



## 重力式码头抛石基床内部滑移破坏研究<sup>\*</sup>

只红茹<sup>1</sup>, 别社安<sup>1</sup>, 任增金<sup>2</sup>

(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:** 现行规范要求对抛石基床的顶面和底面进行水平抗滑稳定性验算, 而不考虑抛石基床的内部滑移破坏情况, 当基床较薄时, 这样的规定可以保证抛石基床的安全性; 当抛石基床比较厚时, 基床后侧水平土压力作用不能忽略, 基床内部可能会存在水平滑移面。通过模型实验和有限元软件 PLAXIS 的数值分析, 证明了厚基床内部存在滑移面, 建议在验算基床抗滑稳定性时要考虑基床前后土压力作用。

**关键词:** 重力式码头; 抛石基床; 滑移稳定性

**中图分类号:** U 656.1<sup>11</sup>

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2009)01-0050-07

### On sliding failure in rubble Bed of gravity wharf

ZHI Hong-ru<sup>1</sup>, BIE She-an<sup>1</sup>, REN Zeng-jin<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** It is stipulated in current codes to check the resistance to sliding on the top and bottom of the rubble bed, with no consideration of sliding failure inside the rubble bed. When the bed is thinner, such provision can guarantee the safety of the rubble bed; but when the bed is thicker, the horizontal earth pressure at the back of the rubble bed shall not be neglected, since there possibly appears a horizontal slip plane. The result of model experiment and numerical analysis by PLAXIS revealed that there is a slip plane in the thick bed. Thus it is suggested to consider the earth pressure in the front of and at the back of the bed when checking the bed's resistance to stability.

**Key words:** gravity wharf; rubble bed; resistance to stability

现行 JTJ 290—1998《重力式码头设计与施工规范》中, 要求对抛石基床的顶面和底面进行水平抗滑稳定性验算, 而不考虑抛石基床的内部滑移破坏情况。在验算抛石基床底面的水平抗滑稳定性时, 抛石基床计算区域的后侧线从重力式结构的后趾沿 45°角向前下方延伸至与抛石基床底面相交, 在该计算面上, 不考虑任何作用力对抛石基床计算区域的作用<sup>[1-2]</sup>。当抛石基床较薄时, 这些计

算内容和计算假定对重力式码头抛石基床的安全性尚未出现明显影响。

当前, 一方面重力式码头向大型深水泊位发展, 另一方面, 在地基承载力不是很高的地方, 也要求建造重力式码头, 这样, 由于地基承载力的要求, 重力式码头抛石基床的厚度就会较大, 抛石基床后侧的水平土压力强度也会较大。该作用力不会在较小的范围内传递到地基土中, 这样,

收稿日期: 2006-07-19

<sup>\*</sup> 基金项目: 交通部重力式码头修编资助项目。

作者简介: 只红茹(1981—), 女, 在读硕士研究生, 从事港口、海岸及近海工程的研究。

现行规范规定的抛石基床计算域内会存在抛石基床后侧的水平土压力作用, 当抛石基床的厚度越大时, 这种水平土压力作用可能也会越大, 在该水平土压力作用下, 抛石基床内部可能会存在近似于水平的滑动面, 这点是现行规范中没有考虑的。本文要对抛石基床内部是否出现水平的滑动面以及是否需要考虑基床前后侧土压力进行探讨。

1 模型实验

实验在天津大学港口工程结构实验室进行, 所用实验槽尺寸为: 高×宽×长=1.2 m×1.2 m×2.5 m。荷载通过单块尺寸为长×宽=21 cm×15 cm, 重量为 20 kg 的砝码, 35 kg 的胶皮板以及 100 kg 的钢板施加。根据实验室条件, 选择尺寸为高×宽×长=0.8 m×1.2 m×0.45 m 的木箱, 箱内回填干砂, 干砂的内摩擦角为 32°, 重度  $\gamma=18\text{ kN/m}^3$ 。共设计了 3 种实验方案, 实验 1: 箱后回填砂 50 cm (图 1); 实验 2: 箱后回填砂 20 cm (图 2); 实验 3: 箱后不回填砂 (图 3)。每种实验重复做 3 次, 在箱后和基床内部埋设 8 个压力盒传感器, 每个测点记录 2 个压力值, 取平均值。其传感器分布如图 1、2、3 所示, 施加的可变荷载大小见表 1。

