



国内外内河航道整治工程护面块体稳定性计算对比

袁永强，刘杰，刘宁

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：水流冲刷作用下整治建筑物护面块体的稳定性计算是内河航道整治工程设计的重要组成部分。随着国内设计企业参与海外工程越来越多，设计人员掌握国内外工程中常用的不同标准和计算方法尤为重要。介绍了国外工程中常用的Pilarczyk方法、英国水力研究院推荐的Escarameia and May方法、美国标准Maynard方法以及国内《航道工程设计规范》和《堤防工程设计规范》中的设计方法。通过对比，总结梳理各种计算方法的差异性，并通过工程实例进一步验证。结果表明，中国规范操作相对简单，但考虑的影响因素较少；国外常用方法考虑更为全面，适用范围更广，但计算过程相对复杂。

关键词：航道整治；护面块体；水流冲刷

中图分类号：U 617

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)12-0164-06

Comparison of stability calculation for armor block in inland waterway regulation project by Chinese and international methods

YUAN Yong-qiang, LIU Jie, LIU Ning

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Stability calculation for armor block in regulation structures under current scour is important for the design of an inland waterway regulation project. As more and more Chinese design companies are involved in overseas projects, design engineers must master different standards and calculation methods commonly used in projects both in China and abroad. This paper introduces the Pilarczyk method commonly adopted in foreign projects, the Escarameia and May method recommended by HR Wallingford, the American standard Maynard method, and methods proposed in the *Design Code for Waterway Engineering* and *Code for design of levee project* of China. Through comparison, the paper summarizes the differences between these calculation methods and further verifies them through engineering examples. The results show that calculation based on Chinese codes is relatively easy to be implemented, but it only considers fewer influencing factors. On the contrary, the commonly used foreign methods are more comprehensive and have a wider application range, but they involve a relatively complicated process.

Keywords: waterway regulation; armor block; current scour

内河航道整治工程中，常见的整治建筑物有护岸、丁坝、顺坝、锁坝等，采用护面块体对各种整治建筑物进行防护是常见的工程手段。不同于海洋区域防护结构，影响内河航道整治建筑物

护面块体稳定性的主要因素为波浪和水流的冲刷作用^[1-2]。如何计算水流冲刷作用下的护面块体稳定性是航道整治工程的重点。

针对此问题，目前国际工程设计中比较受认

可的方法有 Pilarczyk 方法^[3]、英国水力研究院 (HR Wallingford) 推荐的 Escarameia and May 方法^[4]以及美国标准中美国陆军工程兵团推荐的 Maynard 方法^[5]。我国现行《航道工程设计规范》^[6]、《堤防工程设计规范》^[7]也提供了相关的计算方法。本文通过对国内外针对水流冲刷作用下护面块体稳定性的计算方法, 总结梳理各计算方法的差异性, 并通过具体工程实例进一步对比分析, 可为国内外相关工程设计时提供参考。

1 国外标准水流作用下块体稳定计算方法

1.1 Pilarczyk 方法

1.1.1 块体稳定中值粒径计算公式

Pilarczyk 方法是在 Izbash 公式^[8]的基础上, 通过一系列特殊的修正系数而得到的水流冲刷作用下块体稳定的计算公式, 广泛应用于国外航道整治工程设计中。该方法不仅可应用于块石等常见的护面结构, 同时也可应用于格宾石笼、格宾垫等结构的计算。

$$D = \frac{\phi_{sc}}{\Delta} \frac{0.035}{\psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U^2}{2g} \quad (1)$$

式中: D 为护面块体的中值粒径 (m), $D = (M_{50}/\rho_r)^{1/3}$, M_{50} 为块体的中值质量 (kg); ϕ_{sc} 为稳定修正系数; Δ 为护面块体的相对密度, $\Delta = \rho_r/\rho_w - 1$, ρ_r 为护面块体密度 (kg/m^3), ρ_w 为水体密度 (kg/m^3); ψ_{cr} 为机动系数; k_h 为深度系数; k_{sl} 为边坡系数; k_t 为紊流系数; U 为深度平均水流速度 (m/s); g 为重力加速度 (m/s^2)。

