基本呈均匀分布,这也与 Martin 等人<sup>[20-21]</sup>人给出的结论基本一致,说明局部强度折减法能更好地反映滑坡的真实剪切变形情况。整体强度折减法显著放大了滑坡水平位移、滑坡推力,导致无法准确计算墩台基础及抗滑桩的真实受力和变形,采用本文提出的滑动面局部强度折减法计算滑坡和结构物的位移及变形更为合理。

表 2 监测点的水平位移统计表

	测点 A	测点 B	测点 B <sub>1</sub>	测点 B <sub>2</sub>	测点 C
整体折减/mm	7.41	10.21	10.06	6.79	11.40
局部折减/mm	3.57	6.99	6.79	6.74	8.76
$k$	0.48	0.68	0.67	0.99	0.77

## 2 设计关键步骤与算例

### 2.1 设计关键步骤

滑坡岩土体在不利因素影响下,随着时间的推移,岩土体强度参数不断劣化,进而引起土体的蠕动变形。传统的局部强度折减法通过不断降低局部土体的强度参数,获取滑坡处于极限平衡状态时的折减系数。而对于桥梁墩台滑坡,需要根据滑坡对运营安全的影响程度、桥梁工程的重要性及破坏后果确定滑坡的折减系数,继而通过调整支撑结构设计,使墩台基础的水平位移控制在容许范围内。

滑坡上桥梁墩台加固设计流程,如图 3 所示。其关键步骤如下:

(1) 建立滑坡的三维数值模型,生成滑坡的初始应力场,并对初始位移进行清零。

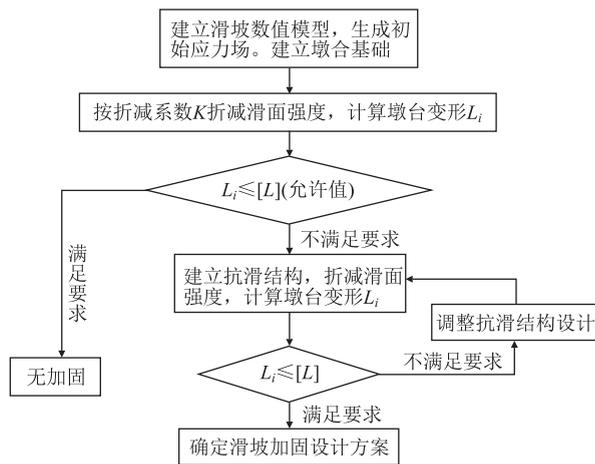


图3 桥梁墩台滑坡加固设计主要步骤图

(2) 根据滑坡对运营安全的影响程度、桥梁工程的重要性及破坏后果等,确定滑坡上桥梁墩台基础的水平变形容许值 $[L]$ ;确定滑动面的强度折减系数 $K$ 。

(3) 在滑坡数值模型中建立桥梁墩台基础。

(4) 采用局部强度折减法,降低滑动面的强度参数,求解桥梁墩台的水平变形 $L_i$ 。

(5) 判别桥梁墩台的变形是否满足 $L_i \leq [L]$ 。若满足要求,则无需设置抗滑桩对桥梁墩台进行加固。若不满足要求,初步确定抗滑桩的几何尺寸、桩间距及埋置位置等参数。

(6) 在滑坡数值模型中建立抗滑桩,采用局部强度折减法进行桥梁墩台变形的求解。

(7) 判别桥梁墩台的变形是否满足要求。若满足要求,初步确定抗滑桩的相关设计参数或在此基础上进行优化设计。若不满足要求,则调整抗滑结构设计,直至桥梁墩台的变形满足要求。

