

于仲洋,张鸿儒,邱滢佳,等.地震作用下相邻地下结构与土相互作用特性研究[J].地震工程学报,2020,42(2):481-489.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.481

YU Zhongyang, ZHANG Hongru, QIU Yanjia, et al. Neighboring Underground Structure-Soil Interaction Characteristics under Seismic Action[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 481-489. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.481

地震作用下相邻地下结构与土相互作用特性研究

于仲洋, 张鸿儒, 邱滢佳, 李昊

(北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对简单框架式地铁车站结构的抗震特性研究已取得一定成果,但对于结构形式较复杂或多个地下结构间相互作用等问题仍需进一步探究。本文利用现有地震分析方法中的动力时程分析法对两个地下结构间相互作用的影响进行系统对比分析,其中主体结构为三层三跨车站、附属结构为两层三跨车站。主要探讨附属结构与主体结构间距离的变化、两结构间连接形式对场地土以及主体结构地震响应特性的影响,分析比较场地土变形、主体结构变形、层间位移角以及内力在不同工况下的地震响应特性。结果表明:相邻地下结构与土相互作用形式较独立结构与土相互作用形式对场地土影响更加明显;当附属结构与主体结构间距离超过两倍结构宽度,附属结构对主体结构周围场地变形影响效应可基本忽略;同样当附属结构与主体结构间距离超过两倍的结构宽度,附属结构对主体结构的变形、内力基本已无影响,因此地震情况下相邻结构间相互作用影响范围基本为两倍结构宽度。与此同时,附属结构的对于主体结构抗震特性是不利的,不同连接形式中单层通道连接的形式变形以及内力方面均小于双层通道连接形式。

关键词: 相邻结构与土相互作用; 结构连接模式; 场地土地震响应; 结构地震响应

中图分类号: TU352

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)02-0481-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.481

Neighboring Underground Structure-Soil Interaction Characteristics under Seismic Action

YU Zhongyang, ZHANG Hongru, QIU Yanjia, LI Hao

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044 Beijing, China)

Abstract: In this paper, the seismic performance of a large subway station with a three-story, three-span major structure, and a two-story, three-span additional structure, was analyzed using a dynamic time-history method. The seismic responses of the site soil and the major structure under varying interaction modes and distances between major and additional structures were discussed. Under different working conditions, deformation of the site soil and the major structure, and the internal force and story drift angle of the major structure were analyzed and compared. Results showed that the influence of the neighboring underground structures-soil interaction on the site soil was more significant than that of the individual underground structures-soil interac-

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678042)

第一作者简介: 于仲洋(1991-),男,博士生,主要从事城市地下结构抗震研究。E-mail: 15115294@bjtu.edu.cn.

tion. When the distance between the additional structure and major structure was more than twice the structural width, the effect of the additional structure on the deformation of site soil around the major structure could be neglected, and the effect on the deformation and internal force of the major structure was essentially zero. Hence, the influence range of the interaction between neighboring underground structures under an earthquake was basically twice the structural width. The existence of the additional structure adversely affected the major structure under an earthquake. The deformation and internal force of the structure with a single-layer channel connection were smaller than those with double-channel connections.

Keywords: neighboring underground structures-soil interaction; connection mode of structure; seismic performance of site soil; seismic performance of structure

0 引言

地下结构在土中发生振动后,其振动能量将向土层中逸散从而引起变形,继而对结构的反应产生影响的过程和现象可称为地震作用下土与结构相互作用。在地震过程中,这是一种普遍存在现象,而对其研究最早可追溯到1904年Lamb^[1]对弹性地基振动问题的分析;随后经历50~60年代的基本理论的准备阶段、70~80年代的计算方法的发展阶段、以及80年代中期以后的深化发展阶段^[2-4]。随着大规模的模型试验和现场观测受到关注、计算机计算速度的提高,对于土与结构相互作用的研究已得到国内外大量学者的关注。特别是1995年阪神大地震中地下车站结构的严重破坏,使得地下结构的地震响应问题成为土与结构动力相互作用研究中的重要分支^[5]。通过近些年各国学者的实际地震破坏调查、模型试验以及数值模拟研究,对于结构形式比较简单的浅埋地下结构在地震作用下的主要动力特性的认识基本一致。地下结构的地震反应主要取决于地震产生的地层变形,而惯性作用不显著;对于有中柱的明挖地下结构,中柱是结构的关键构件,中柱失效将导致整个结构坍塌。

庄海洋、陈国兴等对不同的地下车站结构形式、不同的场地土类别性质、不同的结构埋深、不同的地震动输入、不同计算算法效率等问题进行了系统的数值模拟分析,其中对模型边界效应、场地土和车站结构的地震响应与影响等问题进行了清晰的阐述,进一步反映了土与结构相互作用效应^[6-11]。在国外对于地下结构地震响应以及结构抗震方面的研究也同样成果颇多。John等基于子结构原理研发了通用软件SASSI2000用于土与结构动力相互作用分析,并利用SHAKE等软件计算结构所在场地的自由场非线性地震反应,用于SASSI2000软件中土的动参数输入^[12];Jun等基于有限元软件ANSYS对

