

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231009002

文章编号: 1672-9331(2024)01-0100-10

引用格式: 付亚伟. 地震和降雨共同作用下植生混凝土生态护坡稳定性分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1): 100-109.

Citation: FU Yawei. Stability analysis of planting concrete ecological slope protection under the coupling effect of earthquake and rainfall [J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 100-109.

地震和降雨共同作用下植生混凝土生态护坡 稳定性分析

付亚伟

(广西桂中工程咨询有限公司, 广西 柳州 545000)

摘要:【目的】探究地震和降雨共同作用下公路植生混凝土生态护坡的防护效果。【方法】以广西壮族自治区河池-都安高速公路某植生混凝土生态边坡为研究对象, 基于颗粒流模拟软件(2-dimensional particle flow code, PFC^{2D})分析大变形和实时追踪裂隙的优势, 通过 PFC^{2D}建立了植生混凝土生态护坡数值模型, 并以动力学边界条件和颗粒流耦合原理来实现地震和降雨工况, 以探究植生混凝土在不同工况下对边坡的加固作用。【结果】在地震单独作用下, 有、无生态护坡的边坡都出现裂隙贯通坡体的现象。但值得注意的是, 前者仅在中部和底部出现小规模危岩体, 而后者形成了大规模的危岩体。在地震和降雨的共同作用下, 前者在坡脚处出现浅层失稳, 边坡整体稳定性较好, 后者在坡顶出现了局部失稳, 最终导致整体失稳。【结论】植生混凝土生态护坡可以有效降低坡面在地震和降雨作用下的破坏程度, 保护坡体不出现大规模的失稳, 但坡体在坡脚处会出现局部破碎和滑移, 因此在此处须加强防护。

关键词: 植生混凝土; 生态护坡; 边坡稳定性; 颗粒流模拟; 地震; 降雨

中图分类号: U417.9

文献标志码: A

Stability analysis of planting concrete ecological slope protection under the coupling effect of earthquake and rainfall

FU Yawei

(Guangxi Guizhong Engineering Consulting Co., Ltd., Liuzhou 545000, China)

Abstract: [Purposes] This study aims to investigate the protective effects of planted concrete ecological slopes under the combined influence of earthquakes and rainfall. [Methods] Taking a planted concrete ecological slope on the Hechi-Du'an Expressway in Guangxi Zhuang Autonomous Region as the research object, this study utilized the 2-dimensional particle flow code (PFC^{2D}) software for granular flow simulation. The advantages of analyzing large deformations and real-time tracking of cracks were leveraged. A numerical model of the planted concrete ecological slope was established using PFC^{2D}, employing dynamic boundary conditions and the particle-flow-fluid-coupling principle to simulate seismic and rainfall conditions. The reinforcement effect of planted concrete on slopes under different conditions was investigated. [Findings] Under the sole action of

收稿日期: 2023-10-09; 修回日期: 2023-10-17; 接受日期: 2023-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378440); 湖南省自然科学基金杰出青年基金项目(2023JJ10045)

通信作者: 付亚伟(1972—)(ORCID: 0009-0005-3609-4103), 男, 高级工程师, 主要从事路桥工程方面的研究。

E-mail: fyw3355@163.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

earthquake, the slope with and without ecological slope protection has the phenomenon of cracks penetrating through the slope body. However, it is noteworthy that the former exhibited only small-scale unstable rock masses in the middle and bottom, while the latter formed large-scale unstable rock masses. Under the combined influence of earthquakes and rainfall, the former experienced shallow instability at the base, maintaining overall stability, whereas the latter exhibited local instability at the top, ultimately leading to overall instability. [Conclusions] Planted concrete ecological slopes effectively reduce the extent of slope damage under the combined influence of earthquakes and rainfall, preventing large-scale instability. However, localized fragmentation and sliding may occur at the base of the slope, necessitating reinforcement measures in this area.

Key words: planting concrete; ecological slope; slope stability; particle flow simulation; earthquake; rainfall

Foundation item: Project (52378440) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2023JJ10045) supported by Hunan Provincial Natural Science Foundation Outstanding Youth

Corresponding author: FU Yawei (1972—)(ORCID:0009-0005-3609-4103), male, senior engineer, research interest: road and bridge engineering. E-mail: fyw3355@163.com

0 引言

植生混凝土护坡是将边坡的工程防护与植被保护进行有机结合的新型边坡生态防护技术^[1-2]。地震和降雨是导致边坡失稳的两大主要诱因^[3],由于地震后常伴随着持续性降雨和间歇性余震,因此亟须开展地震和降雨作用下生态护坡稳定性分析,揭示植生混凝土护坡失稳灾变机理。

万春芳^[4]研究了河道边坡的不同生态护坡技术,对不同生态护坡的适用性进行了总结。陈欣然等^[5]根据自主研发的新型复合植生层生态护坡技术,探究了生态护坡在极端环境下的可行性。申更新等^[6]从生态护坡的技术造价方面出发,评价了植生混凝土相较于传统护坡的优势。上述研究对生态护坡的适用性和经济性进行了评价,肯定了生态护坡在边坡防护上的应用价值。

离散元是一种基于颗粒单元的数值计算方法,由于其可以模拟介质分裂和分离,已被多数学者用于分析边坡在特定条件下的变形和稳定性问题。贾唯龙等^[7]通过颗粒流模拟软件(2-dimensional particle flow code, PFC^{2D})复现了边坡在地震作用下的失稳过程,并进一步探究了边坡失稳机理。胡训健等^[8]通过颗粒流程序研究了岩质边坡在地震作用下的破坏过程并探讨了岩桥和节理对岩石破碎的影响。在此基础上,周文东