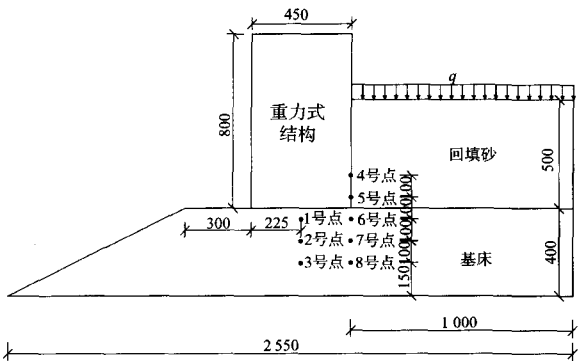


图 1 实验 1

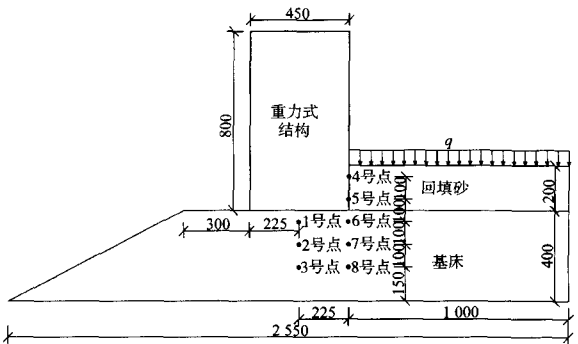


图 2 实验 2

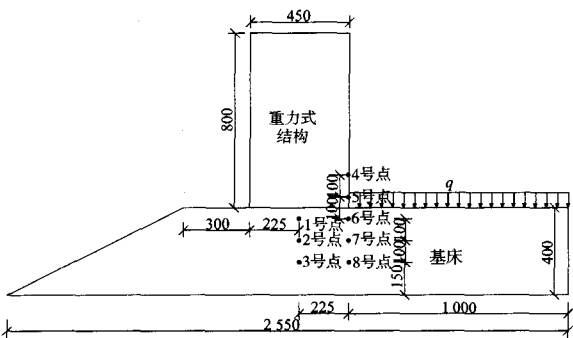


图 3 实验 3

表 1 可变荷载值

实验状态	可变荷载 $q/\text{kPa}$
加完第一层砝码	6.22
加完第二层砝码	12.44
加完第三层砝码	18.67
加完第四层砝码	24.89
加完第五层砝码	31.11
加完第六层砝码	37.33
加完 2 块钢板	44.11
加完 6 块钢板	52.99
加完 10 块钢板	61.87
加完 14 块钢板	70.75
加完 18 块钢板	79.63
加完 10 块胶皮	89.73

2 数值模拟

本文采用弹塑有限元法<sup>[3-4]</sup>的思想, 用有限元软件 PLAXIS 对重力式码头抛石基床进行计算分析。在本构模型中, 假设抛石基床材料为均质连续介质, 材料只能承受压应力, 不能承受拉应力。通过数值模拟计算, 可以得到抛石基床前后侧土压力分布情况以及抛石基床失稳破坏路径。

2.1 PLAXIS 程序简介

PLAXIS 程序是荷兰的岩土工程有限元软件, 能够模拟复杂的工程地质条件, 尤其适合于变形和稳定分析。PLAXIS 程序能够计算 2 类工程问题, 即平面应变问题和轴对称问题。

2.1.1 本构模型

本文采用 PLAXIS 的线弹性模型、摩尔-库仑模型进行分析计算。

2.1.1.1 线弹性模型 (Linear Elastic Model)

重力式结构的本构关系简化为线弹性模型。该模型参数包括压缩模量  $E$ , 重度  $\gamma$ , 泊松比  $\mu$ 。

### 2.1.1.2 摩尔-库仑模型 (Mohr-Coulomb Model)

土体是否破坏采用摩尔-库仑破坏准则来进行判别。一旦土体内任意平面上的剪应力达到了土的抗剪强度，土就发生破坏，而任意平面上的抗剪强度只是该面上法向应力函数，即：

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

式中： $c$  和  $\phi$  为土体强度参数。

摩尔-库仑模型参数包括干重度  $\gamma_{\text{unsat}}$ ，饱和重度  $\gamma_{\text{sat}}$ ，压缩模量  $E$ ，泊松比  $\mu$ ，黏聚力  $c$ ，摩擦角  $\phi$ 。

