



重力式码头基槽抛石体沉降量计算方法^{*}

张炜煌

(福建省交通规划设计院有限公司, 福建 福州 350004)

摘要: 针对重力式码头基槽抛石体的沉降量计算问题, 进行计算模型和计算方法研究。通过基槽抛石体原尺度块石的压缩试验, 得出多次加卸载情况下块石体的应力-应变关系, 基于此建立重力式码头基槽抛石体的沉降量计算模型。结合重力式码头的建造过程, 提出基槽抛石体的沉降量计算方法, 并利用实际工程现场观测数据回归出模型中的主要参数。结果表明, 模型计算结果与观测数据吻合。

关键词: 重力式码头; 基槽抛石体; 应力-应变关系; 沉降量

中图分类号: U 656.1+11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0099-05

Calculation method for subsidence of ripraps in foundation trench of gravity wharf

ZHANG Wei-huang

(Fujian Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350004, China)

Abstract: This paper focuses on the calculation model and method for the subsidence of ripraps in the foundation trench of a gravity wharf. By a compression test of full-scale riprap blocks in the foundation trench, this paper obtains the stress-strain relationship of the block stones under repeated loading and unloading and then uses the relationship to build a calculation model for the subsidence of the ripraps in the foundation trench of the gravity wharf. Taking into account the construction process of the gravity wharf, this paper proposes a calculation method for the subsidence of the ripraps in the foundation trench and obtains the key parameters of the model by regression with the data observed in the actual engineering field. The results show that the calculation results of the proposed model are consistent with the observed data.

Keywords: gravity wharf; riprap in foundation trench; stress-strain relationship; subsidence

根据《码头结构设计规范》^[1], 抛石基床应预留沉降量, 对于夯实的基床, 可仅按地基沉降量预留。工程实践表明, 对于经夯实的厚度不大的抛石基床, 由于其自身沉降量数值微小, 只按地基沉降量预留可以满足码头安全和使用要求。随着近年工程中重力式码头基槽开挖深度不断加大, 由抛石基床和其下部抛石换填层组成的基槽抛石体厚度也随之加大, 如福州港平潭港区金井作业区 1[#]~5[#]泊位工程平均基槽抛石体厚度达 31.5 m^[2], 夯实后基槽抛石体的竖向沉降量对于码头安全和

使用已不可忽略。但现行规范缺乏夯实基槽抛石体的施工期和使用期沉降量计算方法等规定, 在工程实践中该沉降量或被忽视, 或多靠设计和施工经验取值, 难以进行量化计算, 重要原因之一在于对夯实基槽抛石体的压缩变形特性研究与认识不足。

基槽抛石体的块石具有随机性、离散性和大尺度特性, 竖向沉降量问题难以通过地质勘探和试验测试的方式解决。郭林林等^[3]通过原尺度试验研究夯实后基槽抛石体的压缩变形特性, 其结

收稿日期: 2022-03-08

*基金项目: 福建省交通运输科技项目(201924)

作者简介: 张炜煌(1983—), 男, 高级工程师, 从事港口航道工程设计与咨询。

果为基槽抛石体的竖向沉降量计算研究提供基础。本文基于原尺度试验得到的抛石体的压缩变形特性曲线,结合基槽抛石体的应力历史,提出重力式码头基槽抛石体的沉降计算方法,可为重力式码头基槽抛石体施工期、使用期的沉降量预测与控制提供参考。

1 抛石体反复加卸载后的压缩变形特性

重力式码头基槽抛石体一般需要经过夯实处理,即反复加/卸载,后期随施工过程还需要分段加载,这使得其应力历史和变形特性更为复杂,给其沉降量计算带来难度。文献[3]通过原尺度试验研究,得到重力式码头抛石体所用块石组成的抛石体的多次加卸载的应力-应变关系曲线,如图1所示。可以看出,在前期加载的历史最大应力处,后期的加载曲线上有明显的拐点,拐点前后曲线均近似直线段,直线的斜率因加载和卸载作用次数的不同而不同。因此,可将抛石体的应力-应变曲线进行分段线性表示,即将前期的各个历史最大应力作为应力-应变曲线的分段点,各分段点间通过直线连接,统计该直线段对应的应力状态在加载以来出现的加载次数,根据加载次数确定直线斜率所对应的变形模量。

