



# 遮帘桩对板桩码头地震响应的影响

王翠燕, 吴相豪

(上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306)

**摘要:** 为了研究地震作用下遮帘桩对板桩码头前墙、锚碇墙以及拉杆受力性能的影响, 运用 ABAQUS 软件对京唐港 32<sup>#</sup> 遮帘式板桩码头进行动力有限元分析。结果表明, 遮帘桩可显著减小地震作用下前墙弯矩和拉杆拉力, 对锚碇墙的受力性能影响较小; 遮帘桩厚度对地震作用下拉杆拉力、泥面高程以下部分的前墙弯矩影响较大, 对泥面高程以上部分的前墙弯矩和锚碇墙弯矩影响较小; 泥面线高程以上部分前墙弯矩随着前墙与遮帘桩间距的增大逐渐增大, 前墙与遮帘桩间距对泥面线高程以下部分前墙弯矩、锚碇墙弯矩以及拉杆拉力的影响不明显; 遮帘桩长度对地震作用下前墙、锚碇墙以及拉杆的受力性能影响较小。

**关键词:** 遮帘桩; 板桩码头; 地震响应; 有限元分析

中图分类号: TV 312; U 656.1<sup>+</sup>12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0055-06

## Influence of covered pile on seismic response of sheet-piled wharf

WANG Cui-yan, WU Xiang-hao

(School of Marine Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the covered pile on the front wall, anchor wall and lever force performance of the sheet-piled wharf under seismic action, we carry out the dynamic finite element analysis of covered sheet-piled wharf of the 32<sup>#</sup> berth of Jingtang Port by ABAQUS software. The results show that the covered pile can significantly reduce the front wall bending moment and rod tension under the seismic action, and the influence on the force performance of the anchor wall is small. The thickness of the covered pile has a great impact on the rod tension and bending moment of the front wall below the mud surface elevation, and has a small effect on the front wall bending moment above the mud surface elevation and anchor wall bending moment. The front wall bending moment above the elevation of the mud surface line increases gradually with the increase of the spacing between the front wall and the covered pile, and the spacing between the front wall and the covered pile has no obvious effect on the front wall bending moment below the elevation of the mud surface line, anchor wall bending moment and rod tension. The length of the covered pile has less effect on the force performance of the front wall, anchor wall and lever under seismic action.

**Keywords:** covered pile; sheet-pile wharf; seismic response; finite element analysis

板桩码头由板桩、拉杆、锚碇结构等组成, 依靠板桩入土部分土压力和锚碇结构来保持其整体稳定性。由于板桩强度的限制, 只适用于水深不大的中小型码头。为了克服这一缺陷, 中交第一航务工程勘察设计院提出了遮帘式板桩结构,

可作为深水泊位的码头结构。遮帘式板桩是指在码头前排板桩后方打设一排或多排不连续桩, 以遮挡前排板桩的后方土压力, 减小前排板桩的弯矩, 改善其受力状态。目前该新型码头结构的设计方法还不成熟, 国内许多学者正在开展相关的

研究工作,如李景林等<sup>[1]</sup>运用离心模型试验技术对采用遮帘桩方案的京唐港 14<sup>#</sup>、15<sup>#</sup>泊位板桩码头结构受力状态和变形特点进行研究;刘文平等<sup>[2]</sup>对遮帘式板桩码头结构进行数值分析,研究码头面堆载和剩余水压力对前墙和遮帘桩弯矩及其轴力的影响;崔冠辰等<sup>[3]</sup>利用数值分析方法,研究遮帘桩与前墙的距离以及遮帘桩的刚度对码头工作性状的影响,得出墙桩间距增大会削弱遮帘桩对前墙的挡土效果;惠炜等<sup>[4]</sup>基于平行墙理论及最不利荷载情况下的朗肯主动土压力理论,推导出遮帘桩后水平土拱拱前自由区及拱后稳定区土压力表达式,并在此基础上,根据拱脚水平静力平衡条件及三角形受压区强度条件得出遮帘桩合理桩间距的计算式;李胜林<sup>[5]</sup>根据极限平衡理论提出遮帘桩有效长度的计算方法;蒋建平等<sup>[6]</sup>运用 ABAQUS 软件研究不同加速度峰值对京唐港 32<sup>#</sup>遮帘式板桩码头地震响应的影响。

