

遮帘式板桩码头抗震特性及设计参数研究^{*}

高 鹏¹, 王丽艳¹, 陈尚坤¹, 周亚军²

(1. 江苏科技大学 土建学院, 江苏 镇江 212003; 2. 江苏省水利勘察设计院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 板桩码头是港口工程建筑物一种重要的结构形式, 但受墙身高度限制, 只适用于中小码头建造。遮帘桩的加入, 极大地改善了前墙受力, 使码头泊位大型深水化成为可能。作为一种新型的结构形式, 遮帘式板桩码头抗震特性尚不清楚, 地震破坏机理与变形灾变性能是抗震安全设计中需考虑的较复杂的问题。基于非线性有限元分析技术, 考虑遮帘桩到前墙间距、遮帘桩长度和遮帘桩厚度等一系列抗震设计参数, 研究不同参数时, 遮帘式板桩码头前墙残余变形分布特征、墙身以及拉杆受力特性, 阐述各设计参数下板桩码头的抗震机理和变形特性, 给出各设计参数的合理抗震取值, 研究结果为遮帘式板桩码头的抗震安全设计提供参考。

关键词: 地震; 板桩码头; 遮帘桩; 残余变形; 拉杆拉力; 等效应力

中图分类号: TU 443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-4972(2015)04-0086-06

Seismic behavior and design parameters of covered sheet-pile quay

GAO Peng¹, WANG Li-yan¹, CHEN Shang-kun¹, ZHOU Ya-jun²

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;
2. Design and Research Company of Hydraulic Exploration Survey of Jiangsu, Yangzhou 225009, China)

Abstract: The sheet-pile quay is an important port structure only used in the small quay construction because of the restriction of the wall height. The large-scale deep water berths will be realized due to that covered sheet pile greatly strengthens the force of the front wall. As a new structure, there is no mature theory and method of covered sheet-pile quay, and the seismic characteristics and mechanism is unclear. The seismic residual deformation and seismic mechanism of sheet pile quay are complex problems in the seismic safe design of sheet pile quays. Based on the nonlinear finite element method, a series of seismic design parameters were considered such as spacing between the covered pile and the wall, seismic acceleration amplitude, the length, thickness, intension of the covered pile. The seismic residual deformation and stress characteristics of covered sheet-pile walls and mechanical characteristics of rods are analyzed, seismic mechanisms and deformation characteristics of covered sheet-pile quay are studied in detail and the seismic effect is confirmed under different parameters. Finally, the reasonable seismic design values of design parameters are presented. The achieved results may serve as reference for the seismic safe design of covered sheet-pile quays.

Keywords: earthquake; sheet-pile quay; covered pile; residual deformation; rod tension force; equivalent stress

板桩码头, 作为码头三大结构形式之一, 在我国港口和护岸工程中得到了广泛的应用。但由于板桩码头结构自身的受力特点, 水深的变化对其强度和稳定性影响十分敏感, 所以限制了板桩结构向深水化的发展^[1]。经过多年对板桩墙结构码头设计实践和探索, 中交第一航务工程设计院

收稿日期: 2014-06-19

^{*}基金项目: 国家博士后基金 (2011M500906)

作者简介: 高鹏 (1988—), 男, 硕士研究生, 从事港口码头地震工程方面的研究。

新近提出了一种新型的遮帘式板桩墙码头结构, 可作为大型深水泊位的码头结构^[2]。

板桩码头在使用过程中除承受一般设计中的作用外, 还会受到地震的作用。设计不当结构会在地震中发生破坏, 如日本神户 Hyogo-ken 地震中板桩码头遭到严重破坏, 钢板桩断裂。然而由于缺乏关于此类破坏的观测资料, 关于遮帘式板桩码头动力响应的试验模型比较少, 因此准确描述地震作用下遮帘式板桩码头的地震响应与变形灾变机理尚较困难。

