

重力式码头抛石基床内部滑移破坏研究

贺立¹, 别社安², 齐越³

(天津大学建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 研究讨论了重力式码头厚抛石基床内部水平滑移破坏问题, 并提出了一套简化的计算分析方法。利用原规范中的计算方法和考虑基床后方土压力的计算方法计算分析了重力式码头厚抛石基床的内部滑移破坏情况, 并将两种方法所得的结果与采用 Plaxis 弹塑性有限元数值分析结果相比较, 结果表明: 考虑基床后方土压力的新计算方法所得结果与 Plaxis 分析结果吻合较好, 同时研究显示在抛石基床内部存在着潜在的滑移破坏面, 该破坏面的位置与码头结构的高度和宽度、后方荷载和土体的参数有关。

关键词: 重力式码头; 抛石基床; 滑移稳定性; Plaxis 有限元分析

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)01-0066-05

作者简介: 贺立(1980-), 男, 广西柳州人, 硕士研究生, 主要从事港工结构方面的研究。E-mail:enyao_zha@yahoo.com.cn。

Study of slipping in the rubble-bedding of gravity quays

HE Li¹, BIE She-an², QI Yue³

(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Horizontal slipping in the deep rubble-bedding of gravity quays was studied and a simplified method was put forward. The slipping was respectively analyzed by use of the method of original standard and the method considering the earth pressure on back of the rubble-bedding. The results of the two methods were compared with those of the elastic-plastic FEM called Plaxis. It was indicated that the result of the method considering the earth pressure on back of the rubble-bedding was coincident with that of Plaxis. There was a potential slipping plane in the rubble-bedding and its position was related to the height and width of the structure, load and parameters of the soil.

Key words: gravity quay; rubble-bedding; stability of slipping; Plaxis

0 前言

众所周知, 在非岩石地基上建重力式码头, 主要是解决地基承载力问题, 要使地基满足承载力要求, 必然要加深抛石基床的厚度, 随着抛石基床厚度的增加, 基床后方的土压力是否会对抛石基床的稳定性构成影响, 在现行的规范^[1]中没明确的说明。目前, 规范只要求验证重力式码头沿墙底面和基床底面的抗滑稳定性, 而对于沿基床内某一水平面上的抗滑稳定性, 没具体的要求, 只是强调“在当基床肩宽较大时, 应考虑建筑物在基床内部滑动的可能性”, 而且还没具体的计算方法。由于重力式码头上部结构很大, 产生较大的基底应力, 基底应力沿前后趾 45° 方向进行扩散, 因此为满足地基土的承载力, 就要加大抛石基床的厚度。当验算基床底面抗滑稳定性时, 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 45° 斜面上, 不考虑任何作用力对抛石基床计算区域的作用, 而计算

码头前方的被动土压力时则选取 0.3 的折减系数^[2], 对较薄的抛石基床来说这样的简化处理基本符合实际情况。当抛石基床逐渐增厚, 抛石基床后方的土压力作用可能会逐步增加, 到一定程度后就不可忽略了, 其存在会对基床内部和底部的破坏形态产生影响。这点在现行规范中还没考虑。为进一步丰富和完善规范, 使其向更科学规范高效安全的目标发展, 很有必要建立一套重力式码头厚抛石基床滑移破坏计算模式。