### 2.1.2 界面单元

为了模拟结构与土的相互作用，PLAXIS 程序引入了界面单元的概念。用一个弹塑性模型描述界面的性质，来模拟土与结构侧面的相互作用，并用  $R_{\text{inter}}$  反映两者相互作用的程度。界面单元的强度等于周围土体的强度乘以土与界面单元的摩擦系数  $R_{\text{inter}}$ 。当土与结构变形一致，两者之间没有相对滑动时， $R_{\text{inter}}=1.0$ ；而当两者有相对滑动时，界面单元的强度低于周围土体的强度， $R_{\text{inter}}<1$ 。一般地，对于真正的土与结构相互作用的问题，界面单元比周围土体软弱， $R_{\text{inter}}<1$ 。在本文中，根据 PLAXIS 程序中推荐的各种模型参数，取  $R_{\text{inter}}=0.6$ 。

当界面单元为弹性时，剪应力为：

$$|\tau| < \sigma_n \tan \phi_i + c_i \quad (2)$$

当界面单元为塑性时，剪应力为：

$$|\tau| = \sigma_n \tan \phi_i + c_i \quad (3)$$

式中： $\phi_i$  和  $c_i$  分别为界面单元的摩擦角和黏聚力； $\sigma_n$  为作用在界面单元上的正应力； $\tau$  为剪应力。

### 2.1.3 破坏分析方法

在工程中，安全系数通常被定义为破坏荷载与工作荷载的比值。在岩土工程中，这样的定义并不很有效，安全系数的一种更恰当的定义方式应运而生：

$$k = \frac{S_{\text{能承受的最大荷载}}}{S_{\text{平衡所需要的荷载}}} \quad (4)$$

式中： $S$  代表剪应力。真实强度与计算所得的最小平衡强度的比值就是岩土工程中通常所使用的安全系数。利用标准的库仑条件，安全系数可以表示为下式：

$$k = \frac{c + \sigma_n \tan \phi}{c_r + \sigma_n \tan \phi_r} \quad (5)$$

式中： $c$  和  $\phi$  为输入的强度参数； $\sigma_n$  是实际的法向应力分量；参数  $c_r$  和  $\phi_r$  是刚好维持土体平衡所需的衰减后的强度参数。以上所依据的原则基于 Phi-c-reduction 方法，Phi-c-reduction 是 PLAXIS 中计算安全系数的一种可行性选项，这种方法在 PLAXIS 中被用来计算整体安全系数。在这种方法中，黏性系数和切向摩擦角以同样的比例减小：

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan \phi_{\text{input}}}{\tan \phi_{\text{reduced}}} = \frac{c_{\text{input}}}{c_{\text{reduced}}} \quad (6)$$

式中：带有下标‘input’的强度参数表示输入值；而带有下标‘reduced’代表分析过程中所使用的衰减值。与其他的总增量不同，强度参数的衰减由总乘数  $\Sigma M_{sf}$  控制， $\Sigma M_{sf}$  在计算开始时被设置为 1.0，来将所有的强度参数的原始值都设为它们没有衰减的值。强度参数自动连续衰减直到结构发生破坏。此时，可以得到安全系数值：

$$SF = \frac{\text{可以承受的强度}}{\text{破坏时的强度}} = \text{结构破坏时的 } \Sigma M_{sf} \text{ 值} \quad (7)$$

本文利用 Phi-c-reduction 方法来模拟抛石基床的滑移破坏情况。

### 2.2 数值分析

将结构看作是平面应变问题，采用平面 15 结单元进行网格划分，模型采用的参数见表 2 和表 3。

表 2 重力式结构(线弹性模型)的参数

轴向刚度 $EA/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	抗弯刚度 $EI/(\text{kN} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	厚度 $d/\text{m}$	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 $\mu$
$1.5 \times 10^9$	$3.125 \times 10^5$	0.05	0	0

