

外掺植物纤维对冻融作用下植被 混凝土抗剪强度的影响

梁永哲^{1,2}, 陈毅², 刘大翔^{1,3}, 许文年^{1,3}, 姚小月²

(1. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: [目的] 研究外掺 2 种植物纤维对冻融作用下植被混凝土抗剪强度的影响, 为植被混凝土生态保护技术在高寒地区的应用提供科学依据。[方法] 参考相关标准(GB/T50082-2009)中的慢冻法, 采用 2 因素 3 水平全面交叉试验开展研究。[结果] 未掺植物纤维的植被混凝土, 冻融后黏聚力显著减小, 内摩擦角变化不明显。掺入植物纤维可使经受 5 次冻融循环作用后植被混凝土的内摩擦角平均增加 5°左右, 并且随植物纤维掺量的增加, 内摩擦角变化无明显规律, 黏聚力则呈先增加后减小的趋势。表明纤维加筋对黏聚力的贡献存在临界掺量。棕纤维掺量对黏聚力的影响比黄麻纤维掺量更为敏感。[结论] 外掺植物纤维可有效改善植被混凝土抵抗冻融破坏的能力, 棕纤维和黄麻纤维的建议掺入比为 0.6% 和 0.6%, 具备推广应用前景。

关键词: 植被混凝土; 植物纤维; 冻融循环; 黏聚力; 内摩擦角

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)02-0136-04

中图分类号: TU411.7

文献参数: 梁永哲, 陈毅, 刘大翔, 等. 外掺植物纤维对冻融作用下植被混凝土抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 136-139. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.02.026

Effect of Additive Plant Fiber on Shearing Strength of Vegetation-compatible Concrete Under Freezing-thawing Cycles

LIANG Yongzhe^{1,2}, CHEN Yi², LIU Daxiang^{1,3}, XU Wennian^{1,3}, YAO Xiaoyue²

(1. Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in

Three Gorges Area, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Hydraulic and

Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] The effect of mixing two plant fiber into vegetation-compatible concrete on its shearing strength under the condition of freezing and thawing was studied, aimed to provide a scientific basis for the application of vegetation-compatible concrete based ecological protection technology in the alpine region. [Methods] According to slow freezing method in relevant test standards(GB/T50082-2009), 2 factors and 3 levels of comprehensive cross test was conducted. [Results] For the fiber unincorporated vegetation-compatible concrete, the frozen-thawed cohesion value of vegetation-compatible concrete was reduced remarkably as compared with that without freeze-thaw cycle, whereas no obvious change of internal friction angle value was observed. After 5 frozen-thawed cycles, the fiber addition made the internal friction angle value of vegetation-compatible concrete increased by an average of about 5°. The internal friction angle variation was not significant with the increase of fiber addition. However, cohesion firstly increased and then decreased with increasing fiber content, which implied that the contribution of fiber reinforcement to cohesion has a critical content. Palm fiber was proved more effective on cohesion than hemp fiber did as their content varied. [Conclusion] Fiber can improve the ability of vegetation-compatible concrete to against freezing and thawing.

收稿日期: 2015-04-21

修回日期: 2015-04-22

资助项目: 长江水利委员会长江科学院开放基金项目“植被混凝土加筋系统微生物腐蚀行为与机理”(CKWV2015205KY); 三峡大学博士科研启动基金项目(KJ2014B038); 国家自然科学基金项目(51278281); 湖北省教育厅优秀中青年科技创新团队计划项目(T201304)

第一作者: 梁永哲(1990—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 硕士研究生, 研究方向为边坡防护与水土保持。E-mail: lyz0125s@163.com。

通信作者: 刘大翔(1987—), 男(汉族), 湖北省潜江市人, 博士, 讲师, 主要从事生态修复技术研究。E-mail: Liudaxiang004@163.com。

The reasonable proportion of palm and hemp fiber was 0.6% and 0.6%. Fiber added vegetation-compatible concrete with the above testified materials and proportion is applicable and has the market prospectation.

