

文章编号:1006-1355(2017)05-0136-06

基于动态子结构法探讨地铁列车运行 引起建筑物的振动

冯青松¹, 王子玉¹, 张翊翔²

(1. 华东交通大学 铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 南昌 330013;
2. 天津市地下铁道运营有限公司, 天津 300041)

摘要:运用动态子结构固定界面模态综合法,结合Ansys有限元分析软件建立隧道-土层-建筑物系统动力学分析模型,通过与有限元整体建模分析法进行比较,验证了动态子结构法的准确性,对比分析系统的振动特性,分析隧道埋深、桩基深度对建筑物振动的影响。分析结果表明:隧道上方的建筑物桩基不利于建筑物减振,增加隧道埋深、增加隧道与建筑物桩尖的距离,可以有效降低建筑物振动。固定界面模态综合法具有较高的精度,计算效率高,在地铁列车引起建筑物振动分析中具有较好的适用性。

关键词:振动与波;固定界面模态综合法;建筑物振动;动态子结构

中图分类号:TB533⁺.2

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2017.05.029

Application for Dynamic Sub-structuring Method in the Analysis of Building Vibration Caused by Metro Train

FENG Qing-song¹, WANG Zi-yu¹, ZHANG Yi-xiang²

(1. Education Ministry Engineering Research Center for
Railway Environmental Vibration and Noise, East China Jiaotong University,
Nanchang 330013, China;
2. Tianjin Underground Railway Operation Co. Ltd., Tianjin 300041, China)

Abstract: A dynamic model for the tunnel-ground-building coupling system is established by using the fixed-interface component mode synthesis, a dynamic substructure method, combining with the Ansys software. The accuracy of the dynamic substructure method is validated and the vibration characteristic of the coupling system is analyzed by comparing with the whole finite element analysis model. Influences of the tunnel buried depth and the depth of pile foundation on the building vibration are investigated. The computation show that the building pile foundation at the top of the tunnel is not conducive to reduce the building vibration, and increasing the tunnel buried depth and increasing the spacing between the tunnel and the pile tip can effectively reduce the vibration of the building. The fixed interface modal synthesis method has high precision and calculation efficiency, is suitable to analyze the building vibration caused by metro train.

Key words: vibration and wave; fixed-interface component mode synthesis; building vibration; finite element

结构振动通过地层向外传播,进而诱发临近建筑物振动并辐射低频结构噪声(统称为环境振动)。环境振动问题受到了各国研究人员的高度重视,成为当今轨道交通研究领域的一个热点问题^[1]。分析地铁列车运行引起的建筑物振动需考虑隧道与土层,土层与建筑物结构之间的耦合作用,目前一般都

采用有限元法建立隧道-土层-建筑物为一体的整体模型^[2-5]。有限元整体建模分析法计算功能强大,能模拟各种隧道、土层、建筑结构的复杂工况,但也存在一些还未很好解决的难点。为了模拟土层与建筑结构的相互作用,土层与建筑物单元网格划分需很细,模型离散区域需很大、且需引入人工边界条件,常导致模型单元数量非常庞大,自由度数万乃至上百万,计算成本很高。动态子结构法是缩减自由度、提高计算效率的一种有效方法,其基本思想是“先修改后复原”,即将整体结构划分为多个子结构,再对各子结构通过坐标变换进行自由度缩减,综合缩减后的各个子结构以形成整体系统的运动方程,最终

收稿日期:2017-01-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51368020,51008123);
江西省青年科学家培养对象(20112BCB23015)

