

# 考虑地震动空间非一致性的地铁车站结构三维数值模拟

谷 音, 庄舒曼, 卓卫东, 孙 颖

(福州大学土木工程学院, 福建 福州 350116)

**摘要:** 介绍了实现非一致地震动作用采用的等效人工边界单元和等效荷载法, 采用自由场模型验证输入的正确性. 以某在建地铁车站为背景, 建立了三维地铁车站模型, 计算了不同频谱地震波在一致与非一致波动入射工况下地铁车站的地震动反应, 分析了该地铁车站在非一致地震动作用下的反应特性. 总结了非一致地震动作用对车站结构反应的影响, 分析了不利位置地震动内力反应, 得出长跨度地铁车站有必要考虑地震动非一致因素影响作用的结论并提出抗震建议.

**关键词:** 地震动非一致性; 地铁地下结构; 人工边界单元; 波动输入法; 斜入射

**中图分类号:** TU 91

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2015)06-0819-06

## Research on numerical simulation of subway structure under spatially non-uniform seismic ground motion

GU Yin, ZHUANG Shuman, ZHUO Weidong, SUN Yin

(College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** An artificial boundary element and equivalent loading method are introduced for considering the non-uniform seismic ground motion. Free field finite element is built to verify the correctness of the input. Taking a subway station under construction in the background, the 3D finite element model of the subway station was established, the different seismic wave spectrum under the working condition of uniform and non-uniform wave incident seismic ground motion response of a subway station was calculated, and the subway station under the effect of non-uniform seismic response characteristics was analyzed. The responses of subway station under spatially non-uniform ground motion are summarized and internal forces of weak positions studied. It concludes that the non-uniform factor needs to be considered for the long span subway stations. An advice of anti-seismic is come up with.

**Key words:** spatially non-uniform ground motion, subway underground structure, artificial boundary elements, wave input method, oblique incidence

由于地震传播到达地表的时间及地质情况的不同, 到达地表的震动存在差异, 即地震动空间需要考虑其非一致性. 目前考虑地震动空间变异性的只有欧洲规范<sup>[1]</sup>. 在强震动观测记录的统计中, 基岩场地的地震波入射角平均在 60 度左右<sup>[2]</sup>, 应考虑以斜入射为主的地震输入的非一致性. 地震动空间变异性对于大跨桥梁、水坝、生命线工程—地下管线的影响已经得到一定程度的研究. 北京工业大学陈维等<sup>[3]</sup>以实际建设的南京地铁某车站结构为研究对象, 建立了 ANSYS 有限元二维模型, 并进行了地震波斜入射条件下地下结构时域地震反应的计算和分析; 同济大学王琴<sup>[4]</sup>对地下管线的非一致地震激励反应进行了较为系统的研究, 主要包括对模型振动台试验的数值模拟, 原型地震反应的数值分析和简化计算理论研究; 同济大学陈隽, 史晓军等<sup>[5-7]</sup>以纵向非一致地震激励试验为主, 分析了地下综合管廊振动台模型试验的场地的加速度响应、结构的应变响应、结构和场地加速度响应关系、结构

在纵向非一致激励和一致激励下应变响应的区别等内容; 大连理工大学何伟<sup>[8]</sup>采用规范反应谱合成空间相关多点地震动模拟三维地下地铁车站振动, 对地铁车站非一致地震动响应特征进行了分析; 清华大学李鹏<sup>[9]</sup>对饱和地基中无限长隧道在非一致地震作用下的纵向地震反应特点进行了研究; 美国伊利诺伊大学香槟分校 Y.M.A. Hashasha<sup>[10]</sup>研究了地下结构的抗震性能、影响因素并提出了抗震设计方法; 美国普渡大学 HongbinHuo<sup>[11]</sup>采用 ABAQUS 软件模拟分析了日本大开地震的震害机制, 并提出了矩形地铁区间隧道抗震分析的解析解; 韩国汉阳大学 Duhee Park<sup>[12]</sup>采用相关函数生成了考虑变异性地震动的时程曲线, 探讨了隧道在地震动空间变异下的纵向位移, 应力及弯矩响应; 美国普林斯顿大学 Saxena V.<sup>[13]</sup>研究了考虑地震动空间变异性条件下的钢筋混凝土公路桥梁的地震响应. 目前地铁车站结构在纵向非一致地震激励下的动力反应研究还较少. 地铁车站结构纵向长度一般超过百米, 非一

