

DOI: 10.11779/CJGE202007006

非一致激励下长大盾构隧道结构地震响应分析

王国波^{1,2}, 巴峰¹, 孙富学², 袁明智¹, 郝鹏飞¹

(1. 武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 采用数值模拟的方法对非一致激励下土-隧道体系的地震响应进行研究, 旨在探究非一致激励下地下结构的响应规律及其与一致激励下响应的差异。首先基于相干函数、功率谱函数以及包络函数进行了多点相关的人工地震动合成, 并通过与目标功率谱的对比验证了所合成人工波的合理性。然后对生成的地震波进行批处理, 得到可用于计算的人工地震波, 包括一致波、行波、相干波、相干行波。并以一精细化长大盾构隧道模型为研究对象, 在其底部按单元分别进行四种波的输入, 计算分析隧道结构及土体的地震响应规律。对比分析表明: 在响应幅值上, 当纵向距离较小时, 非一致激励下地表及结构响应在整体上小于一致波, 但随着纵向距离的增加, 峰值加速度响应呈现递增趋势, 且会超过一致激励下的响应; 在频域上, 非一致激励下主频处幅值相比于一致波有所减小, 且主频右侧频段对应幅值增大。另外, 非一致激励会引起隧道横截面内衬砌和隔板产生更大的相对位移, 且相干波和相干行波的影响更大, 并体现出更为显著的空间变化性。因此, 在进行大尺度地震模拟计算时, 应考虑地震动空间效应的影响。

关键词: 多点非一致激励; 地下结构; 地震响应; 地震动空间效应; 人工地震动

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)07-1228-10

作者简介: 王国波(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程结构的抗震分析研究工作。E-mail: wgb16790604@126.com。

Seismic response analysis of long shield tunnels under non-uniform excitation

WANG Guo-bo^{1,2}, BA Feng¹, SUN Fu-xue², YUAN Ming-zhi¹, HAO Peng-fei¹

(1. Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: The numerical simulation method is used to study the seismic response of the soil-tunnel system under non-uniform excitation. The aim is to explore the response laws of the underground structures under non-uniform excitation and its difference with those under uniform excitation. First, based on the coherence function, power spectrum function and envelope function, the multi-point correlation artificial seismic synthesis is carried out, and the rationality of the synthesized artificial waves is verified by comparing with the target power spectra. Then, the generated seismic waves are batch-processed to obtain artificial seismic waves that can be used for calculation, including four kinds of waves, such as uniform waves, traveling waves, coherent waves, and coherent traveling waves. Taking a refined long shield tunnel model as the research object, the four kinds of waves are input respectively according to the unit at the bottom of the model, and the seismic response of tunnel structure and soil is calculated and analyzed. Based on the comparative analysis, the response of the ground and the tunnel under non-uniform excitation is smaller than that under the uniform waves when the longitudinal distance is small, but the peak acceleration response increases with the longitudinal distance and exceeds the response under uniform excitation. In frequency domain, the amplitude of the dominant frequency under the non-uniform excitation is reduced compared to that of the uniform waves, and the corresponding amplitude of the right frequency band of the dominant frequency increases. In addition, the non-uniform excitation will cause greater relative displacement of the linings and transverse plates in the tunnel cross-section. The influence of coherent waves and coherent traveling waves is greater, and more significant spatial variability is exhibited. Therefore, when conducting large-scale seismic simulation calculations, due consideration should be given to the spatial effects of ground motion.

Key words: multi-point non-uniform excitation; underground structure; seismic response; ground motion space effect; artificial ground motion

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878529, 51678465); 武汉理工大学研究生优秀学位论文培育项目(2018-YS-044)

收稿日期: 2019-10-16

*通信作者(E-mail: sunfuxue@163.com)

0 引言

目前中国各大主要城市均已开通城轨, 同时进行地铁交通建设, 且大型地下车站和综合保障系统限于地表空间紧张开始有计划的开发和建设。根据已有的震害^[1-2], 发现当较大地震来临时, 现有的地下结构并不安全。1985年墨西哥8.1级地震中地铁结构侧墙部位出现破坏现象; 1995年日本7.2级阪神地震中, 神户市内的大量地下结构遭到了严重的破坏, 最为著名的是大开地铁车站的破坏, 大部分中柱出现完全倒塌, 从而引起顶板的塌陷和上部土层的下陷。与此同时, 神户市的地铁和高架结构都出现了较为严重的连续梁倒塌和坍塌。这些较为明显的震害说明, 地下结构相比于地表结构, 其抗震特征有很大不同。在发生地震时, 地下结构周围土体的变形相当剧烈, 极有可能引起地下结构薄弱部位的破坏, 此外, 由于场地土的复杂性, 地下结构不同节段之间的土体参数可能存在显著差异, 直接造成了地下结构的各个区段不同程度的破坏。因此, 针对复杂场地条件下的地下结构, 尤其是长大型地下结构, 其抗震性能和地震响应状态应该予以重视。

近几年, 在非一致地震动研究方面, Jayalakshmi等^[3]通过考虑沉积盆地的影响, 利用SPECFEM3D结合有限元估算德里地区由于当地地震活动引发的地面运动, 重点估算地震动频谱的低频端, 包括位移和速度时程。但是研究中没有考虑影响地面运动的当地土体条件。Yenier等^[4]建立了随机等效点源模拟模型, 并对加利福尼亚州地震进行了模拟再现, 通过对其关键源和衰减建模参数的简单修改, 可以对不同区域的源和衰减属性进行调整。

与此同时, 在国内方面, 屈铁军等^[5-6]计算每一点时均考虑与其他 $n-1$ 个点的相关性, 避免了各点合成公式相差较大导致的各点地震动幅值相差较大的问题, 同时给出了适用于II、III类场地的功率谱模型。杨庆山等^[7]在屈铁军方法的基础上引入相位差谱, 用符合相位差谱统计规律的相位角代替随机相位角, 生成了考虑非平稳性的多点地震动时程。王鼎等^[8]给出了地震动的物理随机模型, 并引入断层模型。

