



重力式码头暗基床应力扩散特征分析

关 兴

(广东省航运规划设计院有限公司, 广东 广州 510050)

摘要: 利用有限元程序 Midas-GTS, 分析重力式码头暗基床应力的扩散特征和影响范围, 以及基床底面应力的分布和大小, 结合现行重力式码头规范的计算结果进行对比分析, 列举出两者之间的差异, 供类似工程设计作为参考。

关键词: 重力式码头; 暗基床; 基床应力扩散; 有限元

中图分类号: U 656.1⁺11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)08-0066-05

Diffusion characteristics of subgrade stress of gravity wharf's rubble bed

GUAN Xing

(Guangdong Province Planning & Design Institute for Water Transportation Co., Ltd., Guangzhou 510050, China)

Abstract: Using the finite element procedure MIDAS-GTS, we analyze the diffusion characteristics and extent, as well as the shape and size of the subgrade stress of gravity wharf's rubble bed. Combining with the current code of gravity wharf to analyze comparatively the difference between them, we provide reference for the design of similar projects.

Key words: gravity wharf; subgrade bed; diffusion of subgrade stress; finite element

现行规范, 墙后有填土的重力式码头暗基床顶面应力传递至基床底面, 基床应力扩散范围在前肩按 $\geq 1.5d$ (d 为基床厚度, 下同)、后肩按 $\geq 0.5d$, 应力扩散至基床底部呈“梯形”, 见图 1。结合某港口码头工程, 对该码头基床应力的扩散范围和大小使用 Midas-GTS 有限元软件进行数值分析, 查看基床应力扩散情况与现行规范计算结果的区别。

1 工程实例

某港口沉箱重力式码头, 沉箱底宽 10 m, 设置厚 3.0 m 的抛石基床, 采用暗基床的结构形式, 基床前肩回填中粗砂, 基床下部持力层为中粗砂, 贯入度约 18 击, 状态稍密-中密, 地基容许承载力 220 kPa, 码头极端低水位工况下, 码头墙体底部的合力转化为基床顶面的大小应力和水平摩擦力, 基

