



基于ABAQUS的板桩码头地震动力响应研究*

蒋建平, 刘春林, 蒋宏鸣, 史旦达

(上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306)

摘要: 基于ABAQUS软件的隐式模块和有限元-无限元方法对单锚板桩码头进行了地震动响应研究。研究发现, 在相同地震波不同加速度峰值情况下, 峰值加速度对板桩码头的板桩弯矩、剪力和拉杆拉力有重要影响, 与静力分析时的情况相比较, 地震加速度峰值每增大0.1g, 板桩最大弯矩相应增大大约40%, 拉杆拉力增大大约10%~50%, 但拉杆拉力增幅在后期逐渐趋于稳定; 地震作用下, 拉杆最大拉力与板桩墙最大剪力(单宽)基本相等; 地震加速度峰值对板桩墙底与锚碇之间塑性区开展范围也有一定的影响。结果表明, 与静载相比, 地震对板桩码头的影响不容忽视。研究结果可为板桩码头考虑地震影响的设计提供参考。

关键词: ABAQUS; 板桩码头; 动力时程分析; 地震加速度峰值

中图分类号: U 656.1⁺12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0040-006

On seismic dynamic response of sheet pile wharf based on ABAQUS

JIANG Jian-ping, LIU Chun-lin, JIANG Hong-ming, SHI Dan-da

(College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Based on the implicit module and the FEM-IEM coupling model of ABAQUS, we study the dynamic response of the single anchor sheet pile wharf under the seismic load. It is found that the peak acceleration has a great effect upon the sheet pile bending moment, shear force and tension force of tension bar with the same seismic wave in different peak accelerations. Comparing with the data of static analysis, the sheet pile's maximum bending moment grows by 40% and the tension force of tension bar by 10% to 50% as the seismic peak acceleration increases by 0.1g, but the growing rate of tension force of tension bar tends to be stable at the end. Under the seismic load, the maximum tension force of tension bar closes to the maximum shear force per unit width on the sheet pile. This paper makes a study on the impact of seismic peak acceleration upon the range of plastic zone between sheet pile bottom and anchorage wall. The results show that seismic ground motion imposes an important effect on the sheet pile wharf in comparison with static load, thus it provides references for design of the sheet pile wharf under the influence of earthquake.

Key words: ABAQUS; sheet pile wharf; dynamic time history analysis; seismic peak acceleration

板桩码头是港口水工建筑物中的一种重要结构形式, 由于其结构简单、材料用量省、施工方便、施工速度快、对复杂的地质条件适应性强等特点, 已在国内外广泛使用^[1-2]。目前, 现行的水运工程抗震设计规范及有关研究对板桩码头结构

的抗震设计研究涉及较少, 特别对于板桩墙的内力和拉杆拉力的可靠度研究分析尚不成熟^[1-3]。对地震作用下板桩码头结构的受力和结构与土的相互作用进行研究是很有必要的^[4]。鉴于此, 本文利用大型软件ABAQUS的有限元-无限元耦合方法对

收稿日期: 2012-11-14

*基金项目: 上海海事大学科研项目(20120074); 港口、海岸及近海工程校重点学科项目(A2120016001X)

作者简介: 蒋建平(1966-), 男, 博士后, 副教授, 主要从事岩土工程、地震工程方面的教学和研究工作。

板桩码头进行了地震动响应研究。

本文利用典型的 Kobe 地震波, 通过对加速度峰值分别调整为 0.1g, 0.2g, 0.3g, 0.4g 和 0.5g 情况下对板桩码头进行动力时程分析。本文主要分析不同加速度峰值地震作用下板桩墙弯矩、剪力和拉杆拉力的变化情况, 通过动力计算结果与静力计算结果进行对比分析, 得出了一些有价值的结论。