综合分析国内外有关遮帘式板桩码头的研究成果可以发现,现有遮帘式板桩码头结构性能方面的研究大都基于静力,抗震方面的研究成果比较少。为此,本文采用数值分析方法对京唐港 32<sup>#</sup>遮帘式板桩码头进行地震响应研究,分析遮帘桩、遮帘桩刚度、遮帘桩与前排板桩间距等对板桩码头结构地震响应的影响。

1 工程概况

京唐港 32<sup>#</sup>码头为遮帘式地连墙板桩码头所在位置的地基土层为粉细砂层、粉质黏土层以及细砂层。码头前沿泥面高程为-16.0 m,顶面高程为4.2 m,前墙高 27.0 m、厚 1.0 m,遮帘桩横截面尺寸为 2.0 m×1.0 m(长×宽)、间距为 2.75 m、高 30.0 m,锚碇墙高 14.5 m、厚 1.2 m,均为钢筋混凝土构件。连接遮帘桩和锚碇墙的长拉杆直径为95 mm,连接前墙和遮帘桩的短拉杆直径为75 mm,拉杆均为 Q345 钢棒,拉杆间距约为 1.2 m。前墙与遮帘桩之间的距离为 3.0 m。码头结构如图 1 所示。

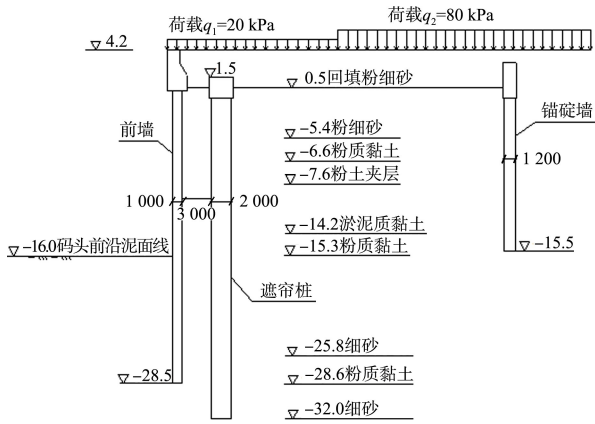


图 1 码头结构 (尺寸: mm; 高程: m)

2 有限元分析模型

2.1 码头结构模拟及材料参数

采用 ABAQUS 软件建立京唐港 32<sup>#</sup>码头结构二维有限元分析模型,如图 2 所示。土体采用 Mohr-Coulomb 模型,选取非对称求解器进行求解;桩的弹性模量是土弹性模量的 200 倍以上,相对来说变形一般不会很大,采用线弹性模型;拉杆采用梁单元进行模拟。由于遮帘桩间距为 2.75 m,前墙和锚碇墙均为连续墙结构,故采用刚度等效原则把遮帘桩等效成连续墙,即前遮帘桩的刚度与连续墙的刚度等效。根据京唐港 32<sup>#</sup>码头的地质资料,模型中的材料参数取值见表 1。

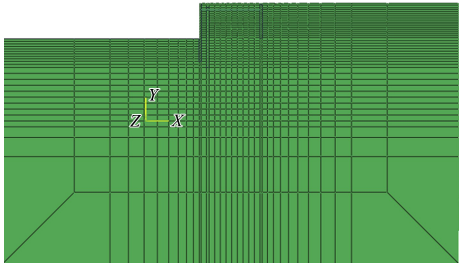


图 2 有限元模型

ABAQUS 软件在分析时有材料和单元的阻尼、整体阻尼和模态阻尼 3 种阻尼引入途径。本文采用常见的瑞利阻尼,在材料中直接定义。瑞利阻尼是与运动量成正比的单元阻尼矩阵与由内部摩擦而产生的、与应变速度成正比的单元阻尼矩阵 C 的线性组合<sup>[7]</sup>,表达式为:

$$\mathbf{C}=\alpha\mathbf{M}+\beta\mathbf{K}\tag{1}$$

式中： $\mathbf{M}$  为单元质量矩阵； $\mathbf{K}$  为单元刚度矩阵； $\alpha$ 、 $\beta$  分别为与质量、刚度成正比的系数，计算公式为：