近年来关于遮帘式板桩码头的研究有: 蔡正银^[3]结合设计需要, 开展多组土工离心模型试验, 研究了均匀砂土地基中遮帘桩与前墙距离对前墙土压力分布的影响。吕宁^[4]在某大型深水泊位遮帘式板桩码头设计中, 开展了大型土工离心模型试验, 研究了初步设计方案中遮帘式板桩码头各构件的受力和变形情况, 对初步设计方案进行了验证, 并对原设计提出了优化。李元音^[5]从数值模拟的角度通过研究全遮帘板桩这种新型结构的受力特点及边界条件, 建立了相应的计算模型。蒋建平^[6]利用 ABAQUS 软件研究了京唐港 32[#]遮帘式板桩码头在不同加速度峰值的地震荷载作用下的动态响应。A. Takahashi^[7]采用了离心机模型试验研究了桩基码头动力行为, 集中研究了桩基的破坏机理, 以及地震作用下回填土以及底层砂土层的液化对码头永久残余变形的影响。Omer Bilgin^[8]鉴于传统极限平衡法的锚定板桩墙设计, 运用有限元着重研究了施工方法对墙体变形、墙体弯矩和锚杆拉力的影响。

从笔者搜集的资料看, 目前针对遮帘式板桩码头地震动力响应研究的成果相对较少。因此, 借助数值手段研究遮帘式板桩码头的地震破坏机理与变形灾变性能是地震工程安全设计中值得研究的课题。本文主要通过大型非线性有限元 ADINA 程序研究遮帘式板桩码头受地震荷载残余变形与抗震受力特征, 具体分析遮帘桩前墙间距、遮帘桩长度和厚度等一系列影响因素。

1 分析过程

1.1 计算模型与载荷

计算模型以京唐港 32[#]码头为背景: 水深 $H = 18\text{ m}$, 前墙到遮帘桩距离 $L = 3\text{ m}$, 前墙到锚碇墙距离 $l_z = 33\text{ m}$, 前墙厚度 $h_1 = 1\text{ m}$, 前墙长度 $l_1 = 32\text{ m}$, 遮帘桩厚度 $h_2 = 2\text{ m}$, 遮帘桩长度 $l_2 = 33.5\text{ m}$, 锚碇墙厚度 $h_3 = 1.2\text{ m}$, 锚碇墙高度 $l_3 = 18.5\text{ m}$, 前拉杆直径 $d_1 = 0.075\text{ m}$, 后拉杆直径 $d_2 = 0.095\text{ m}$, 前墙遮帘桩及锚碇墙墙体弹性模量 $E_{a1} = E_{a2} = E_{a3} = 2.8 \times 10^4\text{ MPa}$, 水平及竖向最大加速度幅值 $a_{h\max} = 0.2g$ 、 $a_{v\max} = 0.1g$, 拉杆均为 Q345 钢棒, 前墙及锚碇墙均为连续结构, 拉杆为间隔布置, 选取有拉杆一剖面作为典型计算截面, 模型尺寸见图 1, 网格划分见图 2。

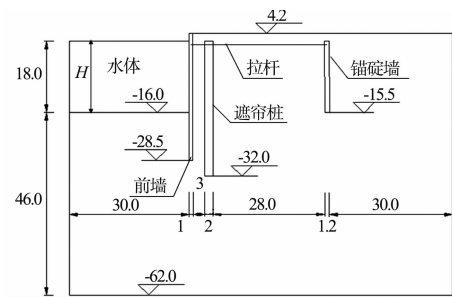


图 1 基准模型尺寸 (单位: m)

