

DOI: 10.11779/CJGE2018S2019

粉砂土岸坡三维加筋生态护坡结构力学效应研究

王晓春¹, 王远明^{1, 2}, 张桂荣³, 李登华^{2, 3}, 张家胜³

(1. 黑龙江省三江工程建设管理局, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 东北林业大学工程技术学院, 哈尔滨 150040; 3. 南京水利科学研究所
水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 加筋生态护坡是土工织物与植草相结合形成的一种护坡形式, 在保证工程生态性的同时大大提高了生态护坡的强度, 有广泛的应用前景。以黑龙江同抚堤防工程粉砂土岸坡防护工程为例, 开展了三维加筋生态护坡结构的现场原位测试与加筋土体力学特性室内试验研究, 揭示了该护坡技术固土护坡力学效应。试验结果表明: 对比纯植被护坡和遮阳网表土覆盖护坡方式, 三维加筋生态护坡结构对土体加筋作用最为有效。土工网可以帮助植被根系在岸坡表层形成良好的加筋层, 而植被根系则帮助土工网与岸坡土体更紧密地结合。加筋生态结构效果主要表现为增加了土体黏聚力, 但对内摩擦角影响不大; 一个生长周期内草本型植被根系加筋区域集中在地面以下 20 cm 左右的深度; 土体含水率和含根量对根土复合体抗剪强度有明显影响, 随着土体中含根量和含水率的增加, 根土复合体抗剪强度呈先增加后减少的趋势, 即对于高羊茅这类抗剪型根系, 其加固土体时存在最佳含根量和含水率使其强度最高。

关键词: 加筋生态护坡; 三维土工网垫; 植被根系; 抗剪强度; 边坡稳定性

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S2-0091-05

作者简介: 王晓春(1969-), 男, 高级工程师, 主要从事生态水利工程建设 and 运行管理工作。E-mail: sjjgjh@126.com。

Mechanical effect of three-dimensional reinforced eco-structure on silty sand slopes

WANG Xiao-chun¹, WANG Yuan-ming^{1, 2}, ZHANG Gui-rong³, LI Deng-hua^{2, 3}, ZHANG Jia-sheng³

(1. Sanjiang Engineering Bureau of Heilongjiang Province, Haerbin 150040, China; 2. College of Engineering and Technology, Northeast Forestry University, Haerbin 150040, China; 3. State Laboratory Key of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The reinforcement turf is a form of slope protection combined with geotextile and grass. It greatly improves the strength of ecological slopes and ensures the ecology and has a wide application prospect. Taking the bank slope protection of silty sand in Tongfu embankment in Heilongjiang Province as an example, the field in-situ tests on 3D reinforcement eco-structure for slope protection and laboratory experiments on the mechanical properties of reinforced soils are carried out, and the mechanical effects are revealed. The experimental results show that: (1) Compared to pure vegetation slope protection and slope protection of surface covering by sunshade net, 3D reinforced turf structure is the most effective for soil reinforcement. The geotextile mat can help vegetation roots to form a good reinforced layer on slope surface, and the vegetation root system helps geotextile mat to be more closely combined with slope soils. (2) The effect of reinforced turf mainly increases the soil cohesion, but has little effect on the internal friction angle. In a growth period, the root reinforcement effect of herbaceous vegetation is concentrated at the depth of 20 cm below the ground. (3) The effect of soil moisture content and root content on the shear strength of root-soil complex is obvious. With the increase of soil root content and moisture content, the shear strength of root-soil complex increases firstly and then decreases or remains unchanged. For the shear-resistant roots, such as tall fescue, there is an optimal root content and moisture content to make the soil strength be the highest.

Key words: turf reinforcement mat; three-dimensional geo-mat; vegetation root system; shear strength; slope stability

0 引言

植被护坡技术作为一种利用植被涵水固土防冲并同时美化生态环境的一种新技术, 在水利工程岸坡防护中得到了广泛应用。但是, 随着植草护坡技术的逐

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0405100); 黑龙江应用技术与开发计划引导项目(GZ16B024); 2017年江苏省水利科技重点攻关项目(2017010)

