

含软弱结构面岩质边坡时效稳定性 影响因素的数值模拟分析

李少华^{1,2}, 刘倩^{1,2}, 郭彦雪²

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590)

摘要:基于对岩石材料的力学性质随时间不断衰减、内部细观结构产生损伤并不断积累的认识,引入材料强度退化模型,并在有限元程序中予以实现,从结构面产状、边坡高度及坡角、岩体强度衰减特征等几个方面着手,对边坡的长期时效变形、损伤萌生与演化模式以及影响含软弱结构面岩质边坡的各种因素进行了数值模拟研究。结果表明:结构面的连通率越大,边坡高度及坡角越大,基岩及结构面的长期强度越高,则边坡的时效稳定性越好;降低边坡高度能够显著减小坡顶最大水平位移;结构面倾角对边坡的破坏模式具有重要的影响。

关键词:岩质边坡;结构面;时效变形;影响因素;数值模拟

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2014)01-0075-10

Numerical Investigation on the Factors Influencing the Time-dependent Stability of Rock Slopes with Weak Structure Planes

Li Shaohua¹, Liu Qian¹, Guo Yanxue²

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: Based on the knowledge that the mechanical properties of rock may gradually degrade with time, and mesoscopic damage can accumulate inside the rock, a strength degradation model of material was employed and achieved in a finite element program, then the numerical study was performed to investigate the structure planes inside the slope, slope height and inclination and the characteristics of strength deterioration. Particularly the time-dependent deformation, damage initiation and evolution mode, and the factors influencing time-dependent stability of the rock slope with weak structure planes were simulated. The results show that the larger connectivity rate is, the bigger slope height and inclination is, and the bigger strength of bedrock and structure planes is, the better stability of the slope is achieved. Reducing the height of the slope can significantly cut down the maximum horizontal displacement near the top of the slope. The inclination of the slope plays a major role in slope failure mode.

Key words: rock slope; structure plane; time-dependent deformation; influence factors; numerical simulation

影响边坡长期稳定性的因素有很多,主要有地形地貌、岩土体类型及性质、岩土体结构面、边坡形态、地震、地下水以及人类工程扰动等^[1-4]。这些内因及外因的综合作用,对边坡的长期稳定性产生了重要的影响。研究^[5-8]表明,工程岩体的长期强度,往往是由岩石和不连续面的流变特性决定的,而不连续面的流变特性往往更为重要,对岩质边坡而言,不连续面及不连续面间关键岩桥的强度特征是影响其长期稳定性的主要因

收稿日期: 2013-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279024); 国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(2011CB013503)

作者简介: 李少华(1987—),女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事边坡工程灾害机理及数值模拟方面研究。

E-mail: shaohualee2011@126.com

素。孙钧等^[9]通过对三峡船闸高边坡的研究证实,即使是坚硬致密的典型脆-弹性岩石,在应力水平较高时,仍会表现出相当显著的蠕变时效特征。研究已证实,沉积岩^[10]、盐岩^[11]、以及很多硬岩^[12-14]均存在显著的蠕变及松弛效应。因此对边坡进行稳定性分析时,除了考虑结构面及软弱充填物力学特性的时效性外,对于坡体中的其他完整岩体,特别是关键岩桥的蠕变特性也应足够重视^[8,15]。

本研究尝试从岩体强度长期演化的角度出发,将岩体材料强度按指数型衰减的曲线在 RFPA(rock failure process analysis)程序中予以实现,并从细观损伤积累的角度,对含有软弱结构面的边坡时效变形与破坏的影响因素进行研究,对岩质边坡长期稳定性分析和评价提供参考。

1 强度的时效表征方程

目前,很多研究在假定的流变本构模型中,岩体的力学参数不随时间的增长而改变,即所谓的线性流变问题。事实上,岩体在自然风化、地下水渗流、干湿交替等多种因素的作用下,材料力学参数的时间效应十分显著。已有的研究^[5-8]证实,岩体的强度和弹性模量等都会随时间增长而降低,初期速率较快,最终将逐渐趋于一个稳定值。许宏发^[16]基于软岩的蠕变试验,认为其强度和弹性模量均随时间延长而降低,其实质是细观单元损伤累积的结果。周翠英等^[17]对红色砂岩、黑色炭质泥岩等几种典型的软岩的饱水试验和力学性质测试发现,其强度变化的定量表征关系一般服从指数变化规律,力学强度指标随饱水时间的增长不断降低,最后趋于稳定,而含水率的差异影响其达到稳定的时间^[18]。张向东等^[19]通过对硅藻的室内蠕变试验提出,硅藻的长期强度可表述为: $\sigma_t = A + Be^{-at}$ 。吕爱钟等^[20]基于页岩蠕变试验数据分析后认为,考虑参数时间相关性的非定常黏弹性模型比定常黏弹性模型更能准确地反应岩石的黏弹性变形性能。本文所采用的参数参考了上述文献的研究成果及文献^[21-22]的相关内容。

本文从岩石材料内在物理力学性质随时间劣化及岩石内部细观损伤积累等观点出发,在细观弹性损伤模型的基础上^[23-24],引入细观表征单元力学特性的退化模型。如图 1 所示,模型假设细观表征元的强度随时间不断降低,其退化速度取决于应力、环境等综合因素,最后达到一个稳定的长期强度。

细观表征单元强度随时间的退化模型可用简单的数学方程加以描述^[25]:

$$f_t = f_\infty + (f_0 - f_\infty)e^{-at} \quad (1)$$

其中: f_0 为单元的初始强度; f_t 为 t 时刻的单元强度, f_∞ 为单元的长期强度,当 $t \rightarrow \infty$ 时, $f_t \rightarrow f_\infty$; a 为强度衰减影响因子,可由实验确定。模型利用 RFPA^{2D}软件展开相应的数值计算分析。关于 RFPA^{2D}软件的介绍,可参见文献^[23]。本研究从细观单元强度长期衰减的角度,从结构面产状、边坡高度及坡角、岩体强度衰减特征等几个方面着手,对边坡的长期时效变形、损伤萌生与演化模式等进行数值模拟研究,并以此验证模型的适用性。

