

· 港口 ·



# 地震作用下大型起重机与高桩码头 耦合作用动力特性研究\*

宋波<sup>1,2</sup>, 李吉人<sup>1,2</sup>, 黄付堂<sup>1,2</sup>, 杨华<sup>3</sup>

(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; 3. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 为了研究上部起重机对下部码头结构抗震性能的影响, 基于所建立的起重机-码头整体结构的三维有限元模型, 研究了不同峰值加速度以及近远场等不同地震动作用下结构的动力响应特征, 分析了不同地震动作用下起重机的动力响应对下部码头结构动力特性的影响。研究表明: 起重机对高桩码头结构的自振特性影响较大, 使整体结构周期变长; 考虑起重机时, 码头桩顶弯矩极值大幅下降、剪力极值大幅下降的同时, 其出现的位置也产生了明显的下移, 进而将改变码头结构整体的破坏机制; 近场地震动对结构的动力响应影响最大, 对其弹塑性极限状态起控制作用。

**关键词:** 起重机; 高桩码头; 近远场地震; 地震响应; 动力特性

中图分类号: U 656.113; U 442.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)02-0039-09

## Dynamic characteristics of coupled interaction between jumbo container crane and piled wharf

SONG Bo<sup>1,2</sup>, LI Ji-ren<sup>1,2</sup>, HUANG Fu-tang<sup>1,2</sup>, YANG Hua<sup>3</sup>

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Beijing International Cooperation Base for Science and Technology-Aseismic Research of Rail Transit Engineering in Strong Motion Area, Beijing 100083, China; 3. CCCC Water Transport Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** To study the effect of the container crane to the seismic performance of the wharf structure, we study the dynamic response characteristics of the wharf structure under the seismic actions of different peak accelerations and near-field and far-field ground motions based on the 3D finite element model of crane-wharf structure. The effects of the dynamic response of container crane to the wharf structure dynamic characteristics under different seismic actions are analyzed. The study shows that the container crane has a significant impact on the natural vibration characteristics of the pile-supported wharf structure, making the period of the structure extended. Considering the container crane, the moment extremum of the pile-top gets decreased significantly. With the decrease of the shear force extremum, the position where the extreme value occurs gets down obviously. These will change the failure mechanism of the wharf structure. The near-field earthquake has the most significant impact on the structural dynamic response, which will be the main controlling factor of the elastic-plastic limit state.

**Keywords:** container crane; pile-supported wharf; near-field and far-field ground motion; seismic response; dynamic characteristics

收稿日期: 2015-07-30

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51178045); 教育部海外名师资助项目 (MS2011BJKJ005)

作者简介: 宋波 (1962—), 男, 博士, 教授, 从事土木工程防灾减灾研究。

1995年兵库县南部地震发生后，神户港集装箱码头诸多的港湾土木设施和建筑结构以及起重机等均遭受了严重的震害<sup>[1]</sup>，神户港部分港湾机能完全瘫痪，不仅阪神地区，甚至日本国内外的经济、社会活动等也都受到了严重的影响<sup>[2]</sup>。起重机与码头震害以及起重机倒塌过程见图1~3。

兵库县南部地震中，由于陆上的交通运输几乎完全陷入了瘫痪状态，因而向灾区输送救援物资等紧急救援工作主要通过抗震强化码头（包括紧急维修后投入使用的码头）来进行，在灾区救援的整个进程中发挥了重要的作用<sup>[2-3]</sup>。此外，随着灾区恢复重建的推进，港湾绿地亦可作为临时住宅区、应急救援物资输送据点等来使用，这使人们对于机能性码头的重要性有了全新的认识<sup>[4]</sup>。结合阪神大地震的经验教训以及港湾设施在灾后所发挥的重要作用，并考虑到港湾设施现今的社会性及经济性，尤其是重要的港湾设施，在抗震性能设计方面，应作为可抵抗罕遇强震的抗震强化设施来考虑。日本2007年版《港口设施技术规范与解说》中则以安全性、修复性以及使用性对港口设施的性能设计进行了规定<sup>[5]</sup>。其中使用性即

