

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201909030

地震作用下土石混合体边坡稳定性分析研究*

刘康琦^{1,2}, 刘红岩^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 目前对边坡进行的动力分析多是针对土质边坡或岩质边坡, 忽略了土石混合体边坡这一特殊岩土体边坡, 而少有的研究中都是将土石混合体边坡简化为等效均质土坡, 忽略了块石的存在。利用数字图像处理技术, 建立某一实际土石混合体边坡的细观结构模型, 利用有限差分软件FLAC3D的动力分析模块分析对比了等效均质土坡与土石混合体边坡在地震荷载作用下的变形及稳定性。结果表明: 土石混合体边坡在地震作用下首先在坡脚处出现剪切破坏, 随作用时间增加逐渐在顶部产生拉裂破坏, 最终形成完整的破坏带; 土石混合体边坡的滑面受石块位置制约, 具有“绕石现象”; 在相同地震荷载作用下, 土石混合体边坡破坏区贯通比等效均质土坡慢, 最终产生的永久位移比等效均质土坡产生的永久位移小, 块石的存在增加了土石混合体边坡的抗剪强度, 提高了其稳定性。

关键词: 数字图像处理; 土石混合体边坡; 地震; 稳定性分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0224-07

Stability Analysis of Soil-rock Mixture Slope under Earthquake

LIU Kangqi^{1,2}, LIU Hongyan^{1,2}

(1. College of Engineering & Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology of Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: At present, the dynamic analysis of slope mainly focuses on soil slope or rock slope, but ignores soil-rock mixture slope which is a special geomaterial slope. However, few studies have simplified the soil-rock mixture slope into equivalent homogeneous soil slope, ignoring the existence of block rock. By using digital image processing technology, a meso-structure model of an actual soil-rock mixture slope is established, and the deformation and stability of equivalent homogeneous soil slope and soil-mixture slope under seismic load are analyzed and compared by using the dynamic analysis module of FLAC3D software. The following conclusions are drawn: the soil-rock mixture slope first appears shear failure at the foot of the slope under earthquake; then gradually develops tensile failure at the top with the increase of action time; finally forms a complete failure zone. The sliding surface of the soil-rock mixture slope is restricted by the position of the rock and has the phenomenon called stone-winding phenomenon. Under the same seismic load, the failure zone of soil-rock mixture slope is slower than that of the equivalent soil slope, and the final permanent displacement is smaller than that of the equivalent soil slope. The existence of block stones increases the shear strength and stability of soil-rock mixture slope.

Keywords: digital image technology; soil-rock mixture slope; earthquake; stability analysis

* 收稿日期: 2019-09-13; 修回日期: 2020-02-08

基金项目: 国家级地质灾害应急防治项目(2019)、四川省自然资源科技计划项目(KJ-2018-23)资助

作者简介: 刘康琦(1996—), 男, 硕士研究生。主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: lkq1104@126.com

引言

地震是自然界中边坡失稳的一个重要诱因,2008年汶川地震引发了大量的山体滑坡、泥石流等地质灾害,造成了严重的人员伤亡和财产损失^[1],我国山脉众多、地震频发,地震作用下边坡的稳定性分析已成为岩土工程界的一个重要课题。

已有学者对边坡在地震作用下的响应机理与变形特征进行了大量的研究。徐光兴等^[2]通过大型振动台模型试验研究了土质边坡的动力特性与动力响应,发现边坡在地震作用下的损伤具有累积效应,同时沿坡高方向,边坡对加速度有放大作用,另研究了不同参数对边坡动力响应的影响规律。郑颖人等^[3]利用FLAC3D软件对土坡进行动力分析,研究了边坡在动力作用下的破坏机理。言志信等^[4]研究了某三级黄土边坡的动力响应规律。J.Y.Liu等^[5]研究了地震荷载下多年冻土路基边坡的变形及强度特性。L.Lu等^[6]提出了一种适用于分析地震荷载下受高水位影响的边坡的数值模拟方法。岩质边坡方面,谭儒蛟等^[7]利用离散单元法研究了地震作用下边坡岩体的动力响应规律及稳定性,并考虑了超静孔隙水压力的作用。M.L.Gali等^[8]利用FLAC3D软件研究了不同地震波和不同参数对印度某岩石边坡动力响应的影响,并评价了其在当地地震荷载强度下的稳定性。姜彤等^[9]研究了节理岩质边坡在不同频率、不同波形地震波下的变形时程响应。S.Srikrishnan等^[10]分别利用Slope/W和FLAC3D软件研究了露天矿边坡在地震作用下的动力响应。X.Y.Jiang等^[11]利用极限平衡法,提出了一种基于Hoek-Brown破坏准则的岩体边坡稳定性分析方法。A.L.Che等^[12]研究了节理岩体中波的传播对边坡稳定性的影响。另有学者对深部岩石边坡^[13]、露天矿节理边坡^[14]、顺层断续节理岩质边坡^[15]、岩质高边坡^[16]等在地震作用下的动力响应和稳定性进行了分析。