## 2.2 算例

某滑坡断面的几何尺寸,如图4所示。滑坡岩土体的主要参数,如表3所示。桥梁墩台基础为 $3 \times 3$ 群

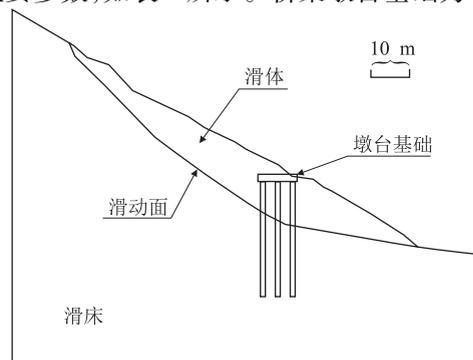


图4 滑坡断面图

桩基础,承台尺寸为 $10.1 \text{ m} \times 10.1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ,桩基直径 $1.25 \text{ m}$ ,桩长 $30.5 \text{ m}$ ,桩间距(中-中) $3.9 \text{ m}$ 。根据桥梁墩台滑坡的性质和规模、滑动后果和整治难度等因素,综合确定折减系数 $K = 1.25$ ,承台的水平变形容许值 $[L] = 6 \text{ mm}$ 。

表3 数值模拟中岩土体的主要参数表

	重度 /( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	内摩擦角 /( $^\circ$ )	黏聚力 /kPa	剪切模量 /GPa	体积模量 /GPa
滑体	21	36	0	0.061 5	0.089 3
滑面	21	36	0	0.061 5	0.089 3
基岩	23	40	1 800	10.1	16.0

滑动面内摩擦角 $\varphi = 27^\circ$ ,强度折减系数 $K = 1.25$ ,故折减后的内摩擦角为 $\varphi' = 22.8^\circ$ 。折减滑动面的强度参数,计算得到桥墩基础的水平变形 $L = 224 \text{ mm}$ ,远大于桥梁墩台的水平变形容许值。

拟采用单排抗滑桩对桥梁墩台进行加固。初步确定后排抗滑桩边缘距桥梁承台边缘净距 $2 \text{ m}$ ,桩截面为 $2.25 \text{ m} \times 3.25 \text{ m}$ ,桩间距 $6 \text{ m}$ ,桩长 $26 \text{ m}$ ,计算得到桥梁墩台的水平变形 $L_1 = 7.99 \text{ mm}$ ,仍不满足桥梁墩台水平变形容许值的要求。

再次确定抗滑桩的几何尺寸、桩间距及埋置位置等参数。确定后排抗滑桩的截面为 $3 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ,桩间距 $6 \text{ m}$ ,桩长 $26 \text{ m}$ ,计算得到桥梁墩台的水平变形 $L_2 = 3.66 \text{ mm}$ 。调整抗滑桩位置,求解不同抗滑桩位置时桥墩基础的变形,得到桥梁承台水平变形与抗滑桩位置的关系曲线,如图5所示。以桥梁承台的水平变形为控制指标,确定抗滑桩的最佳位置。当抗滑桩与桥梁承台边缘净距为 $4 \text{ m}$ 时,桥梁承台的水平变形量最小,为 $3.49 \text{ mm}$ 。

