

宋波,何宇鑫,王海龙.不同设计参数对高桩码头损伤和破坏特性的影响[J].地震工程学报,2017,39(6):1126-1133.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1126
SONG Bo, HE Yuxin, WANG Hailong. Influence of Different Design Parameters on the Damage and Failure Characteristics of High-piled Wharves[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6):1126-1133.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1126

不同设计参数对高桩码头损伤和破坏特性的影响^①

宋 波^{1,2}, 何宇鑫^{1,2}, 王海龙^{1,2}

(1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 强震区轨道交通工程抗震研究北京市国际科技合作基地, 北京 100083)

摘要:基于相同结构不同设计参数的高桩码头建立计算模型,研究两种结构自身动力特性的差异以及在地震作用下抗震性能的差异。研究表明:在相同荷载条件、场地条件、材料用量的前提下六桩码头的刚度要大于八桩码头;天津波作用下六桩码头的桩身加速度响应较大,且两种结构桩身加速度差异值随着震度的增大而增大;在相同峰值的罕遇地震下六桩码头的桩顶位移响应要小于八桩码头,而其残余位移要大于八桩码头;相同荷载条件下八桩码头的延性能力明显强于六桩码头,其极限塑性率是六桩码头极限塑性率的 2.28 倍;八桩码头在峰值加速度为 800 gal 地震作用下达到极限曲率,六桩码头在峰值加速度为 1 150 gal 的地震作用下达到极限曲率。

关键词:高桩码头;地震;桩数;抗震性能

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)06-1126-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1126

Influence of Different Design Parameters on the Damage and Failure Characteristics of High-piled Wharves

SONG Bo^{1,2}, HE Yuxin^{1,2}, WANG Hailong^{1,2}

(1. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing International Cooperation Base for Science and Technology-Aseismic Research of the Rail Transit Engineering in the Strong Motion Area, Beijing 100083, China)

Abstract: Two high-piled wharves with same structure but different design parameters were examined to determine the design influence on damage and failure characteristics. The first wharf comprised eight piles, each with a pile diameter of 1.2 m and a wall thickness of 22 mm. The second wharf comprised six piles, each with a pile diameter of 1.6 m and a wall thickness of 16 mm. The differences in dynamic characteristics and seismic performance of the two wharves were studied using the finite element software ANSYS. Both types of piles were simulated by BEAM188 element and the nonlinear spring was simulated by COMBINE39 element. The results show that under the same condition of load, site, and material usage, the stiffness of the six-pile wharf is greater than that of the eight-pile wharf. When the wharves were examined under the influence of a Tianjin wave, the pile acceleration of the six-pile wharf is larger

① 收稿日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178045)

作者简介: 宋 波(1962—),男,教授,博士研究生导师,工学博士,主要从事构筑物抗震方面的研究。

通信作者: 何宇鑫(1992—),男,硕士研究生,主要从事构筑物抗震方面的研究, E-mail: heyuxin001@126.com。

than that of the eight-pile wharf, with the difference increasing with the strength of the seismic degree imposed. Under a rare earthquake, the displacement at the top of the six-pile wharf is less than that of the eight-pile wharf, but the residual displacement of the six-pile wharf is greater than that of the eight-pile wharf. Under the same condition of load, the ductile capacity of the eight-pile wharf is obvious greater than the six-pile wharf, and the limit plastic rate of the eight-pile wharf is 2.28 times that of the of six-pile wharf. With peak acceleration of 800 gal, the eight-pile wharf approaches the ultimate curvature, whereas the six-pile wharf approaches the ultimate curvature when the peak acceleration is 1 150 gal. Thus, it is important to comprehensively consider the stability and ductility capacity of the structure.

Key words: high-piled wharf; earthquake; pile amount; seismic performance

0 引言

大量研究表明随着港口工程建设项目走向深水化和大型化,以及强震区港口工程建设范围进一步扩大,高桩码头的结构形式、荷载条件、场地类型对码头结构的抗震性能和稳定性具有很大影响。地震作用下码头结构的位移、内力分布、塑性开展以及抗震性能在很大程度上取决于基桩的布置方式,合理的断面参数设计基桩布置是码头结构在地震作用下安全工作和减小损失的关键。

