

全霄金,唐建政,付艳青,等.双向地震作用下崩塌堆积体边坡动力模糊可靠性分析[J].地震工程学报,2024,46(2):343-348.
DOI:10.20000/j.1000-0844.20220617003

TONG Xiaojin, TANG Jianzheng, FU Yanqing, et al. Dynamic fuzzy reliability analysis of collapse accumulation slopes under bi-directional earthquakes [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46 (2): 343-348. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20220617003

双向地震作用下崩塌堆积体边坡 动力模糊可靠性分析

全霄金¹, 唐建政¹, 付艳青¹, 陈训龙^{2,3}, 舒苏荀⁴

(1. 济南市勘察测绘研究院, 山东 济南 250000;

2. 南京水利科学研究院 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029;

3. 深圳市乾行达科技有限公司 广东省交通安全防护工程技术研究中心, 广东 深圳 518102;

4. 武汉工程大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 考虑崩塌堆积体边坡岩土体参数随机性和模糊性, 以及地震力双向性, 建立一种边坡地震动力模糊可靠度计算方法, 针对竖向地震力对崩塌堆积体边坡稳定可靠性的影响进行进一步研究。首先, 选用动力有限元时程分析法计算出双向地震工况下崩塌堆积体边坡的响应特征, 并运用模糊理论对强度参数进行模糊性处理; 然后, 根据 Mohr-Coulumb 强度准则构建边坡安全系数与可靠度的时程计算模型; 最后, 采用边坡地震可靠性评价新方法, 通过 MATLAB 编写相应程序, 实现计算和分析结果的快速输出。案例结果表明: 新方法计算结果更加合理, 对工程而言也更加安全; 竖向地震作用均对崩塌堆积体边坡整体可靠性存在影响, 但影响程度需根据工程实际情况进行分析。在算例工况下, 竖向地震对崩塌堆积体边坡的可靠性影响很小, 仅使得可靠度降低 3.55%, 因此, 可仅考虑水平地震的影响。

关键词: 崩塌堆积体边坡; 可靠性; 双向地震; 动力时程分析; 模糊理论

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2024)02-0343-06

DOI:10.20000/j.1000-0844.20220617003

Dynamic fuzzy reliability analysis of collapse accumulation slopes under bidirectional earthquakes

TONG Xiaojin¹, TANG Jianzheng¹, FU Yanqing¹, CHEN Xunlong^{2,3}, SHU Suxun⁴

(1. Jinan Geotechnical Investigation and Surveying Research Institute, Jinan 250000, Shandong, China;

2. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the
Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu, China;

3. Guangdong Traffic Safety Protection Engineering Technology Research Center,
Shenzhen Cansinga Technology Co., Ltd., Shenzhen 518102, Guangdong, China;

4. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

收稿日期: 2022-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(52008319); 武汉工程大学科学研究基金(K201731); 广西省防灾减灾与结构安全重点实验室开放课题
项目(2019ZDK045); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放研究基金(YK321004)

第一作者简介: 全霄金(1980—), 男, 山东济南人, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程。E-mail: 122448931@qq.com。

通信作者: 舒苏荀(1987—), 女, 湖北黄冈人, 博士, 讲师, 研究方向: 边坡稳定性及防护技术研究。E-mail: hustssx@163.com。

Abstract: A dynamic fuzzy analysis method for the seismic reliability of collapse accumulation slopes was established, considering the randomness and fuzziness of parameters for rock and soil in collapse accumulation slopes and the excitation of bidirectional earthquakes. Furthermore, the influence of vertical earthquake excitation on the reliability of the collapse accumulation slope was analyzed. First, the dynamic time-history analysis of FEM was used to calculate the dynamic response of collapse accumulation slope under bidirectional earthquakes, and the strength parameters of rock and soil mass were processed using fuzzy theory. Based on the Mohr-Coulomb strength criterion, the time-history calculation model for the safety factor and reliability of the slope under an earthquake was then established. Finally, a new method for evaluating the seismic reliability of slope was adopted, and the corresponding program was compiled by MATLAB to realize the rapid output of calculation and analysis results. The calculation results of the proposed method are reasonable and safe for engineering. The vertical earthquake has an impact on the reliability of the collapse accumulation slope, but the degree of impact must be analyzed in accordance with the actual situation. For the working condition of the example, the vertical earthquake slightly influences the reliability of the collapse accumulation slope, which only reduces the reliability by 3.55%. Therefore, the influence of a vertical earthquake can be overlooked in this example, and only the influence of a horizontal earthquake should be considered.