作者简介:冯青松(1978—),男,山西省榆社县人,博士,教授,从事铁路环境振动与噪声研究。

E-mail: fqshdjtdx@aliyun.com

对降阶的运动方程进行求解,进而获得原结构体系的动态响应^[6]。

动态子结构法常用于建筑结构的抗震分析,其在地铁列车引起建筑物振动分析中的研究还甚少。地铁环境振动与地震引起的建筑物振动有一些明显区别:建筑物抗震分析一般考虑 10 Hz 以下低频振动,且需考虑结构的非线性特性;而地铁环境振动分析频率很宽,一般需达到 100 Hz。这样在建筑抗震分析中常用的动态子结构法在地铁列车引起的建筑物振动分析中是否适用,其准确度和计算效率如何,值得进行深入探讨。在各类动态子结构模态综合法中,由于固定界面模态综合法概念清晰,易于理解,不会出现刚体位移和零频率^[7],因此常被采用。本文采用固定界面模态综合法(简称 CMS 法),借助 Ansys 商用软件分析地铁列车引起的建筑物振动问题,并与整体有限元法(简称 FEM 法)进行对比分析,探讨了动态子结构法在地铁环境振动分析中的适用性,并分析了建筑物桩基础、隧道埋深对建筑物振动的影响。

1 Ansys 子结构法分析流程

固定界面模态综合法基本理论由 Hurty 于 1964 年正式提出^[8],1968 年 Craig 和 Bampton 改进了此方法,使之更加简明化和实用化^[9]。子结构分析过程在软件 Ansys 中分为 3 个步骤:生成部分、使用部分和扩展部分,如图 1 所示。

(1) 生成部分首先将有限元模型划分为合适的

子结构,然后通过定义主自由度将子结构的有限元单元凝聚为一个超单元。超单元与非超单元以及超单元与超单元的交界面上的节点被定义为主自由度,用以提取模型的动力特性。

(2) 使用部分是组装超单元形成整体结构模型。整个模型可以仅仅是一个超单元,也可以是超单元与非超单元的组装体。通过求解得到超单元的凝聚解和非超单元的完全解。

(3) 扩展部分是由超单元的凝聚解进行扩展计算得到整个超单元所有自由度的完整解。

2 隧道-地基-建筑物系统模态分析

分别采用 FEM 法、CMS 法建立隧道-土层-建筑物系统二维振动分析模型,采用 Block-Lanczos 算法对整个系统模型进行模态分析,分析整个系统的振动特性。

2.1 隧道-地基-建筑物整体有限元模型的建立

以南昌地铁下穿南昌市少年宫建筑物为研究对象,如图 2 所示。上部建筑物结构为 10 层 5 跨混凝土框架结构,层高 3.3 m,梁截面尺寸为 0.3 m×0.6 m,桩基、柱截面尺寸为 0.6 m×0.6 m,桩基为方桩。隧道、地基各土层考虑为均质线弹性体,考虑到建筑物沿隧道方向是多跨结构且体型很大,为简化分析,将隧道-地基-建筑物系统模型考虑为二维平面应变问题。模型结构共有四层土,沿两隧道中心线左右两侧各取 50 m。建筑物梁和柱采用平面 Beam3 单元模拟,隧道衬砌、隧道基础、土层及桩基均采用平