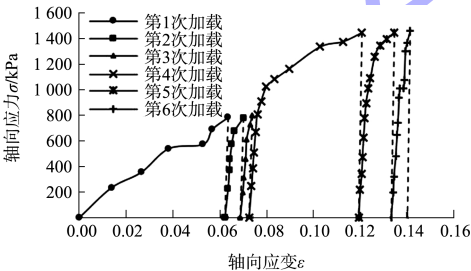


图1 抛石体多次加卸载的应力-应变关系曲线

通过对试验数据的分析发现,抛石体第2和第3次加载的压缩变形模量明显大于第1次加载,第3次加载后抛石体的压缩变形模量基本不变。试验还发现卸载时抛石体基本无回弹。

通过对多组试样和多次重复试验结果的统计分析,可将重复加卸载的抛石体的应力-应变曲线分段线性表示成图2所示的形式,其中实线为加载过程,虚线为卸载过程。加载过程有3种斜率

的直线段,分别对应于初次、再次和多次压缩变形模量,即 E_1 、 E_2 和 E_m 。图2中F点和C点的应力水平与前期加载的应力峰值点A点的应力水平相当,即 $\sigma_F = \sigma_C = \sigma_A$; G点的应力水平与前期加载的应力峰值点D点的应力水平相当,即 $\sigma_G = \sigma_D$ 。通过对试验数据的统计分析,得到 E_1 、 E_2 、 E_m 分别为11.5、150、184 MPa。

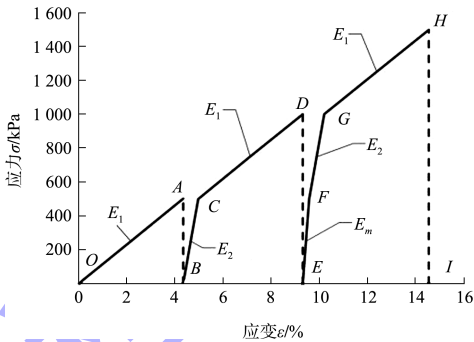


图2 抛石体多次加/卸载的应力-应变曲线分段线性拟合

需要指出的是,由于试验测试模型的尺寸和抛石手段与工程施工的差异,会导致试验测试得到的模型参数 E_1 、 E_2 和 E_m 与工程实际有差异,其中 E_1 的差异会较大, E_2 和 E_m 的差异较小。

2 抛石体沉降量计算模型与计算方法

2.1 抛石体沉降量计算模型

重力式码头施工和后期使用过程中,抛石体经历了以下加/卸载过程:

- 1) 基槽抛石体分层抛填和夯实,为多次加载和卸载过程。
- 2) 上部结构安装和建造(沉箱安装、墙后回填、胸墙和码头面层施工),为多次加载和卸载过程。
- 3) 使用期施加使用荷载,为多次加载和卸载过程。

如果利用图2的变形模型,重力式码头抛石体的沉降量计算模型可表示成图3所示的形式。OA段表示抛石体分层抛填和夯实,其斜率为初次压缩变形模量 E_1 ,AB段表示夯实卸载;BCD段表示上部结构安装和建造(沉箱安装、墙后回填、胸墙和码头面层施工),BC段的斜率为再次压缩变形模量 E_2 ,CD段的斜率为 E_1 ;DE段表示码头顶

面施加使用荷载，其斜率为 E_1 ， EF 段表示卸去码头顶面施加的使用荷载卸载； FG 段表示码头顶面再次施加使用荷载，其斜率为 E_2 ； G 点之后，表示码头面多次进行卸载和加载，加载段的斜率为多次压缩变形模量 E_m 。

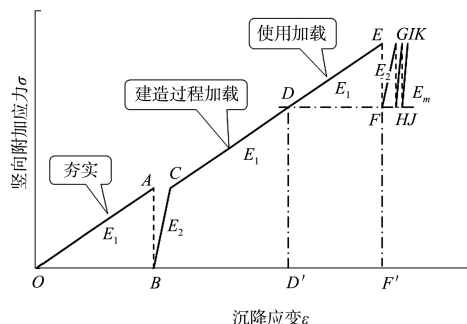


图3 重力式码头抛石体的竖向应力-应变关系模型

A 点的应力值表示抛石体夯实时所受到的等效静态夯实应力 σ_e 。已有文献对此进行过研究^[4-7]，室内锤夯试验测试得到的最大夯实应力为 280 ~ 380 kPa^[8]。抛石体的分层厚度、夯实方式、夯实能量、夯击遍数等都会对该参数产生影响。

