



硬质岩基条件下沉箱码头的 抛石棱体优化设计

吕 威¹, 谭彬政², 马 勇²

(1. 中国港湾工程有限公司, 北京 100007; 2. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 对于硬质基岩条件下的重力式沉箱码头, 通常在沉箱后方设置抛石棱体, 用以减小沉箱宽度, 从而缩减基槽开挖范围内的炸礁量。依托某海外工程, 对棱体高度和工程造价的关系进行分析, 探究抛石棱体的优化设计规律。结果表明, 当抛石棱体高度约为沉箱高度的 60%~80% 时, 工程造价最低; 在硬质岩面低于沉箱高度的 1/2 时, 抛石棱体的最优高度为沉箱高度的 60% 左右; 在硬质岩面高出沉箱高度的 1/2 时, 抛石棱体的最优高度为沉箱高度的 80% 左右。揭示的规律可供类似项目参考, 实际工程中应综合考虑工程地质条件、地材价格、施工能力等多方面因素, 分析确定经济合理的棱体高度。

关键词: 沉箱码头; 硬质岩基; 抛石棱体高度; 工程造价; 优化设计规律

中图分类号: U656.1+11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0069-05

Optimization design of riprap prism for caisson wharf under hard rock foundation conditions

LYU Wei¹, TAN Binzheng², MA Yong²

(1. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100007, China; 2. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: For gravity caisson quay under hard bedrock conditions, riprap prisms are usually installed behind the caissons to reduce the width of the caissons, and reduce the amount of reef blasting within the excavation range of the foundation trench. This article relies on an overseas project to analyze and study the relationship between the height of the prism and the engineering cost, so as to explore the optimal design rules of the riprap prism. The results show that the engineering cost is the lowest when the height of the riprap prism is about 60%~80% of the height of the caisson. When the hard rock surface is lower than 1/2 of the height of the caisson, the optimal height of the riprap prism is about 60% of the height of the caisson. When the hard rock surface is 1/2 higher than the height of the caisson, the optimal height of the riprap prism is about 80% of the height of the caisson. The laws revealed in this article can be used as a reference for similar projects. In practical projects, multiple factors such as engineering geological conditions, ground material prices, and construction capacity should be comprehensively considered to analyze and determine an economically reasonable prism height.

Keywords: caisson quay; hard rock foundation; height of riprap prism; engineering cost; optimal design rule

重力式沉箱码头作为一种技术成熟的水工结构, 适用于良好持力层埋深较浅的地质条件, 因其良好的耐久性和整体性, 在国内外水运工程中得到广泛应用。

对于重力式沉箱码头, 后方填料土压力是关键荷载, 为了减小填料土压力、降低对结构稳定的不利影响, 通常在沉箱后方设置减压棱体, 棱体可选用中粗砂或块石。相比中粗砂棱体, 块石