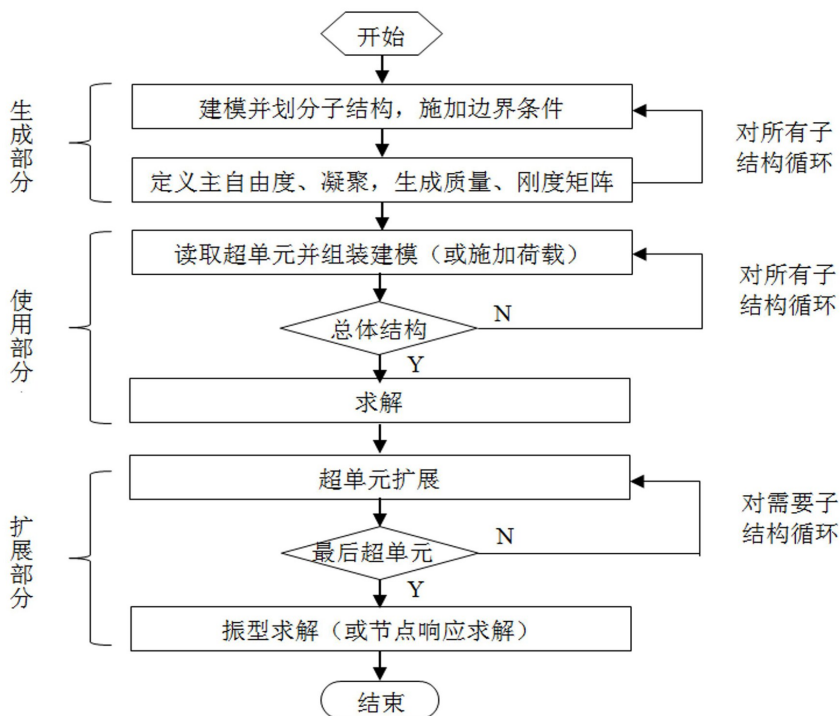


图 1 子结构分析流程图

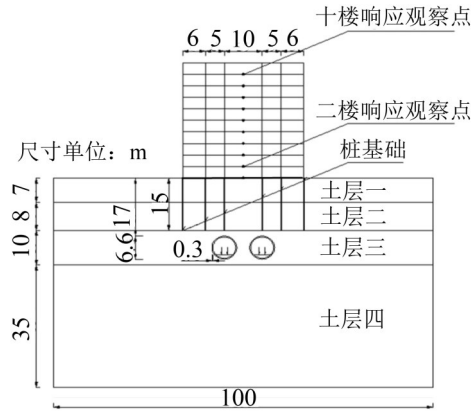


图2 隧道-地基-建筑物系统

面 Plane42 单元模拟。隧道有限元模型单元划分为 0.25 m~0.3 m,地基划分为 0.5 m~1 m 的单元网格。对模型左侧、右侧及底部的 X 方向和 Y 方向进行约束,并施加等效一致黏弹性边界^[10],其中黏弹性边界附加在非子结构上。模型中各部分的计算参数见表 1。

2.2 子结构划分及主模态截断

根据整体 FEM 模型在 Ansys 中通过网格删除,形成子结构模型,如图 3 所示。根据地基土的分层特性、桩土耦合接触面、结构刚度和质量的均一化为原则划分子结构。建筑物及其下方的隧道、土层和桩为子结构 1,子结构 2、3 为建筑物下方左右两侧土层,隧道下方土层为子结构 4,剩余结构 5 为非子结构。增加一非子结构主要为施加人工边界条件。子结构将凝聚为超单元,根据分析,人工边界条件不能施加在超单元上,否则自由度凝聚将导致边界条件施加错误。CMS 法通过仅保留子结构的低阶模态而舍去某些对结构响应贡献很小的高阶模态从而实现整体结构模态自由度的缩减降阶。一般而言,模态数目应能保证动态响应计算模态截断后的正确性,文献[11]推荐选取系统优势频率的 2~3 倍频率以内的子结构主模态。根据以往研究经验,建筑物振动关心频率在 80 Hz 以下。故基于动态子结构法

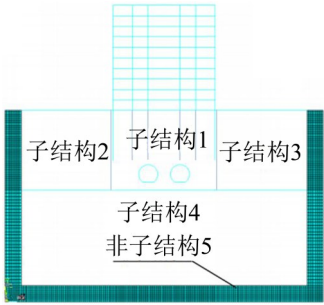


图3 系统子结构模型

的模态截断原理(即高阶模态在模态综合中对整体计算结果的贡献量微乎其微,故可缩减)以及所关心的分析频率,本模型基于以往经验及模型计算可控性来进行子结构划分,截取各子结构主模态数以及截取的最高阶模态对应的频率如表 2 所示。由表 2 可看出,与通常子结构分析中仅包括刚性结构时模态密度较低的情况不同,模型计算的低频模态密度比较高。这是由于子结构 1、2、3 中包括了柔性的土层一、二、三及其相互耦合,此外子结构 1 还包括了隧道土体耦合、桩土耦合,故模态密度比较高。这种现象在桩土耦合动力分析,地铁环境振动分析中是合理的。

2.3 系统自振频率和振型结果的分析

采用 CMS 法、FEM 法计算得出整体系统的自振频率,如表 3 所示。系统的前 8 阶振型图,如表 4 所示,其中左侧为 FEM 法得出的结果,右侧为 CMS 法得出的结果。

