

船行波作用下联锁混凝土块护坡面层稳定性分析

刘健, 齐泊良, 胡南琦, 岳秀丽, 仲奇
(山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250061)

摘要: 联锁混凝土块护坡不仅能够保持水土、提高通航能力,还具有节能减排和保护生态环境的优势,是近年来常用的内河航道护坡形式。研究其结构稳定性对联锁块的优化设计、护坡的日常维护具有现实指导意义。以京杭运河济宁段内河航道为工程依托,合理确定船行波作用,通过数值模拟计算了不同工况下联锁混凝土块护坡面层的稳定性。计算结果表明:(1)在联锁混凝土块设计参数中,厚度是影响其稳定性的首要因素,厚度越大,稳定性越高;(2)波峰线与岸边水线夹角应作为重要参数对船行波压力进行折减;(3)联锁混凝土块的主要破坏区域在静水面以下,可根据河道通航情况计算其具体位置;(4)开孔率对稳定性影响较小,应在施工便利性和植被覆盖率之间权衡取值。

关键词: 内河航道; 联锁混凝土块; 护坡; 船行波; 稳定性

中图分类号:TV861; TV314

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)06-0179-07

Stability analysis of interlocking concrete block revetment surface layer considering influence of Ship Waves

LIU Jian, QI Boliang, HU Nanqi, YUE Xiuli, ZHONG Qi
(School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: As one of the popular slope protection structure of inland waterway, the interlock concrete block revetment is well known by its advantages of water and earth preserving, energy saving, and environmental protection. Research on the stability of interlocking concrete block during operation period is important for the design, construction and maintenance of revetment. Based on the project of Jining section of the Grand Canal from Beijing to Hangzhou, the stability of interlock concrete block under different operation conditions and impacts of ship waves were simulated and analyzed by numerical modeling. Results indicated that: (1) Thickness of the block was the primary parameter among all the design parameters. As the thickness values increasing, the index of stability would increase accordingly. (2) Angle between the wave curve and the water line at the shore was an important parameter in determining ship waves. (3) The main damaged area of the interlock concrete was below the static water, which could be calculated according to navigation conditions of the canal. (4) The opening ratio of the block would not affect the stability index obviously. Therefore the value of opening ratio could be determined in terms of construction convenience and vegetation coverage.

Key words: inland waterway; interlock concrete; revetment; ship waves; stability

我国江河纵横,根据第一次全国水利普查结果,流域面积 1 000 km² 及以上河流 2 221 条,总长度为 38.65 × 10⁴ km;流域面积 10 000 km² 及以上河流 228 条,总长度为 13.25 × 10⁴ km^[1]。随着社会经济的快速发展和人们环保意识的提高,河道在满足泄

洪、排涝、蓄水、引清、航运的基本功能外,更强调其水生态系统的建立与修复^[2-3]。护坡是河道治理工程的重点。目前,联锁混凝土护坡因其能保证岸坡的稳定,防止水土流失,同时又充分考虑河道的生态功能,正逐渐被广泛采用^[4-6]。

收稿日期:2016-07-08; 修回日期:2016-08-24

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAB07B05);国家自然科学基金项目(41172267)

作者简介:刘健(1975-),男,山东梁山人,博士,教授,主要从事岩土工程和结构工程等方面的教学与研究工作。

通讯作者:齐泊良(1991-),男,河北晋州人,硕士研究生,研究方向为护坡的安全评估与监控。

连锁混凝土护坡自20世纪80年代中期开始在欧美等地应用。该护坡一般由预制混凝土块构成的连锁矩阵层、级配碎石滤水层、土工布反滤层、基土层等组成。我国从20世纪90年代开始引入连锁混凝土护坡,近年来虽然在内河航道中得到了快速发展,但目前其结构设计多依靠经验公式^[7]。

国内内河航道坡式护坡主要破坏因素有波浪冲击破坏和冻融破坏(北方)。波浪主要分为风浪和船行波。由于内河河道宽度有限,风浪往往很小,可不作为护坡稳定性计算的主要荷载。高等级河道中的船只吨位大速度快,以本文中的Ⅲ级河道为例,代表船只类型为1 000 t级的货船或驳船,设计最高航速最小值为15 km/h^[8],激起的船行波将对护坡稳定性产生较大影响。

国外对连锁混凝土护坡的稳定性研究开展较早,国内的相关研究在近年来也呈现增多趋势。潘军宁等^[9]分别采用规则波和不规则波对混凝土护面砌块进行了波浪水槽试验,分析了波浪作用下砌块失稳机理,认为对于单层铺砌的护面块体,只要有一块块体在波浪作用下被吸出、脱落,或累计位移超过单个护面块厚度时即判定为失稳。杨中等^[10]通过对荷兰Pilarczyk公式、Breteler公式及根据砌块护坡稳定性系列试验研究导出的计算公式几种计算方法进行研究比较,结合临淮岗主坝抗风浪模型试验,提出了砌块设计具体技术指标。张玉清等^[11]利用条分法对铰接式混凝土砌块护坡稳定性进行了分析,结果表明不同坡角和砌块重量对护坡稳定性影响较小。然而,目前关于连锁混凝土块护坡稳定性的研究仍然较少,特别是考虑随船速变化的船行波影响的相关研究更是有限。