收稿日期: 2018-07-22

***通讯作者** (E-mail: grzhang@nhri.cn)

渐推广,其固土能力的局限性也体现得越来越明显。经过不断的尝试与研究,土工材料与植草护坡技术相结合的加筋生态护坡结构能够解决生态要求和强度要求的矛盾。现有的加筋生态结构普遍采用的是在坡面铺设土工网垫与种植草皮相结合的加筋方式,通过植物生长达到根系加筋、茎叶防冲蚀的目的,在坡面形成茂密的植被覆盖,在表土层形成盘根错节的根系,有效抑制暴雨径流对边坡的侵蚀,增加土体的抗剪强度,从而大幅度提高边坡的稳定性和抗冲刷能力。

1 加筋生态护坡结构研究现状

1988 年 Chen 等^[1]系统论述和总结了利用抛石、碎石或生态加筋网对路边渠道边坡进行柔性加筋的技术;1996 年 Theisen^[2]系统论述了加筋生态护坡的应用效果、理论依据及应用注意事项等,指出生态加筋网能够保护种子及幼苗发育、控制土壤侵蚀、加固植物根系和土壤,较传统护坡技术大为改善;2007 年 Robeson 等^[3]对几种传统护坡与高性能加筋生态护坡在不同流速下的表现进行了对比试验,并给出了各材料承受范围内的最大流速及各流速条件下的材料铺设长度。2013 年 Pan 等^[4]提出了一种结合了土工格栅与三维加筋生态网的新型 HPTRM 结构,实验结果表明,该技术应对波浪溢流产生的高速水流冲刷的能力较以往加筋方式有显著改善。在国内,加筋生态护坡技术起步于 20 世纪 90 年代末。2002 年谭发刚等^[5]提出了土工网垫植草技术,指出其“前期固草,后期护坡”的功能。2007 年钟春欣等^[6]利用室内水槽实验研究了三维加筋生态网的抗水流侵蚀能力,研究结果认为三维植被网可以大大提高天然草皮的抗水流侵蚀能力。杨锡武等^[7]提出不同布筋方式对加筋边坡的坡面侧向位移及位移场等变形形态也有较大影响,加筋改变了土体内部的裂纹扩展路径,在一定程度上阻止裂纹的扩展形成滑动面,由此增加了岸坡稳定性。纤维加筋土和素土边坡的离心模型试验成果^[8]表明素土边坡的破坏往往具有突发性,而纤维加筋土边坡的破坏是渐进发生的,可以观测到裂缝的开展以及边坡破坏过程。

2 粉砂土加筋岸坡护坡效果原位测试

2.1 粉砂土岸坡生态防护示范工程

同抚堤防位于黑龙江省抚远县境内,研究区内背水坡岸坡土体为粉土或粉砂,抗冲刷能力较差。在边坡植被未成熟时期,裸露的土壤、植被的种子甚至植物幼苗抵抗雨水冲刷的能力都很弱。护坡示范工程采用 3 种生态护坡形式,即直接撒播草籽种植、与三维土工网垫联合种植(加筋草皮护坡)、直接与撒播草籽

后在地表覆盖遮阳网(表面覆盖)。在充分考虑示范区域的气候、土壤、当地植被等特殊情况后,选择高羊茅、小冠花、紫花苜蓿等冷季型草种作为护坡植被。

在护坡工程竣工 5 个月后,植被生长旺盛;3 种岸坡防护措施中,遮阳网覆盖表层土体的措施只在植被生长早期起到了对土体的防护作用,当植被逐渐长高,遮阳网被逐渐被植被顶起而整体浮在植被表层,对土体的防护效果大大减小,其后期防护效果类似单纯植被护坡;三维土工网和植被联合护坡方案中,植被与网垫之间结合紧密,植物的茎叶穿过网垫网孔生长出来,而根系如同无数铆钉将三维网垫牢牢固定在岸坡上,整体结构抗降雨侵蚀效果良好。

2.2 原位测试方法

2017 年 9 月中下旬采用钻孔剪切试验仪对示范工程生态防护效果进行了现场测试,通过与室内直剪试验对比分析,为后续生态防护技术推广应用提供详实的数据支撑。

钻孔剪切试验仪是一种在钻孔侧壁上进行直接剪切试验的仪器。常用的钻孔剪切试验设备主要有美国 Iowa 钻孔剪切试验仪和法国 Phicometer 钻孔剪切试验仪。本次试验采用 Iowa 钻孔剪切试验仪,仪器结构如图 1 所示。仪器组成主要包括剪切头、测量与控制系统两大部分。剪切板面积为 $50.8\text{ mm} \times 63.5\text{ mm}$ 。法向压力采用手动加压泵(压力范围 $0 \sim 300\text{ kPa}$)加压;采用人工转动曲柄提供上拔力对土体施加剪切应力(剪切应力范围 $0 \sim 350\text{ kPa}$)。法向压力和剪切应力通过测力仪表读取。