非线性土与地下结构的动力相互作用进行了数值模拟,考虑结构与土体之间的分离和相对滑动,给出了矩形地下结构由地震运动引起的动内力分布图^[13];Stamos等提出了三维地下结构动力分析的边界单元法^[14];Akira基于动力子结构技术,提出了一种计算地下结构地震反应的响应加速度法^[15];Kouretzis等用三维壳模型分析了圆形地下结构在剪切地震波作用下的动力响应特性^[16]。

虽然近些年国内外研究取得一定成果,但是其研究对象往往针对地下结构形式比较简单的地铁站,采用理论分析、模拟或试验等手段探究了其对场地土或者地下结构的影响问题。而对于如交叉换乘车站、并行或附带附属结构的车站组合体的结构形式,由于其受力特性复杂、影响因素较多、试验过程困难等原因,学者研究较少。复杂结构形式中的相邻结构通过周围场地土紧密联系,在地震作用下,邻近结构的存在改变了结构周围的土层运动,受邻近结构影响的主体结构动力特性与单独主体结构动力特性明显不同^[17],因此现有研究已远远不能满足设计要求。而对于多个结构间的相互作用以往研究主要集中在地面结构间以及地面与地下结构之间^[18-19];另外,研究主要在弹性范围内,较少考虑非线性;是否考虑,以及如何考虑结构与结构之间的相互作用效应,也缺乏具体的评判指标。

有鉴于此,本文选取复杂结构形式中的相邻地下结构为研究对象进行探究。以实际地下结构中并行车站或主体车站与风道或地下商业区合建的组合体结构为背景,利用有限元软件ABAQUS建立数值模型对相邻地下结构与土相互作用模式进行非线性时程分析。具体结构形式为三层三跨的主体结构以及两层三跨的附属结构,主要探究场地土以及车站结构的地震响应特性、相邻结构与土的相互作用模式、相邻结构间连接形式对结构抗震的影响、以及

相邻结构之间相互影响范围等问题。研究成果有助于提高对相邻地下结构相互作用的认识。

1 数值分析方法

1.1 车站结构

本文分析的地下车站组合体结构模型如图 1 所示。其中,主体结构为三层三跨地铁车站结构,附属结构为两层三跨结构,该结构形式是地下组合体结构常见组合形式,广泛应用于并行通道换乘车站或地下结构与商业区合建结构中。其主体以及附属结构各截面的具体尺寸如图 2(a)(b)所示。其中,主体地下结构中柱采用 0.8 m×1.2 m 的矩形截面柱形式,纵向间距取 7.0 m;附属地下结构中柱采用

0.7 m×1.0 m 的矩形截面柱形式,纵向间距取 7.0 m。与此同时,中柱与顶、底及中板的连接处都设置了纵梁,在顶、底及中板与侧墙连接处进行了加腋处理。

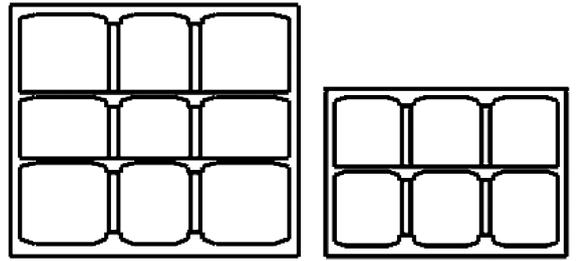


图 1 地铁车站组合体结构形式

Fig.1 Structure form of subway station combination

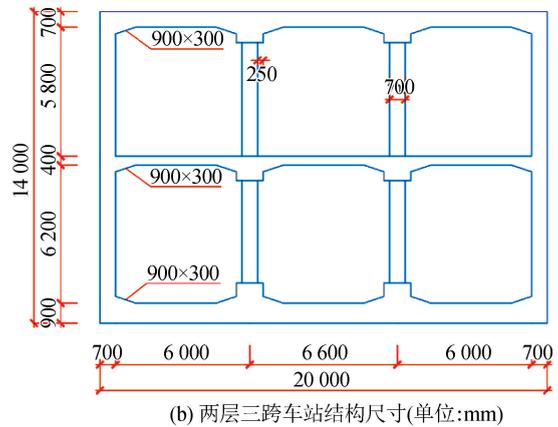
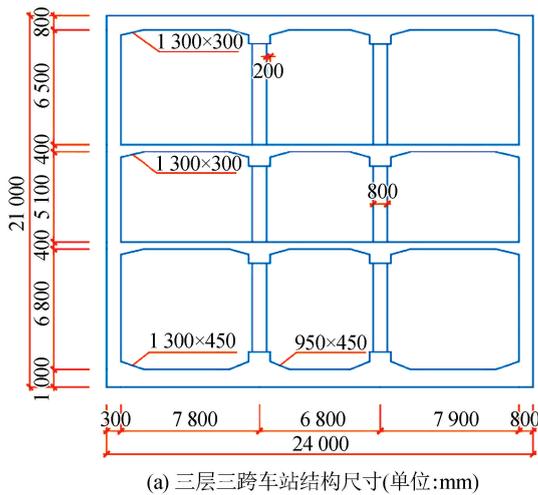