本文以京杭大运河济宁段内河航道连锁混凝土块护坡为例,考虑内河浅水环境及波峰线与岸边水线夹角值对波浪荷载的影响,选取了合适的船行波参数计算公式,建立了连锁混凝土块护坡的数值模型,模拟并分析了不同船速、不同尺寸厚度,不同开孔率等情况下护坡块体稳定性。研究成果对内河护坡设计和通航控制等具有重要的指导意义。

1 船行波作用机理及计算公式

1.1 船行波作用机理

船舶在航行中,船体周围的水体会受到排挤,使过水断面发生变化,引起流速、压力的变化,从而激起船行波。波浪传播到河岸时,沿岸坡爬升中破碎,岸坡受到较大的动水压力。在高频次船行波的周期

作用下,岸坡易崩裂坍塌。船行波作用下河道岸坡的破坏形式包括:

(1)船舶航行时船舶与岸坡间的水体高速向后流动,对岸坡产生淘刷。

(2)船尾扩散波与横波在岸边重叠形成螺旋型波卷,波卷随船速的增大而增大,并与河道过水断面面积与船体面积的比值成反比,这种波卷也会对岸坡产生淘刷。

(3)船行波在岸坡上爬升、跌落和破碎,对岸坡产生压力和吸力,这是护坡结构破坏的主要影响因素^[12-13]。

上述3项作用同时存在。当岸坡护面结构完好时,可以抵抗前两种淘刷作用。当护面结构受到破坏时,波浪的淘刷作用很快会直接作用到土体本身。因此在本文中认为,只要有一块护坡块体在波浪作用下被吸出、脱落,或累计位移超过单个护面块厚度时即判定为坡面失稳^[14]。

1.2 船行波主要参数计算公式

国内外学者和机构对于船行波参数的确定进行过较深入的研究,特别是一些内河航运发达国家曾开展系统性的船行波与护岸工程原型观测和模型试验,提出了一定条件下的船行波相关参数的经验和半经验计算公式。如包瑞奇、库斯科夫、向金、Gokhsteyn和美国陆军工程团水道试验站、荷兰Delft水工试验所、我国南京水利科学研究所等^[15]都曾提出过船行波相关参数的计算公式。这些研究为内河航道护坡船行波荷载的计算提供了依据。

本文以京杭运河邓楼船闸段为工程依托,航道宽度为60 m,底标高32.07 m,堤顶高程39.5 m。最高通航水位37.35 m,最低通航水位36.42 m,边坡坡度为1:3。此航道为典型内陆运河,相对水深小于2,即浅水环境,代表船型为1 000 t级货船或驳船。因此针对本文要解决的具体问题,选取适用的计算公式和计算参数如下:

(1)波高计算

荷兰Delft水工试验所公式^[15]

$$H_m = \alpha d \left(\frac{l}{d} \right)^{-0.33} \left(\frac{V}{\sqrt{gd}} \right)^{2.67} \quad (1)$$

式中: l 为船舷到计算岸边距离,m; d 为航道水深,m; g 为重力加速度,m/s²; α 为与船型有关的修正系数,本文取值0.42; V 为船舶航行速度,m/s。

(2)波长和波周期计算

荷兰Delft水工研究所^[15]推荐的基于Lord Kelvin理论导出的公式:

$$L_m = 0.672\pi \frac{V^2}{g} \quad (2)$$

$$T_m = \sqrt{\frac{2\pi L_m}{g}} \quad (3)$$

式中: L_m 为船行波波长, m; T_m 为船行波波周期, s。

(3) 波压力计算

以静水位为原点, Z 轴垂直向下, 作用在护坡上的船行波波压力分布见图1, 其公式如下^[16]:

船行波沿坡上爬:

$$\begin{cases} Z_1 = -R, p_1 = 0 \\ Z_2 = 0, p_2 = 1.34\gamma H_{\text{船}} \\ Z_3 = 1.5H_{\text{船}}\sqrt{1 + \cot^2\alpha}, p_3 = 0.5\gamma H_{\text{船}} \end{cases} \quad (4)$$

船行波沿坡回落:

$$\begin{cases} Z_1 = f, p_1 = 0 \\ Z_2 = 0.5H_{\text{船}}, p_2 = \gamma(0.5H_{\text{船}} - f) \\ Z_3 = h, p_3 = p_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: γ 为水的容重, kN/m^3 ; R 为船行波在堤坡上的爬高, m; $H_{\text{船}}$ 为船行波的波高, m; α 为斜坡与水平面的交角; f 为由渗流引起的水位降落, 本文取值为 $f = 0.2H_{\text{船}}$; h 为护坡在静水位下的深度, m。

