

植被混凝土有机质类型与配比的合理选取

刘大翔^{1,2}, 李少丽³, 许文年³, 程尊兰¹

(1. 中国科学院·水利部成都山地灾害与环境研究所山地灾害与地表过程重点实验室 四川 成都 610041;
2. 中国科学院研究生院 北京 100049; 3. 三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室 湖北 宜昌 443002)

摘要:为同时保证植被根系生长需求和坡面稳定,需通过试验确定植被混凝土有机质合理类型与配比。选取 4 种常见富含有机质材料(稻壳、锯末、玉米酒糟、稻谷酒糟),以有机质类型和掺入量为变量,分别试验研究了其对植被混凝土孔隙率和无侧限抗压强度的影响。试验结果表明:植被混凝土孔隙率增幅随有机质配比增加而逐渐减小,无侧限抗压强度降幅则随有机质配比增加而增大;有机质的合理类型为小粒径粉末状有机质,合理配比范围为 7%~9%。

关键词: 植被混凝土;有机质配比;孔隙率;无侧限抗压强度

中图分类号: TU411; TU528.7 文献标志码: A 文章编号: 1006-7647(2012)04-0037-04

Selection tests for type and ratio of organic matter in vegetation concrete/LIU Da-xiang^{1,2}, LI Shao-li³, XU Wen-nian³, CHENG Zun-lan¹ 1. Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

Abstract: In order to simultaneously guarantee the root growth needs of vegetation and slope stability, proper types and ratios have to be determined through selection tests. Four kinds of common organic matter (rice husk, sawdust, corn vinasse, and rice vinasse) were selected to investigate the influence of different organic matter types and ratios on the porosity and unconfined compression strength of vegetation concrete. The test results show that while the porosity decreases with an increase in organic matter ratio, the unconfined compression strength increases with increasing organic matter ratio. The most reasonable type of organic matter is found to be the small size powder with a ratio ranging from 7% to 9%.

Key words: vegetation concrete; organic matter ratio; porosity; unconfined compression strength

水电建设工程扰动区的生态修复是环境保护的重要内容,从地形地貌的角度看,扰动区可分为平地 and 边坡两大类型。针对平地的生态修复,可参考城市绿地工程,目前国内相关技术理论均很成熟,但扰动区内边坡(开挖边坡、弃渣地、消落带等)的生态修复在我国尚处于发展的初期阶段,应用较多的典型技术有植被混凝土生态防护技术^[1-2]、厚层基材喷射技术^[3]、液压喷播植草技术^[4]等。上述技术的核心是基材,因此基材特性一直是研究重点和技术瓶颈。

植被混凝土是把水泥、土、有机质、植被混凝土绿化添加剂(专利产品)、混合植绿种子按特定的组成比例,并添加一定量的水充分搅拌后形成的混合物,用于边坡生态防护工程。实际工程中发现,植物根系大多集中在表层,其原因主要是植被混凝土孔隙率较低,导致根系难以深入。为改善此状况,可在植被混凝土中增加有机质,因为有机质自身是疏松

的多孔体,同时又能形成可改良土壤结构的团聚体胶结剂^[5-6]。但有机质配比与基材强度成反比,因此需分别研究有机质对植被混凝土孔隙率和力学性能的影响,进而得到有机质的合理类型与配比,此举可进一步完善植被混凝土的技术体系,对水电工程扰动区生态环境重建具有积极意义。

本研究在借鉴前人研究成果的基础上,通过室内试验研究 4 种常见的富含有机质材料(稻壳、锯末、玉米酒糟、稻谷酒糟)在不同掺入量条件下,分别对植被混凝土孔隙率和无侧限抗压强度的影响,以期获得植被混凝土有机质合理类型和配比。为方便起见,文中对富含有机质的材料简称为有机质。

1 试样制作与试验方法

1.1 试样制作

生态护坡工程实施过程中,原材料在满足性能

要求的前提下应价格低廉、来源广泛。经综合考虑,选取了稻壳、锯末和酿酒后的下脚料——酒糟(玉米酒糟和稻谷酒糟)共4种材料作为试验用有机质。4种有机质在使用前均经过干燥处理。

