

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.09.009

# 场地条件对西昌昔格达组三维地基地震动响应

陈积普<sup>1</sup>, 徐则民<sup>1</sup>, 张家明<sup>1</sup>, 刘文连<sup>2</sup>

(1. 昆明理工大学 土木系, 昆明 650500; 2. 中国有色金属工业昆明勘察设计研究院, 昆明 650051)

**摘要:**为查明场地结构和填挖分布对西昌昔格达组沉积地层三维地基地震动响应规律的影响,利用有限元软件模拟了地震作用下 2 个三维计算模型表面的加速度分布情况。从场地平台结构、标高突变和填挖分区 3 个方面讨论地基地震动响应差异。研究表明:场地平台标高越高, 垂直方向加速度放大系数变化越显著;标高突然增大引起垂直方向加速度放大系数骤增,向平台内侧延伸,加速度放大系数有减小的趋势;填方区加速度放大系数大于挖方区;地震动响应的地形放大效应应具有方向性,数值分析应该采用三维计算模型。研究结果为西昌昔格达组地层场地地基方案比选和抗震设计提供重要依据。

**关键词:**昔格达组;三维地基;场地条件;加速度放大系数

**中图分类号:**TU475

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2014)09-068-09

## Seismic response of site conditions to Xigeda formation of Xichang three-dimensional subgrade

CHEN Jipu<sup>1</sup>, XU Zemin<sup>1</sup>, ZHANG Jiaming<sup>1</sup>, LIU Wenlian<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650550, China; 2. Kunming Prospecting Design Institute of China Nonferrous Metals Industry, Kunming 650051, China)

**Abstract:** In order to find out the effect of site structure and distribution of cut-fill area on the seismic responses rules of Xigeda formation three-dimensional subgrade in Xichang, finite element method software is used to simulate the acceleration distribution on the surface of three-dimensional calculation models under seismic load. This paper discusses differences of subgrade seismic response from three aspects, including platform structure of the site, elevation mutation, and excavation and filling area. And there are four conclusions can be drawn. Firstly, the higher the elevation sites platform is, the greater the acceleration amplification factors are, especially in the changes of vertical acceleration amplification factors. Secondly, a sudden increase of elevation causes a sudden increase of vertical acceleration magnification factors, and acceleration amplification factors is getting smaller while extending to the platform inside. Thirdly, the acceleration amplification factors of filled area are greater than those of the excavation area. Fourthly, because terrain amplification of the seismic response is directional, three-dimensional calculation models should be used to numerical analysis. The results provide an important basis for the Xigeda subgrade base plan selection in Xichang and seismic design.

**Key words:** Xigeda formation; three-dimensional subgrade; site condition; acceleration amplification factors

**收稿日期:**2014-07-19

**基金项目:**国家自然科学基金项目-云南联合基金重点项目(U1033601);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20135314110005)

**作者简介:**陈积普(1981-),男,博士研究生,主要从事岩土力学及数值模拟研究,(E-mail)cip836@163.com。

在我国西南攀西地区汉源、攀枝花、盐源、布拖之间面积约 4 万  $\text{km}^2$  的范围内为广泛分布的昔格达地层。昔格达地层作为半成岩河湖相沉积地层,形成过程复杂多样、工程性质较差。攀西地区矿产、水利资源丰富,金属矿产尤其铁矿储量约达 60 多亿 t,是我国第二大铁矿基地;金沙江、雅砻江、安宁河水力蕴藏巨大,为攀西地区钢铁和冶金提供了雄厚的条件;加之航天、交通等工业和国防建设活动,昔格达地层往往成为这些大型工程建设项目的建设场地。另外,攀西地区地质构造受控于攀西裂谷和凉山褶皱带,地震频繁且烈度较大,地震作用下场地安全性较差。因此,开展昔格达地层场地条件地震动响应研究具有重要的工程意义。

工程地震学研究中,场地条件是指场址区的工程地质条件,主要包括场址的地形地貌、岩土体组成与性质、地质构造与水文地质条件等。研究表明,场地条件对地震动响应主要基于震害调查的目视解释、解析、数值分析和物理实验等方法。相关学者对该领域的研究进展做了综述和评价<sup>[1]</sup>,由于波动问题的复杂性,该领域一直是地震工程研究的热点。一些学者<sup>[2-3]</sup>探讨了 P 波和 SV 波在圆弧冲积河谷中的散射效应;Fishman<sup>[4]</sup>研究了 SH、P 和 SV 波对冲积河谷的地震动响应;荣棉水<sup>[5]</sup>分析了平台地形对地震地面运动周期值的影响;杜永军<sup>[6]</sup>研究了等腰三角形与半圆形凸起地形对 SH 波的地震动响应机制。由于昔格达组地层是一种特殊的沉积地层,1964 年日本新潟地震、1974 年秘鲁地震和 1985 年墨西哥 Michoacan 地震都表明沉积地层的地震动异常强烈<sup>[4]</sup>。赵成刚<sup>[7]</sup>和刘洪兵<sup>[8]</sup>的研究表明,分析地形对地震动影响时,应考虑三维效应,否则可能低估地形对地震动的影响。由于场地条件较复杂,受地震波的散射和波形转换的影响,解析法具有较大的局限性,数值法可以弥补这一缺陷,并且可以对不同方向地震波耦合影响场地地震动进行模拟。

