

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2023.06.003

埋深比对地铁车站与临近多层建筑峰值加速度响应的影响

汪博豪^{1,2}, 龙 慧^{1,2*}, 丘志杰^{1,2}, 刘璐瑶^{1,2}

(1. 南华大学 土木工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学 高性能特种混凝土湖南省重点实验室, 湖南 衡阳 421001)

摘 要: 为了对城市密集建筑区的抗震设计提供理论依据和参考, 以三层三跨岛式车站和多层框架建筑为研究对象, 采用有限元软件 Abaqus 对层状场地中由地铁车站与两个框架结构所组成的左右对称模型进行数值模拟实验, 分析了不同埋深比对结构-土-结构相互作用(structure-soil-structure interaction, SSSI)效应的影响规律。结果表明, 在地震作用下, 当地铁车站埋深比小于等于 1.5 时, 地铁车站与临近多层框架建筑间的 SSSI 效应对车站下半部分和上方框架结构所产生的不利影响值得重视; 在埋深比增大过程中, 临近建筑对车站上半区域的有利影响以及对车站整体的其他影响逐渐减弱, 而车站对临近建筑的影响会整体趋向有利; 地震动的频谱特性是地铁车站与临近多层建筑间地震反应的主要影响因素之一。

关键词: 结构-土-结构动力相互作用; 地震加速度响应; 埋深比; 非线性

中图分类号: TU435 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-0062(2023)06-0015-09

Influence of Buried Depth Ratio on Peak Acceleration Response of Subway Station and Adjacent Multi-story Buildings

WANG Bohao^{1,2}, LONG Hui^{1,2*}, QIU Zhijie^{1,2}, LIU Luyao^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. Key Laboratory of High Performance Special Concrete in Hunan Province, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In order to provide theoretical basis and reference for seismic design of urban dense building area, taking three-story three-span island station and multi-story frame building as research objects, the numerical simulation experiment of left-right symmetrical model composed of subway station and two frame structures in layered site was carried out by using finite element software Abaqus, and the influence of different buried depth ratio

收稿日期: 2023-08-15

基金项目: 湖南省教育科研项目优秀青年项目(21B0420)

作者简介: 汪博豪(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事结构抗震方面的研究。E-mail: 1939206498@qq.com。* 通信作者: 龙 慧(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程领域方面的研究。E-mail: 28748388@qq.com

on structure-soil-structure interaction (SSSI) effect was analyzed. The results show that under the earthquake, when the buried depth ratio of the subway station is less than or equal to 1.5, the adverse effects of the SSSI effect between the subway station and the adjacent multi-story frame buildings on the lower half of the station and the upper frame structure should be paid attention to. In the process of increasing the buried depth ratio, the favorable influence of the adjacent buildings on the upper half of the station and other effects on the whole of the station gradually weakens, while the influence of the station on the adjacent buildings tends to be favorable as a whole. The frequency spectrum characteristic of ground motion is one of the main factors affecting the seismic response between subway station and adjacent multi-story buildings.

key words: structure-soil-structure dynamic interaction; seismic acceleration response; buried depth ratio; nonlinear

0 引言

地铁作为城市公共交通的重要组成部分,在城市快速发展的过程中扮演着越来越重要的角色。根据 2020 年我国交通运输部发布的数据,中国城市轨道交通运营里程已经超过 7 500 km,2020 年全国城市轨道交通客运量达到了 175.9 亿人次。其中,地铁运输成为城市公共交通系统中的主力军之一。而多层建筑作为大都市标志性建筑形态之一,它与邻近的地铁车站之间在地震来临时往往存在着相互作用。在地震发生时,地铁车站和周围多层建筑之间所产生的相互作用可能导致不同程度的破坏。例如,在 2017 年墨西哥地震中,墨西哥城一条地铁线路遭到严重破坏。这条地铁的部分线路穿过多层建筑区域,地震发生时地铁车站与周围的多层建筑发生了不同程度的倾斜和部分坍塌,这很可能与车站及周边多层建筑物的动力相互作用有关。因此,深入研究地铁车站与两侧多层建筑相互作用体系的地震加速度响应影响具有重要的理论和实践意义。

地震作用下地下结构与地上结构的动力响应研究一直以来都是备受关注和具备热度的话题。目前已有多项数值模拟研究表明邻近地上结构与地下结构会影响甚至显著增加彼此的地震响应。从研究内容可发现,结构间距作为地下结构与临近建筑 SSSI 效应的主要影响因素之一始终是学者们积极钻研的角度。其中,地上-地下结构间距分为平行于水平面的水平距离和纵向的地下结构埋深两类。王淮峰等^[1]用结构间水平位置的无量纲参数分析邻近典型高层框架结构对地下车站动力响应的影响,并表明随着结构间距增加,相互作用迅速减小。而与王淮峰不同的是,一些学者