土石混合体边坡是自然界中广泛存在的一种介于土质边坡与岩质边坡的特殊岩土体边坡,内部块石的存在使土石混合体边坡具有显著的不均匀性和不连续性。徐文杰等^[17-19]的研究表明土石混合体是一种力学性质介于土和岩石之间的特殊介质,其力学性质明显不同于单一的土体或岩石。然而目前关于土石混合体边坡在地震作用下稳定性问

题的研究则较少。目前仅有徐文杰等^[17]基于附加质量法,利用ABAQUS分析研究了水下土石混合体边坡的稳定性问题。J.J.Han等^[20]利用FLAC3D软件评价了某土石混合体边坡的稳定性。然而上述研究中都忽略了块石空间分布及土石物理力学性质的不同对边坡变形及稳定性造成的影响。由于其物理力学性质的复杂性,使用数值模拟对土石混合体边坡进行稳定性分析是一种切实有效的方法。本文首先利用数字图像处理技术建立某一真实土石混合体边坡的细观结构模型,然后在有限差分软件FLAC3D中分析其变形破坏机理并对其稳定性进行评价。

1 土石混合体边坡动力分析模型

利用数字图像处理技术建立某一真实土石混合体边坡细观结构模型,在有限差分软件FLAC3D中选择合适的边界条件及阻尼,选取Loma-Prieta大地震的加速度时程曲线用于动力分析。

1.1 计算模型

数字图像处理是指借助于计算机来处理数字图像,已在岩土工程界中得到广泛应用^[19,21]。一幅图像在计算机中可用一个二维数组 $f(x,y)$ 表示,其中 (x,y) 表示空间或平面坐标, f 代表图像在该点处的灰度值。本文利用Python+OpenCV对如图1所示的真实土石混合体边坡进行处理,首先将图像转化为灰度图,使用自适应阈值二值化对其进行二值化处理,并对其进行边界光滑及矢量化处理,得到如图2所示的土石混合体边坡模型,然后将模型导