此外, 在分解方法方面, 为了避免Cholesky分解带来的问题, 夏友柏等^[9]假设各点的自功率谱相同, 吴作菊^[10]采用虚实分离法来分解功率谱矩阵, Gao等^[11]则给出了Cholesky分解下三角矩阵元素的显式解。此外, 姚二雷等^[12]提出一种基于奇异值分解的地震动合成方法, 合成多点地震动时则针对复功率谱矩阵的奇异值进行分解。

地震动的空间效应涉及因素较多, 现阶段大多数合成方法针对功率谱分解和相干函数分解均提出了许多不同的分解方法。针对起始的随机过程采用平稳过程非平稳化的方式或采用根据实际测得的地震时程为基础, 也有根据引入矩形断层模型来形成震源模型从而生成特定地质条件下断层断裂过程产生的地震动。所以, 目前针对平稳地震动的功率谱模型研究较为深入, 而基于非平稳地震动的演化功率谱模型及相应的相干函数研究值得关注。

目前, 对于大跨度桥梁^[13-14]、地表结构^[15-16]、坝体^[17]的非一致激励影响已经得到广泛的研究, 但是对于地下结构的影响研究尚少。当地下结构尺寸较小时, 由于地震波在土体中传播速度较大而地下结构尺寸有限, 因而地震动的空间效应和入射角度对结构响应的影响较小。然而, 当地下结构尺寸较大时, 结构穿越的场地土较为复杂, 不同部位的地震动输入不同, 此时地震动的空间变化效应对地下结构的地震响应具有不可忽视的影响^[18], 因此, 空间变化地震动的特征分析与建模是大型复杂结构地震响应分析和抗震性能评价的基础。

基于上述分析, 本文从地震动的合成方法、输入方式以及土体特性等方面切入, 采用数值模拟的方法对多点非一致输入下大尺寸地下结构及其周围土体的地震响应规律进行研究, 期望为长大型地下结构地震破坏模式以及简化实用的抗震设计分析方法的研究提供一定的参考。

1 空间相关地震动合成方法

基于生成多点相关地震动的目标, 考虑借助相干函数模型结合平稳地震动的功率谱模型, 利用功率谱密度函数和相干函数的关系, 得到由各个点的自功率密度函数和互功率谱密度函数组成的互谱矩阵, 再利用Cholesky分解将互谱矩阵进行分解得到各个点的地震动傅里叶谱, 最后再由傅里叶逆变换得到各个点的时程, 从而得到多点相关的相干波。

基于MATLAB平台编制了地震动合成程序, 程序主要包括输入点坐标信息、功率谱模型、相干函数模型、包络函数模型、功率谱拟合、数据批处理等方面。程序主要框架及流程图如图1所示, 此外, 在得到符合要求的地震动之后, 针对生成的地震动进行批处理, 得到作为荷载输入的一致波、行波、相干波、相干行波。

依照研究需要, 假定时间间隔为 $\Delta t = 0.002$ s, 且时间间隔数为 $N_t = 8192$ 。现针对平面内线性均匀分布的共201个点 A_1, A_2, \dots, A_{201} , 合成各点相关地震动, 如

图2所示。其中各点间距为2 m,且震级 $M=6$,震中距假定为 $D=50$ km。

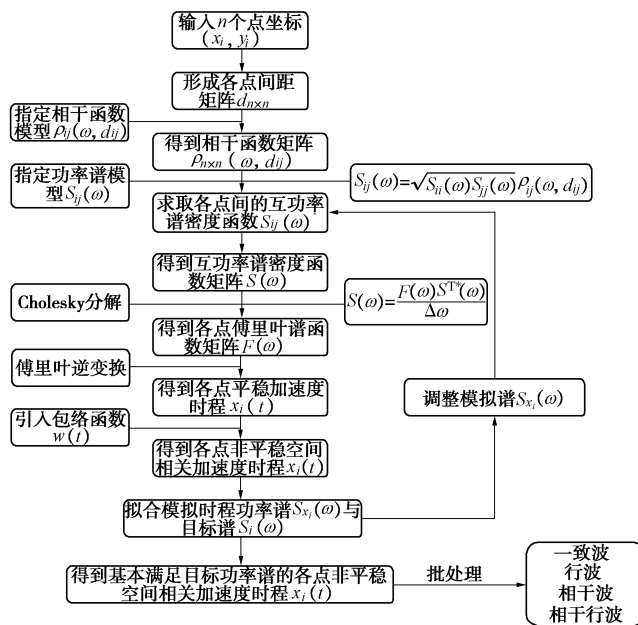


图1 地震动合成流程图

Fig. 1 Flow chart of synthesizing ground motion



图2 各点位置分布图

Fig. 2 Position of points

根据各点的相对位置得到间距矩阵 $d_{201 \times 201}$ 为

$$d_{201 \times 201} = \begin{bmatrix} 0 & 2 & \dots & 400 \\ 2 & 0 & \dots & 398 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 400 & 398 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

此处引入 Harichandran 模型作为地震动合成的相干函数模型,考虑视波速 v_c 为 1000 m/s。基于 Harichandran 等研究^[19],选取相干函数模型参数如表1所示。

表1 相干函数模型参数^[19]

Table 1 Parameters of coherent function model

$v_c / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A	α	k / m	$\omega_0 / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	b
1000	0.626	0.022	19700	12.69	3.47

此外,引入 Clough-Penzien 模型^[20],其中模型参数如表2所示。

表2 功率谱模型参数

Table 2 Parameters of power spectrum model

S_0	$\omega_g / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\omega_f / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\zeta_g / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\zeta_f / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
2.25×10^{-3}	7.539	0.754	0.85	0.85

选用的包络函数模型为 Jennings 模型^[21],该模型广泛应用于地震动合成,其模型参数如表3所示。

表3 包络函数模型参数^[21]

Table 3 Parameters of envelope function model

t_1 / s	t_2 / s	c
0.8	7	0.35

由上述相干函数得到各点间的互功率谱,进而进行 Cholesky 分解,再由傅里叶函数向量得到各个平稳地震动时程,再利用包络函数进行非平稳化,最终经过功率谱平均处理,得到各点的非平稳地震动时程。

