

混凝土联锁块软体排受波浪作用的结构稳定性

章云，郝宇驰，王费新，朱平

(中交疏浚技术装备国家工程研究中心有限公司，上海 201208)

摘要：对波浪作用下的混凝土联锁块软体排结构进行了受力分析。通过分析可知：波浪的作用使软体排四周产生水压差，当该压差作用形成的波浪力矩大于软体排的稳定力矩时，软体排结构失稳。并建立软体排受波浪力作用的数学模型，开展了混凝土联锁块软体排结构稳定性研究。基于上述分析，提出一种卸压型压载块结构进行数模研究。数模结果表明，卸压型压载块结构可通过卸压孔减小压载块所受到的波压差来减小波浪力矩，提高压载块的稳定性。

关键词：混凝土联锁块；软体排；波浪；稳定性

中图分类号：U617.4 文献标志码：A 文章编号：2095-7874(2019)11-0027-05

doi:10.7640/zggwjs201911006

Structural stability of soft mattress of concrete interlocking block under wave action

ZHANG Yun, HAO Yu-chi, WANG Fei-xin, ZHU Ping

(CCCC National Engineering Research Center of Dredging Technology and Equipment Co., Ltd., Shanghai 201208, China)

Abstract: The force analysis of the soft mattress of concrete interlocking blocks under wave action is carried out. It can be seen from the analysis that the effect of the water pressure difference around the soft mattress is caused by the wave action. When the torque of the wave formed by the pressure difference is greater than the stable torque of the soft mattress, the structure of the soft mattress is unstable. The mathematical model of the soft mattress subjected to wave force is established, and the structural stability of the concrete interlocking block soft mattress is studied. Based on the above analysis, a kind of unpressurized ballast block structure is proposed for numerical simulation. The numerical simulation results show that the wave moment can be reduced and the stability of the new structure can be improved by reducing the wave pressure difference of the structure through pressure relief hole.

Key words: concrete interlocking block; soft mattress; waves; stability

0 引言

河流治理中护滩结构大致分为3类：第1类是散抛块体护滩；第2类是坝体护滩；第3类是软体排护滩。软体排护滩可将有利的滩槽形态加以稳定。混凝土联锁块软体排是潮汐河段航道治理工程中重要的护底结构，在国内外潮汐河段及河口护底工程中应用广泛^[1-4]。郑英等^[5]通过水槽试验对四面六边透水框架护滩结构效果进行了研究。吴苏舒等^[6]对不同部位护底混凝土联锁排的稳

定特性进行了研究，推导出水流作用下不同部位排体的稳定厚度计算公式，还结合长江口深水航道整治工程验证了公式的合理性。田鹏等^[7]研究分析了软体排不同部位在不同水深、波浪、流速等条件下的压载失稳形式、过程。何阳等^[8]通过物模对波流共同和单独波浪作用下混凝土块软体排的稳定性进行了研究。

JTJ 239—2005《水运工程土工合成材料应用技术规范》^[9]中软体排抗掀动稳定性验算公式为：

$$V \leq V_{cr} = \theta \sqrt{\frac{\gamma_m - \gamma_w}{\gamma_w} g t_m} \quad (1)$$

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; θ 为系数; γ_m 为软体排重度, kg/m^3 ; γ_w 为水体重度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; t_m 为排体等效厚度, m。

该公式考虑了垂线平均流速、块体水下重度和厚度等, 但未考虑波浪作用的影响。在潮汐河段高滩部位的护底软体排, 低潮位时水深值很小, 且江面开阔, 波浪较大, 波浪对软体排稳定的影响较大, 不容忽略。

潮汐河段软体排特别是浅水区软体排的稳定性, 除受径潮流影响外, 受波浪作用的影响也非常明显^[10-11]。故本文围绕潮汐河段护底软体排稳定性等问题, 结合长江下游潮汐河段及长江口航道整治工程实践, 选取不同波高、波周期、水深等工况条件进行模拟, 分析波浪作用下混凝土联锁块软体排稳定性及其失稳的原因。基于模型计算结果, 提出一种新型块体结构, 并分析其对提高稳定性的作用。