高桩码头的抗震问题引起了国内外学者的广泛关注。陶桂兰等^[1]以全直桩码头结构为研究对象,分析了码头结构的基底剪力和桩顶位移关系曲线以及塑性铰分布。项雯等^[2]通过对沉箱高桩复合式码头的有限元模型进行分析,考察了码头结构的自振特性和地震作用下其内力和加速度分布和变化情况。李颖等^[3]采用有限元软件 abaqus 建立高桩码头结构的模型,考虑了桩土相互作用以及土体和桩板的动力非线性,对高桩码头的地震响应规律进行了研究。陶桂兰和王定^[4]以高桩码头的的一个结构段为研究对象,建立了结构的有限元模型,采用振型分解反应谱法研究了结构在地震作用下的响应规律。Tacioglu 等^[5]提出的桩土相互作用模型可以用于数值分析中,且可以模拟承受循环荷载的桩土相互作用。Mageau 等^[6]采用有限元程序 plaxis 对塔科马港的一处新建高桩码头结构进行了地震稳定与变形分析。Chopra 等^[7]结合 Pushover 分析方法和振型分解法提出振型 Pushover 方法。星隈顺一^[8]对罕遇地震下的结构进行分析,指出了规范计算式中存在的问题。

1 工程背景

分别选取每榀排架有 8 根桩和 6 根桩的两种高桩码头结构形式,八桩码头桩身直径为 1.2 m,壁厚为 22 mm,六桩码头桩身直径为 1.6 m,壁厚为 16 mm。两种结构的桩身断面图如图 1 所示,立面图

和有限元模型如图 2 所示。这两种结构均为水深 18.61 m 的深水高桩码头,采用钢管桩,其混凝土灌芯,抗震设防烈度(Ⅷ度)和场地条件均相同。两码头头面的均载为 35 kPa,码头前沿到前轨道梁范围内均载为 15 kPa。八桩码头的质量约为 2 155 t,六桩码头为 2 362 t,差异在 8% 左右,材料用量大致相当。同时在自重和堆载作用下,八桩码头桩身最大应力为 18.81 MPa,六桩码头为 18.82 MPa,差异在 1% 以内。基于上述条件,本文对不同桩数的高桩码头进行抗震能力对比,从位移、弯矩和曲率等方面对结构抗震能力的差异进行定量评价。

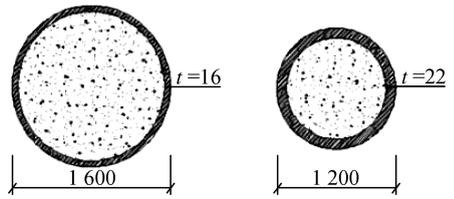


图 1 八桩码头和六桩码头的桩身断面图(单位:mm)
Fig.1 The cross-section diagram of piless of eight-pile wharf and six-pile wharf

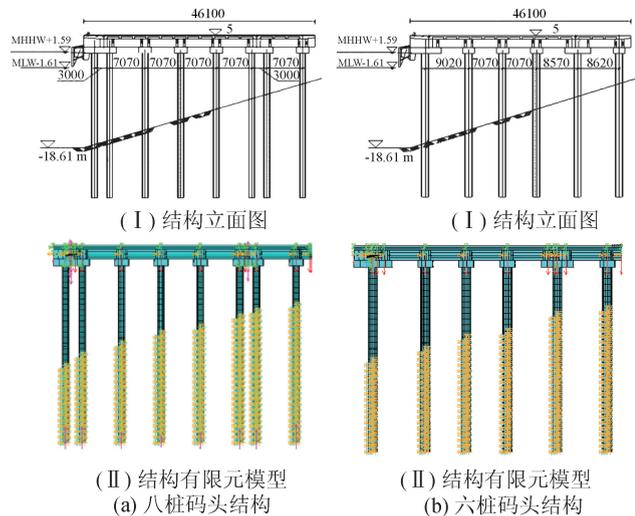


图 2 两种码头结构的立面图和有限元模型
Fig.2 The elevation and finite element model of two kinds of wharves

两种结构形式的码头上部横梁和下部灌芯钢管桩均采用 BEAM188 单元;采用 p - y 曲线法模拟桩土相互作用,选用 COMBINE 39 单元来模拟非线性弹簧,弹簧一端与桩上节点相连,一端固结。

2 不同桩数高桩码头抗震能力研究

2.1 自振特性对比分析

为研究两种高桩码头结构的频率、周期和振型等自振特性,需要对结构进行模态分析。通过分析,两种结构的前四阶频率如表 1 所列。

对不同结构形式的高桩码头进行自振特性分析:从结构的前四阶模态来看,两种结构形式的码头自振周期有一定差异,且六桩码头均小于八桩码头,

差异均在 15%~30% 间。

这种自振周期的差异主要是因为:高桩码头结构在材料用量相当的情况下,结构形式由八桩码头变成六桩码头,结构的整体刚度增加,从而使其自振周期减小。

对两种结构进行模态分析,发现八桩码头和六桩码头的前四阶振型相似,具体振型如图 3 所示。

表 1 八桩和六桩码头自振周期对比(单位:s)

Table 1 Comparison between natural periods of six-pile wharf and eight-pile wharf (Unit:s)