基于 MATLAB 程序最终生成的各点地震动时程数据,任意选取其中的 A_1 点, A_8 点, A_{18} 点和 A_{150} 点的时程分别如图3所示,对应的功率谱曲线如图4所示。从各点的功率谱曲线与对应的目标功率谱曲线的对比可以看出,各点的功率谱曲线基本与目标功率谱吻合,模拟时程的功率谱与频率横轴所包围的面积,与目标功率谱与频率横轴包围的面积相对误差小于假定的相对误差(3%~5%),此时各点的模拟时程的功率谱基本与目标谱吻合,且频域内能量的相对误差也满足要求,即生成的多点地震动时程满足要求。

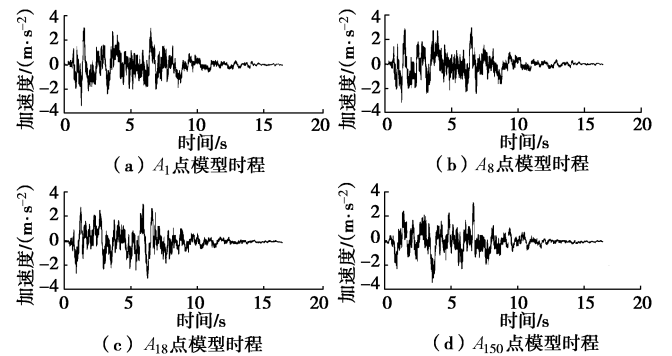


图3 $A_1, A_8, A_{18}, A_{150}$ 模拟时程

Fig. 3 Simulated time histories of points A_1, A_8, A_{18} and A_{150}

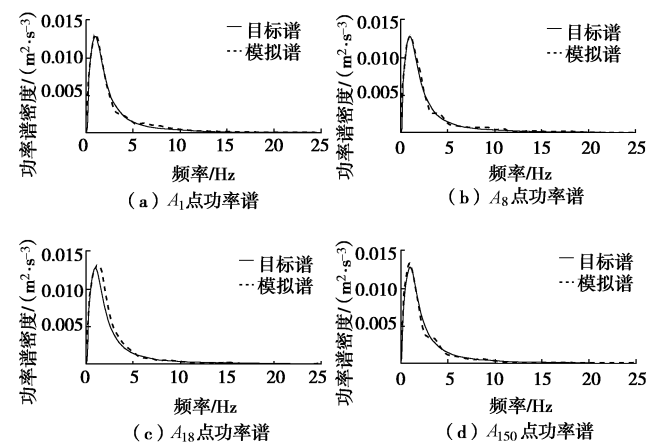


图4 $A_1, A_8, A_{18}, A_{150}$ 模拟时程功率谱

Fig. 4 Simulated power spectra of points A_1, A_8, A_{18} and A_{150}

2 模型概况

2.1 模型建立

选取某地铁隧道作为隧道模型的原型, 隧道横截面尺寸如图 5 所示, 隧道外径为 15.2 m。横向计算宽度取不小于 7 倍的隧道直径, 即 108 m; 深度方向取至基岩面即 70 m。纵向长度方面, 本文在计算效率和考虑地震动空间效应两方面寻找平衡点: 太长, 计算效率低下; 太短, 体现不出地震动的空间效应。最后在试算的基础上选取纵向长度为 400 m。因此, 所采用的土体模型尺寸为 400 m (长) × 108 m (宽) × 70 m (深), 隧道衬砌厚度为 0.65 m, 横板厚度和竖墙厚度均为 0.3 m。隧道顶部距地表 10 m, 空间位置如图 6 所示。

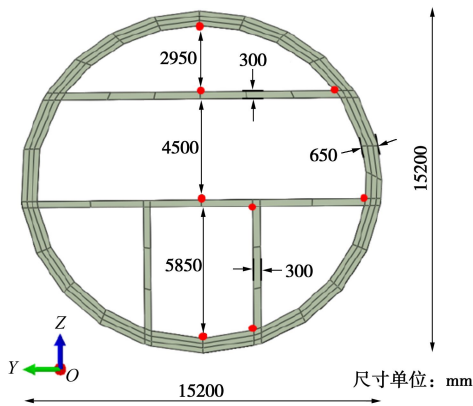


图 5 隧道横截面尺寸

Fig. 5 Cross-sectional dimensions of tunnel

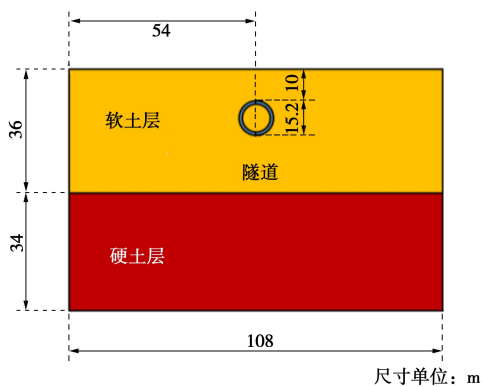


图 6 隧道空间位置图

Fig. 6 Location of tunnel

建立的土体模型和隧道模型分别如图 7, 8 所示, 其中土体单元和隧道单元均采用 C3D8 实体单元, 考虑模拟的土体剪切波速在 200 m/s 以上, 为了保证波在土体中的有效传播, 一般要求单元尺寸小于波长的 1/10。因此确定土体网格尺寸为 2 m, 且隧道网格尺寸为 1 m。

模拟中没有考虑隧道和土体之间的滑移, 即隧道与土体间采用“tie”接触。

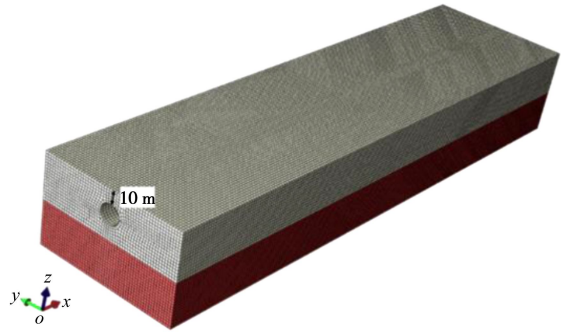


图 7 土体计算模型

Fig. 7 Soil model

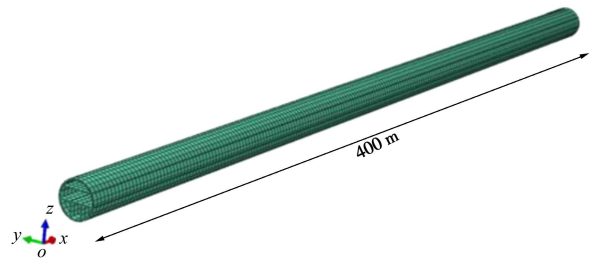


图 8 隧道计算模型

Fig. 8 Tunnel model

2.2 边界阻尼设置

模型四周及底部均采用侧向滑移边界, 即约束竖向和垂直于振动的方向, 平行于振动的方向自由, 而顶部为自由边界。例如, 当在图 7 所示的 x 轴方向输入地震动时, 侧面及底面均约束 y, z 方向的运动。

