

周进, 乔明叶. 基于非确定性分析法的顺层边坡抗震性研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(4): 925-930. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.925

ZHOU Jin, QIAO Mingye. Measurement of the Seismic Behavior of Bedding Slopes Based on Uncertainty Analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(4): 925-930. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.925

基于非确定性分析法的顺层边坡抗震性研究

周进¹, 乔明叶²

(1. 西安理工大学土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 顺层岩质边坡的抗震性指标大部分都是非确定的, 无法用固定阈值衡量。提出基于非确定性分析法的顺层边坡抗震性性能研究, 将顺层岩质边坡看作若干个叠加的薄板; 运用非确定性分析法计算各个薄板的动力安全系数和动力极限状态方程, 并对顺层边坡动力极限状态方程进行求解, 可得在地震作用力下顺层边坡动力可靠度指标与顺层边坡失效概率之间的关系; 评估地震作用力下顺层边坡整体稳定性, 同时综合考量顺层岩质边坡的最小平均安全系数以及平均失效概率, 得出评估结果。实验结果显示, 在地震作用力下, 顺层边坡坡高、坡角、岩层倾角对顺层岩质边坡抗震性能影响显著, 评估结果与实际结果一致。

关键词: 非确定性分析; 顺层边坡; 抗震性; 评估

中图分类号: P642.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)04-0925-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.04.925

Measurement of the Seismic Behavior of Bedding Slopes Based on Uncertainty Analysis

ZHOU Jin¹, QIAO Mingye²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China;

2. Yellow River Survey Planning and Design Co. Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Seismic indexes of bedding rock slopes are mostly uncertain and cannot be measured by a fixed threshold. An uncertain analysis-based method of measuring the seismic behavior of bedding rock slopes is proposed. The bedding rock slope is regarded as several superimposed thin plates. The dynamic safety factor and the dynamic limit state equation of each thin plate are calculated by an uncertain analysis method, and the dynamic limit of bedding rock slope is calculated. The relationship between the dynamic reliability index and failure probability of the bedding slope under earthquake can be obtained by solving the dynamic limit state equation, and the overall stability of the bedding slope can be evaluated under seismic force. The minimum average safety factor and average failure probability of the bedding slope can be comprehensively considered, and the evaluation results can be obtained. The experimental results show that the height, angle, and

收稿日期: 2018-11-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202196)

第一作者简介: 周进(1981-), 男, 河南信阳人, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 岩土工程。E-mail: qiao.yezi@163.com。

dip angle of the bedding slope have a significant influence on the seismic performance of the bedding slope under seismic force, and the evaluation results are consistent with the actual results.

Keywords: uncertainty analysis; bedding slope; earthquake resistance; evaluation

0 引言

我国处于板块交界处,地壳活动十分活跃,地震造成的顺层岩质滑坡灾害几乎遍及我国西部、西南等各大省市,地震作用力造成的顺层岩质边坡失稳是岩石安全工程的主要研究问题^[1]。例如:我国历史上地震最高强度为里氏 8.5 级的海原地震,其地表断裂带长达 220 km,造成了大量顺层岩质滑坡和崩塌及多数河流阻塞,伤亡惨重;1999 年台湾发生 7.6 级地震,震源深度达 8 km,震灾波及 6 个地区,80 个县市,1 000 多个乡镇,死伤不计其数;2008 年汶川 8.0 级地震和 2010 年青海玉树 7.1 级地震给当地居民和社会经济带来了不可挽回的损失。由地震引发的顺层岩质滑坡和崩塌成为震后灾区重建过程中面临的难点^[2-3]。

由于顺层岩质边坡分布广泛,顺层岩质倾角与边坡坡角接近,在地震作用力下容易导致滑移失稳,因此顺层岩质边坡分布广泛地区一旦发生地震,损失将更加惨重。因此进行顺层岩质边坡的抗震性能研究,特别是顺层岩质边坡的抗震性能,总结顺层岩质边坡失稳破坏规律,对实施滑坡加固,采取有针对性的治理、防护措施,以及实现灾后重建具有重要的理论和现实指导意义^[4]。

