



国内外规范关于水流作用下护底块石 稳定质量计算方法对比

马 勇, 王 馨, 黄丹萍, 覃 杰, 陈良志

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 关于水流作用下护底块石的稳定质量计算, 国内外均开展了大量研究, 并总结提出多种计算理论, 各国规范也给出不同的计算方法。因研究条件和背景有所不同, 采用各种计算方法往往得到不同的计算结果, 给设计人员带来较多不便。针对上述问题, 梳理国内外常用规范中给出的计算方法, 并结合工程案例进行对比分析, 总结不同方法之间的差异以及适用条件。结果表明, 水深是影响护底块石质量的敏感因素, 计算方法选取时应重点考虑该因素; 美国规范考虑的影响因素较为全面, 具有较好的适用性; 但在强紊动的水流条件下, 建议对照国际通用手册中的 Pilarczyk 法和 Escarameia & May 法综合评估确定块石质量。

关键词: 水流作用; 护底块石; 稳定质量; 国内外规范; 计算方法

中图分类号: U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0017-04

Comparison of calculation methods for stable mass of bottom protection stone under current attack in Chinese and foreign codes

MA Yong, WANG Xin, HUANG Dan-ping, QIN Jie, CHEN Liang-zhi

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: Regarding to the calculation for stable mass of bottom protection stone under current attack, a large amount of research has been carried out in the domestic and overseas, and a variety of calculation theories have been summarized and put forward, with different calculation methods given in different national codes. Due to different research conditions and backgrounds, different calculation results are often obtained by different calculation methods, which bring more inconvenience to engineers. In view of the above problems, we sort out the calculation methods given in Chinese and common international codes, make comparative analysis based on a project, and summarize the differences and applicable conditions in different methods. The results show that water depth is a sensitive factor affecting the mass of bottom protection stone, which should be significantly considered in the selection of calculation method. American code has better applicability due to more comprehensive in consideration of influencing factors, however, in the strong turbulent water flow condition, the Pilarczyk method and Escaramei & May method of the international general manual are recommended for comparison and comprehensive evaluation to determine the mass of bottom protection stone.

Keywords: current attack; bottom protection stone; stable mass; Chinese and foreign codes; calculation method

近年来, 随着我国承建海外工程的增多, 在国内设计规范尚未得到境外业主和咨询工程师普遍认可的情况下, 熟悉和掌握国际规范成为海外

工程人员的必修课; 同时, 为了更好地推动中国规范走向海外, 开展国内与国际规范的对比研究也极为必要。

在护岸、防波堤、围堰合龙、大江大河截流、河流整治等工程中，经常需要采用块石进行护底防护，以抵御水流作用对地基土的冲刷破坏，避免构筑物的堤脚结构发生沉降，确保堤脚及构筑物的稳定性。关于水流作用下护底块石的稳定质量计算，国内外均已开展了大量研究，根据模型试验、理论推导和工程经验，国际上已总结提出了多种成熟的计算理论^[1]。基于已有研究成果，国内外常用规范中对于水流作用下护底块石的稳定质量计算问题，均给出了明确的计算方法，可通过计算公式直接计算块石的质量或粒径，但因各种经验公式推导的前提和背景有所不同，往往产生多个不同的计算结果，给设计和使用人员带来较多不便。在海外的水运工程中，护底块石的结构设计问题普遍存在，尤其在护岸工程，基于多个海外工程对该问题的处理经验，本文针对水流作用下护底块石稳定质量的计算方法进行国内外规范的对比分析，可为类似海外工程提供借鉴。

本文针对国内外常用规范中给出的计算方法进行对比分析，主要对比的规范为：中国的《堤防工程设计规范》^[2]、美国的 *Coastal Engineering Manual*^[3]、日本的 *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan*^[4] 和国际通用手册 *The Rock Manual*^[5]。