Keywords: collapse accumulation slope; reliability; bidirectional earthquake; dynamic time-history analysis; fuzzy theory

0 引言

近年来,我国的基础设施建设不断提速,公路、铁路、水电和矿山开采等工程在建造中往往会出现大量的边坡问题。地震过程易诱发边坡失稳,造成滑坡或崩塌等地质灾害,从而造成交通或基础设施的破坏或人员伤亡。同时,灾害的发生也会给自然生态带来环境污染,并给国家造成巨大损失。基于此,地震工况下边坡安全问题越来越成为岩土领域的一个研究热点。

当前,边坡抗震分析主要采用拟静力法和数值模拟时程分析法^[1-3],其中拟静力法由于原理简单且计算快捷,成为当前多个国家标准规范中边坡抗震分析的主要方法^[4]。Li 等^[5]和 Low^[6]基于拟静力法分别研究了岩石边坡和顺层岩质边坡的地震稳定性问题。但该方法存在明显的理论缺陷,其将地震力简单地当作一个恒定惯性力,忽略了地震力在大小和方向上的变化特征。而时程分析法恰好弥补了这一不足之处,同时,随着电子软硬件技术的飞速进步,数值模拟时程分析法能够快速建模,并分析各种复杂边坡工程及工况,进而成为了当今的行业主流分析方法^[7]。赖杰等^[8]基于该方法研究了锚杆抗滑桩加固边坡的动力稳定特性。尹光志等^[9]基于有限元时程分析法,对云南省狮子山铜矿的大沙河尾矿坝进行了3种工况下的动力响应和抗震性能分析。

上述研究仅单独分析了水平地震力的工况,而竖向地震力对边坡稳定性的影响同样显著,单独考虑水平地震力易导致结构设计的安全性存在较大风险^[10-11]。实际地震发生时,边坡内部应力随着地震时间而产生波动变化,边坡稳定状况也一定是一个波动的随机变量,但当前的边坡动力稳定性评价方法往往是仅关注安全系数这一指标的确定性评价方法,考虑可靠状态随机性的研究还少有报道^[1,12]。更进一步,能同时考虑崩塌堆积体边坡及参数模糊性的文献更是鲜有报道^[11]。

综合考虑上述问题,本文选用崩塌堆积体边坡作为研究对象,研究边坡参数随机性和模糊性、双向地震力,以及地震工况下边坡可靠状态的随机特性,采用动力有限元时程分析法、模糊理论及陈训龙提出的边坡地震可靠性评价新方法^[1,13],建立一套崩塌堆积体边坡动力模糊可靠度计算方法,并进行验证和分析,在此基础上探讨竖向地震力因素对边坡稳定性的影响。

1 地震作用下崩塌堆积体边坡动力模糊可靠度计算方法

1.1 崩塌堆积体边坡的地震动力响应

针对水平和竖向两种地震作用力,采用动力有限元时程分析法,在进行边坡地震响应分析时将边

坡土体视为理想弹塑性体, 由此, 基于龚文惠等^[14]提出的水平地震边坡动力计算模型, 进一步构建出双向地震下边坡整体运动方程:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}_i(t)\} + [\mathbf{C}_i]\{\dot{\mathbf{u}}_i(t)\} + [\mathbf{K}_i]\{\mathbf{u}_i(t)\} = -[\mathbf{M}]\{\mathbf{I}\}\ddot{\mathbf{u}}_{gi}(t) \quad (1)$$