床顶面大小应力为 390 ~ 39 kPa, 摩擦力 700 kN/m, 各土层分布和基床顶面内力见图 2。

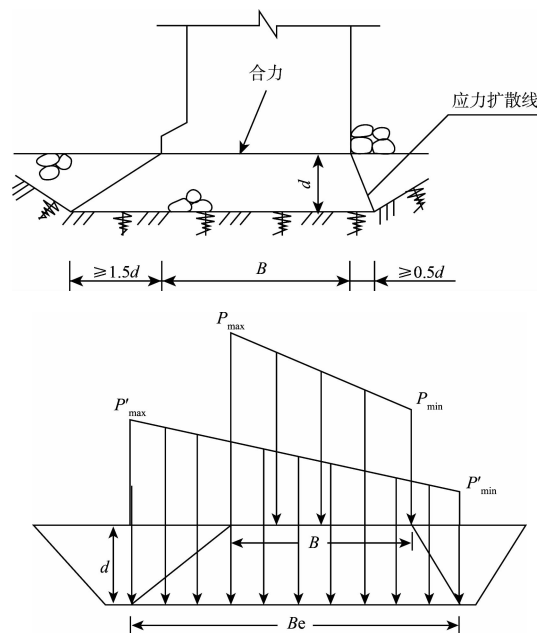


图 1 现行规范重力式码头基床应力扩散

收稿日期: 2013-12-26

作者简介: 关兴 (1984—), 男, 助理工程师, 从事港口与航道工程规划、设计工作。

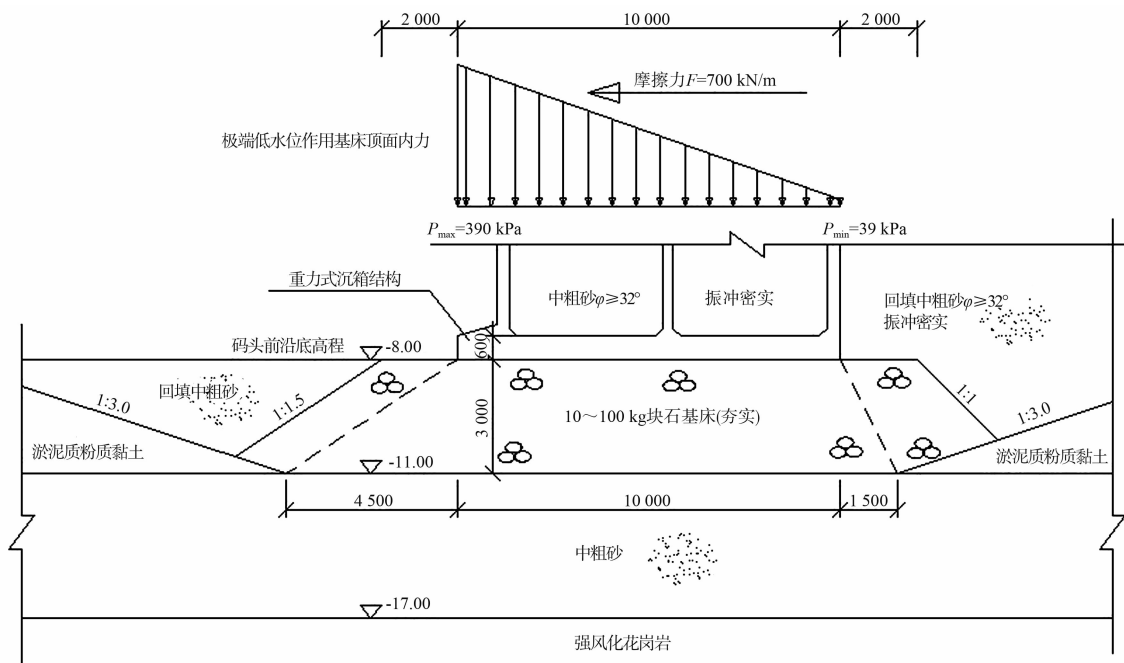


图 2 重力式码头数值分析条件示意图

2 有限元模型建立

重力式码头抛石基床采用 10 ~ 100 kg 块石，基床底部持力层为中粗砂，基床前后为淤泥质粉质黏土，块石、中粗砂和淤泥质粉质黏土为弹塑性材料，遵循有限元数值模拟的弹塑性本构模型和摩尔-库伦破坏准则，将上述土层定义为二维平面应力单元，根据土层厚度和宽度划分为若干个三角形平面应力子单元，各土层材料特性见表 1。Midas-GTS 有限元建模边界：岩土两侧采用限制水

平方向移动的边界条件，底部设置限制水平和竖向移动的边界条件，网格划分见图 3。

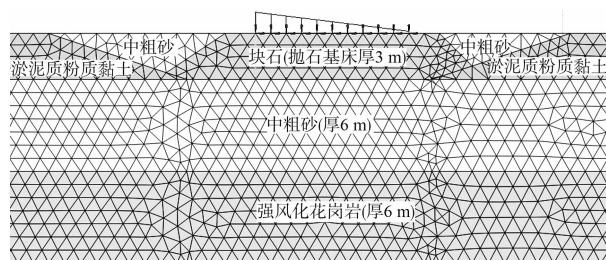


图 3 Midas GTS 有限元建模

表 1 土体材料特性

土体名称	弹性模量/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	泊松比	密度/ $(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$		凝聚力 C/kPa	摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	层厚度/ m
			水上	水下			
淤泥质粉质黏土	21 000	0.35	1.6	1.73	13	18.7	3.0
中粗砂	40 000	0.30	1.8	1.95	0.001	32.0	6.0
块石	100 000	0.25	1.7	2.00	0.001	45.0	3.0
强风化花岗岩	200 000	0.15	2.2	2.30	100	36.0	6.0

3 计算结果分析

3.1 现行规范计算结果

依据文献[3]，抛石基床底面最大、最小应力计算结果见表 2。

表 2 计算结果表明：基槽前底边线距墙前趾水

平距离 $1.5d$ ，后底边线距墙后踵水平距离 $0.5d$ ，扩散后基床底面应力呈“梯形”，最大应力为 273.75 kPa，大于中粗砂地基容许承载（220 kPa），需对下部中粗砂持力层进行地基处理，采用振冲密实的方法。

表2 现行规范基床底面应力计算结果

基床顶面应力/kPa		墙底宽度 B_1/m	块石浮密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	基床厚度 d_1/m	基床底面应力/kPa	
大应力 σ_{max}	小应力 σ_{min}				大应力 σ'_{max}	小应力 σ'_{min}
390	39	10	1.0	3	273.75	54.38

3.2 有限元计算结果

3.2.1 基床底面应力计算结果

利用 Midas-GTS, 采用二维平面应力单元, 土体应变遵循摩尔-库伦准则, 在抛石基床顶面加载基床顶面大小应力和摩擦力, 各层土体应力见图4。作用在基床面的应力计算结果见表3。