等^[9]以受载裂隙岩体为对象,探究了其在地震作用下的声发射特性,并基于离散元再现了岩体裂隙发育过程。李其在等^[10]基于PFC^{2D}探讨了在地震作用下抗滑桩对顺倾节理岩质边坡的加固特性,发现抗滑桩可降低结构面对边坡的不利影响。以上研究基于离散元揭示了地震作用下边坡破坏的过程和机理,在此基础上,部分学者进一步讨论了降雨和地震耦合作用下边坡的稳定性分析。许经圆^[11]发现地震对边坡稳定性的影响较降雨影响更为显著,在此基础上,ZHANG等^[12]利用数值计算研究了地震和降雨作用对加筋土边坡稳定性的影响,发现降雨和地震耦合作用对边坡稳定性影响远大于降雨和地震单独作用。FU等^[13]以某实际滑坡为例,采用极限平衡法和Newmark法分析了边坡在震后降雨作用下的稳定性,为边坡抗震稳定性分析提供了理论依据。除数值模拟和理论分析外,YIN等^[14]则通过室内模型试验发现降雨和地震共同作用对边坡稳定性影响显著,并探讨了在雨水入渗下边坡变形失稳机理。在此基础上,张忠传等^[15]发现静水压力是导致边坡失稳的主要因素,并且峰值加速度为0.3g时,边坡出现塑性区贯通趋势。

综上所述,目前学者们就植生混凝土护坡技术的工程应用主要针对水利河道边坡、天然边坡,较少关注其在高速公路边坡工程的应用,关于地震和降雨共同作用对植生混凝土护坡稳定性影响

的研究更是鲜见报道。

为此,本研究以广西壮族自治区河池-都安高速公路某植生混凝土生态护坡工程为背景,借助PFC^{2D}分析坡体大变形、实时追踪裂隙的优势,对地震和降雨共同作用的植生混凝土生态护坡的稳定性进行数值模拟研究,探究植生混凝土护坡在地震和降雨共同作用下坡体变形和裂隙演化规律,论证植生混凝土护坡的公路工程适用性。研究成果对完善公路边坡生态防护技术和提升公路边坡观赏性具有深远意义。

1 地震和降雨共同作用下植生混凝土生态护坡数值模型

1.1 模型参数

本研究依托广西壮族自治区河池-都安高速公路工程,选取该公路左侧某植生混凝土生态护坡为研究对象,为便于研究,将其进行一定简化,不考虑边坡分级台阶设置,其示意图如图1所示。

该生态护坡坡高为36 m,坡率为1:1.25,坡顶长35 m,坡脚向左侧延伸30 m,到底部边界距离为20 m,生态护坡左侧边界高为56 m,底部长110 m。该生态边坡坡面铺砌有正八面体植生混凝土砌块,厚0.1 m。生态护坡岩土体和植生混凝土砌块力学参数参考工程资料及相关文献进行综合取值^[16-18](见表1)。

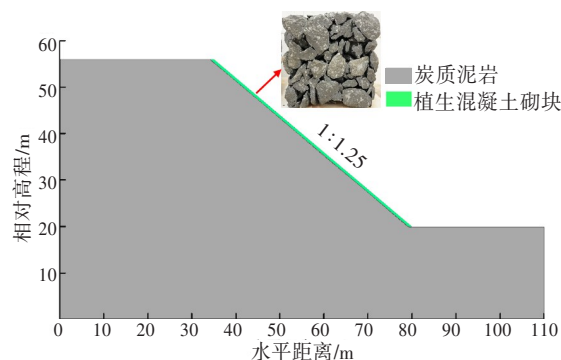


图1 植生混凝土生态护坡示意图

Fig. 1 Schematic profile of ecological slope protection of planted concrete

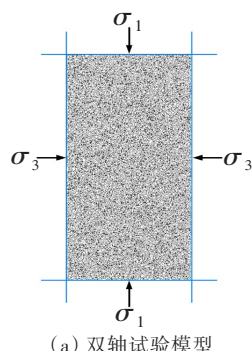
表1 边坡岩土体及植生混凝土生态护坡力学参数

Table 1 Mechanical parameters of slope rock and soil mass and vegetation concrete ecological slope protection

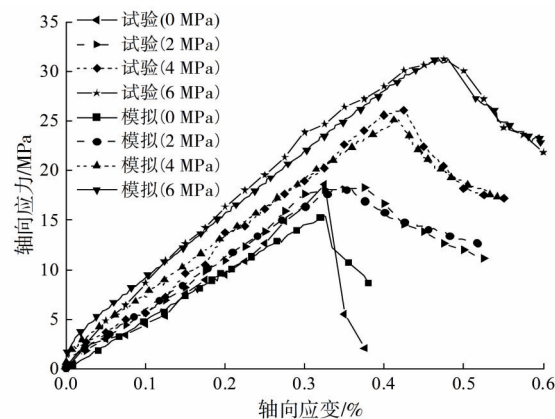
生态护坡材料	天然重度/ ($\text{kN}\cdot\text{cm}^{-3}$)	饱和重度/ ($\text{kN}\cdot\text{cm}^{-3}$)	单轴抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	泊松比	渗透系数/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
炭质泥岩	21.4	23.3	15.7	4.8	32.2	3.24	0.21	4.5×10^{-7}
植生混凝土砌块	24.0	25.1	22.0	20.4	47.0	4.41	0.20	2.0×10^{-2}

1.2 参数标定

本文采用双轴试验来进行参数标定,计算模型如图2(a)。数值模型为宽100 mm,高200 mm的双轴试样,颗粒半径0.02~0.03 mm,总共产生颗粒数量为13 172,炭质泥岩颗粒接触采用平行黏结模型来模拟岩土体^[21],由于植生混凝土属于人造石,性质倾向于岩石,故参照岩石模型采用平行黏结模型。炭质泥岩双轴压缩试验与室内试验下的应力-应变曲线如图2(b)所示。