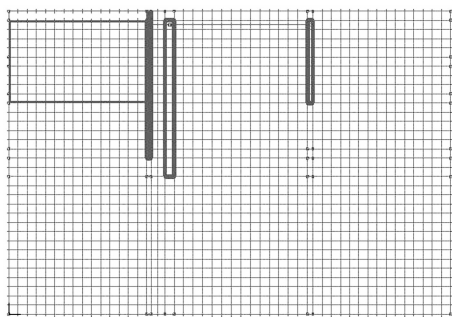


图 2 模型网格剖分图

模型中定义了考虑摩擦的桩土接触, 采用约束方程接触算法, 在该算法中使用了隐式时间积分方法, 接触位移选用小位移算法, 水体采用势流体单元, 拉杆采用 rebar 单元。填土表面所加静载荷为 20 kN/m, 在素土状态下, 定义重力荷载后, 计算土体初始地应力, 并将所有节点应力以 txt 格式导出。

静力计算通过施加初始地应力模拟初始条件，动力计算通过导入地震波在静力计算结果上进行重启分析。地震波采用 kobe 波，水平与竖直两个方向同时加载，在 ADINA 中，地震波是以比例因子的时间函数加到所有节点上的，与处理重力的方法一样，水平方向 $a_{\max}=0.2g$ ，竖直方向最大加速度幅值取为水平方向的一半，动力分析时间步为 0.02 s，共 1 000 步，波形如图 3 所示。

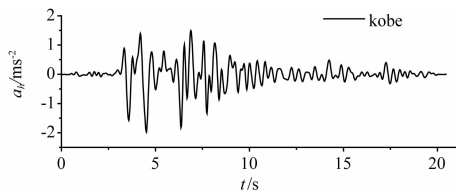


图 3 输入地震波

1.2 材料参数

板桩码头的墙后土体为分层填土，土体采用理想弹塑性 Drucker-Prager 模型模拟。前墙、遮帘桩、锚碇墙及拉杆采用各向同性的弹性材料模拟，前墙、遮帘桩及锚碇墙材料为 C25 混凝土，抗压强度为 16.7 MPa，拉杆材料为 Q345 钢棒，短拉杆直径为 75 mm，屈服拉力为 1 524 kN，长拉杆直径为 95 mm，屈服拉力为 2 445 kN，水体采用势流体单元进行模拟。基准模型中各材料的参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 土体、墙体、拉杆材料参数

材料类型	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	粘聚力/Pa	弹性模量/MPa	泊松比
土层 1	1.80	32.0	5 000	26.00	0.29
土层 2	1.80	28.0	5 000	26.00	0.29
土层 3	1.91	27.0	20 000	8.97	0.30
土层 4	1.93	28.0	16 000	12.60	0.30
土层 5	1.76	17.1	16 000	3.60	0.30
土层 6	1.91	19.6	18 000	8.97	0.30
土层 7	1.97	31.0	5 000	26.00	0.29
土层 8	1.97	24.7	31 000	8.97	0.30
土层 9	1.97	32.0	5 000	26.00	0.29
混凝土	2.50			2.80×10^4	0.20
钢	7.85			2.06×10^5	0.30

表 2 水体材料参数

材料类型	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	体积弹性模量/Pa
水体	1 000	2.3×10^9

1.3 边界条件

考虑海面海浪运动的影响，在 ADINA 中将海面设为自由液面，考虑地震作用下水体对结构动水压力影响，将海水与结构接触面定义为流固耦合边界。在动力数值模型中，不可能模拟整个无限地基，因此需要在一定的范围将地基截断，只模拟截断边界以内的部分，为了保证运动波能够通过截断边界而不被反射，需要在截断边界处施加人工黏弹性边界条件。二维黏弹性边界基本参数的计算如下：

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho c_p \tag{1}$$

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho c_s \tag{2}$$

式中： K_{BN} 、 K_{BT} 分别为法向和切向弹簧刚度系数， C_{BN} 、 C_{BT} 分别为法向和切向阻尼器阻尼系数， G 为介质剪切模量， R 为波源至人工边界点的距离， ρ 为介质密度， α_N 、 α_T 分别为法向与切向黏弹性边界修订系数，通常取 $\alpha_T=0.35 \sim 0.65$ 、 $\alpha_N=0.8 \sim 1.2$ ，本文中取 $\alpha_T=0.5$ 、 $\alpha_N=1.0$ ， c_p 、 c_s 分别为介质的 P 波与 S 波波速，即