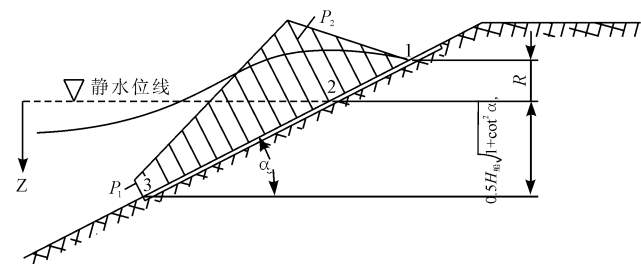
(4) 弗汝德数 F_d ^[15]

$$F_d = \frac{V}{\sqrt{gd}} \quad (6)$$

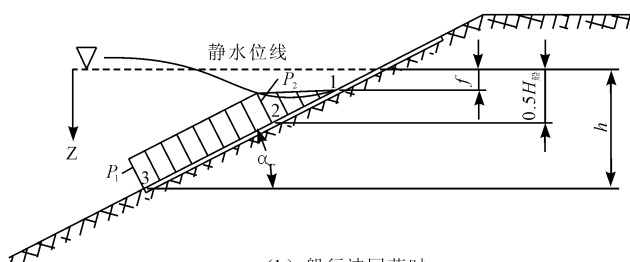
(5) 波峰线与岸边水线的夹角 β ^[8, 17]

$$F_d < 1.0, \beta = 90 - 35.27[1 - e^{12(F_d-1)}] \quad (7)$$

$$F_d > 1.0, \beta = \arcsin(F_d^{-1}) \quad (8)$$



(a) 船行波上爬时



(b) 船行波回落时

图1 船行波上爬和船行波回落时的护坡面压力分布

2 联锁混凝土块体护坡结构稳定性数值分析

ABAQUS 是国际上最先进的大型通用有限元计算分析软件之一, 具有广泛的模拟性能。它拥有众多的单元模型、材料模型、分析过程等, 可以用来分析各个领域的问题, 如固体力学、岩土力学和结构力学等等, 特别是能够驾驭庞大复杂的问题和模拟高度非线性问题。本文采用 ABAQUS 中的 (Dynamic, Explicit) 分析步类型进行计算分析。

2.1 计算模型

工程实际中联锁混凝土块体护坡采用两面联锁

型开孔块, 其尺寸数据如图2所示。坡面底部设置趾墙, 用于防止铺面系统整体下滑, 如图3所示。

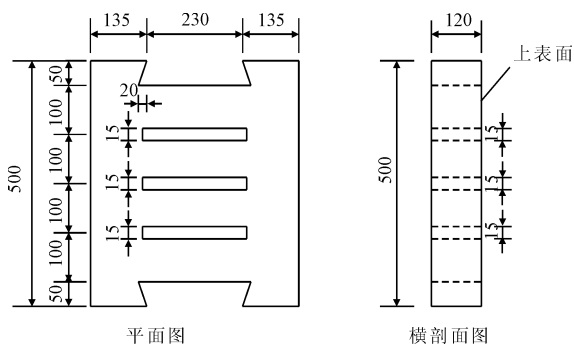


图2 联锁混凝土块设计图(单位:mm)

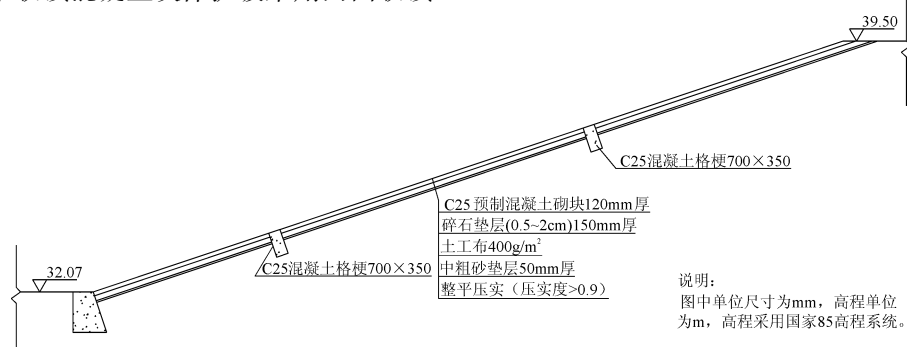


图3 联锁混凝土块护坡结构设计图

说明:
图中单位尺寸为mm, 高程单位为m, 高程采用国家85高程系统。

根据上述结构特点,取航道一边坡体进行模拟。对土体、联锁混凝土块等所有结构均采用实体单元按实际尺寸进行模拟。计算过程中暂不考虑河岸的变形。

2.2 模型荷载

联锁混凝土块在使用过程中受到的荷载包括:重力(扣除浮力)、垫层对块体的支撑力、块体和垫层间的摩擦力和船行波作用力。故结构中所施加的荷载为:土体及混凝土的重力、波浪荷载,摩擦作为接触单独定义。

根据《内河航道工程设计规范 DG/TJ08-2116-2012》,Ⅲ级航道采用最高航速 15 km/h 为设计船速,因此从 4 m/s 的速度开始计算其船行波压力值,得 $P_{正} = 3.504$ kPa, $P_{负} = 0.785$ kPa,按照此规律将波浪简化为周期为 1.486 s 的正弦波加载于水面附近相应位置的护坡块体上。单个块体上的波浪荷载值变化趋势见图 4。为了直观地表示块体位置,用 0 表示位于水平面位置处的块体,1,2 分别表示水面以上的第 1、第 2 块,而带“-”号数字则表示位于水平面以下的块体,如“-1”表示水面以下的第 1 块,以此类推。