由于顺层岩质边坡内含有大量节理、断层,且分布不均匀,传统方法局限于简单的概括顺层岩质边坡模型,而对于其动力学响应研究成果十分匮乏,特别是对于地震作用力下顺层岩质边坡动力响应的研究更是微乎其微^[5]。

本研究针对顺层边坡抗震性进行分析,提出基于非确定性分析法的顺层边坡抗震性评估方法,试图为实现顺层岩质滑坡和崩塌加固提供科学指导。

1 顺层边坡抗震性评估实现方法

评估顺层边坡抗震性,需要分析顺层边坡的结构力学特性,即在地震作用下,确定顺层边坡的受力状况,以判断其是否稳定或已达到极限平衡状态。依据顺层边坡的受力状态,计算顺层边坡动力可靠度,得到顺层边坡动力可靠度指标与顺层边坡失效概率之间的关系,以评估地震作用力下顺层边坡整体稳定性,同时综合考量顺层边坡的最小平均安全系数以及平均失效概率,得出评估结果。

1.1 顺层岩质边坡结构力学指标

将顺层岩质边坡看作若干个叠加在一起的薄板,假设 P 表示地震作用力下顺层岩质失稳破坏段上部岩体自重沿着岩层方向的力学分量; q_1 和 q_2 分别表示顺层岩质岩体自重沿着水平方向和垂直方向的力学分量; γ 表示顺层岩质厚度; h 表示地震作用力下发生滑动的顺层岩质厚度; α 表示顺层岩质倾角,如果沿顺层岩质走向取单位宽度,则有:

$$q_1 = \gamma h \cos \alpha \quad (1)$$

$$q_2 = \gamma h \sin \alpha \quad (2)$$

则可得 P 的计算公式如下:

$$P = l_0 (q_2 - q_1 \times \tan \phi) - c_j \quad (3)$$

式中: l_0 表示地震作用力下发生滑动段的顺层岩质长度; ϕ 表示顺层岩质边坡层间摩擦角; c_j 表示顺层岩质边坡层间黏聚力。

根据上述计算,令 ΔW 表示地震作用力所做的总功; ΔU 表示地震作用力下顺层岩质内部存储的变形能,分析地震作用力下顺层岩质边坡力学性能可知^[6], $\Delta W = \Delta U$,则可得地震作用力对顺层岩质边坡板柱做的功有:

$$\Delta W_1 = P \times \Delta \quad (4)$$

$$\Delta W_2 = \Delta \times Q_x \quad (5)$$

式中: ΔW_1 和 ΔW_2 分别表示力学分量 P 对顺层岩质边坡板柱做的功和地震作用力下顺层岩质边坡自身重力所做的功; l 表示顺层岩质长度; Δ 表示力学分量 P 的作用下顺层岩质边坡板柱轴向变形量如下:

$$\Delta = \frac{1}{2} \int_0^l (y)^2 dx \quad (6)$$

式中: y 表示地震作用力下顺层岩质边坡横向弯曲变形的弹性方程; x 表示随机变量,则有:

$$\Delta W_1 = \frac{1}{2} \int_0^l (y)^2 dx \times P \quad (7)$$

$$\Delta W_2 = \frac{1}{2} \int q(l-x)(y)^2 \sin \alpha dx \quad (8)$$

根据上述分析,计算地震作用力下顺层岩质边坡内部存储的变形能^[6] 为:

$$\Delta U_1 = \frac{1}{2} \Delta W_1 \int M d\phi = \frac{1}{2} \Delta W_1 \int EI (y')^2 dx \quad (9)$$

$$\Delta U_2 = \Delta W_2 q y \cos \alpha dx \quad (10)$$

$$d\phi = \frac{M}{EI} dx \quad (11)$$

$$y' = \frac{M}{EI} \quad (12)$$

式中: M 表示顺层岩质边坡整体质量; EI 表示顺层岩质边坡板内抗弯强度; ΔU_1 表示顺层岩质边坡板内存储的弹性势能; ΔU_2 表示顺层岩质边坡板内增加的势能。