并未对间距做无量纲处理而是依靠绝对数值来衡量结构间的远近关系。例如,J. Guo 等^[2]依靠绝对水平距离分析矩形地铁车站对相邻地表多层建筑层间位移比的影响;K. Pitilakis 等^[3]通过改变隧道绝对埋深,对由地上等效单自由度振子结构、圆形隧道和砂土所组成模型进行动力时程分析,得出地上结构更易对浅埋隧道的地震反应有显著影响;Y. Miao 等^[4]对由建筑物、隧道和土壤组成的系统的地震响应进行了数值模拟,且考虑的水平距离与地铁埋深均为绝对参数。此外,部分学者对间距的把控也有自己独到的风格。H. F. Wang 等^[5-6]对模型地铁车站-黏弹性土-桩支撑结构模型间距的选用为无量纲水平间距和绝对埋深。王国波等^[7]建立隧道-土体-地表邻近框架结构相互作用体系数值计算模型,利用隧道半径乘以倍数来表示结构间距,对比分析隧道与邻近框架结构之间地震响应影响规律,发现隧道埋深对地表临近结构的地震响应均有一定的影响。从上述的研究现状可以判断,可能由于研究侧重点的不同,学者们对地下结构埋深的无量纲处理并不常见。然而,研究需要一般性来为规范服务,规范更需要研究成果从定性向定量转变。因此有必要考虑结构尺寸与间距的相对关系并实现参数化,进而对地铁车站埋深做参数化处理,使用如图 1 所示无量纲埋深^[8]即埋深比(摘自《隧道抗震设计:一种简单的最先进的设计方法》^[8])。

综上,相邻结构间的 SSSI 效应对地铁车站的动力响应具有不可忽视的影响,且车站埋深不同时 SSSI 效应的影响也不尽相同。为探究不同埋深比下地铁车站与两侧多层框架建筑间的 SSSI 效应特征,本文基于苏州某Ⅲ类场地条件,对不同埋深比下的地铁车站与两侧多层框架建筑二维非

线性有限元模型开展与 SSSI 效应相关的峰值加速度响应研究,为城市密集建筑区地铁车站及相似结构的抗震设计提供理论依据和参考。

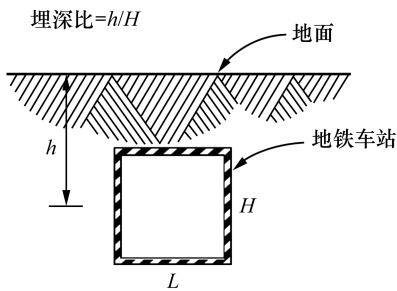


图 1 地铁车站埋深比

Fig. 1 The buried depth ratio of metro stations

1 二维有限元模型及输入地震动

1.1 模型信息

采用有限元分析软件 Abaqus,建立地铁车站-土体-多层框架建筑系统的二维非线性静动力耦合

有限元分析模型。如图 2 所示,两侧的多层建筑物为拥有一层地下室的六层四跨式框架结构,地下室高 3.9 m,标准层高 3 m,中间两跨的柱中距为 5.4 m,边跨和纵向的柱中距为 6 m,柱截面尺寸为 0.6 m×0.6 m;梁截面尺寸为 0.2 m×0.6 m,楼板和屋顶板厚度为 0.1 m,填充墙厚度取 0.2 m 且密度为 1 800 kg/m³;基础采用 0.5 m 厚平板式筏板基础,挑出宽度为 0.6 m。地铁车站始终在筏板基础下侧,其总宽 23.9 m,总高 20.3 m,边墙高 19.3 m,边跨宽 8.15 m,中跨宽 6.6 m;上层顶板和下层底板均厚 1 m,中层顶板和底板厚 0.4 m;上层中柱高 4.5 m,中、下层中柱高 4.9 m,截面尺寸为 0.9 m×0.9 m,纵向柱距为 9 m。二维建模时,采用等刚度比原则将柱转化为连续墙、梁转化为连续板,使三维问题转化为二维平面应变问题^[9]。假定地铁地下车站和多层建筑均采用 C30 混凝土,其动力特性依据黏塑性动力损伤本构模型^[10]来描述,混凝土塑性损伤模型的参数如表 1 所示。

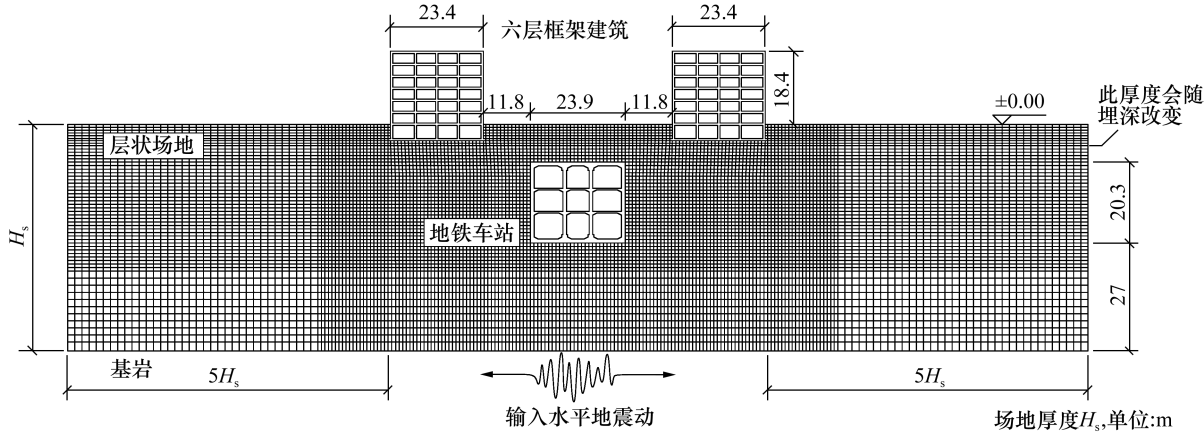


图 2 地铁车站-土-六层框架建筑二维有限元模型

Fig. 2 Two dimensional finite element model of subway station, soil and six-story frame building