1 各国规范推荐计算方法

1.1 中国规范

《堤防工程设计规范》给出水流作用下护底块石保持稳定的抗冲粒径及质量的计算公式如下：

$$D_{50} = \frac{v^2}{C^2 2g \Delta} \quad (1)$$

$$M_{50} = \frac{\pi}{6} \rho_r D_{50}^3 \quad (2)$$

式中： D_{50} 为块石的中值粒径，即细粒质量占比为 50% 对应的块石粒径 (m)； M_{50} 为块石的中值质量，即细粒质量占比为 50% 对应的块石质量 (kg)； v 为水深范围内水流平均流速 (m/s)； ρ_r 为块石密度 (kg/m^3)； Δ 为块石的相对浮力密度，其值为 $\frac{\rho_r - \rho_w}{\rho_w}$ ，其中 ρ_w 为水的密度 (kg/m^3)； C 为块石运动

的稳定系数，水平底坡取 1.2，倾斜底坡取 0.9。

1.2 美国规范

Coastal Engineering Manual 给出水流作用下护底块石的稳定质量的计算公式如下：

$$\frac{D_{30}}{h} = S_f C_s \left[\left(\frac{\rho_w}{\rho_r - \rho_w} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{v}{\sqrt{K_1 g h}} \right) \right]^{\frac{5}{2}} \quad (3)$$

$$K_1 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \varphi}} \quad (4)$$

$$M_{30} = \frac{\pi}{6} \rho_r D_{30}^3 \quad (5)$$

$$M_{50} = 2.6 M_{30} \quad (6)$$

式中： D_{30} 为细粒质量占比为 30% 对应的块石粒径 (m)； M_{30} 为细粒质量占比为 30% 对应的块石质量 (kg)； S_f 为安全系数，最小取值为 1.1； C_s 为初始运动的稳定系数，带棱角的块石取 0.30，圆润块石取 0.38； h 为水深 (m)； K_1 为边坡修正系数； θ 为边坡坡度； φ 为护面结构休止角 (°)，对于块石取 40°。

1.3 日本规范

Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan 给出水流作用下护底块石稳定质量的计算公式如下：

$$M_{50} = \frac{\pi \rho_r v^6}{48 g^3 y_d^6 (S_r - 1)^3 (\cos \theta' - \sin \theta')^3} \quad (7)$$

式中： y_d 为 Isbash 系数，掩埋块石取 1.20，裸露块石取 0.86； S_r 为块石的相对密度； θ' 为河道纵向坡度。

1.4 国际通用手册

The Rock Manual 关于水流作用下护底块石稳定质量的计算推荐以下 3 种方法：

1) Pilarczyk 法：

$$D_{n50} = \frac{\varphi_{sc}}{\Delta} \frac{0.035}{\psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} k_i^2 \frac{v^2}{2g} \quad (8)$$

$$M_{50} = \frac{\pi}{6} \rho_r D_{n50}^3 \quad (9)$$

式中： D_{n50} 为块石的公称中值粒径 (m)， $D_{n50} = 0.84 D_{50}$ ； φ_{sc} 为稳定校正系数，对于连续的护底块石取 0.75； ψ_{cr} 为护底块石的临界起动系数，取 0.035； k_i 为紊动系数，根据紊动程度取值； k_h 为速度系数； k_{sl} 为边坡坡度系数。

2) Escarameia & May 法:

$$D_{n50} = c_T \cdot \frac{u_b^2}{2g\Delta} \quad (10)$$

$$M_{50} = \rho_r D_{n50}^3 \quad (11)$$

式中: c_T 为紊动系数, 对护底块石 $c_T = 12.3r - 0.20$, 其中 r 为海床面 0.1 倍水深处的紊动强度; u_b 为距海床面 0.1 倍水深处底流速 (m/s), u_b 范围为 (0.74~0.90) v 。

3) Maynard 法:

$$D_{50} = f_g^{0.32} S_f C_{st} C_v C_T h \left(\frac{1}{\sqrt{\Delta}} \frac{v}{\sqrt{k_{sl}gh}} \right)^{2.5} \quad (12)$$

$$k_{sl} = -0.67 + 1.49 \cot \alpha - 0.45 \cot^2 \alpha + 0.045 \cot^3 \alpha \quad (13)$$

式中: f_g 为级配系数, 其值为 D_{85}/D_{15} , 其中 D_{85} 、 D_{15} 为细粒质量占比为 85%、15% 对应的块石粒径 (m); C_{st} 为稳定系数, 带棱角的块石取 0.3, 圆润

