

# 地震作用下框架锚杆加固黄土边坡 稳定性及可靠度分析

叶帅华<sup>1,2</sup>, 曾浩<sup>1,2</sup>, 时轶磊<sup>3</sup>, 陶晖<sup>4</sup>

1. 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;
2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;
3. 甘肃中建市政工程勘察设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000;
4. 甘肃建筑职业技术学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为了研究框架锚杆加固黄土边坡在地震作用下不同参数对边坡稳定性及可靠度的影响, 依托边坡工程实例, 借助 Geo-Studio 有限元软件, 建立加固边坡计算模型, 采用 Monte Carlo 法分析了土体参数 (内摩擦角、黏聚力) 和地震峰值加速度的随机性对框架锚杆加固黄土边坡稳定性及可靠度的影响。研究表明, 随着地震峰值加速度的增大, 边坡的稳定性逐渐降低; 地震峰值加速度的随机性对边坡的稳定性及可靠度的影响最为明显, 其次为内摩擦角。为了保证边坡有足够的稳定性和可靠度, 应尽可能多地考虑参数的随机性, 其中需特别注意地震峰值加速度和内摩擦角的影响。

**关键词:** 稳定性; 可靠度; 黄土边坡; 框架锚杆; 安全系数; 地震作用

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 2096-7195(2023)03-0228-10

## Stability and reliability analysis of loess slope strengthened by frame anchor in earthquake

YE Shuai-hua<sup>1,2</sup>, ZENG Hao<sup>1,2</sup>, SHI Yi-lei<sup>3</sup>, TAO Hui<sup>4</sup>

1. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
2. Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
3. Gansu CSCEC Municipal Engineering Investigation and Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China;
4. Gansu Vocational College of Architecture, Lanzhou 730050, Gansu, China)

**Abstract:** The influence of different parameters on the stability and reliability of the loess slope reinforced by frame anchors under the action of earthquake is studied. Relying on the slope engineering example, the calculation model of the reinforced slope is established by Geo-Studio finite element software. The effects of randomness and variability of parameters on the stability and reliability of loess slopes strengthened by frame anchors are analyzed by Monte Carlo method. The results show that with the increase of seismic peak acceleration, the stability of slope decreases gradually. The randomness of seismic peak acceleration has the greatest influence on the reliability of slope stability, followed by the angle of internal friction. In order to ensure enough stability and reliability of the slope, the randomness of parameters should be considered as much as possible. Special attention should be paid to the influence of seismic peak acceleration and internal friction angle.

**Key words:** stability; reliability; loess slope; frame anchor; safety factor; earthquake action

收稿日期: 2022-04-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51768040, 51508256)。

作者简介: 叶帅华 (1983—), 男, 河南巩义人, 博士后, 教授, 主要从事支挡结构、地基处理及岩土工程抗震方面的教学和研究工作。E-mail: yeshuaihua@163.com。

## 0 引言

关于边坡稳定性的问题,国内外学者做了大量的研究。目前考虑动力作用的边坡稳定性的分析方法主要有:拟静力法、Newmark 分析法、时程分析法和数值分析法等<sup>[1]</sup>。祁生文等<sup>[2]</sup>从边坡的地质条件出发,对地震作用下边坡的破坏失稳机制进行了研究,总结并归纳了边坡的动力破坏形式。郑颖人等<sup>[3]</sup>运用 FLAC 3D 软件采用动力折减法分析了地震作用下边坡的破坏机制,其研究表明边坡在地震作用下的破坏形式为剪-拉复合破坏模式。邓东平、李亮<sup>[4]</sup>基于拟静力法对地震作用下边坡的滑移面搜索进行了理论研究,提出了一种滑移面搜索的新方法以及给出了相应的安全系数解析解,并结合工程实例验证了该方法的合理性。年廷凯等<sup>[5]</sup>同样在拟静力法的基础上,采用极限上限分析法对地震作用下锚固边坡的稳定性进行了理论分析,并通过算例进行了对比验证。文献[6-10]对地震作用下边坡的稳定性进行了数值模拟研究,不同的有限元软件能够提供多种动力计算方法,通过输入不同的土体参数和地震波,可以高效地分析地震作用下边坡的受力和变形情况,并能给出相应的稳定性安全系数。

在边坡可靠度研究方面,我国是一个地震多发的国家,因此十分有必要对地震作用下边坡的稳定性和可靠度进行研究<sup>[11]</sup>。ABDEL MASSIH 等<sup>[12-13]</sup>基于可靠度理论对地震作用下边坡的稳定性进行了分析。董建华等<sup>[14]</sup>考虑地震作用的随机性,建立了框架锚杆支护边坡动力方程,并给出了对应的可靠度计算方法。JIN 等<sup>[15]</sup>将概率计算方法引用到边坡的动力分析中,结合 Monte Carlo 法对边坡进行了损伤分析。叶帅华等<sup>[16]</sup>建立了考虑锚杆预应力的边坡动力平衡方程,进而推导了地震作用下受预应力影响的边坡安全系数计算公式。

综上所述,已有学者对边坡的稳定性及可靠度展开研究,也取得了很多有益的成果,但目前关于黄土加固边坡的可靠度研究较少,特别是在动力分析方面,并且影响边坡稳定性及可靠度的影响因素较多,因此有必要考虑各参数的不确定性对黄土加固边坡进行研究。本文主要考虑了边坡土体内摩擦角  $\varphi$ 、黏聚力  $c$  以及地震峰值加速度  $S_a$  的影响,借助工程实例,通过 Geo-Studio 有限元软件对边坡在地震作用下的稳定性和可靠度进行分析,研究了不同参数的随机性、相关性以及变异性对地震作用下框架锚杆加固边坡稳定性及可靠度的影响。

## 1 工程概况

工程项目位于甘肃省兰州市某公路框架锚杆加固边坡,如图 1 所示,该边坡采用框架锚杆支护,边坡高度为 12 m,重要性系数为 1.0,边坡与水平面夹角为  $70^\circ$ ,抗震设防烈度为 8 度,锚杆设计参数见表 1。

