



混凝土联锁块软体排压载块 抗水流掀动稳定性研究^{*}

王费新¹, 马兴华², 张 忱¹, 洪国军¹

(1. 中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司, 航道疏浚技术交通行业重点实验室, 上海 201208;
2. 中交航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120)

摘要: 通过稳定性物模、Fluent 二维数模、受力测试等手段, 研究和分析纯流条件下 4 种常用混凝土联锁块护底软体排压载块的稳定性、失稳过程、失稳临界流速, 以及水深和压载部位 (排边缘、搭接处、中间部位) 等因素对压载块稳定性的影响。根据研究结果对现行规范公式提出了水深、结构尺寸及压载部位等因素的修正。在此基础上, 提出了 3 种新型压载块结构形式, 并与常用压载块进行了比较。结果表明, 3 种新型压载块稳定性均好于现用的 4 种压载块。

关键词: 软体排; 混凝土联锁块; 临界流速; 抗水流掀动

中图分类号: U 617.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0008-06

Physical and numerical model study on anti-rolling stability of concrete interlocking blocks by current

WANG Fei-xin¹, MA Xing-hua², ZHANG Chen¹, HONG Guo-jun¹

(1. Key Laboratory of Waterway Dredging Technology Co., Ltd., Ministry of Transport, PRC,
CCCC National Engineer Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201208, China;
2. Shanghai Waterway Engineer Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: The anti-rolling stability, failure process and critical velocity of 4 commonly applied concrete interlocking blocks are tested and analyzed by physical model tests, Fluent-2D calculation and force tests. The influence of water depth and location (at the edge, lap joint, or middle of the bed-protection mattress) on the block's anti-rolling stability is also studied. A modification of the formula in the current specification is proposed, involving water depth, block structure and location. Then, 3 new-type blocks are designed and compared with the commonly used block. The results show that the anti-rolling stability of the 3 new-type blocks is certainly better than that of the commonly used 4.

Keywords: flexible mattress; concrete interlocking block; critical velocity; anti-rolling stability

土工织物软体排是一种常用的护底结构, 具有反滤、隔离、防冲及整体性、适用性强等特点, 能有效防止水流直接冲刷河床和水流渗透作用造成的河床局部冲刷变形, 克服了传统防护结构存在的很多问题, 近年来被广泛应用于长江口深水航道治理工程及其它水运、水利、吹填造陆等工程中^[1-3]。JTJ 239—2005《水运工程土工合成材料

应用技术规范》^[4]中软体排抗掀动稳定性验算公式为:

$$v \leq v_{cr} = \theta \sqrt{\frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_w} g t_m} \quad (1)$$

式中: v 为软体排边缘流速 (m/s); v_{cr} 为排边缘临界流速 (m/s); θ 为系数; ρ_m 为压载体密度 (kg/m^3); ρ_w 为水体密度 (kg/m^3); g 为重力加速

收稿日期: 2014-12-01

^{*}基金项目: 交通运输建设科技项目 (2013328J17500)

作者简介: 王费新 (1979—), 男, 高级工程师, 从事疏浚技术及相关方面的研究工作。

度 (m^2/s); t_m 为排体等效厚度 (m)。

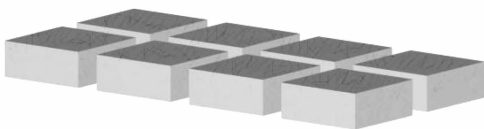
长江口深水航道治理工程等工程实践表明, 公式(1)用于确定水流作用为主的护底软体排压载质量在总体上是可行的。但该经验公式仅考虑了垂线平均流速、压载块的水下密度和厚度, 而忽略了排布、流向、水深、波浪、块体结构等因素。

本文采用稳定性观测、受力测试计算、数模分析计算等手段, 研究纯水流作用下混凝土联锁块软体排压载块的稳定性、失稳过程及其临界流速, 分析水深、压载块结构尺寸以及所处压载部位(排边缘、搭接处及中间部位)等因素对压载块稳定性的影响。