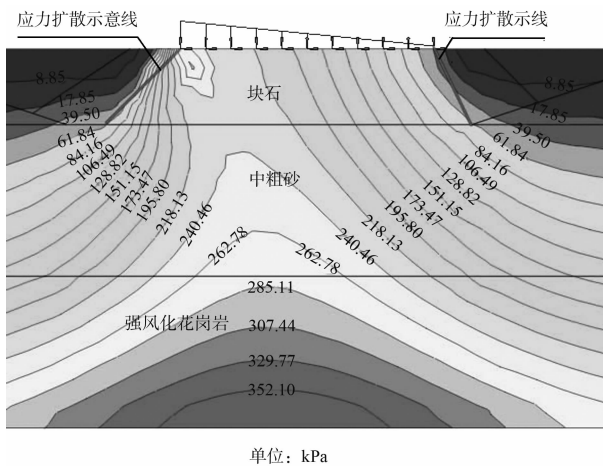


图4 Midas GTS 计算地基应力 (单位: kPa)

表3 现行规范基床应力计算结果

基床顶面应力/kPa		基床底面应力/kPa	
大应力 σ_{max}	小应力 σ_{min}	大应力 σ'_{max}	小应力 σ'_{min}
390.00	39.00	218.14	61.84

表3 计算结果表明: 基床应力扩散至前肩约 $1.0d$, 后肩约 $0.5d$, 扩散后基床底面应力呈“凹形”, 最大应力为 $218.14 \text{ kPa} <$ 中粗砂地基容许承载 220 kPa 。

对比有限元分析计算与规范计算值可知: 基床应力扩散前肩差别较大, 后肩基本相同; 基床应力前肩扩散角与上部应力大小和基床厚度有着密切的关系。

3.2.2 基床前肩应力扩散角特征分析

3.2.2.1 基床应力扩散与上部应力大小的关系

拟加载 $190 \sim 19 \text{ kPa}$, $290 \sim 29 \text{ kPa}$, $390 \sim 39 \text{ kPa}$,

$490 \sim 49 \text{ kPa}$, $590 \sim 59 \text{ kPa}$ 的基床顶面应力, 查看应力扩散角度的变化 (表4)。

表4 基床应力与基床应力扩散角的关系

基床顶面最大应力/kPa	190	290	390	490	590
前肩应力扩散角/(°)	35	41	45	47	50

根据表4 计算结果, 基床顶面最大应力每增加 100 kPa , 前肩应力扩散角度约增加 $3^\circ \sim 4^\circ$, 根据重力式规范抛石基床顶面最大容许应力为 600 kPa , 则对应的应力扩散角度约为 50° 。

3.2.2.2 基床应力扩散与基床厚度大小的关系

拟设基床厚度分别为 $1 \sim 5 \text{ m}$, 加载 $390 \sim 39 \text{ kPa}$ 基床顶面应力和 700 kN/m 的摩擦力, 查看应力扩散角度的变化, 见表5。

表5 基床厚度与基床应力扩散角的关系

基床厚度/m	1	2	3	4	5
前肩应力扩散角/(°)	59	51	45	40	36

根据表5 计算结果, 基床厚度每增加 1 m , 前肩应力扩散角度变化范围为 $6^\circ \sim 4^\circ$, 当基床厚度为 1 m 时, 前肩应力扩散角为 59° , 与现行规范计算的抛石基床前肩应力扩散角约 56° 较为接近。

4 问题描述

4.1 基床应力扩散的差异

根据现行规范, 暗基床前肩基床应力扩散为 $1.5d$, 当基床厚度 $\geq 3 \text{ m}$ 时, 岩土有限元数值模拟计算值约为 $1.0d$, 差异较大 (图5), 若根据有限元数值模拟值设计, 可节省基槽开挖和抛石基床块石回填的方量, 从而节省工程造价; 根据现行规范, 后肩基床应力扩散为 $0.5d$, 岩土有限元数值模拟计算值约为 $0.5d$, 两者计算值相符合。