针对土体阻尼的设置, 将结合 ABAQUS 平台中开发的基于 Davidenkov 骨架曲线修正得到的土体非线性模型子程序中进行设置。

该本构模型中, 土体的 $G/G_{\max} - \gamma_d$ 关系为

$$\frac{G}{G_{\max}} = 1 - \left[\frac{\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_r} \right)^{2B}}{1 + \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_r} \right)^{2B}} \right]^A, \quad (2)$$

阻尼比 $\zeta - \zeta_{\max}$ 关系为

$$\frac{\zeta}{\zeta_{\max}} = \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right)^\beta. \quad (3)$$

式中 A, B, β 为拟合参数; γ_r 为参考剪应变; γ_d 为瞬时动剪应变; G 和 ζ 为瞬时动剪切模量和阻尼比; G_{\max} 和 ζ_{\max} 为土体最大动剪切模量和最大阻尼比。

2.3 材料参数

采用文献[22]中的开发的基于 Davidenkov 骨架曲线修正后针对 ABAQUS 软件平台开发的土体动力非线性黏弹性模型的子程序, 用以考虑土体的非线性。其中土体参数如表 4 所示。表 4 中, G_{\max} 为最大剪切

表4 土体参数

Table 4 Parameters of soils

土层	深度/m	密度 $\rho /(\text{kg}/\text{m}^3)$	Davidenkov 模型参数						
			$G_{\max} / (10^8 \text{ Pa})$	ν	A	B	γ_0	ζ	$\nu / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
软土	36	1920	1.728	0.41	1	0.38	9.67×10^{-4}	3×10^{-3}	300
硬土	34	1980	4.009	0.35	1	0.35	1.77×10^{-3}	3×10^{-3}	450

模量, ν 为土体剪切波速, ν 为泊松比, ζ 为初始阻尼比, A, B, γ_0 为与土性相关的拟合参数。

隧道模型考虑为 C45 混凝土, 混凝土密度为 $2500 \text{ kg}/\text{m}^3$, 且弹性模量为 33.5 GPa , 泊松比 ν 为 0.32 。由于隧道三维模型单元量较大, 为了保证计算效率, 选用弹性模型。

2.4 地震动输入

地震波在模型底部输入。进行纵向(沿 X 轴向)输入地震动时, 将各点地震动分别输入到对应的垂直于地震动方向的单元结点列。如图 9 所示。

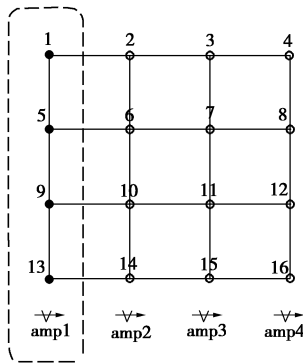


图9 地震动输入示例

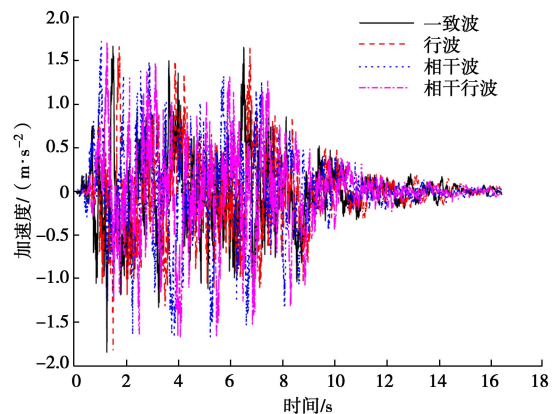
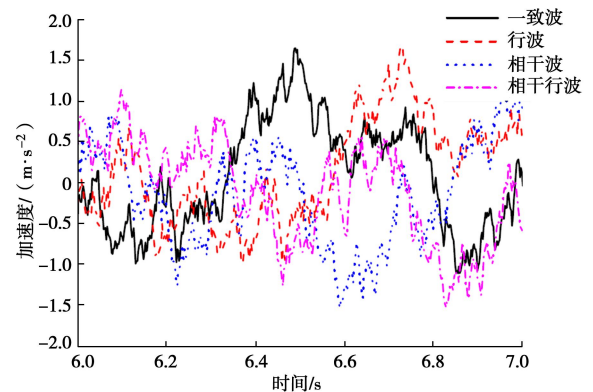
Fig. 9 Example of ground motion input

当进行纵向输入即沿 X 轴方向输入时, 生成沿 X 轴方向的 201 条空间相关地震动, 沿模型基底垂直于传播方向的每排单元节点输入一组地震动时程。

取视波速 v_c 为 $1000 \text{ m}/\text{s}$, 根据第 1 节中地震动合成的方法, 分别生成纵向输入的一致波、行波、相干波、相干行波 4 种地震动; ①一致波, 一致波各个输入点的地震动均相同; ②行波, 在一致波基础上结合视波速考虑地震波的时滞效果, 即各点地震波时程仅存在时间差; ③相干波, 考虑地震波在空间中传播的相干效应, 各点的幅值和相位有略微差异; ④相干行波, 在相干波基础上考虑地震波的时滞效果, 各点地震动在幅值和相位差异之外, 还存在相应的时间滞后。

考虑到《建筑抗震设计规范》GB50011—2010 中设防烈度为 7 度的第二组的城市处于大多数, 其对应的设计基本地震加速度值为 $1.5 \text{ m}/\text{s}^2$, 且对于设防烈度为 8 度的第二组的大多数城市对应的设计基本地震加速度值为 $2.0 \text{ m}/\text{s}^2$ 。为了探究在设防烈度 7~8 之间