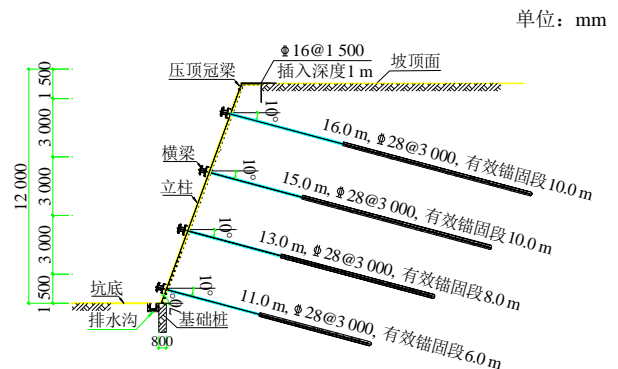


图 1 边坡支护剖面图

Fig. 1 Slope support profile

表 1 锚杆设计参数

Table 1 Design parameters of anchors

锚杆 层数	距坡底 距离/m	水平间 距/m	锚固体直 径/mm	锚杆直 径/mm	自由段 长度/m	锚固段 长度/m
1	10.5	3	150	28	6	10
2	7.5	3	150	28	5	10
3	4.5	3	150	28	5	8
4	1.5	3	150	28	5	6

## 2 有限元模型建立及参数选取

### 2.1 有限元模型的建立

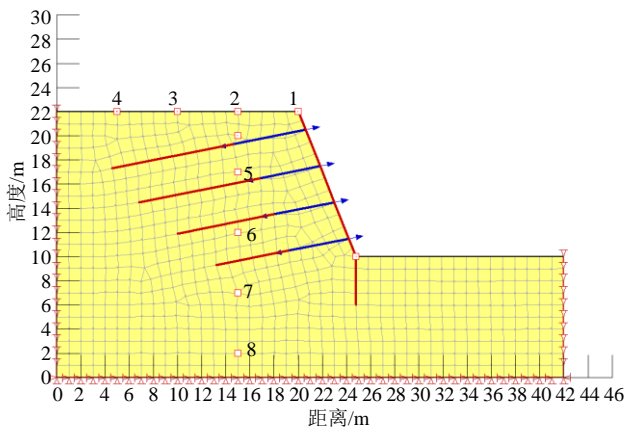
本文通过耦合 Geo-Studio 软件中的 QUAKE/W 模块和 SLOPE/W 模块对该边坡的稳定性及可靠度进行计算,并在模型中选择了 8 个不同的监测点位进行对比,计算模型和监测点位如图 2 所示。Geo-Studio 软件中不同模块的结构单元有所差异,本模型在 QUAKE/W 模块中锚杆自由段采用结构杆单元进行模拟,锚固段则采用结构梁单元进行模拟,而在 SLOPE/W 模块直接采用锚单元模拟锚杆,采用桩单元模拟横梁、立柱以及坡底支护桩。

该有限元软件在计算边坡可靠指标时所采用的方法为 Monte Carlo 法,而 Monte Carlo 法中抽样试验的次数直接决定了计算结果的精度,抽样次数越高计算精度就越高,抽样次数可通过式(1)计算得到:

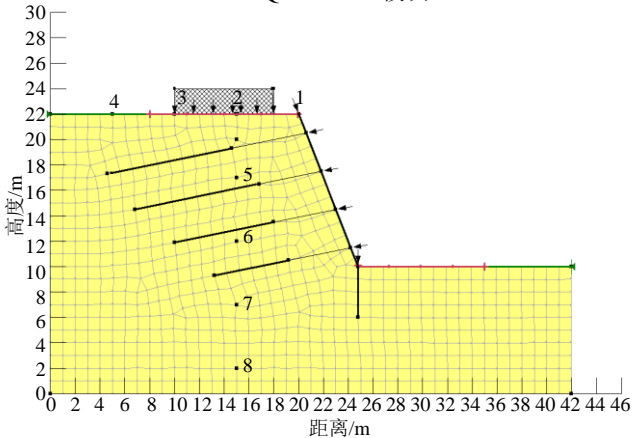
$$I \geq \frac{1-p}{p \times \text{cov}_p^2} \quad (1)$$

式中： $I$ 为抽样次数； $p$ 为失效概率； $\text{cov}_p$ 为失效概率的变异系数。

通过选择不同的抽样试验次数对边坡的可靠度进行计算，发现当 $I$ 大于20 000时，可靠指标的变化已经很小，能够满足计算精度的要求，因此为了减小抽样次数对计算结果的影响，本文在通过Geo-Studio软件对边坡可靠指标进行计算时输入的抽样次数为30 000。



(a) QUAKE/W 模块



(b) SLOPE/W 模块

图2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element calculation model

## 2.2 模型参数设置

根据对西北地区基坑工程以及边坡工程项目中地勘报告所给出的黄土强度参数的统计<sup>[17]</sup>，本文将土体重度 $\gamma$ 设为定值 $18 \text{ kN/m}^3$ ，黏聚力 $c$ （最小值为 $12 \text{ kPa}$ ，最大值为 $17 \text{ kPa}$ ）和内摩擦角 $\varphi$ （最小值为 $20^\circ$ ，最大值为 $25^\circ$ ）均设为服从正态分布的随机变量，均值和方差如表2所示，土体所采用的本构模型为摩尔-库伦本构模型。

有限元模型中输入的地震波为EL-Centro水平地震波，波形时程曲线如图3所示，同时将地震峰

值加速度 $S_a$ 考虑为随机变量，并通过软件将地震峰值加速度分别修正为 $0.05g$ 、 $0.10g$ 、 $0.15g$ 、 $0.20g$ 、 $0.30g$ 、 $0.40g$ 进行计算，进而分析不同地震峰值加速度对边坡稳定性及可靠度的影响。

表2 土体随机参数取值

Table 2 Random parameters of soil mass			
土体参数	分布类型	均值	方差
$c/\text{kPa}$	正态分布	14.5	1.44
$\varphi/(\circ)$	正态分布	23.0	1.96