目前,对昔格达组沉积地层三维地基的地震动响应研究相对匮乏,文中依托攀西西昌钒钛钢铁新基地地基工程项目,利用 ANSYS 有限元软件分析场地地基在 2 种填筑方案(文中以 FA1 和 FA3 表示)下的地震动响应规律,探讨昔格达三维地基场地结构微地貌和填挖分区对地震动响应的影响。

## 1 工程概况

攀钢西昌钒钛钢铁新基地场区位于西昌以南约 18 km 处安宁河左岸阶地,距河道中心约 2 km。受安宁河断裂、则木河断裂以及大凉山褶皱带影响,地壳活动频繁,区域稳定性较差。为适应工业生产的需求,场地进行了大规模开挖与填筑,场区原始地表形态和 FA1、FA3 场地结构图如图 1 所示。FA1 共填筑形成 8 个平台并以标高表示。FA1 填筑方案中,场地东北端 1 610、1 590、1 560 3 个平台尺寸为 285.3 m $\times$ 148.7 m、385.8 m $\times$ 150.4 m 和 385.8 m $\times$ 149.1 m;1 532 南、北段及 1 555 平台尺寸分别为 1 486.3 m $\times$ 321.1 m、1 015.9 m $\times$ 300.1 m、442 m $\times$ 166.9 m;场地最大平台 1 516 尺寸为 3 213.6 m $\times$ 836.8 m。FA3 相对 FA1 场地形态更为复杂,共切割填筑形成 11 个平台,场区中部由单一平台划分出 1 506、1 525、1 512 3 个平台,其尺寸为 450.7 m $\times$ 155.2 m、1 246.3 m $\times$ 836.8 m、1 967.3 m $\times$ 836.8 m;原 1 555 平台部分标高降低形成 1 542 平台,尺寸为 190 m $\times$ 175.6 m,其他平台尺寸不变。

不同平台之间以直立挡土墙或上部 1:1.5 放坡、下部挡土墙护坡方式衔接。挡土墙采用 C20 混凝土等截面方式浇筑,墙宽 2.0 m,计算过程中挡土墙容重、弹性模量和泊松比分别取 25  $\text{kN/m}^3$ 、 $2 \times 10^4$  MPa 和 0.2。由于场地原地貌起伏,造成地基填挖高度较大,图 2 给出了 2 个方案的填挖方分布情况。FA1 方案中,1 516 平台最大挖方深度达 90 m,位于平台东北侧罗家山挖方区;最大填方高度为 35 m,位于平台西南侧山谷地段。1 532 平台受 1 555 平台山体和多个冲沟控制,出现填挖交替状况,最大填方高度 36 m,最大挖方高度为 38 m。FA2 方案由于平台细化,填挖高度有所降低,中部平台最大挖深 81 m,最大填高 31 m,其他区域填挖高度与 FA1 相仿。

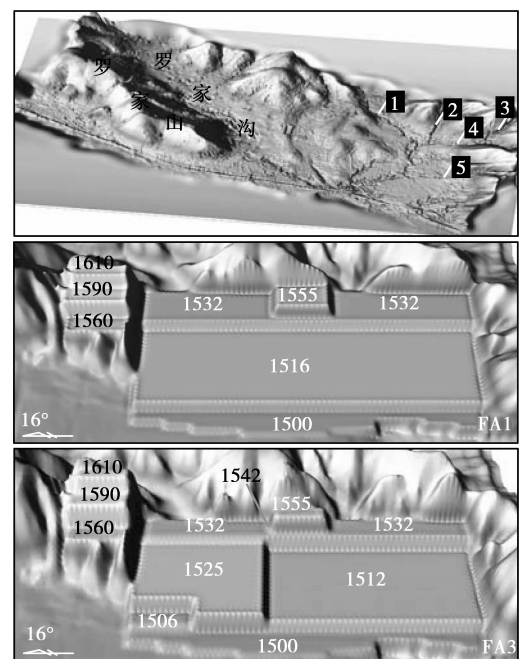
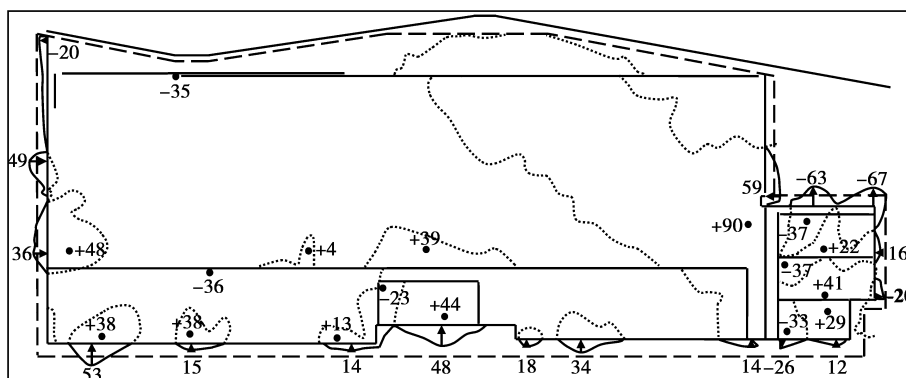
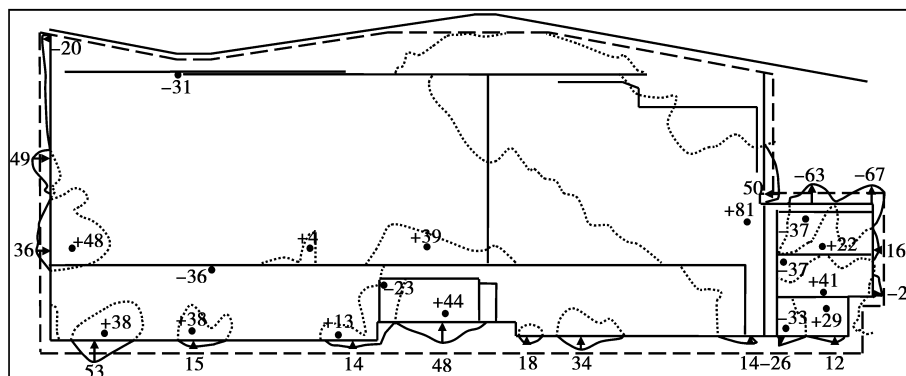