致地震空间引起的地铁车站结构的纵向内力响应差异不容小觑。

当前我国处于地铁建设的黄金时期,我国针对地铁地下结构抗震的设计规范并未完善.以地铁车站为主要研究对象,基于 ABAQUS 有限元软件建立有限元模型.采用等效人工边界单元和等效荷载法实现波动输入,研究考虑地震动空间非一致性的地铁车站数值分析方法以及其地震反应规律.

## 1 人工边界及非一致输入

建立大型土-地铁车站动力数值模型,需要考虑截断土体并设置合理的人工边界.根据文献[14],可采用与实体单元替换弹簧-阻尼单元体系,即在边界上沿界面法向延伸一层厚度相等的实体单元,并将外层边界固定.则其等效剪切模量、弹性模量和等效单元的阻尼系数分别:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{G} &= hK_{BT} = \alpha_T h(G/R) \\ \tilde{E} &= \frac{(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})}{(1-\tilde{\nu})} hK_{BT} = \alpha_N h \frac{G(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})}{R(1-\tilde{\nu})} \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\tilde{\eta} = (\rho R/3G)[2(c_S/\alpha_T) + (c_P/\alpha_N)] \quad (2)$$

其中:  $\tilde{\nu}$  为等效边界单元的泊松比,  $h$  为等效单元的厚度,  $R$  为波源至人工边界点的距离,  $c_S$  和  $c_P$  分别为 S 波和 P 波波速,  $G$  为介质剪切模量,  $\rho$  为介质质量密度,  $\alpha_T$  与  $\alpha_N$  为人工边界参数,根据已有研究建议,取  $\alpha_T = 0.5$  与  $\alpha_N = 1$ .

地震波的斜入射是空间非一致地震波中主要组成,根据图 1 所示,设地震波垂直入射时入射角为  $0^\circ$ ,以 P 波为例,入射角即为地震波入射方向与竖直线 y 轴的夹角  $\theta_{pi}$ .

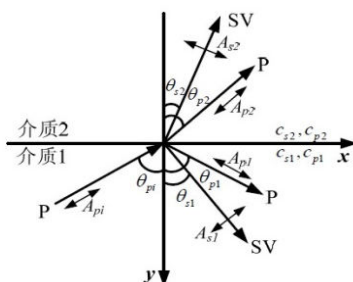


图 1 地震波入射角

Fig.1 Incident angle of seismic wave

根据文献[15]基于一维化时域有限元模型计算方法扩展至三维模型,实现地震波斜入射反应分析,将非一致地震动转化为等效荷载实现波动输入的详细过程,编写了基于 ABAQUS 程序中 python 语言的等效荷载求解程序.图 2 是实现波动输入的流程.

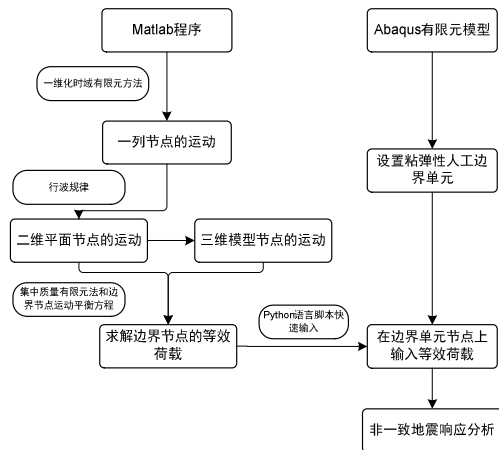


图 2 波动输入流程

Fig.2 Procedure of input waves

## 2 地震波选择

根据工程所在场地自由场场地类别为 IV 类,选取常用且典型的 El-centro 波、Kobe 波和 Loma prieta 波进行地震反应分析. El-centro 波记录:发生于 1940 年 5 月 19 日,震级 6.5,持续时间 40 s,时间步长 0.01 s;; Kobe 波记录:发生于 1995 年 1 月 17 日,震级 6.9,持续时间 40.95 s,时间步长 0.01 s; Loma prieta 波记录:发生于 1989 年 10 月 18 日,震级 6.9,持续时间 39.94 s,时间步长 0.005 s. 图 3 给出了加速度峰值为 0.1 g 的三种地震波的加速度时程曲线和对应的位移时程曲线.从位移时程曲线可以看出,三条波具有明显不同的特性.

