

高速公路边坡 CF 网防护抗冲刷室内模型试验研究

程 晔^{1,2}, 方 靓³, 赵俊锋³, 周翠英^{1,2}

(1. 中山大学 工学院, 广东 广州 510275; 2. 中山大学 岩土工程与信息技术研究中心, 广东 广州 510275;

3. 厦门鹭路兴绿化工程建设有限公司, 福建 厦门 361009)

摘要: 基于韶赣高速公路边坡工程实际, 设计制作生态边坡防护室内抗冲刷试验模型, 进行包括高羊茅、狗牙根、蜈蚣菊等 3 个物种; 1:0.75, 1:1 和 1:1.15 等 3 个不同边坡坡度, CF(椰纤维)网、三维网、三维网+CF 网、复合网、复合网+CF 网、土工格室、土工格室+CF 网等 7 种不同生态边坡防护形式, 40, 80, 120 L/(10⁴ s·m²)等 3 个不同降雨强度, 植物生长 2 和 5 个月等 2 个不同生长时期在内的共计 378 组冲刷量测试试验。试验结果表明: 相同条件下 CF 网抗冲刷效果比土工格室、复合网和三维网均明显要好, 特别对于高羊茅和狗牙根生长初期(2 个月)且边坡坡度大于 1:1 时、蜈蚣菊生长初期(2 个月)与后期(5 个月)等情况, 单独采用 CF 网或采用 CF 网与其他防护措施相结合的防护形式可有效降低暴雨对边坡的冲刷。

关键词: 边坡工程; 生态防护; CF 网; 模型试验

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2010)增 1-2935-08

INDOOR SCOUR MODEL TEST OF EXPRESSWAY SLOPE ECOLOGY PROTECTION USING COCONUT FIBRE NETS

CHENG Ye^{1,2}, FANG Liang³, ZHAO Junfeng³, ZHOU Cuiying^{1,2}

(1. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China; 2. Research Center for Geotechnical Engineering and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China; 3. Xiamen Luluxing Green Project Construction Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361009, China)

Abstract: According to the situation of Shaoguan-Ganzhou expressway slope project, the indoor scour test model of expressway slope ecology protection was designed and made. 378 groups scour testing were carried out which included three kinds of plants(i.e. Tall fescue, Dogtoothgrass, Trilobate wedelia), three kinds of slope angles(i.e. 1:0.75, 1:1 and 1:1.15), seven kinds of protection forms(i.e. coconut fibre nets, three-dimensional nets, three-dimensional nets plus coconut fibre nets, wire netting, wire netting plus coconut fibre nets, geocell, geocell plus coconut fibre nets), three kinds of rainfall intensities(i.e., 40, 80, 120 L/(10⁴ s·m²)) and two plant growth periods(i.e. 2-month and 5-month). The testing results show that the protection effect which used coconut fibre nets is markedly better than that of three-dimensional nets, wire netting, and geocell. The slope ecology protection which used coconut fibre nets solely or coconut fibre nets and other protection forms together can availablely reduce the rainstorm scour especially when the tall fescue and Dogtoothgrass growth 2-month and the slope angle is bigger than 1:1, or Trilobate wedelia growth 2-month or 5-month.

Key words: slope engineering; bio-engineering protection; coconut fibre(CF) nets; model test

收稿日期: 2009-04-20; **修回日期:** 2009-06-15

基金项目: 广东省交通厅 2007 年度科技项目(2007-11)

作者简介: 程 晔(1974-), 男, 博士, 1995 年毕业于湖南大学土木系工程建筑工程专业, 现为在站博士后, 主要从事岩石力学试验方面的研究工作。E-mail: chengye0515@21cn.com。通讯作者: 周翠英(1963-), 女, 博士, 现任教授、博士生导师。E-mail: zhoucey@mail.sysu.edu.cn

1 引言

随着我国高速公路建设的快速发展,高速公路边坡生态防护技术发展迅速,各种生态防护技术^[1~4]与防护形式^[5~12]层出不穷,目前应用较多的防护形式如三维网^[5, 8, 9]、土工格室(格栅)^[7~10, 12]、复合网^[4, 10, 11]等,但从大量工程实际情况看,目前仍存在不少问题:如高速公路生态边坡植物养护成本高,部分路段草坪退化严重;生态防护结构与功能脱节,过于追求短期景观效果而忽视边坡生态群落的演化与长期稳定^[5, 7]。而笔者认为,最为严重且目前仍未引起高度重视的问题是以环保为目的的边坡生态防护工程中却大量采用非降解或难降解的“土工合成材料”,给环境保护留下了严重隐患。