式中: $[\mathbf{M}]$ 、 $[\mathbf{C}]$ 和 $[\mathbf{K}]$ 分别为整体质量、阻尼和刚度矩阵; $i = x$ 或 y , 为水平或竖直方向; $\{\ddot{\mathbf{u}}_i(t)\}$ 、 $\{\dot{\mathbf{u}}_i(t)\}$ 和 $\{\mathbf{u}_i(t)\}$ 分别为岩块在 i 向上的加速度、速度和位移响应矩阵, t 为地震时间; $\{\mathbf{I}\}$ 为单位转置矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}_{gi}(t)$ 为基岩在 i 向上的地震加速度; 总阻尼矩阵 $[\mathbf{C}_i]$ 采用 Rayleigh 模型^[15], 可采用下式计算得到:

$$[\mathbf{C}_i] = a[\mathbf{M}] + b[\mathbf{K}_i] \quad (2)$$

式中: a 和 b 为 Rayleigh 阻尼系数, $a = 2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)/(\omega_2^2 - \omega_1^2)$, $b = 2(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1)/(\omega_2^2 - \omega_1^2)$ 。其中, ω_1 和 ω_2 分别为第 1、2 阶固有频率, ξ_1 和 ξ_2 为对应的阻尼比^[11]。

已知地震加速度数据, 根据式(1)便能计算出整个地震中加速度、速度和位移响应。

1.2 边坡参数的模糊性处理

在传统统计学理论中, 频率法只适用于分析大样本随机变量的问题, 而边坡的强度参数, 即黏聚力 c 和内摩擦系数 $\tan\varphi$, 属于小样本变量, 存在一定的模糊性^[11]。因此, 需进一步采用模糊理论对强度参数 c 和 $\tan\varphi$ 进行模糊化处理^[16-17], 具体见式(3)和(4)。

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \exp\left\{-\frac{2(x_i - \bar{x})^2}{(d_{\max} - d_{\min})}\right\} x_i}{\sum_{i=1}^n \exp\left\{-\frac{2(x_i - \bar{x})^2}{(d_{\max} - d_{\min})}\right\}} \quad (3)$$

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{n}{n-1} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \exp\left\{-\frac{2[(x_i - \bar{x})^2 - \sigma^2]^2}{(\xi_{\max} - \xi_{\min})}\right\} \cdot (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n \exp\left\{-\frac{2[(x_i - \bar{x})^2 - \sigma^2]^2}{(\xi_{\max} - \xi_{\min})}\right\}} \quad (4)$$

式中: \hat{x} 为模糊均值; $x_i \in (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中 (x_1, x_2, \dots, x_n) 为实测样本值; \bar{x} 为样本平均值; d_{\max}, d_{\min} 分别为 $(x_i - \bar{x})^2$ 的最大值和最小值; $\hat{\sigma}^2$ 为模糊方差; σ^2 为样本方差; ξ_{\max} 和 ξ_{\min} 分别为 $(d_i - \sigma^2)^2$ 中的最大值和最小值。

因此, 根据式(3)和(4)可实现对强度参数的模糊化处理, 为便于后续方法推导, 将模糊化处理之后

的强度参数表示为 \tilde{c} 和 $\tan\tilde{\varphi}$ 。

1.3 安全系数与可靠度动力时程的确定

根据以上动力时程计算结果, 进一步计算出边坡体各单元的应力响应特征, 进而可求出边坡在最危险滑移面上的总剪切力和抗滑力地震响应结果^[14]。由此, 采用 Mohr-Coulumb 破坏准则, 并结合模糊化处理后的强度参数 \tilde{c} 和 $\tan\tilde{\varphi}$, 以某一时刻 t_1 为例, 假设此时的最危险滑移面弧长为 $l|_{t=t_1}$, 单位弧面设为 $\Delta l_i|_{t=t_1}$, 则 t_1 时刻边坡的安全系数 $F_s|_{t=t_1}$ 可表示如下:

$$F_s|_{t=t_1} = \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{c} + \sigma_{ni}|_{t=t_1} \tan\tilde{\varphi}) \Delta l_i|_{t=t_1}}{\sum_{i=1}^n \tau_i|_{t=t_1} \Delta l_i|_{t=t_1}} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{ni}|_{t=t_1}$ 和 $\tau_i|_{t=t_1}$ 为 t_1 时刻的法向应力和切应力。