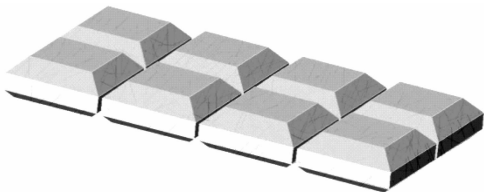
1 研究方案

1.1 试验压载块

选取工程中常用的 4 种结构形式的压载块作为试验压载块, 分别为: 普通型厚度 12、20 cm 压载块, 以及改进型厚度 12、20 cm 压载块。其中, 普通型厚度 12、20 cm 块体为长方体(长 40 cm, 宽 40 cm, 厚分别为 12、20 cm); 改进型厚度 12、20 cm 块体为带倒角的长方体(长 48 cm, 宽 48 cm, 厚度分别为 12、20 cm, 底面倒角 4 cm, 顶面倒角分别为 4、8 cm)。4 种块体中心间距均为 50 cm。



a) 普通型厚度20 cm块体



b) 改进型厚度20 cm块体

图 1 试验块体结构形状

1.2 物模试验

物模试验进行块体抗水流掀动稳定性观测及部分典型工况的受力测试, 不考虑基底土质、地

形等因素的影响。试验在水槽中进行, 采用了多种比尺的模型, 分别用于水深 1、2、2.5、5 m 情况。其中 1 m 水深工况采用 1:4 模型比尺, 进行稳定性观测试验以及部分工况的受力测试; 2、2.5 m 水深采用 1:8 模型比尺, 仅进行改进型块体稳定性观测试验; 5 m 水深工况采用 1:20 的模型比尺, 也只进行改进型块体稳定性观测试验。模型排布按原型 350 g/m² 机织布与 150 g/m² 无纺布复合考虑。

1.3 数模计算

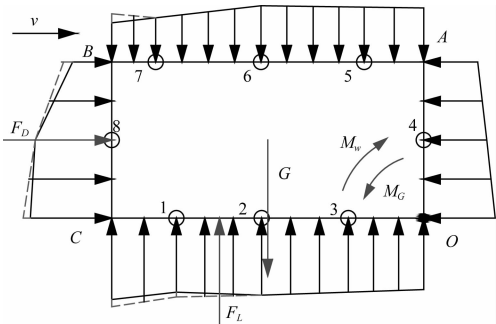
考虑到排体结构相对复杂, 采用简化的 Fluent 断面二维数模来模拟和计算压载块在水流作用下的受力情况及其稳定性, 通过受力及力矩平衡的方法分析计算压载块的稳定性。数模计算结果采用物模受力测试分析结果进行验证, 并与物模稳定性观测结果相互印证。

2 结果与分析

2.1 物模受力测试分析及数模验证

2.1.1 物模受力测试分析

以 1 m 水深普通型厚度 0.20 m 及改进型厚度 0.20 m 压载块排边缘为例, 进行了水流作用下压载块表面受力情况测试及分析计算, 用于数模计算结果的验证, 测点布置见图 2。图 2 中水流方向为左向右, O 点为力矩作用点。试验块体表面水压力分布由各测点水压力线性推算得到; M_G 为重力力矩; M_w 为水流力矩, 根据水压力分布计算推求。受力分析结果见图 3, 其中的修正 M_w 为考虑排布受力产生的附加力矩以及计算过程简化等因素对 M_w 按一定比例修正得到。



