

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202002013

下穿隧道对地铁车站结构地震反应的影响研究*

路德春, 郝文磊, 吴春玉, 杜修力

(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: 针对下穿隧道对临近地铁车站地震反应的影响问题, 本文采用数值模拟方法, 基于ABAQUS平台建立了隧道下穿大开地铁车站的整体三维非线性数值分析模型, 通过改变地震动类型和隧道与车站结构的交叉净距, 从结构构件的破坏比和竖向变形等角度, 定量分析了不同工况下隧道下穿对车站结构地震反应的影响, 并与单体大开车站原型结构的地震反应进行了对比。研究表明: 下穿隧道会增大地铁车站结构中柱和侧墙的破坏比(相应的最大增幅: 中柱为35%, 侧墙为26%); 同时, 底板的竖向变形显著增大, 最大增幅达到100%; 随着交叉净距的增大, 中柱和侧墙地震反应减小, 而底板竖向沉降有所增大; 下穿隧道对车站结构地震反应的影响范围约为隧道直径的3倍。研究成果对隧道近距离穿越地铁车站结构的设计与分析具有一定的参考价值。

关键词: 大开车站; 下穿隧道; 破坏比; 交叉净距; 地震反应

中图分类号: TU921 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0445-09

Influence of Undercrossing Tunnel on Seismic Response of Subway Station Structure

LU Dechun, HAO Wenlei, WU Chunyu, DU Xiuli

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The seismic response of subway stations is inevitably affected by the adjacent tunnel engineering. In this paper, three-dimensional non-linear numerical analysis models of a tunnel passing under the Daikai subway station are established using the ABAQUS platform. The simulation cases are set considering different ground motions and varying clear distances between the tunnel and the station structure. The influence of an undercrossing tunnel on the seismic response of subway station structure is quantitatively analyzed from the point of view of failure ratio and vertical deformation of the structural components, and compared with the seismic response of the prototype Daikai station without an undercrossing tunnel. The results show that the failure ratio of the central column and the lateral wall of the subway station structure increased with the existence of the undercrossing tunnel (the corresponding maximum increase rate is 35% for the central column and 26% for the lateral wall). The vertical deformation of the bottom floor increased maximumly by 100%. With the increase of the cross clearance, the seismic response of the central column and the lateral wall reduce, while the vertical settle-

* 收稿日期: 2020-02-12; 修回日期: 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52025084)资助

作者简介: 路德春(1977—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事岩土与城市地下工程领域的教学与科研工作。

E-mail: dechun@bjut.edu.cn

ment of the bottom floor increase. The influence area of the undercrossing tunnel on the seismic response of the station structure is about 3 times of tunnel diameter. The research results have certain reference significance for the design and analysis of the subway station structure where the tunnel passes through in a short distance.

Keywords: Daikai subway station; undercrossing tunnel; failure ratio; clear-distance; seismic response

引言

随着我国城市轨道交通的大规模建设及地下工程施工技术的日趋成熟,城市地下交通工程不断向深处发展,近距离地下穿越工程大量涌现^[1-2],其中新建线路穿越既有结构的形式之一为隧道下穿地铁车站。如,北京地铁6号线马蹄形隧道垂直下穿2号线车公庄站,穿越净距即隧道拱顶距离车站底板距离为2.5 m;北京地铁7号线矩形隧道垂直下穿5号磁器口站,穿越净距仅为1.1 m;此外,北京地铁6号线区间隧道分别零距离下穿2号线朝阳门站和5号线东四站。地震作用下临近地下结构地震反应的相互影响,尤其是下穿隧道对地铁车站结构地震反应的影响是地下结构抗震研究面临的新问题,具有重要的研究意义。

近年来,临近地下结构地震时的动力相互影响已经引起研究者的广泛关注。有学者认为下穿隧道会降低体系刚度或改变土层应力状态,导致上部结构地震反应增大。如陈磊等^[3]使用数值模拟方法对竖向交叉隧道地震反应的研究表明,下层隧道的存在会增大上层隧道拱顶与拱底的水平向相对位移;孙玮泽等^[4]模拟了北京地铁7号线隧道下穿双井地铁车站结构的地震反应,发现下穿隧道会引起车站周围土体发生应力重分布,导致车站结构的边墙和仰拱的水平向和竖向位移增大;在地下结构对临近地面结构影响方面,J.Guo等^[5]通过数值模拟研究发现地下结构的存在会放大地表结构的地震反应。也有学者认为结构底部的下穿隧道会阻隔地震波的传播从而降低上部结构地震反应,如张波等^[6-7]从能量消耗的角度进行分析,指出下穿地铁车站结构的隧道会吸收部分地震能量,减小车站结构的地震反应,并通过模型试验验证了这一观点。在隧道对临近地表车站结构的影响研究方面,G.B.Wang等^[8]开展了隧道对地表结构地震反应的模型试验,研究发现隧道会阻碍地震波的传播,导致地

