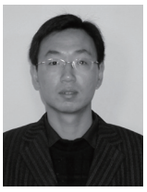

船舶尾流作用下码头抛石基床稳定性物理模型试验研究*

张宝华[1]，祝振宇[2]
（1.天津大学建筑工程学院，天津 300072；2.中交水运规划设计院有限公司，北京 100007）

摘要：采用物理模型试验方法对船舶尾流作用下码头抛石基床稳定性开展研究。选用长14 m，宽8 m，高度1.2 m的开敞式矩形水池作为试验水池，精选颗粒均匀的块石作为试验用基床块石。利用潜水泵模拟拖轮螺旋桨射流，通过调整不同功率潜水泵的出流位置控制研究区域的流速。采用先进的多普勒点式流速仪测量基床抛石前缘和后缘的流速，得到能够对块石基床稳定性造成破坏的流速指标，并经实际工程验证了本模型研究成果的可靠性。

关键词：物理模型；抛石基床；水流冲刷；稳定性
中图分类号：U 656.1+1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2013)01-0144-05

Physical model research on rubble bed stability by ship stern flow

ZHANG Bao-hua[1], ZHU Zhen-yu[2]
(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2.CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The research on rubble bed stability by ship stern flow is carried out using the physical model. The open-type rectangular pool of 14m long, 8m wide, and 1.2m high is chosen as a test pool, and uniform-sized stones are selected as the test bed rock. We use the submersible pump to simulate the tug propeller jet flow, and control the flow rate of the study area by adjusting different power submersible pump positions. The advanced Doppler-point current meter can measure the flow rate of the base bed riprap leading and trailing edge, and get flow rate indicators which can cause damage to the rubble bed stability. Practical engineering has verified the reliability of the research results.

Key words: physical model; rubble bed; water erosion; stability

抛石基床作为码头的下层基础结构，其主要作用是承受上部结构垂直荷载、扩散基础应力。

沿海港口码头的抛石基床常采用10～100 kg块石抛填而成，虽然大型码头的抛石基床经过重锤夯实和整平，但其仍然是一种散体结构。在较大水流冲刷作用下，小粒径块石不免会被带走，造成大粒径块石局部失去支撑而塌落，最终危及整个基床结构甚至码头整体的安全。特别是近年来，日趋大型化的作业船舶螺旋桨尾流对抛石基床的冲刷现象已经引起港口工程界的关注，例如2005年3月，营口港鲅鱼圈港区四港池210 m粮食皮带廊护岸段基床遭冲刷破损后码头岸壁向海侧倾斜，码头后方10 m区发生开裂、沉陷，码头前沿外移达23 cm，成为即将倾倒的危险码头[1]；2007年7月，秦皇岛港东区工作船码头，发生了上部胸墙位移、方块外倾的险情。经潜水探摸发现

收稿日期：2012-05-24
***基金项目：**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，副研究员，主要从事港工结构检测与结构研究工作。

抛石基床被冲动，外坡肩块石塌落，造成方块基础移位[2]；2008年11月，大连港大连湾4#泊位（小滚装码头）处及大窑湾8#泊位（工作船码头）在潜水检查时发现抛石基床多处遭水流冲刷淘空，沉箱前趾悬空，进深达3 m左右，形成严重易倾倒的安全隐患[3]。船舶尾流作用下的抛石基床稳定性问题实质上是流–固耦合问题，对这一问题的研究一直是计算流体力学发展的重点领域，当然处理起来也会存在很多困难[4]。本文尝试采用物理模型试验手段，避开具有较强非线性的流–固耦合问题，对船舶尾流作用下的码头抛石基床稳定性开展研究，取得了阶段性成果。

1　试验概况

1.1　研究对象

码头长184.77 m，是建造在抛石基床上的沉箱重力式结构，设计为专供停靠拖轮的工作船码头，见图1。2008年经潜水探摸发现该码头抛石基床已破损，沉箱前趾底脚下存在大空洞，最大洞高2.7 m，最大进深2.0 m。

