

陈礼飞,朱明轩,张敏敏.考虑土-结构相互作用时地铁高架车站结构横向地震反应分析[J].地震工程学报,2019,41(5):1332-1338.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1332

CHEN Lifei, ZHU Mingxuan, ZHANG Minmin. Transverse Seismic Responses of an Elevated Metro Station Considering Soil-Structure Interaction[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1332-1338. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1332

考虑土-结构相互作用时地铁高架车站 结构横向地震反应分析

陈礼飞^{1,2}, 朱明轩², 张敏敏²

(1. 扬州工业职业技术学院 建筑工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要: 基于 ABAQUS 软件平台, 建立了土-桩-高架车站结构非线性动力相互作用的整体有限元分析模型, 考虑输入地震动的频谱特性, 系统分析了地铁某上部高架车站结构的横向地震反应规律, 给出了不同地震条件下车站结构地震横向变形、结构加速度反应和柱底动内力反应程度及其规律。结果表明: 由于高架车站结构顶层质量集中较为严重, 使得上层结构的动力反应明显大于下层结构, 尤其是上层柱底的最大剪力和弯矩都大于下层柱底的对应值。同时, 具有明显近场地震动脉冲特征的地震波更易增强结构的地震反应。分析结果能为类似轨道交通高架车站结构的地震反应分析和抗震设计提供有效的参考和指导。

关键词: 轨道交通; 高架车站结构; 地震反应; 土-结构相互作用; 有限元分析

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1332-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1332

Transverse Seismic Responses of an Elevated Metro Station Considering Soil-Structure Interaction

CHEN Lifei^{1,2}, ZHU Mingxuan², ZHANG Minmin²

(1. Institute of Architectural Engineering, Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225127, Jiangsu, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 210009, Jiangsu, China)

Abstract: In this work, an overall finite element model, considering the nonlinear dynamic interaction of soil-pile-evaluated station structure systems, was established with the software ABAQUS. The transverse seismic performance of an elevated metro station was systematically analyzed, considering the spectral characteristics of input ground motions. Horizontal deformation and the acceleration response of the structure, and the dynamic internal force response at the column bottom were obtained and analyzed. The results showed that the dynamic response of the superstructure of the elevated station was stronger than that of the understructure, especially the maximum shear force and bending moment at the column bottom. Meanwhile, earthquake waves with obvious near-field pulse-like characteristics should more easily enhance the seismic response

收稿日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778282)

第一作者简介: 陈礼飞(1977-), 男, 讲师, 主要从事结构地震工程的研究。E-mail: 41140376@qq.com。

of the elevated structure.

Keywords: rail transit; elevated station structure; seismic response; soil-structure interaction; finite element analysis

0 引言

随着城市现代化的发展,城市交通网络的地震安全在整个城市生命线抗震防灾系统中越来越重要,尤其是作为城市交通网络重要枢纽或快速通道的城市交通高架结构,其抗震减震更是城市交通生命线工程防震减灾的重中之重。例如,1995年1月17日在日本阪神7.2级大地震中,神戸市有635 m的高速高架桥梁倒塌,包括大阪神戸高速道路、名神高速道路、第二神明线、湾岸线等,在同一地区的铁路线被破坏的有山阳新干线、东海道本线(JR 神戸线)、阪神地铁神戸线和阪神地铁本线,其中山阳新干线部分区段高架桥梁发生了严重的多跨连续落梁和侧向倒塌破坏^[1];2004年10月23日发生在日本新潟地区的6.8级地震再次造成上越新干线列车脱轨等破坏,这些因地震造成的破坏现象也打破了日本新干线安全可靠的神话。

目前有不少学者对城市轨道交通高架结构的抗震性能进行了初步研究,如赵亮等^[2]、吴勇等^[3]和肖敬华等^[4]分别对不同结构形成的高架车站建立了对应的有限元分析模型,分析比较了不同工况下结构的动力反应,给出了不同高架车站结构的地震反应规律;Carbonari 等^[5]考虑桩-土与桩-桩之间的动力相互作用,证明了SSI效应对铁路连续梁桥的地震反应影响规律及其重要性,在相关的抗震设计应予以考虑;陈令坤^[6]建立了地震作用下高速铁路列车-无砟轨道-桥梁的动力分析方法,探讨了地震作用下高速铁路列车-无砟轨道-桥梁动力系统的动力设计参数;YANG 等^[7]和刘哲^[8]针对不同的地震参数、制动力率、列车速度和行车工况以及轨道不平顺等级对城市轨道交通桥梁结构在地震和列车作用下的动力响应进行了分析;另外,Kawatani 等^[9]也开展了列车荷载对轨道交通桥梁结构非线性地震反应的影响研究,给出了列车荷载和场地条件等对结构地震反应的影响规律。

