【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

地铁运行引起的临近桥梁结构振动分析

孟 坤¹, 崔春义¹, 许民泽¹, 王启福², 苏 健³

1) 大连海事大学土木工程系, 辽宁大连 116026; 2) 大连海事大学安全工程系, 辽宁大连 116026;

3) 大连海洋大学海洋与土木工程学院, 辽宁大连 116023

摘 要: 为研究地铁列车运行引起的环境振动对临近既有公路桥梁结构的影响, 基于大型有限元计算平台 ABAQUS, 采用精细化建模方法, 建立地铁隧道-地基-既有桥梁的大规模三维数值计算模型, 通过列车-轨道-隧道结构系统力学简化模型, 计算得到列车振动荷载, 对桥梁结构在列车通行振动荷载作用下的受力及变形进行分析. 结果表明, 在列车通行过程中, 公路桥梁结构构件均存在明显的振动, 但未发生扩散性共振效应, 振动幅值很小; 在桥梁结构地震荷载与列车振动作用组合中, 列车振动作用效应可忽略.

关键词: 结构工程; 地铁列车; 地铁隧道; 公路桥梁; ABAQUS; 数值分析; 列车振动荷载

中图分类号: TU391

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2020.06610

Vibration of the existing bridge structure induced by metro train operation

MENG Kun¹, CUI Chunyi¹, XU Minze¹, WANG Qifu², and SU Jian³

1) Department of Civil Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning Province, P. R. China

2) Department of Safety Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning Province, P. R. China

3) College of Ocean and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, Liaoning Province, P. R. China

Abstract: In order to study the influence of environmental vibration induced by metro train operation on existing highway bridges, a three-dimensional numerical calculation model of metro tunnel-foundation-existing bridge is established based on ABAQUS, a large-scale finite element calculation platform. Then, the train-track-tunnel structure system is established to calculate the train vibration load. On this basis, the force and deformation of bridge structure under vibration load caused by train are analyzed, respectively. The calculation results show that during the train passage, there are obvious vibration effects in bridge structural components, but there is no diffusive resonance effect, and the vibration amplitude is very small. In the combination of seismic load of bridge structure and train vibration, the effect of train vibration can be completely neglected. The results can provide reference for engineering analysis and practice.

Key words: structural engineering; subway train; metro tunnel; highway bridge; ABAQUS; numerical analysis; train vibration load

Received: 2020-03-25; Accepted: 2020-09-20

Foundation: National Natural Science Foundation of China (51878109, 51578100); Fundamental Research Fund for the Central Universities (3132019349)

Corresponding author: Professor CUI Chunyi. Email: cuichunyi@dlmu.edu.cn

Citation: MENG Kun, CUI Chunyi, XU Minze, et al. Vibration of the existing bridge structure induced by metro train operation [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(6): 610-616. (in Chinese)

<http://journal.szu.edu.cn>

地铁作为缓解城市交通拥堵、便利出行的重要交通工具, 在中国得到了快速发展. 然而, 地铁发展给人们带来便利的同时, 列车运行产生的振动亦会对城市既有建筑物产生不利影响^[1-5]. 因此, 研究地铁列车运行引发的环境振动对临近既有建筑物的影响具有重要实践意义.

列车荷载计算是研究地铁列车对临近建筑物振动影响的关键. 潘昌实等^[6]认为列车引起的振动具有随机性, 并将列车荷载简化为一系列正弦函数叠加的形式. 高广运等^[7]采用离散傅里叶级数对上海地铁实测轨道加速度进行拟合, 根据达朗贝尔原理求解得到列车荷载的数定表达式. 李晓霖^[8]认为低频振动阻尼相对较小, 低于 20 Hz 的振动衰减较慢, 土体刚度增大时, 振动峰值向高频转移. 周云^[9]认为接近振源处的振动频率以车辆自振频率为主, 较远处的振动频率以地基的自振频率为主. 楼梦麟等^[10]通过对上海地铁地面振动实测, 发现地面振动随振中距的增加而衰减, 且地铁运行引起的地面振动频率集中在 40 ~ 90 Hz. 在地铁列车运行对临近建筑物产生影响方面, 杨博^[11]通过多点加载和一致激励加载的方法, 研究了地铁周边建筑物振动响应特性. 吴景壮^[12]围绕邻近地铁线路的建筑物隔振问题, 分析了地铁对建筑物振动影响, 得出了既定结构隔振的目标频段. 钟才敏等^[13]通过对地铁邻近某新建多层混凝土建筑楼面、地面的振动加速度进行实测分析, 认为多层建筑以竖向振动为主, 振动在部分楼层有放大现象, 顶层和底层受到振动的影响更大. 毕伟^[14]将低频竖向谐振波作为激振力, 通过数值模拟和实测对比发现楼层越高振动加速度幅值越大.