表 3 土体模型参数

土体类型	土体模型	干重度 $\gamma_{\text{dry}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和重度 $\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩模量 $E/\text{kPa}$	泊松比 $\mu$	粘聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$
干砂	摩尔-库仑模型	18	21	$2.0 \times 10^4$	0.3	0	32

2.2.1 实验 1

通过软件分析, 结构断面图和网格单元图分别见图 4、5, 各断面应力图见图 6, 图 7 为滑移破坏线, 安全系数见图 8。

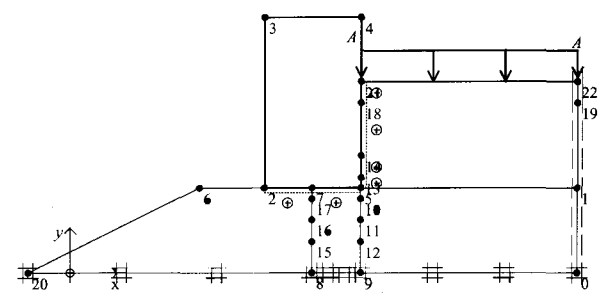


图 4 实验 1 结构断面图

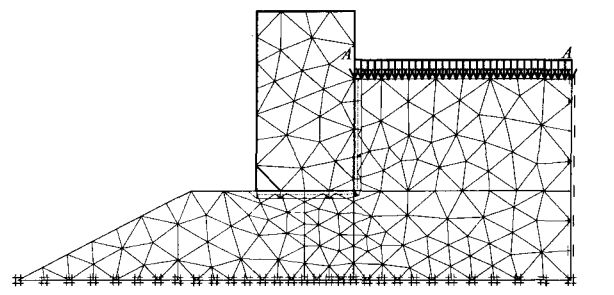


图 5 实验 1 单元网格图

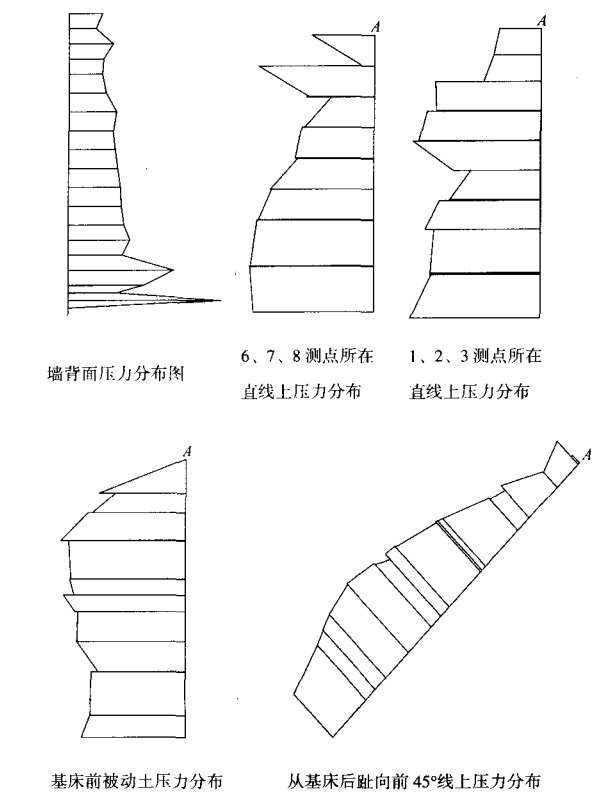


图 6 各断面应力分布图

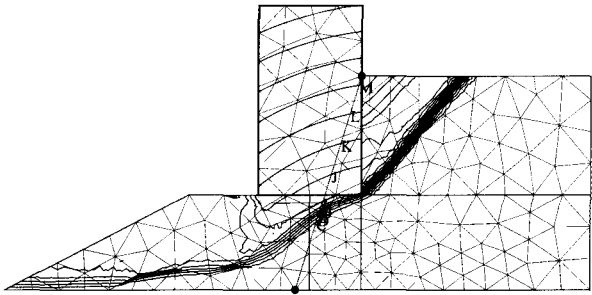


图 7 滑移破坏线 ( $q=6.22\text{ kPa}$ )