对应的加速度值的荷载输入下土体与地下结构的地震响应, 故综合考虑将加速度峰值统一调整为 $1.85 \text{ m}/\text{s}^2$, 其中作为纵向输入的 A_{120} 点对应的 4 种波如图 10 所示, 并取其中 6~7 s 放大图如图 11 所示。

图10 A_{120} 点处 4 种波时程Fig. 10 Time histories of four seismic waves at point A_{120} 图11 A_{120} 点处 4 种波时程放大图Fig. 11 Partial enlargement of time histories of four waves at point A_{120}

通过针对 ABAQUS 有限元软件的 inp 文件进行批处理, 将多点地震动快速与对应输入节点列对应。

2.5 测点布置

当沿纵向进行地震动输入时, 对于土体, 在隧道上方地表沿纵向布置间距为 20 m 的连续测点, 如图 12 所示。针对隧道选取纵向 $X=80, 160, 240, 320 \text{ m}$ 截面处半边隧道截面作为监测截面, 各个截面的测点布置位置主要分布在衬砌拱顶底、横板中间和边缘以及竖墙上下, 主要测点位置如图 13 (a) 所示, 且 4 个截面的测点分布的空间位置如图 13 所示。

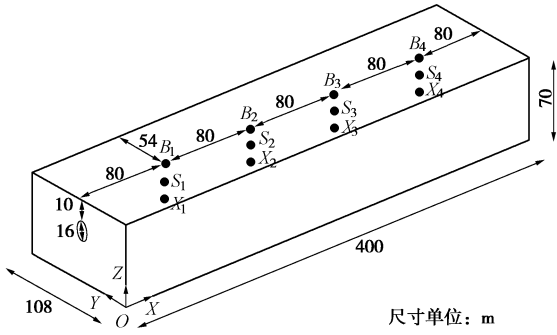
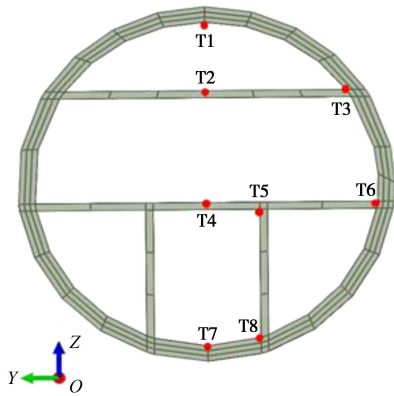
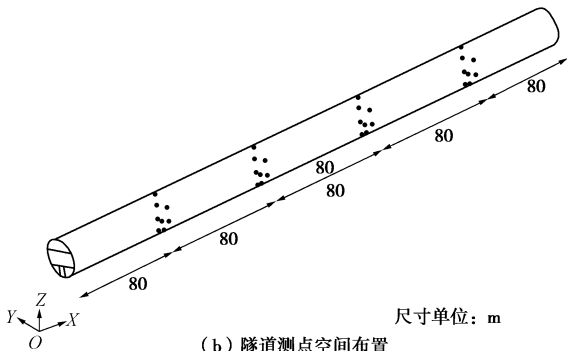


图 12 土体测点布置

Fig. 12 Arrangement of measuring points for soil



(a) 隧道截面测点布置



(b) 隧道测点空间布置

图 13 隧道测点布置

Fig. 13 Arrangement of measuring points for tunnel

3 不同激励方式下土体及隧道地震响应分析

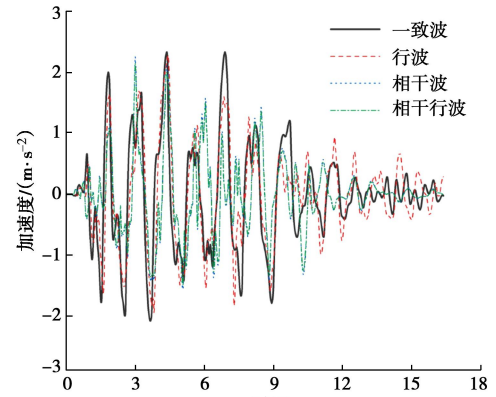
选取地表及隧道沿纵向各个截面关键部位的测点, 分析其在一致波、行波、相干波、相干行波 4 种地震波作用下的地震响应状态, 总结在不同地震动作用下土体和隧道的地震响应规律。

为了便于分析比较不同地震波作用下的响应差异, 现以一致地震动时的响应为基准, 定义响应变化率为

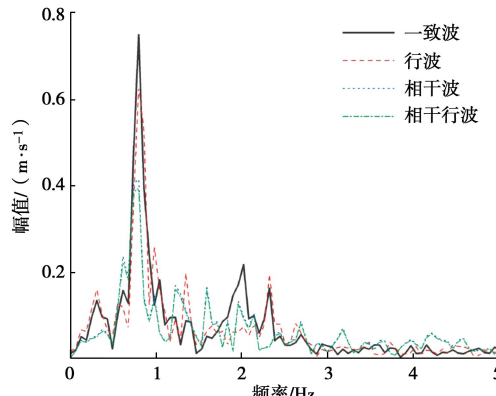
$$\text{变化率} = \frac{\text{非一致响应} - \text{一致响应}}{\text{一致响应}} \times 100\% \quad (4)$$

3.1 地表加速度响应分析

取地表 B1 点, 做出其分别在 4 种波作用下的加速度响应曲线, 如图 14 所示。



(a) 加速度时程曲线



(b) 频谱曲线

图 14 不同激励方式下地表 80 m 处加速度响应

Fig. 14 Acceleration responses under different waves at 80 m below surface of soil

在时域上, 从整体上来看一致波、行波、相干波、相干行波作用下的地表加速度响应依次减小, 而在 10~16 s 时, 行波作用下的加速度响应最大, 图 14 中行波效应所产生的时滞并不明显, 这是因为所选取的测点的纵向距离较小, 波传播的时间较短。