收稿日期: 2023-07-22

作者简介: 吕威 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计及施工管理工作。

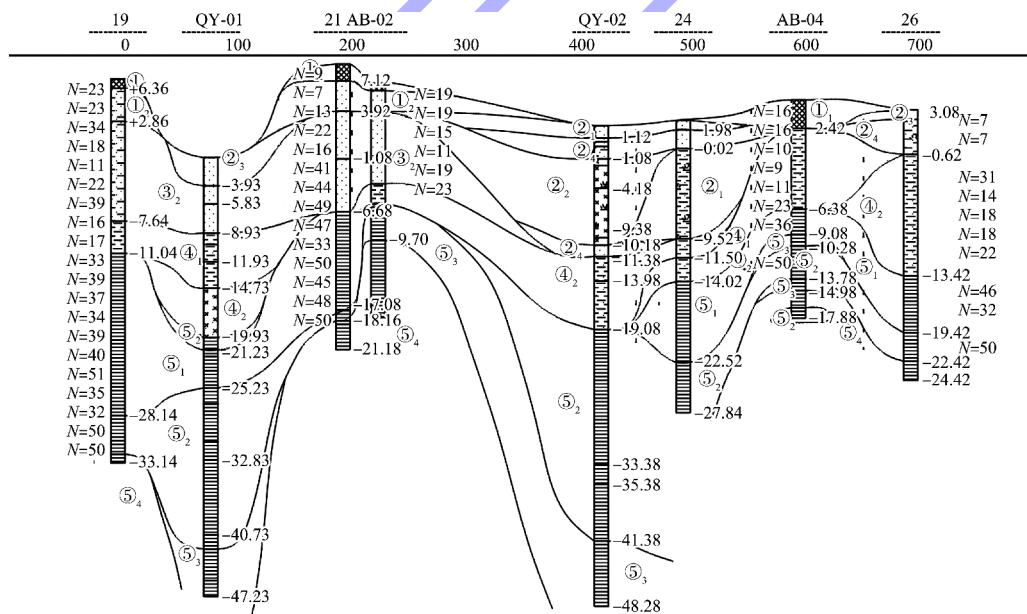
棱体更利于减小墙后土压力，可缩减沉箱宽度和基槽尺寸，但块石的价格往往远高于中粗砂。根据以往经验，在无需炸礁的非硬质地基条件下，若存在可用疏浚砂，因回填砂费用较低且砂棱体与后方回填料之间无需设置倒滤结构，通常选用中粗砂棱体；在需要炸礁的硬质岩基条件下，因炸礁费用较高，通常在沉箱后方设置抛石棱体，用以减小沉箱宽度和基槽尺寸，从而较大程度上缩减基槽开挖范围内的炸礁量。实际工程中应结合结构受力特性、方案经济性和施工便利性等多方面因素进行棱体方案的综合比选。

针对沉箱后方的减压棱体设计，国内已有较多的研究成果，王显加^[1]和陆文萍^[2]探讨了后方棱体的设计策略和施工工艺，但偏重于施工工艺，没有对后方棱体设计作详细论述；赵辉^[3]为了解决前后轨沉降差的问题，对码头后方减压棱体进行结构优化，论述优化后的施工工艺，但没有详细对比研究棱体设置对码头结构本身受力规

律的影响；卢永昌^[4]基于南沙港区二期码头工程针对重力式沉箱结构进行设计优化，包括沉箱海侧仓位部分回填以减少地基压力、基槽优化和胸墙裂缝控制等，但仅选定一个棱体高度作为对比方案，没有针对不同棱体高度开展敏感性分析。基于目前的研究现状，本文依托某海外工程，对硬质岩基高于码头底高程地质条件下沉箱码头后方的抛石棱体进行研究，分析不同棱体高度对工程造价的影响，探究抛石棱体的优化设计规律。

1 工程概况

海外某港升级扩建项目包括新建 1 座 16.5 万吨级的专业化集装箱码头，工程区域的基岩埋深较浅，地质剖面如图 1 所示。本项目港池底高程为 -17.0 m，根据上述地质条件，-17.0 m 以下基本为风化岩层，属于良好的持力土层，适于建设重力式沉箱码头。



注：图中编号对应的土层：①₁ 松散-中密砂；①₂ 松散-中等致密，细至粗砂；②₁ 有机质土-淤泥；②₂ 非常松散-松散，细至粗砂；③₁ 中等致密中粗砂；③₂ 中密-密实，细至粗砂；③₃ 硬-坚硬黏土；④₁ 非常坚硬粉质黏土；④₂ 坚硬粉质黏土；④₃ 坚硬粉质黏土（残积土）；⑤₁ 全风化混合岩；⑤₂ 强风化混合岩；⑤₃ 中风化混合岩；⑤₄ 微风化混合岩。

图 1 码头区域地质剖面

2 抛石棱体优化

随着抛石棱体高度的增加，沉箱后方土压力会逐渐减少。在保证码头结构整体安全度基

本一致的前提下，沉箱的宽度和基槽尺寸会随之减小，本文将重点研究抛石棱体的高度调整对工程造价的影响，探究棱体高度的优化设计

规律。根据依托项目的地质条件,选取AB02作为代表性钻孔进行分析,以抛石棱体的高度为研究变量,分析不同棱体高度对沉箱结构稳

定性的影响,并结合当地材料价格,进一步研究工程造价随棱体高度的变动规律。材料综合价格见表1。

表1 材料综合价格

材料	非岩质土	中-微风化岩	块石基床	抛石棱体	回填中粗砂	沉箱内回填疏浚砂	钢筋混凝土
综合单价/(欧元·m ⁻³)	4.6	70.0	43.0	32.0	5.0	0.5	450.0

