

· 施 工 ·



重力式码头抛石基床 重锤夯实施工效率改进研究

童新春¹, 叶 锋², 邱青长², 张宝洁¹

(1. 中交四航局, 广东 广州 510230; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 在重力式码头水下抛石基床厚度越来越大、同时爆夯法通常受环境制约不能采用的背景之下, 提出对传统的重锤夯实工艺进行改进, 即采用超重锤以及较大的基床分层厚度的施工工艺。首先设计了超重夯锤, 并采用有限元方法计算得到了夯锤的绕流阻力系数及有效夯击能, 再以有效夯击能估算基床的有效加固深度, 在此基础上, 将重锤夯实基床分层厚度从传统的2 m/层提高至4 m/层。厦门港嵩屿港区抛石基床的夯实施工结果表明, 改进后的重锤夯实工艺效果较好, 平均夯沉率达到了14.85%, 而且施工效率显著提高, 为类似工程提供了借鉴。

关键词: 重力式码头; 抛石基床; 重锤夯实法; 绕流阻力系数; 有效夯击能

中图分类号: U 656.1¹¹

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)03-0199-05

Method for improving the efficiency of heavy tamping compaction of gravity wharf's rubble bed

TONG Xin-chun¹, YE Feng², QIU Qing-chang², ZHANG Bao-jie¹

(1. CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: With the increase of the thickness of rubble bed, and under the condition the explosive tamping method usually can't be adopted because of environmental constraints, this paper recommends a renovation of the conventional heavy tamping compaction method, i.e. adopting super-heavy hammer and larger dividing thickness of the rubble bed. Firstly, the heavy-weight hammer is designed; Secondly, the resistance coefficient of surrounding flow and effective tamping energy is adopted by the finite element method; Thirdly, the effective reinforced depth of rubble bed is estimated with effective tamping energy. On this basis, the dividing thickness of rubble bed is increased to 4 meters. The construction results of Sonyu harbour in Xiamen showed that the improved process of heavy tamping compaction got a good result, as the average compacted rate reached as high as 14.85% and the efficiency increased significantly. It may serve as reference for similar engineering practices.

Key words: gravity wharf; rubble bed; heavy tamping compaction; resistance coefficient of flow; effective tamping energy

重力式码头水下抛石基床的密实施工中, 最常采用的两种方法为爆夯法^[1-2]和重锤夯实法^[3-4]。爆夯法施工速度快, 然而对周边环境产生的地震效应明显, 因此受周边环境的制约; 重锤夯实法施工的优点在于施工机动灵活, 对周边建筑物产生的地震效应影响小, 施工干扰小, 缺点在于施

工成本大、施工速度慢。

厦门港嵩屿港区二期岸壁工程B标(下称“嵩屿工程”)为重力式沉箱结构, 位于厦门海沧开发区, 设计规模为可靠泊10万吨级集装箱及兼泊载箱量为12 500 TEU的集装箱船码头, 码头岸线长度617.44 m, 抛石基床厚度达到14~17 m。

收稿日期: 2012-08-22

作者简介: 童新春(1971—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事港口工程技术与管理工。

该工程周边环境复杂,与村庄距离近,与厦门博坦油库相邻,并且工程施工水域是国家一级保护动物——中华白海豚活动的核心区域,基床夯实采用爆夯工艺存在一定的难度和风险,因此该工程选用重锤夯实法对抛石基床进行密实施工。

然而传统的重锤夯实法施工成本高、施工速度慢,依据JTJ 290—1998《重力式码头设计与施工规范》的规定:采用重锤夯实法夯实基床,每层厚度宜大致相等,夯实后厚度不宜大于2 m。对于嵩屿工程中长度达600 m,厚度达14~17 m的抛石基床而言,如果按照规范规定的2 m/层的分层锤夯工艺,夯实面积将非常之大、工程造价高,同时也限制了抛石速度,而且频繁移船定位也将占用大量的时间,从而造成施工成本显著提高、施工效率低下。为此,工程中对传统的重锤夯实法进行了改进,提出了超重锤、大分层的锤夯工艺,即在提高单位面积夯击能的基础上,提高基床分层厚度,达到4 m/层,从而使夯实施工效率大大提高。