由表 3、表 4 可知,采用 CMS 法、FEM 法计算得到的整体系统自振频率和振型基本一致,两者间误差很小。需说明的是,由于振型存在归一化的问题,根据计算方法的不同,振型可能会相差任意纯量因子,两种计算方法得到的振型结果有时会出现振动方向左右的不同(如表 4 中第 2、6 阶振型),但是各阶振型的振动形式是相一致的。因此,采用固定界面模态综合法对土-建筑物动力耦合作用进行模态分析,具有很高的精度。

表 1 计算参数

介质	名称	厚度/ m	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模量/ Pa	剪切波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	边界等效刚度/ Pa	边界等效 阻尼
衬砌	混凝土	—	2 550	0.2	3.0×10^{10}	—	—	—
轨道基础	混凝土	—	2 550	0.2	3.0×10^{10}	—	—	—
梁、柱、桩	混凝土	—	2 500	0.2	3.0×10^{10}	—	—	—
土层一	杂填土	7	1 800	0.35	0.093×10^9	139	4.58×10^5	0.55
土层二	砾砂	8	2 000	0.30	0.45×10^9	294.3	2.30×10^6	0.25
土层三	中风化泥质粉砂岩	10	2 250	0.28	4.20×10^9	854.0	2.18×10^7	0.085
土层四	微风化泥质粉砂岩	35	2 300	0.25	6.71×10^9	1 086.6	3.57×10^7	0.066

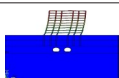
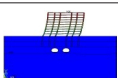
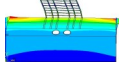
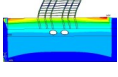
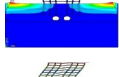
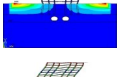
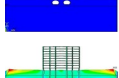
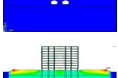

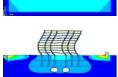

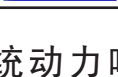
表2 子结构主模态截断及最高阶模态对应频率

子结构	主模态截断数	最高阶模态对应频率/Hz
1	367	79.947
2	299	79.903
3	299	79.903
4	48	78.649

表3 系统自振频率值/Hz

阶数	28	100	207	341	518	680
FEM	9.950 7	19.962	29.870	39.910	49.971	57.760
CMS	9.951 3	19.963	29.898	40.013	50.202	58.311
误差/(%)	0.006 0	0.005 0	0.093 7	0.285 1	0.462 3	0.953 9

表4 前6阶振型结果对比

振型	FEM法	CMS法
1		
2		
3		
4		
5		
6		

3 隧道-地基-建筑物系统动力响应分析

3.1 FEM法、CMS法对建筑物振动响应的对比分析

为了保证建筑物振动响应分析中阻尼比处在合理的范围内,取隧道-地基系统的阻尼系数为0.1,考虑模型的低频5 Hz及优势频率上限80 Hz作为 ω_1 和 ω_2 得到Rayleigh阻尼参数,其中 $\alpha=2.078\ 858$, $\beta=$

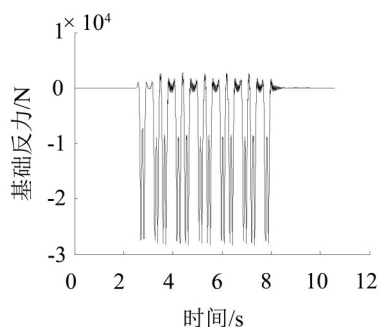
3.9×10^{-4} 。根据文献[12]中方法建立列车-轨道子模型,取列车运行速度为80 km/h,计算列车通过时作用在隧道基础上的力,如图4所示。将此作用力施加在上述隧道-地基-建筑物二维模型中,时间步长取为0.005 s,进行瞬态动力分析。

选择两隧道中心线上方建筑物各楼层的中跨跨中节点为动力响应观察点,见图2所示。图5、图6和图7为采用FEM法和CMS法计算得到2楼、10楼观察点的竖向加速度时程曲线、频谱曲线、1/3倍频程曲线。图8为各楼层中跨跨中节点Z振级曲线。

