

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2022.01.016

车辆荷载作用下城市桥梁与地铁车站合建体 结构动力响应研究

王 博¹, 康 华¹, 高志宏¹, 毛念华¹, 马 辉², 贾晨俊², 谢钟辉²

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司 城市轨道与建筑设计研究院, 陕西 西安 710043;

2. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 为研究车辆荷载作用下地铁车站与城市桥梁合建体结构的动力响应规律,以国内某地铁车站为研究对象,采用 MIDAS GTS 建立了合建体结构的三维有限元模型,根据车辆动荷载激励公式,将不同车辆荷载简化后作用于合建体结构,分析车辆荷载、车辆速度等因素对结构动力特性及响应的影响规律。结果表明:合建体结构的竖向位移、竖向加速度、应力大小均随车速或车辆荷载的增加而逐渐增大;在车辆荷载分析范围内,车辆荷载引起的合建体结构的最大竖向位移为 2.593 mm,明显小于规范的上限值 10 mm,而车辆荷载引起的合建体结构的最大竖向加速度为 6.293 cm/s²,远小于规范的限值 150 cm/s²。车辆作用下,合建体结构的桥墩上部、转换梁与车站顶板结合处、顶板与侧墙交界处、板柱结合处等均出现了较大的应力集中现象,故需要对上述部位进行加强设计。

关键词: 地铁车站; 城市桥梁; 合建体; 车辆荷载; 动力响应

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2022)01-0121-12

Dynamic response analysis of the composite structure of metro station and urban bridge under vehicle loads

WANG Bo¹, KANG Hua¹, GAO Zhihong¹, MAO Nianhua¹, MA Hui², JIA Chenjun², XIE Zhonghui²

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Research Institute of Urban Rail and Architectural Design, Xi'an 710043, China;

2. Faculty of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: To study the dynamic response of the composite structure of subway station and urban bridge under the vehicle loads, a domestic subway station was taken as the research object, with the MIDAS GTS used to establish a three-dimensional finite element model of structure. According to the excitation formula for the dynamic loads of vehicles, the different vehicle loads were simplified and then applied to the structure. The dynamic response characteristics and rules of the structure under vehicle loads and speeds were analyzed in detail. The results show that the vertical displacement, acceleration and stress of the structure increase with the increase of vehicle speeds or loads. In the range of vehicle load analysis, the maximum vertical displacement of structure caused by the vehicle loads is 2.593 mm, which is obviously less than the upper limit of the code by 10 mm. In addition, the maximum vertical acceleration of structure caused by the vehicle loads is 6.293 cm/s², which is also less than the limit value of the code by 150 cm/s². In addition, the stress concentration phenomenon appears in the upper part of bridge pier, the junction of the transfer beam and station roof, the junction between the roof and sidewall, and the joint of the slab and

收稿日期: 2021-05-26; 网络出版日期: 2021-11-01

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20211101.1131.002.html>

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2019JM-193); 铁一院科学研究计划项目(院科 19-57-1)

第一作者: 王博,男,硕士,高级工程师,研究方向为地铁工程设计。E-mail: 10259891@qq.com

通信作者: 马辉,男,博士,副教授,研究方向为钢与混凝土组合结构及工程抗震。E-mail: mahuiwell@163.com

columns. Therefore, it is necessary to strengthen the design of the above parts in the structure.

Key words: subway station; urban bridges; composite building; vehicle loads; dynamic response

随着我国轨道交通和市政桥梁的快速发展,现有的城市空间利用越发受限,经常出现规划的市政高架桥与规划地铁线路在同一条道路上重叠的现象,从而导致许多新建的地铁线交织穿行于立交桥的桩基础之间。目前,采用二者“共建”的结合形式是在有限空间条件下解决这个问题的有效手段^[1-4]。但对于这种既有高架桥又有地铁的合建体而言,上部车辆荷载将对地铁车站结构及周围建筑物带来不利影响,如地铁内部开裂或地层不均匀沉降等问题^[5-8],从而影响地铁的正常安全运行。因此,有必要开展车辆荷载对地铁车站与城市桥梁合建体结构的动力响应研究。

目前,国内外学者对城市桥梁与地铁车站合建体结构开展了一系列研究。郭宏博等^[9]采用 MIDAS GEN 建立了站桥合建体结构的三维有限元模型,分析了城市桥梁对车站结构各构件的受力影响,并提出了结构加强措施。赵月^[10]以厦门地铁吕厝站为例,采用 MIDAS GEN 建立了合建体有限元模型,结果表明,通过柱下设置桩基、结构固结、匹配孔跨、加强地铁车站立柱等措施,可以有效解决地铁车站在桥梁基础集中荷载下的结构抗震、结构受力、沉降控制等问题。班自愿^[11]以上海某地铁车站与规划道路桥梁同期同位合建为例,对合建体结构进行了有限元计算,结果表明,车站顶板、底板需按双向板进行配筋,桥梁范围内的柱轴力较大且桥墩下横梁弯矩较大。董沂鑫等^[12]分析了地铁车站与高架桥同位分离合建中地铁车站主要构件的受力特点,并对合建体结构提出了柱下增设桩基础、顶板加设横梁以及纵向加强板配筋的设计方案。

综上所述,目前关于车辆交通荷载引起的城市桥梁与地铁车站合建体的动力响应研究还比较少,相关认识不够深入。鉴于此,本文通过 MIDAS GTS 软件建立地铁车站与城市桥梁合建体结构的三维有限元模型,根据不同车辆的荷载特征,将车辆荷载简化到城市桥梁上,研究车辆荷载、车辆速度等参数对合建体结构的动力响应特征及响应规律,研究结果可为地铁车站与城市桥梁合建体结构的工程应用提供技术参考。

1 工程概况

本文以国内某地铁车站为研究对象,该车站采用双柱三跨地下两层框架结构,总长 372.2 m,结构

标准段宽度 21.6 m,车站基坑深 17.6~19.1 m,顶板覆土约 3.3 m。车站高度 14.87 m,方柱截面尺寸为 0.9 m×1.3 m。顶板尺寸 0.8 m,中板厚 0.4 m,底板厚 0.9 m,顶纵梁尺寸 1.2 m×1.8 m,中纵梁尺寸 0.9 m×1.0 m,底纵梁 1.2 m×2.2 m,顶板承台梁 3.8 m×3.3 m。主体结构除中柱外均采用 C35 混凝土,中柱采用 C50。城市桥梁为 4 车道,大桥宽 16 m,城市桥梁上的汽车荷载按城-A 级桥梁设计,根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[13],城-A 级公路的汽车荷载按车辆荷载标准值 550 kN 计算。车站范围内桥长 279 m,共包括 10 个桥墩和 1 个桥台,桥墩设置为单墩,尺寸为 2 m×2.5 m。城市桥梁引桥段在车站顶板范围采用箱型框架结构,地铁车站与城市桥梁合建体结构的横断面、纵断面如图 1、图 2 所示,合建体结构的主要构件几何尺寸如表 1 所示。