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \tag{3}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{4}$$

式中： λ 、 μ 分别为拉梅第 1、第 2 参数。

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \tag{5}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{6}$$

式中： E 、 ν 分别为介质的弹性模量和泊松比。本文采用公式(1)、(2)，计算出模型两侧及底部人工边界的弹簧刚度系数和阻尼系数，利用大型有限元软件 ADINA 中的 Spring 单元，将弹簧单元和阻尼单元分别施加在对应的人工边界节点的切向与径向。

1.4 接触条件

由于前墙、遮帘桩及锚碇墙均为各向同性弹性材料，而土层为莫尔库仑材料，这两种特性相差很远的材料在共同受力的情况下，在接触面及

其容易产生错动滑移或开裂, 所以需采取接触算法。该接触算法是经典的 Lagrange 乘子算法, 不需要人工控制接触面刚度, 自迭代满足界面的运动和动力方程。考虑到接触面的摩擦因素, 使用隐式时间积分方法, 精度高, 计算稳定。

本文共定义了 6 个接触面、3 个接触对, 摩擦系数取 0.5, 对于水体与前墙及土体的接触通过定义流固耦合边界实现。

1.5 计算工况

为研究地震荷载作用下遮帘式板桩码头的动力特性, 利用有限元法分析了前墙与遮帘桩间距、遮帘桩厚度、遮帘桩长度、和遮帘桩强度等一系列抗震设计参数对遮帘式板桩码头残余变形及力学特性的影响。计算工况如表 3 所示。

表 3 遮帘式板桩码头模拟工况			
编号	L/H	h_2/H	l_2/H
①	0.11	0.056	0.938
②	0.17	0.111	1.063
③	0.22	0.167	1.188
④	0.28	0.222	1.313

2 抗震特性及参数研究

2.1 残余变形与受力特征分析

基准模型下, 遮帘式板桩码头水平向残余变形云图如图 4 所示, 可以看出在前墙与锚碇墙距离范围内存在较大水平向残余变形, 大小随深度的增加而减小, 结构后下方存在一系列圆弧, 说明结构在地震荷载作用下, 存在圆弧滑动破坏的可能。