2 不同因素对边坡稳定性影响的数值模拟

2.1 结构面产状对边坡稳定性的影响

结构面成因复杂,又经历了不同性质、不同时期构造运动的改造,从而使结构面的自然特性各不相同,在温度、渗流、干湿交替等环境因素作用下,其强度较完整岩石降低得更多,因此必须对不同特征的结构面有充分的认识。对于结构面对边坡稳定性的影响,众学者已经从工程实践和科学研究等方面取得了研究成果^[26-28]。本文将从结构面的连通率及位置、结构面的倾角两方面来研究结构面对于边坡长期稳定性的影响。

2.1.1 结构面的连通率及位置的影响

连通率是反映岩体结构的重要指标,是指断续结构面在其延伸方向上的连通性,其定义为岩体结构面在

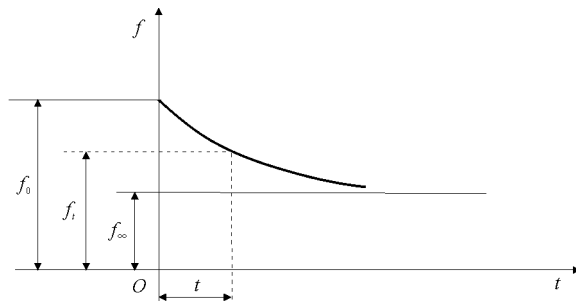


图 1 岩石细观表征单元强度退化模型图
Fig. 1 Strength degradation model of mesoscopic representative element

延伸方向上的连通段长度之和与其延伸总长度的比值^[29]。断续结构面的强度为“连通段”的结构面强度与非连通段“岩桥”强度在长度(或面积)上的加权平均值^[30]。当控制岩体稳定性的边界条件为若干断续延伸的裂隙型结构面时,结构面的连通率对边坡岩体的稳定性具有决定性作用。为了研究结构面的连通率及位置对边坡长期稳定性的影响,对一坡高为 40 m,距离坡脚 5 m 处存在一倾角为 45° 软弱结构面的岩质边坡,分别设计了结构面位于坡顶、坡中和坡脚三种不同位置以及连通率按 82.5% 和 70% 两种情况(图 2,3)下的数值模型,模型的计算参数如表 1 所示。

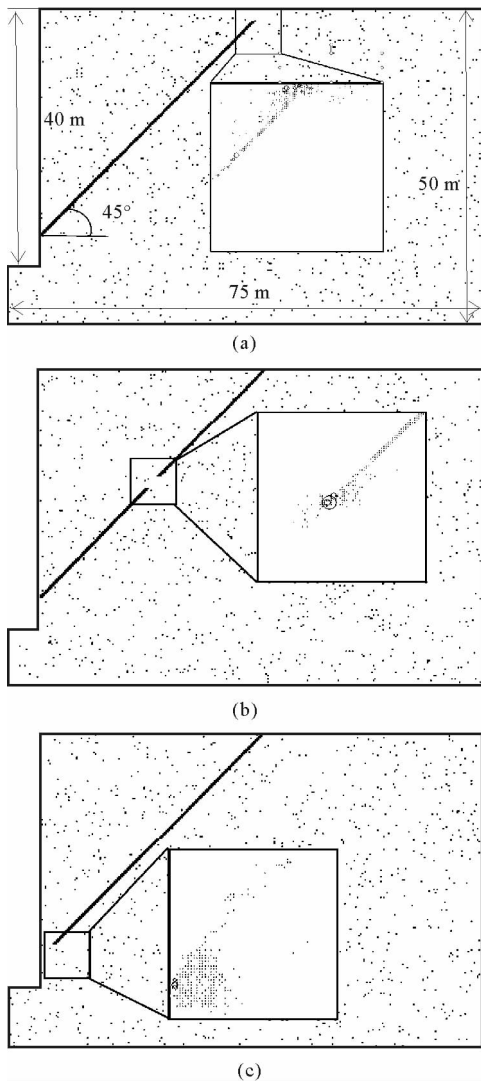


图 2 连通率为 82.5% 的模型声发射效果图
Fig. 2 Acoustic emission activity results with connectivity rate of 82.5%

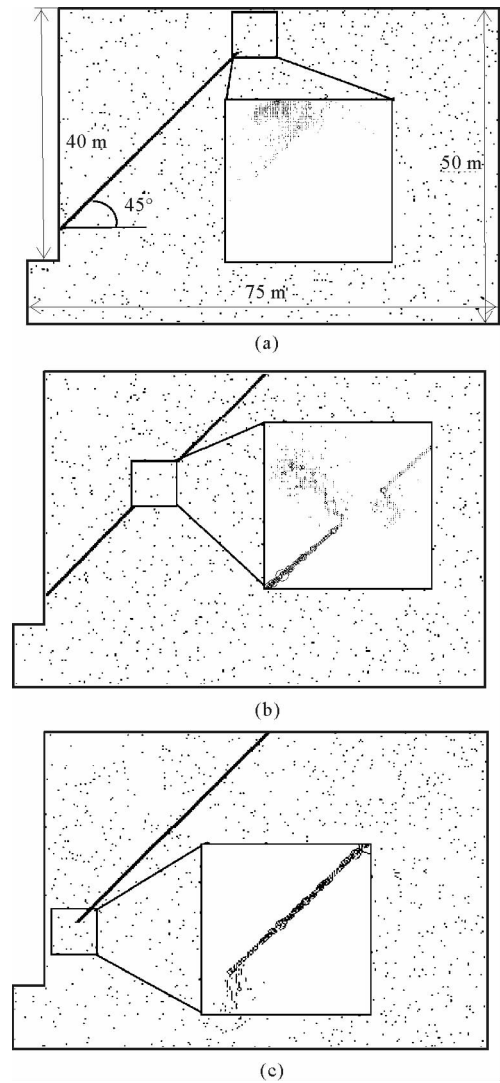


图 3 连通率为 70% 的模型声发射效果图
Fig. 3 Acoustic emission (AE) activity results with connectivity rate of 70%