然而对地铁高架车站结构抗震性能的研究明显不足,对城市轨道交通高架桥梁结构的抗震设计通常是参考铁路抗震规范或公路抗震规范的相关条文作为参考,对城市轨道交通高架车站结构的抗震设计主要借鉴建筑结构抗震设计规范作为参考。因此,相关的抗震设计方法无法有效的反应轨道交通高架结构的地震反应特性,且具有很大的随意性。造成了轨

道交通高架结构抗震设计方法的不一致和地震破坏性态的不可预见性。

本文以南京轨道交通十二号线上某高架车站结构为研究对象,考虑土与结构非线性动力相互作用,对该高架车站框架结构的抗震性能进行了数值模拟分析,研究成果有助于对常见地铁高架车站结构地震反应规律的认识及其该类结构的抗震设计。

1 计算模型

1.1 工程概况

选取十二号线的桥林新城站作为研究对象进行相关分析。桥林新城站位于南京市浦口区桥林镇西联村(陈山组),全长120.0 m,型式采用高架三层侧式。根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001),确定桥林新城站所在场地抗震设防烈度为Ⅷ度,设计基本地震加速度为0.1g。根据《铁路工程抗震设计规范》(GB50111-2006 2009年版)对桥林新城站场地类别判为Ⅱ类场地。

桥林新城车站结构形式为桥梁结构,中间岛式车站(上、下行行车路线之间的站台)。该车站结构站台能够有效利用站台面积、方便乘客换乘、管理方便,因此适用于客流量较大的车站。桥梁上部结构尺寸见图1,下部结构中承台尺寸长宽都为8.6 m,厚为2 m,承台下6根桩的桩长均为42 m。

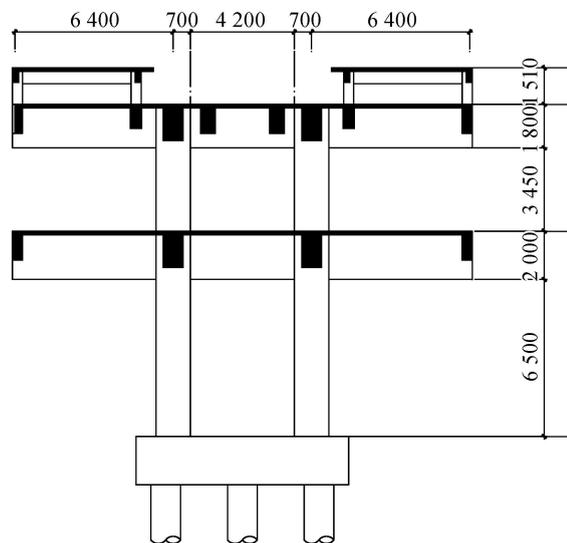


图1 车站结构横断面主要尺寸(单位:mm)

Fig.1 Main dimension of the cross section of station structure (Unit: mm)

1.2 有限元计算模型

根据《南京地铁十二号线工程 D12-XK02 标岩土工程勘察报告》中提供的桥林新城车站所在的工程场地类别及相关参数,对高架车站所在的工程场地进行相应简化,具体的土体参数列于表 1。土体的非线性动力学本构模型采用庄海洋等^[10-11]建立的

表 1 土层参数

Table 1 Parameters for the soils

层号	土层	厚度 /m	参考剪应变	剪切波速 /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角 /($^{\circ}$)	动泊松比	静弹模 /MPa
1	素粘土	2	0.000 4	113.5	2 000	12.6	0.266 9	3.4
2	粉质粘土	6	0.000 4	228.8	1 910	14	0.419 8	2.9
3	粉质粘土	8	0.000 4	247.6	1 980	15	0.430 9	3.5
4	粉质粘土	14	0.000 4	258.9	1 960	17	0.409 6	3.2
5	中风化岩	20	0.000 4	475.1	2 280	23	0.323	9