综上所述, 地铁列车运行振动对既有临近建筑物的影响, 涉及到列车、轨道、地铁隧道、地基和既有建筑结构多个部分和诸多因素. 由于计算硬件和理论限制, 已有研究大多进行部分简化处理, 少见关于地铁列车运行振动对临近桥梁影响的相关研究. 本研究基于大型通用有限元数值分析平台 ABAQUS, 采用精细化建模方法建立地铁隧道-地基-既有桥梁的大规模三维数值计算模型, 并通过车辆-轨道耦合动力学简化模型, 计算得出列车振动荷载, 对某公路桥梁结构在地铁列车通行振动荷载作用下的受力及变形进行分析与评价.

1 工程概况

某地铁区间隧道采用盾构法施工, 单洞单线隧

道, 隧道内径为 5.4 m, 管片厚度为 0.3 m, 左右线隧道净距约为 9 ~ 22 m, 隧道结构顶板埋深为 13.5 ~ 24.3 m, 标高为 -25.12 ~ -15.06 m, 隧道结构底板埋深为 19.5 ~ 30.3 m, 平均埋深为 26.6 m. 隧道洞身位于全风化花岗岩、土状强风化花岗岩和中微风化花岗岩. 隧道下穿某高速公路桥, 下穿段长 46 m, 平面夹角 37°. 地铁线路地理位置与某高速公路桥梁交叉情况如图 1.

图 1 地铁线位置及与高速桥梁交叉情况图

Fig. 1 (Color online) Location of metro line and crossing with high-speed bridge

某高速公路上部构造为预应力混凝土连续板梁, 组合断面结构, 预制板宽为 1.0 m、高为 0.7 m, 梁长分别为 14.70 m 和 14.82 m. 桥面各幅单向横坡为 2.5%, 桥面现浇层为 10 cm 整体化层, 8 cm 沥青混凝土铺装. 盾构隧道下穿高速桥梁涉及 L_{20} — L_{24} 左线桥、 R_{21} — R_{25} 右线桥, 左、右线桥横截面如图 2. 左、右线主下部桥墩柱均采用双柱和三柱型桥墩, 墩底矩形截面为 1.2 m × 1.0 m, 基础采用直径 1.2 m 的钻孔桩, 均为一墩一桩结构, 桩基以弱风化花岗岩为桩端持力层.

根据既有桥梁结构墩柱复测结果, R_{22} 2[#]墩、 R_{23} 2[#]、3[#]墩、 R_{24} 1[#]墩、 L_{23} 1[#]墩和 L_{24} 1[#]墩在平面上与盾构左右线冲突. 为保证盾构下穿高速桥梁, 减小区间施工对既有结构安全的影响, 需对上述 6 处桩基进行桩基托换, 桩基托换平面布置如图 3. 桥墩桩基托换均采用由托换桩和托换大梁组成的门字架托换体系, 托换桩采用直径 1.5 m 的钻孔灌注桩, 托换梁截面为 3.6 m (宽) × 2.6 m (高) × (12.0 ~ 13.5) m (跨度).

图 2 左右线桥横截面 (单位: mm)

Fig. 2 The cross section of left and right line bridge (unit: mm)

图 3 桩基托换平面布置图

Fig. 3 (Color online) Layout plan of pile foundation underpinning

2 数值分析模型

采用有限元计算平台 ABAQUS, 建立盾构隧道下穿既有建筑物三维弹塑性数值模型. 其中, 地下土层采用三维弹塑性实体单元, 隧道衬砌结构采用三维弹性实体单元, 建筑桩基和柱子采用梁单元, 楼板则采用二维板单元. 假定土体材料为服从莫尔库伦的弹塑性材料, 盾壳、衬砌管片和建筑结构均为弹性材料. 土层、隧道衬砌及建筑结构材料的参数如表 1. 为消除模型边界效应影响, 地基部分长、宽和深分别取为 170、100 和 70 m. 地铁隧道-地基-既有桥梁的大规模三维数值计算模型如图 4.