(a) 双轴试验模型



(b) 炭质泥岩数值模拟和室内试验应力-应变曲线

图2 双轴试验模型及炭质泥岩应力-应变曲线

Fig. 2 Biaxial test model and stress-strain curve of carbonaceous mudstone

从图2(b)可以发现,室内试验的应力-应变曲线结果与数值模拟很接近。

为了获得炭质泥岩合理的细观参数,将数值计算结果与室内试验结果进行对比,通过多次参

数调整后,当数值计算结果与室内试验结果相对误差小于10%时结束调试,并记录此时的颗粒细观参数,见表2。

表2 数值模型细观参数

Table 2 Mesoscopic parameters of numerical model

微观参数	炭质泥岩	植生混凝土砌块
孔隙率	0.13	0.13
颗粒密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2 140	2 400
颗粒弹性模量/GPa	6.5	8.9
颗粒刚度比	1	1
接触弹性模量/GPa	7.9	10.8
接触刚度比	1.5	1.5
接触抗拉强度/MPa	9.4	14.4
接触黏聚力/MPa	13.8	19.6
接触内摩擦角/($^{\circ}$)	32.2	47.0

1.3 地震-降雨共同作用下颗粒流实现方法

在地震波实现方法上,根据文献[19-20]提出的地震作用下颗粒流模拟边界条件设置,可知边界颗粒接触力与颗粒运动速度的关系如下:

$$F = -2R\rho Cv \quad (1)$$

式中: F 为颗粒接触力; R 为颗粒半径; ρ 为颗粒密度; C 为波速; v 为颗粒运动速度。

在流固耦合方法上,PFC^{2D}内设置有计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的模块,其流体控制方程可表示^[19]:

$$q = ka^3 \frac{\Delta p}{L} \quad (2)$$

式中: q 为流量; k 为渗透系数; Δp 为两孔隙网格之间的压力差; a 为通道开度。

在 Δt 时间内,流体流动导致的孔隙水压力变化可以通过流体的体积压缩模量来计算。对于单个孔隙,其有 N 条流体通道,则总流量为 Σq ,孔隙水压力的变化 ΔP 可由式(3)表示。

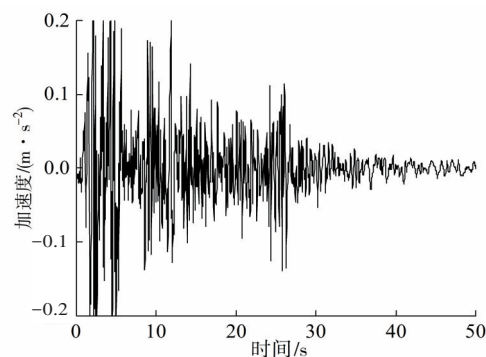
$$\Delta P = \frac{K_f}{V_d} (\Sigma q \Delta t - \Delta V_d) \quad (3)$$

式中: K_f 为流体的压缩模量; V_d 为孔隙体积; ΔV_d 为孔隙体积变化; Δt 为时间间隔。

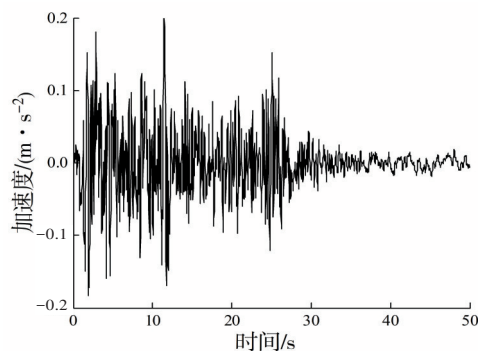
1.4 模拟工况及边界条件

本研究数值模拟中考虑先发生地震后产生降雨的工况对设计坡面有、无生态护坡两种情况进行对比分析,其他模拟条件设置一致。在地震工况设计中,根据《中国地震动参数区划图》(GB

18306—2015)^[21],该公路路堑边坡段抗震设防烈度达到7度,设计基本地震加速度为 $0.15g$,选用经典Elcentro波南北(NS)向和东西(EW)向,分别调整其加速度振幅为 $0.15g$,以模拟水平向和垂直向的入射波荷载,地震波加速度曲线如图3所示,传播方向自下而上,选取地震波波动区间较大的前30 s作为地震的持续时间。



(a) Elcentro波NS向



(b) Elcentro波EW向

图3 Elcentro波加速度曲线

Fig. 3 Elcentro wave acceleration curve

结合当地历年降雨资料及相关文献^[22-23],选取降雨强度为75 mm/d(暴雨),降雨时长为1 h。

根据所选模拟工况建立如图4所示的颗粒离散元模型,在坡表自上而下依次布置3个位移监测点来监测边坡岩土体在地震和降雨作用下的位移规律。为模拟动力学边界条件,本文根据式(1)、(2)采用颗粒边界条件,将地震波转化为力加载到颗粒边界上,不固定边界的位移。

在PFC^{2D}中,可根据前文所述的颗粒流流固耦合方法来实现降雨入渗的影响,通过划分流体网格单元,使渗透力以体力的方式作用在单元内的颗粒上来对岩土体进行流固耦合计算,用强度折减来模拟水对岩土体的弱化,通过自编的Fish语言,对标定值进行实时替换。

