

格宾石笼结构在河道堤防整治中的力学特性与工程应用

卢勇鹏

湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司

DOI:10.32629/hwr.v10i6.7023

[摘要] 现阶段国内河道堤防提标改造、水系生态修复工作同步推进,以往广泛使用的刚性护岸结构,已经很难同时满足堤防防洪安全与水生态保护两大核心需求。格宾石笼作为柔性生态护岸的代表形式,凭借独特的受力特点与综合使用性能,在各地河道整治工程中得到大范围推广。本文依托实际堤防整治工程经验,针对水流冲击、地基沉降、波浪作用、地震影响等不同工况,分析该结构真实的力学响应规律。从实际运行效果来看,该结构柔性变形能力突出,抗水流冲刷性能稳定,同时能够实现水陆水体与物质正常交换,有效弥补了浆砌石、现浇混凝土等传统刚性护岸的应用短板。

[关键词] 格宾石笼; 河道堤防; 力学特性; 生态护岸; 工程应用

中图分类号: F062.2 **文献标识码:** A

Mechanical Properties and Engineering Application of Gabion Structure in River Embankment Regulation

Yongpeng Lu

Hubei Water Resources and Hydropower Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] At present, the upgrading and reconstruction of river embankments and ecological restoration of water systems are being carried out simultaneously across China. Traditional rigid revetment structures can hardly meet the two core requirements of embankment flood safety and aquatic ecological protection. As a typical flexible ecological revetment, gabion structures have been widely applied in river regulation projects due to their distinctive mechanical characteristics and excellent comprehensive performance. Based on practical experience in embankment regulation projects, this paper analyzes the mechanical response rules of gabion structures under various working conditions including water flow impact, foundation settlement, wave action and seismic load. Operational results show that gabion structures feature superior flexible deformation capacity and stable anti-scour performance. Meanwhile, they facilitate the normal exchange of water and substances between land and water areas, effectively overcoming the deficiencies of conventional rigid revetments such as mortar stone masonry and cast-in-place concrete.

[Key words] gabion; river embankment; mechanical property; ecological revetment; engineering application

引言

随着生态水利理念逐步落地,兼顾安全防护与生态修复的新型护岸技术,成为水利行业研究和应用的主流方向。植物护岸、土工合成材料护岸、生态格网护岸等多种形式陆续投入使用,格宾石笼便是其中应用最成熟的柔性结构之一。该结构由金属网箱搭配填充石料组合而成,依靠网体拉结力和石料之间的嵌挤摩擦力形成完整防护体系,目前已经广泛应用在中小河流治理、堤防加固、库区岸坡防护等工程当中。与之配套的行业技术规程也在持续更新,对材料指标、结构设计、现场施工都提出了更加细化、严格的要求。

1 河道堤防整治主流护岸结构类型及性能对比

1.1 传统刚性护岸结构应用特点

石材类和混凝土类护岸属于发展时间最久的刚性防护形式,也是早期河道堤防的首选方案。石材类护岸包含干砌石、浆砌石、抛石护脚等常见做法,依靠石料自重和砌筑咬合作用抵御水流冲击。干砌石结构允许不冲流速区间在2.5m/s至4m/s之间,整体透水效果较好,石料缝隙可以为小型生物提供生存空间,生态表现相对理想。但纯浆砌石依靠砂浆封堵石缝,透水性大幅下降,而且砌筑质量完全依赖工人手艺,一旦地基出现变形,砌体很容易松动、脱落^[1]。

混凝土类护岸包含现浇混凝土板、预制混凝土板、生态框、混凝土连锁块等多种样式,整体结构强度在各类护岸中处于最

高水平,其中现浇混凝土板允许不冲流速可达8m/s,大多用在高流速、高防洪标准的主干河道。完整浇筑的混凝土面板密闭性极强,基本不具备透水能力,不仅割裂了水陆生态联系,光滑的板面还会加剧波浪爬升,额外增加堤防护压力。经过生态改良的混凝土生态框、连锁块通过预留孔隙改善了透水和生态性能,这类结构允许不冲流速维持在1.5m/s至3m/s,但本质依旧属于刚性结构,无法适应地基出现的大幅度变形。