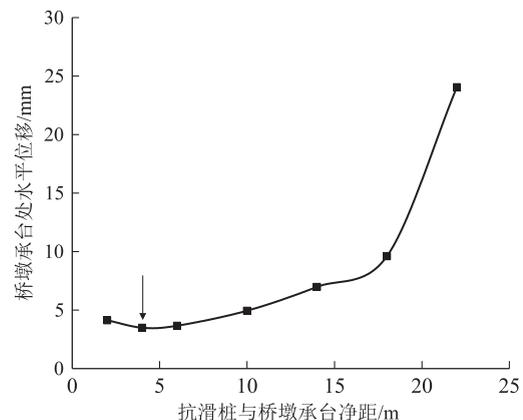


图5 抗滑桩桩位对承台水平位移的影响图

抗滑桩的最终设计方案为设置后排抗滑桩,后排

抗滑桩边缘与桥梁承台边缘净距4 m,桩截面3 m × 4 m,桩间距6 m,桩长27.5 m。抗滑桩的弯矩分布如图6所示。

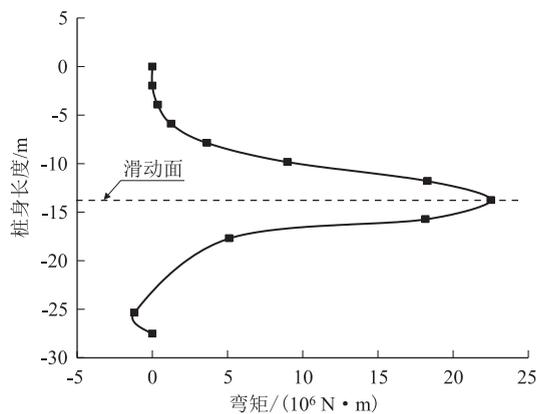


图6 抗滑桩的弯矩分布图

本文虽主要针对滑坡进行分析,但局部强度折减法对边坡同样适用。边坡没有明显的滑动面,可先采用整体强度折减法搜索最危险滑动面的位置,然后再建立滑坡数值模型,采用薄层实体单元模拟最危险滑动面,最后在滑坡上建立结构(桥梁墩台基础或抗滑桩),采用局部强度折减法进行计算。需要说明的是,对于部分边坡而言,若最危险滑动面位于坡体浅表层,则还应找出深层的次级滑动面。因为相对于浅表层的滑动破坏(可以通过清方或锚索框架梁等方式进行整治),深层滑动破坏更难处置,且对桥梁墩台基础的破坏性更大。

实际上,在各种不利因素的影响下,滑坡各个部位(滑体、滑动面及滑床)土体的强度指标都会出现不同程度的降低;滑动面不同部位(如抗滑段、下滑段等)强度指标的降低程度亦并不相同;即使同一位置,土体内摩擦角和黏聚力的折减程度也并不一定同步,因此引入多折减系数进行折减才更符合实际情况。但不同状态下,土体各个位置、各个指标的真实折减程度难以确定,引入多折减系数后,满足滑坡稳定性和变形要求的是一系列折减系数数组,答案并不唯一,这就增加了问题的复杂性和不确定性。由此看来,目前仅折减滑动面强度参数的方法,在满足一定精度的前提下,更为快捷高效。

### 3 结束语

采用整体强度折减法来搜索最危险滑动面、求解最小安全系数是合理的,但不应用于求解滑坡变形。

本文提出的针对滑动面的局部强度折减法能够很好地解决整体强度折减法求解滑体剪切变形失真的问题,真实地反映滑体的剪切变形分布规律。

对于存在变形敏感结构的滑坡,滑坡和结构物变形控制比滑坡的安全系数更重要。本文给出了以桥梁墩台基础水平位移为控制目标、基于局部强度折减法的桥梁墩台滑坡加固设计方法,可为以结构物变形控制为主的滑坡加固设计提供参考。

### 参考文献:

- [1] FU Zhengdao, JIANG Guanlu, YUAN Shengyang, et al. Lateral Behavior of Piled Bridge Foundation and Stabilizing Piles on Steep Slope [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23 (10): 4223 - 4236.
- [2] Ardalan. Analysis of Slopes Stabilized Using One Row of Piles Based on Soil-Pile Interaction [D]. Huntsville: The University of Alabama in Huntsville, 2013.
- [3] 张建华, 谢强, 张照秀. 抗滑桩结构的土拱效应及其数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 699 - 703.  
ZHANG Jianhua, XIE Qiang, ZHANG Zhaoxiu. Arching Effect of Anti-slide Pile Structure and Its Numerical Simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 699 - 703.
- [4] 詹永祥, 姚海林, 董启朋, 等. 松散体滑坡抗滑桩加固的土拱效应分析 [J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(9): 1372 - 1376.  
ZHAN Yongxiang, YAO Hailin, DONG Qipeng, et al. Soil Arching Effect Analysis of Anti-slide Piles in Loose Media Landslide [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, 47(9): 1372 - 1376.
- [5] 苏媛媛, 张占民, 刘小丽. 微型抗滑桩设计计算方法综述与探讨 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 223 - 228.  
SU Yuanyuan, ZHANG Zhanmin, LIU Xiaoli. Computation Methods of Anti-sliding Micropiles: an Overview [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 223 - 228.
- [6] 张昊, 余巍巍, 林杭, 等. 不同安全系数对应的边坡滑动面位置分析 [J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 449 - 452.  
ZHANG Hao, YU Weiwei, LIN Hang, et al. Analysis of Location Distribution of Slope Slip Plane with Different Factors of Safety [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 449 - 452.
- [7] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 层状岩质边坡破坏模式及稳定性的数值分析 [J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3300 - 3304.  
LIN Hang, CAO Ping, LI Jiangteng, et al. Numerical Analysis of Failure Modes and Stability of Stratified Rock Slopes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3300 - 3304.
- [8] WEI W B, CHENG Y M. Strength Reduction Analysis for Slope Reinforced with one Row of Piles [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(7): 1176 - 1185.