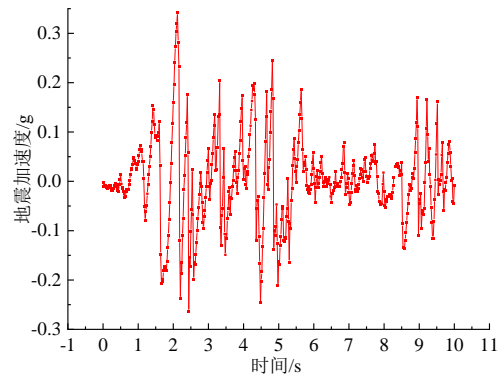


图3 地震波加速度时程曲线

Fig. 3 Time history curve of seismic wave acceleration

## 3 有限元计算结果分析

本文将地震作用下土体的内摩擦角、黏聚力以及地震峰值加速度设置为随机变量，通过数值模拟，采用拟静力法对该框架锚杆加固边坡的变形、稳定性和可靠度进行了计算分析。

### 3.1 地震作用下边坡水平位移分析

如图4所示为地震峰值加速度为 $0.05g$ 、 $0.20g$ 和 $0.40g$ 时边坡的水平位移云图，从图4可以看出随着地震峰值加速度的增大，边坡的水平位移明显增大，并且在地震作用下边坡的水平位移最大值均发生在坡顶位置处。

为了进一步分析地震作用下框架锚杆加固边坡的水平位移情况，如图5所示为 $S_a=0.20g$ 时，竖向监测点2、5、6、7、8的水平位移随时间的变化曲线。由图5可知，竖向监测点的水平位移值在地震作用时间内波动变化，但随地震作用时间的增加均有明显增大的趋势，说明地震持续时间越长，边坡的水平位移越大，同时会引起边坡产生永久位移，地震作用时间内竖向监测点2、5、6、7、8所对应的最大水平位移值分别为 $84.6 \text{ mm}$ 、 $78.0 \text{ mm}$ 、 $69.3 \text{ mm}$ 、 $65.0 \text{ mm}$ 、 $61.7 \text{ mm}$ ，可以看出随着监测点位置高度的增加，地震作用产生的水平位移明显增大，表明地震作用下距离边坡坡顶越近，地震作用所产生的



水平位移越大。为分析地震峰值加速度对边坡水平位移的影响,如图6所示为地震峰值加速度分别为0.05g、0.10g、0.15g、0.20g、0.30g、0.40g时监测点5在地震作用过程中的水平位移曲线,可以明显看出随着地震峰值加速度的增大,监测点5的水平位移也在逐渐增大,当 $S_a$ 分别为0.05g、0.10g、0.15g、0.20g、0.30g、0.40g时监测点5的最大水平位移分别为43.3 mm、52.0 mm、60.7 mm、78.0 mm、95.3 mm、113 mm,当地震峰值加速度为0.40g时,此时最大水平位移已远超规范所允许的最大位移值,可认为此时边坡已经处于危险状态。

