

船舶尾流作用对抛石基床冲刷稳定性的影响研究

张宝华¹, 王元战², 孙建军²

(1.交通部天津水运工程科学研究所 水工构造物检测、诊断与加固技术交通行业重点实验室, 天津 300456 2.天津大学 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 文章提出了抛石基床块石理想排布状态的二维模型, 并通过有限元软件对抛石基床的冲刷问题进行了数值模拟。采用 ADINA 软件建立二维数值模型, 针对船舶尾流的分布特点, 计算分析抛石基床在船舶尾流作用下的起动流速, 得出抛石基床在尾流作用下的冲刷机理, 并拟合得到抛石基床块石的起动流速经验公式。

关键词: 抛石基床, 船舶尾流, 起动流速, 冲刷机理

中图分类号: U 661.1; TV 223

文献标识码: A

文章编号: 1005-8443(2010)05-0416-05

抛石基床是重力式码头或直立式防波堤的基础。近年来, 作业船舶的大型化、高速化和操作性能的提高给港口工程建设和运营管理提出了新的课题, 如大型拖轮和滚装船螺旋桨产生的水流对水工建筑物抛石基床的冲刷问题。目前, 重力式码头的抛石基床出现了被大水流掏空的重大安全隐患。

20 世纪 70 年代以来, 伴随着引擎功率大幅提升, 我国到港船舶也日趋大型化。特别是近年来, 各港口都在增大船载吨位, 大多需要大型拖轮协助调头或靠泊码头作业。因而, 各港口的港作拖轮马力越来越大, 螺旋桨的推力及尾流流速也越来越大。大型船舶尾流流速超过了 10~100 kg 块石的起动流速, 导致螺旋桨射流冲刷基床而损坏码头。然而, 设计规范未涉及港作大拖轮或尾直式滚装船对抛石基床冲刷破坏的工况, 也没有相应防范措施。规范的不足客观上造成了设计的缺陷, 因此有必要对此展开研究。

1 有限元模型及其可行性研究

1.1 二维有限元模型的建立

块石的冲刷稳定性问题实质上是块石的稳定重量问题。目前, 国内外相关的研究工作有很多^[1-5], 其中比较著名的有伊兹巴什公式^[6]、沙莫夫公式^[7]、交通部防波堤施工规范^[8]等。但是绝大多数研究工作都基于理论推导和物理模型试验展开, 很少有人通过建立有限元数值模型进行研究。本文首次通过建立有限元模型, 对船舶尾流作用下抛石基床块石稳定性问题展开研究。

根据等容原则, 将形状不规则的块石简化成同体积的圆球后, 再根据等容原则将体积为 V 、直径为 D 的圆球, 简化成为体积为 V 、长度为 D 的圆柱体。这样使圆柱体的高度方向与断面的法线方向一致排布, 就将一排圆球简化成一排圆柱体, 简化过程见图 1。在理想状态下, 由于每个小圆柱体重量相等, 只有受到相同水流力作用时, 才可能发生位移, 也就是说当水流达到一定条件后, 这一排圆柱体石块将同时起动。可以将这一排圆柱体石块看作是一根中间连续的石柱。这样就将三维的石球简化成了石柱, 取其断面进行二维模型分析, 有限元模型见图 2。

1.2 有限元模型的可行性研究

为了验证本文所提出二维模型的可行性, 首先建立了水平面上 3 种排布状态(图 3)的单层块石, 分别进

基金项目: 西部交通建设科技项目(2009328000084), 中央级公益性科研院所基本科研项目(TKS090202)

作者简介: 张宝华(1978-), 男, 天津市人, 助理研究员, 主要从事港工结构研究工作。

Biography: ZHANG Bao-hua(1978-), male, assistant professor.