图1 实际的土石混合体边坡图像

Fig.1 Photograph of a soil-rock mixture slope

入AutoCAD中面域化然后利用ANSYS划分网格,为消除边界效应使用均质土体对边坡进行延拓,最后导入FLAC3D,生成模型如图3所示,其中土石比为14:1。

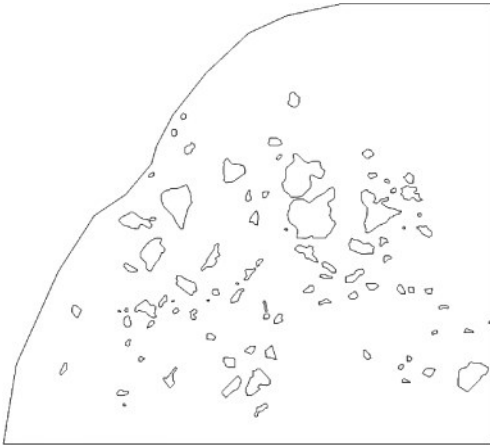


图2 矢量化土石混合体边坡模型
Fig.2 Model of soil-rock mixture slope

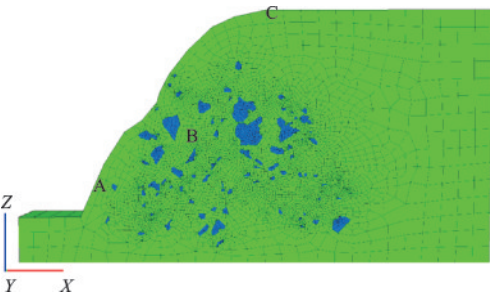


图3 FLAC3D中生成的土石混合体边坡模型
Fig.3 Model of soil-rock mixture slope in FLAC3D

在FLAC3D中设置土与石块为弹塑性材料,服从Mohr-Coulomb强度准则,其物理力学参数见表1。

表1 物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters

岩土体	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	剪切模 量/Pa	体积模 量/Pa	黏聚力/ Pa	内摩擦 角/ $(^\circ)$
土体	2 000	4e6	6.8e6	3.5e4	24
块石	2 500	6e8	1e9	6e5	38

1.2 动力荷载

动力分析时的边界条件底部设置为黏性边界,两侧设置为自由场边界,阻尼设置为局部阻尼,阻尼系数为0.125。边坡破坏一般是由地震波中的横波造成的,在模型底部输入Loma-Prieta大地震的横波,将加速度峰值(PGA)设置为0.25g,

相当于Ⅷ级地震烈度,并进行滤波和基线校正处理,地震持时20 s,其加速度时程曲线如图4所示。

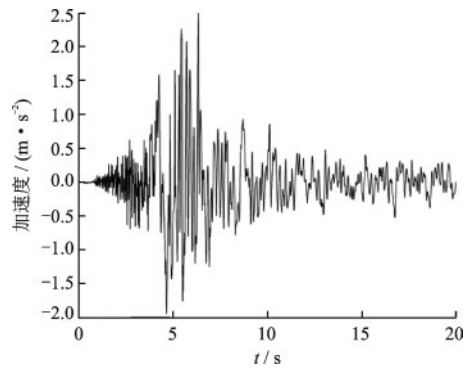


图4 地震波加速度时程曲线
Fig.4 Time-history of the acceleration of earthquake

当模型底部为黏性边界时,需要将加速度时程转化为速度时程,如图5所示。然后通过式(1)、(2)将速度时程转化为应力时程:

$$\sigma_n = -2(\rho C_p)v_n \quad (1)$$

$$\sigma_s = -2(\rho C_s)v_s \quad (2)$$

式中, σ_n 、 σ_s 分别为法向应力和切向应力; ρ 为介质密度; C_p 、 C_s 分别为P波和S波的波速; v_n 、 v_s 分别为模型边界上法向和切向的分量。

通过在边坡底部设置监测点,得到的加速度时程曲线与输入地震波的加速度时程曲线吻合良好,说明地震波的输入是正确的。

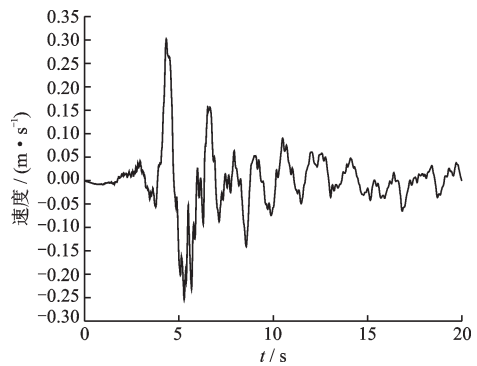


图5 地震波速度时程曲线
Fig.5 Time-history of the velocity of earthquake

2 土石混合体边坡变形及破坏机理

2.1 边坡破坏形式及滑带位置的确定

在进行边坡破坏分析时,可以通过在FLAC中

查看单元塑性区云图、剪应变增量云图等方式确定边坡的破坏形式和滑带位置。图6为不同时刻土石混合体边坡的塑性状态云图,当地震波达到第一个峰值时,只在边坡底部发生了剪切破坏,顶部尚未形成拉破坏区;当地震作用5.5 s时边坡底部继续发生剪切破坏,受破坏的单元增多,顶部部分单元发生拉破坏,但尚未与剪破坏区贯通;地震作用到6.5 s时,边坡顶部已发生大量拉破坏,且已于剪破坏区贯通。这说明,在受到地震作用时,边坡首先在底部发生剪切破坏,随着作用时间的增加,顶部开始形成拉破坏区,并逐渐扩大,与剪破坏区相连形成贯通的破坏区。