a) 普通型厚度20 cm块体

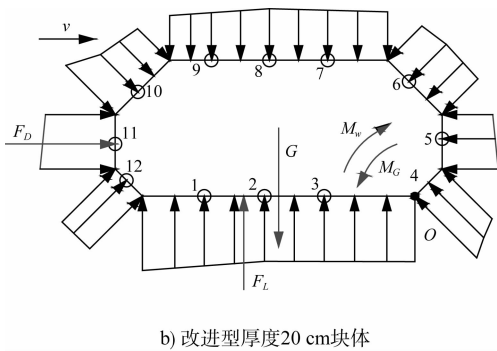


图 2 传感器布置及块体稳定性分析

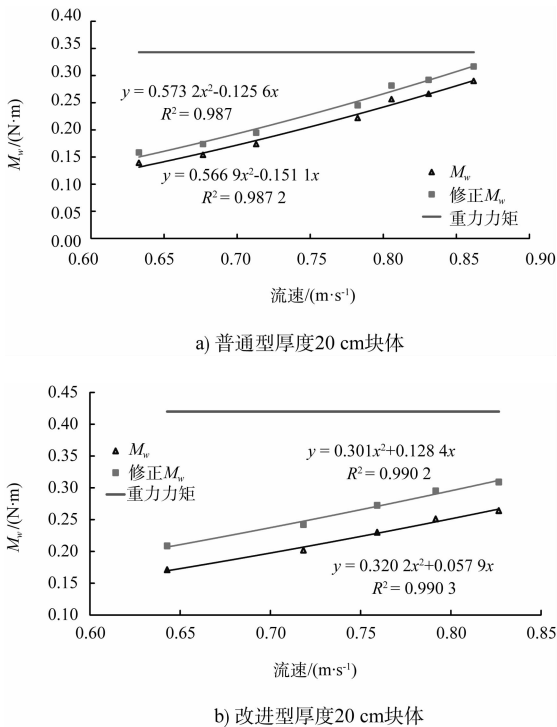


图 3 受力测试及分析计算结果

2.1.2 数模验证

直接采用物模受力测试的部分试验组次对数模计算结果进行验证，验证结果见表 1。考虑到决定压载块抗水流掀动稳定性的关键参数为水流力力矩，为简单起见，表 1 仅给出了水流力力矩的验证结果。由表 1 及各测点水压力对比结果可知，数模计算结果与物模受力测试分析结果基本一致。其中，各测点水压力经水深修正后，绝大部分偏差在 5% 以内，仅个别点偏差较大。6 种验证工况下水流力力矩数模计算值较物模值偏差均在 6.5% 以内。总体说来，采用简化的 fluent 二维数模分析计算混凝土连锁块软体排压载块抗水流掀动（卷边）稳定性是可行的。

表 1 数模验证结果

压载块	验证流速/(m·s ⁻¹)		水流力力矩/(N·m)		差值 比例/%
	物模	数模	物模	数模	
普通型 厚度 0.20 m	0.713	0.714	0.195	0.203	4.3
	0.806	0.808	0.288	0.270	-6.4
	0.831	0.833	0.292	0.279	-4.4
改进型 厚度 0.20 m	0.718	0.710	0.242	0.234	-3.2
	0.792	0.782	0.295	0.298	1.2
	0.830	0.852	0.309	0.305	-1.4

2.2 压载块稳定性物模观测及数模计算结果

首先观测压载块失稳形式，根据观测结果，试验条件下排边缘及搭接处压载块均表现为卷边失稳，即迎流面压载块一旦失稳头部上抬，立即上翘并翻卷，带动后续压载块及排体向后滚动（图 4），而中间部位块体则表现为整体掀动失稳（漂浮）。



图 4 水流作用下压载块掀动（卷边）失稳状况

其次，测试了纯水流动作用下 4 种压载块的失稳临界流速。其中，压载块整体稳定性指软体排中间部位压载块的稳定性，物模试验时按压载块间距铺设前后两排压载块，固定前排压载块，观测后排压载块在水流作用下的稳定性。测试结果见表 2（已换算至原型）。作为比较，表 2 也给出了由物模受力测试分析推算得到的失稳临界流速（括号内值），两者基本一致。

最后，采用简化的 fluent 二维数模计算并分析纯水流动作用下 4 种压载块的失稳临界流速。计算工况基本涵盖了物模稳定性观测试验的所有组次，并增加了 10 m 水深情况的部分组次。其中，压载块整体稳定性分析计算时，以迎流面第 2 排压载块为分析计算对象。数模计算结果见表 2，某组次数模计算结果见图 5。表 2 也给出了修正公式计算结果，修正公式具体结构及参数取值详见后文。

