

DOI: 10.11779/CJGE2019S1049

天津 Z2 线地铁运营对沿线地面振动的影响分析

刘一文¹, 巴振宁², 高愈辉³, 田巧焕³

(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: 天津滨海新区 Z2 线为新型地铁线路, 有着列车运行速度快、发车频次高等特点, 其地铁运营时速最高可达 120 km, 而中国现阶段城市中运行的普通地铁列车时速一般在 60~80 km。高速地铁荷载与普通列车荷载相比, 有着频率高、幅值大的特点, 所造成的环境振动规律也有所不同。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 建立隧道-土层三维有限元模型, 采用动力隐式分析模拟地基土高速移动地铁列车荷载下的地表振动强度衰减规律, 比较不同盾构隧道埋深、不同地铁列车行车速度以及不同隧道上覆土层性质工况下的地表振动变化规律, 并结合相关城市环境振动评估标准, 对地铁造成的环境振动进行评价, 初步得到了地铁线路环境振动防护距离随以上三种因素的变化规律。研究结论可为今后高速地铁线路工程建设选线以及运营沿线振动预测、地铁沿线规划提供一定指导。

关键词: 地铁振动; 环境振动; 移动荷载; 有限元模拟; 防护距离

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0193-04

作者简介: 刘一文(1978—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事建筑工程专业工作。E-mail: 845145711@qq.com。

Influences of metro operation on ground vibration along Tianjin Z2 line

LIU Yi-wen¹, BA Zhen-ning², GAO Yu-hui³, TIAN Qiao-huan⁴

(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 Z2 metro line in Tianjin Binhai New Area is a new type of metro line. It has the characteristics of fast train operation and high frequency of departure. Its maximum speed of metro operation can reach 120 km per hour. At present, the speed of ordinary metro trains running in cities in China is generally 60~80 km per hour. Compared with the ordinary train load, the load of high-speed metro train has the characteristics of high frequency and large amplitude, and the pattern of environmental vibration is also different. Taking the first phase of Tianjin Z2 metro line as an example, and relying on the actual engineering data, a three-dimensional finite element model for rail track-tunnel-soil is established by using ABAQUS, a large-scale general finite element software. The dynamic implicit analysis is used to simulate the attenuation pattern of ground vibration intensity under the load of high-speed moving subway train in foundation soil, and different shield tunnels are compared. The variation of ground vibration under different conditions of road burial depth, train speed and soil properties of tunnels is studied. Combined with the relevant evaluation criteria for urban environmental vibration, the environmental vibration caused by metro is evaluated. The variation of environmental vibration protection distance of metro lines with the above three factors is preliminarily obtained. The research conclusions can provide some guidance for the selection of high-speed metro line construction, vibration prediction along the operation line and planning along the metro line in the future.

Key words: metro vibration; environmental vibration; moving load; finite element simulation; protection distance

0 引言

近年来,随着我国工业不断发展,城市现代化建设也进展基快,城市规模不断扩大、人口持续增加,大城市道路交通条件逐渐恶化。城市地下轨道交通作为一种及运量大、速度快、能耗少、易管理等优点为

一身的出行方式,在解决城市交通问题中具有特殊的地位和作用。但是由于城市的建设需要,地下轨道交

收稿日期: 2019-04-29

*通讯作者 (E-mail: bazhenning_001@163.com)

通往距离居民生活工作区很近，地铁运营引起的环境振动问题也日益显现出来针对地铁造成的环境振动问题，国内外学者在理论研究和数值模拟方法领域做了大量的工作。在国外，Verhas^[1]、Kurzweil 等^[2]探讨了地面运行的列车或地铁诱发振动的传播规律；Degrande 等^[3]提出了土中波传播的数值计算方法；在国内，王星星^[4]通过对北京现运营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。崔正翔等^[5]则根据经验公式对南京地铁隧道振动对地面环境影响进行了预测。可见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（速度高于 100 km/h）造成的环境振动还较少。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，其研究成果可以直接指导地铁线路设计。



图 1 天津市 Z2 线一期工程示意图
Fig. 1 Sketch of Phase I Project of Tianjin Z2 Line

1 有限元计算模型

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。结合有限元建模精度需要和研究地表振动相应的范围，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），水平方向上模型长度大于 15D（D=6.6 m），较好地降低了边界效应^[6]，振动模拟较为稳定。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 2。模型采取三维黏弹性边界模拟土体的无限域。

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	密度 /(kg·m ⁻³)	泊松比	动弹性模量 /MPa
素填土	5.2	1920	0.427	67.5
粉质黏土	5.3	1920	0.427	88.7
粉质黏土	2.2	2030	0.406	120.8
粉土	6.6	1990	0.414	142.2
粉质黏土	6.6	1970	0.417	259.7
粉质黏土	3.3	2000	0.412	325.2
粉砂	4.2	2040	0.404	635.1
粉细砂	5.6	1990	0.414	723.0
粉土	3.0	1990	0.414	681.3
粉质黏土	3.2	2020	0.408	778.5