CF(coconut fibre)网也称椰纤维网或椰棕网,是椰子壳通过机械粉碎后利用其纤维编制成一定规格尺寸的网,可用于边坡或堤岸的生态防护,由于其具有良好的抗冲刷性能、一定的吸水性和保水性、较大的抗拉强度、能与坡面很好贴近、且可完全降解,因此得到了较广泛的关注^[13~15]。CF网可在植物生长前期起到土层加筋与表层抗冲刷作用,而到边坡植物群落恢复且稳定(5~10 a)后可完全降解,为彻底解决边坡生态防护工程因土工合成材料大量应用而产生的固体废弃物污染问题提供了一种思路与方法。目前CF网应用于高速公路边坡生态防护,其防护效果、抗冲刷能力,与防护物种相互适应性等方面目前仍缺少研究。因此本文依托韶赣高速公路工程实际,采用抗冲刷室内模型试验对比研究CF网与目前常用的三维网、土工格室(格栅)、复合网等防护形式的性能,为高速公路生态边坡防护形式与防护物种选择提供依据。

2 室内模型试验总体方案

2.1 室内试验模型设计

参考黎军和林延鹏^[8]室内模型设计图,考虑到草种试种样地最小面积的要求,因此本文重新设计室内试验模型如图1所示,其中面板采用180 cm×120 cm的木板,厚2.5 cm,采用不等边角钢(75 mm×50 mm)加劲,角钢与木板之间用8 mm的螺栓连接,螺栓之间的间距为24 mm;地面支护与撑杆也用不等边角钢(75 mm×50 mm),加劲杆与地面支护和撑杆间的连接采用合页,合页与角钢之间采用焊接;撑杆与地面支护间用挡板连接,挡板的尺寸

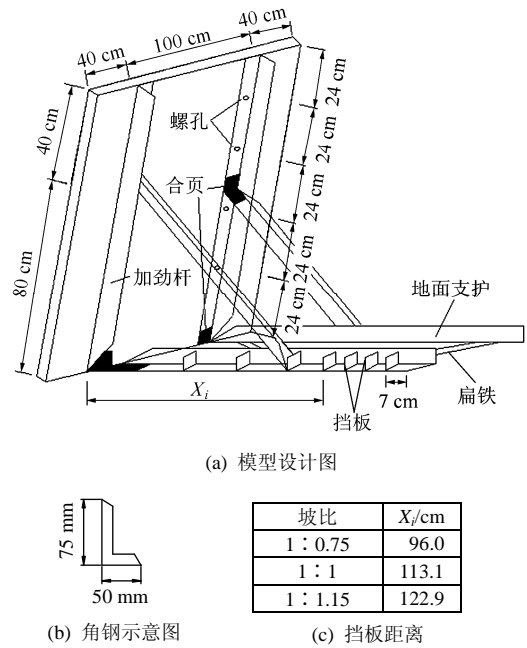


图1 室内试验模型图

Fig.1 Schemes of indoor testing model

为7 mm×2 mm×1 mm,挡板与地面支护间采用焊接。两地面支撑间用扁铁加固;加劲杆与地面支护和撑杆的连接处将角钢按1:3切角;加劲杆角钢长边与木板连接,地面支护角钢用长边贴地。按照图1制作模板21块,该模板可模拟边坡倾角1:0.75, 1:1, 1:1.15。制作过程如下:

- (1) 将模板面打毛,钉钉,再用细石混凝土打底拉毛。
- (2) 根据土壤改良试验结果配制种植基(泥炭、椰粉、红土),铺在模板面上,厚2~3 cm,再将三维网垫或土工格室满铺在种植基上,具体固定施工如下:三维网:展开顺延模板平铺,网紧贴坡面,无褶皱和悬空现象;再用钢钉进行固定,固定点为模板四周角点及中心,网的边角需修剪整齐,伸出模板不超过5 cm。复合网:挂设方法与三维网一样。土工格室:土工格室沿坡面展开至网格最大尺寸,四周按三角形,间距为1 m,将铆缝节点用“U”型钢钉紧紧固定在模板上,中间用钢钉固定。
- (3) 在固定好的固土设施填满种植基并拍紧,总厚度控制在10 cm左右。
- (4) 固土材料固定后,视边坡土的湿润程度向边坡洒水,保证边坡土壤有一定的湿度,以用手对土壤握裹时有黏聚现象为宜。
- (5) 将草籽与干细土拌和均匀,一起均匀地撒在已铺设好固土材料的模拟边坡上坡面上,一个模型约需草籽30 g。
- (6) 草籽撒播完成后,用无纺布覆盖,每天早晚各洒水养护一次。

2.2 物种与固土形式组合方案

考虑到本试验的主要目的是对比生态边坡防护形式的抗冲刷效果, 为减少生态边坡抗冲刷试验物种选择的难度, 在本试验开展前, 项目组采用样地法与盆栽法进行适应性种植试验与水分胁迫试验, 对包括单一草种、混播草种、藤本、灌木、草灌混播、乔木及多种乡土物种等在内的大量物种进行了比选与适应性研究(另文报道), 遴选出与当地气候、土壤、降雨量等条件最为适应的高羊茅、狗牙根、蟛蜞菊 3 个单一草种作为室内模型试验物种。固土形式则选取椰棕(CF)网、三维网、三维网+CF 网、土工格室、土工格室+CF 网、复合网、复合网+CF 网 7 种。由此可组成 21 种情况(见表 1)。