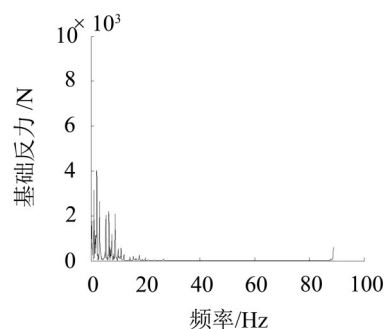
(1)由图5、图6、图7可看出:FEM法和CMS法计算得到2楼观察点和10楼观察点的竖向加速度时域响应和频谱曲线基本一致;在竖向加速度1/3倍频程曲线的高频段,两种计算方法有一定误差。由图8可知,各楼层观察点(中跨跨中节点)处的Z振级曲线走势一致,两种方法得到的Z振级差值在0.5 dB范围内。因此CMS法具有较高的计算精度。

(2)由图6可看出:本工程中建筑结构楼层加速度频谱主要分布在0~30 Hz范围内;不同楼层的振动优势频率稍有变化,但都在20 Hz范围内。

(3)由图5—图8可得出:随着楼层的逐渐增高,振动响应逐渐增大,最大值出现在顶层,顶层与底层的Z振级差值为2 dB~3 dB。



(a) 隧道基础反力时程曲线



(b) 隧道基础反力频谱曲线

图4 隧道基础反力的时程及频谱

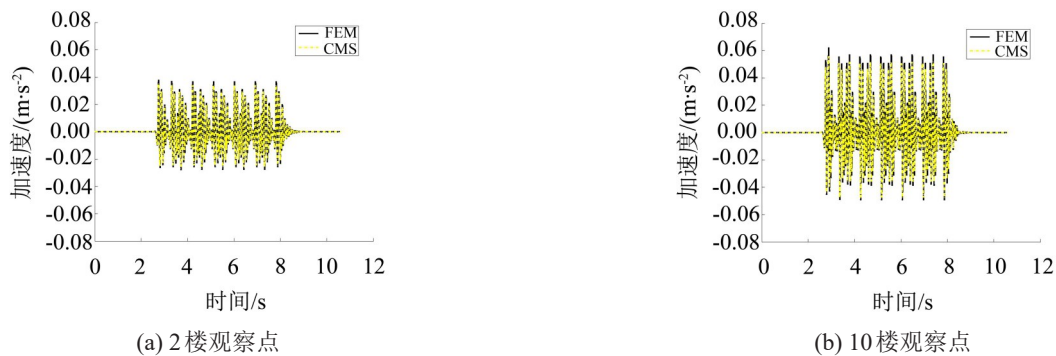


图5 竖向加速度时程曲线

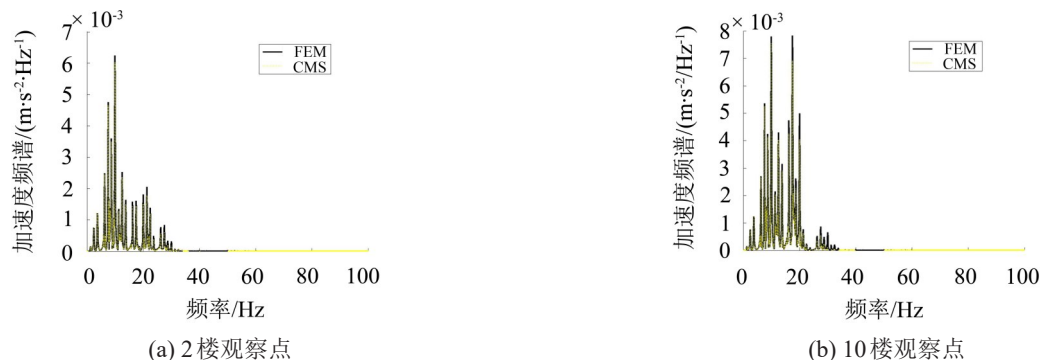


图6 竖向加速度频谱曲线

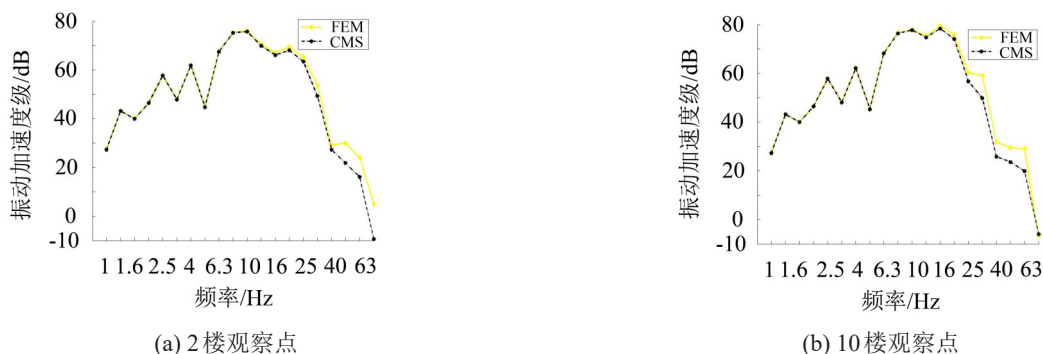


图7 竖向加速度1/3倍频程曲线

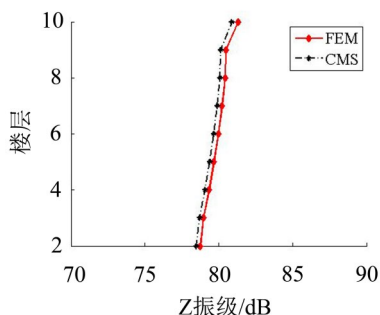


图8 各楼层Z振级曲线