块石取 0.375; C_v 为速度分布系数; C_T 为护底厚度系数; k_{sl} 为边坡坡度系数; α 为坡面与水平面夹角 (°)。此方法根据 D_{50} 计算 M_{50} 的公式与式 (2) 相同。

2 工程案例计算对比

2.1 计算结果

某海外运河航道扩建升级工程, 浚深后航道底高程为 -16.5 m, 底宽 250 m, 两侧边坡采用块石护面防护, 坡度为 1:2.5, 极端高水位为 1.78 m, 极端低水位为 0.55 m, 运河内最大水流流速为 3.2 m/s (洪水期)。

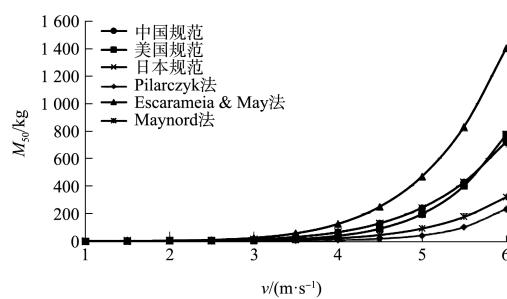
对于本工程所需的护底块石质量, 采用上述国内外规范推荐的方法分别进行计算, 其中块石密度取 2 650 kg/m³, 水密度取 1 025 kg/m³, 重力加速度 g 取 9.81 m/s², 计算结果见表 1。

表 1 国内外规范推荐方法计算结果对比

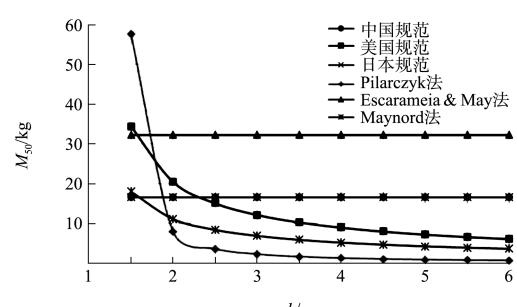
规范	关键控制参数	护底块石质量/kg
《堤防工程设计规范》	$C = 1.2$	16.6
Coastal Engineering Manual	$h = 17.05 \text{ m}, K_1 = 0.82$	6.9
Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan	$y_d = 1.2$	16.6
Pilarczyk 法	$k_i^2 = 1.0, h = 17.05 \text{ m}, k_h = 0.59, k_{sl} = 0.82$	15.1
The Rock Manual	$C_T = 1.28, u_b = 0.74v = 2.37 \text{ m/s}$	32.3
Escarameia & May 法	$h = 17.05 \text{ m}, k_{sl} = 0.95$	4.1
Maynard 法		

2.2 影响因素分析

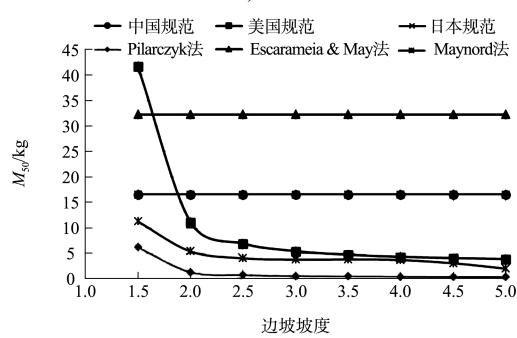
对比上述各种方法的计算结果, 可以看出不同方法的计算考虑因素和计算结果存在一定的差异, 经综合分析, 其中流速、水深、边坡坡度、河道纵坡、紊动程度是主要控制因素, 以上述工程案例为依托, 分析不同因素对计算结果的影响见图 1、表 2。