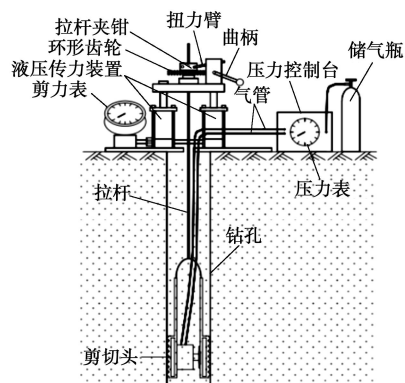


图 1 钻孔剪切仪及其试验原理

Fig. 1 Drilling shear apparatus and its testing principle

2.3 原位测试

本次现场试验分别在上述 3 种护坡表层、10 cm 深度、20 cm 深度、30 cm 深度开展土体强度原位试验(图 2),并与同期当地植物以及当地裸土强度作对比,分析研究上述 3 种生态护坡形式对土体力学性能的影响。

现场探坑结果表明高羊茅根系深度超过 50 cm, 但大部分根系集中在地表以下 20 cm 左右, 根系基本上为细密的网状根系, 根茎较小, 为抗剪型根系^[9], 这种根系结构往往与土颗粒结合较多, 对浅层岸坡土体稳定性发挥着明显的加筋效果。



图 2 加筋土护坡效果现场剪切测试

Fig. 2 Field shear tests on reinforced soil slope

现场采用美国 Iowa 钻孔剪切试验仪对生态护坡进行土体强度试验。采用大型取土器取表层至深度 50 cm 以上的土体, 待取土器将试验位置土体取出后, 将剪切试验仪安装在洞口, 并将剪切头下探至试验高度, 加载初始固结压力, 并维持 15 min 时间, 其余各级压力的维持时间为 5 min, 待达到固结时间后以 2r/s 的速度匀速转动曲柄施加剪切力, 测定每级法向压力作用下土体的抗剪强度, 根据各级强度绘制曲线, 获得不同深度下各护坡结构岸坡土体平均黏聚力和内摩擦角 (图 3)。

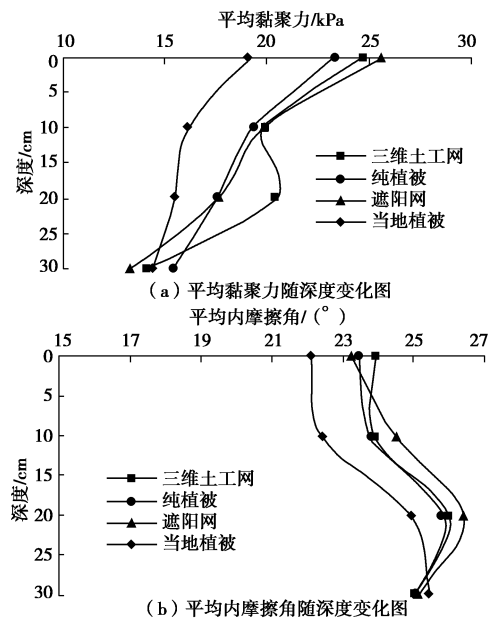


图 3 不同护坡方式下根系土体力学性质随深度变化曲线

Fig. 3 Curves of mechanical properties of soils with depth under different slope protection methods

2.4 原位测试结果分析

由图 3 (a) 可知, 在表层土体范围内, 采用三维土工网和遮阳网区域内土体黏聚力基本一致, 而裸土

区域的土体黏聚力则稍稍偏小; 在深度 10~20 cm 范围内三维土工网区域的土体黏聚力减少幅度最少, 其次为遮阳网, 结果表明在同一生长周期内采用以上方式处理的护岸坡面植被根系比未做任何处理的植被根系发达; 三维土工网和遮阳网对植被的生长有促进作用, 其中尤以三维土工网的效果最为明显。植被对土体性质的影响区域主要集中在地面以下 20 cm 左右的深度, 随着深度增, 植被根系对土体力学性质的影响逐渐降低。图 3 (b) 表加明护坡方式与土体深度对内摩擦角的影响无明显规律, 根系作用主要表现为增加了土体的黏聚力。

