

动力分析中人工地基边界处理方法对比研究

高颖, 郭庆林, 杨永辉, 卞艳山, 张聪
(河北工程大学土木工程学院, 河北邯郸 056038)

摘要: 针对地基模型边界的近似处理问题, 运用有限元方法分析了固定边界、等效粘弹性边界和无限元边界近似处理后的地基动力响应规律, 借助已有的现场实测数据分析了各种边界处理方法的可行性和精确性。结果表明: 等效粘弹性边界和无限元边界均能反映边界辐射振动特性, 从准确性角度来看, 无限元方法具有更多优势。

关键词: 土体动力响应; 人工边界; 无限元; 等效粘弹性边界; 有限元

中图分类号: TU47

文献标识码: A

Compared analysis on artificial boundary methods for the dynamic response of soils

GAO Ying, GUO Qinglin, YANG Yonghui, BIAN Yanshan, ZHANG Cong
(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China)

Abstract: For the foundation boundary approximation in the vibration analysis, dynamic responses of foundation treated by fixed boundary, equivalent viscoelastic boundary and infinite element boundary were obtained by using the finite element method. Operability and accuracy of various boundary methods were analyzed according to the measured data. The results show that both the equivalent viscoelastic boundary and the infinite element boundary can better reflect boundary vibration characteristics, but infinite element method has a better advantage in terms of accuracy.

Key words: soil dynamic response; artificial boundary; infinite element; equivalent viscoelastic boundary; FEM

运用有限元法研究结构-地基相互作用问题时, 常常由于有限元模型难以反映无限域介质的辐射影响效应而使研究受挫。因此, 地基中无限域的模拟成为研究地基振动响应的关键。通常情况下, 模拟无限域时需要从无限介质中取出有限尺寸的计算区域, 并在区域的边界上引入虚拟的人工边界来实现^[1]。目前, 人工边界大致分为两种: 全局人工边界和局部人工边界^[2]。全局人工边界包括边界元、无限元^[3-4]等, 局部人工边界包括弹性边界、透射边界、粘性边界及粘弹性边界等。其中, 无限元方法和等效粘弹性边界方法是比较常用的两种边界处理方法^[5-7]。然而, 在有限元分析中, 尤其是对于多层土体组成的复杂地基模型问题, 两种方法的施加效率却差别

很大, 严重影响了有限元分析的效率^[8]。另一方面, 不同处理方法的准确性也有待进一步深入研究并明确。因此, 本文选取固定边界模型、扩展模型、无限元处理模型及等效粘弹性边界处理模型进行对比分析, 利用现场实测数据分析验证了不同方法的差异性和准确性, 为人工地基边界的快速选取及施加提供了一种有效的参考依据。

1 常用的地基边界处理方法

1.1 等效粘弹性边界单元方法

该方法由刘晶波、谷音等人提出, 边界单元需要在已建立的三维有限元模型的边界上沿界面法

收稿日期: 2017-08-22

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51508150); 河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2017034); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目(1621211041-1)

作者简介: 高颖(1977-), 女, 河北霸州人, 硕士, 讲师, 从事道路与桥梁结构振动理论研究。

向延伸一层一定厚度的实体单元,并将外层边界固定。实体单元与计算区域单元的材料参数不同,通过定义等效单元的材料性质使其作用等价于粘弹性人工边界。

由下列公式计算,粘弹性边界单元的等效材料参数剪切模量 \tilde{G} :

$$\tilde{G} = \alpha_T h \frac{G}{R} \quad (1)$$

弹性模量 \tilde{E} :

$$\tilde{E} = \alpha_N h \frac{G}{R} \cdot \frac{(1+\tilde{\nu})(1-2\tilde{\nu})}{(1-\tilde{\nu})} \quad (2)$$

式(2)中 G 为计算区域的剪切模量; R 为振源到边界的距离; α_T 与 α_N 分别为切向与法向粘弹性人工边界修正系数; h 为边界单元的厚度。 α_T 、 α_N 及 h 的取值均具有较好的鲁棒性, α_T 的取值范围为[0.35, 0.65], α_N 的取值范围为[0.8, 1.2], h 为等效泊松比,按下式取值:

$$\begin{cases} \tilde{\nu} = \frac{\alpha - 2}{2(\alpha - 1)}, & \alpha \geq 2 \\ \tilde{\nu} = 0, & \alpha < 2 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 $\alpha = \frac{\alpha_N}{\alpha_T}$ 。

根据以上公式可以确定等效粘弹性边界单元的剪切模量 \tilde{G} 和弹性模量 \tilde{E} 。采用与刚度成正比的阻尼假设,材料的等效阻尼系数 $\tilde{\eta}$ 由下式确定:

$$\tilde{\eta} = \frac{\rho R}{2G} \left(\frac{c_s}{\alpha_T} + \frac{c_p}{\alpha_N} \right) \quad (4)$$