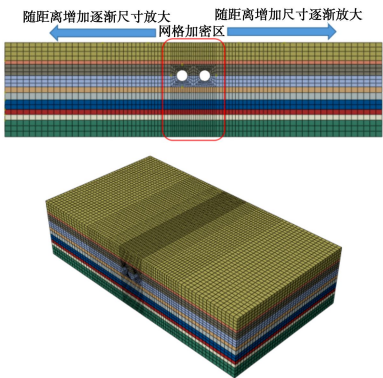


图 2 土层有限元模型及网格划分示意图

Fig. 2 Finite element model for soil layers and mesh partition

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 3 所示。

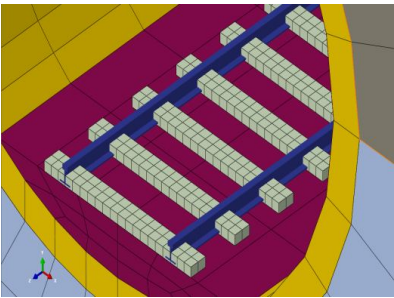


图 3 道床-轨枕-铁轨耦合有限元模型

Fig. 3 Coupled finite element model for ballast bed-rail tracks

建模所施加的列车荷载采取激振力函数法模拟，即采用一个静荷载和一系列正弦荷载叠加而成的动荷载^[7]。此种荷载取值方法表达式虽然简单，但它与车辆振动性质、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，被广

泛运用于列车荷载模拟中。根据 Yang 等^[8]的研究结果, 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。为了能全面地反映出列车从驶来到驶离的全过程, 故考虑车辆系统 4 节车体。列车车型参数选取典型地铁 A 型车。为模拟列车荷载在隧道中的移动作用, 利用 ABAQUS 自带子程序 DLOAD, 编程输入轮载大小、位置随时间的周期性变化, 并输入轮载作用点的移动速度。在提交模型计算是调用 DLOAD 程序即可实现荷载移动施加。

2 计算结果及分析

为研究不同因素对地表振动强度和振动防护距离的影响, 在确定一部分工况的情况下, 通过改变其中一项影响因素来研究此因素对于环境振动规律的影响。在综合考虑工程应用领域和研究需要后, 本文采取中国国标《城市区域环境振动标准》(GB10070—88) 作为评价指标, 并将评价区域分为工商业区、居民区和振动敏感区。根据标准, 本研究采取的评估值为垂向地表振动加速度级并结合不同区域类型的控制振动级 (表 2) 做达标水平线以截取相应振动防护距离。具体研究内容如下:

表 2 各类型区域的控制达标振动强度

区域类型	达标振动级/dB	
	白天	夜间
工商业区	75	72
居民区	70	67
振动敏感区 (如医院、精密仪器实验室等)	65	65

2.1 列车运行速度对地表振动的影响

为研究不同列车行驶速度对地表振动以及振动防护距离的影响, 并模拟滨海新区地铁 Z2 线各种行驶速度下的地表振动反应。在确定隧道埋深及原钻孔土层参数的情况下, 分别施加不同移动速度的列车荷载, 80, 100, 120 km/h (通过修改 DLOAD 中荷载速度参数实现), 提交 ABAQUS 进行计算, 采取 ABAQUS 动力隐式分析步, 分析步长 $\Delta t=0.01$ s。在距离外轨中心线 0~100 m 处每隔 10 m 提取振动数据进行地表振动衰减分析并作衰减曲线如图 4 所示。

计算结果显示, 车速对于环境振动强度有着较大的影响。在相同的埋深 (16 m) 状况下, 地表垂向最大振动级出现在隧道正上方, 并且随距线路中心距离的增加, 振动强度稳定减小; 列车车速每提升 20 km/h, 地表振动强度增加 3~5 dB。振动防护距离增加 5~20 m, 120 km/h 车速工况下, 振动敏感区的振动防护距离达到 50 m 以上, 而在 80 km/h 工况下只有 30 m 左右。所以对于振动防护距离来说, 降低车速可有效减

小环境振动强度, 并且减小振动防护距离, 对于城市规划的灵活性影响较小。

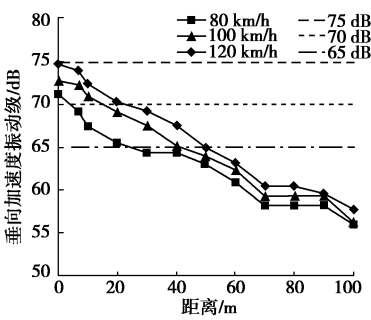


图 4 不同列车速度下地表振动强度衰减对比

Fig. 4 Comparison of ground vibration intensity attenuations under different train speeds

