

王笃国, 贾其军, 尤红兵, 翟奋楼, 薛齐齐, 喻烟, 2020. 内马铁路一期工程局部不规则二维场地地震反应分析. 震灾防御技术, 15 (4): 708—717. doi: 10.11899/zfy20200405

# 内马铁路一期工程局部不规则 二维场地地震反应分析<sup>1</sup>

王笃国<sup>2)</sup> 贾其军<sup>1)</sup> 尤红兵<sup>2)</sup> 翟奋楼<sup>3)</sup> 薛齐齐<sup>3)</sup> 喻烟<sup>4)</sup>

1) 中国路桥工程有限责任公司, 北京 100011

2) 中国地震灾害防御中心, 北京 100029

3) 北京市计算中心, 北京 100101

4) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

**摘要** 基于内马铁路一期工程地质资料, 利用 ABAQUS 有限元软件建立某局部不规则二维场地有限元计算模型, 利用 Python 语言进行二次开发, 编制二维等效线性化计算程序。开展 50 年超越概率 63%、10% 和 2% 水准下的土层地震反应分析计算, 对不规则地形不同位置处的地震动峰值加速度和频谱特性进行对比分析。研究表明, 不规则地形对地震动特性的影响显著。本文研究结果对内马铁路一期工程地震动参数确定具有指导意义, 同时可为跨越不规则地形工程结构抗震设计提供参考。

**关键词:** 铁路工程 二维等效线性化 不规则地形 地震动参数 土层反应

## 引言

肯尼亚内罗毕至马拉巴新建标轨铁路一期工程(以下简称“内马铁路一期工程”)位于非洲东部, 全线位于东非高原区, 线路横跨埃塞俄比亚-肯尼亚裂谷肯尼亚段, 是世界最大的断层陷落带, 沿线地势高低起伏较大, 第四系覆盖层较厚。本工程所在区域地震地质条件复杂, 研究基础薄弱, 铁路跨越多个不规则局部地形, 需开展专题研究确定场地地震动参数。

局部不规则地形、土层分布不均匀性是影响地表地震动的重要因素, 对该问题的研究一直是地震工程领域备受关注的课题。工程上通常采用一维等效线性化方法确定水平成层场地地震动参数, 但对于地形起伏较大的场地, 仅进行一维地震反应分析是远远不够的, 需采用二维或三维模型(Kamiyama 等, 2002; 车伟等, 2008)进行研究。战吉艳等(2013)采用 ABAQUS 有限元软件, 利用修正 Martin-Seed-Davidenkov 黏弹性动力本构模型, 研究了横向不均匀深厚软土场地非线性地震效应; 赖强林等(2014)研究了复杂 V 型谷地一维模型与二维模型地震动参数的差异; 王永幸等(2015)和杨笑梅等(2017)分别给出了二

**1 基金项目** 地震科技星火计划项目(XH18060); 北京市科委重大科技研发攻关项目(Z181100003918005); 北京市科学技术研究院创新团队计划(IG201506C2)

**[收稿日期]** 2020-05-20

**[作者简介]** 王笃国, 男, 生于 1979 年。博士, 正高级工程师。主要从事岩土工程与地震工程科研工作。E-mail: wangduguo@163.com

维土层地震反应分析频域、时域等效线性化解法。上述研究均认为，对于复杂不规则或横向不均匀场地，采用二维非线性模型能得到更合理的地震动参数。基于此，针对内马铁路一期工程某典型局部不规则场地，利用 ABAQUS 有限元软件建立二维场地计算模型，利用 Python 语言进行二次开发，采用等效线性化方法进行土层地震反应分析计算，得到场地地震响应，并探讨二维不规则地形地震动分布规律，为内马铁路一期工程抗震设防提供科学依据。

## 1 工程概况与地震动输入

### 1.1 工程概况

拟分析的局部不规则地形工程场地位于东非大裂谷西翼山区，第四系覆盖层较厚，达 80—100m，基岩以第四系玄武岩、凝灰岩为主。根据已有工程地质资料，确定工程地质剖面图如图 1 所示，水平向长 90m，竖向深 100m。

