



# 混凝土联锁块护底软体排抗掀稳定分析

罗少林, 陈锦, 周小超

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

**摘要:** 针对规范中软体排抗掀稳定计算公式未考虑水深影响的问题, 对水流作用下混凝土联锁块软体排受力进行研究。采用理论推导方法, 得出了新的混凝土联锁块软体排抗掀稳定计算公式, 结合数模分析确定新公式的相关参数取值。新公式中考虑了水深的影响, 采用临界断面平均流速替代规范公式的软体排边缘临界流速, 较规范公式更为准确。分别采用新公式和规范公式对黑沙洲水道航道整治二期工程护底软体排抗掀稳定进行计算。分析结果表明: 新公式较规范公式更能反映软体排实际受力情况。工程实践证明新公式具有较好的可靠性, 可供类似工程参考和借鉴。

**关键词:** 水流作用; 混凝土联锁块软体排; 稳定分析

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0131-05

## Anti-overturning stability analysis of concrete interlocking blocks bottom protection soft mattresses

LUO Shao-lin, CHEN Jin, ZHOU Xiao-chao

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

**Abstract:** For the problem that the calculation formula of anti-overturning stability of concrete interlocking blocks does not consider the influence of water depth in the standard formula, the stress of concrete interlocking blocks underwater current is studied, and new calculation formula of anti-lifting stability of concrete interlocking blocks is obtained by theoretical deduction method, then the relevant parameters of the new formula are determined by combining mathematical model analysis. In the new formula, the influence of water depth is considered, and the critical current velocity at the edge of the soft mattress is replaced by the average current velocity of the critical section, which is more accurate than the standard formula. In this paper, new formulas and standard formulas are respectively adopted to calculate the anti-overturning stability of bottom protection soft mattresses of the Heishazhou channel regulation project Phase II. The analysis results show that the new formulas can better reflect the actual force of soft mattresses than the standard formulas. Engineering practice proves that the new formulas have better reliability and can be used for reference of similar projects.

**Keywords:** action of water current; concrete interlocking blocks soft mattresses; stability analysis

航道整治工程建设中, 大量采用软体排作为护底结构进行保土护滩, 该结构具有整体性好、保沙性能好、适应河床变形能力强等优点, 在航道整治工程中得到了广泛的应用。护底软体排的稳定直接关系到整治建筑物的安全, 施工期与使用期的护底软体排防冲尤其重要, 设计中需重点

考虑对软体排的抗掀、抗滑、抗浮稳定进行计算分析。

关于软体排在水流作用下的抗掀稳定计算, JTJ 239—2005《水运工程土工合成材料应用技术规范》提供了相应的计算公式<sup>[1]</sup>, 该公式未考虑水深的影响并存在软体排边缘流速难以准确确定

的问题,有待进一步改进。国内一些学者采用理论分析结合物理模型、数学模型分析的方法对软体排稳定性进行了研究,主要对软体排受力特性及影响软体排稳定的因素进行定性分析<sup>[2-4]</sup>;并对软体排压载块形状进行优化,但未对规范计算公式的不足提出针对性的改进。本文结合黑沙洲水道航道整治二期工程对混凝土联锁块软体排的抗掀稳定进行分析,提出了新的软体排抗掀稳定计算公式,采用该公式设计的混凝土联锁块软体排结构稳定,在工程实践中取得了较好的护底效果。

## 1 工程概况

黑沙洲水道位于长江下游安徽省境内,上距铜陵市约 62 km,下距芜湖市约 50 km,水道上起板子矶,下至高安圩,全长 14 km,平面形态为首尾窄、中间向左展宽的鹅头形分汊河型,江中的黑沙洲、天然洲将水道分成南、中、北 3 个汊道。黑沙洲水道航道整治二期工程建设内容主要包括心滩梳齿坝工程、已建潜坝加固工程、天然洲左缘上段护岸工程、天然洲右缘护岸加固工程、右岸新港一带护岸加固工程,工程选用的护底结构为混凝土联锁块软体排。