1.1.2 稳定修正系数 ϕ_{sc}

水流冲刷作用下的护面块体稳定计算均是基于块体连续铺放的假设, 而在实际的工程应用中, 护面块体不可能无限连续铺设。在整治结构的边缘突变部位, 需要特别考虑水流的作用。不同护面类型稳定修正系数的典型取值分别为: 格宾笼、格宾垫边缘部位 1.00; 抛石、护面块体边缘部位 1.50; 连续的块石防护 0.75; 互相咬合的人工块体、联锁块软体排 0.50。

1.1.3 机动系数 ψ_{cr}

机动系数是通过大量的物理模型试验总结得到的, 主要体现整治建筑物系统类型的稳定特征。对于一般的松散块石体类型, 其机动系数可取为 0.035。因此, 比率 $0.035/\psi_{cr}$ 可用来评价其它的复合系统类型(例如格宾石笼等)相对于松散块石体的相对稳定性。表 2 给出了不同整治建筑物系统类型机动系数的典型取值为: 松散抛石及护面块体 0.035; 一般格宾笼、格宾垫 0.070; 大块石充填格宾石笼 <0.100。

1.1.4 深度系数 k_h

对于充分发展的对数流速剖面:

$$k_h = 2 / [\lg^2(1 + 12h/k_s)] \quad (2)$$

式中: h 为水深 (m); k_s 为粗糙度 (m), 对于松散抛石及护面块体, 可取 $(1 \sim 3)D$; 对于相对较浅的水流 ($h/D < 5$), k_h 值可近似取为 1。

对于没有充分发展的剖面:

$$k_h = (1 + h/D)^{-0.2} \quad (3)$$

1.1.5 边坡系数 k_{sl}

边坡系数主要考虑整治建筑物在空间形态上的影响因素, 由 2 个因素构成, 一是考虑边坡横断面坡度的系数 k_d , 二是考虑整治结构纵断面坡度的系数 k_l 。

$$k_{sl} = k_d k_l \quad (4)$$

式中: $k_d = [1 - (\sin^2 \alpha / \sin^2 \phi)]^{0.5}$, $k_l = \sin(\phi - \beta) / (\sin \phi)$; α 为边坡横断面坡度 ($^\circ$); ϕ 为护面块体的内摩擦角 ($^\circ$); β 为整治结构纵断面坡度 ($^\circ$)。

1.1.6 紊流系数 k_t

紊流系数主要用来评估水体的紊动程度, 不同紊动情况下紊流系数的典型取值为: 正常紊动水平 1.0; 非均匀流, 平缓转弯处 1.5; 非均匀流, 转角突变处 2.0; 非均匀流, 特殊剧烈紊动情况 >2.0。

1.2 Escarameia and May 方法

1.2.1 块体稳定中值粒径计算公式

Escarameia and May 方法为 HR Wallingford 推荐使用的计算方法, 该方法也是在 Izbash 公式的

基础上, 通过物理模型试验修正得到, 广泛应用于河流整治建筑物、桥梁桩基、大坝、沉箱结构等水工结构的防冲刷设计中^[9]。

$$D = c_T \frac{u_b^2}{2g\Delta} \quad (5)$$

式中: c_T 为紊流系数; u_b 为近床流速 (m/s), 可以取 $u_b = (0.74 \sim 0.90)U$, U 为深度平均水流速度 (m/s)。

1.2.2 紊流系数 c_T

紊流系数 c_T 可以通过以下公式计算:

$$c_T = \begin{cases} 12.3r - 0.20 & (r \geq 0.05, \text{适用于护面块体}) \\ 12.3r - 1.65 & (r \geq 0.15, \text{适用于格宾护垫}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: r 为紊流强度, 具体取值见表 1。