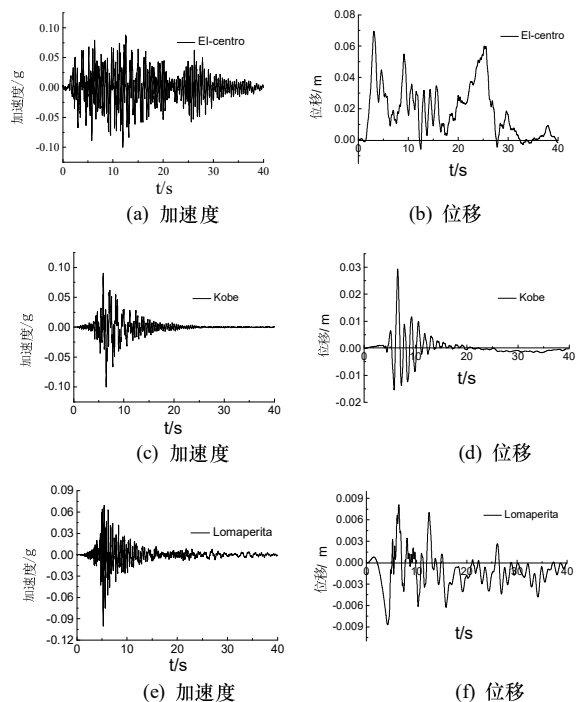


图 3 三条地震波及对应位移时程

Fig.3 Time history waves of acceleration and velocity

3 输入方法验证

采用 ABAQUS 有限元软件建立二维单层土模型. 土体尺寸为 165 m×36 m, 土体左右两侧面和底面设置厚度为 3 m 的二维等效粘弹性人工边界单元. 为满足等效荷载输入法的要求, 网格划分如下图, 土体单元尺寸为 1.5 m×3 m. 土体基本参数如表 1 所示. 在三维自由场中心纵向截面上取与二维平面相同位置的点, 并用相同字母 O、A、B、C、D 五点表示, 如图 4(b).

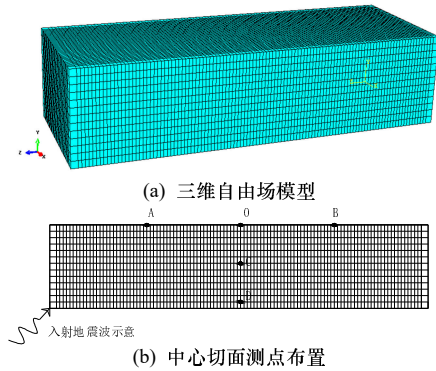


图 4 三维土体地震动计算模型  
Fig.4 3D ground motion model of soil

根据文献[2]的地震观测统计, 大多数基岩处的地震波斜入射角度为 30 度左右. 斜入射角度超过 30 度后会产生更为复杂的反射等现象<sup>[15]</sup>, 程序计算了 15 度和 30 度斜入射的情况, 并和垂直入射, 即入射角度为 0 的一致输入地震波进行了比较. 提取土体中五个特征点的位移峰值结果进行比较, 表 2 给出了图 3(a)所示的 El-centro 地震波输入工况下采用 Abaqus 有限元程序计算的结果和 matlab 结果的五个特征点中的最大差值. 可以看出误差在 10%以内, 采用的程序精度满足有限元计算的需求.