依据重力式沉箱码头的设计经验,棱体设计主要影响码头结构的抗滑、抗倾稳定性以及地基承载力,但因硬质岩的地基承载力较高,棱体高度的调整对其影响较小,基本不会对结构尺寸产生影响。因此,本文仅从码头结构的抗滑和抗倾稳定性两方面研究抛石棱体高度对码头结构方案及工程造价的影响。根据项目工程条件,确定2种工况组合,工况1为自重力+墙后填料土压力+剩余水压力+船舶系统缆力+均载土压力(主导可变荷载),工况2为自重力+墙后填料土压力+剩余水压力+船舶系统缆力(主导可变荷载)+均载土压力。荷载条件为码头前沿均载40 kPa;船舶系统缆力2 000 kN;剩余水头后方水位取平均高潮位与平均低潮位的平均值0.95 m,海侧水位取极端低水位0.1 m。

2.1 设计方案

基于工程条件,码头结构的基本方案为C32/40混凝土,长19.33 m,高19.0 m,在保证码头结构整体安全度基本一致的条件下,宽度随后方抛石棱体高度调整;沉箱下方设置抛石基床,顶高程为-17.7 m,因硬质岩基条件下无需通过抛石基床进行应力扩散以满足地基承载力要求,此时抛石基床的厚度按照满足基槽开挖整平要求设置,厚度选定为1 m;沉箱后方抛设10~100 kg的块石棱体,棱体高度为研究变量,将选取不同的棱体高度;棱体后方回填中粗砂,棱体与回填砂之间铺设二片石、混合倒滤层及土工布;沉箱内回填疏浚砂,顶部设置碎石层及素混凝土垫层;沉箱前铺设200~300 kg护底块石。码头典型断面见图2。

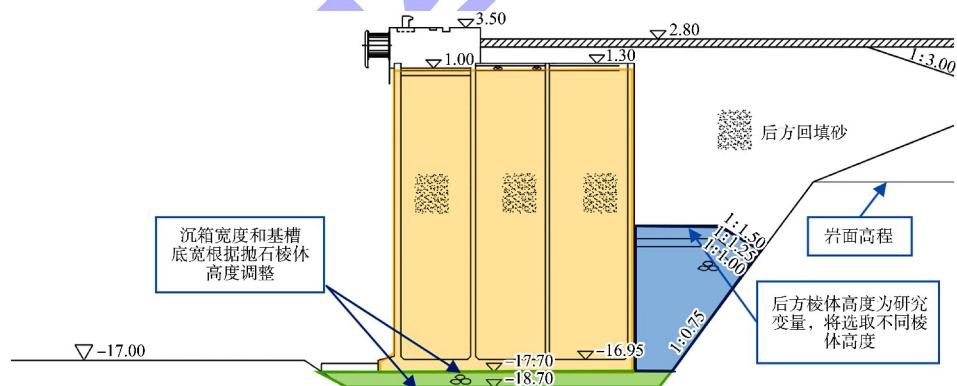


图2 码头断面 (单位: m)

2.2 稳定性计算

针对钻孔AB02代表的典型地质条件,选取不同的棱体高度,在保证码头结构整体安全度基本一致的条件下,通过对码头结构抗滑和抗倾稳定性的计算分析,确定不同棱体高度对应的结构方案及稳定性。

沉箱高度为19 m时计算结果见表2。由表可知,沉箱宽度随后方抛石棱体高度的增加呈非线性减小,棱体高度超过沉箱高度的50%后,沉箱

宽度的减小趋势逐渐变缓,说明该区段内的棱体高度对沉箱宽度的影响减弱。分析其原因为,沉箱的结构尺寸主要由自身的抗滑稳定性控制,即主要受水平力的影响;在沉箱高度方向上,土压力基本呈上小下大的正梯形分布^[5],从沉箱底部向上,土压力随填料性质的变化幅度逐渐减小,由此使得超过一定高度后抛石棱体对沉箱宽度的影响减弱。