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}=\frac{2\xi}{\omega_i+\omega_j}\begin{bmatrix} \omega_i\omega_j \\ 1 \end{bmatrix}\tag{2}$$

式中： $\xi$  为材料阻尼比； $\omega_i$ 、 $\omega_j$  为结构  $i$ 、 $j$  振型的振动频率。

表 1 材料参数

材料类型	高程范围/m	密度/(t·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	弹性模量/MPa	泊松比
回填粉细砂	0.5~4.2	1.80	32.0	5	26.00	0.29
粉细砂	-5.4~0.5	1.80	28.0	5	26.00	0.29
粉质黏土	-6.6~-5.4	1.91	27.0	20	8.97	0.30
粉土夹层	-7.6~-6.6	1.93	28.0	16	12.60	0.30
淤泥质黏土	-14.2~-7.6	1.76	17.1	16	3.60	0.30
粉质黏土	-15.3~-14.2	1.91	19.6	18	8.97	0.30
细砂	-25.8~-15.3	1.97	31.0	5	26.00	0.29
粉质黏土	-28.6~-25.8	1.97	24.7	31	8.97	0.30
细砂	-28.6 以下	1.97	32.0	5	26.00	0.29
混凝土	-	2.50	-	-	28 000	0.20
钢	-	7.85	-	-	206 000	0.30

2.2 模型边界及地震波输入

板桩码头在进行静力分析时，一般只截取出较大区域，在边界上设置固定边界就能满足计算要求，但在动力分析中，地震波会在人为截断处发生反射，造成计算结果失效。目前设置人工边界的方法主要有黏弹性边界、无限元边界、透射边界和黏性边界等，本文选用无限元边界处理地震波的反射问题<sup>[8]</sup>。

地震波选用 EL-Centro 波(标准化处理后,峰值加速度 PGA=1.0 m/s<sup>2</sup>)，动力分析时间步为 0.02 s，波形见图 3，采用设置加速度边界条件的方法施加在地基底部有限元与无限元交界面的节点上<sup>[9]</sup>。

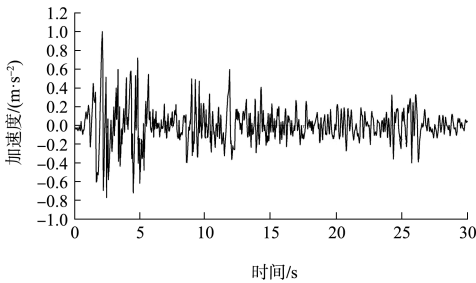
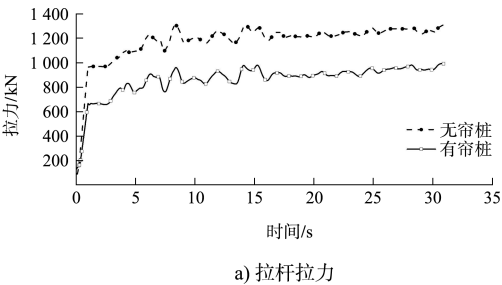


图 3 地震波时程曲线

3 计算结果及分析

3.1 遮帘桩对码头结构受力性能的影响

地震作用下无遮帘桩板桩码头和有遮帘桩板桩码头拉杆、前墙和锚碇墙的力学特性如图 4 所示。可以看出，设置遮帘桩后，板桩码头前墙最大正弯矩由 874.80 kN·m 减小至 99.14 kN·m，减小了 775.66 kN·m；最大负弯矩由 1 858.0 kN·m 减小至 758.2 kN·m，减小了 1 099.8 kN·m。锚碇墙最大负弯矩由 691.9 kN·m 增加至 747.6 kN·m，增加了 55.7 kN·m。拉杆拉力最大值由 1 309.36 kN 减小至 993.12 kN，减小了 316.24 kN。由以上分析可知，遮帘桩对板桩码头前墙和拉杆的受力性能影响比较大，可以显著降低前墙和拉杆的地震响应，对锚碇墙受力性能的影响比较小。