表 1 土层参数

Tab.1 Parameters of soil			
密度 kg/m <sup>3</sup>	S 波波速 m/s	P 波波速 m/s	泊松比
1 740	180	336	0.3

表 2 程序与有限元计算结果误差

Tab.2 Error comparison of the procedure and the FEA				
入射波	方向	Matlab 结果/m	Abaqus 结果/m	误差 绝对值
垂直入射 P	x	0	0	0
	y	-0.139	-0.145	4.32%
垂直入射 SV	x	0.139	0.145	4.32%
	y	0	0	0
15° P	x	0.037	0.039	5.41%
	y	-0.136	-0.142	4.41%
15° SV	x	0.131	0.138	5.34%
	y	-0.037	-0.039	5.41%
30° P	x	0.072	0.069	4.17%
	y	-0.128	-0.132	3.13%
30° SV	x	0.102	0.107	4.90%
	y	-0.072 3	-0.075	3.37%

4 工程数值分析

4.1 有限元建模

以某双柱三跨地下两层地铁车站为工程背景, 该车站呈东南至西北走向, 岛式站台, 地下一层为站厅层, 地下二层为站台层. 车站主体为整体结构, 中间内设框架柱. 车站主体结构长为 135 m, 宽为 21 m, 高为 13.8 m, 顶板厚 0.8 m, 中板厚 0.4m, 底板厚 0.9 m, 中柱截面尺寸为 1 m×0.6 m. 图 5 给出了地铁车站模型的三视图, 地铁车站埋置于均质单层土体. 上层覆土厚度 9 m, 底面距土层底部 13.2 m. 柱子纵向间距 7.8 m, 横向间距 6 m. 车站墙板采用 S4R 壳单元模拟, 梁柱采用 B31 梁单元模拟, 土体采用 C3D8R 实体单元模拟. 除土体自由表面, 其余五个面外包一层厚度为 3 m 的人工边界单元, 人工边界单元采用 C3D8R 实体单元.

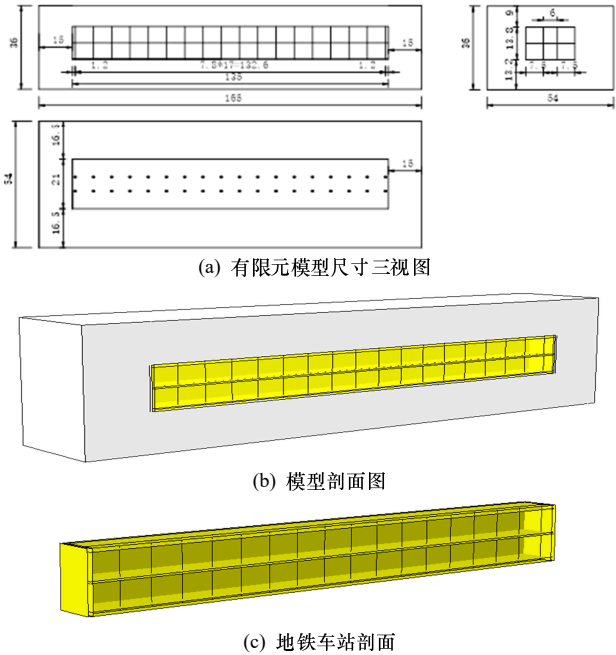


图 5 地铁车站模型  
Fig.5 Model of the station

4.2 结果分析

在阪神地震中, 神户地铁区间线路车站侧壁上部拐角处有裂缝出现, 中柱上下端也有裂缝出现, 表明地铁车站柱顶、柱脚和墙板连接角点附近是较易发生损坏的结构点<sup>[15,17]</sup>. 为分析地铁车站墙板结构在非一致地震作用下的响应, 将车站沿纵向划分为多个截面, 取不同截面上的特征点进行分析, 特征点如图 6 所示. STT 为上层柱顶, SBB 为上层柱脚, XTT 为下层柱顶, XBB 为下层柱脚, S-1、S-6、X-6 为柱截面顶板、中板、底板中点, S-2 至 S-5 和 X-2 至 X-5 为车站上层和下层墙角、板角对应点.