表结构的地震反应降低;李积栋等^[9]进行了交叉车站的振动台试验,研究发现下层车站的存在减小了上层车站结构的地震反应,且上层车站地震反应随穿越净距的增加而增大。陶连金等^[10]研究了下穿隧道对车站地震反应的影响,结果表明,竖向地震作用下,下穿隧道对车站结构的影响与地震动的频谱特性相关。由此可见,关于临近地下结构地震反应的相互影响规律尚未形成共识,更未建立实用的抗震性能评价指标与分析方法^[11]。

本文利用数值模拟方法,研究了不同地震动作用时下穿隧道对上部地铁车站结构地震反应的影响,并获得了隧道与结构净距的影响规律。研究成果对于认识临近地下结构地震反应的相互影响及评价方法具有一定的指导意义。

1 研究对象及分析模型

1.1 研究对象

1995年日本阪神地震中,大开地铁车站发生塌毁破坏,车站的大部分中柱发生严重破坏,中柱的破坏导致结构顶板折断和地面的沉陷^[12],引起了国内外学者和工程师对地下结构抗震问题的广泛关注。研究者们针对大开车站的地震破坏机理开展了大量的研究工作^[13-17]。考虑到大开车站结构简单,设计资料和场地条件明确,本文以大开车站单层结构为研究背景建立数值模型,并在车站下方设置一条外半径 r 为3 m的圆形隧道,隧道与车站进深方向垂直,衬砌厚度为0.5 m。

大开地铁车站倒塌破坏段对应的上覆土体厚度为4.8 m,场地土层参数见表1。结构断面形式如图1所示。侧墙厚0.85 m,配筋率0.8%,顶板和底板厚度分别为0.80、0.85 m,配筋率1%。中柱截面尺寸为0.40 m×1.00 m,高3.82 m,相邻柱中心纵向净距为2.5 m。中柱的配筋形式如图2所示,纵筋采用30根32 mm的螺纹钢筋;采用矩形和折线单肢箍两种配箍形式,箍筋直径为9 mm,沿竖向间隔350 mm布置^[18]。

表1 大开车站场地土层物理性质参数

Table 1 Physical parameters of soil layer of Daikai station site

土层	深度/m	密度/ (g·cm ⁻³)	剪切波速/ (m·s ⁻¹)	泊松比
1	0~1.0	1.9	140	0.33
2	1.0~5.1	1.9	140	0.32
3	5.1~8.3	1.9	170	0.32
4	8.3~11.4	1.9	190	0.40
5	11.4~17.2	1.9	240	0.30
6	17.2~22.2	2.0	330	0.26
7	>22.2	—	—	—

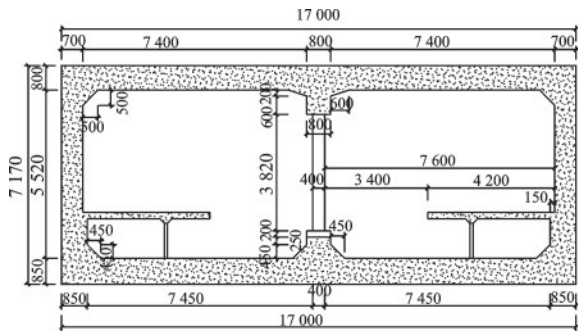


图1 结构横断面示意

Fig.1 Cross-section diagram of the structure

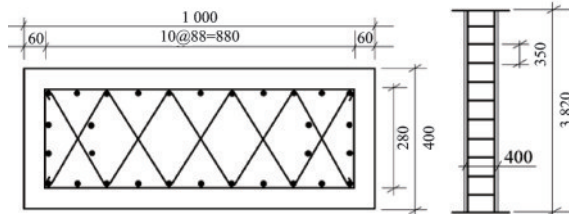


图2 中柱尺寸及配筋示意

Fig.2 Size and reinforcement diagram of the central column

1.2 数值模型

利用ABAQUS有限元软件建立了大开地铁站及其下穿隧道的整体三维有限元模型,模型尺寸、监测点及监测断面布置如图3所示,其中监测点A位于车站结构纵向监测断面的底板上。整体模型计算宽度取5倍车站宽度,即85 m,车站纵向取7跨28 m,车站模型及网格划分如图4所示。围岩土体和混凝土采用六面体减缩积分单元,钢筋采用三维桁架单元,土体单元格尺寸最大为1.5 m,小于1/10波长^[19],满足计算精度要求。

