遮帘式板桩码头地基地震液化破坏机理。

韩小凯^{1,2},曹雪健^{1,2},唐小微^{1,2},张西文^{1,2},付培帅^{1,2}

(1.大连理工大学建设工程学部岩土工程研究所,辽宁大连 116024;2.大连理工大学海岸与近海工程国家重点实验室,辽宁大连 116024)

摘要:遮帘式板桩码头作为一种新型的板桩结构型式,其抗震性能研究是设计建造过程中的重要环 节。在 FEM-FDM 水土耦合计算的平台上引入循环弹塑性本构模型,借助 FORTRAN 编程软件 形成饱和砂土动力液化分析的数值方法,可有效模拟饱和砂土在地震动力作用下的非线性及大变 形特性,同时也可模拟砂土液化流动对遮帘桩和前墙的动土压力。研究表明:地震作用下可液化土 层超孔隙水压力比增长并发生较大的水平流动变形,对前墙的水平破坏大于竖向破坏;前墙剪力最 大值位于海床与前墙交界处;遮帘桩剪力最大值位移与前墙底平行的位置;后拉杆拉力逐渐变大, 前拉杆拉力逐渐变小。通过对板桩码头地震液化灾害的分析,可为抗震和抗液化设计提供参考依 据。

关键词: 遮帘式板桩码头; 地震液化; 前墙剪力 中图分类号: TU43 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2015)02-0410-05 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0410

Destruction Mechanism of Covered Sheet-pile Wharf Foundation under Seismic Liquefaction

HAN Xiao-kai^{1,2}, CAO Xue-jian^{1,2}, TANG Xiao-wei^{1,2}, ZHANG Xi-wen^{1,2}, FU Pei-shuai^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: The all-covered type of sheet-pile wharf is a new type of sheet-pile structure, and research into its seismic performance is important for its design and construction. In this study, based on the FEM-FDM soil coupling calculation platform, the cyclic elastic-plastic constitutive model is introduced. The FORTRAN dynamic programming software is used for saturated sandy soil liquefaction numerical analysis. This software can effectively simulate saturated sand under earthquake dynamic nonlinear and large deformation and can also simulate sand liquefaction flow at the barrier of the pile and the front wall. The results are: under the action of earthquakes, the excess pore water pressures of liquefiable soils increase and there is large deformation due to horizontal flow; the horizontal damage to the front wall is greater than the vertical damage. The maximum shear wall is located in the seabed and before the wall at the junction. The barrier pile is the location of the maximum shear displacement parallel to the bottom of the front wall. The rod tension in the back increases gradually, while that in front reduces gradually. Through the analysis of sheet-pile wharf disasters caused by seismic liquefaction, the results of this study provide a reference for seismic and liquefaction resistance design.

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目::国家高技术研究发展计划 863 资助项目(NO.2012AA112510) 作者简介:韩小凯(1989-),男,硕士生,主要从事板桩码头数值方面研究.E-mail;hanxiaokai.good@163.com 通讯作者:唐小微(1968-),男,博士生导师,主要从事土动力学、海洋土动力学等方面研究.E-mail:tangxw@dlut.edu.cn Key words: covered sheet-pile wharf; seismic liquefaction; front wall shear

0 引言

板桩码头是码头三大结构型式之一,其主要组成部分包括:板桩墙、拉杆、锚定结构、导梁、帽梁和码头附属设施等。建国 60 多年来,我国建设的板桩码头 300 多个泊位,其中 200 多个泊位是中小型码头,占 85%以上。上世纪末我国建成的最大的板桩码头为 3.5 万吨级。

板桩码头是港口码头工程建筑物的一种主要结构型式,其优点在于可在地基允许承载力较低的软弱地基上修建,减少土方工程量和施工围堰等难题,但板桩码头耐久性较差。随着我国经济的发展,板桩码头技术向更高吨位发展成为必然趋势。中交第一航务勘测设计院提出了遮帘式板桩码头结构^[1],该结构是在常规的板桩码头前墙后增加遮帘桩,承受一部分土压力来减小前墙所受的压力,再加上钢拉杆对前墙和遮帘桩上部的约束,前墙的受力明显改善,码头得以向深水化发展。我国目前开发了半遮帘式^[2]、全遮帘式和分离卸荷式^[3]三种深水板桩码头新结构,实现了板桩码头大型化、深水化发展的新突破,达到了国际领先水平。