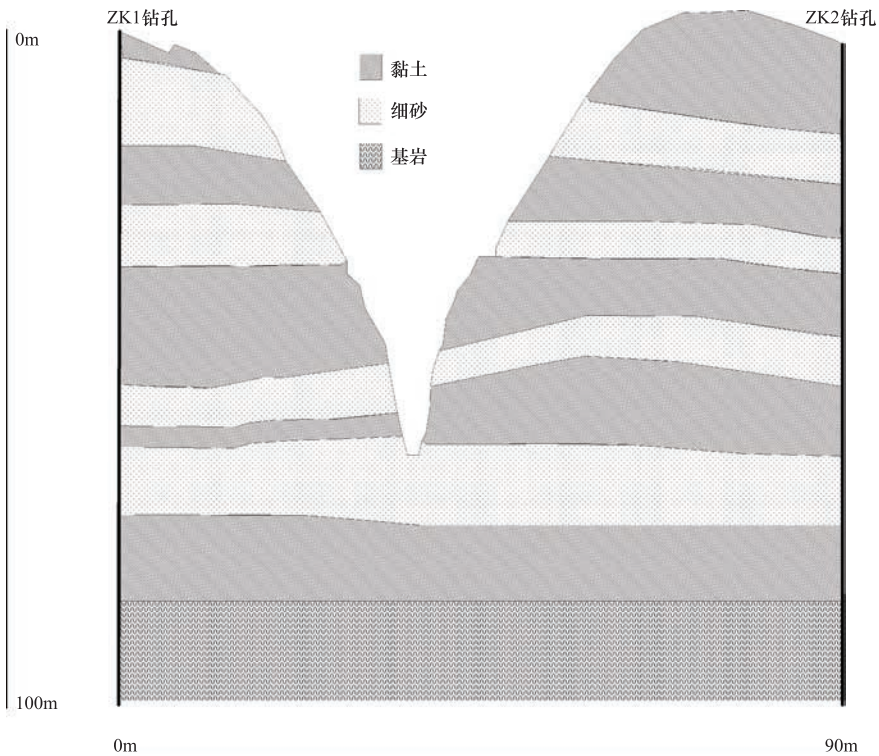


图 1 工程地质剖面图

Fig. 1 Engineering geological profile

将工程场地各钻孔土层资料进行整理，可知该场地土体类别主要为黏土和细砂，钻孔 ZK1 与 ZK2 土体类型和各项参数（陆鸣等，2016）分别见表 1 和表 2，其中土层沿浅部至深部依次进行编号，动三轴序号为 10 的土体为计算基底，其剪切模量比通常取 1.0，阻尼比取 0.05。

表 1 ZK1 钻孔土层分布资料

Table 1 Soil layer distribution data of ZK1 borehole

土层编号	土性描述	动三轴序号	层厚/m	波速 $V_s/m \cdot s^{-1}$	密度/ $kg \cdot m^{-3}$
1	黏土	1	3.5	191	2100
2	细砂	6	4.5	171	2050
3	细砂	6	4.5	182	2050
4	细砂	6	4.8	223	2050
5	黏土	2	4.2	249	2100
6	黏土	2	4.2	277	2100
7	细砂	7	4.6	284	2050
8	细砂	7	5.1	345	2050
9	黏土	3	6.0	341	2100
10	黏土	3	6.0	373	2100
11	黏土	3	6.0	409	2100
12	细砂	8	6.8	434	2050
13	黏土	4	2.5	445	2100
14	细砂	9	5.5	455	2050
15	细砂	9	5.5	475	2050
16	黏土	5	4.7	508	2100
17	黏土	5	5.0	534	2100
18	黏土	5	5.0	568	2100
19	计算基底	10	—	584	2200