试验所用植被混凝土试样配比(质量比,以干土质量为计算基数)如下:水泥质量为干土质量的8%;植被混凝土绿化添加剂质量为干土质量的4%;有机质配比变化梯度则依据经验设计,分别为干土质量的3%、5%、7%、9%、11%;水质量为干土质量的30%。各材料特性如下:植生土为黏土,干密度为 1.71 g/cm^3 ,天然含水率为25.3%,塑限为22.5%,液限为40.4%,内摩擦角为 14° ,黏聚力为18 kPa;水泥为宜昌华新水泥厂生产的32.5级普通硅酸盐水泥;植被混凝土绿化添加剂为宜昌绿野环保工程有限公司添加剂厂生产的专利产品LY-2型混凝土绿化添加剂;稻壳取自宜昌市西陵区维民米厂,厚度 $14\sim 30\ \mu\text{m}$;锯末为宜昌市夜明珠木材加工厂生产的松木锯末;酒糟为宜昌稻花香酿酒厂酿酒后剩余的含可溶物干玉米酒糟和稻谷酒糟;水为自来水。

孔隙率试验试样尺寸为 $70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}\times 70.7\text{ mm}$,无侧限抗压强度试验试样尺寸为 $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,试样制作以实际工程中植被混凝土的密度为控制标准,合格试样的密度应为 $1.55\sim 1.70\text{ g/cm}^3$ 。每组试样均含两个重复样,养护龄期为7 d。

1.2 试验方法

1.2.1 孔隙率试验方法

由于植被混凝土是由多种材料混合而成的,普通土壤的孔隙率测试方法不适用于植被混凝土孔隙率的测试,通过查阅国内外相关文献,最终参考普通混凝土孔隙率的测定方法来测试植被混凝土的总孔隙率和连通孔隙率^[7]。物体内部相互连通的微小空隙的总体积与该物体的外表体积的比值称连通孔隙率或有效孔隙率;物体内部相通的和不相通的所有微小空隙的总体积与该物体的外表体积的比值称总孔隙率或绝对孔隙率。

1.2.2 无侧限抗压强度试验方法

植被混凝土与土木工程中常用的水泥土存在许多相似点^[8] ①土和水泥均是二者的主要材料,且水泥含量接近,水泥土中水泥质量为土的10%左右,植被混凝土中水泥质量为土的6%~8%;②都将混合物充分搅拌后再加以应用;③二者的力学性能均与水泥掺入比、养护龄期和土质密切相关。因此,在国内外无相关力学试验标准的情况下,参考土工试验及混凝土试验等相关规程,对植被混凝土开展试验研究是可行和必要的。综合其他关于水泥土试验文献所用的参考规范,试验的参考依据有SL 237—

1999《土工试验规程》、GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》和《建筑工程常用材料试验手册》^[9]。

试验所用仪器为济南试金集团有限公司生产的WAW-Y1000C型微机控制电液伺服万能试验机。加载采用控制行程的方式,试样加载速率为 $0.6\sim 1.2\text{ mm/min}$,但每组试样加载速率一致。

2 孔隙率试验结果与分析

2.1 总孔隙率与连通孔隙率间的联系

各试样孔隙率与配比间的关系见图1,可见总孔隙率 P_1 与连通孔隙率 P_2 随有机质配比变化的趋势线基本保持平行,即同种有机质条件下,二者间的差值为定值。此定值也可通过理论分析得出。

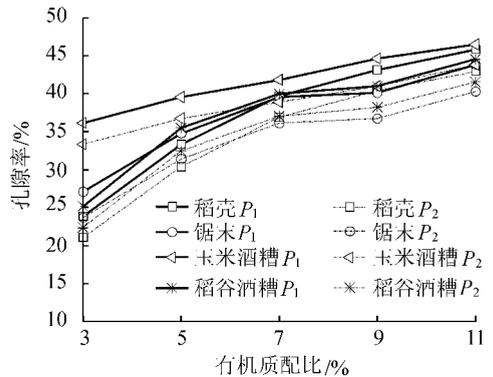


图1 孔隙率随有机质配比变化

文献[7]中提供的总孔隙率 P_1 计算公式和连通孔隙率 P_2 计算公式分别为

$$P_1 = \left(1 - \frac{W_2 - W_1}{V}\right) \times 100\% \quad (1)$$

$$P_2 = \left(1 - \frac{W_3 - W_1}{V}\right) \times 100\% \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可得

$$P_1 - P_2 = \frac{W_3 - W_2}{V} =$$

$$\frac{W_2 + \rho_{\text{水}} V_{\text{内}} - W_2}{V} = \frac{\rho_{\text{水}} V_{\text{内}}}{V}$$