表 1 单一草种试验方案表
Table 1 Single grass testing scheme

防护形式	高羊茅	狗牙根	蟛蜞菊
CF 网	1	8	15
三维网	2	9	16
三维网+CF 网	3	10	17
土工格室	4	11	18
土工格室+CF 网	5	12	19
复合网	6	13	20
复合网+CF 网	7	14	21

2.3 降雨强度、植物生长时期情况

为检测与对比各种边坡的抗冲刷能力, 综合考虑降雨量、降雨历时、降雨强度、降雨面积及降雨重现期五个要素及降雨的非均匀性, 且考虑在实验模拟中降雨面积较小, 选取暴雨强度 q 值分别为 40, 80, 120 L/(10⁴ s · m²) 进行试验。降雨强度采用转子流量计与水表双控。

试验程序: (1) 正式试验前, 以较小的降雨强度降水, 将边坡润湿。(2) 试验时每次降雨强度分别取 40, 80, 120 L/(10⁴ s · m²), 每级降雨强度历时 15 min。收集每级冲刷水量。(3) 收集水量每次取样 3 000 mL, 沉淀后再取样 1 000 mL 在室内烧干, 测得冲刷量。(4) 改变模板坡度, 重复试验程序(1)~(3)。(5) 各坡度冲刷试验完毕, 抽样量测各物种的叶长根长。

为模拟植物生长早期和后期成坪情况不同, 本试验方案设计草种生长早期(播种后养护 2 个月)和后期(播种后养护 5 个月)冲刷试验, 分别研究各草种和防护形式在草种生长早期和后期防冲刷效果, 为防护形式和防护物种的选择提供依据。

本次模型试验考虑到草种、防护形式、坡度、

降雨强度、植物生长时期等各种因素, 试验共进行 378 组。

3 试验过程与数据整理

3.1 试验过程

室内模型试验从 2007 年 4 月开始加工制造模型, 考虑尽量模拟该高速公路实际气候条件, 模型试验地点选择在韶关南雄市园林研究所苗圃基地。模型试验总体布置如图 2 所示, 部分物种生长情况如图 3 所示。



图 2 模型试验总体布置图

Fig.2 Model testing holistic disposal



(a) 狗牙根 2 个月后



(b) 蟛蜞菊 2 个月后(CF 网)



(c) 高羊茅 5 个月后(三维网)



(d) 蟛蜞菊 5 个月后(CF 网)

图 3 部分物种生长情况

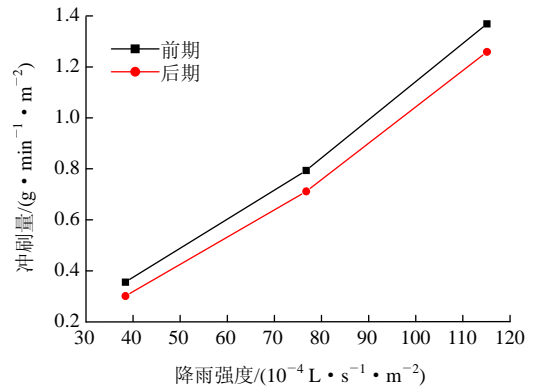
Fig.3 Some plant species growth status

3.2 试验数据整理

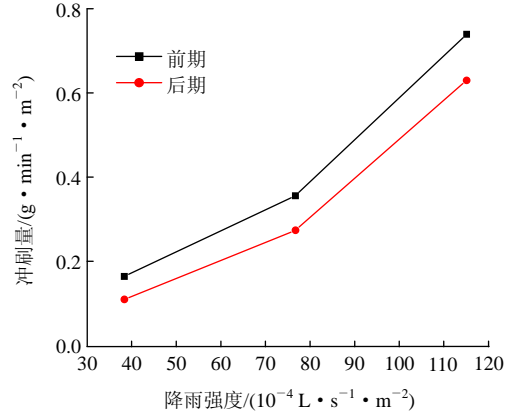
根据室内抗冲刷模拟试验测试结果，将各种防护形式，不同草种、不同降雨强度下、不同坡度情况下边坡的冲刷量与降雨强度曲线进行整理(共整理冲刷量与降雨强度曲线图 152 幅，限于篇幅，本文仅列出代表性曲线)。

(1) 按照物种不同生长时期进行整理，降雨强度与冲刷量关系如图 4 所示。

(2) 按不同草种进行整理，降雨强度与冲刷量关系如图 5 所示。



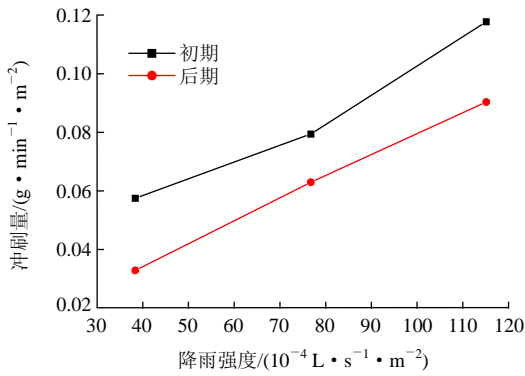
(c) 蟛蜞菊、三维网(坡度 1 : 1.15)