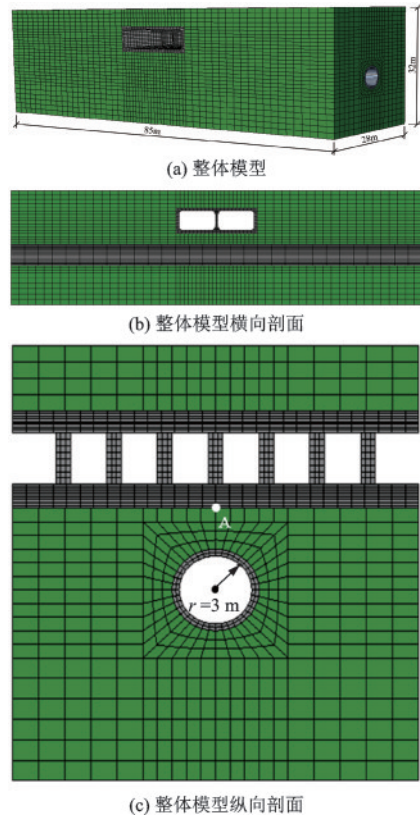


图3 整体分析有限元模型

Fig.3 Finite element analysis model

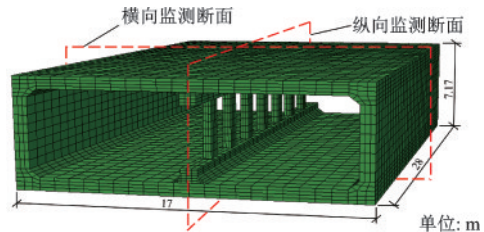


图4 大开车站三维有限元模型

Fig.4 3D finite element model of Daikai station structure

1.3 人工边界条件与地震动输入方法

采用黏弹性人工边界模拟无限域土体对计算区域土体边界的影响^[20],采用波场分解法实现地震动的输入^[21]。阪神地震记录为大开车站实际场地条件下获得的地震记录,集集地震导致大量软土场地中的地下结构发生破坏,因此选择阪神地震和集集地震记录作为输入地震动。《建筑抗震设计规范》^[22]规定抗震设防烈度为9度地区的设计基本地震加速度为0.4g,将两条地震记录的水平加速度幅值调至0.4g,调幅后两条地震波的地表水平加速度时程曲线如图5所示。由于阪神地震中水平加速度幅值在20 s后衰减到很小,对计算结果不会产生

影响,考虑到计算效率,截取前 23 s 的地震动时程进行输入。输入的集集地震动记录的持时为 30 s。

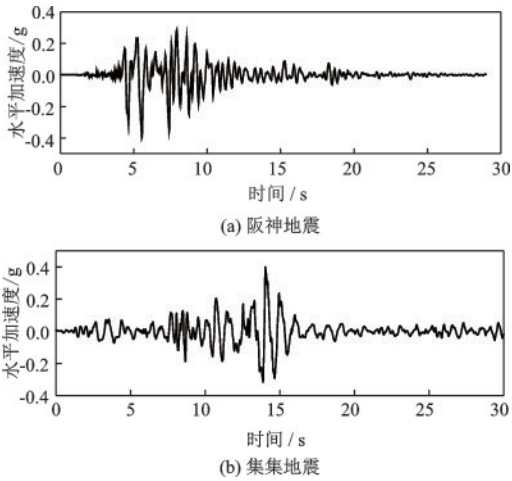


图5 地震动水平加速度时程曲线

Fig.5 Time history curves of horizontal acceleration of ground motion

地震反应分析之前,首先进行了整体模型的地应力平衡,得到了合理的应力场和位移场,作为初始计算条件。此外,在作者已开展的研究中对数值模拟的方法的合理性进行了验证^[15]。

1.4 材料本构模型

为了合理描述围岩土体在地震反应中的力学特性,采用三维弹塑性本构模型^[22]模拟土体的力学行为,该模型能较好的模拟土体在循环荷载作用下塑性变形累积和应变软化特性。为了简化分析,在计算过程中对土层进行均一化处理,结合大开车站实际场地土层参数^[23]以及文献资料^[13, 15, 24-25]确定了模型初始孔隙比为 0.6,前期固结压力为 1.5 MPa,土体材料参数详见表 2。采用弹塑性损伤模型^[26]模拟混凝土材料的力学行为,材料参数见表 3。钢筋采用理想弹塑性模型,其中 $\rho = 7\ 800\ \text{kg/m}^3$ 、 $E = 200\ \text{GPa}$ 、 $\nu = 0.1$,屈服应力为 240 MPa。采用罚函数法定义车站结构及隧道与围岩土体之间接触特性,切向设置为摩擦接触,摩擦系数取为 0.4^[27];法向设置为硬接触,接触单元之间互不侵入;计算中不考虑钢筋和混凝土之间的相对滑移。