1 混凝土联锁块软体排结构及分析

1.1 软体排结构

本文以改进型联锁块、加长型 1 m 混凝土联锁块和加长型 2 m 联锁块 3 种结构类型为研究对象。块体形式如下: 改进型联锁块长度 l 为 48 cm、加长型 1 m 联锁块长度 l 为 1 m 和加长型 2 m 混凝土联锁块长度 l 为 2 m, 宽度 b 为 48 cm, 厚度 d 分为 12 cm 和 20 cm 2 种类型, 顶面倒角为 8 cm, 底面倒角为 4 cm 块体形式。联锁块体结构示意图见图 1。

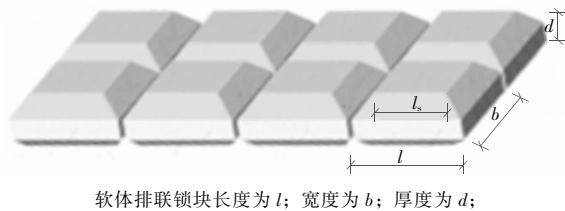


图 1 联锁块体结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of interlocking block

1.2 结构受力分析

根据压载失稳机理分析可知^[7], 波浪作用下软体排结构失稳主要表现为: 水质点发生周期性运动, 在边缘块体的迎浪面和底面产生波浪力, 若波浪力产生的绕边缘块后趾的倾覆力矩大于由块体有效重力产生的稳定力矩, 则块体发生掀动; 当边缘块掀动至卷边失稳, 则会带动后续软体排掀动, 最终导致整块软体排发生失稳破坏。故边

缘排稳定性是软体排整体稳定性的关键, 边缘块体的掀动是引起整体排体不稳定的重要原因。

根据压载块失稳机理分析和受力分析可知^[7], 引起块体失稳的力有波浪正向水平力 P 与波浪竖向浮托力 P_u , 保持稳定的力有块体有效重力 G , 见图 2。波浪正向水平力在块体厚度方向上近似矩形分布; 波浪浮托力 P_u 沿混凝土联锁块底部近似三角形分布。

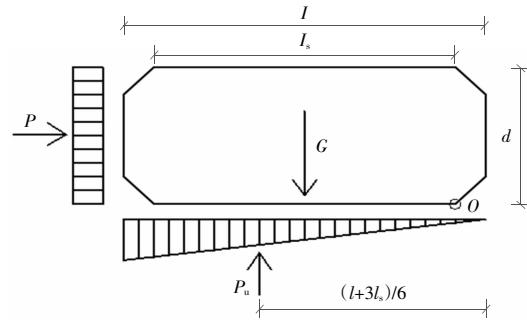


图 2 压载块受力简化图

Fig. 2 Simplified load on ballast block

本文在上述研究的基础上建立软体排受波浪作用数学模型, 分析波浪作用下块体稳定性影响因素与受力特点, 根据分析结果提出一种卸压型块体结构形式, 并评估其改进效果。

2 混凝土联锁块软体排受波浪力作用数学模型

2.1 基本方程

基于流体不可压缩的假定, 其连续性方程及动量方程分别为:

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{\text{DIF}} + R_{\text{SOR}} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \} - \xi \frac{A_y v^2}{x V_F} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho V_F} (u - u_w - \delta u_s) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \} + \xi \frac{A_y u v}{x V_F} = - \frac{1}{\rho} (R \frac{\partial p}{\partial y}) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho V_F} (v - v_w - \delta v_s) \quad (4)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y R \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{\text{SOR}}}{\rho V_F} (w - w_w - \delta w_s) \quad (5)$$

式中: V_F 为开放流动的体积分数; ρ 为流体密度; t 为时间参数; R 为紊流扩散源项; ξ 为坐标系数; δ 为压力参数; R_{DIF} 为湍流扩散项; R_{SOR} 为质量源项; 速度分量(u , v , w)分别对应于(x , y , z)坐标系或

(r, θ, z) 坐标系的对应方向值; (A_x, A_y, A_z) 为3个方向自由面流动的面积分数; (G_x, G_y, G_z) 为体加速度; (f_x, f_y, f_z) 为黏性加速度; (b_x, b_y, b_z) 为孔隙介质中流动产生的损耗。 (u_s, v_s, w_s) 表示流体在源表面相对于源自身的速度; (u_w, v_w, w_w) 是源分量的速度, 对于一般运动物理模型中的质量源, 其速度一般为非零。