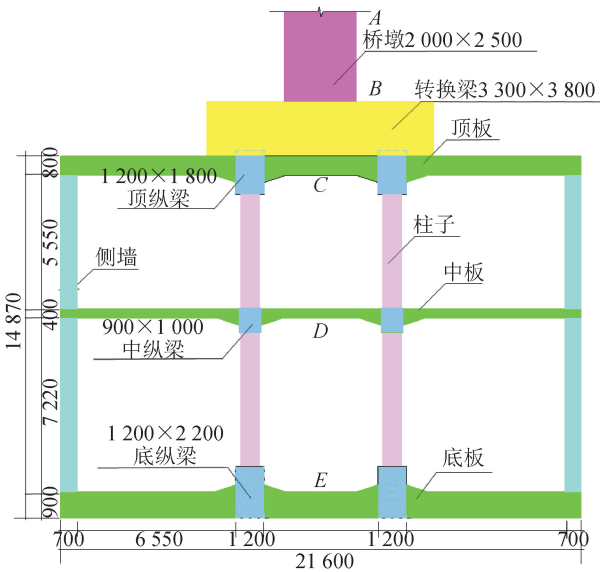


图 1 地铁车站与城市桥梁合建体的横断面示意图(单位:mm)
Fig. 1 Schematic diagram of cross section of joint building of subway station and urban bridge(unit: mm)

表 1 合建体结构尺寸大小

Tab. 1 Structural dimensions of joint building

结构 构件	板厚及截 面尺寸/m	结构 构件	板厚及截 面尺寸/m
顶板	厚 0.8	底梁	1.2×2.2
中板	厚 0.4	侧墙	厚 0.7
底板	厚 0.9	柱子	0.9×1.3
顶梁	1.2×1.8	转换梁	3.8×3.3
中梁	0.9×1.0	桥墩	2.0×2.5

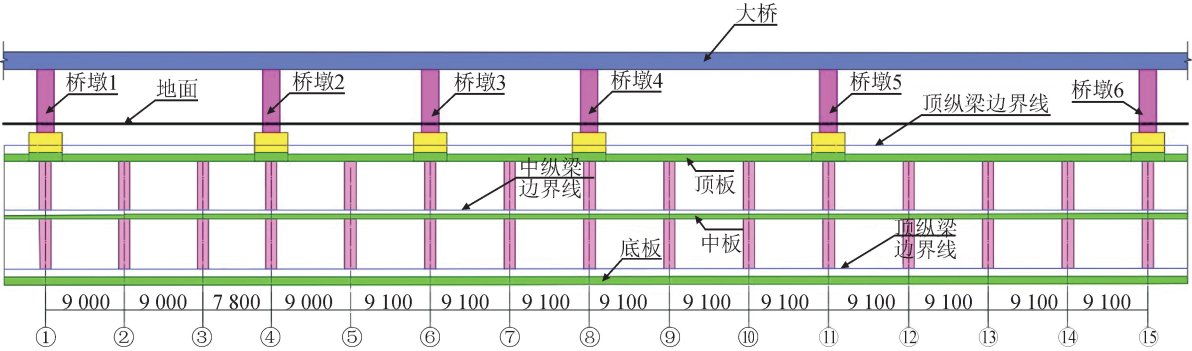


图2 地铁车站与城市桥梁合建体的纵断面示意图(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of longitudinal section of joint building of subway station and urban bridge(unit: mm)

2 有限元模型的建立

2.1 模型建立

利用 MIDAS GTS 建立合建体的三维有限元模型,由于土体会发生受力变形,在建模时应考虑合建体结构与土体之间的相互作用。根据文献[14]确定土体的计算范围时,取地表为计算模型土体的顶面,深度方向的建模尺寸为车站结构竖向有效高度的3倍;侧向边界至结构的距离为车站结构水平有效宽度的3倍,整个数值模型尺寸为180 m×134 m×64 m($x \times y \times z$)。合建体结构中,土体采用实体单元模拟,遵守摩尔库伦屈服准则;大桥、桥墩采用实体单元模拟,按结构实际尺寸设置,转换梁、桥墩与顶板固接,形成站桥结合形式,网格单元尺寸为1 m;车站主体采用二维板单元模拟;柱、梁采用一维线单元模拟。另外,土体单元尺寸在模型外边缘设置为2 m,车站主体二维板单元的单元尺寸为1 m,柱采用一

维梁单元且网格尺寸为0.5 m。合建体结构的模型网格划分及车站结构的地质剖面图如图3所示。

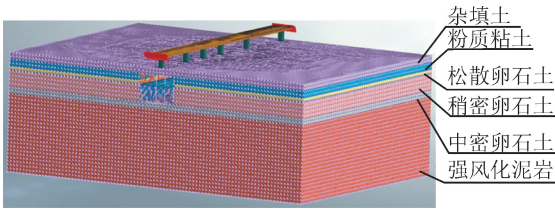


图3 合建体结构的模型网格划分及车站结构的地质剖面图

Fig. 3 Global mesh generation of composite structure model and geological profile of the station structure

2.2 材料属性

根据地质报告资料可知,合建体场地内的地层分布较为稳定,从上到下依次是杂填土、粉质粘土、松散卵石土、稍密卵石土、中密卵石土、强风化泥岩,如表2所示。

表2 土层的摩尔-库伦模型参数取值

Tab. 2 Parameter values of Mohr-Coulomb model for soil layer

土体名称	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/($^{\circ}$)	粘聚力/kPa	弹性模量/MPa	泊松比	压缩模量/MPa
杂填土	1.8	10	8	15	0.30	
粉质粘土	1.97	16.5	39.2	16	0.35	6
松散卵石土	2.0	30		18	0.30	20
稍密卵石土	2.1	35		20	0.32	23
中密卵石土	2.2	40		28	0.30	32
强风化泥岩	2.15	30	65	38	0.18	

根据屈铁军等^[15]的研究结果,对于钢筋混凝土构件的模拟,可以采用等效弹性模量的方法,考虑到配筋率对钢筋混凝土复合材料弹性模量的影响,目前提出了开裂前钢筋混凝土的等效弹性模量,并验

证了等效弹性模量的适用性。本文在合建体结构的建模过程中,对钢筋混凝土构件采用等效弹性模量的方法进行分析,主要构件的等效弹性模量如表3所示。

表 3 主要钢筋混凝土构件的等效弹模汇总
Tab. 3 Summary of equivalent elastic modulus of main reinforced concrete members

构件	配筋率/%	等效弹模/(kN·m ⁻²)
柱构件	2.38	3.51×10 ⁸
转换梁	1.04	3.62×10 ⁷
底纵梁	0.87	2.30×10 ⁷
中纵梁	1.00	1.26×10 ⁸
顶纵梁	0.91	2.1×10 ⁷
顶板	1.43	1.44×10 ⁷
中板	1.02	2.7×10 ⁷
底板	0.15	3.0×10 ⁷
底梁	0.87	2.3×10 ⁷