混凝土联锁块软体排由排垫和压载块两部分组成。其中排垫排布采用长丝机织布与无纺布的复合布,单位面积质量为 500 g/m<sup>2</sup>,排垫沿排宽方向每隔 50 cm 设有一根宽 5 cm 的纵向丙纶加筋条,用于固定系结条和增加排垫抗拉强度,其长度与排长相同,在加筋条上每隔 1 m 设一个绑扎环,环直径为 80 mm。压载块采用 C20 混凝土浇筑,平面形状呈现为正方形,其尺寸为 48 cm × 48 cm(长×宽),厚度分为 12、16、20 cm 共 3 种规格。混凝土压载体预制串联成片,用驳船拖运至现场,成片起吊安装于铺排船软体排布上,并与之连接后沉河底。

## 2 软体排抗掀稳定计算分析

### 2.1 现行规范计算方法

按照 JTJ 239—2005 《水运工程土工合成材料

应用技术规范》的有关要求,软体排抗掀稳定计算公式如下:

$$v \leq v_{cr} \quad (1)$$

$$v_{cr} = \theta \sqrt{\rho'_R g t_m} \quad (2)$$

$$\rho'_R = (\rho_m - \rho_w) / \rho_w \quad (3)$$

式中:  $v$  为软体排边缘流速 (m/s);  $v_{cr}$  为软体排边缘临界流速 (m/s);  $\theta$  为系数, 系结软体排取 2;  $\rho'_R$  为软体排相对浮密度;  $g$  为重力加速度;  $t_m$  为软体排等效厚度;  $\rho_m$  为软体排密度;  $\rho_w$  为水的密度。

该经验公式仅考虑了软体排边缘流速、压载块的水下密度和有效厚度,而忽略了水深的影响,且工程实践中测定的流速一般为表面流速或断面平均流速,公式应用存在软体排边缘流速难以准确确定的问题,有待进一步改进。

### 2.2 受力分析及公式推导

选取单个压载块体进行受力分析,以  $O$  点为圆心,临界状态时各作用力对  $O$  点的力矩之和为零。引起边缘压载块失稳的力为水流力,水流力可分解为水平向的推力  $F_w$  和竖向的托举力  $F$ ,保持稳定的力是其有效重力  $G$ ,压载块受力情况见图 1。

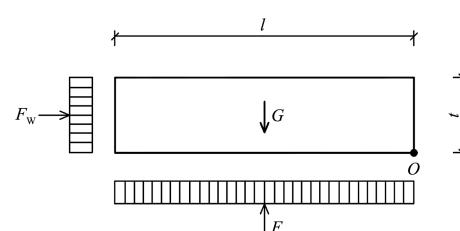


图 1 水流作用下软体排压载块受力

水流推力  $F_w$  和托举力  $F$  引起绕边缘压载块后趾的倾覆力矩,当倾覆力矩不大于边缘压载块有效自重  $G$  引起的稳定力矩时,边缘压载块保持稳定;当倾覆力矩大于边缘压载块自重  $G$  引起的稳定力矩时,边缘压载块发生倾覆,临界状态时倾覆力矩与稳定力矩相等,即满足式(4)。

$$M_w + M = M_G \quad (4)$$

式中:  $M_w$  为水流推力倾覆力矩 (N·m);  $M$  为托举力倾覆力矩 (N·m);  $M_G$  为有效重力稳定力矩 (N·m)。

压载块有效重力可根据式(5)进行计算:

$$G = (\rho - \rho_w) g b l t \quad (5)$$

式中:  $\rho$  为压载块密度( $t/m^3$ );  $\rho_w$  为水密度( $t/m^3$ );  $g$  为重力加速度,  $b$  为边缘压载块宽度( $m$ );  $t$  为压载块厚度( $m$ );  $l$  为压载块长度( $m$ )。

水流推力  $F_w$  可根据 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》中的水流力公式计算:

$$F_w = C_w \frac{\rho_w}{2} u^2 A \quad (6)$$

式中:  $F_w$  为水流推力( $kN$ );  $C_w$  为水流阻力系数;  $u$  为压载块前水流流速( $m/s$ );  $A$  为构件在与流向垂直平面上的投影面积( $m^2$ )。