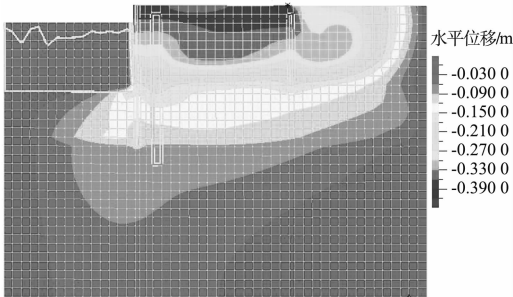


图 4 水平残余变形云图

图 5 给出了震后拉杆拉力云图。可以看出: 长、短拉杆拉力均沿背离前墙方向减小, 拉杆最大拉力出现在长拉杆左端。因此, 在遮帘式板桩

码头抗震设计时, 长拉杆直径宜适当大些。

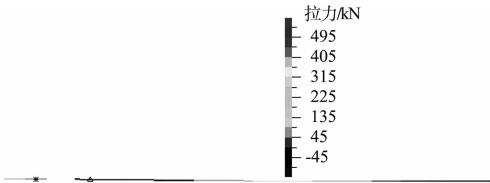


图 5 拉杆拉力云图

2.2 前墙与遮帘桩间距影响

图 6 a) 为不同前墙与遮帘桩间距比 L/H 时前后拉杆拉力 F 沿拉杆的分布情况 (拉杆上任一点距前拉杆左端距离设为 l , 前后拉杆总长为 l_2)。

由图 6 可以看出: 拉杆拉力沿拉杆分布规律一致, 前拉杆拉力沿背离前墙方向逐渐减小, 后拉杆拉力沿背离遮帘桩先减小后小幅增加。这是因为墙体发生变形时, 墙体与拉杆连接处的作用力最大^[9], 且土体与拉杆之间存在摩擦, 拉杆长度较大, 摩擦效应较为显著, 阻碍了力的传递。最大拉力值出现在长拉杆与遮帘桩连接处, 后拉杆最大拉力约为 800 kN, 远大于前拉杆最大拉力 500 kN, 随前墙与遮帘桩间距的增加, 拉杆拉力减小, 但减幅不大。

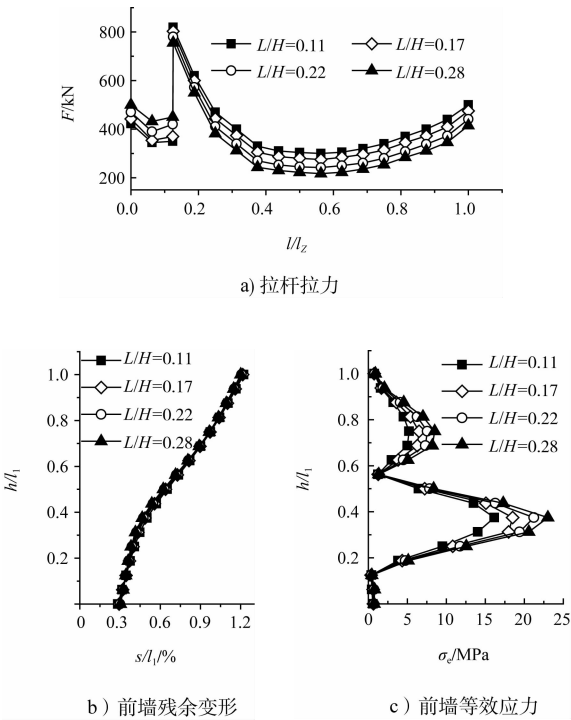


图 6 不同前墙与遮帘桩距离下拉杆拉力、前墙残余变形、墙身等效应力分布

图 6 b)、c) 分别为前墙残余变形比 s/l_1 及墙体等效应力 σ_e 沿墙高的分布情况(墙上任一点距前墙底部距离设为 h , 墙体任一点残余变形量为 s)。

残余变形及等效应力分布规律一致, 前墙残余变形基本呈倾斜变形模式, 在前沿泥面处出现小幅弯曲变形, 等效应力最大值出现在墙体中下部 $h/l_1 = 0.375$ 处, 即前沿泥面处, 墙体上部 $h/l_1 = 0.75$ 处出现小的应力集中。

随前墙与遮帘桩距离增加, 墙身等效应力增大, 残余变形增大, 但增幅极小, 前墙距遮帘桩距离越大, 前墙所承受的前墙与遮帘桩间的土压力越大, 导致前拉杆拉力、前墙残余变形、前墙等效应力均增大。前拉增大的拉力限制了前墙残余变形的发展, 因此前墙残余变形增幅极小, 后拉杆拉力随前墙到遮帘桩距离的增加而减小, 这主要是由于遮帘桩承受的遮帘桩与锚碇墙间土压力减小所致。从减小前墙残余变形及所受应力角度出发, 在遮帘式板桩码头抗震设计时可适当减小前墙到遮帘桩间距。