高架车站结构所用的混凝土强度为 C30,混凝土动力本构模型采用 Jeeho Lee 等^[12]提出的粘塑性动力损伤模型。基于混凝土的断裂能原理,在 Lubliner 等^[13]提出的模型基础上进行改进,分别采用两个损伤变量来描述混凝土受拉和受压破坏时的刚度衰减规律,并用多个硬化变量来修正模型中的屈服函数,建立混凝土在循环荷载作用下的动力塑性损伤本构模型。C30 混凝土对应的动力损伤模型参数可详见文献^[14]。根据工程实际情况,车站结构和地连墙均采用 Q235 钢筋,其弹性模量为 200 GPa,不考虑钢筋的非线性及钢筋与混凝土之间的动力滑移与分离现象。

软土记忆型黏塑性嵌套面动力本构模型,该模型基于土体的广义塑性理论,采用等向硬化和随动硬化相结合的硬化模量场理论,建立了一个总应力增量形式的土体黏塑性动力本构模型。该模型已在一些重大课题研究和工程建设中得到了应用和验证。模型的土体参数确定方法参见文献^[10-11]。

基于 ABAQUS 软件平台,考虑土-结构的非线性动力相互作用,建立了桥林新城站的梁单元模型和实体单元模型。通过梁单元模型求解出结构在地震动反应下的位移、弯矩、剪力;通过实体单元模型求解出结构在地震动下的位移、应力等。高架车站结构有限元模型详见图 2。土体部分和承台部分采用四节点平面应变单元,下部桩体采用梁单元模拟,有限元模型见图 3。为了消除上部结构、承台和下部桩体的三维实体转化为二维有限元模型带来的问题,本文根据车站结构纵向柱距,采用刚度等效的原则对上部结构、承台和桩体的弹性模型进行必要的折减。

