



# 胶凝砂砾石材料在防冲结构中的应用

陈丽丽，首佳，潘雪倩

(四川江源工程咨询有限公司，四川成都 610041)

**摘要：**在防洪堤结构中，护脚的抗冲防护作用至关重要，持久耐用、防护效果好的护脚结构能为防洪堤结构提供有效、可靠的保护。结合犍为航电枢纽前丰坝堤防工程，引入胶凝砂砾石新型材料作为新的防冲结构材料。对不同的护脚形式从适用性、耐久性、造价等方面进行对比分析，探讨胶凝砂砾石预制四面体护脚在堤防工程、河道防冲等结构中的运用。

**关键词：**胶凝砂砾石；护脚；防冲结构；防洪堤；加固；犍为航电枢纽

中图分类号：U 641；TV 49

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)12-0135-04

## Application of cemented sand gravel material in anti-scour structure

CHEN Li-li, SHOU Jia, PAN Xue-qian

(Sichuan Jiangyuan Engineering Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In the flood protection dike, the impact protection of the foot protection structure is very important. The durable foot protection structure with good protection effect can provide effective and reliable protection for the flood dike structure. In this paper, combined with Qianfengba dike project of Qianwei navigation power junction, a new type of cemented sand gravel material is introduced as a new anti-scour structural material. The applicability, durability and cost of different types of foot protection are compared and analyzed, the application of prefabricated tetrahedral toe protection of cemented sand gravel in dike engineering and river anti-scour structure is discussed.

**Keywords:** cemented sand gravel; foot protection structure; anti-scour structure; flood protection dike; reinforce; Qianwei navigation-power junction

堤岸防护工程一般以枯水位为界，分为上部护坡工程和下部护脚工程，下部护脚是上部护坡的支撑，对整个堤防稳定起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。下部护脚结构经常受到水流冲刷，是堤防工程的根基，关系着堤防工程的稳定。护脚结构的可靠性、耐久性很大程度上影响了整个堤防工程的安全性、稳定性，可靠耐用的护脚结构能为堤防工程的长期运行提供有效的保障和支撑<sup>[2]</sup>。

为了克服堤岸防护与护脚的不足，确保堤岸坡脚的稳定，本文结合犍为航电枢纽工程的前丰坝防洪堤防工程，将胶凝砂砾石材料引入护脚工程，论证、比较、研究护脚工程的结构形式，以

期得到经济合理、安全可靠的护脚结构。

### 1 前丰坝堤防工程现状及问题

前丰坝堤防工程整体位于岷江右岸，距犍为下坝址约 15.7 km，地面高程约 333~338 m。犍为水库蓄水后，由于水库回水和淹没影响，坝上的大片耕地将被淹没或受到水库蓄水淹没影响，为了保护耕地、减少淹没损失以及移民安置压力，采取垫地填高的防护方案对耕地进行防护，使之达到 5 a 一遇的防洪标准或消除水库蓄水对其淹没影响。

前丰坝保护区垫地高程 337.20 m，垫地面积

约 57.89 万 m<sup>2</sup>, 垫地边界放坡坡比 1:2, 表面采用 20 cm 厚 C25 混凝土聚丙烯纤维面板。防护区坡顶高程 337.20 ~ 338.72 m, 即 5 a 一遇洪水位加 0.5 m 安全超高。坡顶为 1 m 宽、15 cm 厚 C25 混凝土路面, 坡率 2%, 背水侧设置 20 cm×30 cm C25 路缘石, 迎水侧设置 1.2 m 高栏杆。背水侧防护采用 20 cm 厚浆砌 C20 预制混凝土空心六棱块, 其下铺筑 5 cm 厚砂垫层+300 g 土工布, 坡脚设置 30 cm×40 cm C25 混凝土基座。当背水坡面斜长小于 0.5 m 时, 坡顶与垫地区采用耕作土顺接。

岷江流域发生“8·18”特大洪水, 最高洪峰达 37 800 m<sup>3</sup>/s, 远超前丰坝防护工程设计标准(5 a 一遇,  $Q=24\,400\text{ m}^3/\text{s}$ )。前丰坝防护工程出现了面板损毁、断裂冲毁, 堤顶道路悬空、路面断裂变形, 堤顶背坡损毁, 包括砂卵石淘刷形成空洞、六棱块护坡塌陷、六棱块掉落、基座倾斜、基座断裂等, 迎水面坡脚冲刷严重等问题。