1.2 轻型生态护岸结构发展现状

土工合成材料护岸和纯植物护岸属于轻型生态防护形式,两大核心优势是生态效果好、施工便捷,整体工程造价也相对偏低。土工格室、土工网垫、填土土工袋等结构,依靠土工材料的拉结作用固定岸坡土体,水体渗透通畅,能够维持岸坡水土连通状态。但这类材料本身抗水流冲刷能力偏弱,所有土工合成材料护岸的允许不冲流速均低于2m/s,仅适合水流平缓的乡村支流、景观河道,不能承担主干堤防的防冲任务。

草皮护坡、活木护岸、桩木护岸等纯植物护岸,是生态属性最强的防护形式,施工对自然环境扰动最小,完全依靠植物根系实现固土效果。不过这类结构抗冲能力最弱,普通草皮护坡允许不冲流速不足1.5m/s,即便搭配桩木进行加固,极限流速也仅能达到3m/s。同时植被生长受季节、气候、病虫害影响较大,堤防护防的稳定得不到长期保障,现场一般只作为辅助防护或者景观河道表层防护使用。

2 格宾石笼结构的基本构造与原材料技术要求

2.1 结构形态与尺寸划分

工程当中会按照整体厚度,将格宾类防护结构划分为格宾石笼和雷诺护垫两类,二者构造原理一致,适用位置有所区别。行业内以0.45m作为划分界限,整体厚度超过0.45m的箱体定义为格宾石笼,厚度不足0.45m的薄层结构为雷诺护垫。雷诺护垫多用于河道坡面大面积防护,受力相对较小;格宾石笼则集中布置在堤身挡护、坡脚防冲等受力集中的关键部位^[2]。

目前工程使用的格宾石笼网箱均为工厂预制标准化构件,市面上应用最广泛的规格为1000mm×1000mm×1000mm、1000mm×1000mm×500mm两种。为防止网箱受力后出现局部鼓胀、变形,所有标准网箱内部都会加装金属隔片,把整体箱体分隔为多个独立腔体,保障填充石料分布均匀,受力传递更加合理。现场施工时,多个单体网箱通过扎丝相互绑扎连接,最终形成连续、完整的防护整体。

2.2 金属网体的技术参数与防腐标准

格宾石笼网片由低碳钢丝通过机械绞合编织而成,网孔统一为六边形。钢丝直径、表面镀层等级,直接决定网体结构强度和防腐能力,也是原材料进场验收的重点内容。按照现行技术要求,网箱边丝直径不得小于3.1mm,主体网丝直径不低于2.3mm,用于箱体拼接、固定的扎丝直径需达到2.0mm。不同位置钢丝区分直径设计,既可以保障网箱整体强度,也能兼顾现场拼装作业的便利性。

钢丝表面主要采用热镀锌或者铝锌合金镀层做防腐处理,

结合堤防等级、河道水体环境,镀层分为三个等级。常规淡水河道选用基础等级镀层即可,若河道存在水体污染、水土盐碱化等问题,镀层等级需要上调一级,以此抵御水体腐蚀,延长网体使用年限。早期不少工程会在钢丝外侧增加PVC覆膜进行二次防护,但结合多年现场运行观测结果,再对照2024版行业规程要求,PVC覆膜长期浸泡在水中容易老化开裂,脱落的覆膜碎片还会造成水体污染,因此现阶段新建、改建河道堤防工程,已经全面淘汰这种工艺。

2.3 填充物料与附属配套材料要求

填充石料是格宾石笼承受水流荷载、传递结构应力的核心载体,石料品质和填充密实度,直接影响整体结构的力学稳定性。现场施工可选用卵石、块石,符合强度要求的废旧混凝土块也可作为填充材料使用,但是强风化岩石、遇水膨胀类岩土料严禁投入使用。这类材料浸水之后会快速软化、破碎,短时间内就会丧失结构防护能力。填料粒径需要和网箱网格尺寸相互匹配,石料中值粒径控制在网格尺寸的1.5倍至2倍之间,填充完成后整体空隙率不能超过30%。合理的空隙既能保证结构透水,又能依靠石料相互挤压产生摩擦力,提升整体抗滑移能力。