表 1 混凝土塑性损伤模型的参数

Table 1 Parameters of plastic damage model of concrete

模型参数	值
密度/(kg·m ⁻³)	2 400
弹性模量/MPa	3.0×10 ⁴
膨胀角/(°)	32.4
泊松比	0.18
初始屈服拉应力/MPa	2.4
极限压应力/MPa	24.5

选择苏州地区某典型Ⅲ类场地作为模型场地

条件,地铁车站顶面以下各土层厚度与基本参数始终不变,而顶面以上的素填土和软黏土只有厚度随埋深比的变化而变化,即地震波从基岩到地下结构的传播介质、地下结构与两侧土的相对刚度和地铁车站与周围土的摩擦系数都不发生改变。模型底部为基岩地震动输入面,具体土层信息如表 2 所示。为确保足够的精度,场地范围需从地表结构外边缘扩大到等于场地厚度 H_s 的 5 倍^[6],以此来削弱在输入地震动时侧边界反射波所带来的影响。另外,场地土体的非线性特性采用 H. Y. Zhuang^[11-12]的黏塑性记忆嵌套表面本构模型加以实现。

表 2 场地土模型参数
Table 2 Site soil model parameters

土层编号	土体名称	厚度/m	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	内摩擦角/($^{\circ}$)	动态泊松比/ μ
1	素填土	/	18.4	140	16	0.49
2	软黏土	/	19	152.7	26	0.49
3	黏土	7.8	15	158.5	16	0.49
4	中砂	8	20.9	172.7	28	0.49
5	中砂	8	21.2	205.8	30	0.49
6	粉质黏土	9	33	236.3	28	0.49
7	老黏土	11	35	491.6	21	0.49

1.2 分析方法与输入地震动

结构单元采用平面应变全积分单元,网格尺寸为 $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$;场地土单元采用平面应变缩减积分单元,网格最小尺寸为 $0.9 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$,最大网格尺寸为 $1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ 。二者之间接触面的法向假定为“硬接触”(即土与结构之间只能产生压力,不能产生拉力),接触面的切向力学行为设置为“罚函数”(即接触面切向力为库伦摩擦力),切向摩擦系数取为 0.39。分析步的设置参考 H. Long 等^[13]

的静动力耦合分析方法,将整个过程分为三个分析步,以此来还原地震发生前和过程中实际的应力应变状况。最后,地震动选用一条苏州人工波(Suzhou Wave, SZ Wave)、一条远场地震波 Chi-Chi 波(Chi-Chi Wave, CC Wave)和一条近场地震波 Chuetsu-oki 波(Chuetsu-oki Wave, CH Wave),且地震动的峰值加速度全部调幅为 1 m/s^2 ,以模拟具备不同典型频谱特征的 40 s 地震动,它们的加速度时程曲线和傅氏谱如图 3、图 4 所示。

