

大型十字换乘车站结构地震响应及空间效应分析*

郝鹏飞¹, 王国波², 赵旭³, 余淼坤¹

(1. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325000; 3. 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)

摘要: 由于换乘地铁车站结构在地下交通网中发挥重要作用, 且其相对于单体地铁车站具有结构复杂、三维不规则等特性, 是典型的空间结构, 不能采用平面模型进行分析, 因此有必要探讨大型十字换乘站的抗震性能。基于某大型十字换乘地铁车站, 分别建立自由场、单体地铁车站、十字换乘地铁车站三维有限元模型, 对比分析单体车站与换乘站结构的抗震性能差异, 换乘站结构在不同地震动输入方向作用下的地震响应及其空间效应的影响范围。结果表明: (1) 相对于单体车站, 换乘站结构及其周围土体加速度响应、相对位移均小于单体车站, 表明其整体抗震性能优于单体车站; (2) 换乘站空间效应受地震动输入方向的影响较小, 其中端墙的影响范围为 B , 十字换乘节点的影响范围为 $3B/2$ (B 为结构宽度)。

关键词: 十字换乘车站; 单体地铁车站; 地震响应; 多向地震动输入; 空间效应

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0180-11

Seismic Response and Spatial Effect Analysis of Large Cross Interchange Metro Station Structure

HAO Pengfei¹, WANG Guobo², ZHAO Xu³, YU Miaokun¹

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325000, China; 3. The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Since the transfer subway station structure plays an important role in the underground traffic network, and it has the characteristics of complex structure and three-dimensional irregularity with respect to the single subway station, it is a typical spatial structure and cannot be analyzed by a plane model. It is necessary to discuss the seismic performance of large cross-transfer stations. Based on a large cross-change subway station, three-dimensional finite element models of free-field, single-unit subway station and cross-change subway station are established, respectively, and the two metro stations and their surrounding soils are calculated under different ground motion types and amplitudes. Dynamic response, comparative analysis of the difference between the seismic performance of the sin-

* 收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2020-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878529, 51678465)、武汉理工大学研究生优秀学位论文培育项目(2018-YS-044)资助

作者简介: 郝鹏飞(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事工程结构抗震分析方面的研究。E-mail: haopf995@foxmail.com

通讯作者: 王国波(1979—), 男, 教授, 博士。主要从事工程结构动力响应分析方面的研究。

E-mail: 20190337@wzu.edu.cn

gle station and the transfer station structure and the influence range of the transfer station space effect. The results show that: (1) Compared with the single station, the acceleration response and relative displacement of the transfer station structure and its surrounding soil are smaller than that of the single station, indicating that its overall seismic performance is better than that of the single station; (2) The space effect of the transfer station is less affected by the input direction of the ground motion. The influence range of the end wall is B , and the influence range of the cross transfer node is $3B/2$ (B is the structure width). The research results of the thesis have certain reference significance for the seismic design of the transfer station structure.

Keywords: cross interchange metro station; single metro station; seismic response; multi-directional ground motion input; spatial effect

引 言

随着城市轨道交通的快速发展,地铁车站的交错换乘变得越来越普遍。由于换乘地铁车站结构在地下交通线网中发挥着人群集散、交通枢纽等重要作用,且其相对于单体地铁车站具有结构复杂性、三维不规则性及显著的空间效应,因此换乘站结构的抗震性能值得关注。

针对地下结构地震响应的研究已有非常丰富的研究成果。如:陈国兴等^[1]对国内外城市地下结构的地震灾害现象、模型试验与理论研究成果等进行了简要分析;Y. M. A. Hashash等^[2]总结了地下结构抗震设计的研究进展,并描述了用来量化地下结构地震影响的方法;杜修力等^[3]通过建立阪神地震中大开地铁车站的有限元模型,分析了车站结构与围岩土体的地震反应,进而探讨了浅埋地下结构的地震破坏机理;H. Y. Zhuang等^[4]通过数值模型分析了在液化土壤中建造的大型地下地铁结构的非线性地震反应,结果表明,大型地铁站会严重影响附近土壤的液化行为,而附近的土壤比远处的土壤更容易液化;C. Ma等^[5]通过分析矩形地下结构在不同埋深和多次地震动作用下的地震响应,系统研究了地下结构及其周围土体的水平和竖向变形,并提出了地下结构地震响应最强时的埋深;S. Chen等^[6]通过对具有不规则截面的地铁车站结构在不利土壤条件下(软土和可液化土)的大型振动台试验分析表明,与可液化场地相比,软弱场地中的地下结构出现了更为明显的破坏。

在针对换乘车站以及复杂换乘节点的地震响应分析方面,张宇^[7]针对某T型交叉换乘车站结构

在不同土层和不同地震动类型作用下的动力响应及损伤发展趋势进行了分析;袁蕾等^[8]通过对地铁换乘站不规则结构进行地震响应弹塑性时程分析表明,周围土体的约束作用有利于减轻地下不规则结构的扭转效应;黄锐财^[9]通过建立二维、三维有限元模型,并分别采用反应位移法和动力时程法分析了地铁车站换乘节点的地震响应;王国波等^[10]基于某横、纵向跨度相同的十字换乘车站结构,对比分析换乘站与单体车站抗震性能差异,并初步探讨了其空间效应。

目前,对于换乘地铁车站结构的地震响应研究还相对较少,本文在已有研究^[10]的基础上,建立大型十字换乘车站计算模型,主要考虑车站尺寸、地震动输入方向等因素的影响,对比分析单体车站、换乘站结构及土体的地震响应差异,以及单体车站、换乘站空间效应的影响范围,期望为十字换乘车站的抗震设计提供参考。