2.2 盾构隧道埋深对地表振动的影响

为研究隧道埋深对地表振动衰减的影响。在不改变土层的情况下, 改变盾构隧道的埋深, 分别建立深度 $H=8, 12, 16, 20$ m 的隧道埋深工况进行分析, 在列车以相同速度 120 km/h 经过的情况下, 对地表振动进行评价。

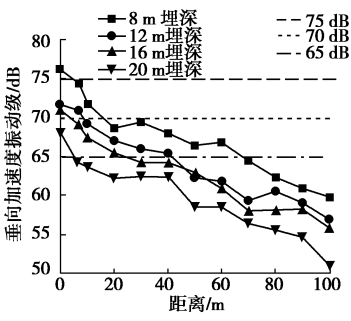


图 5 不同隧道埋深下地表振动强度衰减对比

Fig. 5 Comparison of ground vibration intensity attenuations under different tunnel depths

根据上述建模计算和数据结果整理, 并作距离-振动强度衰减曲线 (图 5)。可得隧道埋深对振动防护距离影响较大: 埋深每增加 4 m, 地表振动强度减小 3~5 dB, 振动防护距离减小 1/2~1/4 左右, 当经过振动敏感区时, 若埋深过浅且不进行减振或降低车速等措施, 可能造成振动防护距离值过大: 8 m 埋深下, 敏感区防护距离可达 60 m。在进行特定区域的隧道埋深和线路选择确定时可作为参考因素。

2.3 上覆土层性质对地表振动的影响

为研究不同上覆土层形式对地表振动的影响, 在确定隧道埋深和列车运行速度的前提情况下, 改变隧道上覆土层的弹性模量以对比研究土层性质对地表振动的影响 (改变参数见表 3)。分别建立原上覆土层、软上覆土层和硬上覆土层模型, 设定 DLOAD 子程序使列车荷载以 120 km/h 的速度经过隧道, 对地表振动

进行评价。

表 3 上覆土层参数改变

Table 3 Change parameters of in overlying soil		
上覆土层性质	土层剪切波速 /(m·s ⁻¹)	土层动弹性模量 /MPa
原土层	120	85.1
软土层	100	63.1
硬土层	200	225.8

计算结果如图 6 所示，从图中可以看出，上覆土层弹性模量的改变对于沿线地表振动的有一定的影响，但相比于埋深和车速因素而言较小，软土层和硬土层的振动强度插值在 2~4 dB，推测原因为软土层对于地铁高频振动能量的吸收效果较好。

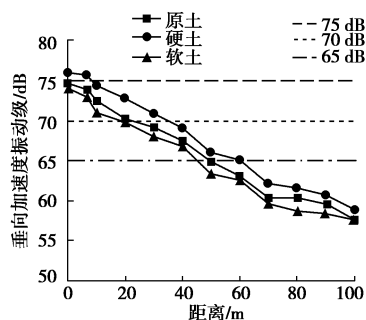


图 6 不同性质上覆土层下地表振动强度衰减对比

Fig. 6 Comparison of ground vibration intensity attenuations under different overlying soils

3 结 论

本文通过三维有限元建模分析研究了天津滨海新区在建地铁 Z2 线沿线地表的振动响应，主要得到以下 2 点结论。

(1)列车行驶速度对于环境振动强度有着较大的影响，在相同的埋深状况下，车速每提升 20 km/h，地表振动强度增加 3~5 dB。车速对于振动防护距离有着较大的影响：车速每提升 20 km/h，振动防护距离增加 5~20 m。当经过居民区或振动敏感区时，降低车速可有效减小环境振动强度，并且减小振动防护距离。故进行线路规划时可将列车运行速度作为参考因素之一。

(2)隧道埋深对振动防护距离影响较大：埋深每增加 4 m，振动防护距离减小 1/2~1/4 左右，当经过振动敏感区时，若埋深过浅且不进行减振或降低车速

等措施，可能造成振动防护距离值过大，在进行特定区域的隧道埋深确定和线路选择时可做为参考因素。

参考文献：

[1] VERHAS H P. Prediction of the propagation of train-induced ground vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 66(3): 371 - 376.

[2] KURZWEIL L. Ground-Borne noise and vibration from underground system[J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 66(3): 363 - 370.

[3] DEGRANDE G, SEHILLEMANS M, CHATTERJEE P, et al. Vibrations due to test train at variable speeds in a deep bored tunnel embedded in London clay[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293(3/4/5): 626 - 44.

[4] 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))

[5] 崔正翔, 嵇正毓. 地铁隧道振动对地面环境影响预测的探讨. 噪声与振动控制, 1996(1): 9 - 14. (CUI Zhen-huan, JI Zheng-yu. Discussion on the prediction of ground environmental impact caused by metro tunnel Vibration[J]. Noise and Vibration Control, 1996(1): 9 - 14. (in Chinese))

[6] 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))

[7] 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))

[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)