

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.141



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



站-桥同位合建工程中地下结构的地震响应

张胜¹, 郑俊杰¹, 章荣军², 杨文钰¹

(1. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘要: 地铁车站与高架桥同位合建(站-桥合建)工程能缓解城市交通拥堵和节约建造空间,但其动力响应机制和地下结构地震反应特性不甚明确。利用有限差分软件建立站-桥合建工况和单一车站工况对应的三维模型,首先进行静力计算,分析两类工况的受力变形规律,在此基础上分析在输入 El-Centro 波和 Kobe 波时两类工况中地铁车站的层间位移角、应力变化规律以及薄弱位置;最后深入研究高架桥的桥梁荷载和高度对地铁车站地震反应的影响规律。结果表明:随着基岩输入加速度的增加,高架桥对地铁车站层间位移角和最大应力的影响增大;站-桥合建工况中车站楼板两端容易发生受拉破坏,大震时应增加对车站中柱的关注;层间位移角随桥梁荷载线性增加,随桥梁高度非线性增加,应力随两者均呈线性增加。

关键词: 站-桥合建工程; 高架桥; 地铁车站; 地震响应; 桥梁特性

中图分类号: TU93 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)02-0042-09

Seismic response of underground structures in subway station-bridge unitized projects

ZHANG Sheng¹, ZHENG Junjie¹, ZHANG Rongjun², YANG Wenyu¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: The subway stations - bridge unitized (station - bridge unitized) projects can reduce urban traffic congestion and save construction space. But their seismic response mechanism and the seismic response of underground structures are not very clear. 3D models of station - bridge unitized condition and single station condition were established using finite difference software. Firstly, static calculations were completed, and the law of force and deformation of two conditions were analyzed. On the basis, with the input of El-Centro and Kobe waves, interlayer displacement angle, stress and weak positions of subway station were analyzed. Finally, the effects of load and height of the bridge on the seismic response of subway station were studied. The results indicate that as the input acceleration of bedrock increases, the effect of the overpass on the interlayer displacement angle and maximum stress of the subway station becomes greater. Tensile damage at the ends of station floors is easier to occur in station - bridge unitized condition, and the middle columns should also be attached equal importance to in strong earthquakes. There is a positive linear correlation between the interlayer

收稿日期: 2022-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(52078236)

作者简介: 张胜(1999-), 男, 主要从事岩土工程研究, E-mail: zhangs1@hust.edu.cn。

郑俊杰(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn。

Received: 2022-09-02

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52078236)

Author brief: ZHANG Sheng (1999-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: zhangs1@hust.edu.cn.

ZHENG Junjie (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhengjj@hust.edu.cn.

displacement angle and bridge load, which can also be observed in bridge height. In addition, stresses increase linearly with bridge load and height.

Keywords: subway station-bridge unitized project; overpass; subway station; seismic response; bridge characteristics

随着城市的发展,城市交通拥堵问题日益突出,为了解决此问题,部分地段将地下交通轨道和高架桥建在同一走廊,高架桥架设在地铁车站之上,上下共线同位合建,可以减少拆迁量、避免市政管线二次迁改、缩短工期以及节约投资^[1]。

从全球范围内多次地震震害的破坏现象来看,在地震作用下,现有的地下结构并不安全^[2-3],结构易发生破坏且会导致较严重的生命和财产损失。1995年日本阪神地震导致地下管道、地铁车站等均严重毁坏,自此,学者和研究机构纷纷开始关注地下结构的抗震问题^[4-5]。Iwatate等^[6]通过振动台试验发现车站的倒塌破坏是由车站中柱抗剪能力不足导致的。车爱兰等^[7]通过缩尺的振动台试验,研究了地震波输入方向、结构埋设深度以及地基-结构刚性比等对结构地震反应的影响规律。Samata等^[8]对日本大开车站进行了破坏机理分析,结果表明:车站中柱首先发现剪切破坏,之后结构顶板和侧墙相继发生弯曲破坏。庄海洋等^[3]、刘如山等^[9]对大开车站的破坏损伤机制进行了有限元分析,模拟了大开车站的地震反应和破坏过程。此外,学者们针对地下结构提出了多种抗震设计方法。Penzien^[10]、Wood等^[11]引入相互作用系数来考虑土体与结构相对刚度之间的差异,通过数值解及解析解的形式分析比较不同刚度比下结构变形和自由场变形之间的关系,从而计算结构变形。为考虑更多实际的结构形式,日本学者提出反应位移法,将周围场地土对地下结构的作用等效为集中弹簧,该方法中的地震荷载包括自由场的强制位移、自由场的剪应力和结构处惯性力。刘晶波等^[12]、董正方等^[13]、耿萍等^[14]也分别通过理论推导、参数求解等方式进一步完善了反应位移法。Liu等^[15]采用Pushover的方法,对大开车站结构进行了动力时程分析,并提出结构的塌毁是由强烈的水平及竖向作用荷载共同作用导致的。刘晶波等^[16-19]借鉴其他分析法总结后,提出了地下结构Pushover分析方法,该方法理论清晰,适用于复杂断面结构形式,得到广泛应用。现有研究主要针对单一车站工况中地下结构的地震反应特性,其中土体-地下结构的相互作用对地下结构地震反应影响最为显著。

