张涵,张西文.耦合地震动下地铁车站的动力响应研究[J].地震工程学报,2021,43(1):245-250.doi:10.3969/j.issn.1000-0844. 2021.01.245

ZHANG Han, ZHANG Xiwen, Dynamic Response Research on Subway Stations under Coupled Ground Motion[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(1): 245-250. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.245

耦合地震动下地铁车站的动力响应研究

张 涵1,2,张西文1,2

(1. 济南大学土木建筑学院,山东 济南 250022;

2. 山东省城市地下工程支护及风险检测工程技术研究中心,山东济南 250022)

摘要: 耦合地震动对地铁车站结构的响应较为复杂,本文运用有限单元法进行动力时程分析,研究 地铁车站结构承受水平、竖向和双向耦合地震动作用下的动力响应规律。结果表明:(1)耦合地震 动对结构相对水平位移影响较小,但对结构的相对竖向位移影响较大。(2)耦合地震动会减小中柱 主应力值,但并未较大程度上改变中柱主应力值大小分布情况。(3)车站中柱底部和各节点位置在 单向以及耦合地震动中都为结构的薄弱位置,需要在抗震设计中着重注意。

关键词:地铁车站;地震响应;耦合地震动;中柱主应力
 中图分类号:TU91
 文献标志码:A
 文章编号:1000-0844(2021)01-0245-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.01.245

Dynamic Response Research on Subway Stations under Coupled Ground Motion

ZHANG Han^{1, 2}, ZHANG Xiwen^{1, 2}

(1.School of Civil Engineering and Architecture, University of Ji'nan, Ji'nan 250022, Shandong, China;

2. The Engineering Technology Research Center for Urban Underground Supporting and Risk Monitoring of Shandong Province, Ji'nan 250022, Shandong, China)

Abstract: The response of subway station structure under coupled ground motion is complex. This paper uses a finite element method for dynamic response research. Dynamic response of the subway station structure was analyzed under the horizontal, vertical, and bi-directional coupled ground motion. Results showed that: (1) Coupled ground motion has little effect on the relative horizontal displacement of the structure, but has a large effect on the relative vertical displacement of the structure. (2) Coupled ground motion can decrease the principal stress of the middle column, but cannot change the distribution of principal stress of the middle column to a large extent. (3) The bottom of the middle columns and joints of the station are weak positions under under undirectional and coupled ground motion, which require more attention in seismic design.

Keywords: subway station; seismic response; coupled ground motion; principal stress of middle

column

第一作者简介:张 涵(1997-),男,本科生,主要从事岩土与地下工程等方面的科研。E-mail:zjsnbszh@163.com。

通信作者:张西文(1987-),男,博士,讲师,主要从事岩土与地震工程方面的教学和科研。E-mail:cea_zhangxw@ujn.edu.cn。

收稿日期:2018-12-12

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51708251);山东省重点研发计划(公益性科技攻关类)(2019GSF111031);中国博士后科 学基金面上项目(2019M652304);济南大学博士基金项目(XBS1619)

0 引言

近年来我国经济快速发展,地下空间大量兴建, 特别是现阶段各大主要城市都在大规模地进行地铁 建设,地铁也逐渐成为人们出行的主要选择。但我 国处在地震的多发地带,例如 1999 年的台湾 chichi^[1],2008 年的汶川地震^[2],都对地下结构造成了 严重的破坏。然而我国对地下结构的抗震研究起步 较晚,地下结构抗震设计的相关规范也不够完善。

因此地下结构的抗震设计和与地震响应分析也 成为众多学者的重要研究课题^[3]。陈磊、谷音等^[4-5] 利用 ABAQUS 软件,对某车站进行了非线性地震反 应分析。杜兴华等^[6]分析了某车站在水平地震动作 用下的内力和变形情况。刘庭金等^[7]运用动力时程 分析法对地铁车站进行了水平向的非线性地震响应数 值模拟。Ni 等^[8]建立了地铁车站的二维模型,研究了 车站在水平地震波下的塑形损伤和能量响应特征。上 述研究都是将水平地震动视为地下结构破坏的主要原 因,没有考虑竖向地震动以及耦合地震动的影响。

