



# 斜坡式抛石结构护底的倒滤设计

宋建东

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

**摘要:**根据《防波堤与护岸设计规范》的要求,对于可冲刷地基上的斜坡堤,水下棱体的大块石均应抛置于厚度不小于0.5 m的小块石或者土工织物软体排上。对于有局部裸露岩石的砂质海岸,土工织物软体排容易被局部刺破而无法使用,同时土工布也难以满足长达50 a的设计使用年限。国标规范没有严格的预铺碎石倒滤计算,碎石厚度也没有严格的理论依据。针对这些问题,结合国外各倒滤设计原理,采用严格倒滤原理和几何稳定倒滤原理详细阐述了斜坡堤底部的倒滤设计,较好地弥补了国标规范的设计不足。

**关键词:**斜坡式抛石结构;砂质海岸;护底;倒滤设计

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0055-04

## Filter design for bottom protection of sloped riprap structure

SONG Jian-dong

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

**Abstract:** According to the requirements of the *Code of Design for Breakwater and Revetment*, for the sloping dikes on the scoured foundation, large stones of the underwater prisms should be thrown on small stones with a thickness of not less than 0.5 m or the geotextile soft mattress. For sandy coasts with partially exposed rocks, the geotextile soft mattress is easily punctured in part and cannot be used, and it is also difficult to meet the design working life of up to 50 a. Furthermore, there is no strict international standard on the filter calculation of pre-laid gravels, and no strict theoretical basis for gravel thickness. In view of these problems, combined with the filter design principles from China and foreign countries, this paper elaborates the filter design of the sloping dike bottom by adopting the strict filter principle and geometrically stable filter principle, which better makes up for the design deficiencies in the international standard.

**Keywords:** sloped riprap structure; sandy coasts; bottom protection; filter design

根据JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》<sup>[1]</sup>的要求,对于可冲刷地基上的斜坡堤,水下棱体的大块石均应抛置于厚度不小于0.5 m的小块石或者土工织物软体排上。但是对于有局部岩石裸露的砂质海岸,土工织物容易被局部刺破而无法使用;而且目前施工采用的土工布都不能满足50 a的耐久性设计要求,大部分土工布在使用年限达到约20 a时就已经腐蚀破坏<sup>[2-3]</sup>。而采用预铺小块石的方案,国标规范没有详细的粒径和级

配的理论要求,同时对于小块石的厚度也没有严格的理论依据。抛石结构护底的倒滤设计成为一个不容忽视的设计重点。

本文依据国外各倒滤设计的原理,结合国外某项目的设计和施工经验,阐述倒滤的两种作用机理;针对护底结构的不同倒滤要求,采用不同的倒滤机理进行设计。充分弥补了国标规范的设计不足,为其他类似的项目提供设计参考。