1 计算模型的确定和参数选取

1.1 计算模型的确定

本文的单锚板桩码头结构尺寸来自文献[5], 为建模的方便本文对一些土层进行了简化。模型尺寸如图 1 所示。板桩墙和锚碇板均是钢筋混凝土材料, 数值模拟时均采用实体单元。拉杆为钢筋材料, 拉杆直径为 7 cm, 使用梁单元进行模拟。土体采用四节点缩减积分实体单元, 数值模拟时考虑砂土的剪胀性。板桩墙与锚碇板之间的距离为 18.5 m, 满足水运工程抗震设计规范规定要求。拉杆与板桩墙和锚碇板之间的连接采用规范规定的铰接方式。数值计算模型见图 2, 模型近场采用有限元, 远场采用无限元模拟。由于水平向自由表面场地不平整, 为避免远场无限元对计算结果产生影响, 设置有限元距板桩墙各横向延伸 100 m, 从海底向下延伸 40 m。设置无限元与有限元的尺寸相同, 总宽 400 m, 总高 89.85 m。为使得地震荷载对土-结构的响应效果好, 在模型底部有限元和无限元的交界处设置了一层 2 m 厚的岩石, 岩石材料的物理力学性质与混凝土相同。板桩码头周围有限元网格划分如图 3 所示。

1.2 计算模型参数的选取

土体采用莫尔库伦强度模型, 其动应力应变

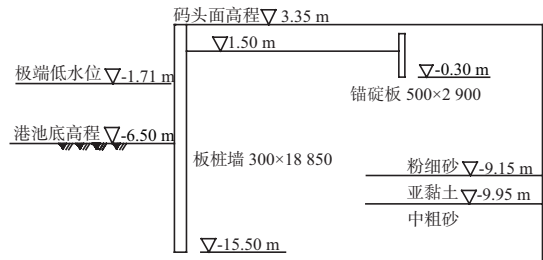


图 1 板桩码头结构 (单位 mm)

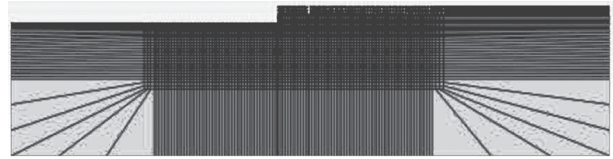


图 2 二维有限-无限元计算模型

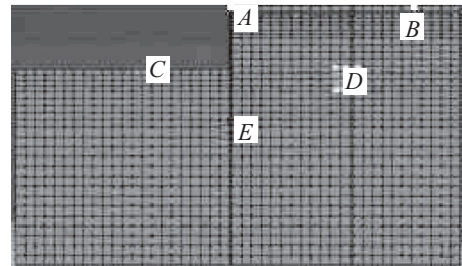


图 3 板桩码头周围有限元网格划分

关系为一个平行四边形^[6]。拉杆、板桩墙和锚碇板采用线弹性模型, 参数见表 1。ABAQUS 中可以定义不同类型的阻尼^[7-8], 本文采用瑞利阻尼, 可以在设置材料模块里面直接定义瑞利阻尼。瑞利的阻尼矩阵是由单元质量矩阵 m^e 和与单元刚度矩阵 m^e 的线性组合, 即为: $c^e = \alpha m^e + \beta m^e$; α 为质量阻尼系数, β 为刚度阻尼系数^[9]。陈国兴^[10]认为地震动作用下土体的阻尼比一般在 5%~25%。由于土质越硬, 阻尼比越小; 土质越软, 阻尼比越大, 综合考虑选取土体阻尼比如表 1 所示。ABAQUS 软件可以很容易提取结构的自振频率。在实际工程中, 一般取多质点体系的前两阶自振频率, 其大小见表 2。

表 1 材料物理力学参数

土名	密度/(t·m ⁻³)	有效密度/(t·m ⁻³)	摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	弹性模量/MPa	泊松比	阻尼比
粉细砂	2.00	1.00	25	3	26	0.29	0.08
亚黏土	1.95	0.95	11	25	51	0.35	0.10
中粗砂	2.00	1.00	30	2	33	0.30	0.05
拉杆	7.85	6.85			2.06 × 10 ⁵	0.20	0.02
板桩、锚碇	2.50	1.50			2.80 × 10 ⁴	0.20	0.02