1 模型建立

1.1 计算范围及边界条件

以天津地铁金钟河大街站为例,该站为3线换乘枢纽,5号线与6号线、Z2线“十”字换乘,其中5号线布置于地下三层,而6号线、Z2线于地下两层平行布置,同台换乘。基于此,建立由横向三层三跨和纵向两层六跨的框架结构组成的十字换乘地铁车站结构数值模型,其横截面如图1所示。其中,结构层高均为6 m,柱距为9 m,柱截面尺寸为0.9 m×0.6 m,车站顶板、中板、底板厚度分别为0.8、0.4、0.9 m,侧墙厚0.8 m,端墙厚0.2 m,结构埋深为3 m。

三层三跨及两层六跨车站结构长宽高分别为： $432\text{ m}\times 27\text{ m}\times 18\text{ m}$ 及 $459\text{ m}\times 54\text{ m}\times 12\text{ m}$ 。并取跨度较大的两层六跨车站作为单体车站进行对比分析,得到如图2所示的模型示意图。由于地下结构变形缝的模拟较为困难,且目前结构设计中换乘节点两侧结构采用刚接,未设置变形缝等抗震构造措施,因此本文暂未考虑变形缝的影响。

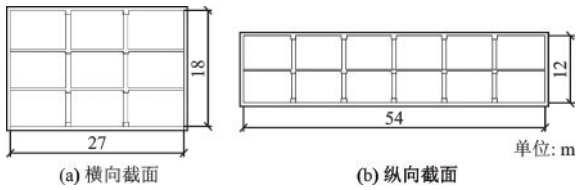


图1 车站截面示意图

Fig.1 Sectional view of the station

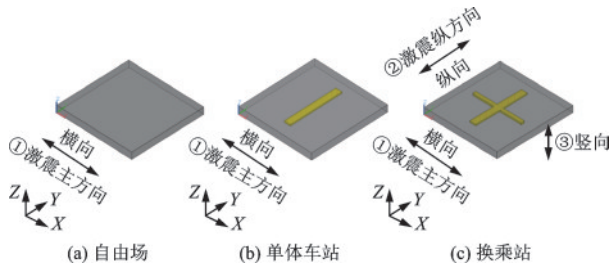


图2 模型示意图

Fig.2 Model schematic illustration

对于土体的计算宽度,应至少取到结构宽度的5倍^[11],为便于对比分析,三种模型土体计算范围均取为 675 m (长) $\times 648\text{ m}$ (宽) $\times 51\text{ m}$ (高)。为确保地震波能在模型中较好地传播,通常情况下要求网格尺寸小于 $1/10$ 波长^[12],即 $\Delta l_{\max} \leq 0.1v/f_{\max} = 0.1 \times 300/10 = 3\text{ m}$,故网格尺寸取 3 m 。

对于边界条件,由于动力黏性边界参数不易确定,且已有研究表明,土层范围长深比大于7时,采用自由边界即可满足要求^[13],而本文土层长深比 $(648/2)/51=6.35$,与7较为接近,故本文采用滑动边界,且这与规范GB 50909—2014^[14]中反应加速度法所用的侧向滑动边界是一致的。

模态分析时,模型底部设置固定边界,侧面设置Y、Z向位移约束。瞬态分析时,对于水平单向激震,如地震动在模型底部沿水平X向输入时,模型底部和侧向约束Y、Z向,同理Y向输入时则约束X、Z向;进行水平双向激震时,模型底面及侧面设置Z向约束;对于三向激震时,仅模型侧面设置Z向约束。

1.2 本构模型与材料参数

为了较好的模拟土体的非线性动力特性,土体采用Davidenkov非线性本构模型^[15],基于已有的动力试验资料,本文中取 $A=1.02$, $B=0.35$, $\gamma_r=0.0004$,初始阻尼比 0.001 。土体采用C3D8R实体单元,板和墙采用S4R壳单元,柱采用B31梁单元,车站结构采用弹性模型,土体与车站结构之间的接触面设置Tie约束,土体及结构材料参数见表1。

表1 材料参数表

Table 1 List of material parameters

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
土	1 800	453.60	0.4
墙板	2 400	3.00×10^4	0.2
钢筋混凝土柱	2 500	3.45×10^4	0.2

1.3 计算工况

为考虑不同地震动类型及幅值、不同地震动输入方向,及多向地震动组合输入对结构响应的影响,选取如图3所示的 $0.1\text{g}/0.5\text{g}$ El-Centro波及 $0.1\text{g}/0.5\text{g}$ Kobe波,并以两层六跨车站截面的横向抗震方向作为地震动输入主方向(即水平X向),则三层三跨车站截面横向抗震方向为水平次方向(即水平Y向),得到如表2所示的计算工况表。

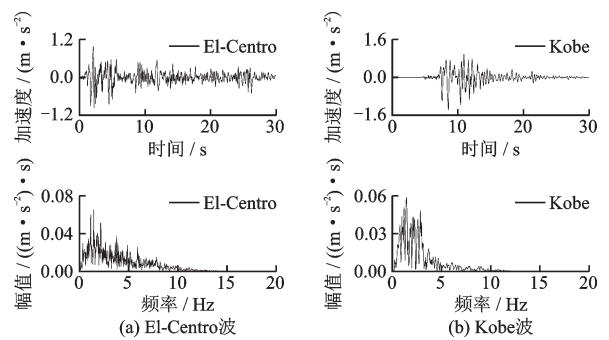


图3 地震波时程及频谱

Fig.3 Input seismic time history curves and Fourier spectrum

1.4 监测方案

对于土体,测点均匀布置于地表及其深度方向;对于车站结构,监测其顶板及中柱柱端弯矩及加速度、速度、位移响应等。考虑到模型是对称的,仅取一半进行监测,测点布置如图4所示。