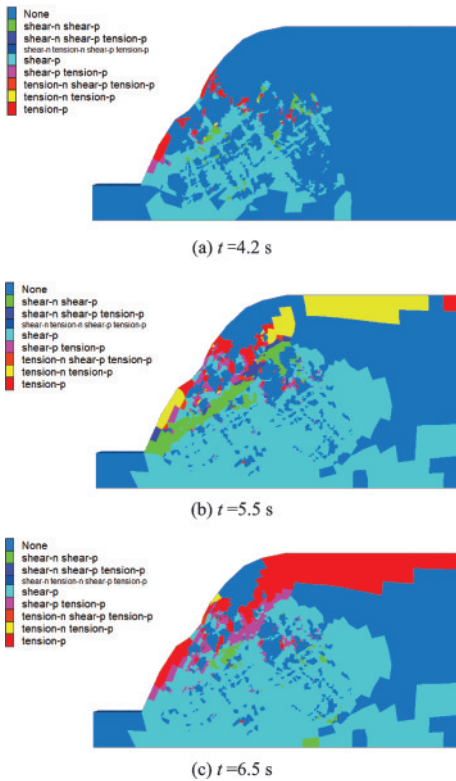


图6 不同时刻土石混合体边坡塑性云图
Fig.6 Plastic state contour of the SRM slope at different times

图7为地震作用结束时土石混合体边坡的剪应变增量云图。可以看到由于块石的存在,边坡内部存在多条滑带并具有明显的“绕石”现象,这是土石混合体边坡特有的破坏模式。从另一个角度来看,将该边坡看作部分严重风化的岩质边坡,滑带部位恰好可以看作是石块与土形成的类软弱夹层(图8),进一步证明了结构面是岩质边坡破坏的控制因素。另外,剪应变增量从坡脚向坡顶发展,但是并没有贯通,这是由于在边坡顶部形成了拉裂破坏

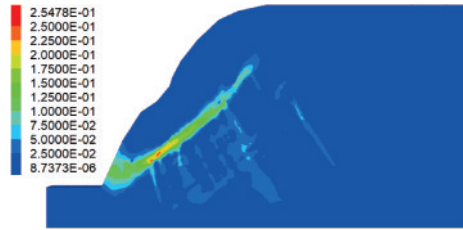


图7 地震作用结束时剪应变增量云图
Fig.7 Nephograms of shear strain increment of SRM slope at the end of the earthquake

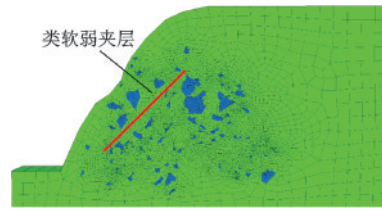


图8 土石混合体内部类软弱夹层
Fig.8 Soft interlayer in the SRM slope

带,其与剪破坏区域共同形成边坡的滑带,这与郑颖人等^[3]的结论一致,因此土石混合体边坡在地震作用下的破坏模式与一般均质土坡或岩质边坡一致,只不过其内部的剪切滑带形成受块石位置的控制。

2.2 等效均质土坡与土石混合体边坡破坏机理对比

由于块石的存在,使得土石混合体边坡具有复杂的内部结构特征,这是其与土质边坡最大的不同点。通过将相同地震荷载作用在等效均质土坡上,分析在地震作用下,两者破坏与变形机理的区别。图9为等效均质土坡在不同地震作用下的