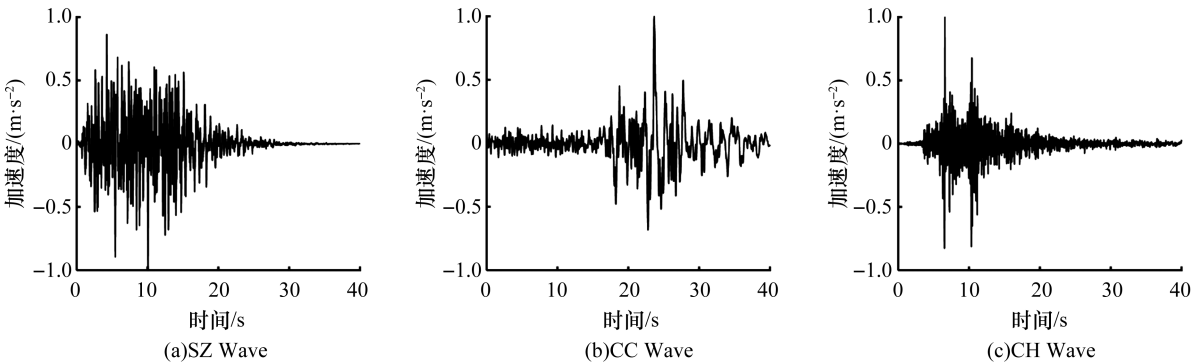


图 3 地震动加速度时程
Fig. 3 Acceleration time-histories of ground motion

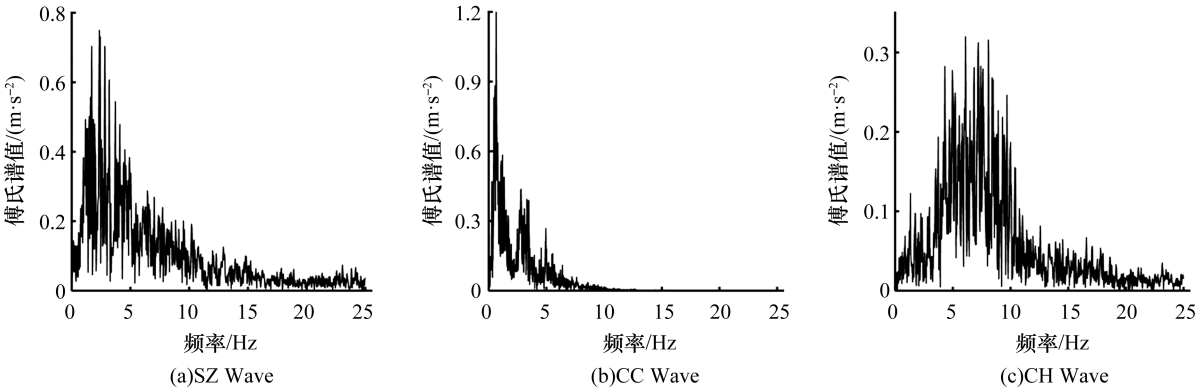


图 4 地震动傅氏谱
Fig. 4 Fourier spectra of earthquake wave

2 计算结果分析

2.1 影响参数与评价指标

为了实现地铁车站埋置深度的一般性,本文引入了埋深比 h/H ^[8] 作为参数化的影响因素,式中 h 为地铁车站水平中轴线深度, H 为车站的高度。如图 5 所示,框架结构 (frame structure, F), 地铁车站 (metro station, M), 模型 F-M-F 表示框架建筑-地铁车站-框架建筑在分层场地中左右对称排布的相互作用体系模型,模型 F-F 表示模型中仅有两栋框架建筑,模型 M 表示模型中仅有地铁车站。值得强调的是,场地的宽高尺寸随埋深比的改变而改变,故一个埋深比就对应一组分析模型(所谓的一组包括:一个模型 F-M-F、一个模型 F-F 和一个模型 M),本实验共建立了 5 个埋深比 ($h/H=0.9, 1.2, 1.5, 1.8, 2.1$) 条件下的五组分析模型。

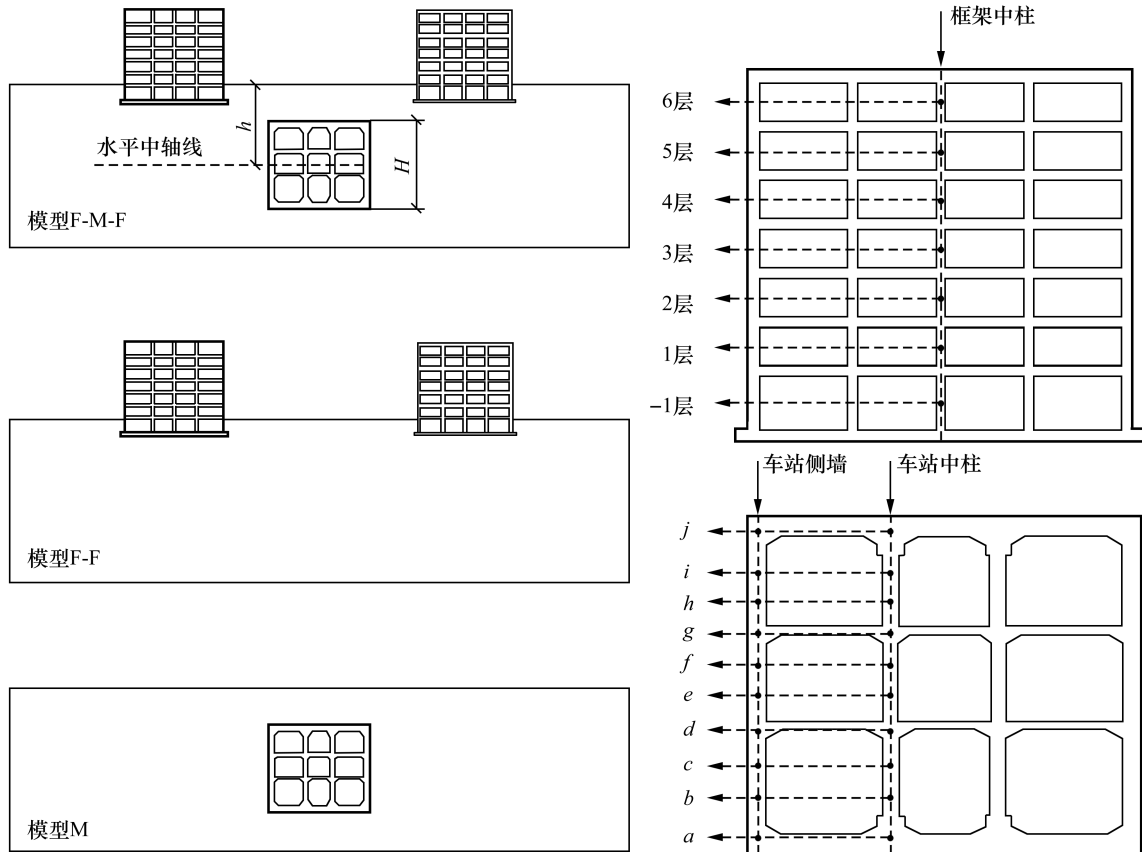


图 5 模型示意图(粗线内是需要提取数据的结构)

Fig. 5 Schematic diagram of model (within the thick line is the structure of the data to be extracted)