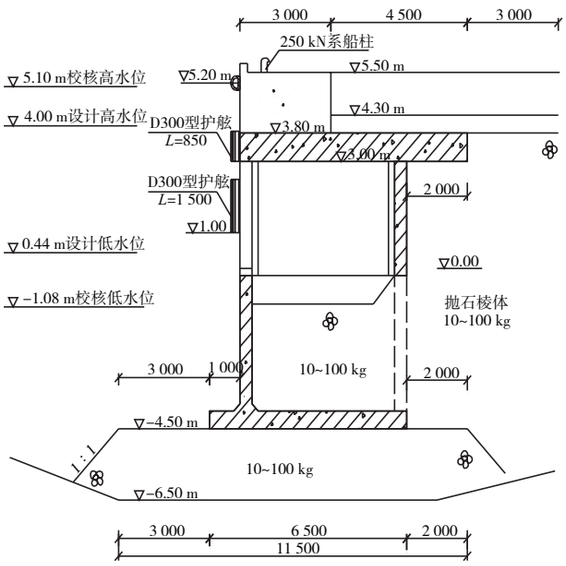

图1　码头结构断面（单位：mm）

1.2　研究方法和目的

码头地处港池区域为开敞式水域，因此选用开敞式矩形水池作为试验水池，精选颗粒均匀的块石作为试验用抛石石块，利用潜水泵模拟拖轮螺旋桨射流，通过调整不同功率潜水泵的出流位置控制研究区域的流速，采用先进的多普勒点式流速仪测量基床抛石前缘和后缘的流速，研究能够对块石稳定性造成破坏的流速指标，分析其破坏原理。

1.3　模型比尺及模型制作

模型按重力相似准则设计。重力相似$\lambda_u=\lambda_l^{1/2}$，质量比尺为$\lambda_m=m_p/m_m$，块石质量与体积关系为$m=\rho V$，将块石概化为球体，则$V=\frac{4}{3}\pi r^3$。若$r=l$，则$\lambda_m=\lambda_l^3$，取几何比尺$\lambda_l=10$，则质量比尺$\lambda_m=1\,000$，流速比尺$\lambda_u=3.16$。

模型设计为一矩形水池，水池长14 m，宽8 m，高1.2 m，水深0.4 m。抛石区长9 m，左右两侧各布置长4 m的抛石防护区，选用大于150 g的块石作为抛石石块，起到防护试验区边坡稳定的作用。中间设置试验区，抛石区宽1 m，高0.2 m，边坡坡顶距墙面0.3 m。试验区并排布置3组块石，各组块石区宽度为0.3 ~ 0.4 m。采用先进的多普勒点式流速仪测量基床抛石前缘和后缘的流速，1#流速仪在抛石坡脚附近，距离坡顶高约0.05 m，2#流速仪位于挡墙前沿约0.1 m处。

试验区前方布设射流出水口，由不同功率的潜水泵供水。模型布置见图2。

1.4　实施方案

1）根据模型相似比尺，选择相应天然10~100 kg块石作为试验块石，根据块石的质量不同分为5组，选用10 g，25 g，50 g，70 g，100 g 块石作为试验块石。