表2 计算工况表

Table 2 List of calculation conditions

工况	输入方向	地震波	幅值	结构形式
1		El-	0.1g	自由场
2	水平	Centro	0.5g	
3	X向	Kobe	0.1g	
4			0.5g	
5		El-	0.1g	单体车站
6	水平	Centro	0.5g	
7	X向	Kobe	0.1g	
8			0.5g	
9		El-	0.1g	换乘站
10	水平	Centro	0.5g	
11	X向	Kobe	0.1g	
12			0.5g	
13		El-	0.1g	换乘站
14	水平	Centro	0.5g	
15	Y向	Kobe	0.1g	
16			0.5g	
17	X、Y向同时	El- Centro	0.1g(X向)+0.085g(Y向)	换乘站
18	三向同时	El- Centro	0.1g(X向)+0.085g(Y向)+0.065g(Z向)	换乘站

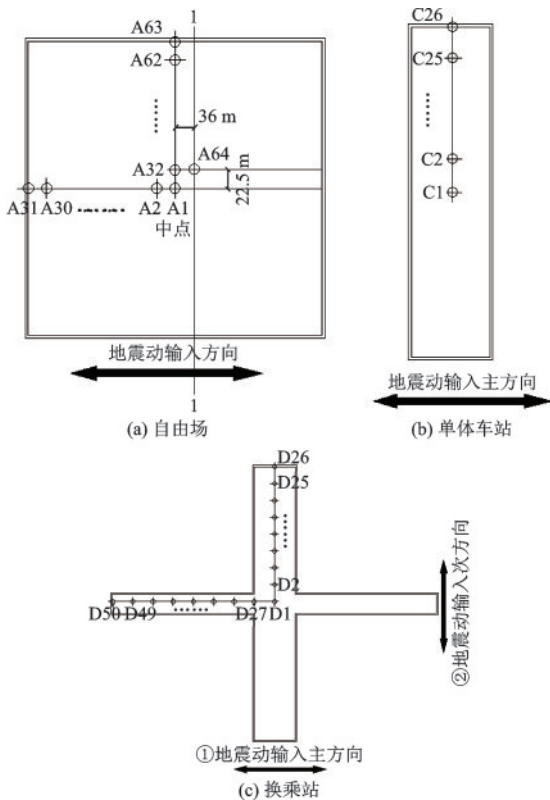


图4 模型测点布置图

Fig.4 Distribution of measuring points on the model

2 单体车站与换乘站对比

2.1 车站结构对土体响应的影响分析

地震波在土体中由基底向上传播的过程中,受到地下结构边界的影响,其传播路线发生变化,从而导致土体响应也产生变化。自由场、单体车站及换乘站的地表中点A1的加速度时程曲线在3种工况下的响应规律较为相似,但其幅值存在明显差异,如图5所示。

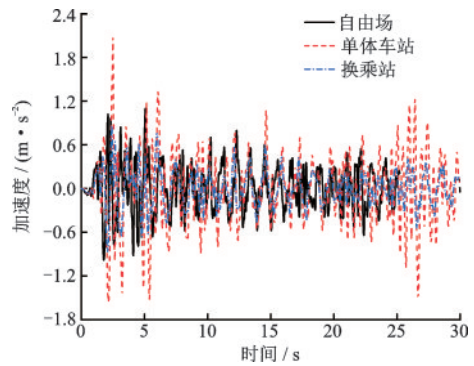


图5 0.1g El-Centro波作用地表中点A1加速度时程曲线

Fig.5 Time-history curves of the horizontal acceleration of the mid-point A1 of the soil surface under 0.1g El-Centro wave

进一步提取加速度时程中的幅值,并定义其与输入地震动幅值的比值为土体放大系数,得到表3。由土体表面加速度幅值可以看出,单体车站>自由场>换乘车站,且该规律不受地震动类型及幅值的影响。这是由于换乘站结构的规模明显大于单车站,其在地震波向地表传播时起到的阻隔作用也越大,从而导致其响应相对较小,而单体车站虽然对地震波阻隔较小,但其却在一定程度上削弱了体系刚度,从而导致其地表响应大于自由场。以0.1g El-Centro波作用时为例,自由场、单体车站、换乘站的土体放大系数分别为1.12、2.12、0.88,可见地下

表3 地表加速度幅值及放大系数

Table 3 Surface acceleration amplitudes and amplification factors

输入波	自由场	放大系数	单体车站	放大系数	换乘站	放大系数
0.1g El	1.10	1.12	2.08	2.12	0.87	0.88
0.5g El	4.12	0.84	8.46	1.73	3.04	0.62
0.1g Kobe	1.44	1.47	1.78	1.81	1.28	1.31
0.5g Kobe	4.35	0.89	6.46	1.32	3.74	0.76

结构的存在与否及地下结构的尺寸大小会对场土的放大效应产生明显的影响,该效应必将进一步影响邻近地表结构的地震响应。

2.2 车站结构加速度响应

考虑到车站结构纵向跨中截面响应较大,分别取单体车站及换乘站结构顶板中点C1及D1,同时考虑到换乘站换乘节点及端墙的影响,取换乘站半结构纵向跨中测点D13,得到如图6所示的加速度时程曲线,可见3个测点的加速度时程趋势基本一致,但其幅值存在明显不同。不同地震波作用下加速度放大系数均存在以下规律(表4):单体车站纵向跨中C1点>换乘站纵向跨中D13点>换乘站换乘节点D1点,原因在于换乘站相比单体车站而言平面尺寸更大,地震波从基底经由土体向结构顶板传播过程中的阻隔作用也越大,从而导致其结构顶板加速度响应相对于单体车站较小。