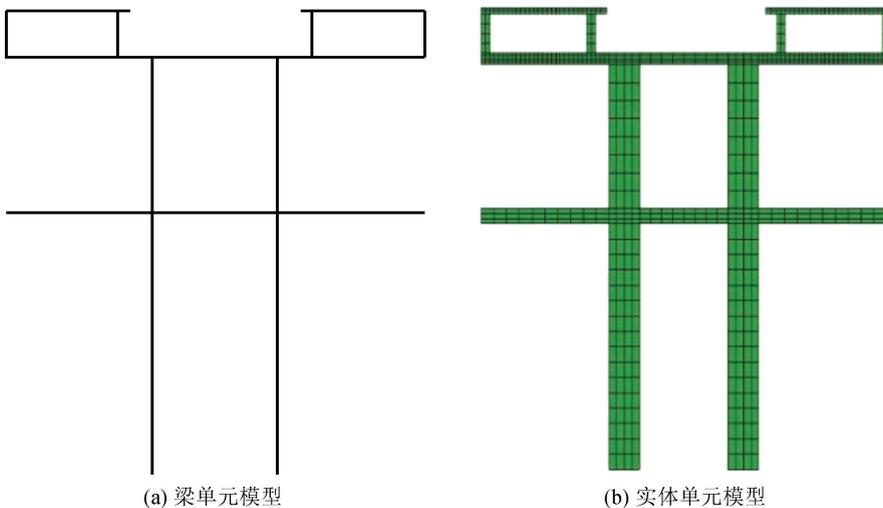


图 2 高架车站结构的有限元模型

Fig.2 Finite element model of the elevated structure for a subway station

1.3 基岩面输入地震动

地震动的输入采用目前较为常用的土体底部基岩输入加速度时程的方法。地震动记录主要选取了

两条实测地震加速度和一条人工合成地震加速度。分别为远场波:El-Centro 波;近场波,Kobe 波和人工合成波:南京人工波。三种地震波的加速度时程

曲线如图 4 所示。本文根据南京地区的地震设防烈度为Ⅷ度的要求,分别在原加速记录的基础上对其

峰值进行调整,调整后的小震、中震和大震对应的加速度峰值分别为 0.05g、0.10g 和 0.15g。

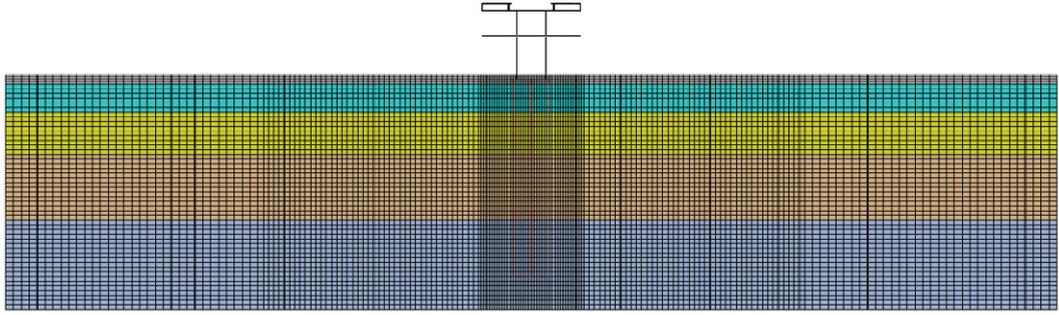


图 3 土-桩-高架车站结构相互作用有限元模型

Fig.3 Finite element model of soil-pile-elevated station structure interaction

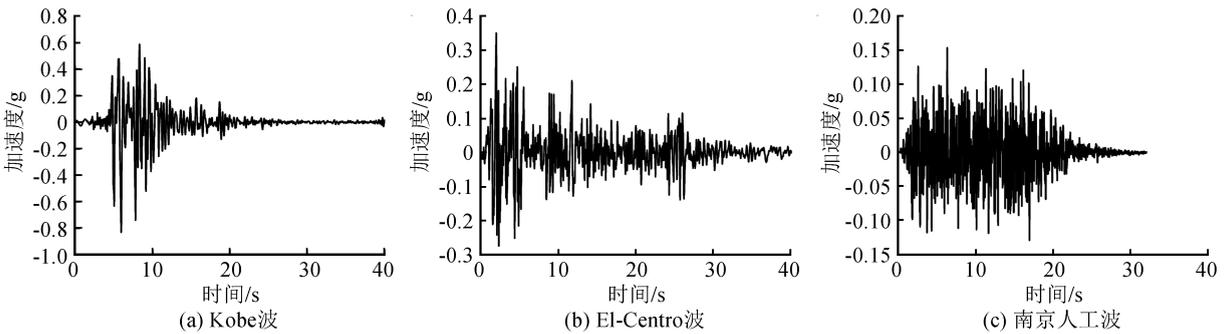


图 4 输入地震波对应的原始加速度时程

Fig.4 Original time-histories of the acceleration used as the input motion in this test

2 结果分析

2.1 高架车站结构横向振动模式分析

考虑到对结构抗震作用产生至关重要影响的一般为结构前几阶固有振动模式,因此,本文仅选取前十阶固有频率并提取了第一阶振型。该高架车站结构的固有频率提取结果列于表 2,相应的振型见图 5。

表 2 桥林车站自振频率及振型特性分析

Table 2 Natural vibration frequencies of the Qiaolin subway station

振阶	频率/Hz	周期/s	振阶	频率/Hz	周期/s
1	1.229 4	0.813 4	6	2.226 7	0.449 1
2	1.387 1	0.720 9	7	2.592 2	0.385 8
3	1.649 5	0.606 2	8	2.624 7	0.381 0
4	1.759 6	0.568 3	9	2.670 8	0.374 4
5	1.959 0	0.510 5	10	2.789 1	0.358 5