指在大震后确保紧急救援物资的输送机能的一类港湾码头设施，在遭受突发性的罕遇灾害时其损伤程度亦需要设定在一个较小的范围内，以确保其使用性能。



图1 起重机整体倒塌（六甲 Island 地区）



图2 码头与起重设备的破坏（东部工区地区）

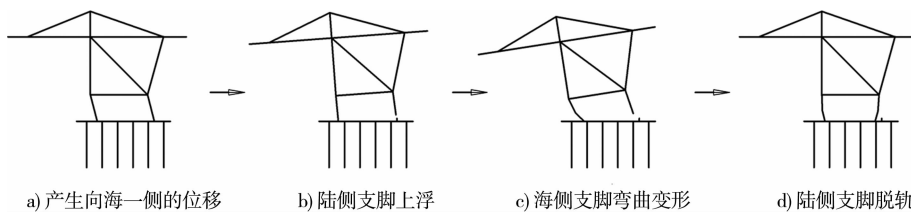


图3 地震时起重机倒塌过程

对于我国而言，随着对外贸易的增加，港口与集装箱吞吐量持续增加，推动了集装箱与大型专业化机能性码头的相继投产与使用。我国《“十二五”综合交通运输体系规划》中亦指出，积极发展水路运输，完善港口布局，提升我国码头的整体现代化水平，加强集装箱码头等机能性港口工程设施的整体抗震水平的建设。此外，国家在“一带一路”的倡议中，对于“推动口岸基础设施建设，畅通陆水联运通道，推进港口合作建设”的需求，亦对国内外强震区、大水深的高水准码

头的设计与建设施工以及抗震防灾等提出了更高的要求。

关于大型码头及上部大型起重器械的抗震性能，国内外的专家学者做了相关的研究。Chaudhuri等<sup>[6]</sup>用数值方法建立地震作用下典型起重机与码头相互耦合的模型，对早期小型和现代大型起重机的抗震性能进行了分析。Jaradat等<sup>[7]</sup>通过非线性时程反映分析了起重机-码头的相互作用，根据《长滩港设计准则》，基于不同的抗震性能设计水平，对起重机的结构设计进行了修正，

进而减小了码头的横向位移并降低了对于轨道抗剪能力的要求。Soderberg等<sup>[8]</sup>对地震作用下起重机的抗震设计以及防倒塌机制的传统分析方法和标准进行评价,建议应注重防止起重机结构的局部屈曲,以提高其抗震性能和可靠性。Shafieezadeh等<sup>[9]</sup>应用数值模拟对某典型高桩码头与集装箱起重机结构进行了研究,通过对基础-码头-起重机结构体系的动力反应分析说明,起重机的存在将会大幅增加码头的变形需求。郑培等<sup>[10-11]</sup>基于起重机的有限元模型与模型试验,并通过振动台试验,分析了起重机在有/无减隔震装置时的动力响应。Jacobs等<sup>[12]</sup>采用振动台模型试验,研究了大型起重机线弹性地震响应及跳轨行为,并定量计算了起重机地震动态特性。稻富等<sup>[13]</sup>通过试验以及起重机-码头整体有限元模型,分析两者的动力相互作用,研究发现加速度较小时(30 gal)起重机的存在对码头的动力特性基本无影响,但对加速度增大后二者的相互作用的影响未进行深入研究。小滨等<sup>[14-16]</sup>通过模型试验以及数值仿真模拟对单一起重机结构在强震作用下的动力反应特性进行了分析和研究。菅野等<sup>[17]</sup>通过模型试验对免震装置在减低起重机的地震加速度反应以及脱轨防止等方面的效果进行了校核和验证。

目前集装箱码头的抗震设计以及分析研究中,对于将起重机与下部码头结构作为整体、考虑起重机的有无对于码头结构的动力响应的作用影响以及震损机制的研究尚不充分。机能性码头作为灾后救援的生命线工程设施,须确保其自身结构及上部起重机械在强震后的安全服役功能。另一方面,上部起重机属于不规则的高耸结构,并且与码头基础结构之间处于非完全固定状态,在遭受地震灾害时,会产生支脚上浮、脱轨等特有的破坏现象及地震动响应特征,使得其整体地震动力响应趋向复杂,进而将影响到下部码头结构的地震响应特征及破坏机制。因此本文通过建立起重机-高桩码头三维有限元模型,基于数值模拟,考虑起重机的动力影响,对高桩码头结构的地震响应及损伤机理进行分析和研究,并与无起

重机高桩码头的有限元数值模拟计算结果进行对比分析,为集装箱码头的抗震设计研究提供参照和依据。

## 1 工程背景

本文所研究的高桩码头实际工程的场地类型为III类场地,码头结构宽度为46.1 m,排架间距为8 m,每排架包含8根桩。桩长32 m,桩径1 200 mm,壁厚22 mm,选用420级钢。桩内部采用钢筋混凝土灌芯,混凝土强度C35,码头上沿法向方向设2道宽1.5 m、高2.47 m的轨道梁及1道宽1.2 m、高2.47 m的纵梁,横梁宽1.2 m、高2.47 m,其间以厚度为700 mm的叠合面板连接。高桩码头结构见图4。