目前站-桥同位合建的项目案例并不丰富,对相关结构的研究分析略显不足。梅展军^[20]介绍了一种

高架桥与地铁车站结合建设案例并提出对应建议。肖敬华等^[21]用SAP2000分析了武汉市的一座地铁车站与高架桥的共建体的受力变形,以此评价改方案的可行性。地震响应分析方面,张媛^[22]分析了高架车站与桥梁分离和合建结构的地震响应,研究表明,“站桥合一”结构体系的刚度更大,整体结构更加稳定,对桥梁在抗震方面有了很大的提升。张俊杰等^[23]等结合高架道路和高架地铁相结合的高架工程,通过软件建立模型分析其动力响应并评价其抗震性能。王轶等^[24]结合工程实例,利用两种方法研究了不同地震下结构的弹性响应。李忠献等^[25-26]建议设计“站桥合一”结构体系时一定要根据现场所得到的反应谱值来对整个结构体系进行时程分析。在地铁车站站-高架桥同位合建工程中,上部为桥跨结构,下部为框架结构的地铁车站,目前对桥梁-土体-地下结构间的相互作用研究较少,迫切需要系统地研究站-桥合建工程中地下结构的地震反应特性。

笔者基于有限差分数值模拟软件,建立站-桥合建工况和单一车站工况对应的三维数值模型,分别进行地震动反应分析,对比分析不同地震波作用下两类工况地铁车站的地震反应,并进一步研究高架桥的桥梁荷载和高度对地铁车站地震反应的影响规律。

1 模型概况

以某在建地铁车站-高架桥合建工程为背景,建立站-桥合建结构的三维数值模型。其中,下部地铁车站为2层3跨钢筋混凝土框架结构,宽22.4 m,高为15.3 m,顶板厚为0.8 m,中板厚为0.4 m,底板厚0.9 m,侧墙厚为0.7 m,中柱截面为1.0 m×1.0 m,间距为8.0 m或9.0 m。上部结构为等跨桥梁结构,取跨径组合为25.0 m×2+5.0 m×2,桥面宽16 m,采用双柱形桥墩,墩身宽2.5 m,厚度为1.4 m,横向间距为6.0 m,桥梁承台尺寸3.0 m×9.0 m×2.0 m,桩基直径为1.8 m,站-桥合建结构横断面尺寸如图1所示。

1.1 模型建立

为了尽可能消除边界效应对地下结构地震反应的影响,场地的计算宽度应取地铁车站结构宽度的5倍以上^[27]。模型地基的横向(X方向)长度为140 m,纵向(Y方向)长度为60 m,竖向(Z方向)高

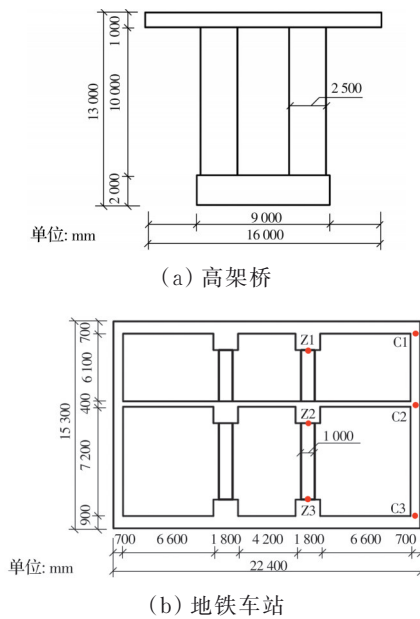
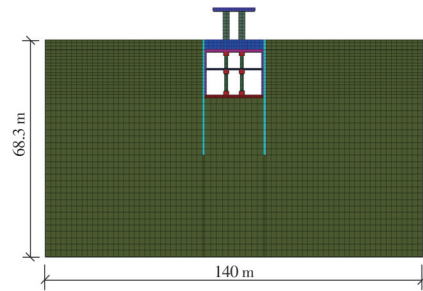


图 1 站-桥合建结构横断面示意图

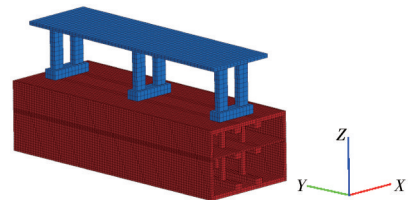
Fig. 1 Cross section of the Station-bridge combined structure

度为 68.3 m, 见图 2。土体采用硬化土(Plastic-Hardening)模型^[28], 土层参数见表 1。车站和桥梁结构均采用线弹性模型; 车站结构采用 C35 混凝土, 弹性模量取 31.5 GPa, 泊松比取 0.2; 桥梁结构采用

