

DOI: 10.11779/CJGE202008008

地铁车站结构端部效应影响范围研究

王国波^{1, 2}, 郝鹏飞¹, 孙富学^{*2}

(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)

摘 要: 常规的地铁车站抗震设计均是选择跨中截面按平面问题进行计算分析和设计, 但在靠近车站前后端墙的区域必然受端墙及区间隧道的影响, 从而应考虑其空间效应, 即端墙的端部效应。基于对地铁车站及区间隧道振动台试验的数值模拟, 验证数值模型的合理性, 然后对地铁车站结构端部空间影响范围进行一系列的数值分析, 主要考虑地铁车站结构跨数及层数、土体参数、地震波类型及幅值以及区间隧道数量的影响。计算分析结果表明: 车站结构的跨数、层数以及区间隧道的数量均会对地铁车站端部影响范围产生一定的影响, 车站结构端部影响范围最大的为 2 层 3 跨车站, 其影响范围为 $1.6B$ (B 为结构宽度); 地铁车站结构端部效应影响范围与其自身结构特性相关, 而受土体参数和地震波类型及幅值影响较小, 同时对比分析表明采用柱端弯矩作为端部影响范围的评价指标更为合理。

关键词: 地铁车站; 区间隧道; 端部效应; 地震响应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)08-1435-11

作者简介: 王国波(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构抗震分析方面的研究和教学工作。E-mail: wgb16790604@126.com。

Spatial influence scope of end wall of metro station structures

WANG Guo-bo^{1, 2}, HAO Peng-fei¹, SUN Fu-xue²

(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)

Abstract: The conventional seismic design of metro stations is to select the mid-span section for calculation analysis and design based on plane problem. However, the spatial effect of end walls must be considered because the area close to the front and rear end walls will inevitably be affected by the end walls and running tunnels. This effect is also called the end wall effect. The rationality of the numerical model is verified based on the numerical simulation of shaking table tests on metro stations and running tunnels firstly. Then a series of parameter analysis is performed on the spatial influence scope of the end wall of the metro station structures, which mainly includes the influences of the number of spans and layers of the metro station structures, soil parameters, seismic wave types and amplitudes, and the number of running tunnels. The calculation and analysis results show that the number of spans, the number of layers and the number of tunnels of the station structures will have certain effect on end walls influence scope. The largest influence area of end wall is the station with 2 layers and 3 spans, and the influence range is $1.6B$ (B is the structure width). The influence range of end wall effect is related to their own structural characteristics, but they are less affected by the soil parameters and seismic wave types and amplitudes. At the same time, the comparative analysis shows that it is more reasonable to use column end bending moment as evaluation indexes for end wall influence range analysis.

Key words: metro station; running tunnel; end wall effect; seismic response

0 引 言

随着城市化进程的加快, 地上建筑趋于饱和, 人们把目光投向地下空间。21 世纪是地下空间大发展的世纪, 地下结构和设施在城市日常功能中发挥着重要的功能, 其一旦在地震中破坏, 会造成严重的后果及次生灾害。因此隧道及地铁车站等地下结构的抗震性能必须得到足够的重视。目前地下结构的抗震设计大

多基于简化的荷载-结构方法, 采用平面模型进行简化计算。但对于实际的地下结构, 如地铁车站结构, 其前后端墙以及区间隧道的存在导致结构实际上是一个

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)

收稿日期: 2019-12-02

*通信作者 (E-mail: sunfuxue@163.com)

空间结构,而不能简化为平面问题。因此,需研究结构端墙等引起的空间效应,确定其空间影响范围。

目前人们习惯了将地铁车站和盾构隧道等细长地下结构的受力分析问题简化为平面问题,如: Zlatanović 等^[1]通过建立二维简化隧道结构有限元模型,对比分析隧道结构在良好和不良土壤条件下的土-隧道结构相互作用差异;庄海洋等^[2]将地铁车站结构等效为平面应变问题,探究了软土层埋深变化对地铁车站结构地震反应的影响规律;而对于地铁车站的空间效应,陈磊等^[3]通过对深软地基土上的三层三跨框架式地铁车站结构地震响应分析表明,其纵向中间截面处的相对位移最大,沿车站结构纵向的水平位移曲线呈现出波浪形状,具有明显的空间效应。王国波^[4]建立了地铁车站及隧道的三维模型,得出车站结构端墙 1.5 倍车站结构横向宽度外的横截面,可以按照平面应变问题分析,区间隧道的存在削弱了车站结构前后端墙的整体抗震性能;Mok 等^[5]通过考虑经典的两层及三层地下结构模型,对三维细长地下结构端墙效应进行了研究,结果表明端墙的空间影响范围约为端墙尺寸的 3 倍,靠近端墙的侧墙和底板之间的弯矩约为结构中部弯矩的一半。Hosseini 等^[6]通过对较长的连续直埋钢管的地震响应研究表明,不影响管段中间部分响应值的最小有效长度为:管道在黏土中时为剪切波波长的 2 倍而在砂土中时为波长的 4 倍。陈清军等^[7]从定量角度将地铁车站与隧道接头结构对车站及隧道地震响应的影响程度及范围进行了研究分析,结果表明,地铁车站结构的最大层间位移响应在接头部位显著减小,且接头结构对地铁车站地震响应的影响范围约为结构宽度 1.69 倍。

由上可见目前相关研究成果较少,且得到的结论之间的差异也较大。《建筑抗震设计规范》^[8]基于文献[4]的研究成果,规定车站结构端部影响范围为 1.5 倍的结构横向宽度,但该研究成果是基于典型地铁车站结构振动台试验^[9]以及对其的数值拟合和参数分析,没有考虑车站尺寸、土层参数、区间隧道、地震动特性等的影响。在地下结构规模不断扩大,其重要性日益加强的地下空间大开发背景下,本文拟仍基于已有的振动台试验数据,在利用试验数据验证计算方法合理性的基础上,进行系统的参数分析,具体包括地铁车站跨数、层数、土体参数、地震波类型及幅值、有无区间隧道及区间隧道数量等,全面探究地铁车站端部空间效应影响范围。一方面期望能论证规范建议值的一般性,同时也希望在端部影响范围评价指标上进行一些有益的探讨。

1 振动台试验与数值拟合

1.1 振动台试验简介

试验采用净尺寸为 3 m×2.5 m 的刚性模型箱,地铁车站接头结构由典型两层三跨地铁车站结构及两条环形区间隧道组成,如图 1 所示。模型结构几何相似比为 1/30,模型尺寸参数如图 2 所示,模型结构均采用微粒混凝土制作,模型土为基于原状土配制的重塑土。加速度传感器监测点布置如图 3、4 所示,试验选取上海人工波、El-Centro 波、正弦波作为振动台输入波。更多详细试验细节参见文献[10]。