根据式(5), 可建立 t_1 时刻边坡的极限状态方程:

$$Z(t) = \sum_{i=1}^n (\tilde{c} + \sigma_{ni}|_{t=t_1} \tan\tilde{\varphi}) \Delta l_i|_{t=t_1} - \sum_{i=1}^n \tau_i|_{t=t_1} \Delta l_i|_{t=t_1} = 0 \quad (6)$$

本处选用 Monte Carlo 法^[18] 计算边坡可靠度, 设定总模拟次数为 m , 随机生成 m 组岩土强度参数, 由此, t_1 时刻边坡可靠度 $P_s|_{t=t_1}$ 可表示为^[1,10]:

$$P_s|_{t=t_1} = 1 - \frac{k}{m} \quad (7)$$

式中: k 为 $Z(t) \leq 0$ 的次数。

这样, 根据式(5)和式(7)便能确定出边坡安全系数与可靠度的动力时程曲线。

1.4 边坡地震可靠度计算与分析

基于 1.3 节的安全系数与可靠度动力时程数据, 进一步计算和分析边坡地震可靠性状况。选用陈训龙早期提出的两个新指标来进行评价^[1,11], 其计算可分为以下几步:

(1) 计算累积概率分布曲线: 分析出安全系数与可靠度时程曲线的最大值和最小值, 选定间隔值, 并将安全系数与可靠度数据按最小到最大等间隔排列, 再分别统计每一时刻安全系数与可靠度值的出现次数, 得到区间概率分布和累积概率分布曲线图。

(2) 计算最低安全要求可靠度^[1]: 通过相关工程规范查询边坡实际工况对应的稳定安全系数最低要求值^[1,11], 再结合步骤(1)中的安全系数累积概率分布曲线, 计算出最低安全要求可靠度 P_{sa} 。

(3) 计算最大允许失效可靠度^[1]: 目前对于边坡最大判断失效概率尚无统一标准, 外国学者给出

了滑坡的失稳概率推荐范围为 $4\% \sim 10\%$ ^[19],王伟等^[20]给出了我国边坡的破坏概率建议值为 3.6% 。基于此,本处选定判断失效概率值为 3% ,参考步骤(1)中可靠度累积概率分布,可计算出最大允许失效可靠度 P_{sd} 。

(4)结合步骤(2)得到的 P_{sa} 和步骤(3)得到的 P_{sd} ,边坡整体可靠度表示如下:

$$P_{so} = \min\{P_{sa}, P_{sd}\} \quad (8)$$

2 工程案例分析

2.1 工程概况及模型建立

选取贵州省道真至新寨高速互通区的一处崩塌堆积体边坡进行研究,其断面尺寸如图1所示。查询并判定出该边坡安全等级为一级,其岩土体物理力学参数值列于表1。

表1 岩土体的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass

岩土层	弹性模量 /MPa	泊松比	重度 (kN/m ³)	黏聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
				模糊均值	模糊标准差	模糊均值	模糊标准差
①崩塌堆积体	60	0.30	19.25	15.282	6.552	26.352	8.183
②中风化泥岩	400	0.21	23.53	110.973	13.625	46.012	10.683

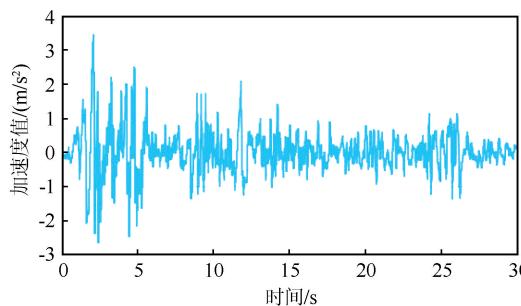


图1 算例边坡的断面图(单位:m)

Fig.1 Section diagram of the example slope (Unit:m)

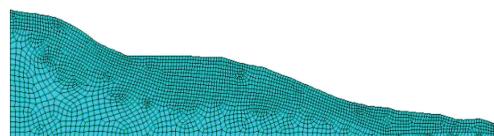


图2 El-Centro 波的加速度曲线图

Fig.2 Acceleration curve of the El-Centro seismic wave

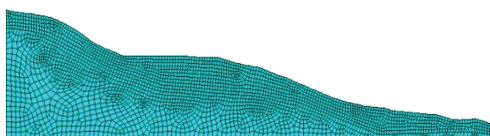


图3 算例边坡的有限元建模

Fig.3 Finite element calculation model of the example slope

2.2 安全系数与可靠度的动力响应

根据本文所提方法计算边坡动力响应,然后采用Mohr-Coulomb破坏准则与Monte Carlo法进行求解,总次数 m 选为 10^6 ,计算得出安全系数与可靠度动力响应如图4所示。