Keywords: vegetation-compatible concrete; plant fiber; freeze-thaw cycles; cohesion; internal friction angle

植被混凝土生态防护技术是三峡大学研发的具有自主知识产权的生态防护技术,已在我国南方低纬度区域边坡防护与生态修复中得到了广泛应用。然而,我国国土面积的 53.5% 属于季节性冰冻地区^[1]。寒冷地区的工程建设经验和研究表明,在季节性冻土区,由于边坡土体长期经受周期性冻融循环作用,边坡稳定性受到严重影响^[2-3]。对生态防护基材而言,其主要成分为种植土,因此边坡生态防护技术在高寒地区的应用必定受到冻融循环作用制约。为提高土体抗冻性能,国内外就纤维加筋土做了较多研究,如日本曾通过改良法国 Texsol 技术开发了连续纤维补强技术,在边坡防护中得到广泛应用^[4];李广信等^[5]认为,当纤维处在土体剪切变形区域时,纤维在受拉时表现为裂而不断的现象,可增加土体抗剪强度。而生态防护领域相关研究^[6]表明,纤维固土护坡植生法在早期无植被覆盖下,能有效防止植生层水土流失;含椰纤维的植生基材保水性能好,抗破坏能力强,且纤维在逐步降解过程中还能为植被生长提供部分养分来源^[7],曹兴松^[4]研究发现纤维丝含量增加,植生土黏聚力和内摩擦角都呈先增大之后有所减小的趋势。可见,植物纤维加筋是一种良好的基材改良技术。然而,由于所使用植生基材成分不同,以及植物纤维种类繁多,实际工程应用中仅依靠经验确定纤维掺量。本研究将以植被混凝土为研究对象,选取两种易于获取、力学性能较好且降解缓慢的植物纤维,通过组合两种纤维掺量,定量研究外掺植物纤维对植被混凝土冻融作用下抗剪强度的影响,为季节性冰冻地区边坡生态防护基材配方改进提供科学依据。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

植被混凝土是由土、水泥、有机质及植被混凝土绿化添加剂等材料加水组配而成。本试验水泥采用 42.5 R 普通硅酸盐水泥;有机质采用锯末;绿化添加剂采用宜昌绿野环保工程有限责任公司生产的 LV-2 型添加剂,为三峡大学专利产品。试验所用土样则取自属于季节性冰冻地区的雅砻江流域两河口水电站工区,取样后将风干土过 2 mm 筛,对土样粒径大于 0.075 mm 采用机械振动筛分法,对土样小于 0.075 mm 的采用离心法,综合得到土样颗粒级配详见表 1。经测定,土样天然容重为 1.48 g/cm³,土粒相对密度为 2.68,孔隙率为 44.7%。试验选用的植被混

凝土基础配合比如表 2 所示,选用的植物纤维长度为 17~20 mm 的棕纤维和黄麻纤维,棕纤维直径为 25~50 μm,黄麻纤维直径为 15~30 μm。

表 1 土样各粒径范围百分比

粒径范围/mm	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	0.075~0.05	<0.05
百分比/%	21.34	20.04	26.63	18.45	11.29	2.21

表 2 植被混凝土基础配合比

材料名称	土	水泥	有机质	植被混凝土绿化添加剂
用量	100	8.0	6.5	4.5

注:配比为质量比。

1.2 试验方法

植被混凝土与工程中常用的水泥石土有一定相似性,但国内外对水泥石土冻融研究尚无直接标准或规范可供参考,一般参照土工试验及混凝土试验等相关规程进行。本试验参考《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准(GB/T50082-2009)》所述的慢冻法开展研究^[8],可测定试样在气冻水融反复作用下的质量变化。试验前,先将试样放入标准养护室中养护 7 d。养护完成后按编号置入框篮后即可放入冷冻箱开始冻融。冻融过程需保持冻结温度为 -20 ℃,冻结时间为 12 h,之后立即将试样放入电热恒温培养箱中加热,保持融化温度为 20 ℃,融化时间为 12 h,至此一次冻融循环结束。本试验设计冻融循环次数为 5 次。试验测试指标为各组试样冻融后的内摩擦角和黏聚力。按照表 3 设计的因素与水平进行全面交叉试验,有 9 组试样,计入 1 组不掺纤维空白样,共 10 组试样。另外,再制作 1 组不掺纤维的标准环刀样,不进行冻融作用,只进行剪切试验,可以比较冻融作用对试样抗剪强度的影响。每组 4 个试样,分别用于在 4 个不同垂直压力下快速直剪试验。制样时,先将植物纤维与植被混凝土干料混合均匀,再加水搅拌形成植被混凝土基材,然后以高 2 cm,直径 6.18 cm 的环刀为模具制成标准环刀样。5 次冻融循环结束后对所有试样进行快速直剪试验,直剪仪采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪,每组 4 个试样垂直压力分别为 50,100,150 和 200 kPa,手轮转速为 0.8 mm/min。