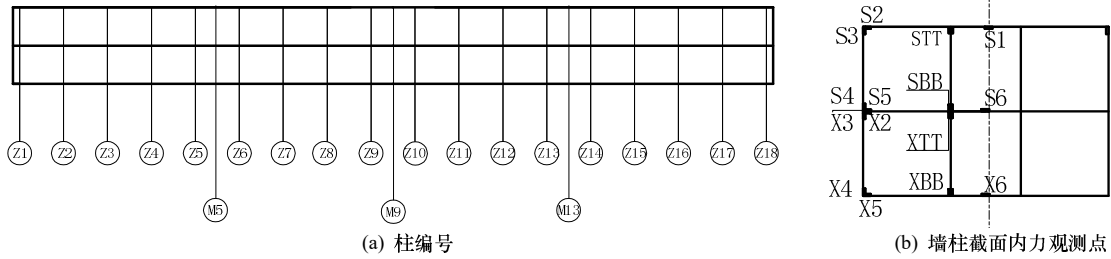


图6 柱截面和柱间截面编号及内力观测点  
Fig. 6. Key point of the station and the numbers

图7给出了0.1 g El-centro P波垂直入射工况作用下墙体断面关键点的内力分布情况. 不同P波和SV波以0°、15°和30°入射时, 截面观测点内力图趋势一致, 墙板构件中最不利位置为位于墙板连接的角度点位置附近.

图8给出了El-centro波的P波和SV波作用下El-centro波作用下墙体最不利位置(X-4)内力分

布. P波工况作用下纵向轴力和剪力随着入射角的增大而增大, 横向弯矩随着入射角的增大而有所减小. SV波工况下, 随着入射角的增大, 横向轴力值增大, 增大幅值在20%内. 平面剪力最大值随着入射角的增大而减小, 随着入射角的增大, 纵向弯矩值明显增大.