2.3 边界条件

进行地下结构数值模拟时需要引进人工边界,将无限域问题转化为有限域问题,目前应用较为广泛的有粘性边界、粘弹性边界、透射边界等动力人工边界。其中,粘弹性边界能较好地模拟人工边界外半无限地基的弹性恢复能力,同时也能模拟散射波从有限域向无限域的传播,克服了粘性边界所引起的低频漂移等问题^[16],因此,本文采用文献^[16]提出的粘弹性人工边界。在计算模型四周设置粘弹性人工边界,模型底部的边界为竖向固定、水平自由,模型顶面为自由边界。粘弹性人工边界作为合建体结构有限元建模的人工边界条件,即在截断边界的同时施加粘性阻尼器和线性弹簧,其力学参数分别为:

$$\begin{cases} C_b = \alpha_s \\ K_b = G/2r_b \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_b 为极坐标中人工边界的坐标; C_b 和 K_b 分别为施加于人工边界 $r=r_b$ 之上的粘性阻尼器和线性弹簧; $c_s = \sqrt{G/\rho}$ 为剪切波速; G 为剪切模量, ρ 为质量密度。

2.4 车辆荷载

车辆在行驶过程中,由于车辆荷载大小随时间不断变化且具有随机性,为便于计算分析,本文将其简化为具有一定频率和振幅的简谐波动荷载,表达式为:

$$p_{(t)} = p + q_{(t)} \quad (2)$$

式中: p 为汽车静载, kPa; $q_{(t)}$ 为反映车辆振动的波动荷载, kPa, 采用简化后的正弦荷载公式:

$$q_{(t)} = q_{\max} \sin^2\left(\frac{\pi t}{T}\right) \quad (3)$$

$$T = \left(\frac{12L}{V}\right) \quad (4)$$

式中: L 为车辆轮胎接触面积的当量圆半径,通常取 15 cm; V 为车速;根据杨春风等^[17]的研究,动荷载系数通常取 1.4~1.5,考虑到合建体结构处于繁华地段,故取动荷载系数为 1.5,则荷载振动幅值 $q_{\max} = (1.5 - 1)p = 0.5p$, 稳态简谐荷载表达式为:

$$p_{(t)} = p + 0.5p \sin^2\left(\frac{\pi tV}{12L}\right) \quad (5)$$

在本次数值模拟中,根据《公路工程技术标准》(JTGB01—2014)^[18],城-A 级公路的代表性设计车速可取 60 km/h、80 km/h、100 km/h,分析不同车速对合建体结构的动力响应规律。车辆荷载标准值分别取 50 kN、250 kN 以及 550 kN(城-A 级公路最大设计车辆荷载标准值^[13]),并将 50 kN、250 kN 的车辆荷载标准值作为对比分析参数。本文选择的车辆类型及荷载情况如表 4 所示。车辆荷载的加载制度如图 4 和图 5 所示。

表 4 车辆类型及车辆荷载情况
Tab. 4 Types and loads of vehicles

车辆类型	车辆荷载/t	车长/m	车宽/m
两轴货车	5	7	1.8
三轴货车	25	12	2.5
五轴货车	55	15	2.5

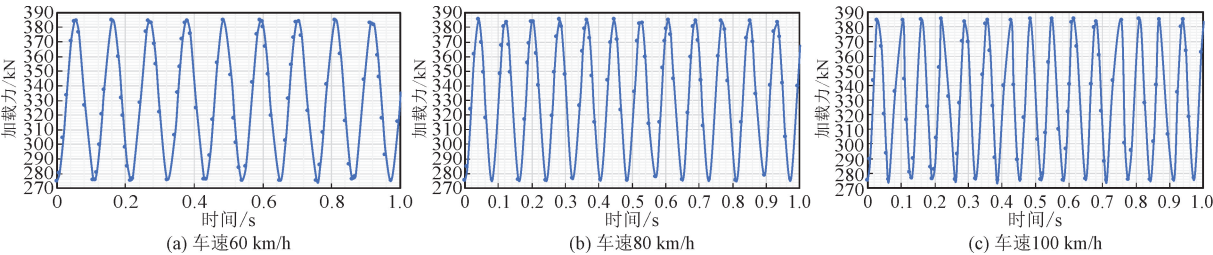


图 4 车辆荷载 55 t 下三种车速的简谐波动荷载

Fig. 4 Harmonic fluctuating load of three vehicle speeds under 55 t vehicle load

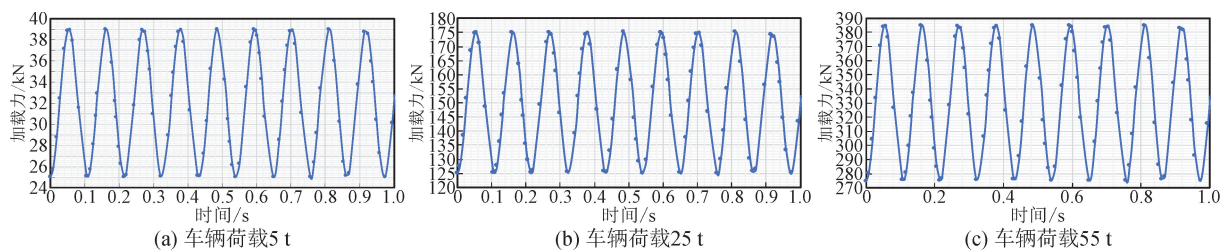


图 5 车速 60 km/h 下三种车辆荷载的简谐波波动荷载

Fig. 5 Harmonic fluctuating load of three kinds of vehicle loads at 60 km/h

2.5 测点布置

为了解合建体结构在多车辆荷载组合作用下的受力性能及内力传递规律,本文合建体共设置了 5 个位移、加速度、应力测点,分别为桥墩处 6585055 节点、承台转换梁处 6589255 节点、车站顶板处 6590073 节点、中板处 6872875 节点及底板处 6578798 节点,将其依次编号为 A、B、C、D、E,见图 1。

2.6 工况设计

本文主要研究城市桥梁车辆荷载对地铁车站的影响规律。根据三维实体计算模型,考虑行车速度、车辆荷载等不同影响因素,在每个工况中分别在四个车道布置相同的车辆荷载,以同方向同时刻作用在大桥上,对合建体结构三维模型进行计算分析。不同车辆工况如表 5 所示。

表 5 不同车辆工况

Tab. 5 Different vehicle conditions

工况	车辆荷载/t	车速/(km · h ⁻¹)
工况一	55	60
		80
		100
工况二	5	60
	25	
	55	

3 计算结果分析

3.1 车辆荷载单向行驶时对合建体的影响

以车速 60 km/h、车辆荷载 55 t 为参数,分别在四个车道布置相同的车辆荷载,以同方向同时刻作用在大桥上,研究合建体结构在多车辆荷载组合下的动力响应规律。选取 4 个特征时间节点(0.40 s、4.00 s、4.45 s、6.50 s)作为参考点,其中 0.40 s 为车辆刚好完全进入合建体结构的时刻;4.00 s 为车头刚好到达合建体分析断面的时刻;4.45 s 为车尾