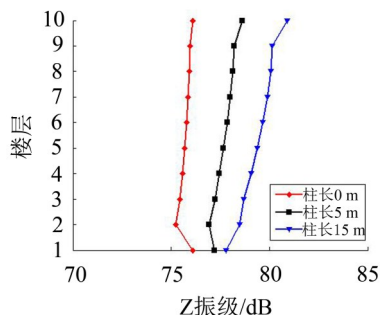


图9 不同桩长下各楼层Z振级曲线

3.2 桩基础对建筑物振动的影响分析

隧道位于建筑物正下方,隧道埋深17 m,考虑建筑物无桩基础(即桩长0 m)和桩长5 m、15 m三种状况下地铁列车运行对隧道上方建筑物振动的影响。计算得到建筑物各楼层中跨跨中节点Z振级曲线,见图9。

由图9可看出:与不考虑桩基础(即桩长0 m)相

比,桩长5 m时,各楼层Z振级增加约2 dB,桩长15 m时,各楼层Z振级增加约4 dB。可见,桩基础对建筑物振动具有放大趋势,而且桩基础越长建筑物振动响应越大。这是因为地铁隧道下穿桩基建筑物,随着桩长的增加,桩基越靠近于隧道顶端,此时隧道振动经过土层衰减后,以更短的距离传递给桩基,由桩基传递给建筑物各楼层,从而导致各楼层的振动

响应变大。桩基础缩短了地铁振动在土层的衰减距离,导致建筑物振动放大的现象,在地铁环境振动的预测评估和振动治理中需特别引起重视。在一般的地铁环评分析中^[13],只考虑隧道埋深到地面建筑物的距离,没有考虑桩基础的影响。因此在地铁上盖物业设计中,为了减小地铁列车运行诱发的振动,应该注意避免桩基础距离隧道顶端过近,或者选用其它的基础类型如筏板基础代替桩基。

3.3 隧道埋深影响因素分析

隧道位于建筑物正下方,桩长为实际工程中的15 m,考虑隧道埋深为17 m、22 m、27 m三种情况下地铁列车运行对隧道上方建筑物振动的影响,计算得到建筑物各楼层中跨跨中节点Z振级曲线,见图10。