图 1 场地原始表面形态及三维地基结构图



(a) FA1填挖分布



(b) FA3填挖分布

注:●-18填方边坡高度 ●+50挖方边坡高度 ▲-36局部最大填方高度 ▼44局部最大挖方深度 虚线:填完分界

图 2 场地填挖分布图(单位:m)

## 2 计算模型

### 2.1 模型范围

地勘报告(中国有色金属工业昆明勘察设计研究院)显示场区地层复杂,昔格达地层呈薄层状相互交织,鉴于介质参数对地层单元类型指示性差而与地基深度依存关系较好,考虑到模型规模、地层单元复杂性以及建模精度等问题,在建模过程中将昔格达视为经历了卸荷过程的均质地层,不以年代地层单元为单位而以地基深度进行概化分层建模。自地表向下每 10 m 分一层,分别以 0~10 m、10~20 m、20~30 m 和大于 30 m 分为 4 层。从场区最低标高 1 480 m 向下 30 m,即 1 450 m 标高处作为模型底部边界,模型总高差为 150 m。填方区考虑腐殖土开挖的影响,其计算高度从地表下 1 m 处算起。

为克服边界效应,2 个方案计算模型均自挖方边坡开口线起长、短边分别外推 100 m 和 30 m,最终场区计算平面长 3 960.2 m、宽 1 622.84 m,面积达 6.43 km<sup>2</sup>。模型单元一般采用八节点六面体,局部区域采用四节点四面体。如图 3 所示,FA1 模型单元数为 476 340 个,节点数为 142 015 个;FA3 分别为 516 772 个单元和 131 019 个节点。2 种方案的模型采用相同的边界条件,底部设置为竖向固定、水平自由边界,四周边界施加法向链杆约束,上表面为自由边界。

### 2.2 输入地震波与介质参数

根据场地地震安全性评价报告(四川赛思特科技有限责任公司,2007),地震波选取如图 4 所示的人工波(设计基准期 50 a,发生概率 10%,加速度峰值 0.25 g)作为计算的基岩

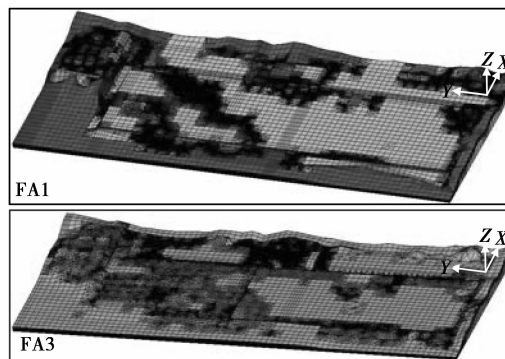


图 3 计算模型

输入地震动,计算时步 $\Delta t=0.02$  s。计算时从模型底部同时向3个方向输入地震波并对竖向地震波峰值加速度按2/3折减(0.166 6 g)。根据场地勘察报告和场地昔格达土工程特性试验报告(四川大学水利水电学院,2008)提供的土体参数,为体现场地地层组特点并结合建模方式,模型每层介质参数按分层内所有地层参数数学平均值选取。文中计算采用线弹性模型,介质参数如表1所示。

表1 场地计算参数

深度/m	动弹模/MPa	动泊松比	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
填体	347	0.46	19.0
0-10	312	0.46	
10-20	942	0.44	19.5
20-30	1 531	0.43	
30~模型底部	2 245	0.42	

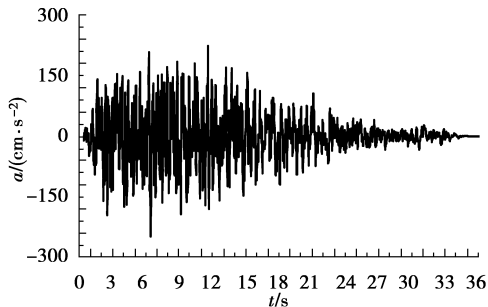


图4 输入加速度时程

### 3 计算结果与分析

计算获得了2个计算模型所有时步模型表面总加速度和3个分向( $x$ 、 $y$ 和 $z$ )加速度云图和等值线图,鉴于篇幅限制,文中不再给出图件。图件结果显示模型表面加速度随地震波实时变化。