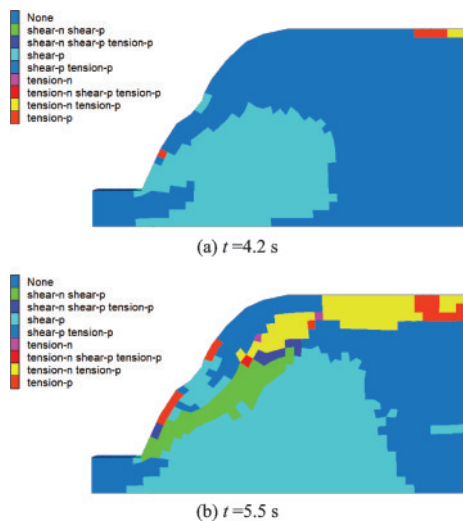


图9 不同时刻土质边坡塑性云图
Fig.9 Plastic state contour of the soil slope at different times

塑性云图。可以看到,当 $t=4.2\text{ s}$ 时,土石混合体边坡相较于纯土质边坡,其内部剪切破坏区存在“绕石现象”,呈现多滑动面现象;当 $t=5.5\text{ s}$ 时,等效均质土坡上部拉裂破坏区已经和由下向上发展的剪切破坏区贯通,说明在相同地震荷载作用下,土石混合体边坡要比等效均质土坡破坏的慢,稳定性更高。

2.3 等效均质土坡与土石混合体边坡加速度响应对比

为了探究在地震作用下土石混合体边坡与等效均质土坡动力响应方面的不同,选取边坡坡顶处监测其加速度时程曲线。对于均质土坡,坡顶处水平峰值加速度为 6.47 m/s^2 ,约为输入峰值加速度的2.588倍;对于土石混合体边坡,坡顶处水平峰值加速度为 5.88 m/s^2 ,约为输入峰值加速度的2.352倍。可见,块石的存在影响了地震波的传播。

3 土石混合体边坡稳定性分析

即使已经确定了土石混合体边坡在地震作用下的破坏带位置,但这并不足以判定边坡失稳破坏。一般情况下,边坡在地震作用结束后往往会产生永久位移,若该位移在地震结束后保持不变,则边坡并没有产生完全的失稳破坏;若地震结束后位移仍不断增加,则可以判定此时边坡已失稳破坏^[22]。在坡面、滑带以及坡顶各选择一个关键点A、B、C监测其水平位移。关键点的位置已在图3的计算模型中标出。图10为3个监测点的水平位移曲线,可以看到3个点的位移曲线的趋势一致,由于地震的作用,边坡产生了一定的永久位移,并且在地震作用结束后,3个关键点的位移仍在不断增加,由此可以判定该边坡在地震作用下已失稳破坏。通过自编强度折减法对土体和岩体的黏聚力和内摩擦角以一定系数进行折减计算,发现此时该土石混合体边坡在折减系数为0.92~0.95会有位移突变,即其安全系数为0.92~0.95。在相同地震荷载作用下等效均质土坡的位移曲线如图11所示,发现在地震作用结束时,等效均质土坡所产生的永久位移比土石混合体边坡产生的永久位移大,以坡面监测点为例,地震作用结束时,土质边坡永久位移为0.415 m,土石混合体边坡永久位移为0.268 m。