式中: W_1 为试样在水中浸泡24 h后在水中称得的质量; W_2 为试样烘干至恒重后在空气中称取的质量; W_3 为试样在标准养护条件下放置24 h后在空气中称得的质量; V 为试样总体积; $V_{\text{内}}$ 为试样内部孔隙体积; $\rho_{\text{水}}$ 为水在 4°C 时的密度。因 $V_{\text{内}}$ 、 V 和 $\rho_{\text{水}}$ 均为定值,所以 $P_1 - P_2$ 是定值,说明理论分析和试验结果一致。

2.2 总孔隙率分析

图1中稻壳试样孔隙率随配比单调递增,且递增的速度逐步减小;锯末试样孔隙率总体上随锯末配比的增加而单调递增,当配比在7%~9%之间时基本保持不变;玉米酒糟试样随有机质配比变化的

趋势线接近于直线,稻谷酒糟试样变化规律与锯末试样相似。

总孔隙率是植被混凝土中连通与非连通的孔隙率之和,植物根系生长不仅穿过连通孔隙,而且会打通非连通孔隙,总孔隙率大小对植被根系的生长起着重要作用。同时前文的理论与试验分析表明总孔隙率与连通孔隙率间差值为定值,因此此处研究仅针对总孔隙率。

玉米酒糟试样孔隙率一直最高,说明在有机质配比相同的情况下,其对基材总孔隙率的贡献最大。观察有机质配比由3%提高到11%时总孔隙率的增幅,发现增幅由大至小依次为:稻壳试样、稻谷酒糟试样、锯末试样、玉米酒糟试样。虽然一开始稻壳对植被混凝土总孔隙率的影响最小,但其增幅最大,而一开始玉米酒糟对植被混凝土总孔隙率的影响最大,但其增幅最小。有机质配比为3%时,4种有机质对应的植被混凝土总孔隙率之间的差值较大,但配比达到11%时,4者间的差值明显缩小。

所有试样当有机质配比从3%增加到5%时,总孔隙率增量最大。随着有机质配比的增加,总孔隙率增量总体上呈现逐渐减小的变化趋势,说明配比较小,有机质对孔隙率的影响较大。比较4种不同有机质试样,稻谷酒糟试样的总孔隙率前期增幅最大,达到10.35%;玉米酒糟试样增幅最小,总孔隙率增量仅为3.40%。

3 无侧限抗压强度试验结果与分析

3.1 有机质对比对无侧限抗压强度的影响

由表1可知,玉米酒糟试样的无侧限抗压强度明显低于其他3种试样,原因是在试样制作过程中掺入的是晒干后的玉米酒糟,在试样养护过程中玉米酒糟吸水膨胀,使试样内部产生很多细小裂纹,降低了其强度。随有机质配比的增加,稻壳试样、锯末试样、稻谷酒糟试样的无侧限抗压强度均逐渐降低。有机质配比由3%增加到5%时,无侧限抗压强度降低缓慢;而有机质配比达到5%后,降低速度加快。由以上分析可知,配比较小,有机质对试样无侧限抗压强度的影响较小。

表1 无侧限抗压强度试验中各试样峰值应力

试样	不同有机质配比试样的峰值应力/MPa				
	3%	5%	7%	9%	11%
稻壳	0.493	0.483	0.391	0.349	0.251
锯末	0.484	0.47	0.432	0.347	0.305
玉米酒糟	0.158	0.136	0.135	0.112	0.097
稻谷酒糟	0.499	0.461	0.408	0.341	0.290

对稻壳试样、锯末试样、稻谷酒糟试样在不同有

机质配比情况下的强度进行分析,其强度比值 $q_{11\%}/q_{3\%}$ 分别为0.509、0.630、0.581,即锯末试样无侧限抗压强度降低速度较慢,稻谷酒糟试样次之,稻壳试样降低速度最快。当有机质配比为11%时,锯末试样的无侧限抗压强度仍超过0.3 MPa,基本能满足植被护坡要求。