C40 混凝土, 弹性模量取 32.5 GPa, 泊松比取 0.2。土体和结构均采用实体单元, 支护横撑和底部桩基分别采用梁(beam)单元和桩(pile)单元。为了模拟地铁车站结构与周围土体的相互作用, 在车站结构与周围土层之间设置了接触面单元, 接触面计算参数参考文献^[29]取值, 见表 2。



(a) 整体计算模型



(b) 站-桥合建工况模型

图 2 三维有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element model

表 1 土层参数

Table 1 Material properties of soil layers

材料	h/m	$\gamma/(kN/m^3)$	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	$\psi/(^\circ)$	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/kPa$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/kPa$	E_{50}^{ref}/kPa	m	ν	R_f
黏土	30.0	19	10	35	5	45	180	45	0.55	0.2	0.9
砂土	38.3	20	1	38	6	75	300	75	0.55	0.2	0.9

注: h 为土层厚度; γ 为土层重度; c 为黏聚力; φ 为摩擦角; ψ 为剪胀角; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为固结试验的参考切线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸荷再加载参考模量; E_{50}^{ref} 为三轴固结排水试验的主加载参考割线模量; m 为应力水平相关幂指数; ν 为泊松比; R_f 为破坏比。

表 2 接触面力学参数

Table 2 Mechanical parameters of the surfaces

位置	K_n/MPa	K_s/MPa	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
混凝土-黏土	88	88	10	30
混凝土-砂土	360	360	1	35

注: K_n 为法向刚度, K_s 为切向刚度。

1.2 模型动力参数

结构在静力计算阶段, 将模型底部 3 个方向全部约束住, 同时约束四周的水平位移。在动力计算阶段, 为了模拟模型四周的无限边界情况, 在模型四周设置自由场边界, 从而消除模型边界上反射波的影响, 同时释放模型底部 X 方向约束。土体阻尼选取 Seed 双参数的滞后阻尼, 因其能描述土体的非线性特性且参数确定较简单; 结构采用瑞利阻尼, 阻尼比取 0.05^[30]。同时, 为了便于研究高架桥对地铁车站结构地震反应的影响, 在车站横截面处布置

了相应监测点(见图 1(b)), 对比分析车站中柱、侧墙应力以及层间位移响应。

1.3 地震波输入

选用 El-Centro 波和 Kobe 波两个实际地震波作为输入地震波。El-Centro 波为 1940 年美国 Imperial 山谷地震时记录的强震地震波, 该地震波原始峰值加速度为 0.349g, 强震部分持续时间约 26 s。Kobe 波为 1995 年日本阪神地震中神户海洋气象台记录的强震加速度记录, 取其南北的水平向加速度记录作为基岩输入波, 该地震的原始峰值加速度为 0.85g, 强震部分持续时间约 10 s, 两条地震波的时程见图 3。在基岩上输入水平 X 向地震波时, 将这两条地震波的峰值加速度分别调整为 0.05g、0.1g、0.15g、0.2g、0.3g, 基岩输入地震波持续时间为 20 s。

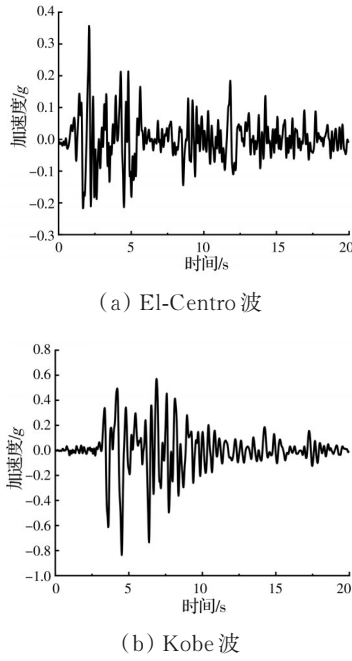


图 3 地震波时程曲线

Fig. 3 Time history of El-Centro and Kobe ground motion

2 计算结果分析

2.1 模型验证

图 4 为静力计算阶段基坑开挖后的竖向位移云图。距离基坑边界 8~15 m 范围内地表沉降较大,将计算得到的地表沉降曲线与聂宗泉^[31]等提出的经验公式曲线对比分析。从图 5 可以发现,数值计算与经验公式曲线比较吻合,两者曲线的变化趋势接近,最大沉降差距为 1 mm 以内,可以认为数值模型较合理。

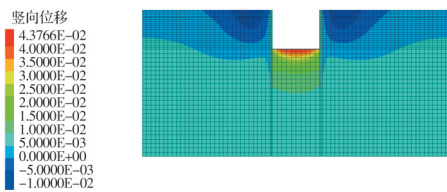


图 4 土体竖向位移云图

Fig. 4 Vertical displacement contour of soil

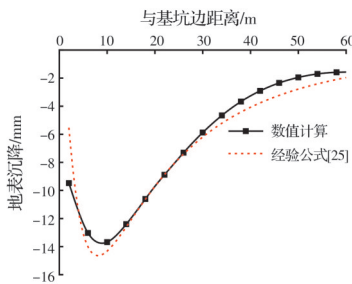
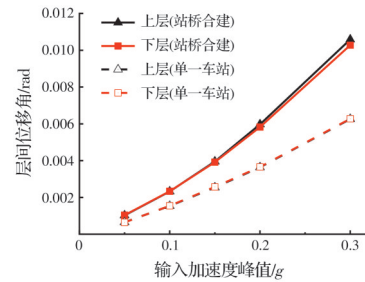