表 3 试验设计因素与水平

因素	水平 1	水平 2	水平 3
棕纤维/%	0.3	0.6	0.9
黄麻纤维/%	0.3	0.6	0.9

注:纤维含量是指纤维质量占干土质量的百分比。

2 结果与分析

2.1 冻融循环对植被混凝土抗剪强度的影响

对未掺纤维未冻融的植被混凝土和冻融循环 5 次后的未掺纤维植被混凝土分别进行直剪试验,对数据进行线性拟合后,得到冻融前后正应力与抗剪强度的关系如图 1 所示。

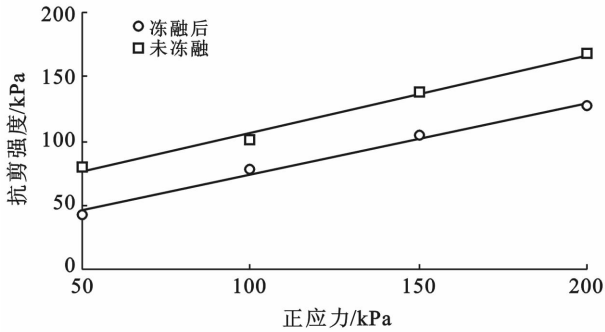


图 1 植被混凝土冻融前后的正应力与抗剪强度的关系

图 1 中,未冻融试样 $R^2 = 0.9906$,冻融后试样 $R^2 = 0.9917$,可根据库伦剪切强度公式得到抗剪指标详见表 4。经过 5 次冻融循环作用后黏聚力和内摩擦角均有不同程度的降低。其中黏聚力降低幅度较大,内摩擦角降低程度较小。冻融后黏聚力降低的主要原因可能是基材在冻结过程中,一部分结合水冻结成冰,冰晶体的发育生长破坏了基材颗粒间的联结而使基材结构弱化,从而导致黏聚力降低^[9]。另一方面,试验过程中虽对冻融前后试样含水率进行了控制,但依然难以保持完全一致,含水率的增加也降低了试样的黏聚力^[10]。内摩擦角变化可能由两方面原因共同引起。一是含水率的增加会降低试样内摩擦角^[10]。二是试样经过冻融后内摩擦角会增大,有学者对冻融前后的试样进行电镜扫描,发现大孔隙的总面积所占的比例减少,这会导致基材颗粒间的接触点增多,从而引起基材内摩擦角增大^[9,11],二者共同作用下产生相互抵消,导致冻融前内摩擦角稍小于冻融后的值。

表 4 冻融前后植被混凝土抗剪指标值

试样	含水率/%	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
未冻融循环	21	49.32	30.6
有冻融循环	25	18.342	29.2

2.2 纤维掺量对冻融循环后植被混凝土抗剪强度的影响

按前述试验方法对掺入植物纤维的试样进行冻融试验,注意试验过程尽量减少其他因素扰动,使各试样冻融后含水率始终保持在 25% 附近。冻融后快速直剪试验结果详见表 5。由表 5 可知,当试样不含纤维时,4 种法向应力条件下均小于含纤维试样所测得的抗剪强度。而在 50,150 和 200 kPa 的法向应力下,纤维含量为 0.6%+0.6% 时抗剪强度最大;在 100 kPa 的法向应力下,纤维含量为 0.6%+0.3% 时抗剪强度最大。上述现象说明:纤维的添加增加了基材冻融后的抗剪强度,但当纤维含量超过某一临界值时,反而会影响了基材的均匀性、整体性和团粒结构,从而降低了基材抗剪强度^[4]。