2.2 软体排模型

建立混凝土联锁块三维模型, 并进行网格划分。软体排长度20 m, 排体计算区域前后分别预留100 m、50 m长过渡段。

2.3 模型验证

由于块体不仅受到上、下波浪压力, 同时也受到排布的作用。因此试验验证的块体所受波浪力时, 需同时测量上、下、前、后表面以及排布下压强。故在排布下的底床以及块周边布置波压测点, 见图3。

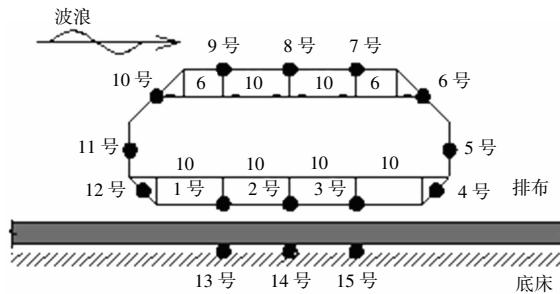


图3 波压力测试点布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of wave pressure test point arrangement

选取部分工况进行受力测试, 与水槽物理模型试验结果对比, 进行数学模型的验证。图4给出厚度 $d_0=0.20\text{ m}$, 水深 $h_0=1.00\text{ m}$ 的改进型压载块在波浪参数为周期 $T_0=4.00\text{ s}$, 波高 $H_0=0.60\text{ m}$ 的波浪作用下的波压对比图(节选部分测点对比结果)。

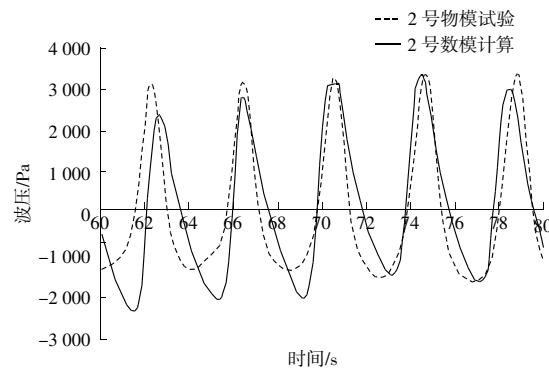


图4 测点波压对比图

Fig. 4 Comparison of wave pressure at measuring points

通过测点波压力对比, 测点波压力过程线与物模实测结果基本一致, 故建立的软体排受波浪力数学模型是可行的。

3 模型计算结果分析

3.1 数值模拟

混凝土联锁块稳定性数模计算结果见表1。图5与图6分别给出改进型 $d_i=0.20\text{ m}$ 、 $h_i=5.00\text{ m}$ 、 $T_i=7.50\text{ s}$ 、 $H_i=3.0\text{ m}$ 波浪作用下的混凝土联锁块波压分布图与波浪力矩图。

表1 波浪作用下混凝土联锁块压载块稳定性计算结果

Table 1 Stability calculation results of concrete interlocking block ballast block under wave action

工况	水深 h/m	波高 H/m	周期 T/s	波浪力矩/(N·m)	稳定力矩/(N·m)	稳定系数 k	备注
1	1	0.30	4.0	17.33	67.90	3.92	改进型 0.12 m 厚
2		0.60	4.0	20.06		3.38	
3	2	0.60	4.0	12.82		5.30	改进型 0.12 m 厚
4		1.20	4.0	18.67		3.64	
5	2.5	0.75	4.0	27.11	107.50	3.97	改进型 0.20 m 厚
6		1.50	5.0	47.42		2.27	
7	5	1.50	5.0	42.09		2.55	改进型 0.20 m 厚
8		3.00	7.5	101.54		1.06	
9	5	3.00	7.5	391.65	536.00	1.37	加长型 1 m 0.20 m 厚
10		3.00	8.5	502.24		1.07	
11	5	3.00	7.5	1 008.26	2 277.67	2.26	加长型 2 m 0.20 m 厚
12		3.00	8.5	1 312.18		1.74	