图 1 地铁车站接头结构模型

Fig. 1 Structural model for joints in subway stations

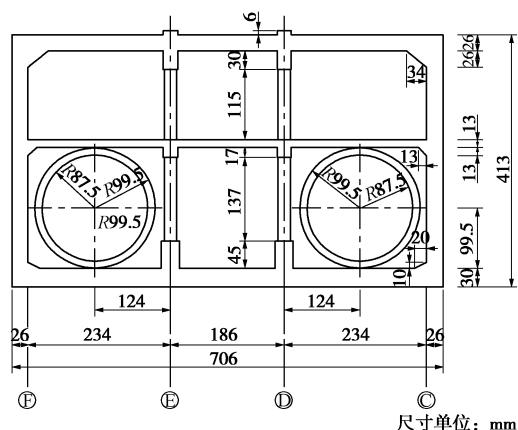


图 2 地铁车站接头结构剖面图

Fig. 2 Cross-section view of joints of subway station

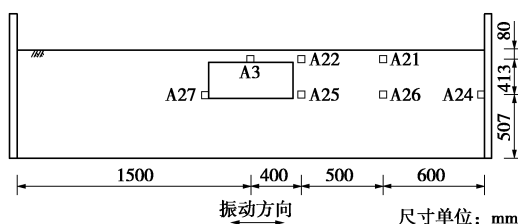


图 3 加速度传感器布置图 (③轴剖面)

Fig. 3 Arrangement of acceleration sensors (③ axial section)

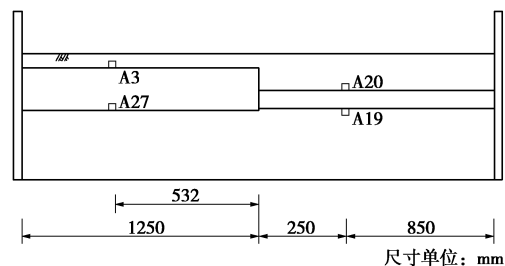


图 4 加速度传感器布置 (垂直振动方向)

Fig. 4 Arrangement of acceleration sensors (vertical vibration direction)

1.2 振动台试验拟合

(1) 有限元模型建立

根据模型箱内土体尺寸确定土体计算范围, 长宽高分别为 2.65 m×2.5 m×1 m, 且长度方向为地震动激震方向。车站模型结构为宽 0.72 m (激震方向), 高 0.4 m, 长 0.9 m 的两层三跨框架结构, 区间隧道为内半径 0.09 m, 壁厚 0.03 m, 长 0.8 m 的环状结构, 车站模型结构埋深为 0.1 m。结合上述尺寸通过 ABAQUS 建立如图 5 所示三维有限元模型, 其中, 土体采用 C3D8R 实体单元, 隧道结构及车站板和墙采用 S4R 壳单元, 柱子为 B31 梁单元。

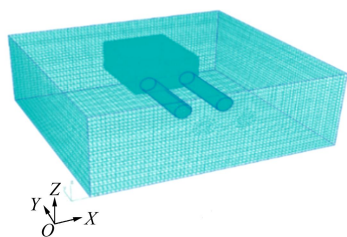


图 5 有限元模型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of finite element model

土体采用等价非线性模型 Davidenkov 模型^[11]来模拟土体的非线性特性, Davidenkov 模型可以描述为

$$G_d / G_{\max} = 1 - \left[\frac{(\gamma_d / \gamma_r)^{2B}}{1 + (\gamma_d / \gamma_r)^{2B}} \right]^A, \quad (1)$$

$$\lambda / \lambda_{\max} = (1 - G_d / G_{\max})^\beta, \quad (2)$$

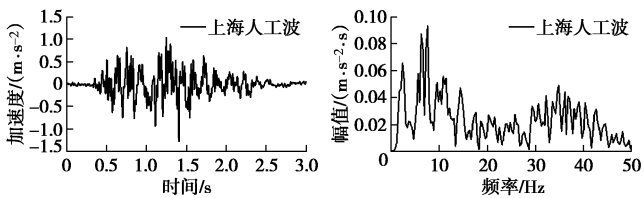
式中 A, B, β 均为拟合常数, γ_r 为参考剪应变; γ_d 为瞬时动剪应变; λ, G_d 为阻尼比和瞬时动剪切模量, λ_{\max}, G_{\max} 为最大阻尼比和最大动剪切模量。基于已有的动力试验资料, 本文中取 $A=1, B=0.77, \gamma_r=0.001226$, 初始阻尼比取 0.003。

车站及隧道为弹性模型, 模型土及模型结构材料参数如表 1 所示。模型采用滑移边界, 4 个侧面和底部约束 Y, Z 向位移, 顶部自由, 模型底部 X 向输入振动台面波, 以如图 6 所示的 0.11g 上海人工波、0.11g/0.51g El-Centro 波为例与试验数据进行数值拟合分析。

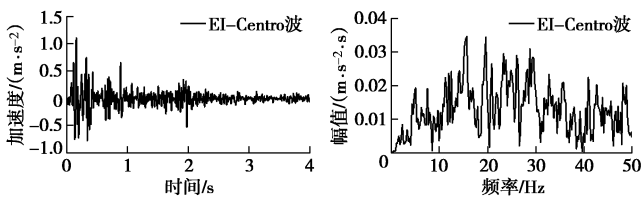
表 1 模型结构及模型土材料参数

Table 1 Material parameters of model structure and model soil

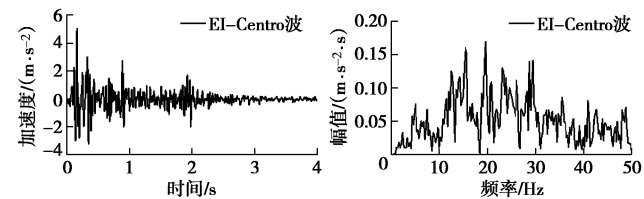
材料参数	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	剪切模量/MPa
模型土	1760	30.8	0.4	11
微粒混凝土	2100	9800	0.2	—



(a) 0.11g 上海人工波



(b) 0.11g El-Centro 波



(c) 0.51g El-Centro 波

图 6 振动台台面实测波加速度时程及频谱曲线

Fig. 6 Time-history and spectral curves of measured wave acceleration on shaking table

(2) 数值模拟与试验对比

针对地铁车站接头结构在上海人工波、El-Centro 波作用下的地震响应规律, 以如图 3, 4 所示的模型土内测点 A22、车站结构测点 A3、区间隧道测点 A20 为例, 将数值模拟计算的加速度时程、频谱曲线与振动台试验数据进行拟合。

如图 7, 8 所示, 在 0.11g 上海人工波和 El-Centro 波作用下, 模型结构及其周围土体加速度时程及频谱曲线的数值结果均与试验结果波形基本一致, 表明所采用的数值模拟方法可以较好地模拟模型结构及其周围土体的动力响应规律。但其幅值仍存在一定的差异, 模型土、模型结构的加速度幅值模拟值相对试验值偏小, 而车站结构模拟值相对试验值偏大, 且其相对误差均在 30% 以内, 可能是由于数值模拟时土体阻尼取值与试验模型土存在一定的偏差。

如图 9 所示, 在 0.51g El-Centro 波作用下, 虽然模型结构及其周围土体加速度时程曲线的数值结果与试验结果波形较为一致, 但其幅值存在明显差异, 模型土、模型结构的加速度幅值模拟值均明显大于试验