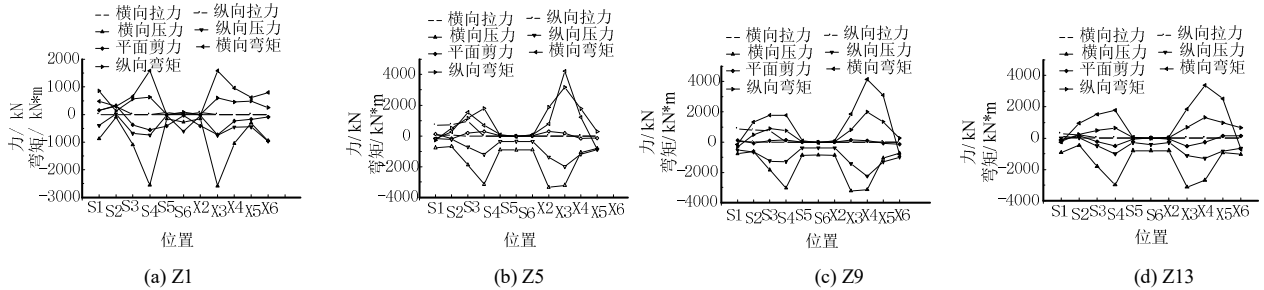


图7 墙体断面观测点内力分布  
Fig.7 Key point of the section

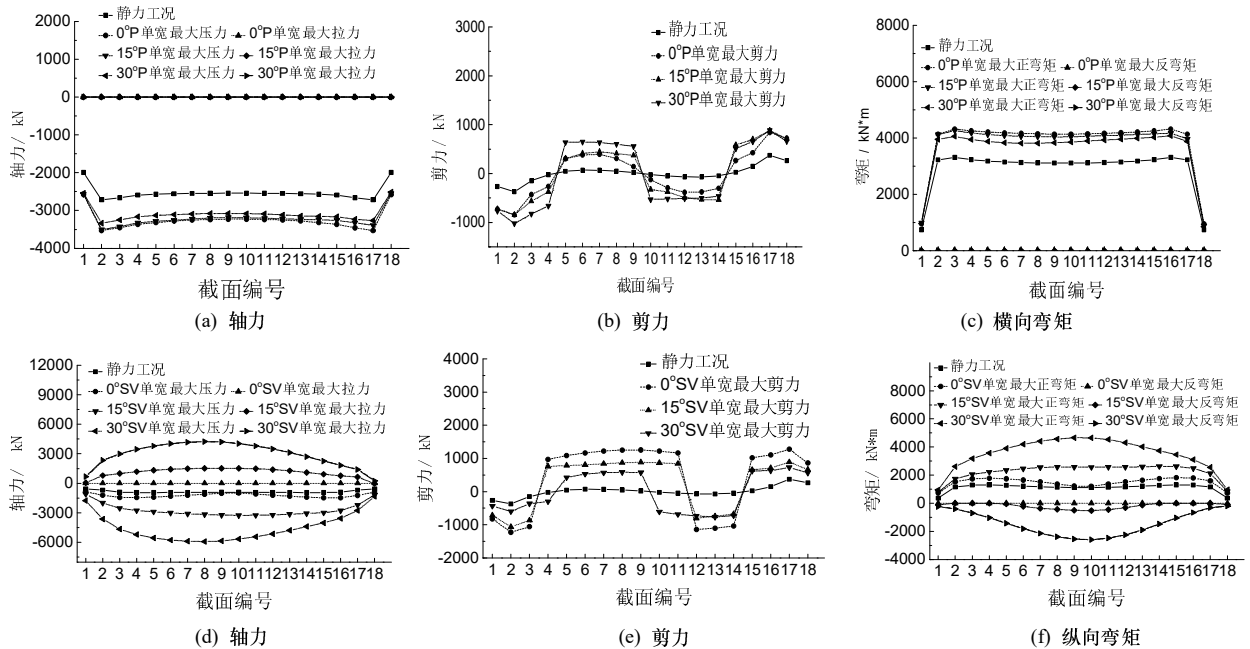


图8 El-centro波作用下墙体最不利位置(X-4)内力分布  
Fig. 8 Internal force distribution of the El-centro wave

已有的地震中地下车站主要震害发生在中柱, 文中分析后柱脚基本都是最不利位置, 因此这里主要分析了柱脚的最大内力情况. 图9给出了车站下层各柱脚最不利位置的峰值内力分布情况以及各

柱脚的最大内力分布情况. 相对于一致地震动输入, P波作用轴力减小, 剪力和弯矩增大, 并且随着入射角的增大, 轴力减小, 剪力和弯矩增大. 从峰值来看, 轴力值相对较大, 非一致地震P波相对

于一致地震 P 波对柱结构内力的影响差异较小. 在 SV 波作用下非一致地震动, 柱顶和柱脚的内力相对于静力工况都是增大, 轴力, 减小剪力和弯矩, 并且随着入射角的增大轴力呈递增规律, 而剪力和弯矩呈递减规律.

引入斜入射角度的非一致影响因子, 即不同角度斜入射地震波柱脚最大内力与一致输入垂直入射地震波内力比值. 表 4 给出了三种地震波的 P 波和 SV 作用下, 分别考虑 15 度和 30 度斜入射角两种情况下柱脚的最大内力的非一致影响因子值. 考虑非一致地震作用后, 随着入射角增加, P 波作用下的轴力减小, 剪力和弯矩增大. 其中, 30 度斜入射输入下, El-centro 波的轴力减小最多, 是一致轴

入的 0.73 倍, 剪力和弯矩增加最大为 loma 波, 分别为 3.71 倍和 3.51 倍.

考虑 SV 波输入时, 考虑非一致地震因素影响后, 三条地震波作用下的轴力都增大, 剪力和弯矩减小, 并且随着入射角的增大, 其差值越明显. 轴力增量最大为 El-centro 波, 当斜入射角为 30 度时, 增加值为一致地震的 4.57 倍, 剪力和弯矩减小最多的是 Kobe 波, 为一致地震作用的 0.37 倍和 0.38 倍. 从图 9 可以看出对于车站中柱而言, 轴力值相对较大, 非一致地震的 SV 波作用下轴力增加较多, 对柱结构内力的影响差异较大, 考虑非一致地震因素存在必要性.