从频域上可以明显地观察到, 在响应主频处, 行波作用下的响应幅值明显小于一致波, 相干波作用下的响应幅值又明显小于行波, 而相干行波作用下的响应幅值略小于相干波。因此行波效应会导致地震作用下主频处响应的减小, 这可能与不同位置作用的地震波的相位角的差异有关, 而对于相干波和相干行波, 这种由相位角的差异所造成的影响被不相干效应减弱。另外, 在响应主频右侧即 1~1.6 Hz 处, 非一致激励下的响应大于一致激励下的响应。

4 种地震波作用下 B1~B4 测点对应的峰值加速度, 如图 15 所示。

由图 15 可以发现, 在一致波作用下地表各点的峰值加速度响应呈现出一致性, 这与传统理论是一致的, 而在行波作用下, 地表的峰值加速度响应随纵向距离的增大而逐渐增大, 在纵向距离大于 210 m 时, 峰值加速度响应大于一致波作用下的响应。对于相干波和相干行波体现出更为显著的空间变化性, 且随传播距离的增加, 其响应可能大于一致波作用下的响应。

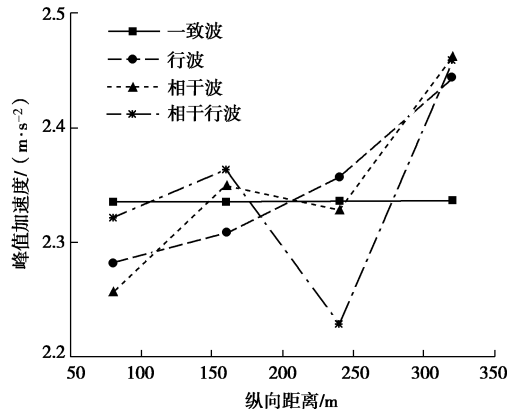


图 15 不同激励方式下地表峰值加速度响应随纵向距离的变化曲线

Fig. 15 Peak ground acceleration responses at different longitudinal distances under different waves

根据图 15 的峰值加速度响应, 分别计算出行波、相干波以及相干行波作用下地表峰值加速度响应相对于一致波的变化幅度, 如表 5 所示。

表 5 地表峰值加速度变化率

Table 5 Change rates of peak ground acceleration (%)

输入方式	纵向长度/m			
	80	160	240	320
行波	-2.29	-1.14	0.89	4.62
相干波	-3.39	0.62	-0.36	5.42
相干行波	-0.59	1.20	-4.63	5.23

由表 5 可以看出, 在地震波传播距离较小时 (小于等于 240 m), 非一致激励下的地表加速度响应整体上均小于一致激励, 而当地震波传播距离增大时, 非一致激励下的响应可以大于一致激励。因此在対大型地表结构进行抗震分析时, 应考虑地震动的空间效应的影响。

3.2 隧道加速度响应分析

选取隧道纵向沿 x 轴 $x=160$ m 和 $x=320$ m 截面处衬砌顶部的加速度响应进行分析, 如图 16, 17 所示。

由图 16 可知, 从时域上看, 整体上一致波作用下衬砌顶部的加速度响应较大, 在少数时刻相干行波作用下的响应最大。且可观察到相干行波的波形与一致波相比存在着明显的时滞现象。从频域上看, 一致

波、行波、相干波作用下的主频所对应的幅值依次减小, 而相干行波作用下响应的主频略微左移。在主频右侧, 非一致激励下的响应略大于一致激励下的响应。

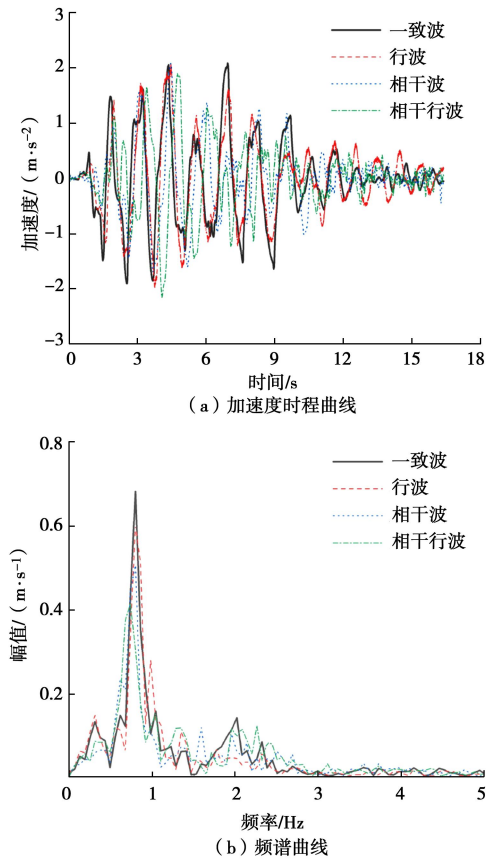
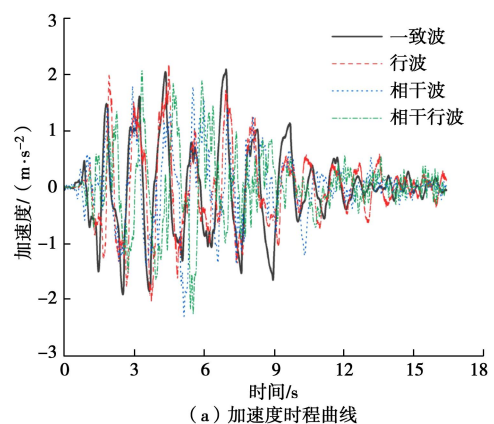


图 16 不同激励方式下 160 m 处隧道衬砌顶部加速度响应

Fig. 16 Acceleration responses of lining top at 160 m under different waves

由图 17 可知, 从时域上看, 在纵向距离为 320 m 处, 行波效应较为明显, 且在多个时段非一致激励下的响应大于一致激励, 不相干效应引起响应波形的变化十分明显。频域上的规律与 160 m 处的分析类似, 且非一致激励下主频对应的响应减小的幅度更大, 这是因为随着纵向距离的增大, 非一致效应越明显。另外, 在次主频 2 Hz 处, 行波作用下的响应增大。