将峰值加速度(PGA)调整到0.2g后,发现等效

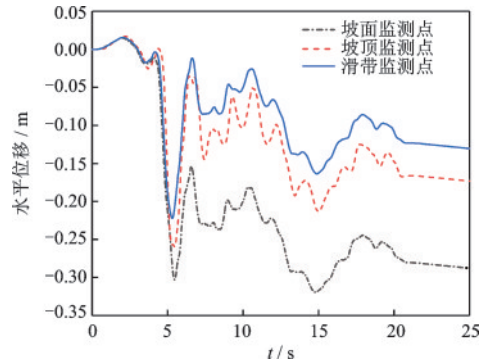


图10 土石混合体边坡关键点位移曲线

Fig.10 Displacement time-history at SRM slope's key points

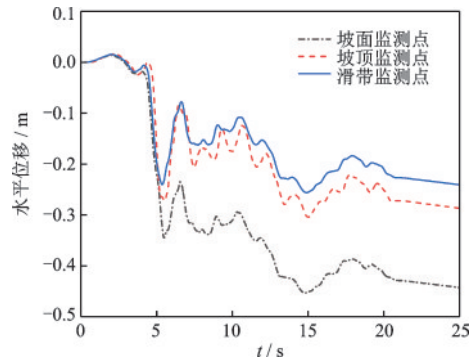


图11 土质边坡关键点位移曲线

Fig.11 Displacement time-history at soil slope's key points

均质土坡与土石混合体边坡均未发生破坏。如图12所示的监测点位移对比可知,地震作用结束后等效均质土坡坡面上的监测点永久水平位移为0.26 m,土石混合体边坡坡面上的监测点永久水平位移为0.16 m,说明在地震作用后,边坡在已变形破坏或者未变形破坏的情况下,土石混合体边坡产生的永久位移都比等效均质土坡小,这是因为块石的存在在一定程度上增加了土石混合体边坡的抗剪强度,提高了边坡的稳定性。

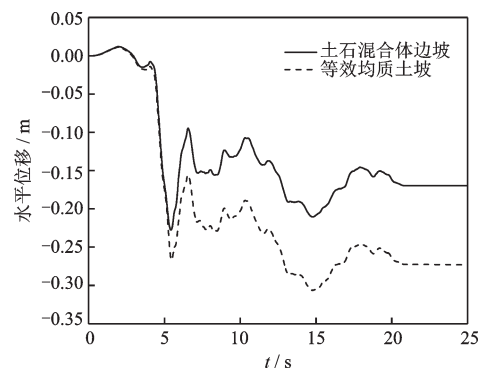


图12 坡面监测点位移对比

Fig.12 Displacement comparison of monitoring points

4 结 论

利用数字图像技术对某一真实土石混合体边坡进行处理,得到其细观结构模型,然后利用有限差分软件FLAC3D对其进行动力分析,得出以下结论:

(1) 土石混合体边坡在地震作用下首先在坡脚处产生剪切破坏,从坡脚向上发展,随地震作用的进行,逐渐在坡顶产生拉裂破坏,并形成贯通的破坏区。土石混合体边坡内部会产生“绕石”的滑带,在特定土石排列情况下会沿着“类软弱夹层”发展,在边坡破坏的情况下滑带并不会贯通,而是与边坡顶部的拉裂破坏共同形成边坡的破坏带。

(2) 在相同地震荷载作用下,土石混合体边坡内部塑性破坏区贯通需要的时间比等效均质土坡的长。土石混合体边坡内部剪切破坏区存在“绕石”现象。

(3) 在地震烈度为Ⅷ级的情况下,该土石混合体边坡在地震作用结束后位移仍不收敛,最终失稳破坏。相较于等效均质土坡,土石混合体边坡所产生的永久位移要小得多,内部块石的存在提高了土石混合体边坡的稳定性。

参考文献:

- [1] Yin Y P, Wang F W, Sun P. Landslide hazards triggered by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan, China[J]. Landslides, 2009, 6(2): 139-151.
- [2] 徐光兴,姚令侃,高召宁,等.边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 624-632.
- Xu G X, Yao L K, Gao Z N, et al. Large-scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 624-632. (in Chinese)
- [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 Y R, Ye H L, Huang R Q. 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. (in Chinese)