图 2 地铁车站结构尺寸图

Fig.2 Structural size of subway stations

1.2 模型计算参数

建模过程中,车站结构采用 C35 混凝土,中柱采用 C50 混凝土,混凝土动力本构模型采用 Lee 和

Fenves 提出的动力损伤塑性模型^[20],具体参数如表 1、图 3 所示。

钢筋采用热轧钢筋 HRB400,本构采用理想弹

表 1 混凝土损伤模型主要参数

Table 1 Main parameters of concrete damage models

模型参数	参考值	模型参数	参考值
弹性模量/GPa	31.5(34.5)	偏心率	0.1
密度/(kg·m ⁻³)	2 500	黏聚系数	0.005
泊松比	0.2	不变应力比	0.666 7
扩张角/(°)	30	拉伸刚度恢复参数	1
极限抗压强度之比	1.16	压缩刚度恢复系数	0

注:表中参数为 C35 与 C50 混凝土参数,其中括号中为 C50 参数

塑性本构模型。密度取 7 800 kg/m³;弹性模量取 200 GPa;泊松比取 0.3;屈服强度取 400 MPa;具体各部分配筋尺寸如表 2 所列。

场地土采用饱和黏性土,土的本构采用等效线性动力本构模型,其本质是基于黏弹性理论,即用黏

弹性 Kelvin 模型来反映土体在周期荷载下的滞回效应^[21]。通过改变土体的剪切波速来更加趋近于真实的描述场地土特性,其具体简化参数如表 3 所列;剪切模量比、阻尼比和剪应变关系曲线如图 4 所示;模型覆土层厚度 3.0 m。

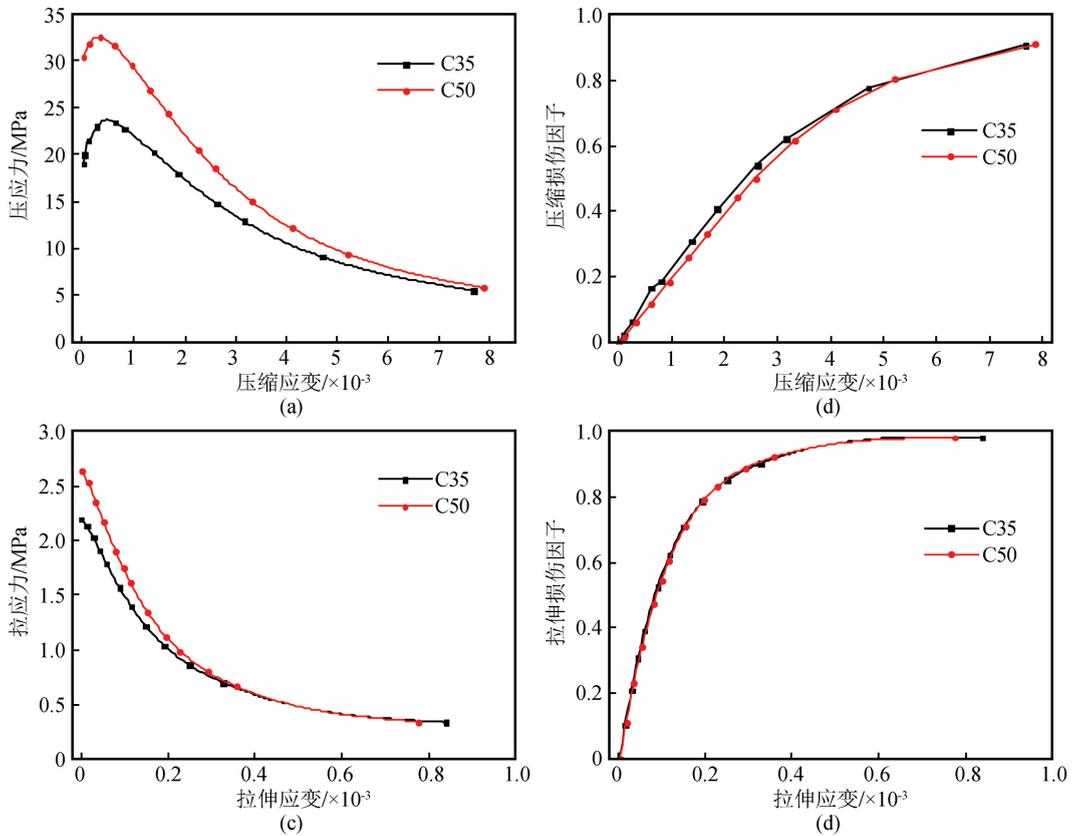


图3 混凝土压缩拉伸应力应变曲线及其损伤曲线

Fig.3 Curves of stress-strain and damage of concretes

表2 车站结构各位置配筋尺寸

Table 2 Reinforcement size of different part of station

	侧墙/mm	顶板/mm	中板/mm	底板/mm	中柱/mm
三层	28@150	28@150	22@150	32@150	32D28(800×1 200)
两层	28@150	25@150	18@150	28@150	32D28 (700×1 000)

表3 场地土层参数

Table 3 Site soil parameters

土层编号	土性	厚度/m	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切波速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	泊松比
①		10	1 940	175	
②		10	1 940	200	
③		10	1 940	225	
④	黏土	10	1940	250	0.47
⑤		10	1 940	275	
⑥		10	1 940	300	
⑦		10	2 000	325	
⑧		10	2 000	350	

1.3 有限元分析模型

为分析相邻地下结构与土相互作用机理,将有限元模型进行分类研究,其中主体结构与附属结构采用无连接、单层通道连接、双层通道连接三种模式进行建模分析;除此以外,建立只有主体结构的独立地下车站结构,与多结构模型进行对比分析研究。

