



植物型生态护坡在河道治理中的应用

范昕然，王海琳

(中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202)

摘要: 针对河道治理工程, 分析传统硬质护坡的缺陷及弊端, 阐述植物型生态护坡的优势及特点, 探讨了植物型生态护坡的作用机理。结合国内河道治理的工程经验, 系统分析了国内常用的几种植物型生态护坡技术, 提出每种技术的工艺特点及适用性。依托具体的河道治理工程实例, 从工程造价、抗冲刷能力、整体性、地形适应性、适用特点等多角度, 评价植物型生态护坡技术不同工艺的优缺点。结果表明: 1) 植物型生态护坡是一套完整的生态系统, 是由水-土-植物共同相互作用所形成的。2) 其作用效应机理包括水文作用效应和力学作用效应。3) 目前国内河道治理工程中常用的植物型生态护坡技术, 其适用范围及应用特点各不相同。4) 松花江流域某二级支流的河道治理及生态修复工程采用空心六角块植物型生态护坡与格宾块石植物型生态护坡材质, 具有较强的适用性及推广性。

关键词: 河道治理; 植物型生态护坡; 作用机理; 工程应用

中图分类号: TV 853; U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S2-0015-05

Application of plant-based ecological slope protection in river management

FAN Xin-ran, WANG Hai-lin

(CCCC(Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China)

Abstract: Regarding the river management project, the defects and disadvantages of the traditional hard slope protection are analyzed, the advantages and characteristics of the plant-based ecological slope protection are expounded, and the mechanism of the plant-based ecological slope protection is discussed. Combined with the experience of domestic river control engineering, several common plant-based ecological slope protection technologies are systematically analyzed, and the technological characteristics and applicability of each technology are proposed. Relying on specific examples of river management projects, the advantages and disadvantages of different processes of plant-based ecological slope protection technology are evaluated from the perspectives of project cost, scour resistance, integrity, terrain adaptability, and applicable characteristics. The results show that: 1) The plant-based ecological slope protection is a complete ecosystem, which is composed of water-soil-plant interaction. 2) Its effect mechanism includes hydrological effect and mechanical effect. 3) At present, the plant-type ecological slope protection technology is widely used in the river regulation engineering in China, and its application range and application characteristics are different. 4) For the river regulation and ecological restoration of a secondary tributary in the Songhuajiang river basin, the hollow hexagonal plant-type ecological slope protection and the gabion stone plant-type ecological slope protection materials are adopted, which have strong applicability and popularization.

Keywords: river management; plant type ecological slope protection; mechanism of action; engineering application

收稿日期: 2022-07-11

作者简介: 范昕然(1992—), 男, 硕士, 工程师, 注册土木工程师(港口与航道工程), 一级造价工程师, 从事水运工程设计及咨询工作。

1 植物型生态护坡技术

植物型生态护坡是指依靠植物根系良好的持土作用，使坡面上的土壤颗粒抗侵蚀能力增强，从而保证河岸边坡的安全稳定，达到以生态措施治理河道的目的。建设植物型生态护坡工程，首先必须保证河道的正常防洪、排涝及通航功能；其次应尽量与周围的环境相协调，确保生态平衡。

传统的硬质护坡常常会出现以下弊端：修筑过程中消耗大量石矿、砂矿，项目成本较高；地表径流夹带污染物较多，水资源浪费严重；亲水性下降，隔断生物交流，水体自净能力下降，水质易发黑发臭等。

相较于传统硬质护坡，植物型生态护坡在提升河道景观、改善河道水流流态、防止边坡冲刷上更具有优势，随着技术的进步，河道治理工程正在向生态型、资源型、促进人与自然和谐的方向发展。

2 植物型生态护坡作用机理

2.1 水文作用效应

2.1.1 降雨截留，减少飞溅和侵蚀

降雨落在植物型生态护坡后，一部分被植物截留，另一部分下落到坡面或重新蒸发到大气中。植物对雨滴的下落有一定的阻挡作用，可以减弱雨滴直接对坡面的侵蚀，减少土颗粒的飞溅^[1]。

2.1.2 减少土粒流失

受坡面径流和降雨的影响，坡面往往会出现片蚀、沟蚀，甚至溶蚀。植物在土壤中生根，引起土壤自身结构发生变化，有效阻碍雨滴溅蚀，减缓了坡面径流，最终改善了坡面的土粒流失现象。植被覆盖率越高，土壤流失率越低，成指数负相关。