表 1 计算用参数表

Tab. 1 Parameters employed in numerical test

岩性	弹性模量 E/MPa	抗压强度 σ_c/MPa	抗拉强度 σ_t/MPa	粘聚力 c/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	泊松比 μ	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	长期强度与 原强度的比值	强度 衰减因子
基岩	4 200	30	3.00	8.70	30	0.25	25	0.7	0.2
结构面	100	1.5	0.15	0.16	16	0.35	18	0.2	0.2

数值模拟发现,当结构面的连通率相同时,非贯通区位于坡顶时的稳定性最差,声发射现象较为密集且微裂纹向坡体外部延伸;非贯通区位于坡脚时,稳定性最好,微裂纹向岩体内部发展;非贯通区位于坡中的稳定性介于坡顶与坡脚之间。对比图 2 与图 3 发现,连通率越大,边坡的稳定性越差,这是因为结构面连通率低时,岩桥在断续结构面加权强度中所占的比重较大,较之同长度的结构面,其强度提高很多。图 2 和图 3 中的局部放大的声发射图,可以看出,结构面上单元,在靠近坡顶处受拉破坏的单元较多,靠近边坡底部处,受压破坏的单元较多;而岩桥处的单元,则是在结构面单元失效后,首先在结构面端部产生应力集中,随着岩体强度的不断衰减,微裂纹萌生、扩展并相互连接,宏观的“剪切带”(通过声发射可见,岩桥实质是受拉而破坏的)出现,边坡发生失稳。而连通率较小时,微裂纹不断向岩体深部扩展,无法形成贯通的破坏面,因此边坡易维持稳定。

2.1.2 坡体中结构面倾角对边坡稳定性的影响

岩质边坡失稳主要是沿着某些关键岩桥及结构面的滑动,而岩体中结构面的倾角对于边坡是否维持稳定以及滑坡的体积具有重要的影响。为了研究结构面倾角对于边坡稳定性的影响,同时消除岩桥位置及连通率对不同结构面倾角模型的影响,本文建立如图 4 所示的含有多条平行随机节理的模型(模型采用的计算参数见表 1),结构面的倾角从 20° 开始每隔 5° 递增,直至 85° (部分数值模拟结果图如图 5~8),以此来研究结构面倾角对边坡长期稳定性的影响。

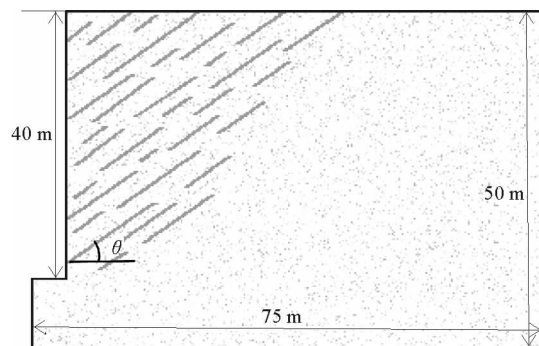


图 4 含一组平行随机结构面的计算模型图
Fig. 4 A slope model with a set of the parallel random structure planes

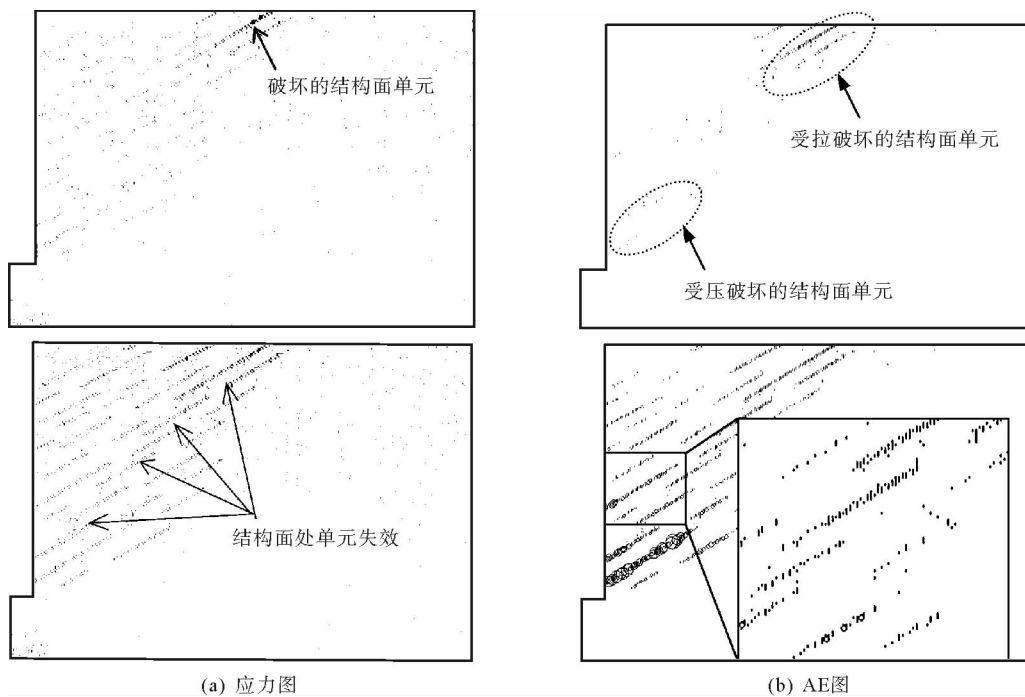


图 5 倾角为 30° 的模型计算结果图

Fig. 5 Numerical results of the model with dip angel of 30°

通过数值模拟结果发现,当岩体中的结构面倾角小于 30° 时(图 5),岩质边坡仅在自重应力作用下,其稳定性是较好的。原因在于,结构面倾角较小时,其潜在滑面较平缓,垂直于结构面的法向应力较大,因此坡体