根据楼梦麟等人^[22]的研究,当模型地基的总宽

度大于5倍结构宽度可忽略边界对结构模型的不利影响,因此模型计算尺寸均取 $400 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ 。采用四节点平面应变减缩积分实体单元模拟土体介质,采用四节点平面应变全积分实体单元模拟车站结构,采用两节点杆单元模拟钢筋,各个模型具体网格划分如图5所示。采用等刚度折减弹性模量的方法来考虑中柱问题,将矩形中柱等效成平面应变问题

中等厚度的连续墙。

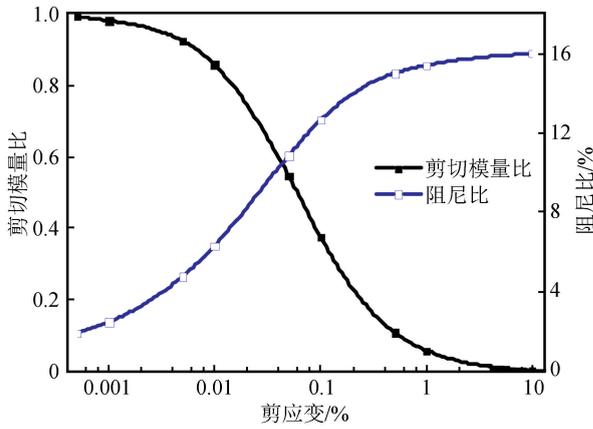


图 4 剪切模量比、阻尼比与剪应变关系图

Fig.4 Relationship among shear strain, shear modulus ratio, and damping ratio

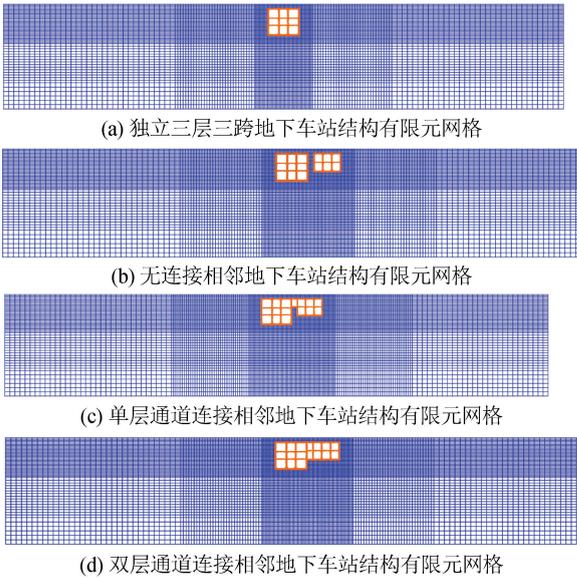


图 5 相邻地下结构与土相互作用有限元模型网格划分图

Fig.5 Mesh of the adjacent underground structure-soil interaction model

场地土与地铁车站结构之间的法向接触采用“硬”接触的方式;切向接触采用摩擦接触;为控制模型比较中变量,本文计算过程中不同模型各个接触面摩擦系数均取 0.4。

1.4 输入地震动特性与边界问题

El-Centro 波为具有明显的中远场地震波特征的强震地震波,该地震波原始峰值加速度为 0.349g,强震部分持续时间约为 26 s。本模型地震波采用调幅后地震峰值加速度为 0.2g 的 El-Centro 波作为输入波;输入时间持续 30 s,设置 5 s 空载时间用于

消散地震响应;El-Centro 地震波的原始波形曲线如图 6 所示。

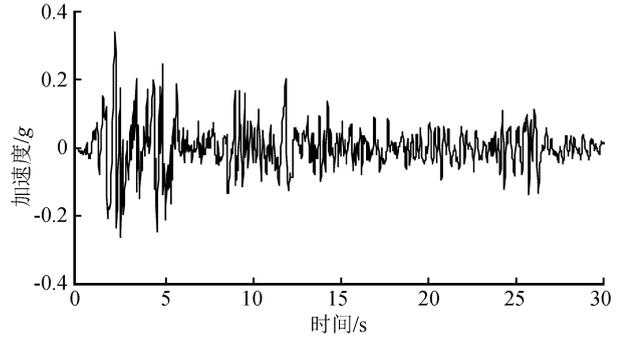


图 6 El-Centro 地震波原始波形

Fig.6 Original waveform of El-Centro wave

本文采用黏弹性边界条件,在场地的两侧采用弹簧-阻尼器的边界^[23],具体参数选取方法如式(1)~(2)所示。

切向边界

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R} \quad C_{BT} = \rho c_s \quad (1)$$

法向边界

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R} \quad C_{BN} = \rho c_p \quad (2)$$

式中: K_{BN} 与 K_{BT} 分别为弹簧法向与切向刚度; 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; ρ 为介质质量密度; α_T 与 α_N 分别为切向与法向黏弹性人工边界参数。本文中 α_T 取 0.5, α_N 取 1.0。

