

DOI: 10.11779/CJGE2019S2045

# 滨海软土地区地铁运营对沿线建筑物振动影响分析

马晓磊<sup>1</sup>, 巴振宁<sup>2\*</sup>, 高愈辉<sup>3</sup>, 田巧焕<sup>4</sup>

(1. 天津滨海新区轨道交通投资发展有限公司, 天津 300450; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300050;

3. 天津大学国际工程师学院, 天津 300072; 4. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300072)

**摘要:** 滨海新区新建地铁 Z2 线运行最高时速可达 120 km, 大于城市中运行的普通地铁列车时速 (60~80 km), 高速地铁荷载相较于普通列车荷载有着频率高、幅值大的特点, 所造成的环境振动也有所不同。本研究以天津市 Z2 地铁线一期工程作为实例, 依托实际工程数据, 利用大型通用有限元软件 ABAQUS, 建立轨道-隧道-地基-建筑物三维有限元模型, 并结合 ABAQUS 自带子程序 DLOAD 模拟移动荷载, 利用动力隐式分析针对天津滨海新区饱和软土地带快速地铁运营对沿线构建物的振动影响进行分析。并且对比 3 种基础形式-桩基础、筏板基础与条形基础的建筑结构在不同列车速度和隧道埋深工况下的振动反应规律。研究结论可为今后地铁工程沿线振动预测和评估提供指导。

**关键词:** 高速地铁; 环境振动; 结构振动; 移动荷载; 有限元分析; 动力响应; 基础形式

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S2-0177-04

**作者简介:** 马晓磊(1984—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事市政工程专业工作. E-mail: 411294895@qq.com。

## Vibration effect of metro operation on buildings along Tianjin Binhai New Area in soft soil areas

MA Xiao-lei<sup>1</sup>, BA Zhen-ning<sup>2</sup>, GAO Yu-hui<sup>3</sup>, TIAN Qiao-huan<sup>4</sup>

(1. Tianjin Binhai New Area Rail Transit Investment Development Corporation, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coastal Structures in Civil Engineering and Safety of Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin International Engineering Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 4. China Railway Design Corporation Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The maximum running speed of the newly built Z2 metro line in Tianjin Binhai New Area can reach 120 km/h, which is higher than that of the ordinary metro train running in the cities (about 60~80 km/h). Compared with the ordinary train load, the load of high-speed metro has the characteristics of high frequency and large amplitude, and the environmental vibration caused by it is also different. Taking the first phase of Tianjin Z2 metro line project as an example and based on the actual engineering data, by using the large-scale general finite element software ABAQUS, the three-dimensional finite element model for rail track-tunnel-foundation-building is established, and the moving loads are simulated with ABAQUS self-contained subroutine DLOAD. The influences of rapid metro operation in Tianjin Binhai New Area in soft soil areas on the vibration of buildings along the line are analyzed using the dynamic implicit analysis. At the same time, the vibration response laws of three kinds of foundation structures of pile foundation, raft foundation and strip foundation under different train speeds and tunnel buried depth conditions are compared. The conclusions can provide guidance for the prediction and evaluation of vibration along metro lines in the future.

**Key words:** high-speed metro; environmental vibration; structural vibration; moving load; finite element analysis; dynamic response; foundation form

## 0 引言

随着社会发展, 城市生活水平提高, 地铁建设在各大城市中如火如荼的进行。轨道交通在飞速发展的同时, 也带给社会带来了环境安全问题。目前, 地铁引起的环境振动已经愈来愈引起关注, 众多学者对地铁列车振动传播规律、产生机理及振动荷载进行了研究。Nelson 等<sup>[1]</sup>指出结构响应是由地面传至结

构的振动及振动在建筑物内的传播引起的。Dawn 等<sup>[2]</sup>的研究表明: 当车辆行驶较快时将会产生地表冲击波, 继而对建筑物产生破坏。中国目前虽然正处于建设地铁的发展阶段, 但从实测研究到数值分析再到理论研究, 均取得了初步成果: 王星星<sup>[3]</sup>通过对北京现运营

