

高分子稳定剂生态护坡机理及其应用

刘 瑾, 张 达, 汪 勇, 孙梦雅, 段新春, 白玉霞

(河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘 要:针对土质边坡坡面稳定性问题,从土体改性机理出发,采用高分子稳定剂对土质坡面进行生态护坡。对自主研发的高分子稳定剂改性土的强度、抗冲刷性和植被生长等进行了室内评价,通过室内试验和微观扫描深入分析了高分子稳定剂的生态护坡机理,并通过工程实例应用进一步验证了高分子稳定剂的生态护坡效果。结果表明:高分子稳定剂可以在较大程度上提高土体的强度和抗冲刷性,同时可以促进植被的生长;高分子稳定剂生态护坡机理是通过包裹土质边坡坡面的土颗粒形成网状膜结构,提高土体的强度和抗冲刷性等性能,给坡面植被提供良好的生长环境,从而达到生态护坡的效果;工程实例验证了高分子稳定剂应用于土质边坡生态护坡的可行性,为土质边坡坡面治理提供了一条有效的解决途径。

关键词:地质工程;土质边坡;高分子稳定剂;加固机理;生态护坡;强度;抗冲刷性

中图分类号:P642

文献标志码:A

Reinforcement Mechanism of Soil Slope Surface with Polymer Soil Stabilizer and Its Application

LIU Jin, ZHANG Da, WANG Yong, SUN Meng-ya, DUAN Xin-chun, BAI Yu-xia

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China)

Abstract: The polymer soil stabilizer was used to protect the soil slope surface ecologically. The strength, anti-erosion and vegetation growth of soil modified with polymer soil stabilizer were evaluated in the laboratory. The ecological slope protection mechanism was analyzed by the test results and microscopic scanning. Engineering example application was carried out to prove the ecological slope protection effect. The results show that the strength and anti-erosion of soil are improved by polymer soil stabilizer, and the vegetation growth is promoted; the ecological slope protection mechanism of polymer soil stabilizer is that a mesh membrane structure of soil particle on slope surface is formed by the wrapping of polymer soil stabilizer, to improve the strength and anti-erosion of soil and provide a well growth environment, so as to achieve the effect of the ecological slope protection; the feasibility of ecological slope protection with polymer soil stabilizer is verified by engineering example, therefore, this method can be considered as an effective solution for the soil slope surface treatment.

Key words: geological engineering; soil slope; polymer soil stabilizer; reinforcement mechanism; ecological slope protection; strength; anti-erosion

0 引 言

随着社会经济的发展,人类工程活动对地表作

用日益加剧。在开发建设项目的大量施工过程中,由于开挖造成原有的生态体系失衡,原生植被遭到严重损坏,形成许多裸露的土质边坡^[1-3]。这些边坡

收稿日期:2016-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41472241,41202208);江苏省自然科学基金项目(BK20141415);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2016B05914)

作者简介:刘 瑾(1983-),女,福建漳州人,教授,工学博士,E-mail:jinliu920@163.com。

土壤土质松散、含水量降低、易风化,容易造成坡面侵蚀、水土流失、坡体坍塌、河流阻塞、滑坡、水污染等灾害^[4-11],从而危害人民生命财产安全及农田水利等基础设施安全^[12-13]。目前,常用的防治措施主要有浆砌片石护坡、换土、湿度控制、土工织物加固、挡土墙、土钉、抗滑桩等^[14-17]。这些工程措施在一定条件下可有效解决土质坡面的稳定性,但在许多情况下还存在问题,如未从根本上解决土体的工程性质,不能满足生态绿化要求,工程造价高等。因此,探索一种既能有效防止土质坡面水土流失又能结合坡面生态环境建设,既能提高土体工程性质又能降低坡面治理成本的土质坡面生态防护技术是一项紧迫任务。

20世纪90年代以来,随着人类环保意识的加强,高分子稳定剂(也称为高分子固化剂)作为一种新型环保的土体加固材料,在美国、日本等发达国家开始蓬勃发展。高分子稳定剂利用聚合物交联形成立体结构包裹和胶结土粒,并利用表面活性剂改变土粒表面亲水性质,改变土体本身的性质,同时具有掺入量较少、运输方便、施工简单、固化效果稳定、生态环保等优点。高分子稳定剂广受国际学者的关注,并取得了一批重要的成果。Bae等研究了水溶性聚丙烯酰胺在黏性土工程特性改良中的应用^[18-20];Iyengar等报道了高分子聚合物稳定路基土效果显著^[21];Ates介绍了水性聚合物可显著改善砂性土的抗液化性能和无侧限抗压强度^[22];Liu等从2008年开始对高分子稳定剂进行自主研发,对其性能进行了室内研究,取得了一系列创新性成果^[23-26]。