在基岩底面输入地震波数据,同时在两侧弹簧-阻尼单元外输入按自由场变形换算出的地震波数据,以此来较为准确的模拟地震波输入情况。

2 场地土地震响应特性

本节分析了相邻地下结构与土相互作用对场地土地震响应特性的影响,其中以全模型顶底水平相对位移最大值变化情况作为衡量指标,用于描述场地土的地震响应变形特性,比较了相邻地下两结构间不同连接形式、结构间距离变化对场地土地震响应特性的影响,如表 4 所列、图 7 所示。

表 3 反映了场地土的地震变形特性受结构间不同相互作用模式影响明显,不同连接形式直接导致场地土响应特性的差异。总体来说,地下结构的加入使得场地土变形增大;其中,相邻地下结构与土相互作用模式相比于地下独立结构与土相互作用模式对土层变形有更大的影响;从连接形式比较来看,单

层通道连接对场地的影响要小于双层通道连接形式；而无连接的相邻两结构由于其整体的刚度要小于连接结构形式，因此其对场地土变形的影响最为明显。

表4 不同相互作用形式下模型顶底水平相对位移峰值

Table 4 Peak value of horizontal relative displacement at the top and bottom of model under different interaction modes

模型类型	水平相对位移峰值 /m
自由场	0.074 86
独立结构	0.079 44
无连接两结构	0.084 59
单层通道连接两结构	0.082 48
双层通道连接两结构	0.082 95

注：无连接、单层、双层连接两结构间距离均为4 m。

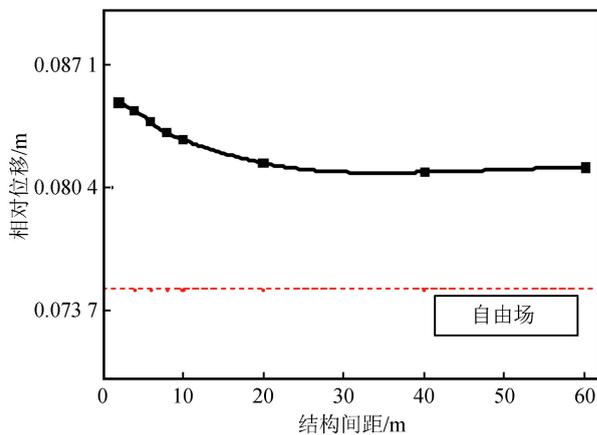


图7 不同间距场地土顶底水平相对位移

Fig.7 Horizontal relative displacement of the top and bottom of the site soil under different distances

图7反映了相邻地下两结构间距离对场地土地震特性的影响效应。可以看出相邻地下两结构对场地土变形的增大效果随着两结构间距离增大逐渐减小，最终趋于稳定，但是依然大于自由场变形结果，这说明尽管附属结构对主体结构周围场地土变形影响效果在减小，但是地下结构的加入对场地土的影响还是起主导作用。而当附属结构距离主体结构超过两倍结构宽度，即40 m后，随着距离增加，场地土变形已基本无变化，可认为附属结构对主体结构周围场地土变形已无影响，因此在地震影响下相邻地下两结构间相互作用对场地土的影响范围基本为两倍结构宽度。

3 相邻地下结构地震响应特性

3.1 主体结构侧墙侧向变形特性

本节分析相邻地下结构与土相互作用对地下主体结构侧墙变形特性的影响，比较结构间不同连接形

式、结构间距离对主体结构侧墙横向变形的影响；其中，两结构间无连接、单层、双层连接距离均取4 m。

图8反映了结构间不同连接模式下主体结构侧墙沿深度的变化。其中，结构侧墙水平相对位移由底到顶逐渐增大，且不同连接形式下相对位移峰值均大于自由场结果，这是因为地下结构整体刚度要小于同样位置原土体的刚度，因此结构产生较大的变形。无连接相邻结构形式、单层以及双层通道连接相邻结构形式相对位移峰值均大于独立结构相对位移峰值，这说明相邻两结构与土相互作用模式相比于独立结构与土相互作用模式从抗震方面考虑是更加不利的。而只从侧墙沿深度变化的变形来看，三种相邻地下结构与土相互作用模式对侧墙的变形影响相差并不大，单层通道连接形式变形略小于双层通道连接形式。

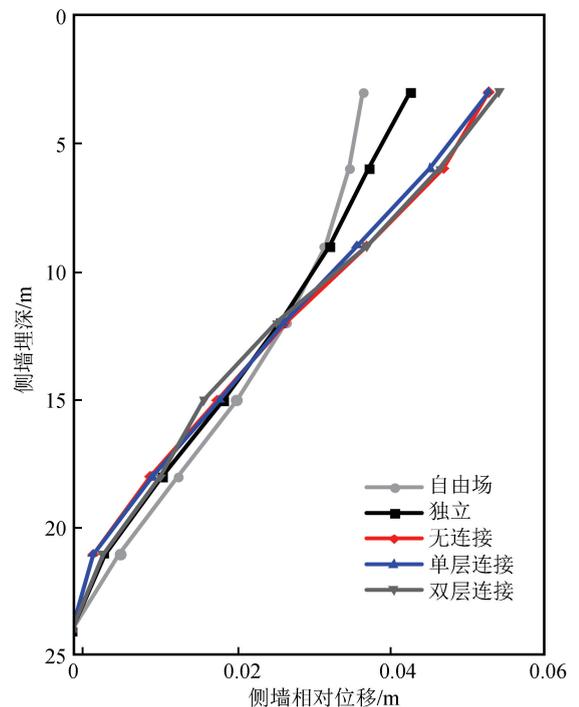


图8 不同连接形式侧墙水平相对位移沿深度变化图

Fig.8 Horizontal relative displacement of the lateral wall along depth under different connection modes