- [9] 刘怡林, 宁兆轲, 姜瑞清, 等. 抗滑桩加固含软弱夹层边坡三维弹塑性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 216-221.  
LIU Yilin, NING Zhaoke, JIANG Ruiqing, et al. 3D Elastoplastic Stability Analysis of Slopes with Weak Interlayers Reinforced by Piles Based on FEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 216-221.
- [10] 梁庆国, 李德武. 对岩土工程有限元强度折减法的几点思考[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3053-3058.  
LIANG Qingguo, LI Dewu. Discussion on Strength Reduction FEM in Geotechnical Engineering [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 3053-3058.
- [11] 付正道, 蒋关鲁, 刘琪, 等. 含倾斜夹层滑坡内抗滑桩和桥基耦合作用的试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2152-2161.  
FU Zhengdao, JIANG Guanlu, LIU Qi, et al. Experiment and Numerical Simulation on Interaction between Piled Bridge Foundation and Stabilizing Piles in the Slope with Intercalated Layer [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2152-2161.
- [12] 年廷凯, 徐海洋, 李东晨. 不同截面型式抗滑桩加固边坡数值分析[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(5): 695-701.  
NIAN Tingkai, XU Haiyang, LI Dongchen. Numerical Analysis of Slope Reinforcement with Different Cross-section Anti-slide Piles [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(5): 695-701.
- [13] 吴应祥, 刘东升, 宋强辉, 等. 基于有限元强度折减法的抗滑桩滑坡推力及抗滑桩内力可靠性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 348-354.  
WU Yingxiang, LIU Dongsheng, SONG Qianghui, et al. Reliability Analysis of Landslide Thrust and Internal Forces of Anti-slide Pile Based on Strength Reduction Finite Element Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 348-354.
- [14] ZIENKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and Non-associated Visco-plasticity and Plasticity in Soil Mechanics [J]. Géotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [15] 杨光华, 钟志辉, 张玉成, 等. 用局部强度折减法进行边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 53-58.  
YANG Guanghua, ZHONG Zhihui, ZHANG Yucheng, et al. Slope Stability Analysis by Local Strength Reduction Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 53-58.
- [16] 薛雷, 孙强, 秦四清, 等. 非均质边坡强度折减法折减范围研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 275-280.  
XUE Lei, SUN Qiang, QIN Siqing, et al. Scope of Strength Reduction for Inhomogeneous Slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 275-280.
- [17] 钟志辉, 杨光华, 张玉成, 等. 基于局部强度折减法的土质边坡位移研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1): 203-208.  
ZHONG Zhihui, YANG Guanghua, ZHANG Yucheng, et al. Displacement of Soil Slopes Based on Local Strength Reduction Method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 203-208.
- [18] 陈国庆, 黄润秋, 周辉, 等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1140-1146.  
CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, ZHOU Hui, et al. Research on Progressive Failure for Slope Using Dynamic Strength Reduction Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1140-1146.
- [19] 李小春, 袁维, 白冰, 等. 基于局部强度折减法的边坡多滑面分析方法及应用研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 847-854.  
LI Xiaochun, YUAN Wei, BAI Bing, et al. Analytic Approach of Slope Multi-slip Surfaces Based on Local Strength Reduction Method and Its Application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 847-854.
- [20] MARTIN G R, CHEN C Y. Response of Piles Due to Lateral Slope Movement [J]. Computers & Structures, 2005, 83(8/9): 588-598.
- [21] FRANK R, POUGET P. Experimental Pile Subjected to Long Duration Thrusts Owing to a Moving Slope [J]. Géotechnique, 2008, 58(8): 645-658.

(编辑:车晓娟 张红英)