本文针对土质边坡坡面稳定性问题,从土体改性机理出发,采用课题组自主研发的高分子稳定剂对土质坡面进行生态护坡,结合室内和现场试验详细介绍了高分子稳定剂坡面加固机理,验证了该方法在土质边坡坡面加固中的有效性,为土质边坡坡面治理提供一条有效的解决途径。

1 高分子稳定剂概况

高分子稳定剂是一种高聚物类土体稳定剂。高分子稳定剂利用聚合物交联形成立体结构包裹和胶结土粒,或者利用表面活性剂改变土颗粒表面的亲水性质,从而提高土体的强度、水稳定性和抗冲刷性能。

本试验所选取的高分子稳定剂为自主研发的聚醋酸乙烯酯型稳定剂(简称PAS)。PAS系列高分子稳定剂为乳白色液体,通过乳液聚合而成,黏稠

状,质地细腻,无可见颗粒物,是一种可与水以任意比例互溶的有机高分子稳定材料。该稳定剂是一类近中性、高固含量、低黏度的有机高分子材料,在自然干燥条件下,具有良好的成膜性,并且具有较好的稳定性能,在储藏、运输及使用过程不会产生产品变质失效现象。本文所用的高分子稳定剂pH值为6~7,固含量(质量分数,下同)为41%,黏度为920 mPa·s,吸水率为34%,凝胶率为1.48%。该稳定剂对环境没有污染,自然环境下降解时间一般为2~3年,但根据固化剂中的添加剂可以调节在自然环境下的降解时间。

2 试验目的、内容、结果与分析

为了深入了解高分子稳定剂改良效果和改性机理,对其改性土强度、抗冲刷性和植被生长等进行室内试验评价。室内试验所用的土样均取自江苏省南京市浦口区的下蜀土,其液限为53.6%,塑性指数为19.7,相对密度为2.72,最佳含水率(质量比,下同)为15.6%,最大干密度为1.74 g·cm⁻³。

2.1 强度试验

2.1.1 试验目的

通过无侧限抗压强度试验和抗剪切强度试验,测出不同高分子稳定剂含量的改性土试样强度,并计算内聚力和内摩擦角变化。

2.1.2 试验内容

首先,将从现场取来的土样在自然状态下风干,破碎并过2 mm标准筛。试样制备前将高分子稳定剂稀释成5种不同含量(体积分数,下同)(0%(参照样)、5%、10%、20%和30%)的稀释液,然后与土样拌合。试验设计含水率为17.8%,干密度为1.7 g·cm⁻³。土样拌合均匀后采用静力压实法压实制成相应的土样,在室温下分别养护48 h后进行无侧限抗压强度试验和抗剪切强度试验。试样尺寸分别为39.1 mm(直径)×80.0 mm(高)和61.8 mm(直径)×20.0 mm(高)。无侧限抗压强度试验所采用的仪器是南京土壤仪器厂有限公司生产的YYW-2型应变控制式无侧限压力仪,其升降板的速率控制在2.4 mm·min⁻¹。抗剪切强度试验所采用的试验仪器是ZJ轻便型应变控制式直剪仪,试验过程中垂直施加的四级荷载分别为50、100、200、300 kPa,应变速率为0.8 mm·min⁻¹。

2.1.3 试验结果与分析

从高分子稳定剂改性土的无侧限抗压强度和抗剪切强度参数(表1)可以看出:改性土试样的无侧限抗压强度在经过48 h养护后均有明显提高,其强

度随着高分子稳定剂含量的增大而增大;改性土试样的内聚力均有较明显的提高,并随着高分子稳定剂含量的增加而增大,在含量为 0%~10% 时,试样的内聚力上升最为明显,在含量为 10%~30% 时,试样的内聚力增加速度明显降低;而对于内摩擦角,试样在改良前后没有明显变化,同时改性土试样的内摩擦角随着高分子稳定剂含量的增加而变化量很小。