图 5 地表沉降曲线

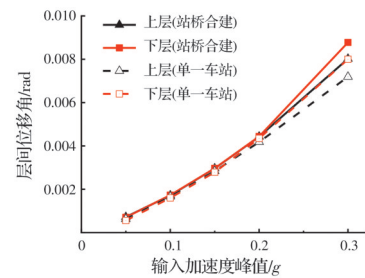
Fig. 5 Surface settlement curve

2.2 高架桥对车站层间位移的影响

为了便于分析车站的变形状态,将上、下层相对层间位移与上、下层层间高度的比值分别定义为上、下层相对层间位移角。图 6 分别为站-桥合建工况和单一车站工况中地铁车站上、下层最大层间位移角随着输入加速度峰值的变化曲线。在基岩输入 El-Centro 波时,站-桥合建工况中地铁车站的上、下层层间位移角均大于单一车站工况。随着地震动的增强,两类工况的层间位移角差值随之增加,特别是在输入加速度峰值为 0.3g 时,站-桥合建工况中地铁车站上、下层最大层间位移角分别为 0.010 59、0.010 28 rad,比单一车站工况约大 66.7%。而在基岩输入峰值加速度较小(0.05g、0.1g、0.15g、0.2g)的 Kobe 波的情况下,两种工况中地铁车站的上、下层层间位移角都较为接近,高架桥的影响并不明显。当输入峰值加速度增大至 0.3g 强震状态时,站-桥合建工况中地铁车站上、下层最大层间位移角分别为 0.008 02、0.008 78 rad,比单一车站工况分别大 14.3% 和 9.9% 左右。总体来说,地震作用下,站-桥合建工况的地铁车站位移响应要强于单一车站工况,这是由于合建工况中上部桥梁的存在,相比单一车站,一方面会降低整体结构的侧向刚度;另一方面是车站会受到桥梁的惯性力作用,均会导致车站位移响应增大。



(a) El-Centro 波



(b) Kobe 波

图 6 最大相对层间位移角

Fig. 6 Maximum interlayer displacement angles

2.3 高架桥对车站结构应力的影响

图 7 为站-桥合建工况和单一车站工况中地铁车站的结构应力云图。由图 7 可以看到,两种工况

下结构最大竖向应力主要集中在车站中柱,最大横向应力分布在侧墙与顶板连接处。表3列出了站-桥合建工况和单一车站工况下静力阶段各监测点的应力。由表3可知,总体站-桥合建工况中各监测点的应力大于单一车站工况的应力。其中监测点Z2的压应力最大,为-11.30 MPa;监测点C1的拉应力最大,为2.47 MPa。监测点Z2的Z方向应力差值最大,达5.24 MPa。这是因为高架桥的桥梁荷载大部分经承台传给车站中柱,使其在合建工况中承受更大的压应力;由于在梁柱附近区域承受更大压应力,车站楼板处的沉降比楼板两端大得多,导致楼板发生不均匀沉降。特别是在顶板两端会

产生较大的弯矩,使得此处楼板产生较大的拉应力。受到上述因素的影响,相对楼板中间区域,楼板两端会有一定的上浮趋势,且由于受到周围土体的侧向压力,远离土体的侧墙面产生拉应力,特别是与底板相连接的侧墙,也呈现一定的上浮趋势。因此,沿侧墙向下,其承受的竖向压力会逐渐减小,直至拉应力产生;横向拉应力逐渐减小,直至压应力产生。可以看到,站-桥合建工况中C2的Z方向压应力小于单一车站工况,分别为-0.26、-0.35 MPa;C3的X方向压应力小于单一车站工况,分别为-0.36、-0.55 MPa。

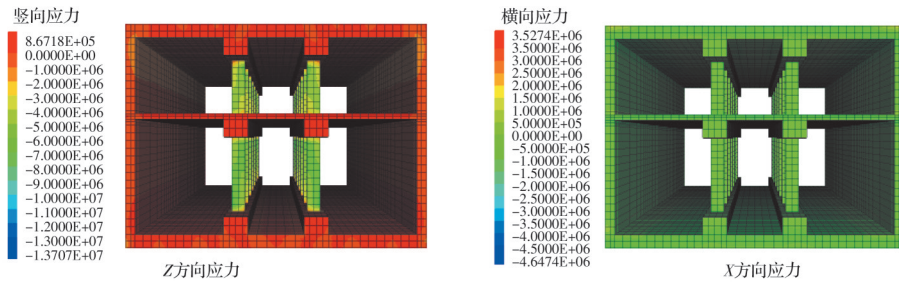
为方便研究站-桥合建工况和单一车站工况中地铁车站应力的差异,图8给出了监测点Z1的峰值压应力和监测点C1的峰值拉应力随输入加速度峰值的变化曲线。由图8可知,两种工况下,监测点Z1的峰值压应力和监测点C1的峰值拉应力均随着地震动增强而增加。站-桥合建工况的峰值拉/压应力随输入加速度峰值呈线性增加,增幅较大;单一车站工况的峰值拉/压应力增速随地震动变强有所减缓,增幅较小。当输入加速度峰值为0.05g时,两种工况下监测点Z1的峰值压力分别为-11.96、-7.88 MPa,差值为4.08 MPa;当输入加速度增至0.3g时,差值达9.12 MPa。对于监测点C1,基岩输入加速度峰值为0.05g时,两种工况下的拉应力差