表 1 紊流强度取值

适用情况	定性描述	紊流强度 r
平顺河流及航道	正常程度(较低)	0.12
平顺河段的转弯及护岸边缘处	正常程度(较高)	0.20
桥梁桩基、沉箱结构; 结构过渡区域	中高度	0.35~0.50
水利整治建筑物下游位置处	极高度	0.60

1.3 美国陆军工程兵团 Maynard 方法

1.3.1 块体稳定中值粒径计算公式

以上 2 种方法均是基于块体在水流作用下达到临界启动状态的泥沙理论得出的, 而美国陆军工程兵团的 Maynard 方法有所不同。该方法基于护面块体结构下的垫层不会因水流的冲刷作用而暴露的理念得出, 考虑了护面块体厚度的因素。

$$D = (f_g)^{0.32} S_f C_{st} C_v C_T h \left(\frac{1}{\sqrt{\Delta}} \frac{U}{\sqrt{k_{sl} g h}} \right)^{2.5} \quad (7)$$

式中: f_g 为级配系数, D_{85}/D_{15} ; S_f 为安全系数, 最小取值为 1.1; C_{st} 为稳定系数, 对于棱角护面块体, 取 0.300, 对于圆球状护面块体, 取 0.375; C_v 为流速分布系数; C_T 为厚度系数, 一般情况下取 1.0, 其它情况可以参考 Maynard 的研究成果。

1.3.2 流速分布系数 C_v

流速分布系数是考虑水流断面流速分布影响的经验性系数。

对于平稳顺直航道, 以及整治结构的内侧转

弯处, $C_v = 1.0$; 对于整治结构的外侧转弯处:

$$C_v = 1.283 - 0.2 \lg(r_b/B) \quad (8)$$

式中: r_b 为转弯处断面中心的转弯半径 (m); B 为转弯处上游的水面宽度 (m)。对于整治结构的下游处, $C_v = 1.25$ 。

1.3.3 边坡系数 k_{sl}

将 Pilarczyk 方法计算得到的边坡系数应用于公式(7)的计算时, 计算结果均偏于保守。因此 Maynard 提出了更加适用于公式(7)的边坡系数计算方法^[10]:

$$k_{sl} = -0.67 + 1.49 \cot \alpha - 0.45 \cot^2 \alpha + 0.045 \cot^3 \alpha \quad (9)$$

2 中国标准水流作用下块体稳定计算方法

2.1 中国交通运输部颁发行业标准

JTS 181—2016《航道工程设计规范》(简称“JTS 规范”)规定, 水流作用下块石粒径宜根据经验或模型试验确定, 当流速大于 3m/s 时, 可按照下式估算:

$$d = 0.04 V_f^2 \quad (10)$$

式中: d 为块石中值粒径 (m); V_f 为建筑物处的最大表面流速 (m/s)。

该公式形式结构简单, 块石中值粒径主要和冲刷区域的最大表面流速有关, 应用较为便捷。

2.2 中国国标水利行业标准

GB 50286—2013《堤防工程设计规范》(简称“GB 规范”)规定, 在水流作用下, 防护工程护坡、护脚块石保持稳定的抗冲粒径(折算粒径)可按下列公式计算:

$$d = \frac{v^2}{C^2 2g \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \quad (11)$$

$$W = \frac{\pi}{6} \rho_s d^3 \quad (12)$$

式中: d 为折算粒径, 按照球形进行折算 (m); W 为石块质量 (kg); v 为水流流速 (m/s); C 为石块运动的稳定系数, 水平底坡 $C = 1.2$, 倾斜底坡 $C = 0.9$; ρ_s 为石块的密度 (kg/m^3); ρ 为水的密度 (kg/m^3)。

从公式(11)的形式可以看出, 该公式同样

通过 Izbasch 公式修正得到的。

3 国内外计算方法对比

对国内外水流冲刷作用下护面块体稳定性计算的常用方法的影响因素进行对比分析, 结果见表 2。

表 2 国内外水流冲刷作用下护面块体稳定性计算方法对比

影响因素	Pilarczyk 方法	Escarameia and May 方法	Maynard 方法	JTS 规范	GB 规范
空间位置	√	√	√	-	-
块体类型	√	√	√	-	-
水深	√	-	√	-	-
边坡坡度	√	-	√	-	√
水流流速	√	√	√	√	√
块体密度	√	√	√	√	√
块体级配	-	-	√	-	-
护面块体厚度	-	-	√	-	-

