

# 波浪和地震作用下高桩承台-土-结构动力响应

武崇福, 刘贝贝

(燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**利用有限元软件 ANSYS 模拟高桩承台-土-上部结构在波浪和地震共同作用下的内力和变形,采用 Morison 方程计算波浪力,并对结构水平方向输入 El-Centro 波进行模拟,根据时程曲线分别选取初始状态和正负加速度最大状态对结构进行研究,研究了桩基础在波浪和地震共同作用下的位移、弯矩、剪力以及轴力的变化,并与地震单独作用下的结构动响应进行了对比分析。分析结果表明,在波浪和地震共同作用下,前排桩所受弯矩最大,同时,桩顶的受力最危险;桩顶轴力分布表现出角桩最大、中间桩最小的分布特征。当波浪力和地震力方向一致时,桩顶位移增大,桩身弯矩和桩顶剪力也随之增加;反之,当波浪力和地震力方向相反时,则桩顶位移减小,桩身弯矩和桩顶剪力也随之减小。

**关键词:**高桩承台; Morison 方程; 波浪; 地震; 桩基础

**中图分类号:** TU473.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2011)06-0007-06

## Dynamic Response Analysis of High-rise Pile Cap-soil-structure under the Wave and Earthquake Action

WU Chong-fu<sup>1</sup>, LIU Bei-bei<sup>1</sup>

(School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract:** Finite element software was used to simulate the internal force and deformation of high-rise pile cap-soil-structure under the wave and earthquake action. Meanwhile, wave force was calculated by using Morison equation, and the mechanical behavior of structure was simulated by inputting horizontal El-Centro wave. Then, the initial state and the state of the largest positive and negative acceleration were selected to study the structure according to the time history curve, and the displacement, bending moment, shear and axial force changes of pile foundation under wave and earthquake action were discussed, which was compared and analyzed with the structural response under the action of earthquakes solely. The result shows that the moment of front row of piles is biggest, and the force of pile bolck is the most dangerous; the axial force of the corner piles is the largest, and one of the center piles is the smallest under the action of wave and earthquake. When the wave forces and seismic forces are in the same direction, the displacement, moment, and shear force of pile bolck will be increased, on the contrary, the displacement, moment, and shear force of pile bolck will be decreased.

**Key words:** high-rise pile cap; Morison equation; wave; earthquakes; pile foundations

随着国家经济建设的不断发展,海上项目的不断增多,高桩承台在实际工程中的应用也越来越广泛。高桩承台由于承台位置较高,可减少台身的钢筋混凝土数量,减轻自重,且施工较为方便,故广泛

收稿日期:2011-04-21

基金项目:国家自然科学基金资助(51074140);河北省建设厅项目(2010-221)

作者简介:武崇福(1966-),男,副教授,主要从事上部结构与地基基础共同作用研究,(E-mail) wcf11@263.net。

应用于桥梁工程、港口工程及海洋工程等结构上<sup>[1-3]</sup>。海洋工程结构不同于陆地上的建筑物,其工作环境更加恶劣。结构在服役期间受到的荷载包括波浪、海流、风和地震作用<sup>[4]</sup>,其中波浪荷载是最基本的,它是一种动荷载。中国地处世界上 2 个最活跃的地震带,是多地震发生的国家之一。在中国多地地震发生的海域修建建筑物必须进行抗震设计<sup>[4]</sup>。然而,通常情况下,当地震发生时,结构会同时受到地震和波浪的共同作用,因此,对结构进行波浪和地震共同作用下的研究是非常有必要的。

国内外学者和专家对地震和波浪作用下结构的动力响应做了大量的研究<sup>[5-7]</sup>。贾学敏<sup>[8]</sup>采用 Morion 方程来近似计算地震作用下结构上的动水力;郑海容等<sup>[9-11]</sup>在考虑桥墩上的动水压力下,进行了桩-土-桥墩-流体相互作用体系的水平地震反应分析;张学志,黄津等<sup>[12-14]</sup>考虑波浪力及流固耦合对码头结构进行了动力计算;赖伟<sup>[15]</sup>采用混合分析方法对地震和入射波浪作用下深水桥梁进行了动力分析。