式(6)中设计水流流速应取软体排压载块前水流流速, 由于压载块前水流流速不易测定, 且在工程实践中测定的流速多为表面流速或者断面平均流速, 为便于工程应用, 拟将压载块前流速采用断面平均流速进行转换。因压载块厚度相对水深较小, 近似认为压载块内流速均匀分布, 将压载块高度范围内流速采用压载块厚度  $1/2$  高度处流速代替。根据长江口新浏河河段现场实测流速拟合, 压载块厚度  $1/2$  高度处流速  $u$  与断面平均流速关系如下:

$$u = v(1+m) \left( \frac{t}{\alpha d} \right)^m \quad (7)$$

式中:  $v$  为断面平均流速( $m/s$ );  $m$  为流速分布指数, 反映水流流速沿水深分布, 取  $m=1/8$ ;  $t$  为压载块厚度( $m$ );  $d$  为水深( $m$ );  $\alpha$  为系数, 对于软体排边缘取 2。

由式(6)~(7)推算得到以断面平均流速表示的水流推力计算公式:

$$F_w = C_w \frac{\rho_w}{2} v^2 A (1+m)^2 \left( \frac{t}{\alpha d} \right)^{2m} \quad (8)$$

托举力  $F$  与护坦脉动压强性质相似, 引用水利工程护坦脉动压强计算公式:

$$F_L = \partial_m \rho_w g \frac{v^2}{2g} \quad (9)$$

式中:  $F_L$  为脉动压强( $kPa$ );  $\partial_m$  为脉动压力系数;  $\rho_w$  为水的密度( $t/m^3$ )。

由式(4)、(5)、(8)、(9)推算得到水流作用下压载块失稳时临界断面平均流速  $v_{cr}$  计算公式:

$$v_{cr} = \sqrt{\frac{2(\rho - \rho_w)}{\rho_w} g t} \cdot \sqrt{\frac{l^2}{\partial_m l^2 + C_w (1+m)^2 \left( \frac{t}{\alpha d} \right)^{2m} t^2}} \quad (10)$$

### 2.3 参数的率定

式(10)中待定参数主要有  $C_w$  和  $\partial_m$ , 为了确定上述参数的取值, 选取两种规格混凝土联锁块软体排和 3 种不同水深进行组合进行数模分析, 数模分析工况组合见表 1。

表 1 数模分析工况组合

软体排规格	水深/m
12 cm 厚混凝土联锁块软体排	1.0, 0.5, 0.10, 0.0
20 cm 厚混凝土联锁块软体排	1.0, 0.5, 0, 10, 0

数模采用 Fluent 软件模拟, 计算模型采用二维模型, 计算过程中不断增大水流流速直至软体排边缘被掀起失稳, 记录各个时刻流量并推算相应的断面平均流速。计算数学模型见图 2。

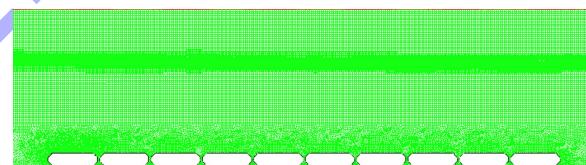
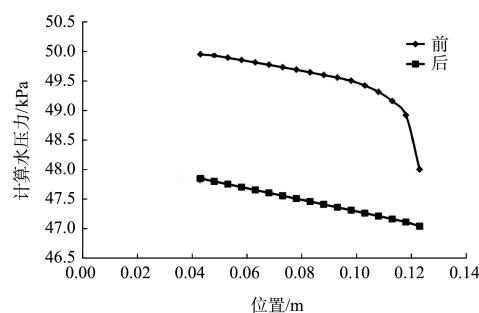
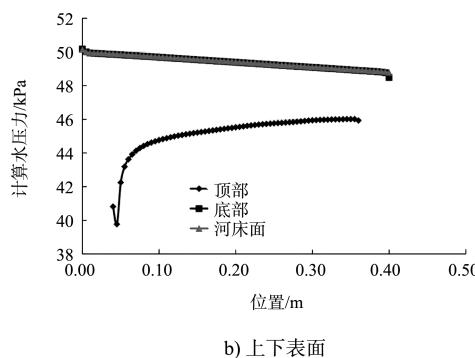