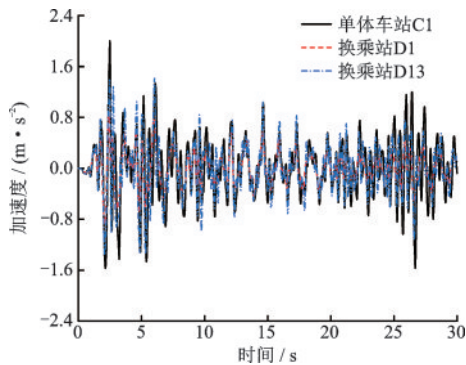


图6 0.1g El-Centro波作用车站结构顶板水平加速度时程
Fig.6 Time-history curves of horizontal acceleration of points in the top plate of the structure under 0.1g El-Centro wave

表4 车站结构顶板加速度幅值及其放大系数

Table 4 Structural acceleration amplitudes and amplification factors

输入波	C1点	放大系数	D1点	放大系数	D13点	放大系数
0.1g El-Centro	2.00	2.04	0.85	0.86	1.43	1.45
0.5g El-Centro	8.14	1.66	2.95	0.60	6.64	1.35
0.1g Kobe	1.82	1.85	1.28	1.31	1.68	1.72
0.5g Kobe	6.57	1.34	3.84	0.78	4.92	1.00

2.3 车站结构相对变形分析

由于地下结构的破坏受周边土体的影响较大,故其具备一定的抵抗变形能力是非常必要的。为

避免端部效应的影响,取单体车站中部(C1-C27)及换乘站换乘节点(D1-D51)的顶层层间位移,得到如图7所示的相对位移时程曲线。可以发现:换乘站结构的层间相对位移小于单体车站,且相对于单体车站换乘站换乘节点的相对位移幅值最大减小73%,这是由于换乘站纵、横向都存在结构且本文暂未考虑变形缝的影响,故而单体车站刚度小于换乘站。此外,受土体非线性变形的影响,0.5g El-Centro波作用下车站结构层间位移表现出一定的残余变形。

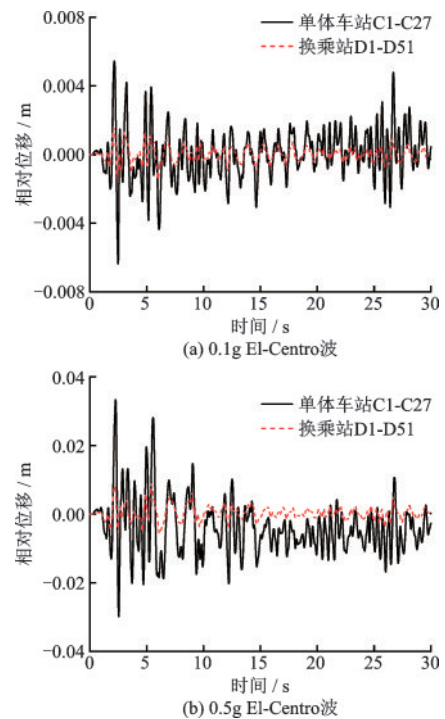


图7 结构顶层层间位移曲线

Fig.7 Interlayer displacement curves of the top structural layer

结合图7中结构最大相对变形值除以结构层高,得到如表5所示的结构顶层层间位移角,可见换乘站的层间位移角均较小,这可能与车站结构采用弹性模型有关,单纯从相对变形来看,可初步判断其满足弹性阶段的变形要求^[16],且换乘站的抗震性能要优于单体车站。

表5 车站结构顶层的层间位移角

Table 5 Inter-layer displacement angle of structure top layer

	0.1g El Centro	0.5g El-Centro	0.1g Kobe	0.5g Kobe
单体车站	1/944	1/180	1/723	1/162
换乘站	1/3 773	1/680	1/2 205	1/548

3 水平主、次方向单向激震对比

考虑到换乘站结构横向和纵向的跨度及层数均不同,其抗震性能也必然存在一定的差异,故对结构在主、次方向分别单向激震时结构及其周围土体的地震响应进行对比分析,其中,主、次方向激震分别对应两层六跨、三层三跨车站的横向激震方向。

3.1 换乘站对土体响应的影响分析

从自由场和换乘站主、次方向分别激震时其地表中点 A1 加速度幅值(表 6)来看,自由场 > 次方向输入 > 主方向输入,且以 0.1g Kobe 波为例,换乘站主、次方向激震时的土体放大系数相比自由场分别减小了 25% 和 20%,这是由于次方向激震对应于换乘站结构三层三跨车站的横向抗震,其跨度相对较小,相对于主方向输入其对地震波的隔断效果较弱,导致次方向输入时其土体地表响应大于主方向输入。

表 6 地表中点 A1 加速度幅值及放大系数

Table 6 Surface acceleration amplitudes and amplification factors

输入波	自由场/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大 系数	主方向 输入/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大 系数	次方向 输入/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大 系数
0.1g El-Centro	1.10	1.12	0.88	0.89	0.96	0.98
0.5g El-Centro	4.81	0.98	3.54	0.72	4.05	0.83
0.1g Kobe	1.80	1.84	1.35	1.38	1.45	1.48
0.5g Kobe	5.81	1.19	4.72	0.96	5.29	1.08

3.2 换乘站顶板加速度分析

从换乘站主、次方向激震时结构顶板中点加速度幅值(表 7)来看,次方向输入 > 主方向输入,且以 0.1g Kobe 波为例,次方向激震时的结构加速度响应相比主方向激震增大了 7.9%,这也是由于次方向激震所对应的结构宽度相对较小的缘故。

3.3 换乘站相对变形分析

换乘站结构中点的顶层层间位移角见表 8。以 0.1g Kobe 波为例,主方向输入的层间位移角是次方

表 7 换乘站顶板 D1 点加速度幅值及放大系数

Table 7 D1 acceleration amplitudes and amplification factors of the point D1 in the top plate of the structure

输入波	主方向输入/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大 系数	次方向输入/ ($m \cdot s^{-2}$)	放大 系数
0.1g El-Centro	0.88	0.90	0.97	0.99
0.5g El-Centro	3.61	0.74	3.81	0.78
0.1g Kobe	1.37	1.39	1.47	1.50
0.5g Kobe	4.79	0.98	5.49	1.12