目前针对海上建筑物的研究多为海上平台以及桥梁结构,而对上部有框架结构的海上建筑物的研究是少之又少。上部结构与高桩承台基础是一结构整体,在风载、地震荷载、再加上基础所受到波浪力共同作用下协同工作,该文从共同作用角度,重点研究在地震和波浪力作用下桩基础及承台效应。工程算例为秦皇岛海上五星级酒店,距海岸 200 m,海水深 3~6 m。利用 ANSYS 有限元软件对高桩承台-土-上部结构进行分析,研究桩基础在波浪和地震共同作用下的受力和变形,为海上建筑物的设计提供依据。

## 1 波浪作用

### 1.1 波浪力的计算

Morison 等认为,作用于柱体任意高度  $z$ (离海底以上高度  $z$ ) 处的水平波力  $f_H$  包括 2 个分量:一是波浪水质点运动的水平速度  $\mu_x$  引起对柱体的作用力——水平拖拽力  $f_D$ ,另一是波浪水质点运动的水平加速度  $\frac{d\mu_x}{dt}$  引起的对柱体的作用力——水平惯性力  $f_1$ <sup>[16]</sup>,波浪对柱体结构的波浪力计算公式为:

$$f_H = f_D + f_1 \quad (1)$$

$$f_D = \frac{1}{2} C_D \rho A \mu_x |\mu_x| \quad (2)$$

$$\begin{aligned} f_1 &= \rho \bar{V}_0 \frac{d\mu_x}{dt} + C_m \rho \bar{V}_0 \frac{d\mu_x}{dt} \\ &= (1 + C_m) \rho \bar{V}_0 \frac{d\mu_x}{dt} = C_M \rho \bar{V}_0 \frac{d\mu_x}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: $\mu_x$  和  $\frac{d\mu_x}{dt}$  分别为柱体轴中心位置任意高度  $z$  处波浪水质点的水平速度和水平加速度; $A$  为单位柱高垂直于波向的投影面积; $\bar{V}_0$  为单位柱高的排水体积; $\rho$  为海水密度; $C_D$  为垂直于柱体轴线方向的拖拽力系数; $C_m$  为附加质量系数; $C_M$  为质量系数; $f_H$ 、 $f_D$  和  $f_1$  分别为水平波力、水平拖拽力和水平惯性力。

### 1.2 运动方程

结构在地震作用下的动力学方程为:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{x}_g\} \quad (4)$$

结构在地震和波浪共同作用下的动力学方程为:

$$\begin{aligned} [M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} \\ = -[M]\{\ddot{x}_g\} + \{f_H\} \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$  分别为结构体系的质量、阻尼和刚度矩阵, $\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$  和  $\{\ddot{x}\}$  分别为结构体系的位移、速度和加速度, $\{\ddot{x}_g\}$  为地震加速度, $\{f_H\}$  为水平波力。

## 2 有限元模型的建立

结构模型基本参数为:上部结构为 3×2 跨 6 层框架结构,层高均为 3 m,柱网尺寸为 6 m×6 m,承台为高桩承台,承台板厚为 1 m,承台下的群桩基础由 49 根桩径为 1 m×1 m 的桩组成,桩长为 22 m,桩的自由段长度为 7 m,承台边沿距边桩为 2  $d$  ( $d$  为桩径)。地基土边界尺寸的取值要考虑桩与土相互作用影响的边界范围,一般水平向取 12~15  $d$ ,竖向取 5~10  $d$ ,超出此范围桩的应力和变形对地基土的影响已经很小,地基土尺寸为 53 m×53 m×22 m,地基土边界很大,足以吸收到达边界的应力波,桩的平面布置图如图 1 所示。

采用重现期为 50 a 的场区波流参数:波高 3.2 m,波长 35 m。依据《海港水文规范》,取  $C_D = 1.2$ , $C_M = 2.0$ 。采用 ANSYS 软件建立地基-群桩基础-框架结构在波浪与地震共同作用下的有限元分析模型:上部梁柱采用 beam188 单元,板采用 shell 单元,桩基、承台和土体采用 solid45 单元,有限元模型图如图 2 所示。