1 超重夯锤设计

传统的重力式码头水下抛石基床重锤夯实施工中,夯锤质量一般仅为4.5~6.0 t。为了提高重锤夯实法的有效加固深度,必须增大夯击能。通过增大夯锤重力和提高夯锤落距的方式均可达到增大夯击能的目的,然而由于夯锤在水中下落,通过提高夯锤落距的方式会造成夯击能的较大损失,是不经济的。赵敏成^[5]与王德利^[6]均建议水下抛石基床的夯实施工应遵循“大质量、小阻力”的原则,因此嵩屿工程中通过设计超重夯锤来提高夯击能,夯锤设计主要遵循如下几个原则:

1) 重力大,以形成较大的夯击能。嵩屿工程中所用夯锤的质量设计为15 t,锤落距为4 m,在不计水阻力、浮力影响的情况下单位面积夯击能达到了332.7 kJ/m²,远大于规范中的120 kJ/m²。

2) 底面积小,以便使单位面积的冲击能达到较大值。嵩屿工程中所制夯锤采用铸钢材料,这样可减小底面积。该夯锤底面直径为1.5 m,与基床的接触面积1.77 m²。

3) 尽量减少夯锤在水中下落过程中的能量损

失。与陆上锤夯施工不同的是,基床夯实中夯锤在水中下落,必然存在能量损失,为了减少夯锤在水中运动过程中的能量损失,尽量使夯锤接近流线形。嵩屿工程中所制夯锤为圆台形,底部进行圆角处理,这样可减少运动时的水阻力。

4) 保证夯锤在水中下落过程中的稳定性。为了保证夯锤在水中的平稳下落,避免“倒锤”现象,在夯锤平行运动方向上开若干泄水孔。

按照以上几点原则对超重夯锤进行设计,夯锤详细尺寸如图1所示。

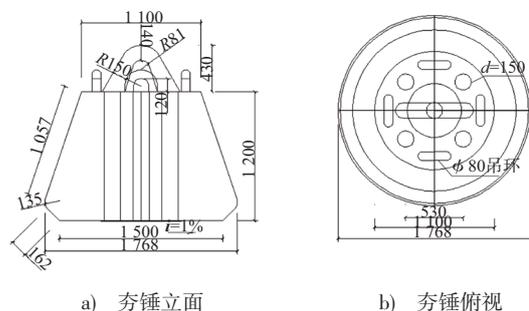


图1 夯锤(单位:mm)

2 夯锤绕流阻力系数及有效夯击能计算

抛石基床夯实施工中,由于夯锤在水中下落,必然存在能量损失,这是与陆上夯实施工的一个显著区别,然而现行的重力式码头施工规范中,所给出的夯击能为不考虑浮力、阻力影响所得的夯击能,将它直接用于估算有效加固深度显然并不合理。

2.1 夯锤绕流阻力系数计算

各种形状物体的绕流阻力^[7]由下式确定:

$$F_{阻} = C_f A \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

式中: A 为绕流物体在垂直于来流速度方向的最大投影面积; ρ 为流体密度; v 为来流速度(相对于绕流物体的速度); C_f 为绕流阻力系数。

文献[6]认为圆台型夯锤的绕流阻力系数一般为1.2~1.6,然而文中并未给出任何的理论或计算依据。本文通过有限元数值模拟的方法,得到夯锤在水中下落时的绕流阻力系数及绕流阻力,进而得到夯锤的有效夯击能。