刚好到达分析断面的时刻;6.50 s 为车辆开始离开合建体的时刻。图 6 和图 7 分别为合建体上部桥墩及下部地铁车站在上述参考时刻的应力云图分布特征。

从图 6 和图 7 可知,当车辆荷载单向行驶时,车辆车轮周围会产生相应的变形;当车辆荷载不断驶入时,合建体结构的变形随车辆荷载的向前移动而逐渐增加,变形范围逐渐扩大;当车辆荷载驶出时,结构变形逐渐减小;合建体的应力响应主要集中在桥墩上部、承台转换梁与车站顶板结合处、顶板与侧墙交界处以及柱子与各层板交界处。对于合建体的上部桥墩而言,因其受到车辆荷载的直接作用,导致其成为合建体结构中最薄弱的部位,最大应力为 2 031.97 kN/m²;对于下部地铁车站而言,最大应力位于车站顶板处,因其直接承受转换梁传递下来的车辆荷载,故形成了较大的应力集中,最大应力为 368.12 kN/m²。

因此,在合建体结构设计时,应对桥墩上部、转换梁与顶板结合处、顶板与侧墙交界处等部位进行加强设计,以提高合建体的安全性。

另外,由图 6 和图 7 还可知,在同一时刻,合建体上部桥墩的应力明显大于下部地铁车站的应力,可见,随着合建体结构埋深的增加,车辆荷载对下部地铁车站产生的应力逐渐减小。

3.2 不同车速下合建体的动力响应分析

本文以城-A 级公路规定车辆荷载 55t 为条件,研究不同车速对合建体结构的影响规律,动力计算分析时间取为车辆通过大桥的时间,分析测点见图 1。本文取合建体结构左数第四个转换梁的中间位置的横断面作为分析断面,重点分析该断面测点的竖向位移、竖向加速度、竖向动应力的响应规律。

3.2.1 位移动力响应

在车辆荷载为 55 t 的情况下,不同车辆速度对合建体结构各测点的竖向位移的影响规律,如图 8~图 11 所示,测点的最大竖向位移如表 6 所示。

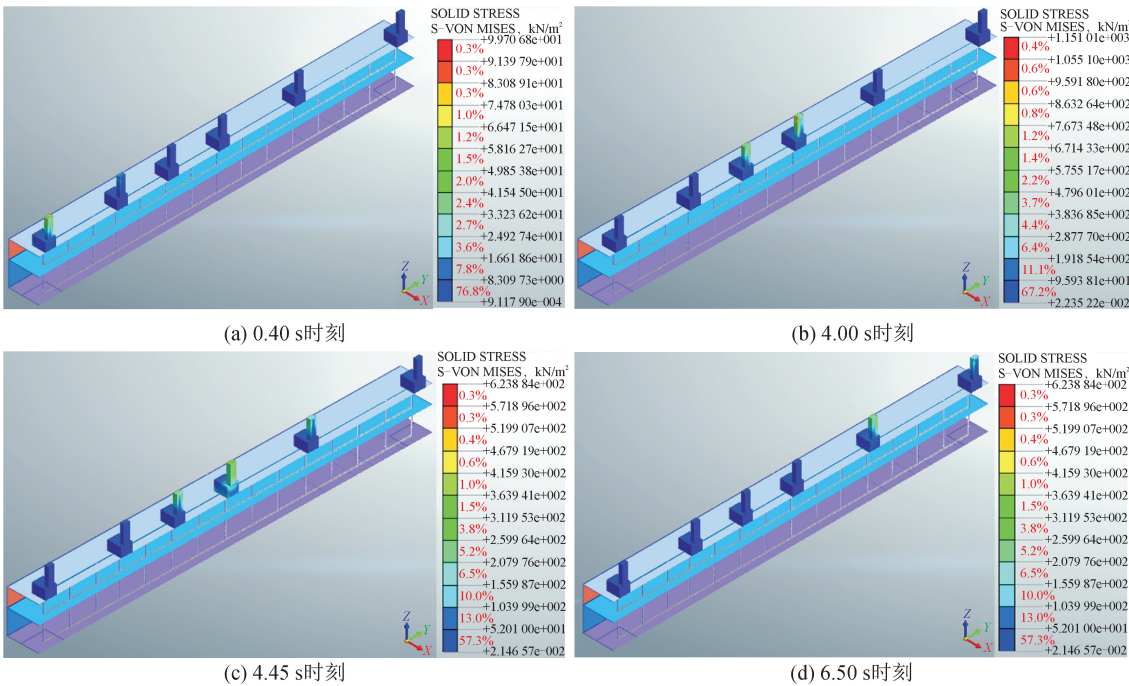


图 6 不同时刻合建体上部桥墩应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of superstructure pier of composite structure at different times

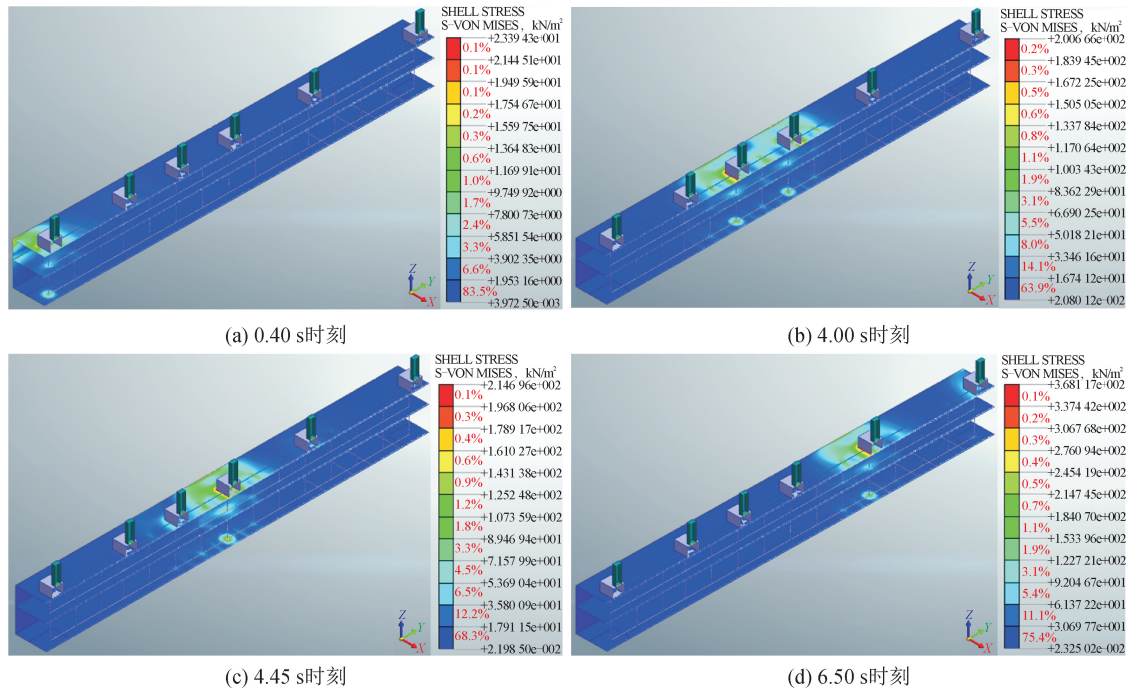


图 7 不同时刻合建体下部地铁车站应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of substructure subway station of composite structure at different times

表 6 不同车速下合建体结构各测点的最大竖向位移

Tab. 6 Maximum vertical displacement of each measuring point of composite structure at different speeds