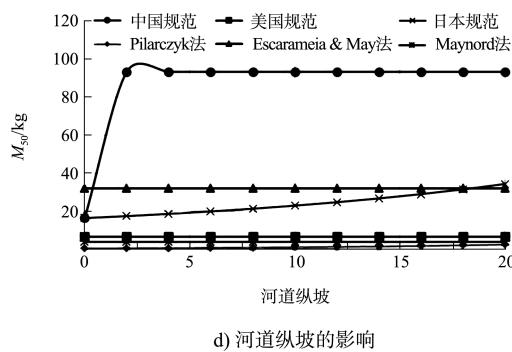
a) 水流流速的影响



b) 水深的影响



c) 边坡坡度的影响



d) 河道纵坡的影响

注: 图 a)~c) 的中国与日本规范的曲线重合。

图 1 不同因素对护底块石质量的影响曲线

表 3 不同规范推荐公式的影响因素对比

规范	影响因素				
	流速	水深	边坡坡度	河道纵坡	紊动程度
中国的《堤防工程设计规范》	√	×	×	√	×
美国的 <i>Coastal Engineering Manual</i>	√	√	√	×	×
日本的 <i>Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan</i>	√	×	×	√	×
国际通用手册 <i>The Rock Manual</i>	√	√	√	√	√
Pilarczyk 法	√	×	×	×	√
Escarameia & May 法	√	×	√	√	√
Maynard 法	√	√	√	×	×

注: “√”表示受影响; “×”表示不受影响。

2) 在不考虑河道纵向坡度的条件下, 对于掩埋状态的护底块石, 中国与日本规范的计算公式完全一致, 因此在相关影响因素的分析曲线中, 两种规范的计算结果完全重合。但对于河道纵向坡度的影响, 两种规范有显著的差异; 此外, 两种计算公式中同一位置的计算参数(中国规范中的 C , 日本规范中的 y_d)分别代表不同的影响因素, 这也造成两种计算公式在某些条件下出现差异。

3) 中国和日本规范、*The Rock Manual* 推荐的 Escarameia & May 法均未考虑水深和边坡坡度的影响, 计算考虑因素较为简单; 美国规范、*The Rock Manual* 推荐的 Pilarczyk 法和 Maynard 法, 综合考虑了水流流速、水深和边坡坡度等多方面的因素, 考虑更为全面。

4) 对比这些方法的计算结果可以看出, Escarameia & May 法的计算结果明显偏大, 本方法是基于 Izbasch 公式, 在 *The Rock Manual* 的第 5.2.1.4 节中说明 Izbasch 公式的适用条件为 h/D_{50} 为 5~10, 所以在水深较大的条件下, Escarameia & May 法的计算结果可能出现不合理, 须谨慎使用。

5) 在水深较小的条件下, Pilarczyk 法的计算

表 2 不同方法计算的不同水流紊动程度下的护底块石质量 M_{50}

计算方法	护底块石质量 M_{50} /kg			
	正常	稍强	较强	强
中国规范	16.58	16.58	16.58	16.58
美国规范	6.90	6.90	6.90	6.90
日本规范	16.58	16.58	16.58	16.58
Pilarczyk 法	0.79	4.50	16.18	106.81
Escarameia & May 法	32.26	179.22	1 632.59	5 746.77
Maynard 法	4.08	4.08	4.08	4.08

通过对比分析, 可以发现:

1) 不同规范推荐公式考虑的影响因素存在一定的差异, 见表 3。

结果可能出现明显突变, 须谨慎使用。

6) Pilarczyk 法和 Escarameia & May 法都考虑了水流紊动程度的影响, 在紊动程度较强的情况下, Escarameia & May 法的计算结果将远超其他计算方法, 须谨慎使用。

3 结语

1) 中国规范和日本规范推荐的计算公式基本一致, 两种经验公式应源自同一理论, 但对于河道纵向坡度的考虑, 两种方法出现了显著差异, 后续将进一步分析差异出现的原因。

2) 水深对于护底块石的稳定质量是一个敏感因素, 随着水深的增加, 护底块石的稳定性增强, 也即所需的块石稳定质量减小, 但是中国规范、日本规范和 *The Rock Manual* 推荐的 Escarameia & May 法均未考虑水深影响, 在深水条件下, 可能导致计算所需的块石质量偏大。此外, Escarameia & May 法应存在一定的水深适用条件, 建议在 h/D_{50} 为 5~10 的条件下使用。在水深较小的条件下, Pilarczyk 法的计算结果可能出现明显突变, 也须谨慎使用。

(下转第 34 页)