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◎

陶连金1,李积栋1,2,吴秉林1,安军海1,郭飞1

(1.北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室,北京 100124; 2.中国建筑总公司技术中心,北京 101300) 摘要:以北京地铁 6 号线新华大街站公共区 Y 型柱地铁车站为工程背景,利用 FLAC^{3D}有限差分程 序数值模拟分析,研究超浅埋大跨度、高断面、Y 形柱地铁车站结构分别在仅输入水平向地震动和 同时输入水平向与竖向地震动情况下的地震响应特性。结果表明:(1)与仅输入单向地震动相比, 双向地震动耦合作用下车站各测点的峰值加速度和应力值均增大,而相对水平位移减小,且随着输 入地震动强度的增加,竖向地震动影响率呈递减趋势;(2)双向地震动作用下,同一工况 Y 形柱叉 支处各测点的竖向位移明显增大,且各测点的竖向位移值较为均匀,而单向水平地震动作用下各测 点竖向位移差异较大;(3)与单向水平地震动相比,竖向地震动的输入对各测点间的水平方向地震 动特性规律影响较小。

关键词:大跨度;高断面; Y 形柱; 竖向地震动; 地震动特性 中图分类号:TU311.3; TU93⁺1 文献标志码:A 文章编号: 1000-0844(2015)03-0648-07 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0648

Influence of the Vertical Seismic Wave on the Seismic Response of an Large-span High-section Y-shaped Column Subway Station

TAO Lian-jin¹, LI Ji-dong^{1,2}, WU Bing-lin¹, AN Jun-hai¹, GUO Fei¹

(1.Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2.China National Construction Corporation Technology Center, Beijing 101300, China)

Abstract: In this study, the Y-column subway station of the Xinhua Street Station in public areas of the Beijing Metro Line 6 was used as an engineering background to develop a numerical model with the FLAC^{3D} finite difference program. The model was used to analyze and research the seismic response characteristics of the large-span high-section Y-shaped column subway station under only ground horizontal vibrations as well as under a combination of both horizontal and vertical seismic waves. The results showed that compared with inputting only one-way seismic waves, the peak acceleration and stress value of the station increased and the relative horizontal displacement decreased under the two-way seismic coupling. When the strength of the seismic wave input increased, the impact rate of vertical ground motion showed a decreasing trend. Under the combined action of the two-way seismic waves, the vertical displacement of the Y-shaped column fork branch was significantly increased under the same conditions and the vertical displacement of the measuring point was more uniform, whereas the vertical displacement of the measuring point in the one-way horizontal motions was quite different. Compared with the one-

① **收稿日期:**2014-08-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51038009);国家自然科学基金面上项目(40972189) 作者简介:陶连金(1964-),教授,主要从事岩土工程与地下工程方面的研究工作。E-mail:ljtao@bjut.edu.cn。 通信作者:李积栋(1987-),博士研究生,主要从事地下结构抗震方面的研究。E-mail:ljd0911@emails.bjut.edu.cn。 way horizontal motion, the vertical seismic wave input was less affected by the horizontal-direction vibration characteristics law among each measuring point.

Key words: large-span; high-section; Y-shaped column; vertical ground motion; ground motion characteristics

0 引言

水平地震动是造成地下结构破坏的主要原因^[1-3]。有人认为,在水平向地震动作用下底层发生 水平振动,由于地层的不均匀性等因素,不同深度处 的振幅不同,从而导致地下结构顶板与地板间产生 相对水平位移,进而在结构中产生很大的弯矩和剪 应力,致使结构破坏。但这种观点具有一定的局限 性,结构的实际破坏形式并非典型的剪切破坏,而是 与较大竖向地震动有关^[4-5]。