2.2 地铁车站峰值加速度反应分析

为了直观地反应两侧框架结构对下方地铁车站在三种地震波和五组埋深比下竖向构件的峰值

框架结构的峰值加速度影响系数 $E_F, \%$ 和地铁车站的峰值加速度影响系数 $E_M, \%$ 如式(1)、式(2)所示:

$$E_F = \frac{a_{ALL-F} - a_F}{a_F} \quad (1)$$

$$E_M = \frac{a_{ALL-M} - a_M}{a_M} \quad (2)$$

式中: a_{ALL-F} 表示在模型 F-M-F 中框架结构的峰值加速度反应,单位 m/s^2 ; a_{ALL-M} 表示在模型 F-M-F 中地铁车站的峰值加速度反应,单位 m/s^2 ; a_F 表示在模型 F-F 中框架结构的峰值加速度反应,单位 m/s^2 ; a_M 表示在模型 M 中地铁车站的峰值加速度反应,单位 m/s^2 。当峰值加速度影响系数为正时表明产生了不利影响,反之则产生有利影响,此外当该系数绝对值增大时表明影响程度增大。图 5 中圆点为峰值加速度提取点。

加速度 SSSI 响应情况,绘制了随埋深比变化的车站左侧侧墙和中柱峰值加速度影响系数图,如图 6、图 7 所示。其中,图 6 所表达的具体峰值加

速度影响系数信息如表3所示,以地震动缩写来表示模型所处工况,并以峰值加速度提取点字母名作为后缀来命名各工况下点位信息。例如,当

要给出苏州人工波作用下a处峰值加速度影响系数时,相关点位信息为SZ-a。

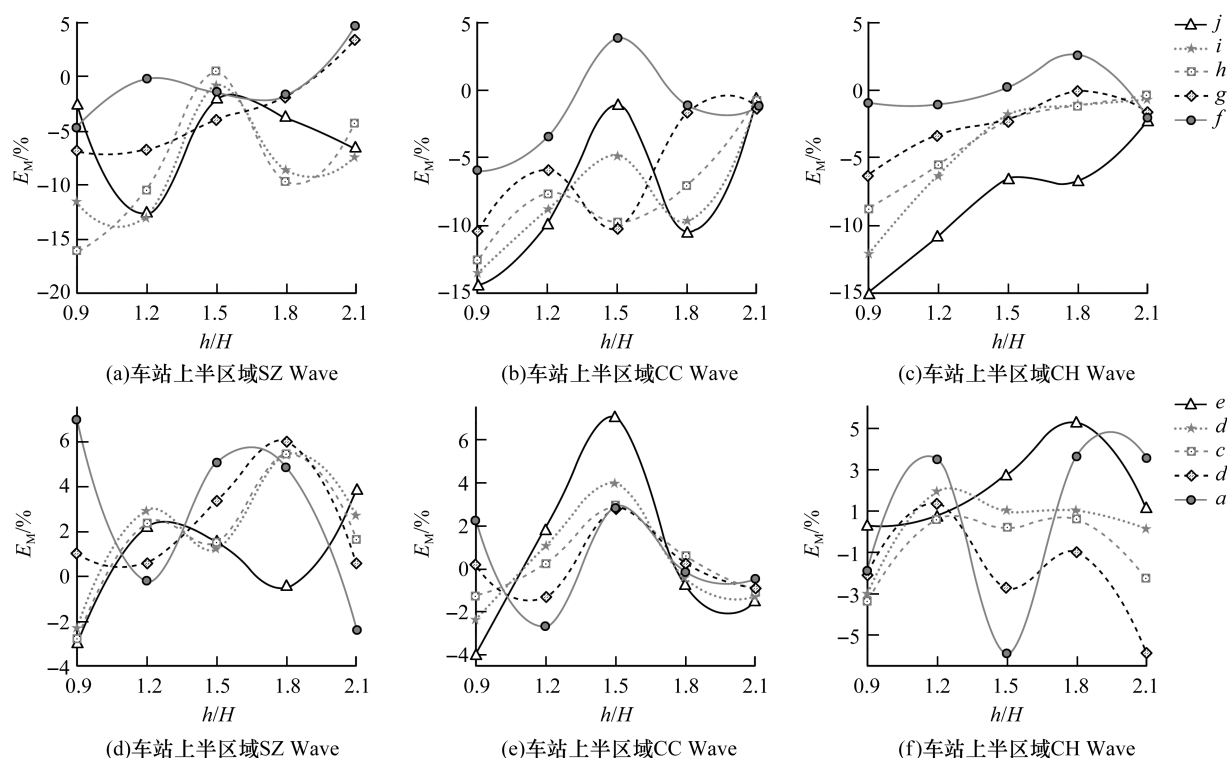


图6 地铁车站侧墙峰值加速度影响系数

Fig. 6 Influence coefficient of peak acceleration of subway station side wall

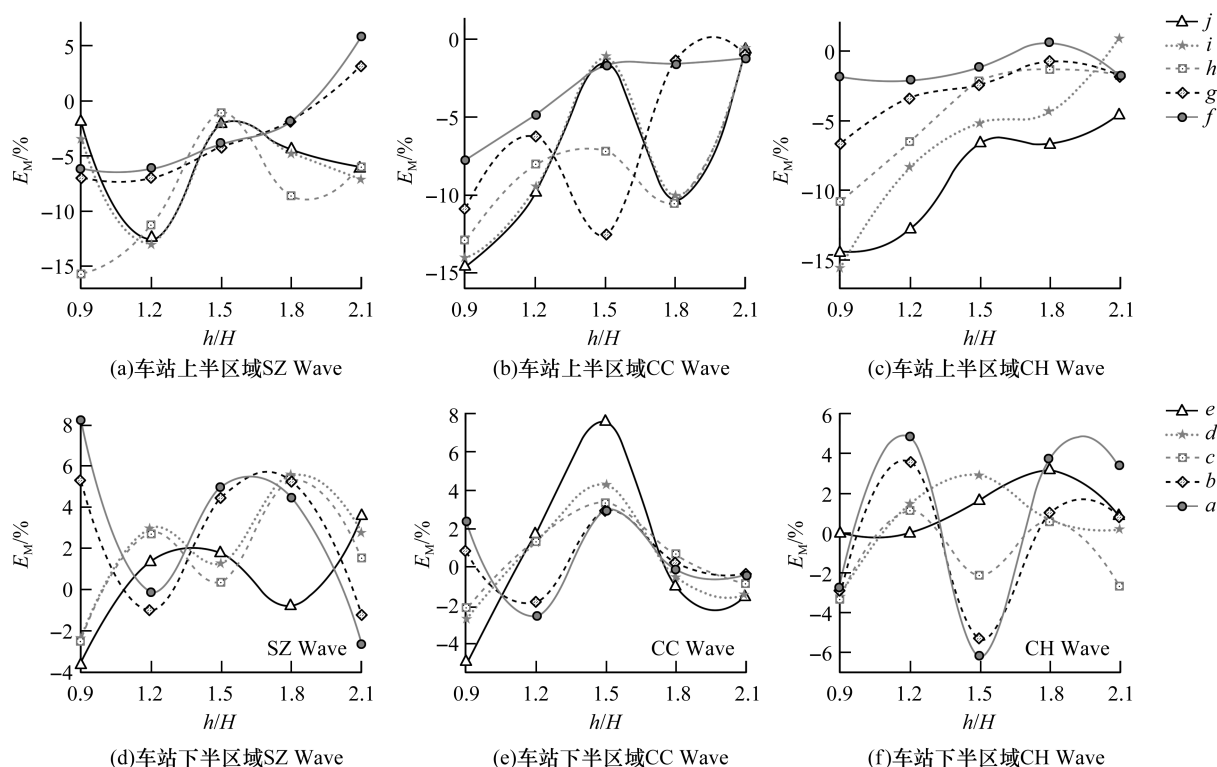


图7 地铁车站中柱峰值加速度影响系数

Fig. 7 Influence coefficient of peak acceleration of central column in subway station

表 3 地铁车站侧墙峰值加速度影响系数

点位信息	h/H				
	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1
SZ-a	6.98	-0.23	5.04	4.83	-2.42
SZ-b	1.01	0.60	3.32	5.96	0.58