## 1 项目概况

项目位于非洲某区域, 护岸长度 650 m。护岸采用抛石斜坡堤结构, 护底结构采用护面块石顺

延的形式, 在护底结构和原泥面之间铺设 300 mm 厚的碎石垫层, 断面见图 1。原地面为砂质海岸, 局部区域有突出的孤石。

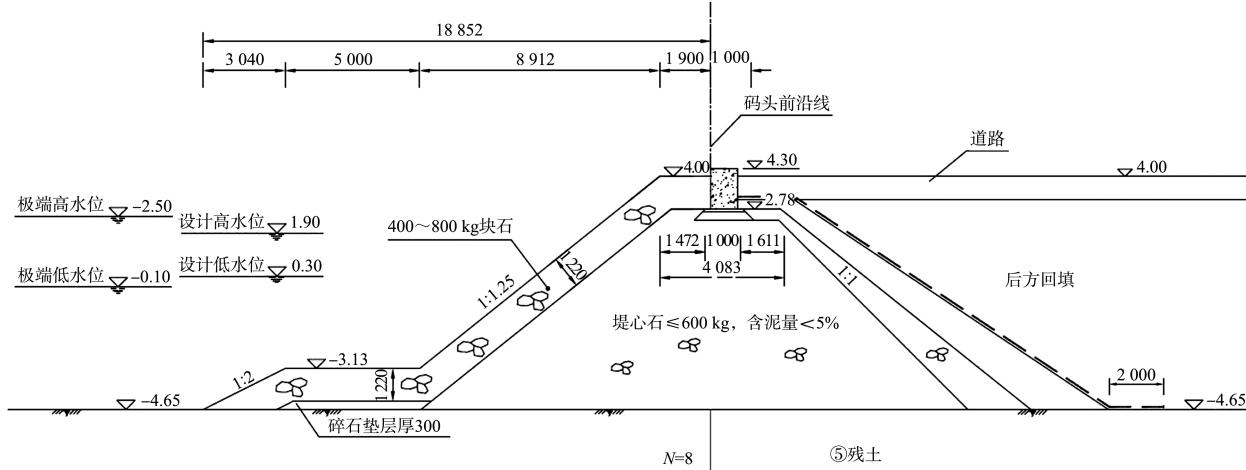


图 1 护岸结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

## 2 块石的设计计算

### 2.1 护面块石

护面块石的稳定质量可按照式(1)计算:

$$W = \frac{\rho H^3}{K_D \left( \frac{\rho_b}{\rho} - 1 \right)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

式中:  $W$  为块石稳定质量 (kg);  $\rho_b$  为块石密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $H$  为设计波高 (m);  $K_D$  为形状系数;  $\rho$  为水的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $\alpha$  为斜坡角度 ( $^\circ$ )。根据计算可知, 护面块石的稳定质量为 0.66 kg, 采用 400~800 kg 的块石, 厚度为 1.22 m。

### 2.2 护底块石

根据 JTS 154—2018《防波堤与护岸设计规范》可知, 护底结构处在 1 倍设计波高以下时, 护底块石结构质量可以采用计算质量的 0.3~0.4 倍, 本项目为了减少级配种类, 护底结构采用护面顺延的形式。

## 3 护底结构的倒滤设计

### 3.1 倒滤原理

根据设计手册 *Interface stability of granular filter structures*<sup>[4]</sup> 可知, 倒滤标准可分为两个类型, 分别为传统倒滤标准(严格倒滤标准)和几何倒滤标准。

### 3.2 传统倒滤标准

传统的倒滤标准又称为严格倒滤标准, 其要求倒滤层和内基层都要足够稳定, 内基层不得穿透倒滤层, 以防止内基层发生内部侵蚀, 该倒滤标准对于倒滤层和内基层都做出严格的级配要求。根据设计手册 *The Rock Manual*<sup>[5]</sup>, 其具体标准见式(2)(3)。

倒滤层和内基层的倒滤要求为:

$$\begin{cases} \frac{D_{15f}}{D_{85b}} \leq 5 \\ \frac{D_{15f}}{D_{15b}} > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $D_{15f}$  为倒滤层倒滤曲线 15% 比例处的粒径大小;  $D_{85b}$  为内基层倒滤曲线 85% 比例处的粒径大小;  $D_{15b}$  为内基层倒滤曲线 15% 比例处的粒径大小。

倒滤层和内基层的稳定性要求为:

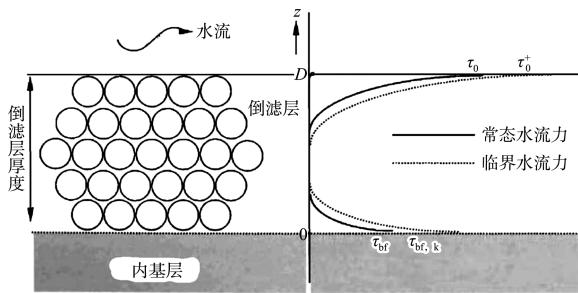
$$\frac{D_{60}}{D_{10}} < 10 \quad (3)$$

式中:  $D_{60}$  为本层倒滤曲线 60% 比例处的粒径大小;  $D_{10}$  为本层倒滤曲线 10% 比例处的粒径大小。

### 3.3 几何稳定倒滤标准

内基层无法满足传统倒滤标准, 在可穿透倒

滤层的前期下，内基层颗粒在微弱的极限启动流速状态下所需要的最厚防护倒滤层。其作用原理见图2。



注:  $\tau_0$  为倒滤层顶部处水流力;  $\tau_{bf}$  为倒滤层底部处水流力;  
 $\tau_0^+$  为内基层颗粒临界穿透状态下的倒滤层顶部处水流力;  
 $\tau_{bf,k}$  为内基层颗粒临界穿透状态下的倒滤层底部处水流力。