1 抛石基床地基应力和稳定性问题的有限元数值分析

采用弹塑性有限元法^[3-4]对重力式码头结构体系进行计算分析。抛石基床和重力式结构后方的回填体采用理想弹塑性本构模型和莫尔-库仑破坏准则来模

基金项目: 交通部重力式码头修编资助项目

收稿日期: 2005-10-20

表 1 土体模型参数

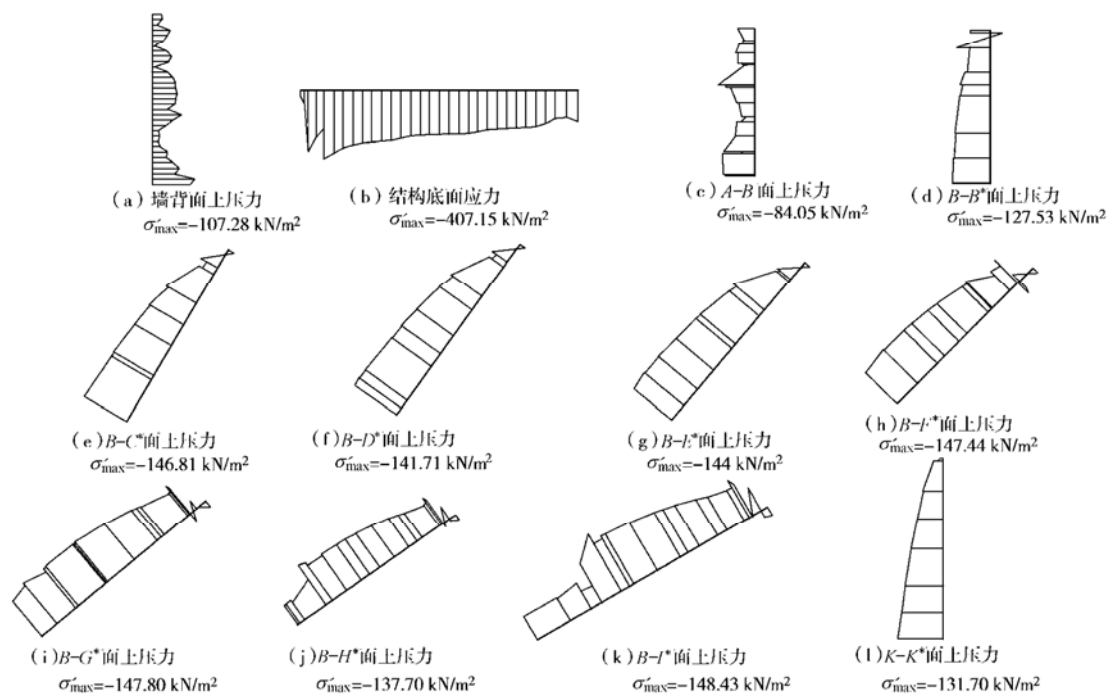


图 5 各面应力图

Fig. 5 Stresses of each plane

表 3 各面上的水平土压力值

Table 3 Earth pressures of each plane

位置	码头后墙背	A - B (后趾)	B - B* (0°)	B - C* (30°)	B - D* (35°)	B - E* (40°)	B - F* (45°)	B - G* (50°)	B - H* (55°)	B - I* (60°)	K - K* (墙前)
合力(kN · m ⁻¹)	-863.3	-968.9	1400.6	1399.7	1482.9	1522.9	1561.4	1576.4	1436.1	1238.1	1230.7

表 4 理论计算的土压力值

Table 4 Theoretical earth pressures of each plane

位置	墙后主动土压力	基床内部水平土压力 (深度为 14 m)	折减后墙前被动土压力 (深度为 14 m)
采用基床后方土体参数计算	920.1	2547.8	1080.3
采用基床块石的参数计算	920.1	1067.3	4031.5

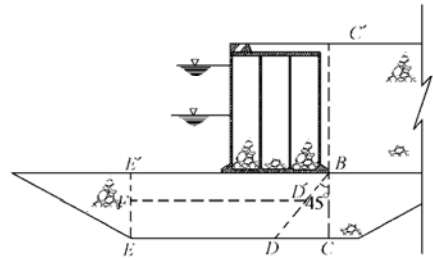


图 6 规范的计算图示

Fig. 6 Calculating section in the criterion

面相交的斜面为抛石基床内的计算面,在此计算面上,不计算任何水平土压力作用,同时计算抛石基床前方的被动土压力时,乘 0.3 的折减系数。见图 6。然而 Plaxis 数值分析结果显示,在码头后趾 45°~50° 方向线面上存在较大水平土压力,因此新的计算模式中,当验算抛石计算内部水平滑移稳定性时,应考虑 45° 斜面上的水平土压力作用,并且在计算土压力值时,采用抛石基床两侧土体的参数。见图 7,滑移破坏面初步定为面 AC-CC'-C'F。由于计算选取的都是水平方

向的力,因此为便于计算,在不影响计算结果的前提下,可将被动土压力和主动土压力的计算面分别选为 AB 和 C'E;计算土压力时,利用抛石基床两侧土体的强度参数计算土压力值,其中被动土压力值需乘 0.3 的折减系数。分别验算基床顶面、内部和底部的水平滑移状况,3 种情况下的 μ 分别取为 0.6、0.8 和 0.53。