对比分析结论如下:

1) 水流流速和块体自身密度是国内外规范计算水流冲刷作用下的块体稳定性所考虑的重要因素。对比来看, 国内标准考虑的影响因素相对较少, 在实际计算时易于操作; 国外方法考虑影响因素较多, 从作用机理角度看计算边界更为全面、合理, 但在实际计算中可能需要对相关参数进行假设。

2) 对于计算中所采用的水流流速, Pilarczyk 和 Maynard 方法采用的是深度平均水流速度; Escarameia and May 方法采用的是近床流速; JTS 规范采用的是建筑物处的最大表面流速; GB 规范中未明确说明, 实际应用时, 基于保守考虑可采用最大表面流速。

3) 国外常用计算方法普遍会考虑整治结构的空间位置情况和块体类型的影响, 如计算区域为整治结构的上游还是下游, 整治结构是位于顺直航段还是转弯突变航段, 块体类型为抛石块体还是格宾石笼等; 而国内标准仅针对块石护面, 且未考虑块体的空间位置影响。

4) 仅有 Pilarczyk 和 Maynard 方法在计算水流冲刷块体稳定性时考虑了水深因素的影响, 其它对比方法均未考虑。

5) GB 规范相对于 JTS 规范多考虑了边坡坡度的影响, 但仅分了水平底坡和倾斜底坡 2 种工况, 整体比较粗略; 国外 Pilarczyk 和 Maynard 方法则给出了边坡坡度影响系数的计算公式, 可以量化边坡坡度影响的作用。各种计算方法均表明, 边坡坡度越陡, 块体所需的稳定质量越大。

6) 不同于其它几种方法, Maynard 方法没有基于临界启动状态的泥沙理论进行推导, 但考虑的影响因素最为全面, 还特别考虑了块体级配和护面层厚度对稳定性的影响。

4 工程实例

某河流航道整治恢复项目位于哥伦比亚北部地区, 该航道为天然河流。项目拟实施整治工程(护滩、护岸、丁坝、顺坝、锁坝)总计 16.73 km, 以达到通航水深 2.4 m、航道宽度 95 m、转弯半径 1 095 m 的通航指标。航道整治结构主体材料采用块石。

以该项目中典型的航道整治建筑物(丁坝)为例(图 1), 采用国内外不同方法计算丁坝结构主体护面块石的稳定性。整治建筑物附近水深 $H = 4 \text{ m}$, 50 a 一遇的深度平均水流速度为 3 m/s, 块石的密度为 2.2 t/m^3 , 水体密度为 1.0 t/m^3 。按照正常紊乱水平的顺直段航道和紊乱水平较高的转弯突变位置分别进行考虑。计算结果见表 3。

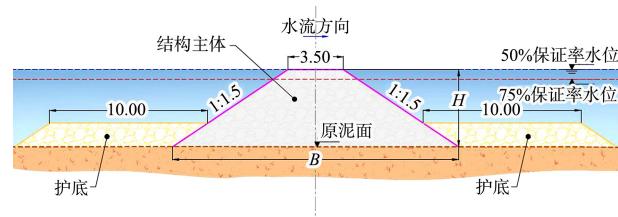


图 1 航道整治建筑物(丁坝)结构 (单位: m)

表 3 块体稳定性计算结果对比

工况	计算方法	紊动水平	块体中值粒径/m	块体质量/kg
正常紊动水平(平稳顺直航段)	Pilarczyk	$k_t^2 = 1.0$	0.34	87
	Escarameia and May	$r = 0.12$	0.40	136
	Maynard	$C_v = 1.0$	0.32	74
	JTS 规范	-	0.36	103
较高紊动水平(转弯突变位置)	GB 规范	-	0.47	121
	Pilarczyk	$k_t^2 = 1.5$	0.56	385
	Escarameia and May	$r = 0.2$	0.70	754
	Maynard	$C_v = 1.25$	0.40	145
JTS 规范	JTS 规范	-	0.36	103
	GB 规范	-	0.47	121

