

文章编号:1006-1355(2019)03-0067-06

岸桥主要构件对整机地震响应的影响分析

李哲¹, 伍世英¹, 王贡献²

(1. 长江大学 机械工程学院, 湖北 荆州 434023, 2. 武汉理工大学 物流工程学院, 武汉 430063)

摘要:地震和岸桥结构都极其复杂,进行岸桥地震研究存在较多不确定性,为了降低后期模型试验中的黑箱现象,首先对地震灾害现场岸桥结构破坏情况进行统计,明确岸桥结构地震激励下的主要破坏形式以及主要失效构件,再采用仿真计算对比各主要构件对岸桥整体结构地震响应的影响,验证岸桥地震激励下门腿绕Z轴的弯曲刚度对整机影响占主导作用。研究的结论可以作为试验方案的指导,在保证试验顺利进行且结果准确可靠的前提下大幅提高试验效率。

关键词:振动与波;集装箱起重机;地震载荷;地震响应;弯曲刚度;影响分析

中图分类号:TH213.4

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2019.03.013

Study on the Influence of Main Components of the Container Crane on the Overall Response to the Earthquake Load

LI Zhe¹, WU Shiyong¹, WANG Gongxian²

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei China;

2. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract : The earthquake phenomenon and container crane structure are extremely complex, and there are many uncertainties in seismic and container crane research. In order to reduce the black-box phenomenon in the later model test, the influence of main components of the container crane on the overall response to the earthquake load is studied. The damage condition of the structure and the main failure modes and main failure components of the container crane under the earthquake is investigated. The main damage type and the main failure components of the container crane structure are confirmed. The influences of the main components of the container crane on the overall response of the crane structure are simulated, and the results are analyzed and compared. It is verified that the bending stiffness of the gantry leg around the z-axis has the dominant influence on the container crane structure. The conclusion can be used as the guidance for the test scheme preparation.

Keywords : vibration and wave; container crane; earthquake load; seismic response; bending stiffness; impact analysis

上世纪末日本阪神大地震重创了神户港的绝大多数起重设备,引起相关部门对港口大型起重机地震研究的重视,一些业主对岸桥这类大型结构提出了抗震性能要求,有关岸桥地震方面的研究也相继开展起来。地震研究最核心的问题是明确地震激励下结构物的反应,在结构地震反应分析中,结构物的动态数据可以来自震害经验、模型试验、实物实测的分析和总结、有限元的仿真计算等^[1]。地震极为复杂,包含有大量未知因素,岸桥结构庞大,原型实验

存在诸多不可控情形,目前的条件只能进行仿真分析和缩尺模型试验。

开展大型结构物的缩尺模型地震试验,首先要对结构中的主要构件进行分析,清楚地震激励下各构件所受动载荷情况以及其对整体结构的影响。先期采用仿真软件进行地震模拟分析,可大幅降低试验中的黑箱现象^[2],提高试验效率同时降低成本。文献[3]将岸桥结构主要组成构件进行分类:弯曲梁单元、杆单元、质量单元,采用该分类形式建立相应的有限元模型并进行仿真计算,将结果与原模型计算值进行对比分析,结果表明这种分类方式适用于岸桥结构的动力学仿真计算,不仅能得到准确的结果且大幅降低了计算量。文献[4-5]在此基础上制作了相似比为1:15的岸桥试验模型,鉴于安装在岸桥结构上的部分设备如控制台、运行小车及吊具等在

收稿日期:2018-05-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275369)

作者简介:李哲(1986-),男,湖北省仙桃市人,讲师,从事动力学方面研究。

E-mail: 172042756@qq.com

结构振动时主要起惯性作用,将这些设备简化成相应的质量单元,安放在模型对应的位置,使得模型尽可能与原型保持一致,并在该模型上进行了大量的动力学试验并取得较好的结果。文献[6-7]在设计岸桥结构的相似模型时,为了保证模型与原型的相似关系,采用截面惯性半径相似的方法控制抗弯刚度设计梁截面尺寸,通过附加质量的办法保证了各构件的质量相似关系,最后成功制作一台相似比为1:50的岸桥试验模型。