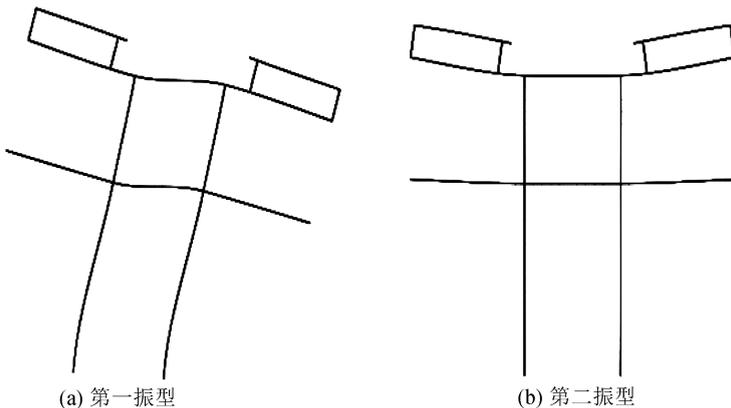


图 5 高架车站结构的前两阶振型图

Fig.5 The first two vibration modes of the elevated station structure

通过对桥林新城车站高架结构系统进行的模态分析表明:结构的第一阶振型主要为横向变形,在实际工程设计中应充分考虑结构的水平向变形对结构产生的影响。结构的第二阶振型主要为墩柱顶部支承轨道梁的横梁的竖向变形。对以上高架车站结构进行独立的模态分析后,发现高架车站结构的第一阶频率要比高架车站-桩土整体结构系统的第一阶频率要大,说明桩-土降低了整个结构的自振频率,对整个系统的动力学特性起到一定的有利作用。从频率的增长趋势上来看,从低阶固有频率向高阶固有频率的变化过程中,该结构的频率增长幅度相对缓慢,未产生明显的错动,说明该结构动力性能较好。

2.2 加速度反应规律

轨道交通高架车站结构在基岩输入地震动的作

用下,传到下层柱柱底的加速度和上层柱柱顶的加速度峰值大小和频谱特性会发生明显的变化。因此,本文选取高架车站结构下层柱柱底和上层柱柱顶加速度为分析对象。图 6 给出了该高架车站结构下层柱底和上层柱顶相对于基岩的加速度反应放大系数。由图可知:随着基岩输入的峰值加速度增加,高架结构体系中下层墩柱底部和顶部的加速度放大效应随之减弱。但是,加速度传递到上层墩柱顶部时,加速度时程的峰值显著增大,即墩柱对加速度产生了非常明显的放大作用。上层柱顶的加速度峰值约为下层柱底的 2 倍。上述结果与一般房建框架结构相比,层间的加速度反应放大效应明显强于一般的框架结构,主要应为轨道交通高架车站结构的顶层质量较为集中的原因造成的。

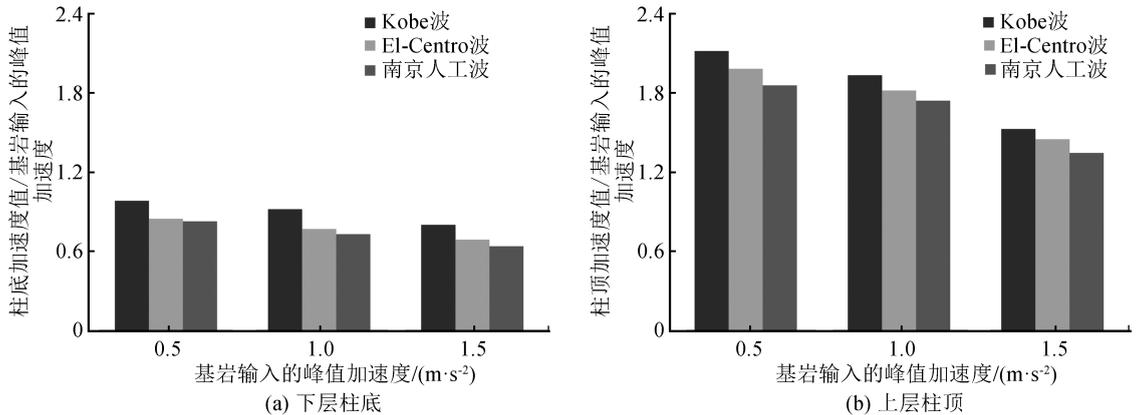


图 6 基岩输入的加速度峰值对柱底加速度和柱顶加速度放大效应

Fig.6 Acceleration amplification at the bottom and top of column under bedrock input