此外,水流冲刷作用下,水流流速是影响块体稳定性的重要参数,图 2 显示了在不同流速的水流冲刷作用下的块体稳定中值粒径的变化趋势。对于 JTS 规范,流速小于 3 m/s 时仍旧采用式(10)进行计算。

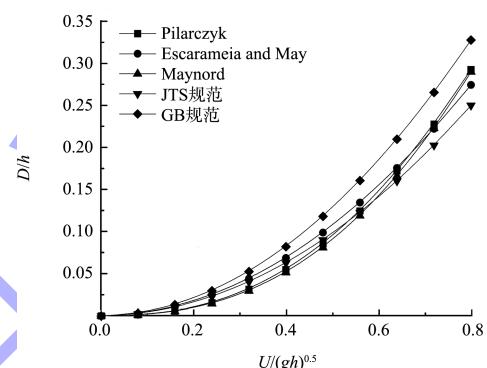
从表 3 和图 2 的计算结果可以总结出以下几点:

1)航道中水流紊动水平对块体稳定影响较大,在紊动水平较高的紊流区域,护面块石稳定所需的中值粒径和块体质量会明显增大。中国 JTS 和 GB 规范中没有针对水流紊流情况的特殊要求。

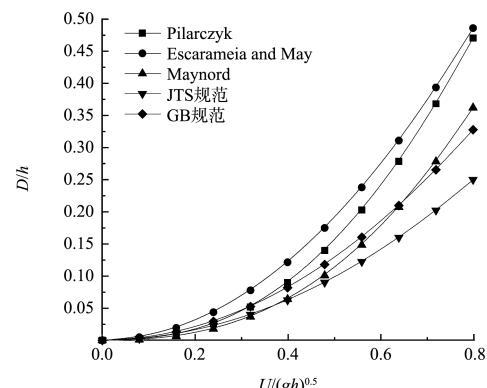
2)中国标准计算结果更接近于国外常用计算方法中正常紊动水平的计算结果。在正常紊动水平下,国内外各种计算方法所得到的块石稳定中值粒径较为接近,GB 规范计算的块石粒径相对较大,但由于计算块体质量时假设块石为球体,因此块石质量略小于假设块石为立方体的 Escarameia and May 方法。

3)在较高紊动水平的情况下,Escarameia and May 和 Pilarczyk 方法计算得到的块石粒径相对较大。因此在极度紊流的特殊位置及情形下,采用这 2 种方法进行设计更为保守和安全。

4)Maynard 方法只能通过调整 C_v 系数来体现水流的紊流水平,该系数最大取值为 1.25,在高紊流的极端情况下难以适用,计算结果偏小。



a) 正常紊动水平(平稳顺直航段)



b) 较高紊动水平(转弯突变位置)

图 2 不同流速的水流冲刷作用下的块体稳定性

5 结论

1)内河航道整治工程中,水流的冲刷作用是影响整治结构物护面块体稳定的主要因素。国内外针对此问题的计算方法均是基于大量的试验结果总结归纳而来。

2)国内标准在计算水流冲刷作用下块体稳定时考虑的影响因素相对较少,在实际计算时易于操作,当航道紊流水平不高时,可快速推算稳定质

量；国外工程常用方法综合考虑了空间位置、块体类型、水深、边坡坡度等多种影响因素，并对各影响因素进行了量化，具有较强的工程实用性。

3)国外工程对于水流冲刷作用下块体稳定性
的常用计算方法应用较为成熟、广泛,建议国内
工程师在国内外工程设计时可参考借鉴。在实际
工程中,还应当通过物理模型试验进行验证。