## 3 模拟分析结果

对模型水平  $x$  方向输入峰值为 0.1 g 的 El-

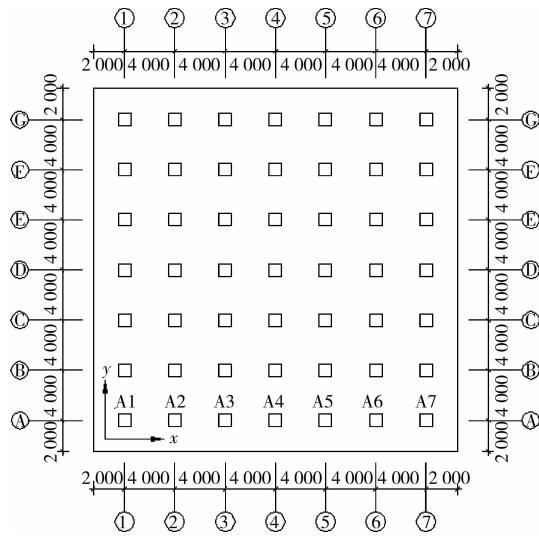


图 1 桩的平面布置图

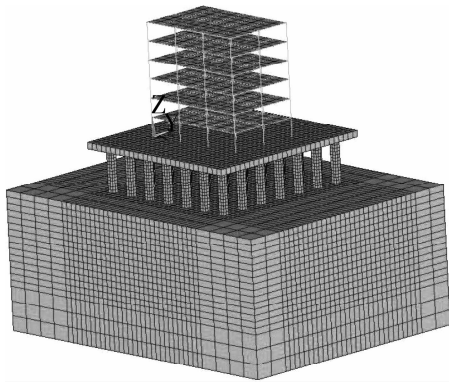


图 2 有限元模型

Centro 地震波,取其前 10 s 进行计算,地震动加速度时程曲线见图 3。文中取 2 种工况对结构进行分析:工况 1,地震和波浪共同作用;工况 2,地震单独作用。分析结构在有波浪荷载和无波浪荷载作用下桩顶位移、桩身位移、弯矩、剪力和轴力。

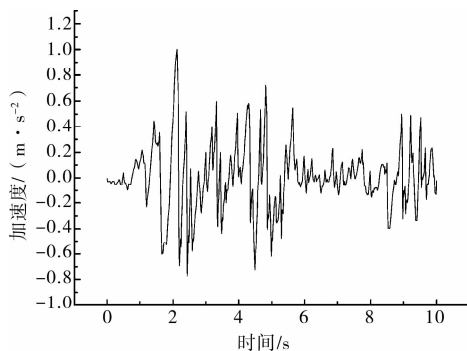


图 3 El-Centro 地震波加速度时程曲线

### 3.1 模态分析结果

在进行动力分析之前,先要进行模态分析,获取结构的动力学基本特征。结构自振周期和自振频率

是重要的结构动力特性<sup>[17]</sup>,根据所建模型,利用有限元软件 ANSYS 计算出结构的前 60 阶频率。其前 6 自振频率对应周期见表 1。

表 1 结构前 6 阶自振频率和自振周期

阶数	1	2	3	4	5	6
自振频率 $f/\text{Hz}$	1.000 7	1.006 3	1.133 3	1.236 4	1.295	1.308 8
自振周期 $T/\text{s}$	0.999 3	0.993 7	0.882 4	0.808 8	0.772 2	0.764 1

### 3.2 桩顶位移分析

水上结构必须严格控制桩顶位移,这也是水上建筑不同于一般地面建筑桩基的特点。在有无波浪作用下的桩顶位移,见图 4。从图中可以看出,在 El-Centro 波和波浪共同作用下, $t=2.24\text{ s}$  时位移达到了负向最大值,最大值为  $-12.3\text{ mm}$ , $t=2.76\text{ s}$  时位移达到了正向最大值,最大值为  $9.32\text{ mm}$ 。在无波浪作用时, $t=2.24\text{ s}$  时位移为  $-10.5\text{ mm}$ , $t=2.76\text{ s}$  时位移为  $10.1\text{ mm}$ 。通过比较 2 种工况下桩顶位移可知,波浪作用对桩顶位移有影响。