为了查明场地条件差异对昔格达组三维地基地震动响应差异的影响,在2个计算模型表面相应位置各布置了84个观察点,受篇幅限制,观察点位置图不再给出。计算获得了每个模型的84个观察点3个方向加速度时程曲线图和3个方向加速度峰值数据文件,用于统计加速度峰值和加速度放大系数,并分析地震动响应规律。为表明计算结果的合理性并考虑篇幅限制,图5给出了FA1和FA3 2个关键点的 $y$ 向加速度计算时程曲线,两点均位于各自模型1 555平台西南角点处,其中FA3模型52 985点位置如图9所示。加速度放大系数 $\lambda$ 为加速度时程曲线峰值与对应方向输入地震波峰值比值的绝对值。从以下3个方面讨论场地地基地震动响应差异规律。

#### 3.1 平台结构响应差异

FA1的84个观察点为:1 500有6个,1 516有43个,1 532有11个,1 555有6个,1 560有4个,1 590有3个,1 610有5个,挖方边坡6个;FA3的84个观察点分布为:1 500有6个,1 512有34个,1 525有14个,1 532有10个,1 555有6个,1 560有2个,1 590有3个,1 610有3个,挖方边坡有6个。图6给出2个计算模型各个平台加速度放大系数平均值。

从图6可以看出,随着平台标高升高, $x$ 方向加速度放大系数有微弱减小的趋势, $y$ 方向加速度放大系数变化与平台标高升高不成规律,竖直方向加速度放大系数随着平台标高升高而增加的规律最显著,但加速度放大系数增减幅值与平台标高变化幅值不成简单的正相关关系。从3个方向加速度放大系数变化看,在低平台,水平方向加速度放大系数大于竖直方向,随着平台标高升高,竖直方向加速度放大系数大于水平方向,无论是低平台还是高平台, $y$ 方向加速度放大系数始终大于 $x$ 方向。以上分析表明,场地地震动响应的地形放大效应具有方向性,分析场地条件对地震动响应时必须采用三维模型。

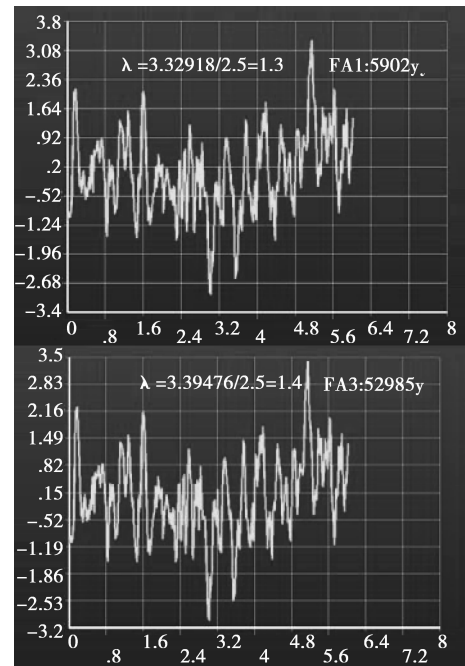


图5 FA1和FA3模型关键点加速度计算时程曲线

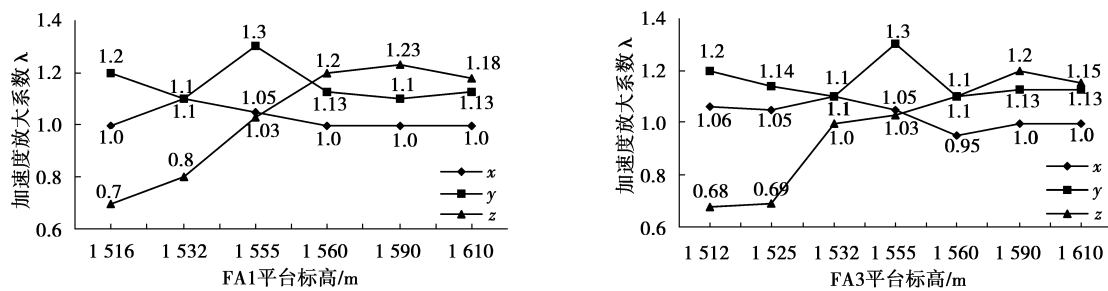


图 6 各平台加速度放大系数平均值

从图 1 和图 6 可以看出竖直方向加速度放大系数变化情况,在 FA1 中,从 1 516 平台升高到 1 532 平台,标高增大 16 m,加速度放大系数增大 0.1;从 1 532 平台升高到 1 555 平台,标高增大 23 m,加速度放大系数增大 0.23;1 516 平台升高到 1 560 平台,标高增大 34 m,加速度放大系数增大 0.5。FA3 中的 1 512 平台升高到 1 525 平台,标高升高 13 m,加速度放大系数增大 0.01,1 512 平台升高到 1 532 平台,标高增大 20 m,加速度放大系数增大 0.34;1 525 平台升高到 1 560 平台,标高增大 35 m,加速度放大系数增大 0.39。以上分析说明,平台相对高差在 20 m 以下,对竖直方向地震动响应差异不敏感,当高差超过 20 m 时,地震动响应差异才显著,不同平台加速度响应差异还受平台本身标高的影响。黄土地区地形条件对地震动影响研究表明<sup>[9]</sup>,当斜坡高差超过 20 m 时,坡上下强震地面运动峰值加速度即存在较大差异,理论计算结果表明,黄土高阶地顶部的强震地面运动峰值加速度与底部相比可放大 6~7 倍。这与文中的计算结果相符。