a) 拉杆拉力

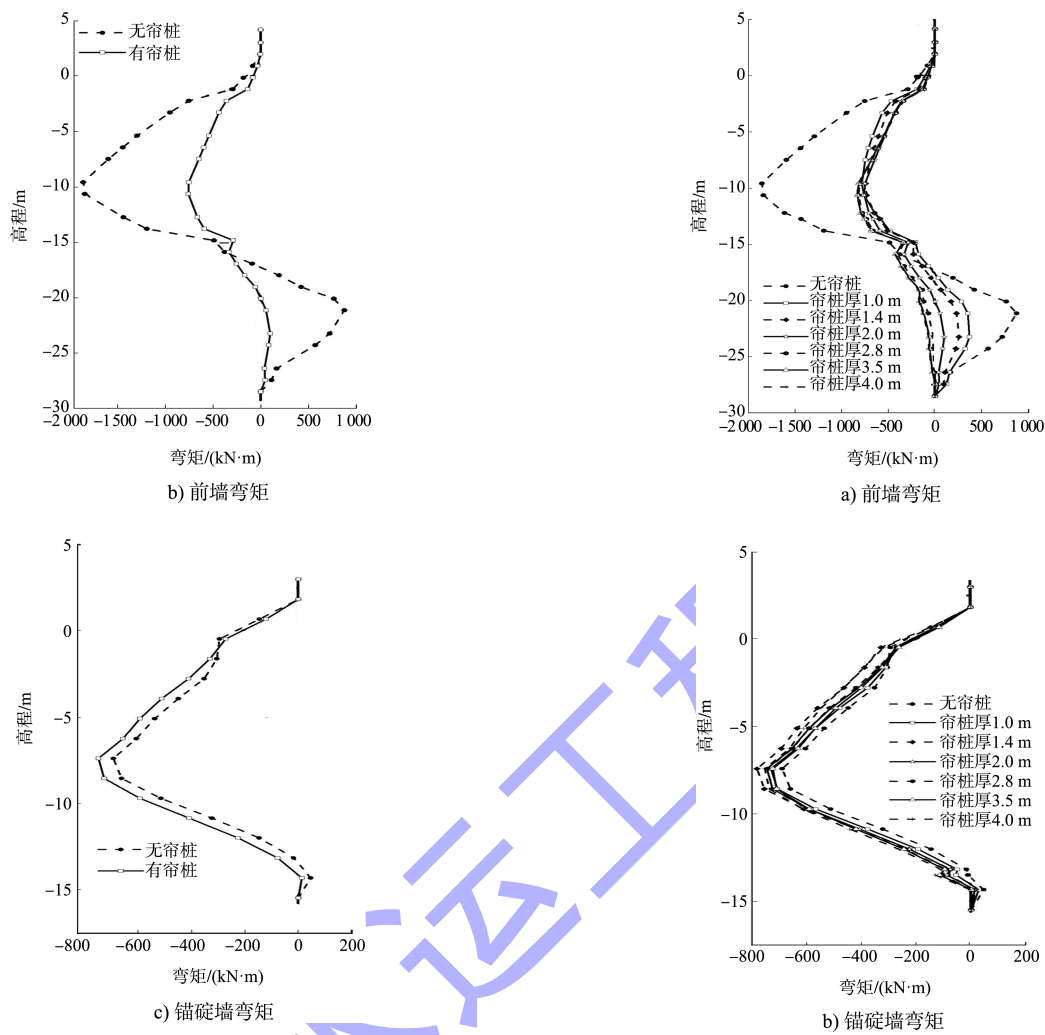


图 4 各结构力学特征

3.2 遮帘桩厚度对码头结构受力性能的影响

图 5 为不同厚度的遮帘桩对板桩码头结构地震响应的影响。由图 5a)可以看出，在所取遮帘桩厚度范围内，前沿泥面线高程以下部分的前墙弯矩随着遮帘桩厚度增加逐渐减小，泥面线以上部分的前墙弯矩随着遮帘桩厚度增加变化不明显；由图 5b)可看出，随着遮帘桩厚度的变化，锚碇墙弯矩无明显的变化规律，而且遮帘桩厚度的变化对锚碇墙弯矩值影响较小，可见遮帘桩厚度对锚碇墙受力性能的影响不明显；由图 5c)可看出，遮帘桩厚度对拉杆拉力有一定的影响，随着遮帘桩厚度的增加，拉杆拉力逐渐减小；当遮帘桩厚度增大到 2.8 m 时，拉杆拉力为 895.58 kN，继续增加遮帘桩厚度对拉杆拉力没有明显影响。