测点	最大竖向位移/mm			测点	最大竖向位移/mm		
	车速 60 km · h ⁻¹	车速 80 km · h ⁻¹	车速 100 km · h ⁻¹		车速 60 km · h ⁻¹	车速 80 km · h ⁻¹	车速 100 km · h ⁻¹
A	-2.126	-2.351	-2.593	D	-0.127	-0.232	-0.349
B	-0.224	-0.543	-0.842	E	-0.020	-0.051	-0.083
C	-0.217	-0.326	-0.515				

注:断面位置为左数第四个转换梁的中间位置。

1) 由图 8~图 10 可知,在车辆荷载作用下,合建体结构各测点的竖向位移远大于横向位移,故本文以合建体结构各测点的竖向位移响应作为分析依据。随着车辆荷载逐步接近结构分析断面,各测点竖向位移呈增大趋势;当车轮经过测点后,其竖向位移达到峰值;随着车辆荷载的远离,位移呈减小趋势,最后趋于平稳;且车速越大,位移响应衰减越快,因此,限制车速能有效减小车辆荷载对合建体结构的不利影响。

2) 由表 6 和图 11 可知,在不同车速影响下,合

建体各测点竖向位移的变化趋势基本相同,测点 A 处位移值最大,其余各测点的竖向位移随合建体结构埋深的增加而逐渐减小;测点位移值随车辆速度的增加而不断增大。当车速为 60 km/h 时,A 点最大沉降值为 2.126 mm;而当车速为 80 km/h 和 100 km/h 时,A 点最大沉降值分别为 2.351 mm 和 2.593 mm。上述计算结果均明显小于《城市轨道交通结构安全保护技术规范》(CJJ/T 202—2013)^[19] 中的地铁车站结构竖向位移控制值(沉降值)10 mm,满足工程要求。

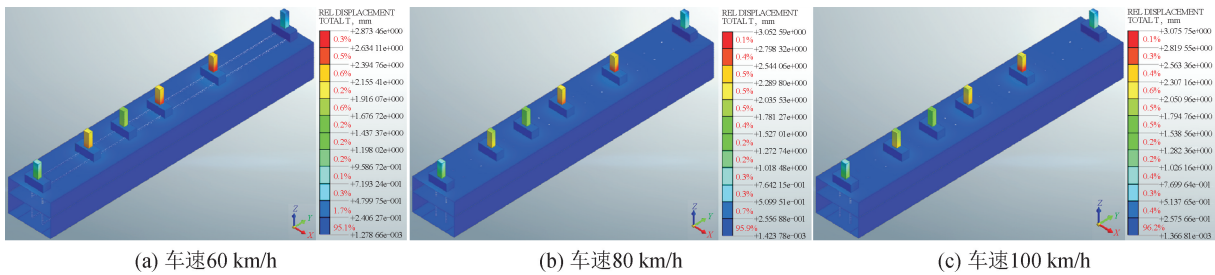


图 8 不同车速下合建体结构的最大位移变形图

Fig. 8 Maximum displacement and deformation diagram of composite structure at different vehicle speeds

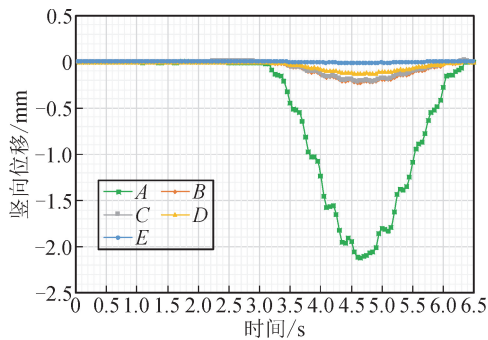


图 9 车速 60 km/h 时各测点的竖向位移时程曲线
Fig. 9 Vertical displacement of each measuring point at 60 km/h displacement time history curve

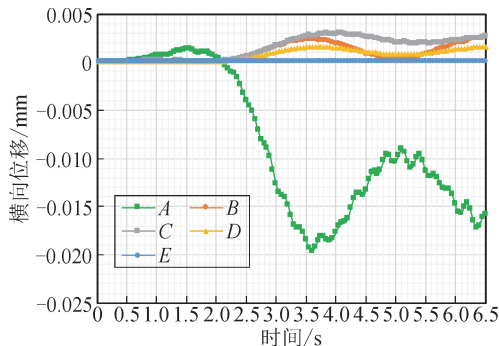


图 10 车速 60 km/h 时各测点的横向位移时程曲线
Fig. 10 Lateral displacement of each measuring point at 60 km/h displacement time history curve

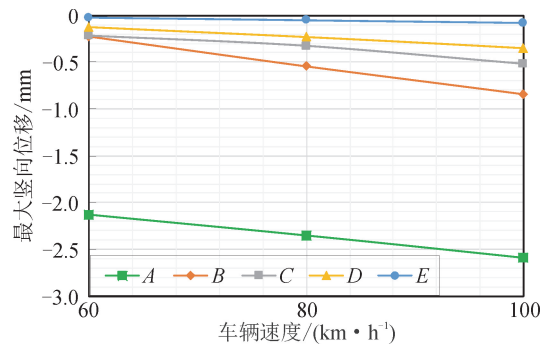


图 11 合建体各测点最大竖向位移与车速响应规律
Fig. 11 Maximum vertical displacement of each measuring point of composite building and vehicle speed response law

3.2.2 加速度动力响应

在车辆荷载为 55t 的情况下,不同车辆速度对合建体结构各测点的竖向加速度的影响规律,如图 12 和图 13 所示,最大竖向加速度如表 7 所示。

由表 7、图 12 和图 13 可知,不同车速影响下,合建体结构的测点 A 处加速度响应最大,车速 60 km/h、80 km/h 及 100 km/h 时,测点 A 处的加速度峰值分别为 12.584 cm/s^2 、 15.658 cm/s^2 、 17.781 cm/s^2 。由此可知,随着车辆速度的增加,合建体的加速度响应逐渐增加;车速 80 km/h 时合建体的最大竖向加速度较车速 60 km/h 时增加了 24.4%,而车速 100 km/h 时合建体的最大竖向加速度较车速 80 km/h 时增加了 13.56%,显然,车速越大,合建体产生的竖向加速度越明显。

表 7 不同车速下合建体结构各测点的最大竖向加速度
Tab. 7 Maximum vertical acceleration of each measuring point of composite structure at different speeds

测点	最大竖向加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)		
	车速 60 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	车速 80 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	车速 100 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
A	12.584	15.658	17.781
B	3.233	5.282	8.357
C	2.593	4.246	6.293
D	0.998	1.752	2.661
E	0.506	0.925	1.059

注:断面位置为左数第四个转换梁的中间位置。

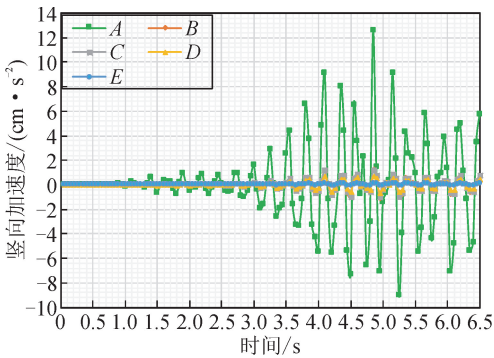


图 12 车速 60 km/h 时各测点的竖向加速度时程曲线
Fig. 12 Vertical acceleration time history curve of each measuring point at 60 km/h