表2 结构频率

振型	频率/Hz	周期/s	圆频率/(rad·s ⁻¹)
第一阶振型	3.032	0.330	19.05
第二阶振型	3.051	0.328	19.17

1.3 动力边界的选取与地震波的输入

在数值模拟结构-土在地震作用下的相互作用时，需要切取出有限的区域来进行计算，选择的区域越大，计算的效率越低，切取的区域对结果的可靠度影响较小。在进行动力分析时，地震波能会在人工切取出的边界上反射回计算区域，导致模拟结果失真^[11]。为此，需要在人工截断的边界上引入人工边界条件来消除波的反射。目前设置人工边界条件主要有边界元边界、无限元边界、透射边界、黏弹性边界和黏性边界等。每一种边界处理都有各自的优缺点，本文采用无限元边界来处理波的反射问题。本文采用典型的地震波Kobe波，为了节省计算时间只选取了显著的波段。对Kobe波取前面4~25 s波段，总时程21 s。为了比较不同加速度峰值下结构的响应情况，根据以下公式进行加速度峰值调整：

$$a'(t) = \frac{a'_{\max}}{a_{\max}} a(t) \quad (1)$$

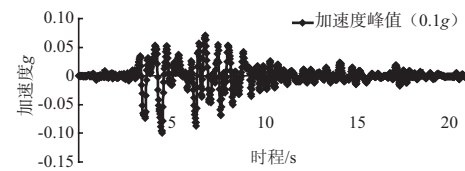
式中： $a'(t)$ ， a'_{\max} 分别为调整后地震加速度曲线及峰值； $a(t)$ ， a_{\max} 分别为调整前地震加速度曲线及峰值。在地震作用下结构-地基动力相互作用问题中，地震波输入处理得合理与否是决定地震动荷载数值计算成功与否的关键，它将直接影响计算结果的可靠度。利用无限元模拟无限区域时，地震动荷载选择以加速度时程为输入方式时，将使结构位移时程产生漂移；利用等效荷载输入方式输入地震波荷载将会弱化地震波的作用；利用位移时程作为地震荷载输入地震波能得到比较好的效果^[12]。本文采用位移时程作为地震荷载输入方式，位移时程在模型底部有限元和无限元的交界处输入。根据水运工程抗震设计规范^[13]，水运工程建筑物的地震作用，应根据建筑物形式，分别对纵、横两个方向或其中一个方向进行验算。由于地震作用下，影响板桩码头结构安全的主要因素是水平向地震荷载，故本文只输入水平向荷载进行研究分析。

2 计算结果分析

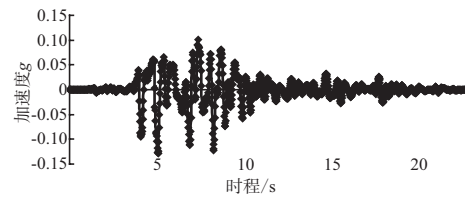
2.1 地震后提取的加速度时程曲线

输入加速度峰值为0.1g的地震位移时程荷载（ g 为重力加速度），分别在图3所示A,B,C,D,E点提取其加速度时程曲线。A点位于板桩墙顶部；B点位于码头面顶部，距离锚碇板9 m；C点位于港池海底面，距离板桩墙13.6 m处；D点距离码头面10.37 m，距离板桩墙16.87 m；E点位于板桩墙底部。

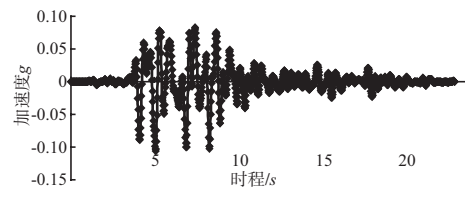
提取的各点加速度时程曲线如图4所示。从图4可发现，5点的加速度时程曲线各有其特点，这与地震到达各点所经过的路径或地层的不同有关；A,B,C这三点的最大加速度放大明显。