1.5 计算工况

为了探讨下穿隧道与地铁车站间距对车站地震

表 2 土体材料参数

Table 2 Material property of the surrounding soil

参数	值	参数	值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 960	压缩指数	0.12
泊松比	0.3	回弹指数	0.008
摩擦角/($^\circ$)	33		

表 3 混凝土材料参数

Table 3 Material property of the concrete

参数	值	参数	值
杨氏模量/GPa	30	极限屈服应力/MPa	26.8
泊松比	0.2	拉伸破坏应力/MPa	2.4
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2 400	压缩刚度恢复系数	1
剪胀角/($^\circ$)	35	拉伸刚度恢复系数	0
初始压缩屈服应力/MPa	18.8		

反应的影响规律,通过改变隧道埋深,使隧道拱顶与车站底板间垂直净距分别为 $0.25r$ 、 $0.5r$ 、 $0.75r$ 和 $1r$, r 为下穿隧道半径,同时采用两组不同的地震动,对大开车站原型结构和 4 种不同间距的工况进行模拟计算,所有工况的编号及详细信息见表 4。

表 4 模拟工况

Table 4 Details of the simulation cases

编号	模型设置	地震记录
Hanshin-1	单体地铁车站	阪神地震动记录 (Hanshin)
Hanshin-2	隧道与车站净间距 $0.25r$	
Hanshin-3	隧道与车站净间距 $0.5r$	
Hanshin-4	隧道与车站净间距 $0.75r$	
Hanshin-5	隧道与车站净间距 $1r$	
Chi-Chi-1	单体地铁车站	集集地震动记录 (Chi-Chi)
Chi-Chi-2	隧道与车站净间距 $0.25r$	
Chi-Chi-3	隧道与车站净间距 $0.5r$	
Chi-Chi-4	隧道与车站净间距 $0.75r$	
Chi-Chi-5	隧道与车站净间距 $1r$	

2 地铁车站结构地震反应对比分析

2.1 中柱地震反应对比分析

在地震作用下,地铁车站结构的中柱水平方向会发生侧向变形,同时由于上部土体重力和竖向地震作用,中柱的轴压比会显著增高,轴压比的增高

会导致中柱侧向变形能力减弱,因此,分析中柱的水平变形反应状态应同时考虑竖向轴压比的大小。破坏比^[28] $f_r(t)$ 通过地下结构的地震反应和变形能力之间的比例关系来描述构件的地震反应程度,可以反应轴压比对构件变形能力的影响。因此本文采用破坏比评价中柱及侧墙的地震反应程度,其表达式为:

$$f_r(t) = \frac{\theta(t, N_c)}{\theta_U(N_c)} \quad (1)$$

其中, $\theta(t, N_c)$ 为构件在 t 时刻的位移角,对应的轴压比为 N_c , $\theta_U(N_c)$ 为在对应轴压比(N_c)下构件极限位移角,极限位移角通过构件的推覆分析获得。如图6所示,构件底部边界固定,在限制顶面转动的条件下,在构件顶面施加轴向荷载 N 使其轴压比达到 N_c ,对构件顶面进行水平位移加载,获得图6所示构件的水平反力—位移角曲线,构件的极限位移角定义为,当构件底部水平反力下降至其峰值荷载的85%时所对应的位移角。由破坏比的定义可知,当 $f_r(t) < 1$ 时,构件处于安全状态,破坏比的值越大表示构件的地震反应程度越剧烈;当 $f_r(t) = 1$ 时,构件达到极限变形能力;当 $f_r(t) > 1$ 时,构件发生破坏,破坏比的正负表示构件的侧移方向。