刘永绣[4]结合某深水泊位板桩码头的优化设 计,进行了遮帘式板桩结构码头的土工离心模型试 验,通过设置遮帘桩可减小前墙所受到的土压力,从 而使前墙的墙厚保持在合理范围内。崔冠辰[5]以数 值模拟为手段,研究了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。刘文平[6]通过 大型有限元软件 PLAXIS 及 ANSYS 进行码头结构 的空间三维计算,并与二维计算结果进行了比较,研 究了剩余水压力对前墙及遮帘桩的影响。司海宝[7] 基于 ABAQUS 计算软件,利用自行二次开发的"南 水双屈面土体本构模型",探讨码头结构与地基土体 间的相互作用,墙身与桩体变形拉杆拉力变化以及 桩与前墙土压力和弯矩分布规律。蒋建平[8]结合 ABAQUS 软件,利用隐式有限元方法和无限元边 界,结合京唐港 32 # 码头遮帘桩工程, 对其进行地 震动响应研究,分析不同地震加速度峰值情况下地 震波对前墙遮帘桩拉杆和锚碇墙的影响。

我国沿海地区广泛存在粉细砂地质条件,强震 中饱和砂土液化是造成码头结构物地震破坏的直接 原因。饱和砂土地震液化往往导致大范围的抗剪强 度丧失甚至流动,是造成板桩码头破坏的主要因素, 因而成为深水板桩码头抗震设计的主要技术问题。 本文依据日本京都大学防灾研究所研究成果,借鉴 OKA 提出的循环弹塑性本构理论,应用已建立的 数值计算平台对深水板桩码头地基液化做相关研 究。

1 水土二相耦合理论及本构模型

1.1 水土耦合理论

基于 Biot^[9-11]饱和砂土理论,对水土二相混合体进行分析,对二相混合体平衡方程进行空间离散化,动时间离散化,进而得到一个水土之间随时间和空间变化的关系式。

1.2 本构模型

采用 Oka F^[12-14]循环弹塑性本构模型,本模型 的特点是:

(1)基于非线性运动硬化规律提出的一种有效 循环弹塑性本构模型;

(2)考虑塑性剪切模型的应力-剪胀特性关系 和累积应变依赖性;

(3)可用来模拟地震荷载作用下饱和砂土的材料非线性;

(4) 引入了超固结边界面,可以表示正常固结 土和超固结土的特性。

2 板桩码头数值模型及地震荷载

2.1 有限元模型

根据初步设计参数和地质资料,将模型进行简 化处理,见图 1。遮帘式板桩码头结构由前墙、遮帘 桩、锚定墙和拉杆组成,共设置了五个土层,板桩、遮 帘桩、锚桩、拉杆分别用梁单元进行模拟。左右边界 水平方向固定,竖直方向自由;底部边界固定;顶面 为排水边界。最上层的粉细砂层为干土,其余土层





Fig.1 Calculation diagram of the covered sheet-pile wharf

为饱和土。遮帘桩与前墙的距离是 5 m,锚桩与前 墙的距离是 46 m。

建立的有限元网格如图 2,采用四节点四边形 单元,共计 2 370 个节点,2 333 个单元,板桩和遮帘 桩采用梁单元模拟。

2.2 材料参数

各层土的性质见表1。

2.3 输入地震波荷载

输入的动荷载时程曲线如图 3 所示,即该板桩 模型所承受的是加速度峰值为 0.4 g 的位移时程地 震波。



Fig. 2 The finite element model of covered sheet-pile wharf

Table 1 The soil parameters					
 土体参数	粉细砂	淤泥质黏土	细砂	粉质黏土	粉细砂
初始孔隙比 e ₀	1.087	0.686	0.931	0.686	0.987
压缩指数 λ	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
膨胀指数 κ	0.002 5	0.002 5	0.002 5	0.002 5	0.002 5
初始剪切模量比 G_0/G'_{m0}	587	750.0	750.0	750.0	587
渗透系数 k/(m・s ⁻¹)	2.76E - 6	2.45E - 6	2.91E-6	2.45E - 6	2.87E-6
重力加速度 g/(m・s ⁻²)	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
密度 $ ho/(t \cdot m^{-3})$	1.55	1.968	2.009	0.92	1.779
变相应力比 M _m	0.909	0.909	0.909	0.909	0.909
破坏应力比 M _f	1.308	1.308	1.308	1.308	1.308
硬化参数 B ₀	4 800	5 500	4 500	5 000	4 800
硬化参数 B1	40.0	45.0	45.0	45.0	40
水体积弾性系数 K _w /(N・m ⁻²)	2.0E + 6	2.0E + 6	2.0E + 6	2.0E + 6	2.0E + 6