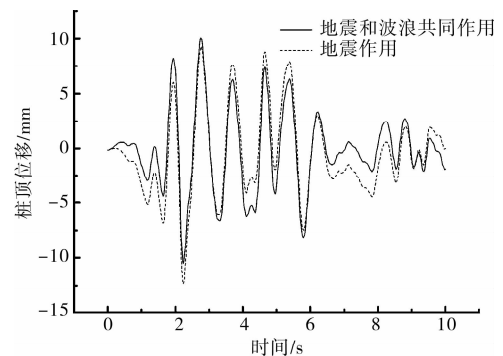


图 4 桩顶位移时程曲线的对比

### 3.3 桩身位移分析

根据时程曲线,分别取初始状态、正负加速度最大状态 3 个时间点对结构进行研究,分别对应  $t=0.02\text{ s}$ , $t=2.24\text{ s}$  及  $t=2.76\text{ s}$ 。由于边排桩受力最大,故本文以 A 轴线对应的桩为例进行研究。

对桩在水平作用力下进行研究和设计,必须严格控制桩的水平位移。桩在地震和波浪共同作用下的位移如图 5 所示。由于刚性承台的存在,限制和协调了桩的桩顶位移,故各桩的桩顶位移值相近。地震波施加在整个土体上,作用在桩底以下那部分土体的地震波,波动在由桩底传到桩顶的过程中,桩周土吸收了大部分能量,所以桩底的位移要比其它入土段桩的位移大,而自由段的桩由于没有土体对它进行约束,故桩顶的位移比较大。

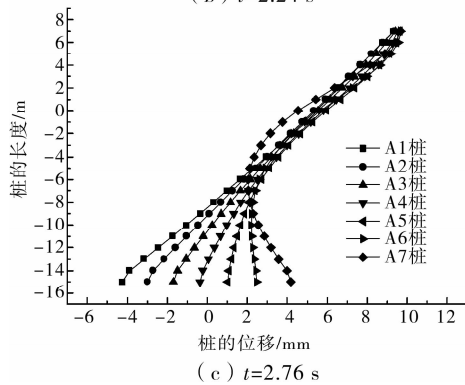
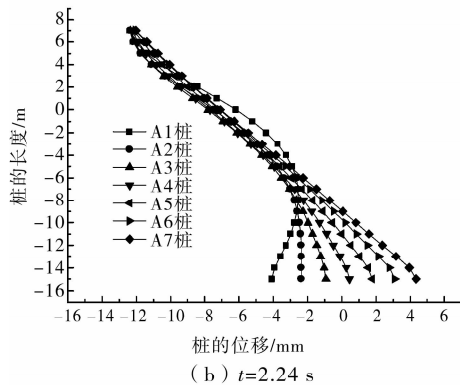
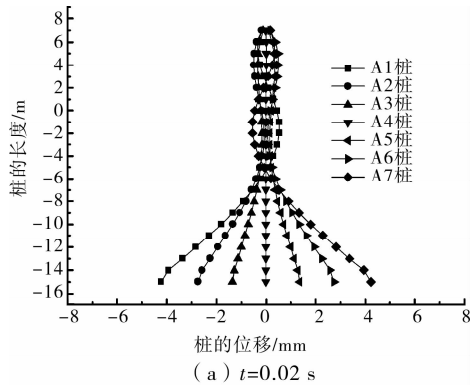


图 5 地震和波浪作用下桩身位移

$t=0.02$  s 时, 桩顶位移很小, 下部桩位移比较大, 作用在上部结构的竖向力使得桩底发生了位移, 桩底部各桩位置间隔均匀分布, 最大位移为 4.2 mm;  $t=2.24$  s 时, 为左震最大状态, 桩的位移向负方向增加, 各桩的位移均有所增大, 桩顶位移增速最快, 达到了  $-12.4$  mm, 下部桩的位移较  $t=0.02$  s 时变化不大;  $t=2.76$  s 时, 为右震最大状态, 桩的位移向正方向增加, 桩顶最大位移为 9.7 mm。

可以看出, 在地震和波浪作用下桩顶产生的位移最大, 在设计时应充分考虑桩顶位移对结构的影响。

图 6 为无波浪作用时的桩身位移, 由图 6 可以看出,  $t=0.02$  s 时, 桩身位移图和在有波浪作用时的桩身位移图近似;  $t=2.24$  s 时, 这时波浪力作用方向沿  $x$  轴正方向, 桩顶位移比有波浪作用时的桩顶位移有所减少, 其中, 减少最多的为 17.9%;  $t=$