但近年来研究者已经开始逐渐关注竖向地震动 对地下结构的地震响应。如张海^[9]等开展了地震动 输入方向对软土区车站结构响应影响的研究,结果 表明竖向地震动对车站结构的内力和应力影响比较 大。陶连金等^[10]研究了大跨度高断面 Y 形柱地铁 车站在竖向地震动下的地震响应规律,结果表明双 向耦合地震动会增大结构的应力值,并对竖向位移 产生影响。钟波波、Ma 等^[11-12]在对地铁车站进行 地震响应分析时,均输入了水平、竖向和双向耦合三 种形式地震动作为数值模拟的条件。

本文以某地铁车站结构为背景,使用有限元软件建立二维计算模型,利用 EI-Centro 波计算分析 地铁车站在水平、竖向和双向耦合地震动作用下结 构的抗震性能与地震响应规律。

1 地铁车站结构的有限元计算模型

1.1 模型建立

本文以2层3跨双柱地铁车站为背景进行地震 响应分析。该车站高12.7 m、宽21.6 m。顶板厚度 0.7 m、中板厚度0.4 m、底板厚度1 m、外墙厚度0.8 m。两根纵向柱间距为5.4 m、直径0.6 m。此车站 为箱型车站,车站的柱子在地震中为薄弱环节。因 此为了计算简便选取地铁车站中带有中柱的关键断 面,将三维模型转化为二维平面应变问题进行分析, 具体结构剖面如图1所示。分别在水平方向上取四 倍车站宽度的土体,竖直方向上取三倍车站高度的 土体为研究对象,整体模型尺寸为 200 m×55 m。 在车站底部输入地震波,模型顶面为自由面,模型两 侧设置为自由场边界,来模拟现实中两侧无限土体的 效果。并采用 0.5 m×0.5 m 的矩形网格对地铁车站 结构划分,2 m×2 m 的矩形网格对土体划分,如图 2 所示。模型共计 3 295 个单元,3 519 个节点。







1.2 土层及结构参数

车站周围土体采用 Mohr-Coulomb 本构模型来 模拟土的弹塑性,各土层参数见表 1 所列。地铁车 站的混凝土结构采用弹性模型。车站主体结构中的 外墙与中板采用 C30 混凝土,立柱采用 C40 混凝土 浇筑。具体结构参数见表 2。 土层参数

Table 1 Parameters of soil layers							
编号	土层埋深/m	重度/(kN・m ⁻³)	弹模/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	
1	2	20.0	6.0	0.30	12.0	6.0	
2	9	19.9	8.4	0.28	25.1	23.0	
3	14	20.7	30.1	0.30	35.1	0.0	
4	20	21.2	35.0	0.27	40.1	0.0	
5	26	20.2	17.7	0.27	29.1	21.0	
6	36	21.4	45.0	0.27	40.0	0.0	
7	55	20.3	15.3	0.27	21.0	27.0	

表 1

表 2 车站结构力学性能参数

Table 2	Mechanical parameters of station structure			
结构名称	弹模/GPa	泊松比	密度	
外墙	42.0	0.20	2 500	
立柱	54.5	0.25	2 779	
板	42.0	0.20	2 500	

1.3 分析工况

选择具有代表性 EI-Centro 波作为地震动输入 并截取 25 s 的地震动进行动力时程分析。水平、竖 直地震动加速度时程曲线如图 4 所示。分析工况见 表 3。







表 3	分析工况
-----	------

Table 3	Working	conditions for	analysis	
	0.1	0.0	0	ĺ

	输入方向	0.1g	0.2g	0.4g
	水平单向	工况一	工况四	工况七
	竖直单向	工况二	工况五	工况八
	双向耦合	工况三	工况六	工况九
_				

2 位移响应分析

分析车站结构在 0.1g, 0.2g, 0.4g 三种峰值加

速度下的位移响应,同时定义侧墙上各点与底板的 绝对水平位移之差为相对水平位移,中部底板点与 底板最左侧点的绝对竖直位移之差为相对竖向 位移。

2.1 水平变形分析

(1)图4为车站顶板在0.2g峰值加速度下的 相对水平位移时程图。从图中可以看出车站在水平 单向与水平竖直耦合地震动输入两种情况下,曲线 几乎完全重合而竖直地震引起的位移较小。说明结 构顶板相对水平位移一般由水平方向地震动引起, 竖直方向地震动对其影响较小。



Fig.4 Time history of relative horizontal displacement at station roof (PGA=0.2g)