值,可能是由于加速度输入峰值过大,土的动剪切模量衰减较大,导致模型土的应力应变关系曲线与Davidenkov 本构模型的曲线偏离较大。

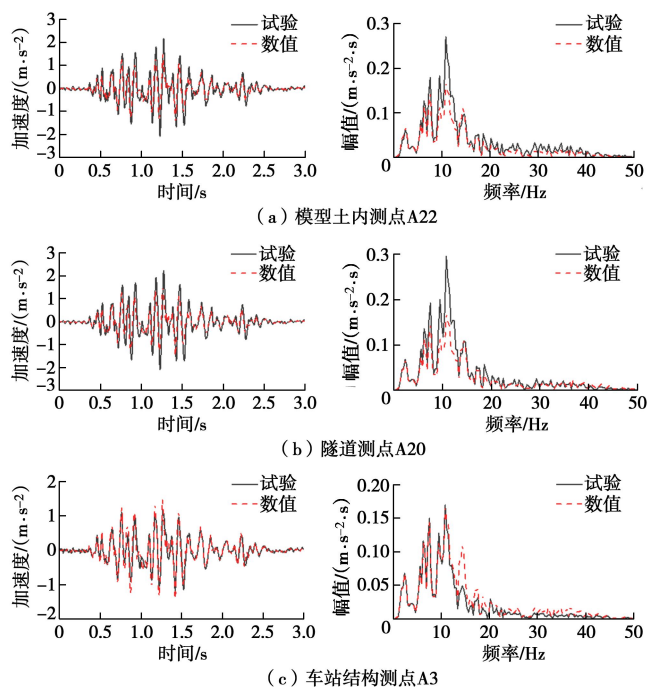


图 7 0.11g 上海人工波工况下测点加速度时程与频谱曲线的试验与模拟结果对比

Fig. 7 Comparison between experimental and simulated results of acceleration time-history and spectral curves at measured points under 0.11g Shanghai artificial wave

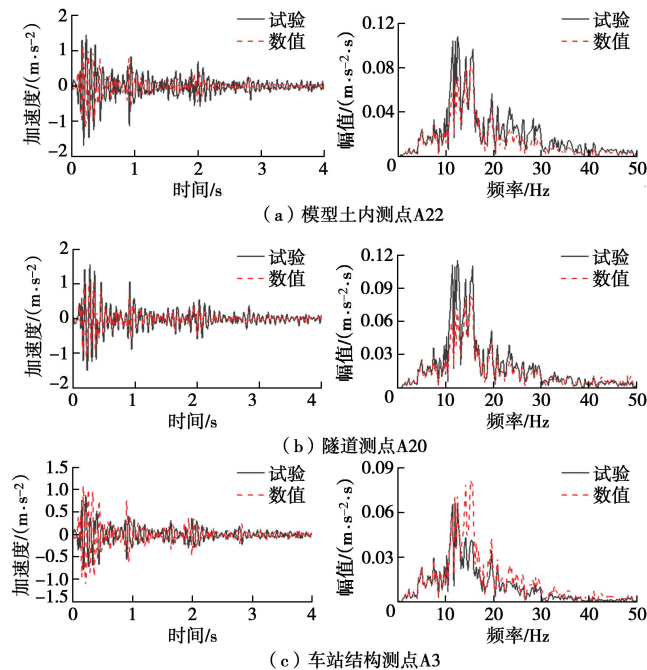


图 8 0.11g El-Centro 工况下测点加速度时程与频谱曲线的试验与模拟结果对比

Fig. 8 Comparison between experimental and simulated results of acceleration time-history and spectral curves at measured points under 0.11g El-Centro conditions

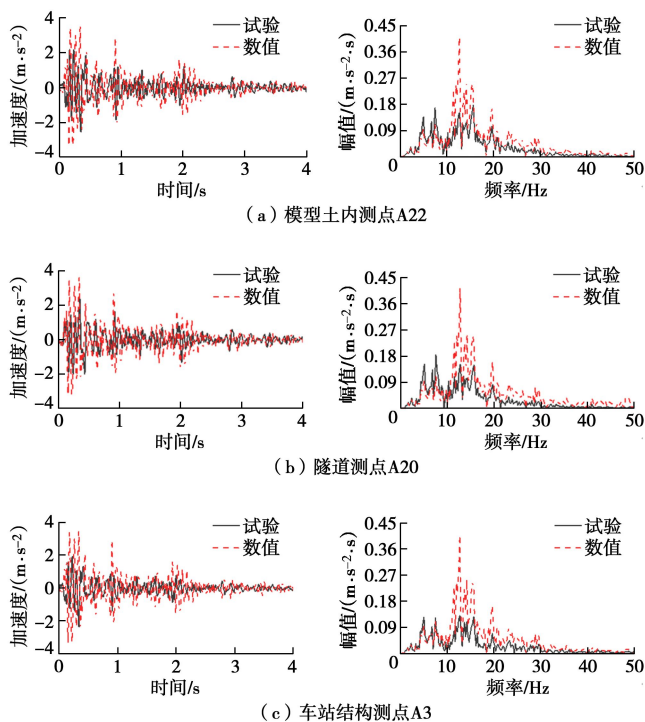


图 9 0.51g El-Centro 工况下测点加速度时程与频谱曲线的试验与模拟结果对比

Fig. 9 Comparison between experimental and simulated results of acceleration time-history and spectral curves at measured points under 0.51g El-Centro conditions

综上可知,虽然数值模拟值与试验实测值的幅值存在一定的误差,且相对误差随着加速度幅值的增大而增大,但是模拟值与试验值的加速度时程及频谱曲线波形均较为一致,表明该数值模拟方法较好地模拟了土体、车站结构以及区间隧道的加速度响应规律,验证了该数值模拟方法的合理性。

2 计算模型建立

2.1 计算范围及边界设置

基于上述试验验证的数值模拟方法,以典型的 2 层 3 跨地铁车站作为标准工况,建立数值模型。地铁车站结构埋深 3 m,车站计算尺寸为 20 m (宽) × 112 m (长) × 13 m (高),如图 10 所示,结构每层层高 6.5 m,跨度分别为 7, 6, 7 m,柱距均为 8 m,矩形混凝土柱截面尺寸为 0.9 m × 0.6 m,车站的底板厚 0.9 m,中板厚 0.4 m,顶板和侧墙厚 0.8 m,端墙厚 0.2 m。

基于已有的研究成果^[4],为了降低计算时边界效应的影响,土体的横向计算宽度一般至少应为结构宽度的 5 倍;纵向计算长度一般取结构纵向长度加上 4 倍的结构宽度,深度方向则取至基岩面。取土体深度 60 m,基岩深度 10 m,共 70 m。由此确定标准工况土体计算范围为 100 m × 192 m × 70 m,同时考虑了相

应的自由场模型。车站结构的有限元模型如图 11 所示。

基于标准工况，建立如图 12 所示 1 层 3 跨、3 层 3 跨、2 层 2 跨、2 层 4 跨、2 层 5 跨、2 层 6 跨、2 层 3 跨-2 孔区间隧道、3 层 3 跨-4 孔区间隧道模型，其中隧道外径 6 m，壁厚 0.4 m，长度 100 m，含区间隧道的土体计算范围为 100 m×252 m×70 m。

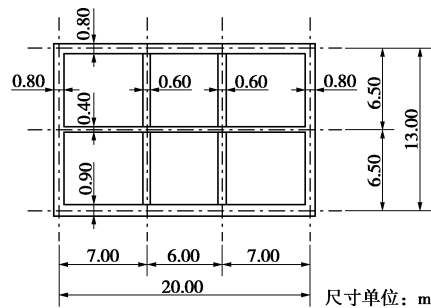


图 10 标准工况 2 层 3 跨地铁车站截面图

Fig. 10 Cross-sectional view of a subway station with 2 floors and 3 spans under standard conditions