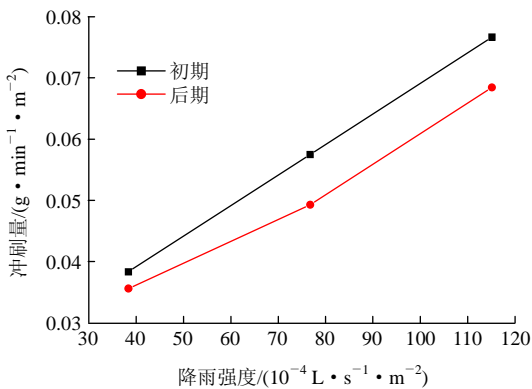
(d) 蟛蜞菊、土工格室(坡度 1 : 1.15)

图 4 不同生长时期降雨强度与冲刷量关系

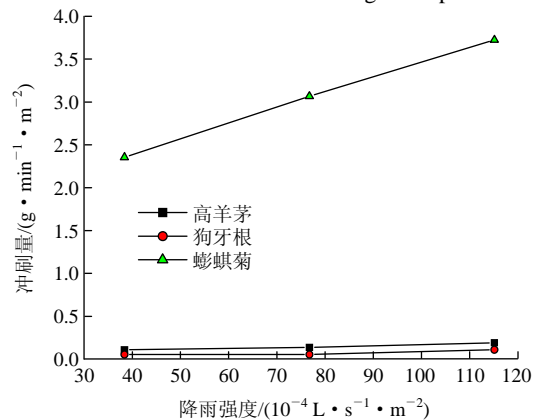
Fig.4 Relationship between rainfall intensity and water erosion for different growth periods



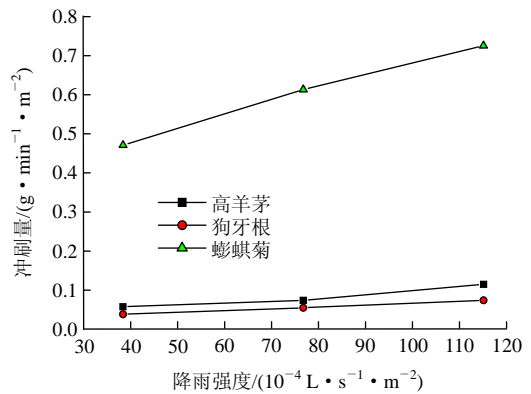
(a) 狗牙根、复合网(坡度 1 : 1)



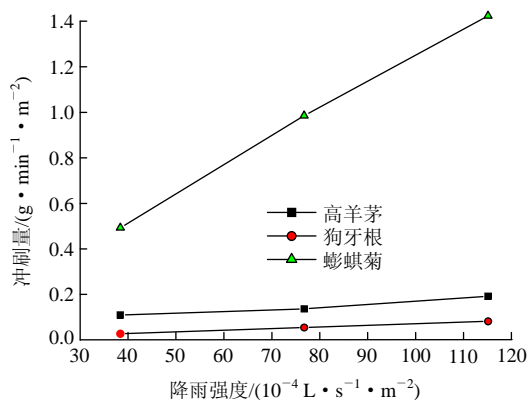
(b) 狗牙根、CF 网(坡度 1 : 1)



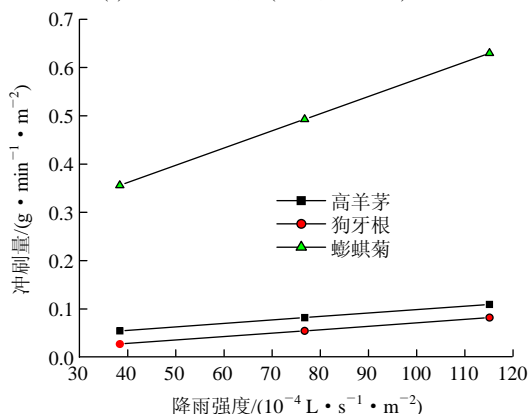
(a) 复合网、2 个月(初期坡度 1 : 1)



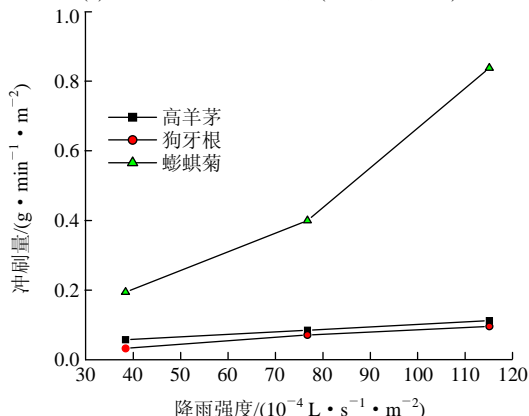
(b) 复合网+CF 网、2 个月(初期坡度 1 : 1)