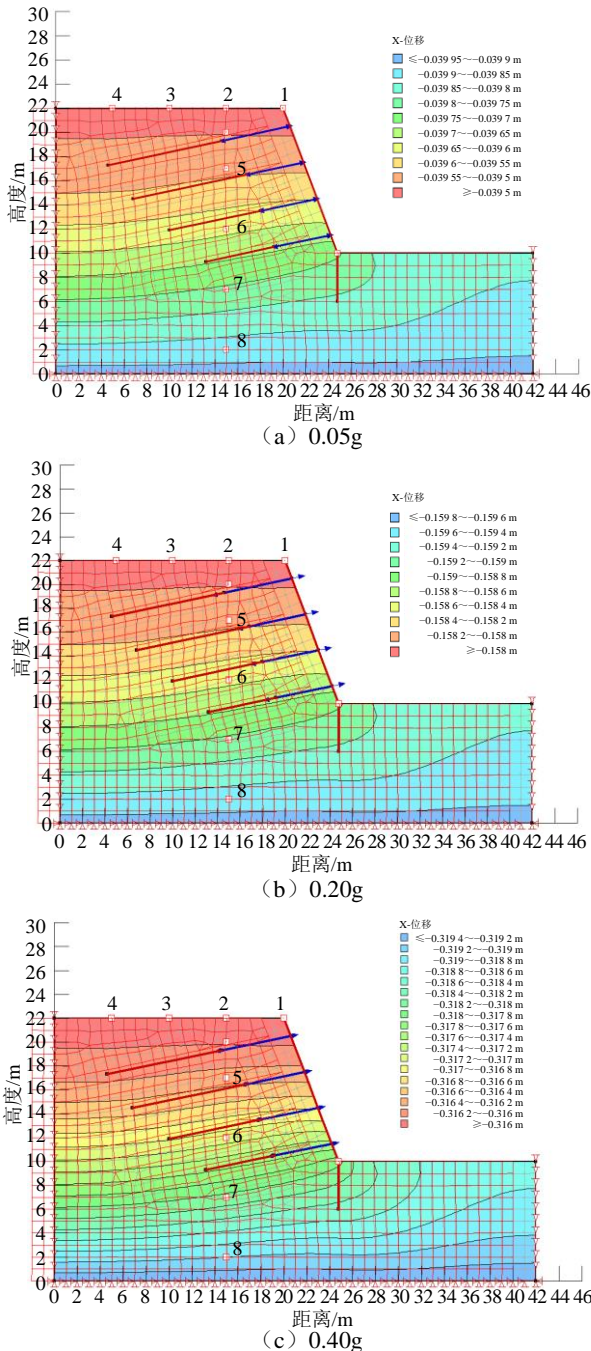


图4 边坡水平位移云图

Fig. 4 Horizontal displacement nephogram of slope

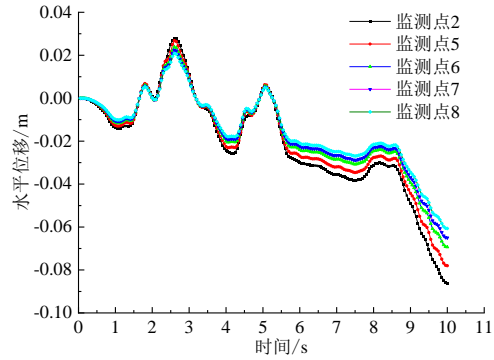


图5 监测点水平位移变化曲线

Fig. 5 Variation curves of horizontal displacement of monitoring points

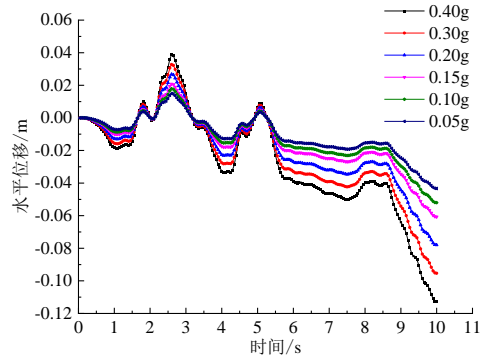
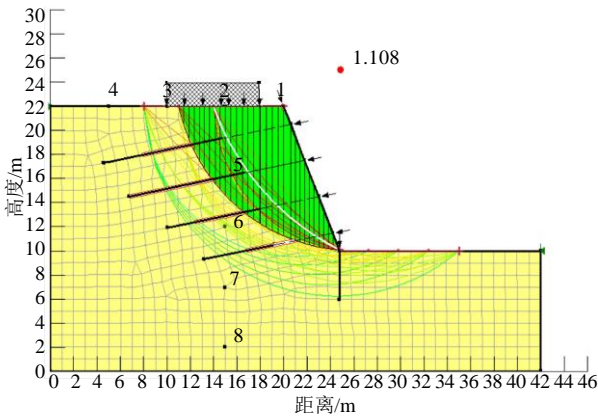


图6 不同地震峰值加速度的水平位移

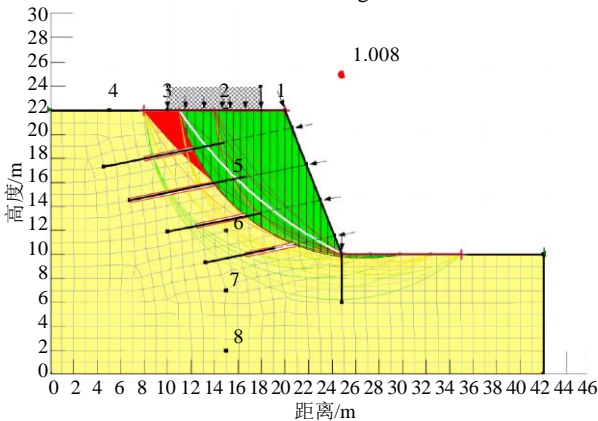
Fig. 6 Horizontal displacement with different seismic peak accelerations

### 3.2 地震作用下边坡稳定性分析

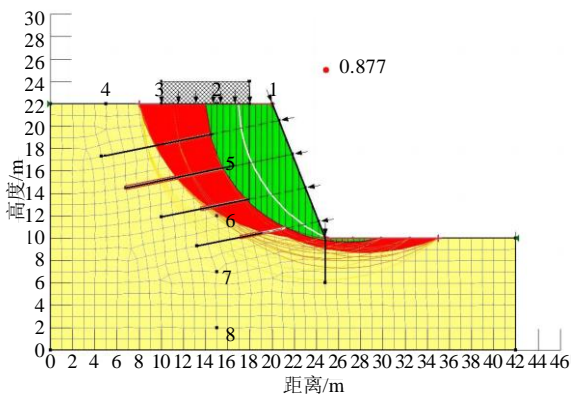
通过 Geo-Studio 软件中的 QUAKE 模块可以得到地震作用下边坡的稳定性安全系数,如图7所示,地震峰值加速度为0.05g、0.20g和0.40g时边坡的潜在滑移面云图,由图7可以看出随着地震峰值加速度的增大,边坡的潜在滑移面逐渐增多。图8为不同地震峰值加速度下边坡的临界滑移面所对应的安全系数变化曲线,由图8可知框架锚杆加固边坡的安全系数随着地震峰值加速度的增大而逐渐减小,整体下降趋势接近线性变化,当地震峰值加速度从0增大到0.40g的过程中,边坡安全系数从1.186逐渐降低到0.877。为了进一步分析地震振动过程中安全系数的变化情况,如图9所示为在地震振动过程中,边坡临界滑移面的安全系数随时间的变化曲线。由图9可知在地震作用过程中,边坡的安全系数呈现波动变化,安全系数在地震作用过程中并非一个定值,表明采用单一安全系数来评价地震作用下边坡的稳定性偏于不安全。随着地震峰值加速度的增大,安全系数整体有着减小的趋势,边坡稳定性逐渐降低,当地震峰值加速度分别为0.10g、0.20g、0.30g时,安全系数的最小值均出现在2.3s附近,由于安全系数在地震作用过程中呈现波动变化,表明在地震作用时间到2.3s时该边坡的稳定性最低。