土层参数

表 1







3 数值结果分析

3.1 桩侧剪应力分析

前墙的自身剪力如图 4(a)所示。第4s时,桩 身最大负剪应力为-249.1 kPa,位于土层-20.3 m 处,桩身最大正剪应力为 208.9 kPa,位于土层 -31.1 m 处;第16 s时,桩身最大负剪应力为 -146.2kPa,位于土层-22.3 m处,桩身最大正剪 应力为 175.9 kPa,位于土层-12 m处。随着动荷 载的输入,前墙下部剪应力由负变正,出现了突变。 剪应力最大值一般出现在不同土层的交界面处。

遮帘桩的自身剪力如图 4(b)所示。第4s时, 桩身最大负剪应力为-333.9 kPa,位于土层-4.5 m处;桩身最大正剪应力为 342.5 kPa,位于土层-34 m处;第16 s时,桩身最大负剪应力为-1 445 kPa,位于土层-32.7 m处,桩身最大正应力为 1 140 kPa,位于土层-34 m处。随着动荷载的输入,遮窗帘桩下部所受剪应力的转折点基本上位于 两土层的交界处,时间越长,剪应力变化越大。

3.2 前墙位移分析

前墙水平位移变化图如图 5(a)所示,随着动荷载的输入,桩的位移越来越大。

通过图 5(a)可以看出,前墙最上端为位移最大 点。地震波加载结束后,水平位移最大值为-2.181 m,竖向位移最大值为-0.256 m。通过图 5(b)可以 看出,该点的水平位移远大于竖向位移。初步预测 较大水平方向位移的原因为,板桩后侧土体的液化 导致了水平向的流动,使板桩产生了较大的横向变 形。因此可以推断水平方向的流动砂土是导致板桩





Fig.4 Shear stress distribution on front wall and covered sheet-pile



在地震响应下影响最大的破坏模式。

3.3 超孔隙水压力地震响应

epwpr 的计算公式为

$$epwpr = \frac{\sigma_0' - \sigma_t'}{\sigma_0'} \tag{1}$$

式中: σ'_{0} 为 0 时刻土的平均有效应力; σ'_{t} 为 t 时刻 土的平均有效应力。

图 6 表示了不同时刻整个区域的超孔隙水压力 比(*epwpr*)的分布图。超孔隙水压力比(*epwpr*)接 近 1 表明土体液化。第 4 s时,饱和的砂土层和粉 细砂土层已经逐渐液化,第 8 s时,液化部分逐渐扩 大。第 12 s、16 s时与第 8 s液化土层面积变化不 大,表明第 8 s之前土层就已经液化。



3.4 拉杆拉力分析

前墙与遮帘桩的拉杆称为前拉杆,遮帘桩与锚



Fig.7 Time-history curves of rod tension

定墙的拉杆称为后拉杆(图 7)。在 8.31 s之前,前 拉杆的拉力大于后拉杆的拉力;之后,后拉杆的拉力 大于前拉杆。随着动荷载的输入,砂土及细粒土逐 渐液化,遮帘桩右侧承受很大一部分水平力,而遮帘 桩与前墙的距离比较小,逐渐受到来自遮帘桩右侧 的水平压力,致使前拉杆的拉力越来越小。

4 结论

(1)饱和的砂土和粉土在地震荷载作用下极易产生液化现象,使土体的承载力降低,产生横向流动。在遮帘式板桩码头的动力分析中可见,板桩及遮帘桩后面的土体产生了液化,对板桩有水平的推力,使得板桩产生较大的横向位移。

(2) 土体液化后, 桩受到的自身剪应力比土体 液化前要大。因此做抗震设计时对板桩的承载能力 要相应的提高。

(3)海底标高以上桩身剪应力变化不大,海底标高以下,由于受到部分土层土体液化的影响,桩身的剪应力变化剧烈。

参考文献(References)