阶数	1	2	3	4
八桩	0.678	0.137	0.106	0.089
六桩	0.558	0.109	0.088	0.076

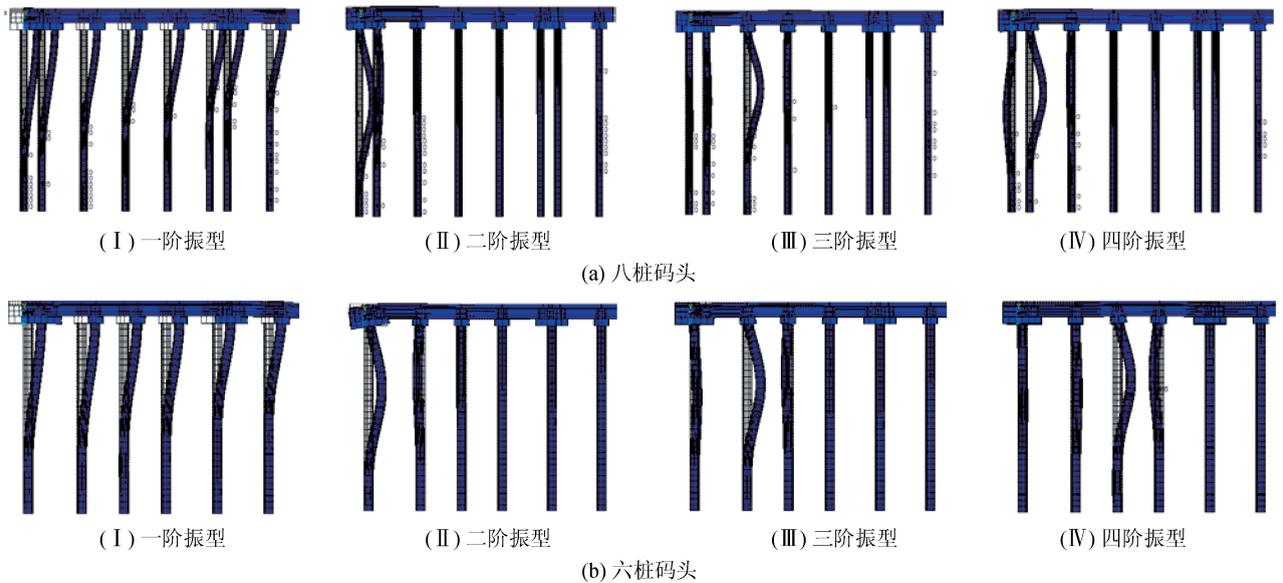


图 3 两种结构形式码头的前四阶振型

Fig.3 The first four vibration modes of two kinds of wharves

从图 3 可以看出,两种结构形式的码头前四阶振型相差不大。一阶主振型为码头上部面板和梁体的平移;第二阶和第三阶振型主要是桩身弯曲,且两种结构弯曲桩的位置相同;两种结构的第四阶振型有一定的差异,八桩码头是左边两根桩的弯曲,而六桩码头为中间两根桩的弯曲。

2.2 抗倒塌能力对比分析

在动力时程反应中结构体系的运动方程是通过数值时间步进法对微分方程来进行积分求解的。本文采用 Newmark 法进行有限元分析中动力反应数值计算,计算主要基于如下公式:

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma)\Delta t] \ddot{u}_i + (\gamma\Delta t) \ddot{u}_{i+1} \quad (1)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t) \dot{u}_i + [(0.5 - \beta) (\Delta t)^2] \ddot{u}_i + [\beta (\Delta t)^2] \ddot{u}_{i+1} \quad (2)$$

式中: \dot{u} 、 \ddot{u} 及 u 分别为加速度、速度和相对位移;参数 β 和 γ 定义了时间步内加速度的变化,并决定计算方法的稳定性与精度特性。