由图4可见,在算例工况条件下,得到边坡安全系数与可靠度区间分别在:[0.713, 1.944], [0.253, 9,

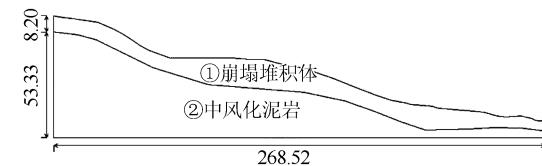


图1 算例边坡的断面图(单位:m)

Fig.1 Section diagram of the example slope (Unit:m)

已知该边坡区域的抗震烈度为Ⅶ,选用El-Centro波作为地震力,其相应的曲线如图2所示。采用Mohr-Coulomb屈服准则的弹塑性本构模型进行建模,水平和竖向地震力采用峰值叠加模式输入^[21],其中竖向地震力为水平地震力的 $2/3$ ^[10,21]。采用有限元方法建模,得到的边坡模型如图3所示,模型左右两侧边界选用水平约束,底部边界采用水平和竖向约束,而上部自由无约束。

0.797 1],其中初始时刻为静力工况,此时的安全系数和可靠度分别为1.457,0.797 1。可见,初始时刻的可靠度值最大,但安全系数并非最大值,其最大值出现在4.8 s。因此,崩塌堆积体边坡的安全系数与可靠度是随地震波动而时刻变化的,且数值并非一定小于静力工况。

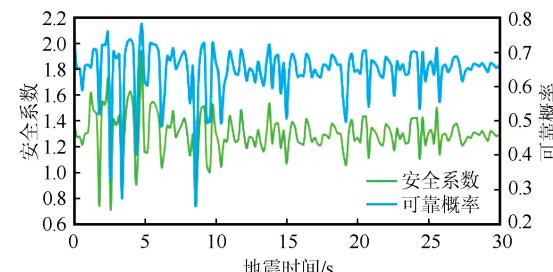


图4 双向地震工况下安全系数与可靠度响应曲线

Fig.4 Safety factor and reliability response curves under bidirectional seismic conditions

2.3 边坡可靠性分析与比较

运用MATLAB软件对上述安全系数与可靠度数据进行编程统计和计算,选定安全系数与可靠度曲线的间隔值分别为0.01和0.005,并采用1.4节计算步骤,最终求出二者的累积概率分布分别如图5、6所示。

由图5、6可得,边坡最低安全要求可靠度 $P_{sa}=0.503 3$,最大允许失效可靠度 $P_{sd}=0.478 9$,由此可

得边坡整体可靠度 $P_{\text{so}} = \min\{P_{\text{sa}}, P_{\text{sd}}\} = 0.4789$ 。

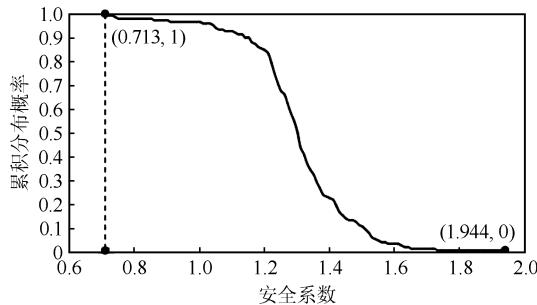


图 5 安全系数值的累积概率分布

Fig.5 Cumulative probability distribution of the safety factor

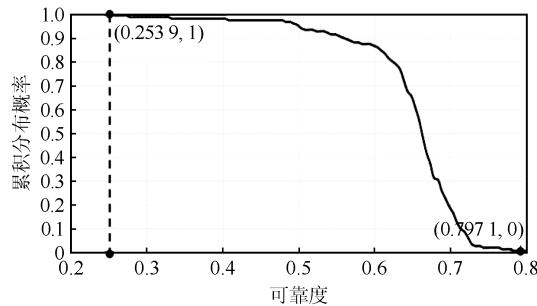


图 6 可靠度值的累积概率分布

Fig.6 Cumulative probability distribution of the reliability

进一步将本文方法与现有方法进行比较分析, 具体结果如表 2 所列, 其中①采用了拟静力法和 Monte Carlo 法, ②采用了平均值计算, ③采用了数据的最小值, 而④选自文献[12]的新方法。