3.2 应力-应变分析

选取有机质配比为9%时各试样的应力-应变关系曲线进行分析。由图2(图中3条曲线表示同

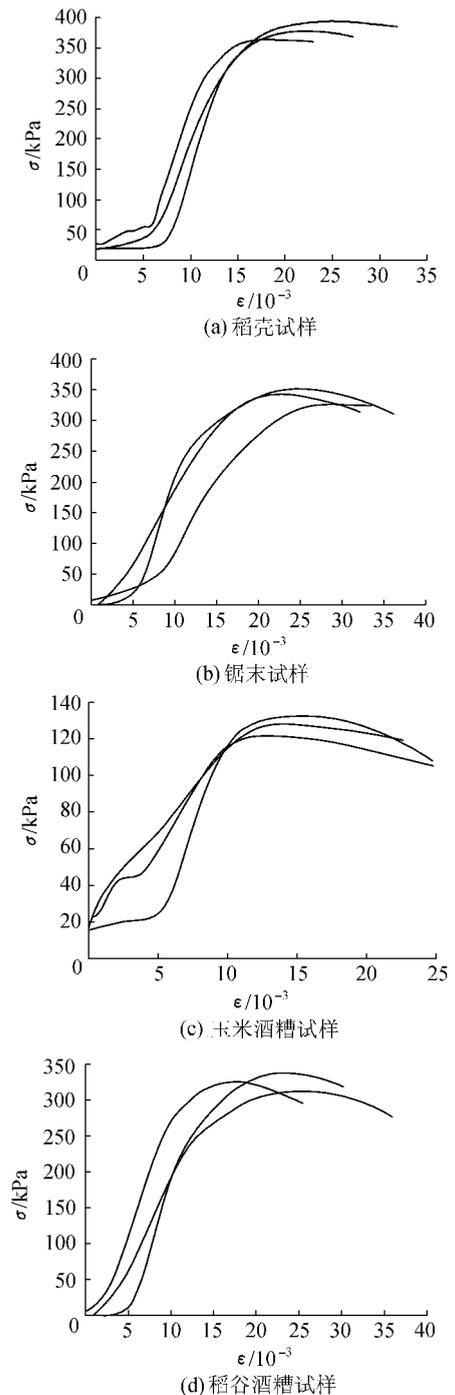


图2 有机质配比为9%时4种试样的应力-应变关系曲线

组试样中 3 个平行试样的应力-应变关系)可知,一些试样的应力-应变关系曲线在初始阶段都呈波浪线状态,在于试样表面与试验机未完全接触,受力不均,系统处于调整阶段,待调整完毕,试样受力均匀以后,曲线就变得平滑。而玉米酒糟试样的应力-应变关系曲线几乎全为波浪状,而非平滑曲线,主要原因在于玉米酒糟试样在测试之前内部已经存在很多细小裂纹,加载过程困难。

植被混凝土应力-应变曲线与普通混凝土类似,即有脆性材料的性质^{9]}。植被混凝土的应力-应变过程根据应力的大小,可分成 5 个阶段。阶段 I,由于试样表面不完全平整,不能与仪器完全接触,应力-应变关系曲线有一个自动调整的阶段;阶段 II,当调整平整后,应力介于(30%~70%) σ_{max} 之间时,应力-应变曲线趋于线性上升,此时植被混凝土处于弹性阶段,弹性变形是主要变形,同时伴随极小的塑性变形,主要是局部拉应力引发了极少的新生微裂缝;阶段 III,当应力介于(70%~90%) σ_{max} 之间时,应力-应变关系曲线曲率变小;阶段 IV,应力继续增大达到峰值后,植被混凝土承载能力急剧下降,新生裂缝范围与深度迅速扩大;阶段 V,根据水泥土与普通混凝土的应力-应变变化规律,应变继续增长,试样将依靠摩擦力抵抗残余应力。

由于几组试样的变化规律相似,因此选择锯末试样分析应力-应变关系曲线随有机质配比增加的变化规律。由图 3 可知,随着有机质配比的增加,曲线初始直线段的斜率减小,弹性模量减小,所达到的峰值应力也逐渐减小,应力达到峰值时的应变逐渐增加,说明植被混凝土随着有机质配比的增加脆性逐渐减弱。