表3 静力分析时监测点的应力

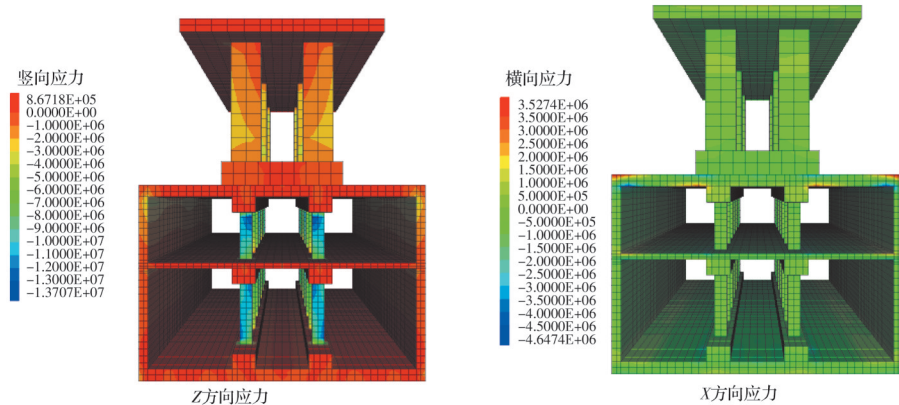
Table 3 Stress at monitoring point of static analysis

监测点	Z方向应力/MPa			X方向应力/MPa		
	站-桥合建	单一车站	差值百分比/%	站-桥合建	单一车站	差值百分比/%
Z1	-9.33	-5.28	43.41	-0.65	-0.43	33.85
Z2	-11.30	-6.06	46.37	-0.79	-0.46	41.77
Z3	-7.68	-3.46	54.95	-0.76	-0.31	59.21
C1	-1.21	-0.73	39.67	2.47	0.33	86.64
C2	-0.26	-0.35	-34.62	1.32	0.65	50.76
C3	0.39	0.04	89.74	-0.36	-0.55	-52.78

注:负数表示压应力;正数表示拉应力。



(a) 单一车站工况

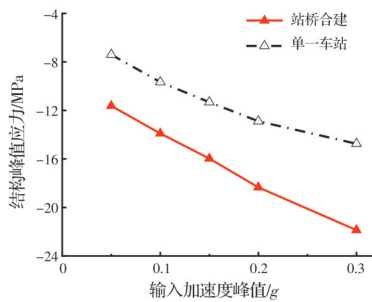


(b) 站-桥合建工况

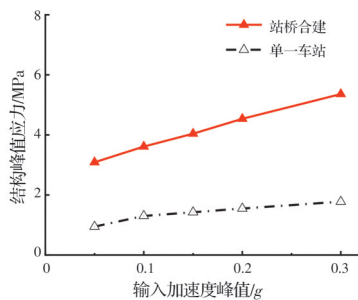
图7 结构应力云图

Fig. 7 Structural stress contour

值为 2.18 MPa 左右,当增至 0.3g 时,差值达到 3.69 MPa 左右。这是由于在地震作用下,站-桥合建工况中车站会受到上部桥梁的惯性力作用,其应力响应大于单一车站;随着地震动增强,车站受到桥梁惯性力作用更大,车站中柱承受的荷载更大;楼板不均匀沉降也在增加,导致楼板两端弯矩增大,从而引起其应力增加;因此,两种工况的拉应力差值会越来越大。值得注意的是,在本文基岩输入峰值加速度中,单一车站结构的最大拉压应力基本小于容许应力,但站-桥合建结构的最大拉压应力均可能超过容许应力。上述结果表明:小震时,两种工况中构件几乎不会发生破坏;但大震时,站-桥合建工况中顶板两端相比单一车站工况发生受拉破坏的风险剧增,且中柱承受的荷载增大,有受压破坏的风险。在抗震设计时,相比单一车站工况,站-桥合建工况进行抗震设计时不仅要对学生站中柱进行加固处理,还应重视对楼板两端的抗震设计。