图 2 计算数学模型

提取排边缘压载块体各表面的压强数据见图 3。边缘压载块迎流面和背流面水压力差, 即水流推力; 边缘压载块底部和顶部水压力差, 即托举力。



a) 前后表面



注: 改进型原厚度 20 cm, 边缘块体, 水深 5.0 m。

图 3 压载块表面水压力分布

根据各工况下压载块表面的压强数据及对应的流速, 经计算分析得到各工况下排边压载块体所受的水流推力  $F_w$ 、托举力  $F$  及对应的力矩  $M_w$ 、 $M$ , 并将水流推力及托举力代入式(5)、(6), 得到各工况对应的  $C_w$ 、 $\partial_m$ , 计算结果见表 2。

表 2 中水流阻力系数  $C_w$  在 0.6~1.1, 脉动压力系数  $\partial_m$  在 0.43~0.86, 且水流推力产生的倾覆力矩  $M_w$  占总倾覆力矩的比例较小(占 3%~12%), 倾覆力矩主要由托举力产生, 托举力是引起失稳的主要因素。

表 2 水流阻力系数、脉动压力系数分析

软体排规格	水深/m	水流流速/(m·s <sup>-1</sup> )	$F_w/N$	$F/N$	$M_w/(N·m)$	$M/(N·m)$	$C_w$	$\partial_m$
120 mm 厚混 凝土联锁块软 体排	1.0	1.67	35.2	237.0	2.1	63.2	0.60	0.72
	5.0	1.98	33.8	253.0	2.0	67.5	0.72	0.55
	10.0	2.20	32.0	244.0	1.9	65.1	0.65	0.43
200 mm 厚混 凝土联锁块软 体排	1.0	1.84	126.0	340.0	12.6	90.7	1.09	0.86
	5.0	2.37	108.0	393.0	10.8	104.8	0.84	0.60
	10.0	2.64	111.0	386.0	11.1	102.9	0.83	0.47

基于以上分析,  $C_w$  宜取 1.1、 $\partial_m$  宜取 0.9。工程应用时水流推力及托举力应考虑相应的分项系数, 水流推力分项系数参考 JTS 167-1—2010《高桩码头设计与施工规范》中水流力分项系数, 取 1.5; 托举力分项系数参考 SL 265—2001《水闸设计规范》中水闸闸室抗浮稳定安全系数取值, 取 1.1。

期水深约为 2.0 m, 对应的断面平均流速约为 0.8 m/s; 铺排区内汛期水深约为 15 m, 对应断面平均流速约为 2.0 m/s。

取  $C_w = 1.1$ 、 $\partial_m = 0.9$ , 水流推力分项系数取 1.5, 托举力分项系数取 1.1。根据式(10)计算得到水流作用下软体排边缘临界断面平均流速, 采用新公式和规范公式分别对混凝土联锁块软体排整体稳定进行计算分析, 计算结果见表 3。

### 3 软体排抗掀稳定复核

经数模计算分析, 黑沙洲水道铺排区内枯水

表 3 新公式和规范公式混凝土联锁块软体排整体稳定计算结果

公式	软体排型号	时段	水深/m	排边临界断面 平均流速/(m·s <sup>-1</sup> )	铺排区断面 平均流速/(m·s <sup>-1</sup> )	软体排是否 满足抗掀稳定
新公式	120 mm 厚混凝土联锁块软体排	枯水期	2.0	1.71	0.80	是
		汛期	15.0	1.73	2.10	否
规范公式	160 mm 厚混凝土联锁块软体排	枯水期	2.0	1.94	0.80	是
		汛期	15.0	1.97	2.10	否
	200 mm 厚混凝土联锁块软体排	枯水期	2.0	2.11	0.80	是
		汛期	15.0	2.17	2.10	是
	120 mm 厚混凝土联锁块软体排	枯水期	2.0	2.26	1.06	是
		汛期	15.0	2.26	2.12	是
	160 mm 厚混凝土联锁块软体排	枯水期	2.0	2.67	1.06	是
		汛期	15.0	2.67	2.12	是
	200 mm 厚混凝土联锁块软体排	枯水期	2.0	2.86	1.06	是
		汛期	15.0	2.86	2.12	是