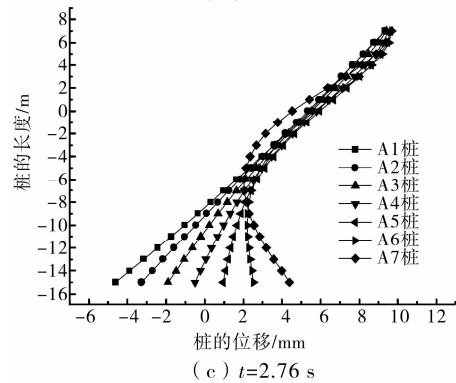
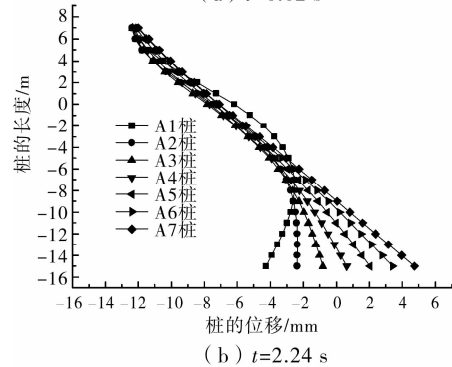
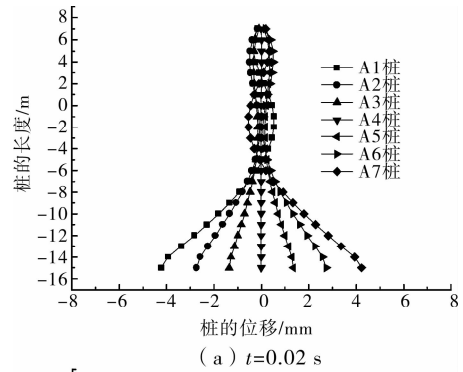


图 6 地震作用下桩身位移

2.76 s 时, 此时波浪力作用方向也是沿  $x$  轴正方向, 桩顶位移比有波浪作用时的桩顶位移有所增加, 增加最多的为 8.1%。可以看出, 当波浪力方向和地震力方向一致时, 波浪力作用会增大桩顶位移; 相反, 则波浪力作用会减小桩顶位移。

### 3.4 桩身弯矩分析

结构在地震和波浪共同作用下的桩身弯矩如图 7 所示。各桩的桩顶承受的弯矩是最大的, 入土部分的桩在入土深度为 2~3 m 时弯矩达到最大值, 桩底所受的弯矩最小。桩顶由于有承台的作用, 一般属于嵌固端, 其抗弯刚度明显提高, 桩身弯矩减小, 桩顶弯矩加大。其中, 桩右端受拉为正。

在初始时刻  $t=0.02$  s 时, A1 桩和 A7 桩桩顶弯矩最大, 桩顶弯矩呈现由角桩到中间桩逐渐减小的趋势, 角桩由于和其周围土体相对滑动的趋势更大, 因此其桩侧摩阻力也是最大的, 发挥的比较充分。由于桩间土体的沉降较大, 中桩和桩间土体的相

对滑动趋势较小,故其桩侧摩阻力最小。 $t=2.24$  s 时,为左震最大状态,桩顶均为左端受拉,A1 到 A7 桩各桩弯矩呈依次减小的趋势,但各桩弯矩均比  $t=0.02$  s 时增大,尤其是桩顶弯矩,平均增加了 464.8 kN。相反, $t=2.76$  s 时,为右震最大状态,桩顶变为右端受拉,A7 到 A1 桩各桩弯矩呈依次减小的趋势,桩顶弯矩比  $t=0.02$  s 时平均增加了 384.5 kN。由于地震波在土体中传播时,桩周土会吸收一部分能力,所以,前排桩的受力是最大的。