强震数据表明,某些地震震中区的竖向地面运 动分量与水平地面运动分量的大小具有相同的量 级,甚至在个别情况下前者大于后者^[6-7]。例如 1979年 Imperial Valley发生的 6.4 级地震,在距离 断层 1 km 处的埃尔森特罗 6 号观测台测取的竖向 最大加速度为 1.74 g,是该处记录最大水平加速度 的 2.4 倍。再如 Meishin 高速公路桥墩的破坏、 Shinkansen 隧道线桥墩的破坏、1995 阪神地震多层 建筑结构中间层的坍塌以及地下结构中柱的破坏等 均与竖向地震动有关。竖向地震波由土层进入结构 内部时,结构在竖向地震力作用下受到上下反复振 动,结构上下发生相互冲击,致使结构中产生较大的 拉应力,可导致钢筋混凝土拉伸破坏^[8-9]。因此竖向 地震动对结构破坏的影响不容忽视^[10-13]。

历史地震调查显示高断面的地下结构对水平向 地震动非常敏感,而大跨度地下结构对竖向地震动 特别敏感,同时普遍认为中柱的破坏是导致整个地 下结构破坏的主要原因,然而对于具有异形柱地下 结构的抗震性能及地震响应规律的研究少之又少。 因此对于大跨度、高断面、异形柱地下结构的抗震性 能及地震响应规律的研究具有重大意义。

本文基于 FLAC^{3D}有限差分软件,以北京地铁 6 号线的新华大街站为研究对象,利用日本阪神地震 波对大跨度、高断面、Y 形柱地铁车站进行动力时程 分析,探讨其在不同地震动条件下的抗震性能及地 震动响应规律。

1 三维数值模型

1.1 模型建立

新华大街站为北京地铁6号线快慢线中转换乘

站,周边为通州核心区重点开发地带,远期与 S6 线 换乘,车站为双岛四线车站,采用明挖法施工,两端 区间采用盾构法施工。车站公共区采用 Y 形柱受 力体系,局部中板打开形成中庭效果;Y 形柱上部采 用铸钢形式,下部采用钢管形式,钢管及铸钢件内部 采用 C50 微膨胀混凝土填充。车站顶板覆土厚度 不足 3 m,断面宽 41.9 m、高 19.4 m,柱高 18.4 m, 分叉跨度 8.4 m;顶板厚 1.0 m,底板厚 1.6 m,边墙 厚 1.0 m;中柱直径为 1.2 m,分叉处直径由 1.1 m 渐变到 0.75 m。模型尺寸为 200 m×60 m×50 m。 车站结构周边网格加密,土体和车站结构均采用实 体单元(图 1),参数详见表 1、表 2。同时为了便于 分析 Y 形柱地铁车站地震动响应,在车站结构上布 置了相应监测点,如图 2 所示。







表 1 土层参数 Table 1 Parameters for soils

编号	名称	厚度	重度/	泊松	压缩模量	摩擦角	黏聚力
		$/\mathrm{m}$	$(kN \cdot m^{-3})$	比	/MPa	/ (°)	/kPa
1	人工填土	5	16.5	0.35	23	8	10
2	粉土	3	19.54	0.365	34	32	14
3	粉质黏土	3	19.90	0.37	25	17	26
4	粉细砂	1.5	20.20	0.34	76	32	0
5	细中砂	7	20.20	0.338	132	34	0
6	粉质黏土	4	19.44	0.337	91	18	31
7	细中砂	剩余	20.20	0.33	169	33	0

表 2 结构参数

Table 2 Parameters for structures

编号	名称	重度/(kN•m ⁻³)	泊松比	弹模/GPa
1	车站结构	25	0.2	32.5
2	中柱	35	0.18	72.5
3	叉支	32	0.18	34.5

1.2 模型动力参数

模型在静力计算结束后得到初始应力场,即可进行动力计算。在模型底部输入水平振动地震波, 模型顶面采用自由面,底部采用由 Lysmer 和 Kuhlemeyer 提出的静态边界条件(即黏性边界、吸收 边界),同时模型周边采用自由场边界,使之产生与 无限自由场地相同的效果,以达到吸收入射波的目 的。

1.3 地震波输入

选用日本阪神地震波进行动力分析。地震波加 速度时程曲线和傅里叶谱值如图 3 所示。现将阪神 地震波加速度峰值分别调至 0.1 g(工况一)、0.2 g (工况二)、0.4 g(工况三)和 0.6 g(工况四)作为水平 向的输入加速度。四种工况分别采用单向水平地震 动输入和水平向地震动与竖向地震动同时输入的方 式,其中竖向地震动输入加速度峰值均为对应水平 向加速度峰值的 2/3。