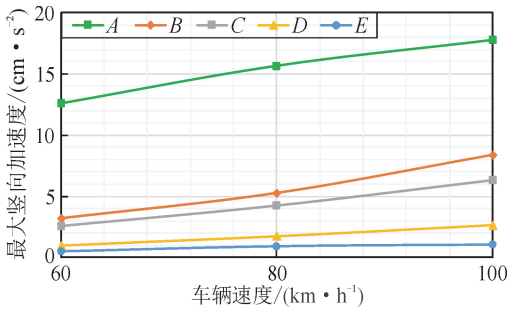


图 13 合建体各测点最大竖向加速度与车速响应规律
Fig. 13 Maximum vertical acceleration and vehicle speed response law of joint construction body measurement point

另外,在车辆荷载和车速一定情况下,随着合建体结构埋深的增加,竖向加速度逐渐减小,桥墩处测点的竖向加速度最大,而车站底板所受影响最小。根据《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T441—2019)^[20],公共交通等候大厅楼盖结构振动峰值加速度限值为 150 cm/s^2 ,在模拟中,车速为 100 km/h 时,地下结构顶板 C 点的最大加速度峰值为 6.293 cm/s^2 ,结构顶板振动加速度峰值未超限。

3.2.3 应力动力响应

在车辆荷载为 55t 的情况下,不同车辆速度对

合建体结构各测点的竖向动应力的影响规律,如表 8、图 14 及图 15 所示。

表 8 不同车速下合建体结构各测点的最大竖向动应力
Tab. 8 Maximum vertical acceleration of each measuring point of composite structure at different speeds

测点	最大竖向动应力/kPa		
	车速 60 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	车速 80 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	车速 100 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$
A	495.020	501.041	512.724
B	123.608	133.730	141.517
C	102.737	113.073	121.787
D	50.182	63.225	74.464
E	33.495	45.945	58.167

注:断面位置为左数第四个转换梁的中间位置。

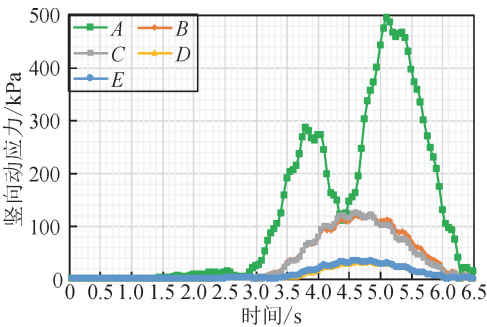


图 14 车速 60 km/h 时各测点的竖向动应力时程曲线
Fig. 14 Time history curve of vertical dynamic stress at each measuring point at 60 km/h

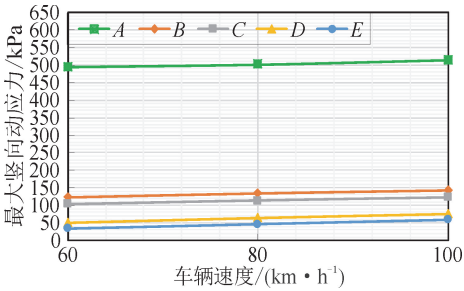


图 15 合建体各测点最大竖向动应力与车速响应规律
Fig. 15 Maximum dynamic stress and vehicle speed response law of joint building

由表 8、图 14 及图 15 可知,车辆速度与合建体竖向动应力基本呈线性关系。随着车速的增大,合建体竖向动应力呈增大趋势,但增幅不大,合建体测点 A 在三种车速下的竖向动应力分别为 495.020 kPa、501.041 kPa、512.724 kPa。

此外,合建体各测点的竖向动应力在车辆前后轮经过测点时表现不同,当车辆前轮通过合建体测

点时,测点的竖向动应力增大且出现一个较小的峰值;当车辆后车轮通过时,竖向动应力达到峰值;随着车辆的远离,测点的竖向动应力趋于平稳。

3.3 不同车辆荷载下合建体的动力响应分析

当车速为 60 km/h 时,分析不同车辆荷载对合建体结构的影响。根据规范要求和工程设计规定,本次模拟的车辆荷载分别为 5 t、25 t、55 t。

3.3.1 位移动力响应

在车速为 60 km/h 情况下,不同车辆荷载对合建体结构各测点的竖向位移的影响规律,如表 9 和图 16~图 18 所示。

表 9 不同车辆荷载下合建体结构各测点的最大竖向位移
Tab. 9 Maximum vertical displacement of each measuring point of composite structure under different vehicle weights

测点	最大竖向位移/mm		
	车辆荷载 5t	车辆荷载 25t	车辆荷载 55t
A	-0.206	-1.027	-2.126
B	-0.022	-0.107	-0.224
C	-0.021	-0.104	-0.217
D	-0.012	-0.061	-0.127
E	-0.002	-0.009	-0.020

注:断面位置为左数第四个转换梁的中间位置。

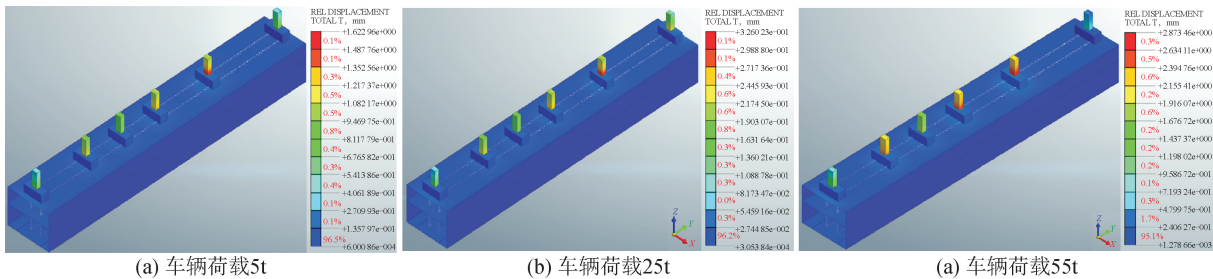


图 16 不同车辆荷载下合建体结构的最大位移变形图

Fig. 16 Maximum displacement and deformation diagram of composite structure under different vehicle weights

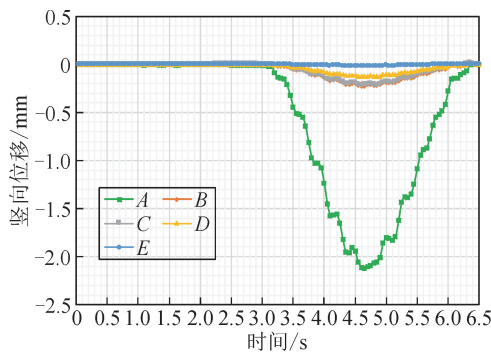


图 17 车辆荷载为 55 t 时各测点的竖向位移时程曲线
Fig. 17 Vertical displacement time history curve of each measuring point when the vehicle weight is 55t