为了提高岸桥地震实验效率,避免黑箱效应,在对岸桥各构件进行分类的基础上,文章首先通过实际地震灾害案例分析,明确岸桥结构地震激励下的主要破坏形式以及主要失效构件,再采用仿真计算对比各主要构件对岸桥整体结构地震响应的影响,以此确定仿真模型中哪些构件需要精细化建模或者可以简化处理,而试验模型中哪些构件需要绝对相似或等效相似,使建立的仿真模型与制作的试验模型具有更强的针对性。

1 岸桥地震灾害分析

结构地震研究中,震害现场分析结果的可靠性高于人们对结构地震反应的估计和仿真计算结果。地震灾害发生后,根据各类结构物所受不同程度的损坏以及各种破坏形式,可以得到丰富的地震灾害经验,有助于改进结构设计而提高其抗震性能。

1995年1月17日阪神发生7.2级地震,给神户港的装卸设备带来了一场破坏性极大的灾难,55台大型起重机中有52台遭到不同程度的损毁^[8]。灾后相关专业人员对神户港的岸桥及其他设备的受损情况进行了深入的调查。

调查报告中将岸桥的破坏程度和状况分为以下五类:

- (1) 支撑车轮脱离轨道,其他部位没有明显损伤;
- (2) 门腿部位出现扩展且有少量变形;
- (3) 门腿部位可见纵向弯曲,变形明显;

(4) 前大梁损坏;

(5) 整机坍塌。

神户港六甲岛、波特岛和摩耶码头的港口岸桥损坏数据统计见下表所示。

52台遭到损坏的岸桥中,上部结构(前大梁)损坏的岸桥一台;整机坍塌一台,坍塌的主要原因是门腿部位的扩展变形导致箱型梁断裂;其余的50台岸桥门腿底部均出现了明显的弯曲变形。

岸桥的全部重量由4个门腿的大车运行机构分担支撑,长悬臂、重心高以及轨道和车轮轮缘的位移约束致使地震下结构的响应以垂直于轨道方向的摇摆为主,这种摇摆最终导致门腿立柱部位发生弯曲变形,是地震破坏岸桥的主要原因,见图1所示。



图1 地震中岸桥门腿弯曲变形

2 岸桥结构主要组成构件

岸桥结构主要由门架、大梁、拉杆系统组成,以J248型岸桥为研究对象,其主要构件示意如图2所示。

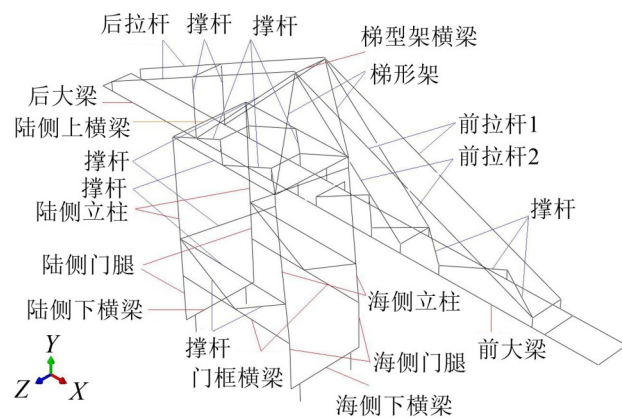
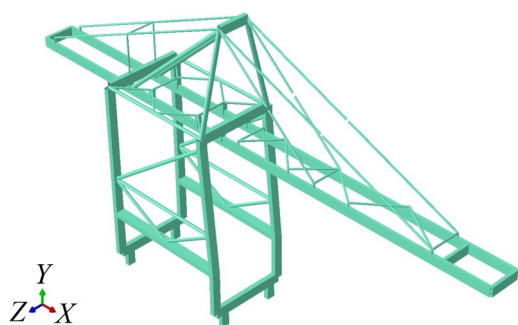