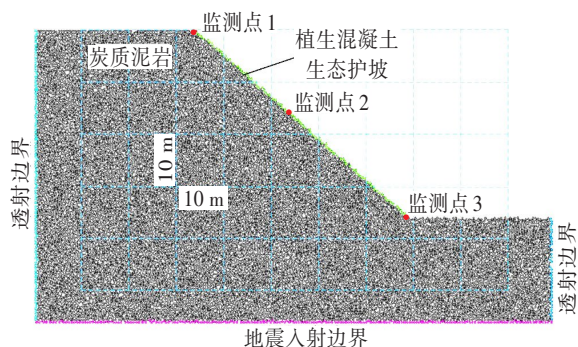


图4 地震和降雨作用下植生混凝土生态护坡数值模型
Fig. 4 Particle flow model of ecological slope protection with planted concrete under earthquake and rainfall

此处的岩土体主要为广西壮族自治区的炭质泥岩,这种岩石遇水易崩解,强度劣化严重。此外,由于本文主要探讨公路边坡,未考虑地下水的影响。而且考虑到模拟计算效率等因素,本文设置网格长和宽均为10 m,在降雨工况开始前,重新建立墙体边界,约束模型边界颗粒位移,重新设置网格外颗粒的强度。

对于数值模拟岩质边坡滑坡问题,岩体阻尼参数对计算结果的影响较大,在颗粒流中一般采用局部阻尼来模拟,其值一般为0~0.7,在滑坡模拟中通常会忽略颗粒间相互摩擦和碰撞,阻滑力处于较低水平,因此本文计算阻尼采用0.1^[20]。

2 地震和降雨共同作用下植生混凝土生态护坡稳定性分析

2.1 地震作用下有、无生态护坡的坡体变形与裂隙演化对比分析

图5为地震作用下有、无生态护坡的坡体变形与裂隙随时间的演化对比示意图。由图5可知,地震发生10 s后,坡体内会产生贯通裂隙,而生态护坡会使裂隙产生的位置发生改变,当公路边坡有生态护坡时,坡面部位只有坡脚处产生了少量裂隙,而无生态护坡时,坡面顶端部位岩土体出现开裂现象。地震20 s后,有生态护坡的边坡坡面中部和底部的裂隙继续发育,岩土体较为破碎,而无生态护坡时,坡面顶部岩土体已经呈现出大范围的破碎状,坡体稳定性降低。地震30 s后,地震作用停止,有生态护坡的边坡在坡面中部和底部形成了小范围的危岩,有可能发生失稳,而无生态护坡的边坡坡面顶部岩土体极为破碎,形成了大规模的危岩,随时可能发生失稳。

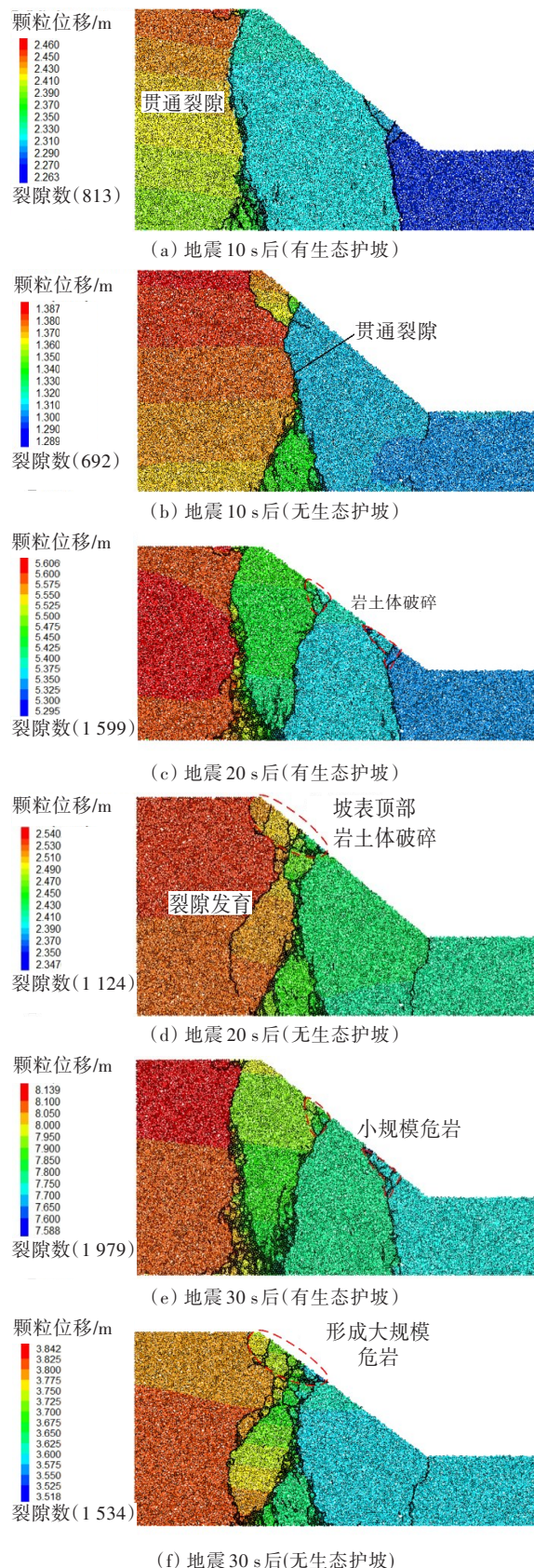


图5 地震作用下有、无生态护坡的坡体变形与裂隙演化示意

Fig. 5 Slope deformation and fracture evolution with or without ecological slope protection under earthquake action

从整体上看,在地震作用下,生态护坡对边坡坡面的防护较为有效,仅在小范围内出现岩土体破碎现象,虽然裂隙数量较无生态护坡的边坡要高,但其破坏部位主要位于坡体底部,对坡面影响较小。产生上述情况的原因主要是植生混凝土护坡中的植物根系起到了很好的固土连接作用,阻碍了坡体表层裂纹的扩散。另外,由于植生混凝土砌块对坡体的反压作用,进一步阻碍了大规模危岩的形成,降低了坡体发生大规模失稳的概率。