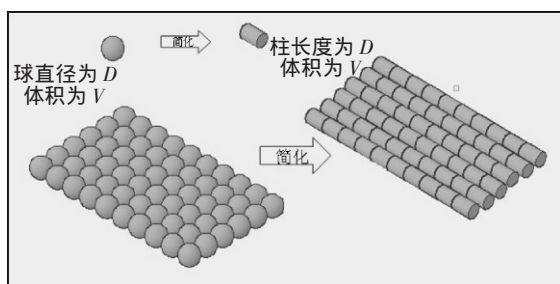


图 1 模型的简化过程图

Fig.1 Simplified model

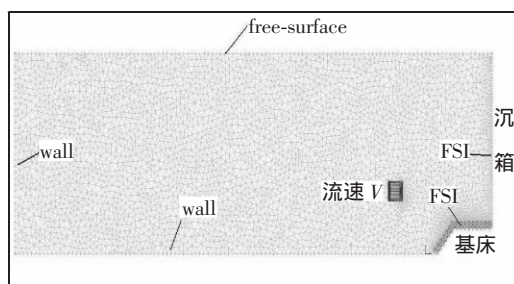


图 2 抛石基床遭尾流冲刷数值模型图

Fig.2 Numerical model of rubble bed scoured by ship stern flow

行计算分析。将所得起动流速计算结果与伊兹巴什公式、交通部规范拟合公式做比较, 对比结果见图 4。

由图 4 可以看出, 本文有限元计算结果与伊兹巴什公式等理论计算结果相比, 在起动流速随稳定重量的变化趋势上是一致的, 且计算结果与以往理论计算结果较为吻合。说明本文所提出的二维数值模型是可行的, 也验证了通过有限元建立的数值模型在研究块石起动流速问题上的可行性。

2 船舶尾流数值模拟

目前, 国内外在船舶尾流领域的研究已经取得了丰硕的成果。本文针对重力式码头明基床形式, 分别计算螺旋桨位于岸壁前 3 m、5 m、7.5 m 和 10 m 时, 距离海底 1.5 m、2 m、2.5 m 共 12 种情况, 运用 FLOW-3D 模拟计算螺旋桨尾流场分布状况, 其数值模型及部分计算结果见图 5~图 6。