表 5 掺纤维基材室内直剪试验数据

试样编号	试样类型(棕纤维/%+麻纤维/%)	不同法向应力下的抗剪强度/kPa			
		50	100	150	200
CK	0+0	43.23	77.75	104.19	127.51
ZM ₁	0.3+0.3	45.23	107.51	126.19	155.78
ZM ₂	0.3+0.6	54.50	98.09	129.23	163.49
ZM ₃	0.3+0.9	60.83	89.83	135.82	166.86
ZM ₄	0.6+0.3	79.44	138.53	164.96	192.18
ZM ₅	0.6+0.6	116.1	136.87	185.65	227.42
ZM ₆	0.6+0.9	94.56	133.49	156.48	200.44
ZM ₇	0.9+0.3	81.64	110.30	132.17	181.16
ZM ₈	0.9+0.6	71.20	99.63	138.06	175.49
ZM ₉	0.9+0.9	48.27	87.19	107.43	162.71

2.3 纤维掺量对冻融后的试样内摩擦角及黏聚力的影响

对 10 组冻融后的试样在不同正应力下的抗剪强度进行拟合,发现相关系数最小为 0.9323,最大为 0.9958,说明用直线拟合的效果良好,据摩尔-库伦准则可计算得到各试样内摩擦角和黏聚力数据详见表 6。从表 6 中可知,不同纤维掺量基材的内摩擦角平均值为 35.51 $^\circ$,且各试样间数值相差不大,说明纤维掺量对基材内摩擦角的影响较小。但不含纤维基材的内摩擦角为 29.19 $^\circ$,明显偏小,说明纤维加筋效应显著。原因在于基材受剪时,不仅产生颗粒间的摩擦作用,还产生颗粒与纤维之间的摩擦作用,这对纤维-基材复合体来讲,都属于内摩擦^[12];此外,剪切面上的绝大部分纤维排列方向与剪切方向并不平行,有利于增加基材颗粒和纤维间的咬合摩擦作用^[13]。但纤维总量增加,内摩擦角变化却不大,原因可能是随着纤维含量的增加,纤维与基材颗粒间的接触面积只有少量增加^[14-15]。因此,可认为纤维掺量对内摩擦

角的影响并无明显规律,这与目前纤维加筋土的研究结论一致^[16]。从表 6 中还可知,基材黏聚力总体上随纤维掺量的提高先增加后减小。已有研究表明,当纤维含量较低时,由于纤维之间的间距较大,不能形成有效的纤维网,纤维对黏聚力的贡献主要是单个纤维的拉筋作用,而随着纤维掺量的增加,越来越多的纤维会构成纤维网,一段纤维的受力变形都会牵动与之交叉的各个方向的纤维,从而形成空间的受力区,从而导致黏聚力随着纤维掺量的增加有明显的升高^[13]。但现有研究也指出,纤维加筋对黏聚力值的贡献存在临界掺量,超过临界掺量后,强度指标随纤维掺量增加而下降^[14]。本试验中,同样存在临界掺量,当纤维含量超过 0.6%+0.6%后,黏聚力开始下降。

表 6 不同纤维含量试样的剪切指标值

试样编号	试样类型(棕纤维/%+黄麻纤维/%)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角增加率/%	黏聚力增加率/%
CK	0+0	29.19	18.35	0.00	0.00
ZM ₁	0.3+0.3	35.01	20.10	19.95	5.09
ZM ₂	0.3+0.6	35.61	21.80	22.00	13.97
ZM ₃	0.3+0.9	35.75	22.84	22.48	19.40
ZM ₄	0.6+0.3	36.10	52.61	23.68	175.09
ZM ₅	0.6+0.6	36.71	70.82	25.77	270.28
ZM ₆	0.6+0.9	34.26	61.09	17.38	219.38
ZM ₇	0.9+0.3	35.01	46.21	19.95	141.59
ZM ₈	0.9+0.6	35.09	33.27	20.22	73.93
ZM ₉	0.9+0.9	36.02	10.51	23.41	-45.05