2.1.3 植物蒸腾作用

边坡是否稳定与坡体内孔隙水压力有关^[2-3]。

根据土力学的有效应力原理，有效应力和土的抗剪强度计算公式为：

$$\sigma = \sigma' + \mu \quad (1)$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (2)$$

式中： σ' 为有效应力 (kPa)； σ 为总应力 (kPa)；

μ 为孔隙水压力 (kPa)； τ_f 为土的抗剪强度 (kPa)； c' 为土的有效黏聚力 (kPa)； φ' 为土的有效内摩擦角 (°)。

植物的蒸腾作用引起边坡中孔隙水压力降低，从而在总应力不变的情况下，有效应力得以提高，土体的抗剪强度增大，边坡土体更加稳定。

2.2 力学作用效应

2.2.1 根茎的加筋作用

土中植物根茎错综交织、延伸生长，植物根系相当于三维加筋材料。根据 Mohr-Coulomb 准则，根茎的加筋作用，在拉应变方向提供拉力，对边坡土体产生压力，形成一定的约束作用，限制了边坡土体的侧向变形，相当于对土体侧向施加了围压增量 $\Delta\sigma_3$ ，使最小主应力 σ_3 增至 $\sigma_3 + \Delta\sigma_3$ ，最大主应力 σ_1 亦相应增加，莫尔应力圆向右平移 $\Delta\sigma_3$ ，见图 1。因此，有植被边坡土体的强度包线相较于无植被边坡土体的强度包线向上平移了一段距离。即根茎的加筋作用，增加了边坡土体的黏聚力 c 值，强度包线向上平移 Δc ，抗剪强度提高。 Δc 、 $\Delta\sigma_3$ 的大小与根系强度、分布特性、密度及土壤性状有关。

$$\Delta c = \frac{\Delta\sigma_3}{2\tan(45^\circ - \varphi/2)} \quad (3)$$

式中： Δc 为土的黏聚力增量 (kPa)； $\Delta\sigma_3$ 为最小主应力增量 (kPa)； φ 为土的内摩擦角 (°)。

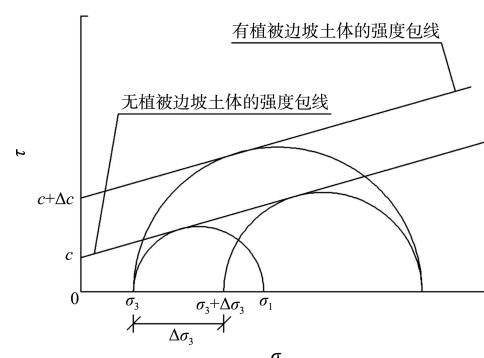


图 1 有无植被边坡土体的莫尔应力圆及强度包线

2.2.2 茎叶的防冲刷作用

河道的平面冲淤变化规律可以概括为凹岸冲刷、凸岸淤积。随着多年的水流冲刷，河道凹岸侧曲率半径会逐渐增大，若不增加边坡的防护措

施, 水流会逐渐淘刷边坡土体颗粒, 最终导致裁弯取直、河道向稳定流态方向发展。植物的茎叶在坡面上交错盘结生长, 当河道水流经过, 或者船行波传播发生破碎时, 具有一定的摆动、壅水、抗冲刷和消耗波能效应^[4]。尤其是透空多孔型植物型生态护坡, 效果更加显著。

2.2.3 根系的锚固作用

植物的根系穿过坡面表层土进入坡体较深土层。由于根系具有一定的刚度、与土体之间产生摩擦阻力, 经力学模型简化后, 相当于预应力锚杆的作用。随着时间推移, 根系生长越发茂密, 这种根系的锚固作用和侧阻效应亦越发明显。根系的抗拉强度 T 的计算公式为:

$$T = nD^m \quad (4)$$

式中: D 为根系的直径 (mm); n 、 m 为根系的经验参数。对于直径 2~5 mm 的各类根系, 其抗拉强度为 8~80 MPa。

3 植物型生态护坡的应用

3.1 人工植被生态护坡

人工植被生态护坡采用人工铺设草皮或撒播草籽的方法, 实现快速成坪、边坡覆绿, 从而保护河道的自然属性, 见图 2。

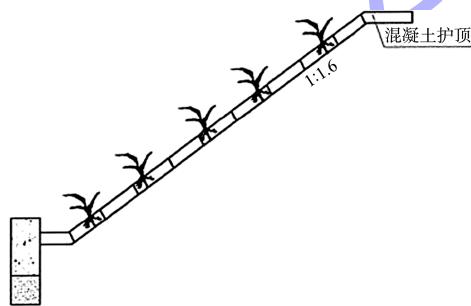


图 2 人工植被生态护坡结构形式

施工顺序为: 边坡修整→松土除杂→撒种覆盖→施肥、养护→草块移植铺设。

该工艺优势为: 1)适用于水流速度小于 1.0 m/s 的河段, 且岸坡坡比小于 1:2.5; 2)人工草皮可平铺、斜铺, 地形适应性强; 3)施工工艺简单且不需要配备大型设备, 季节气候制约少, 造价低廉。

该工艺不足之处为: 1)通常情况下, 植物在

种植初期抵抗冲刷能力较弱, 初期管理工作量较大; 2)抗冲刷保护能力较弱; 3)播撒草籽施工时常会出现播撒不均、成活率低、易被雨水冲走等现象, 伴随坡面冲沟、表土流失等边坡病害造成大量的边坡病害整治及修复工作, 施工后期养护管理难度较高。

3.2 土工材料植物型生态护坡

土工材料植物型生态护坡由土工合成材料、种植土和植被 3 部分组成(图 3)。利用土工合成材料固土护坡, 并在其中复合种植植物, 自然生长形成植物型生态护坡。常用土工合成材料包括土工袋、土工格室、土工网垫、土工格栅和水保植被毯等。施工顺序为: 清理坡面→施底肥→钉设网垫→回填种植土→喷播草籽→洒水养护。

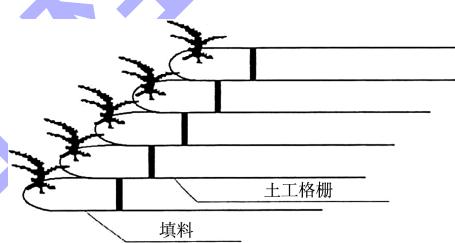


图 3 土工材料植物型生态护坡结构形式

土工材料植物型生态护坡既有美化造景、节能环保、经济节省、自修复、少维护等优点, 又能有效提高土体稳定性和抗冲刷能力, 尤其可提高工程初期的岸坡防护效果。

土工材料植物型生态护坡抗暴雨冲刷能力优于人工植被生态护坡, 但仍然较弱, 适宜用于河道较缓、流速较小的岸坡, 且不宜用于常水位以下。

3.3 混凝土植物型生态护坡

混凝土植物型生态护坡是利用水泥浆体粘结粗骨料, 制备无砂大孔混凝土。该生态混凝土依靠天然成孔或人工预留孔洞, 在孔洞中填充种植土、种子、缓释肥料等, 创造适合植物生长的环境, 形成植被, 见图 4。施工顺序为: 坡面平整→铁丝网、锚钉铺设安装→植被混凝土制备→植被混凝土喷植→管养。

混凝土植物型生态护坡既具有混凝土护坡的安全可靠和抗冲耐磨等优点, 又具有植物护坡的生物适应性强、削污净水、美化造景等特点。适

用于水流速度较快、岸坡较陡、防冲要求较高的河道岸坡。

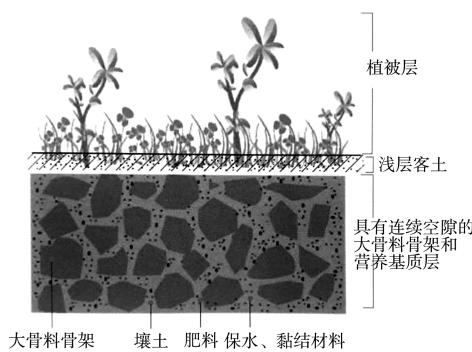


图 4 混凝土植物型生态护坡结构形式剖面

3.4 格宾块石植物型生态护坡

格宾块石植物型生态护坡是将高强度、高耐磨、抗腐蚀的钢丝编织成网箱，选用不易风化的块石材料填充网箱，在其表面覆土绿化或植物插条而成的新型生态护坡技术，见图 5。施工顺序为：平整坡面→格宾组装→装填石料→封盖施工→覆土并播种草籽。