表 1 高分子稳定剂改性土的强度参数

Tab. 1 Strength Parameters of Specimens Modified with Polymer Soil Stabilizer

稳定剂含量/ %	无侧限抗压 强度/kPa	抗剪切强度参数	
		内聚力/kPa	内摩擦角/(°)
0	113.0	260.0	58.5
5	192.1	347.7	58.5
10	204.3	367.3	56.5
20	221.2	373.8	61.5
30	233.3	384.4	58.5

2.2 抗冲刷性试验

2.2.1 试验目的

在模拟降雨条件下,观察不同高分子稳定剂含量的改性土试样表面土颗粒从试样中分离出来的数量情况及试验的抗冲刷效果。

2.2.2 试验内容

本试验采用自主设计的冲刷试验模拟装置(图 1)对高分子稳定剂坡面加固效果进行初步评价。试验中先将土样盒(16 cm×16 cm×3 cm)盛满烘干土样并压实,称重得到土样盒质量(m_0)与土样质量之和(m_1),将不同含量的高分子稳定剂稀释液均匀喷洒在试样表面(喷洒量为 $3 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2}$),在室温条件下养护 48 h。养护后,试样放置于坡度为 30° 可调角支架上进行冲刷测试,收集冲刷下的土量。收集盒中的土放置在烘箱烘干 24 h,得到其质量为

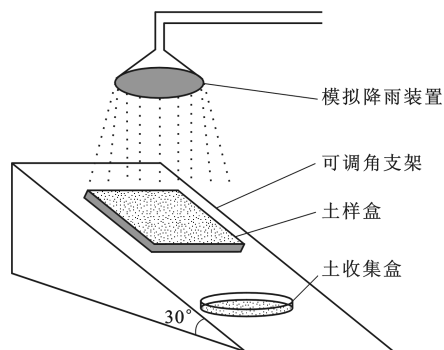


图 1 冲刷试验模拟装置

Fig. 1 Simulation Equipment of Erosion Test

m_2 , 土样的抗冲刷率 $R = (m_1 - m_2) / (m_1 - m_0)$ 。土样的抗冲刷率越小,则冲刷越严重,抗冲刷能力越弱。此试样模拟降雨的强度为 $2.8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,降雨时间为 30 min。

2.2.3 试验结果与分析

试样在不同含量(0%、5%、10%、20%和 30%)的高分子稳定剂稀释液作用下,测试所得的抗冲刷率分别为 29.8%、78.8%、87.0%、94.5%和 98.9%。高分子稳定剂改性土试样在模拟降雨条件下,表面土颗粒从试样中分离出来的数量有明显的降低。改性土的抗冲刷能力有了很大程度的提高,并随着高分子稳定剂含量的增加而不断加强。未改性土试样在经过冲刷后,表面具有较为明显的冲刷破坏现象,抗冲刷率只有 29.8%,而改性土试样冲刷后土体基本保持完整结构,当高分子稳定剂含量达到 20%和 30% 时,试样的抗冲刷率分别高达 94.5%和 98.9%,达到很好的抗冲刷效果。

2.3 植被生长试验

2.3.1 试验目的

观察喷洒不同含量高分子稳定剂对土体结构影响和表面破坏情况及对植被生长的影响。

2.3.2 试验内容

为了了解高分子稳定剂对植被生长的影响,通过植被的种子发芽和生长对比情况进行评价。本试验选用的植被为百喜草,先将草种撒在装有土样的土样盒(16 cm×16 cm×3 cm)中,在其表面喷洒水及含量为 5%、10%、20%、30% 的高分子稳定剂稀释液,放置于人工模拟气候箱中进行养护,气候箱的温度设置为 28 °C,观察草种的发芽和生长情况以及土样表面土颗粒的破坏情况。

2.3.3 试验结果与分析

从高分子稳定剂对植被生长的影响结果(表 2)可知,高分子稳定剂对植被生长无任何不良影响。高分子稳定剂改性土中的草种生长和发育均较好,其中高分子稳定剂含量为 30% 的土样中草种发芽提前一天,且发芽率高。改性土表面土颗粒结构完整性好,产生的裂隙量也明显减少。此结果主要是由于高分子稳定剂改性后的土颗粒水稳定性得到较大程度的提高,土体结构及其物理性质(如孔隙度、通气性、透水性等)得到明显改善,为植被提供了良好的生长环境,促进了植被生长。

3 生态护坡机理分析

高分子稳定剂生态护坡的机理见图 2。高分子

表 2 高分子稳定剂对植被生长的影响

Tab. 2 Effects of Plant Growth of Specimens Modified with Polymer Soil Stabilizer