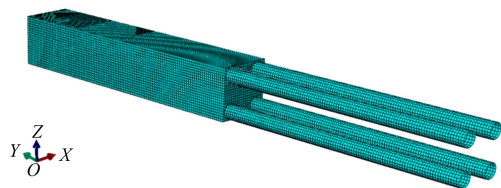


图 11 3 层 3 跨-4 孔区间隧道结构有限元模型图

Fig. 11 Finite element model for a three-story, three-span and four-hole tunnel structure

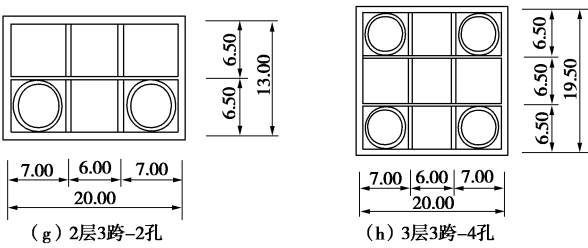
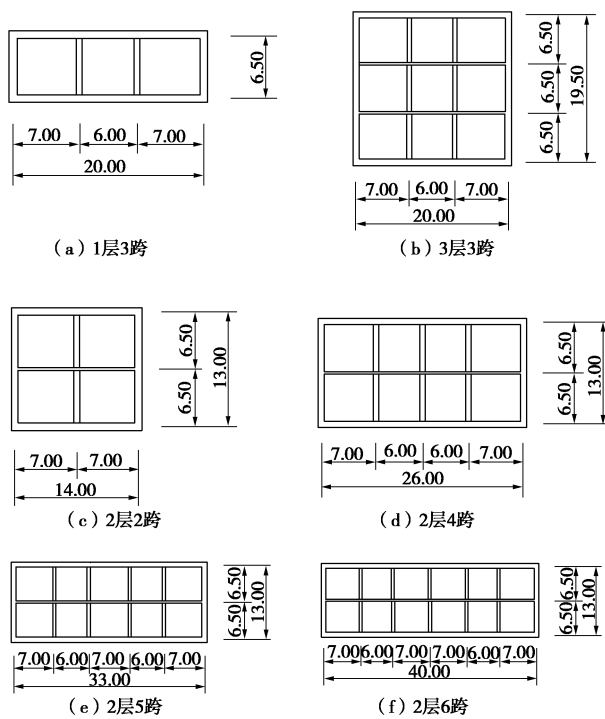


图 12 不同工况的地铁车站截面示意图 (m)

Fig. 12 Schematic cross-sections of subway stations under different working conditions (m)

依据上述尺寸参数，基于 ABAQUS 建立相应的有限元模型，对于边界条件，采用侧向滑移边界，即地震动沿模型底部 X 向输入，模型底部及侧面设置 Y 向、 Z 向约束，顶部自由。为了保证输入地震能够在模型中传播，一般要求网格尺寸小于 $1/10$ 波长， $\Delta l_{\max} \leq 0.1v/f_{\max}$ ，其中 v 为剪切波速， f_{\max} 为需考虑的地震动能量范围的最大频率。取 $v=200\text{ m/s}$ ， $f_{\max}=10\text{ Hz}$ ，则 $\Delta l_{\max} \leq 2\text{ m}$ 。故土体网格尺寸取 2 m ，车站隧道结构网格尺寸取 1 m ，满足要求。土体采用 C3D8R 实体单元，隧道结构及车站楼板和墙采用 S4R 壳单元，柱子为 B31 梁单元，车站楼板和柱，车站端墙和隧道以及地下结构与土体均采用 Tie 约束，即不考虑接触面的相对位移。

2.2 材料参数

土体采用软土/硬土+基岩的双层土，采用 Davidenkov 等价非线性本构模型，车站结构及隧道采用弹性模型，采用 C30 混凝土，土体及结构材料参数如表 2 所示。

2.3 地震动输入

地震响应分析时，选取 El-Centro 波（近场波）和 Kobe 波（近场脉冲波）两种地震波，其加速度时程曲线及傅里叶曲线如图 13 所示。

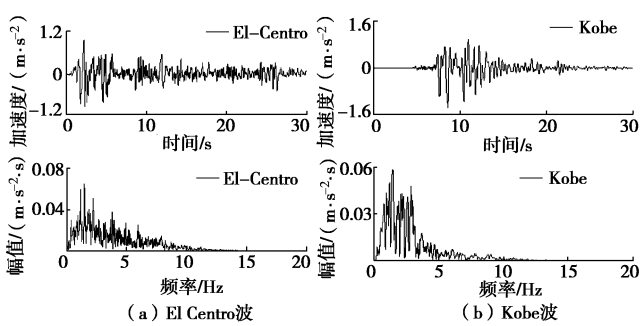


图 13 地震波时程及频谱图

Fig. 13 Time histories and spectra of seismic waves

2.4 计算工况

基于标准工况，为探究车站跨数及层数、土体参数、地震波、区间隧道等因素对车站端部效应的影响，确定如表 3 所示计算工况表。

表 2 材料参数表

Table 2 Material parameters

材料	土层厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比	波速/(m·s ⁻¹)	<i>A</i>	<i>2B</i>	γ_r
软土	60	1800	209	0.45	200	1	0.77	0.00123
硬土	60	1900	790	0.30	400	1	0.76	0.00074
基岩	10	2200	1320	0.20	500	1	0.68	0.00177
混凝土	—	2500	30000	0.20	—	—	—	—

表 3 计算工况表

Table 3 Calculation conditions

工况	车站结构	地震波	土体参数	区间隧道	备注
1	2 层 3 跨	0.1g El-Centro 波	软土	无区间隧道	标准工况
2	2 层 2 跨	0.1g El-Centro 波	软土	无区间隧道	车站跨数的影响
3	2 层 4 跨				
4	2 层 5 跨				
5	2 层 6 跨				
6	1 层 3 跨	0.1g El-Centro 波	软土	无区间隧道	车站层数的影响
7	3 层 3 跨	0.1g El-Centro 波	硬土	无区间隧道	土性参数的影响
8	2 层 3 跨				
9	2 层 3 跨				
10	2 层 3 跨				
11	2 层 3 跨-2 孔	0.1g El-Centro 波	软土	2 孔区间隧道	区间隧道的影响
12	3 层 3 跨-4 孔			4 孔区间隧道	

2.5 监测方案

监测地铁车站顶层中柱柱顶及柱底的加速度、速度、位移、弯矩响应，以 2 层 3 跨地铁车站为例，测点布置如图 14 所示。

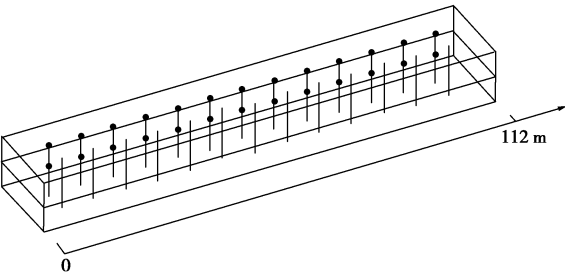


图 14 2 层 3 跨地铁车站测点布置图

Fig. 14 Arrangement of measuring points of a metro station with 2 layers and 3 spans