式中 c_s 、 c_p 分别为等效单元介质的 S 波和 P 波波速。

1.2 无限元边界方法

无限元是几何上趋于无穷的“有限”单元,从概念上讲它是有限元的延伸,是种特殊的有限单元。对无限元单元中节点编号进行重新排列时,要保证单元的第一个面为有限元和无限元的交接面,从而确保无限元单元的延伸方向是从近区到远区,而且延伸方向不能相交。比如,ABAQUS中不能直接定义无限元单元,需要通过修改INP文件,改变边界的单元类型来实现对无限元单元的定义^[8]。

ABAQUS中无限元施加过程如下:当模型建好以后,找到边界单元相应的INP文件编号,改变网格类型为CIN3D8,修改前节点编号顺序为1-2-3-4-5-6-7-8,重新调整单元节点的排列顺序,顺序要求为:前四个节点面 A 与计算区域单元共点,后四个节点面 B 为无限区域面, A 、 B 面的节点顺序遵循由 A 面指向 B 面的右手螺旋法则,即修改后节点编

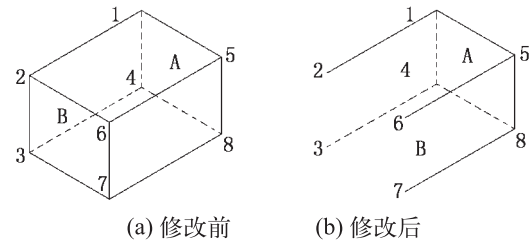


图1 无限元单元建模编号示意图

Fig.1 Sketch of infinite element model numbering

号顺序为1-4-8-5-2-3-7-6,如图1所示。

1.3 固定边界及扩展模型处理方法

本文所用的固定边界模型即直接对土体模型施加固定边界条件,不考虑边界振动辐射效应。而扩展模型则是将原地基模型分别沿 x 、 y 、 $-z$ 方向扩展20倍所得的数值模型,扩展倍数由计算机试算确定。

2 有限元分析模型选取

2.1 Lamb问题模型

为了分析四种模型的差异性,根据已有文献^[1]中给出的Lamb问题模型,模型尺寸为 $1 \times 1 \times 0.5$,模型弹性模量为40,泊松比取0.25,密度为1,模型单元划分尺寸为0.05,分析步长设为0.01,分别建立固定边界模型、等效粘弹性人工边界模型、无

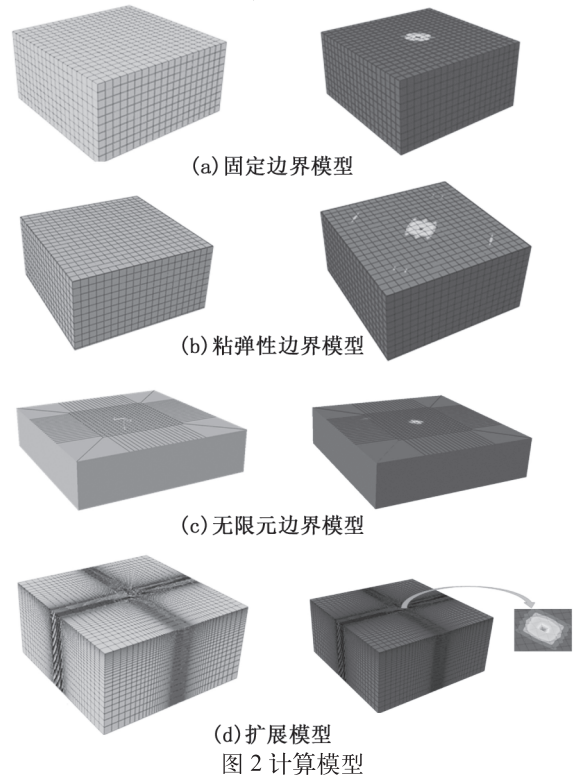


图2 计算模型

Fig.2 The calculation model

限元模型、扩展模型等四个计算模型，如图2。

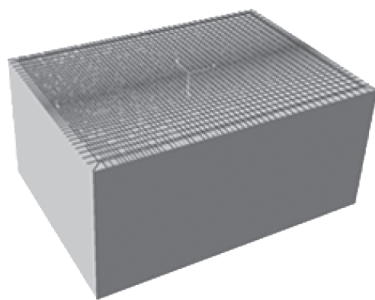
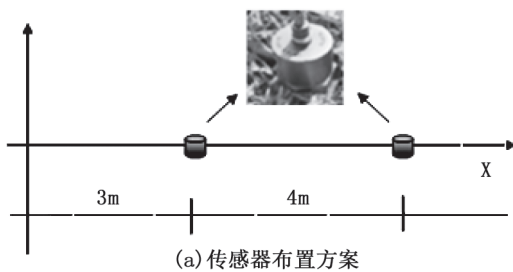
2.2 车辆激振实测模型