高分子稳定剂含量/%	发芽时间/d	植被生长情况	表面土体破坏情况
0	6	草种发芽率高,生长情况较好	表面土颗粒结构性差,有大量裂缝
5	6	草种发芽率较高,生长情况良好	表面土颗粒结构性较好,有细小裂缝
10	6	草种发芽率较高,生长情况良好	表面土颗粒结构性较好,有细小裂缝
20	6	草种发芽率较高,生长情况良好	表面土颗粒结构性好,无裂缝
30	5	草种发芽率较高,生长情况良好	表面土颗粒结构性好,无裂缝

稳定剂喷洒到土质坡面后,高分子链上的内部高分子长链逐渐展开,高分子链上的亲水基团醋酸基

($-\text{OOCCH}_3$)、羧基($-\text{COOH}$)和羟基($-\text{OH}$)通过氢键及阳离子交换作用与土颗粒形成紧密的连接结构(图 3)。而主链上具有疏水性的 C—C 长链通过扩散、渗透和缠绕在土颗粒表面及空隙内形成网状膜结构,增强土颗粒间的连接,最终在坡面形成一定厚度的弹性网状膜土体结构(图 4)。在护坡的植被还没有生长前,通过高分子稳定剂的化学、物理和网状膜结构的作用,可以在根本上增强土体强度,提高边坡抗冲刷性,防止在坡面产生大量的冲沟及水土流失,还可以提高土体的保温性和透气性,有利于植被的生长和发育,减缓表面径流和雨水的冲刷。而根系发达的植物根系力学效应可视为三维加筋纤维分布,通过水平根系的加筋作用和垂直根系的黏结型锚杆加固作用来提高坡面土体的附加“内聚力”和承载能力,从而在高分子稳定剂和植被的共同作用下达到良好的生态护坡效果。

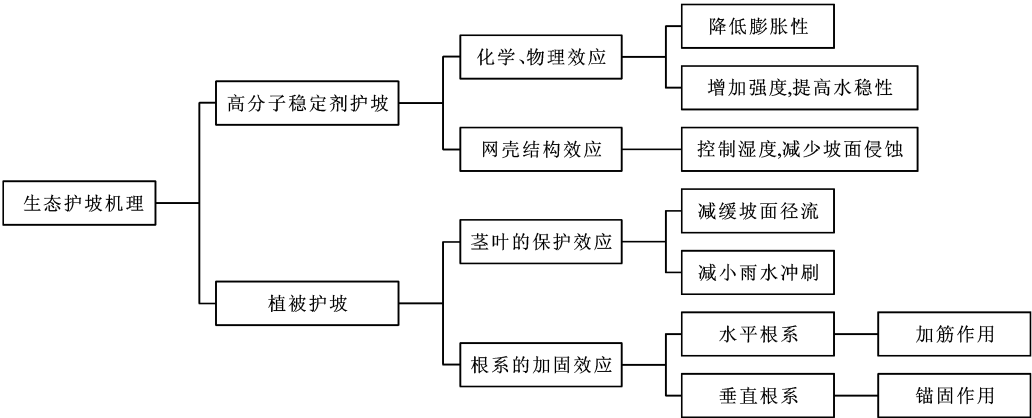


图 2 高分子稳定剂生态护坡机理

Fig. 2 Mechanism of Polymer Soil Stabilizer Ecological Slope Protection

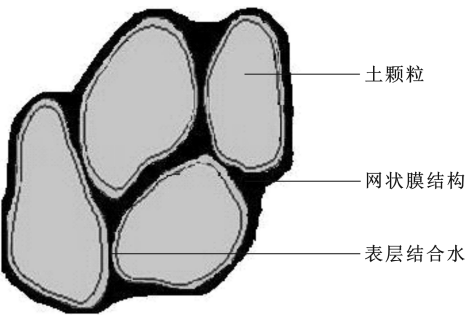


图 3 高分子稳定剂改性土的膜结构

Fig. 3 Film Structure of the Soils Modified by Polymer Soil Stabilizer

边坡表层土在 高分子稳定剂所形成的膜结构作用下,土颗粒表层结合水的变化速度大幅度降低。在降雨时,土颗粒表层结合水缓慢地吸收增加,在干燥条件下,减少的速度也十分缓慢,同时高分子链上