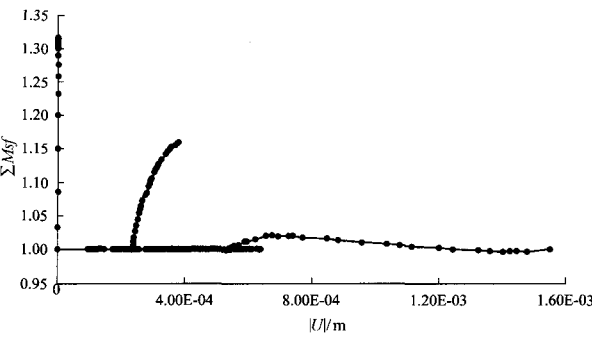


图 8 安全系数变化图

(从上到下依次为结构安装完毕, 回填砂完毕,  $q=6.22\text{ kPa}$ )

2.2.2 实验 2

通过软件分析, 结构断面图和网格单元图分别见图 9 和 10, 各断面应力图见图 11, 图 12 为滑移破坏线, 安全系数见图 13。

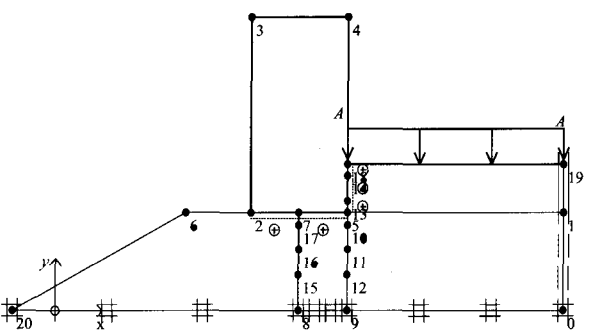


图 9 实验 2 结构断面图

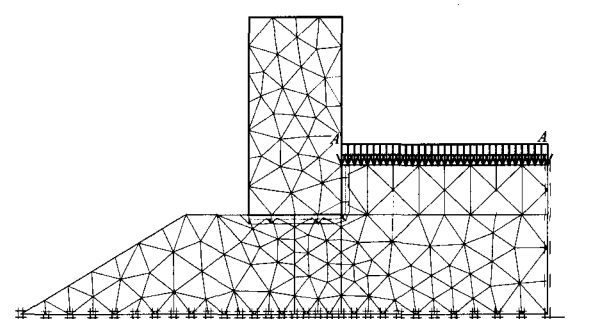


图 10 实验 2 单元网格图

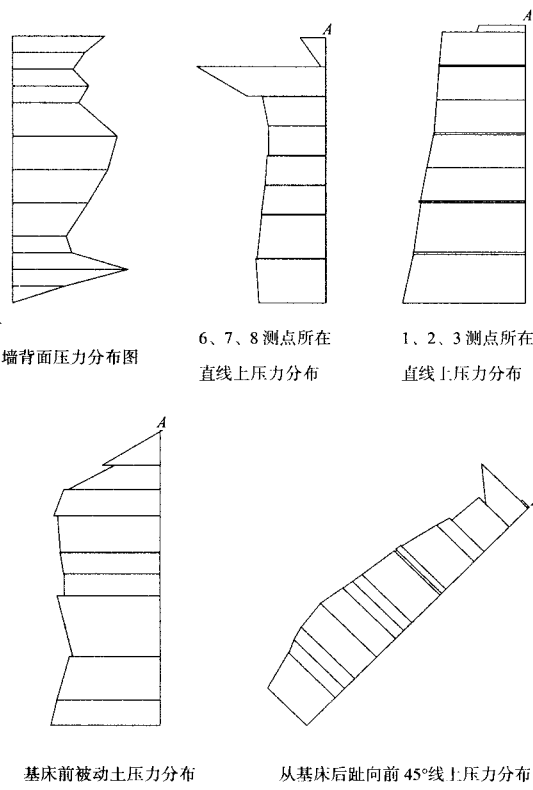


图 11 各断面应力分布图

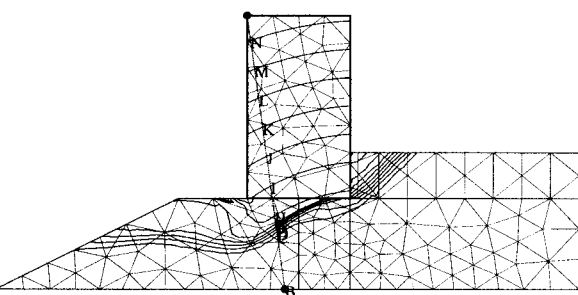


图 12 滑动破坏线 ( $q=31.11$  kPa)