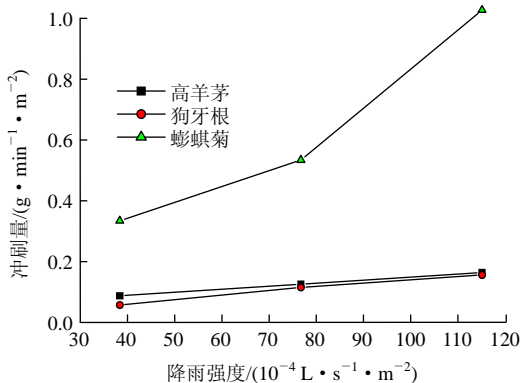
(c) 三维网, 2 个月(初期坡度 1 : 1)



(d) 三维网+CF 网, 2 个月(初期坡度 1 : 1)



(e) 土工格室, 2 个月(初期坡度 1 : 1)



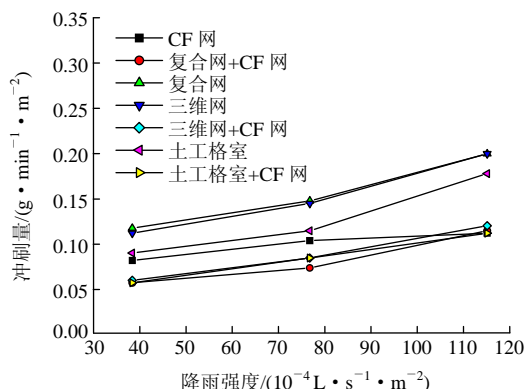
(f) 土工格室+CF 网, 2 个月(初期坡度 1 : 0.75)

图 5 不同草种下降雨强度与冲刷量关系

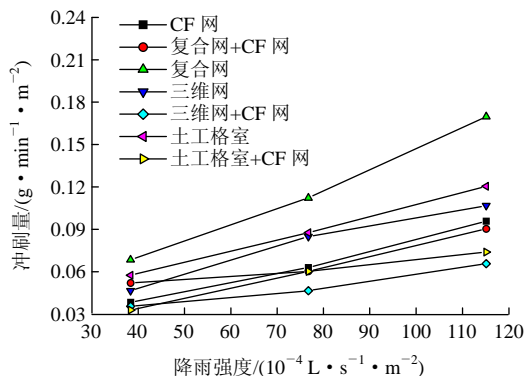
Fig.5 Relationship between rainfall intensity and water erosion for different plants

(3) 按不同防护形式进行整理, 降雨强度与冲刷量关系如图 6 所示。

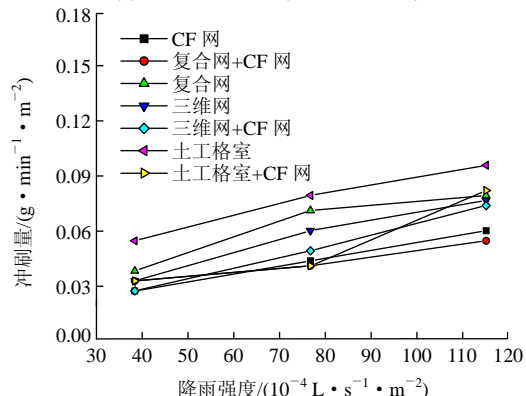
(4) 按不同坡度进行整理, 降雨强度与冲刷量关系如图 7 所示。



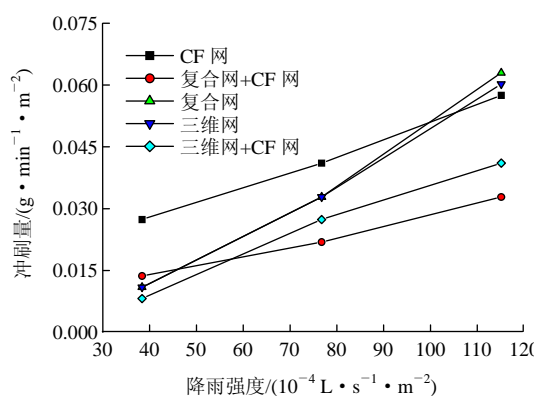
(a) 高羊茅, 2 个月(初期坡度 1 : 1)



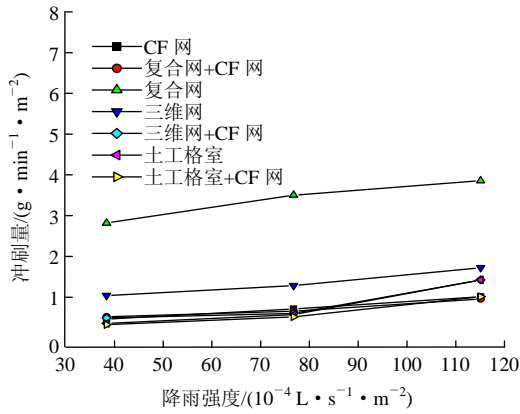
(b) 高羊茅, 5 个月(后期坡度 1 : 1)