3 砂土加筋岸坡土体力学性质室内试验

3.1 根-土复合体抗剪强度室内试验

为深入分析试验段岸坡土体力学性质, 在现场采用环刀分别采集了不同防护方式下含植被根系的土样、当地本土植被土样与裸土土样, 对比分析根-土复合体抗剪强度变化规律。

采用室内直剪试验获得土体抗剪强度, 试验前后的土样情况如图 4 所示。从直剪试验前后土样状态对比, 可以直观看出植被根系对土体的加筋作用。当地裸土由于无植被根系, 其自身黏聚力较小, 在试验结束后土样完全离散成粉粒状。本地植被表层土样由于有根系加筋的作用, 拆解后整体状态保持的比较完整, 没有明显的破裂面, 沿根系有摩擦痕迹; 三维土工网+植被的表层土样在试验结束后依然能保持完整状态。上述结果表明在外荷载作用下, 根土复合体共同受力、协调变形, 由于土体与根系在变形模量方面存在着差异, 因此土体和根系之间产生相互错动或有相互错动趋势, 这种错动被根系与土体之间存在摩阻力所抵抗, 使根系承受拉力, 阻止了土层的侧向变形发展, 所以根土复合体有效提高了岸坡土体的抗剪强度。



(a) 试验后三维土工网表层土样 (b) 试验后当地裸土土样

图 4 剪切试验前后土体试样状态

Fig. 4 States of soil sample before and after shear tests

三维土工网+植被的区段取样较为完整, 取样深度为表层至地面下 50 cm 范围。将其土体力学特性值按照深度范围绘制图 5, 可以看出土体黏聚力沿深度方向逐渐降低, 这与现场原位试验结果吻合, 随着深

度增加, 植被根系对土体的加筋作用逐渐减小。在一个生长周期内其有效加固深度范围为 20 cm, 能有效抵抗浅表层土体的径流冲刷破坏。土工网垫与植被根系联合加筋之后存在相互缠绕、互为表里的协作关系, 其共同作用效果比单独加筋具有更大的优势。随着植被生长, 地下根系网络将会更加发达, 加固浅表层土体的能力也将逐渐增强, 其与三维土工网垫联合作用将在坡面形成完整的生态防护体系。

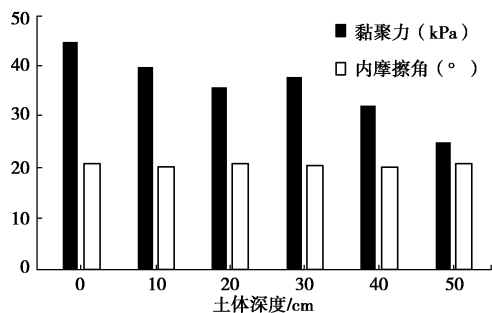


图 5 三维土工网区域土体抗剪强度随深度变化图

Fig. 5 Change of shear strength of soils with depth in 3D geomat

3.2 土体含水率对根-土复合体抗剪特性的影响

通过室内直剪试验分析了 5 种含水率状态下根土复合体（含根量 0.50%）抗剪强度变化规律（图 6）。随着土体含水率的增加, 根土复合体的抗剪强度呈现出先增大后减小的趋势, 黏聚力对土体含水率变化相当敏感, 而含水率的变化对内摩擦角的影响并不明显。究其原因, 当含水率较低时, 土粒之间、土粒与根系之间接触较为松散, 黏聚力小。含水率在适宜范围内增加时, 可以增加根-土复合体之间的黏聚力, 从而增强其抗剪强度。然而, 当含水率增大至超过适宜范围时, 土颗粒之间的结合水膜变厚, 水膜黏聚力减小, 使摩擦强度降低, 导致根-土复合体的黏聚力下降, 抗剪强度减小, 这也解释了示范工程段堤防岸坡在降水冲刷作用下容易发生浅表层破坏的原因。