经过水毁原因分析发现, 前丰坝防护工程遇超标洪水形成的较大波浪与大流速时, 水流流态不佳引起坡脚冲刷严重, 从而造成堤体破坏、影响堤体安全。可见堤防坡脚稳固对于堤防工程的

安全尤为重要, 为解决前丰坝堤防工程的护脚工程的防冲问题, 须对护脚的形式进行研究分析, 得到合适的防冲护脚结构。

对于前丰坝的水毁部分, 冲空部分采用砂卵石回填密实, 填筑料应保证卵石的含量及级配连续性, 最大卵石粒径小于 30 cm, 小于 5 mm 细粒含量小于 30%, 小于 0.075 mm 土粒含量小于 3%。迎水面护坡采用 20 cm 厚的 C25 钢筋混凝土面板, 坡度为 1:2.0。坡面钢筋网采用 I 级 ( $d=8\text{ mm}$ ) 钢筋, 间距为 250 mm×250 mm。钢筋网沿坡面铺设, 距离面板表面 100 mm。迎水面坡脚采用顶宽 60 cm、高 3 m、背坡为 1:0.3 的 C20 混凝土防冲齿墙。护坡面板上梅花状布置  $d=5\text{ cm}$  的 PVC 排水管, 坡度 5%, 水平间距 2 m, 坚向间距 2 m, 交错梅花形布置。排水管后侧用 0.4 m×0.4 m 土工布包裹绑扎 2 层, 防止细颗粒骨料的流失, 以免引起面板破坏。背水坡防护采用 20 cm 厚浆砌 C20 预制混凝土空心六棱块, 其下铺筑 5 cm 厚砂垫层+300 g 土工布, 坡度为 1:2.0。坡顶为 1 m 宽、15 cm 厚的 C25 混凝土路面, 坡率 2%。齿墙前端护脚的结构形式, 须根据抗冲刷计算的成果进行比选研究。前丰坝防洪堤设计典型断面见图 1。

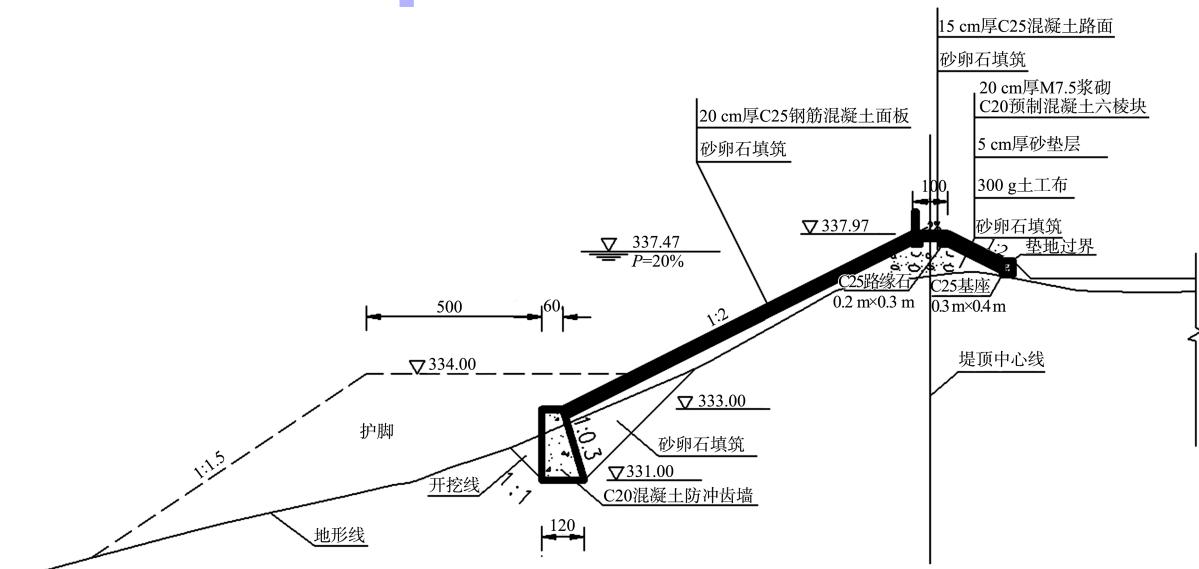


图 1 前丰坝防洪堤设计典型断面 (单位: m)