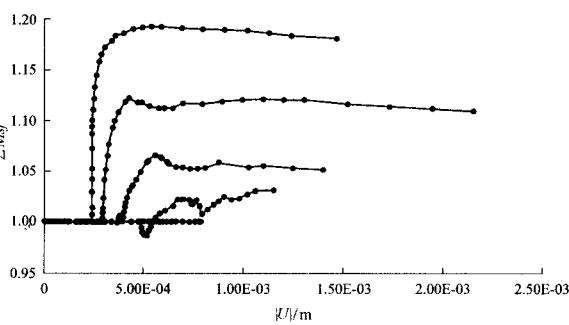


图 13 安全系数变化图

(从上到下依次为  $q=12.44, 18.67, 24.89, 31.11$  kPa)

2.2.3 实验 3

通过软件分析, 结构断面图和网格单元图分

别见图 14、15, 各断面应力图见图 16, 图 17 为滑动破坏线, 安全系数见图 18。

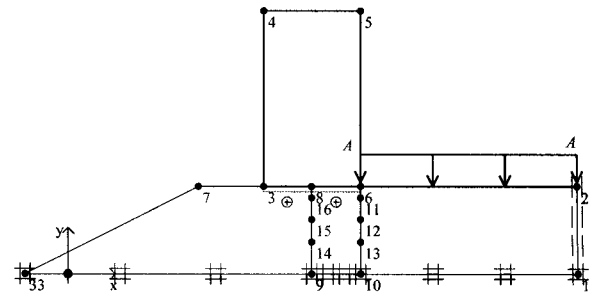


图 14 实验 3 结构断面图

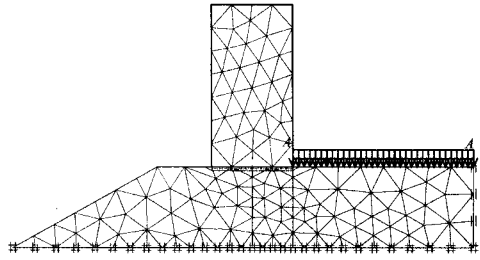


图 15 实验 3 单元网格图

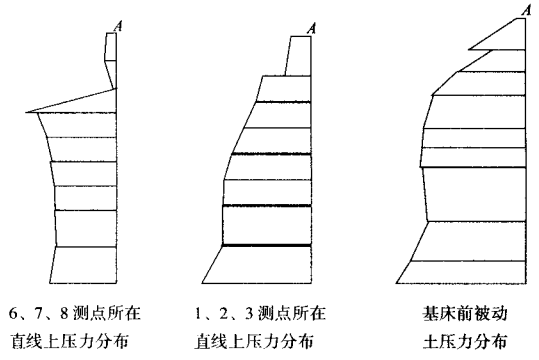


图 16 各断面应力分布图

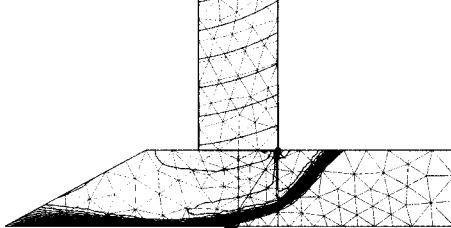


图 17 滑动破坏线 ( $q=79.63$  kPa)