由表3数据可知, 新公式与规范公式计算结果存在一定的差异, 根据新公式计算结果, 采用120 mm厚压载块体作为排边压载不满足抗掀稳定要求, 压载块体厚度增大至200 mm后满足要求。根据规范公式计算结果, 采用120 mm厚压载块体作为排边压载满足抗掀稳定要求。新公式考虑了水深的影响, 较规范公式更能反映软体排实际受力情况。

混凝土联锁块软体排中间部位压载块因受边缘压载块的掩护; 且当某一中间压载块体发生跳脱时, 会受到四周压载块体向下的拉力。因此, 相同条件下, 中间排临界断面平均流速比边缘排大, 中间排更容易保持稳定。

基于以上分析, 黑沙洲航道整治二期工程中护底结构采用混凝土联锁块软体排, 其中中间排采用120 mm厚压载块, 排边缘5 m范围压载块加厚至200 mm。从目前效果来看, 工程施工期及运行期排体均保持稳定。

#### 4 结语

1) 对水流作用下的混凝土联锁块软体排压载块进行受力分析, 建立了混凝土联锁块软体排抗掀稳定计算公式, 可适应于带排垫和压载块的护

(上接第130页)

#### 参考文献:

- 梅玉龙.刚性桩复合地基上双铰底板式闸室的三维数值分析[D].南京:河海大学, 2006.
- 李骞.复合地基船闸结构有限元分析[D].重庆:重庆交通大学, 2015.
- 罗彬, 章金河, 毛成.混凝土桩复合地基在船闸工程中的应用[J].工程与建设, 2020, 34(3): 493-495.
- 周峰, 宰金珉, 梅国雄.复合桩基与复合地基[J].岩土工程技术, 2005, 19(3): 141-143, 151.
- 高兴和.软基上的船闸闸室结构选型: 荡茜河枢纽船闸闸室结构及其基础处理设计探讨[C]//中国水利学会, 山东省水利学会, 安徽省水利学会.华东七省(市)水利学会协作组第二十三次学术研讨会论文集.北京: [出版者不详], 2010: 340-344.
- 赵朝志.复合桩基上船闸闸首结构有限元分析[D].南京:河海大学, 2010.

底软体排抗掀稳定计算。

2) 通过数学模型分析, 对公式中的参数进行率定, 给出了较为合理的取值。

3) 将公式应用于黑沙洲航道整治二期工程护底软体排稳定分析, 实施效果良好, 能够对类似工程护底结构设计起到一定的借鉴作用。

4) 研究仅考虑了水流作用, 未考虑河床地质、水流流态、波浪等因素, 具有一定的局限性, 有待进一步研究。

#### 参考文献:

- 天津港湾工程研究所.水运工程土工合成材料应用技术规范: JTJ 239—2005[S].北京:人民交通出版社, 2005.
- 吴献, 刘一恒.混凝土联锁块软体排压载块抗水流掀动稳定性研究[J].中国水运(下半月), 2017, 17(6): 328-329.
- 王费新, 马兴华, 张忱, 等.混凝土联锁块软体排压载块抗水流掀动稳定性研究[J].水运工程, 2015(7): 8-13.
- 周海, 马兴华, 田鹏, 等.水流作用下混凝土联锁块软体排压载失稳机理和计算方法[J].中国港湾建设, 2014(9): 11-16.

(本文编辑 武亚庆)

- 周俊波, 何良德, 孙保虎.高石碑船闸下闸首结构有限元分析[J].交通科技, 2011(6): 98-101.
- 李成强, 陶桂兰, 曹称宇.船闸闸室结构刚性桩加固地基承载特性分析[J].水道港口, 2017, 38(3): 263-268.
- 孙保虎, 何良德, 何英发, 等.PHC刚性管桩基础上的闸首底板内力计算方法[J].水道港口, 2014, 35(1): 73-80.
- 张守国.船闸闸首复合桩基变刚度设计的探讨[D].南京:河海大学, 2012.
- 伊西凯.船闸闸首复合桩基有限元分析与刚度调平研究[D].南京:河海大学, 2015.
- 中国建筑科学研究院.建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S].北京:中国建筑工业出版社, 2008.
- 中交水运规划设计院.船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001[S].北京:人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 王璁)