3 地铁车站端部影响范围分析

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，考虑到柱顶响应大于柱底，因此，本节采用车站中柱柱顶加速度、车站顶层柱端相对位移、柱顶弯矩和柱顶能量等 4 个指标，从 4 个方面探讨地铁车站端部影响范围。考虑到车站中部距端墙较远，可作为不受端墙影响的区域，并以车站中部响应作为基准值（距端墙 56 m），得到其他截面的响应与基准值的比值。由于缺乏统一规定，本文

暂规定当地震响应比值 $R_i/R \geq 0.9$ 时可认为该区域不受车站端墙的影响（其中 R_i 为分析的响应量，如加速度、层间位移、能量和弯矩，而 R 为车站中部截面的响应量）。

能量计算公式为^[12]

$$E_{\text{总}} = \int_0^T V^2 dt$$

(3)

式中， T 为地震波作用时间， V 为测点每一时刻对应的速度。

3.1 地铁车站跨数的影响

由车站中部的参考柱柱顶加速度时程图 15 来看，不同车站跨数的加速度响应规律基本一致，仅幅值存在差异。提取车站中柱加速度、能量、弯矩、相对位移幅值，并以车站纵向跨中截面处的中柱作为基准值，得到其相应的比值，如图 16 所示，加速度、弯矩、相对位移幅值沿车站长度方向基本呈现先增加后平稳再减小的趋势，即车站中部响应较大，而两端由于端墙的影响响应相对较小。而从加速度幅值来看，2 层 2 跨<2 层 6 跨<2 层 5 跨<2 层 3 跨<2 层 4 跨，即随着车站跨数的增加，加速度幅值同样呈现先增大后减小的规律，且转折点在 2 层 4 跨。从弯矩幅值来看，2 层 2 跨<2 层 6 跨<2 层 3 跨<2 层 4 跨<2 层 5 跨，即随着车站跨数的增加，弯矩幅值呈现先增大后减小的规律，且转折点在 2 层 5 跨。从相对位移来看，2 层 3 跨<2 层 4 跨<2 层 5 跨<2 层 6 跨<2 层 2 跨，随着跨数增加，

相对位移幅值呈现先减小后增大的趋势, 且转折点在 2 层 3 跨。这表明车站跨数会对其中柱地震响应产生明显影响, 且随着跨数增加, 影响程度存在转折点。

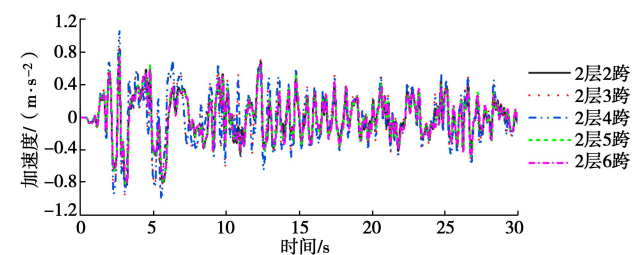


图 15 地铁车站参考柱柱顶加速度时程曲线

Fig. 15 Time-history curve of top of reference column of subway station

基于图 16 所示, 取比值小于 0.9 的区间为端部影响范围得到表 4, 可以发现, 除能量对端部效应的影响不明显外, 其他 3 种评价指标得出的影响范围规律基本一致, 即随着车站跨数的增加, 端部影响范围呈现先增加而后趋于一致的趋势, 且从柱端弯矩角度得出的影响范围更为接近最终的最大影响范围。结合车站宽度, 则地铁车站结构端部影响范围随着跨数的增加呈现先增大后减小的趋势, 最大的为 2 层 3 跨车站, 影响范围为 1.6B。

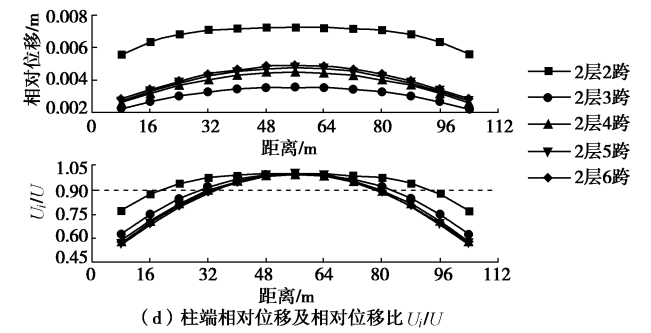
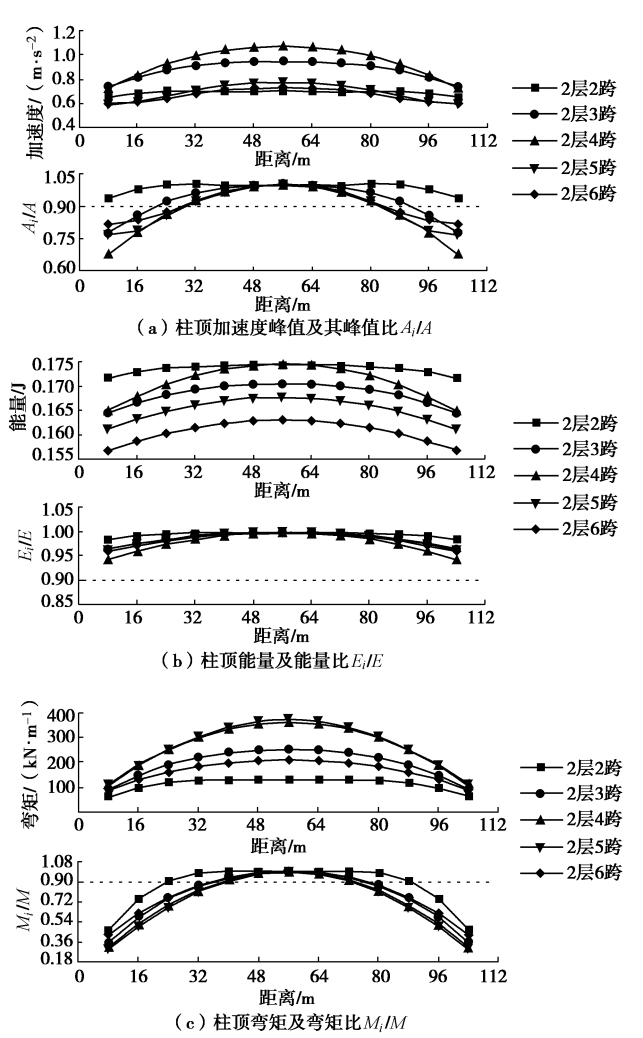


图 16 不同跨数的地铁车站结构地震响应以及其与参考点比值沿车站长度方向变化曲线

Fig. 16 Seismic responses of a subway station structure with different spans and its ratio to reference point along length of the station

表 4 不同跨数地铁车站端部影响范围

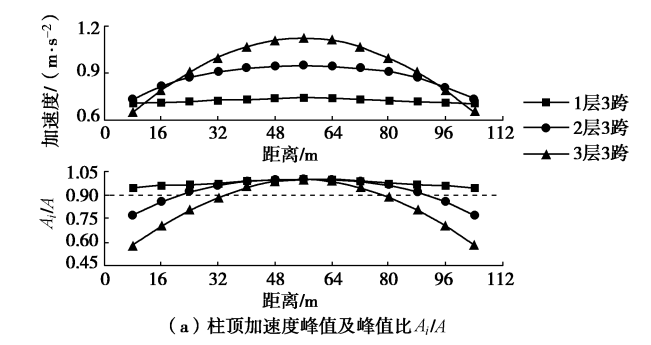
Table 4 Influence ranges of end wall of metro station with different spans