表 2 压载块抗水流掀动稳定性物模观测及数模分析结果对比

分类	压载块	水深/m	掀动(卷边)失稳临界流速/(m·s ⁻¹)		
			物模	数模	修正公式
压载块排边缘稳定性	普通型厚度 0.12 m	1.0	1.65	1.675	1.716
	普通型厚度 0.20 m	1.0	1.70(1.78)	1.785	1.769
	改进型厚度 0.12 m	1.0	1.73	1.678	1.628
		2.0	1.77	1.771	1.773
		5.0	1.86	1.946	1.985
		10.0		2.210	2.168
	改进型厚度 0.20 m	1.0	1.86(1.97)	1.903	1.950
		2.5	2.14	2.051	2.140
		5.0	2.42	2.375	2.336
		10.0		2.614	2.549
压载块搭接处稳定性	普通型厚度 0.12 m	1.0	1.81	1.631	1.652
	普通型厚度 0.20 m	1.0	1.86	1.672	1.715
	改进型厚度 0.12 m	1.0	1.86	1.706	1.717
		2.0	1.85	1.914	1.811
		5.0	1.82	1.936	1.946
		10.0		2.109	2.061
	改进型厚度 0.20 m	1.0	2.11	1.859	1.877
		5.0	2.05	2.129	2.106
		10.0		2.264	2.232
压载块整体稳定性	改进型厚度 0.12 m	2.5	4.40	4.504	
	改进型厚度 0.20 m	2.5	4.57		

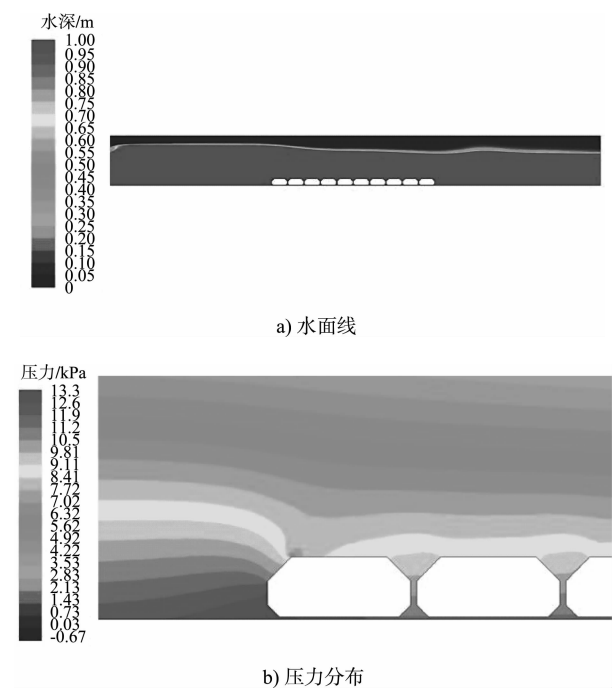


图 5 1 m 水深水流作用下改进型厚度 0.20 m 压载块数模计算结果

由表 2 可知,压载块抗水流掀动失稳临界流速数模计算结果与物模测试结果基本一致,误差均在 6% 以内。再次验证了简化二维数模方法计算软体排压载块抗水流掀动稳定性的可行性。

2.3 结果分析

1) 结构形式对压载块抗水流掀动稳定性的影响。

4 种压载块中,无论排边缘还是搭接处,相同水深条件下,改进型厚度 0.20 m 压载块抗水流掀动稳定性均好于其它 3 种压载块;普通型厚度 0.12 m 压载块稳定性最差;改进型厚度 0.12 m 压载块和普通型厚度 0.20 m 压载块则介于以上两者之间,且大体相当。

2) 排边缘、搭接处及中间部位压载块稳定性比较。

计算工况组次下,4 种压载块搭接处抗水流掀动稳定性较排边缘总体略有下降,其中,5、10 m 水深条件下改进型厚度 0.20 m 压载块下降幅度较大。表明:相同水深条件下,压载块搭接处抗水流掀动稳定性是软体排抗水流掀动稳定性的控制