由表 2 可得, ③算得的结果最小, ②的结果最大且与①的结果非常接近。相比其他方法, 本文方法充分考虑变量随机特性, 并且能与技术规范和实际工程风险相结合, 所求得计算值能更真实地反映实际状况, 更具合理性和工程适用性。

3 进一步讨论与分析

运用本文提出的新方法, 进一步针对单独竖向地震力作用对算例边坡稳定性的影响进行研究, 主要对以下 4 种工况进行分析: (A) 仅水平地震力作用情况; (B) 仅竖向地震力作用情况; (C) 无地震力作用情况; (D) 水平和竖向地震力共同作用情况。各种工况的计算结果及对比情况列于表 3。

从表 3 中可以看出, 在水平和竖向地震共同作用工况下, 崩塌堆积体边坡的可靠度降低了 39.92%。可见, 双向地震对边坡整体稳定性的影响很大。

表 2 各方法计算结果对比

Table 2 Comparison of calculation results of each method

评价方法	本文方法	①拟静力可靠度法	②平均可靠度法	③最小动力可靠度法	④平均大可靠度法
可靠度	0.4789	0.6444	0.6480	0.2539	0.6038

表 3 地震作用效果的对比分析

Table 3 Comparative analysis of the seismic excitation effect

工况条件	水平地震	竖向地震	可靠度/%	降低率/%
A	√	✗	49.06	38.45
B	✗	√	76.88	3.55
C	✗	✗	79.71	-
D	√	√	47.89	39.92

注: “√”表示考虑, “✗”表示不考虑

就单向地震作用而言, 水平地震力作用使得崩塌堆积体边坡的可靠度降低了 38.45%, 而仅竖向地震力作用情况下边坡可靠度降低率为 3.55%。可见, 与水平地震力作用相比, 竖向地震力作用对该算例边坡整体稳定性的影响要小得多, 因此在本文算例工况下, 该算例边坡的抗震分析可忽略竖向地震力作用的因素。但是, 针对其他工程边坡和工况条件, 竖向地震力作用的影响程度需根据工程实际情况具体分析。

4 结论

本文选用动力有限元时程分析法、模糊理论和陈训龙提出的边坡地震可靠性评价方法建立了一套

双向地震工况下崩塌堆积体边坡稳定可靠性计算方法, 并以具体工程案例进行了研究。具体结论总结如下:

(1) 本文新方法同时考虑了边坡参数随机性和模糊性、水平和竖向地震作用, 以及地震作用下边坡可靠状态的随机特性, 计算结果更合理, 对工程而言也更安全。

(2) 根据本文计算出的累积概率分布曲线可以快速输出任一安全系数与可靠度对应的统计可靠度值, 更全面地分析崩塌堆积体边坡的地震安全稳定状态, 可为边坡抗震与加固方案设计提供支撑。

(3) 本文工况下, 竖向地震力作用对算例边坡整体稳定性的降低率仅为 3.55%, 影响很小, 进行抗震分析时可仅考虑水平地震力作用的影响。

参考文献(References)

- [1] 陈训龙, 高荣雄, 龚文惠, 等. 基于 Newmark- β 法的地震作用下顺层岩质边坡可靠度时程分析方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(7):33-40.
- CHEN Xunlong, GAO Rongxiong, GONG Wenhui, et al. Time