中结构面单元多发生剪切破坏(坡顶处也出现了工程中常见的拉裂缝)。由于岩石是典型的抗压材料,其抗压强度极高,结构面端部的应力集中并未造成岩桥被拉坏或压坏,使坡体中未能形成贯通的破坏面,因此边坡能够长期维持稳定。

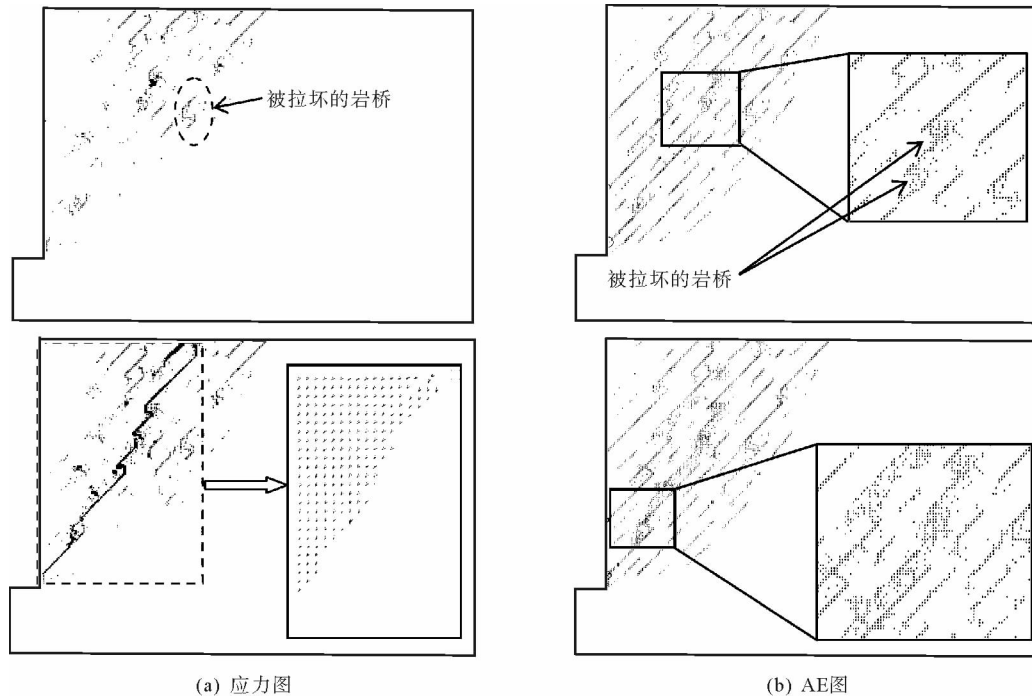


图 6 倾角为 45° 模型计算结果图

Fig. 6 Numerical results of the model with dip angle of 45°

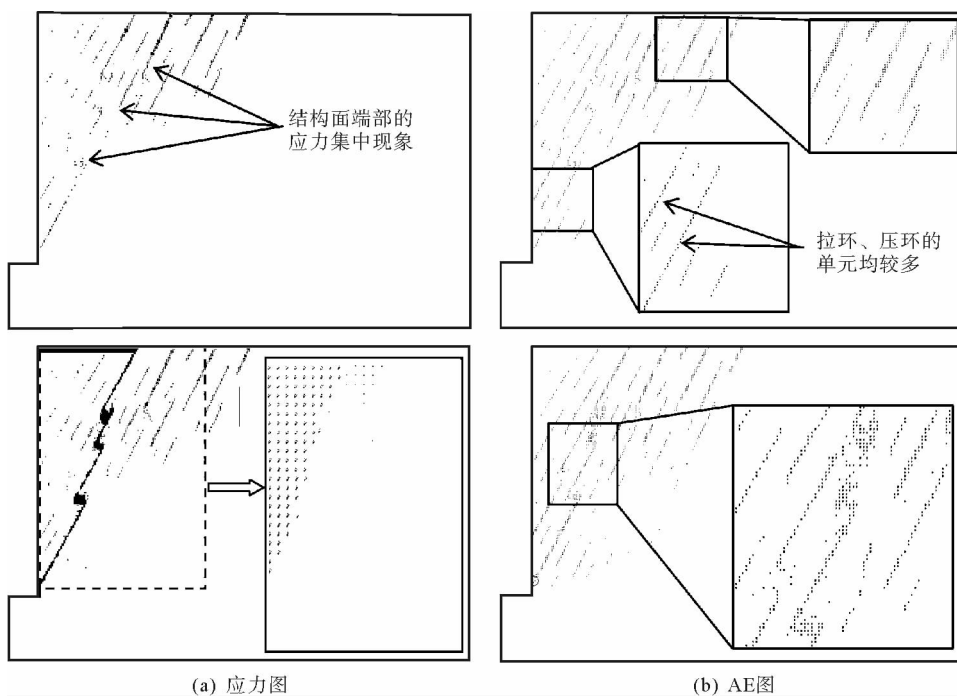


图 7 倾角为 60° 模型计算结果图

Fig. 7 Numerical results of the model with dip angle of 60°

随着结构面倾角的增大(图 6,7),当顺倾结构面与主压应力方向成 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 夹角时,在结构面处出现压应力及拉应力集中区,并产生最大剪应力和最大拉应力值,坡顶处拉裂缝仍可见,坡体内部结构面单元既有受拉破坏也有剪切破坏,当结构面处单元完全失效后,结构面的端部出现应力集中并产生微裂纹,随着岩体强度的不断衰减,微裂纹扩展并相互贯通,形成宏观的“剪切带”(通过声发射图可见,其实质是由细观拉伸裂纹组合贯通所形成的),边坡失稳。