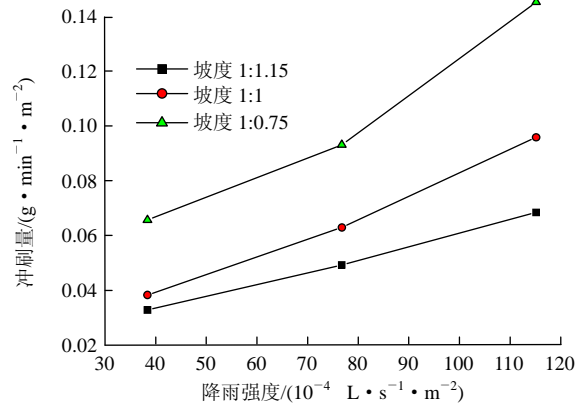
(c) 狗牙根, 2 个月(初期坡度 1 : 1.15)



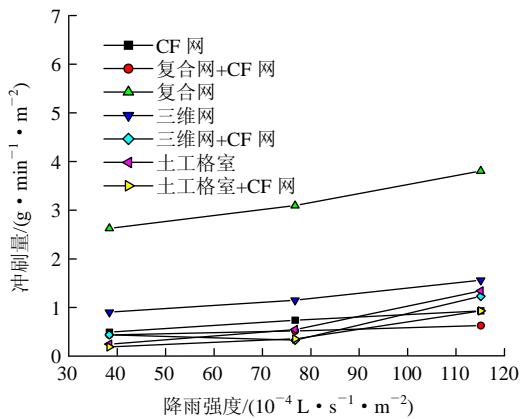
(d) 狗牙根, 5 个月(后期坡度 1 : 1.15)



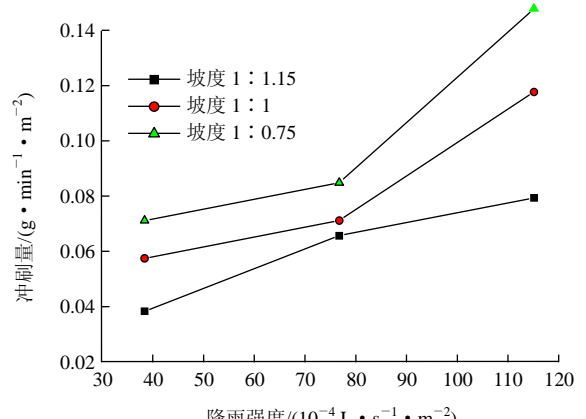
(e) 蟛蜞菊, 2个月(初期坡度 1 : 0.75)



(b) 高羊茅, 5个月, CF网(高羊茅后期CF网)



(f) 蟛蜞菊, 5个月(后期坡度 1 : 0.75)



(c) 狗牙根, 2个月, 复合网(狗牙根初期复合网)

图 6 不同防护形式下降雨强度与冲刷量关系

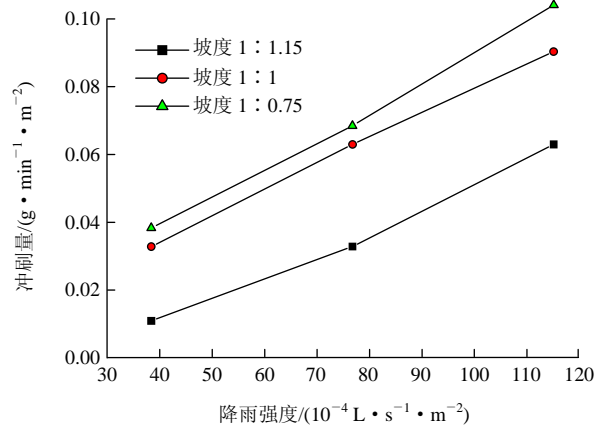
Fig.6 Relationship between rainfall intensity and water erosion for different protection patterns

4 室内边坡抗冲刷模型试验规律研究

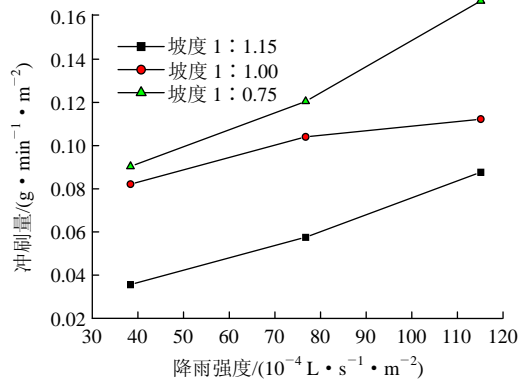
4.1 植物不同生长时期对边坡抗冲刷能力影响规律

从图 4 可以看出, 不同生长时期对边坡抗冲刷能力影响规律如下:

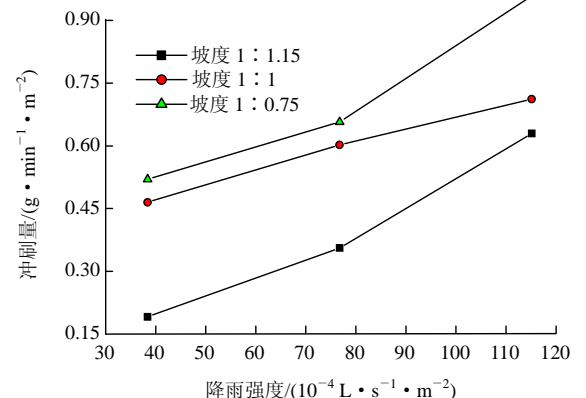
(1) 高羊茅和狗牙根生长后期总的抗冲刷能力明显提高, 无论坡度与降雨强度变化, 总的冲刷量降低 30%~49%。



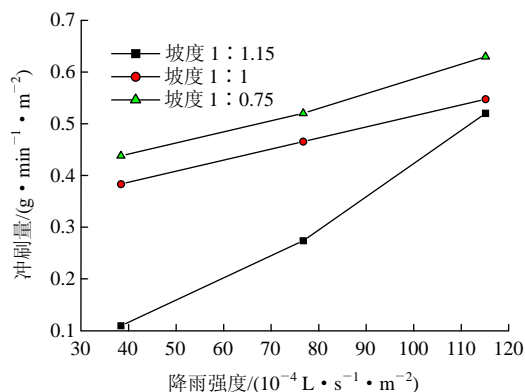
(d) 狗牙根, 5个月, 复合网(狗牙根后期复合网)



(a) 高羊茅, 2个月, CF网(高羊茅初期CF网)



(e) 蟛蜞菊 2个月, 复合网+CF网(蟛蜞菊初期复合网+CF网)



(f) 蜈蚣菊 5 个月, 复合网+CF 网(后期复合网+CF 网)

图 7 不同坡度下降雨强度与冲刷量关系

Fig.7 Relationship between rainfall intensity and water erosion for different gradients

(2) 降雨强度越大, 边坡坡度越大, 高羊茅与狗牙根生长后期抗冲刷能力提高越明显。

(3) 虽然蜈蚣菊生长 5 个月后(见图 3(d))覆盖率明显高于生长 2 个月(见图 3(b)), 其抗冲刷能力提高不明显, 冲刷量降低 12%~21%。

4.2 不同防护物种对边坡抗冲刷能力影响规律

本次试验主要研究高羊茅、狗牙根和蜈蚣菊 3 种植物作为边坡防护物种的性能, 从图 5 可以看出, 不同物种对边坡抗冲刷能力影响规律如下:

(1) 无论各个时期, 各种不同防护形式、各种不同坡度、不同降雨强度下, 蜈蚣菊的冲刷量均显著大于高羊茅和狗牙根。

(2) 在早期, 蜈蚣菊的冲刷量大于高羊茅和狗牙根的现象更加突出, 蜈蚣菊早期冲刷量最大达到 3.81 g/(min · m²), 同等条件下比高羊茅和狗牙根冲刷量大 15.7 倍。需采取其他防护措施, 减轻降雨对边坡的冲刷。

4.3 不同护坡形式对冲刷量影响规律

本次试验研究了多种护坡形式如复合网、三维网、土工格室、复合网+CF 网、三维网+CF 网、土工格室+CF 网、CF 网等作为边坡防护形式的性能, 图 6 表现出的规律如下:

(1) 无论物种如何, 冲刷量大小与生态边坡防护形式关系最为密切。

(2) 同等条件下增加一层 CF 网比单独采用复合网、三维网、土工格室防护的冲刷量分别降低最大为 92%, 52%, 56%。

4.4 不同坡度对冲刷量影响规律

本次试验主要研究了高速公路上、下边坡较多采用的 1:0.75, 1:1, 1:1.15 三种坡度, 从图 7 可以看出如下规律:

(1) 无论物种、生长时期与防护形式, 冲刷量随边坡坡度增大而增大。

(2) 蜈蚣菊无论在生长初期还是后期, 当防护形式防冲刷能力较弱时, 如采用土工格室、三维网、复合网等防护形式时, 其冲刷量随着坡度增大急剧增大。但如增加 CF 网保护, 可显著改善该现象。

(3) 高羊茅和狗牙根在生长初期, 当防护形式防冲刷能力较弱时, 如采用土工格室、三维网、复合网等防护形式时, 其冲刷量随着坡度增大而明显增大, 增大幅度不如蜈蚣菊显著, 高羊茅和狗牙根在生长后期, 其冲刷量随着坡度的变化幅度减缓。

5 结 论

通过综合考虑不同防护形式、不同防护物种、不同生长时期、不同坡度、不同降雨强度等多因素的边坡生态防护室内抗冲刷模型试验对比研究, 得到如下认识:

(1) CF 网覆盖在边坡表面, 与植物根系形成水平与垂直双向加筋效应, 可有效提高边坡抗冲刷能力。同等条件下增加一层 CF 网比单独采用复合网、三维网、土工格室防护的冲刷量分别降低最大为 92%, 52%, 56%。