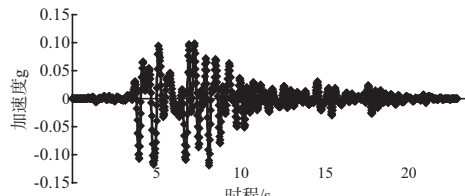
a) 输入



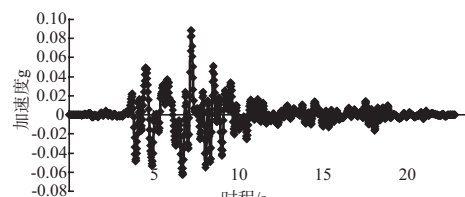
b) A点



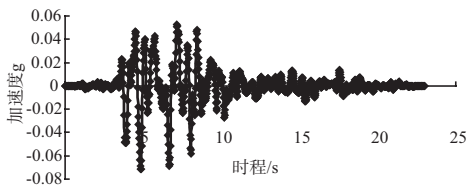
c) B点



d) C点



e) D点



f) E点
图4 提取各点加速度时程曲线

2.2 板桩墙弯矩分析

地震过程中, 板桩墙最大弯矩出现的时间在7.56 s左右。由图5可知, 地震作用下板桩墙弯矩分布曲线与静力作用下的分布形状相似。在静力作用下, 板桩墙最大弯矩出现的位移在桩顶以下-6.5 m处。在地震作用下, 板桩墙最大弯矩出现的位置与加速度峰值有关系, 并且随着加速度峰值的增加, 最大弯矩出现的位置向下移。加速度峰值为0.5g时, 震后最大弯矩发生在距离桩顶-8 m处, 且不同地震加速度峰值作用下板桩最大弯矩出现的位置变化幅度不大。

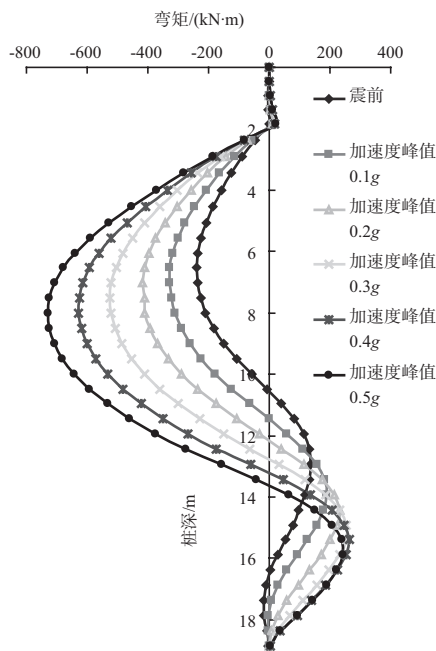


图5 板桩墙弯矩

由表3统计的数据显示, 加速度峰值每增大0.1g (g 为重力加速度), 最大弯矩相应增大约43%。地震过后板桩墙的最大弯矩比地震过程中的最大弯矩减小10%左右。地震前板桩最大弯矩为240.5 kN·m, 加速度峰值为0.5g的震后弯矩最大值为730 kN·m, 震后最大弯矩较震前最大

弯矩增大489.5 kN·m, 增幅为203.53%。在桩顶下-14 m附近也出现了较大的弯矩, 加速度峰值为0.5g的震后最大弯矩为242.6 kN·m, 静力计算时结果为136.7 kN·m, 震后结果较静力结果增大了105.9 kN·m, 增幅为77.47%, 相对板桩最大弯矩变化幅度不大, 地震加速度峰值与板桩最大弯矩成线性关系。

表3 加速度峰值与最大弯矩关系

加速度峰值	震前/		震中		震后	
	大小/(kN·m)	增幅/%	大小/(kN·m)	增幅/%	大小/(kN·m)	增幅/%
0.1g	240.5	43.37	344.8	43.37	329.6	37.05
0.2g	240.5	86.65	448.6	86.65	419.2	74.30
0.3g	240.5	132.10	558.2	132.10	524.5	118.08
0.4g	240.5	175.38	662.3	175.38	627.6	160.97
0.5g	240.5	219.00	767.2	219.00	730.0	203.53