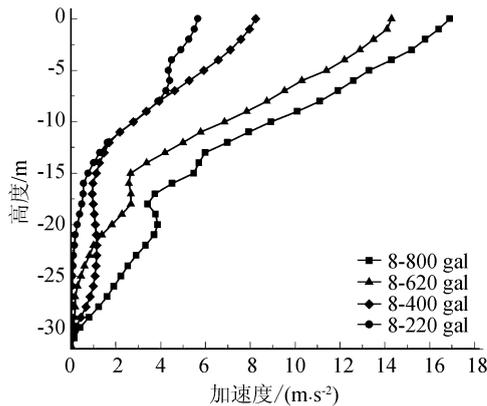
(1) 加速度响应对比分析

选取不同峰值加速度的天津波对两种结构形式的高桩码头进行地震动力响应分析,研究其桩身加速度响应的差异。两种结构的加速度曲线如图 4 所示。

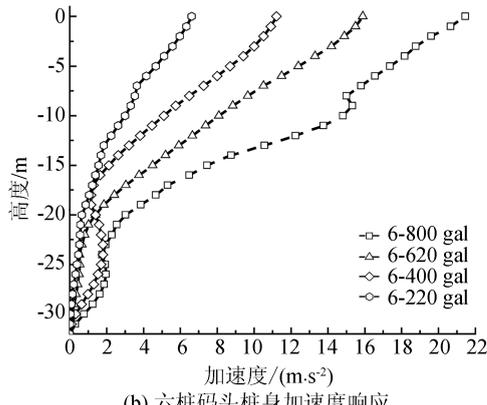
两种结构形式的高桩码头在不同加速度峰值的天津波作用下,加速度沿桩身变化规律相似:从桩底到桩顶,桩身加速度响应呈总体递增的趋势,而在泥面处有一定波动,且六桩码头的桩身加速度响应要大于八桩码头。当天津波的峰值加速度分别为 220、400、620 和 800 gal 时,六桩码头和八桩码头桩

顶加速度响应值分别相差 17%、36%、11%和 27%。因此六桩码头和八桩码头在地震作用下加速度响应差异较大,并随着震度的增大差异也不断增大。

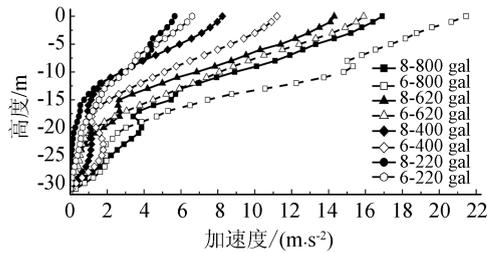
800 gal 时,六桩码头和八桩码头桩顶位移响应峰值分别相差 2.18、5.11、12.32 和 14.93 cm,桩顶位移峰值的差异随着震度的增大不断增大。



(a) 八桩码头桩身加速度响应



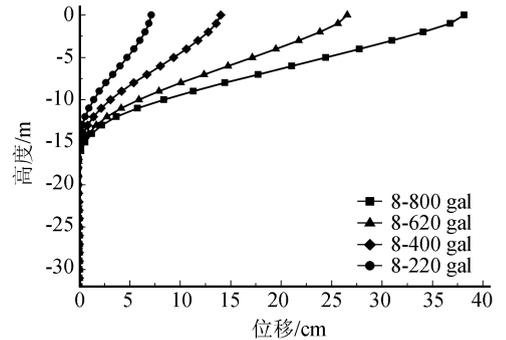
(b) 六桩码头桩身加速度响应



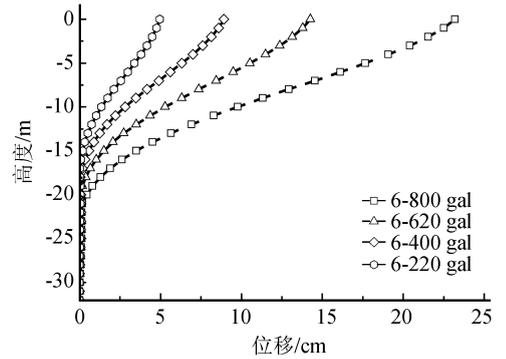
(c) 八桩和六桩码头加速度响应对比

图 4 加速度响应对比

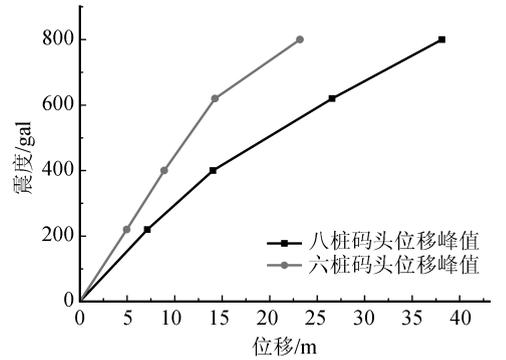
Fig.4 Comparison of the acceleration response



(b) 八桩码头桩身位移响应



(b) 六桩码头桩身位移响应



(c) 八桩码头和六桩码头位移响应对比

图 5 位移响应对比

Fig.5 Comparison of the displacement response

(2) 桩身位移响应对比分析

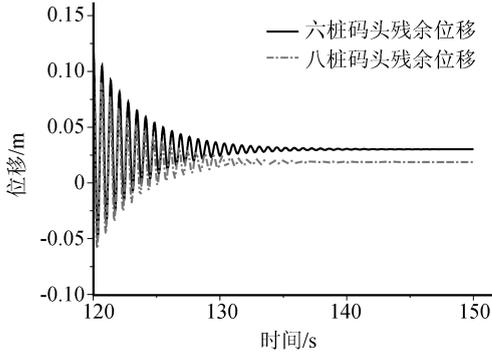
选取不同峰值加速度的天津波对两种结构形式的高桩码头进行地震动力响应分析,研究桩身位移响应的规律及桩顶残余位移差异,定量评价其在强震作用下的抗震性能差异。两种码头的桩身位移计算结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,在不同加速度峰值的天津波作用下,两种高桩码头位移响应沿桩身的变化规律相似:从桩底到桩顶,桩身位移响应呈总体递增的趋势,且六桩码头的桩顶位移响应要小于八桩码头。当天津波的峰值加速度分别为 220、400、620 和