图2 岸桥结构的主要构件

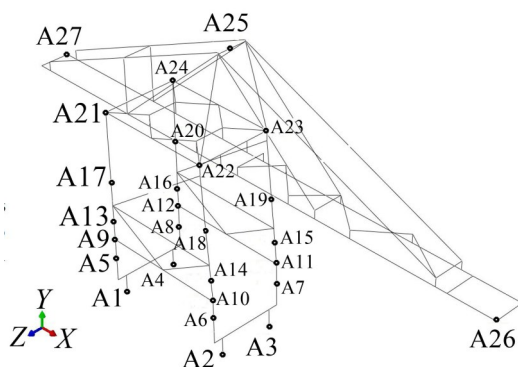
表1 岸桥损坏情况统计

损坏情况	轨道间距 30 m级		轨道间距 16 m~20 m级			合计
	六甲岛	波特岛	六甲岛	波特岛	摩耶码头	
一类	0	0	0	0	0	0
二类	4	0	1	11	6	22
三类	14	7	4	4	1	30
四类	0	0	0	0	1	1
五类	1	0	0	0	0	1
不明	-	-	1	-	-	1
合计	19	7	6	15	8	55

在Abaqus中建立岸桥结构模型,材料Q345钢,弹性模量 $E=2.06 \times 10^{11}$ N/m²,泊松比0.3,密度7 850 kg/m³。将其主要构件进行分类处理:门腿、立柱、门框上下横梁、前后大梁可用弯曲梁代替;各种撑杆、拉杆采用杆单元模拟;控制室、货运小车、吊具均可简化为集中质量。建成后的岸桥结构仿真模型如图3(a)所示,在结构上选取测试点,编号及对应位置见图3(b)。



(a) 结构仿真模型图



(b) 结构测点示意图

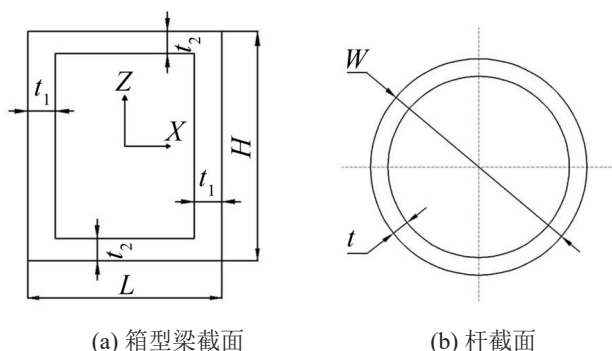
图3 岸桥结构模型

3 岸桥主要构件对整机地震响应的影响分析

岸桥结构中构件种类繁多,在不同载荷激励下受力形式也不尽相同。在结构振动研究中,构件主要性能体现在质量及刚度方面,质量不管在仿真模型中还是在试验模型中都是固定的,因此刚度成为考察的对象。以岸桥门腿为例,研究门腿刚度改变对结构地震响应的影响,通过调节截面尺寸来改变门腿的弯曲刚度,在工况、约束、激励一致的情况下对改变后的岸桥模型进行地震时程分析,提取计算结果与岸桥原型地震时程结果进行对比,分析门腿刚度对整机结构地震响应的影响。

岸桥构件主要为箱型梁和杆件,在地震下的响应以梁的弯曲振动为主,箱型梁弯曲刚度(EI)是通过截面惯性矩(I)来确定的,而岸桥结构中的另一个主要构件杆主要是受拉和受压,杆的抗拉(压)刚度

(EA)是通过截面面积(A)来确定的。岸桥主要构件截面示意图如4所示。



(a) 箱型梁截面

(b) 杆截面

图4 截面示意图

由截面惯性矩公式可得门腿绕Z轴的梁截面惯性矩

$$I_z = \frac{1}{12} [LH^3 - (L - 2t_1)(H - 2t_2)^3] \quad (1)$$

I_z 表示绕Z轴的梁截面惯性矩, L 、 H 、 t_1 、 t_2 分别表示岸桥梁单元截面长度、宽度、左右厚度及上下厚度。

改变岸桥结构主要构件的截面尺寸,通过式(1)计算其原始尺寸下的截面惯性矩以及修改尺寸后的截面惯性矩(弹性模量 E 取值一致,弯曲刚度、拉压刚度与截面惯性矩、截面积成线性关系),计算各构件截面积及质量,通过附加质量或者修改密度来保证构件原型质量与修改尺寸后的构件质量一致。