2.3 板桩墙剪力分析

由图6可知, 板桩上部剪力最大值出现在板桩墙与拉杆的交接处, 即桩顶下-1.85 m处。板桩上部震后最大剪力与板桩下部震后最大剪力相比较小, 板桩墙震后最大剪力出现在板桩的下部, 约在板桩顶下-12.5 m处, 此处也是亚黏土土层所处的位置。当加速度峰值达到一定值后板桩墙最大剪力出现的位置基本不变。通过比较图6和图7, 震后板桩最大剪力与拉杆最大拉力分布基本一致(单宽)。在进行板桩墙强度验算时, 可以根据拉杆最大拉力校核板桩墙强度。

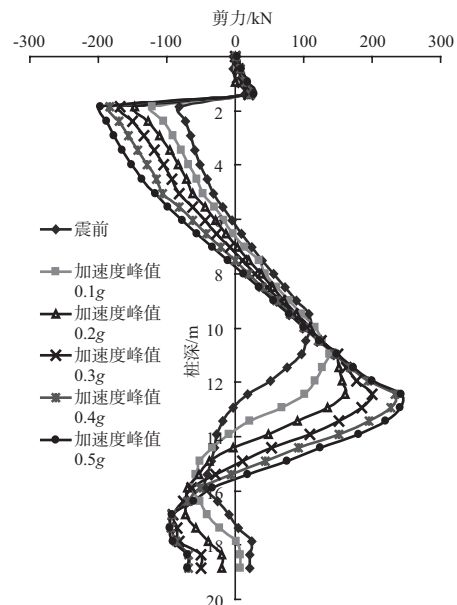
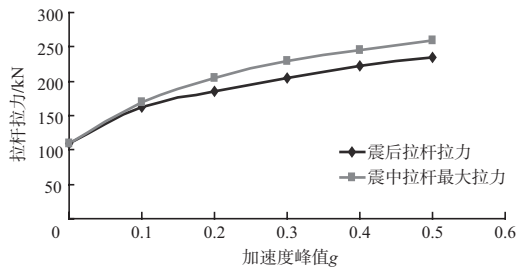
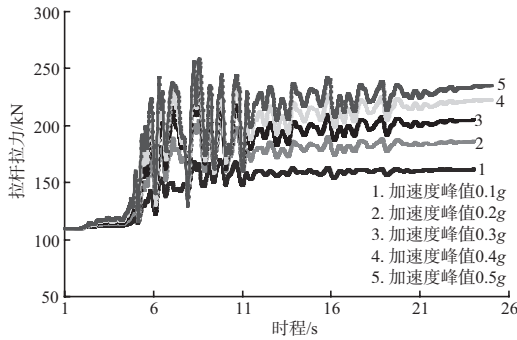


图6 板桩墙震后剪力分布



a) 拉杆拉力与加速度峰值关系



b) kobe波拉杆拉力时程曲线

图7 拉杆拉力与加速度峰值关系

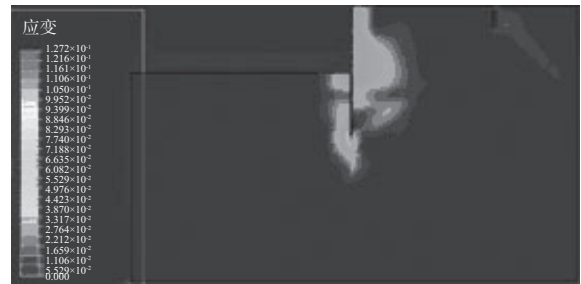
2.4 拉杆拉力地震时程分析

由图7可知，拉杆拉力随着加速度峰值的增大而增大，但拉杆拉力增幅在后期逐渐趋于稳定。地震过程中拉杆拉力比震后拉杆拉力大10%左右。加速度峰值为0.5g时，拉杆拉力较静力计算结果大149 kN，增幅达135.45%。拉杆拉力增大的幅度约为板桩墙最大弯矩增大的幅度的1/2。拉杆拉力最大值出现的时刻与板桩墙弯矩出现最大值的时刻基本相同。拉杆拉力出现最大值的时刻为地震开始后7.52 s，与板桩墙最大弯矩出现的时刻7.56 s相近。输入地震位移时程曲线的最大位移时刻为5.5 s，地面B点的最大水平位移出现在地震开始后6.9 s，由此可得出，板桩码头结构最大响应发生的时刻滞后于位移时程峰值和加速度峰值出现的时间。