表 2 ZK2 钻孔土层分布资料

Table 2 Soil layer distribution data of ZK2 borehole

土层编号	土性描述	动三轴序号	层厚/m	波速 $V_s/m \cdot s^{-1}$	密度/ $kg \cdot m^{-3}$
1	黏土	1	4.0	192	2100
2	黏土	1	5.0	209	2100
3	黏土	1	5.0	232	2100
4	细砂	6	3.5	253	2050
5	细砂	6	4.0	274	2050
6	黏土	2	4.0	275	2100
7	黏土	2	4.5	289	2100
8	细砂	7	5.5	345	2050
9	黏土	3	4.5	337	2100
10	黏土	3	4.8	362	2100
11	细砂	8	4.0	382	2050
12	细砂	8	4.0	418	2050

续表

土层编号	土性描述	动三轴序号	层厚/m	波速 $V_s/m \cdot s^{-1}$	密度/ $kg \cdot m^{-3}$
13	黏土	4	5.0	441	2100
14	黏土	4	5.0	477	2100
15	细砂	9	5.5	507	2050
16	细砂	9	5.0	523	2050
17	黏土	5	5.5	547	2100
18	黏土	5	6.0	569	2100
19	计算基底	10	—	590	2200

场地 9 种不同层位土体剪切模量和阻尼比随剪应变变化曲线（陆鸣等，2016）如图 2 所示，图中土样编号 1—9 分别对应表 1 和表 2 中动三轴序号 1—9，为不同土类不同深度土样动三轴试验结果。

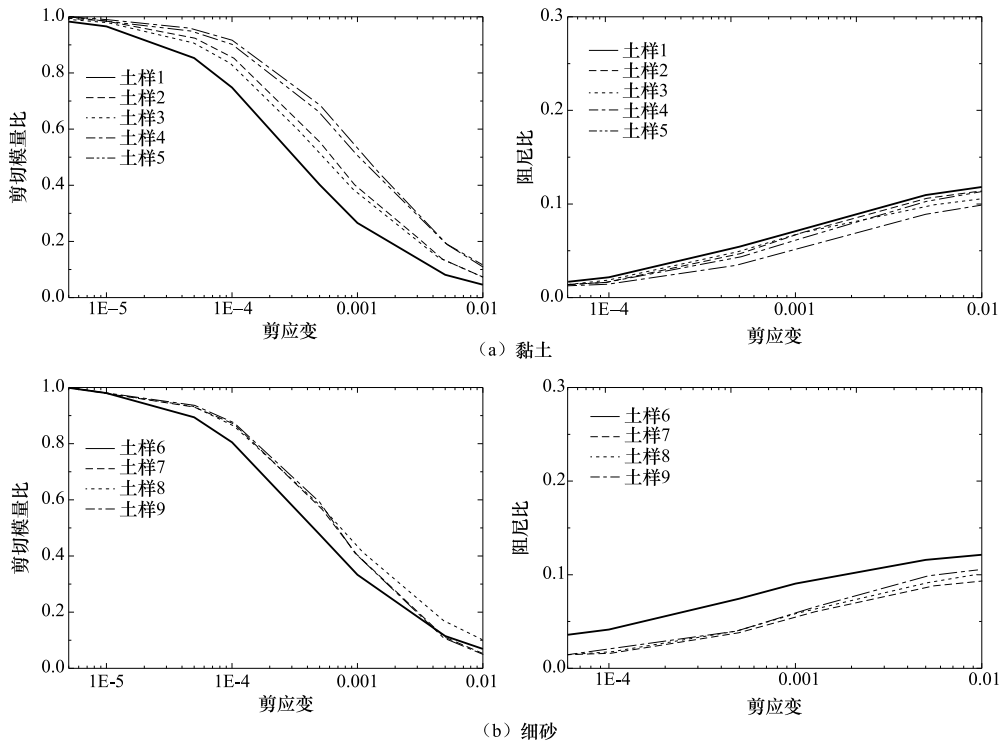


图 2 9 种土层剪切模量和阻尼比随剪应变变化曲线

Fig. 2  $G/G_{max} \sim \gamma$  and  $D \sim \gamma$  curves for 9 representative soil specimens