(a) 加速度时程曲线

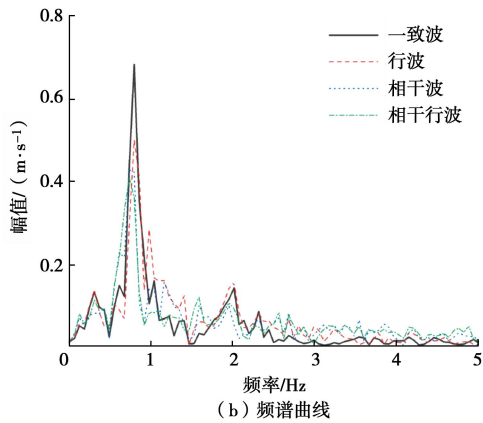


图 17 不同激励方式下 320 m 处隧道衬砌顶部加速度响应
Fig. 17 Acceleration responses of lining top at 320 m under different waves

由表 6 和图 18 可知, 衬砌顶部峰值加速度响应随纵向距离的变化规律基本与土体峰值加速度响应一致, 但相干波和相干行波作用下结构响应的空间变化性比行波作用下更为显著。

表 6 衬砌顶部峰值加速度变化率

Table 6 Change rates of peak acceleration of lining top (%)

输入方式	纵向长度/m			
	80	160	240	320
行波	-4.76	-0.57	2.51	4.79
相干波	-8.03	-0.25	-8.95	9.18
相干行波	-3.17	3.12	-3.63	6.96

3.3 隧道相对位移响应分析

选取隧道纵向沿 x 轴 $x=80, 160, 240, 320$ m 截面处, 4 种地震波下隧道衬砌顶底、上下横板中间的最大相对位移列于表 7, 8。

由表 7, 8 可知, 从整体上来看, 非一致激励下的隧道结构相对变形均大于一致激励, 且变化率非常

表 7 不同地震波作用下隧道衬砌顶底 (T1 与 T7) 的最大相对位移

Table 7 Maximum relative displacements between tunnel lining top and bottom (T1 and T7) under different seismic waves

截面	一致波		行波		相干波		相干行波	
	相对位移/m	变化率/%	相对位移/m	变化率/%	相对位移/m	变化率/%	相对位移/m	变化率/%
$x=80$ m	-0.0006	—	-0.0019	217	-0.0120	1900	-0.0142	2267
$x=160$ m	-0.0006	—	-0.0009	50	-0.0045	650	0.0102	1800
$x=240$ m	-0.0006	—	-0.0006	0	-0.0030	400	0.0053	983
$x=320$ m	-0.0006	—	0.0008	233	0.0124	2167	0.0106	867

表 8 不同地震波作用下隧道上下横板中间 (T2 与 T4) 的最大相对位移

Table 8 Maximum relative displacements between upper and lower tunnel horizontal plates (T2 and T4) under different waves

截面	一致波		行波		相干波		相干行波	
	相对位移/m	变化率/%	相对位移/m	变化率/%	相对位移/m	变化率/%	相对位移/m	变化率/%
$x=80$ m	-0.0004	—	-0.0007	75	-0.0171	4175	-0.0042	950
$x=160$ m	-0.0003	—	-0.0004	33	-0.0062	1967	0.0072	2500
$x=240$ m	-0.0003	—	-0.0003	0	-0.0051	1600	-0.0093	3000
$x=320$ m	-0.0003	—	0.0005	267	0.0172	5833	0.0089	3067

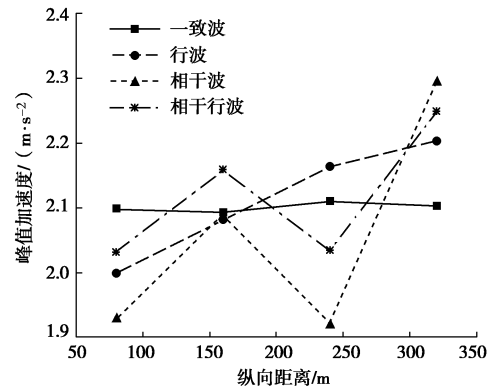


图 18 不同激励方式下衬砌顶部峰值加速度响应变化曲线
Fig. 18 Peak acceleration responses of lining top at different longitudinal distances under different waves

大, 这与一致波作用下较小的相对位移有关, 但仍应注意非一致波作用下的结构变形与一致波的巨大差异。对比不同非一致波作用下的响应发现, 非一致效应越显著, 隧道结构的相对变形越大。其原因在于地震波非一致效应导致结构不同部位变形不一致, 甚至在某些时刻会出现完全相反的变形趋势, 导致相对位移增大。因此, 对于长大型地下结构同样不能忽视地震动的空间变化性。

4 结 论

本文首先简述了基于功率谱、相干函数以及包络函数的多点相关的人工地震动合成方法, 研究了一致地震激励与非一致地震激励下精细化地下隧道模型的地震响应规律, 其中非一致地震激励包括在模型底部分别输入行波、相干波和相干行波, 得到以下 4 点结论。

(1) 在行波激励下, 随着纵向距离的增加, 产生的时滞现象越明显, 且隧道截面各个部位的加速度峰值整体均呈现递增趋势。另外, 在时域上, 纵向各个点间的波形基本一致, 但随着纵向距离的增加, 在多个时段的波峰峰值逐渐增大。

(2) 对于相干波和相干行波, 当纵向距离较小时, 地表及结构峰值加速度响应整体上小于一致波, 但随传播距离的增加, 在时域上表现出更为显著的空间变化性, 且会导致土体或结构的响应大于一致波作用下的响应。

(3) 在频域上, 非一致波作用下响应主频处幅值相比于一致波有所减小, 且主频右侧频段对应幅值增大。

(4) 在结构变形方面, 非一致波作用会引起隧道横截面内衬砌和横板产生更大的相对位移。其中行波作用下引起的相对位移变化较小, 而相干波和相干行波则可能引起衬砌拱顶拱底间、横板不同位置间的相对位移明显增大, 说明相干效应的影响更显著, 仅考虑行波效应是不够的。

由于实际场地条件较为复杂, 受行波效应、相干效应、衰减效应和局部场地效应的影响, 非一致地震波作用下的响应表现出一定的周期性和变化性, 可能与视波速的大小以及场地特性有关, 其一般性规律有待进一步探讨。还应注意到实际的盾构隧道是管片通过螺栓连接而成的柔性结构, 但本文采用了传统的匀质圆环模型, 加大了结构刚度。可以推测, 对于实际的柔性结构, 地震动空间效应对结构地震响应的影响会更加显著。因此, 在进行区域震害模拟以及长大型地下结构的抗震分析时, 应适当考虑地震动的空间效应, 采用更为合理的地震动输入方式。