车站结构形式	车站宽度 B/m	不同评价指标下的端部影响范围/m				最大影响范围
		加速度	能量	弯矩	相对位移	
2 层 2 跨	14	0	0	16	16	1.1B
2 层 3 跨	20	16	0	32	24	1.6B
2 层 4 跨	26	24	0	32	32	1.2B
2 层 5 跨	32	24	0	32	32	1.0B
2 层 6 跨	40	24	0	32	32	0.8B

3.2 地铁车站层数的影响

提取地铁车站中柱地震响应幅值如图 17 所示, 从加速度幅值来看, 1 层 3 跨<2 层 3 跨<3 层 3 跨, 即车站层数越多, 其顶层柱顶加速度响应越大; 从弯矩幅值来看, 1 层 3 跨<3 层 3 跨<2 层 3 跨, 且 3 层 3 跨与 2 层 3 跨弯矩幅值较为接近, 并明显大于 1 层 3 跨; 从相对位移幅值来看, 1 层 3 跨<2 层 3 跨<3 层 3 跨, 即车站结构相对位移会随层数增加而增加, 但层数增加至 2 层后, 影响程度减弱。

基于图 17 并以比值小于 0.9 为界得到表 5, 可见随着车站层数的增加, 端部影响范围呈现先增加而后趋于一致的趋势, 且从柱端弯矩角度得出的影响范围更为接近最终的最大影响范围。结合车站宽度, 影响范围最大的为 2 层 3 跨/3 层 3 跨车站, 为 1.6B。



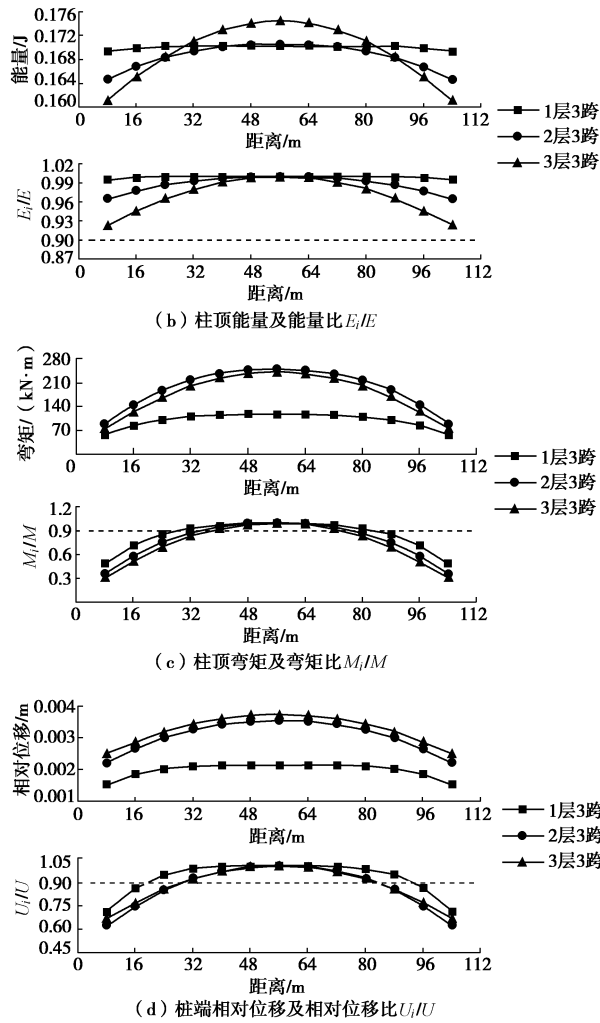


图 17 不同层数的地铁车站结构地震响应以及其与参考点比值沿车站长度方向变化曲线

Fig. 17 Seismic responses of a subway station structure with different layers and its ratio to reference point along length of station

表 5 不同层数地铁车站端部影响范围

Table 5 Influence ranges of end wall of metro station with different layers

车站结构形式	车站宽度 B/m	不同评价指标下的端部影响范围/m				最大影响范围
		加速度	能量	弯矩	相对位移	
1 层 3 跨	20	0	0	24	16	1.2B
2 层 3 跨	20	16	0	32	24	1.6B
3 层 3 跨	20	32	0	32	24	1.6B

3.3 土体参数的影响

考虑软土、硬土两种土层参数，对车站中柱地震响应进行分析，如图 18 所示，从加速度幅值来看，硬土中的地铁车站响应明显大于软土中的车站响应；而从弯矩、相对位移幅值来看，软土中的车站结构响应大于硬土中的，这是由于在软土中地铁车站受土体约束相对较弱，更容易发生产生变形。如表 6 所示，对

于不同土层中结构端部效应的影响，两种土层相差不大，均为 1.6B。这是由于对于车站结构端部影响范围的四种指标中，弯矩通常为关键影响因素，而地铁车站虽然在不同土层中的响应差别较大，但其柱顶弯矩沿车站长度方向的变化规律基本一致，因此土层参数对于地铁车站结构的端部效应的影响可基本忽略不计。

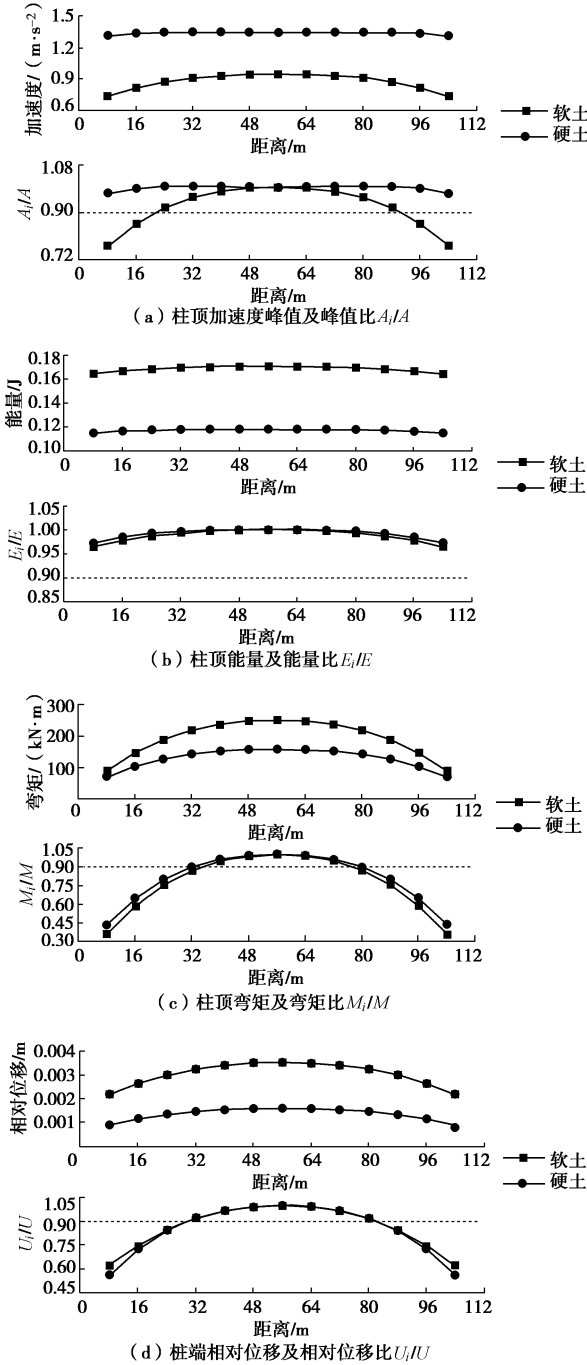


图 18 不同土层参数中的地铁车站结构地震响应以及其与参考点比值沿车站长度方向变化曲线

Fig. 18 Curves of seismic response of subway station structure with different soil layer parameters and ratio to reference point along station