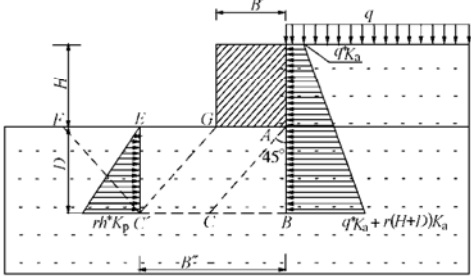


图 7 简化的计算图示

Fig. 7 Calculating section in simplified method

按上述计算模式,可分别得到他们各自的水平稳定安全系数随计算深度变化的规律。计算中通过变化

码头面载,使其中的一项安全系数为1.0。按现行规范的计算方法,图8显示,一定厚度的基床,其底部滑移安全系数大于其顶面的安全系数;图9显示,基床顶面的水平滑移安全系数低于基床内部的安全系数;基床内部和底部的滑移安全系数随着计算深度的增加而增加。最危险的滑移破坏面出现在基床顶面。

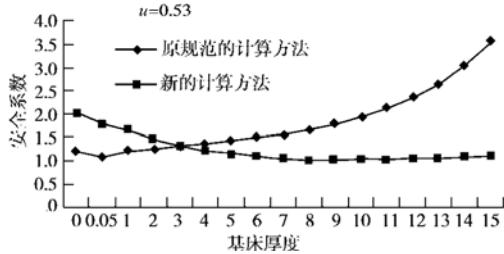


图8 基床底部滑移安全稳定性

Fig. 8 Stability of slipping on the bottom of the rubble-bedding

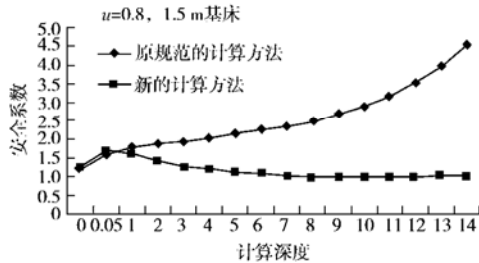


图9 基床内部滑移安全稳定性

Fig. 9 Stability of slipping in the rubble-bedding

按改进计算方法,通过不断增加后方荷载,使得在基床中某一深度出现安全系数临界值。从图8、9可看到,计算深度不断增加时,基床不同深度处的安全系数随深度的增加而发生先减小后增大的变化过程,算例中在8 m深处,基床内部水平滑移安全系数出现最小值,即基床内部存在潜在滑移面,其中计算

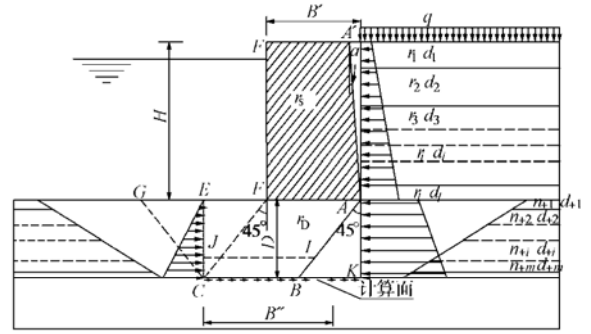


图10 考虑基床后方土压力的计算简图

Fig. 10 Calculating section considering the earth pressure on back of the rubble-bedding in simplified method

利用公式^[1]

$$\gamma_0 (\gamma_E E_H + \gamma_E E_{qH} + \phi \gamma_P P_B) \leq \frac{1}{\gamma_d} (\gamma_g G + \gamma_E E_v + \gamma_E E_{qv} + \phi \gamma_P P_{BU}) f. \quad (1)$$

可以得到

$$D \geq \frac{\gamma_E (\gamma_0 \gamma_d - f \tan \alpha) E_H}{\gamma_d B'' f} + \frac{\gamma_E \sum_{i=1}^n K_{ai} d_i (\gamma_d \gamma_0 \cos \alpha - f \sin \alpha)}{\gamma_d B'' f} q + \frac{\gamma_0 \gamma_d \phi \gamma_P}{f B'' \gamma_d} P_B - \frac{\phi \gamma_P}{\gamma_d B''} P_{BU} - \frac{B' \gamma_s}{B'' \gamma_d} \gamma_G H, \quad (2)$$