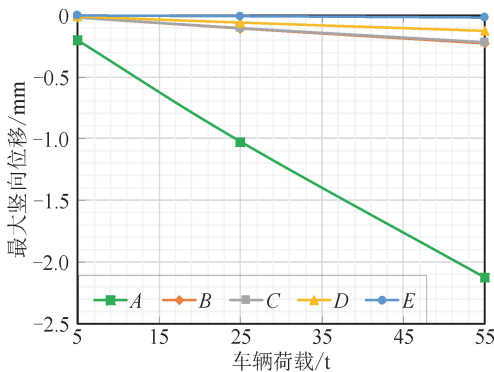


图 18 合建体各测点最大竖向位移与车辆荷载响应规律
Fig. 18 Response law of maximum vertical displacement of measuring point and vehicle speed of combined building

1) 由表 9、图 16 和图 17 可知,随着车辆荷载的增加,各测点的竖向位移逐渐增大,在 5 t、25 t 及 55 t 三种车辆荷载下,测点 A 的竖向位移分别为 0.206 mm、1.027 mm、2.126 mm,显然,车辆荷载越重,合建体的竖向位移响应就越大,因此,限制重型车辆通行是维护合建体结构安全的有效措施。当车速保持在 60 km/h,车辆荷载为 5t 时 A 点最大位移为 0.206 mm,车辆荷载为 25 t 时 A 点最大位移为 1.027 mm,而车辆荷载为 55t 时 A 点最大位移为 2.126 mm,均小于规范限值 10 mm,符合工程要求。

2) 由图 18 可知,车辆荷载与各测点的最大竖向位移基本呈线性关系,且随着地铁车站埋深的增加,合建体各测点的竖向位移逐渐减小。

3.3.2 加速度动力响应

在车速为 60 km/h 的情况下,不同车辆荷载对合建体结构各测点的竖向加速度的影响规律,如表 10、图 19 及图 20 所示。

根据表 10、图 19 及图 20 可知,在车辆速度一定的情况下,随着车辆荷载的增加,合建体结构各测点的竖向加速度显著增加,三种车辆荷载下均为测点 A 的加速度最大,分别为 2.583 cm/s²、5.421 cm/s²、12.580 cm/s²,车辆荷载为 25t 时的加速度是车辆荷载为 5 t 时的加速度的 2.10 倍,而车辆荷载为 55 t 时的加速度是车辆荷载为 25t 时的加速度的 2.32 倍,

说明限制车辆荷载可有效降低对合建体结构的不利影响。

根据《建筑楼盖结构振动舒适度技术标准》(JGJ/T 441—2019)^[20],公共交通等候大厅楼盖结构振动峰值加速度限值为 150 cm/s^2 ,在模拟中,车速为 60 km/h 、车辆荷载为 55 t 时,地下结构顶板 C 点的最大加速度峰值为 2.593 cm/s^2 ,结构顶板振动的加速度峰值未超规范限值。

表 10 不同车辆荷载下合建体结构各测点的最大竖向加速度
Tab. 10 Maximum vertical acceleration of each measuring point of composite structure under different vehicle weights

测点	最大竖向加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)		
	车辆荷载 5t	车辆荷载 25t	车辆荷载 55t
A	2.583	5.421	12.580
B	0.108	0.636	3.233
C	0.107	0.535	2.593
D	0.105	0.527	0.998
E	0.018	0.059	0.506

注:断面位置为左数第四个转换梁的中间位置。

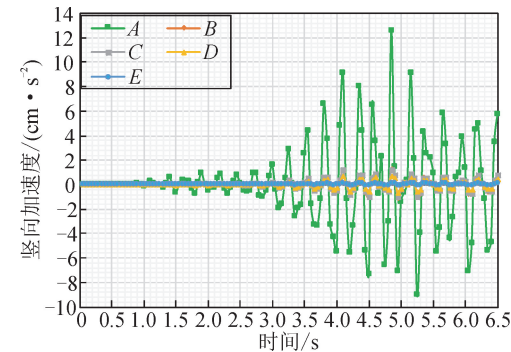


图 19 车辆荷载为 55t 时各测点的竖向加速度时程曲线
Fig. 19 Vertical acceleration time history curve of each measuring point at 55t vehicle weight

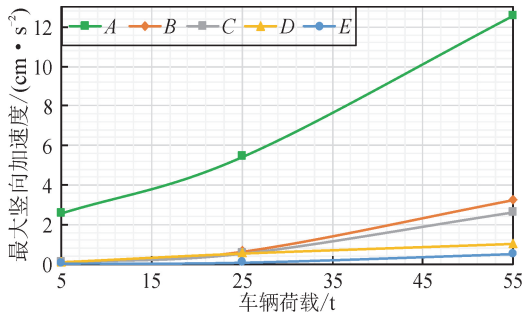


图 20 合建体各测点最大竖向加速度与车辆荷载响应规律
Fig. 20 Maximum vertical acceleration and vehicle speed response law of joint building

3.3.3 应力动力响应

在车速为 60 km/h 的情况下,不同车辆荷载对合建体结构各测点的竖向动应力的影响规律,如表 11、图 21 及图 22 所示。

表 11 不同车辆荷载下合建体结构各测点的最大竖向动应力
Tab. 11 Maximum vertical dynamic stress of each measuring point of composite structure under different vehicle weights

测点	最大竖向动应力/kPa		
	车辆荷载 5 t	车辆荷载 25 t	车辆荷载 55 t
A	49.557	240.602	495.020
B	11.886	69.541	123.608
C	12.225	59.779	102.737
D	3.422	16.999	50.182
E	3.138	10.082	33.495

注:断面位置为左数第四个转换梁的中间位置。

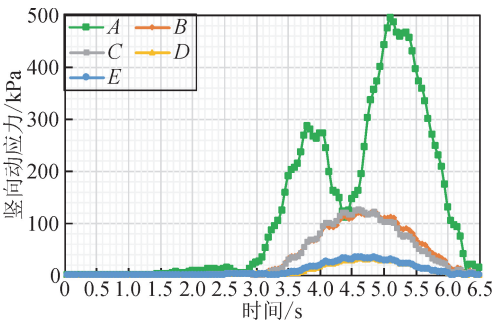


图 21 车辆荷载为 55t 时各测点的竖向动应力时程曲线
Fig. 21 Time history curve of vertical dynamic stress at each measuring point under 55t vehicle weight

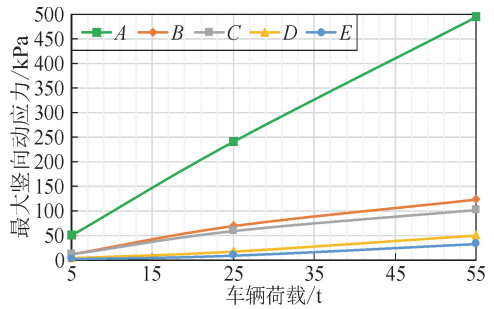


图 22 合建体各测点最大竖向动应力与车辆荷载响应规律
Fig. 22 Maximum dynamic stress and vehicle speed response law of joint building