D 点的应力值表示码头建成后抛石体内的附加应力值（不考虑抛石体的自重应力）； E 点的应力值表示码头面上使用荷载作用后的附加应力值。 F 、 H 、 J 点的应力值不低于 D 点的应力值。

图3的 OB 段对应的沉降量在抛石体的施工中已经完成和消除， BD 段对应的沉降量是上部结构安装和建造施工时产生的， $DEFG$ 段对应的沉降量是码头使用时产生的。后两部分沉降量需要合理估算，并在基槽抛石体施工中预留。

2.2 抛石体沉降量计算方法

抛石体内的附加应力随着埋深的加大会因为扩散而减小，抛石体的厚度较大时，需要分层计算其附加应力和沉降量。抛石体上层的附加应力大，层厚应小些；底层的附加应力小，层厚可以大些。

对于第 i 层抛石体，厚度为 h_i ，按《码头结构设计规范》计算出码头荷载作用下（施工期或使用期）该层顶面附加应力的最大值 σ_{imax} ，《码头结构设计规范》假定该最大值在沉箱前趾之前的抛石体中，但相关研究表明抛石体中实际的附加应力最

大值在沉箱正下方^[9]。无论抛石体中附加应力的分布形态如何，第 i 层抛石体顶面附加应力的最大值 σ_{imax} 肯定是对抛石体的最大沉降量影响最直接的因素，因此采用层顶面的 σ_{imax} 计算最大沉降量。

如果 σ_{imax} 位于图3所示模型的 BC 段，即 $\sigma_{imax} \leq \sigma_e (\sigma_A = \sigma_e)$ ，则该层抛石体的沉降量 δ_i 为：

$$\delta_i = \left(\frac{\sigma_{imax}}{E_2} \right) h_i \quad (1)$$

如果 σ_{imax} 位于模型的 CDE 段，即 $\sigma_{imax} > \sigma_e$ ，则该层抛石体的沉降量 δ_i 为：

$$\delta_i = \left(\frac{\sigma_e}{E_2} \right) h_i + \left(\frac{\sigma_{imax} - \sigma_e}{E_1} \right) h_i \quad (2)$$

如果 σ_{imax} 位于模型的 FG 段，可以先计算出 E 点对应的沉降量 δ_{Ei} ，然后再计算 FG 段的沉降量增量 $\Delta\delta_{FGi}$ ，即：

$$\delta_i = \delta_{Ei} + \Delta\delta_{FGi} = \delta_{Ei} + \left(\frac{\sigma_{imax} - \sigma_{Fi}}{E_2} \right) h_i \quad (3)$$

式中： σ_{Fi} 为 F 点对应的附加应力。

如果 σ_{imax} 位于模型的 HI 段，可以先计算出 G 点对应的沉降量 δ_{Gi} ，然后再计算 HI 段的沉降量增量 $\Delta\delta_{Hi}$ ，即：

$$\delta_i = \delta_{Gi} + \Delta\delta_{Hi} = \delta_{Gi} + \left(\frac{\sigma_{imax} - \sigma_{Hi}}{E_m} \right) h_i \quad (4)$$

式中： σ_{Hi} 为 H 点对应的附加应力。 HI 段之后的沉降量很小，基本可以忽略。

将各层的沉降量叠加，得到抛石体的总沉降量 δ ：

$$\delta = \sum \delta_i \quad (5)$$

DD' 为码头施工完成界线， EF' 为使用荷载施加后的界线，重力式码头基槽抛石体的沉降量主要发生在 BF' 段，该段对应的沉降量叠加地基的沉降量，可作为抛石体的预留沉降量。

3 抛石体沉降量计算模型参数确定

3.1 计算模型参数估算

重力式码头抛石体的夯实常用的有锤夯法和爆夯法。两种方法的作用过程在抛石体中产生的应力状态和块石密实过程都很复杂。

依据《码头结构设计规范》，重力式码头抛石

基床爆夯时的夯沉量控制在基床厚度的 10% ~ 15%; 在锤夯密实锤夯停锤时, 相邻锤次的夯沉量不超过 30~50 mm。结合图 3 的抛石体应力-应变关系曲线, 可对抛石体夯实过程中所受到的等效夯实应力 σ_e 作估算。