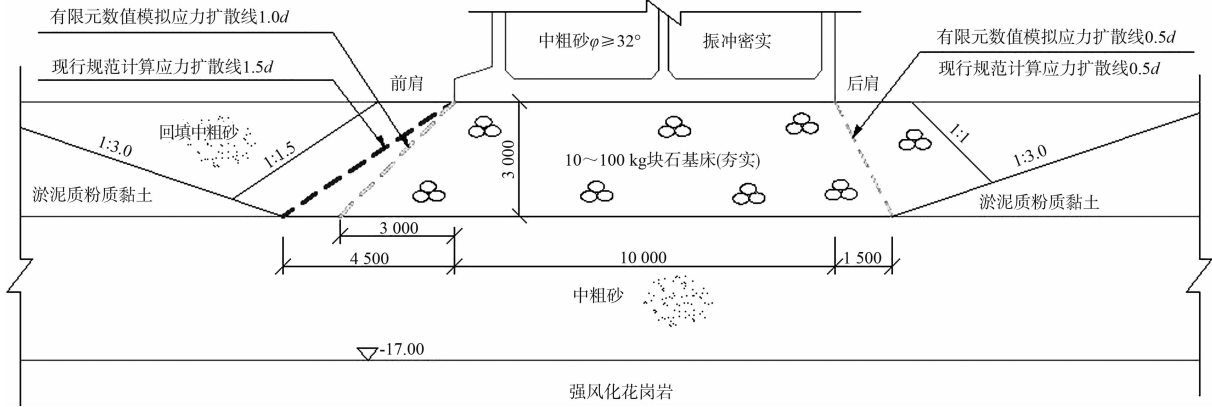


图 5 基床应力扩散差异

4.2 扩散后基床应力大小的差异

根据现行规范，本工程实例，基床底面最大应力为 273.75 kPa，大于中粗砂地基容许承载 220 kPa，因此基床下部中粗砂层需采用地基处理，振冲密实大于 18 击；根据有限元数值模拟计算值，基床底面最大应力为 218.14 kPa，小于中粗砂地基容许承载 220 kPa，地基可不进行处理，从而可节省工程成本。现行规范基床底面大小应力计算值呈“梯形”，最大应力集中在基床前部（图 6），有限元基床底面大小应力计算值呈“凹形”，最大应力集中在抛石基床的中部（图 7）。

由图 6、7 可见，现行规范计算值未考虑基床前土层被动土压力的影响，大小应力按刚性扩散，基床底面应力呈“梯形”，最大应力仍出现在前肩底部，若基床厚度较薄时，该应力扩散是合理的，基床厚度较厚时，受基床前被动土压力的影响越明显，基床应力扩散至底部越均匀，应呈“凹形”，最大基床应力位于基床中部，并较均匀地分布，这与经典地基理论是相符合的。

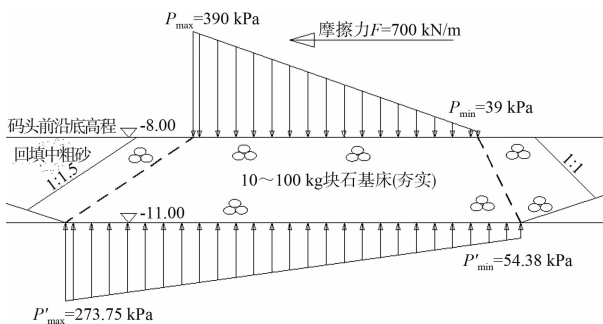


图 6 现行规范计算基床底应力呈“梯形”

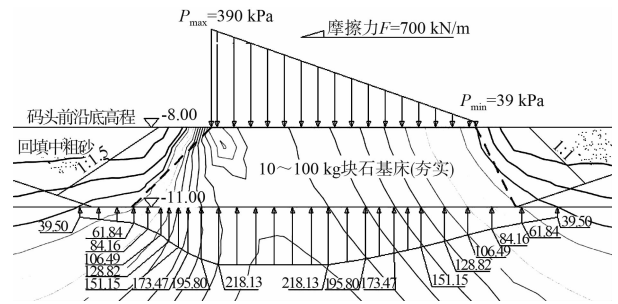


图 7 岩土有限元数值分析基床底应力呈“凹形”（单位：kPa）

4.3 基床前肩应力扩散角度取值问题

基床前肩应力扩散角与基床顶面最大应力关系密切，当基床最大应力为 450 ~ 600 kPa 时，基床前肩应力扩散角约为 45° ~ 50°，基槽开挖底宽前肩按 1.5d 倍考虑是合理的；当基床最大应力为 < 450 kPa 时，基床前肩应力扩散角 ≤ 45°，基槽开挖底宽前肩可适当减小，按 1.0d 设计。

同时，基床前肩应力扩散角与基床厚度大小关系密切，当基床厚度 < 3 m 时，基床前肩应力扩散角约为 59° ~ 51°，槽开挖底宽前肩按 1.5d 倍考虑是合理的；当基床厚度 ≥ 3 m 时，基床前肩应力扩散角约为 45° ~ 36°，基槽开挖底宽前肩可适当减小。