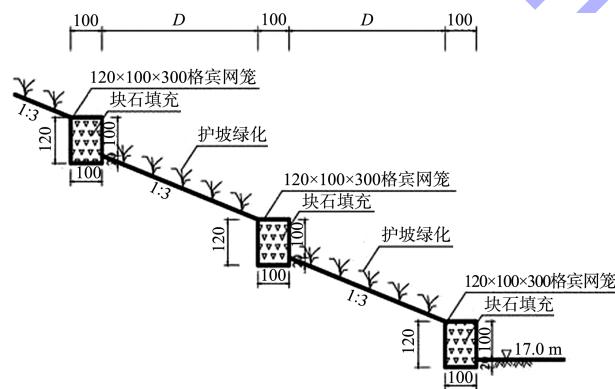


图 5 格宾块石植物型生态护坡结构形式（单位：cm）

格宾块石植物型生态护坡具有以下特点：

- 1) 整体性好，大面积连续组装，稳固耐久；2) 柔韧性好，适用于不均匀沉降地基，遇地震自适应变形能力强；3) 透水性好，坡体水可通过缝隙排出，减少地下水压力；4) 抗风浪、防淘刷效果好，不产生波浪破碎，退潮时不产生真空吸力；5) 施工速度快，造价经济，耐久性好，养护简单。

格宾块石植物型生态护坡适用于水流速度较大、冲刷较严重的河道护坡工程，块石和卵石料源丰富的地区更适用。

3.5 麦克加筋垫植物型生态护坡

麦克加筋垫植物型生态护坡是由较高强度的镀 10% 铝锌合金钢丝网（六边形双绞合）、抗侵蚀性较好的聚丙烯土工垫以及植物耦合作用而成的边坡防护系统，见图 6。施工顺序为：坡面平整→铺设种植土层→施肥、撒草籽→铺设麦克垫→锚固→喷洒湿润。

该工艺的优点：1) 耐冲刷性能好，麦克垫与植物根系组合缠绕；2) 吸热性能较好，有利于植被生长；3) 透水性较强，水体交换充分；4) 造价低廉，减少了石料、水泥等用量，具有显著的经济优势；5) 施工无需专业工人、大型机械设备，施工方便，使用 U 形钉固定于护坡上，施工损耗小，受天气变化影响小，因此可以大幅度提高施工效率。

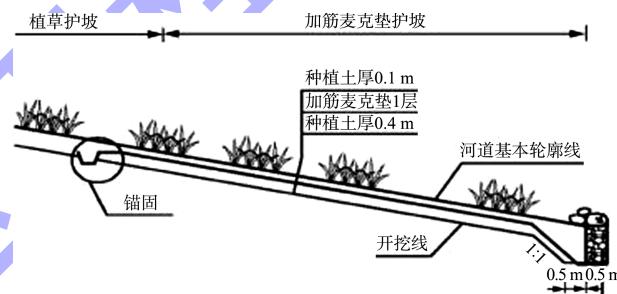


图 6 麦克加筋垫植物型生态护坡结构形式

3.6 生态联锁式植物护坡

生态联锁式植物护坡是由一组形状、尺寸和质量一致的预制混凝土联锁块，通过绞索相互连接而形成的联锁矩阵护坡体系，见图 7。施工顺序为：平整坡面→铺碎石和土工布→铺装联锁护坡砌块→护坡砌块孔洞处理→坡面种植草籽。

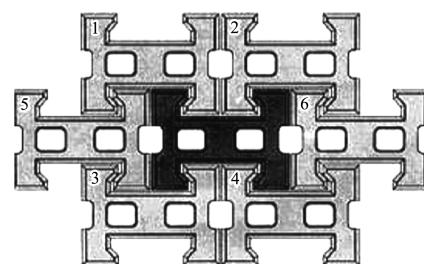


图 7 生态联锁式植物护坡结构形式

其工艺特点：1) 整体性良好，相邻单元连接为一体共同抵御水流和波浪的冲击；2) 模块化生产，施工效率高，可针对块体的强度、抗冻、抗

渗性能要求, 提前进行配合比设计; 3) 防冻胀性能好, 块体较薄, 绞索连接, 具有一定柔性, 能自行调整冻胀变形; 4) 生态效果好, 混凝土中添加了醋酸纤维等高分子材料, 有利于植物生根, 植草面积比较大, 绿化率较高^[5]。