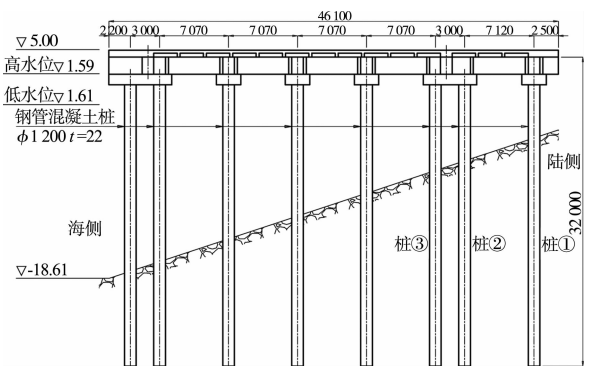


图4 高桩码头标准断面(高程:m;尺寸:mm)

上部起重机总质量为1 600 t,吊具下额定起吊质量65 t,外伸距64 m,后伸距14 m,轨距30.48 m,起重机主要结构尺寸见图5。

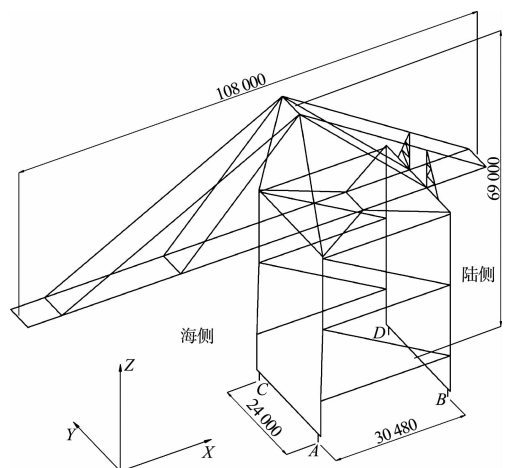


图5 起重机主要结构尺寸(单位:mm)

该地区土质的构成主要以粉土、砂土为主。地基土的各项土体参数见表1。

表1 地基土土体参数

土层编号	土层名称	厚度/m	干密度/(t·m <sup>-3</sup> )	土粒比重	孔隙比
①	粉砂	6	1.59	2.73	0.715
②	粉土	1	1.61	2.70	0.684
③ <sub>-1</sub>	层状粉土	3	1.53	2.70	0.770
③ <sub>-2</sub>	层状粉土	6	1.46	2.71	0.863
③ <sub>-3</sub>	层状粉土	4	1.53	2.70	0.770
④	粉细砂	6	1.54	2.69	0.752

## 2 结构体系有限元建模及自振特性分析

### 2.1 三维有限元模型的建立

利用SAP2000进行三维有限元分析，采用梁单元模拟轨道梁、纵梁和灌芯钢管桩，用板单元

模拟码头上部面板。通过计算得到的灌芯钢管桩的弯矩-曲率曲线(图6)。对于桩体与地基的相互作用，采用p-y曲线法进行模拟。有限元建模中规定以起重机沿轨道行走的方向为Y方向，垂直于轨道方向为X方向。起重机结构、码头结构以及起重机-码头整体结构的三维有限元模型见图7。