条件,宜通过合理优化软体排搭接部位位置和方向的布置,避免搭接部位正向面对最大流速水流,以减小搭接处失稳的可能性。

从试验结果来看,纯水流作用下,软体排中间部位压载块的掀动失稳临界流速均远高于排边缘及搭接处。表明:适当减小中间部位压载块的压载厚度及质量,不会对软体排稳定性造成影响。

3) 水深对软体排压载抗水流掀动稳定性有显著影响。

从数模、物模结果来看,压载块稳定性均随水深的增加而明显增加,表明水深是分析计算压载块稳定性的关键因素之一。

4) 公式修正。

根据试验结果,提出如下压载块抗水流掀动失稳临界流速公式,对现有规范公式进行修正:

$$v_{cr}=K\sqrt{\frac{\rho_m-\rho_w}{\rho_w}gD_b}\left(\frac{h}{h_b}\right)^m\tag{2}$$

式中: D_b 为压载块当量直径 (m); h_b 为压载块高度 (m); K 和 m 为经验系数,取值见表 3。由式(2)估算得到的临界流速值见表 2,与数模计算结果基本一致,最大偏差在 6% 以内。

表 3 修正公式经验系数 K 和 m 取值

压载块	K		m	
	排边缘	搭接处	排边缘	搭接处
普通型厚度 0.12、0.20 m	0.62	0.64		
改进型厚度 0.12 m	0.56	0.64	1/8	1/12
改进型厚度 0.20 m	0.65	0.67		

2.4 新型压载块

根据以上分析计算结果,在改进型厚度 0.20 m 压载块的基础上,提出了 3 种新型压载块结构形式(图 6)。其中,加长型长度 1 m 及加长型长度 2 m 压载块分别由改进型厚度 0.20 m 压载块长度方向上分别加长至 1 m 和 2 m 得到,宽度方向及倒角不变;楔形长度 1 m 压载块为加长型长度 1 m 压载块改变倒角形成,即取消下倒角,上倒角由原 8 cm 增加至 13 cm。

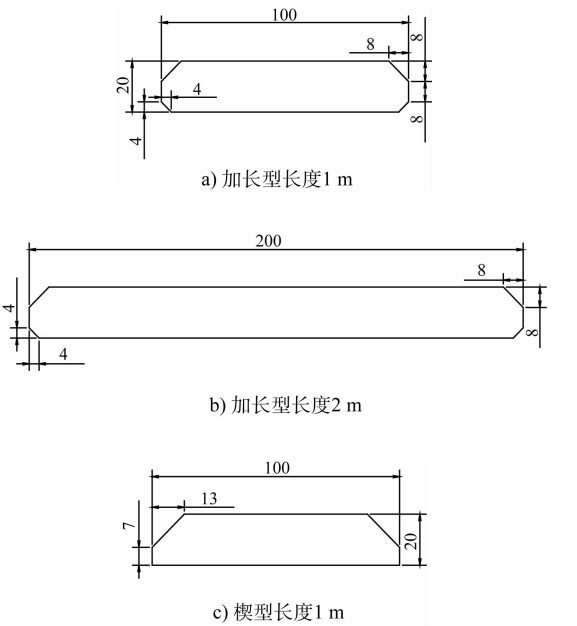


图 6 3 种新型压载块结构形式 (单位: cm)

对 3 种新型压载块在纯水流作用下的掀动失稳临界流速进行物模观测及数模分析计算,并与改进型厚度 0.20 m 进行比较,结果见表 4。其中,物模模型比尺均为 1:8,试验水深 2.5 m,仅分析和观测排边缘压载块稳定性。

表 4 3 种新型压载块抗水流掀动稳定性物模观测及数模分析结果

压载块	水深/m	掀动(卷边)失稳临界流速/(m·s ⁻¹)	
		物模	数模
改进型厚度 0.20 m	2.5	2.14	2.051
加长型长度 1 m		2.43	2.267
加长型长度 2 m		2.51	2.444
楔形长度 1 m		2.33	2.226