3.1 门腿弯曲刚度改变对地震响应的影响

门腿是岸桥地震激励下最易发生破坏的部位,其绕Z轴弯曲刚度直接影响整体结构的动力特性。在保证质量与原构件相同的情况下,通过改变截面尺寸调整其截面惯性矩 I_z ,进行地震仿真时程分析,取地震工程中常用的EL-Centro、Taft、Northridge、Kobe波作为输入动载荷,截取地震记录中有效持续时间段均为20 s,采样间隔 $\Delta t=0.02$ s,观察岸桥结构在不同弯曲刚度(门腿绕Z轴弯曲)下地震响应。

1) 门腿截面第一组改动

表2中所示为岸桥门腿的截面尺寸,海陆侧门腿均为箱型梁。在原截面尺寸的基础上,按照表中改动1对其进行修改,使得修改前后截面积均为78 360 mm²,且海陆侧门腿绕Z轴的截面惯性矩 I_z 都为 2.50×10^{10} mm⁴。加速度放大系数包络线能清楚反映结构不同位置对输入地震加速度的放大或缩小效应,故从下至上依次选取6个测点绘制加速度放大系数包络线作为岸桥结构地震响应指标。绘制不同地震波下原型与修改1后模型上相关测点加速度放大系数包络线进行对比,见图5所示。(注:用0表示原型测点加速度包络线,用1表示修改后模型测点

表 2 门腿截面尺寸

构件	H/mm	L/mm	t_1/mm	t_2/mm	截面积/ mm^2	截面惯性矩 I_x/mm^4	截面惯性矩 I_z/mm^4
原门腿截面尺寸	1 290	2 210	12	10	78 360	5.22×10^{10}	2.50×10^{10}
改动后的尺寸 1	1 212	5 330	6	6	78 360	2.53×10^{11}	2.50×10^{10}
改动后的尺寸 2	5 330	1 212	6	6	78 360	2.50×10^{10}	2.53×10^{11}