(a) 监测点 Z1 的 Z 方向应力



(b) 监测点 C1 的 X 方向应力

图 8 监测点峰值应力

Fig. 8 Peak stress at monitor points

3 高架桥自身特性对车站结构地震响应的影响

高架桥的存在对地铁车站地震反应有一定的影响,而高架桥自身特性(桥梁荷载和高度)的改变均会影响地铁车站承受的荷载、抗侧移刚度等,进而影响地铁车站结构的地震反应。所研究桥梁荷载主要是桥梁的自重和汽车荷载,假定前述计算模型为基本工况,将桥梁荷载改至基本工况的 50%、

150%、200% 桥梁高度改至 120%、150%、180%,分析不同工况下的车站地震响应。

图 9 分别给出了不同桥梁荷载工况下车站上、下层峰值层间位移角和峰值拉压应力的变化曲线。由图 9 可知,随着桥梁荷载的增加,上、下层峰值层间位移角和峰值压应力均呈线性增加。上、下层相对层间位移角曲线基本重合;当输入加速度峰值为 0.05g 时,上、下层间位移角均为 0.002 21 rad,随加速度均线性增至 0.002 77 rad。桥梁荷载对上下层相对层间位移角的影响程度基本一致。车站中柱 3 个监测点的峰值压应力增速相近,增幅均为 5.13 MPa 左右;顶板两端的峰值拉应力增速明显大于中板、底板两端的峰值拉应力增速,C1 的应力增幅达 2.76 MPa,C2 和 C3 的应力增幅均在 0.3 MPa 以下。这是由于桥梁荷载的增加会使车站在地震作用下承受更大的桥梁惯性力作用,且桥梁荷载的增加呈线性,所以上、下层层间位移亦呈线性增加。车站中柱各处承受的约束作用相似,桥梁荷载对车站中柱各处压应力的影响基本一致,所以其应力增幅相近。桥梁荷载对楼板拉应力的影响程度沿侧墙由上至下逐渐递减,这是由于顶板距离高架桥最近,受桥梁荷载影响最大;且随着埋深的增加,楼板受土体的约束作用增强,导致底板受桥梁荷载的影响最小。由于车站中柱是主要承受荷载的构件,所以桥梁荷载对车站中柱压应力的影响要大于对楼板拉应力的影响。

图 10 给出了不同桥墩高度工况下车站上、下层峰值层间位移角和峰值拉压应力的变化曲线。由图 10 可知,桥墩高度的增加会增大车站上、下层峰值层间位移角和峰值拉压应力。随着桥墩变高,上、下层峰值层间位移角增速变大,且下层层间位移角的增速大于上层层间位移角;下层位移角由 0.002 33 rad 增至 0.002 68 rad,增幅为 0.000 35 rad;上层位移角增幅为 0.000 29 rad。这是由于随着高架桥高度的增加,地震作用下,随着深度增加车站结构受到的倾覆力矩随之增加,进而增大车站地震响应,特别是车站的水平位移。与此同时,结构整体的抗侧移刚度呈非线性减小,且沿着侧墙向下亦呈非线性减小。综上,地铁车站下层的抗侧移能力小于上层,其侧移反应要强于上层。峰值拉压应力随桥墩高度的增加呈线性小幅度增加,增幅均在 0.5 MPa 以内,这是由于桥墩增高,车站结构承受荷载的增加幅值较小,且地震作用下受到桥梁惯性力作用的变化较小,所以桥墩高度的增加对应力的影响比较有限。

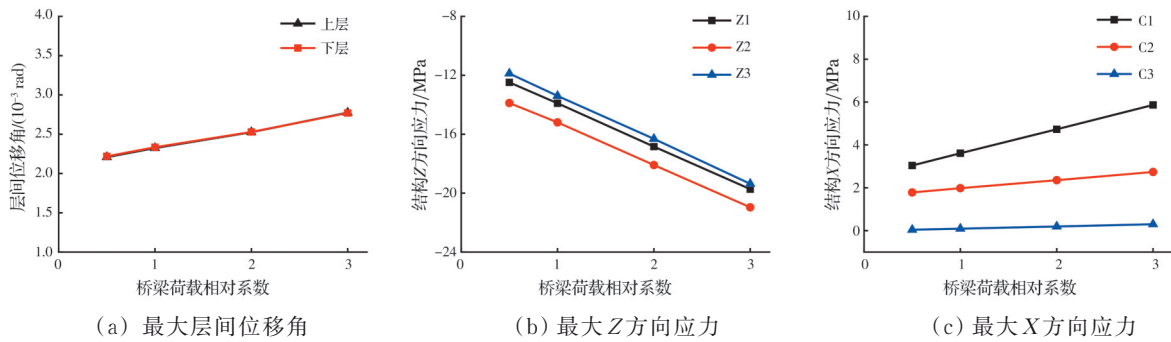


图9 不同桥梁荷载下的最大层间位移角和峰值应力

Fig. 9 Interlayer displacement angles and peak stress under different bridge loads