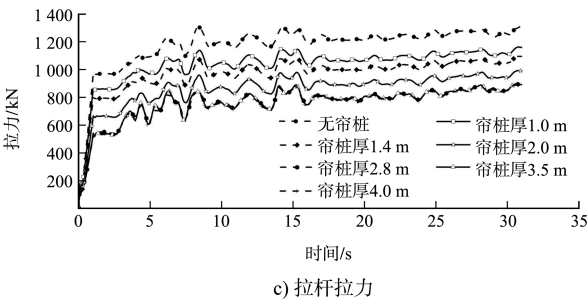


图 5 不同厚度下各结构力学特征

3.3 前墙与遮帘桩间距对码头结构受力性能的影响

地震作用下不同前墙与遮帘桩间距的板桩码头拉杆拉力、前墙弯矩及锚碇墙弯矩的分布情况见图 6。可以看出，前沿泥面线高程以上部分的前墙弯矩随着前墙与遮帘桩间距的增大逐渐增大，前墙与遮帘桩间距对泥面线以下部分的前墙弯矩影响不明显。随着前墙与遮帘桩间距的增大，

锚碇墙弯矩无明显的变化规律, 而且锚碇墙弯矩值变化不大, 可见前墙与遮帘桩间距对锚碇墙受力性能的影响不明显。在所取间距范围内, 拉杆拉力先是随间距增大逐渐减小, 后是随间距增大逐渐增大, 但拉杆拉力变化极小, 前墙与遮帘桩之间间距为 4 m 时拉杆拉力最小。