收稿日期: 2019-04-29

\*通讯作者 (E-mail: bazhenning\_001@163.com)

地铁进行环境振动测试调查，并对地铁振动所产生的沿线环境影响进行了研究；潘昌实等<sup>[4]</sup>的研究表明列车引起的地面水平方向振动在传导过程中的衰减要快于垂直方向的振动，沿线建筑物内垂直方向的振动将大于水平方向的振动。虽国内外对于地铁振动影响的研究已取得了一定的成果。但对于高速地铁运营（速度大于 100 km/h）造成的环境振动和对于不同基础类型建筑物对高速地铁运营的动力响应研究还较少。天津滨海新区 Z2 线为新型地铁线路，有着列车运行速度快、频次高等特点，其最高列车运行速度可达 120 km/h，对地铁列车振动响应的研究具有非常重要的现实意义。研究结论可为今后地铁工程沿线振动预测和评估提供指导。

1 有限元计算模型

1.1 土层有限元模型

研究采用大型通用有限元软件 ABAQUS 建模分析，利用 Drucker-Prager 弹塑性本构模型模拟滨海饱和软土，具体材料参数取自滨海新区 Z2 线现场勘探钻孔数据（见表 1），土层材料阻尼比取 0.02。本研究采取土层模型建立尺寸为 55 m（垂向深度）×120 m（轴向长度）×220 m（水平宽度），较好地降低了边界效应<sup>[5]</sup>。网格尺寸根据模型位置距盾构隧道的距离由近到远逐渐由 0.8 m 放大至 2.5 m，单元类型选择较为常用的 C3D8R 单元具体网格划分如图 1。模型采取三维黏弹性边界以模拟土体的无限域。

表 1 滨海 Z2 线土层计算参数

Table 1 Parameters of soil layers in Z2 line in Tianjin Binhai New Area

土类	厚度 /m	剪切波速 /(m·s <sup>-1</sup> )	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比
素填土	5.2	111	1920	0.427
粉质黏土	5.3	127	1920	0.427
粉质黏土	2.2	146	2030	0.406
粉土	6.6	159	1990	0.414
粉质黏土	6.6	216	1970	0.417
粉质黏土	3.3	240	2000	0.412
粉砂	4.2	333	2040	0.404
粉细砂	5.6	359	1990	0.414
粉土	3.0	348	1990	0.414
粉质黏土	3.2	370	2020	0.408

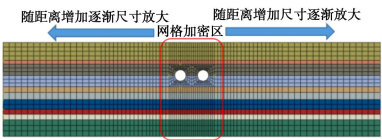
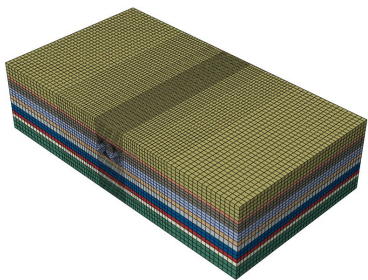


图 1 土层有限元模型

Fig. 1 Finite element model for soil layers

1.2 隧道-轨道有限元模型

因研究的是土体振动响应，盾构隧道管片间的相互作用可进行简化忽略，故隧道采取一体化实体建模。隧道横断面根据实际滨海新区 Z2 线管片实际情况采取内径 5.9 m，外径 6.6 m。铁轨采用 B31 梁单元建模，并采取 T60 型钢轨参数。道床、轨枕均采用实体单元建模，整体道床-轨枕-轨道耦合模型如图 2 所示。