有、无生态护坡边坡坡表监测点的水平、竖向位移随地震时间的变化曲线分别如图6、图7所示,数值模型水平位移向右为正,竖向位移向上为正。

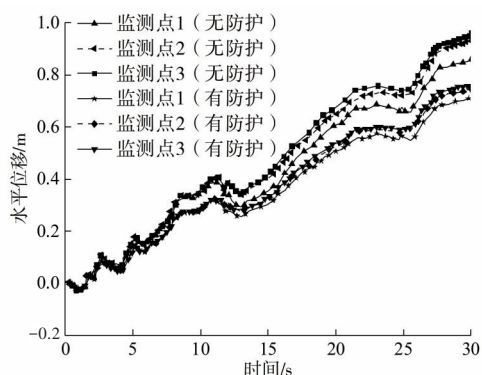


图6 地震作用下护坡坡表监测点水平位移响应

Fig. 6 Horizontal displacement response of monitoring points of slope protection surface under earthquake action

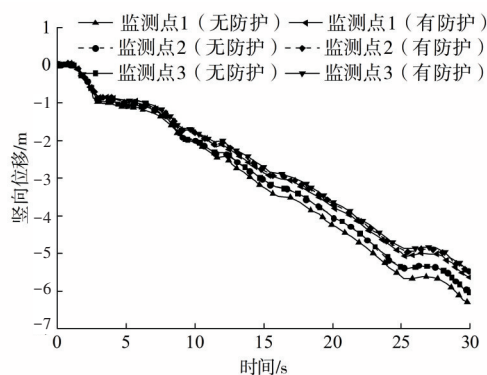


图7 地震作用下护坡坡表监测点竖向位移响应

Fig. 7 Vertical displacement response of monitoring points of slope protection surface under earthquake action

由图6可知,在发生地震0~30 s过程中,监测点位移值出现来回波动的情况,但总体位移值呈增长趋势。对于监测点水平位移,其在12 s后开始出现差值,且随地震时间的增加呈增大趋势,这表明坡体的裂缝宽度进一步增大。当地震结束

后,有生态护坡的坡体各监测点水平位移差值如下:监测点1和监测点2的差值为4.1 cm,监测点2和监测点3的差值为1.4 cm;而无生态护坡的坡体各监测点水平位移差值如下:监测点1和监测点2的差值为8.0 cm,监测点2和监测点3的差值为2.0 cm,这说明在地震作用下生态护坡可有效减小坡面开裂程度。

由图7可知,对于监测点竖向位移,有生态护坡的边坡监测点位移差值在地震12 s时出现,而无生态护坡的边坡监测点位移差值却在地震9 s时就已经出现,且在地震结束后,有生态护坡的坡体各监测点竖向位移差值如下:监测点1和监测点2的差值为13.0 cm,监测点2和监测点3的差值为4.0 cm;而无生态护坡的坡体各监测点竖向位移差值如下:监测点1和监测点2的差值为25.0 cm,监测点2和监测点3的差值为7.0 cm,这表明在地震作用下生态护坡能有效对坡面进行防护。有、无生态护坡坡体位移数据变化的原因主要是植生混凝土砌块对坡体的反压作用和植物根系的固土作用。当地震发生时,由于植物根系对岩土体的团聚和砌块的预压力,部分地震波的冲击被抵消,进而阻碍了坡体的进一步位移。

2.2 地震和降雨共同作用下坡体变形与裂隙演化分析

为探究地震和降雨共同作用下植生混凝土边坡的稳定性,本研究设置先地震后降雨的极端工况,开展有、无生态护坡的坡体变形与裂隙演化分析,结果如图8所示。

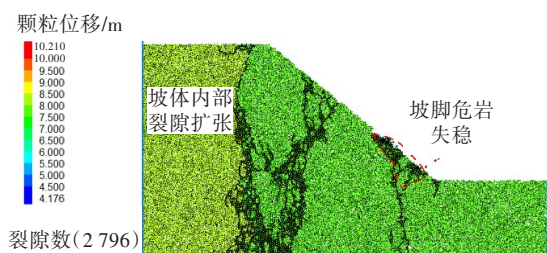
由图8(a)可知,当降雨时间步长为200 000时,有生态护坡的边坡坡脚颗粒开始滑落,且坡体内裂隙数量增加,这表明地震造成的贯通裂隙为雨水入渗提供了通道,弱化了边坡岩土体强度,造成了坡脚危岩失稳,并使坡体内裂隙进一步扩张。

由图8(b)可知,当降雨时间步长为130 000时,无生态护坡的边坡坡面顶部危岩失稳,大量颗粒滑落,且同样出现了坡内裂隙扩张的现象。

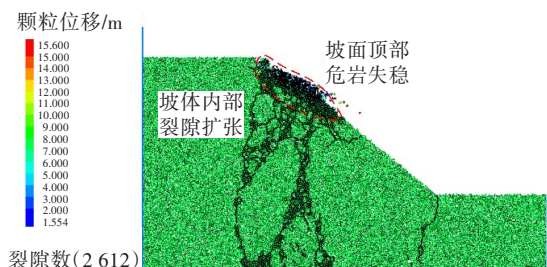
由图8(c)可知,当降雨时间步长为500 000时,有生态护坡的边坡坡脚浅层岩土体滑出,但由于坡体上部岩土体较为完整,整体边坡并未出现进一步的滑移。这是因为40%~60%的雨水通过植生混凝土表面排走,其余的雨水则入渗到植生

混凝土中,为植物生长提供必要的水分,所以生态护坡降低了雨水在岩土体中的入渗量,起到了阻止雨水入渗的作用。另外,由于受重力势能的影响,坡表和坡内的雨水会在坡脚聚集,使坡脚形成暂态饱和区,从而引起该处岩土体强度劣化。