## 1.2 地震动输入

假定地震动为垂直入射，取值参考《肯尼亚内罗毕-马拉巴铁路 CK0-CK120 段地震危险性分析报告》（陆鸣等，2016），工程场地 50 年超越概率 63%、10% 和 2% 的水平向基岩加速度反应谱如图 3 所示，每个概率水准下拟合 3 条人工地震动时程样本，拟合谱和目标谱周期控制点

上的误差不超过 5%，50 年超越概率 63% 水准下的 3 条人工地震动时程样本曲线如图 4 所示。

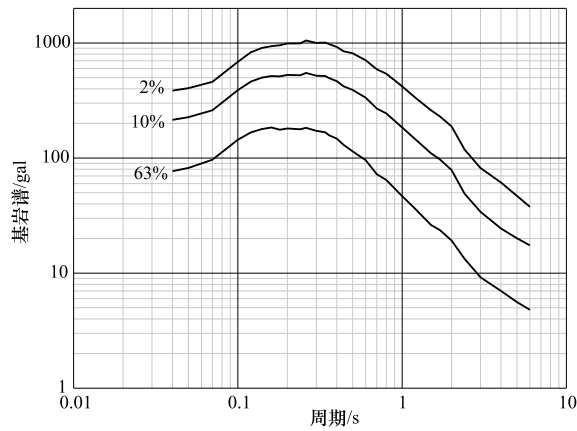


图 3 50 年不同超越概率下水平向基岩加速度反应谱（阻尼比为 5%）

Fig. 3 Acceleration response spectrum for rock site with different exceedance probabilities in 50 years (damping ratio 5%)

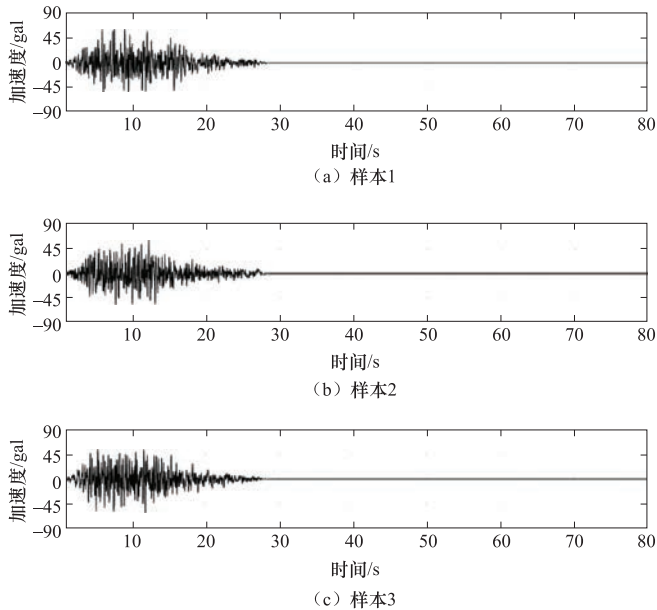


图 4 50 年超越概率 63% 水准下的 3 条人工地震动时程样本曲线

Fig. 4 Acceleration response history curves for rock site with 63% probability of exceedance in 50 years

## 2 二维等效线性化模型

### 2.1 二维等效线性化方法

本文采用等效线性化模型描述场地非线性特性，二维模型等效剪应变取值采用王笃国等

(2016) 给出的方法。二维计算模型示意如图 5 所示, 计算区域包括水平成层介质区和不规则地形区, 计算区域两侧设置黏弹性人工边界, 基岩基底为水平向。采用时域等效线性化方法进行计算, 阻尼矩阵的选取采用 Park 等 (2004) 给出的完整 Rayleigh 阻尼公式, 即  $[C]=\alpha[M]+\beta[K]$ , 目标频率  $f$  的选取参考马俊玲等 (2013) 的研究结果, 采用第 1 阶和第 3 阶自振频率, 阻尼系数  $\alpha$  和  $\beta$  取值公式为:

$$\alpha = 2\zeta \left( \frac{\omega_1 \omega_3}{\omega_1 + \omega_3} \right), \quad \beta = 2\zeta \left( \frac{1}{\omega_1 + \omega_3} \right) \quad (1)$$