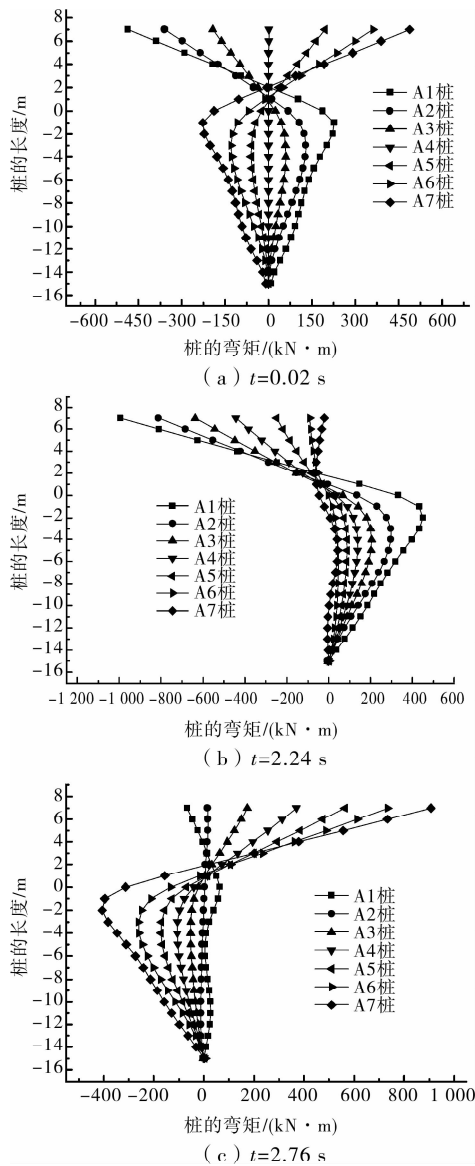


图 7 地震和波浪作用下桩身弯矩

可以看出,在地震和波浪共同作用下,前排桩的弯矩较大,同时,桩身最大弯矩处发生在桩顶,在设计时,应当增加前排桩以及桩顶的配筋,以抵抗地震作用对桩弯矩的改变。

在水平力作用下,桩顶所受弯矩值是最大的。结构在有无波浪作用下的桩顶弯矩值如表 2 所示。

表 2 有无波浪作用下桩顶弯矩 /( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )

桩号	地震			地震和波浪		
	0.02 s	2.24 s	2.76 s	0.02 s	2.24 s	2.76 s
A1	-486.7	-937.1	-45.9	-486.4	-995.1	-67.1
A2	-359.8	-763.3	32.8	-359.3	-811.6	15.1
A3	-194.0	-590.5	191.5	-193.5	-637.3	174.4
A4	0.3	-396.4	386.1	0.8	-443.0	369.0
A5	194.6	-201.9	580.1	195.1	-248.7	563.0
A6	360.5	-43.0	753.0	360.9	-91.4	735.3
A7	487.7	37.3	928.5	488.1	-20.6	907.3

从表 2 可以看出, $t=0.02$  s,在有无波浪作用下桩顶的弯矩变化很小; $t=2.24$  s 时,波浪力和地震力的作用方向均沿  $x$  轴正向,各桩的桩顶弯矩在有波浪作用下比无波浪作用下有所增加,其中,各桩平均增加了 11.0%; $t=2.76$  s 时,波浪力的作用方向沿  $x$  轴正向,但此时的地震加速度沿  $x$  轴负向,各桩的桩顶弯矩在有波浪作用下比无波浪作用下有所减少,其中,各桩平均减少了 4.1%。可以看出,当波浪力方向和地震力方向一致时,波浪力的存在会增强结构的动力反应,相反,则波浪力会减弱结构的动力反应。

### 3.5 桩顶剪力分析

桩在受水平力作用时,一般桩顶所受的剪力最大,表 3 列出了在地震和波浪共同作用下以及地震单独作用下桩顶剪力值的对比。从表 3 中可以看出,在初始时刻  $t=0.02$  s 时,2 种工况作用下的桩顶剪力值相差很小,A1 和 A7 桩的桩顶剪力最大,A4 桩的桩顶剪力最小; $t=2.24$  s 时,2 种工况作用下的桩顶剪力均向正方向增大,有波浪作用下的桩顶剪力比无波浪作用下稍有增加; $t=2.76$  s 时,2 种工况作用下的桩顶剪力均向负方向增大,有波浪作用下的桩顶剪力比无波浪作用下稍有减少。可见,波浪力和地震力作用方向一致时,会增加桩顶剪力值,相反,会减少桩顶剪力值。

表 3 有无波浪桩顶剪力对比 /kN

桩号	地震			地震和波浪		
	0.02 s	2.24 s	2.76 s	0.02 s	2.24 s	2.76 s
A1	98.2	178.4	21.2	98.1	183.7	23.1
A2	61.9	125.4	1.3	61.7	127.7	2.1
A3	31.6	90.0	-25.0	31.4	92.6	-24.2
A4	-0.1	58.5	-55.9	-0.2	60.0	-55.3
A5	-31.6	27.7	-88.3	-31.8	29.4	-87.6
A6	-61.9	1.6	-122.6	-62.1	3.9	-121.7
A7	-98.3	-18.1	-175.4	-98.5	-12.9	-173.5