计算结果表明: 当螺旋桨距离岸壁结构 3 m, 螺旋桨距离海底 1.5 m 时, 射流主要沿

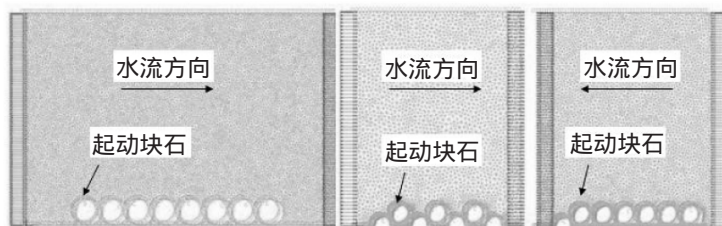


图 3 3 种排布状态模型图

Fig.3 Three assignments of configuration

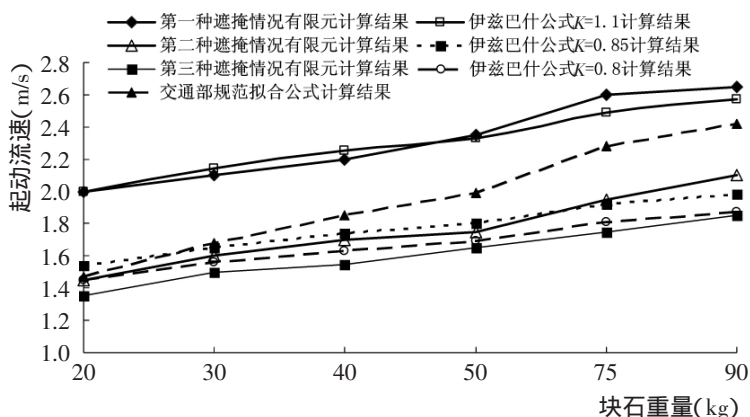


图 4 有限元计算结果与以往理论成果比较图

Fig.4 Comparison between finite element results and previous theoretical results

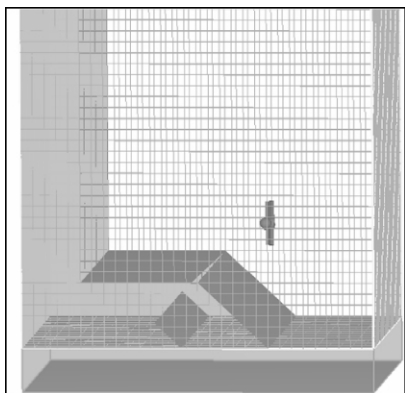


图 5 螺旋桨射流数值模型图

Fig.5 Numerical model of propeller jet

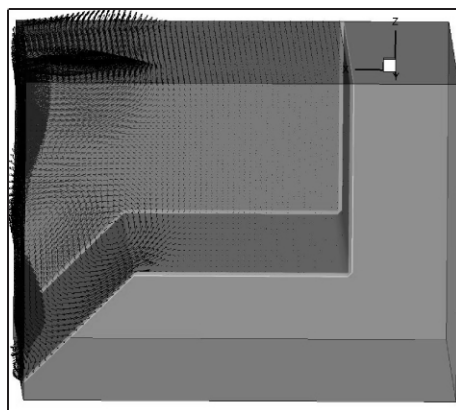


图 6 桨位于岸壁前 5 m、离地 1.5 m 结果图

Fig.6 Numerical model of propeller (5 m offshore, 1.5 m above the ground)

着抛石基床表面传播,遇到岸壁结构后,沿岸壁结构物向上传播,回流对抛石基床的冲刷作用不明显;而当螺旋桨距离岸壁结构 3 m,螺旋桨距离海底 2.0 m 和 2.5 m 时,螺旋桨射流遇到岸壁结构物后反射,部分发射回流沿斜向下方向传播,这部分回流对基床的冲刷作用显著。当螺旋桨距离岸壁 5 m 时,螺旋桨射流遇到岸壁的反射回流依然存在,只是这部分回流主要分布在离岸壁较近的区域,此时抛石基床堤头主要受到螺旋桨射流的直接冲刷作用。当螺旋桨距离岸壁结构 7.5 m 时,射流场分布与 5 m 距离时相比,直接冲刷作用和回流作用都明显减弱。当螺旋桨距离岸壁结构 10 m,螺旋桨尾流传播到基床位置时,已经逐渐趋于平稳,基本为水平流向,涡旋作用减弱,此时螺旋桨离海底的距离对基床处流场分布的影响已经很弱。

对沿岸壁方向流速分布进行分析,结果表明:当螺旋桨距离岸壁结构较近时,螺旋桨中轴线附近的流速较大;当螺旋桨离开岸壁一段距离后,流速较大的区域开始向中轴线两侧偏移,此时中轴线处的流速相对小一些;当螺旋桨离岸壁较远时,尾流流场已经逐渐趋于稳定,此时在抛石基床堤头处的水流分布变化不大。这样,当给出螺旋桨出流的初速度时,通过流速比可以粗略推算出螺旋桨距离岸壁一定距离时,螺旋桨尾流在抛石基床堤头处的流速分布状态,可用于针对性的有限元建模计算,或作为实际工程安全稳定性评估的参考。

研究发现,当螺旋桨距离岸壁结构物约 5 m 时(当射流初始速度较大时,该区域也会相应增大),且距离海底在 1.5 m 以上(抛石基床厚度 1.0~1.2 m),此时螺旋桨射流遇到岸壁结构物的反射回流对抛石基床的冲刷作用显著,这是抛石基床被大水流掏空的主要原因。当螺旋桨距离岸壁结构较远时,螺旋桨射流对抛石基床的冲刷作用减弱,此时水流主要沿着抛石基床斜坡面向岸传播,遇到岸壁结构后产生向上或斜向上的反射作用。可见,在船舶靠泊和起航的时候,螺旋桨射流对基床的冲刷是造成抛石基床冲刷破坏的重要因素,应针对这种工况重点对抛石基床进行设计防范。