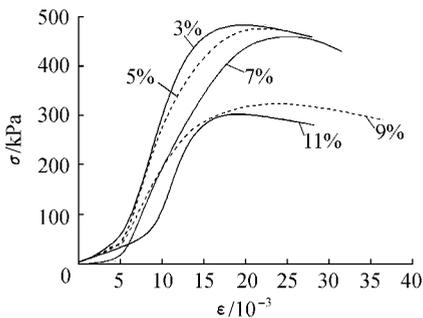


图 3 不同配比锯末试样应力-应变关系曲线

4 有机质类型与配比的合理选取

据郑碧仿等^{10]}的研究,最适宜植物生长的典型土壤的三相分布应为:土壤中固体部分约占土壤总体积的 1/2,水分和空气各约占 1/4,且土壤固体中矿物质占固相总量 95%,有机质占 5%。但周德培等^{11]}通过对厚层基材的研究,认为大部分生态基材

的三相分布并不满足以上条件,但植物仍生长良好。通过有机质对植被混凝土孔隙率的影响试验,以及植被混凝土无侧限抗压强度试验,可以得出植被混凝土的孔隙率和强度是成反比的,即有机质配比增加,孔隙率增加,无侧限抗压强度降低。因此可综合考虑两方面因素,在满足强度要求的前提下尽量增大基材孔隙率,得出植被混凝土有机质较为合理的配比范围为 7%~9%,在此范围内,植被混凝土无侧限抗压强度大于 0.34 MPa。根据已有研究成果^{12]},认为植被混凝土的无侧限抗压强度大于 0.3 MPa,就能满足大部分边坡的强度及抗冲刷要求;同时,此配比范围内的植被混凝土总孔隙率在 39.55%~44.65%之间,连通孔隙率在 36.15%~41.00%之间,而生态防护基材孔隙率在 30%~44%之间,植物就能较好生长。可见,此配比既能令基材满足力学性能要求,同时又能形成植被生长所需的物理结构,达到了试验预期目的。需要说明的是,在生态防护工程实施中,有机质配比还需根据实际情况而定,当坡度较缓时可适当增加掺入量;当所选土壤有机质含量较高时,可适当降低掺入量。

5 结论

- a. 植被混凝土孔隙率随有机质配比增加而增加,但其增幅随有机质配比增加逐渐减小,总孔隙率与连通孔隙率的差值为定值。
- b. 随着有机质配比的增加,植被混凝土的无侧限抗压强度逐渐下降,且降低速度加快。
- c. 锯末试样在强度试验中表现最好,当有机质配比为 11%时,其无侧限抗压强度仍超过 0.3 MPa,基本能满足植被护坡要求。
- d. 玉米酒糟试样的总孔隙率和连通孔隙率明显高于其他 3 种试样,而无侧限抗压强度却相反,因此大粒径材料不宜作为植被混凝土的有机质,若选择用大粒径有机质,应将其充分磨碎,以免大粒径有机质使生态防护基材产生裂纹,使基材力学性能显著降低。
- e. 综合有机质对植被混凝土孔隙率及无侧限抗压强度的影响,得出植被混凝土有机质合理配比范围为 7%~9%。

参考文献:

[1] 王铁桥,许文年,叶建军,等.挖方岩石边坡绿化技术与方法探讨[J].三峡大学学报:自然科学版,2003,25(2):101-104.
 [2] 许文年,王铁桥,李建林,等.岩石边坡护坡绿化技术应用研究[J].水利水电技术,2002,33(7):35-37.

(下转第 54 页)

以下近似公式：

$$T_B = \left[0.012HL_1L_2 \left(\frac{H}{122} \right)^{\frac{H}{122}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

式中： L_1 为坝顶高程处拱端可利用基岩面河谷宽度； L_2 为拱冠梁底以上 $0.15H$ 处拱端可利用基岩面河谷宽度。

根据本文建议厚高比(式(2))，可得拱坝底厚经验公式为

$$T = k_0 H^{1.3} \left[0.0033 \left(\frac{L}{H} \right)^2 - 0.0016 \frac{L}{H} + 0.0254 \pm S \right] [0.9(1 + \mu)] \quad (5)$$

其中标准方差 $S = 0.0115$ 。

对式(3)与式(5)进行计算比较分析(由于资料不全，暂取参数 $\mu = 0.1$, $k_0 = 1$)，结果列于表1。由计算结果分析可知，式(5)比式(3)更接近实际设计值，说明式(5)稍优，且由图1可知式(5)的相关系数、标准方差等回归指标均优于式(3)，但在特高拱坝中必须考虑河谷两岸岩基的地质状况、河谷形状的对称性等其他因素对拱坝厚高比的修正。