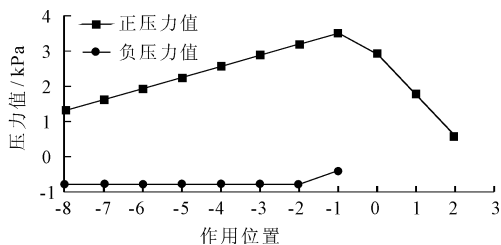


图 4 船行波荷载作用位置及大小

2.3 模型边界条件

约束坡体底部在所有方向上的位移,左右两边

上的连锁块体约束其 z 向位移和 y 向位移。联锁混凝土块护坡结构在实际工作时,主要依靠块体间的连锁作用保证其稳定性不受破坏。为了模拟这种相互作用,在每块护坡块体的相互接触面上均设置摩擦型接触。护坡块体与土体之间也设置为接触。

施加荷载和边界条件后的模型图见图 5。

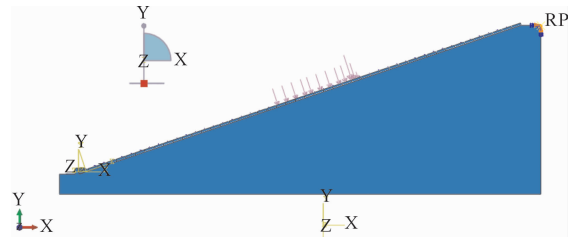


图 5 施加荷载和边界条件后的模型图

2.4 结构稳定性分析

分别考虑波浪荷载、船行波冲击角度、护坡块体的尺寸和厚度、开孔率等因素,对不同工况下联锁混凝土块护坡结构稳定性进行分析。

2.4.1 波浪荷载的影响作用分析 从计算出的设计波浪荷载(0.785 kPa)起,随着船速的增加,波压力值不断增大。不同船速下的最大波压力具体取值见表 1(混凝土接触面之间,混凝土护坡与地基土之间的摩擦系数均取 0.6)。

可以看到,随着船速的加快,船行波对护坡的压力呈现加速增长趋势,其中负压力可以致使连锁块体脱出,是护坡破坏的最主要因素之一,而负压力的最大作用位置随船速的加快而降低。

对不同工况进行模拟,按照最不利因素考虑,先将压力垂直加载在护坡连锁块上,计算结果如图 6 所示。

表 1 波压力工况

影响因素	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
每秒船速/m	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000
每小时船速/km	14.400	18.000	21.600	25.200	28.800	32.400
波高 H_m /m	0.267	0.484	0.788	1.189	1.698	2.326
波长 L_m /m	3.446	5.385	7.755	10.555	13.786	17.448
周期 T_m /s	1.486	1.858	2.230	2.601	2.973	3.344
$P_{正}$ /kPa	3.504	6.359	10.346	15.615	22.303	30.545
$P_{负}$ /kPa	0.785	1.424	2.316	3.496	4.993	6.839
弗汝德数 F_d	0.556	0.695	0.834	0.973	1.112	1.251
与坡岸夹角/(°)	54.901	55.639	59.548	80.277	64.049	53.059
负压起始高度/m	5.227	5.183	5.122	5.042	4.940	4.815