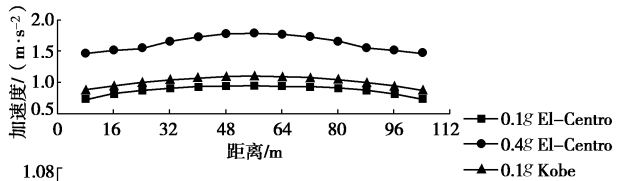
表 6 不同土层参数中地铁车站端部影响范围

Table 6 Influence ranges of end wall of metro station with different soil layer parameters

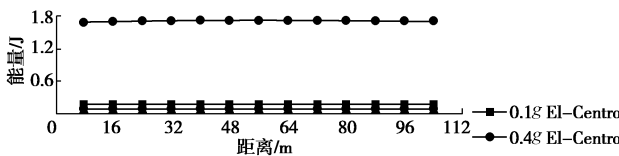
土体 参数	车站宽 度 B/m	不同评价指标下的端部影 响范围/ m				最大影响 范围
		加速 度	能 量	弯 矩	相对 位移	
软土	20	16	0	32	24	$1.6B$
硬土	20	0	0	32	24	$1.6B$

3.4 地震波类型、幅值的影响

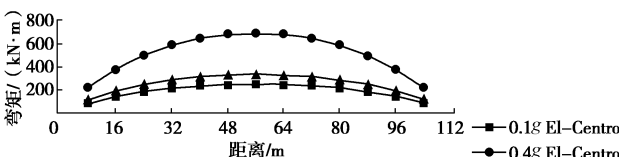
如图 19 所示, 在 $0.1g$ 及 $0.4g\text{El-Centro}$ 波和 $0.1g\text{Kobe}$ 波作用下地铁车站顶层中柱柱端加速度、弯矩、相对位移幅值响应存在如下规律: $0.1g\text{El-Centro}<0.1g\text{Kobe}<0.4g\text{El-Centro}$; 而从其与基准值的比值曲线来看, 车站结构沿长度方向的响应特征基本一致, 端部响应较小而中部响应较大, 且比值曲线较为接近, 这是由于采用了同一结构形式的地铁车站。结合表 7, 虽然从加速度的指标来看, $0.4g$ 的地震波端部影响范围大于 $0.1g$, 但由于弯矩的影响程度更大, 故三种地震波作用下的地铁车站端部效应影响范围均为 $1.6B$, 表明其端部影响范围受地震波类型、幅值影响较小, 而更多地与其自身结构特性有关。



(a) 柱顶加速度峰值及峰值比 A_i/A



(b) 柱顶能量及能量比 E_i/E



(c) 柱顶弯矩及弯矩比 M_i/M

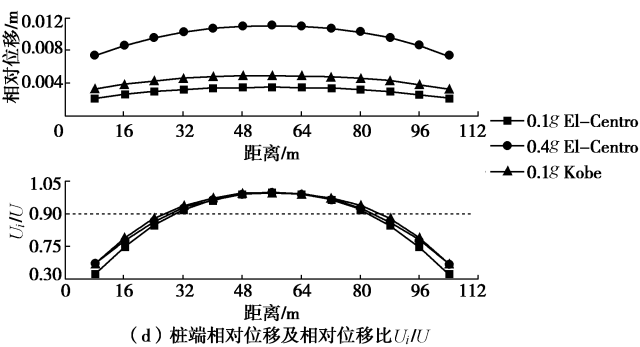


图 19 不同地震波作用下地铁车站结构地震响应以及其与参考点比值沿车站长度方向变化曲线

Fig. 19 Seismic responses of subway station structure under different seismic waves and its ratio to reference point along length of the station

表 7 不同地震波作用下地铁车站端部影响范围

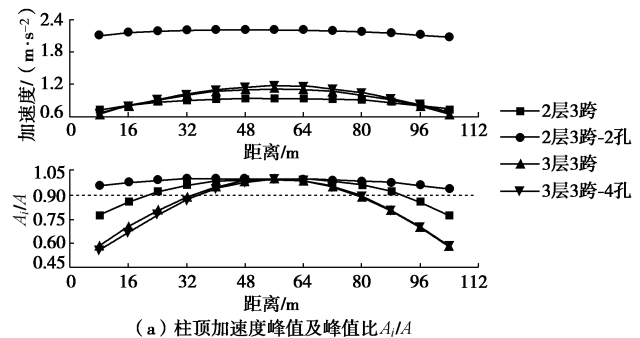
Table 7 Influence ranges of end wall of metro station under different seismic waves

地震波类型	车站宽 度 B/m	不同评价指标下的端部影 响范围/ m				最大影响 范围
		加速 度	能 量	弯 矩	相对 位移	
$0.1g\text{El-Centro}$	20	16	0	32	24	$1.6B$
$0.4g\text{El-Centro}$	20	24	0	32	24	$1.6B$
$0.1g\text{Kobe}$	20	16	0	32	24	$1.6B$

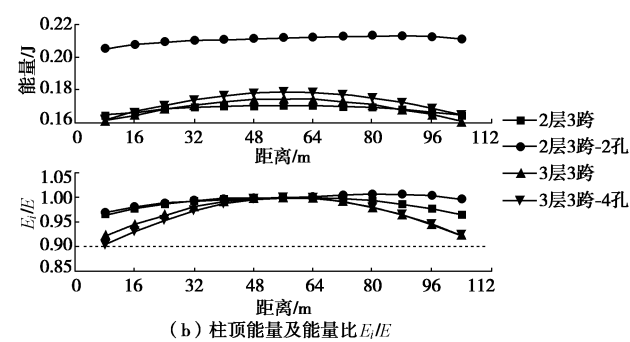
3.5 区间隧道对车站的影响

如图 20 所示, 从加速度幅值来看, 2 层 3 跨 $<$ 3 层 3 跨 $<$ 3 层 3 跨-4 孔 $<$ 2 层 3 跨-2 孔, 即区间隧道开孔的存在会导致地铁车站中柱加速度响应增加, 尤其是 2 层 3 跨车站, 在加入 2 孔区间隧道后, 其加速度峰值显著增大; 从弯矩幅值来看, 2 层 3 跨-2 孔 $<$ 3 层 3 跨 $<$ 2 层 3 跨 $<$ 3 层 3 跨-4 孔; 从相对位移幅值来看, 2 层 3 跨-2 孔 $<$ 2 层 3 跨 $<$ 3 层 3 跨 $<$ 3 层 3 跨-4 孔, 可见区间隧道开孔较多时, 会导致地铁车站弯矩、相对位移响应增大。