2 动力分析

为了便于分析不同地震动条件下车站结构的地 震动响应规律,现将双向地震动作用下与单向水平 地震动作用下车站结构产生的地震动特性值的差值 再除以后者所得的绝对值定义为竖向地震动影响 率;将车站结构各部位与底板的水平位移差值定义 为相对水平位移。

2.1 位移分析

(1)图4、图5分别为Y形柱顶端相对水平位移-时程曲线和车站边墙各测点相对水平位移。从



图 3 输入地震动加速度时程曲线及傅氏谱 Fig.3 Acceleration time-histories and Fourier spectra of input ground motion

图中可以看出,随着输入加速度强度的增大,各测点 的相对水平位移依次增加,但各工况均在结构上部 出现了最大相对水平位移;输入单向水平地震动时 Y形柱顶端的水平位移略大于双向地震动输入情 况,且随着输入加速度强度的增大,竖向地震动影响 率越来越小。可能是由于在较大量级激振条件下, 输入竖向地震动在一定程度增大了对结构的约束作 用,进而制约了车站结构的相对水平运动,这也说明 水平激励与竖向激励的耦合反而会对水平激励引起 的相对水平位移起到一定的消弱作用。

(2)双向地震动作用下同一工况 Y 形柱叉支处 各测点的竖向位移明显增大,且较为均匀,而单向水 平地震动作用下各测点竖向位移差异较大。Y 形柱 叉支竖向位移,如图 6 所示。

2.2 应力分析

仅输入单向水平地震动和同时输入水平向和竖向地震动条件下,车站结构各部位应力值如表3所示。计算数据表明:

(1) 输入双向地震动引起的最大应力值大于输入单向水平地震动引起的最大应力值,但前者与后者相比,竖向地震动并未较大程度上改变 Y 形柱车站结构应力大小分布情况,即车站结构抗震薄弱部位依旧是 Y 形柱叉支、Y 形柱支撑柱两端、及边墙顶部与底部,其中 Y 形柱叉支处应力值最大。

表 3 车站各测点应力值

Table 3 The stress value in each measuring point of station

监测点	水平向地震波			水平向+竖向地震波					竖向地震波影响率			
	工况一	工况二	工况三	工况四	工况一	工况二	工况三	工况四	工况一	工况二	工况三	工况四
Y-Z1	1.87	2.17	2.78	3.38	2.78	2.98	3.68	4.09	0.484	0.371	0.254	0.122
Y-Z2	2.56	3.17	4.38	5.60	3.67	4.18	5.40	6.61	0.548	0.451	0.346	0.182
Y-Z3	0.93	1.57	3.26	5.03	1.37	2.05	4.23	5.99	0.499	0.373	0.267	0.131
Y-Z4	2.30	2.67	3.42	4.18	3.49	3.65	4.18	5.01	0.562	0.452	0.367	0.199
Y-Z5	2.20	2.64	3.52	4.41	3.22	3.87	4.68	5.50	0.371	0.351	0.244	0.112
Y-Z6	0.31	0.40	0.58	0.76	0.45	0.56	0.72	0.98	1.406	1.144	0.967	0.816
Y-Z7	1.54	2.36	4.00	5.64	2.34	3.36	5.00	6.64	0.520	0.423	0.299	0.176
Y-B1	0.60	1.13	2.18	3.24	0.93	1.62	2.92	4.00	0.470	0.432	0.243	0.119
Y-B2	0.06	0.09	0.17	0.24	0.09	0.13	0.21	0.28	3.467	2.635	1.889	1.474
Y-B3	0.93	1.30	2.04	2.77	1.37	1.77	2.57	3.28	0.455	0.360	0.223	0.110