SZ-c	-2.81	2.33	1.48	5.42	1.64
SZ-d	-2.30	2.91	1.18	5.39	2.71
SZ-e	-3.07	2.12	1.54	-0.52	3.82
SZ-f	-4.71	-0.26	-1.48	-1.78	4.61
SZ-g	-6.93	-6.76	-4.03	-1.85	3.29
SZ-h	-16.06	-10.43	0.37	-9.69	-4.35
SZ-i	-11.51	-12.85	-0.87	-8.66	-7.46
SZ-j	-2.68	-12.68	-2.18	-3.81	-6.76
CC-a	2.23	-2.68	2.89	-0.16	-0.53
CC-b	0.18	-1.32	2.79	0.26	-0.86
CC-c	-1.25	0.26	2.87	0.58	-1.00
CC-d	-2.36	1.05	3.97	-0.44	-1.32
CC-e	-4.04	1.81	7.05	-0.74	-1.56
CC-f	-5.97	-3.45	3.81	-1.13	-1.43
CC-g	-10.45	-5.91	-10.24	-1.71	-1.16
CC-h	-12.66	-7.66	-9.76	-7.07	-0.74
CC-i	-13.54	-8.85	-4.85	-9.71	-0.85
CC-j	-14.51	-9.89	-1.16	-10.48	-0.69
CH-a	-1.95	3.51	-5.91	3.66	3.56
CH-b	-2.15	1.32	-2.75	-1.04	-5.86
CH-c	-3.40	0.57	0.16	0.57	-2.27
CH-d	-3.07	1.89	0.98	1.00	0.13
CH-e	0.31	0.77	2.70	5.27	1.06
CH-f	-0.95	-1.08	0.16	2.62	-1.98
CH-g	-6.32	-3.34	-2.18	-0.13	-1.68
CH-h	-8.84	-5.64	-2.23	-1.20	-0.45
CH-i	-12.17	-6.37	-1.87	-1.18	-0.72
CH-j	-15.11	-10.89	-6.65	-6.78	-2.32

从峰值加速度影响系数随埋深比的变化趋势以及变化范围来看,不同水平地震动作用下地铁车站上竖向构件受上方多层框架结构的影响随埋深比的变化各具特色又不失共性。由图 6、图 7 可知:1)在 SZ Wave 作用下,上方框架结构对地铁车站上半部分的峰值加速度响应产生了相对有利影响,且最有利位置均在顶层中部位置(h 结