图2 几何稳定倒滤标准原理

该理论采用适当级配的块石，通过足够的块石厚度，对底部水流力超过临界启动水流力的状态进行倒滤防护，倒滤层的块石厚度为：

$$D_f = d_{15f} \times 2 \ln \left[ \alpha_k \cdot \frac{\Delta_f d_{50f} \psi_{ef} (1 - y V_{Gf})}{\Delta_b d_{50b} \psi_{eb} (1 - y V_{Gb})} \right] \quad (4)$$

式中:  $D_f$  为倒滤层厚度 (m);  $d_{15f}$  为倒滤层级配曲线 15% 比例处的粒径大小;  $\alpha_k$  为紊流密度系数;  $\Delta_f$  为倒滤层水下相对密度;  $\Delta_b$  为内基层水下相对密度;  $d_{50f}$  为倒滤层中值粒径;  $d_{50b}$  为内基层中值粒径;  $\psi_{ef}$  为倒滤层的临界掩护系数;  $\psi_{eb}$  为内基层的临界掩护系数;  $y$  为内基层的颗粒输移系数;  $V_{Gf}$  为倒滤层颗粒的不均匀系数;  $V_{Gb}$  为内基层颗粒的不均匀系数。

1) 紊流密度系数  $\alpha_k$ 。对于稳定的水流状况，紊流密度系数  $\alpha_k$  取最小值 0.05；对于水流变化较大的湍流，紊流密度系数  $\alpha_k$  取最大值 0.5。

2) 相对密度  $\Delta_f$  和  $\Delta_b$ 。相对密度为：

$$\Delta = \frac{\rho_i - \rho_w}{\rho_w} \quad (5)$$

式中:  $\rho_i$  为块石自身密度;  $\rho_w$  为水的密度。

3) 颗粒输移系数  $y$ 。根据设计手册 *Interface stability of granular filter structures* 的试验结果可知，该参数取 0.625。

4) 颗粒的不均匀系数  $V_{Gf}$  和  $V_{Gb}$ 。颗粒的不均匀系数为：

$$V_G = \frac{d_{50} - d_{15}}{d_{50}} \quad (6)$$

式中:  $d_{15}$  为颗粒级配曲线 15% 比例处的粒径大小;  $d_{50}$  为颗粒级配曲线 50% 比例处的粒径大小。

5) 临界掩护系数  $\psi_{ef}$  和  $\psi_{eb}$ 。根据 Egiazaroff 的研究结果<sup>[6]</sup> 可知，临界掩护系数  $\psi_{eb}$  和  $\psi_{ef}$  可以按式 (7) 计算：

$$\psi = 0.1 \lg^{-2} (19d_{15}/d_{50}) \quad (7)$$

式中:  $d_{15}$  为颗粒级配曲线 15% 比例处的粒径大小;  $d_{50}$  为颗粒级配曲线 50% 比例处的粒径大小。

倒滤层上方有块石层覆盖时，倒滤层的综合临界掩护系数  $\psi_f$  需要根据上部覆盖块石和倒滤层的级配转换：

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_f = \eta \cdot \frac{d_{50f}}{d_{50t}} \psi_{ef} \\ \eta = \alpha_k e^{(-0.5 \cdot \frac{D_t}{d_{15t}})} \end{array} \right. \quad (8)$$

式中:  $\eta$  为相对荷载因子;  $d_{50f}$  为倒滤层级配曲线 50% 比例处的粒径大小;  $d_{50t}$  为覆盖块石层级配曲线 50% 比例处的粒径大小;  $d_{15t}$  为覆盖块石层级配曲线 15% 比例处的粒径大小;  $D_t$  为覆盖块石层的厚度。

针对砂质海岸的块石防护倒滤设计，几何倒滤的设计方法可以有效接近块石护底厚度的合理计算方法。

## 4 本方案的护底倒滤设计计算

### 4.1 护底块石与碎石垫层之间的倒滤

根据设计手册 *The Rock Manual*，护底块石与碎石垫层之间的倒滤采用严格倒滤标准进行倒滤设计，采用护底块石的级配规格为 400~800 kg，碎石垫层的级配规格为 80~150 mm，相应的级配见表 1。