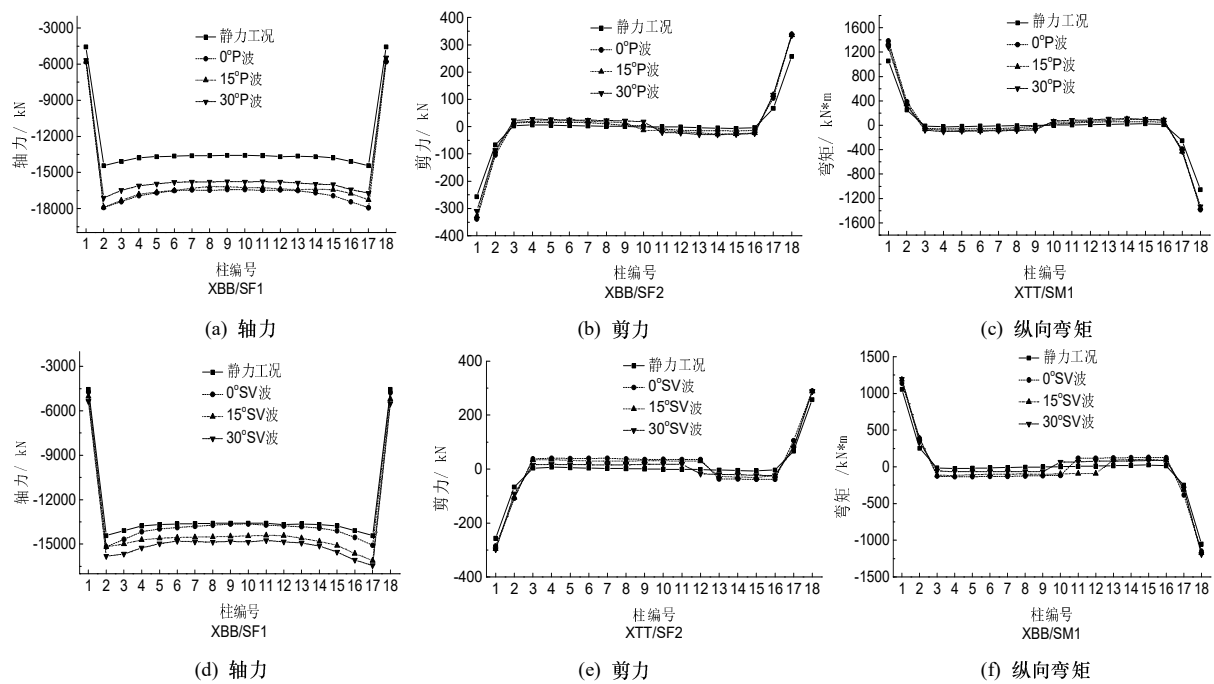


图 9 0.1g El-centro 波作用下层柱脚最大内力图

Fig.9 Maximum internal force of the column under El-centro waves

表 4 考虑斜入射角度的非一致影响因子

Tab.4Non-uniform effect index for oblique incidence's angle

	工况	入射角/°	轴力	剪力	弯矩
P 波	El-centro	15	0.96	2.25	2.07
	El-centro	30	0.74	2.41	2.35
	Kobe	15	1.00	2.63	2.27
	Kobe	30	0.84	3.37	2.96
	Loma	15	0.84	2.33	2.08
	Loma	30	0.76	3.73	3.51
SV 波	El-centro	15	3.41	0.84	0.84
	El-centro	30	4.57	0.48	0.55
	Kobe	15	2.74	0.74	0.77
	Kobe	30	4.75	0.37	0.38
	Loma	15	2.61	0.95	0.95
	Loma	30	4.00	0.76	0.90

5 结论

研究了地铁车站结构在非一致地震动空间下的地震动响应, 分析了三条不同的地震波输入情况

下, P 波和 SV 波传播时地铁车站柱结构、墙板的内力和加速度反应, 得到以下结论:

- (1) 典型两层三跨地铁车站两端附近的柱结构内力值与中部区间柱结构的内力值有明显差异; 纵向地震作用下地铁车站柱结构内力以轴力为主, 纵向剪力和弯矩相对较小; 纵向地震作用下, 墙板连接的角点附近内力较大, 抗震设计中应当重点考虑部位.
- (2) 随着 P 波入射角的增大, 中部区间柱结构轴力减小, 纵向剪力和纵向弯矩增大. 随 SV 波入射角的增大, 中部区间柱结构轴力有明显的增大, 纵向剪力和纵向弯矩减小.
- (3) 纵向非一致地震动引起关键构件, 特别是

中柱的轴力、弯矩和平面剪力较一致地震作用工况差异显著. 设计时有必要考虑地震动空间非一致性对大跨度地铁车站的影响.

## 参考文献 References

- [1] European Committee for Standardization. Eurocode 8: Structures in seismic regions-design part2: Bridges. Brussels: European Committee for Standardization, 1995.
- [2] XING J N, LIAO Zhenpeng. Statistival research on S-wave incident angle[J]. Earthquake Research in China, 1994, 8(1):121-131.
- [3] 陈维. 斜入射地震动对地下结构地震反应的影响研究[D]. 北京: 北京工业大学岩土工程系, 2007.  
CHEN Wei. Obliquely incident on earthquake ground motion response of underground structures [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2007.
- [4] 王琴. 地下管线非一致激励地震反应分析[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
WANG Qin. Underground pipeline non-uniform excitation seismic response analysis [D].Shanghai: Tongji University, 2008.
- [5] 史晓军. 非一致地震激励地下综合管廊振动台模型试验研究(I)—试验方法[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(1): 147-154.  
SHI Xiaojun. Shaking table test on utility tunnel under non-uniform seismic excitations(I): Experimental setup [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(1): 147-154.
- [6] 陈隽. 非一致地震激励地下综合管廊振动台模型试验研究(II)—试验结果[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 123-130.  
CHEN Jun. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform seismic excitations(II): Experimental results [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 123-130.
- [7] 蒋录珍. 非一致地震激励地下综合管廊振动台模型试验研究(III)—数值模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(3): 46-53.  
JIANG Luzhen. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform seismic excitations(III): Experimental results[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(3): 46-53.
- [8] 何伟. 地铁地下车站在非一致性地震输入下的动力响应[J]. 振动与冲击, 2011, 30(12): 103-107.  
HE Wei. Dynamic response analysis of an underground station subjected to non-uniform seismic action [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011,30(12): 103-107.
- [9] 李鹏. 饱和地基中隧道纵向地震反应的数值分析[D]. 北京: 清华大学, 2013.  
LI Peng. Numerical analysis for longitudinal seismic response of tunnels in saturated soils[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [10] HASHASHA Y.M.A. Seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, (16): 247-293.
- [11] HUO H. Seismic design and analysis of rectangular underground structures[D]. Purdue University,2006.
- [12] DUHEE Park, MYUNG Sagong, DONG YeopK wak, et al. Simulation of tunnel response under spatially varying ground motion[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, (29):1417-1424.
- [13] SAXENA V. Spatial variation of earthquake ground motion and development of bridge fragility curves[D]. Princeton University, 2000.
- [14] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9):1070-1075.  
LIU Jingbo, GU Yin, DU Yixin. Consistent viscous-spring artificial boundaries and viscous-spring boundary elements [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006,28(9): 1070-1075.
- [15] 王艳. 非一致地震动场数值方法研究及在结构动力分析中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2007.  
WANG Yan. Research on the numerical method for asynchronous seismic wave motions and its application in dynamic analysis of structures[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [16] 刘祥庆. 地铁地下结构地震反应分析方法与试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.  
LIU Xiangqing. Research on analysis method and experimental study of seismic response of underground subway structures. Beijing: Tsinghua University, 2008.
- [17] 庄海洋, 陈国兴, 杜修力, 等. 液化大变形条件下地铁车站结构动力反应大型振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(4): 94-97.  
ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing, DU Xiuli, et al. Analysis of earthquake response of subway station built on liquefied soil by large-scale shaking table testing[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(4): 94-97.

(编辑 吴海西)