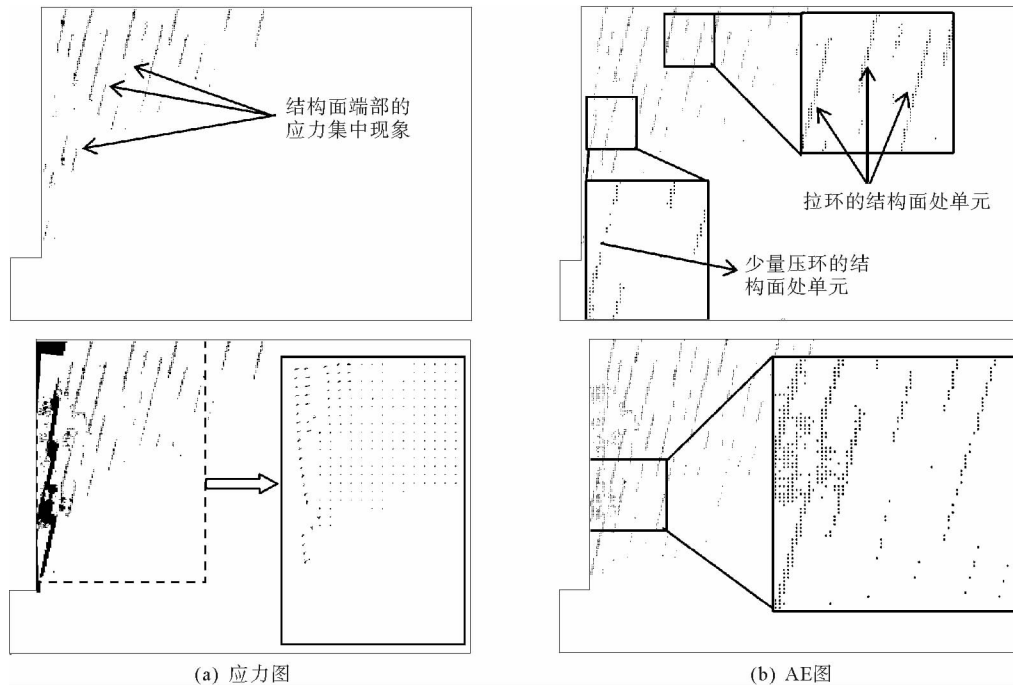


图 8 倾角为 75° 模型计算结果图

Fig. 8 Numerical results of the model with dip angle of 75°

随着结构面倾角的继续增大(图 8),其潜在的滑动面较陡,在自重应力作用下,结构面上的切应力较大,单元以受拉破坏为主。随着时间的推移,结构面处的单元完全失效后,结构面端部产生很大的拉应力集中,使微裂纹产生并迅速扩展,多条微裂纹相互连通过,岩桥失效、滑动面形成,边坡失稳。

可见,边坡变形与破坏的首要原因在于坡体中存在各种形式的结构面,结构面的特征是边坡变形与破坏的控制性条件,并且结构面倾角较小的边坡一旦发生失稳,其滑坡体积较之倾角较大的边坡可能会大很多,这也可以从图 6~8 中(a)图的局部放大位移图中看出。因此,对于缓倾角的边坡应采取相应的措施防止大体积的滑坡灾害产生,而陡倾角的边坡则应注意边坡碎石崩落。

2.2 边坡形貌对边坡稳定性的影响

2.2.1 坡高对边坡稳定性的影响

为了研究坡高对于岩质边坡长期稳定性的影响,本文采用图 9 所示的模型(模型的计算参数见表 1),对坡高分别为 30, 40, 50, 60, 70 m 的边坡进行了数值模拟,边坡失稳时间及坡顶最大水平位移与坡高的关系如图 10 所示。

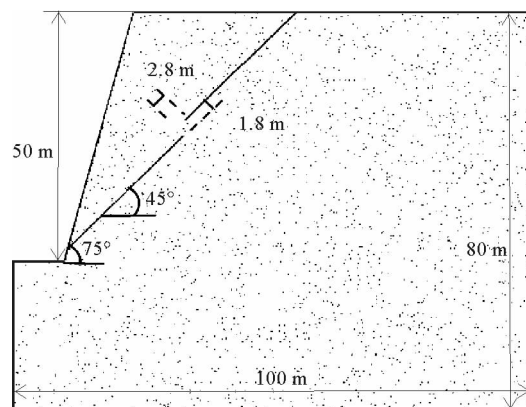


图 9 不同坡高的边坡模型图

Fig. 9 A slope model with different slope height

图 10 表明,随着边坡高度的增加,边坡保持稳定的时间总体呈急剧下降的趋势,坡高与边坡失稳时间成曲线相关,文献[31]的研究证实,边坡的稳定时间与坡高具有相关关系。从坡顶最大水平位移曲线可以看出,坡顶最大水平位移随着边坡高度增加而急剧增大。换言之,减小坡体高度能够有效地减小坡顶最大水平位移,增大边坡的稳定性^[32]。对于不同地质条件的边坡,边坡失稳时间及坡顶最大水平位移随边坡高度增加的规律会因地质条件的不同而有所差异,但坡高对于边坡稳定性的影响,应在工程实践中予以重视,尤其对高陡边坡应及时加固。