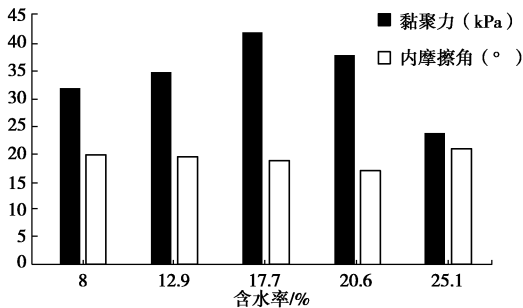


图 6 含水率对根土复合体抗剪强度的影响

Fig. 6 Effect of moisture content on shear strength of root-soil complex

3.3 土体含根量对根-土复合体抗剪特性的影响

对于植被根系的固坡机理, 学者们普遍从加筋土角度开展试验研究, 其中含根量就是一个重要影响因

素^[10]。为了更准确地研究根系对土体特性的影响, 采用现场取样重塑土人工配置植物根系进行重塑土加筋直剪试验。试样制作见图 7。试样内所添加根系采用现场取回的高羊茅根系, 模拟了土层深度 30 cm 以内根系含量, 并设置素土对照组（表 1）。

表 1 重塑含根加筋土直剪试验方案

Table 1 Test schemes for direct shear of remolded reinforced soils

试样编号	含根量/%	试样含水率/%	环刀内土体质量/g
表层	0.92	13	100
地下 10 cm	0.52		
地下 15 cm	0.35		
地下 20 cm	0.22		
地下 30 cm	0.12		
素土	0		

注: 含根量为质量百分比, 根系质量与干土质量比。

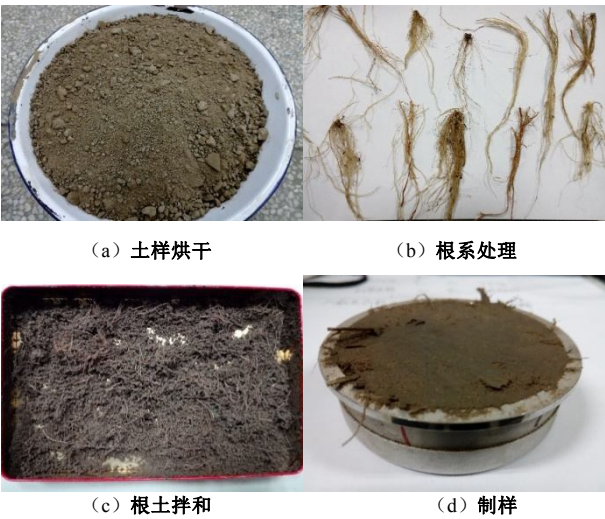


图 7 含根系重塑土直剪试样制作

Fig. 7 Preparation of samples direct shear of remolded reinforced soils

图 8 为重塑含根加筋土黏聚力和内摩擦角随含根量变化的试验结果。根土复合体黏聚力随含根量的增大而增大, 含根量对内摩擦角的影响并不明显。这是因为当土中含根量较少时, 根土充分接触, 含根量增大, 根土之间接触面积也随之增大, 从而根土之间产生的摩擦阻力作用增强了根土复合体的抗剪强度。随着含根量增大, 土体黏聚力持续增大。当含根量达到或超过 0.5% 后, 土体黏聚力随着含根量的增加基本不变或略有降低。究其原因, 当根系含量超过最优含根量后, 因为根系数量过多, 根系之间相互交织, 致使根系不能与土充分接触, 部分根系不能充分发挥其加筋作用, 反而因根系间的相对错动导致土体抗剪强度有所降低, 即对于重塑草根加筋土, 存在最优含根量使其强度最高。

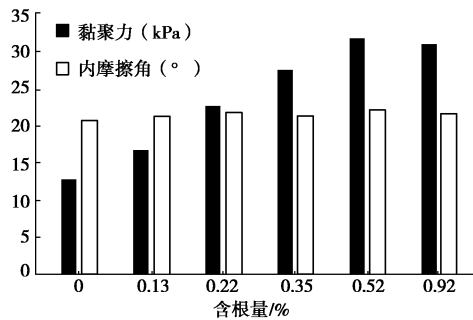


图 8 含根量对根土复合体抗剪强度的影响

Fig. 8 Effect of root content on shear strength of root-soil complex

4 结 论

本文针对砂土岸坡单纯植被护坡存在的问题, 基于现场试验和室内直剪试验, 提出了适合于黑龙江干流堤防砂土岸坡的三维土工网垫与植草相结合的生态加筋护坡技术, 在保证工程生态性的同时大大提高了砂性土岸坡的强度。具体结论如下:

(1) 分析了不同坡面防护方式的含植被根系土样、当地本土植被土样与裸土土样的抗剪强度变化规律, 结果表明植被根系与土工网垫联合加筋时, 两者相互缠绕共同作用, 因而三维土工网+植被的护坡方式对土体加筋作用最为明显有效。

(2) 三维土工网垫-植被根系加筋效果主要表现为增加了土体的黏聚力, 对内摩擦角影响不大; 针对寒区高羊茅等冷季型草种, 一个生长周期内其根系影响区域主要集中在地面以下 20 cm 左右的深度; 随着深度增加, 加筋作用对土体力学性质影响逐渐降低。

(3) 研究了土体含水率对根土复合体抗剪强度的影响; 随着土体中含水率的增加, 根土复合体抗剪强度呈先增加后减少的趋势, 即抗剪强度在一定范围内明显增加, 超过一定范围后抗剪强度增加不明显, 即存在最佳含水率, 最佳含水率范围为 17%~18%。

(4) 利用重塑含根土研究了含根量对加筋体抗剪强度的影响, 随着含根量的增加, 土体黏聚力增加, 但内摩擦角变化不明显, 存在最优含根量使其抗剪强度最高。

参考文献:

- [1] CHEN Y H, COTTON G K. Design of roadside channels with flexible linings[R]. Federal Highway Administration Report HEC-15/FHWA-1P-87-7, 1988.
- [2] THEISEN M S. How to make vegetation stand up under pressure[J]. Civil Engineering News, 1996, 8(4): 221 - 232.
- [3] ROBESON M D, CARPENTER T, CLOPPER C E. Design

guidance for scourstop transition mat® atculvert outlets[C]// Proceedings from the Environmental Connection 2007 Conference. Colorado, 2007.

- [4] PAN Y, LI L, AMINI F, et al. Full-scale HPTRM-Strengthened levee testing under combined wave and surge overtopping conditions: overtopping hydraulics, shear stress, and erosion analysis[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 29(1): 182 - 200.
- [5] 谭发刚, 杨元明, 刘章龙. 土质边坡植草防护技术[J]. 西部探矿工程, 2002(6): 160 - 161. (TANG Fa-gang, YANG Yuan-ming, LIU Zhang-long. The soil slope planting protection technology[J]. Subgrade Engineering, 2002(6): 160 - 161. (in Chinese))
- [6] 钟春欣, 张 玮, 王树仁. 三维植被网加筋草皮坡面土壤侵蚀试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 258 - 261. (ZHONG Chun-xin, ZHANG Wei, WANG Shu-ren. Experimental research on soil erosion of turf slope reinforced by 3D vegetation net[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2007, 35(3): 258 - 261. (in Chinese))
- [7] 杨锡武, 易志坚. 基于理性模型试验和断裂理论的加筋边坡合理布筋方式研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 59 - 64. (YANG Xi-wu, YI Zhi-jian. Study on Reasonable Distribution of Reinforcement for Reinforced Slope[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 59 - 64. (in Chinese))
- [8] 介玉新, 李广信, 陈 轮. 纤维加筋土和素土边坡的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 12 - 15. (JIE Yu-xin, LI Guang-xin, CHEN Lun. Study of centrifugal model tests on tressol and cohesive soil slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 12 - 15. (in Chinese))
- [9] 刘甲荣, 舒安平, 郭建明, 等. 半干旱区高速公路生态护坡技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011. (LIU Jia-rong, SHU An-ping, GUO Jian-ming, et al. Technologies for ecological slope protection on expressway in the semiarid area[M]. Beijing: China Communication Press, 2011. (in Chinese))
- [10] 王元战, 刘旭菲, 张智凯, 等. 含根量对原状与重塑草根加筋土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1405 - 1410. (WANG Yuan-zhan, LIU Xu-fei, ZHANG Zhi-kai, et al. Experimental research on influence of root content on strength of undisturbed and remolded grassroots-reinforced soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1405 - 1410. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)