式中,  $\zeta$  为土体阻尼比;  $\omega_1=2\pi f_1$ ;  $\omega_3=2\pi f_3$ ;  $f_1$  和  $f_3$  可由下式求得:

$$f_n = \frac{v_{\text{seq}}}{4H} (2n-1), \quad v_{\text{seq}} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N (h_i / v_{si})} \quad (2)$$

式中,  $n$  分别取值 1 和 3;  $h_i$  为第  $i$  层土体厚度;  $v_{si}$  为第  $i$  层土体剪切波速;  $H = \sum_{i=1}^N h_i$ 。

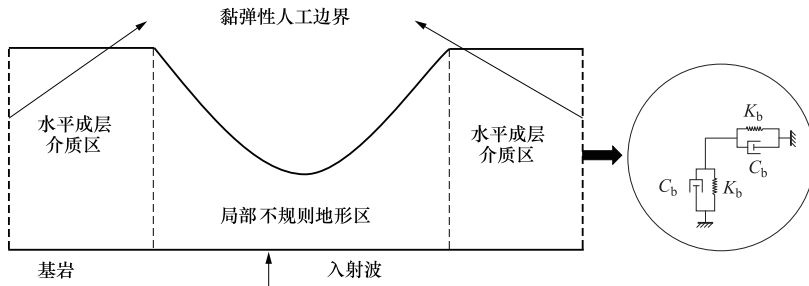


图 5 二维模型计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram for two dimensional simulation model

计算时对每个单元剪切模量和阻尼比与上次迭代计算结果进行对比, 所有单元误差均小于 5% 时停止迭代, 进行二维线弹性场地地震反应分析计算, 得到场地地震响应。

## 2.2 人工边界地震动输入

计算区域两侧采用黏弹性人工边界, 地震动输入时需将波动输入转换为等效荷载施加在人工边界上, 并保证人工边界上的位移和应力与原自由场相同。本文采用刘晶波等 (1998) 给出的边界节点等效荷载计算公式:

$$p(t) = \sigma(x, y, z, t) + c\dot{u}(x, y, z, t) + ku(x, y, z, t) \quad (3)$$

式中,  $p(t)$  为边界点处等效荷载;  $\sigma(x, y, z, t)$ 、 $\dot{u}(x, y, z, t)$  和  $u(x, y, z, t)$  分别为边界点处自由场求解得到的应力、速度和位移;  $c$  和  $k$  分别为黏弹性人工边界法向和切向弹簧阻尼系数, 求解方法参见刘晶波等 (1998)。

自由场求解采用一维等效线性化方法, 一维计算模型可由计算区域两侧水平成层介质区得到。求得计算区域两侧自由场地地震响应后, 根据式 (3) 可得到等效荷载, 将等效荷载分别施加于两侧人工边界, 实现黏弹性人工边界地震动输入。

## 2.3 场地有限元模型建立

利用 ABAQUS 有限元软件建立模型, 采用 Springs/Dashpots 单元对黏弹性边界进行模拟, Springs/Dashpots 单元为弹簧阻尼器单元, 切向刚度  $K_{bT}=0.5G/R$ , 法向刚度  $K_{bN}=G/R$ , 切向阻

尼系数  $C_{bT}=\rho v_s$ ，法向阻尼系数  $C_{bN}=\rho v_p$ ，其中  $G$  为自由场不同土层等效线性化计算得到的等效剪切模量， $R$  近似取不规则地形中心点到人工边界点的距离， $v_s$  和  $v_p$  分别为自由场不同土层等效线性化计算得到的剪切波波速和压缩波波速。土体单元大部分采用四边形平面应变单元 CPE4R 进行模拟，极少部分采用三角形平面应变单元 CPE3 进行模拟，本次计算剖面单元总数为 33096 个，节点总数为 36369，长度、宽度方向单元尺寸基本小于 1m。利用 Python 语言进行二次开发，实现了二维等效线性化方法的迭代算法，本次计算采用隐式 H.H.T 法求解动力方程，有限元模型如图 6 所示，图中 L1、L2、L3、R1、R2、R3 为不规则地形不同位置处计算点，模型尺寸为 375m×88m（长×宽）。