2.2.2 坡角对边坡稳定性的影响

高陡边坡以其“高”、“陡”的特点在边坡稳定性分析中引起广泛重视,岩质边坡在地震作用下的变形和破坏与坡面形态密切相关^[33]。为了研究坡角对于边坡长期稳定性的影响,采用图 11 的模型,对高陡边坡坡角分别为 $60^\circ, 65^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ 时的模型进行了数值模拟,结果如图 12 所示。

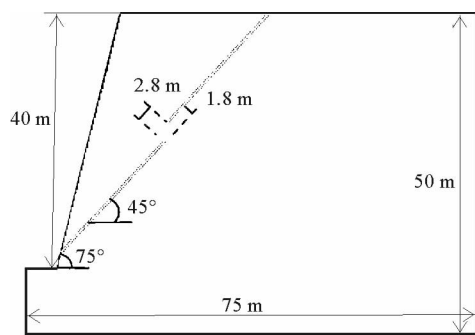


图 11 不同坡角的边坡模型图

Fig. 11 A slope model with different slope angle

从图 12 可以看出,随着坡角的增大,边坡发生失稳破坏所需的时间急剧缩短。其原因在于,在坡高相同的情况下,坡角越大的边坡,结构面上部的自重应力越大,结构面处单元因达到其抗压强度而发生破坏,与坡角较小的边坡相比,结构面完全失效的时间缩短,随着时间的推移,岩桥强度不断衰减,结构面端部更易出现拉应力集中现象,微裂纹萌生并不断扩展,多条微裂纹连通过,岩桥处宏观“剪切带”形成、边坡失稳,较之坡角较小的边坡,破坏的时间也明显缩短。因此工程中进行边坡开挖时,应尽量避免形成高陡坡面,当不可避免要开挖坡角很大的边坡时,应及时采取支护措施,以免造成大规模滑坡事故。

2.3 岩体强度衰减特征对边坡稳定性的影响

2.3.1 不同长期强度的基岩及结构面对边坡稳定性的影响

岩体的力学性质是边坡失稳的决定性因素,边坡变形的发生、发展、频率和失稳效应受结构面和结构面间完整岩石(如岩桥)的刚度和抗剪强度的制约。在漫长的地质环境中,岩体受到温度、地震、渗流以及各种地质构造应力的作用,使边坡岩体的长期强度存在差异,体现在本文模拟中模型参数“长期强度与原强度比值”的大小上。为了加深对基岩和结构面不同长期强度下边坡失稳的认识,分别对基岩和结构面在不同长期强度下的边坡稳定性情况进行了研究,如图 13,14 所示。通过数值研究以及对比图 13 和图 14 可以发现,岩体的强度由结构面和结构面间的完整岩体的强度共同控制,当岩体长期受到不良地质条件的作用、岩体力学性质发生恶化时,边坡失稳所需的时间显著缩短。而且与基岩相比,结构面的强度对岩体的稳定性更具有控制作用,即结构面的性质控制和制约着滑坡等地质灾害的形成和发展。

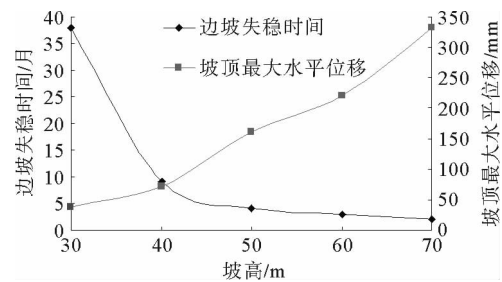


图 10 边坡失稳时间及坡顶最大水平位移与坡高的关系曲线

Fig. 10 The curve of the failure time and the maximum horizontal displacement at the top of the slope related to the height of the slope

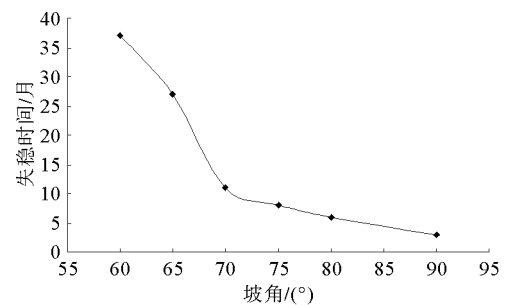


图 12 边坡失稳时间与坡角的关系曲线图

Fig. 12 The curve of the failure time of the slope related to slope angle

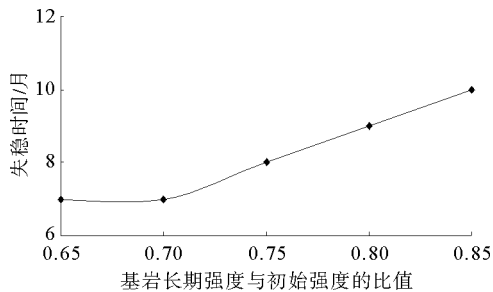


图 13 边坡失稳时间与基岩长期强度的关系曲线图

Fig. 13 The curve of slope failure time related to the different strength long-term strength of the bedrock

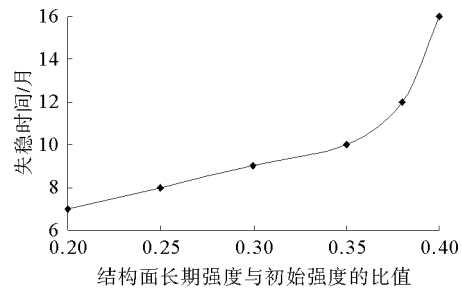


图 14 边坡失稳时间与结构面长期强度的关系曲线图

Fig. 14 The curve of slope failure time related to the different long-term strength of the structure planes