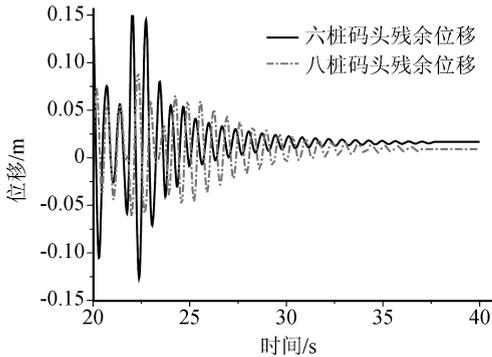
此外,残余位移也是码头结构的一个重要的动力性能指标,它是评价码头能否继续使用的重要依据。图 6 中给出了两种高桩码头结构桩顶的残余位移。

如图 6 所示,在峰值为 800 gal 的 TI-III-I (长周期)和 TII-III-I (直下型)地震波作用下,高桩码头结构桩顶残余位移分别为:在 TI-III-I 地震波作用下,六桩码头为 3.02 cm,八桩码头为 1.87 cm;在 TII-III-I 地震波作用下,六桩码头为 1.68 cm,八桩码头为 0.9 cm。因此,从结构的位移响应来看,六桩码头在地震过程中的水平位移小,但结构的残余

位移增大,六桩码头结构使结构的地震反应更为复杂。



(a) TI-III-I作用下桩顶残余变形



(b) TI-III-I作用下桩顶残余变形

图 6 两种结构形式高桩码头的残余位移

Fig.6 The residual displacement of two kinds of wharves

(3) 桩身弯矩对比分析

选取不同峰值加速度的天津波对两种结构形式的高桩码头进行地震动力响应分析,研究弯矩沿桩身的变化规律,计算结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在不同峰值加速度的天津波作用下,六桩码头和八桩码头由桩底到桩顶的弯矩包络曲线沿桩身的变化趋势相似:桩底到嵌固点弯矩增加,由泥面到反弯点弯矩减小,由反弯点到桩顶又迅速增加,到桩顶达到最大。此外,在天津波的峰值加速度超过 620 gal 时,八桩码头结构弯矩增加速度小于 220~620 gal 的增长速度,这说明八桩码头在峰值加速度超过 620 gal 后已经进入塑性,结构总刚度下降,接近结构的破坏极限;而对于六桩码头,结构在超过 620 gal 的地震作用下弯矩增长速度仍然较快,说明六桩码头塑性开展程度较低。

(4) 桩身曲率对比分析

选取不同峰值加速度的天津波对两种结构形式的高桩码头进行地震动力响应分析,研究曲率沿桩身的变化规律,计算结果如图 8 所示。

由图 8 可知,在不同峰值加速度的天津波作用

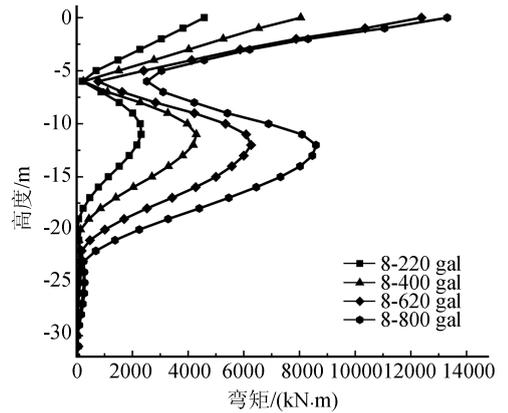
下,两种结构由桩底到桩顶的曲率包络曲线沿桩身的变化趋势相似:桩底到嵌固点曲率增加,由泥面到反弯点曲率减小,由反弯点到桩顶又迅速增加,到桩顶达到最大。

为确定高桩码头结构的破坏界限,需要计算桩身的极限曲率。根据文献[9],结构的极限曲率按照式(3)和式(4)计算:

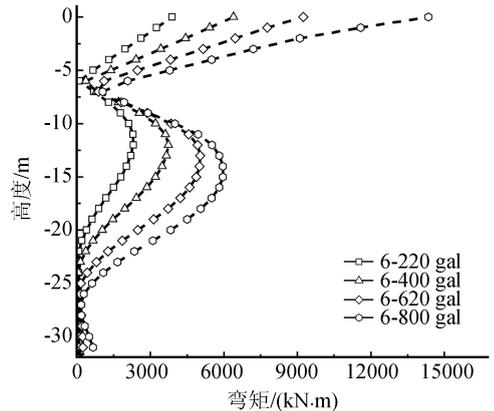
$$\epsilon_{\max} = 0.44 \frac{t}{D} \tag{3}$$

$$\phi_{\max} = \frac{2\epsilon_{\max}}{D} \tag{4}$$

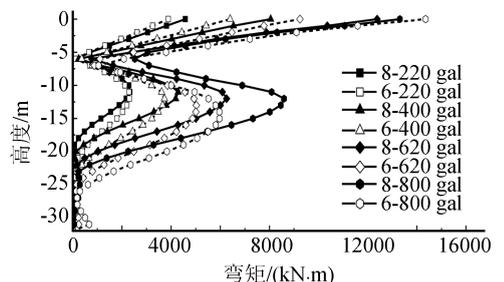
式中: t 为钢管桩的厚度; D 为钢管桩的直径。



(a) 八桩码头桩身弯矩包络曲线



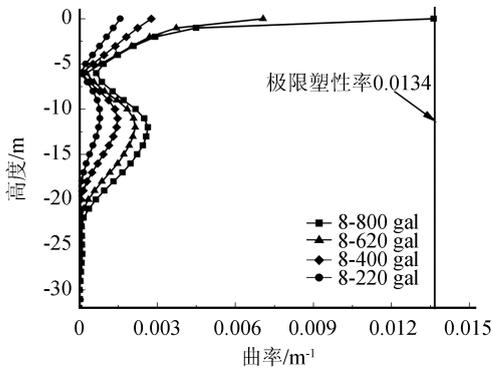
(b) 六桩码头桩身弯矩包络曲线



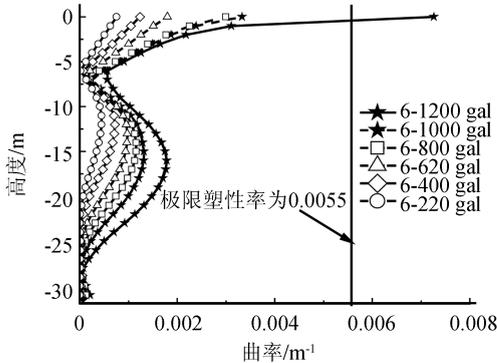
(c) 八桩码头和六桩码头桩身弯矩包络曲线对比

图 7 桩身弯矩对比

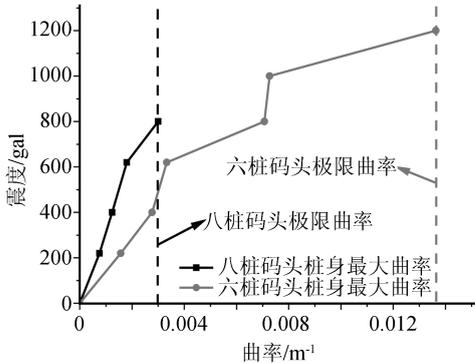
Fig.7 Comparison of the bending moment of pile



(a) 八桩码头曲率包络曲线



(b) 六桩码头曲率包络曲线



(c) 八桩码头和六桩码头桩身曲率对比

图 8 桩身曲率对比

Fig.8 Comparison of the curvature of pile

八桩码头桩身直径为 1.2 m,壁厚为 22 mm,由式(3)和式(4)计算其桩身极限曲率为 0.013 4,屈服曲率为 0.003 0,计算可得其极限塑性率为 4.47。六桩码头桩身直径为 1.6 m,壁厚为 16 mm,由式(3)和式(4)计算其桩身极限曲率为 0.005 5,其屈服曲率为 0.002 8,计算出其极限塑性率为 1.96。因此,八桩码头的延性能力明显强于六桩码头,二者相差 2.28 倍。

达到极限曲率时,八桩码头对应天津波的峰值加速度约为 800 gal;六桩码头约为 1 150 gal。因此在使用材料相当的情况下,六桩码头的稳定性要优于八桩码头,但其延性能力要远远低于八桩码头,使

得其在震后的修复难度要远远高于八桩码头。

(5) 滞回曲线对比分析

绘制桩身的滞回曲线,通过比较滞回环的大小能评价桩身最危险截面塑性开展程度,并进一步定量描述不同结构形式高桩码头的抗震能力差异。八桩码头和六桩码头在不同峰值加速度的天津波作用下,结构最危险截面的滞回曲线如图 9 所示。

根据两种码头结构在不同峰值加速度的天津波作用下桩身滞回曲线可以看出:

(1) 八桩码头在峰值加速度小于 400 gal 的天津波作用下,结构整体处于弹性状态;当峰值加速度大于 620 gal 时,结构处于塑性状态;当峰值加速度达到 800 gal 时,桩身曲率达到极限曲率 0.013 4,结构处于破坏的临界状态;当峰值加速度达到 1 000 gal 时,桩身曲率超过极限曲率,结构破坏。

(2) 六桩码头在峰值加速度小于 620 gal 的天津波作用下,结构处于弹性状态;当峰值加速度大于 800 gal 时,结构处于塑性状态;当峰值加速度达到 1 000 gal 时,六桩码头的滞回环仍然较小,此时桩身最大塑性率仍未达到极限塑性率,说明结构仍然安全;当峰值加速度达到 1 200 gal 时,桩身最大曲率达到 0.07 左右,超过了结构极限曲率,结构破坏。经过试算,六桩码头结构在峰值加速度为 1 150 gal 的天津波作用下,桩身最大曲率接近结构的极限曲率。

综上所述:两种结构形式的码头在材料用量和资金投入相当的情况下,六桩码头的刚度要大于八桩码头,其强震作用下的稳定性也要优于八桩码头,但六桩码头的延性能力和抵抗残余变形的能力要远远低于八桩码头。

3 结论

本文在结构、场地条件、荷载作用相同的前提下,分别以桩数为六桩和八桩的高桩码头为研究对象,通过施加不同烈度的地震波,从桩身加速度、位移、弯矩、曲率以及桩底的滞回曲线对比研究其抗震性能,得出以下结论:

(1) 两种结构形式的高桩码头在相同荷载条件、场地条件、同种地震作用下,加速度沿桩身变化规律相似。相对于八桩码头,六桩码头的桩身加速度响应较大,且两种结构桩身加速度差异值随着震度的增大而增大。