(a) 0.05g



(b) 0.20g



(c) 0.40g

图7 边坡临界滑移面云图

Fig. 7 Nephogram of critical slip surface of slope

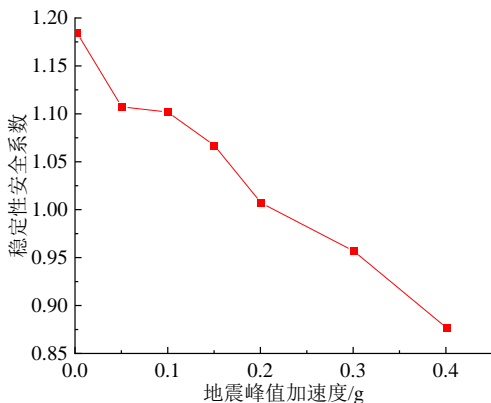


图8 安全系数变化曲线

Fig. 8 Variation curve of safety factor

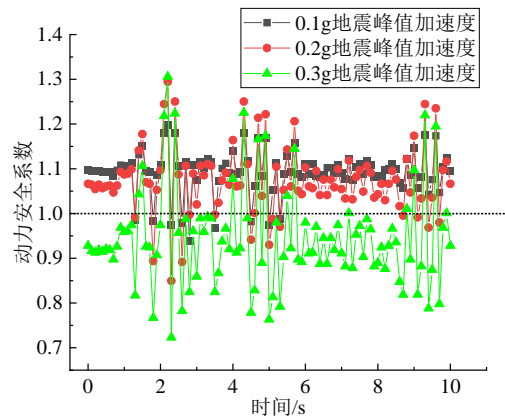


图9 边坡安全系数时程曲线

Fig. 9 Time history curves of safety factor

### 3.3 地震作用下边坡可靠度分析

#### (1) 随机变量参数的影响

本文主要考虑土体黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  以及水平地震峰值加速度  $S_a$  的随机性,如表3所示为地震峰值加速度为  $0.20g$  且其变异系数为  $0.2$  时,考虑不同随机变量时的计算结果。由表3可知在地震作用下考虑的随机参数越多,边坡的失效概率越大,稳定性越差。当仅考虑黏聚力  $c$  的随机性时,边坡的安全系数为  $1.102$ ,可靠指标为  $0.801$ 。然而当同时考虑黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$  和水平地震峰值加速度  $S_a$  的随机性时,边坡的安全系数减小到  $1.008$ ,可靠指标则减小为  $0.638$ ,表明在边坡工程中考虑的随机参数越多,安全系数越小,可靠度也越低,因此为保障边坡的稳定性和安全性,有必要充分考虑各参数的随机性。此外由表3还可知,地震峰值加速度  $S_a$  的随机性对边坡稳定性及可靠度的影响明显大于土体参数  $c$ 、 $\varphi$  对边坡稳定性及可靠度的影响,因此在地震作用下对边坡的稳定性及可靠度进行分析时,需着重考虑地震峰值加速度  $S_a$  的影响。

#### (2) 变异系数的影响

变异系数  $\delta_x$  可由式(2)计算得到:

$$\delta_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $\delta_x$  为随机变量  $X$  的变异系数;  $\sigma_x$  为随机变量  $X$  的标准差;  $\mu_x$  为随机变量  $X$  的平均值。

黏聚力和内摩擦角的变异系数范围较小<sup>[18]</sup>,本文黏聚力和内摩擦角变异系数范围分别取  $0.05 \sim 0.3$  和  $0.05 \sim 0.25$ ,而地震峰值加速度的变异系数大,本文则取  $0.1 \sim 0.9$ <sup>[19]</sup>。由式(2)可知变异系数为随机变量的标准差与平均值的比值,本文则在随机变量平均值不变的情况下,通过改变标准差的取值范围来控制变异系数的取值范围。图10~

13 为边坡的失效概率和可靠指标随各随机参数在不同变异系数下的变化曲线, 由图 10~13 可知随机参数的变异系数对边坡的可靠度有着明显影响, 随着边坡各随机参数变异系数的增大, 边坡的失效

概率增大, 可靠指标减小, 而地震峰值加速度  $S_a$  的变异系数对边坡可靠度的影响最为明显, 其次为内摩擦角  $\varphi$ , 而土体黏聚力  $c$  的变异性对边坡的可靠度影响最小。

表 3 考虑不同随机参数的计算结果

Table 3 Calculation results considering different random parameters

随机变量	安全系数	失效概率/%	可靠指标	平均安全系数	最小安全系数	最大安全系数
$c$	1.102	21.2	0.801	1.138	1.012	1.413
$\varphi$	1.087	21.7	0.784	1.137	0.985	1.313
$S_a$	1.051	23.1	0.738	1.116	0.977	1.325
$c、\varphi$	1.058	23.3	0.730	1.108	0.974	1.337
$S_a、c$	1.031	23.8	0.713	1.125	0.956	1.319
$S_a、\varphi$	1.025	24.3	0.708	1.083	0.970	1.312
$S_a、c、\varphi$	1.008	26.3	0.638	1.067	0.967	1.308

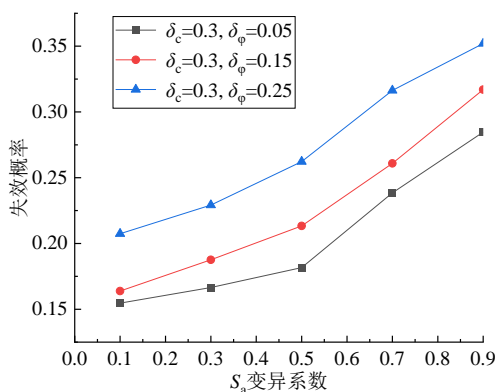


图 10 不同  $\delta_\varphi$  与  $S_a$  变异系数下失效概率变化曲线  
Fig. 10 Variation curves of failure probability under different  $\delta_\varphi$  and  $S_a$  coefficients of variation

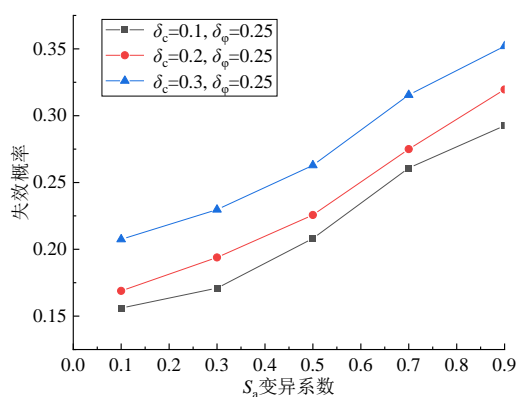


图 11 不同  $\delta_c$  与  $S_a$  变异系数下失效概率变化曲线  
Fig. 11 Variation curves of failure probability under different  $\delta_c$  and  $S_a$  coefficients of variation

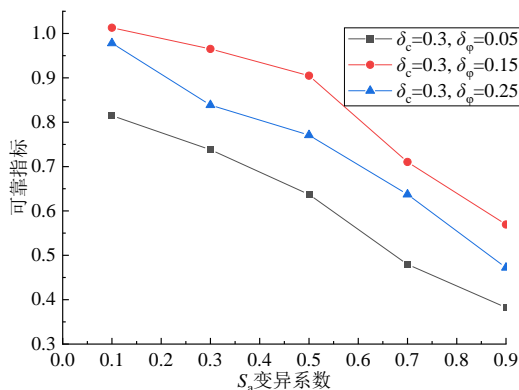


图 12 不同  $\delta_\varphi$  与  $S_a$  变异系数下可靠指标变化曲线  
Fig. 12 Variation curves of reliability index under different  $\delta_\varphi$  and  $S_a$  coefficients of variation