2.3 遮帘桩厚度影响

图 7 给出了不同遮帘桩厚度比 h_1/H 下前墙墙体地震残余变形比 s/l_1 和前墙等效应力 σ_e 沿墙体高度及拉杆拉力沿拉杆长度的分布情况。

由图 7 可以看出, 前后拉杆拉力沿拉杆及前墙地震残余变形、等效应力沿墙体高度分布规律均一致。随着遮帘桩厚度增加, 前拉杆拉力增大, 后拉杆拉力减小, 前墙残余变形及墙身等效应力减小, 遮帘桩厚度越大, 其自立性及拉结能力越大, 因此前墙残余变形减小, 前拉杆拉力增大。由于自立性的增加, 其自身所抵抗遮帘桩到锚碇墙间土压力亦越大, 因此后拉杆拉力及前墙墙身等效应力均越小。

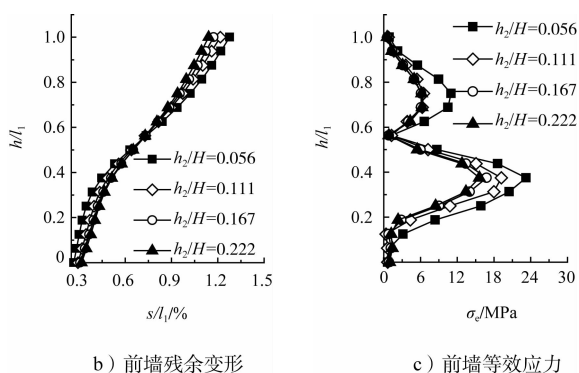
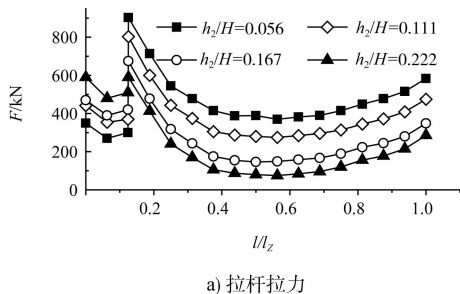


图 7 不同遮帘桩厚度下拉杆拉力、前墙残余变形、墙身等效应力分布

后拉杆承受最大拉力约为 900 kN, 远小于屈服拉力 2 445 kN, 因此抗震设计时应重点考虑前墙残余变形及墙身等效应力, 遮帘桩厚度越大前墙残余变形及墙身等效应力均越小, 理论上, 遮帘桩厚度越大, 结构越安全。