表 2 码头结构方案及稳定性计算结果

钻孔	硬质岩面 高程/m	抛石棱体高度		沉箱 宽度/m	基槽 底宽/m	抗倾 稳定性	抗滑 稳定性
		绝对值/m	相对值/%				
AB02	-6	0	0	18.4	21.9	5.3	1.1
		3	16	17.7	21.2	5.0	1.2
		6	32	16.9	20.4	4.2	1.2
		9	47	15.8	19.3	3.5	1.2
		12	63	15.0	18.5	3.4	1.2
		15	79	14.5	18	3.4	1.2
		18	95	14.2	17.7	3.4	1.2

注：高度相对值即抛石棱体高度与沉箱高度的比值。

2.3 硬质岩基岩面高程的影响

在硬质岩基条件下，码头基槽范围内的炸礁费用较高，对工程造价有较大影响；抛石棱体高度的调整会带动沉箱宽度、基槽尺寸以及炸礁量的调整，其中炸礁量的调整幅度受岩面高程的影响显著，这在一定程度上可能会影响抛石棱体对工程造价的影响规律，本文将进一步研究不同岩面高程下抛石棱体对工程造价的影响。

硬质岩面高程的调整不会引起沉箱后方土压力的变化，因此不同岩面高程下抛石棱体高度对沉箱宽度和基槽尺寸的影响遵循表 2 揭示的调整规律。基于硬质岩面高程分别为 -17.7 m (与沉箱底高程齐平)、-14.0 m、-10.0 m、-6.0 m、-2.0 m、1.3 m (与沉箱顶高程齐平) 6 种地质条件，研究对应结构方案的工程造价。绘制不同岩面高程条件下抛石棱体高度与结构方案每延米工程造价的关系曲线，见图 3。

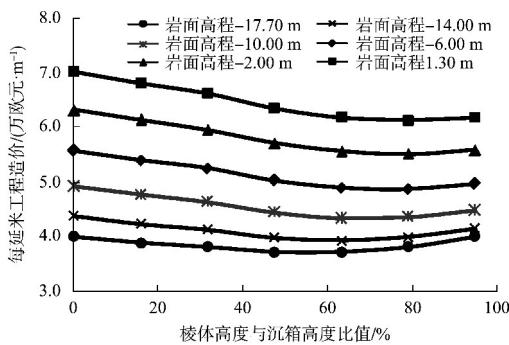


图 3 不同岩面条件下抛石棱体高度与工程造价的关系曲线

由图 3 可以看出：

1) 在不同岩面高程条件下，棱体高度对工程造价的影响规律有所差异，但总体规律基本一致。

随着棱体高度的增大，工程造价均呈现先降低后增加的变动趋势；当抛石棱体高度为沉箱高度的 60%~80% 时，工程造价达到最低。

2) 对于硬质岩面位于 1/2 沉箱高度以下的地质条件，当棱体高度超过沉箱高度的 60% 时，随棱体高度的增加工程造价增长速率显著加大，说明该区段的棱体高度对工程造价的影响显著；其原因如表 2 所示，当抛石棱体超过一定高度时，棱体高度增大带来的沉箱宽度缩减幅度变小，但棱体自身增加的块石量却大幅提升，由此也造成了工程造价的显著提升；该地质条件下抛石棱体的高度适于设置为沉箱高度的 60% 左右。

3) 对于硬质岩面位于 1/2 沉箱高度以上的地质条件，当后方抛石棱体高度低于沉箱高度的 80% 时，工程造价随棱体高度的减小呈显著增大，说明该区段的棱体高度对工程造价的影响显著；其原因如表 2 所示，当抛石棱体低于一定高度时，棱体高度的增加使沉箱宽度和基槽宽度有明显缩减，由此带来沉箱混凝土量、基床块石量、和炸礁量的大幅缩减；同时，因较高的基岩面使抛石棱体基本呈倒梯形分布(图 2)，棱体高度增大带来的块石增加量有限。这两方面因素对工程造价影响显著，因此该地质条件下抛石棱体的高度应设置在沉箱高度的 80% 左右。