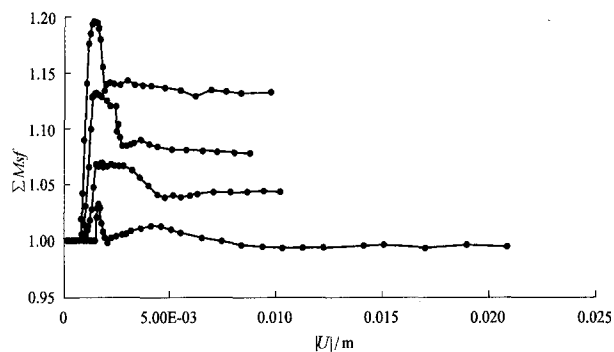


图 18 安全系数变化图

(从上到下依次为  $q=61.87, 70.75, 79.63, 89.73$  kPa)

3 结语

3.1 物模、数模及理论计算结果比较

理论计算采用现行规范推荐的土压力计算公式, 计算主动土压力时, 考虑抛石基床后面的土压力; 计算抛石基床前面被动土压力时, 因为结构处于临界滑移状态, 故不乘以 0.3 的折减系数。3 个实验的物模、数模及理论计算结果比较见图 19、20、21, 被动土压力的数模和理论计算结果比较见图 22。

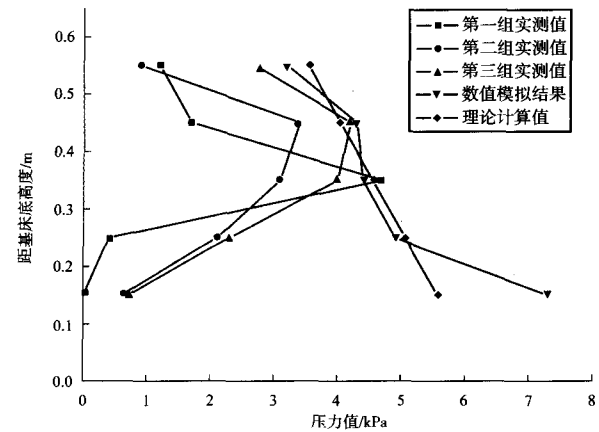


图 19 实验 1 各种结果比较

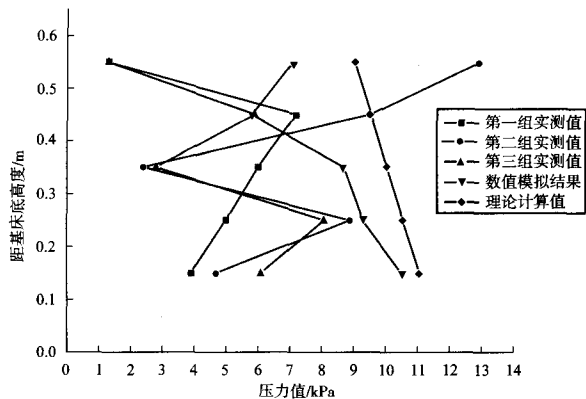


图 20 实验 2 各种结果比较

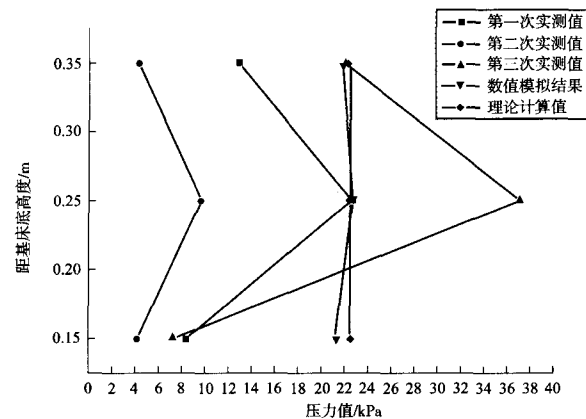


图 21 实验 3 各种结果比较

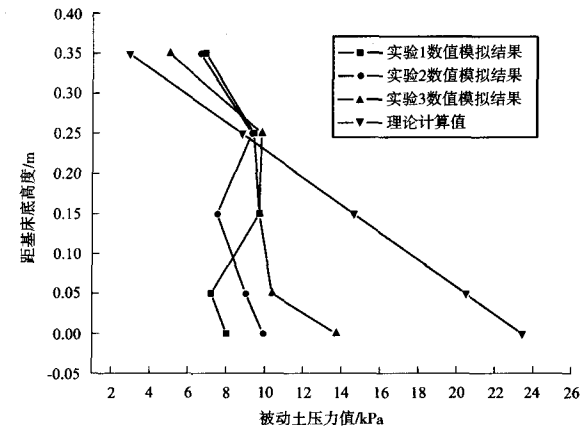


图 22 被动土压力结果比较

3.2 结语

通过物理模型实验和有限元分析, 得到以下结论:

- 1) 按现行规范要求, 在验算抛石基床底面的水平抗滑稳定性时, 从重力式结构的后趾沿 45°角向前下方延伸至与抛石基床底面相交的计算面上, 不考虑任何作用力对抛石基床计算区域的作用。从有限元分析结果看, 当抛石基床比较厚时, 该计算面上作用的土压力不能忽略。
- 2) 通过分析滑移破坏线, 可以看出当重力式结构出现滑移破坏时, 破坏线基本上通过结构后趾沿 45°线向下, 并且成水平滑移状态。同时还可以明显看出滑移破坏基本出现在抛石基床的内部, 这说明当抛石基床比较厚时, 不能只验算沿基床顶面和基床底面的滑移稳定性, 还必须要验算内部滑移稳定性。
- 3) 当抛石基床比较厚, 验算基床底面和内部滑移稳定性时, 必须考虑基床前后土压力作用。

按现行规范推荐的被动土压力计算方法，土压力分布呈三角形；3 种实验的数值模拟结果显示被动土压力先在一段距离内线性增加，和理论计算结果比较吻合，而后土压力值不再变化，在基床底部又有增大的趋势，这和理论分布是矛盾的。

4) 抛石基床后侧土压力分布从实测数据看，先增大，在靠近基床底部又减小，这也和理论上土压力呈三角形分布矛盾。

由于实验条件的限制，同一种实验的几组实测数据之间，个别测点的离散性很大，不利于总结土压力分布规律。本次实验基床和回填料采用的都是一种干砂，且没有水位影响，而实际工程地质复杂，且水位影响不能忽略，实际工程土压力分布规律还有待进一步探讨。

建议在今后做物模实验时，土质资料尽量结合实际工程，可能的条件下要考虑水位的影响，并结合现有实际工程的测量数据，总结出厚抛石基床前后土压力分布形式，修正现有土压力计算公式。

参考文献：

[1] JTJ 290—1998 重力式码头设计与施工规范[S].  
[2] 邱驹. 港工建筑物[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.  
[3] Bathe, K. J. Finite Element Procedures in Engineering Analysis[M]. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1982.  
[4] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

(原文编辑 蒋运茂; 本期编辑 武亚庆)

评委点评：

重力式码头是码头建筑物主要结构型式之一，其特点是依靠码头结构重量保持稳定，并要求地基有相应的强度来保证建筑物的稳定性，因此要求有比较好的地基。基床可扩大地基承载面积，降低地基面的荷载强度，减少地基沉降量，其稳定性关系到整个码头的安全。

现行规范只要求对抛石基床的顶面和底面进行水平抗滑稳定性验算，而不考虑抛石基床的内部滑移破坏情况。本文通过模型实验和有限元的数值模拟分析，证明了当基床较薄时，这样的规定可以保证抛石基床的安全性。但当抛石基床比较厚时，基床后侧水平土压力作用不能忽略，基床内部存在滑移面，建议在验算基床抗滑稳定性时要考虑基床前后土压力作用，这是现行规范中没有考虑的。

当前，一方面重力式码头向大型深水泊位发展。另一方面，在地基承载力不是很高的地方，也要求建造重力式码头，这样，由于地基承载力的要求，重力式码头抛石基床的厚度就会较大，抛石基床后侧的水平土压力强度也会较大，本文的分析成果对当前重力式码头设计有重要的借鉴意义。

本文内容丰富，数据翔实可靠，理论联系实际，启发性强，是一篇优秀的科技论文。

顾倩燕

二〇〇八年十二月

评委简介：

顾倩燕，研究员，一级注册结构、注册造价工程师，中船第九设计研究院工程有限公司水工所总工程师，上海市第十三届人大代表，中国造船工程学会近海工程学术委员会学术委员，以第一完成人或参与人身份曾获得建设部优秀工程设计金质奖等多项高级别奖项。