## 2 抗冲刷计算

根据《堤防工程设计规范》, 在水流作用下, 护脚结构保持稳定的抗冲粒径可按下式计算<sup>[3]</sup>:

$$d = \frac{v^2}{C^2 2g \cdot \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \quad (1)$$

$$W = \frac{\pi}{6} \rho_s d^3 \quad (2)$$

式中:  $d$  为折算粒径(m), 按球形折算;  $W$  为石块质量(t);  $v$  为水流流速(m/s), 取 6 m/s;  $g$  为重力加速度, 取 9.81 m/s<sup>2</sup>;  $C$  为石块运动的稳定系数, 水平底坡  $C=1.2$ , 倾斜底坡  $C=0.9$ , 此处取  $C=1.2$ ;  $\rho_s$  为石块的密度, 取 2.4 t/m<sup>3</sup>;  $\rho$  为水的密度, 取 1.0 t/m<sup>3</sup>。计算得出:  $d=1.19$  m,  $W=2.114$  t, 球体体积为 0.88 m<sup>3</sup>。

## 3 护脚结构形式比较

护脚形式传统使用的材料有木头、芦苇等制作成柴枕、柴排、抛石、石笼等, 采用水上抛填方法对所需防护的堤防结构下部区域形成设计要求的护脚结构。但在山区河流中, 由于山区河流的流速大、水流湍急等特点, 护脚结构使用较广泛的有抛石护脚、铅丝石笼、压载土工布垫等形式。根据前面的计算得知, 所需块体质量、体积均较大, 因此传统材料的护脚结构恐不能满足抗冲刷作用。

胶凝砂砾石新型材料使用少量的胶凝材料和工程现场不筛分不水洗的砂、砾、石料, 通过拌合、摊铺、振动碾压后形成, 具备一定强度和抗剪性能, 最大粒径可达 150 mm。最初提出胶凝砂砾石材料是为了更好、更充分利用当地材料, 且安全、经济建设大坝, 贾金生等<sup>[4]</sup>提出了胶结颗粒料坝(cemented material dam, 简称 CMD)和“宜材适构”的新型筑坝理念。因其原材料易得、施工操作相对比较简单、造价相对经济, 在近十年的时间内, 大同守口堡水库、顺江堰工程的胶结砂砾石坝、犍为航电枢纽塘坝防洪堤、顺江堰溢流坝等坝体的建设<sup>[5~8]</sup>均采用了胶凝砂砾石材料; 在嘉陵江桐子壕航电枢纽、凤仪航电枢纽等工程的护坦尾坎防护中也有四面体防冲结构的应用。

前丰坝堤防工程护脚结构所需抗冲粒径较大、质量较大, 普通的护脚形式难以满足此处的抗冲要求。因此, 考虑将富胶凝砂砾石材料用于前丰坝防护工程的护脚结构的制作。若护脚结构需采用富胶凝砂砾石四面体预制块体, 根据前面的计算成果, 可换算得出预制四面体的棱长为 2 m, 预制四面块体的实物见图 2。四面体预制块体单个体积为 0.943 m<sup>3</sup>, 块体质量为 2.263 t, 体积和质量大, 完全能抵御汛期洪水的冲击。



图 2 预制四面体实物

除了富胶凝砂砾石预制四面体, 护脚结构还可采用大块石抛填、铅丝石笼两种常用的形式。针对上述 3 种护脚形式在适用范围、防护对象、施工工艺和工程造价等方面均存在的优缺点, 综合考虑前丰坝防护堤处的水流边界条件、岸坡受水流冲刷的强度以及当地护脚形式实施的可能性, 有针对性地选择适用而经济合理的防护方案。3 种护脚形式的优缺点、适用范围见表 1。

大块石抛填护脚能很好地适应河床变形, 符合设计强度、风化、粒径要求的块石护岸效果较好, 适用范围广, 施工方便; 但块石抛填护脚抛填施工时, 容易出现定位不准, 导致与设计预估工程量相差较大; 且大粒径(本工程要求粒径 0.8~1 m)的块石料源不易寻找, 在犍为县附近均没有满足要求的石料来源; 因此虽然块石抛填具有单价低、投资少、施工简便等优点, 却不适用于前丰坝堤防工程的护脚结构。