表 8 车站结构顶层的层间位移角

Table 8 Interlayer displacement angle of structural top layer

	0.1g El-Centro	0.5g El-Centro	0.1g Kobe	0.5g Kobe
主方向输入	1/3 773	1/680	1/2 205	1/548
次方向输入	1/7 326	1/1 470	1/4 477	1/1 111

向输入的 2 倍,这是由于换乘站结构在激震主方向跨度(6 跨)相对次方向(3 跨)较大,故其结构整体刚度相对较小,导致其层间相对位移相对较大,这表明换乘站结构主次方向的跨度会对结构的相对位移响应产生显著影响,且跨度越大,结构相对位移响应越大。

4 车站结构空间效应分析

换乘站结构尺度较大,属于空间结构,不能简化为平面问题分析。但目前规范推荐的简化方法一般基于平面问题,如常见的荷载结构法(反应位移法)和地层结构法(反应加速度法)。为了指导工程实际,可先确定换乘站的空间影响范围,在影响范围外的部分可按传统的平面问题分析;而影响范围内的部分则可考虑在传统平面分析方法的基础上乘以一个影响系数以考虑空间效应。但目前对空间影响范围的研究并不多见,采用何种指标评价空间效应也不统一。因此,本节采用车站顶板加速度、车站顶层层间相对位移、柱端弯矩和柱顶能量等 4 个指标,探究单体车站和换乘站的空间效应。由于边墙的影响,在靠近换乘节点和端墙区域响应值相对较小,而换乘节点与端墙之间中间部分的响应较大,且幅值变化不大。因此,选取结构跨中截

面的响应作为基准值(单体车站C13、换乘站D13),得到其他截面的响应与基准值的比值。由于缺乏统一规定,且从图8~11所示的结构加速度、相对位移、能量及弯矩比值来看, $A_i/A_{13} < 0.9$ 时,比值曲线会有相对明显的下降趋势,因此本文暂统一规定当 $A_i/A_{13} \geq 0.9$ 时可认为该区域不受车站端墙或换乘节点的影响(其中 A_i 为分析的响应量,如加速度、层间位移、能量和弯矩,而 A_{13} 为纵向跨中截面的响应量)。

能量计算方法参照公式(1)^[17]:

$$E_{\text{总}} = \int_0^T V^2 dt \quad (1)$$

其中, T 为地震波作用时间; V 为测点每一时刻对应的速度。

4.1 单体车站空间效应

4.1.1 柱顶加速度变化分析

通过监测单体车站结构纵向跨中C1点加速度达到幅值时的C1-C26点加速度值,得到如图8所示加速度幅值由结构中心到端墙的变化曲线及其与参考点(C13)的比值曲线,横坐标零点表示结构中心C1点的加速度值。

由图8可知,在不同类型和幅值的地震波作用下,车站顶板加速度幅值从结构跨中到端墙均呈现先平稳再降低的趋势,可见车站端墙的存在会降低结构靠近端部一定范围内的加速度响应。而从车站顶板加速度比值 A_i/A_{13} 来看,当 $A_i/A_{13} < 0.9$ 时,端墙的最大影响范围约为63 m,即 $7B/6$ (B 为车站宽度,54 m)。

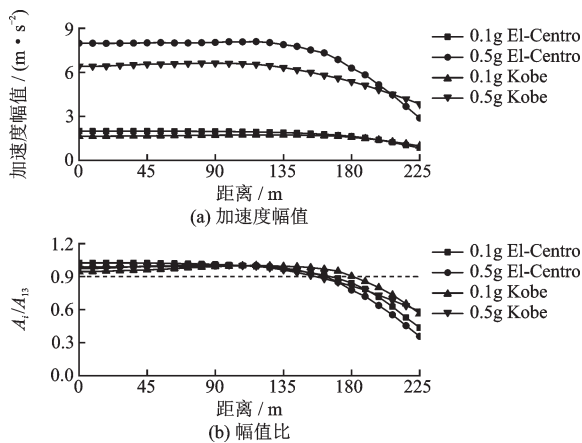


图8 结构顶板各点加速度幅值及其与参考柱比值

Fig.8 Acceleration amplitude of structural roof and its ratio to reference point

4.1.2 顶层中柱相对位移变化分析

单体车站结构顶层层间位移幅值沿车站长度方向变化曲线如图9所示。可见单体车站结构的层间相对位移幅值从结构中心到端墙均呈现先平稳再降低的趋势,且受Kobe波的影响比El-Centro波更大。从车站顶层中柱相对位移比值 U_i/U_{13} 来看,当 $U_i/U_{13} < 0.9$ 时,端墙的最大影响范围约为54 m,可见空间效应影响范围约为 B ,但其受不同地震动类型及幅值的影响较小。

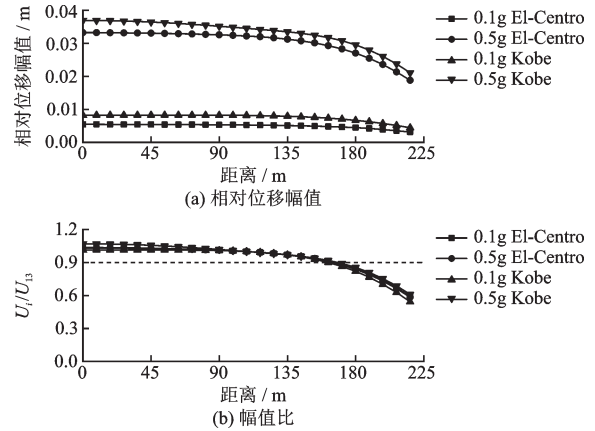


图9 结构顶层各柱相对位移及其与参考点比值

Fig.9 Relative displacement of each column on the top layer of the structure and its ratio to the reference point