参考文献:

- [1] IIDA H, HIROTO T, YOSHIDA N, et al. Damage to Daikai subway station[J]. *Soils & Foundations*, 1996, **36**: 283 - 300.
- [2] DOWDING C H, ROZAN A. Damage to rock tunnels from earthquake shaking[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 1978, **104**(2): 175 - 191.
- [3] JAYALAKSHMI S, RAGHUKANTH S T G. Regional ground motion simulation around Delhi due to future large earthquake[J]. *Natural Hazards*, 2016, **82**(3): 1 - 35.
- [4] YENIER E, ATKINSON G M. An equivalent point - source model for stochastic simulation of earthquake ground motions in California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2015, **105**(3): 1435 - 1455.
- [5] 屈铁军, 王前信. 空间相关的多点地震动合成(I)基本公式[J]. *地震工程与工程振动*, 1998, **18**(1): 8 - 15. (QU Tie-jun, WANG Qian-xin. Simulation of spatial correlative time histories of multi-point ground motion, part I: fundamental formulas[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1998, **18**(1): 8 - 15. (in Chinese))
- [6] 屈铁军, 王前信. 空间相关的多点地震动合成(II)合成实例[J]. *地震工程与工程振动*, 1998, **18**(2): 25 - 32. (QU Tie-jun, WANG Qian-xin. Simulation of spatial correlative time histories of multi-point ground motion, part II: application of fundamental formulas[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1998, **18**(2): 25 - 32. (in Chinese))
- [7] 杨庆山, 姜海鹏. 基于相位差谱的时-频非平稳人造地震动的反应谱拟合[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, **22**(1): 32 - 38. (YANG Qing-shan, JIANG Hai-peng. Generation of response-spectrum-compatible ground motions based on phase-difference spectrum[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, **22**(1): 32 - 38. (in Chinese))
- [8] WANG D, LI J. Physical random function model of ground motions for engineering purposes[J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2011, **54**(1): 175 - 182.
- [9] 夏友柏, 王年桥, 张尚根. 一种合成多点地震动时程的方法[J]. *世界地震工程*, 2002, **18**(1): 119 - 122. (XIA You-bai, WANG Nian-qiao, ZHANG Shang-gen. A simulation method for spatial correlative time histories of multi-point ground motion[J]. *World Earthquake Engineering*, 2002, **18**(1): 119 - 122. (in Chinese))
- [10] 吴祚菊. 空间相关性地震动生成及地下管线非一致性激励研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015. (WU Zuo-ju. Generation of Spatial Correlation Ground Motion and the Study of Inconsistency Motivation About Underground Pipeline[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015. (in Chinese))
- [11] GAO Yu-feng, WU Yong-xin, LI Bing. Simplified method for simulation of ergodic spatially correlated seismic ground motion[J]. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, 2011, **32**(10): 1297 - 1314.
- [12] 姚二雷, 苗雨, 陈超. 基于奇异值分解的空间变异地震动模拟[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2016, **44**(10): 22 - 25. (YAO Er-lei, MIAO Yu, CHEN Chao. Simulation of spatially varying ground motions based on singular value decomposition[J]. *Journal of Huazhong*

- University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, **44**(10): 22 - 25. (in Chinese))
- [13] 范立础, 王君杰, 陈 玮. 非一致地震激励下大跨度斜拉桥的响应特性[J]. 计算力学学报, 2001, **18**(3): 358 - 363. (FAN Li-chu, WANG Jun-jie, CHEN Wei. Response characteristics of long-span cable-stayed bridges under non-uniform seismic action[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001, **18**(3): 358 - 363. (in Chinese))
- [14] XIA H, HAN Y, ZHANG N, et al. Dynamic analysis of train-bridge system subjected to non-uniform seismic excitations[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, **35**(12): 1563 - 1579.
- [15] SURH H B, RYU T Y, PARK J S, et al. Seismic response analysis of a piping system subjected to multiple support excitations in a base isolated NPP building[J]. Nuclear Engineering and Design, 2015, **292**: 283 - 295.
- [16] 杨庆山, 刘文华, 田玉基. 国家体育场在多点激励作用下的地震反应分析[J]. 土木工程学报, 2008, **41**(2): 35 - 41. (YANG Qing-shan, LIU Wen-hua, TIAN Yu-ji. Response analysis of national stadium under specially variable earthquake ground motions[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, **41**(2): 35 - 41. (in Chinese))
- [17] 陈健云, 林 皋. 多点输入随机地震动拱坝—地基体系反应分析[J]. 世界地震工程, 2000, **16**(3): 39 - 43. (CHEN Jian-yun, LIN Gao. Random response analysis of arch dam-foundation system subjected to multi-input seismic excitation[J]. World Earthquake Engineering, 2000, **16**(3): 39 - 43. (in Chinese))
- [18] 田 利, 李宏男. 多维多点地震动激励下折线型输电塔线体系反应分析[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(增刊 1): 131 - 135. (TIAN Li, LI Hong-nan. Seismic response of fold linear type transmission tower-line system under multi-component multi-support excitations[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(S1): 131 - 135. (in Chinese))
- [19] HARICHANDRAN R S, HAWWARI A, SWEIDAN B N. Response of long-span bridges to spatially varying ground motion[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, **122**(5): 476 - 484.
- [20] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of Structures[M]. New York: McGraw Hill, 1993.
- [21] JENNINGS P C, HOUSNER G W, TSAI N C. Simulated Earthquake Motions[R]. Pasadena: California Institute of Technology, 1968.
- [22] 庄海洋, 陈国兴, 梁艳仙, 等. 土体动非线性黏弹性模型及其 ABAQUS 软件的实现[J]. 岩土力学, 2007, **28**(3): 436 - 442. (ZHUANG Hai-yang, CHEN Guo-xing, LIANG Yan-xian, et al. A developed dynamic viscoelastic constitutive relations of soil and implemented by ABAQUS software[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(3): 436 - 442. (in Chinese))