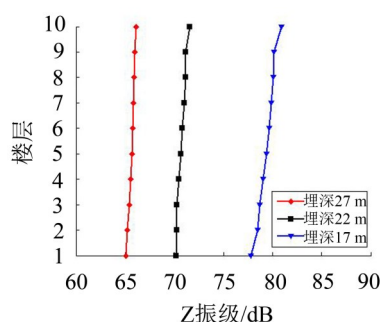


图10 不同埋深下楼层Z振级曲线

从图10可看出:隧道埋深越深,建筑物的振动响应越小,与实际隧道埋深17 m相比,隧道埋深22 m、27 m时Z振级分别减小了约5 dB、15 dB。这是因为隧道埋深增加,即振动波的传播衰减路径就会增加,这样对建筑物结构的振动影响就会减弱。但是,由于深埋隧道会导致工程量的显著增加,因此为节省投资,国内许多地铁线路常采用浅埋隧道,但浅埋隧道导致振动响应显著增大。因此在地铁线路设计时应综合考虑建设工程投资、环境振动影响分析,综合对比选择合适的隧道埋深。

4 结 语

以南昌市地铁下穿少年宫建筑物为研究对象,采用动态子结构法中的CMS法分析了地铁列车运行引起的建筑物振动,与有限元整体模型法对比分析,探讨了动态子结构法在地铁列车引起建筑物振动分析中的适用性。并通过子结构法分析了在其它因素作用下地铁列车运行引起建筑的振动规律。通过分析得出:

(1) CMS法可较好地应用于分析地铁列车引起的建筑物振动。采用合适的子结构划分和子结构主模态截断后,可以在模态分析、瞬态动力响应分析

中,保证CMS法的计算精度,且具有很高的计算效率。

(2) 随着楼层增高,地铁列车引起的建筑物各楼层振动水平逐渐增大,但差别不大。在地铁环境振动预测评估时,需特别重视建筑物桩基础的影响,需分析桩基础到隧道的有效距离,避免桩基础距离隧道壁过近。增加隧道埋深有利于建筑物减振,在地铁线路设计中,应综合考虑工程建设投资和地铁环境振动影响,选择合适的隧道埋深。

(3) 建立了隧道-地基-建筑物二维模型,下一步将建立详细的三维耦合模型,同时进行现场实测,进一步探讨动态子结构法在地铁环境振动三维分析方面的适用性及效率,进行详细的建筑物振动传递规律研究。

参考文献:

- [1] 夏禾. 交通环境振动工程[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [2] 马莉,宣言,马筠,等. 地铁隧道不同轨道结构形式对建筑物减振的仿真分析[J]. 铁道建筑,2011,(1):110-113.
- [3] 雷震宇,吴宪迎,袁明. 建筑物桩基对地铁隧道振动传播影响的有限元分析[J]. 城市轨道交通研究,2011,12:28-31.
- [4] 刘长卿,车驰东,吴庞. 地铁振动对地面建筑物影响的数值分析与测试[J]. 噪声与振动控制,2013,33(3):188-193.
- [5] 冯青松,雷小燕,伍明辉. 地铁运行列车引起建筑物低频振动的数值分析[J]. 铁道科学与工程学报,2007,10(4):68-72.
- [6] 楼梦麟. 结构动力分析的子结构方法[M]. 上海:同济大学出版社,1997.
- [7] 白建方. 复杂场地土层地震反应分析的并行有限元方法[D]. 上海:同济大学,2007.
- [8] HURTY W C. Vibrations of structural systems by component mode synthesis[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1960, 86: 51-59.
- [9] CRAIG R R, BAMPTON M C C. Coupling of structures for dynamic analyses[J]. AIAA J, 1968, 6(7): 1313-1319.
- [10] 刘晶波,谷音,杜义欣. 一致黏弹性人工边界及黏弹性边界单元[J]. 岩土工程学报,2006,28(9):1070-1075.
- [11] ZHANG GENG. Component-based and parametric reduced-order modeling methods for vibration analysis of complex structures[D]. Ann Arbor: The University of Michigan, 2005.
- [12] 冯青松,雷晓燕,练松良. 解析法分析铁路环境振动的列车随机激振荷载[J]. 华东交通大学学报,2013,30(5):1-7.
- [13] High-speed ground transportation noise and vibration impact assessment[R]. U S Department of Transportation Federal Railroad Administration, 2005.
- [14] 张翊翔. 动态子结构法分析地铁引起的建筑物振动[D]. 南昌:华东交通大学,2015.