4.1.3 柱顶能量变化分析

由图10所示的 E_i/E_{13} 曲线可得:单体车站柱顶能量比值在不同地震波作用下的变化趋势较为相似;取最大的影响范围,在距离端墙约54 m范围内柱端能量比值 $E_i/E_{13} < 0.9$,即空间效应影响范围约为 B 。

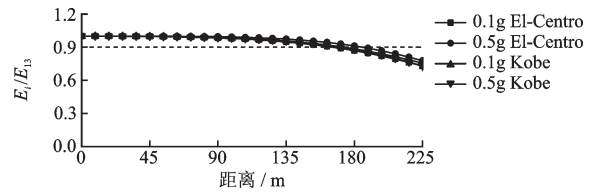


图10 单体车站的 E_i/E_{13} 曲线

Fig.10 E_i/E_{13} curves of the single station

4.1.4 柱端弯矩变化分析

如图11所示,单体车站结构的柱端弯矩幅值从结构中心0 m到154 m段相对趋于平稳,在154 m处(即距端墙66 m时)弯矩开始明显下降,充分体现了端墙对结构弯矩的影响,从弯矩比值来看,在距离端墙约72 m范围内 $M_i/M_{13} < 0.9$,即其空间效应影响范围约为 $4B/3$ 。

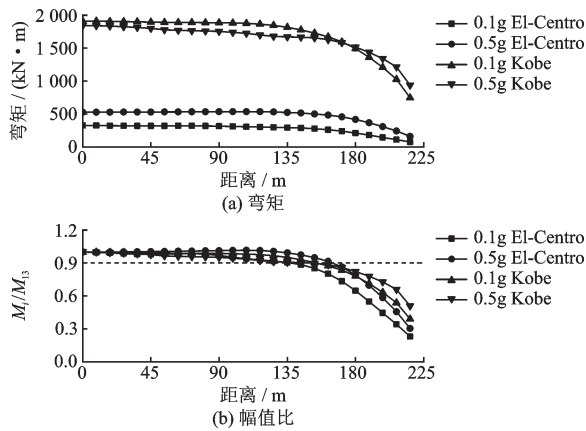


图 11 结构柱顶弯矩及其与参考点比值

Fig.11 Bending moment at the top of the structural column and its ratio to the reference point

综合加速度、相对位移、能量与弯矩的分析结果可以发现,从弯矩角度得出的影响范围相对较大,即单体车站受端墙影响范围为 $4B/3$,如图 12 所示。该影响范围与《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[16]的推荐值 $1.5B$ 接近。

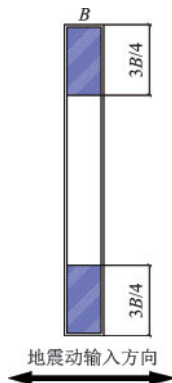


图 12 单体车站结构的空问效应影响范围

Fig.12 Space effect area of a single station

4.2 换乘站空间效应

4.2.1 柱顶加速度变化分析

由图 13 所示的换乘站柱顶加速度变化曲线可以看出:(1)在不同地震动类型和幅值的地震波作用下,换乘站结构的顶板加速度幅值从结构中点到端墙均呈现先增加再平稳而后降低的趋势,可见车站换乘节点和端墙的存在会降低结构靠近换乘节点和端墙一定范围内的加速度响应;(2)从车站顶板加速度比值 A_i/A_{13} 来看,当 $A_i/A_{13}<0.9$ 时,换乘节点和端墙的最大影响范围分别为 81 m、54 m,即空间效应影响范围约为 $3B/2$ (换乘节点附近)、 B

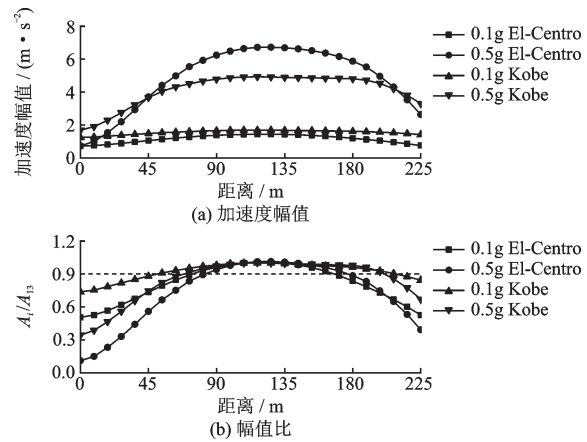


图 13 结构顶板加速度幅值及其与参考柱比值

Fig.13 Acceleration amplitude of structural roof plate and its ratio to the reference point

(端墙附近)。

4.2.2 顶层中柱相对位移变化分析

由图 14 所示换乘站顶层中柱相对位移变化曲线可得:(1)换乘站结构的层间相对位移幅值从结构中点到端墙均呈现先增加再降低的趋势,且受地震动幅值和类型的影响;(2)从车站顶板相对位移比值 U_i/U_{13} 来看,当 $U_i/U_{13}<0.9$ 时,换乘节点、端墙的最大影响范围分别为 81 m、27 m,即空间效应影响范围约为 $3B/2$ (换乘节点附近)、 $1B/2$ (端墙附近),且受不同地震动的影响较小。

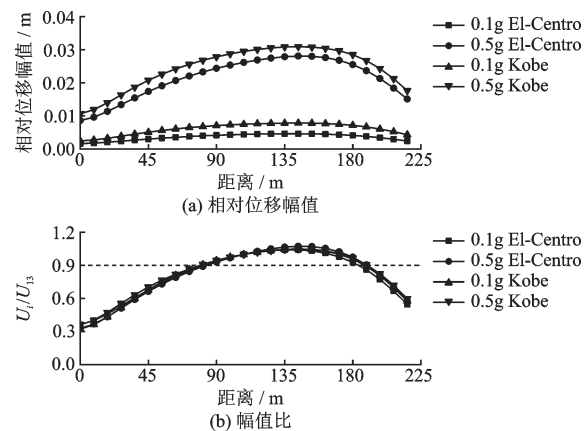


图 14 结构顶层中柱相对位移及其与参考点比值

Fig.14 Relative displacement of each column on the top layer of the structure and its ratio to the reference point