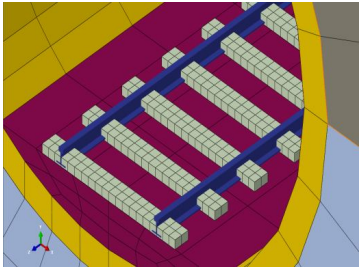


图 2 道床-轨枕-铁轨耦合有限元模型

Fig. 2 Coupled finite element model for ballast bed-rail tracks

1.3 基础结构建模

各类建筑物的有限元模型建立过程如图 3~5 所示，其中桩、梁和柱均采用 B31 梁单元建模，楼板、桩板和砌体墙采用 SEHELL 壳单元建模，建模过程如图。

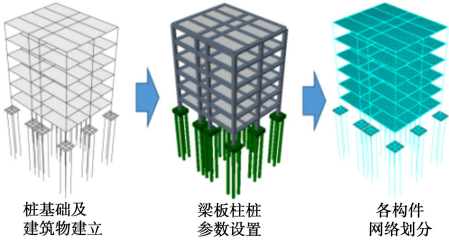


图 3 桩基础框架结构有限元模型

Fig. 3 Finite element model for pile foundation structures

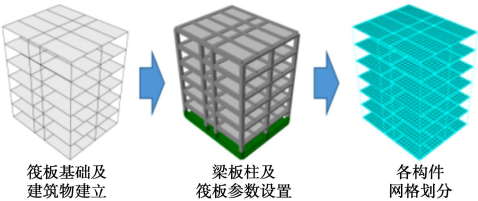


图 4 筏板基础框架结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model for raft foundation structures

1.4 移动荷载模拟

建模所施加的列车荷载采取激振力函数法模拟，表达式为<sup>[6-7]</sup>

$$F(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) + A_3 \sin(\omega_3 t) \quad (1)$$

此种荷载取值方法表达式与车辆振动性质、线路平顺性或路况、车速、荷载组合与传递关系密切,能在一定程度上模拟车辆荷载。根据研究结果显示<sup>[8]</sup>,列车由 4 节增加到 10 节,对地表造成的振动响应几乎没有区别,故考虑车辆系统 4 节车体。同时利用 ABAQUS 自带子程序 DLOAD 模拟列车荷载在隧道中的移动效果。

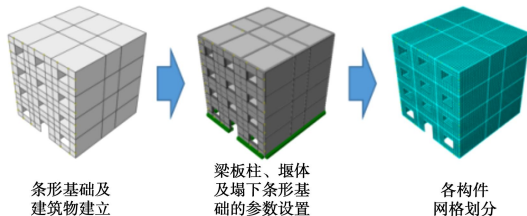


图 5 条形基础框架结构有限元模型

Fig. 5 Finite element model for strip foundation structures

## 2 地铁运营对不同基础类型建筑物的振动影响分析

为研究沿线不同基础形式在地铁运营下的振动响应规律,建立 3 种基础形式下的隧道-土层-建筑物三维有限元模型进行模拟计算。基础结构建立位置在距离外轨中心线 30 m 处。

### 2.1 桩基础结构振动响应规律

分别计算分析埋深保持不变(16 m)的前提下,80, 100, 120 km/h 列车运营速度下的沿线桩基建筑的垂向振动响应。提取建筑物每层楼板的垂向振动数据整理成图像如图 6 所示。

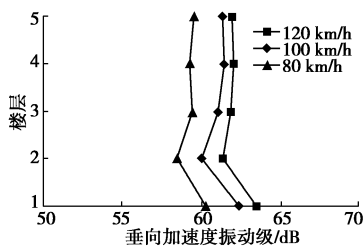


图 6 不同列车速度对桩基建筑的振动影响

Fig. 6 Vibration effects of different train speeds on buildings of pile foundation

再计算列车速度保持不变的前提下,隧道埋深为 8, 12, 16, 20 m 四种情况下的沿线桩基础建筑物的振动响应。同样提取建筑物每层楼板上垂向加速度振动数据整理成图像如图 7 所示。