### 3.6 桩顶轴力分析

桩在有无波浪力作用下的轴力最大值比较如图 8 和图 9 所示。

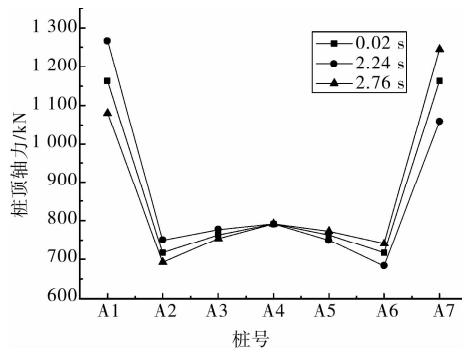


图 8 地震和波浪作用下桩顶轴力

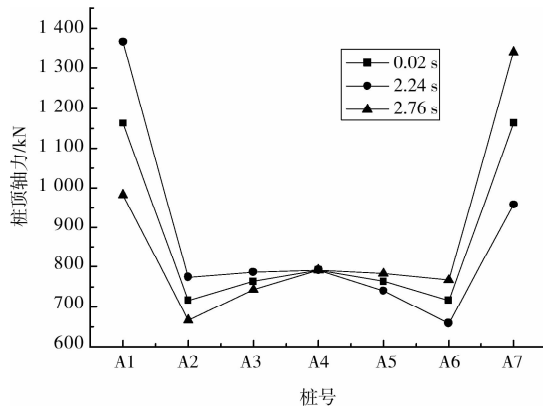


图 9 地震作用下桩顶轴力

由图 8 和图 9 可以看出,桩顶轴力分布表现出角桩最大、中间桩最小的分布特征,形成“W”形状的反力趋势。由于群桩引起的土中应力的重叠,使得内部桩具有更大的沉降,而刚性承台的存在使得各桩的沉降必须相等,导致荷载由中心桩向角桩转移,因此角桩所受的桩顶反力比较大。

$t=0.02\text{ s}$  时,有无波浪作用对桩顶的轴力影响很小, $t=2.24\text{ s}$  时,A1—A3 桩在无波浪作用下比有波浪作用下的值大,平均大出 4.1%,A5—A7 桩在无波浪作用下比有波浪作用下的值小,平均减小 5.1%; $t=2.76\text{ s}$  时,A1—A3 桩在无波浪作用下比有波浪作用下的值小,平均减小 5.1%,A5—A7 桩在无波浪作用下比有波浪作用下的值大,平均增大 4.2%。因此,波浪作用对桩顶轴力有影响,在设计时应充分考虑桩顶承受的轴力,适当增强桩的配筋。

## 4 结论

对结构在波浪和地震共同作用下进行了动力响应研究,并比较了有无波浪作用时桩身的内力和变形。分析结果表明,波浪力方向和地震力方向一致

时,桩顶位移、弯矩和剪力增大,相反,则桩顶位移、弯矩和剪力减小。在波浪和地震共同作用下,桩身最大位移和最大弯矩均发生在桩顶处,而且,前排桩的受力最大,在设计时应适当增大桩顶以及前排桩的配筋;桩顶轴力分布表现出角桩最大、中间桩最小的分布特征。在海上修建结构物时,应考虑波浪和地震作用对其的影响。