图 7 给出了场区周围部分挖方边坡坡顶加速度放大系数情况。结合图 1 和图 2 可以看出,随着边坡高度增加,加速度放大系数波动变化,水平方向加速度放大系数变化与坡高不呈规律,但竖直方向加速度放大系数随坡高升高而总体增大,坡顶竖直方向加速度放大系数明显较场区各平台大。局部凸起山体地形对场地地震动的影响是复杂的,影响因素有标高、临空势能等。大量的震害分布调查和数值分析表明<sup>[8-10]</sup>,在临空势能优越和地形突变的地方,由于存在山脊效应,地震动响应态势较平缓地区异常强烈。文中构建三维地基模型是采用自原始地面向下分层建模,且每一层的物理力学参数不同(见表 1)。因此,层与层之间的界面就是一个不连续地质界面,且界面的形状和原始地面相同。除此之外,填方物理力学参数与原始地基物理力学参数不同,也存在填方与原始地基不连续地质界面,界面形状和填方原始地面形状相同的情况。因此,文中用于计算的 2 个数值模型实际上是非规则的层状介质模型。加速度的放大倍数和位移放大倍数具有相同的规律<sup>[11]</sup>。由于不连续地质界面形状与原始地面形状相同,在凸起山体部位凸起地形的散射效应造成地震动显著加强<sup>[12]</sup>。在地形表面有 Rayleigh 波产生, Rayleigh 波对孤突地形地面运动的放大作用显著大于 P 波和 SV 波,说明 Rayleigh 波对地震动有促进放大作用<sup>[13]</sup>。若凸起山体尺寸相对地震波优势波长较小,地震波就感觉不到凸起地形的存在<sup>[12]</sup>。因此,高边坡的地震动响应较低边坡地震动响应强烈。

### 3.2 标高突变响应差异

2 个计算模型不同平台衔接方式都处理为直立挡土墙(比如 FA3 中的 1 525 平台与 1 512 平台衔接)或自高平台向低平台按 1:1.5 放坡,下部以挡土墙接地。挡土墙引起场地平台标高突变,分析标高突变对地基地震动响应的影 响是场地稳定性评价的重要部分,同时为场地平台衔接方式的选择和优化提供依据。

将 FA1 的部分观察节点连接成 9 条平行于  $x$  方向的线(1~9),FA3 共连接成 8 条平行于  $x$  方向(1~8)、6 条平行于  $y$  方向的线(A~F),每条线穿越不同平台引起标高突变。鉴于篇幅受限,以下仅给出 FA1 的

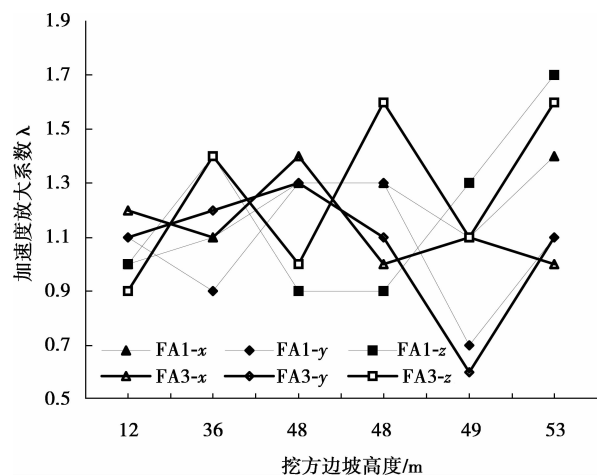


图 7 挖方边坡坡顶加速度放大系数

4~6线和FA3的2~4线上沿线观察点加速度放大系数变化情况(见图8)。从图8可以看出,FA1中3条线都穿越3个平台,共有6次标高突变,水平方向加速度放大系数随标高突变而变化不成规律,但垂直方向加速度放大系数显著随标高升高而增大,FA3显示同样的规律。FA1的9条线经过14个陡坎,引起13次垂直方向加速度放大系数骤增;FA3的14条线经过19个陡坎,引起18次垂直方向加速度放大系数骤增。高差越大,垂直方向加速度放大系数突变也越大,但受地震波优势波长与高差相互关系影响,两者之间不成严格的正相关关系。2个模型计算结果显示,平台标高突变不能引起水平方向加速度放大系数有规律变化,但垂直方向加速度放大系数增大。

1975年2月4日辽宁海城发生7.3级地震,中国地震局工程力学研究所布设的海城小山包在山顶与山下洞内同时取得了4次余震记录。该小山包南北尺寸远大于东西尺寸,山洞与山顶2个测点高程相差仅约10m,山顶与山下洞内测点最大加速度的平均比值水平分量为1.75、垂直分量为1.84<sup>[5]</sup>。姚凯等<sup>[14]</sup>使用数字流动强震仪,利用汶川余震流动观测资料探讨地形对峰值加速度的影响。研究表明,山顶的加速度峰值在相同地质条件下较山脚的观测值大1.5倍左右。这些地震动事实都支持文中计算所得的结论。