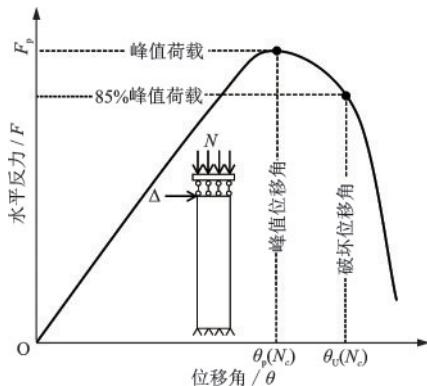


图6 构件加载方案及破坏标准

Fig.6 Loading scheme and failure standard of the components

图7为单体车站和隧道下穿地铁车站结构中中柱破坏比时程曲线。可以看出,隧道下穿后,中柱的地震反应的总体趋势并未发生改变,但下穿隧道放大了车站中柱的地震反应,表现为幅值的增大。这主要是由于隧道下穿后,隧道位置处刚度减小,隧道与围岩土体在地震作用下的相互作用增大了围岩土体的水平变形,导致车站地震反应增大。全部工况下中柱破坏比最大值见表5。表6为不同工况

下中柱轴压比的最大值,可见隧道下穿后,中柱轴压比略有减小,而交叉净距对中柱轴压比的影响并不明显。

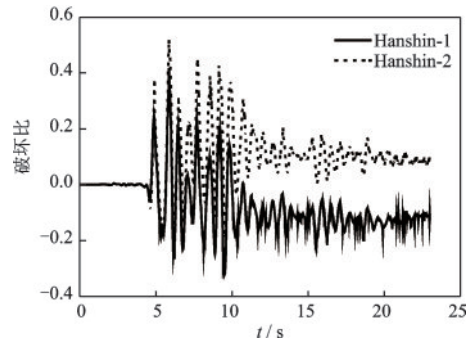


图7 中柱破坏比时程曲线

Fig.7 Time history curves of the failure ratio of the central column

表5 中柱破坏比最大值

地震记录	单体车站	隧道—下穿车站交叉净距			
		0.25r	0.5r	0.75r	1r
Hanshin	0.41	0.52	0.48	0.45	0.42
Chi-Chi	0.48	0.65	0.61	0.57	0.49

表6 中柱轴压比最大值

地震记录	单体车站	隧道与车站净间距			
		0.25r	0.5r	0.75r	1r
Hanshin	0.47	0.45	0.45	0.44	0.45
Chi-Chi	0.47	0.45	0.46	0.45	0.46

图8给出了中柱的破坏比随下穿隧道与地铁车站净距的变化规律曲线,从图中可以看出,在两组地震动作用下,隧道下穿的车站中柱地震反应大于单体车站结构;中柱的地震反应随隧道与车站净距的增大而减小。这主要是由于车站与隧道间距越大,隧道与围岩土体的相互作用对车站地震反应的影响越小。表7为相对于单体车站结构,隧道下穿车站结构中柱破坏比的增加量,从表中可以看出,当隧道与车站净距为0.25r时,集集地震作用下中柱破坏比增加量达到35%,交叉净距为1r时,中柱破坏比增加量仅有2%。由此可见,下穿隧道的存在对上部车站结构中柱的地震反应的影响不可忽略,同时交叉间距的增大会明显减小隧道对中柱地震反应的影响程度。

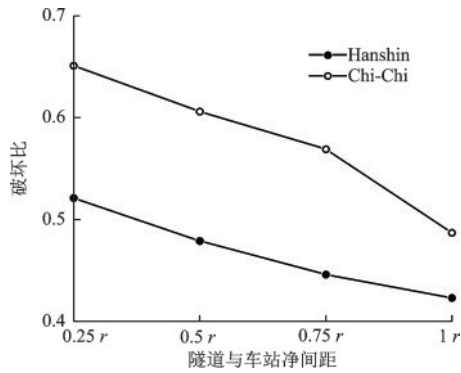


图8 中柱破坏比最大值随净间距变化规律

Fig.8 Variation of maximum failure ratio of the central column with the increasing clear-distance

表7 中柱破坏比增加量

地震记录	隧道与车站净间距			
	0.25r	0.5r	0.75r	1r
Hanshin	25%	15%	7%	2%
Chi-Chi	35%	26%	18%	2%

2.2 侧墙地震反应对比分析

同样采用破坏比评价车站侧墙的地震反应程度,从图9中无隧道穿越的车站侧墙破坏比时程的对比可以看出,隧道下穿后车站侧墙地震反应趋势不变,但幅值明显增大,说明下穿隧道放大了侧墙的地震反应。图10为侧墙破坏比随下穿隧道与车站净距的变化规律曲线,图中可以看出,隧道下穿后侧墙的地震反应大于单体车站,车站侧墙的地震反应随下穿隧道与车站间距的增大而减小,这两点结论与2.1节中下穿隧道对中柱的地震反应影响规律一致,这主要是由于顶板和底板的协调作用,导致中柱和侧墙水平向变形规律基本一致。表8给出了相对于单体车站,隧道下穿后车站侧墙破坏比