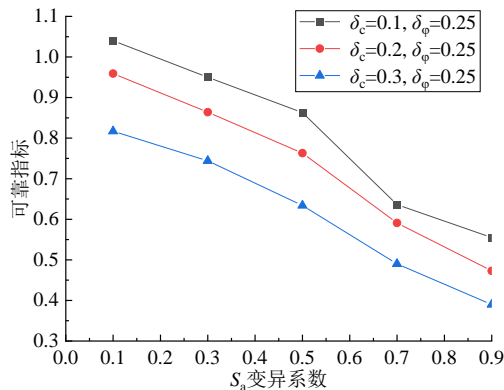


图 13 不同  $\delta_c$  与  $S_a$  变异系数下可靠指标变化曲线  
Fig. 13 Variation curves of reliability index under different  $\delta_c$  and  $S_a$  coefficients of variation

为了进一步分析地震峰值加速度变异系数对边坡可靠度的影响, 如表 4 所示为地震峰值加速度  $S_a$  为 0.20g 时不同地震峰值加速度变异系数下边坡的稳定性和可靠度的计算结果。由表 4 可知随着地震峰值加速度变异系数从 0.1 逐渐增大到 0.9 的过程中, 边坡的安全系数呈现逐渐减小的趋势, 失效

概率明显增大, 可靠指标则明显减小。表明随着地震峰值加速度变异性的增大, 边坡的稳定性和可靠度均出现减小的趋势, 地震峰值加速度的变异性对边坡可靠度的影响更为明显, 加之地震峰值加速度的变异性相比于内摩擦角和黏聚力更大, 因此在对地震作用下边坡可靠度进行分析时, 不能忽略地震



峰值加速度变异性的影响。

(3) 土体参数相关性的影响

为了研究土体参数相关性对边坡的稳定性及可靠度的影响,根据文献[19-21],本文将c与φ的相关系数取为-0.8~-0.2进行计算,如表5所示为通过Geo-Studio软件得到的不同土体相关系数下的计算结果,由表5可知随着土体参数相关系数从0减小到-0.8的过程中,安全系数从1.008减小到1.003,变化并不明显,但边坡的失效概率从26.3%减小到21.5%,可靠指标从0.638增大到0.789,表

明内摩擦角和黏聚力的相关性对边坡的安全系数影响较小,但对边坡可靠度的影响比较明显,在边坡安全系数变化不大的情况下,边坡仍有破坏的可能,所以仅采用单一安全系数来评价边坡的稳定性和可靠度时存在一定缺陷,在安全系数满足要求时,边坡仍有失稳破坏的可能。图14~15所示分别为失效概率和可靠指标随相关系数变化曲线,由图14~15可知,随着土体参数相关性的减小,边坡的失效概率逐渐减小,可靠指标则逐渐增大,表明土体参数的相关性越小,边坡的可靠度越高。

表4 不同Sa变异系数的计算结果(0.20g)

Table 4 Calculation results of variation coefficients with different Sa (0.20g)

Sa 变异系数	安全系数	失效概率/%	可靠指标	平均安全系数	最小安全系数	最大安全系数
0.9	1.014	35.2	0.382	1.017	0.906	1.293
0.7	1.017	31.6	0.480	1.026	0.925	1.302
0.5	1.021	26.3	0.638	1.067	0.967	1.308
0.3	1.031	23.0	0.739	1.033	0.905	1.313
0.1	1.041	20.8	0.816	1.054	0.968	1.438

表5 不同土体参数相关系数的计算结果

Table 5 Calculation results of correlation coefficients with different soil parameters

相关系数	安全系数	失效概率/%	可靠指标
0.0	1.008	26.3	0.638
-0.2	1.005	25.1	0.671
-0.3	1.005	24.2	0.700
-0.4	1.005	23.2	0.763
-0.5	1.004	22.7	0.749
-0.6	1.004	22.1	0.769
-0.7	1.003	21.8	0.778
-0.8	1.003	21.5	0.789

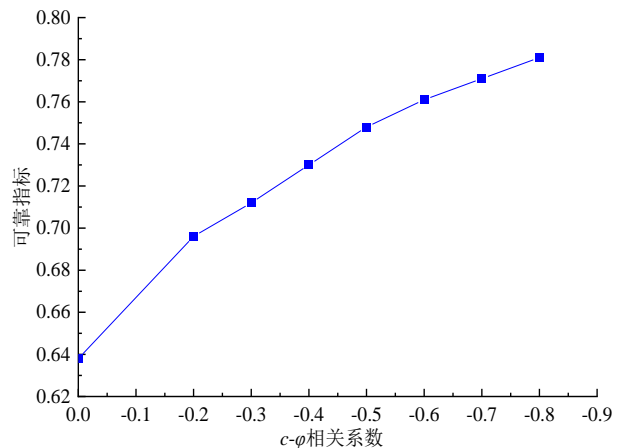


图15 可靠指标变化曲线

Fig. 15 Variation curve of reliability index

(4) 不同地震加速度峰值的影响

如表6所示为地震峰值加速度分别修正为0.05g、0.10g、0.15g、0.20g、0.30g、0.40g时Geo-Studio软件计算得到的边坡安全系数、失效概率和可靠指标,其中黏聚力和内摩擦角的大小和分布均按2.2节所述进行取值。由表6可知在地震峰值加速度Sa增大到0.15g过程中,边坡的最小安全系数从1.023减小到0.869,而边坡的失效概率从0增大到14.0%,尽管边坡安全系数的变化较为明显,但由于失效概率较小,边坡可认为仍处于安全状态,随着Sa的进一步增大,边坡的可靠指标快速下降,失效概率明显增大,当Sa增大到0.40g时,虽然边坡的安全系数变化并不明显,但边坡的失效概率增大到95.5%,此时边