荣锦水等<sup>[15]</sup>用显式有限差分法研究了局部凸起平台的谱特性差异。分析认为局部凸起平台的存在使得山顶地面运动放大。Gangi<sup>[16]</sup>和Boore<sup>[17]</sup>研究认为在地形角点处存在波型转换(转换成Rayleigh波),使地形角点具有地形放大效应。地震波入射到阶梯地形角点时,通常会同时产生转换体波和面波;台面上地面运动幅值变化较大,地面主运动分量在上角点处存在极大值,在下角点处存在极小值,地面次运动分量在横向上总体变化不大<sup>[18-19]</sup>。波型转换产生的Rayleigh波对地表运动具有促进放大作用。

由图8还可以看出,从低平台上升到高平台,垂直方向加速度放大系数骤增,随着向高平台内侧延伸,加速度放大系数有减小的趋势。黄土塬的塬内和塬边对地震动的放大效应也存在较大差异,大致相差25%,塬边往往在地震时显示出高烈度异常,产生滑坡与崩塌,这与地震动在塬边被放大有关<sup>[9]</sup>。显然,文中计算结果与石玉成等的研究结果是相符的。数值计算结果表明,波形转换产生的Rayleigh波从阶梯地形角点向内逐渐衰弱<sup>[18]</sup>。

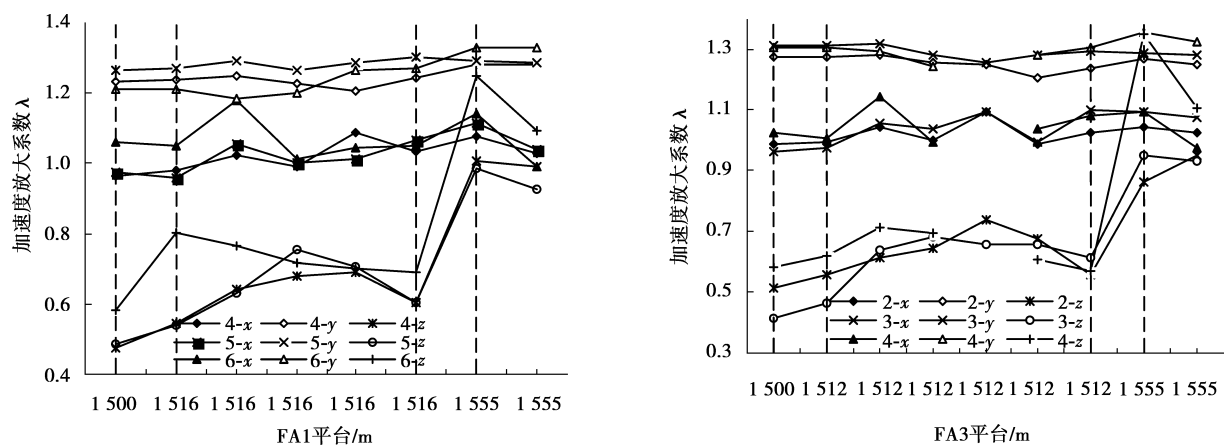


图8 加速度放大系数沿线变化

### 3.3 填挖分区响应差异

如图1和图2所示,2个计算模型的主要差异在于FA1的1516平台被FA3调整成1512平台和1525平台,1512平台的填方高度整体比1516平台降低4m,最大填方高度从35m降低到31m;而1525平台的挖方深度和填方高度分别增加9m。因此,1516平台整体地震动响应稍强于1512平台(见图6)。由于2个计算模型的罗家沟填方高度都没有超过30m,所以1516平台与1525平台的响应差异较小。

图9给出FA3中1555平台6个观察点具体位置。表2给出6个观察点3个方向加速度放大系数及其填挖属性。从这些图表可以看出,32232→12664→52985,前2个属于挖方,最后一个属于填方,3个方向加速度放大系数依次增大,垂直方向骤增最显著。33281→25974→52784也显示同样的变化规律。1555平台加速度放大系数这种变化规律主要受填挖影响。

如前所述,在场地填方区,由于填体参数与原始地基参数不同而形成凹槽状地质界面,界面形状与原始地面相同。昔格达组地层是沉积地层,故填方区就可概化为具有多层凹槽状地质界面的沉积谷地模型。范会吉等<sup>[20]</sup>根据射线理论对二维盆地型弯曲界面对散射波的作用研究,认为因界面弯曲引起的广角反射和聚焦作用分别是 P 波波列中出现大能量团的第一和第二位的重要因素。Anderson 等<sup>[21]</sup>研究认为三维沉积盆地对地震波有聚集放大作用。Rayleigh 波在沉积层状介质中传播时会在每一层界面产生多次反射、使能量汇聚,从而是位移幅值放大<sup>[22]</sup>。盆地的二维散射效应对波有汇聚作用,使盆地地表面位移运动显著放大<sup>[23]</sup>。多层谷地散射波的干涉效应比单层谷地强,由于散射波干涉造成了波动能量的汇聚,因此,地面运动呈现出了驻波的特性,增强了地表地震动<sup>[24]</sup>。

从表 2 可以看出,填体动弹性模量 347 MPa 比原始地基第 1 层(0~10 m)的动弹性模量 312 MPa 大,而小于第 2 层(10~20 m)的动弹性模量 942 MPa。因此,在填方区是非正常沉积谷地,有软弱夹层存在。沉积层非正常排列情况下的放大作用要大于正常排列的情况。非正常沉积谷地中软弱夹层厚度的增加对谷地地表中心地带地震动强度具有放大效应<sup>[25]</sup>。