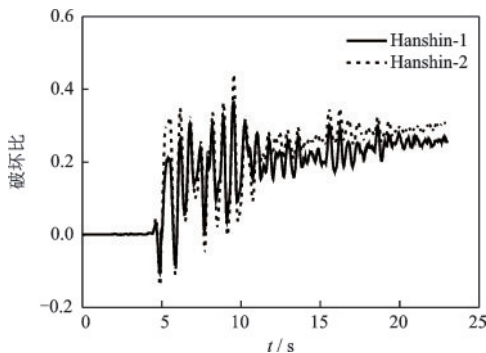


图9 侧墙破坏比时程曲线

Fig.9 Time history curves of the failure ratio of the lateral wall

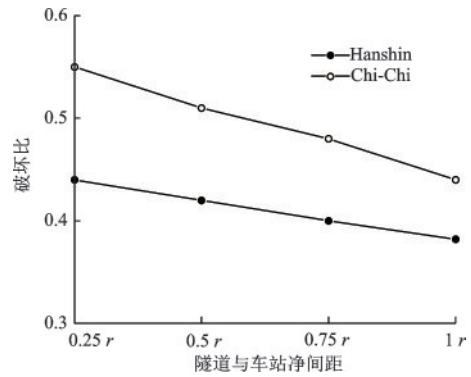


图10 侧墙破坏比最大值随净间距变化规律

Fig.10 Variation of maximum failure ratio of the lateral wall with the increasing clear-distance

表8 侧墙破坏比增加量

地震记录	隧道与车站净间距			
	0.25r	0.5r	0.75r	1r
Hanshin	22%	14%	10%	5%
Chi-Chi	26%	17%	11%	2%

的增加量,可以看出,下穿隧道对车站侧墙地震反应的放大程度最大为26%,下穿隧道对侧墙的地震反应影响同样不可忽略。

图11为集集地震作用下,车站中柱和侧墙破坏比的对比,图中数据为相对于单体车站结构,不同穿越净距工况下中柱和侧墙破坏比的增加量。可以看出,下穿隧道对车站中柱地震反应的放大效应明显大于侧墙(除隧道与车站净间距为1r的工况外),其原因是在地震作用下中柱的轴压比最大值为0.45,而侧墙仅为0.1,当围岩土体变形增加引起车站侧向位移增加时,由于中柱的轴压比更高,其极限变形能力小于侧墙,导致中柱地震反应增大程度大于侧墙。对于矩形车站结构,中柱为其抗震薄

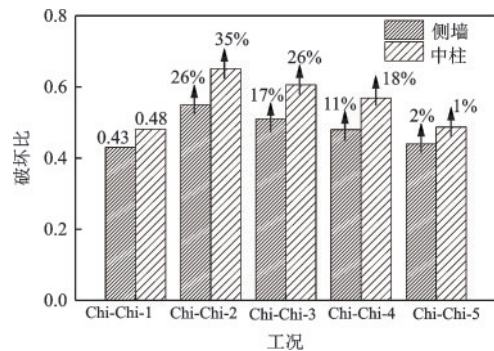


图11 集集地震作用下中柱与侧墙破坏比对比

Fig.11 Comparison of maximum failure ratio of the central column and lateral wall in Chi-Chi earthquake

薄弱环节,隧道下穿后,中柱的地震反应被进一步放大,需要在抗震设计中予以考虑。

2.3 底板地震反应对比分析

在地震作用下,下穿隧道和夹层土体的竖向变形直接引起上方车站结构底板的竖向变形。图12为阪神地震作用下,不同工况下车站底板监测点A(图3)的竖向位移时程。从图中可以看出,隧道下穿后车站结构底板变形明显增大,这主要是由于地震作用下隧道与围岩土体的相互作用,受扰动的夹层土体的变形与隧道结构的变形叠加,引起底板的竖向变形。同时可以看出,A点的竖向变形量随交叉净距的增大而增加,这主要是由于车站底板与隧道拱顶间夹层土体厚度的增大,这部分土体产生的不可恢复变形增加。

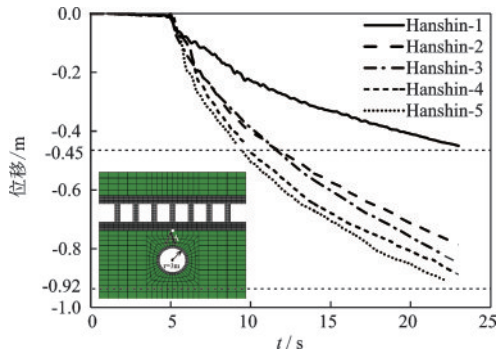


图12 不同工况下车站结构底板竖向沉降

Fig.12 Vertical deformation of the bottom floor of station structure in different working conditions