由图 6, 7 可以看出,对于桩基础框架结构建筑物,首层楼板的垂向振动强度最大,并且随着楼层的增加,振动强度先减小后略微增加,最后维持稳定。由图 6 可以看出,随着列车速度的增加,建筑物的振动响应增大,且由 80 km/h 增加到 100 km/h 的振动增幅(约 2.5 dB)大于 100 km/h 增加到 120 km/h 的振动增幅(约 1.5 dB)。由图 7 可知,改变隧道埋深对桩基础建筑物

振动有一定程度的影响,埋深每增加 4 m,建筑振动强度减小 2~4 dB。

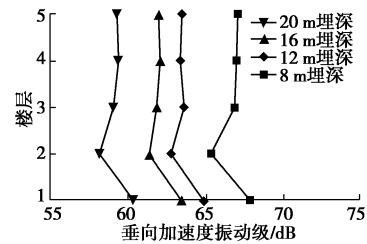


图 7 不同隧道埋深对桩基建筑的振动影响

Fig. 7 Vibration effects of different tunnel depth on buildings of pile foundation

### 2.2 筏板基础结构振动响应规律

计算工况同以上桩基础,同样提取不同速度、不同隧道埋深工况下筏板建筑物每层楼板的垂向振动数据整理成图像如图 8, 9 所示。

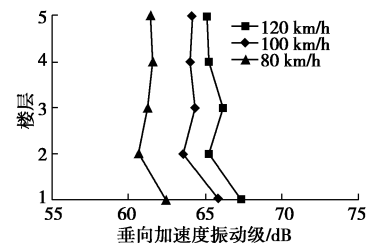


图 8 不同列车速度对筏板基础建筑的振动影响

Fig. 8 Vibration effects of different train speeds on buildings of raft foundation

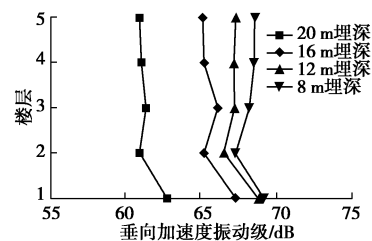


图 9 不同隧道埋深对筏板基础建筑的振动影响

Fig. 9 Vibration effects of different tunnel depths on buildings of raft foundation

由图 8, 9 可以看出,对于筏板基础框架结构建筑物,垂向振动强度随楼层的变化规律与桩基础结构大致相同。由图 8 可以看出,随着列车速度的增加,建筑物的振动响应也相应增大,且由 80 km/h 增加到 100 km/h 的振动增幅(约 3 dB)大于 100 km/h 增加到 120 km/h 的振动增幅(约 1 dB)。如图 9 可知,改变隧道埋深对筏板基础建筑物振动有一定程度的影响,埋深每增加 4 m,建筑振动强度减小 2~4 dB 左右。

### 2.3 条形基础结构振动响应规律

计算工况同桩基础,计算结果如图 10, 11 所示。由图 10 可以看出,对于条形基础砌体结构建筑物,同样首层的楼面垂向振动强度最大,但随楼层增

加变化较小。随着列车速度的增加,条形基础建筑物的振动响应也相应增大,且由车速 80 km/h 增加到 100 km/h (约 3 dB) 的振动强度增加稍大于车速由 100 km/h 增加到 120 km/h 的震动强度增加大致相同 (约 2.5 dB)。由图 11 可知,改变隧道埋深对桩基础建筑物的振动影响较大,埋深每增加 4 m,建筑振动强度减小 1~3 dB。

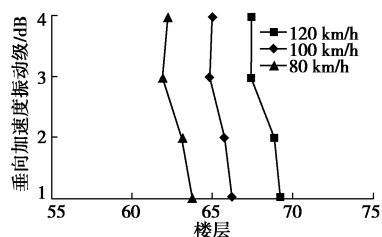


图 10 不同列车速度对条形基建筑的振动影响

Fig. 10 Vibration effects of different train speeds on buildings of strip foundation