图 4 数值计算模型

Fig. 4 (Color online) Numerical model

表 1 地层岩性及计算参数
Table 1 Soil parameters of coal field

材 料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
素填土	1 910	8	0.35
粉质黏土	1 980	10	0.32
砂 土	2 030	25	0.30
强风化花岗岩	2 100	60	0.28
中风化花岗岩	2 570	800	0.26
桥面板	2 500	28 000	0.20
承 台	2 500	28 000	0.20
桥 桩	2 500	28 000	0.20
管片衬砌	2 500	30 000	0.20

假定列车行进速度为 80 km/h, 地铁列车各轮轨的竖向和横向振动荷载动力时程曲线如图 5. 将轮轨力时程作为地铁列车激励荷载, 进一步分析地铁列车通行时对桥梁结构动力响应的影响. 为校核桥梁结构在列车运行振动作用下的安全性, 将地铁列车通行时桥梁结构动力响应与地震作用下桥梁结构动力响应进行对比分析. 选取 EI Centro 波、Taft 波和 Kobe 波, 取加速度时间间隔为 0.02 s, 持续 30 s, 对桥梁结构进行一致激励动力时程分析. 根

图 5 (Color online) Time history of wheel rail force

据设防烈度对 3 条地震波加速度峰值进行调幅, 调幅后的地震波如图 6^[15].

图 6 输入地震波时程曲线^[15]
Fig. 6 (Color online) Time history curve of input seismic wave^[15]

3 结果与分析

地铁列车荷载按图 5 所给的横向和竖向轮轨力时程施加. 当列车通行隧道和桥梁区域时, 桥梁各关键节点位移及应力最大值见表 2, 桥梁板梁跨中

节点动力响应时程如图 7. 其中, U_x 、 U_y 和 U_z 分别为沿 x 、 y 和 z 方向的位移. 综合表 2 和图 7 可知, 在列车通行过程中, 桥梁结构构件均存在明显振动, 但未发生扩散性共振效应, 列车通行激起的桥梁结构振动最大位移仅为 $0.18 \mu\text{m}$, 第一主应力最大值仅为 $-1.2 \times 10^{-4} \text{ MPa}$, 属于微米级振动. 桥梁板梁跨中节点在列车荷载激励下的位移及应力傅里叶谱值如图 8. 由图 8 可见, 频率 $4 \sim 5 \text{ Hz}$ 时激起的桥梁位移和应力幅值最大, 因此在对列车荷载进行控制时需特别注意此频率段成分.

表 2 地铁列车通行时桥梁结构关键节点
变形及受力计算结果

Table 2 Deformation and stress calculation results of key nodes of bridge structure when subway trains pass

关键节点	$10^5 U_x / \text{mm}$	$10^5 U_y / \text{mm}$	$10^5 U_z / \text{mm}$	$10^4 \text{ 应力} / \text{MPa}$
$R_{23}-R_{24}$ - 8#梁跨 中节点	3.5	-14	-5.0	0.9
$R_{23}-R_{24}$ - 20#梁跨 中节点	3.6	-9	-5.0	0.8
$L_{22}-L_{23}$ - 8#梁跨 中节点	7.0	-5	7.0	0.5
R_{23} 盖梁	3.5	-11	-5.0	0.5
R_{24} 盖梁	3.7	-14	-5.0	-1.2
L_{22} 盖梁	-4.0	-10	7.0	-0.4
L_{23} 盖梁	-5.0	-10	7.0	-0.6
R_{23} 墩柱	5.5	-10	3.0	0.7
R_{24} 墩柱	2.9	-18	-2.9	-0.6
L_{22} 墩柱	-2.3	-3	4.8	-0.7
L_{23} 墩柱	-3.0	-9	5.0	-0.6

对 3 组地震波输入时桥梁结构的地震动力响应进行分析, 并将输入响应结果的最大值与列车运行时桥梁结构动力分析的位移、应力结果进行对比, 进一步校核桥梁结构在列车运行振动作用下的安全性.