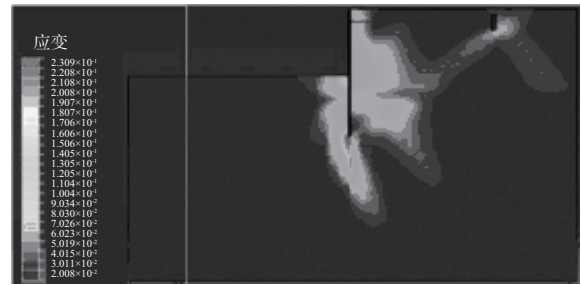
2.5 板桩码头整体稳定性分析

研究地震荷载作用下板桩码头整体稳定性破坏机理有利于工程的抗震设计 [1,9-11]。这里基于有限元极限分析法分析板桩码头在不同地震加速度峰值情况下板桩码头的整体稳定性。结果显示，随着地震加速度峰值的不断增大，板桩墙与锚碇板之间产生的塑性区不断发展和扩大，最终形成连通的塑性区，如图8所示。当土体的塑性区充分

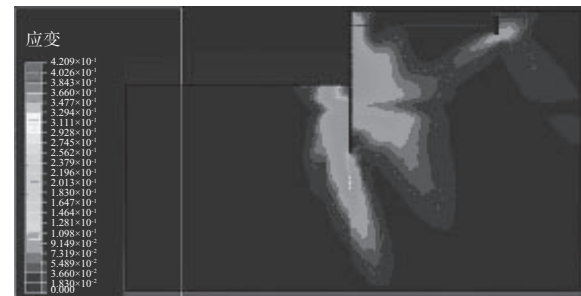
发展且达到不能满足力的平衡条件时，计算过程不收敛，从而可以判断结构已经发生破坏。图8分别是震前和加速度峰值分别为0.1g，0.2g，0.3g，0.4g，0.5g荷载情况下板桩码头土体等效塑性应变（PEEQ）的变化过程。等效塑性应变不为零时，土体发生屈服，但整体稳定性并没有发生破坏。随着地震加速度峰值的最大，等效塑性区不断增大和发展，并且与锚碇板形成连通的区域。