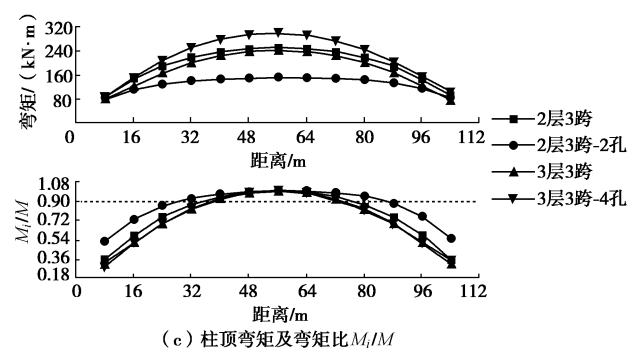
如表 8 所示, 对于 2 层 3 跨地铁车站, 2 孔区间隧道的增加导致其端部影响范围由 $1.6B$ 降低为 $1.2B$, 而对于 3 层 3 跨地铁车站来说, 4 孔区间隧道对其端部效应影响较小, 均为 $1.6B$ 。



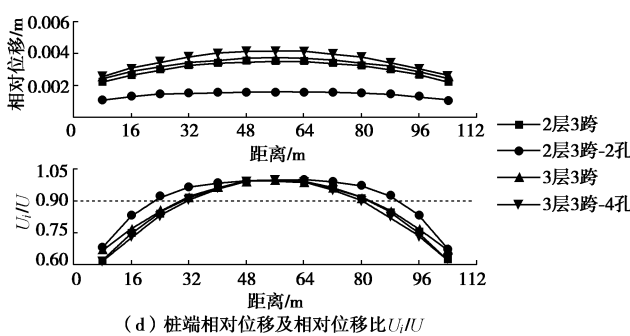
(a) 柱顶加速度峰值及峰值比 A_i/A



(b) 柱顶能量及能量比 E/E_0



(c) 柱顶弯矩及弯矩比 M/M_0



(d) 柱端相对位移及相对位移比 U/U_0

图 20 不同区间隧道数量的地铁车站结构地震响应以及其与参考点比值沿车站长度方向变化曲线

Fig. 20 Seismic response of subway station structure with different number of tunnels and its ratio to the reference point along the length of the station

表 8 不同区间隧道数量的地铁车站端部影响范围

车站结构形式	车站宽度 B/m	不同评价指标下的端部影响范围/m				最大影响范围
		加速度	能量	弯矩	相对位移	
		度	量	矩	移	
2 层 3 跨	20	16	0	32	24	$1.6B$
2 层 3 跨-2 孔	20	0	0	24	16	$1.2B$
3 层 3 跨	20	32	0	32	24	$1.6B$
3 层 3 跨-4 孔	20	32	0	32	32	$1.6B$

综上所述,通过对车站层数及跨数、土体参数、地震波特性、区间隧道等影响因素的研究发现,端部效应影响范围最大的为 2 层 3 跨车站,其最大的端部空间影响范围为 $1.6B$ (B 为车站结构宽度),如图 21 所示。

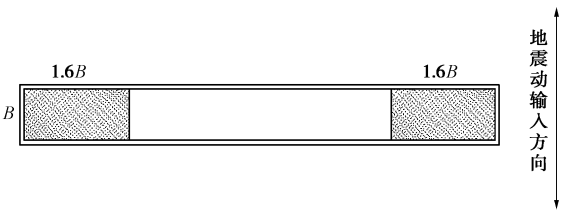


图 21 地铁车站端部空间影响范围

Fig. 21 Spatial influence scopes of end wall of subway station

4 结论与展望

通过对由典型两层三跨地铁车站结构及两条环形区间隧道组成的地铁车站接头结构振动台试验进行数值模拟,验证了数值模型的准确性,从而对地铁车站结构端部影响范围进行了研究,并考虑了地铁车站跨数及层数、土体参数、地震波类型及幅值以及区间隧道的影响,从车站顶层中柱加速度、能量、弯矩、相对位移 4 个评价指标进行分析,可得出以下 3 点结论。

(1) 车站结构的跨数、层数以及区间隧道的数量均会对地铁车站端部影响范围产生一定的影响,地铁车站结构端部影响范围随着跨数的增加呈现先增大后减小的趋势,随着车站层数的增加呈现先增大而后趋于一致的趋势,且影响范围最大的为 2 层 3 跨车站,其影响范围为 $1.6B$ (B 为结构宽度);而添加 2 孔区间隧道后会导致 2 层 3 跨地铁车站端部影响范围的减小。本文的研究结论与目前国家规范推荐的端部影响范围 $1.5B$ 较为接近,也是对目前规范建议值的论证。

(2) 地铁车站结构端部效应影响范围主要取决于自身的结构特性,而受土体参数和地震波类型及幅值影响较小。

(3) 从 4 个评价指标来看,通过柱端弯矩得出的端部效应影响范围更为接近车站结构端部最大影响范围,因此,直接通过弯矩来分析车站结构端部效应影响范围是一种更简单高效的方法。

本文虽然考虑了几种影响因素对单体地铁车站结构端部效应的影响,但对于端部效应的研究后续尚需进一步的全面分析,如进一步考虑不同形式的换乘地铁车站、地下综合体等其他形式的地下结构,进一步确定端部效应影响范围内的影响因子等,以期工程设计提供一定的参考价值。

参考文献:

[1] ZLATANOVIĆ E, LUKIĆ D Č, PROLOVIĆ V, et al. Comparative study on earthquake-induced soil-tunnel structure interaction effects under good and poor soil conditions[J]. European Journal of Environmental and Civil

- Engineering, 2015, **19**(8): 1000 - 1014.
- [2] 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 Hai-yang, WANG Xiu-xin, CHEN Guo-xing. Earthquake responses of subway station with different depths of soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8): 1258 - 1266. (in Chinese))
- [3] 陈磊, 陈国兴, 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, CHEN Guo-xing, MAO Kun-ming. 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. (in Chinese))
- [4] 王国波. 软土地铁车站结构三维地震响应计算理论与方法的研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (WANG Guo-bo. Study on Calculation Theory and Method of Three Dimensional Seismic Response of Subway Station Structures in Soft Soil[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [5] MOK C M, VALLENAS J, ZHANG M, et al. End Wall Effect for Underground Structures: Three-Dimensional Dynamic Soil-Structure Interaction Parametric Study[C]// Proceedings of 100th Anniversary Earthquake Conference Commemorating the 1906 San Francisco Earthquake. 2006.
- [6] HOSSEINI M, ROUDSARI M T. Minimum effective length and modified criteria for damage evaluation of continuous buried straight steel pipelines subjected to seismic waves[J]. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, 2014, **6**(4): 04014018.
- [7] 陈清军, 李文婷. 地铁车站-隧道-土相互作用体系地震反应[J]. 地震工程与工程振动, 2018, **38**(4): 9 - 15. (CHEN Qing-jun, LI Wen-ting. Seismic responses analysis of subway station-tunnels-soil-interaction system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, **38**(4): 9 - 15. (in Chinese))
- [8] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2010. (Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. 2010. (in Chinese))
- [9] 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 Qian-qian. Shaking Table Testing on Underground Subway Station Structures[D]. Shanghai: Tongji University, 2002. (in Chinese))
- [10] MA Xian-feng, WANG Guo-bo, WU Jun, et al. Experimental study on the seismic response of subway station in soft ground[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2017, **11**(5): 1750020-1-27.
- [11] 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 Ding-feng, RUAN Bin, CHEN Guo-xing, 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))
- [12] BARD P Y, CHAZELAS J L, GUÉGUEN P, et al. Site-City Interaction[M]. Dordrecht: Springer, 2008: 91 - 114.