2.4 棕纤维和黄麻纤维掺量的敏感性分析

本试验使用的两种纤维属于自然界中抗拉强度较大且不易降解的植物纤维,但二者在物理力学性能方面存在些许差异,导致基材抗冻性能对二者掺量的敏感性不同。为了对两种纤维的敏感性进行分析,先控制一种纤维的含量,使另一种纤维的含量发生变化,做出纤维含量和黏聚力的变化曲线,如图 2 所示。由图 2 可知,当棕纤维保持不变、黄麻纤维含量发生变化时,曲线较平(图 2 中实线),说明黄麻纤维含量的变化对试样黏聚力影响不大;当黄麻纤维保持不变、棕纤维含量发生变化时,试样黏聚力发生较大变化(图 2 中虚线),说明棕纤维含量对黏聚力的影响比黄麻纤维敏感得多。这可能与棕纤维和黄麻纤维的物理力学特性有关。黄麻纤维主要成分为韧皮纤维,有较高的结晶度和取向度,且又沿纤维径向呈层状结构分布,使黄麻纤维断裂伸长率偏低。而棕纤维的脂蜡质含量很高,使得纤维韧性较强。试样剪切过程属于弹塑性破坏过程,可使棕纤维的韧性充分发挥。因

此,棕纤维掺量对试样黏聚力的影响比黄麻纤维更为敏感。

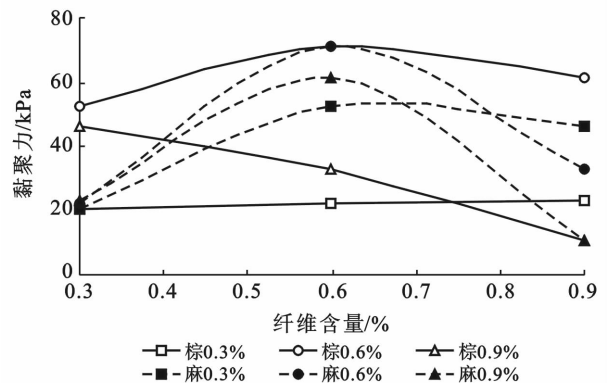


图 2 不同纤维配比试样的黏聚力变化

3 结论

(1) 未掺纤维植被混凝土经过 5 次冻融后,抗剪强度急剧下降,其中黏聚力值降低明显,而内摩擦角值变化不明显,说明外掺植物纤维可显著提高冻融作用下植被混凝土力学性能。

(2) 5 次冻融循环后,含纤维植被混凝土内摩擦角比不含纤维时平均要大 5°左右,但纤维掺量对内摩擦角的影响并无明显规律;黏聚力则随纤维掺量提高呈先增加后减小的规律,说明植物纤维存在临界掺量,可使植被混凝土抗冻效果最好。

(3) 由于植物纤维物理力学性能差异,棕纤维含量对冻融条件下植被混凝土黏聚力的影响比黄麻纤维含量更为敏感。

(4) 当棕纤维与黄麻纤维组合掺量为 0.6%+0.6%时,试样黏聚力与抗剪强度最大。

(5) 本次试验研究冻融循环次数选择 5 次,是在正式试验前,用立方样进行了测试试验,发现冻融循环 4~5 次后试样就会发生较大的坍塌,所以最后确定冻融循环次数为 5 次;这可能与实际工程的冻融作用有所差异,以后可以结合工程实际情况,更加合理地确定冻融循环次数,进行更深入的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 谭忆秋,徐慧宁,周纯秀,等. 季节性冰冻地区路基温度场分布规律[J]. 哈尔滨工业大学学报,2011,43(8):98-102.
- [2] 常丹,刘建坤,李旭,等. 冻融循环对青藏粉砂土力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(7):1496-1502.
- [3] 魏静,许兆义,包黎明,等. 青藏铁路多年冻土区土工格室护坡试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(S1):3168-3173.