为了分析比较两种边界处理方法的计算精度与效率，借助 Mahanna^[9]的实测算例对各方法进行对比分析。试验描述如图3：试验场地振动由一辆载荷为13 t的卡车匀速行驶产生，即振源。卡车沿不平整道路行驶的速度为60 km/h，道路一侧离路中心1.5、3、5、7、10、15 m六个不同位置处设有感应器，可同时记录振动产生时不同距离处振动的速度、加速度值。感应器连线垂直于道路中心线，所测振动持续时间为(15±5)ms。

模型的计算区域外围分别采用不同的边界处理方法进行设置。等效粘弹性边界法边界厚度取0.6 m，与计算区域的网格划分情况保持一致。无限元边界单元通过修改 INP 文件中网格类型及单元节点编号来实现，建立如下无限元边界数值模型图3(b)。

场地土分为四层：粉土、砂土、粘土、粘土，各土层参数信息如表1所示。

针对以上算例，本文借助通用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟，模型计算区域尺寸取长为30 m，宽为21 m，深度为15 m。场地土层分为四层，各个土层参数按表1设置输入。土体网格尺寸为0.6 m×0.6 m×0.6 m。采用冲击力荷载，大小为65 kN，作用面积为两个网格表面积。由于试验场地具有一定的不平整度，车辆荷载采用正弦波动荷载，加载时间及加载曲线如图4所示。



(a) 传感器布置方案
(b) 无限元边界数值模型
图3 试验示意图及无限元模型

Fig.3 Sketch map of test and infinite element model

表1 各土层信息
Tab.1 Properties of different layers

指标	层数			
	1	2	3	4
层厚/m	0.60	1.20	4.20	9.00
E /MPa	200	150	25.0	50.0
泊松比	0.33	0.33	0.33	0.40
S 波速/($m \cdot s^{-1}$)	220	180	65	105
P 波速/($m \cdot s^{-1}$)	440	360	130	252

3 结果分析

3.1 不同边界方法差异性分析

为比较不同边界处理后的模型振动情况，提取了各模型中心处某点的位移时程曲线，如图5所示。

从图5可以看出，固定边界模型在第一个波峰出现以后，曲线在扩展解附近上下震荡，并不能很好反映实际的振动衰减规律；无限元边界模型、等效粘弹性边界模型和扩展模型的振动响应趋势基本一致，第一个波峰出现时两者与扩散解都有较大的

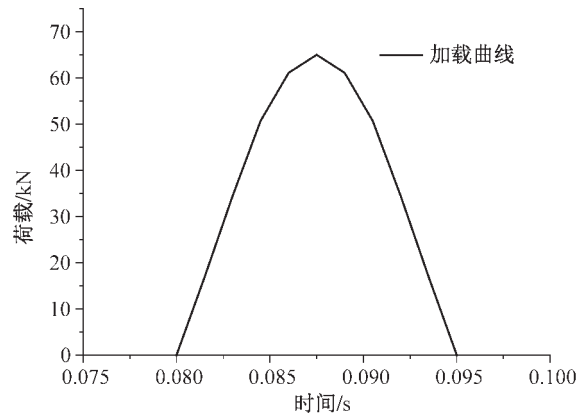


图4 加载时间及曲线
Fig.4 Loading time and curve

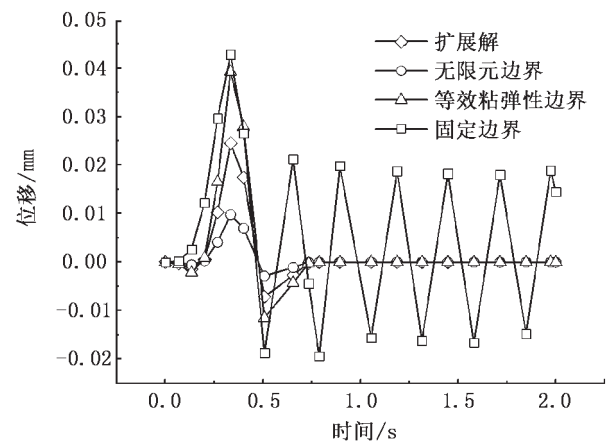


图5 各模型位移时程曲线对比图

Fig.5 Comparison of displacement time history of each model

差距, 0.5 s后曲线趋于平稳, 并且无限元边界模型的计算结果与扩展解更为接近, 说明无限元边界能够更准确的反映地基边界的振动辐射情况。

3.2 边界方法精确性分析

为了分析无限元和等效粘弹性边界两种方法的计算精度, 选取距离振源 3 m 和 7 m 处的加速度时程曲线作为考察指标进行对比分析, 结果如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可以看出, 距离振源 3 m 处的加速度大约在 0.030 s 左右达到最大值, 并且沿竖向向上运动。而在 7 m 处, 加速度最大值则出现在 0.070 s 左右, 且沿竖向向下运动。这种差异主要是由于振动波传导相位差所导致的。