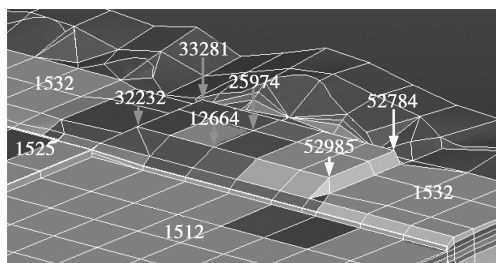


图 9 FA3 的 1 555 平台观察点位置图

表 2 1 555 平台观察点加速度放大系数

观察点	$x$	$y$	$z$	属性
32 232	1.0	1.3	1.0	挖方
12 664	1.1	1.3	0.9	挖方
52 985	1.1	1.4	1.3	填方
33 281	1.0	1.2	0.9	挖方
25 974	1.1	1.3	0.9	挖方
52 784	1.0	1.3	1.1	填方

## 4 结 论

1) 随着场地平台标高升高,加速度放大系数增大,其中竖直方向增大最为显著;临空环境优越和地形突变的地方,地震动响应比地势平缓地区强烈;地震动响应的地形放大效应具有方向性,数值分析场地条件对地震动响应应该采用三维计算模型。

2) 从低平台上升到高平台,标高突变引起竖直方向加速度放大系数骤增,但两者之间不成严格的正相关关系,水平方向加速度放大系数变化规律不明显;从高平台顶部向平台内侧延伸,加速度放大系数有减小的趋势。

3) 昔格达组沉积地层填方区的多层凹槽状地质界面对地震波散射引起能量汇聚效应和填方区软弱夹层的存在,致使填方区加速度放大系数普遍比挖方区大,竖直方向放大最明显。

### 参考文献:

- [1] 薄景山,李秀领,李山有. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程,2003,19(2): 11-15.  
BO Jingshan, LI Xiuling, LI Shanyou. Some progress of study on the effect of site conditions on ground motion[J]. World Earthquake Engineering, 2003,19(2):11-15.
- [2] Li W H, Zhao C G. Scattering of plane sv waves by cylindrical canyons in saturated porous medium [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2005,25(12): 981-995.
- [3] Li W H, Zhao C H, Shi P X. Scattering of plane p waves by circular-arc alluvial valleys with saturated soil deposits [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005,25(12): 997-1014.
- [4] Fishman K L, Shmad S. Seismic response for alluvial valleys subjected to sh, p and sv waves [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1995, 14(4): 249-258.
- [5] 荣棉水,李小军,吕悦军,等. 平台地形对地震地面运动特征周期值的影响[J]. 中国地震,2009,25(2): 178-185.  
RONG Mianshui, LI Xiaojun, Lü Yuejun, et al. Effect of protruding topography on characteristic period of ground motion [J]. Earthquake Research in China, 2009,25(2): 178-185.

- [6] 杜永军,刘殿魁,赵启承,等. SH波入射时等腰三角形与半圆形凸起地形的地震动[J]. 世界地震工程, 2009, 25(3): 167-174.  
DU Yongjun, LIU Diankui, ZHAO qicheng, et al. Ground motion of isosceles triangular and semi-circular hills with the shincident wave[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(3): 167-174.
- [7] 赵成刚,杜修力,李小军. 用三维半解析解边界元的子结构法分析凸起山包对地震波的散射[J]. 中国地震, 1993, 9(2): 154-162.  
ZHAO Chenggang, DU Xiuli, LI Xiaojun. Substructure method of semi-analysis boundary element and application to seismic scattering by three-dimensional topography of a hill[J]. Earthquake Research in China, 1993, 9(2): 154-162.
- [8] 刘洪兵,朱唏. 地震中地形放大效应的观测和研究进展[J]. 世界地震工程, 1999, 15(3): 20-25.  
LIU Hongbing, ZHU Xi. Advance on topographic amplification effects of seismic response[J]. World Information on Earthquake Engineering, 1999, 15(3): 20-25.
- [9] 石玉成,王兰民,张颖. 黄土场地覆盖层厚度和地形条件对地震动放大效应的影响[J]. 西北地震学报, 1999, 21(2): 203-208.  
SHI Yucheng, WANG Lanmin, ZHANG Ying. Effects of overburden thickness and topography of loessial sites on earthquake ground motion[J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, 21(2): 203-208.
- [10] Jamison H. S. Site response in southern California for probabilistic seismic hazard analysis [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, 90(6): 149-169.
- [11] 景立平,卓旭炆,王祥建. 复杂场地对地震波传播的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(6): 16-23.  
JING Liping, ZHUO Xuyang, WANG Xiangjian. Effect of complex site on seismic wave propagation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(6): 16-23.
- [12] 梁建文,巴振宇. 弹性层状半空间中凸起地形对入射平面SH波的放大作用[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(1): 1-10.  
LIANG Jianwen, BA Zhenning. Surface motion of a hill in layered half-space subjected to incident plane sh waves[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(1): 1-10.
- [13] 刘晶波. 局部不规则地形对地震地面运动的影响[J]. 地震学报, 1996, 18(2): 239-245.  
LIU Jingbo. Effects of local irregular topography on seismic ground motion[J]. Acta Seismologica Sinica, 1996, 18(2): 239-245.
- [14] 姚凯,卢大伟,刘旭宙,等. 利用汶川余震流动观察资料探讨地形对峰值加速度的影响[J]. 西北地震学报, 2009, 31(1): 46-50.  
YAO Kai, LU Dawei, LIU Xuzhou, et al. Using observational data from the aftershocks of Wenchuan great earthquake to study the influence of geography on peak ground acceleration[J]. Northwestern Seismological Journal, 2009, 31(1): 46-50.
- [15] 荣锦水,李小军,卢滔. 局部地形对入射P波谱特性的影响分析[J]. 西北地震学报, 2007, 29(4): 297-302.  
RONG Mianshui, LI Xiaojun, LU Tao. Effect analysis of topography on the spectrum property of incident p waves[J]. Northwestern Seismological Journal, 2007, 29(4): 297-302.
- [16] Anthony F G, Robert L W. P-wave to rayleigh conversion coefficients for wedge corners: model experiments [J]. Journal of Computational Physics, 1978, 29(3): 370-388.
- [17] David M B, Stephen C H, Sam T H. Wave scattering from a step change in surface topography [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1981, 71(1): 117-125.
- [18] 李山有,廖振鹏. 地震体波斜入射情形下台阶地形引起的波型转换[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 9-15.  
LI Shanyou, LIAO Zhenpeng. Wave-type conversion caused by a step topography subjected to inclined seismic body wave [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 9-15.
- [19] 李山有,马强,韦庆海. 地震体波斜入射情形下的断层台阶地震反应分析[J]. 地震研究, 2005, 28(3): 277-281.  
LI Shanyou, MA Qiang, WEI Qinghai. Seismic response analysis of fault step subjected to obliquely incident body waves [J]. Journal of Seismological Research, 2005, 28(3): 277-281.
- [20] 范会吉,姚陈. 地震波的散射与盆地的场地效应[J]. 地震研究, 1996, 12(2): 209-223.  
FAN Huiji, YAO Chen. Scattering of seismic waves and site effects of basin-like models[J]. Earthquake Research in China, 1996, 12(2): 209-223.
- [21] Anderson J G, Bodin P, Brune J N, et al. Strong ground motion from the Michoacan, Mexico, earthquake [J]. Science Journal, 1986, 233(4768): 1043-1049.