根据核算可知， $\frac{D_{15f}}{D_{85b}} = 0.85 \leq 5$ ， $\frac{D_{15f}}{D_{15b}} = 2.86 > 1$ ，

$\frac{D_{60t}}{D_{10t}} = 1.5 \leq 10$ ， $\frac{D_{60f}}{D_{10f}} = 5.65 \leq 10$ ，满足设计规范要求。

表 1 块石级配计算结果

块石	比例标准	粒径/m
护底块石 400~800 kg	$D_{10}$	0.570
	$D_{15}$	0.588
	$D_{70}$	0.857
	$D_{85}$	0.937
碎石 80~150 mm	$D_5$	0.032
	$D_{15}$	0.064
	$D_{50}$	0.091
	$D_{90}$	0.181

## 4.2 碎石垫层与砂质泥面之间的倒滤

根据设计手册 *Interface stability of granular filter structures*, 采用几何倒滤进行碎石垫层与砂质泥面之间的倒滤设计。根据勘察报告, 砂质土的  $d_{b15}$  取  $0.2 \times 10^{-3}$  m、 $d_{b50}$  取  $0.4 \times 10^{-3}$  m; 块石的密度取  $26.5 \text{ kg/m}^3$ , 砂质土的密度取  $18 \text{ kg/m}^3$ 。根据计算公式可知:  $\Delta_f = 1.585$ ,  $\Delta_b = 0.756$ ,  $\psi_{cf} = 0.0789$ ,  $\psi_{cb} = 0.1$ ,  $V_{Gf} = 0.297$ ,  $V_{Gb} = 0.5$ ,  $\eta = 0.253$ ,  $\psi_f = 2.517 \times 10^{-3}$ 。最终计算可得, 泥面以上最小的碎石防护厚度  $D_f$  为  $0.251$  m, 最终设计的碎石厚度取  $0.3$  m。

## 5 结语

1) 根据国外某项目的设计和施工经验, 当前国标《防波堤与护岸设计规范》规范对于斜坡式抛石结构的护底设计过于笼统; 对于有局部裸露岩石状态下的海岸, 当前国标规范对于护底结构的

设计描述缺乏严谨的理论支撑, 甚至有设计不足的风险。

2) 对于护底结构不同层级之间的倒滤关系, 分别采用严格倒滤原理和几何稳定倒滤原理, 对复杂地貌和浪况状态下的斜坡式抛石结构的护底结构进行了严谨的倒滤设计, 极大弥补了国标规范的设计不足。

## 参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 防波堤与护岸设计规范: JTS 154—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [2] 邓宗才, 董智福. 高强聚丙烯纺粘针刺土工布的耐久性能[J]. 纺织学报, 2018, 39(11): 61-67.
- [3] 聂松林, 姜瑞明, 镇垒, 等. 高强粗旦聚丙烯纺黏针刺非织造土工布的耐久性研究[J]. 产业用纺织品, 2021, 39(3): 45-50, 56.
- [4] Technische Universiteit Delft. Interface stability of granular filter structures [S]. Delft: CUR BUILDING & INFRASTRUCTURE, 2010.
- [5] CIRIA, CUR, CETMEF. The Rock Manual: The use of rock in hydraulic engineering[S]. 2nd ed. London: CIRIA C683, 2007.
- [6] EGIAZAROFF I V. Calculation of non-uniform sediment concentrations[J]. Journal of hydraulic division, 1965, 91(4): 225-247.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 54 页)

- [5] 宋寅. 预应力混凝土管桩填芯混凝土抗弯试验研究及理论分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [6] 李艳艳, 李泽高, 李和庆, 等. 预应力高强混凝土管桩—承台组合体受力性能[J]. 科技导报, 2015, 33(12): 44-49.
- [7] 柳炳康, 李建宏, 张星宇, 等. 预应力填芯管桩抗弯性能与延性特征的试验[J]. 工业建筑, 2007(3): 46-49.
- [8] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航

- 务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [9] 中交水运规划设计院有限公司. 水运工程混凝土结构设计规范: JTS 151—2011[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2011.

(本文编辑 武亚庆)