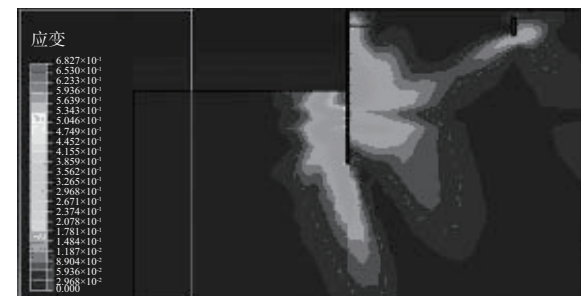
a) 震前



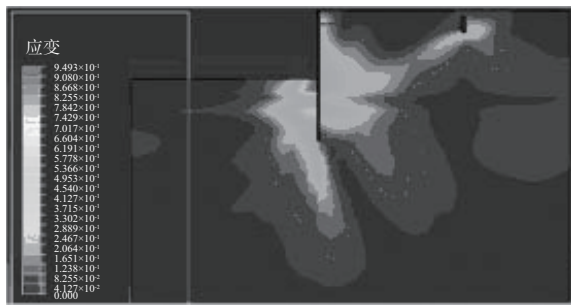
b) 0.1g



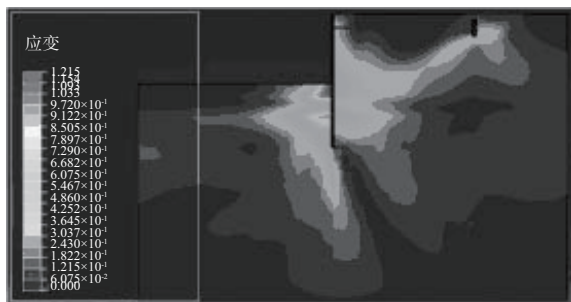
c) 0.2g



d) 0.3g



e) 0.4g



f) 0.5g

在距离海底面下2.65 m处有一层0.8 m厚的亚黏土。在地震过程中亚黏土等效塑性应变值比周围砂土的等效塑性应变值小,有利于阻碍塑性区的形成,同时也验证了地震荷载作用下黏性土不易发生屈服破坏。本文板桩码头的模拟结果并没有发生整体稳定性破坏,而是锚碇板发生了较大的水平位移导致板桩前墙发生大尺度向海侧倾斜导致的破坏,锚碇破坏先于板桩码头整体破坏。数值模拟的结果显示,板桩码头的破坏形式与现有收集到的有关板桩码头的破坏形式的情况基本吻合^[14-16]。

3 结论

拉杆拉力随着加速度峰值的增大而增大,加速度峰值与拉杆拉力近似成线性关系,地震过程中拉杆最大拉力比震后拉杆拉力大10%左右。不同加速度峰值地震荷载作用下,拉杆最大拉力与板桩墙最大剪力(单宽)基本相等。

桩墙弯矩与地震加速度峰值成线性关系。地震加速度峰值每增大0.1g,板桩最大弯矩相应增大40%。震后板桩弯矩分布规律与静力计算结果基本相同。并且拉杆拉力最大值出现的时刻与板桩墙弯矩出现最大值的时刻基本相同。

随着地震加速度峰值的增大,板桩墙底与锚碇之间的塑性区从局部产生到发展连通成一片,塑性区范围越来越大。当塑性区充分发展时,板桩码头结构出现整体稳定性破坏。

参考文献:

- [1] 韩理安,席与耀.港口水工建筑物[M].北京:人民交通出版社,2008.
- [2] Omer Bilgin. Numerical studies of anchored sheet pile wall behavior constructed in cut and fill conditions[J]. Computers and Geotechnics, 2010, 37: 399-407.
- [3] Kristian Krabbenhoft, Lars Damkilde, Sven Krabbenhoft. Ultimate limit state design of sheet pile walls by finite elements and nonlinear programming[J]. Computers and Geotechnics, 2005, 83: 383-393.
- [4] Samuel R Christie. Seismic design methods for anchored sheet pile bulkheads[C]. Ports 2010: Building on the Past, Respecting the Future. Jacksonville, Florida: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [5] 交通部第一航务工程勘察设计院.港口工程结构设计计算例[M].北京:人民交通出版社,1998.
- [6] 陈国兴.岩土地震工程学[M].北京:科学出版社,2007.
- [7] 费康,张建玮.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [8] 张文元,费红姿,连尉安,等.ABAQUS动力学有限元分析指南[M].香港:中国图书出版社,2005.
- [9] 顾淦臣,沈长松,岑威钧.土石坝地震工程学[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [10] 陈国兴,王志华,左熹,等.振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J].岩土工程学报,2010,32(1): 89-97.
- [11] 郭立伟,刘晓宇,李世海.波动数值模拟中的吸收边界条件[J].工程力学,2011,28(9): 17-29.
- [12] 李丽.基于ABAQUS的高速公路隧道地震动力响应研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [13] JTJ 225—1998 水运工程抗震设计规范[S].
- [14] 张存宽.板桩码头震损情况及分析[J].港口工程,1988(6): 38-46.
- [15] 郑颖人,赵尚毅,李安洪,等.有限元极限分析法及其在边坡中的应用[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [16] 李荣庆,贡金鑫,杨国平.板桩结构非线性有限元分析[J].水运工程,2010(2): 110-115.

(本文编辑 武亚庆)