依据能量平衡原理可得:

$$\Delta W_1 + \Delta W_2 = \Delta U_1 + \Delta U_2 \quad (13)$$

$$\Delta W = \Delta W_1 + \Delta W_2 \quad (14)$$

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 \quad (15)$$

综上分析可得地震作用力下顺层岩质边坡结构力学动力极限状态方程^[7]为:

$$\frac{1}{2} \int_0^l (y')^2 dx + \frac{1}{2} \int_0^l (z')^2 dx = \frac{1}{2} \int_0^l EI (z')^2 dx + qy \cos \alpha dx y' \quad (16)$$

根据上述计算,顺层岩质边坡发生失稳破坏时,横向弯曲变形量 z 会越来越大,即 $z \rightarrow \infty$,则可得地震作用力下顺层岩质边坡失稳破坏临界荷载为:

$$P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{(l - l_0)^2} - \frac{1}{2} q (l - l_0) \sin \alpha \quad (17)$$

得到地震作用力下顺层岩质边坡动力安全系数为:

$$\eta = \frac{P_{cr}}{P} \quad (18)$$

如果 $\eta > 1$,则说明地震作用力下顺层岩质边坡状态比较稳定;如果 $\eta < 1$,则说明地震作用力下顺层岩质边坡处于状态不稳定;如果 $\eta = 1$,则说明地震作用力下顺层岩质边坡达到极限平衡。

1.2 对顺层边坡动力极限状态方程求解

由于地震波和顺层岩质边坡失稳破坏具有随机不确定性特点,引入随机模型和模糊理论约束其不确定性^[7-8]。

假设 l_i 、 σ_i 和 τ_i 分别代表地震作用力下顺层岩质边坡第 i 个单元滑动面长度、滑动面上的正应力和剪应力; n 表示顺层岩质边坡单元数目; K_s 表示地震作用力下边坡动力安全系数^[8],具体计算公式如下:

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n c_i l_i + \sum_{i=1}^n N_i \tan \phi}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (19)$$

$$N_i = \sigma_i \cdot l_i \quad (20)$$

$$T_i = \sigma_i \cdot l_i \cdot \tau_i \quad (21)$$

由于顺层岩质边坡层间摩擦角 ϕ 和层间黏聚力 c_j 具有不确定性,将其作为随机变量,考察极限状态下的边坡稳定平衡状况。求解计算公式如下:

$$Z = \sum_{i=1}^n c_i l_i + \sum_{i=1}^n N_i \tan \phi - \eta \sum_{i=1}^n T_i = 0 \quad (22)$$

设 μ_{c_i} 、 σ_{c_i} 、 $f(c_i)$ 和 $F(c_i)$ 分别表示随机变量 c_i 的均值、标准差、概率函数以及累计函数; c'_i 表示与随机变量 c_j 相对应的当量正态化标量; μ'_{c_i} 、 σ'_{c_i} 、 $f'(c_i)$ 和 $F'(c_i)$ 分别表示与之相对应的均值、标准差、概率函数和累计函数。非确定性分析法要求在顺层岩质边坡验算点 c^* 处 c_j 和 c'_i 满足以下条件:

$$f(c^*) = \frac{1}{\sigma'_{c_i}} \Phi \left(\frac{c^* - \mu'_{c_i}}{\sigma'_{c_i}} \right) = f(c^*) \quad (23)$$

$$F'(c^*) = \Phi \left(\frac{c^* - \mu'_{c_i}}{\sigma'_{c_i}} \right) = F(c^*) \quad (24)$$