通过计算，认为式(4)对坝高在150m左右的拱坝有参考价值，但对于坝高在300m左右的拱坝计算的建议底厚值太大，没有参考价值。

3 结论

a. 回归分析表明：拱坝厚高比与 $H^{0.3}$ 成正比(此时相关系数最大)，且厚高比与弧高比呈增函数关系，给出了经验性的拱坝厚高比计算公式，进而给出了拱坝底厚建议公式(式(5))，可为实际工程设计提供方便。式(3)可视作式(2) $a = 0$ 且对弧高比线性回归分析时的特例。

b. 计算分析表明，式(5)比式(3)计算值更接近

实际设计值，并且式(5)的相关系数、标准方差等回归指标均优于式(3)，因此式(5)具有一定的参考价值，但在特高拱坝中需考虑地质条件等不利因素的修正系数 k_0 。而式(4)对于特高拱坝($> 250\text{m}$)建议底厚值太大，没有参考价值。

c. 由于拱坝实际厚高比的选取涉及影响因素多且复杂，如工程地质条件(两岸及坝基的断层与节理等)、河谷断面形状、坝址处地震状况、坝基渗流状况等，对大量已建拱坝资料进行统计回归分析，是寻求高拱坝厚高比的一种实用方法。

参考文献：

- [1] 水利水电规划设计总院. 水工设计手册:第五卷[M]. 2版. 北京:中国水利水电出版社, 2011:109-170.
- [2] LOMBARDI G. Klnbrein Dam: an unusual solution for an unusual problem[J]. Water Power & Dam Construction, 1991, (6):31-34.
- [3] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全:拱坝[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1995:203-207.
- [4] 陈宗梁. 世界超级高坝[M]. 北京:中国电力出版社, 1998:40-41.
- [5] 任青文, 王柏乐. 关于拱坝柔度系数的讨论[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2003, 31(1):1-4.
- [6] 黄朝煌. 薄高拱坝坝体屈曲稳定初探[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2011.
- [7] 饶宏铃. 拱坝体形参数统计分析[J]. 水电站设计, 2004, 20(3):1-5.
- [8] 徐福卫, 田斌. 关于拱坝柔度系数的研究[J]. 人民长江, 2007, 38(11):41-42.
- [9] 李瓚, 陈飞, 郑建波, 等. 特高拱坝枢纽分析与重点问题研究[M]. 北京:中国电力出版社, 2004.
- [10] 美国垦务局. 拱坝设计[M]. 拱坝设计翻译组, 译. 北京:水利电力出版社, 1984.

(收稿日期:2011-12-09 编辑:熊水斌)

(上接第40页)

- [3] 张俊云, 周德培. 厚层基材喷射植被护坡基材混合物的收缩恢复性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(7):1203-1208.
- [4] 刘德荣, 马永林, 韩烈保, 等. 坡面液喷播绿化草种及组合的筛选[J]. 北京林业大学学报, 2000, 22(2):41-45.
- [5] 张俊华, 常庆瑞, 贾科利, 等. 黄土高原植被恢复对土壤肥力质量的影响研究[J]. 水土保持学报, 2003(4):38-41.
- [6] 孙超, 许文年, 夏振尧, 等. 岩质边坡植被混凝土肥力时间变异性研究[J]. 中国水土保持, 2009(4):32-34.
- [7] YANG Jing, JIANG Guo-liang. Experimental study on

properties of pervious concrete pavement material[J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(3):381-386.

- [8] 许文年, 夏振尧, 周宜红, 等. 植被混凝土无侧限抗压强度试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, 38(4):51-54.
- [9] 项翥行. 建筑工程常用材料试验手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.
- [10] 郑碧仿, 张俊云, 李绍才, 等. 岩石边坡植被护坡技术(4)厚层基材基本特性研究[J]. 路基工程, 2001(3):1-4.
- [11] 周德培, 张俊云. 植被防护工程技术[M]. 北京:人民交通出版社, 2003:15-26.
- [12] 许文年, 叶建军, 周明涛, 等. 植被混凝土护坡绿化技术若干问题探讨[J]. 水利水电技术, 2004, 35(10):50-52.

(收稿日期:2011-12-05 编辑:熊水斌)