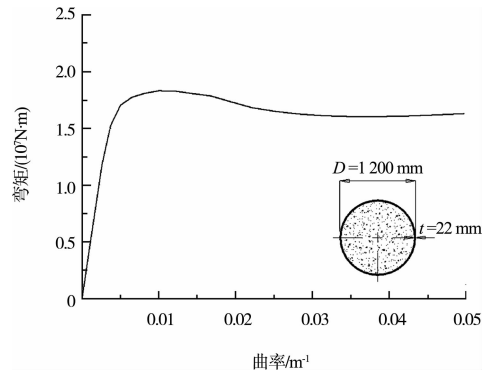


图6 灌芯钢管桩弯矩-曲率曲线

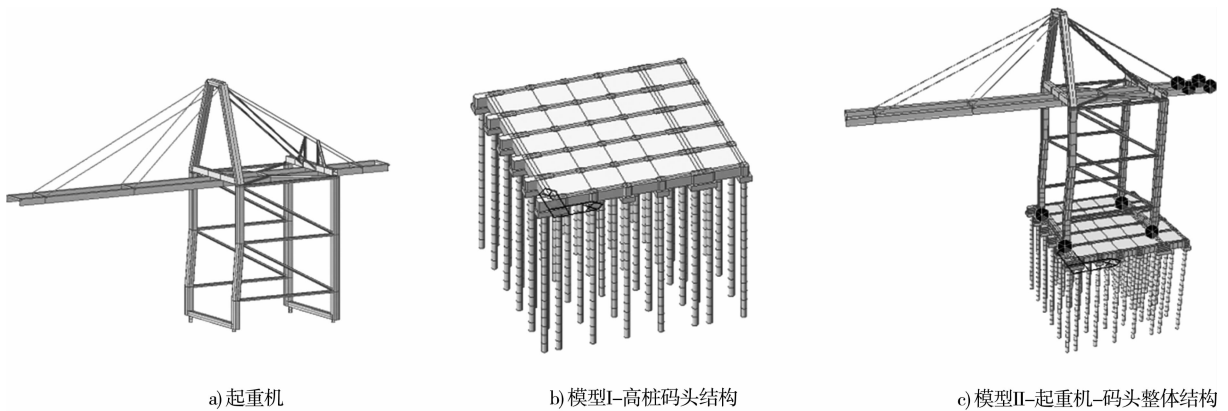


图7 有限元模型

根据起重机的实际工作情况，对有限元分析中起重机支脚部梁单元与下部码头结构连接处的约束条件进行设定。起重机通过4组车轮组在码头的轨道上行走，4组车轮组的位置为图5中的A、B、C、D点。沿Y方向，起重机通过车轮组沿轨道行走，故允许该方向上的车轮组的弹性变形。在X方向上，车轮组受到轨道轮缘的限制，故该方向上的车轮组被约束。同时，车轮组绕X方向以及Z方向的转动也被约束。在有限元建模中对于约束的处理为：A点和B点释放绕Y方

向的转动，其余方向的自由度均约束；C点和D点释放Y方向的自由度以及绕Y方向的转动，其余方向的自由度约束。

对于驱动机构以及其它起吊操作设备等以集中质量的形式施加在模型结构上。

### 2.2 结构自振特性对比分析

为明确上部起重机结构的存在对下部码头结构自振特性的影响，分别提取两种模型结构的主要模态振型，并进行对比分析。结构自振特性的提取结果见表2~4。

表2 结构自振特性

模型结构	模型 I(码头结构)			模型 II(起重机-码头整体结构)		
	自振频率/Hz	自振周期/s	参与质量比	自振频率/Hz	自振周期/s	参与质量比
1	1.37	0.73	0.74	0.21	4.78	$3.99 \times 10^{-11}$
2	1.75	0.57	$1.49 \times 10^{-6}$	0.45	2.22	$2.97 \times 10^{-8}$
3	1.89	0.53	$1.85 \times 10^{-6}$	0.85	1.17	0.24
4	1.92	0.52	$9.88 \times 10^{-9}$	0.88	1.14	$1.74 \times 10^{-3}$
5	1.96	0.51		1.08	0.93	0.11
6	2.00	0.50		1.27	0.79	0.41
7	2.7	0.37		1.54	0.65	$2.74 \times 10^{-6}$
8	4.00	0.25		1.67	0.60	$8.49 \times 10^{-7}$

表3 模型 I (码头结构) 主要模态振型

振型	立体图	侧面图(X-Z)	自振特性	振型	立体图	侧面图(X-Z)	自振特性
1阶			周期: 0.73 s 码头向海一侧(-X方向)的水平向移动	3阶			周期: 0.53 s
2阶			周期: 0.57 s	4阶			周期: 0.52 s

表4 模型 II (起重机-码头结构) 主要振型模态

振型	立体图	侧面图(X-Z)	自振特性	振型	立体图	侧面图(X-Z)	自振特性
1阶			周期: 4.78 s 起重机沿Y方向(行走方向)摆动	5阶			周期: 0.93 s
2阶			周期: 2.22 s	6阶			周期: 0.79 s 码头向陆一侧(X方向)水平移动
3阶			周期: 1.17 s 起重机沿X方向(垂直于行走方向)摆动	7阶			周期: 0.65 s 吊臂扭转
4阶			周期: 1.14 s	8阶			周期: 0.53 s

其中，模型 I(码头结构)的主要振型为第 1 阶振型，周期为 0.73 s。根据模型 II(起重机-码头整体结构)的振型模态及参与质量分析，前 5 阶振型主要表现为上部起重机的沿行走方向及垂直于行走方向的振动，其第 6 阶振型为主要振型，周期为 0.79 s，相比模型 I 周期增大 8.2%。

从自振特性的计算结果可以得出，相对于模型 I，模型 II 的各阶振型自振频率降低，自振周期变长，起重机的存在将影响码头结构的动力特性以及在地震荷载作用下的动力响应机制。

为进一步明确起重机对码头结构动力响应机制的影响，对两种结构的主要模态振型进行考察。模型 I 的主振型(第 1 阶振型)主要表现为向海一侧(-X 方向)的水平向移动；模型 II 的主振型(第 6 阶振型)主要表现为与模型 I 相反的向陆一侧(X 方向)的水平向移动。产生差异的原因

主要是由于起重机重心偏压效应，在振型模态中表现为向海一侧的倾覆趋势，在其动力响应的影响作用下，码头结构出现了与之相对的向陆一侧的位移趋势。

### 3 不同类型的地震动对结构动力响应的影响研究

#### 3.1 地震波的选取

在通过数值模拟方法对结构进行地震时程反应分析时，对于选取的输入地震动的类型不应少于 3 种<sup>[6,18]</sup>。本文所研究的高桩码头所在实际工程的场地类型为 III 类场地，故采用适合于 III 类场地的典型地震波——宁河天津波以及日本海中部地震(远场地震动)、兵库县南部地震(近场地震动)中所记录的适用于 III 类场地的典型地震波作为输入地震动。地震动特性及参数见表 5，地震动加速度记录时程曲线见图 8。