得到可靠性指标 β 计算公式为:

$$\beta = \frac{\phi \{ \Phi^{-1} [F'(c^*)] \}}{f(c^*)} \quad (25)$$

在上述计算基础上可得地震作用力下顺层边坡动力可靠度指标 β 与顺层边坡失效概率 p_f 之间的关系为:

$$p_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (26)$$

1.3 稳定性评估

虽然参数 K_s 和 β 能够较好地考虑顺层边坡变形的不确定性,但是仅仅通过 K_s 和 β 的变化范围,无法准确评估顺层边坡整体抗震性,也就无法确定具体加固标准。在评估地震作用力下顺层边坡整体稳定性的同时,还要充分考虑最小平均安全系数^[9]和平均大失效概率^[10]两个度量指标。

假设 K_{s0} 表示在静力作用下顺层边坡的整体稳定安全系数; K_{smin} 表示 K_s 的最小值,则可得地震作用力下顺层边坡最小平均安全系数为:

$$\bar{K}_{smin} = K_{s0} - 0.65(K_{s0} - K_{smin}) \quad (27)$$

在评价边坡整体抗震性能时,仅采用最小平均安全系数作为度量指标不够全面,故计算顺层边坡平均大失效概率评估顺层边坡的整体抗震性能,具体计算公式如下:

$$\bar{P}_{ff} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} p_f(t) dt + \int_{t_3}^{t_4} p_f(t) dt + \cdots + \int_{t_{m-1}}^{t_m} p_f(t) dt}{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3) + \cdots + (t_m - t_{m-1})} \quad (28)$$

式中: $p_f(t)$ 表示地震作用力下顺层边坡失效概率时程; $t_0, t_1, \cdots, t_m$ 表示地震作用下顺层边坡稳定系

数时程积分; m 表示地震作用下顺层边坡稳定系数时程曲线上的大失效概率数目。

将式(28) 化简,可得:

$$\bar{P}_{ff}=\frac{\sum P_{ff}}{m}$$

(29)

式中: P_{ff} 代表地震作用力下顺层边坡失效概率时程曲线大于静力作用下的顺层岩质边坡失效概率 p_{f0} 的每一步长时刻的值,即地震作用力下顺层边坡大失效概率。

在上述计算基础上,可得顺层边坡的整体抗震稳定性能评估值如下:

$$P=\min\{\bar{K}_{smin},\bar{P}_{ff}\}$$

(30)

根据上述评估结果,将顺层边坡抗震性划分为五个等级,具体等级划分标准如表 1 所列。

表 1 顺层边坡抗震性等级划分标准

Table 1 Grading criteria for the earthquake resistance of slope		
抗震性等级	顺岩边坡失效概率%	顺岩边坡抗震性描述
一级	>90	极高危险
二级	60~90	高危险
三级	30~60	中等危险
四级	5~30	低危险
五级	<5	极低危险

2 顺层边坡抗震性数值模拟实验分析

如图 1 所示给出了顺层岩质边坡模拟模型。

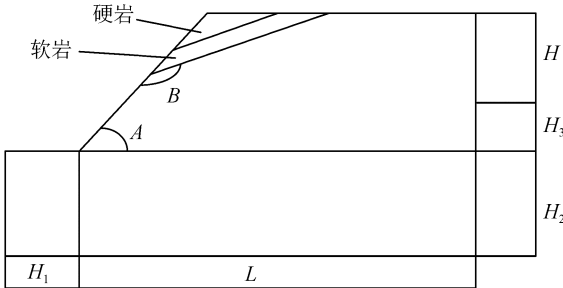


图 1 顺层岩质边坡模型

Fig.1 Model of bedding rock slope

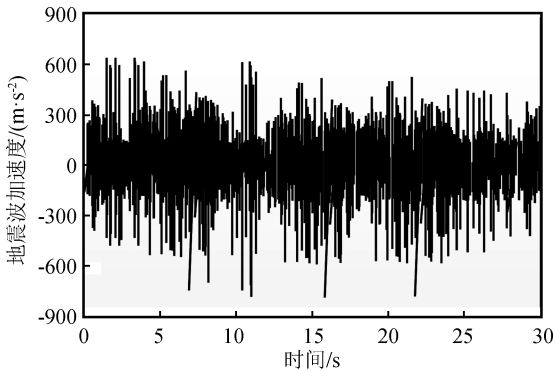
根据工程经验,确定材料参数取值,如表 2 所列。其中:图 1 中 $\angle A$ 表示顺层岩质边坡坡角; $\angle B$ 表示岩层倾角; $H+H_3$ 表示顺层岩质边坡坡高;选取 H_3 的目的是为了使顺层岩质边坡上部悬空;选取参数 L 、 H_1 、 H_2 是为了保证模拟实验的准确性与可靠性。