2）选用长8 m，宽14 m的矩形水池作为试验水池，以长边边墙作为港池码头岸壁墙面，模拟天然的港池开敞式水域。

3）选取试验块石，按照基床抛石设计方案进行布置，布置方案满足几何相似要求。

4）选用不同粒径块石作为试验抛石，研究不同粒径块石起动与流速之间的关系，测量流速变化对块石稳定性的影响，测量每一级块石的起动流速。

5）测量造成10~100 kg混合块石基床产生破坏的流速指标，研究10~100 kg块石的起动破坏机理。

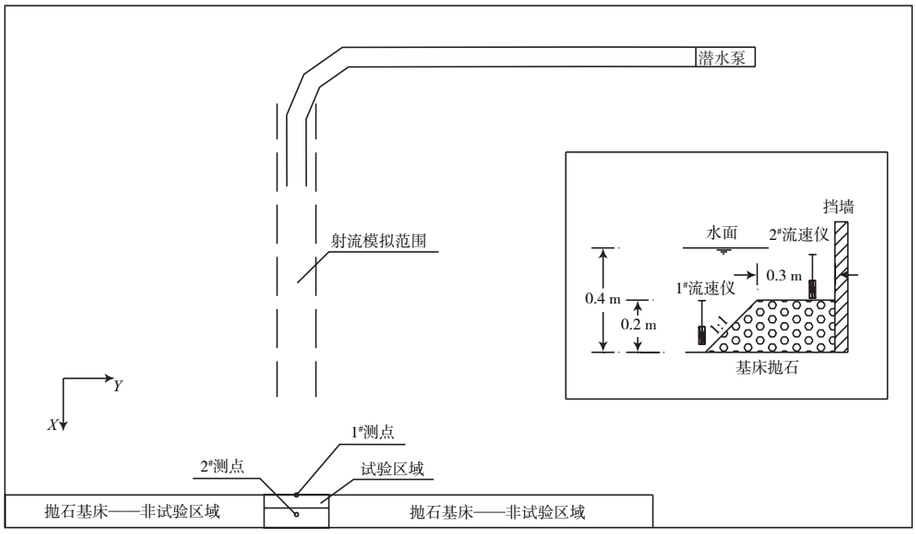

图2　模型试验示意图

2　模型试验过程及测试结果

2.1　单粒径块石起动流速测量

试验区并排布置3块石，各组块石区宽度为0.3~0.4 m，单粒径块石摆放情况见图3～4。通过调整不同功率潜水泵出流位置控制研究区域的流速，分别测量得到10 g，25 g，50 g，70 g，100 g块石的起动流速，见图5。在水流的持续冲刷下，观察基床抛石表面形状改变情况，若3块以上块石起动，则认定为该流速对于该试验质量的块石具有破坏作用，基床抛石处于失稳状态。不同粒径块石的起动流速变化见其中质量10 g块石起动后失稳情况（图6）。

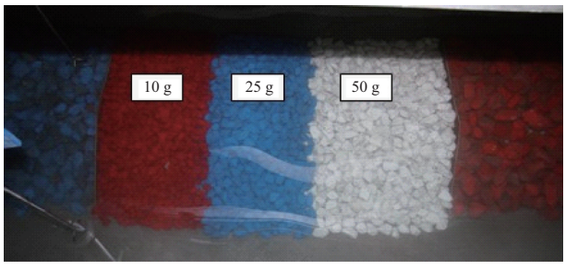

图3　10，25，50 g块石布置情况

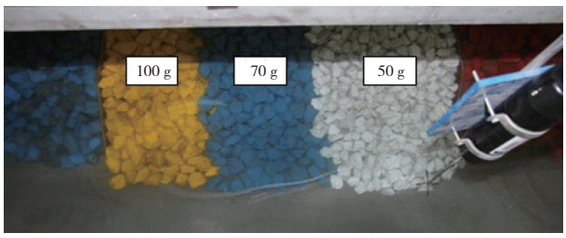

图4　50，70，100 g块石布置情况

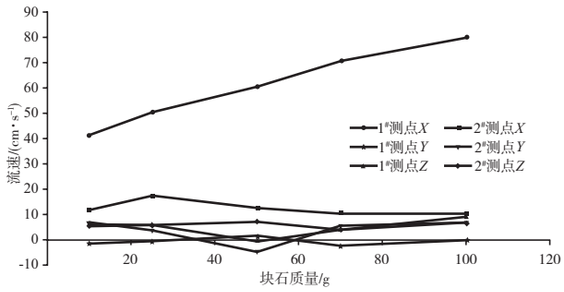

图5　单粒径块石起动流速变化

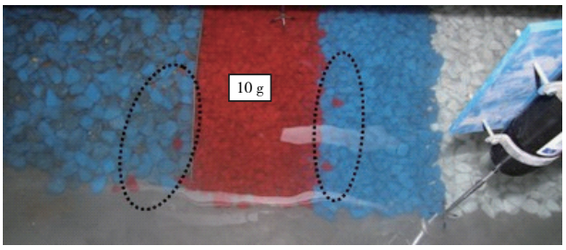

图6　10 g块石失稳

从图5可见，1#测点X向流速呈线性增长，Y向和Z向流速基本稳定；2#测点受后侧墙面的影响，X向流速较小，随着入口流速的增大X向变化不大。

2.2　混合粒径块石起动流速测量

在测量获得单粒径块石起动流速成果的基础上，为了使物理模型更接近实际情况，试验选用10 g，25 g，50 g，70 g，100 g共5种不同粒径块石按质量等比例混合之后，形成10～100 g混合粒径抛石基床，见图7。