参考文献：

- [1] 李玉成, 滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 3 版. 北京: 海洋出版社, 2015.
 - [2] CIRIA, CUR, CETMEF. The Rock Manual, the use of rock in hydraulic engineering[M]. 2nd ed. London: C683, CIRIA, 2007.
 - [3] PILARCYK K W. Dikes and revetments [M]. Rotterdam: A. Balkema, 1998.
 - [4] ESCARAMEIA M, RWP M. Channel protection: turbulence downstream of structures, Report SR 313[R]. Wallingford:

(上接第 133 页)

3)多年来，北支进口段浅滩两侧的深槽呈现“十年河西、十年河东”的变化态势，与白茆沙南、北水道南强北弱格局的变化存在关联：北水道发展，北支口主深槽位于崇明侧；北水道萎缩，北支口主深槽改到海门侧。目前深槽稳定在崇头侧，其主槽与长江南支主流呈 105° 的交角，已明显影响到北支入流条件。

4) 北支进口段崇头沙的发展、崇头侧主槽与长江南支主流扭曲，在北支中下段规划整治处大部分已实施的情况下，进口段的治理已成为北支兴衰的关键。

5) 北支进口段规划疏浚工程实施后, 进口段流路有所归顺, 北支洪季大潮落潮平均流量分流比增加0.1%, 工程实施有利于河势稳定, 达到了治理目的。

参考文献：

- [1] 夏云峰, 闻云呈, 徐华, 等. 长江河口段水沙运动及河床演变[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
 - [2] 水利部长江水利委员会. 长江口综合整治开发规划[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2008.
 - [3] 苏长城, 闻云呈, 周东泉, 等. 变化环境下长江江苏段河道演变规律及综合治理关键技术[M]. 南京: 河海大学,

HR Wallingford, 1992.

- [5] U.S. Army Corps of Engineers. EM 1110-2-1601: Hydraulic design of flood control channels [S]. Washington DC: U. S. Government Printing Office, 1994.

[6] 长江航道规划设计研究院, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 航道工程设计规范: JTS 181—2016 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.

[7] 水利部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.

[8] WATANABE H. Comment on Izbash's equation[J]. Journal of Hydrology, 1982, 58(3/4) : 389-397.

[9] ESCARAMEIA M, RWP M. Stability of riprap and concrete blocks in highly turbulent flows [J]. Proceedings of the institution of civil engineers(Water maritime and energy), 1995, 112(3) : 227-237.

[10] MAYNORD S T. Stable riprap size for open channel flows, Technical report HL-88-4 [R]. Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers, 1988. (本文编辑 王传瑜)

出版社, 2022.

[4] 杨芳丽, 韩婷, 国军, 等. 长江口北支河段演变分析及航道治理思路初探[J]. 水运工程, 2014(12) : 79-82.

[5] 林芬芬, 季岚, 曹慧江, 等. 长江口北支河段碍航特性及治理思路[J]. 水运工程, 2021(6) : 177-182, 199.

[6] 陈正兵, 陈前海, 谢作涛. 长江口北支近期水沙特性及河道演变特征[J]. 人民长江, 2016, 47(23) : 5-9.

[7] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 长江太仓段码头前沿地形变化及冲刷原因分析[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2018.

[8] 南京水利科学研究院. 太仓沿线近岸河床局部冲刷原因研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.

[9] 长江口水文水资源勘测局. 北沿江高铁上海—南通通道工程水文测验技术报告[R]. 上海: 长江口水文水资源勘测局, 2019.

[10] 长江口水文水资源勘测局. 长江南京以下 12.5 m 深水航道后续完善工程工可阶段水文测验Ⅲ标段(2021 年洪季) 技术报告[R]. 上海: 长江口水文水资源勘测局, 2021.

[11] 水利部长江水利委员会. 长江口综合整治规划(2021—2035 年)[R]. 武汉: 水利部长江水利委员会, 2020.

[12] 南京水利科学研究院. 江苏省长江口河段(含徐六泾—七丫口)情势分析及控导方案研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2022. (本文编辑 王璁)