2.3 动力位移反应规律

本文选取高架车站结构上下层的层间位移角进行位移进行反应分析。图 7 给出了车站结构层间位移角的峰值。由图 7 可知,在 Kobe 波、El-Centro 波、南京人工波三种地震波作用下,随着基岩输入的加速度峰值增加,高架车站结构中的上下层层间位移角也随之增加;当基岩输入的加速度峰值相同时,高架车站结构体系中上层的层间位移角峰值明显大于下层的位移角峰值,产生这种现象的原因是结构上层的顶板集中的质量较大造成的;在相同加速度峰值的地震波作用下,Kobe 波引起的高架结构层间位移角峰值最大,El-Centro 波次之,南京人工波最小,可能是由于三种波经过土体的传播后,即基岩输入地震动的频谱特性明显影响上部结构的动力侧向变形反应。

2.4 动内力反应规律

弯矩的反应分析选取高架车站下层墩柱柱底处作为研究对象,从而得出桥梁结构高架车站下层柱

柱底弯矩。图 8 为在三种不同地震波作用下的动弯矩反应规律。由图 8 可知:随着基岩输入的峰值加速度的增加,高架车站结构中柱底的弯矩值也随之增加;在相同加速度峰值的作用下,Kobe 波作用下的柱底弯矩值最大,El-Centro 波次之,南京人工波最小,尤其是具有明显近场地震波特征的 Kobe 波作用下,下层柱底的弯矩明显大于基岩输入另外两种波的弯矩,说明具有近断层脉冲特性的地震波对该高架车站结构的地震安全影响较大。总体来看,上层柱底的最大弯矩明显大于下层柱底的最大弯矩。另外,下层柱底弯矩随输入加速度峰值的变大而增加的速度明显大于上层柱底处的弯矩反应,输入地震波的特性对上层柱底的最大反应的影响明显小于对下层柱底最大弯矩的影响。

剪力反应分析选取高架车站下层墩柱柱底处作为研究对象。总结桥梁结构高架车站下层柱柱底剪力在三种地震波作用下的剪力反应规律。由图 9 可

知:高架车站结构的关键部位最大剪力反应与最大弯矩的反应规律极为相似,即在相同加速度峰值的作用下,Kobe 波作用的柱底剪力值最大,El-Centro

波次之,南京人工波最小。同时,上层柱底的最大剪力总体上要大于下层柱底最大剪力。输入加速度峰值对下层柱底的最大剪力的影响更为明显。

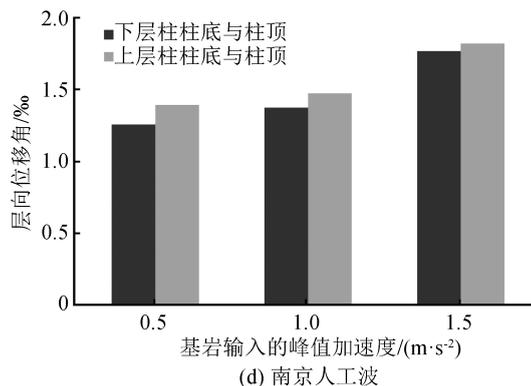
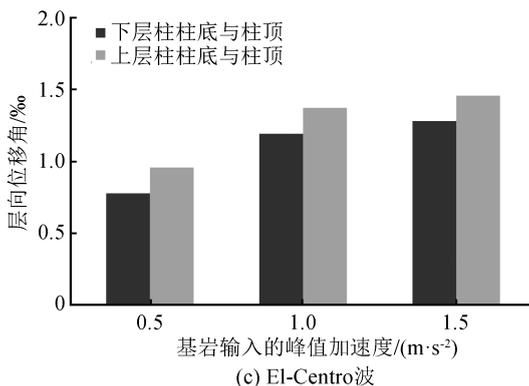
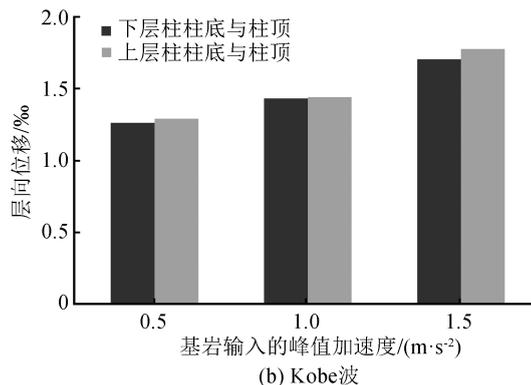
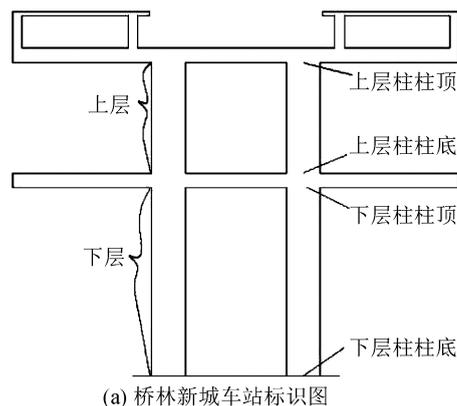