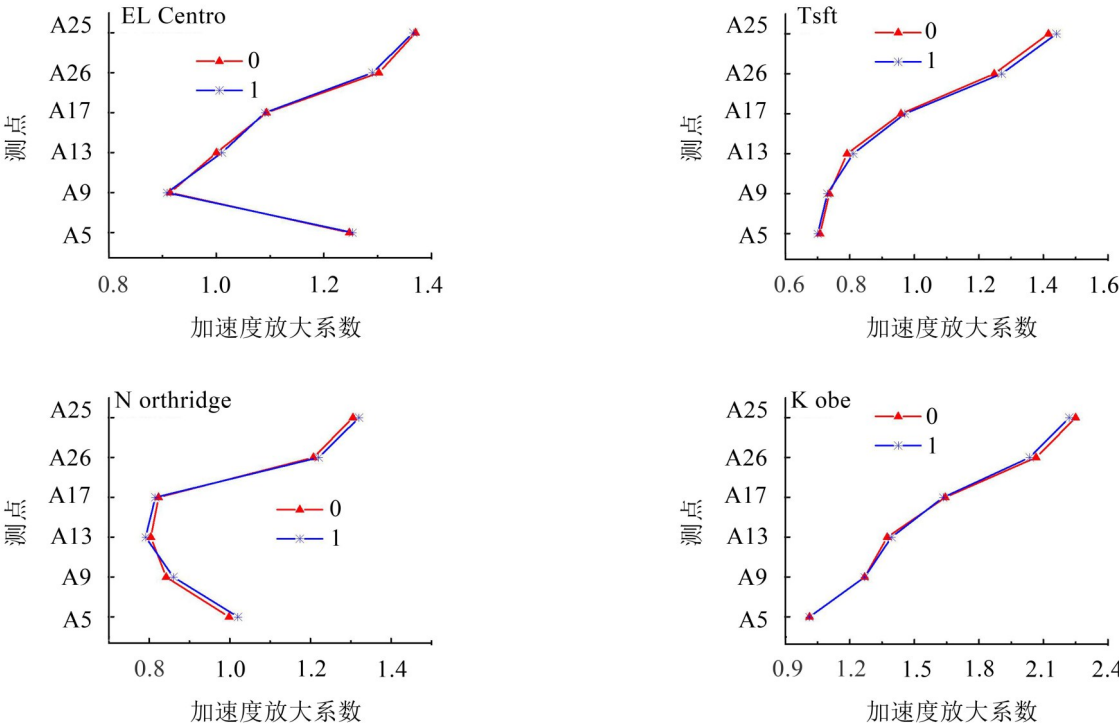


图 5 门腿改动 1 下各测量点加速度放大系数包络线对比图

加速度包络线。)

由图 5 可见原型与修改后模型对应测点加速度放大系数包络线基本重合,说明在保证海陆侧门腿立柱质量一致的前提下,保持门腿截面惯性矩 I_z 相同即可使修改后的模型与原型具有一致的地震响应。

2) 门腿截面第二组改动

按照表 2 中改动 2 对门腿截面尺寸进行调整,修改后截面积变为 $78\,360\text{ mm}^2$,绕 Z 轴的截面惯性矩 I_z 为 2.53×10^{11} ,与之前的 2.50×10^{10} 有较大的差距,故其绕 Z 轴的弯曲刚度较原型有相当大的差距。

提取结构上各测点的加速度时程值计算加速度放大系数并绘制成包络线,与原型测点的加速度放大系数包络线进行对比,见图 6。

图 6 中可见两条包络线存在明显差异,这说明在门腿绕 Z 轴的弯曲刚度改变后,即便质量保持一致,岸桥整体结构的动力特性随之产生较大的变化。

3.2 岸桥各构件改变对地震响应影响综合分析

按上述方法,对结构中主要构件逐一进行改动并进行仿真时程分析,再与原型仿真结果进行对比综合分析。为方便起见,对岸桥各构件进行编号,见

表 3。

表 3 岸桥构件编号

构件编号	构件名称	构件编号	构件名称
1	海陆侧门腿	6	水平撑杆
2	门框横梁	7	前后拉杆
3	前后大梁	8	网状撑杆
4	梯形架横梁	9	梯形架撑杆
5	上、下横梁	10	斜撑杆

针对箱型梁和杆制定了不同的截面修改形式见表 4。

改一针对门腿、门框横梁、前后大梁等箱型梁构件进行截面尺寸改动,并保证其截面积一致、与主要弯曲方向所对应的截面惯性矩一致,即改变前后的质量、弯曲刚度一致。在改一情况下对岸桥模型的时程分析进行对比,能了解该构件非主要弯曲方向所对应的刚度是否对整机地震响应产生影响;改二与改一对象相同都为箱型梁,保证截面积一致,而与主要弯曲方向所对应的截面惯性矩不一致,非主要弯曲方向所对应的截面惯性矩不作要求,即改变前后的质量、弯曲刚度不一致,通过改二对比分析能了解该构件弯曲刚度是否对整机地震响应产生影响;