(3) 基于数量化理论Ⅲ对各样品滑坡的得分计算,得出滑坡 13,14 及 19 号的发育程度较强,说明其危险性较高,而滑坡 1,8,12,15,21,22,23 号的发育程度较弱,危险性较低,其余滑坡的发育程度中等,各滑坡影响因素之间的耦合程度也具有一定差异性,其中滑坡 8,10,12,16,18,19,20,23,25,26,28,33 号的耦合程度相对较强,其余滑坡的耦合程度相对较弱。

(4) 对比数量化理论Ⅲ及杨家垆滑坡的现场调查,得出两者的分析结果相符,验证了数量化理论Ⅲ在川东红层滑坡中应用的有效性,为川东地区多因素分析滑坡提供了新的思路。

[参 考 文 献]

- [1] 程强,寇小兵,黄绍槟,等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报,2004,12(1):34-40.
- [2] 耿兴福,苗天德. 近水平层状红层软岩滑坡成因机制研究[J]. 地质灾害与环境保护,2014,25(1):9-12.
- [3] 黄绍槟,程强,胡厚田. 四川红层分布及工程环境特征研究[J]. 公路,2005(5):81-85.
- [4] 李江,许强,胡泽铭,等. 红层缓倾角土质滑坡发育环境、分布规律及影响因素研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(12):88-93.
- [5] 张明,胡瑞林,殷跃平,等. 川东缓倾红层中降雨诱发型滑坡机制研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3783-3790.
- [6] 张世林,石胜伟,王军朝,等. 杨家垆缓倾岩质滑坡破坏机理及稳定性评价[J]. 水电能源科学,2015(2):38.
- [7] 赵黎明,全怀周. 模糊数量化理论Ⅲ在人力资源绩效评估中的应用[J]. 西北农林科技大学学报:社会科学版,2004(1):76-78.
- [8] 石庆礼,杨胜强. 数量化理论Ⅲ及其在煤与瓦斯突出危险性评估中的应用[J]. 中国安全生产科学技术,2013(6):69-74.
- [9] 吴财芳,秦勇,张许良. 数量化理论Ⅲ在瓦斯突出预测敏感地质指标筛选中的应用[J]. 工程地质学报,2005,13(2):263-268.
- [10] 李军霞,王常明,王钢城,等. 基于数量化理论Ⅲ的滑坡发育影响因素及耦合作用强度分析[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(6):1206-1213.
- [11] 周明涛. 植被混凝土冻融效应试验研究[D]. 湖北武汉:武汉大学,2010.
- [12] 扈萍. 高速公路边坡植被护坡的力学分析[D]. 山东济南:山东大学,2005.
- [13] 王德银,唐朝生,李建,等. 纤维加筋非饱和黏性土的剪切强度特性[J]. 岩土工程学报,2013,10(35):1933-1940.
- [14] 张锋,凌贤长,吴李泉,等. 植被须根护坡力学效应的三轴试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(Z2):3979-3985.
- [15] 杨悦舒,夏振尧,肖海,等. 多花木蓝根—土复合体抗剪强度试验研究[J]. 长江科学院院报,2013,31(2):55-60.
- [16] Yang Yunhua, Cheng Shengguo, Gu Jianyun, et al. Triaxial tests research on strength properties of the polypropylene fiber reinforced soil [C] // Multimedia Technology(ICMT), 2011 International Conference on IEEE. 2011.
- (上接第 139 页)
- [4] 曹兴松,刘世雄,章梦涛,等. 纤维丝加筋补强植生土强度参数的试验研究[J]. 公路交通科技:道路科学版,2013(8):46-50.
- [5] 李广信,陈轮,郑继勤,等. 纤维加筋黏性土的试验研究[J]. 水利学报,1995(6):31-36.
- [6] 刘世雄,曹兴松,程睿,等. 纤维丝固土护坡植生法在边坡防护中的水土保持效应[J]. 山地学报,2013,31(6):701-709.
- [7] 刘光锐,龚明子,刘君秀,等. 椰纤维植被混凝土性能研究[J]. 商品混凝土,2013(11):30-32.
- [8] 住房和城乡建设部. GB/T50082-2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S]. 北京:光明日报出版社,2010.
- [9] 齐吉琳,马巍. 冻融作用对超固结土强度的影响[J]. 岩土工程学报,2006,28(12):2082-2086.
- [10] 吴志琴. 冻融循环作用对粉质黏土抗剪强度指标影响的研究[D]. 黑龙江哈尔滨:黑龙江大学,2012.