(2)图5为顶板在三种加速度峰值下的相对水 平位移时程图。由图5可知随着地震加速度峰值的 增加,顶板相对位移也会相应的增大,而在EI-Centro



图 5 不同加速度峰值地震下顶板相对位移时程曲线 Fig.5 Relative displacement time-history curves of

station roof under different peak accelerations

波这种地震波谱下,顶板会在 2.98 s 出现最大右摆 位移(9.08 mm),3.52 s 出现最大左摆位移(8.66 mm)。说明车站在 2.98~3.52 s 左右振动最大,动 力响应最强烈。

2.2 竖向变形分析

(1)图 6 为底板相对竖向位移时程曲线。从图 中可以看出水平地震动输入下底板相对竖向位移略 大于耦合地震动输入,且均大于竖向输入。可能由 于在耦合地震动的输入条件下,竖向地震动会在一 定程度上限制结构的竖向变形,从而影响结构的相 对竖向位移。





(2)图7为底板相对竖向位移随底板宽度的变 化图。从图中可以看出在竖向输入的情况下,车站底 板的中部位置相对位移最大,并呈对称向两边递减, 但其数值明显小于其他两种输入情况。而在双向输 入与水平单向输入情况下,底板则是向单侧变形。底 板相对竖向位移随底板宽度的变化也基本呈线性关 系。说明在考虑底板相对竖向位移时,应选用耦合地 震动作为输入条件,所获得的结果会更为准确。



Fig.7 Relationship between width of baseplate and relative vertical displacement of baseplate

3 车站内力分析

3.1 应力云图分析

根据车站位移时程曲线,分析可得地震波峰值





图8 车站主应力云图

Fig.8 Principal stress of subway station

由图 8 可知,在三种地震波输入情况下,车站结构的主应力分布基本保持一致,均在负二层中柱底部出现了最大主应力,其数值在耦合地震波输入情况下最大,达4 613 kN/m²,较水平单向输入增大近2.4%。同时在中柱与中板、侧墙连接位置也出现了较大主应力,为结构的薄弱位置。

3.2 中柱主应力分析

为了便于结构中柱的主应力分析,在中柱布置 了相应的监测点见图 9 所示。同时定义水平单向输 入与双向耦合输入两种情况下所获得的中柱主应力 的差值绝对值除以前者的数值为竖向地震动影 响率。

表 4 为中柱各测点在水平单向与耦合地震动输 入下的最大主应力,图 10 为中柱竖向地震动影响 率。结果表明(1)中柱在水平单向输入下所产生的 主应力略大于耦合输入下所产生的主应力,且在这 两种地震动输入形式下,中柱应力值大小分布规律 没有发生改变。即同一层的中柱下端主应力要大于 上端,顶层中柱主应力要大于底层。(2)中柱竖向地 震动影响率随着车站高度增加而减小。可能是由于 竖向地震动向上传递,能量逐渐削弱从而影响减小。 (3)中柱的竖向地震动影响率不受地震峰值加速度 变化的影响。



图 9 中柱监测点

Fig.9 Detecting points at middle column

表 4 中柱监测点主应力值(单位:kN/m²)

 Table 4
 Principal stress of detecting points at middle

column (Unit:KN/m ²)						
広测占	水平单向输入			水平竖直耦合输入		
鱼肉点	0.1g	0.2g	0.4g	0.1g	0.2g	0.4g
Z-1	76.46	152.93	303.51	75.38	150.76	299.19
Z-2	83.46	166.94	331.28	79.48	158.97	315.36
Z-3	68.56	137.11	272.10	61.97	123.95	245.78
Z-4	74.86	149.73	297.14	66.20	132.40	262.48





4 结论

本文通过时程分析法,以某地铁车站为研究对 象,分析其在水平、竖向和双向耦合地震动作用下的 地震响应规律,得到以下结论:

(1) 耦合地震动对结构的相对水平位移影响较小,但会在一定程度上限制结构的竖向变形,对结构

的相对竖向位移产生一定影响。

(2)水平地震动作用下中柱主应力会略大于耦 合地震动作用,且在这两种地震动输入形式下中柱 应力值大小分布规律没有发生较大程度的改变;中 柱的竖向地震动影响率不受地震峰值加速度变化的 影响。