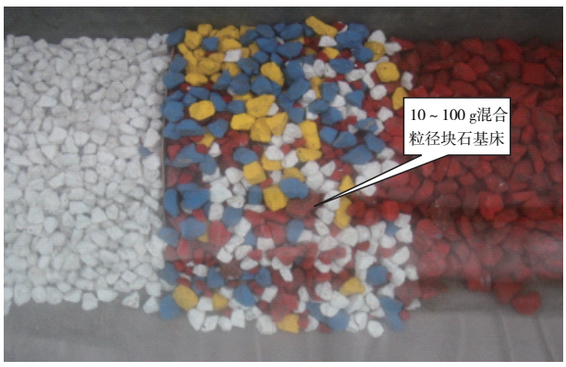

图7　10 ~ 100 g混合粒径抛石基床

试验分别测量了40 ~ 100 cm/s流速作用下，10 ~ 100 g混合粒径抛石基床的稳定性情况。试验结果显示，当流速超过50 cm/s时，块石发生了滑动，由于采用无规则混合抛填方式，因此位于抛石区中间的小颗粒块石较为稳定，位于边缘的小颗粒块石首先发生了滑动，见图8。随着流速的增大，护角位置和护坡边缘位置的块石产生了移动，但基床总体稳定。当流速增大到　　70 cm/s时，块石有较为明显的移动，见图9。当流速增大到90 cm/s时，块石护坡迅速坍塌，呈中央向左右两侧分散的趋势，而基床顶部块石破损则稍小，见图10。

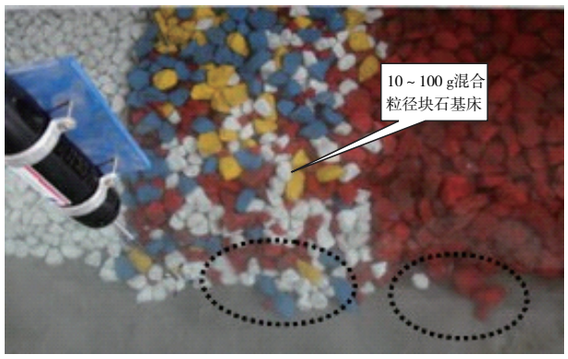

图8　流速50 cm/s作用下，10 ~ 100 g块石基床开始失稳

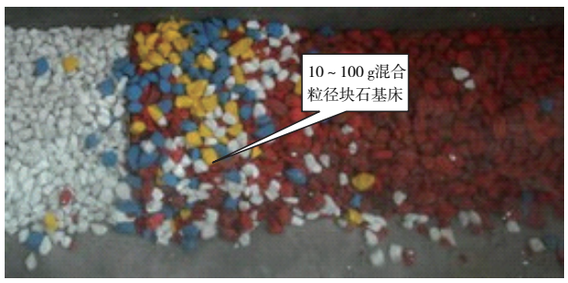

图9　流速70 cm/s作用下，10 ~ 100 g块石基床显著失稳

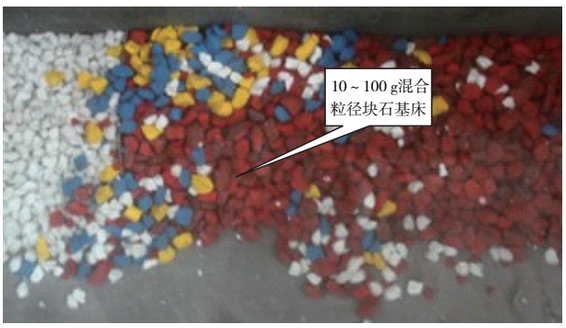

图10　流速90 cm/s作用下，10 ~ 100 g块石基床发生坍塌

2.3　试验小结

通过开展5组块石的起动流速试验研究和1组混合粒径石块的起动流速试验研究，并按照模型设计比尺（几何比尺λ_l=10，质量比尺λ_m=1 000，流速比尺λ_u=3.16），将模型试验结果换算成原型结果进行分析如下：

1）位于前端的1#测点流速，X向流速随着供流流速的增大而增大，是造成块石起动的主控流速。

2）位于后端2#测点，由于靠近码头墙面位置，测点流速位于紊流区，流速变化非常复杂。X向流速明显小于1#测点，横向和垂向流速与1#测点基本相当。

3）单粒径块石起动流速（1#测点X向）随着块石质量的增加呈线性增长趋势。10 kg块石起动流速为1.30 m/s，25 kg块石起动流速为1.59 m/s，50 kg块石起动流速为1.91 m/s，70 kg块石起动流速为2.22 m/s，100 kg块石起动流速为2.51 m/s。