夯锤在水中下落过程为流固耦合问题^[8],因此对固体(夯锤)及流体(海水)分别进行建模。考虑到对称性,建模时仅取固体及流体的1/4

进行, 如图2和3所示。

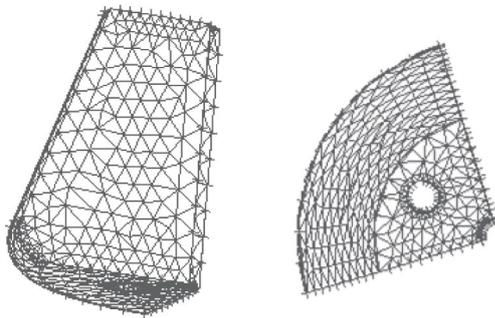


图2 夯锤建模

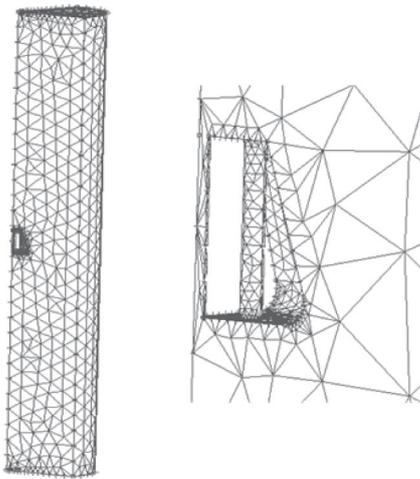


图3 流体建模

夯锤在水中下落过程中, 夯锤相对流体发生较大的位移, 这将导致流体的有限元网格严重畸变, 计算难以收敛。为了克服这个问题, 计算中采用以夯锤为参照物, 而相对地, 原来静止的流体以一定速度 v 流过夯锤, 从而对夯锤产生绕流升力, 其大小等于夯锤以 v 的速度下落时所受的绕流阻力。有限元计算步骤如下:

1) 在夯锤顶面进行约束, 使夯锤不发生任何位移。

2) 在离夯锤足够远的地方定义流体速度 v 。原远离夯锤的流体应为静止不动, 但由于计算中以夯锤为参照系, 那么当夯锤以速度 v 下落时, 相对地流体应以速度 v 向上流过夯锤。

3) 设置时间函数, 让流体速度 v 从0开始不断增大。当 $v=0$ 时, 显然夯锤顶面的约束力大小 $F_{约}=G-F_{浮}$, 其中 G 为锤重力, $F_{浮}$ 为锤所受的浮力; 当 v 不断增大, 约束力将不断减小, 直至 $F_{约}=0$, 此时的 v 值即为夯锤的极限下落速度。夯锤受力如图4

所示。

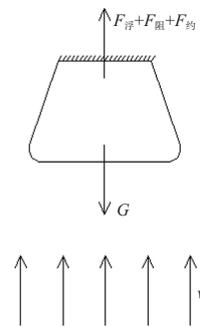


图4 夯锤受力

依速度 v 及夯锤所受的绕流阻力 $F_{阻}$ 可得到夯锤的绕流阻力系数 C_f ; 依夯锤的受力情况可得到夯锤在各个 v 值时对应的加速度值。计算结果如表1所示。

表1 夯锤绕流计算结果

流速 $v/(m \cdot s^{-1})$	$F_{阻}/N$	加速度 $a/(m \cdot s^{-2})$	C_f
0	0	8.51	
1.0	257.25	8.45	1.167 1
2.0	1 028.57	8.25	1.166 6
3.0	2 313.58	7.92	1.166 3
4.0	4 112.42	7.46	1.166 1
5.0	6 425.27	6.87	1.166 0
6.0	9 252.32	6.15	1.166 0
7.0	12 594.30	5.30	1.166 1
8.0	16 449.40	4.32	1.166 1
9.0	20 819.80	3.20	1.166 1
10.0	25 705.40	1.95	1.166 2
11.0	31 107.00	0.58	1.166 3
11.3	32 826.40	0.14	1.166 3
11.4	33 410.10	-0.01	