如图12所示,隧道下穿后,车站底板的竖向变形明显增大,因此提取最终时刻A点所在的纵向监测断面底板竖向位移曲线(图13),从图中可以看出,相对于单体车站结构,隧道下穿的车站结构底板竖向变形增加量随车站底板距离隧道中心点水平距离的增大逐渐减小,由此可知,下穿隧道对车站结构的竖向变形存在一个影响范围。以单体车站结构为基准,隧道中心位置处车站底板竖向变形最大增加量为100%,在距离隧道中心位置9m处,车站底板竖向位移最大增加量为9%,相对于隧道中心位置处,此处隧道对车站底板竖向变形的影响很小,如图13所示,影响程度较大区域的长度约为隧道直径的3倍。因此,本文建议取3倍的隧道直径作为隧道对车站结构地震反应的影响范围。

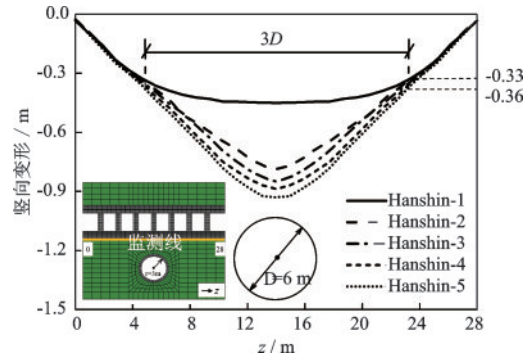


图13 不同工况下底板竖向位移曲线

Fig.13 Vertical displacements of the bottom floor of station structure in different working conditions

3 结论

采用破坏比、沉降变形等地震反应评价指标,对比单体车站与隧道下穿地铁车站结构的地震反应,分析了下穿隧道对车站结构中柱、侧墙和底板的地震反应的影响规律,得到如下几个方面的结论:

(1)隧道下穿车站结构后,车站结构中柱地震反应增大,最大增幅为35%;侧墙地震反应增大,最大增幅为26%;底板竖向变形量增加,最大增幅为100%。隧道下穿后车站中柱地震反应大于侧墙,且下穿隧道对车站中柱地震反应的影响程度大于侧墙。

(2)随着隧道与车站底板间距的增大,隧道对车站结构中柱和侧墙的地震反应影响明显减小。底板竖向变形随着隧道与车站的交叉间距的增大而增大。

(3)下穿隧道对车站结构的竖向地震的影响范围约为隧道直径的3倍。建议对此隧道周围土体采用注浆加固等措施,控制土体、隧道的竖向变形,减小上部车站结构的竖向地震反应。

参考文献:

- [1] 白海卫,王剑晨,刘运亮,等.既有地下结构受下穿施工影响的力学响应与安全控制研究[J].岩土工程学报,2019,41(5):874-884.
Bai H W, Wang J C, Liu Y L, et al. Safety control and mechanical response of existing underground structures induced by excavation of new tunnels under construction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,