4）无规则混合粒径石块基床对自身稳定较为有利。研究结果显示，当流速增大到1.58 m/s时，较小块石首先发生滑动；当流速增大到2.21 m/s时，基床处于失稳状态；随着流速进一步增大到2.84 m/s时，基床块石迅速发生塌陷破坏。

3　模型试验结果的工程精度验证

本模型研究对象为遭水流冲刷破坏的重力式码头结构，实测码头有163 m长的基床已遭船舶尾流冲刷破损，原设计2 m厚的抛石基床平均有1.5 m厚的块石被水流冲走。为了验证本物理模型试验结果的可靠性，选择码头经常靠泊的额定功率为

1 176 kW的Z型全回转拖轮为试验对象，对其工作时的尾吹流速进行实际测量[5]。拖轮启动工作时，主机转速控制在410 r/min。测量时，拖轮顺岸靠泊，流速测量仪距拖轮尾部3 m。将流速测量仪沿码头岸壁放入前沿海水中，仪器距基床顶面高0.5 m，底部坠100 kg铅锤以保持仪器姿态。测量了不同潮位时，在基床顶面0.5 m处的水流流速，结果见表1。

表1　拖轮启动工作尾吹水流流速

潮位/cm	188	88	−12
流速/(m·s^{-1})	0.3	2.2	2.4

从表1可见，拖轮工作时，将在基床表面产生最大2.4 m/s的尾吹流速，对基床造成冲刷破坏。物理模型试验结果也表明，当流速增大到2.21 m/s时，基床处于失稳状态，随着流速的进步一增大到2.84 m/s时，基床块石迅速发生塌陷破坏。对比分析发现，物理模型试验结果能满足工程精度要求。

4　结语

通过物理模型试验，再现了某码头抛石基床遭水流冲刷破坏的过程，得到了单粒径块石和混合粒径块石基床的起动流速，并与工程试验结果进行了比对，结果能满足工程精度要求。基床块石起动流速的测量，因受紊流影响，通过视觉判断块石起动瞬间状态存在一定的难度，事后判断势必带来一定的偏差，下一阶段将引入水下高速摄像机来提高块石起动瞬间的监测精度。另外，模型水流与拖轮螺旋桨射流也存在一定的差异，特别是对螺旋桨产生的紊流模拟还存在很多困难，因此如何处理好模型和原型之间的相似关系，还需要做进一步的深入研究。

参考文献：

[1] 朱崇诚. 营口港鲅鱼圈港区粮食码头210 m皮带机廊道护岸检测评估报告[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究院, 2005.

[2] 张宝华. 秦皇岛东港油区工作船码头评估报告[R]. 天津:交通部天津水运工程科学研究院, 2007.

[3] 张强, 张宝华. 大连港大窑湾8#泊位、大连湾4#泊位码头检测评估报告[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究院, 2009.

[4] 张宝华, 王元战, 孙建军. 船舶尾流作用对抛石基床冲刷稳定性的影响研究[J]. 水道港口, 2010(5): 120–124.

[5] 张宝华, 黄敬东, 王笑难.重力式码头抛石基床遭水流冲刷破损后的诊断和治理[J]. 水运工程, 2009(8): 55–59.

（本文编辑　武亚庆）

（上接第137页）

4　结语

在社会信息化和内河航道数字化、智能化的背景下，将会涉及大量电子地形数据的处理、转换和利用。原有人工分带进行内河航道绝对高程与相对高程计算和转换的办法可以满足数据量不太和时间要求不紧迫情况下的工作需要。本文提出的内河航道绝对高程与相对高程的计算、转换方法和程序特别适用于数据量特别大和时间要求紧迫情况下的高程计算与转换需要。

参考文献：

[1] JTJ 203—2001 水运工程测量规范[S].

[2] 《现代数学手册》编纂委员会. 现代数学手册[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000.

[3] Cormen Thomas H. 算法导论(Introduction to Algorithms) [M]. 潘金贵, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.

[4] 长江泸州航道局, 长江宜宾航道局. 长江上游航行参考图[R]. 泸州: 长江泸州航道局, 2009.

（本文编辑　武亚庆）