(3)车站中柱底部,车站各节点位置在单向以 及耦合地震动中都为结构的薄弱位置,需要在抗震 设计中着重注意。

参考文献(References)

- WANG W L, WANG TT, SU J J, et al. Assessment of Damage in Mountain Tunnels Due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake
 [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16 (3):133-150.
- [2] WANG X W, CHEN J T, XIAO M. Seismic Damage Assessment and Mechanism Analysis of Underground Powerhouse of the Yingxiuwan Hydropower Station under the Wenchuan Earthquake[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018,113:112-123.
- [3] 刘蕊,李延涛,杨德健,等.软土地区地铁车站地震响应分析
 [J].地震工程学报,2014,36(1):16-21.
 LIU Rui,LI Yantao, YANG Dejian, et al. Seismic Response of Subway Stations in Soft Soil Area[J]. China Earthquake Engineering Journal,2014,36(1):16-21.
- [4] 陈磊,陈兴国,毛昆明.框架式地铁车站结构大地震近场地震反应特性的三维精细化非线性分析[J].岩土工程学报,2012,34 (3):490-496.

CHEN Lei, CEHN Xinguo, MAO Kunming, 3D Refined Nonlinear Analysis of Seismic Response Characteristics of Frame Metro Station Under Near-field Strong Ground Motion of Large Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 490-496.

- [5] 谷音,钟华,卓卫东.地震作用下大型地铁车站结构三维动力反应分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(11):2290-2299.
 GU Yin,ZHONG Huai,ZHUO Weidong.Analysis of Dynamic Interaction between Soil and Large Subway Station Structure under Seismic Excitation Based on 3d Model[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11):2290-2299.
- [6] 杜兴华.地铁车站水平地震动力响应分析[J].铁道工程学报, 2013,30(6):103-108.

DU Xing hua. Analysis of Dynamic Response of Subway Station under Horizontal Seismic Action[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(6):103-108.

 [7] 刘庭金,郑月昱,林伟波,等.有、无柱地铁地下车站地震响应对 比分析[J].隧道建设,2017,37(4):421-427.
 LIU Tingjin, ZHENG Yueyu, LIN Weibo, et al. Comparative

Analysis of Seismic Responses of Conventional and Columnfree Metro Station[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(4): 421-427.

- [8] NI H, LI M H, ZUO X. SeismicResponse Characteristics of Subway Station Structure[J]. Advanced Materials Research, 2013,838-841:1613-1619.
- [9] 张海,王雪杰,李雅.地震波输入方向对软土地区车站结构响应 的影响[J].世界地震工程,2014,30(2):29-35.
 ZHANG Hai,WANG Xuejie,LI Ya.Influence of Input Seismic Wave's Direction on Response of Station Structure in Soft Soil Area[J].World Earthquake Engineering,2014,30(2):29-35.
- [10] 陶连金,李积栋,吴秉林,等.竖向地震动对大跨度高断面Y形 柱地铁车站地震响应分析研究[J].地震工程学报,2015,37 (3):648-654.

TAO Lianjin, LI Jidong, WU Bing. Influence of the Vertical Seismic Wave on the Seismic Response of an Large-span High-section Y-shaped Column Subway Station [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(3):648-654.

- [11] 钟波波,张永彬,李宏.大跨无柱地铁车站地震响应分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(增刊1):317-322.
 ZHONG Bobo,ZHANG Yongbin,LI Hong.Analysis of Seismic Response of Large-span Column-free Subway Station[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015,11(Supp1):317-322.
- [12] MA C,LU D C,DU X L,et al.Effect of Buried Depth on Seismic Response of Rectangular Underground Structures Considering the Influence of Ground Loss[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 106:278-297.

(上接第 212 页)

SUN Hongxin, DENG Junjun, WANG Xiuyong, et al. Position Optimization and Damping Analysis of Electromagnetic Inerter Dampers in Structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2019, 39(2); 69-78.

[12] 欧进萍.结构振动控制一主动、半主动和智能控制[M].北京: 科学出版社,2003. OU Jinping. Structural Vibration Control-active, Semi-active and Intelligent Control[M].Beijing; Science Press, 2003.

[13] GOULD P L.Dynamics of Structures: (Theory and Applications to Earthquake Engineering) Anil K. Chopra Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995, 729pp [J]. Engineering Structures, 1995, 17(9); 679.