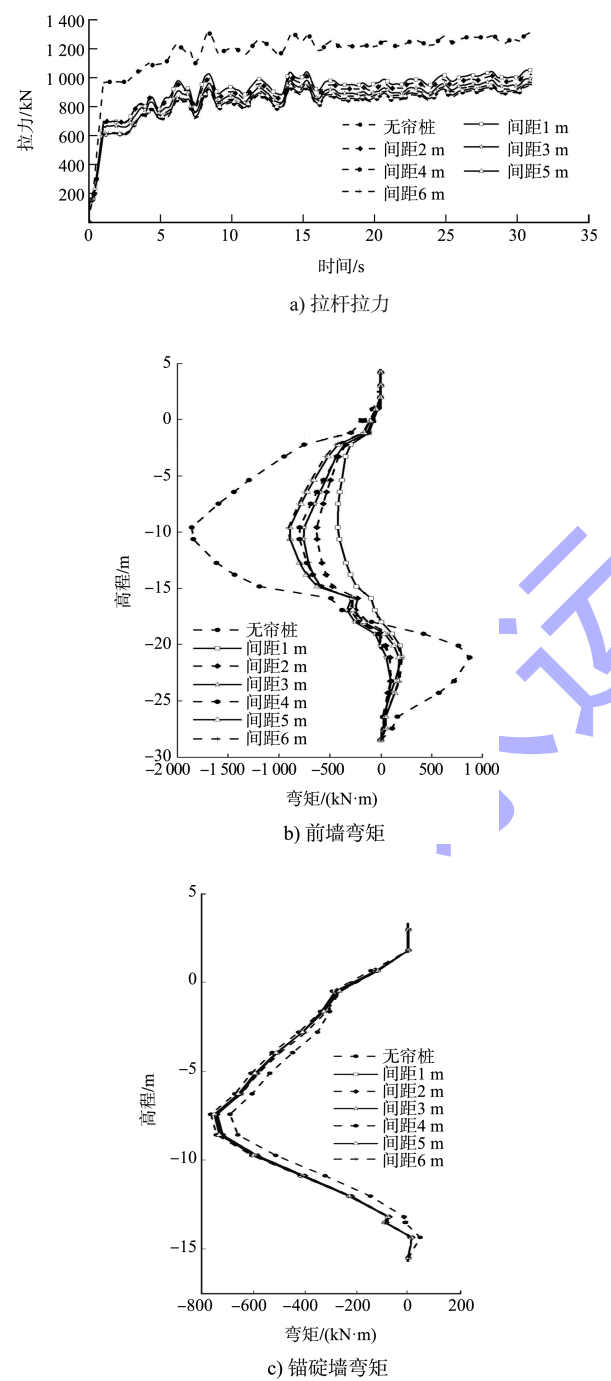


图 6 不同间距下各结构力学特征

3.4 遮帘桩长度对码头结构受力性能的影响

地震作用下不同长度遮帘桩的板状码头拉杆

拉力、前墙弯矩及锚碇墙弯矩的分布情况见图 7。可以看出, 在所取遮帘桩长度范围内, 随着遮帘桩长度增大, 拉杆拉力逐渐减小, 但拉力值变化较小。前沿泥面线高程以上部分的前墙弯矩绝对值随着遮帘桩长度增大逐渐减小, 但弯矩值变化较小; 遮帘桩长度对泥面线以下部分的前墙弯矩影响不明显。随着遮帘桩长度的变化, 锚碇墙弯矩无明显的变化规律, 而且锚碇墙弯矩值变化不大, 遮帘桩长度对锚碇墙受力性能的影响不明显。

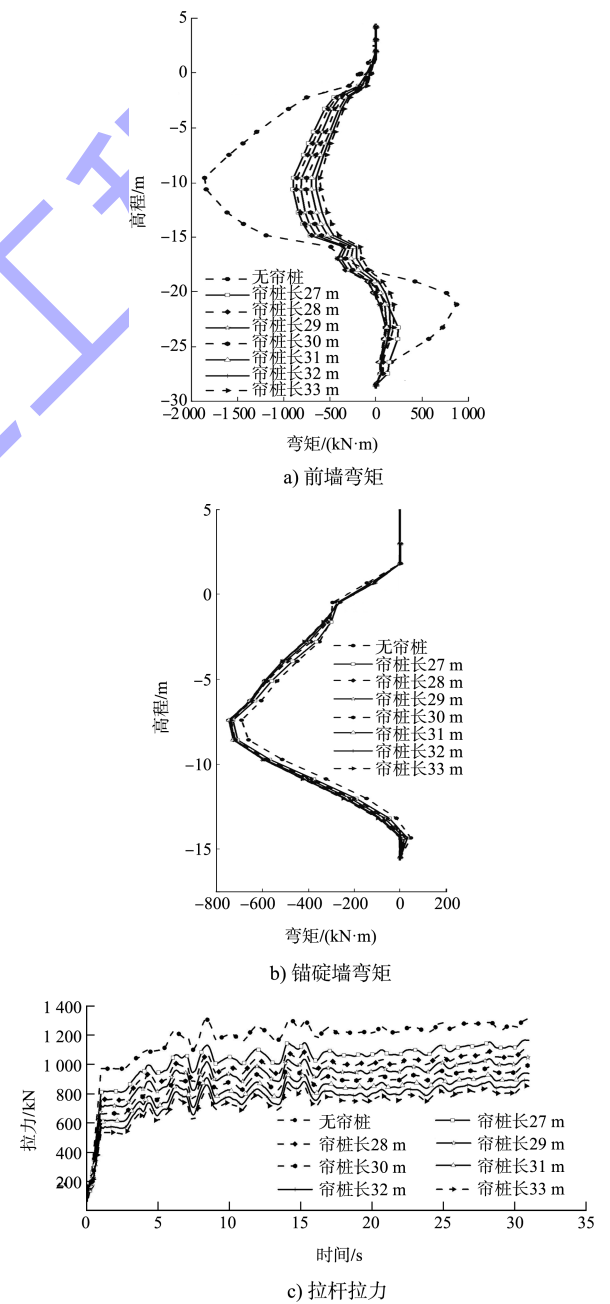


图 7 不同长度下各结构力学特征



4 结 论

1) 遮帘桩对板桩码头前墙和拉杆的受力性能影响比较大,可以显著减小地震作用下前墙弯矩和拉杆拉力,对地震作用下锚碇墙的受力性能影响较小。

2) 遮帘桩厚度对地震作用下拉杆拉力、前沿泥面高程以下部分的前墙弯矩影响较大,对前沿泥面高程以上部分的前墙弯矩和锚碇墙弯矩影响较小。随着遮帘桩厚度增加拉杆拉力逐渐减小,但当遮帘桩厚度达到 2.8 m 时,继续增加遮帘桩厚度,拉杆拉力不再减小。前沿泥面线高程以下部分的前墙弯矩随着遮帘桩厚度增加逐渐减小。