由表 11、图 21 及图 22 可知,在三种车辆荷载影响下,测点 A 的竖向动应力对车辆荷载响应最为显著,其竖向动应力分别为 49.557 kPa 、 240.602

kPa、495.020 kPa,车辆荷载为 25 t 时的动应力是车辆荷载为 5 t 时的动应力的 4.86 倍,车辆荷载为 55 t 时的动应力是车辆荷载为 25 t 时的动应力的 2.06 倍。

另外,车辆荷载与最大竖向动应力呈正比例关系,竖向动应力响应沿竖向向下方传递并逐渐衰减,车辆后轮通过测点时,竖向动应力达到最大值。

4 结 论

通过 MIDAS GTS 软件,采用地层结构法建立了地铁车站与城市桥梁合建体结构的三维有限元数值模型,将车辆荷载简化为简谐波荷载施加到合建体三维模型上,重点分析了车辆速度、车辆荷载等因素对合建体结构动力特性及响应的规律,主要结论如下:

1) 车辆荷载作用下,合建体的横向动力响应小于竖向动力响应,且合建体的竖向加速度响应变化最大,故进行合建体的车辆荷载振动影响评价时,应以竖向加速度作为评判依据;

2) 车辆荷载相同情况下,车速为 100 km/h 时,合建体结构的最大沉降值为 2.593 mm;车速为 60 km/h,车辆荷载为 55 t 时,合建体结构的最大沉降值为 2.126 mm,均符合规范限值要求;

3) 随着车速的增加,合建体的竖向加速度逐渐增加,车速 100 km/h 时的合建体竖向加速度比 60 km/h 时的竖向加速度提高了 166.63%(D 点),因此,限制车速能够有效降低对合建体结构的不利影响;

4) 不同车辆荷载下,车辆荷载为 25 t 和 55 t 时的合建体竖向加速度分别是车辆荷载为 5 t 时的 2.10 和 4.87 倍,故限制车辆荷载可有效降低对合建体结构的不利影响;

5) 随着车速或车辆荷载的增加,合建体的竖向动应力逐渐增大,车辆荷载引起的增幅明显大于车速;在不同车辆荷载作用下,合建体的应力响应主要集中在桥墩上部、转换梁与车站顶板结合处、顶板与侧墙交界处及柱子与各层板交界处,因此,须加强上述部位的设计和构造措施。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 大城市发展轨道交通势在必行[J]. 市政技术, 2004, 22(1):1-3.
WANG Mengshu. It is imperative to develop rail transit in big cities [J]. Municipal Engineering Technology, 2004, 22 (1): 1-3.
- [2] 王金山. 与市政桥梁结合建设的地铁车站结构设计—

以合肥轨道交通 1 号线水阳江路站为例[J]. 建设科技, 2017 (13): 80-81.

- [3] 王谭,莫海鸿,刘添俊. 立交桥与地铁车站共站条件下施工顺序对车站变形及受力的影响[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(8): 110-115.
WANG Tan, MO Haihong, LIU Tianjun. Effects of construction sequence of overpass and metro station in the same location on deformation and stress of the subway station [J]. Railway Standard Design, 2017, 61 (8): 110-115.
- [4] 陈海勇,石达强. 成都地铁中医学院站施工安全风险分
析[J]. 隧道建设(中英文), 2011, 31(5): 559-565.
CHEN Haiyong, SHI Daqiang. Analysis on safety risks in construction of Zhongyixueyuan station of Chengdu metro [J]. Tunnel Construction, 2011, 31 (5): 559-565.
- [5] 孟宪春,景立平,孙海峰. 地铁运行对地面环境的振动影响[J]. 世界地震工程, 2010, 26 (S1): 310-314.
MENG Xianchun, JING Liping, SUN Haifeng. Ground vibration induced by metro running [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(S1): 310-314.
- [6] 郑明新,吴勇,黄文君,等. 盾构下穿铁路框架桥中路
面沉降变形规律分析[J]. 西安理工大学学报, 2015, 31 (1): 78-82.
ZHENG Mingxin, WU Yong, HUANG Wenjun, et al. An analysis of the deformation regulation of road settlement when shield underneath passing the railway frame bridge [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2015, 31 (1): 78-82.
- [7] MHANNA M, SADEK M, SHAHROUR I. Numerical modeling of traffic-induced ground vibration[J]. Computers and Geotechnics, 2012, 39:116-123.
- [8] PANEIRO G, DURÃO F O, SILVA M C E, et al. Prediction of ground vibration amplitudes due to urban railway traffic using quantitative and qualitative field data[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 40:1-13.
- [9] 郭宏博,阳彬武. 与城市桥梁合建的地铁车站结构设计[J]. 市政技术, 2018, 36(4):110-112,116.
GUO Hongbo, YANG Binwu. Design of subway station structure co-built with the urban bridge [J]. Municipal Engineering Technology, 2018, 36 (4): 110-112, 116.
- [10] 赵月. 与市政桥梁合建的地铁车站结构设计——以厦
门地铁吕厝站为例[J]. 隧道建设(中英文), 2015, 35 (5): 439-442.
ZHAO Yue. Structural design of Lucuo station of Xiamen metro: a metro station integrated with a municipal bridge[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(5):439-442.
- [11] 班自愿. 与桥梁同期同位合建的地铁车站结构设计与

- 受力分析[J]. 科技创新与应用, 2016(21): 15-17.
- [12] 董沂鑫, 张强, 陈明. 站桥同位分离合建中的地铁车站设计[J]. 铁道勘察, 2017, 43(4): 96-99.
- DONG Yixin, ZHANG Qiang, CHEN Ming. Design of metro station-viaduct combined structure [J]. Railway Investigation and Surveying, 2017, 43(4): 96-99.
- [13] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- [14] ZHAO W S, CHEN W Z, TAN X J, et al. Study on foamed concrete used as seismic isolation material for tunnels in rock [J]. Materials Research Innovations, 2013, 17(7): 465-472.
- [15] 屈铁军, 徐建, 石云兴. 基于有限元方法和测试结果确定钢筋混凝土构件的弹性模量[J]. 混凝土, 2015 (7): 136-139.
- QU Tiejun, XU Jian, SHI Yunxing. Determination of elastic modulus of reinforced concrete component based on finite element method and test results [J]. Concrete, 2015 (7): 136-139.
- [16] 刘晶波, 谷音, 杜义欣. 一致粘弹性人工边界及粘弹性边界单元 [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.
- [17] 杨春风, 解帅, 孙吉书. 基于路面不平整度的车辆动荷载系数分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2015, 34(4): 77-80, 90.
- YANG Chunfeng, XIE Shuai, SUN Jishu. Vehicle dynamic load coefficient analysis based on pavement roughness [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, 34 (4): 77-80, 90.
- [18] 交通运输部公路局, 中交第一公路勘察设计研究院有限公司. 公路工程技术标准: JTG B01—2014 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通结构安全保护技术规范: CJJ/T 202—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [20] 中国电子工程设计院有限公司. 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准: JGJ/T 441—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

(责任编辑 周 蓓)