(2) 在同种地震作用下,六桩码头的桩顶位移响应小于八桩码头,但其残余位移要大于八桩码头。

从结构的位移响应来看,六桩码头比八桩码头更为稳定,但其结构的残余位移较大,使得震后的修复变得困难。

(3) 两种结构形式的高桩码头在同种地震作用下,由桩底到桩顶,弯矩和曲率的包络曲线沿桩身的

变化规律相似。八桩码头的极限塑性率是六桩码头的2.28倍,因此八桩码头的延性能力明显强于六桩码头。

(4) 八桩码头在峰值加速度为800 gal地震作用下到达极限曲率,处于破坏的临界状态;而六桩码

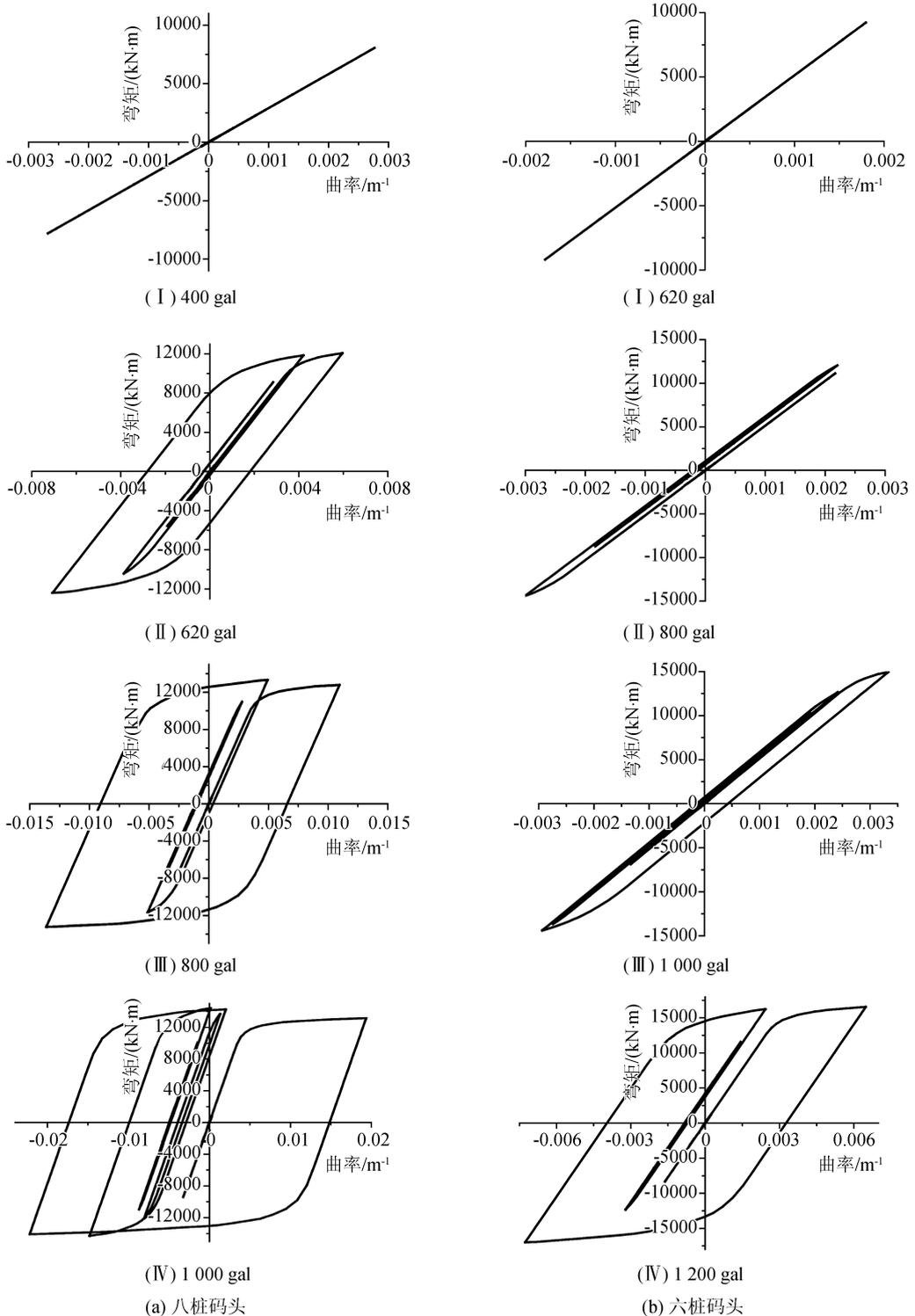


图9 带回曲线

Fig.9 The hysteretic curves

头的塑性开展程度较低,在峰值加速度为 1 150 gal 的地震作用下,桩身最大曲率接近结构的极限曲率,因此六桩码头的抗倒塌性能优于八桩码头。

(5) 使用六桩码头虽然提高了结构整体的刚度,从而提高了结构的抗倒塌能力,但其使得码头结构的地震反应变得更为复杂,一方面引起了较大的残余位移,另一方面降低了码头结构的延性能力。因此,在设计高桩码头结构时要综合考虑结构的稳定性和结构的延性能力等各项因素。

参考文献(References)

- [1] 陶桂兰,习宇,杨铭元.全直桩码头结构的静力与动力弹塑性分析[J].水电能源科学,2013(11):140-143.
TAO Guilan, XI Yu, YANG Mingyuan. Static and Dynamic Elastic Plasticity Analysis of All-vertical-piled Wharf Structure [J]. Water Resources and Power, 2013(11): 140-143.
- [2] 项雯,朱峰,朱卫华.混合式码头动力响应及抗震计算[J].科学技术与工程,2011,11(31):7726-7730.
XIANG Wen, ZHU Feng, ZHU Weihua. Dynamic Response Analysis and Structure Anti-seismic Calculation of Hybrid Wharf [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(31): 7726-7730.
- [3] 李颖,贡金鑫.考虑桩土相互作用的高桩码头非线性地震反应分析[J].水利水运工程学报,2010(2):92-99.
LI Ying, GONG Jinxin. Nonlinear Seismic Response Analysis of Wharf Structure Considering Soil-pile Dynamic Interaction [J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(2): 92-99.
- [4] 陶桂兰,王定.水平地震作用下高桩码头结构响应谱分析[J].中国港湾建设,2012(1):9-11.
TAO Guilan, WANG Ding. Response Spectrum Analysis of Piled Structure of Wharf under Action of Horizontal Earthquake Effect [J]. China Harbour Engineering, 2012(1): 9-11.
- [5] TACIROGLU E, RHA C S, WALLACE J W. A Robust Macroelement Model for Soil-pile Interaction under Cyclic Loads [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(10): 1304-1314.
- [6] MAGEAU D W, CHIN K H. Finite Element Modeling of New-marine Terminal at the Port of Tacoma [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2001(8): 1-10.
- [7] CHOPRA A K, GOEL R K. A Modal Pushover Analysis Procedure for Estimating Seismic Demands for Buildings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31: 561-582.
- [8] 星隈顺一.地震時保有水平耐力法による動水圧の評価[C]//第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集,2000.
Hoshikuma J. Evaluation Method of Hydro Dynamic Pressure Considering Structural Ductility Seismic [C]// Proceedings of the 4th Bridge Seismic Design Considering Structural Ductility Seismic Tokyo, 2000.
- [9] 横田弘,川端规之,芥川博昭,等.鋼直杭式棧橋の弾塑性解析による耐震性能照査および簡便照査法の提案[R].日本运输省港湾技术研究所,1999.
HIROSHI, YOKOTA et al. Verification of Seismic Performance of an Open Piled Pier by an Elasto-Plastic Method and a Simplified Method [R]. Technical Note of the Port and Harbour Research Institute Ministry of Transport, 1999.