(2) 对于高羊茅、狗牙根这类生长初期冲刷量较大的防护物种, 可单独采用 CF 网或采用 CF 网与其他防护形式组合防护, 有效提高边坡土层抗冲刷能力。

(3) 蜈蚣菊成活易, 适应能力强, 已有大量工程实践证明蜈蚣菊是公路边坡生态防护的优选物种之一。但本次室内边坡抗冲刷模型试验结果表明, 如不采取其他的表层防护措施, 单一物种蜈蚣菊边坡防护, 其冲刷量较高羊茅、狗牙根等防护物种大得多, 特别是在其生长初期和边坡坡度较大时更是如此。

参考文献(References):

- [1] 张季如, 朱瑞庚, 夏银飞, 等. ZZLS 绿色生态护坡材料的强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1 533 - 1 537.
(ZHANG Jiru, ZHU Ruigeng, XIA Yinfei, et al. Testing study of

- strength of the ZZLS material for erosion control of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1 533 - 1 537.(in Chinese)
- [2] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态种植基试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 239 - 242.(ZHANG Junyun, ZHOU Depei, LI Shaocai. Testing study of planting material for rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 239 - 242.(in Chinese))
- [3] 李天斌, 徐 华, 周雄华, 等. 高寒高海拔地区岩质陡边坡 JYC 生态基材护坡技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2 332 - 2 339.(LI Tianbin, XU Hua, ZHOU Xionghua, et al. Protection techniques of steep rock slope with JYC ecological base materials in high-cold and high-altitude area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2 332 - 2 339.(in Chinese))
- [4] 王 琼, 柯 林, 辜再元, 等. PMS 技术在高速公路岩石边坡生态防护工程中的应用[J]. 公路, 2009, (2): 180 - 185.(WANG Qiong, KE Lin, GU Zaiyuan, et al. Application of PMS technique to rock slope ecological protection engineering in expressway[J]. Highway, 2009, (2): 180 - 185.(in Chinese))
- [5] 周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.(ZHOU Depei, ZHANG Junyun. Vegetation slope protection project technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.(in Chinese))
- [6] 张俊云, 周德培, 李绍才. 高速公路岩石边坡绿化方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(9): 1 400 - 1 403.(ZHANG Junyun, ZHOU Depei, LI Shaocai. Study of greening method for rock slope in highway project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(9): 1 400 - 1 403.(in Chinese))
- [7] 谭少华, 汪溢敏. 高速公路边坡生态防护技术研究进展与思考[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 81 - 84.(TAN Shaohua, WANG Yimin. Research progress and thinking of bioengineering techniques for slope protection in expressway[J]. Research of Soil Water Conservation, 2004, 11(3): 81 - 84.(in Chinese))
- [8] 黎 军, 林延鹏. 土工格栅(格网)在公路边坡防护及路基中的应用[J]. 公路, 2000, (9): 9 - 11.(LI Jun, LIN Yanpeng. The application of geosynthetics gridiron to highway slope and roadbed protection[J]. Highway, 2000, (9): 9 - 11.(in Chinese))
- [9] 蒋德松, 蒋 冲. 城市岩质边坡土工格室生态防护技术及其应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, 35(11): 12 - 16.(JIANG Desong, JIANG Chong. Geotechnical grid bio-engineering protection of the rock mass slope in the city and its application[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2008, 35(11): 12 - 16.(in Chinese))
- [10] 蒋德松, 蒋 冲, 赵明华. 城市岩质边坡生态防护机制及试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(5): 1 087 - 1 093.(JIANG Desong, JIANG Chong, ZHAO Minghua. Bio-engineering protection mechanism of city rock slope and its laboratory test[J]. Journal of Center South University(Natural Sciences), 2008, 39(5): 1 087 - 1 093.(in Chinese))
- [11] 张俊云, 周德培. 红层泥岩边坡生态防护机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 250 - 256.(ZHANG Junyun, ZHOU Depei. Study of ecological protection mechanism of red bed mudstone slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 250 - 256.(in Chinese))
- [12] 赵明华, 蒋德松, 陈昌富, 等. 岩质边坡生态防护现场及室内抗冲刷试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2004, 31(5): 77 - 81.(ZHAO Minghua, JIANG Desong, CHEN Changfu, et al. Research on on-the-spot and indoor washing-out tests of ecological protection of rocky slopes[J]. Journal of Hunan University(Natural Science), 2004, 31(5): 77 - 81.(in Chinese))
- [13] 刘长红. 草灌型 CF 椰纤维网育苗保水技术研究[J]. 湖南交通科技, 2008, 34(4): 184 - 186.(LIU Changhong. Research on cultivate technology of grass and frutex used coconut fibre nets[J]. Hu'nan Communication Technology, 2008, 34(4): 184 - 186.(in Chinese))
- [14] ASHBY M F, GIBSON L J, WEGST U, et al. The mechanical properties of natural materials. I. material property charts[C]// Proceedings of Mathematical and Physical Sciences. [S.l.]: [s.n.], 1995: 123 - 140.
- [15] KULKARNI G, SATYANARAYANA K G, ROHATGI P K. Weibull analysis of strengths of corn fibers[J]. Fiber Science and Technology, 1983, 19(1): 59 - 76.