图 7 基岩输入不同加速度峰值下的结构层间位移角

Fig.7 The inter-story drift ratio under bedrock input earthquake waves with different PGAs

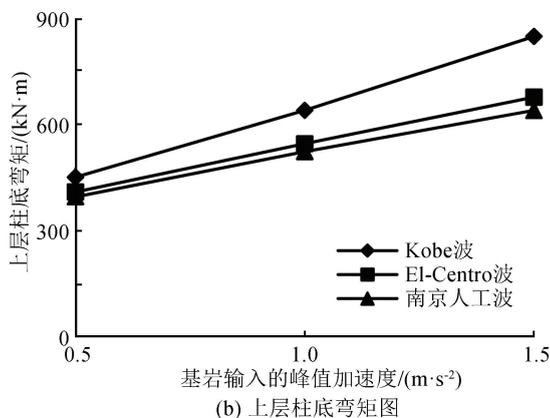
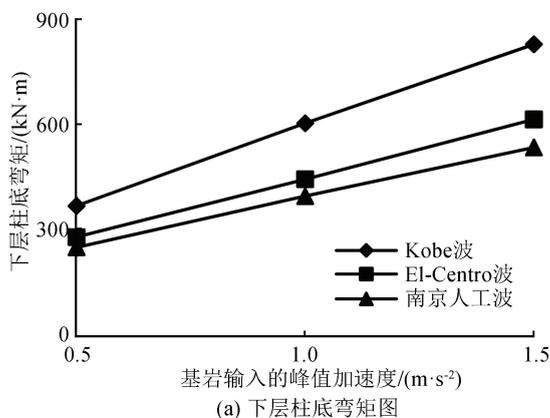


图 8 基岩输入不同加速度峰值下的柱底弯矩图

Fig.8 The bending moment at the bottom of column under bedrock input earthquake waves with different PGAs

3 主要结论

通过对南京地铁十二号线某高架车站结构的横向地震反应的数值模拟,分析了基岩输入不同地震动和不同强度时结构的加速度、动力变形和动内力反应规律,得出以下主要结论:

- (1) 由于站台层放于结构的顶层,造成该高架车站结构顶层对结构底部输入的加速度反应起到明显的放大效应,导致结构顶层的加速度反应尤为强烈;
- (2) 不同地震波的频谱特性对结构的地震反应程度有明显的影晌,根据计算可初步发现,具有明显

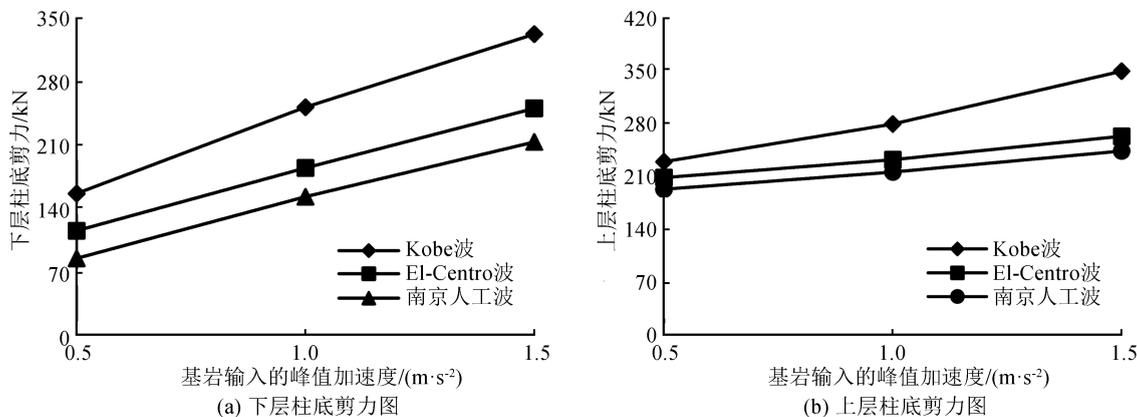


图9 基岩输入不同加速度峰值下的柱底剪力

Fig.9 The shear force at the bottom of column under bedrock input earthquake waves with different PGAs