2.3.2 强度衰减因子对边坡稳定性的影响

工程实例表明,许多边坡的失稳不是瞬时发生的,而是随着时间的推移,在应力、环境等综合因素的影响下,结构面和岩桥不断受到侵蚀,其内部损伤积累的结果。影响结构面和结构面间完整岩体强度的因素有渗流、温度、循环荷载、地震、干湿交替等,这些因素的影响程度,决定了岩体强度的退化速度,体现在模型参数“强度衰减影响因子 a ”的大小上。基于图 11 所示的模型,模拟了不同强度退化速度下边坡的长期稳定性。图 15 是不同影响因子下的强度衰减曲线,图 16 是对应的边坡失稳时间曲线。从图中可以看出,如果岩桥应力高度集中,外部环境恶劣,那么坡体可能会在很短的时间内就发生破坏(如 $a \geq 0.2$ 的情况);而当边坡防护治理措施得当、岩体强度不易受到侵蚀衰减时,坡体工程在服役期内将是安全的(如 $a = 0.005$ 的情况)。总体来看,边坡失稳时间随着坡体强度衰减因子的增大而缩短。

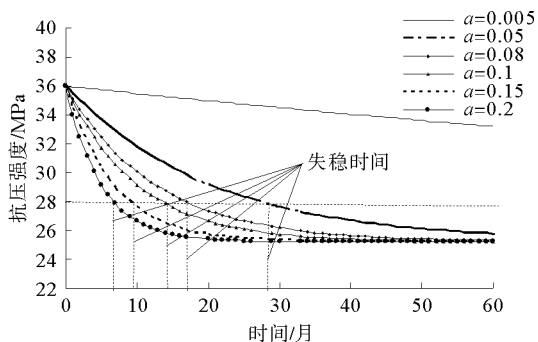


图 15 不同强度衰减影响因子下强度衰减特征曲线图

Fig. 15 Strength degradation curves and related failure time of slopes with different strength degradation factors

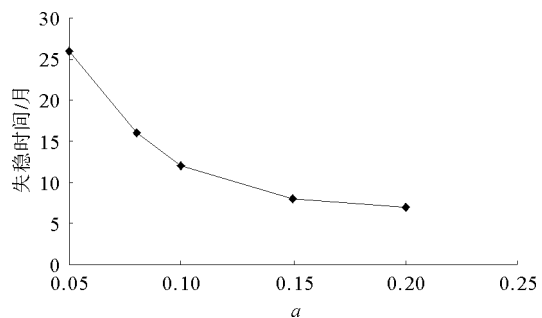


图 16 不同强度衰减影响因子对应的边坡失稳时间曲线图

Fig. 16 The curve of slope failure time with different

3 结论

研究表明,应用考虑材料长期强度演化的 RFPA 软件进行材料长期稳定性分析是适用的,与工程实际是相符的,并得出了以下结论:

1) 含软弱结构面的岩质边坡,其变形破坏表现出显著的时效性,且岩桥区的宏观“剪切带”主要是由细观拉伸裂纹组合而贯通所成。岩体结构面的发育程度、规模、连通率、产出状态以及边坡的形貌对边坡的稳定性具有重要影响。岩体的力学性质不仅受岩石类型控制,更重要的是受结构面制约,直接影响着边坡岩体变形、破坏的发展过程。

2) 结构面的特征与边坡变形与破坏控制性条件形成了不同类型的破坏机制。当结构面倾角较小时,在滑面较平缓,垂直于结构面的法向应力较大,结构面处单元主要发生受压破坏,抗滑力较大,从而有利于结构面压密和坡体稳定;结构面倾角较陡时,受拉破坏的单元居多,其潜在的滑动面较陡,而滑动面上的法向力较小,摩擦力分量和抗滑力也较小,易发生小规模的小倾角破坏,缓倾角边坡一旦发生滑坡,滑坡量会很大。

3) 在一定的地质条件下, 边坡的稳定性取决于边坡的结构参数, 是影响边坡稳定性的内在因素。坡角一定时, 边坡越高, 稳定性越差, 失稳时间与坡高成曲线相关; 当边坡高度一定时, 边坡角越大, 稳定性越差。

4) 岩体的力学性质是边坡失稳的决定性因素, 边坡变形的发生、发展、频率和失稳效应受结构面和结构面间完整岩石(如岩桥)的刚度和抗剪强度的控制。结构面性质制约着滑坡地质灾害的形成和发展。边坡防护措施是否得当, 决定了边坡在服役期内的稳定性。

参考文献:

- [1] 张成恭, 王思敬, 张倬元, 等. 中国工程地质学[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-20.
- [2] Pathak S, Nilsen B. Probabilistic rock slope stability analysis for Himalayan conditions[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2004, 63(1): 25-32.
- [3] 简文彬, 姚环, 焦述强, 等. 漳(州)—龙(岩)高速公路石垵山高边坡稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 43-47.
Jian Wenbin, Yao Huan, Jiao Shuqiang, et al. Zhangzhou to Longyan expressway Shikongshan high slope stability evaluation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 43-47
- [4] 徐平, 杨挺青, 徐春敏, 等. 三峡船闸高边坡岩体时效特性及长期稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 163-168.
Xu Ping, Yang Tingqing, Xu Chunmin, et al. Creep characteristic and long-term stability of rock mass in ship lock high slope of the Three Gorges project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 163-168.
- [5] 刘晓东, 张忠平, 孙书伟. 强度折减法在高陡岩质边坡工程中的应用[J]. 铁道建筑, 2012(7): 97-99.
Liu Xiaodong, Zhang Zhongping, Sun Shuwei. Strength reduction in the high and steep rock slope engineering[J]. Railway Engineering, 2012(7): 97-99.
- [6] 张清照, 沈明荣, 丁文其. 结构面剪切蠕变特性研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(4): 564-569.
Zhang Qingzhao, Shen Mingrong, Ding Wenqi. Structural shear creep characteristics[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(4): 564-569.
- [7] 杨天鸿, 张锋春. 露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1437-1472.
Yang Tianhong, Zhang Fengchun. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1437-1472.
- [8] Kemeny J. The Time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: A fracture mechanics approach[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering 2003, 36(1): 27-38.
- [9] 孙钧, 凌建明. 三峡船闸高边坡岩体的细观损伤及长期稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(1): 1-7.
Sun Jun, Ling Jianming. The high slope micro-mechanical damage of the Three Gorges ship lock and the long-term stability studies[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(1): 1-7.
- [10] Maranini E, Brignoli M. Creep behaviour of a weak rock: Experimental characterization[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(1): 127-38.
- [11] Hunsche U, Hampel A. Rock salt: The mechanical properties of the host rock material for a radioactive waste repository [J]. Engineering Geology, 1999, 52(3/4): 271-291.
- [12] Menglis I L, Chow T M, Young R P. Progressive microcrack development in tests on Lac du Bonnet granite: I. acoustic emission source location and velocity measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1995, 32(8): 741-750.
- [13] Chow T M, Menglis I L, Young R P. Progressive microcrack development in tests on Lac du Bonnet granite: II. ultrasonic tomographic imaging[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1995, 32(8): 751-761.
- [14] Li Y, Xia C. Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 467-75.
- [15] 夏熙伦, 徐平, 丁秀丽. 岩石流变特性及高边坡稳定性流变分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(4): 312-322.
Xia Xilun, Xu Ping, Ding Xiuli. Rheological characteristics of rock and stability rheological analysis for high slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(4): 312-322.
- [16] 许宏发. 软岩强度和弹模的时间效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 246-251.
Xu Hongfa. Time dependent behaviours of strength and elasticity modulus of weak rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 246-251.
- [17] 周翠英, 邓毅梅, 谭祥韶. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 33-38.

- Zhou Cuiying, Deng Yimei, Tan Xiangshao. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 33-38.
- [18] 张峰, 董琳瑛, 郭海俊. 准东露天煤矿近水平层理边坡滑坡变形机制[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2012, 31(6): 854-858.
- Zhang Feng, Dong Linying, Guo Haijun. Deformation mechanism of slope slide with near horizontal stratification at open pit coal mine in Eastern Zhunger Basin[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2012, 31(6): 854-858.
- [19] 张向东, 郑雨天, 吕兴亚. 软弱岩体 Berger 模型及井巷流变地压[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(1): 13-17.
- Zhang Xiangdong, Zheng Yutian, Lü Xingya. Berger model of flabby rock and rheologic pressure acted on shaft[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(1): 13-17.
- [20] 吕爱钟, 丁志坤, 焦春茂, 等. 岩石非定常蠕变模型辨识[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 16-21.
- Lü Aizhong, Ding Zhikun, Jiao Chunmao, et al. Identification of non-stationary creep constitutive models of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 16-21.
- [21] 邓清禄. 云阳县城高边坡稳定性分析与治理研究报告[R]. 武汉: 中国地质大学, 2004.
- [22] 邓清禄, 李连崇, 易民龙. 云阳新县城高边坡变形机理与数值模拟[J]. 地质科技情报, 2005, 24(增): 160-164.
- Deng Qinglu, Li Lianchong, Yi Minlong. Failure mechanism and simulation of cut slopes in the new county town of Yunyang[J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(s): 160-164.
- [23] Li L C, Tang C A, Zhu W C. Numerical analysis of slope stability based on gravity increase method[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(7): 1246-1258.
- [24] 李连崇, 徐涛, 唐春安. 单轴压缩下岩石蠕变失稳破坏过程数值模拟[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1978-1986.
- Li Lianchong, Xu Tao, Tang Chunan. Numerical simulation of creep induced progressive failure process of rock under uniaxial compression[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1978-1986.
- [25] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 6-19.
- [26] 卢敦华, 曲艳伟, 何忠明, 等. 结构面强度参数对层状边坡稳定性影响的三维分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(1): 147-151.
- Lu Dunhua, Qu Yanwei, He Zhongming, et al. Three dimensional analysis for effect of structural plane strength parameters on stratified slope stability[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(1): 147-151.
- [27] 盛永清, 周创兵, 陈益峰, 等. 平行 F42-9 发育的结构面对锦屏水电站高边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(10): 2613-2648.
- Sheng Yongqing, Zhou Chuangbing, Chen Yifeng, et al. Parallel F42-9 structure and development of stability in the face of high slope of Jinping Hydropower Station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(10): 2613-2648.
- [28] 邓宏艳, 王成华, 李秀珍. 地下水与优势结构面对库岸滑坡形成的联合效应: 以龙羊峡近坝库岸滑坡为例[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 30-34.
- Deng Hongyan, Wang Chenghua, Li Xiuzhen. Groundwater the face of the the bank landslide formation of joint effect: With the advantages of structure near the dam in Longyangxia bank landslide example[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(1): 30-34.
- [29] 张悼元. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1981: 5-92.
- [30] 黄润秋. 高边坡稳定性的系统工程地质研究[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1991: 52-106.
- [31] 陈志波, 简文彬. 边坡稳定性影响因素敏感性灰色关联分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2006, 26(4): 473-477.
- Chen Zhibo, Jian Wenbin. Slope stability factors sensitivity gray relational analysis[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2006, 26(4): 473-477.
- [32] 陈景, 唐茂颖, 罗强. 坡高对高边坡变形影响的离心模型研究[J]. 路基工程, 2008(6): 105-106.
- Chen Jing, Tang Maoying, Luo Qiang. Centrifuge model study of the slope height of high slope deformation[J]. Subgrade Engineering, 2008(6): 105-106.
- [33] 言志信, 史盛, 党冰. 地震作用下坡面形态对岩质边坡稳定性的影响[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2013, 32(2): 43-48.
- Yan Zhixin, Shi Sheng, Dang Bing. Influence of the slope shape on the of rock slope under the seismic[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2013, 32(2): 43-48.