- [4] 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2): 610-614.
- Yan Z X, Cao X H, Zhang L P, et al. Numerical analysis of loess slope dynamic response under earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup2): 610-614. (in Chinese)
- [5] Liu J Y, Liu J K, Su Z Q, et al. Numerical simulation of roadbed slope under seismic action in permafrost regions [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2013, 5(5): 540-547.
- [6] Lu L, Wang Z J, Song M L, et al. Stability analysis of slopes with ground water during earthquakes[J]. Engineering Geology, 2015, 193: 288-296.
- [7] 谭儒蛟,李明生,徐鹏道,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2): 3986-3992.
- Tan R J, Li M S, Xu P X, et al. Numerical simulation of dynamic stability of slope rock mass under seismic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. 2009, 28(Sup2): 3986-3992. (in Chinese)
- [8] Gali M L, Arunakumari G. Seismic stability analysis of a himalayan rock slope[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43(6): 831-843.
- [9] 姜彤,刘远征,马瑾.节理岩质边坡地震时程响应分析[J].岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3938-3944.
- Jiang T, Liu Y Z, Ma J. Time history response analysis of jointed rock slope under seismic loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup2): 3938-3944. (in Chinese)
- [10] Srikrishnan S, John L P, Hemant A. Impact of earthquake on mining slopes—a numerical approach[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 7(12): 5193-5208.
- [11] Jiang X Y, Cui P, Liu C Z. A chart-based seismic stability analysis method for rock slopes using hoek-brown failure criterion [J]. Engineering Geology, 2016, 209: 196-208.
- [12] Che A L, Yang H K, Wang B, et al. Wave propagations through jointed rock masses and their effects on the stability of slopes[J]. Engineering Geology, 2013, 201: 45-56.
- [13] Valentin S G, Erik E, Jeffrey R M, et al. On the seismic response of deep-seated rock slope instabilities — Insights from numerical modeling [J]. Engineering Geology, 2015, 193: 1-18.
- [14] Azizabadi H R M, Mansouri H, Fouche O. Coupling of two methods, waveform superposition and numerical, to model blast vibration effect on slope stability in joint-

- ed rock masses[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 61: 42-49.
- [15] 卞康, 刘建, 胡训健, 等. 含顺层断续节理岩质边坡地震作用下的破坏模式与动力响应研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 3029-3037.
- Bian K, Liu J, Hu X J, et al. Study on failure mode and dynamic response of rock slope with non-persistent joint under earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 3029-3037. (in Chinese)
- [16] Zhou Z J, Ren C N, Xu G J, et al. Dynamic failure mode and dynamic response of high slope using shaking table test[J]. Shock & Vibration, 2019, 2019: 1-19.
- [17] 徐文杰, 谭儒蛟, 杨传俊. 基于附加质量的土石混合体边坡地震响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3168-3175.
- Xu W J, Tan R J, Yang Ch J. Research on seismic response of soil-rock mixture slope based on added mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup1): 3168-3175. (in Chinese)
- [18] Xu W J, Xu Q, Hu R L. Study on the shear strength of soil - rock mixture by large scale direct shear test. [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(8): 1235-1247.
- [19] Xu W J, Yue Z Q, Hu R L. Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 749-762.
- [20] Han J J, Liu B X, Zhang D L. Stability analysis of S-RMS under seismic loading [J]. Advanced Materials Research, 2011, 261-263: 1336-1340.
- [21] Chen S, Yue Z Q, Tham L G. Digital Image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(6): 939-957.
- [22] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋, 等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 173-180.
- Zheng Y R, Ye H L, Huang R Q, et al. Study on the seismic stability analysis of a slope[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 173-180. (in Chinese)
- (本文责编: 赵霞)



(上接第 215 页)

- [10] 刘宽, 叶万军, 高海军, 等. 干湿环境下膨胀土力学性能劣化的多尺度效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2148-2159.
- Liu K, Ye W J, Gao H J, et al. Multi-scale effects of mechanical property degradation of expansive soils under drying-wetting environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2148-2159. (in Chinese)
- [11] Liu K, Hu W P, Gao C, et al. Energy dissipation of an infinite damping beam supported by saturated poroelastic halfspace[J]. Physica Scripta, 2021, 96(5): 055220.
- [12] Suzuki M, Nakashita A, Tsukuda K, et al. Applicability of clinker ash as fill material in steel strip-reinforced soil walls[J]. Soils and Foundations, 2018, 58: 16-33.
- [13] Wang H, Yang G, Wang Z, et al. Static structural behavior of geogrid reinforced soil retaining walls with a deformation buffer zone [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(3): 374-379.
- [14] Liu K, Ye W J, Jing H J. Shear strength and damage characteristics of compacted expansive soil subjected to wet-dry cycles: a multi-scale study[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14: 2866.
- [15] Shinde A L, Mandal J N. Behavior of reinforced soil retaining wall with limited fill zone parameter [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25(6): 657-672.
- [16] Wu J T, Wang K H, MHesham E L. Naggar dynamic soil reactions around pile-fictitious soil pile coupled model and its application in parallel seismic method[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 110: 44-56.