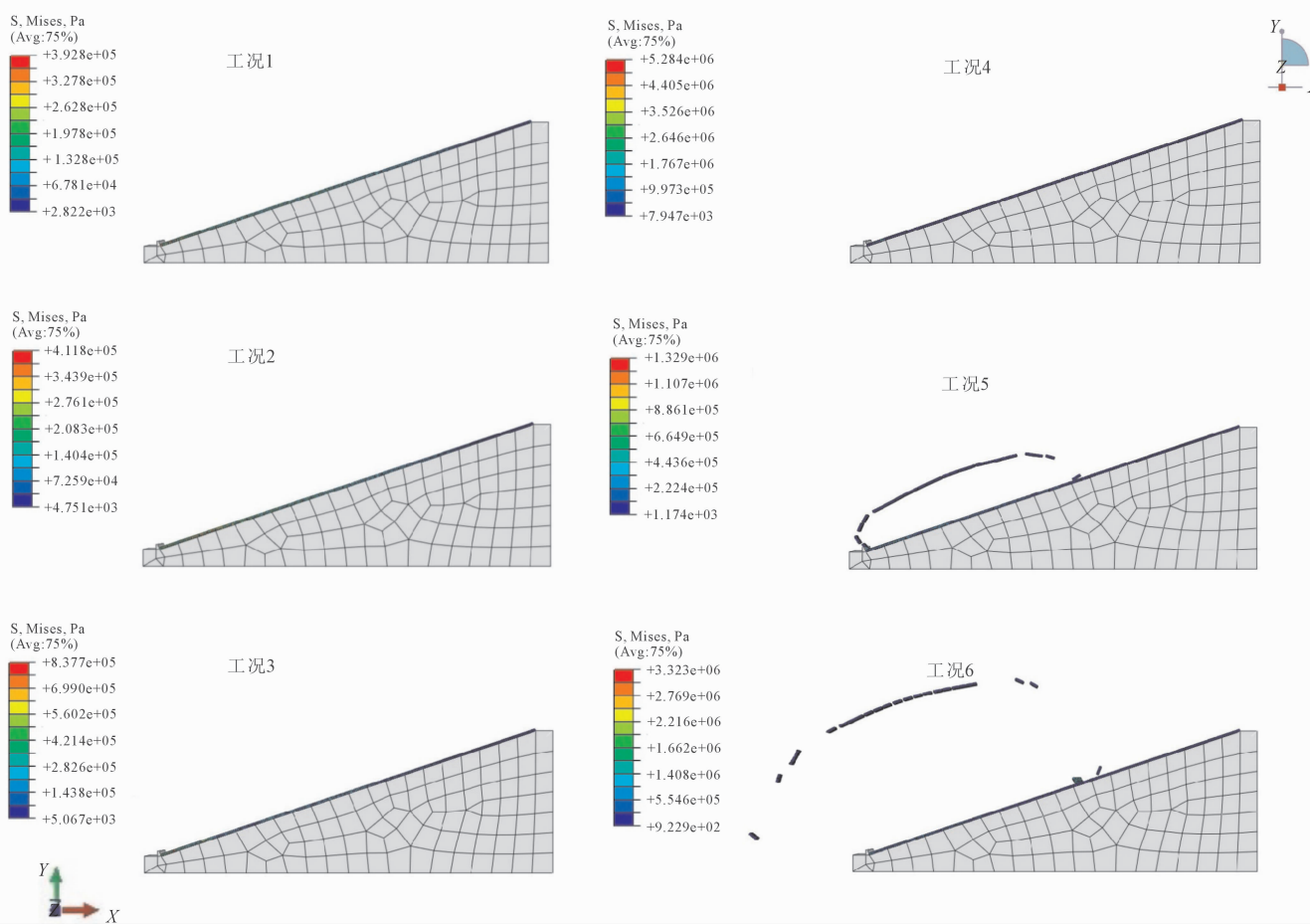


图 6 各工况位移计算结果

根据计算结果,当船速在 28.8 km/h (8 m/s) 时,联锁块体脱出,可以判定护坡已经破坏,此时船速已超过设计的最高船速 (15 km/h) 约一倍,临界负压力 (4.993 KPa) 是设计负压力 (0.785 kPa) 的 6.36 倍。因此,依托工程具有较大的安全储备。

2.4.2 波峰线与岸边水线的夹角对护坡稳定性影响分析 波峰线与岸边水线的夹角 β 随着船速变化而变化,如图 7 所示。以弗汝德数 F_d 为界限,可以利用公式 (7)、(8) 计算出波峰线与岸边水线的夹角 (见表 1)。

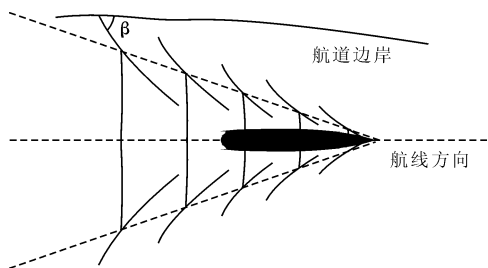


图 7 波峰线与岸边水线的夹角示意图

中波峰线与岸边水线的夹角 53° 。

其结果如图 8 所示。

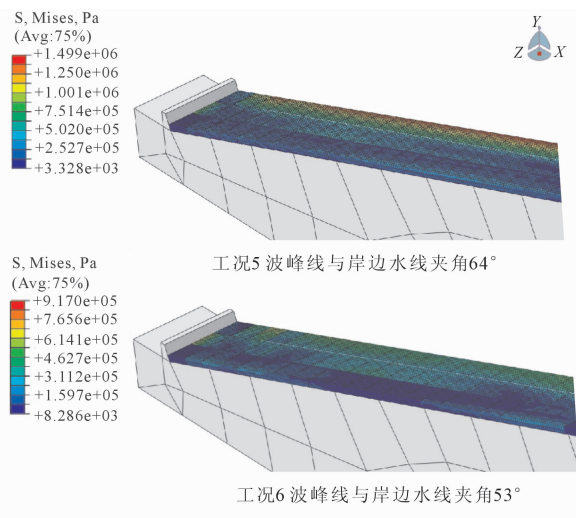


图 8 各工况不同冲击角度模拟

从模拟结果可以看出,波峰线与岸边水线的夹角对联锁混凝土块的位移有很大影响,随着船行波与护岸角度的减小,联锁混凝土块的位移显著减小,块体

工况 5 中波峰线与岸边水线的夹角 64° , 工况 6

的脱开方向也更接近实际情况。通过对不同工况下,块体位移大小的计算分析,可以得到以下结论:

(1)船速在 25.2 km/h 以下时,由于波浪负压力的作用不足以使护坡块体产生向外的位移,坡体整体在波浪的压力作用下保持稳定。

(2)不考虑波峰线与岸边水线的夹角时,在工况五(28.8 km/h)中,波浪负压力相比工况 3(21.6 km/h)时增加了 115.9%,达到 4.993 kPa,护坡块体产生向上的大幅度位移,护坡块与土体脱离接触,块体间也已经脱离,显然此时护坡已经破坏,压力超载 6.36 倍。

(3)考虑波峰线与岸边水线的夹角时,工况 5 和工况 6 都未产生位移,结合实际情况,应将波峰线与岸边水线夹角作为重要参数对船行波压力进行折减,这对护坡的优化设计具有重要意义。