近场地地震波脉冲特性的 Kobe 波更易增强该高架车站结构的地震反应;

(3) 该高架车站结构的上层柱底的最大动内力反应明显大于下层柱底的动内力反应,这与对一般框架结构底层柱底的动内力反应应最大的认识有所不同,主要原因应为该高架车站结构顶层的水平悬臂部分的站台改变了上层结构的动力反应程度。

参考文献(References)

- [1] ANDERSON D L, MITCHELL D, TINAWI R G. Performance of Concrete Bridges during the Hyogo-KenNanbu (Kobe) Earthquake on January 17, 1995[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1996, 23(3): 714-726.
- [2] 赵亮. 独柱式大悬臂高架车站的动力特性及地震反应分析[J]. 现代城市轨道交通, 2005, 2(2): 26-29.
ZHAO Liang. Analysis on Dynamic Characteristics and Seismic Reaction of Single-Column and Large Cantilever Elevated Station[J]. Modern Urban Transit, 2005, 2(2): 26-29.
- [3] 吴勇, 马坤全, 吴定俊, 等. 采用减隔震装置后轨道交通高架桥的抗震性能分析[J]. 城市轨道交通研究, 2005, 8(1): 61-63.
WU Yong, MA Kunquan, WU Dingjun, et al. Anti-seismic Capability of Railway Viaduct Bridges with Seismic Isolator[J]. Urban Mass Transit, 2005, 8(1): 61-63.
- [4] 肖敬华, 李鹏, 舒胜武, 等. 地铁站与高架桥整体分析[J]. 铁道建筑技术, 2011, (10): 84-89.
XIAO Jinghua, LI Peng, SHU Shengwu, et al. The Overall Analysis of the Subway Station and the Overpass[J]. Railway Construction Technology, 2011, (10): 84-89.
- [5] CARONAR S, DEZ F, LEON G. Seismic Soil-structure Interaction in Multi-span Bridges: Application to a Railway Bridge [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamic, 2011, 40 (11): 1219-1239.
- [6] 陈令坤. 地震作用下高速铁路列车-无砟轨道-桥梁系统动力响应及走行安全研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
CHEN Lingkun. Seismic Responses of High-Speed Railway Train-Ballastless Track-Bridge System and Train-Running

Safety during Earthquake[D]. Changsha: Central South University, 2012.

- [7] YANG Y B, WU Y S. Dynamic Stability of Trains Moving over Bridges Shaken by Earthquakes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 258(1): 65-94.
- [8] 刘哲. 地震和列车作用下轨道交通桥梁的响应分析[M]. 大连: 大连理工大学, 2013.
LIU Zhe. Response Analysis of Urban Rail Transit Bridge Structure Under The Earthquakes and Train Loads [M]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [9] KAVATANI M, MATSUMOTO S, HE X, et al. Nonlinear Seismic Response Analysis of High-speed Railway Viaducts Considering Train Load[C]//Proceedings of the Thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13). Sapporo, Japan, 2013.
- [10] 庄海洋, 陈国兴, 朱定华, 等. 土体动力黏塑性记忆型嵌套面本构模型及其验证[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1267-1272.
ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing, ZHU Dinghua, et al. Dynamic Visco-plastic Memorial Nested Yield Surface Model of Soil and Its Verification[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1267-1272.
- [11] 庄海洋, 陈国兴. 对土体动力黏塑性记忆型嵌套面模型的改进[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 118-122.
ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing. Improvement of Dynamic Visco-plastic Memorial Nested Yield Surface Model of Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 118-122.
- [12] LEE J, FENVES G L. Plastic-damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, (4): 892-900.
- [13] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A Plastic-damage Model for Concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [14] ZHUANG Haiyang, HU Zhonghua, CHEN Guoxing. Numerical Modeling on the Seismic Responses of a Large Underground Structure in Soft Ground[J]. Journal of Vibroengineering, 2015, 17(2): 802-815.