结合赋值后的材料参数,选取 2008 年汶川地震的地震加速度时程记录,任意截取其中 30 s 加速度时程,对上述顺层岩质边坡施加,如图 2 所示。采用非确定分析法,评估顺层岩质边坡的抗震性能。

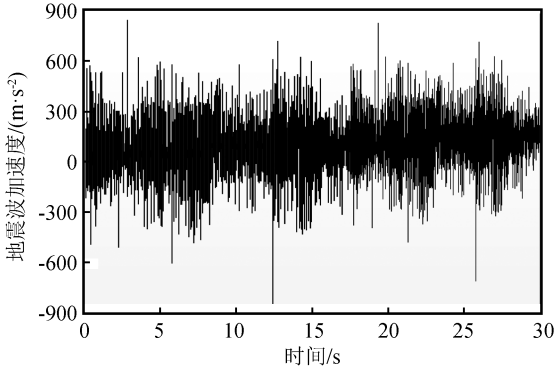
表 2 顺层岩质模型材料参数取值

Table 2 Value of material parameters of bedding rock model

参数	岩层		
	硬岩	软岩	硬岩
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	28	27.5	28
剪切模量/GPa	9.63	3.76	9.63
体积模量/GPa	6.06	1.74	6.06
抗拉强度/MPa	4	0.2	4
层间粘聚力/MPa	1.66	0.4	1.66
层间摩擦角/($^{\circ}$)	47.8	22	47.8



(a) 地震波水平方向加速度时程变化



(b) 地震波竖直方向加速度时程变化

图 2 汶川地震的 30 s 地震加速度时程记录

Fig.2 Acceleration time history record of 30 s under Wenchuan earthquake

顺层岩质边坡坡高分别取值为 50 m、80 m、100 m、120 m,岩层倾角为 30° ,顺层岩质边坡坡角为 30° 。在顺层岩质边坡模型上布设监测点,具体如图 3 所示。监测点 J5 和 J16 的布置在顺层岩质边坡潜在滑移面上,其余各监测点在顺层岩质边坡坡面和坡顶均匀分布。

分析顺层岩质边坡坡高对其抗震性能的影响。根据图 4 可以看出,顺层岩质边坡坡高与边坡表面 X 方向加速度放大效应之间有密切关系,具体表现为,在地震作用力下,顺层岩质边坡的坡高越高,边坡坡面和边坡坡顶地震波加速度放大效应增大越明显。说明顺层岩质边坡坡高对其抗震性能有影响,

顺层岩质边坡坡高越大,抗震性能越差。



图 3 顺层岩质边坡模型监测点布设图

Fig.3 Layout of monitoring points on bedding rock slope model

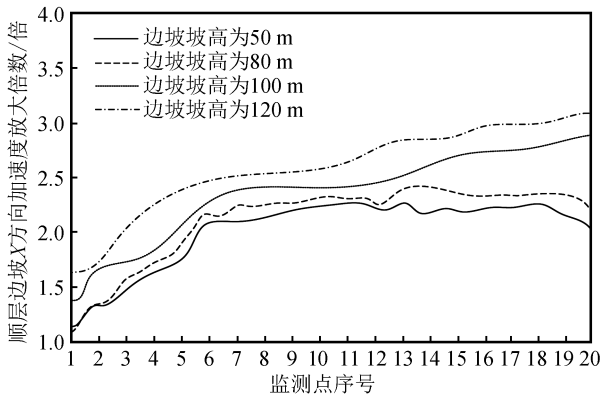


图 4 顺层岩质边坡坡高对其抗震性能的影响测试

Fig.4 Effect of the slope height of bedding rock slope on its seismic performance