爆夯夯沉量为基床厚度的 10%~15%, 即爆夯产生的沉降应变 $\varepsilon_{e1} = \left(\frac{\delta}{H}\right) = 0.10 \sim 0.15$, 此情况对应于抛石体的初次压缩变形, 变形计算时取初次压缩变形模量 E_1 , 则有爆夯等效夯实应力 $\sigma_{e1} = \left(\frac{\delta}{H}\right) E_1$, 其值为 1 150~1 725 kPa。

根据规范要求和室内试验测试参数估算出的爆夯时的等效夯实应力明显偏大, 一方面说明室内试验测试得到的 E_1 偏大; 另一方面现场随机抛填的块石比较松散, 加载初期的沉降量会比较大。

厚度 $H=2\text{ m}$ 的抛石体, 相邻锤次的夯沉量 δ 为 30~50 mm(厚度按 2 m 考虑, 夯击遍数按 8 次考虑), 此情况对应于抛石体的多次压缩变形, 变形计算时取多次压缩变形模量 E_m , 则此时的等效夯实应力 $\sigma_{e21} = \left(\frac{\delta}{H}\right) E_m$, 其值为 345~575 kPa。

锤夯时的等效夯实应力与试验测试值相近, 说明室内试验测试得到的 E_m 比较合理。该参数是抛石体在密实状态的变形参数, 相对比较稳定。

综合分析, 影响 E_1 的因素比较多, 该参数的取值还需要检验。室内测试得到的 E_2 和 E_m 比较合理, 可用于实际工程。

3.2 计算模型参数回归分析

利用上述沉降量计算模型和方法, 结合实际情况的现场沉降量观测数据, 可对计算模型中的参数进行回归分析, 最终得到合理的模型参数。

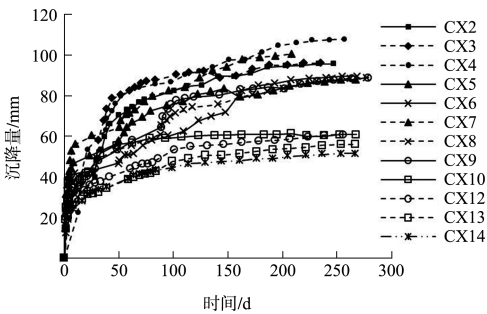
福州港平潭金井 1#~5#泊位工程, 码头面层顶高程 9.5 m(理论基准面, 下同), 基槽开挖底高程 -51.5~-35.0 m, 基槽抛石厚度 23.6~40.1 m, 平均抛石厚度达 31.5 m, 是典型的深基槽重力式码头结构。

基槽顶部 6 m 厚度采用 10~100 kg 的块石, 以下采用 10~500 kg 的块石, 分 4 层进行抛填和

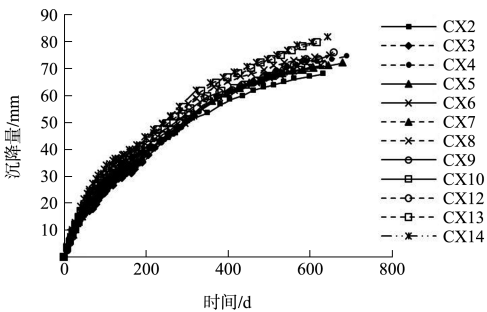
爆夯, 底层厚度为 7.5 m, 其他 3 层厚度均为 8.0 m。顶面再采用重锤夯实。

该工程基槽大部开挖至岩基, 码头沉降主要由基槽抛石层压缩变形所导致。在工程建设期间, 长期持续对沉箱进行了沉降位移观测。对工程中的 1#~5#泊位共 89 个沉箱和胸墙结构进行沉降和位移监测, 沉箱结构顶面 4 个角点处均布置了监测点, 观测沉箱结构安放后其沉降和位移, 在胸墙前后侧各布置 1 个测点, 观测胸墙浇筑后至码头面修建完成以及后期沉箱结构的沉降和位移, 监测时间从 2012 年 11 月持续至 2017 年 3 月。