图 4 相对水平位移-时程曲线





图 5 边墙测点相对水平位移关系图





图6 Y形柱叉支竖向位移

Fig.6 Vertical displacement of Y-shaped column fork-branch

(2)随着输入地震动强度的增加,车站结构同一部位的竖向地震动影响率依次降低。

(3)输入相同强度的地震动,车站结构不同部 位的竖向地震动影响率变化均较大,其中Y形柱中 部与边墙中部的竖向影响率最大,Y形柱叉支与柱 底端也较大。①前者竖向应力影响率较大的主要原 因是水平单向地震动作用下产生的应力值与输入双 向地震动相比基数较小,致使其竖向影响率较大,但 两种情况下应力值均较小,并非抗震薄弱点,因此可 不做太多考虑。②后者竖向影响率较大,是因为结 构摆动所产生的弯矩主要由立柱来承担,在立柱两 端产生较大弯矩,所以在两端产生较大的内力;同时 竖向地震动作用下车站结构在侧向变形下产生附加 弯矩,过大的侧向变形使结构产生了附加内力,加之 Y形柱上端叉支存在一定角度,使其在竖地震动作 用下产生更大的附加应力,也这是Y形柱叉支处应 力值大于根部的主要原因。

2.3 加速度分析

(1)随着输入加速度强度的增加,各测点的加速度放大系数呈现递增趋势;双向地震动作用下加速度放大系数大于单向水平地震动输入情况,其中 Y形柱加速度放大系数受竖向地震动影响最大倍数为1.23,发生在Y-Z7(柱底),边墙为1.21,发生在 Y-B4(边墙中下部);双向地震动作用并未改变各测点间加速度放大系数间的大小关系(图7)。





(2) 双向地震动作用下水平向加速度峰值大于 单向水平地震动输入情况,且对于输入双向地震动 情况而言,在加速度较大时间段会出现加速度值的 剧增(图 8),在工况二 5.2 s和工况三 7.3 s附近均 出现了加速度值剧增现象,这是竖向激励与水平激 励的耦合对车站结构加速度值会产生较大影响。但 竖向地震作用对车站结构各测点的自振周期影响很 小,工况二与工况三在单向水平和双向地震动作用 下的频谱曲线如图 9 所示。



因 0 加达及时任凶线

Fig.8 Acceleration time history curves under different conditions

3 结论

针对北京地铁 6 号线新华大街 Y 型柱地铁车 站建立计算模型,运用 FLAC^{3D}有限差分程序进行 动力时程分析,研究超浅埋大跨度、高断面、Y 形柱 双层地铁车站结构分别在仅输入水平向地震动和同 时输入水平向与竖向地震动情况下的地震响应特 性。由计算分析可以得出如下结论:

(1)输入单向水平地震动时车站各测点的水平 位移略大于双向地震动输入情况,且随着输入加速 度强度的增大,竖向地震动影响率越来越小。可能 是由于在较大量级激振条件下,输入竖向地震动在



图 9 车站结构傅氏谱

Fig.9 Fourier spectrum of station structure

(2)双向地震动作用下,同一工况Y形柱叉支 处各测点的竖向位移明显增大,且位移值较为均匀, 而单向水平地震动作用下各测点竖向位移值差异较 大。

(3) 输入双向地震动引起的最大应力值大于输入单向水平地震动引起的最大应力值,但前者与后者相比,竖向地震动并未较大程度上改变 Y 形柱车站结构应力值大小分布情况;随着输入地震动强度的增加,车站结构同一部位的竖向地震动影响率依次降低。

(4) 输入相同强度的地震动,车站结构不同部 位的竖向地震动影响率变化较大;双向地震动作用 下水平向加速度放大系数大于单向水平地震动输入 情况,且对于输入双向地震动情况而言,在加速度较 大时间段会出现加速度值的剧增;竖向地震作用对 车站结构各测点的自振周期影响很小。

参考文献(References)