2.4 遮帘桩长度影响

图 8 给出了不同遮帘桩长度比 l_2/H 下前墙地震残余变形比 s/l_1 和前墙等效应力 σ_e 沿墙体高度及拉杆拉力沿拉杆长度的分布情况。

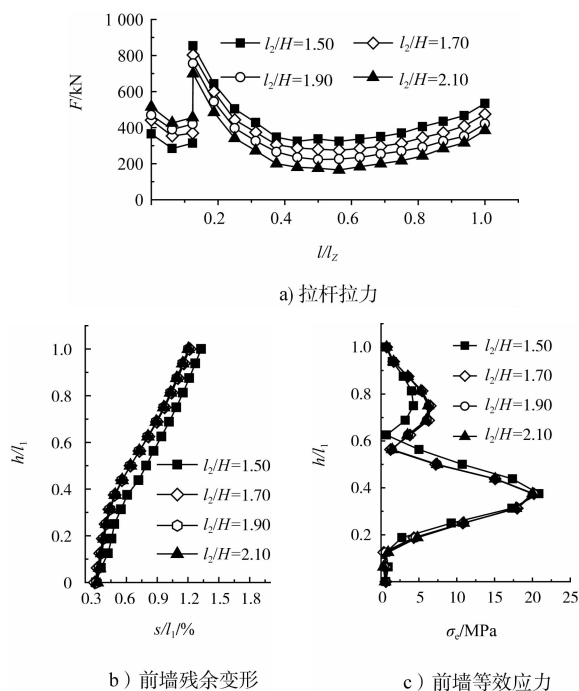


图 8 不同遮帘桩长度下拉杆拉力、前墙残余变形、墙身等效应力分布

由图 8 看出, 前后拉杆拉力沿拉杆及前墙地震残余变形、等效应力沿墙体高度分布规律均一

致, 随遮帘桩长度增加, 前拉杆拉力增大, 后拉杆拉力、前墙残余变形及墙身等效应力均减小, 遮帘桩长度越大, 其自身抵挡土压力及拉结能力均越大, 拉结能力的增大, 导致前拉杆拉力增大, 遮帘桩自身抵挡遮帘桩到锚碇墙间土压力能力的增加, 导致后拉杆拉力及前墙残余变形、墙身等效应力减小。由图 8 b)、c) 可以看出, 前墙残余变形及等效应力的变化极小, 在遮帘桩长度达到一定范围时, 继续增加遮帘桩长度并不能有效减小前墙残余变形及墙身等效应力,

应当注意: 在基准工况下, 改变遮帘桩长度时, 前墙墙身最大等效应力均在 20 MPa 左右, 超过墙体抗压强度 16.7 MPa, 因此, 为保证地震荷载作用下结构的安全, 遮帘桩其他参数不可采用本文的基准工况, 从经济角度考虑, 在进行遮帘式板桩码头抗震设计时, 可以将遮帘桩长度适当减小。

3 结 论

1) 前墙到遮帘桩间距的增加, 会小幅减小拉杆拉力, 但会导致前墙墙身等效应力增加, 前墙到遮帘桩间距的变化对前墙残余变形影响较小, 考虑到拉杆具有很大安全剩余, 为减小前墙墙身等效应力, 建议适当减小前墙到遮帘桩间距。

2) 遮帘桩厚度的增加, 会显著减小拉杆拉力及前墙墙身等效应力, 前墙残余变形也会小幅减小, 理论上遮帘桩厚度越大, 结构抗震能力越强。

3) 遮帘桩长度的增加, 会减小拉杆拉力, 但并不会显著减小前墙残余变形及墙身等效应力, 考虑到拉杆拉力具有很大安全剩余, 为节约材料, 遮帘桩长度比可以适当减小。

参考文献:

[1] 李景林, 蔡正银, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头结构离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1 182-1 187.

[2] 刘文平, 郑颖人, 蔡正银, 等. 遮帘式板桩码头结构有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(4): 573-577.

[3] 蔡正银, 徐光明, 曾友金. 遮帘式板桩码头土压力离心模型试验研究[J]. 港工技术, 2005, 12(S1): 51-55.

[4] 吕宁, 蔡正银, 徐光明, 等. 遮帘式板桩码头结构设计方案优化与验证[J]. 港工技术, 2005(6): 22-24.

[5] 李元音, 刘永绣. 遮帘式板桩码头结构的空问有限元法分析[J]. 港工技术, 2005, 12(S1): 37-40.

[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] Takahashi A, Takemura J. Liquefaction-induced large displacement of pile-supported wharf [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering , 2005, 25: 811-825

[8] Bilgin O. Numerical studies of anchored sheet pile wall behavior constructed in cut and fill conditions [J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37: 399-407.

[9] 蒋国栋, 张日向, 姜萌. 板桩码头的 ANSYS 有限元分析[J]. 中国水运, 2009, 9(9): 81-83.

(本文编辑 郭雪珍)

~~~~~

## · 消 息 ·

### 三航局承建的上海大芦线航道整治二期工程开工

3 月 26 日, 三航局承建的上海大芦线航道整治二期工程( 宣桥段) 2 标段工程正式开工。

该项目位于上海市南汇区宣桥镇, 是市重点基础设施建设项目, 建设总里程为 1 271 m。工程包括护岸工程、防汛道路及支流桥工程、土方工程及排水工程, 合同造价 1.06 亿元, 计划工期 540 d。

大芦线航道起于黄浦江, 止于芦潮港内河集装箱港区同盛大道, 直通自贸区, 是洋山深水港船运转内河航道的重要通道, 也是上海市城市垃圾集装运输的主要通道。

( 来源: 三航局 )