地震作用下, 桥梁各关键节点位移及应力最大值见表 3. 列车通行引起的桥梁最大振动位移幅值为 $-1.8 \times 10^{-4} \text{ mm}$, 与地震作用下桥梁结构最大位移 (1.61 mm) 相差 4 个数量级; 列车通行引起的桥梁最大主应力幅值为 $-1.2 \times 10^{-4} \text{ MPa}$, 与地震作用下桥梁结构最大应力 (0.112 MPa) 相差 3 个

数量级. 显然, 在桥梁结构地震与列车振动作用组合中, 列车振动作用效应可以忽略.

(a) $R_{23}-R_{24}$ 板梁跨中节点位移时程

(b) $L_{22}-L_{23}$ 板梁跨中节点位移时程

(c) $R_{23}-R_{24}$ 板梁跨中节点应力时程

(d) $L_{22}-L_{23}$ 板梁跨中节点应力时程

图 7 桥梁各关键节点动力响应时程

Fig. 7 (Color online) Dynamic response time history of key nodes of bridge

图 8 桥梁各关键节点位移及应力傅里叶谱

Fig. 8 (Color online) Fourier spectra of displacement and stress of key nodes of bridge

表 3 地震作用下桥梁结构关键节点
变形及受力计算结果

Table 3 Deformation and stress calculation results of
key nodes of bridge structure under earthquake

关键节点	U_x / mm	U_y / mm	U_z / mm	应力 / MPa
R_{23} — R_{24} -				
8#梁跨	1.59	0.05	0.24	0.061
中节点				
R_{23} — R_{24} -				
20#梁跨	1.60	0.04	0.22	0.112
中节点				
L_{22} — L_{23} -				
8#梁跨	1.50	0.05	0.15	0.063
中节点				
R_{23} 盖梁	1.61	0.09	0.22	0.018
R_{24} 盖梁	1.60	0.04	0.23	0.071
L_{22} 盖梁	1.60	0.11	0.24	0.022
L_{23} 盖梁	1.58	0.06	0.16	0.073
R_{23} 墩柱	1.58	0.05	0.12	0.087
R_{24} 墩柱	1.57	0.09	0.12	0.014
L_{22} 墩柱	1.56	0.08	0.13	0.053
L_{23} 墩柱	1.51	0.05	0.16	0.062

结 语

基于大型通用有限元数值分析平台 ABAQUS，采用精细化建模方法建立了地铁隧道-地基-既有桥梁的三维大规模数值计算模型，分析了地铁列车运

行振动对临近公路既定桥梁结构的影响，可为相关工程分析与实践提供参考。在列车通行过程中，该桥梁结构构件存在明显的振动效应，但未发生扩散性共振，列车通行激起的桥梁结构振动受力变形极值均很小。列车通行激起的该桥梁最大振动位移和最大应力，与地震作用下桥梁结构振动响应均差 2 到 3 个数量级，即在桥梁结构地震与列车振动作用组合中，列车振动作用效应可忽略。

基金项目：国家自然科学基金资助项目（51878109，51578100）；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（3132019349）

作者简介：孟 坤（1990—），大连海事大学博士研究生。研究方向：工程计算与分析。E-mail: mengkuntumu@163.com

引 文：孟 坤，崔春义，许民泽，等. 地铁运行引起的临近桥梁结构振动分析[J]. 深圳大学学报理工版，2020，37（6）：610-616.

参考文献 / References:

[1] 马龙祥，赵瑞桐，甘雨航，等. 车型及编组对地铁运营诱发环境振动的影响研究[J]. 振动与冲击，2019（11）：24-30.

MA Longxiang, ZHAO Ruitong, GAN Yuhang, et al. Effects of train type and formation on metro operation induced environmental vibration [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019(11): 24-30. (in Chinese)

[2] 马晓磊，巴振宁，高愈辉，等. 滨海软土地区地铁运营对沿线建筑物振动影响分析[J]. 岩土工程学报，2019（增刊1）：177-180.