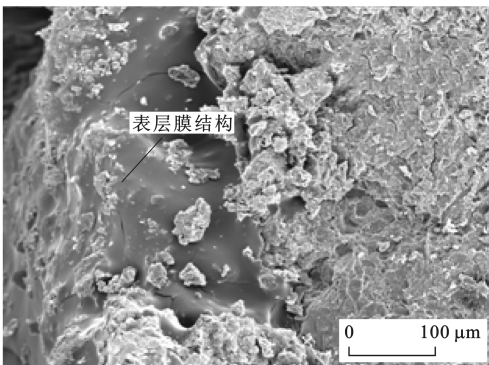


图 4 改性土表面膜结构扫描图

Fig. 4 Scanning Photo of Film Structure of the Soil Surface Modified

的亲水基团也具有较强的保水性,这样在一定条件下可以较好地调节边坡表层土的含水率,促进植被生长,同时防止土体表面开裂。

4 工程实例

为了进一步了解高分子稳定剂的生态护坡效果,笔者进行了现场试验研究。试验场地选择在江苏省南京市浦口区,试验段土质为弱—中等胀缩性下蜀土,在坡面未处理前,坡面冲刷十分严重,植被无法生长(图 5)。



图 5 工程实例的土质边坡

Fig. 5 Soil Slope of Engineering Example

针对本试验坡段的土质特点及气候因素,结合绿化效果及护坡效果,本次现场试验选用了百喜草、狗牙根和白三叶等 3 种植物,并按等份均匀混合。这 3 种植物对生长环境要求较低,根系发达,是极好的水土保持植物品种,非常适于边坡防护工程,可以起到较好的生态护坡作用。

4.1 施工程序

(1)坡面整平阶段:在道路施工过程中,由于路堑边坡多为机械开挖,往往造成坡面平整度较低,出现低洼不平,造成边坡整体视觉及感观上的不足,也给施工带来很多不便。因此,对坡面必须要进行人工整平。

(2)施肥播种阶段:为了使绿化植被能有更好的生长环境,施以有机肥及其他复合肥料,同时播撒用于边坡绿化的草种。如果有合适的喷播机械,这一阶段的工作可合并到高分子稳定剂喷洒阶段,即将肥料和草籽与高分子稳定剂混合后一起喷洒到坡面上。

(3)高分子稳定剂稀释阶段:高分子稳定剂黏度较大,在使用过程中一般都要将其稀释到一定含量后再喷洒,本次试验稀释含量为 20%。

(4)高分子稳定剂喷洒阶段:将高分子稳定剂稀释液按一定单位面积喷洒量均匀喷洒在撒过草种及肥料的边坡表面,喷洒采用的方式为高压机泵喷洒。如果具备有种籽、肥料和高分子稳定剂混喷的机械泵,则施肥播种阶段可省略。

(5)边坡养护阶段:由于种子发芽需要一定的温度、水分和阳光等自然环境,所以在种子发芽和生长过程中,要定期对边坡进行洒水养护。

(6)生态护坡效果评估阶段:对现场试验坡段的抗冲刷性、坡面破坏程度、植被生长情况等定期观察,对护坡效果进行综合评价^[27]。

4.2 生态护坡效果分析

试验段施工期为 4 月下旬,白天气温为 18℃~30℃,喷洒施工期间天气晴朗,有利于高分子稳定剂在坡面成膜,满足高分子稳定剂的施工天气要求。为了更好地对比高分子稳定剂的护坡效果,试验过程中留了小面积没有喷洒稳定剂的坡面进行效果对比。施工后,定期对试验段边坡进行现场评估。从现场试验区的植被发育和坡面情况可知,施工 45 d 以后,经过几次暴雨的冲刷,高分子稳定剂喷洒后的坡面基本上没有被冲刷的迹象,坡面植被生长良好,而对比坡面有了较为明显的冲沟,植被破坏较为严重。120 d 以后,经过炎热的夏季和雨水的冲刷,改良后的坡面(图 6)已被植被完全覆盖,得到充分的保护;而对比坡面(图 7)冲刷严重,沟痕变宽变深,水土流失十分严重,仍无植被发育。从上述现场护坡效果可以得出,高分子稳定剂可以提高土体的抗冲刷性,具有较好的生态护坡效果。