图9探究了相邻地下两结构间不同间距对主体结构侧墙变形的影响，其中随着相邻两结构间距离增加，侧墙的水平相对位移逐渐减小，即附属两层结构对主体三层结构的侧墙变形影响效应是逐渐减弱的，当相邻两结构间距离超过两倍结构宽度时，主体结构侧墙变形峰值已基本与标准独立结构变形峰值一致，可认为附属结构对主体结构已基本无影响。

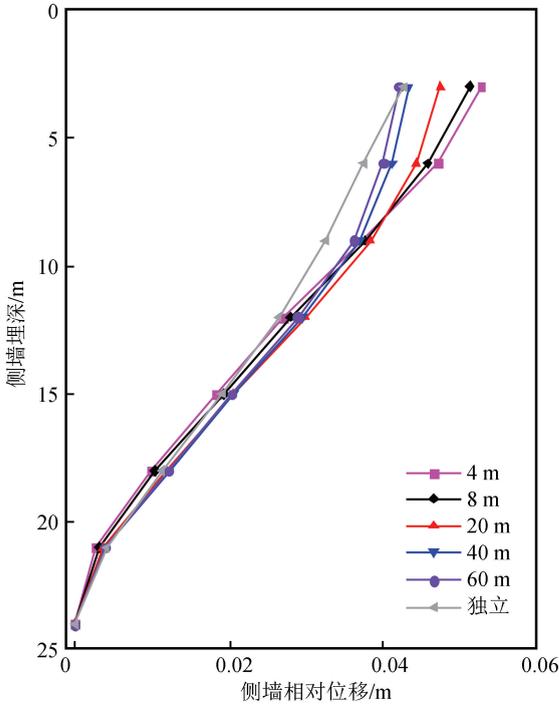


图 9 不同间距侧墙水平相对位移沿深度变化图
Fig.9 Horizontal relative displacement of the lateral wall along depth under different distances

3.2 主体结构层间位移角

结构层间位移角是衡量地下结构抗震变形以及破坏的主要指标之一,层间位移角的变化也可以从一定程度上反映地下结构的变形特性,因此本节探究了相邻地下两结构间不同连接形式、间距下主体结构各层层间位移角的变化规律,如表 5 所列,图 10 所示。其中,两结构间无连接、单层、双层连接距离均取 4 m。

表 5 不同连接形式主体结构各层层间位移角

Table 5 Story drift angle of the major structure under different connection modes

模型类型	顶层/m	中层/m	底层/m
独立结构	0.001 46	0.002 2	0.001 87
无连接两结构	0.002 6	0.002 72	0.001 72
单层通道连接两结构	0.002 24	0.002 66	0.001 77
双层通道连接两结构	0.002 52	0.002 68	0.001 69

表 5 与图 12 给出了不同连接形式下以及不同间距下主体结构各层层间位移角的幅值变化。总体来看,不同结构间距下车站结构中层层间位移角幅值均大于顶层以及底层的层间位移角幅值,造成这一规律的主要原因是车站结构中层纵梁的刚度明显小于顶底纵梁,因此导致中层的线刚度小于顶底层,进而产生了较大的变形。而随着结构间间距的增大,车站结构的顶层以及中层层间位移角幅值缓慢减小,且顶层的减小速度明显快于中层,而底层层间

位移角则逐渐增大,最终各层的层间位移角均趋近于独立结构各层层间位移角幅值。这说明在埋深相同的情况下,三层结构与两层结构在与土相互作用过程中,附属两层结构的存在对于主体三层结构顶层以及中层抗震是非常不利的,因此在主体结构设计过程中要提高结构上部的整体刚度及其抗震性能。当结构间距离足够大时,地下结构间的相互影响也可以忽略不计。不同连接形式下的层间位移角的变化也说明了单层通道连接形式变形要小于双层通道连接形式。

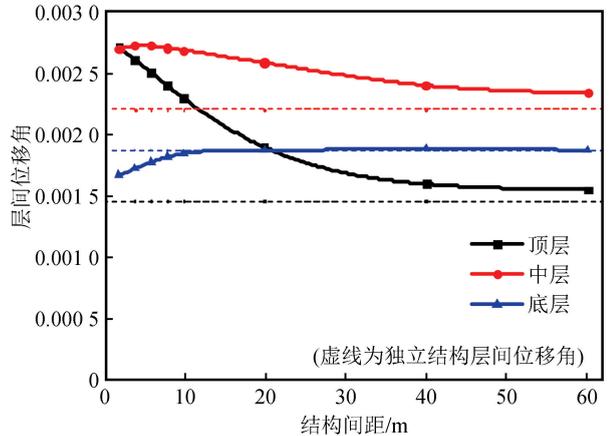


图 10 不同间距主体结构各层层间位移角变化趋势图
Fig.10 Story drift angle of the major structure under different distances