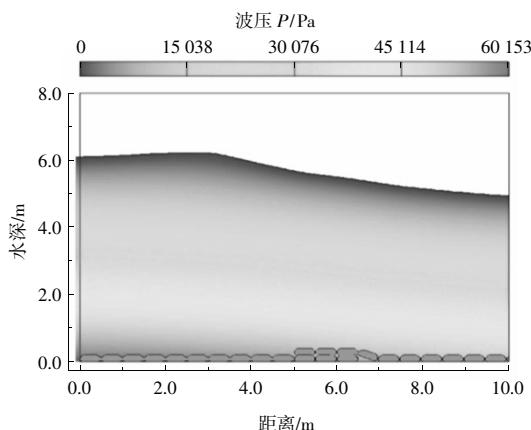


图 5 波压分布图

Fig. 5 Wave pressure distribution

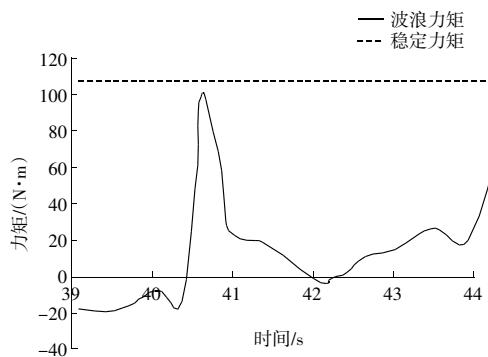


图 6 波浪力矩图

Fig. 6 Wave torque diagram

3.2 计算结果

根据数模中的波压数据进行受力分析计算波浪力矩，并通过稳定性系数与波浪力矩的比值(稳定性系数， k)判断压载块的稳定性，若 k 大于1，对应工况下压载块稳定，且 k 值越大，压载块越稳定。计算结果见表1。

由计算结果可知：

1) 混凝土联锁块软体排所受到的波浪力矩均随波高和波周期的增加而明显增加；同时浅水条件下，水深值越小，波浪力矩越大，块体稳定性

越差。

2) 波浪作用下水质点发生周期性的运动软体排四周产生水压差，当该压差作用在块体上形成的波浪力距大于软体排的稳定力矩时，造成软体排边缘块体结构发生掀动失稳，最终导致整块软体排发生失稳破坏。

3) 根据失稳原因，以及工况9~12结果，可知通过加长压载块长度，增加块体重力力矩，可在一定程度上平滑波浪力矩，提高块体的稳定性。

4) 进一步讨论通过改变块体的结构形式来提高混凝土联锁块稳定性措施。

4 混凝土联锁块软体排块体结构优化

4.1 卸压型压载块

卸压型压载块是在原型压载块(即改进型压载块)基础上设置卸压孔，通过减少压载块受到的竖向波压力来减少波浪力矩，以提高压载块的稳定性，同时节省混凝土用量。卸压孔的位置位于压载块中间或对称位置，块体长度、宽度及倒角均不变。卸压孔的设置形式分别为：1) 中间开单孔，孔径0.18 m；2) 对称开4孔，孔径0.09 m。2种形式的开孔总截面和总体积是相同的。结构形式见图7。

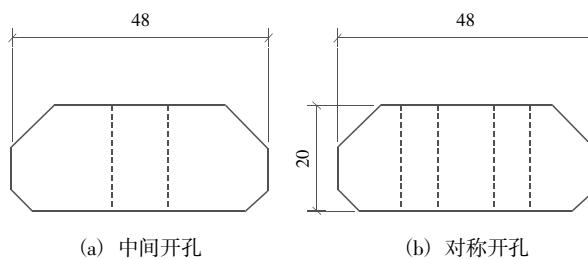


图 7 卸压型压载块结构示意图(cm)

Fig. 7 Structural diagram of unpressurized ballast block(cm)

4.2 计算结果

将卸压型块体结构在波浪作用下的受力情况与原型进行对比，计算结果见表2。

表 2 混凝土联锁块搭接处卸压式压载块稳定性计算结果

Table 2 Stability calculation results of unpressurized ballast blocks at lap joints of concrete interlocking blocks

结构形式	水深 h/m	波高 H/m	周期 T/s	波浪力矩/(N·m)	重力力矩/(N·m)	稳定性系数
原型	2.5	1.5	5	47.42	107.5	2.27
中间开孔	2.5	1.5	5	27.48	90.0	3.28
对称开孔	2.5	1.5	5	23.08	90.0	3.90

由表2计算结果可知: 波浪作用下卸压型块体可通过降低波浪力矩增加稳定性, 且对称开孔的稳定性效果更优于中间开孔; 卸压型块体结构还可以减少工程中混凝土材料的使用量。