### 参考文献:

- [1] 叶爱君,刘伟岸,王斌斌. 高桩承台基础与桥梁结构的动力相互作用[J]. 同济大学学报:自然科学版,2007,35(9):1163-1168.  
YE AI-JUN, LIU WEI-AN, WANG BIN-BIN. Dynamic interaction between high-rise pile cap foundation and bridge structure [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(9): 1163-1168.
- [2] MURAT D. Integral abutment-backfill behavior on sand soil-pushover analysis approach [J]. Journal of Bridge Engineering, 2005, 10 (3) :354-364.
- [3] INGHAM TIM J, RODRIGUEZ SANTIAGO, DONIKIAN ROUPEN, et al. Seismic analysis of bridges with pile foundations [J]. Computers and Structures, 1999, 72 :49.
- [4] 何晓宇,李宏男. 地震与波浪联合作用下海洋平台动力特性分析[J]. 海洋工程, 2007, 25(3):348-351.  
HE XIAO-YU, LI HONG-NAN. Dynamic analysis of offshore platform under the combined effects of the earthquake and waves [J]. Ocean Engineering, 2007, 25(3): 348-351.
- [5] SUN K, NOGAMI T. Earthquake induced hydrodynamic pressure on axisymmetric offshore structures [J]. Earthquake Engng Struct Dynamics, 1991, 20:429-440.
- [6] BHATTA D D, RAHMAN M. Wave loadings on a vertical cylinder due to heave motion [J]. International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences, 1995, 18(1):151-170.
- [7] 衣伟. 考虑桩-土相互作用高桩码头单桩地震反应[J]. 港口工程, 1997, 4:30-34.  
YI WEI. Seismic response of high-piled wharf pile Considering the pile-soil interaction [J]. Port Project, 1997, 4: 30-34.
- [8] 贾学敏. 海岸高桩码头结构受地震和海浪荷载作用的近似计算[J]. 振动、测试与诊断, 1993, 13(1):17-23.  
JIA XUE-MIN. Approximate calculation of coast piled jetties under the earthquake and waves loading [J]. Vibration, Testing and Diagnosis, 1993, 13(1):17-23.
- [9] 郑海容. 桩-土-上部结构(桥墩)-流体相互作用体系的地震反应分析[J]. 桥梁建设, 1992, 4: 67-75.

(下转第 58 页)

- Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8):1804-1825.
- [8] SAATCIOGLU M, RAZVI S R. Strength and ductility of confined concrete[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1992, 118(6):1590-1607.
- [9] YALCIN C, SAATCIOGLU M. Inelastic analysis of reinforced concrete columns [J]. Computers and Structures, 2000, 77:539-555.
- [10] 赵国藩. 高等钢筋混凝土结构学[M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [11] PRIETLEY M J N, PARK R. Strength and ductility of concrete bridge columns under seismic loading[J]. ACI Structural Journal, 1987, 84(8): 61-76.
- [12] BERRY M, PARRISH M, EBERHARD M. PEER Structural Performance Database User's Manual (Version 1.0)[R]. Berkeley: University of California, Berkeley, 2004.
- [13] 中华人民共和国建设部. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.

(编辑 胡 玲)

(上接第 12 页)

- ZHENG HAI-RONG. Seismic response analysis of Pile-soil-structure (pier)-fluid interaction system[J]. Bridge Construction, 1992, 4: 67-75.
- [10] 吴明军, 陈文元, 肖盛莲. 地震和波浪力共同作用下桥墩的动力响应研究[J]. 四川建筑科学研究, 2010, 36(6):21-25.
- WU MING-JUN, CHENG WEN-YUAN, XIAO SHENG LIAN. A study on the dynamic response of bridge piers under the combined effect of earthquake and wave force[J]. Sichuan Building Science, 2010, 36(6):21-25.
- [11] ROLLINS K M, GERBER T M, LANE J D, et al. Lateral resistance of a full-scale pile group in liquefied sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(1):115-125.
- [12] 张学志, 黄维平, 李华军. 考虑流固耦合时的海洋平台结构非线性动力分析[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(5):823-826.
- ZHANG XUE-ZHI, HUANG WEI-PING, LI HUA-JUN. Nonlinear dynamic analysis of offshore platform considering fluid-structure interaction [J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2005, 35(5):823-826.
- [13] 黄津, 于小存, 陈志勇. 波浪力对高桩码头结构的影响分析[J]. 港工技术, 2010, 47(3):8-12.
- HUANG JIN, YU XIAO-CUN, CHEN ZHI-YONG. Analysis on impact of wave force to high-pile wharf structure[J]. Port Engineering Technology, 2010, 47(3):8-12.
- [14] TATJANA ISAKOVIC, MATEJ FISCHINGER. Higher modes in simplified elastic seismic analysis of single column bent viaducts[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35: 95.
- [15] 赖伟. 地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D]. 上海:同济大学, 2004:49-51.
- [16] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津:天津大学出版社, 1991: 42-48.
- [17] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 46-68.

(编辑 胡英奎)