3 抛石基床遭冲刷稳定性研究

船舶尾流流场分布极其复杂,本文结合二维模型的断面结构形式,将复杂的流场分布简化为二维模型中的流速荷载。结合三维流场中流速在基床面上的分布规律,忽略径向流速(即 y 向流速)的影响,针对不同螺旋桨位置时刻的流场分布,选取 20 kg、30 kg、40 kg、50 kg 和 75 kg 5 种不同质量的块石建立数值模型,将流场简化为以下 3 种流速荷载作用情况进行研究分析:(1) 水平来流作用下块石的起动(图 7)。这种情况模拟的是螺旋桨距岸壁结

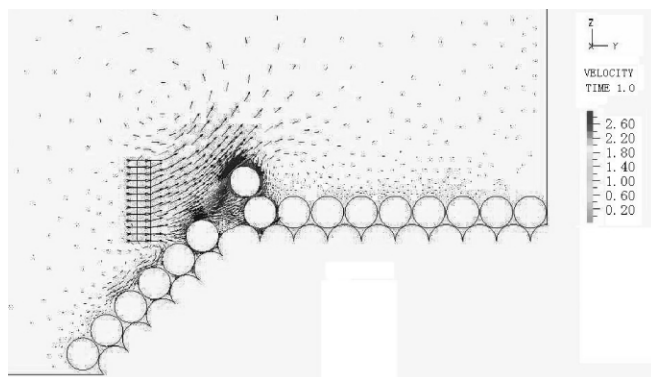


图 7 30 kg 块石在 2.3 m/s 流速条件下起动结果图

Fig.7 Incipient motion for 30 kg stone blocks under 2.3 m/s flow condition

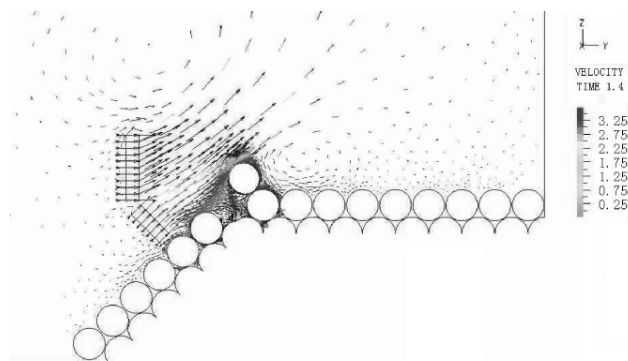


图 8 30 kg 块石在 2.5 m/s 水平流和 2 m/s 斜向流共同作用下起动结果图

Fig.8 Incipient motion for 30 kg stone blocks under 2.5 m/s horizontal flow and 2 m/s oblique flow condition