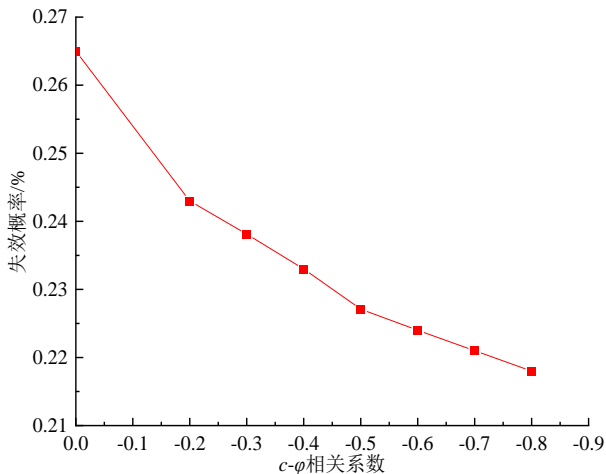


图14 失效概率变化曲线

Fig. 14 Variation curve of failure probability

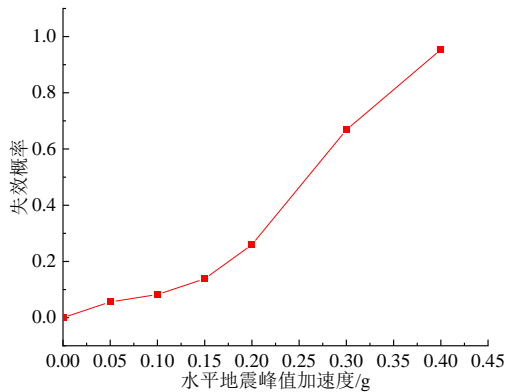
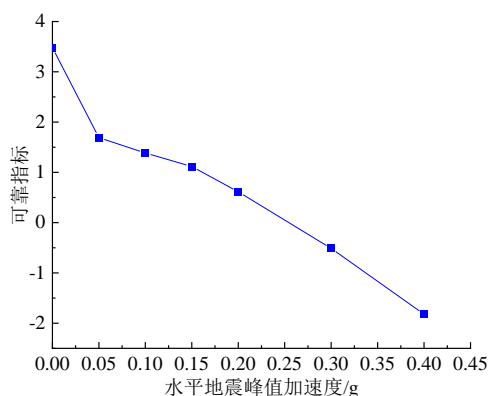
坡已经处于危险状态。图16~17为不同 $S_a$ 下失效概率与可靠指标的变化曲线。由图16~17可知,随着地震峰值加速度 $S_a$ 的改变,边坡的失效概率与可靠指标有明显的非线性变化趋势,失效概率会随 $S_a$ 的增大而增大,可靠指标则随着 $S_a$ 的增大而减小,当

$S_a$ 在 $0\sim 0.15g$ 范围内时,失效概率和可靠指标的变化较为平缓,而当 $S_a > 0.15g$ 时,边坡的可靠指标快速下降,失效概率明显上升,边坡开始变得危险。由此可见, $S_a$ 越大的地震作用会对边坡产生更为明显的破坏,因此需特别注意在高烈度区的边坡设计。

表6 不同地震峰值加速度的计算结果

Table 6 Calculation results of different seismic peak acceleration

$S_a$	安全系数	失效概率/%	可靠指标	平均安全系数	最小安全系数	最大安全系数
0.00	1.186	0.0	3.490	1.129	1.023	1.493
0.05g	1.108	5.6	1.705	1.109	0.917	1.482
0.10g	1.103	8.3	1.384	1.112	0.865	1.416
0.15g	1.068	14.0	1.114	1.077	0.869	1.373
0.20g	1.008	26.3	0.638	1.067	0.967	1.308
0.30g	0.957	66.9	-0.487	0.968	0.932	1.287
0.40g	0.877	95.5	-1.796	0.957	0.917	1.193

图16  $S_a$ 与失效概率关系曲线Fig. 16 Curve of the relationship between  $S_a$  and failure probability图17  $S_a$ 与可靠指标关系曲线Fig. 17 Curve of the relationship between  $S_a$  and reliability index

## 4 结论

借助工程实例,采用有限元软件对黄土加固边坡的稳定性及可靠度进行分析,得到的结论如下:

(1) 框架锚杆加固边坡在地震作用下的位移呈波动变化,位移最大值发生在边坡坡顶附近,随着距离边坡坡顶的位置越近位移越大,且边坡位移随地震峰值加速度的增大而明显增大。

(2) 稳定性方面,在地震振动过程中边坡的安全系数呈波动变化,随地震峰值加速度的增大,边坡安全系数逐渐减小,边坡的最小安全系数发生在地震作用时间内的某一时刻,采用单一安全系数来评价地震作用下边坡的稳定性偏于不安全。

(3) 随机变量的个数、变异性和相关性对框架锚杆加固边坡的稳定性及可靠度有着明显影响,考虑的随机变量个数越多,边坡的稳定性和可靠度越差,当仅考虑单个随机参数时,地震峰值加速度对边坡的稳定性及可靠度的影响最为明显。在变异性方面,地震峰值加速度的变异性最大时对边坡的稳定性和可靠度影响也同样最为明显,因此需特别注意地震作用对边坡的影响。随机参数的相关性方面,随着土体参数相关性的减小,边坡的失效概率逐渐减小,可靠指标则逐渐增大,表明土体参数的相关性越小,边坡的可靠度越高。

(4) 地震峰值加速度对边坡的稳定性和可靠度有着明显影响,当地震峰值加速度相对较小时,边坡的可靠指标变化并不明显,但随着地震峰值加速度逐渐增大到某一值时,尽管此时边坡的安全系数变化并不明显,但边坡的可靠指标开始急速下降,使得边坡处于危险状态。因此在地震作用下考虑边坡的设计加固时,需注意地震峰值加速度的影响,特别是在高烈度区,地震峰值加速度对边坡可靠度的影响十分明显。