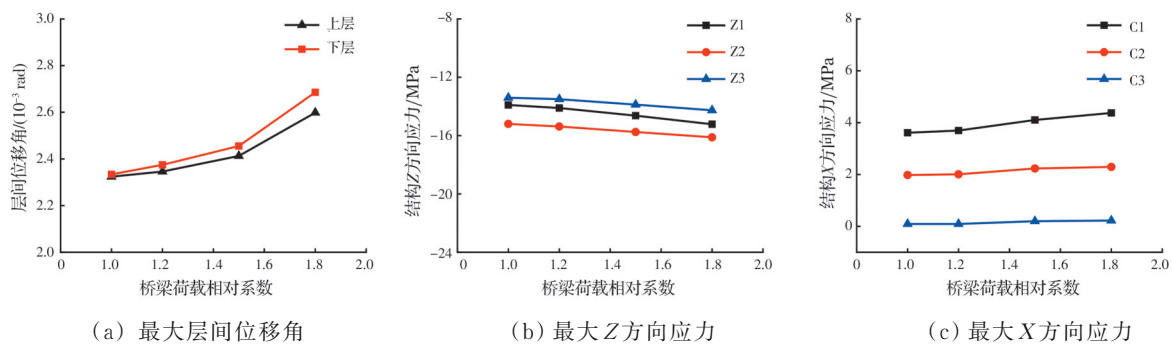


图10 不同桥梁高度下的最大层间位移角和峰值应力

Fig. 10 Interlayer displacement angles and peak stress under different bridge heights

4 结论

1) 高架桥的存在增大了车站结构的侧移。由于高架桥的存在,站-桥合建工况中车站结构的抗侧移刚度有所减小,其上下层层间位移角会大于单一车站工况,这将增加地震作用下结构破坏的风险,且随着输入地震动变强,上述不利影响越显著。

2) 高架桥的存在改变了结构的破坏模式。由于高架桥的存在,车站结构承受更大的荷载,站-桥合建工况的车站中柱和楼板比单一车站结构承受更大压应力和拉应力,导致结构不仅发生受压破坏,并且还有受拉破坏的风险。与单一车站工况相比,站-桥合建工况中薄弱位置不仅仅是楼板两端;大震时,其车站中柱亦成为抗震设计中重点关注部位。

3) 桥梁荷载和桥梁高度均会影响地铁车站的地震反应。层间位移角随桥梁荷载的增加呈线性增加,随桥梁高度的增加呈非线性增加。应力随桥梁荷载和桥梁高度均呈线性增加。

参考文献

[1] 杨家熙. 地铁明挖车站与高架桥同期同位合建关键技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
 YANG J X. Research on the key technology in

construction of open cut metro station-viaduct combined structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)

- [2] 王苏, 路德春, 杜修力. 地下结构地震破坏静-动力耦合模拟研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3483-3488.
 WANG S, LU D C, DU X L. Research on underground structure seismic damage using static-dynamic coupling simulation method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3483-3488. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] JIANG L Z, CHEN J, LI J. Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(4): 555-567.
- [5] 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)
- [6] IWATATE T, KOBAYASHI Y, KUSU H, et al. Investigation and shaking table tests of subway structures of the Hyogoken-Nanbu earthquake [C]//Proceedings 12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand, 2000, 1043-1051.
- [7] 车爱兰, 岩榭敞广, 葛修润. 关于地铁地震响应的模型振动试验及数值分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1293-1298.
- CHE A L, IWATATE T, GE X R. Dynamic behaviors of subway structure subjected to strong earthquake motions using shaking table tests and dynamic analyses [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(8): 1293-1298. (in Chinese)
- [8] SAMATA S, OHUCHI H, MATSUDA T. A study of the damage of subway structures during the 1995 Hanshin-Awaji earthquake [J]. Cement and Concrete Composites, 1997, 19(3): 223-239.
- [9] 刘如山, 邬玉斌, 杜修力. 用纤维模型对地下结构地震破坏的数值模拟分析[J]. 北京工业大学学报, 2010, 36(11): 1488-1495.
- LIU R S, WU Y B, DU X L. Numerical simulation analysis on earthquake damage of underground structure with fiber model [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(11): 1488-1495. (in Chinese)
- [10] PENZIEN J. Seismically induced racking of tunnel linings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, 29(5): 683-691.
- [11] WOOD J H, LOWER H T. Earthquake design of rectangular underground structures [J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2007, 40(1): 1-6.
- [12] 刘晶波, 王文晖, 张小波, 等. 地下结构横断面地震反应分析的反应位移法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 161-167.
- LIU J B, WANG W H, ZHANG X B, et al. Research on response deformation method in seismic analysis of underground structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(1): 161-167. (in Chinese)
- [13] 董正方, 王君杰, 王文彪, 等. 基于土层位移差的地下结构抗震反应位移法分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(7): 38-42, 47.
- DONG Z F, WANG J J, WANG W B, et al. Response displacement method for seismic analysis of underground structures based on soil layers displacement difference [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(7): 38-42, 47. (in Chinese)
- [14] 耿萍, 张景, 何川, 等. 隧道横断面反应位移法基本原理及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(Sup2): 3478-3485.
- GENG P, ZHANG J, HE C, et al. Basic theory of seismic deformation method in cross section of tunnel and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup2): 3478-3485. (in Chinese)
- [15] LIU J B, LIU X Q. Pushover analysis of Dakai Subway Station during the Osaka-Kobe Earthquake in 1995 [C]//The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 2008: 12-17.
- [16] 刘晶波, 刘祥庆, 李彬. 地下结构抗震分析与设计的Pushover分析方法[J]. 土木工程学报, 2008, 41(4): 73-80.
- LIU J B, LIU X Q, LI B. A pushover analysis method for seismic analysis and design of underground structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4): 73-80. (in Chinese)
- [17] 刘晶波, 王文晖, 赵冬冬, 等. 复杂断面地下结构地震反应分析的整体式反应位移法[J]. 土木工程学报, 2014, 47(1): 134-142.
- LIU J B, WANG W H, ZHAO D D, et al. Integral response deformation method in seismic analysis of complex section underground structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(1): 134-142. (in Chinese)
- [18] 刘晶波, 李彬, 谷音. 地铁盾构隧道地震反应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(6): 757-760.
- LIU J B, LI B, GU Y. Seismic response analysis of shielded subway tunnels [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(6): 757-760. (in Chinese)
- [19] 刘晶波, 李彬, 刘祥庆. 地下结构抗震设计中的静力弹塑性分析方法[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 68-76.
- LIU J B, LI B, LIU X Q. A static elasto-plastic analysis method in seismic design of underground structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7): 68-76. (in Chinese)
- [20] 梅展军. 高架桥与地铁车站结合的车站建筑设计[J]. 山西建筑, 2010, 36(29): 7-8, 48.
- MEI Z J. On station building design with viaduct and subway station [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(29): 7-8, 48. (in Chinese)
- [21] 肖敬华, 李鹏, 舒胜武, 等. 地铁车站与高架桥整体分析[J]. 铁道建筑技术, 2011(10): 84-89.
- XIAO J H, LI P, SHU S W, et al. The overall analysis of the subway station and the overpass [J]. Railway Construction Technology, 2011(10): 84-89. (in Chinese)
- [22] 张媛. 轻轨高架桥梁与站桥结构体系地震反应分析与隔震研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
- ZHANG Y. Seismic response analysis and isolation investigation for elevated bridges and station-bridge structural systems of light railways [D]. Tianjin: Tianjin