对比图 6、图 7 可以看出, 两种模型模拟所得到的两个位置处振动的加速度时程曲线与实测结果基本吻合, 加速度变形规律基本保持一致, 最大加速度波峰数值与实测波峰数值也基本吻合, 能够很好地反映出汽车荷载引起的地面振动的衰减规律。

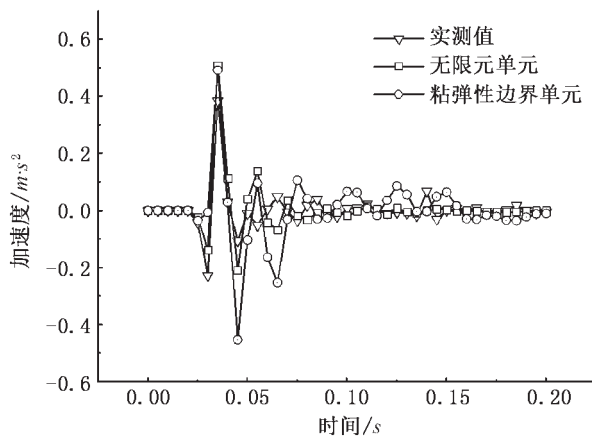


图 6 3 m 处的加速度

Fig.6 Acceleration at 3 meters

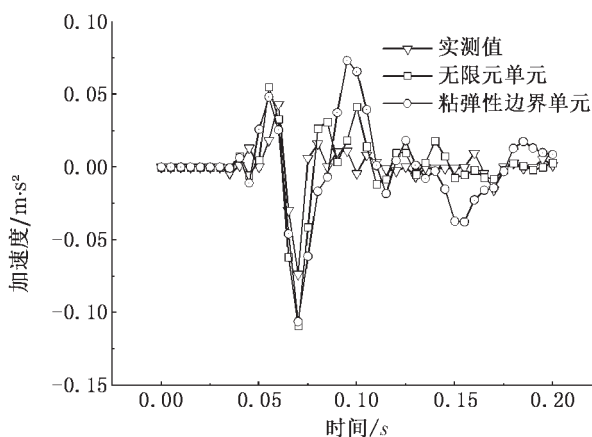


图 7 7 m 处的加速度

Fig.7 Acceleration at 7 meters

同时还可以看出加速度模拟值均大于实测值, 这可能是由于试验场地土层内部复杂构成特点所造成的。从总体上看, 无限元边界模型加速度衰减变化规律与实测结果吻合较好, 说明无限元方法具有良好的边界处理效果, 模拟精度更高, 精确性更好。

4 结论

1) 固定边界、等效粘弹性人工边界、无限元和扩展模型的处理效果是有差异的, 扩展解符合实际规律, 其余三种方法对应的结果向扩展解靠近。

2) 固定边界由于无法考虑边界振动辐射效应, 分析效果最差; 粘弹性边界单元法与无限元法都能较好反映振动衰减规律, 但无限元法模拟精度更高, 更接近于实测值, 近似处理效果更好。

由于地基土层组成的复杂性, 数值模拟结果与现场实测结果大都难以完全吻合, 因此, 怎样在数值分析中降低土层组成对振动响应带来的影响将是未来值得深入研究的一个方向。

参考文献:

- [1] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元 [J]. 工程力学, 2007, 24(12): 31-37.
- [2] 廖振鹏. 工程波动理论导论 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] 梅魁, 孟凡深. 粘弹性人工边界在 ABAQUS 中的实现及应用 [J]. 水电能源科学, 2010(7): 82-84.
- [4] 王福星. 基于 ABAQUS 对高速铁路环境振动的数值模拟及振动特性分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [5] 刘晶波, 吕彦东. 结构—地基动力相互作用问题分析的一种直接方法 [J]. 土木工程学报, 1998(3): 55-64.
- [6] 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.
- [7] 李录贤, 国松直, 王爱琴. 无限元方法及其应用 [J]. 力学进展, 2007, 37(2): 161-174.
- [8] 卞艳山. 地面汽车荷载影响下邻近建筑物的振动响应规律研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
- [9] MHANNA M, SHAHROUR I, SADEK M, et al. Efficiency of heavy mass technology in traffic vibration reduction; Experimental and numerical investigation [J]. Computers & Geotechnics, 2014, 55(1): 141-149.

(责任编辑 王利君)