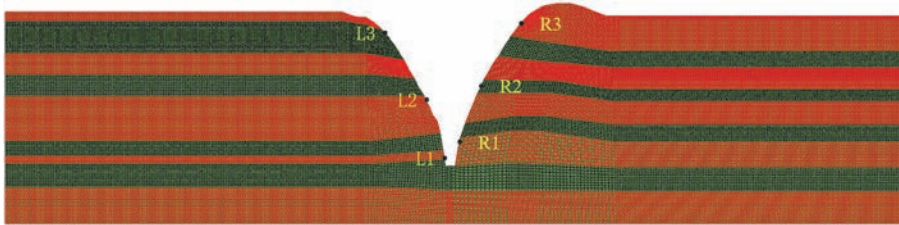


图 6 二维场地有限元模型

Fig. 6 Two dimensional FEM site model

### 3 计算结果与分析

在 50 年超越概率 63%、10% 和 2% 水准下，取每个概率水准 3 条时程样本开展场地土层地震反应计算（共 9 种工况），分析峰值加速度和频谱特性，探讨局部不规则地形地震动分布规律。

#### 3.1 峰值加速度

6 个计算点 50 年超越概率 63%、10% 和 2% 水准下地震动峰值加速度计算结果见表 3。

表 3 6 个计算点 50 年超越概率 63%、10% 和 2% 水准下地震动峰值加速度（单位：gal）

Table 3 Peak ground motions for 6 points with 63%、10% and 2% probabilities of exceedance in 50 years (Unit: gal)

计算点	工况									
	50 年超越概率 63%			50 年超越概率 10%			50 年超越概率 2%			
	样本 1	样本 2	样本 3	样本 1	样本 2	样本 3	样本 1	样本 2	样本 3	
左侧	L1	-58.5	57.4	-61.1	144.5	154.0	151.1	-243.0	237.9	-245.3
	L2	-61.1	-62.6	-65.6	-158.2	-165.3	164.0	255.4	-249.2	-253.8
	L3	68.3	-67.9	76.1	-172.2	-176.1	174.9	-278.6	264.7	-272.0
右侧	R1	-63.7	-64.6	-62.7	158.2	-168.4	164.6	-250.2	255.6	254.0
	R2	-67.4	72.6	-66.1	165.4	-173.7	176.3	-255.6	-268.4	-263.6
	R3	81.5	82.9	-80.7	181.7	198.6	192.4	286.4	-283.5	-288.8

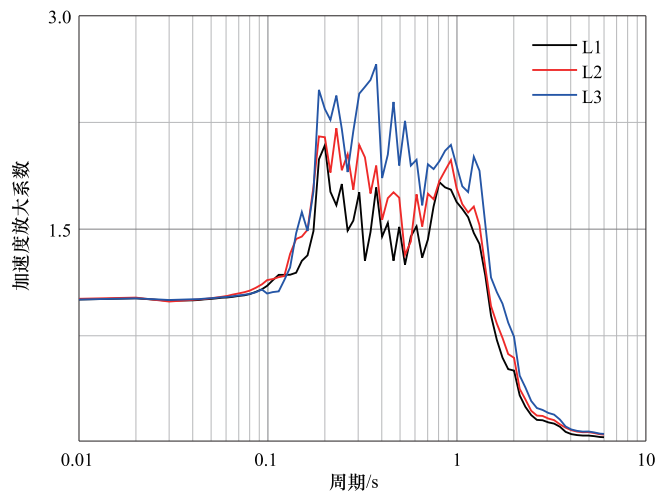
由表 3 可知，同一工况下不同位置处地震动峰值加速度存在一定变化，底部峰值加速度较小，顶部峰值加速度较大，总体呈越靠近顶部峰值加速度越大的趋势；以底部峰值加