图 6 高分子稳定剂改良后的边坡坡面

Fig. 6 Soil Slope Surface Modified by Polymer Soil Stabilizer

5 结 语

(1)自主研发的高分子稳定剂可以在较大程度上提高土体的强度和抗冲刷性,同时可以促进植被的生长。

(2)高分子稳定剂生态护坡机理是通过包裹土质边坡坡面的土颗粒形成网状膜结构,提高土体的强度和抗冲刷性等性能,给坡面植被提供良好的生长环境,从而达到生态护坡的效果。



图7 未改良边坡的坡面

Fig.7 Soil Slope Surface Unmodified by Polymer Soil Stabilizer

(3)工程实例进一步验证了高分子稳定剂应用于土质边坡生态护坡的可行性,为土质边坡坡面治理提供了一条有效的解决途径。

参考文献:

References:

- [1] 罗 斌,胡厚田,卢才金,等.清连公路沿线坡面冲刷研究[J].中国地质灾害与防治学报,2000,11(1):66-70.
LUO Bin, HU Hou-tian, LU Cai-jin, et al. A Study on Slope Surface Erosion Along Qing-Lian Expressway [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2000, 11(1): 66-70.
- [2] 李景保,梁成军,蔡松柏.论土壤侵蚀对山地致灾因子链的复合效应:以湖南四水流域中上游地区为例[J].自然灾害学报,2002,11(4):101-105.
LI Jing-bao, LIANG Cheng-jun, CAI Song-bai. Compound Effect of Soil Erosion on Mountain Hazard Chain: Taking Middle and Upper Drainage Area of Sishui in Hunan Province as an Example [J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4): 101-105.
- [3] 李 萍,张 波,李同录.黄土高原边坡特征与破坏规律的分区研究[J].地球科学与环境学报,2012,34(3):89-98.
LI Ping, ZHANG Bo, LI Tong-lu. Study on Regionalization for Characteristic and Destruction Rule of Slope in Loess Plateau [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(3): 89-98.
- [4] 龚士良.上海地区地质灾害危险性评估关键技术问题研究[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(3):92-96.
GONG Shi-liang. Key Technological Problems of Geological Disaster Risk Assessment in Shanghai [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(3): 92-96.
- [5] 邓通发,桂 勇,罗嗣海,等.降雨条件下花岗岩残坡

积土路堑边坡稳定性研究[J].地球科学与环境学报,2012,34(4):88-94.

DENG Tong-fa, GUI Yong, LUO Si-hai, et al. Study on Slope Stability of Granite Residual Soil Cutting Excavation with Rainfall [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(4): 88-94.

- [6] 白建光,许 强,汤明高,等.三峡水库塌岸影响因素的物理模拟研究[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(1):90-94.

BAI Jian-guang, XU Qiang, TANG Ming-gao, et al. Study on Influence Factors of Bank Collapse in the Three Gorges Reservoir with Physical Modelling [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(1): 90-94.

- [7] 张江伟,李小军,迟明杰,等.滑坡灾害的成因机制及其特征分析[J].自然灾害学报,2015,24(6):42-49.

ZHANG Jiang-wei, LI Xiao-jun, CHI Ming-jie, et al. Analysis of Formation Mechanism and Characteristics [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(6): 42-49.

- [8] 范立民,李 勇,宁奎斌,等.黄土沟壑区小型滑坡致大灾及其机理[J].灾害学,2015,30(3):67-70.

FAN Li-min, LI Yong, NING Kui-bin, et al. Small Landslide and Disaster-causing Mechanism in Gully Loess Area [J]. Journal of Catastrophology, 2015, 30(3): 67-70.

- [9] 吴 凯,倪万魁,武 鹏.宁夏隆德县坡面型泥石流形成机理分析[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(1):50-61.

WU Kai, NI Wan-kui, WU Peng. Analysis on the Formation Mechanism of Debris Flow on Slope in Longde County of Ningxia [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 50-61.

- [10] 庄建琦,彭建兵,李同录,等.“9·17”灞桥灾难性黄土滑坡形成因素与运动模拟[J].工程地质学报,2014,23(4):747-754.

ZHUANG Jian-qi, PENG Jian-bing, LI Tong-lu, et al. Triggered Factors and Motion Simulation of “9·17” Baqiao Catastrophic Landslide [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 23(4): 747-754.

- [11] 顾成壮,胡卸文,方 力,等.四川汉源二蛮山高速滑坡-碎屑流基本特征及地质演化[J].山地学报,2014,32(5):568-578.