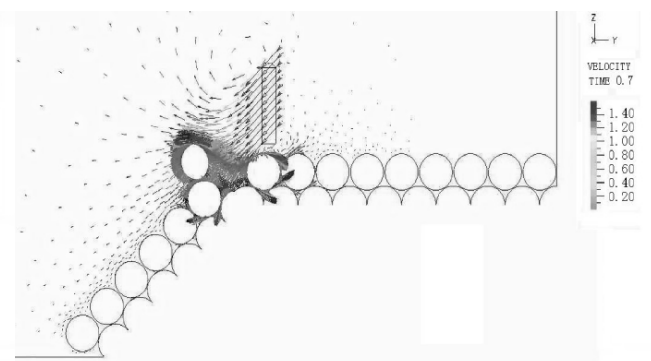


图 9 30 kg 块石在 1.3 m/s 回流作用下起动结果图

Fig.9 Incipient motion for 30 kg stone blocks under 1.3 m/s backflow condition

构一段距离且在特定深度时,块石受到螺旋桨尾流直接作用,发生冲刷位移的情况(2)水平流和沿堤头坡面向上水流共同作用下堤头块石的起动(图 8)。这种情况模拟的是螺旋桨距岸壁结构一段距离后,螺旋桨射流遇到岸壁结构的回流作用已经很弱,不是块石起动的主导作用时,块石受到螺旋桨尾流直接作用,发生冲刷位移的情况(3)斜向下回流作用下堤头块石的起动(图 9)。这种情况模拟的是当螺旋桨距岸壁结构距离很近,螺旋桨射流遇到岸壁结构的反射回流流速很大,这部分回流在距离岸壁较近的区域,是斜向下作用在抛石基床表层块石上的,这时候堤头部分的块石受到斜向下方向水流作用。

将上述抛石基床二维模型的块石在水平来流和回流作用下起动的有限元计算结果,与水平面上单层块石排布的计算结果作比较,对照结果见图 10 和图 11。

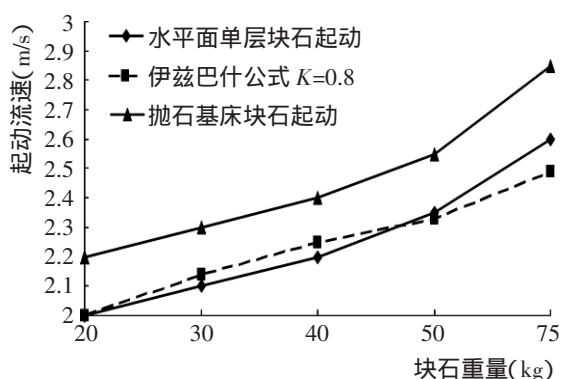


图 10 水平来流作用下水平面单层块石与抛石基床堤头块石起动流速对照图

Fig.10 Comparison diagram of stone incipient velocity between horizontal layer and rubble bed under horizontal flow condition

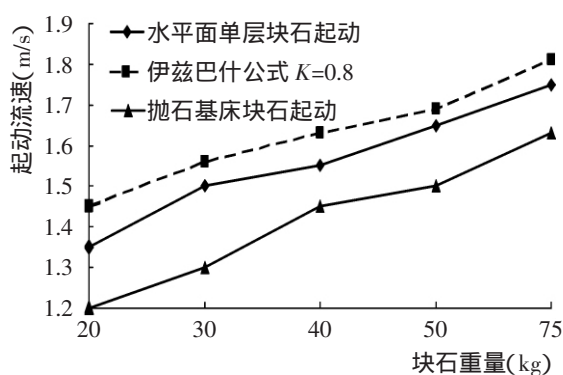


图 11 回流作用下水平面单层块石与抛石基床堤头块石起动流速对照图

Fig.11 Comparison diagram of stone incipient velocity between horizontal layer and rubble bed under backflow condition

通过计算分析抛石基床结构型式下不同水流作用时块石的起动流速发现:螺旋桨射流作用下,沿射流方向只有水平流速作用时,块石的起动流速比水平面上单层块石的起动流速大;沿射流方向,在水平流和沿基床坡面向上的斜向流两股水流共同作用时,基床堤头块石反而更不易起动,块石的稳定性相对提高。

通过计算斜向下的回流作用下基床堤头块石的起动发现:回流作用下,块石的起动流速比同种情况水平流作用下小 10% 以上。也就是说,在螺旋桨射流遇岸壁结构的反射回流作用下,块石更容易发生失稳起动,这种情况下的冲刷作用相当明显,从而解释了目前许多重力式码头出现的抛石基床遭船舶尾流冲刷,块石被水流掏空的现象。针对回流作用下块石易发生失稳的情况,建议以后的研究工作可以针对回流的流场分布特点,以及回流对块石冲刷的作用机理,重点展开研究,提出新的加固方案,提高抛石基床的冲刷稳定性,为设计设防工作提供有力参考。