假设顺层岩质边坡坡角分别取值为 30° 、 45° 、 60° 和 75° ,顺层岩质边坡坡高为 50 m,边坡岩体软弱结构面倾角为 30° ,测试顺层岩质边坡坡角不同情况下顺层岩质边坡的抗震性能。具体测试结果如图 5 所示。

根据图 5 的测试结果可以看出,在地震作用力下顺层岩质边坡坡角越大,顺层岩质边坡 X 方向上的加速度放大效应越显著,说明顺层岩质边坡坡角对其抗震性能有影响,顺层岩质边坡坡角越大,抗震性能越差。

如图 6 所示,测试了顺层岩质边坡坡角为 30° ,边坡坡高取值为 50 m 时,岩层倾角取值分别为 20° 、 30° 、 40° 、 50° 时,在地震作用力下,顺层岩质边坡 X 方向上的加速度放大效应,即岩层倾角对其抗震性能的影响。由图 6 可以发现,岩层倾角对顺层岩质边坡 X 方向上的加速度放大效应具有一定影响,在地

震作用力下,岩层倾角越大,边坡 X 方向上的加速度放大效应越明显,顺层岩质边坡抗震性能越差。

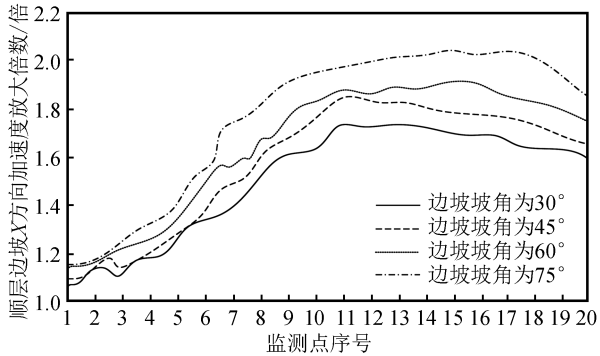


图 5 顺层岩质边坡坡角对其抗震性能的影响测试

Fig.5 Effect test of the slope angle of bedding rock slope on its seismic performance

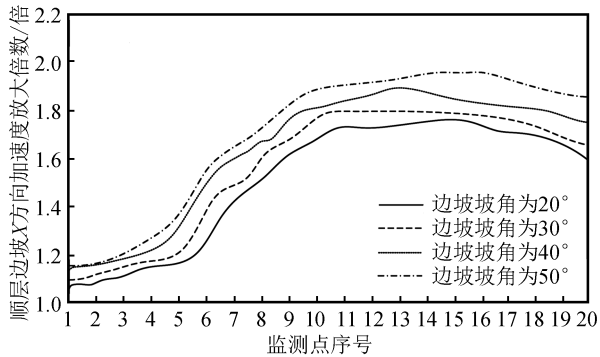


图 6 岩层倾角对其抗震性能的影响

Fig.6 Effect of rock dip on its seismic performance

3 结论

地震作用下的顺层滑坡是近年来比较常见的地震地质灾害,在山区和丘陵地带发生频率更高,而我国一些地区处于地震带,同时又多山地和丘陵,因此,地震作用影响下的顺层岩质失稳破坏给我国许多地区造成了巨大的经济损失和人员伤亡。实现顺层岩质边坡抗震性分析,有利于人们及时采取有针对性的治理和防护措施具有重要指导意义。本研究基于非确定性分析法评估顺层边坡抗震性,模拟实验分析了边坡坡高、边坡坡角和岩层倾角对顺层岩质抗震性能的影响,模拟分析结果与实际情况相吻合,充分证明了所提方法的可行性与可靠性,为实现顺层岩质滑坡和崩塌加固提供理论基础。

参考文献(References)