(4)该设计联锁混凝土块体护坡结构能够在超

过该荷载值 6 倍以上的情況下保持正常工作,完全能够满足正常使用的需求,具有良好的稳定性和安全储备。

2.4.3 联锁混凝土块体尺寸、厚度影响分析 在施工过程中,由于需要人工铺设,过大的混凝土块体对施工造成不便,因此应在保证其稳定的情况之下适当减小块体的体积。

为分析块体尺寸对其稳定性的影响,在原有设计块体尺寸(500 mm × 500 mm × 120 mm)的基础上,分别取将其平面尺寸减半(即 250 mm × 250 mm × 120 mm)、厚度减半(500 mm × 500 mm × 60 mm)、以及厚度和平面尺寸均减半(250 mm × 250 mm × 60 mm)3 种块体进行稳定性分析计算。

模拟以上 4 种尺寸块体在同一荷载工况(工况 4)下的位移情况,如图 9。

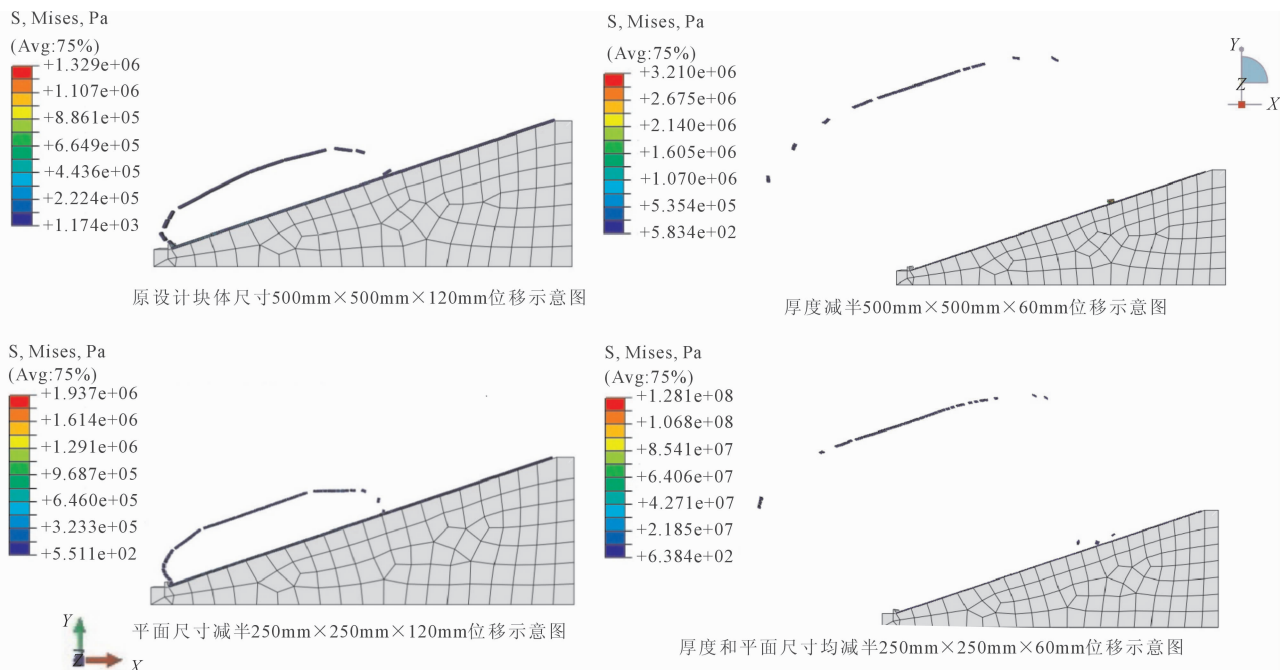


图9 块体尺寸对稳定性的影响

由上面的结果可以知道:

两种厚度为 60 mm 的联锁块体与原设计尺寸的块体相比,承载能力明显降低。说明当块体的表面积一定时,减小块体厚度可能导致护坡的不稳定。而块体表面积对承载力的影响则较小。因此在护坡块体厚度能够满足稳定性要求时,适当减小块体的表面积以达到施工便利是可行的。

2.4.4 块体开孔率的影响分析 联锁混凝土块体

开孔主要是出于减小波生浮托力的考虑,相同波要素条件下开孔可以减小块体厚度。设计联锁混凝土块体设计开孔为 15 mm × 250 mm 的 3 个细长孔。其开孔率为 4.5%。为分析开孔率对护坡稳定性的影响,分别取块体开孔率 2.4% (即孔宽 8 mm)、4.5% (孔宽 15 mm)、9% (孔宽 30 mm)、13.5% (45 mm) 4 种模型进行分析。不同开孔率块体位移如图 10 所示。