3.3 地下结构内力反应特性

由于地下结构的抗震特性主要取决于地层变形,因此地下结构的变形从一定程度上能够反映出地下结构的抗震特性。但在实际工程设计过程中,抗震设计往往是以结构内力为主要衡量指标,因此本节主要研究相邻地下结构与土相互作用对结构侧墙内力的影响。相邻地下两结构间不同连接形式、不同间距主体结构侧墙弯矩如表 6 所列、图 11 所示。其中,两结构间无连接、单层、双层连接距离均取 4 m。

表 6 反映了相邻两结构间不同连接形式下主体结构侧墙顶部以及底部最大弯矩幅值情况;由于相邻两结构与土相互作用的影响导致结构顶板变形增

Table 6 Max bending moment of the top and bottom of the lateral wall under different connection modes (Unit: kN · m)

模型类型	顶层	底层
独立结构	659.6	2 787.5
无连接两结构	879.8	2 192
单层通道连接两结构	850.6	1 955.5
双层通道连接两结构	971.7	1 786.9

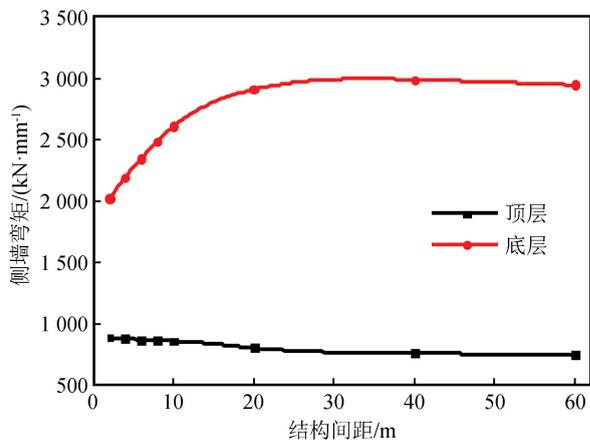


图 11 不同间距侧墙顶部、底部最大弯矩变化图

Fig.11 Max bending moment of the top and bottom of the lateral wall under different distances

大,结构底板变形减小,所以无连接相邻两结构的顶板弯矩大于独立结构,而底板弯矩小于独立结构;两层通道连接结构其相当于一个整体结构,所以底层变形更小,因此其弯矩相比于单层通道连接以及无连接相邻结构都要小,但是由于其上部变形还是大于其他结构形式,因此顶板弯矩也是几种结构连接形式中最大的。

图 11 反映了不同结构间距下主体结构侧墙顶部以及底部最大弯矩幅值变化趋势情况;其中结构顶板弯矩随着结构间距离增加逐渐减小,结构底板弯矩随着距离增加逐渐增加,其原因可以从 3.1 节以及 3.2 节中结构整体以及侧墙变形分析得到,结构变形越大弯矩越大;附属结构的存在对于主体结构侧墙顶部弯矩起到放大效果,而且会减小侧墙底部弯矩,随着相邻结构间距离增加,影响效果越来越不明显,最终趋近于独立车站结构结果。因此,从结构内力方面考虑,依然可以给出相邻地下结构间在地震作用下相互影响范围为两倍的结构宽度。

综上所述,本节从侧墙变形、内力以及结构的层间位移角三方面说明了地下相邻两结构间的影响范围为两倍结构宽度;与此同时,从抗震方面考虑,单层通道连接形式也要优于双层通道形式。研究成果有助于对相邻地下结构相互作用的认识与提高。

4 结论

本文以实际地下车站设计中经常出现的并行地铁车站或车站与风道或与地下商业结构合建的组合体为研究背景,对三层三跨的主体结构附加两层三跨附属结构的大型地铁车站结构进行动力数值模拟

分析,研究不同工况条件下相邻地下结构与土相互作用模式对场地土以及地下结构的地震响应以及抗震性能的影响,主要结论如下:

(1) 地下结构对场地土地震响应特性影响显著;相邻地下结构与土相互作用模式对场地土影响明显强于独立结构与土相互作用模式;当附属结构与主体结构间距离超过两倍结构宽度,附属结构对主体结构周围场地变形影响效应可忽略不计。

(2) 相邻地下结构与土相互作用模式中,当两结构埋深相同时,附属两层结构对主体三层结构的影响主要集中在主体结构上部,而主体结构底层受附属结构影响反而减小,这种现象随着相邻两结构间距离的增加而减弱,当两结构间距离超过两倍结构宽度时,可认为主体结构已不再受附属结构的影响。因此,相邻地下结构与土相互作用模式中结构间的影响范围建议值为两倍的结构宽度。

(3) 综合比较不同的连接形式对结构变形、内力以及结构层间位移角的影响,相邻地下结构间单层通道连接形式的变形、内力均要小于双层通道连接形式。

参考文献(References)