2.2 单位面积有效夯击能计算

设夯锤在水中抛石顶面 h 高度处由静止开始下落, 在夯击基床之前, 作用于夯锤上的外力包括: 重力 Mg , 浮力 $\rho_{水}gV$, 水阻力 $F_{阻}$, 其中 M 为夯锤质量, g 为重力加速度, $\rho_{水}$ 为水密度, V 为夯锤排开水的体积。列出夯锤的运动方程如下:

$$Mg - \rho_{水}gV - C_f A \frac{\rho v^2}{2} = Ma \quad (2)$$

解此常微分方程, 得:

$$v = \frac{1}{\delta} \sqrt{1 - e^{-2\delta^2 \lambda g h}} \quad (3)$$

式中: $\lambda = 1 - \frac{\rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{锤}}}$, $\rho_{\text{锤}}$ 为夯锤密度; $\delta = \sqrt{\frac{C_f A \rho_{\text{水}}}{2M\lambda g}}$ 。

进而得到单位面积有效夯击能表达式为:

$$\varepsilon = \frac{M^2 \lambda g}{C_f A^2 \rho_{\text{水}}} (1 - e^{-\frac{C_f A \rho_{\text{水}} h}{M}}) \quad (4)$$

依上式计算得到嵩屿工程中的夯锤在4 m落距时产生的单位面积有效夯击能为222.0 kJ/m², 而在不考虑浮力、阻力影响时的单位面积有效夯击能为332.7 kJ/m², 能量损失达33.3%。显然, 应当采用考虑能量损失的有效夯击能来估算夯击过程中的有效加固深度。

3 以有效夯击能估算加固深度

通过借鉴陆上夯实大块石地基的经验, 以有效夯击能的大小来估算水中重锤夯实法有效加固深度。徐至钧^[9-10]曾给出陆上大块抛石地基有效加固深度与夯击能的经验关系, 当单击夯击能为1 000 kN·m(换算为单位面积夯击能约为232.5 kJ/m²)时, 抛石地基的有效加固深度可达到4 m。

嵩屿工程中所使用的夯锤, 在落距为4 m时产生的单位面积有效夯击能为222.0 kJ/m², 略小于232.5 kJ/m²。考虑到陆上锤夯一般采用跳夯工艺, 而水下抛石基床夯实一般采用纵横向相邻接压半夯工艺^[3], 因此水下抛石基床夯实施工中, 作用于单位面积上的平均夯击能较陆上大。基于此, 可认为水下抛石基床夯实施工中, 222.0 kJ/m²的单位面积夯击能, 是足以对4 m厚的抛石基床进行有效加固的。

4 工程应用

嵩屿工程中采用锤质量为15 t且锤落距为4 m产生的夯击能, 对分层厚度为4 m的抛石基床进行重锤夯实施工, 夯实施工过程中进行了严密的观测和检测:

1) 夯实后, 潜水人员进行了水下探摸及录像。块石无严重的破碎现象, 且夯后块石嵌合紧密, 基床表面平整度好。

2) 对各分层及分段基床均进行了夯沉率检测, 检测结果为: 夯沉率最小值为12.26%, 最大值达到了18.61%, 平均为14.85%, 表明夯实效果

较好。

3) 对基床进行2遍8夯次夯实之后, 任选一段复打一夯次(夯锤相接排列, 不压半夯), 测得平均沉降量为23 mm, 小于30 mm, 满足规范要求。

4) 沉箱安装之后, 对沉箱的沉降值进行了观测。沉箱在安装及箱内回填阶段存在一定的沉降, 但总的沉降值较小。以1#沉箱为例, 其沉降曲线如图5所示, 其中不均匀沉降为最大角点沉降值与最小角点沉降值之差。

嵩屿工程中由于对传统的重锤夯实工艺进行了改进, 施工效率大大提高, 夯实方量达到了4 710.7 m³/d, 较传统重锤夯实工艺效率提高1倍以上, 从而节省了大量的船机及人员费用, 仅半潜驳费用一项便节省达260万元。