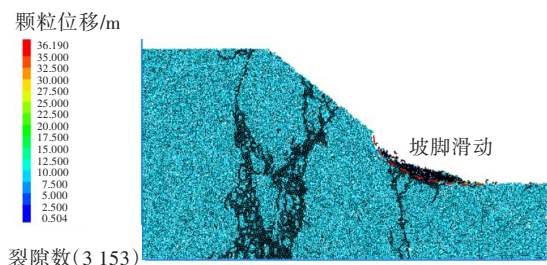
由图 8(d)可知,当降雨时间步长为 500 000 时,无生态护坡的边坡出现大规模滑移,主要是由



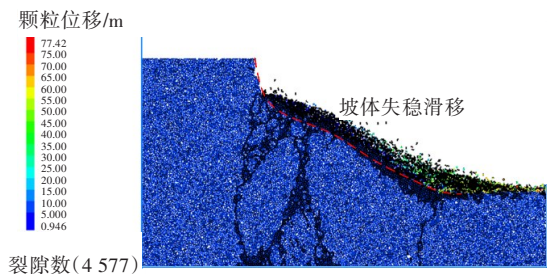
(a) 200 000 时间步长(有生态护坡)



(b) 130 000 时间步长(无生态护坡)



(c) 500 000 时间步长(有生态护坡)



(d) 500 000 时间步长(无生态护坡)

图 8 地震后降雨作用下有无生态护坡对比的坡体变形与裂隙演化示意

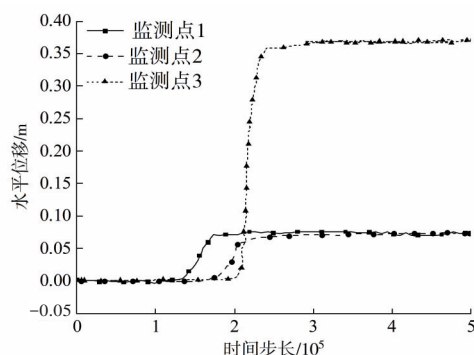
Fig. 8 Slope deformation and crack evolution with or without ecological slope protection under rainfall after earthquake

于坡面顶部裂隙较为发育,为雨水入渗提供了通道,坡面顶端失稳带动整个坡面岩土体发生滑移。从模拟结果可以看出,有生态护坡的坡体稳定性较无生态护坡的坡体稳定性要高,在地震和降雨的共同作用下,生态护坡可对坡面形成有效防护,降低灾害损失。

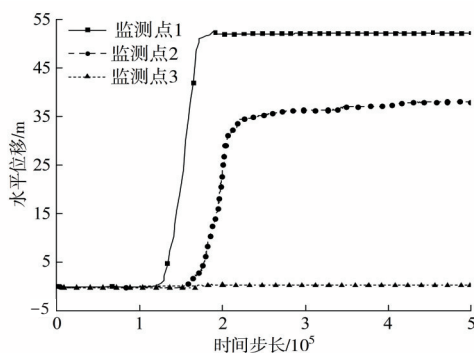
生态护坡边坡坡表监测点的水平、竖向位移随降雨时间步长的变化曲线分别如图 9、图 10 所示。

由图 9 可知,有生态护坡的边坡坡表监测点的水平位移较无生态护坡的边坡的要小得多。随降雨时间步长的增加,坡面顶部、中部、底部监测点均产生了不同程度的位移,且在坡脚处产生的位移较大。这是因为植生混凝土可以防止雨水对坡面的冲刷,并因其良好的排水作用,使雨水在坡脚汇集,进而使坡脚土体重度变大,所以监测点 3 产生了相对于监测点 1 和 2 的较大位移。

由图 10 可知,植生混凝土可以很好地抑制坡体的竖向位移,且顶部监测点先发生位移,随后撞击中部区域岩土体,带动其一起下滑,直到撞击模



(a) 有生态护坡



(b) 无生态护坡

图 9 地震后降雨作用下护坡坡表监测点水平位移响应

Fig. 9 Horizontal displacement response of monitoring point of slope protection surface under rainfall after earthquake

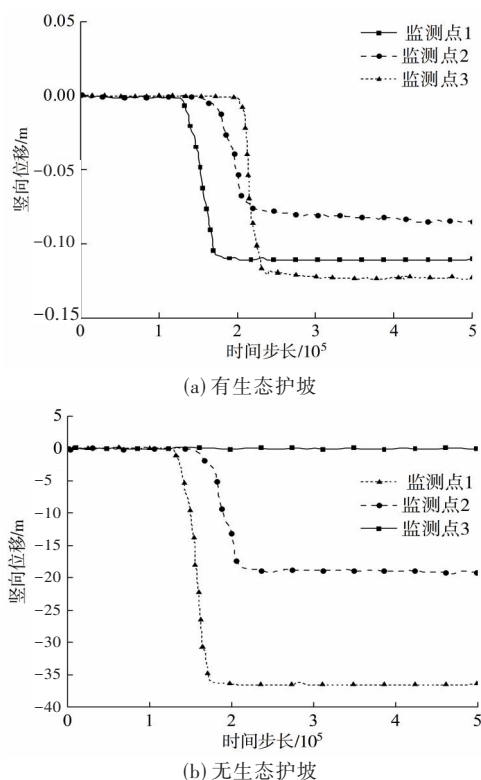


图10 地震后降雨作用下护坡坡表监测点竖向位移响应
Fig. 10 Vertical Displacement response of monitoring point of slope protection surface under rainfall after earthquake

型右侧边界停止。但值得注意的是,无生态护坡的坡体在坡脚处产生的竖向位移很小,这一点在图9中也有被观察到,这可能与坡体在地震作用下的破坏形式有关。由于无生态护坡的坡体在坡顶产生较大的破碎,在雨水和重力势能的影响下会产生较大的位移,这表现在图中的曲线跌落阶段。而植生混凝土生态护坡的植物根系固土和砌块反压很好地抵消了部分下滑力,故其没有产生较大位移。