- [22] 赵成刚,王磊,高福平. 圆弧形沉积场地对平面瑞利波散射的解析分析[J]. 力学学报,2007,39(3): 365-373.  
ZHAO Chenggang, WANG Lei, GAO Fuping. Scattering of plane reyleigh waves by a circular-arc alluvial valley: an analytical solution[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007,39(3): 365-373.
- [23] 袁晓铭,李雨润,孙悦. 圆弧形沉积盆地与软土单覆盖层出平面地表运动对比[J]. 地震工程与工程振动,2002,22(4): 16-21.  
YUAN Xiaoming, LI Yurun, SUN Rui. Comparison of out-of-plane surface ground motion between a circular-arc alluvial valley and a single overburden soft layer[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002,22(4): 16-21.
- [24] 张郁山. 圆弧形多层沉积谷地在平面 SV 波入射下的动力响应[J]. 地球物理学报,2009,52(6): 1547-1555.  
ZHANG Yushan. Dynamic response of alluvial valley containing multiple circular-arc layers incident by plane sv waves[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009,52(6): 1547-1555.
- [25] 张郁山. 圆弧形多层沉积谷地在 Rayleigh 波入射下动力响应的解析解[J]. 地球物理学报,2010,53(9): 2129-2143.  
ZHANG Yushan. Analytical solution to dynamic response of circular-arc-shaped multi-layered valley due to incidence of Rayleigh wave[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010,53(9):2129-2143.

(编辑 陈移峰)

~~~~~  
(上接第 39 页)

- [11] Ramaprabha R, Mathur B L, Sharanya M. Solar Array modeling and simulation of mppt using neural network[C]// Proceeding of International Conference on Control, Automation, Communication and Energy Conversion, 4-6 June 2009, Perundurai, Tamilnadu. Piscataway; IEEE Press, 2009; 1-5.
- [12] Nicola F, Giovanni P, Giovanni S, et al. Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 21(4): 963-973.
- [13] Azevedo G M S, Cavalcanti M C, Oliveira K C, et al. Evaluation of maximum power point tracking methods for grid connected photovoltaic systems[C]// Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, June 15-19, 2008, Rhodes. Piscataway; IEEE Press, 2008; 1456-1462.
- [14] 金福宝,李钊年,刘春艳,等. 光伏系统 MPPT 跟踪方法的发展研究 [J]. 实验技术与管理, 2010, 27(11): 311-313.  
JIN Fubao, LI Zhaonian, LIU Chunyan, et al. Development of MPPT method of PV system [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(11): 311-313.
- [15] 周维维,杨柳. 光伏电池的最大功率跟踪以及并网逆变 [J]. 重庆大学学报, 2010, 33(2): 15-21.  
ZHOU Luwei, YANG Liu. MPPT control of photovoltaic grid-connected system [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(2): 15-21.
- [16] 程红丽,孙帅. 基于光伏和超级电容的输电线路状态监测装置电源 [J]. 电测与仪表, 2014, 51(9): 97-101.  
CHENG hongli, SUN Shuai. A photovoltaic and super-capacitor based power supply for transmission line monitoring equipment [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(9): 97-101.

(编辑 王维朗)