由表 4 可知,3 种新型压载块纯水流作用下掀动失稳临界流速物模观测值与数模计算值基本一致,最大偏差在 7% 左右。根据以上计算结果,3 种新型压载块抗水流掀动稳定性均较改进型厚度 0.20 m 压载块有较大的提高,且其抗水流掀动失稳临界流速基本随压载长度的增加而增加;就加长型长度 1 m 及楔形长度 1 m 两种压载块而言,由于楔形长度 1 m 压载块总压载质量的减少,以及倒角的变更,使得其抗水流掀动稳定性略小于加长型长度 1 m 压载块。

3 结论

压载块稳定性物模观测、受力测试分析、数模计算结果呈现了较好的一致性。综合数模、物模的试验结果可知,压载块结构形式、水深、压载部位等因素对混凝土联锁块软体排压载块抗水流掀动稳定性有重要影响。

1) 结构形式对压载块抗水流掀动稳定性有较大影响。4 种常用压载块中,改进型厚度 0.20 m 压载块稳定性最好,普通型厚度 0.12 m 压载块稳定性最差,改进型厚度 0.12 m 压载块及普通型厚度 0.20 m 压载块介于以上两者之间;3 种新型压载块稳定性均明显高于改进型厚度 0.20 m 压载块,且其抗水流掀动失稳临界流速基本随压载长度的增加而增加。

2) 水深是决定压载块抗水流掀动稳定性的重要因素之一。无论是排边缘,还是搭接处,压载块水流作用下掀动失稳临界流速均随水深的增加而增加,且大体符合指数关系。

3) 水流作用下,混凝土联锁块软体排均表现为卷边失稳,且相同水深及结构形式下,中间部位压载块的掀动失稳临界流速均远高于排边缘及搭接处,而搭接处压载块稳定性均较排边缘有所下降。表明相同水深条件下,搭接处压载块的稳

定性可能是软体排抗水流掀动稳定性的控制条件。

需要指出的是,以上试验研究中,均未考虑基底土质及地形等因素的影响。此外,来流流向、局部流态、波浪等也是影响压载块稳定性的重要因素。后续研究将在上述研究的基础上,考虑这些因素的影响,结合工程实例及现场实测资料,深入探讨和揭示各种因素对混凝土联锁块软体排压载块稳定性的影响,量化压载块掀动失稳临界条件,为现行规范公式的修订和完善提供基础数据资料和依据。

参考文献:

[1] 张景明. 长江口深水航道治理工程护底软体排结构设计[J]. 水运工程, 2006(12): 20-23.

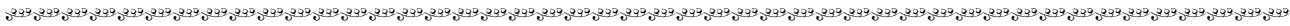
[2] 周海, 陈琳, 王费新. 长江口航道整治建筑物护底软体排结构的优化和运用[J]. 水运工程, 2012(12): 173-177.

[3] 曹棉. 软体排在航道整治工程中的应用[J]. 水运工程, 2004(9): 70-73.

[4] JTJ 239—2005 水运工程土工合成材料应用技术规范[S].

[5] 钱宁, 万兆慧. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

中国港湾签约沙特吉赞白石滨海开发项目

6 月 29 日,中国港湾与阿美石油公司在沙特东部省胡拜尔市阿美石油公司总部正式签署吉赞白石滨海开发项目合同,合同额约 5 700 万美元,工期 540 d。

该项目位于沙特吉赞经济城以北、吉赞白石城以东,规划建设一座红海沿岸长约 1.7 km 的休闲娱乐综合公园,主要包括海滩、海滨道路、运动场地、游乐场、公共卫生设施、餐饮场馆和祈祷场馆等房建工程。

该项目的签署,有利于推动中国港湾在沙特市场的经营战略的落地,进一步巩固中国港湾在沙特市政基础设施建设市场的领先地位。

(摘编自《中国交通建设网》)