- [1] LAMB H. On the propagations of tremor over the surface an elastic solid[J]. Philos. Trans. Roy. Soc. Ser. 1904, 203: 1-42.
- [2] BYCORFT G.N. Forced vibrations of a rigid circular plate on a semi-infinite elastic space and on an elastic stratum[J]. Philos. Trans. Roy. Soc. Ser. 1956, 248: 327-368.
- [3] TRIFUNAC M D. Scattering of Plane Sh Waves by a Semi-cylindrical Canyon[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1972, 1(3): 267-281.
- [4] 李辉,赖明.土:结动力相互作用研究综述(I):研究的历史,现状与展望[J].重庆建筑大学学报,1999,21(4):112-116.
LI Hui, LAI Ming, BAI Shaoliang. A Summary of Research on Soil-Structure Dynamic Interaction (I): History, Status in Quo and Prospects[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 1999, 21(4): 112-116.
- [5] HUO H, BOBET A, FERNA'NDEZ G, et al. Load Transfer Mechanisms between Underground Structure and Surrounding Ground; Evaluation of the Failure of the Daikai Station[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12): 1522-1533.
- [6] 庄海洋,陈国兴,左熹.水平向地震下双层岛式地铁车站结构的动力变形特征[J].地震工程与工程振动,2007,27(6):140-147.
ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing, ZUO Xi. Analysis of Dynamic Deformation Characteristics of Two-layer Subway Station Structure under Horizontal Earthquakes[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2007, 27(6): 140-147.

- [7] 庄海洋,陈国兴,胡晓明.两层双柱岛式地铁车站结构水平非线性地震反应分析[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S1):3074-3079.
ZHUANG Haiyang, CHEN Guoxing, HU Xiaoming. Analysis of Nonlinear Earthquake Response of Two-layer Double-column Subway Station Structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3074-3079.
- [8] 庄海洋,朱超,吴滨,等.场地类别对地铁地下车站结构地震反应的影响规律[J].南京工业大学学报(自然科学版),2015,37(4):70-76.
ZHUANG Haiyang, ZHU Chao, WU Bin, et al. Seismic Responses of Underground Subway Station Built in Different Sites[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2015, 37(4): 70-76.
- [9] 庄海洋,王修信,陈国兴.软土层埋深变化对地铁车站结构地震反应的影响规律研究[J].岩土工程学报,2009,31(8):1258-1266.
ZHUANG Haiyang, WANG Xiuxing, CHEN Guoxing. Earthquake Responses of Subway Station with Different Depths of Soft Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1258-1266.
- [10] 陈国兴,陈磊,景立平,等.地铁地下结构抗震分析并行计算显式与隐式算法比较[J].铁道学报,2011,33(11):111-117.
CHEN Guoxing, CHEN Lei, JING Lipin, et al. Comparison of Implicit and Explicit Finite Element Methods with Parallel Computing for Seismic Response Analysis of Metro Underground Structures[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(11): 111-117.
- [11] 龙慧,陈国兴,庄海洋,等.深软场地地铁地下车站结构近、远场地震反应数值分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2014,36(3):45-51.
LONG Hui, CHEN Guoxing, ZHUANG Haiyang, et al. Numerical Analysis on Seismic Response of in Underground Subway Station under near and far Field Ground Motion in Deep Soft Site[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2014, 36(3): 45-51.
- [12] JOHN L, FARHANG O, CHIH C C. A System for Analysis of Soil-structure Interaction. Geotechnical Engineering Department of Civil and Environmental Engineering[M]. University of California, Berkeley, 2000.
- [13] JUN S C, JONG S L, JAE M K. Nonlinear Earthquake Response of Analysis of 2-D Underground Structures with Soil-structure Interaction Including Separation and Sliding at Interface[C]//15th ASCE Engineering Mechanics Conference, New York, 2002.
- [14] STAMOS A A, BESKOS D E. Dynamic Analysis of Large 3-D Underground Structures by the Bem [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1995, 24(6): 917-934.
- [15] AKIRA T. A Study on Seismic Analysis Methods in the Cross Section of Underground Structures Using Static Finite Element Method[J]. Structural Engineering and Earthquake Engineering, 2005, 122(1): 41-53.
- [16] KOURETZIS G P, BOUCKOVALAS G D, GANTES C J. 3-D Shell Analysis of Cylindrical Underground Structures under Seismic Shear (S) Wave Action[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26(10): 909-921.
- [17] 王国波,袁明智,苗雨.结构-土-结构相互作用体系地震响应研究综述[J].岩土工程学报,2018,40(5):837-847.
WANG Guobo, YUAN Mingzhi, MIAO Yu. Review of Seismic Response of Structure-soil-structure Interaction System [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 837-847.
- [18] WANG HUAIFENG, LOU MENGLIN, CHEN XI, ZHAI YONGMEI. Structure-soil-structure Interaction between Underground Structure and Ground Structure[J]. Soil Dynamic sand and Earthquake Engineering, 2013, 54: 31-38.
- [19] LOU M L, WANG H F, CHEN X, et al. Structure-soil-structure Interaction: Literature Review [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(12): 1724-1731.
- [20] LEE JEEHO, FENVES GREGORY L. Plastic-damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [21] 费康,刘汉龙.ABAQUS的二次开发及在土石坝静、动力分析中的应用[J].岩土力学,2010,31(3):881-890.
FEI Kang, LIU Hanlong. Secondary Development of ABAQUS and Its Application to Static and Dynamic Analyses of Earth-rockfill Dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 881-890.
- [22] 楼梦麟,王文剑,朱彤,等.土-结构体系振动台模型试验中土层边界影响问题[J].地震工程与工程振动,2000,20(4):30-36.
LOU Menglin, WANG Wenjian, ZHU Tong, et al. Soil Lateral Boundary Effect in Shaking Fable Model Test of Soil - Structure System [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4): 30-36.
- [23] 刘晶波,谷音,杜义欣.一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[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.