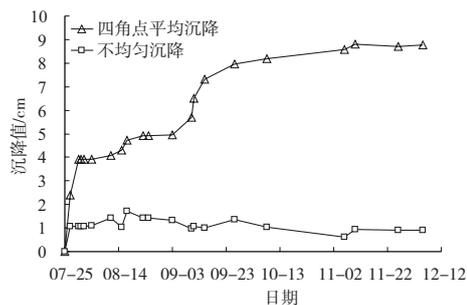


图5 沉箱沉降曲线

5 结论

1) 现行的抛石基床重锤夯实施工规范中, 基床分层厚度仅为2 m/层, 施工效率低下。嵩屿工程中, 设计了到目前为止水下抛石基床夯实施工中质量最大的夯锤, 锤质量达15 t, 并在此基础上, 将基床分层厚度提高至4 m/层。

2) 现行规范所给出的夯击能为不考虑浮力、阻力影响时所得的夯击能, 将它直接用于估算有效加固深度显然并不合理。通过对夯锤在水中下落过程进行有限元流固耦合模拟计算, 得到了夯锤绕流阻力系数值为1.166, 进而建立了有效夯击能与夯锤重力、夯锤落距的关系式。

3) 嵩屿工程中采用改进后的重锤夯实工艺, 夯实效果较好, 平均夯沉率达到了14.85%, 且后期的沉箱沉降值较小。

4) 对传统的重锤夯实工艺进行改进之后, 施

工效率显著提高, 这为其它的类似工程提供了借鉴及参考。

参考文献:

[1] JTJ/T 258—1998 爆炸法处理水下地基和基础技术规程[S].

[2] 李俊如, 高建光, 贺涛, 等. 广西钦州港二期码头抛石基床的水下爆夯[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 917-921.

[3] JTJ 290—1998 重力式码头设计与施工规范[S].

[4] 冯世晖, 庞善喜. 重力式码头基础施工过程控制[J]. 水运科学研究, 2007 (2): 21-24.

[5] 赵敏成. 关于水下抛石基础的夯实问题[J]. 水运工程, 1988(8): 54-58.

[6] 王德利. 不同夯锤的水下夯实效果及夯锤阻力理论在水下夯实中的运用探讨[J]. 水运工程, 1990(3): 51-53.

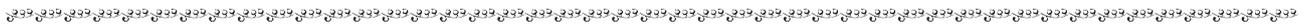
[7] 周光炯, 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[8] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 1997.

[9] 徐至筠. 采用大夯击能强夯处理大块抛石地基[J]. 石油工程建设, 1997(1): 12-17.

[10] 徐至筠. 填海区采用强夯处理抛石地基建成大型储罐[J]. 特种结构, 1999, 16(4): 41-44.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第198页)

同一位置水平变形的差异往往引起线杆、水塔等基础埋置较深而面积较小建筑物的倾斜; 大范围的不均匀沉降易造成公路、楼房等基础面积较大建筑物的开裂, 因而大面积真空预压法往往不适用于周边建筑物较密集地区。本文通过对真空预压法处理软基加固效果的正反两方面进行监测分析, 可在处理效果和对周边影响方面为珠三角地区类似工程的施工和设计提供可靠数据和技术参考。

参考文献:

[1] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4版. 北

京: 中国建筑工业出版社, 2007.

[2] 姜海青, 王业荣, 谭祥韶, 等. 珠三角腹地软基十字板与静探试验成果的相关性研究[J]. 广东公路交通, 2012(1): 38-41.

[3] 黄腾, 廖朝辉. 软基土体中的真空度测试[J]. 水运工程, 2005(7): 80-81.

[4] 张功新, 莫海鸿, 董志良, 等. 真空预压中真空度与孔隙水压力的关系分析[J]. 岩土力学, 2005(12): 1 949-1 952.

[5] 张功新, 莫海鸿, 董志良. 孔隙水压力测试和分析中存在的问题及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(S2): 3 535-3 538.

(本文编辑 郭雪珍)