3.7 空心六角块植物型生态护坡

空心六角块植物型生态护坡是由提前预制好的六角空心块体, 经现场拼装(边对边、角对角等方式)与孔洞内的植物共同组成生态防护系统, 见图 8。施工顺序为: 坡面清理、整坡→脚槽土方开挖→脚槽混凝土基座施工→空心六角块坡面拼装施工→铺设营养土→种植植物。

该结构的特点: 坡体孔洞面积大, 适宜植物生长, 绿化率较高, 生态景观效果显著; 空心六角块提前预制, 施工方便, 节省工期, 造价适中。

表 1 植物型生态护坡的对比

护坡类型	工程造价/ (元·m ⁻²)	抗冲刷 能力	整体性	地形 适应性	适用特点	后期管养 难易程度
人工植被生态护坡	较低(约 400)	较小	较差	一般	易受人畜破坏	难
土工材料植物型生态护坡	较高(约 2 200)	较大	较好	一般	不能机械化操作	适中
绿化混凝土植物型生态护坡	较高(约 2 800)	一般	一般	较差	整体性好, 强度高, 能机械化施工, 工期长	易
格宾块石植物型生态护坡	适中(约 1 500)	较大	较好	较好	强度大、孔隙率大及耐久性好	易
麦克加筋垫植物型生态护坡	较高(约 2 400)	较大	较好	较好	不能机械化操作	适中
生态联锁式植物护坡	较高(约 3 000)	较大	较好	一般	不能机械化操作	易
空心六角块植物型生态护坡	适中(约 1 600)	较大	较好	较好	较低边坡的河道	易

考虑材料地形适应性、抗冲刷能力、适用特点、整体性、工程造价及后期管养难易程度等因素, 经综合比选显示, 空心六角块植物型生态护坡与格宾块石植物型生态护坡材质具有显著的优势, 更适宜于河道的生态护坡工程。

5 结语

1) 植物型生态护坡相较于传统的硬质护坡有显著的优点, 不仅能实现岸坡防护功能, 还能够遵循生态环保的理念。

2) 植物型生态护坡是一套完整的生态系统, 由水-土-植物共同相互作用形成。水文作用效应主要包括植物降雨截留作用、减少水土流失作用和植物蒸腾作用; 力学作用效应包括根茎的加筋作用、茎叶的防冲刷作用和根系的锚固作用。

3) 以松花江流域某二级支流的河道治理及生

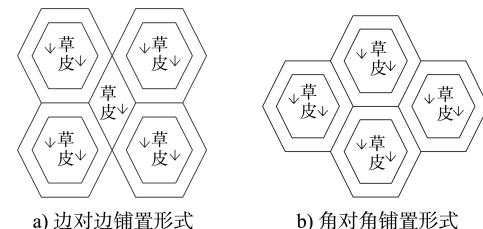


图 8 空心六角块植物型生态护坡结构形式

4 工程案例

以松花江流域某二级支流的河道治理及生态修复工程为例, 本工程任务是在支流修建 36.49 km 的生态护坡, 固土抗冲和防止水土流失; 构建河滨缓冲带 12.73 万 m², 改善区域生态环境; 构建生态湿地 15 万 m², 削减面源污染, 净化水质。

针对其中的生态护坡工程, 设计出 7 种不同的植物型生态护坡工艺, 见表 1。

态修复工程为例, 分析每种技术和工艺的优缺点及适用性, 推荐采用格宾块石植物型生态护坡、空心六角块植物型生态护坡, 具有较强的适用性及推广价值。

参考文献:

- [1] 张婧媛, 吕君为, 沈旦, 等. 江苏内河航道斜坡式生态护岸植物选择[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(1): 23, 44.
- [2] 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): 1400-1403.
- [3] 段晓明, 苗增健, 刘连新, 等. 生态护坡应用及护坡植物群落的选择[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(31): 15327-15329, 15339.
- [4] 吴志龙, 阚得静, 汤建宏, 等. 运河航道开发过程中生态带建设技术方案[J]. 水运工程, 2021(10): 256-259.
- [5] 顾海华, 杨晓康. 河道生态护坡类型探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2011, 6(6): 127-129, 319. (本文编辑 武亚庆)