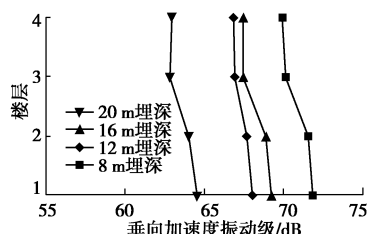


图 11 不同隧道埋深对条形基建筑的振动影响

Fig. 11 Vibration effects of different tunnel depths on buildings of strip foundation

同时通过类比可以看出,在距轨道线距离相同的位置下,首层楼面垂向振动强度:桩基础<筏板基础<条形基础,说明桩基础对振动的削弱效果较好;而条形基础对振动的削弱效果较差。

### 3 结 论

本研究主要通过对滨海新区地铁运营对沿线不同基础形式的构建筑物的振动影响进行三维有限元建模分析,得到了以下 3 点结论。

(1)隧道埋深对于建筑的振动强度影响较大:随着埋深的增加,建筑物的基础和结构的振动响应减小,且每增加 4 m,桩基础、筏板基础结构垂向振动级减小 2~4 dB,条形基础结构垂向振动级减小 1~3 dB。

(2)列车速度同样对沿线建筑物振动强度有着一定的影响:随着列车速度增加,3 种基础形式的建筑物结构振动响应增加,但增幅随着速度的提高逐渐减小。

(3)不同的基础形式均对大地传来的振动有一定的削弱效果,但削弱效果不同:桩基础的削弱效果最好,筏板基础其次,条形基础最差。分析其原因为基础形式较好,对地铁引起的振动有较大的衰减;而条形基础基础形式相较于其他两者较差,故隔振性能较差。

### 参考文献:

- [1] NELSON J T, SAURENMAN H J. State of the art review: prediction and control of ground borne noise and vibration from rail transit trains. Dept of Transp UMTA-MA-06-0049-83-4, 1983.
- [2] DAWN T M, STANWORTH C G. Ground vibrations from passing trains[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 66(3): 355 - 359.
- [3] 王星星. 地铁振动对沿线环境影响的预测[J]. 噪声与振动控制, 1993(5): 22 - 24. (WANG Xing-xing. Prediction of the environmental impact of metro vibration along the line[J]. Noise and Vibration Control, 1993(5): 22 - 24. (in Chinese))
- [4] 潘昌实, 刘维宁. 隧道列车振动试验与动态分析[J]. 兰州铁道学院学报, 1985, 4(2): 1 - 21. (PAN Chang-shi, LIU Wei-ning. Vibration test and dynamic analysis of tunnel trains[J]. Journal of Lanzhou Railway University, 1985, 4(2): 1 - 21. (in Chinese))
- [5] 周立. 地体列车运行诱发环境振动的数值模拟与烦恼率评价[D]. 南京: 南京大学, 2015. (ZHOU Li. Numerical simulation and annoyance rate evaluation of environmental vibration induced by terrain train operation[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. (in Chinese))
- [6] 梁波, 蔡英. 不平顺条件下高速铁路路基的动力分析[J]. 铁道学报, 1999, 21(2): 84 - 88. (LIANG Bo, CAI Ying. Dynamic analysis of high-speed railway subgrade under irregular conditions[J]. Journal of Railway, 1999, 21(2): 84 - 88. (in Chinese))
- [7] 胡宗允, 李晶晶. 地铁列车荷载分析方法[J]. 路基工程, 2006(5): 18 - 20. (HU Zong-yun, LI Jing-jing. Metro train load analysis method[J]. Subgrade Engineering, 2006(5): 18 - 20. (in Chinese))
- [8] YANG Y B, HUNG H H, HONG X. Wave propagation for train-induced vibrations: a finite /infinite element approach[M]. Singapore: World Scientific Publishing 2009: 91 - 92.

(责编: 孙振远)