为实现滤土排水,避免岸坡内部细颗粒土体被水流带走,格宾石笼后侧必须铺设土工布作为反滤层。土工布规格根据河道规模选择,大型行洪河道堤防优先选用250g/m²至300g/m²的长丝土工布,中小型支流、景观河道可采用200g/m²规格产品。部分工程会在网箱内部加装土工布袋,进一步阻挡细小颗粒流失,这类配套材料的使用要求,严格参照《土石笼袋应用技术规程》执行,保证辅材和主体结构协同工作。

3 格宾石笼在河道堤防工况下的力学特性分析

3.1 地基变形下的柔性适配特性

河道堤防大多修建在河道滩地之上,堤基地质多为软土,土体自然固结沉降、侧向蠕变是普遍现象。混凝土、浆砌石这类刚性结构相当于整体刚体,一旦地基出现不均匀沉降,结构内部会产生较大附加应力,应力集中位置会快速产生裂缝并持续扩展,最终造成结构破损、坍塌。格宾石笼由金属网箱和散体石料组合而成,属于典型柔性复合结构,整体不存在硬性连接节点^[3]。

当堤基地面出现不均匀沉降或者局部土体滑移时,金属网片具备拉伸、扭转的能力,网箱之间的绑扎节点也可以产生小幅相对位移,整个防护体系能够跟随地基形态同步变形,不会因为局部沉降产生过大内力。同时箱体内部石料为散体状态,石块之间可以自由转动、调整位置,进一步消解变形带来的应力,从根源上解决了刚性结构易开裂、易坍塌的问题。也正是这种柔性适配能力,让格宾石笼在地质条件差、沉降变形明显的河道堤段优势突出。

3.2 水流荷载作用下的抗冲刷力学性能

水流冲击是河道堤防护岸常年承受的主要动荷载,行业内一般通过临界流速、极限流速两个指标评判结构抗冲刷能力。临界流速指水流作用下,填充石料刚开始发生位移的水流速度;

极限流速代表石料出现明显移动、网箱产生形变,但结构依旧可以继续使用的水流速度。结合大量模型试验和现场实测数据,工程设计阶段会对流速采取保守取值,格宾石笼允许不冲流速统一按照5m/s控制,薄层雷诺护垫允许不冲流速取值为3m/s,该标准可以满足国内绝大多数中小河流、区域堤防的防冲需求。

水流对护岸的破坏,主要依靠水流剪切力实现。现行《生态格网应用技术规程》明确规定,以水流剪切力作为核心判别依据,验算填料和整体结构是否会发生失稳破坏。格宾石笼内部石料间隙通透,水流可以直接穿过结构本体,不会在结构表面形成高压水击,表层水流的冲击力也会被有效分散。石料之间的嵌挤摩擦力、网片对石料的包裹约束力共同抵抗水流剪切作用,多重受力机制相互配合,让结构在长期高速水流冲刷下依旧保持稳定。

3.3 整体稳定性与特殊荷载下的力学表现

格宾石笼的使用形式不同,整体稳定验算的方法也存在区别。如果仅作为坡面防护结构使用,岸坡整体滑移是主要风险,现场一般采用简化毕肖普法、瑞典圆弧法开展边坡稳定计算,核算滑动面的抗滑安全系数。当采用直立式格宾石笼挡墙形式时,需要按照水工挡土墙相关规范要求,依次验算地基承载力、结构抗滑稳定性、抗倾覆稳定性,确保挡墙在土压力、水压力作用下,不会出现滑移、倾覆或者地基沉降破坏。

堤顶高程设计需要综合多项水力参数计算确定,格宾石笼防护段的堤顶高程,由设计洪水位、波浪爬高、风壅水面高度、安全加高以及地基沉降量共同组成。该结构表面存在大量孔隙,糙渗系数远小于光滑混凝土护面,能够有效削弱波浪能量。