- [1] 庄海洋,程绍革,陈国兴.阪神地震中大开地铁车站震害机制数 值仿真分析[J].岩土力学,2008,29(1):245-250.
 ZHUANG Hai-yang, CHENG Shaoge, CHEN Guoxing. Numerical Simulation and Analysis of Earthquake Damages of Dakai Metro Station Caused by Kobe Earthquake[J].Rock and Soil Mechanics,2008,29(1):245-250.(in Chinese)
- [2] Kircher C A.Kobe Earthquake: Ground Shaking, Damage and Loss[C]// Proceedings of the 14th Structures Congress: Part 2 (of 2).Chicago: ASCE, 1996.
- [3] Senzai S A.Study of the Damage of Subway Structures During the 1995 Hanshin-awaji Earthquake[J].Cement and Concrete Composites, 1997, 19, 223-239.
- [4] 国胜兵,赵毅,赵跃堂,等.地下结构在竖向和水平地震荷载作用下的动力分析[J].地下空间,2002,22(4):314-319.
 GUO Sheng-bing,ZHAO Yi,ZHAO Yue-tang, et al. Dynamic Analysis of under ground Structures under the Vertical and Horizontal Seismic Load[J].Underground Space,2002,22(4): 314-319.(in Chinese)
- [5] 李信桥,戚承志,李国华.浅埋地下结构受竖向地震作用的数值

模拟[Z].北京:[s.n.],2010.

LI Xin-qiao, QI Cheng-zhi, LI Guo-hua. Numerical Simulation of the Shallowly Buried Underground Structure under Vertical Seismic Excitation[Z].Beijing:[s.n.],2010.(in Chinese)

[6] 廖振鹏,王阜.论结构物的竖向地震输入[J].地震工程与工程 振动,1983,3(2):74-87.

LIAO Zhen-peng, WANG Fu. Vertical Seismic Motion Input to Structures[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1983, 3(2):74-87. (in Chinese)

- [7] 曹炳政,罗奇峰,马硕,等.神户大开地铁车站的地震反应分析
 [J].地震工程与工程振动,2002,22(4):102-107.
 CAO Bing-zheng, LUO Qi-feng, MA Shuo, et al. Seismic Response Analysis of Dakai Subway Station in Hyogo Ken-Nanbu Earthquake[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2002,22(4):102-107. (in Chinese)
- [8] 陈灿寿, 戚承志, 钱七虎, 等. 浅埋地下结构顶板在竖向地震作 用下的动力响应[J].世界地震工程, 2010, 26(4): 86-92. CHEN Can-shou, QI Cheng-zhi, QIAN Qi-hu, et al. Dynamic Response of the Roof Slab of a Shallowly Buried Underground Structure Under Vertical Seismic Excitation[J]. World Earth-
- quake Engineering,2010,26(4):86-92.(in Chinese))
 [9] 于翔,钱七虎,赵跃堂,等.地铁工程结构破坏的竖向地震力影 响分析[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2001,2(3):75-77.

YU Xiang,QIAN Qi-hu,ZHAO Yue-tang.Analysis of Vertical Earthquake Influence on Damage to Subway Structures[J]. Journal of PLA University of Science and Technology,2001,2 (3): 75-77.(in Chinese)

河海大学,2002.

- [10] 赵大鹏,宫必宁,晏成明.大跨度地下结构振动性态试验研究
 [J].重庆建筑大学学报,2002,24(5):52-57.
 ZHAO Da-peng, GONG Bi-ning, YAN Cheng-ming. Experimental Analysis of Vibration Behavior for Large-span Underground Structure[J].Journal of Chongqing Jianzhu University,2002,24(5): 52-57. (in Chinese)
- [11] 何伟,陈健云,温瑞智.竖向地震动对软土地铁隧道地震响应 影响分析[J].四川大学学报:工程科学版,2010,42(5):271-276.

HE Wei, CHEN Jian-yun, WEN Ruizhi. Study on the Influence of the Vertical Seismic Wave on the Earthquake Response of Tunnel in the Soft Soil[J].Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition, 2010, 42(5):271-276.(in Chinese)

 [12] 周林聪,陈龙珠,宫必宁.地下结构地震模拟振动台试验研究
 [J].地下空间与工程学报,2005,1(2):182-187,213.
 ZHOU Lin-cong, CHEN Long-zhu, GONG Bi-ning. Shaking Table Tests for the Seismic Simulation of Underground Structure[J].Chinese Journal of Underground Space and En-

gineering,2005,1(2):182-187,213.(in Chinese) [13] 周林聪.地震作用下大跨度地下结构振动性态研究[D].南京:

ZHOU Lin-cong. The Analysis of Dynamic Characteristic for Big-span Underground Structure[D]. Nanjing: Hohai University, 2002. (in Chinese).