- University, 2003. (in Chinese)
- [23] 张俊杰, 胡世德. 一体式高架结构抗震分析计算模型[J]. 世界地震工程, 2004, 20(3): 146-151.
ZHANG J J, HU S D. Analytical model for seismic design of urban viaducts with double deck [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2004, 20(3): 146-151. (in Chinese)
- [24] 王轶, 张力, 甄伟, 等. 站桥合一的大型客运站房结构抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(12): 23-27.
WANG Y, ZHANG L, ZHEN W, et al. Study on seismic behavior of large bridge-station combined railway station [J]. Building Structure, 2009, 39(12): 23-27. (in Chinese)
- [25] 李忠献, 张媛, 丁阳. 轻轨铁路站桥结构体系抗震分析与隔震研究[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(6): 163-168.
LI Z X, ZHANG Y, DING Y. Seismic analysis and isolation for station-bridge structures of light railways [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(6): 163-168. (in Chinese)
- [26] 董城, 李忠献. 轻轨铁路站桥整体结构的结构设计及抗震分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 27(3): 73-77.
DONG C, LI Z X. Structural design and seismic analysis of integral station-bridge structure in light railway [J]. Earthquake Resistant Engineering, 2005, 27(3): 73-77. (in Chinese)
- [27] 钟紫蓝, 申铁尧, 甄立斌, 等. 地震动强度参数与地铁车站结构动力响应指标分析[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(3): 486-494.
ZHONG Z L, SHEN Y Y, ZHEN L B, et al. Ground motion intensity measures and dynamic response indexes of metro station structures [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(3): 486-494. (in Chinese)
- [28] 周恩平. 考虑小应变的硬化土本构模型在基坑变形分析中的应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
ZHOU E P. Application of hardening soil model with small-strain in deformation analysis for foundation pit [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [29] 刘飞禹, 汪歆, 李婧婷, 等. 地震作用下混合式加筋土挡墙动力特性[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(3): 612-621.
LIU F Y, WANG X, LI J T, et al. Dynamic characteristics of mixed reinforced earth retaining wall under earthquake loading [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(3): 612-621. (in Chinese)
- [30] 钟波波, 张永彬, 李宏. 大跨无柱地铁车站地震响应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(Sup1): 317-322.
ZHONG B B, ZHANG Y B, LI H. Analysis of seismic response of large-span column-free subway station [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Sup1): 317-322. (in Chinese)
- [31] 聂宗泉, 张尚根, 孟少平. 软土深基坑开挖地表沉降评估方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1218-1223.
NIE Z Q, ZHANG S G, MENG S P. Surface settlement of deep foundation pits by excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1218-1223. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)