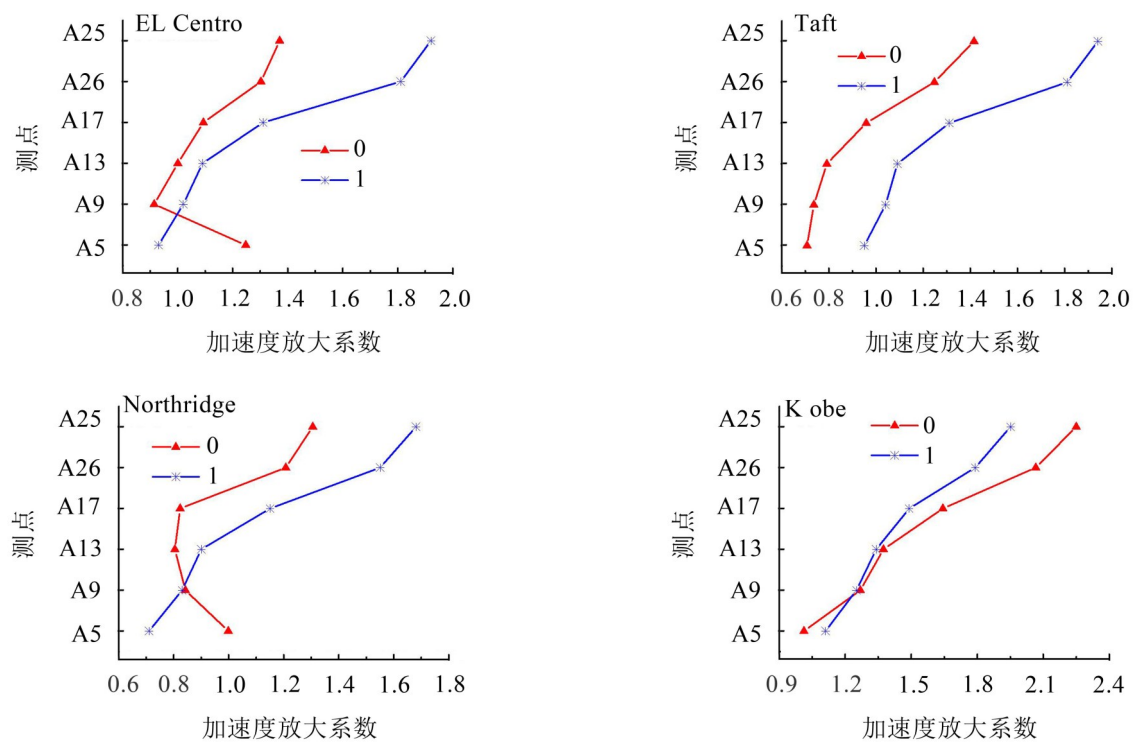


图6 门腿改动2下各测量点加速度放大系数包络线对比图

表4 截面改动形式

改动代号	改动形式	针对构件
改一	保持截面积一致,主要弯曲方向所对应的截面惯性矩一致且其他方向截面惯性矩不一致	箱型梁
改二	保持截面积一致,主要弯曲方向所对应的截面惯性矩不一致	箱型梁
改三	保持杆的截面积一致,杆的拉压保持刚度不变	圆杆
改四	使杆的截面积不一致,杆的拉压保持刚度产生变化,采用附加质量的方法保证杆在修改前后质量一致	圆杆

改三、改四针对杆构件进行改动,其区别在于改三截面积一致而改四截面积不一致,质量都没有变化,拉压刚度 EA 产生了变化,通过分析对比可知各杆刚度对整机地震响应产生的影响。

表5所示为不同构件在不同改动下对整机动态

性能的影响,其中以:轻微、较小、较大来作为影响的指标。为了增加结果的可靠性在表最后加入1—10全部构件的整体改动。

现绘制表5中1—10整体改动后测点加速度放大系数包络线对比图,见图7。

表5 构件改动对整机动态性能影响汇总

改动构件代号	改动内容	对整机动态性能影响	改动构件代号	改动内容	对整机动态性能影响
1	改一	较小	6	改四	轻微
1	改二	较大	7	改三	轻微
2	改一	轻微	7	改四	轻微
2	改二	轻微	8	改三	轻微
3	改一	轻微	8	改四	轻微
3	改二	轻微	9	改三	轻微
4	改一	轻微	9	改四	轻微
4	改二	轻微	10	改三	轻微
5	改一	轻微	10	改四	轻微
5	改二	轻微	1~10	1不改或改一、2~5改二6~10改三或改四	较小
6	改三	轻微	1~10	1改二、2~5改二6~10改三或改四	较大