柔性结构本身具备一定抗震能力,但在地震荷载方面有明确使用限制。八度及以上高地震烈度区域,不建议将砌石类格宾石笼作为堤防主体防护结构。强震发生时,堤基土体剧烈晃动,箱体内部散体石料容易离散,网箱拉结体系会承受反复交变荷载,长期作用下绑扎节点极易松动,直接影响整体防护安全。

4 格宾石笼在河道堤防整治中的典型应用形式

4.1 主流断面布置形式及适用场景

直立重力式断面是堤防工程中使用频率较高的形式,将标准化网箱逐层错缝堆叠,形成直立挡墙,依靠网箱自重抵抗侧向土压力和水压力。这种布置方式占地面积小,能够有效节约河道两岸土地,特别适合城区河道、城镇堤防等用地紧张、水深较大的区段,也是老旧堤防改扩建项目的常用选择。堆叠施工过程中,上下层、相邻网箱必须紧密绑扎,形成整体受力体系,避免单层箱体单独受力引发局部失稳。

阶梯式断面同时兼顾消浪、防冲与生态功能,现场将网箱分层外放布置,岸坡形成多级台阶形态。阶梯结构可以逐级消耗水流和波浪的能量,进一步提升抗浪能力,台阶平台可以留存水土,为草本植物、小型水生生物提供生长栖息空间,生态效果更为理

想。这种形式大多用在生态河道、景观堤防、旅游水系当中,在流速中等、岸坡相对平缓的河段使用效果最佳。

贴坡式断面属于纯坡面防护做法,把雷诺护垫或者薄层格宾石笼直接铺设在修整完成的堤防岸坡表面,整体依附原有堤坡共同受力,主要作用是阻挡坡面水流、雨水径流淘刷岸坡土体。该形式施工简单、工程量小,一般不承担侧向挡土任务,仅适用于坡度平缓、水流流速低、堤身本体稳定的堤防岸坡,现场通常搭配坡脚防冲结构一起使用,形成完整防护体系。

4.2 坡脚基础的布设技术要求

河道堤防坡脚是水流淘刷作用最强的区域,也是格宾石笼防护体系最容易发生破坏的部位,基础埋置深度、横向延伸长度必须严格按照设计标准施工。格宾石笼基础底面,需要设置在河道最大冲刷深度以下,额外预留0.5m至1.0m的安全深度,防止水流淘刷基础底部造成结构悬空失稳。同时基础沿河道横向的延伸长度,要控制为局部冲刷深度的1.5倍至2倍,扩大基础受力范围,分散基底应力^[4]。

对于冲刷现象严重的险工段堤防,除了加深基础埋深,还会在坡脚位置增设多层格宾石笼或者抛石护脚进行加固,打造复合防冲体系。基础底部同样需要铺设反滤土工布,阻断堤基细颗粒土体流失,保证堤基土体结构完整,从根源上提升坡脚部位的长期稳定性。

5 结论

当前河道堤防整治工作,已经进入安全防护与生态修复并行的新阶段。格宾石笼作为成熟的柔性生态护岸结构,依靠独特的力学特性和综合使用性能,完全契合现阶段水利工程的发展需求。该结构借助金属网箱的拉结作用、散体石料的嵌挤作用形成稳定受力体系,既能适应地基变形,又具备可靠的抗冲刷、消浪能力,可适配不同地质、不同流速、不同功能定位的河道堤段。

[参考文献]

- [1]石兆强.格宾石笼在渭河藉河汇流区干流滩面防护中的应用[J].科技与创新,2026,(5):222-224.
- [2]彭建林,曾俊.格宾石笼在青海省湟源县某山水工程中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2026,(1):205-207.
- [3]王轶阳.格宾石笼施工在防洪治理工程生态护坡中的应用[J].浙江水利水电学院学报,2025,37(5):60-63.
- [4]余三敏,冯朝红,陈根,等.格宾石笼挡墙在河道治理工程中的设计探讨[J].内蒙古水利,2025,(10):78-79.

作者简介:

卢勇鹏(1983--),男,汉族,湖北省咸宁市人,硕士研究生,高级工程师,研究方向:河道治理、防洪工程设计与研究。