表 5 地震动特性及参数

地震动类型	地震时间	地震名称	震中距/km	适用场地类型	加速度峰值/(m·s <sup>-2</sup> )	截取时长/s
	1987 年	宁河天津波	65.0	III	1.458	19.19
板块边界型	1983 年	日本海中部地震	210.0	III	0.586	90.00
内陆直下型	1995 年	兵库县南部地震	16.5	III	8.180	30.00

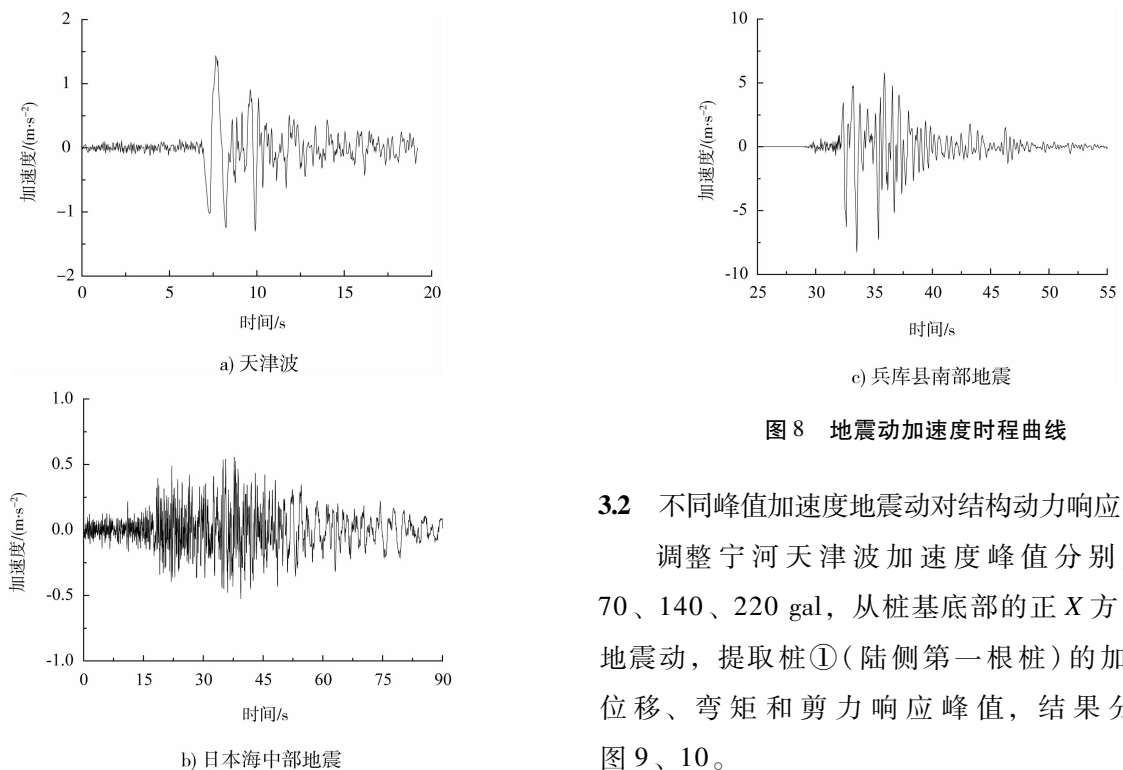
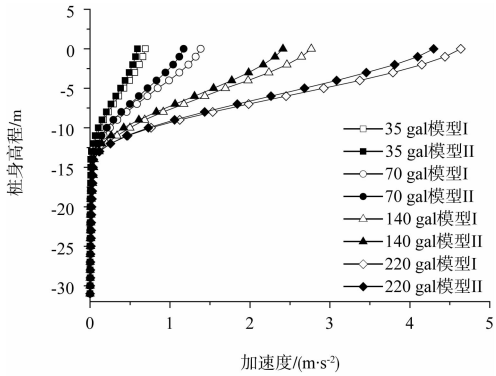


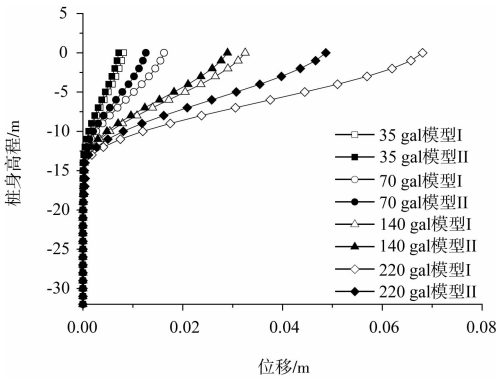
图 8 地震动加速度时程曲线

#### 3.2 不同峰值加速度地震动对结构动力响应的影响

调整宁河天津波加速度峰值分别为 35、70、140、220 gal，从桩基底部的正 X 方向输入地震动，提取桩①(陆侧第一根桩)的加速度、位移、弯矩和剪力响应峰值，结果分别见图 9、10。