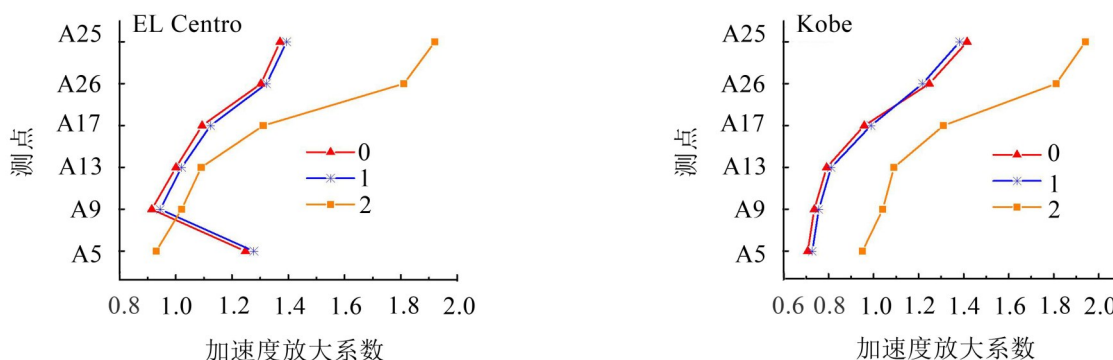


图7 加速度放大系数包络图对比

0代表原型,1代表构件1即门腿不改动、构件2—5改二、构件6—10改三,2代表构件1按改二方式进行修改、构件2—5改二、构件6—10改三。

观察图7,0和1所代表的模型在地震激励下,各测点加速度放大系数包络线非常接近,而与2所代表的模型有着很大的差异。说明岸桥结构在地震载荷下,对整体结构地震响应影响比重最大的是门腿绕Z轴的弯曲刚度。

4 结语

文章首先对岸桥地震灾害调查报告进行分析,通过对地震中损坏岸桥的破坏形式以及相对应数量的统计,用直观的数据展示地震激励下岸桥结构主要破坏形式为门腿的屈曲变形。采用仿真对比分析法研究岸桥各构件对整机地震响应的影响,确定门腿弯曲刚度对整机地震响应影响最大。岸桥模型制作中对所有构件逐一进行相似比设计异常复杂,且多数构件的加工尺寸难以得到保障以至无法满足相似比要求,论文的研究结论可以为岸桥地震模型的简化提供参考依据,在提高实验效率的同时还能保证试验结果的准确性,具体如下:

(1) 岸桥结构地震下的破坏形式主要为门腿的弯曲变形;

(2) 岸桥门腿弯曲刚度(沿大梁方向)对整机地震响应影响最大,其他构件在保证质量不变的前提下改变其弯曲刚度对整机影响较小;

(3) 门腿部位的弯曲刚度可以代替整机的弯曲,试验模型设计时可以对门腿进行精细化建模,其他构件则可以简化处理。

参考文献:

- [1] 李哲,王贡献,胡吉全,等.大型岸桥地震反应分析中阻尼模型的讨论[J].**噪声与振动控制**,2015,35(2):15-18.
- [2] KOSBAB B D, JACOBS L D, R DESROCHES, et al. Analysis and testing of container cranes under earthquake loads[C]// TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment. United States: American Society of Civil Engineers, 2009: 842-852.
- [3] JIN YL, LI Z G. Theoretical design and experimental verification of a 1/50 scale model of a quayside container crane [J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, 2012, 226(6): 1644-1662.
- [4] 李哲,王贡献,胡吉全,等.基于惯性半径相似岸桥模型的地震试验[J].**振动、测试与诊断**,2016,36(5):972-978.
- [5] 李哲,胡吉全,王东.地震载荷作用下岸桥结构单参数畸变相似模型研究[J].**振动与冲击**,2014,33(20):164-169.
- [6] 金玉龙,吴天行.集装箱码头岸桥结构的动力相似分析与试验验证[J].**上海交通大学学报**,2012,46(10):1609-1615.
- [7] JIN Y L, WU T X, LI Z G. Shaking table tests and numerical analysis for vertical seismic response of quayside container crane[J]. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, 2012, 12(5): 1250034(1)-1250034(21).
- [8] Shimizu Construction Co., Ltd., Institute of Technology. 1995 Earthquake Research Report on the South of Hyogo in Japan: 1995.
- [9] 李哲.大型集装箱起重机地震实验关键技术及方法研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.