$$\text{式中, } E_H = \left(\sum_{i=1}^{n-1} \gamma_i d_i \sum_{j=i+1}^n K_{aj} d_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \gamma_i d_i^2 K_{ai} - \sum_{i=1}^{m-1} \gamma_i d_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \gamma_i d_i^2 K_{pi} \right) \cos \alpha, \quad H = \sum_{i=1}^l d_i, \quad K_{pi} = K'_{pi} K_z (K_z = 0.3),$$

$$n = m + l, \quad D = \sum_{i=l+1}^n d_i \text{ 或 } D = \sum_{i=1}^m d'_i, \quad \gamma_s \text{ 为结构重度, } H \text{ 为结构高度, } B' \text{ 为结构宽度, } B'' \text{ 为计算等效宽度, } q \text{ 为后方荷载, } m \text{ 为地基土层数, } l \text{ 为回填土层数, } d_i \text{ 为第 } i \text{ 层土厚度, } \gamma_i \text{ 为第 } i \text{ 层土重度, } \gamma_d \text{ 为抛石重度, } D \text{ 为基}$$

床内部土压力的简化计算方法,其土压力值比较接近,且基床后的被动土压力值相差也不大,仅基床内的水平土压力相差较大,简化计算的值偏大,实际工程计算中应乘一定的折减系数或用基床块石参数来计算水平土压力。通过比较可知,考虑抛石基床后方水平土压力的简化计算方法所得结果与有限元分析结果吻合较好。

2.2 基床中的最危险破坏面深度及其影响因素

对于任意断面型式和地质状况的重力式码头,如图10所示,可以通过理论推导得到其抛石基床内部潜在水平滑移面深度的表达式。

$$K = \mu (\gamma_G \gamma_1 B' H + \gamma_G \gamma_2 B'' D) / \gamma_0 \gamma_d [(\gamma_E q K_{a外} H + \frac{1}{2} (\gamma_E \gamma_2 H K_{a内} + \gamma_E \gamma_2 (H + D) K_{a内}) D / 2 + \gamma_E \gamma_2 H^2 K_{a外} / 2 - \gamma_E \gamma_2 D^2 K_p / 2)]. \quad (3)$$

滑移安全系数关系式为

$$K = \mu (\gamma_G \gamma_1 B' H + \gamma_G \gamma_2 B'' D) / \gamma_0 \gamma_d [(\gamma_E q K_{a外} H + \frac{1}{2} (\gamma_E \gamma_2 H K_{a内} + \gamma_E \gamma_2 (H + D) K_{a内}) D + \frac{1}{2} \gamma_E \gamma_2 H^2 K_{a外} - \frac{1}{2} \gamma_E \gamma_2 D^2 K_p)] \geq 1.0. \quad (4)$$

设:

$$y = \gamma_0 \gamma_d \gamma_E \gamma_2 (K_p - K_{a(i)}) D^2 + (2\mu \gamma_2 \gamma_G B'' - 2\gamma_0 \gamma_d \gamma_E q K_{a(i)} - 2\gamma_0 \gamma_d \gamma_E \gamma_2 H K_{a(i)}) D + 2\mu \gamma_1 \gamma_G B' H - 2\gamma_0 \gamma_d \gamma_E q K_{a(e)} H - \gamma_0 \gamma_d \gamma_E \gamma_2 K_{a(e)} H^2 \geq 0, \quad (5)$$

式(5)求解得

$$D \geq \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad 0 \leq D \leq \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (6)$$

其中, $a = \gamma_0 \gamma_d \gamma_E \gamma_2 (K_p - K_{a(i)})$, $b = 2\mu \gamma_2 \gamma_G B'' - 2\gamma_0 \gamma_d \gamma_E q K_{a(i)} - 2\gamma_0 \gamma_d \gamma_E \gamma_2 H K_{a(i)}$, $c = 2\mu \gamma_1 \gamma_G B' H - 2\gamma_0 \gamma_d \gamma_E q K_{a(e)} H - \gamma_0 \gamma_d \gamma_E \gamma_2 K_{a(e)} H^2$ 。

从式(2)、(6)可以看到, 抛石基床内部水平滑移破坏深度与结构高度 H , 宽度 B' , 计算等效宽度 B'' , 后方荷载 q 和回填土参数 (K_a , K_p , γ_i) 有关。