4.2.3 柱顶能量变化分析

结合图 15 所示的 E_i/E_{13} 曲线,取影响范围的较大值,在距离换乘节点约 72 m 范围内,柱顶能量比 $E_i/E_{13}<0.9$,即空间效应影响范围为 $4B/3$ (换乘节点附近)、 $0B$ (端墙附近)。

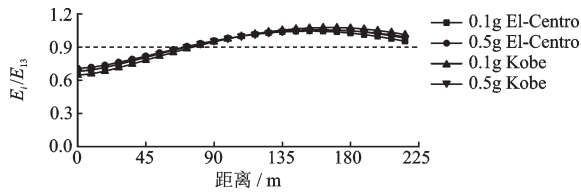


图 15 换乘车站的 E_i/E_{13} 曲线

Fig.15 E_i/E_{13} curves of the transfer station

4.2.4 柱端弯矩变化分析

换乘站结构的柱端弯矩幅值受地震动类型及幅值的影响如图 16 所示。在地震动幅值较大时,这种现象尤为明显。当 $M_i/M_{13} < 0.9$ 时,可知换乘节点附近 81 m 和端墙附近 36 m 为受空间影响区域,即换乘站换乘节点、端墙的空间影响范围分别为 $3B/2$ 、 $2B/3$,且换乘节点的影响范围比端墙大 1.25 倍。

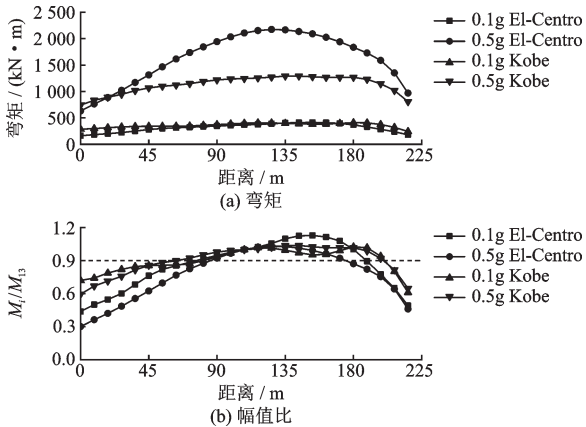


图 16 结构柱顶弯矩及其与参考点比值

Fig.16 Bending moment at the top of structural column and its ratio to the reference point

综合上述加速度、相对位移、能量与弯矩的分析结果并取较大值,即认为换乘车站受端墙影响区域约为 B ,而受换乘节点影响区域约为 $3B/2$ 。

4.3 地震动输入方向对换乘站空间效应的影响

换乘站作为典型的空问结构,其在多向地震作用下效应值得关注,因此,以 0.1g El-Centro 波为例,探究单向、双向及三向激震对换乘站结构空间效应的影响,并从加速度、相对位移、能量、弯矩 4 个方面入手,得到其与参考点的比值曲线,如图 17 所示。将比值小于 0.9 的区域认为是空间效应影响范围。

换乘节点与端墙的空间效应影响范围见表 9、10。从影响范围最大值来看,若以单向输入为基

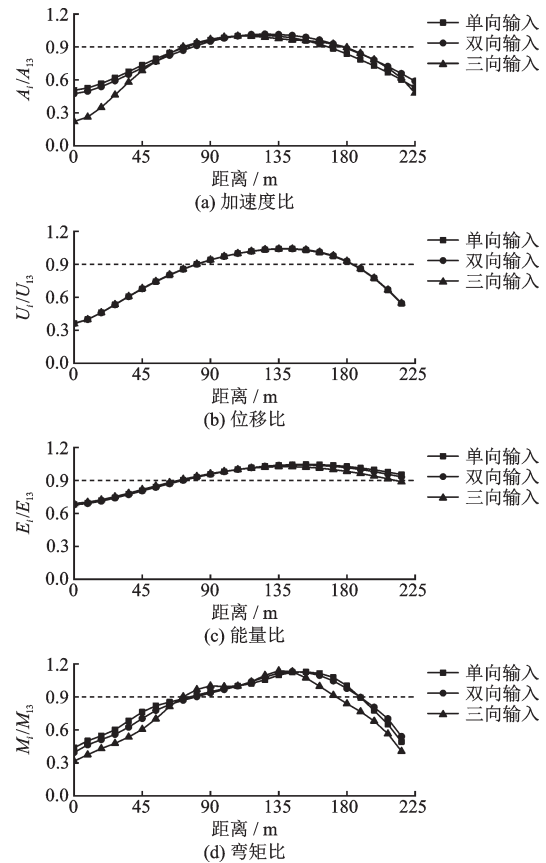


图 17 车站结构加速度、相对位移、能量、弯矩与其参考点比值

Fig.17 Ratio of acceleration, relative displacement, energy and bending moment of station structure to the reference point

表 9 换乘节点空间效应影响范围

Table 9 Range of influence of the transfer node space effect

方向	加速度	相对位移	能量	弯矩	最大值
单向激震	4B/3	3B/2	4B/3	4B/3	3B/2
双向激震	4B/3	3B/2	4B/3	3B/2	3B/2
三向激震	4B/3	3B/2	4B/3	4B/3	3B/2

表 10 端墙空间效应影响范围

Table 10 Range of influence of the endwall space effect

方向	加速度	相对位移	能量	弯矩	最大值
单向激震	B	2B/3	0	2B/3	B
双向激震	5B/6	2B/3	0	2B/3	5B/6
三向激震	5B/6	2B/3	B/6	5B/6	5B/6