- [1] 刘永绣.板桩码头向深水化发展的方案构思和实践——遮帘式 板桩码头新结构的开发[J].港工技术,2005,12(增刊):12-15.
 LIU Yong-xiu. Design Conception and Practice of Building Sheet Pile Wharfs in Deep Waters: Development of a New Structure of Covered Type of Sheet Pile Wharf[J].Port Engineering Technology,2005,12(Supp):12-15.(in Chinese)
- [2] 刘永绣,吴荔丹,李元音.一种新型码头结构型式——半遮帘式 深水板桩码头结构的推出[J].港工技术,2005,12(增刊):16-19.
 LIU Yong-xiu,WU Li-dan,LI Yuan-yin.A New Type of Wharf Structure the Structure of Semi-covered Type of Deep Water Sheet Pile Wharf[J].Port Engineering Technology,2005,12 (S0):16-19.(in Chinese)
- [3] 于泳,焦志斌,葛兵.分离卸荷式地下连续墙板桩码头运行初期 前墙工作性状的观测与研究[J].港工技术,2011,48(5):26-28.

YU Yong, JIAO Zhi-bin, GE Bing. Study and Observation of Front Wall's Working State of Separated Relief Diaphragm Retaining Wall Sheet-pile Wharf at Initial Operating Stage[J]. Port Engineering Technology.2011,48(5):26-28.(in Chinese)

[4] 刘永绣,吴荔丹,徐光明,等.遮帘式板桩码头工作机制[J].水
 利水运工程学报,2006(2):8-12.
 LIU Yong-xiu, WU Li-dan, XU Guang-ming, et al. Working
 Mechanism of Sheet Pile Wharf With Barrier Piles[I]. Hydro-

Mechanism of Sheet Pile Wharf With Barrier Piles[J]. Hydroscience and Engineering, 2006(2):8-12.(in Chinese)
【5】 崔冠辰,蔡正银,李小梅,等.遮帘式板桩码头工作机理初探

- [5] 崔迅成,茶正银,子小樽,寺.巡市式极性吗天工作机理初保
 [J].岩土工程学报,2012,34(4):762-766.
 CUI Guan-chen,CAI Zheng-yin,LI Xiao-mei,et al.Preliminary
 Investigation on Working Mechanism of Covered Sheet-pile
 Wharfs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,
 2012,34(4):762-766. (in Chinese)
- [6] 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.
 LIU Wen-ping, ZHENG Ying-ren, CAI Zheng-yin, et al. Finite
 Element Method for Covered Sheet Pile Wharfs[J]. Chinese
 Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(4):573-577. (in Chinese)
- [7] 司海宝,蔡正银,俞缙.遮帘式板桩码头结构与土共同作用 3D 数值模拟分析[J].土木工程学报,2012,45(5):182-190.
 SI Hai-bao,CAI Zheng-yin,YU Jin.3D Numerical Modeling of Pile-soil Interaction Covered Sheet-piled Wharf[J].China Civil Engineering Journal,2012,45(5):182-190.(in Chinese)
- [8] 蒋建平,刘春林,蒋宏鸣.遮帘式板桩码头三维地震动响应[J]. 上海海事大学学报,2013,34(1):28-35.
 JIANG Jian-ping, LIU Chun-lin, JIANG Hong-ming. 3D Seismic Dynamic Response of Covered Sheet-piled Wharf[J].Journal of Shanghai Maritime University, 2013, 34(1):28-35.(in Chinese)
- [9] Biot M A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluidsaturated Porous Solid, I: Low-frequency Range[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1956, 28:168-178.
- [10] Biot M A. Mechanics Deformation and Acoustic Propagation in Porous Media [J]. Journal of Applied Physics, 1962, 33: 1482-1498.
- [11] Biot M A, Willis D G. The Elastic Coefficients of the Theory of Consolidation[J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24: 594-601.
- [12] Oka F, Yashima A, Shibata T, et al. FEM-FDM Coupled Liquefaction Analysis of a Porous Soil Using an Elastic-plastic Model[J]. Applied Scientific Research, 1994, 52:209-45.
- [13] Oka F, Yashima A, Tateishi A, et al. A Cyclic-elastic-plastic Constitutive Model for Sand Considering a Plastic-strain Dependence of the Shear Modulus[J]. Geotechnique, 1999, 49 (5):661-680.
- [14] Oka F, Yashima A, Kato A, et al. A Constitutive Model for Sand Based on the Non-linear Kinematic Hardening Rule and Its Applications[C]//Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering.Barcelona:[s.n.],1992.