表 1 不同形式护脚特点比较

护脚形式	优点	缺点	适用范围	单价/(元·m <sup>-3</sup> )
大块石抛填	价格低、投资小、施工方案简单	块石粒径不易满足要求，料源相对不易寻找	适用于水流条件平稳、相对简单的水流环境	220
铅丝石笼	抵御汛期洪水冲击能力较强，使用年限较长；砂卵石可就地取材，节约投资；柔性好，适应变形能力强	制作麻烦、人工填装耗时长、人工费高，造价较高，抛填时容易损坏，钢丝连接处在水下易脱落，工序复杂，施工时间长	适用于平缓河床抛填施工	289
富胶凝砂砾石预制四面体	抵御汛期洪水冲击能力强，使用年限长，耐久性好，可靠性高	价格高、投资大、现场预制工序稍复杂、施工工期较长	适用范围广，水下抛填及干地施工均适用	280

铅丝石笼选用直径 2.8~3.5 mm、抗拉强度 350~550 N/mm<sup>2</sup> 的高强度钢丝，采用热镀锌等防腐处理后编织而成，再装成长 1.5 m、宽 1 m、高 0.6 m 的笼子，笼内须充填坚硬、不易风化、不易水解、不易碎的卵石或块石，石料软化系数 ≥ 0.85，石料粒径 ≥ 150 mm，抗压强度 >30 MPa。铅丝网笼装填块石和卵石后可直接吊装抛填。石笼间应形成整体才具有较好的防冲性能及整体性，但是会增加施工难度。铅丝石笼相比于块石护脚柔性好、更好计量；抛填施工时，工程量便于控制；但铅丝石笼的制作相对来说也较麻烦，人工费用高、单价高，在抛填时会出现掉落损坏等，在后期的运行过程中，石笼连接处容易脱开，砂卵石、块石等易被水流冲空，从而导致整体失效，失去作为护脚结构的防冲作用。

富胶凝砂砾石预制四面体砂卵石可就地取材、不筛分、不水洗，但需筛分去除大于 150 mm 超粒径骨料后使用；利用砂石材料现场拌制，预制四面体块；预制时，需安装吊环便于吊装抛填，吊环采用 I 级钢筋 φ25，U 形，两端埋深各 1 m，单根长度 2.49 m，末端做成弯钩状。预制富胶凝砂砾石四面体块抵御汛期洪水冲击能力强，使用年限长；一旦施工抛填完成，基本不易损毁，其后期维修费用少、可减少工程维修经费；计量简单，是一种较好的护脚结构形式；不足之处是四面体块需要预制场所，工序较复杂，施工时间相对长等，其价格相对块石护脚高。

#### 4 结语

1) 预制胶凝砂砾石预制四面体块作为流速较

高、水流条件复杂的山区河流堤防工程的护脚结构，具有耐久性好、抵御汛期洪水冲击能力强、使用年限长等、整体性好、强度高等特点。

2) 预制胶凝砂砾石四面体块在防冲性能及后期维护方面明显优于传统铅丝石笼、块石护脚等结构形式。因此胶凝砂砾石预制四面体块用于制作护脚结构是安全可行、经济合理、稳定可靠的，可在类似工程作推广应用。

#### 参考文献:

- [1] 刘依松, 刘希良, 詹春芳. 压载土工布垫护脚技术在长江防护堤中的实践研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2009 年, 31(1): 41-44.
- [2] 曹金龙, 刘艳涛, 张丽荣. 堤岸防护的类型及其应用[J]. 黑龙江水利科技, 2006, 34(3): 216-217.
- [3] 水利水电规划设计总院. 堤防工程设计规范: GB 50286—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [4] 贾金生, 刘宇, 郑瑾莹, 等. 胶结颗粒料坝研究进展与工程应用[J]. 水力学报, 2016, 47(3): 315-323.
- [5] 杨勇. 三峡工程对长江中下游湖南段影响处理的护岸加固设计[J]. 陕西水利, 2020(8): 83-85.
- [6] 冯炜, 贾金生, 马锋玲. 胶凝砂砾石坝筑坝材料耐久性能研究及新型防护材料的研发[J]. 水力学报, 2013, 44(4): 500-504.
- [7] 胡可可. 大同市守口堡水库胶凝砂砾石大坝富浆胶凝砂砾石铺筑方案简述[J]. 山西水利科技, 2017(1): 24-26.
- [8] 周平, 陈新, 周武松, 等. 基于顺江堰工程的胶结砂砾石坝施工工艺[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(3): 154-155.

(本文编辑 武亚庆)