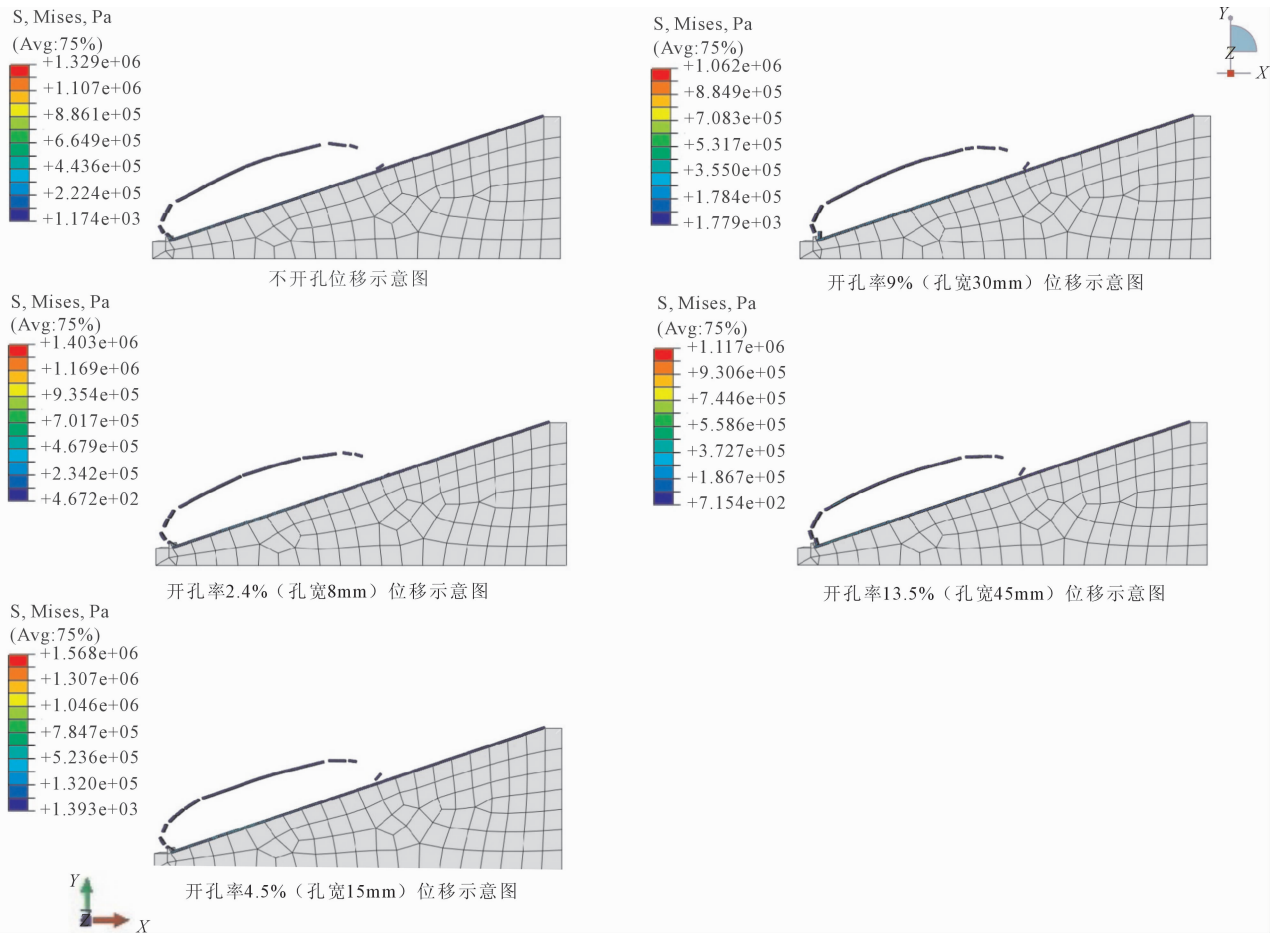


图10 开孔率对稳定性的影响

由计算结果可知,块体开孔率对块体稳定性影响很小,但是开孔能够降低护坡面的水流流速,减小浮托力和提高排水能力,还有增加坡面植被面积,美化环境的作用。同时需要注意的是,在采用开孔砌块时,垫层碎石的粒径应大于砌块孔径,以避免垫层碎石被波浪掏刷,从而导致护面块体失稳。所以在实际应用过程中,块体的开孔率应当综合考虑合理选择。

3 结论

本文对内河航道中以波浪力为主要荷载的联锁混凝土块护坡稳定性进行了分析,根据不同工况的模拟计算,可得到以下结论:

(1)作用在联锁混凝土块上的波浪力大小与船速正相关,且随船速的增加荷载快速增大。

(2)由于船行波的波峰线与岸边水线有一定夹角,使作用在联锁块法向上的荷载方向发生变化。通过数值模拟可以看到,此夹角的存在对护坡的稳定性是有利的。

(3)随着船速的增加,最大负压力作用位置呈逐渐降低趋势。以依托工程数值模拟结果来看,当

前设计条件下,坡面自静水面向下延伸1.9~2.7 m范围内为联锁块破坏集中区,因此,设计、施工时可添加构造措施以减少破坏。

(4)厚度是影响联锁混凝土块体稳定性的首要因素,块体的表面尺寸和开孔率对稳定性影响较小。可以根据施工便利性和成本等方面确定块体尺寸和开孔率,较小的块体易于铺装施工和检修,高开孔率一方面起到渗水、排水的作用,另一方面起到增加植被面积、美化环境的作用,可形成综合绿色生态护岸。

(5)船行波是护岸结构设计的重要参数。由于船行波与船型、航速、护岸结构有关,现有船行波公式尚难以准确计算,尤其是设计航速较大时。另外植物在船行波作用下的安全性是生态护岸设计需要解决的核心问题,尚无经验可循。因此,在现有设计资料下,留有相对充裕的安全储备是合理的。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查公报 [M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.