3 结论

本研究以广西壮族自治区河池-都安高速公路某植生混凝土生态护坡为研究对象,通过对有、无生态护坡的坡体进行对比,采用颗粒离散元软件(PFC^{2D})研究了在地震和降雨作用下植生混凝土生态护坡的稳定性,得出以下结论:

1) 在地震和降雨的共同作用下,植生混凝土生态护坡可以有效降低坡面开裂程度,阻止雨水从坡面进一步渗入坡体,防止边坡出现大规模失稳情况。

2) 在地震单独作用下,公路边坡在植生混凝土护坡的防护下仅在坡面出现了局部岩体破碎,边坡稳定性较好。在地震和降雨的共同作用下,由于雨水在坡脚聚集,坡脚岩体强度劣化,率先破碎,从而产生坡体滑移,为此需要在坡脚增加排水设施,以提高植生混凝土生态护坡的防护效果。

[参考文献]

- [1] 张家明, 陈积普, 杨继清, 等. 中国岩质边坡植被护坡技术研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 1-7. DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.05.001.
ZHANG Jiaming, CHEN Jipu, YANG Jiqing, et al. Advances in biological protection of rock slopes in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33 (5) : 1-7. DOI: 10.13870/j. cnki. stbxb. 2019.05.001.
- [2] TANG W, MOHSENI E, WANG Z Y. Development of vegetation concrete technology for slope protection and greening [J]. Construction and Building Materials, 2018, 179: 605-613. DOI: 10.1016/j. conbuildmat. 2018.05.207.
- [3] 任德斌, 汪莹, 于世海. 边坡在降雨及地震作用下的稳定性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017, 33(3): 439-446. DOI: 10.11717/j.issn: 2095-1922.2017.03.07.
REN Debin, WANG Ying, YU Shihai. Analysis on stability of gravel slope under rainfall and earthquake [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2017, 33 (3) : 439-446. DOI: 10.11717/j. issn: 2095-1922.2017.03.07.
- [4] 万春芳. 河道生态护坡技术应用效果及固土技术研究[J]. 黑龙江水利科技, 2019, 47(11): 176-177, 222. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7596.2019.11.053.
WAN Chunfang. Study on application effect and soil consolidation technology of river ecological slope protection technology [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2019, 47(11): 176-177, 222. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7596.2019.11.053.
- [5] 陈欣然, 周述美. 高海拔地区复合植生层生态护坡技术现场试验研究[J]. 工程技术研究, 2023(14): 185-187. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2023.14.059.
CHEN Xinran, ZHOU Shumei. Research on field test of compound vegetation layer ecological slope protection technology in high altitude areas [J]. Engineering and Technological Research, 2023 (14) : 185-187. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2023.14.059.
- [6] 申更新, 陈巍, 车正伟. 植被混凝土护坡绿化技术造价分析及性价比分析[J]. 价值工程, 2018, 37(34): 198-200. DOI: 10.14018/j. cnki. cn13-1085/n. 2018.

- 34.079.
- SHEN Gengxin, CHEN Wei, CHE Zhengwei. Cost analysis and performance-to-price ratio analysis of vegetation concrete slope protection greening technology [J]. Value Engineering, 2018, 37 (34) : 198-200. DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2018.34.079.
- [7] 贾唯龙,常晁瑜,李佩茹,等.基于颗粒流方法的黄土地震滑坡数值模拟[J].地震学报,2022,44(4):677-687. DOI: 10.11939/jass.20210035.
- JIA Weilong, CHANG Chaoyu, LI Peiru, et al. Numerical simulation of earthquake-induced loess landslides based on particle flow method [J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44 (4) : 677-687. DOI: 10.11939/jass.20210035.
- [8] 胡训健,卞康,李鹏程,等.水平厚层状岩质边坡地震动力破坏过程颗粒流模拟[J].岩石力学与工程学报,2017,36(9):2156-2168. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0145.
- HU Xunjian, BIAN Kang, LI Pengcheng, et al. Simulation of dynamic failure process of horizontal thick-layered rock slopes using particle flow code [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (9) : 2156-2168. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2017.0145.
- [9] 周文东,王笑然,陈力,等.基于离散元模拟的受载裂隙岩体地震声学发射响应特征[J/OL].煤炭科学技术,2023:1-9[2023-10-10]. https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0208.
- ZHOU Wendong, WANG Xiaoran, CHEN Li, et al. Seismological acoustic emission response characteristics of loaded fractured rock bodies based on discrete element simulation [J/OL]. Coal Science and Technology, 2023: 1-9 [2023 - 10 - 10]. https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0208.
- [10] 李其在,周癸武,梁栋才,等.基于离散元法的抗滑桩加固顺倾节理岩质边坡抗震性能研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(5):52-62. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2023.05.008.
- LI Qizai, ZHOU Kuiwu, LIANG Dongcai, et al. Study on seismic performance of compliant jointed rocky slope reinforced by anti-slip pile based on discrete element method [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75 (5) : 52-62. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4172.2023.05.008.
- [11] 许经圆.降雨及地震条件下贵州龙洞坡古滑坡稳定性数值模拟分析与破坏机理研究[D].厦门:厦门大学,2018.
- XU Jingyuan. Numerical simulation analysis and failure mechanism of Longdongpo ancient landslide in Guizhou under rainfall and earthquake conditions [D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
- [12] ZHANG X J, HUANG L, HOU Y J, et al. Study on the stability of the geogrids-reinforced earth slope under the coupling effect of rainfall and earthquake [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1-11. DOI: 10.1155/2020/5182537.
- [13] FU X D, SHENG Q, DU W J, et al. Evaluation of dynamic stability and analysis of reinforcement measures of a landslide under seismic action: a case study on the Yanyangcun landslide [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79 (6):2847-2862. DOI: 10.1007/s10064-020-01745-7.
- [14] YIN X J, WANG L M. Shaking table tests on sliding displacements of loess slope under coupling effect of rainfall and earthquake [J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1-11. DOI: 10.1155/2019/5736305.
- [15] 张忠传,何宇翔,杨溢,等.降雨入渗及地震作用下边坡稳定性研究[J].有色金属工程,2020,10(12):122-127. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1744.2020.12.017.
- ZHANG Zhongchuan, HE Yuxiang, YANG Yi, et al. Study on slope stability under rainfall infiltration and earthquake [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10 (12) : 122-127. DOI: 10.3969/j.issn.2095 - 1744.2020.12.017.
- [16] 付宏渊,史振宁,邱祥,等.炭质泥岩-土分层路堤在浸水条件下的渗流及变形特征试验[J].中国公路学报,2017,30(11):1-8,98. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.014.
- FU Hongyuan, SHI Zhenning, QIU Xiang, et al. Seepage and deformation test of carbonaceous mudstone - soil layered embankment under water immersion [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(11):1-8, 98. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.014.
- [17] 王亚钊.地震和降雨耦合作用下新型植被混凝土生态护坡稳定性数值研究[D].泰安:山东农业大学,2021.
- WANG Yazhao. Numerical study on the stability of new vegetation concrete ecological slope protection under the coupling action of earthquake and rainfall [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021.
- [18] 丛宇,王在泉,郑颖人,等.基于颗粒流原理的岩石类材料细观参数的试验研究[J].岩土工程学报,2015,37(6):1031-1040. DOI: 10.11779/CJGE201506009.
- CONG Yu, WANG Zaiquan, ZHENG Yingren, et al. Experimental study on microscopic parameters of brittle materials based on particle flow theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (6) : 1031-1040. DOI: 10.11779/CJGE201506009.
- [19] 石崇,张强,王盛年.颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[J].岩土力学,2018(增刊2):1. DOI: CNKI:

- SUN:YTLX.0.2018-S2-005.
- SHI Chong, ZHANG Qiang, WANG Shengnian. Numerical simulation technology and application with particle flow code (PFC5.0) [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018(sup 2): 1. DOI: CNKI: SUN: YTLX. 0.2018-S2-005.
- [20] 石崇, 王盛年, 刘琳. 地震作用下陡岩崩塌颗粒离散元数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊1): 2798-2805. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.z1.029.
- SHI Chong, WANG Shengnian, LIU Lin. Research of avalanche disaster numerical simulation based on granular discrete element method of high-steep slope under seismic loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(sup 1): 2798-2805. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.z1.029.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图: GB 18306—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Seismic ground motion parameters zonation map of China: GB 18306—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [22] 付宏渊, 陈镜丞, 曾铃, 等. 降雨对炭质泥岩-土分层路堤渗流与变形影响的模型试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2852-2860. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.11.027.
- FU Hongyuan, CHEN Jingcheng, ZENG Ling, et al. Model test on effect of rainfall on seepage and deformation of carbonaceous mudstone - soil stratified embankment [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(11): 2852-2860. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2018.11.027.
- [23] 付宏渊, 邱祥, 李光裕, 等. 降雨入渗条件下炭质泥岩路堤动态稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(1): 33-42. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2017.01.005.
- FU Hongyuan, QIU xiang, LI guangyu, et al. Dynamic stability of carbonaceous mudstone embankment under rainfall infiltration [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(1): 33-42. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2017.01.005.
- (责任编辑: 周鹏展; 校对: 刘平; 英文编辑: 吴高桥)

(上接第58页)

- 青混合料高温性能 SPT 试验[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 16-23. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.01.003.
- ZHA Xudong, FAN Xiaolin, LIU Anhui, et al. SPT test of high temperature performance of asphalt mixture in middle surface layer of RIOHTrack [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1): 16-23. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgxbzkb.2021.01.003.
- [17] 吕松涛, 李亦鹏, 刘超超, 等. 基于劈裂试验的沥青混合料拉压模量同步测试方法[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 1-7, 16. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.10.001.
- LYU Songtao, LI Yipeng, LIU Chaochao, et al. Synchronous testing method for tensile and compressive moduli of asphalt mixture based on splitting test [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 1-7, 16. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.10.001.
- [18] 郭彤, 杨毅, 夏诚东, 等. 基于拉压模量同步测试的岩沥青改性沥青混合料疲劳损伤特性[J]. 公路交通科技, 2018, 35(6): 14-21. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.06.003.
- GUO Tong, YANG Yi, XIA Chengdong, et al. Fatigue damage characteristics of rock asphalt modified asphalt mixtures based on tension and compression moduli synchronous test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(6): 14-21. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.06.003.
- [19] 程怀磊, 孙立军, 郑健龙, 等. 沥青混合料动态压-拉双模量及其在路面响应分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2022, 55(3): 105-116, 128. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2022.03.005.
- CHENG Huailei, SUN Lijun, ZHENG Jianlong, et al. Dynamic compressive-tensile moduli of asphalt mixture and its applications to pavement response prediction [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(3): 105-116, 128. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2022.03.005.
- [20] 吕松涛. 考虑加载速率影响的沥青混合料疲劳方程[J]. 工程力学, 2012, 29(8): 276-281. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.05.0273.
- LYU Songtao. Fatigue equation of asphalt mixture considering the influence of loading rate [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 276-281. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.05.0273.
- (责任编辑: 石月珍; 校对: 刘平; 英文编辑: 李岳林)