GU Cheng-zhuang, HU Xie-wen, FANG Li, et al. Basic Characteristics and Evolution History of Ermanshan High-speed Slide-debris Flow in Hanyuan, Sichuan [J]. Mountain Research, 2014, 32(5): 568-578.

- [12] 田述军,孔纪名,陈泽富.基于公路功能的边坡灾害易损性评价[J].地球科学与环境学报,2013,35(3):

- 119-126.
- TIAN Shu-jun, KONG Ji-ming, CHEN Ze-fu. Vulnerability Assessment of Slope Hazard Based on Function of Highway[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(3): 119-126.
- [13] 唐朝生, 施 斌. 干湿循环过程中膨胀土的胀缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1376-1384.
- TANG Chao-sheng, SHI Bin. Swelling and Shrinkage Behaviour of Expansive Soil During Wetting-drying Cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1376-1384.
- [14] 袁从华, 周 健, 杨明亮. 高速公路膨胀土边坡整治[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3073-3078.
- YUAN Cong-hua, ZHOU Jian, YANG Ming-liang. Treatment of Expansive Soil Slopes Beside Highways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3073-3078.
- [15] 耿灵生, 巩向锋. 新型砌块水土保持系统的应用研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 98-99, 104.
- GENG Ling-sheng, GONG Xiang-feng. Application Study on Interlocking Concrete Block in the Soil and Water Conservation System[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(4): 98-99, 104.
- [16] 阴 可, 岳中琦, 李焯芬. 人工边坡绿化种植技术及其在香港的应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14(4): 75-80.
- YIN Ke, YUE Zhong-qi, LI Zhuo-fen. Principles and Practice of Man-made Slope Vegetation in Hong Kong[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2003, 14(4): 75-80.
- [17] 冯建刚, 许 英, 周效国. 一种分析小桩距抗滑桩加固边坡稳定的新方法[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1942-1945.
- FENG Jian-gang, XU Ying, ZHOU Xiao-guo. New Method for Stability Slopes Reinforced by Anti-slide Piles with Small Spacing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1942-1945.
- [18] BAE S, INYANG H I, DE BRITO GALVAO T C, et al. Soil Desiccation Rate Integration into Empirical Dust Emission Models for Polymer Suppressant Evaluation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 132(1): 111-117.
- [19] INYANG H I, BAE S, MBAMALU G, et al. Aqueous Polymer Effects on Volumetric Swelling of Na-montmorillonite[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(1): 84-90.
- [20] DANIELS J L, INYANG H I. Contaminant Barrier Material Textural Response to Interaction with Aqueous Polymers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(3): 265-275.
- [21] IYENGAR S R, MASAD E, RODRIGUEZ A K, et al. Pavement Subgrade Stabilization Using Polymers: Characterization and Performance[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 25(4): 472-483.
- [22] ATES A. The Effect of Polymer-cement Stabilization on the Unconfined Compressive Strength of Liquefiable Soils[J]. International Journal of Polymer Science, 2013, 2013: 356214.
- [23] LIU J, SHI B, JIANG H T, et al. Improvement of Water-stability of Clay Aggregates Admixed with Aqueous Polymer Soil Stabilizers[J]. Catena, 2009, 77(3): 175-179.
- [24] LIU J, SHI B, LU Y, et al. Effectiveness of a New Organic Polymer Sand-fixing Agent on Sand Fixation[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(3): 589-595.
- [25] 施 斌, 刘 瑾, 黄 河, 等. STW 型生态土壤稳定剂研发与基本性能[J]. 工程地质学报, 2008, 16(增1): 262-266.
- SHI Bin, LIU Jin, HUANG He, et al. A Study on Development and Basic Properties of STW Ecotypic Soil Stabilizer[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(S1): 262-266.
- [26] 刘 瑾, 施 斌, 顾 凯, 等. 聚氨酯型固沙剂改性土室内试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(1): 29-34.
- LIU Jin, SHI Bin, GU Kai, et al. Laboratory Study on Soil Modified by Polyurethane Sand-fixing Agents[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(1): 29-34.
- [27] 刘 发, 施 斌, 江 臣, 等. 宁淮高速公路膨胀土边坡生态改性护坡技术现场试验研究[J]. 公路, 2009(4): 260-263.
- LIU Fa, SHI Bin, JIANG Chen, et al. Field Test of Modified Ecological Slope Protection Technique of Swelling Soil in Ning-Huai Expressway[J]. Highway, 2009(4): 260-263.