准,双向、三向地震动输入下,其换乘节点的影响范围与单向基本一致,而端墙影响范围相比单向输入降低约 17%,双向、三向输入基本一致。由此可以看出,地震动激震方向对换乘站结构的空问效应影

响较小。

综上所述,换乘站的空间效应影响范围可以确定为:受端墙影响范围约为 B ,受换乘节点影响范围约为 $3B/2$ (B 为结构宽度),其它区域可简化为平面问题进行分析,如图18所示。

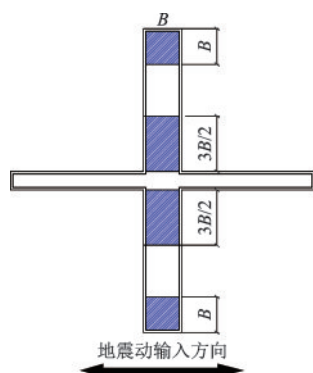


图18 换乘站结构的空问效应影响范围

Fig.18 Range of influence of the transfer station space effect

对比图12所示单体车站空问效应可以发现,相对于单体车站端部影响范围 $4B/3$,换乘站的端部影响范围降低为 B ,而换乘节点影响范围增加,表明由于换乘节点刚度较大的缘故,结构响应由端墙向换乘节点发生了转移。

5 结论与展望

(1)相对于单体车站,换乘站结构及其周围土体加速度响应、相对位移均小于单体车站,表明其整体抗震性能优于单体车站。一方面可能是由于换乘站平面尺寸较大,对地震波在土体中的传播有一定阻隔作用,从而导致地表加速度响应减小;另一方面,换乘车站在纵、横两个方向都有结构,其整体刚度相对较大。

(2)对于纵、横向结构跨度不同的换乘站结构,在纵、横向分别输入地震动时,车站跨度越大,土体及结构加速度响应越小,而相对变形越大。

(3)换乘站空问效应受地震动激震方向的影响较小,其中端墙的影响范围为 B ,十字换乘节点的影响范围为 $3B/2$ (B 为车站宽度),其它区域可简化为平面问题进行分析。

对于地下换乘地铁车站的研究,仍有待进一步进行全面的计算分析,如:考虑不同换乘形式的影响、换乘站与地上结构的相互作用、非一致地震动

对大型换乘站的影响等。另外,在换乘站建模上,应进一步考虑工程实际中的工程缝等。

参考文献:

- [1] 陈国兴,陈苏,杜修力,等.城市地下结构抗震研究进展[J].防灾减灾工程学报,2016,36(1):1-23.
Chen G X, Chen S, Du X L, et al. Review of seismic damage, model test, available design and analysis methods of urban underground structures: retrospect and prospect[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36 (1): 1-23. (in Chinese)
- [2] Hashash Y M A, Hook J J, Schmidt B, et al. Seismic design and analysis of underground structures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16 (4): 247-293.
- [3] 杜修力,王刚,路德春.日本阪神地震中大开地铁站地震破坏机理分析[J].防灾减灾工程学报,2016,36(2):165-171.
Du X L, Wang G, Lu D Ch. Earthquake damage mechanism analysis of Dakai metro station by Kobe Earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 165-171. (in Chinese)
- [4] Zhuang H Y, Hu Z H, Wang X J, et al. Seismic responses of a large underground structure in liquefied soils by FEM numerical modelling[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(12): 3645-3668.
- [5] Ma C, Lu D Ch, 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.
- [6] Chen S, Tang B Z, Zhao K, et al. Seismic response of irregular underground structures under adverse soil conditions using shaking table tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95: 103145.
- [7] 张宇. T型交叉换乘车站地震反应和损伤分析[D].北京:北京交通大学,2017.
Zhang Y. The analysis of seismic response and damage of T-shaped transfer station[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [8] 袁蕾,姜忻良.地铁换乘站不规则结构对其地震响应的影响[J].地震工程与工程振动,2011,31(1):74-79.
Yuan L, Jiang X L. Influence of irregular structure of subway transfer station on its seismic responses [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,

- 2011, 31(1): 74-79. (in Chinese)
- [9] 黄锐财. 地铁车站换乘节点地震响应分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
Huang R C. Seismic response analysis of subway station transfer nodes[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [10] 王国波, 余森坤, 袁明智, 等. 十字换乘地铁车站结构地震响应分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1227-1234.
Wang G B, Yu M K, Yuan M Z, et al. Seismic response analysis of cross metro transfer station structure [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1227-1234. (in Chinese)
- [11] 季倩倩. 地铁车站结构振动台模型试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
Ji Q Q. Shaking table testing on underground subway station structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese)
- [12] Kuhlemeyer R L, Lysmer J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1973, 99(5): 421-427.
- [13] 楼梦麟, 潘旦光, 范立础. 土层地震反应分析中侧向人工边界的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(7): 757-761.
Lou M L, Pan D G, Fan L C. Effect of vertical artificial boundary on seismic response of soil layer[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2003, 31(7): 757-761. (in Chinese)
- [14] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [15] 赵丁凤, 阮滨, 陈国兴, 等. 基于 Davidenkov 骨架曲线模型的修正不规则加卸载准则与等效剪应变算法及其验证[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(5): 888-895.
Zhao D F, Ruan B, Chen G X, et al. Validation of modified irregular loading-unloading rules based on Davidenkov skeleton curve and its equivalent shear strain algorithm implemented in ABAQUS[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 888-895. (in Chinese)
- [16] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [17] Bard P Y, Chazelas J L, Guéguen P, et al. Site-city interaction [M]. Springer, Dordrecht: [s. n.], 2008: 91-114.

(本文责编: 赵霞)