点),其中最有利工况为埋深比在 0.9 时,峰值加速度响应在车站侧墙和车站中柱的 h 结点处分别减少了 16.06% 和 15.72%。而最不利工况都在埋深比为 0.9 的车站底板位置处(a 结点),峰值加速度响应在车站底板两侧和中间分别增大了 6.98% 和 8.17%。此外,上方的多层框架结构对地铁车站的不利影响位置从埋深比 0.9 的车站底层下半部分(a 结点和中柱上 b 结点),到埋深比 1.8 的车站底层上半部分(b 、 c 和 d 结点),再到埋深比 2.1 的车站中部(f 结点),可以看出随埋深比的增大不利影响有从车站底层向车站中层上移的趋势。2)在 CC Wave 作用下,仅在工况 1.5 埋深比处的车站中部(e 结点)出现峰值加速度响应增大了 7.26% 左右的不利影响。而在地铁车站下半区域(a 结点到 e 结点范围内),其余点所受的影响基本可以忽略。与此截然不同的是,地铁车站的上半区域在不同埋深比下所受上方两栋多层框架建筑的有利影响是不容忽视的。其中,最有利位置会出现在车站顶层顶板或底板处(j 或 g 结点),且最有利工况为埋深比在 0.9 时,车站顶板的峰值加速度响应约减少了 14.53%。另外,车站上半区域所受的有利影响范围随埋深比的增大存在缩小的趋势,甚至当埋深比为 2.1 时整个该区域所受影响均可忽略。3)在 CH Wave 作用下,不可忽视的有利影响不仅会出现在车站顶层区域也有极少可能出现在车站底层区域。其中,最有利位置会出现在车站顶层上半部分(j 或 i 结点),且最有利工况为埋深比在 0.9 时,车站侧墙顶端(j 结点)的峰值加速度响应减少了 15.11%;车站中柱上部(i 结点)的峰值加速度响应减少了 15.53%。与 CC Wave 相似的是,车站顶层区域的有利影响范围和大小随埋深比的增大而普遍开始减小并趋于可以忽略的大小。此外,不可忽视的不利影响点仅出现在埋深比为 1.8 的车站侧墙中部(e 结点),此处的峰值加速度响应增大了 5.27%。4)不同地震动随埋深比的变化在地铁车站上所引起的 SSSI 峰值加速度响应各具特色也从侧面证实了 Y. Miao 等在参考文献^[4]中所得出的结论:地震动的频谱分布是影响不同埋深地铁车站地震反应的因素之一。

2.3 多层建筑峰值加速度反应分析

基于所输入的三种不同频谱特性的地震动,绘制了在不同埋深比下多层框架建筑中间构件各层柱中处的峰值加速度影响系数图,如图 8、图 9、图 10 所示。

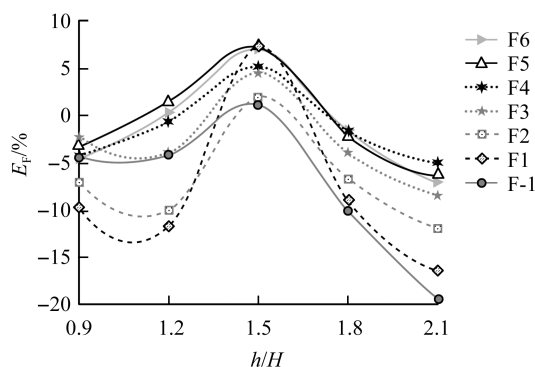


图8 SZ Wave下多层建筑峰值加速度影响系数

Fig.8 Influence coefficient of peak acceleration of multi-story buildings under SZ Wave

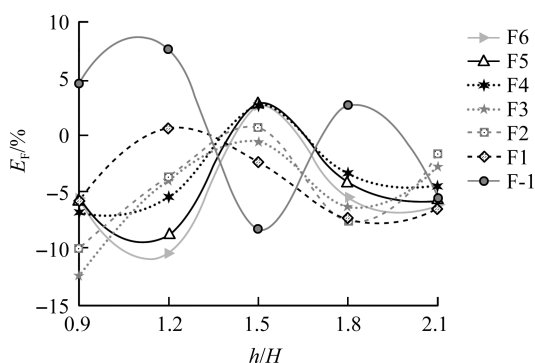


图9 CC Wave下多层建筑峰值加速度影响系数

Fig.9 Influence coefficient of peak acceleration of multi-story buildings under CC Wave

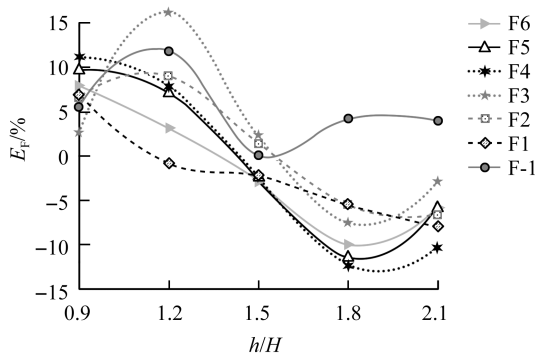


图10 CH Wave下多层建筑峰值加速度影响系数

Fig.10 Influence coefficient of peak acceleration of multi-story buildings under CH Wave

由图8可知,在SZ Wave作用下,处在1.5埋深比的地铁车站会对上方多层框架建筑的部分位置产生不利影响,且最不利的两处位置在第5层和第1层,车站分别使这两处位置的峰值加速度响应增加了7.29%和7.28%。除此之外,当埋深