MA Xiaolei, BA Zhenning, GAO Yuhui, et al. Vibration effect of metro operation on buildings along Tianjin Binhai

- New Area in soft soil areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019(Suppl.1): 177-180. (in Chinese)
- [3] 冯青松, 张运来, 陈艳明, 等. 减振扣件对地铁隧道-地表振动特性影响分析[J]. 铁道工程学报, 2020(1): 101-108.
FENG Qingsong, ZHANG Yunlai, CHEN Yanming, et al. Analysis of influence of damping fasteners on vibration characteristics of metro tunnel-surface [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020(1): 101-108. (in Chinese)
- [4] 雷晓燕, 崔聪聪, 张 凌. 地铁列车荷载激励下综合交通枢纽车站站房结构的振动响应[J]. 中国铁道科学, 2019(3): 119-128.
LEI Xiaoyan, CUI Congcong, ZHANG Ling. Vibration response of station structure of comprehensive transportation hub station under subway train load excitations [J]. China Railway Science, 2019(3): 119-128. (in Chinese)
- [5] 赵 凯, 王秋哲, 毛昆明. 地铁运行引起建筑物振动的三维有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019(2): 209-216.
ZHAO Kai, WANG Qiuzhe, MAO Kunming. 3D FE analysis on building vibration induced by train running [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019(2): 209-216. (in Chinese)
- [6] 潘昌实, PANDE G N. 黄土隧道列车动荷载响应有限元初步数定分析研究[J]. 土木工程学报, 1984, 17(4): 19-28.
PAN Changshi, PANDE G N. Preliminary deterministic finite element study on a tunnel driven in loess subjected to train loading [J]. China Civil Engineering Journal, 1984, 17(4): 19-28. (in Chinese)
- [7] 高广运, 陈 娟, 朱林园. 上海地铁荷载作用下邻近建筑物振动响应分析[J]. 噪声与振动控制, 2016, 36(6): 136-141.
GAO Guangyun, CHEN Juan, ZHU Linjuan. Numerical analysis of the vibration impact induced by underground moving trains on surrounding buildings in shanghai [J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(6): 136-141. (in Chinese)
- [8] 李晓霖. 地铁诱发振动对地面以及地上结构的影响规律研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
LI Xiaolin. Study on influence of vibration induced by subway train on ground and ground structures [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [9] 周 云. 交通荷载对周边建筑的振动影响分析[D]. 浙江: 浙江大学, 2005.
ZHOU Yun. Study on building vibrations induced by trains and vehicles [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)
- [10] 楼梦麟, 贾旭鹏, 俞洁勤. 地铁运行引起的地面振动实测及传播规律分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2009, 29(3): 282-287.
LOU Menglin, JIA Xupeng, YU Jieqin. Field measurement and analysis of ground vibration induced by subway trains [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(3): 282-287. (in Chinese)
- [11] 杨 博. 地铁运行引发周边建筑物振动响应特性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
YANG Bo. Study on response characteristics of building vibrations induced by subway [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [12] 吴景壮. 地铁运行引起的振动对建筑结构的影响及隔振研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
WU Jingzhuang. The impact of vibration on the building structure caused by metro and isolation research [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [13] 钟才敏, 汪 凯, 傅晋申, 等. 地铁运行区域新建多层钢筋混凝土框架结构振动实测与分析[J]. 建筑结构, 2015, 45: 65-68.
ZHONG Caimin, WANG Kai, FU Jinshen, et al. Measurement and analysis of floor vibration of a newly-built multi-story reinforced concrete frame structure in metro operation area [J]. Building Structure, 2015, 45: 65-68. (in Chinese)
- [14] 毕 伟. 地铁列车所致临近建筑物振动预测方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
BI Wei. Study on prediction of metro train-induced building vibration [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [15] 崔春义, 孟 坤, 程学磊, 等. 大连长山矮塔斜拉桥抗震性能三维数值分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017(3): 5-10.
CUI Chunyi, MEN Kun, CHENG Xuelei, et al. 3D numerical analyses of seismic behavior of changshan long span extradosed cable-stayed bridge [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017(3): 5-10. (in Chinese)

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】