3 结论

1) 在硬质岩基条件下，对于重力式沉箱码头，随着抛石棱体高度的增大，工程造价呈现先

降低后增加的变动趋势;当抛石棱体高度约为沉箱高度的60%~80%时,工程造价最低。

2) 对于硬质岩面位于1/2沉箱高度以下的地
质条件,当抛石棱体高度超出沉箱高度的60%时,
工程造价增长速率显著加大,该地质条件下不适
于采用较高的棱体高度,建议将棱体高度设置为
沉箱高度的60%左右。

3) 对于硬质岩面位于1/2沉箱高度以上的地
质条件,当抛石棱体高度低于沉箱高度的80%时,
工程造价增长速率显著加大,不适于采用较低的
棱体高度,建议将棱体高度设置为沉箱高度的
80%左右。

4) 依托工程的岩面高程约为-6 m,其对应最
优工程造价的后方抛石棱体高度为15 m。因不同
工程区域的地材价格、施工条件、土层分布等存
在差异,可能对抛石棱体的最优设计规律产生影
响,本文的研究结论可以提供一个基本规律供类
似项目参考,实际工程中尚应结合具体的工程条
件确定经济合理的棱体高度。

(上接第68页)

2) 一体化结构的经济性并未降低结构的受力
标准,而是通过减少结构自重力以及合理利用装
卸平台的结构受力“盈余”而得。

3) 一体化结构存在的特定的使用范围,适
用于装卸平台单侧仅有1个系缆墩,且系缆点位于装
卸平台的宽度范围内的情况。如单侧有2个或2个
以上系缆墩(图2),则会导致传力臂过长,不适
合采用该结构。由于采用单桩结构,一体化结构
的系缆平台的平面尺寸一般相对较小,操作空间
较为局促。

4) 一体化结构为全钢结构,可根据需要设计
为全装配式,以缩减工期,进一步节省施工费用。
但在恶劣的海洋腐蚀环境下,钢结构耐久性不如混
凝土墩台,后期维护相对频繁。采用一体化结构方
案对码头扩建也存在一定影响,扩建前需要对一体
化结构进行拆除,此时应事先评估整体最优方案。

响,本文的研究结论可以提供一个基本规律供类
似项目参考,实际工程中尚应结合具体的工程条
件确定经济合理的棱体高度。

参考文献:

- [1] 王显加.如意岛沉箱后方棱体结构设计及施工[J].中国水运(下半月),2016,16(7):273-274.
- [2] 陆文萍.重力式码头施工中的常见问题及预防措施[J].中国水运(下半月),2009,9(6):184-185.
- [3] 赵辉.沉箱码头后方棱体结构的优化设计及主要施工
工艺[J].港工技术,2011,48(2):34-36.
- [4] 卢永昌.大型深水沉箱码头设计施工优化研究[D].南京:
河海大学,2007.
- [5] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.码头结构设
计规范:JTS 167—2018[S].北京:人民交通出版社股
份有限公司,2018.

(本文编辑 王传瑜)

参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港工程设
计手册(上册)[M].2版.北京:人民交通出版社股份有
限公司,2018.
- [2] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.装卸油品码
头设计指南[M].广州:中交第四航务工程勘察设计院
有限公司,2015.
- [3] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司,中交第三航
务工程勘察设计院有限公司,中交第四航务工程局有
限公司.码头结构设计规范:JTS 167—2018[S].北京:
人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [4] 北京筑信达工程咨询有限公司,SAP2000 技术指南及
工程应用(上册)[M].北京:人民交通出版社股份有限
公司,2018.
- [5] 徐宇鸣,奚彩亚.节点有限元分析中边界与荷载的施加
方式探讨[J].建筑结构,2015,45(S1):729-734.

(本文编辑 赵娟)