比大于1.5时,车站更容易对上方框架建筑的2层以下区域产生有利影响,并且有利影响程度随埋深比的增大而增大,其中最有利工况为埋深比为2.1时,峰值加速度响应在-1层减少了19.42%。另外,从最有利位置在1层的埋深比为0.9和1.2,而最有利位置在-1层的埋深比为1.8和2.1可以看出随埋深比的增大最有利位置有下移的趋势。

由图9可知,在CC Wave作用下,仅在工况为1.2埋深比的多层框架地下室位置(-1层结点)出现了使峰值加速度响应增大7.60%的不利影响。此外,有利影响基本占据主导地位,其中最有利工况为埋深比在0.9时,框架3层的峰值加速度响应减少了12.45%。由图9中最靠下的点(各埋深比下地铁车站所能产生的有利影响峰值)可以得出:随埋深比的增加有利影响峰值减小,最有利位置有下移的趋势。

由图10可知,在CH Wave作用下,1.5埋深比可看作地铁车站对上方框架结构产生好坏影响的分水岭。当埋深比小于1.5时,上方框架主要承受不利影响,且最不利位置在多层框架结构中上部(3和4层结点),其中最不利工况为埋深比在1.2时,峰值加速度响应增加了16.24%;当埋深比大于1.5时,上方框架主要承受有利影响,且最有利位置在多层框架结构中上部(4层结点),其中最有利工况为埋深比为1.8时,峰值加速度响应减少了12.29%。

由图8、图9、图10可知,地铁车站对上方多层框架结构的上部与下部的峰值加速度响应影响呈现出截然不同的程度。在不同地震动下,框架下部(F-1到F3)相较于上部(F4到F6)的峰值加速度影响系数曲线特点差异明显且不如后者曲线间具有较高的相似性。这表明上方多层框架结构的下部与SSSI效应存在直接关联,即上下结构间的相互作用的强影响范围大致在地下室到3层区域。此外,不同地震动随埋深比的变化在多层框架结构上所引起的SSSI峰值加速度响应各不相同,这说明地震动的频谱分布不仅能影响不同埋深地铁车站的地震反应也会影响上方多层框架建筑的地震反应。

3 结论

采用Abaqus软件,考虑地铁车站埋深比的改变,建立了地铁车站与两侧框架建筑的静动力耦合相互作用非线性有限元模型,分析了地铁车站

与框架结构对彼此峰值加速度响应的影响,主要结论如下:

1) 在地震作用下,地铁车站的上半部分更易受到上方多层建筑的有利影响,并且随着埋深比的减小其所受的有利影响程度增大。当埋深比小于等于1.5时车站下半部分区域有遭受由临近建筑带来较大不利影响的风险。而当埋深比大于1.8时,随埋深比的增大上方多层建筑对地铁车站加速度响应的影响程度在5%左右浮动并开始趋向于无影响状态。

2) 在地震作用下,当地铁车站的埋深比小于等于1.5时,地铁车站对临近多层建筑不同位置的峰值加速度响应影响可以增大或减小,且最不利影响的位置无法确定。而当埋深比大于1.5时,地铁车站对上方框架结构多数楼层的影响基本有利且影响范围不会随埋深比的增加而有过大的变化。

3) 不同频谱特性的地震动所引起结构间的动力相互作用响应均不一致表明:地震动的频谱分布会对地铁车站与临近多层建筑的地震反应产生显著影响。

参考文献:

- [1] 王淮峰,楼梦麟,陈希,等. 邻近地上结构对地下结构动力响应的影响参数[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(12):1773-1777.
- [2] GUO J, CHEN J Y, BOBET A. Influence of a subway station on the inter-story drift ratio of adjacent surface structures[J]. Tunnelling and underground space technology, 2013, 35: 8-19.
- [3] PITILAKIS K, TSINIDIS G, LEANZA A, et al. Seismic behaviour of circular tunnels accounting for above ground structures interaction effects[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2014, 67: 1-15.
- [4] MIAO Y, ZHONG Y, RUAN B, et al. Seismic response of a subway station in soft soil considering the structure-soil-structure interaction[J]. Tunnelling and underground space technology, 2020, 106(1): 103629.
- [5] WANG H F, LOU M L, CHEN X, et al. Structure-soil-structure interaction between underground structure and ground structure[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2013, 54(9): 31-38.
- [6] WANG H F, LOU M L, ZHANG R L. Influence of presence of adjacent surface structure on seismic response of underground structure[J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2017, 100(11): 131-143.
- [7] 王国波,王亚西,陈斌,等. 隧道-土体-地表结构相互作用体系地震响应影响因素分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(6): 1276-1287.
- [8] WANG J N. Seismic design of tunnels: A simple state-of-the-art design approach[M]. New York: Parsons Brinckerhoff, 1993: 119-121.
- [9] 龙慧,陈国兴,庄海洋. 可液化地基上地铁车站结构地震反应特征有效应力分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1731-1737.
- [10] JEEHO L, GREGORY L F. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of engineering mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [11] ZHUANG H Y, CHEN G X, ZHU D H. Dynamic viscoplastic memorial nested yield surface model of soil[J]. Frontiers of architecture and civil engineering in china, 2008, 2(1): 49-55.
- [12] 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.
- [13] LONG H, WANG Z C, ZHANG C S, et al. Nonlinear study on the structure-soil-structure interaction of seismic response among high-rise buildings[J]. Engineering structures, 2021, 242(3): 112550.