4.4 主要技术经济指标对比

按上述两种计算方法对重力式码头暗基床设计的主要技术经济指标对比见表 6。

表 6 主要技术经济指标对比

计算方法	基床应力扩散范围		基床底面应力/kPa		基槽开挖 宽度/m	是否需要进 行地基处理	造价/ (元·延米 ⁻¹)
	前肩	后肩	大应力	小应力			
现行规范	1.5 <i>d</i>	0.5 <i>d</i>	273.75	54.38	16.00	$\sigma'_{max} > f_{ak砂土}, 273.75 > 220 \text{ kPa}$ 需振冲密实	18 285
岩土有限元	1.0 <i>d</i>	0.5 <i>d</i>	218.13	61.84	14.50	$\sigma'_{max} < f_{ak砂土}, 218 < 220 \text{ kPa}$ 不需振冲密实	16 067

5 结语

1) 墙后有填土的重力式码头暗基床, 抛石基床最大应力扩散角与基床顶面应力大小和基床厚度关系密切, 两者基本呈线性增长的关系; 顶面应力越大, 扩散角越宽; 反之, 基床厚度越厚, 扩散角越小。

2) 对于基床厚度 < 3 m 的抛石基床, 有限元分析与现行规范计算的基床前肩应力扩散角约 56°, 较接近, 基槽前底边线距墙前趾水平距离 1.5*d*, 现行规范结果合理; 当基床厚度 ≥ 3 m 时, 有限元分析与现行规范计算结果相差较大, 分析结果表明基床前肩应力扩散角约 45°, 基槽前底边线距墙前趾水平距离约为 1.0*d*, 在设计基槽开挖时, 开挖底边线距墙前趾水平距离可适当减小, 从而减少开挖和回填量; 后肩应力扩散两种计算方法基本吻合, 应力扩散角约 26°, 后底边线距墙后踵水平距离为 0.5*d*。

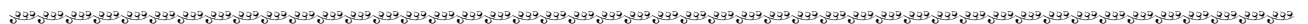
3) 规范中基床底面应力呈“梯形”, 最大应力出现在前肩底部, 当基床厚度较薄时, 该应力扩散是合理的, 随着基床厚度的增加, 基床应力分布趋向均匀, 呈“凹形”, 最大基床应力位于基床中部。

4) 抛石基床对平衡基床顶面的不均匀应力、使其均匀地传递至下部持力层有着重要的作用, 现行规范基本未考虑这一点。

参考文献:

[1] 王晓谋, 尉学勇, 魏进, 等. 硬壳层软土地基竖向附加应力扩散的数值分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007(3): 37-41.
 [2] 秦川. 重力式码头抛石基床应力分析[D]. 天津: 天津大学, 2007.
 [3] JTS 167-2—2009 重力式码头设计与施工规范[S].

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 49 页)

参考文献:

[1] 耿宝磊, 刘海源, 戈龙仔, 等. 日本 PARI 大比尺波浪水槽(LHGF)考察学习报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2012.
 [2] 陈汉宝, 郑宝友. 水槽造波机参数确定及无反射技术研究[J]. 水道港口, 2002, 23(2): 60-65.
 [3] 耿宝磊, 孟祥玮, 刘海源, 等. 日本港湾空港技术研究所大规模波动地盘水路介绍[C]//中国海洋工程学会. 第 16 届中国海洋(岸)工程会议文集. 青岛: 海洋出版社, 2013.
 [4] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 交通部天津水运工程科学研究所水运工程应用基础技术实验室工程可行性研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2009.

[5] 商雪, 李树森, 朱国良, 等. 吸收式造波机控制系统的研究与设计[J]. 港工技术, 2009, 46(3): 8-10.
 [6] 商雪, 李树森. 电动造波机的研究与设计[J]. 港工技术, 2008(2): 27-30.
 [7] 栾亮亮. L 型港池吸收式造波机系统的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2010.
 [8] 陈汉宝, 刘海源, 曹玉芬. 单方向不规则波模拟与统计中的几个问题[J]. 水道港口, 2003, 24(4): 167-173, 209.
 [9] 高杰. 水槽无反射造波理论的研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2006.
 [10] 姚远, 蔡树群, 王盛安. 海啸波数值模拟的研究现状[J]. 海洋科学进展, 2007, 25(4): 487-494.

(本文编辑 郭雪珍)