- 2019, 41(5): 874-884. (in Chinese)
- [2] 路开锋. 北京新建地铁工程穿越既有有线方案及暗挖工法研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
Lu K F. Research on the plans and construction methods of the new-built subway works passing under the existing subways [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [3] 陈磊, 陈国兴, 李丽梅. 近场和远场地震动作用下双层竖向重叠地铁隧道地震反应特性[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 79-86.
Chen L, Chen G X, Li L M. 3D refined nonlinear finite element analysis of intersecting metro tunnels under near-field ground motion [J]. China Railway Science, 2010, 31(1): 79-86. (in Chinese)
- [4] 孙玮泽, 董军, 崔玉萍, 等. 含初始缺陷地铁隧道的抗震动力学行为研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增2): 283-288.
Sun W Z, Dong J, Cui Y P, et al. Study of aseismic performance of a typical subway tunnel with initial defects [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(Sup2): 283-288. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 张波, 陶连金, 姜峰, 等. 地铁超近距交叉结构在水平地震荷载下的响应影响分析[J]. 铁道建筑, 2011, 51(11): 47-50.
Zhang B, Tao L J, Jiang F, et al. Analysis of response to horizontal earthquake loading for metro crossing tunnels with super closed distance apart [J]. Railway Engineering, 2011, 51(11): 47-50. (in Chinese)
- [7] 黄俊, 张波. 地铁交叉结构近场地震反应振动台试验研究 [J]. 水电能源科学, 2013, 31(2): 120-122.
Huang J, Zhang B. Shaking table model test of subway cross-structure under near-field ground motion [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2): 120-122. (in Chinese)
- [8] Wang G B, Yuan M Z, Miao Y, et al. Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 76: 145-159.
- [9] 李积栋, 陶连金, 油新华, 等. 不同净距垂直交叉组合地铁车站结构地震响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增2): 3890-3897.
Li J D, Tao L J, You J H, et al. Study of seismic response of different clear-distance vertical intersecting combination subway station structures [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup2): 3890-3897. (in Chinese)
- [10] 陶连金, 王文沛, 张波, 等. 竖向强震作用下密贴地铁地下交叉结构动力响应分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3): 433-437.
Tao L J, Wang W P, Zhang B, et al. Dynamic response of closely-attached intersecting underground subway structures under vertical strong ground motion [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 433-437. (in Chinese)
- [11] 王国波, 彭祥军, 郝朋飞, 等. 近距离地下穿越结构地震响应研究综述[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(11): 2026-2036.
Wang G B, Peng X J, Hao P F, et al. Review of research on seismic response of close underground crossing structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(11): 2026-2036. (in Chinese)
- [12] Iida H, Hiroto T, Yoshida N, et al. Damage to Daikai subway station [J]. Soils and foundations, 1996, 36: 283-300.
- [13] Huo H, Bobet A, Fernández 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.
- [14] Ma C, Lu D C, Du X L, et al. Structural components functionalities and failure mechanism of rectangular underground structures during earthquakes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 119: 265-280.
- [15] 杜修力, 马超, 路德春, 等. 大开地铁车站地震破坏模拟与机理分析[J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 53-62.
Du X L, Ma C, Lu D C, et al. Collapse simulation and failure mechanism analysis of the Daikai subway station under seismic loads [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(1): 53-62. (in Chinese)
- [16] 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 H Y, Cheng S G, Chen G X. Numerical simulation and analysis of earthquake damages of Daikai metro station caused by Kobe earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 245-250. (in Chinese)
- [17] 路德春, 李强, 杜修力, 等. 基于失效模式控制的地铁车站结构抗震性能研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(8): 1400-1407.
Lu D C, Li Q, Du X L, et al. Research on seismic performance of subway station based on failure model con-

- trol[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(8): 1400-1407. (in Chinese)
- [18] 中村 晋. 地震被害程度の差異に着目した地下鉄の被害要因分析[J]. 土木学会論文集, 2000, 654: 335-354. Nakamura S. Evaluation of damage mechanism of subway station based on the difference damage between two damaged subway stations due to the earthquake[J]. Proceedings-Japan Society of Civil Engineers, 2000, 654: 335-354. (in Japanese).
- [19] 陈国兴, 战吉艳, 刘建达, 等. 远场大地震作用下深软场地设计地震动参数研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9): 1591-1599. Chen G X, Zhan J Y, Liu J D, et al. Parameter study on ground motion design of deep soft site under far-field large earthquake [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(9): 1591-1599. (in Chinese)
- [20] Liu J B, Li B. A unified viscous-spring artificial boundary for 3-D static and dynamic applications [J]. Science in China, 2005, 48(5): 570-584.
- [21] 杜修力. 工程波动理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009. Du X L. Theories and methods of wave motion for engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese)
- [22] 建筑抗震设计规范: GB 5011—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [23] Ma C, Lu D C, 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.
- [24] Chung R, Ballantyne D, Comeau E, et al. The January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) earthquake: performance of structures, lifelines, and fire protection systems[M]. Gaithersburg MD: National Institute of Standards and Technology, Special Publication, 1996.
- [25] Ma C, Lu D, Du X L. Seismic performance upgrading for underground structures by introducing sliding isolation bearings [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 74(2): 1-9.
- [26] 杜修力, 李洋, 许成顺, 等. 1995年日本阪神地震大开地铁车站震害原因及成灾机理分析研究进展[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 223-236. Du X L, Li Y, Xu C S, et al. Review on damage causes and disaster mechanism of Daikai subway station during 1995 Osaka-Kobe Earthquake[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 223-236. (in Chinese)
- [27] An X, Shawky A A, Maekawa K. The collapse mechanism of a subway station during the Great Hanshin earthquake [J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(3): 241-257.
- [28] Lu D C, Ma C, Du X L, et al. A new method for the evaluation of the ultimate seismic capacity of rectangular underground structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105776.

(本文责编: 苏泽云)