若各参数取为: $H=15$ m, $B'=B''=12$ m, $q=220$ kN/m 和 $\gamma_1=\gamma_2=18$ kN/m³, 回填土采用 $\varphi=32^\circ$ 的干砂, 且不考虑分项系数, 则由式(6)可得到潜在破坏深度范围为 2.44 m $\leq D \leq 4.94$ m。同时通过式(4)可得到如图 11 所示的滑移安全系数—抛石基床计算深度关系图。

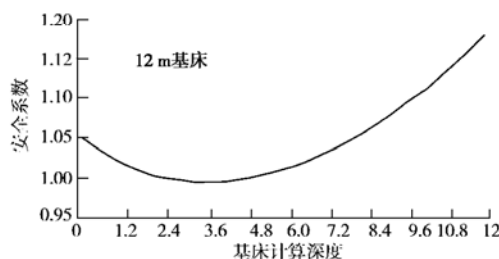


图 11 抛石基床内部滑移安全稳定性

Fig. 11 Stability of slipping in the rubble-bedding

3 结 论

(1) 现行规范的计算方法不考虑抛石基床两侧土体产生的土压力的影响, 不足以验算抛石基床内部水平滑移稳定性问题, 必须考虑抛石基床两侧土体产生的土压力的影响。

(2) 重力式码头厚抛石基床内存在潜在的滑移面, 滑移面经过码头后趾逐渐向前水平延伸, 在经过码头前趾后一定距离向上回归, 最后与基床顶面相交。

(3) 抛石基床内部潜在水平滑移面的深度受到上部结构的高度、等效宽度、后方荷载以及地基和回填土类型的影响。

(4) 抛石基床内部过后趾的各角度平面上的水平土压力值随角度的增加而发生先增大后减小的变化过程, 水平土压力极值出现在 $45^\circ \sim 50^\circ$ 区域的线面上。

(5) 可以根据图 10, 利用新的简化计算方法, 通过式(2)来验算重力式码头基床内部滑移稳定性。

(6) 抛石基床底部的滑移稳定性低于基床内部的滑移稳定性, 在基床设计与施工时需谨慎考虑。

参考文献:

- [1] JTJ290—98 重力式码头设计与施工规范[S]. 1998.(JTJ290—98 Design and construction code for gravity quay[S].1998.(in China))
- [2] 邱 驹. 港工建筑物[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.(QIU Ju. Harbor engineering structure[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2002.(in Chinese))
- [3] BATHE K J. Finite element analysis in engineering analysis[J]. Prentice-Hall, 1982.
- [4] 王勖成, 等. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.(WANG Xu-cheng, et al. Basic theory and numerical method of finite element methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.(in Chinese))
- [5] Introductory version of Plaxis code:[程序说明书]. Construction of a road embankment. PLAXIS BV, P.O.Box 572, 2600 AN Delft The Netherlands, 2000.
- [6] 中交第一航务工程勘察设计院. 天津港北大防波堤工程(一期)初步设计[R]. 2002.(China Communication First Design Institution of Navigation Engineering. Primary Design of Beida Breakwater Project (the first phase), Tianjin port [R]. 2002.(in Chinese))
- [7] VAN Langen H, VERMEER P A. Interface elements for singular plasticity points [J]. Int J Num Analyt Meth in Geomech, 1991,15: 301 - 315.
- [8] HIRD C C, KWOK C M. Finite element studies of interface behaviour in reinforced embankments on soft grounds[J]. Computers and Geotechnics, 1989,8: 111 - 131.
- [9] 连镇营, 韩国城, 等. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报, 2001,23(4):407 - 411.(LIAN Z Y, HAN G C, et al. Stability analysis of excavation by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001,23(4):407 - 411.(in Chinese))
- [10] 赵尚毅, 郑颖人, 等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002,24(3): 343 - 346.(ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, et al. Slope safety factor analysis by strength reduction FEM [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(3): 343 - 346.(in Chinese))
- [11] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报, 1997,3(2): 1 - 7.(SONG Er-xiang. Finite element analysis of safety factor for soil structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997,3(2): 1 - 7.(in Chinese))
- [12] 王元战, 王海龙, 付瑞清. 沉入式大直径圆筒码头稳定性计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2002,24(4): 417 - 420.(WANG Yuan-zhan, WANG Hai-long, FU Rui-qing. Methods of stability analysis of embedded large-diameter cylinder quay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(4): 417 - 420.(in Chinese))