## 参考文献

- [1] 邓东平, 李亮, 赵炼恒. 地震作用下边坡稳定性分析的拟静力法研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(10): 3578-3588.  
DENG Dong-ping, LI Liang, ZHAO Lian-heng. Research on quasi-static method of slope stability analysis during earthquake[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(10): 3578-3588.
- [2] 祁生文, 伍法权, 严福章, 等. 岩质边坡动力反应分析[M]. 北京: 科学出版社, 2007.  
QI Sheng-wen, WU Fa-quan, YAN Fu-zhang, et al. Dynamic Response Analysis of Rock Slope[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [3] 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 Ying-ren, YE Hai-lin, HUANG Run-qiu. 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.
- [4] 邓东平, 李亮. 基于滑动面搜索新方法对地震作用下边坡稳定性拟静力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(1): 86-98.  
DENG Dong-ping, LI Liang. Based on a new method of searching for sliding surface pseudo-static stability analysis of slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 86-98.
- [5] 年廷凯, 刘凯, 黄润秋, 等. 地震作用下锚固土质边坡稳定性解析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2009-2016.  
NIAN Ting-kai, LIU Kai, HUANG Run-qiu, et al. Solutions for stability of anchored earth slopes subjected to seismic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(11): 2009-2016.
- [6] 傅方, 赵成刚, 李伟华, 等. 地震荷载作用下非饱和土边坡稳定性数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 408-414.  
FU Fang, ZHAO Cheng-gang, LI Wei-hua, et al. Numerical simulation of stability of unsaturated soil slopes under earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 408-414.
- [7] 陈晓利, 李杨, 洪启宇, 等. 地震作用下边坡动力响应的数值模拟研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1899-1908.  
CHEN Xiao-li, LI Yang, HONG Qi-yu, et al. Numerical simulation of earthquake effects on rock slope[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1899-1908.
- [8] 谭儒蛟, 李明生, 徐鹏逍, 等. 地震作用下边坡岩体动力稳定性数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊2): 3986-3992.  
TAN Ru-jiao, LI Ming-sheng, XU Peng-xiao, et al. Numerical simulation of dynamic stability of slope rock mass under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3986-3992.
- [9] 言志信, 曹小红, 张刘平, 等. 地震作用下黄土边坡动力响应数值分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 610-614.  
YAN Zhi-xin, CAO Xiao-hong, ZHANG Liu-ping, et al. Numerical analysis of loess slope dynamic response under earthquake[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 610-614.
- [10] 彭宁波, 言志信, 刘子振, 等. 地震作用下锚固边坡稳定性数值分析[J]. 工程地质学报, 2012, 20(1): 44-50.  
PENG Ning-bo, YAN Zhi-xin, LIU Zi-zhen, et al. Numerical analysis on stability of slopes supported with bolts under earthquake[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(1): 44-50.
- [11] 张江伟, 李小军, 王晓明, 等. 土质边坡地震稳定性状态判定方法研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2096-2102.  
ZHANG Jiang-wei, LI Xiao-jun, WANG Xiao-ming, et al. Method for judging seismic stability state of soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2096-2102.
- [12] ABDEL MASSIH D Y, SOUBRA A H, EL-HACHEM E. Slope stability analysis in seismic areas by a reliability approach[C]//The Fourth International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. Thessaloniki, 2007.
- [13] ABDEL MASSIH D Y, SOUBRA A H, HARB J, et al. Dynamic slope stability analysis by a reliability-based approach[C]//The Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. San Diego, 2010.
- [14] 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 Jian-hua, DONG Xu-guang, ZHU Yan-peng. 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.

[15] JIN M K, NICHOLAS S. Probabilistic evaluation of seismically induced permanent deformation of slopes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 44: 67-77.

[16] 叶帅华,朱彦鹏. 框架预应力锚杆支护边坡地震稳定性分析方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 1994-1998. YE Shuai-hua, ZHU Yan-peng. Stability analysis of slope supported by frame with pre-stressed anchors under earthquake[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 1994-1998.

[17] 时铁磊. 地震作用下框架锚杆加固边坡稳定性可靠度分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019. SHI Yi-lei. The reliability analysis of the slope stability reinforced by frame anchors under seismic action[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.

[18] 李萍,黄丽娟,李振江,等. 甘肃黄土高边坡可靠度研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 811-817. LI Ping, HUANG Li-juan, LI Zhen-jiang, et al. Study of reliability for loess high slopes in Gansu area[J]. Rock

and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 811-817.

[19] 周志军,杨志勇,邹群,等. 基于验算点法的地震力作用下边坡可靠性分析[J]. 中国公路学报, 2016, 29(11):18-24, 41.

ZHOU Zhi-jun, YANG Zhi-yong, ZOU Qun, et al. Reliability analysis of slope under seismic load based on checking point method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(11):18-24, 41.

[20] 谭忠盛,高波,关宝树. 隧道围岩抗剪强度指标  $c$ 、 $\tan\phi$  的概率特征[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 760-762.

TAN Zhong-sheng, GAO Bo, Guan Bao-shu. The probabilistic property of shear strength parameters  $c$  and  $\tan\phi$  for rock mass around the tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 760-762.

[21] 赵宇飞,汪小刚,杨健. 基于二维正态分布的岩土参数 Bayes 方法优化[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(2): 93-96.

ZHAO Yu-fei, WANG Xiao-gang, YANG Jian. Bayes method of optimizing geotechnical parameters based on two-dimension normal distribution[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2006, 4(2): 93-96.



(上接第 214 页)

National Energy Administration. Code for Seismic Design of Hydraulic Structures of Hydropower Project: NB 35047-2015[S]. Beijing: China Water and Power Press, 2015.

[8] TAN S A, TJAHYONO S, OO K K. Simplified plane-strain modeling of stone-column reinforced ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(2): 185-194.

[9] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. Formulation and verification of the Hardening-Soil Model[C]// Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Amsterdam, 1999.

[10] BRINKGREVE R. Selection of soil models and parameters for geotechnical engineering application[C]// Geo-frontiers Congress: Soil Properties and Modeling Geo-Institute of ASCE. Austin, 2005.

[11] 王卫东,王浩然,徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2290.

WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-hua. Experimental study of parameters of hardening soil model for numerical analysis of excavations of foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2283-2290.

[12] BRINKGREVE R B J, BROERE W. Plaxis Material Models Manual[M]. Delft, 2006: 49-60.

[13] 徐中华,王卫东. 敏感环境下基坑数值分析中土体本构模型的选择[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 258-264, 326.

XU Zhong-hua, WANG Wei-dong. Selection of soil constitutive models for numerical analysis of deep excavations in close proximity to sensitive properties[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 258-264, 326.