[1] 李逸,龚文惠,陈训龙,等.地震作用下顺层岩质边坡动力可靠

- 度[J].土木工程与管理学报,2016,33(3):94-98.
- LI Yi,GONG Wenhui,CHEN Xunlong,et al.Dynamic Reliability Analysis on Rock Slopes Under Earthquake[J].Journal of Civil Engineering and Management,2016,33(3):94-98.
- [2] 冉涛,赵安平,尹剑辉.地震作用下顺层岩质滑坡稳定性离散元模拟[J].长江科学院院报,2016,33(3):115-121.
- RAN Tao,ZHAO Anping,YIN Jianhui.Discrete Element Simulation of Stability of Bedding Rocky Landslide Under Earthquake Action[J].ournal of Yangtze River Scientific Research Institute,2016,33(3):115-121.
- [3] 陈训龙,龚文惠,钟旭晗,等.水平和竖向地震作用下顺层岩质边坡动力可靠性分析[J].土木工程学报,2017(10):95-102.
- CHEN Xunlong,GONG Wenhui,ZHONG Xuhan,et al.Dynamic Reliability Analysis of Bedding Rock Slopes under Horizontal and Vertical Earthquake Actions[J].China Civil Engineering Journal,2017(10):95-102.
- [4] 范刚,张建经,付晓.含软弱夹层顺层岩质边坡传递函数及其应用研究[J].岩土力学,2017,38(4):1052-1059.
- FAN Gang,ZHANG Jianjing,FU Xiao.Research on Transfer Function of Bedding Rock Slope with Soft Interlayers and Its Application[J].Rock and Soil Mechanics,2017,38(4):1052-1059.
- [5] 陈瑞青,张存巍.循环荷载作用下土质边坡动力响应分析[J].科学技术与工程,2016(3):112-117.
- CHEN Ruiqing,ZHANG Cunwei.Analysis of Soil Slope Dynamic Response under Cyclic Loads[J].Science Technology and Engineering,2016(3):112-117.
- [6] 廖丽萍,朱颖彦,杨志全,等.中巴喀喇昆仑公路顺层岩质边坡受力分析[J].地下空间与工程学报,2016,12(1):243-249.
- LIAO Liping,ZHU Yingyan,YANG Zhiquan,et al.Analysis on Rock Bedded Slope of Karakoram Highway,Pakistan[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2016,12(1):243-249.
- [7] 钟庭,陈辉国,刘国粹,等.地震波双模态时变修正 Kanai-Tajimi 非平稳 随机模型的改进及参数识别[J].地震工程学报,2017,39(1):72-79.
- ZHONG Ting,CHEN Huiguo,LIU Guocui,et al.Improvement and Parameter Identification of Bimodal Time Variables Modified by the Kanai-Tajimi Nonstationary Stochastic Model Using Strong Ground Motion Records[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(1):72-79.
- [8] 毛文涛,冯君,杨涛,等.考虑地震力与静水压力的顺层岩质边坡弯曲破坏分析[J].防灾减灾工程学报,2017,37(5):71-76.
- MAO Wentao,FENG Jun,YANG Tao,et al.Analysis of Flexural Failure of Consequent Rock Slope Considering Seismic Force and Hydrostatic Pressure[J].防灾减灾工程学报,2017,37(5):71-76.
- [9] 梁庆国,王丽丽,孙文,等.二元结构顺层边坡抗滑桩抗震性能研究[J].地震工程与工程振动,2014,01(6):248-255.
- LIANG Qingguo,WANG Lili,SUN Wen,et al.Seismic Behavior of Anti-slide Piles with Double-layered Bedding Slope[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics,2014,01(6):248-255.
- [10] 江婷,沈振中,聂柏松,等.基于离散元法的顺层岩质边坡的地震响应分析[J].南水北调与水利科技,2017,15(4):136-141.
- JIANG Ting,SHEN Zhenzhong,NIEBaisong,et al.Analysis of Seismic Responses of Bedding Rock Slope Based on DEM[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(4):136-141