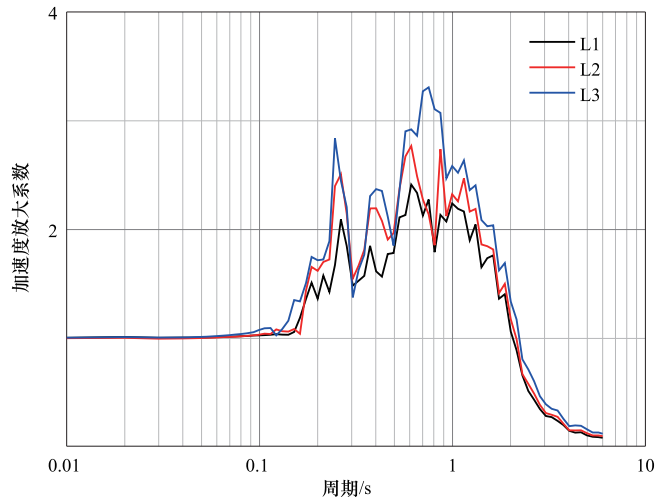
速度为基准点，50 年超越概率 63%、10% 和 2% 水准下的顶部峰值加速度放大系数分别为 1.24—1.30、1.14—1.19 和 1.11—1.15，表明随着地震动输入强度的增加，放大系数呈略减小的趋势。

### 3.2 频谱特性

50 年超越概率 63%、10% 和 2% 水准下不同位置处地震动加速度放大系数谱如图 7 所示，限于篇幅问题，本文仅给出不规则地形左侧 L1、L2 和 L3 计算点每个水准下 1 条样本时程计算结果。由图 7 可知：(1) 3 个工况下的地震动加速度放大系数谱均呈双峰或多峰特性；(2) 同一概率水准下不同位置处的地震动加速度放大系数谱形存在一定差异，总体上看，顶部计算点长周期段地震动加速度放大系数较大。



(a) 50年超越概率63%

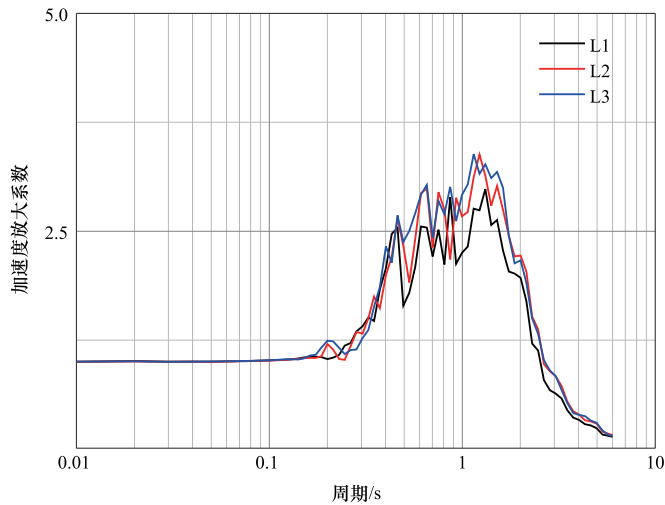


(b) 50年超越概率10%

图 7 不规则地形左侧不同位置处地震动加速度放大系数谱（阻尼比为 5%）（一）

Fig. 7 Acceleration amplification factor spectrum for different positions in left side of irregular topography (damping ratio 5%)





(c) 50年超越概率2%

图7 不规则地形左侧不同位置处地震动加速度放大系数谱(阻尼比为5%) (二)

Fig. 7 Acceleration amplification factor spectrum for different positions in left side of irregular topography (damping ratio 5%)

## 4 结论

基于内马铁路一期工程某局部不规则地形工程地质资料,利用 ABAQUS 有限元软件建立二维场地有限元模型,利用 Python 语言进行二次开发,实现二维等效线性化方法的迭代算法,共进行 3 个概率水准、9 种工况下的土层反应计算,得出以下结论:

(1) 不规则地形不同位置处地震动峰值加速度存在一定差异,通常情况下顶部峰值加速度高于底部,且随着地震动输入强度的增大,加速度放大系数呈略减小的趋势,50 年超越概率 63%、10% 和 2% 水准下的顶部峰值加速度放大系数分别为 1.24—1.30、1.14—1.19 和 1.11—1.15。

(2) 不规则地形不同位置处地震动放大系数谱呈双峰或多峰特性,但谱形有所不同,主要体现在长周期段放大效应不同,顶部计算点长周期段地震动加速度放大系数较大。

本文给出的结果为内马铁路一期工程确定抗震设防要求提供了科学依据,同时可为类似跨越局部不规则地形工程结构地震动参数的确定提供参考。

## 参考文献

- 车伟,罗奇峰,2008.复杂地形条件下地震波的传播研究.岩土工程学报,30(9):1333—1337.
- 赖强林,杨笑梅,2014.复杂 V 型谷地条件下地震动数值模拟的比较.地震工程与工程振动,34(S1):41—46.
- 刘晶波,吕彦东,1998.结构-地基动力相互作用问题分析的一种直接方法.土木工程学报,31(3):55—64.
- 陆鸣,李小军,周正华等,2016.肯尼亚内罗毕至马拉巴铁路 CK0-CK120 段地震危险性分析.北京:中国地震局地壳应力研究所,96—104.

- 马俊玲, 丁海平, 2013. 土层地震反应分析中不同阻尼取值的影响比较. 防灾减灾工程学报, **33** (5): 517—523, 547.
- 王笃国, 赵成刚, 2016. 地震波斜入射时二维成层介质自由场求解的等效线性化方法. 岩土工程学报, **38** (3): 554—561.
- 王永幸, 杨仕升, 高鹏飞, 2015. 基于等效线性化的二维地震反应分析研究. 广西大学学报(自然科学版), **40** (3): 692—698.
- 杨笑梅, 赖强林, 2017. 二维土层地震反应分析的时域等效线性化解法. 岩土力学, **38** (3): 847—856.
- 战吉艳, 陈国兴, 刘建达等, 2013. 远场大地震作用下大尺度深软场地的非线性地震效应分析. 岩土力学, **34** (11): 3229—3238.
- Kamiyama M., Satoh T., 2002. Seismic response analysis of laterally inhomogeneous ground with emphasis on strains. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**(9—12): 877—884.
- Park D., Hashash Y. M. A., 2004. Soil damping formulation in nonlinear time domain site response analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, **8**(2): 249—274.

## Two Dimensional Seismic Response Analysis for Local Irregular Site of Nairobi-Malaba Railway

Wang Duguo<sup>2)</sup>, Jia Qijun<sup>1)</sup>, You Hongbing<sup>1)</sup>, Zhai Fenlou<sup>3)</sup>, Xue Qiqi<sup>3)</sup> and Yu Yan<sup>4)</sup>

1) China Road & Bridge Corporation, Beijing 100011, China

2) China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China

3) Beijing Computing Center, Beijing 100101, China

4) The Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

**Abstract** Based on the engineering geological data, an irregular local 2D FEM soil site model was established by using Abaqus Software. Then, 2D equivalent linear simulation program was coded by Python language. Through input motions with 63%、10% and 2% probabilities of exceedance in 50 years, 2D site response analysis was conducted, and the peak ground acceleration and frequency-spectrum characteristics for different positions located at irregular topography with different exceeding probabilities was compared and analyzed. Results show that local irregular topography greatly affects the characteristics of ground motion. The research results can be applied to derive the earthquake design parameters for Nairobi-Malaba railway, and can be referred to anti-seismic design of engineering structures crossing irregular topography.

**Key words:** Two dimensional equivalent linearization; Irregular topography; Earthquake ground motion parameters; Site response