3) 前沿泥面线高程以上部分的前墙弯矩随着前墙与遮帘桩间距的增大逐渐增大,前墙与遮帘桩间距对泥面线以下部分的前墙弯矩影响不明显。前墙与遮帘桩间距对锚碇墙和拉杆受力性能的影响较小。

4) 遮帘桩长度对地震作用下拉杆拉力、前沿泥面高程以上部分的前墙弯矩影响较大,对前沿泥面高程以下部分的前墙弯矩和锚碇墙弯矩影响较小。拉杆拉力、前沿泥面线高程以上部分的前墙弯矩绝对值随着遮帘桩长度的增大逐渐减小。

(上接第 26 页)

参考文献:

[1] HUGHES S A. Levee overtopping design guidance: what we know and what we need [C] // Proceedings of the solutions to coastal disasters congress. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2008: 867-880.

[2] 潘毅. 海岸防护: 人工养滩工程和海堤越浪、溢流和加固的研究[D]. 上海: 同济大学, 2012.

[3] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working groups I and II of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 582.

[4] PAN Y, KUANG C P, LI L, et al. Full-scale laboratory study on distribution of individual wave overtopping volumes over a levee under negative freeboard [J]. Coastal engineering, 2015, 97: 11-20.

[5] ASCE hurricane Katrina external review panel. The New Orleans hurricane protection system: what went wrong and why [M]. Reston: ASCE, 2007: 92.

参考文献:

[1] 李景林, 王剑平, 蔡正银, 等. 遮帘桩方案改造板桩码头离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 978-982.

[2] 刘文平, 郑颖人, 雷用, 等. 遮帘式板桩码头结构有限元数值分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 135-141.

[3] 崔冠辰, 蔡正银, 李小明, 等. 遮帘式板桩码头工作机理初探[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 762-766.

[4] 惠炜, 吴跃东, 赵颖慧. 基于土拱效应的遮帘桩合理桩间距分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(12): 67-71, 86.

[5] 李胜林. 遮帘式板桩结构码头遮帘桩合理长度确定[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S2): 591-595.

[6] 蒋建平, 刘春林, 蒋宏鸣. 遮帘式板桩码头三维地震响应[J]. 上海海事大学学报, 2013, 34(1): 28-35.

[7] 张文元, 费红姿, 连慰安, 等. ABAQUS 动力学有限元分析指南[M]. 香港: 中国图书出版社, 2005.

[8] ASHEGHABADI M S, ALI Z. Infinite element boundary conditions for dynamic models under seismic loading [J]. Indian journal of physics, 2020, 94(6): 1-11.

[9] 徐雁飞, 钱德玲. 基于 ANSYS 的地震作用下群桩动力效应研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2010, 33(10): 1536-1539, 1562. (本文编辑 王璁)

[6] PULLEN T, ALLSOP N W H, BRUCE T, et al. EurOtop: Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual [M]. Hamburg: Boyens Medien GmbH, 2007.

[7] REEVE D E, SOLIMAN A, LIN P Z. Numerical study of combined overflow and wave overtopping over a smooth impermeable seawall [J]. Coastal engineering, 2008, 55(2): 155-166.

[8] HUGHES S A, NADAL N C. Laboratory study of combined wave overtopping and storm surge overflow of a levee [J]. Coastal engineering, 2009, 56(3): 244-259.

[9] LI L, PAN Y, AMINI F, et al. Full scale study of combined wave and surge overtopping of a levee with RCC strengthening system [J]. Ocean engineering, 2012, 54(1): 70-86.

[10] VAN DER MEER J W, BRUCE T. New physical insights and design formulas on wave overtopping at sloping and vertical structures [J]. Journal of waterway port coastal & ocean engineering, 2013, 140(6): 04014025.

(本文编辑 武亚庆)