5 结论

(1) 新型调垂系统的应用,加快了施工速度,节约了施工成本,提高了工程质量,与传统调垂体系相比,在材料的重复利用度方面提高了50%,在整体质量精度控制方面也提升了50%左右。因此,本文所介绍的新型调垂系统具有高效率、高精度、易于操作等优点,能够很好的适用于上下同步逆作竖向支承系统的调垂工作,同时,也可以为以后施工调垂系统的创新提供一定的参考。

(2) 虽然本文所提到的调垂系统能够在保证操作简易的情况下同时保证较高的精确度,但是在施工环境及后期浇捣混凝土时对立柱的冲击的影响下,还是有极少部分立柱未能达到要求,因此,在复杂施工情况下,怎样控制调垂系统的精确度是需要继续研究的问题。

参考文献:

- [1] 上海市城乡建设和交通委员会. DG/TJ08-2113-2012. 逆作法施工技术规程[S]. 上海市工程建设规范,2012.
- [2] 龙莉波. 逆作法竖向支承柱调垂技术的回顾及展望[J]. 建筑施工,2013,35(1):7-10.

- [3] 吴献,唐彪. 逆作法中几种支撑柱的调垂方法[J]. 建筑技术,2004,35(2):137-138.
- [4] 谢小松,徐伟. “半顺作半逆作法”施工中若干关键技术探讨[J]. 施工技术,2006,35(11):21-23.
- [5] 吴洁妹. 大直径、高精度的一柱一桩型钢后插法施工关键技术[J]. 建筑施工,2013,35(12):1045-1047.
- [6] 廖秋林,江绍忠,许宁,等. 超深逆作钢管柱垂直度控制施工技术[J]. 工程质量,2010,28(1):22-25+29.
- [7] 贺小村,李钟,薛刚,等. 斯托克曼商业中心逆作施工格构柱安装定位技术[J]. 施工技术,2010,39(1):25-27.
- [8] 盛春陵,李仁民,王首超,等. 逆作法中立柱调垂方法探讨[J]. 岩土工程学报,2012,34(z1):595-597.
- [9] 韩庆祝. 对改进一柱一桩垂直度的探讨[J]. 资源环境与工程,2006,20(3):257-259.
- [10] 沈咏. 逆作法施工中桩上支承柱的调垂技术研究[J]. 建筑施工,2005,27(5):66-67+72.
- [11] 胡玉银,顾国明,陆云,等. 基于激光定位的逆作法预埋立柱间接法调垂工艺及设备[J]. 建筑施工,2014,36(6):678-679.
- [12] 王志坚. 逆作法一柱一桩实时监测自动调垂技术的应用. [J]. 山西建筑,2013,39(13):83-85.
- [13] 陶云海,潘曦. 逆作法一柱一桩中的矩形钢管柱高精度调垂技术研究[J]. 建筑施工,2016,38(3):370-372.

(上接第185页)

- [2] 蔡婧,李小平,陈小华. 河道生态护坡对地表径流的污染控制[J]. 环境科学学报,2008,28(7):1326-1334.
- [3] 姜志强,孙树林. 堤防工程生态固坡浅析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(12):2133-2136.
- [4] 程龙飞,程卫国,姜志强. 新型连锁块护坡防冲系统[J]. 水利水电技术,2005,36(11):65-66.
- [5] 王璐,宓永宁,郑红,等. 铰接式护坡系统较之传统护坡的优势[J]. 人民长江,2008,39(11):75-76.
- [6] 程龙飞,孙树林,裴洪军. 香根草-铰链式混凝土块护岸系统机理分析[J]. 岩土工程学报,2005,27(5):562-566.
- [7] 孙增春,何光春. 高强混凝土连锁块在港区堆场中的应用[J]. 水运工程,2016(7):154-157.
- [8] 上海市城乡建设和交通委员会. DGTJ08-2116-2012 内河航道工程设计规范[S]. 上海:上海市建筑建材业市场管理总站,2013. 1.
- [9] 潘军宁,王登婷,吴美安,等. 波浪作用下混凝土砌块护坡稳定性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(4):476-481.
- [10] 杨中,王桂生. 临淮岗主坝开孔垂直连锁混凝土砌块护坡试验研究[J]. 南水北调与水利科技,2012(5):

153-156.

- [11] 张玉清,于广权,孙荣华,等. 基于条分法的铰接式混凝土砌块护坡稳定性分析[J]. 沈阳农业大学学报,2011,42(3):368-371.
- [12] Pan Y, Li L, Amini F, et al. Influence of Three Levee - Strengthening Systems on Overtopping Hydraulic Parameters and Hydraulic Equivalency Analysis between Steady and Intermittent Overtopping [J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2013,139(4):256-266.
- [13] Günaydin K, Kabdaşlı M S. Static stability of submerged partial revetment structures under regular and irregular waves[J]. Ocean Engineering, 2003,30(6):761-777.
- [14] Won J, You K, Jeong S, et al. Coupled effects in stability analysis of pile - slope systems [J]. Computers & Geotechnics, 2005,32(4):304-315.
- [15] 王水田. 关于船行波问题的研究(二)[J]. 水道港口,1981(1):9-16.
- [16] 余广明. 堤坝防浪护坡设计[M]. 北京:水利电力出版社,1987.
- [17] Torsvik T. Modelling of Ship Waves from High - speed Vessels[M]. Applied Wave Mathematics, 2009.