其中 12 个沉箱结构的分阶段沉降量观测曲线见图 4, CX2~CX14 为沉箱编号, 图中沉降量曲线是根据每个沉箱 4 个角点观测数据的平均值绘制。由图 4a) 可见, 沉箱后方回填后持续时间较长, 沉降变形发展得比较充分, 该阶段后期的沉降变形比较稳定, 代表了此荷载状态下抛石体的阶段沉降量, 多个沉箱的平均沉降量为 82 mm; 图 4b) 为码头面层施工完成后的阶段沉降量观测曲线, 历时 2 a, 沉降趋于稳定。多个沉箱的平均总沉降量为 254 mm(从沉箱安装和沉箱内回填后起算)。



a) 沉箱后方回填后的沉降变形历时曲线



b) 面层施工完成后的沉降变形历时曲线

图 4 码头工程沉箱沉降观测曲线

该码头抛石体分 4 层抛填，采用爆夯夯实。抛石体各层顶面的阶段附加应力见表 1。图 3 的模型中， E_2 和 E_m 可取室内试验的测试值，分别为 150 和 184 MPa。现已知从沉箱安放后到沉箱后方回填沉降稳定后的沉降增量为 82 mm，从沉箱安放后到码头面施工完成沉降基本稳定后的沉降增量为 254 mm(从沉箱后方回填到码头面施工完成的沉降增量为 172 mm)。根据这两个现场观测的阶段平均沉降量，按 2.2 节的沉降量计算方法，通过迭代计算，得到爆夯的平均等效静态夯实应

力 $\sigma_e=225$ kPa、初次压缩变形模量 $E_1=7.55$ MPa，计算沉降量与观测沉降量相等，并可求出对应的各阶段分层沉降量，见表 2。

表 1 抛石体各层顶面的各阶段附加应力

位置	抛石体厚度/m	附加应力/kPa			
		沉箱安放后	沉箱后回填后	面层施工完成	码头荷载作用
1 层	7.5	124.1	292.7	452.5	548.0
2 层	8.0	62.8	148.0	228.8	232.4
3 层	8.0	41.1	96.9	149.8	161.2
4 层	8.0	30.5	72.1	111.4	123.1

表 2 模型计算的抛石体各阶段分层沉降量

位置	抛石体厚度/m	沉降量/mm					
		抛石层夯实完成	沉箱安放	沉箱后回填	面层施工完成	施工期分层累积	码头荷载作用
1 层	7.5	0	6.2	72.3	158.7	237.2	94.9
2 层	8.0	0	3.3	4.6	8.2	16.1	3.8
3 层	8.0	0	2.2	3.0	2.8	8.0	0.6
4 层	8.0	0	1.6	2.2	2.1	5.9	0.6
阶段总沉降量/mm	—	0	13.3	82.1	171.8	267.2	99.9

由表 2 可看出，厚度较大的抛石体，其沉降量主要产生在浅层抛石层中，原因是浅层抛石层中的附加应力较大，特别是码头面层施工和码头上的使用荷载作用时，浅层抛石层中的附加应力超过了等效夯实应力，按图 3 所示的沉降变形计算模型，此时沉降变形计算采用较小的 E_1 ，产生的沉降变形增量较大。

计算与观测实际表明，夯实后的抛石体在施工期的累积沉降量近 270 mm，约 90% 的沉降量出现在浅层抛石层中；码头使用荷载作用后，夯实后的抛石体还将产生近 100 mm 的沉降量，95% 的沉降量出现在浅层抛石层中。为保证重力式码头的结构安全和使用功能，该量级的沉降量值得设计和施工重视，并应做好沉降量预留和工艺轨道相关设计。

4 结语

1)通过对重力式码头基槽抛石体填筑所采用的块石进行原尺度压缩试验的应力-应变关系特性分析，提出了重力式码头抛石体的沉降变形计算模型。该模型只包含 4 个参数：等效夯实应力

σ_e 、初次压缩变形模量 E_1 、再次压缩变形模量 E_2 和多次压缩变形模量 E_m ，模型简洁、使用方便。

2)利用码头实际工程的长期观测数据，回归分析了模型计算参数，提出抛石体沉降量计算方法，可为重力式码头基槽抛石体施工期、使用期的沉降预测与控制提供量化计算的方法。

3)对于基槽抛石体厚度较大的重力式码头，夯实基床的施工期和使用期沉降量不容忽视，应纳入设计和施工的考虑范畴，以保障码头建设质量、安全和使用功能。

4)基槽抛石体的沉降变形主要产生在浅层抛石层，主要控制和预防措施：顶层的抛石基床宜采用较小的分层夯实厚度，最好采用重锤夯实或爆夯后再重锤夯实，以提高浅层抛石基床前期受到的等效夯实应力；通过量化计算预测，码头预留足够的沉降量，码头主体施工完成后进行堆载预压，以减少后期使用荷载作用时产生的沉降量。

5)本文提出的重力式码头抛石体的沉降变形计算模型中的参数，可通过更多的工程观测数据进行完善。