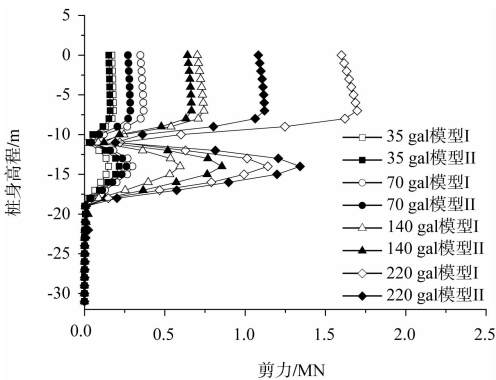


a) 加速度

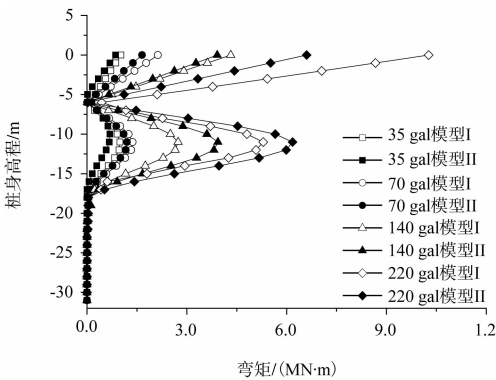


b) 位移

图 9 加速度和位移包络线



a) 剪力



b) 弯矩

图 10 剪力和弯矩包络线

从图 9 可以得出, 随着加速度的增大, 位移的响应值呈近似线性增大, 在加速度峰值处于 35 gal 时, 加速度以及位移包络线几乎重合, 说明在加速度较小时起重机的存在对结构整体的影响很小, 这亦与文献[13]所得到的试验及数值模拟的分析结果相符。随着加速度峰值的逐步增大, 模型 I 的位移响应值要大于模型 II 的响应值, 且差值亦逐渐增加。当加速度峰值达到 220 gal 时, 模型 I 的最大位移为 7.3 cm, 为模型 II 的最大位移 4.8 cm 的 1.52 倍。起重机的存在使得下部码头结构在地震作用下的加速度与位移响应均有所降低, 结构的整体动力响应在一定范围内趋向平缓。

图 10 可以表明, 由于起重机的影响, 下部码头结构桩体内的剪力与弯矩在不同程度上均有所减小。在加速度峰值较小时, 相差不明显。在加速度峰值达到 220 gal 时, 模型 I 与模型 II 中桩体剪力与弯矩的响应值产生了明显的差异, 模型 II 桩①桩顶所产生的弯矩降至模型 I 弯矩响应值的 64%。另外, 对于模型 I 桩体剪力的最大值发生在高程 -7.50 m 左右, 而对于模型 II 其桩体剪力极值在高程 -14.00 m 附近出现。通过两种模型的对比说明, 起重机的存在对于下部码头结构桩体内力的大小和分布均会产生一定程度的影响, 并且随着地震动加速度峰值增大其作用响应趋于显著。

### 3.3 近远场地震动对结构动力响应的影响

选取加速度峰值为 220 gal 的日本海中部地震、兵库县南部地震, 研究近远场地震动对模型 II 起重机-码头整体结构的动力响应规律的影响。图 11、12 分别为桩①的剪力和弯矩包络线。从图 11、12 中可以得出, 在两种不同地震动的作用下, 剪力与弯矩均产生了大小不同的反应值, 但具有相似的影响和变化趋势。

以模型 II 为例, 在日本海中部地震动作用下最大剪力值 1.24 MN, 最大弯矩值 7.1 MN·m, 兵库县地震动作用下最大剪力值为 1.75 MN, 最大弯矩值 10.2 MN·m, 近场地震动(兵库县南部地震动)作用下结构的最大剪力和弯矩响应值分别为远场地震动(日本海中部地震动)作用下的 1.41 倍和 1.44 倍。由此可见, 近场地震动对结构