4 小结

采用有限元软件 Flow-3D 建立数值模型,模拟码头岸壁附近船舶螺旋桨尾流流场分布情况。结果表明,当螺旋桨距离岸壁结构物 5 m 左右(当射流初始速度较大时,该区域也会相应增大),且距离海底在 1.5 m 以上(抛石基床厚度 1.0~1.2 m)时,螺旋桨射流遇到岸壁结构物的反射回流对抛石基床的冲刷作用显著,这是造成抛石基床被大水流掏空的主要因素。

运用 ADINA 软件,针对几种较容易引起块石起动的流速条件进行计算分析,发现螺旋桨射流作用下,沿着螺旋桨射流方向,当水平流速起主导作用时,块石的起动流速略大于水平面上单层块石的起动流速;当块石在受到水平向和沿堤头斜坡面向上的两股水流共同作用时,块石的起动流速相对较大,其稳定性相对较高。通过分析其流速分布发现,沿堤头斜坡面向上的水流使水平流的流向发生了改变,对堤头块石的冲击作用减弱,堤头块石在这两股水流共同作用下,处于一种更稳定的状态。通过计算块石在斜向下方向的回流

作用下的起动情况发现,同种情况下块石在回流作用下比水平面上更易起动,起动流速低 10%以上。这一结论解释了目前许多重力式码头抛石基床,遭到船舶尾流冲刷破坏,出现抛石基床块石被大水流掏空的工况。

参考文献:

- [1] Headquarters US Army Corps of Engineers.Engineer Manual :Hydraulic Design of Flood Control Channels[M].Washington D C : Headquarters US Army Corps of Engineers ,1994.
- [2] Bakker K J ,Verheij H J ,Groot M B.Design Relationship for Filters in Bed Protection[J].Journal of Hydraulic Engineering ,1994 ,120 (9) :1 082-1 088.
- [3] 吴苏舒,张玮.海岸防护中护底块石稳定重量的确定[J].中国港湾建设 2007(6) :13-17.
WU S S ,ZHANG W.Determination of Stable Weight of Bottom Blocks in Coastal Protection Works[J].China Harbour Engineering , 2007(6) :13-17.
- [4] 张玮,沈正潮,钟春欣.涌潮作用下护滩块石的起动研究[J].泥沙研究 2007(1) 24-29.
ZHANG W ,SHEN Z C ,ZHONG C X.Incipient Motion of Rock Blocks for Beach Protection Under the Action of the Tidal Bores [J].Journal of Sediment Research 2007(1) 24-29.
- [5] 陈小莉,马吉明.受涡旋作用的水下块石的起动流速[J].清华大学学报 2005 45(3) 315-318.
CHEN X L ,MA J M.Critical Velocity for Initiation Motion of Rocks Under Water Due to Vortex Motion[J].Journal of Tsinghua University 2005 45(3) 315-318.
- [6] 陈吉余.中国围海工程[M].北京:中国水利水电出版社 2000.
- [7] 王昌杰.河流动力学[M].北京:人民交通出版社 2001.
- [8] JTJ298-98 防波堤设计与施工规范[S].

Study on scouring stability of rubble bed with effect of ship stern flow

ZHANG Bao-hua¹, WANG Yuan-zhan², SUN Jian-jun²

(1.Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering Key Laboratory of Harbor & Marine Structure
Safety Ministry of Communications ,Tianjin 300456 ,China ;

2.School of Civil Engineering ,Tianjin University ,Tianjin 300072 ,China)

Abstract :A two-dimensional simplified model under an ideal aligning condition of the rubble bed was presented in this paper and the scouring problem of rubble bed was numerically simulated by finite element software.According to the distribution characteristics of ship stern flow a two-dimensional numerical model using ADINA was established to calculate and analyze the incipient velocity of rubble with the effect of the ship stern flow.The scouring mechanism of rubble bed under the influence of the ship stern flow was concluded and the empirical formula of incipient velocity of the rubble bed was obtained by fitting method.

Key words rubble bed ;ship stern flow ;incipient velocity ;scouring mechanism