- history analysis method for seismic reliability of bedding rock slopes based on Newmark- β method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(7): 33-40.
- [2] 陈训龙, 龚文惠, 邱金伟, 等. 基于盲数理论的边坡可靠度分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1155-1160.
CHEN Xunlong, GONG Wenhui, QIU Jinwei, et al. Reliability analysis of slopes based on blind data theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(6): 1155-1160.
- [3] 舒苏荀, 龚文惠, 王佳, 等. 各向异性随机场下的边坡模糊随机可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1204-1210.
SHU Suxun, GONG Wenhui, WANG Jia, et al. Fuzzy-random reliability analysis of slope stability in anisotropic random fields[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1204-1210.
- [4] LIN Y L, LENG W M, YANG G L, et al. Seismic response of embankment slopes with different reinforcing measures in shaking table tests[J]. Natural Hazards, 2015, 76(2): 791-810.
- [5] LI D Q, CHEN Y F, LU W B, et al. Stochastic response surface method for reliability analysis of rock slopes involving correlated non-normal variables [J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38(1): 58-68.
- [6] LOW B K. Efficient probabilistic algorithm illustrated for a rock slope[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2008, 41(5): 715-734.
- [7] 周兴涛, 盛谦, 冷先伦, 等. 颗粒离散单元法地震动力时程计算黏性人工边界及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 928-939.
ZHOU Xingtao, SHENG Qian, LENG Xianlun, et al. Viscous artificial boundary for seismic dynamic time-history analysis with granular discrete element method and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(4): 928-939.
- [8] 赖杰, 李安红, 郑颖人, 等. 锚杆抗滑桩加固边坡工程动力稳定性分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 924-930.
LAI Jie, LI Anhong, ZHENG Yingren, et al. Dynamic stability analysis of slopes reinforced by anchor anti-slide pile[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 924-930.
- [9] 尹光志, 王文松, 魏作安, 等. 尾矿库加高扩容坝体动力反应与抗震性能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊1): 3132-3142.
YIN Guangzhi, WANG Wensong, WEI Zuoan, et al. Dynamic response and seismic performance analysis of heightening and expanding dam body of tailings pond[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Suppl01): 3132-3142.
- [10] 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, 50(10): 91-98, 128.
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, 50(10): 91-98, 128.
- [11] 陈训龙. 随机地震下顺层岩质边坡动力模糊可靠度研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [12] 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, 105.
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, 105.
- [13] HUANG Zhiqian, DONG Fuchu, JIANG Xiaochen, et al. Determination of the shear strength of a rock mass at Baoquan Pumped Storage Power Station[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1999, 57(3): 267-272.
- [14] 龚文惠, 陈训龙, 邱金伟, 等. 基于滑移线场理论的地震作用下土质边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1733-1738.
GONG Wenhui, CHEN Xunlong, QIU Jinwei, et al. Seismic stability analysis of soil slope using theory of slip line field [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(6): 1733-1738.
- [15] RAYHANI M H, EL NAGGAR M H. Numerical modeling of seismic response of rigid foundation on soft soil[J]. International Journal of Geomechanics, 2008, 8(6): 336-346.
- [16] JIA Z R, SHI J. A method of data processing for determining shear strength parameters of rock[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 97-98: 397-401.
- [17] SHAHIN M A, MAIER H R, JAKSA M B. Data division for developing neural networks applied to geotechnical engineering[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2004, 18(2): 105-114.
- [18] 董建华, 张媛, 朱彦鹏, 等. 框架预应力锚杆边坡锚固结构的随机地震反应及动力可靠度分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(10): 26-33.
DONG Jianhua, ZHANG Yuan, ZHU Yanpeng, et al. Random seismic response and dynamic reliability analysis of frame with prestressed anchors for slope stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 26-33.
- [19] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析: 原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
CHEN Zuyu. Soil slope stability analysis: theory, methods and programs[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [20] 王伟, 杨敏, 刘德富. 基于经济风险分析的边坡稳定性评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(12): 1603-1607.
WANG Wei, YANG Min, LIU Defu. Assessment of slope stability with economical risk analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2004, 32(12): 1603-1607.
- [21] 黄诚, 王安明, 任伟中. 水平向与竖向地震动的时间遇合模式对边坡动力安全系数的影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3404-3410.
HUANG Cheng, WANG Anming, REN Weizhong. Influence of time combination pattern of horizontal and vertical ground motions on slope seismic safety factor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(11): 3404-3410.