的动力特性影响最大,对其塑性极限状态极限值起着控制作用,在结构整体动力响应分析、抗震设计和抗震性能评价中占主导地位。

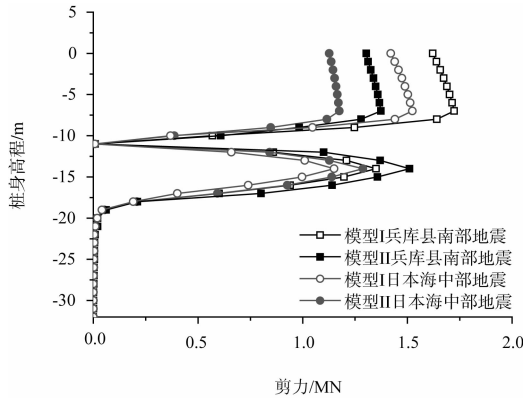


图 11 不同地震动作用下剪力包络线

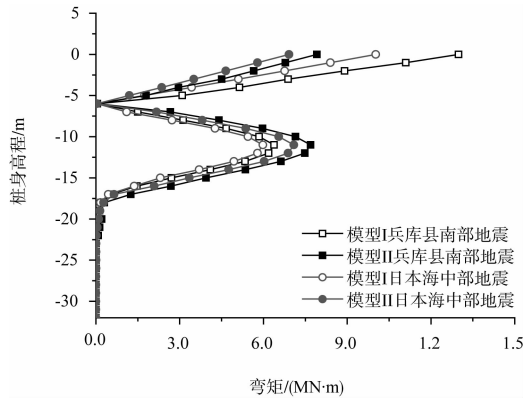


图 12 不同地震动作用下弯矩包络线

图 13 和图 14 分别是模型 II 中桩②和桩③的轴力-弯矩。在加速度峰值 220 gal 的两种不同类型地震动的作用下桩体均处于弹性阶段,但在近场地震动(兵库县南部地震动)的作用下,其弯矩-轴力曲线与另外两种地震动的作用结果相比产生了明显的增幅,更接近弹性区间的临界值曲线。若加速度峰值继续增加,地震动近远场类型不同,将会影响桩体的弹塑性状态,近场地震动将使其超越弹性区间而进入塑性状态。

基于以上研究,选用近场地震动,并调整加速度峰值为 800 gal,以分析强震作用下起重机的存在对下部码头桩基的影响。假定起重机未发生脱轨、倾覆和坍塌等整体失稳破坏,在近场地震动的强震作用下,两种结构的桩①桩顶的弯矩-曲率曲线见图 15。在 800 gal 的强震作用下,两种结构中桩基均进入塑性,且模型 II 的最大曲率比模

型 I 增大 18% 以上,说明在码头桩基进入塑性后,起重机的存在将会加快桩基的塑性开展。

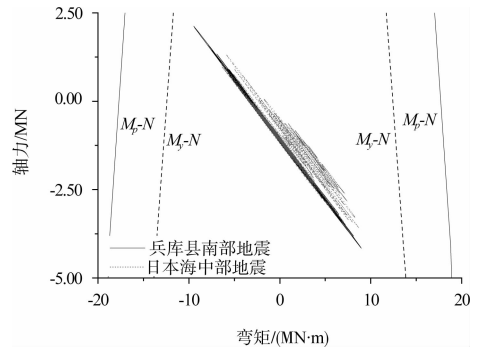


图 13 不同地震动作用下桩②桩顶轴力-弯矩曲线

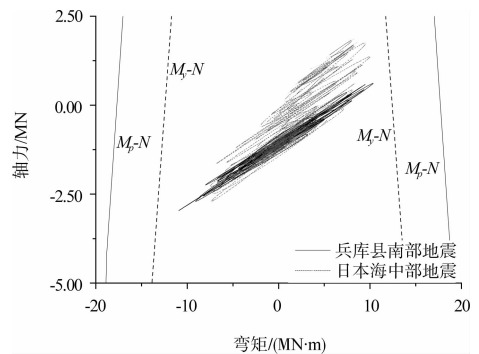


图 14 不同地震动作用下桩③桩顶轴力-弯矩曲线

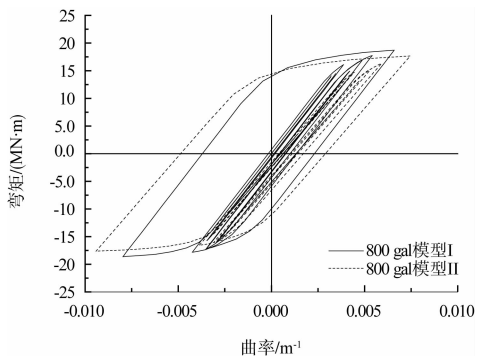


图 15 近场地震动作用下桩①桩顶的弯矩-曲率曲线

#### 4 结论

本文通过建立起重机-码头整体的三维有限元模型,研究了不同峰值加速度以及近远场等不同地震动作用下结构的动力响应特征,并通过整体模型与码头单一模型计算结果的对比,分析了不同地震动作用下起重机的动力响应对下部码头结构动力特性的影响,主要得到以下结论:

1) 相对于单一的码头结构,高耸起重机结构的存在,使得起重机-码头整体结构的自振频率降低、周期变长,对于码头结构整体自振特性的影



响不可忽略。

2) 在地震动加速度较小时,整体模型与码头单一模型的桩体剪力与弯矩响应值相差较小;随着加速度的增大,两种模型的桩体剪力与弯矩差值开始变大,并且相对于码头单一模型,考虑了起重机的整体模型剪力极值出现的位置产生了大幅下移。内力极值出现位置的改变,将会影响到码头桩基的塑性开展,使结构整体呈现出不同的破坏机制。此外,在强震作用下,码头桩基进入塑性后,起重机的存在将会加快桩基的塑性开展。

3) 对起重机-码头整体结构的时程反应分析表明,近场地震动对结构的动力响应影响最大,对其弹塑性极限状态起到控制作用,在结构整体动力响应分析、抗震设计和抗震性能评价中占主导地位。同时也印证了文前所述的兵库县南部地震后神户港诸多港湾码头设施所遭受的严重震害的缘由。

4) 起重机的重心偏向海一侧,其偏压效应随着加速度峰值的增大对下部码头结构作用影响增强。另外,当地震动激励作用达到一定程度时,起重机陆侧脚部支撑脱离轨道,形成近海侧支脚的单侧支撑,偏压效应进一步增大,对于下部码头结构动力特性的影响也将进一步扩大。本文尚未考虑起重机的失稳倾覆等破坏情况,该方面内容在后续的工作中还有待进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] 社団法人建設コンサルタンツ協会. 阪神・淡路大震災被害調査報告書[R]. 日本: 建設コンサルタンツ協会, 1995.
- [2] 藤本健幸. 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その2)被害状況 港湾荷役施設[R]. 日本: 運輸省港湾技術研究所, 1995.
- [3] 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会. 阪神・淡路大震災調査報告 機械編 機械設備の被害[R]. 日本: 機械学会, 1998.
- [4] 一井康二, 井合進, 森田年一. 耐震強化岸壁の耐震性能[J]. 土木学会論文集, 2000, 17(2): 39-50.
- [5] 社団法人日本港湾協会. 港湾の施設の技術上の基準・同解説[M]. 日本: 国土交通省港湾局, 2007.
- [6] Chaudhuri S R, Karmakar D, Na U J, et al. Seismic performance evaluation of container cranes[C]// Proceedings of the ATC & SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. USA: Applied Technology Council, 2009: 379-388.
- [7] Jaradat O, Lai C, Elsakdek A. Crane-wharf interaction nonlinear time-history analysis for pierE wharf at the Port of Long Beach [C]//13th Triennial International Conference. USA: American Society of Civil Engineers, 2013: 1 255-1 264.
- [8] Soderberg E, Jordan M. Seismic response of jumbo container cranes and design recommendations to limit damage and prevent collapse[C]//ASCE Ports 2007 Conference. USA: American Society of Civil Engineers, 2007: 1-10.
- [9] Shafieezadeh A, Kosbab B D, DesRoches R, et al. Dynamic interaction behavior of pile-supported wharves and container cranes in liquefiable soil embankments[C]// ASCE 2012 Structures Congress. USA: American Society of Civil Engineers, 2012: 549-558.
- [10] 郑培, 张氢. 大型起重机的抗震性能分析[J]. 武汉大学学报, 2010, 43(2): 116-120.
- [11] 杨安, 金玉龙. 大型岸边起重机的地震振动台试验研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(4): 437-444.
- [12] Jacobs L D, DesRoches R, Leon R T. Experimental study of the seismic response of container cranes[C]// Proceedings of the 12th Triennial International Conference. USA: American Society of Civil Engineers, 2010: 91-99.
- [13] 稲富隆昌, 林聰, 山下生比古. 大型荷役機械を上載する棧橋の振動性状[R]. 日本: 港湾技術研究所, 1973.
- [14] 小濱英司, 安藤和彰, 菅野高弘, 等. 低頭型コンテナクレーンの大規模地震時挙動に関する模型振動実験及び数値解析[R]. 日本: 港湾空港技術研究所, 2014.
- [15] 江頭隆喜, 山本俊介, 田邊俊郎, 等. 揺脚式コンテナクレーンの大規模地震時の挙動に関する模型実験[R]. 日本: 運輸省港湾技術研究所, 2000.
- [16] 宮田正史, 吉川慎一, 竹信正寛, 等. 耐震強化施設としてのコンテナクレーンの耐震性能照査手法に関する研究(その3) [R]. 日本: 国土交通省 国土技術政策総合研究所, 2010.
- [17] 菅野高広, 芝草隆博, 藤原潔, 等. コンテナクレーンの耐震性向上に関する研究 免震コンテナクレーンの開発[R]. 日本: 港湾空港技術研究所, 2003.
- [18] 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計篇[M]. 日本: 日本道路協会, 2012.