5 结语

通过受波浪力作用的混凝土联锁块软体排数学模型的模拟分析, 得到以下结论:

1) 波浪的作用使软体排四周产生水压差, 当该压差作用形成的波浪力矩大于软体排的稳定力矩时, 软体排块体结构发生掀动失稳, 这是软体排在波浪作用下失稳的主要原因。

2) 根据计算结果, 可知一定条件下块体结构稳定性随波高的增加而减小; 随波周期增大而减小; 随水深增加而增加。

3) 提出了卸压型块体结构。卸压型结构, 一方面可通过减少压载块所受到的波压力来减少波浪力矩, 提高压载块的稳定性; 另一方面在很大程度上减少混凝土用量, 节约资源。通过模型验证了卸压型压载块可以增大结构稳定性的作用, 且对称开孔的结构稳定性更优于中间开孔。

4) 除上述因素外, 软体排稳定性还受到土质、水流、波向等因素的影响。同时考虑到改进型压载块软体排在径潮流河段深水航道等工程中已经广泛应用, 而加长型和卸压型压载块尚处于研究阶段, 故后续可结合工程实际特点, 对这2种新型压载块软体排的应用进行更深入地探讨与分析, 例如卸压孔开孔的数量、卸压孔断面形状、面积和开孔位置等。

参考文献:

- [1] MCDUGAL William G, ATKINSON Frank. Concrete armor mats: Large-scale wave tank tests wave stability tests[C]// Fifth symposium on coastal and ocean management.1987.
- [2] LEIDERSDORF C B, MCDUGAL W G. Articulated concrete mat slope protection[C]//Twenty First Costal Eng Conf, 1988.
- [3] 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(S1):20–23.
- ZHANG Jing-ming. Stuctral design of soft mattress in Yangtze estuary deepwater channel regulation project[J]. Port & Waterway Engineeing, 2006(S1): 20–23.
- [4] 王亚莉, 邹国语, 李保红, 等. 混凝土联锁块软体排在潮汐河道防护工程中的应用[J]. 水利建设与管理, 2015, 35(1): 12–14.
WANG Ya-li, ZOU Guo-yu, LI Bao-hong, et al. Application of concrete interlocking block soft mattress in tidal river protection project[J]. Water Resources Development & Management, 2015, 35 (1): 12–14.
- [5] 郑英, 吴伶, 赵德玉, 等. 四面六边透水框架护滩结构效果水槽试验研究[J]. 水运工程, 2012(11):127–132.
ZHENG Ying, WU Ling, ZHAO De-yu, et al. Flume experiment of tetrahedron permeable framework structural effects of beach protection[J]. Port & Waterway Engineering, 2012(11): 127–132.
- [6] 吴苏舒, 张玮, 袁和平. 不同部位护底混凝土联锁排稳定性研究[J]. 水运工程, 2008(11):53–57.
WU Su-shu, ZHANG Wei, YUAN He-ping. Research on the stability for different parts of concrete mattress under flow action[J]. Port & Waterway Engineering, 2008(11): 53–57.
- [7] 田鹏, 马兴华, 周海, 等. 波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(10):31–35, 56.
TIAN Peng, MA Xing-hua, ZHOU Hai, et al. Ballast instability mechanism and calculation method for soft mattress of concrete interlocking blocks under wave and current[J]. China Harbour Engineering, 2014(10): 31–35, 56.
- [8] 何阳, 琚烈红, 李鹏. 波流共同作用下混凝土块软体排稳定性研究[J]. 水运工程, 2014(7):28–31.
HE Yang, JU Lie-hong, LI Peng. On stability of flexible concrete block mattress under co-action of wave and flow[J]. Port & Waterway Engineering, 2014(7): 28–31.
- [9] JTJ 239—2005, 水运工程土工合成材料应用技术规范[S].
JTJ 239—2005, Technical code for application of geosynthetics for port and waterway engineering[S].
- [10] 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, 2017, 17(6):328–329.
WU Xian, LIU Yi-heng. Study on the stability of concrete interlock block soft row ballast block against water flow lifting[J]. China Water Transport, 2017, 17(6): 328–329.
- [11] 王费新, 马兴华. 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.
WANG Fei-xing, MA Xing-hua. Physical and numerical model study on anti-rolling stability of concrete interlocking blocks by current[J]. Port & Waterway Engineering, 2015(7): 8–13.