

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201908017

黄土丘陵沟壑区挖填场地动力响应特征研究*

刘 琨^{1,2,3}, 卢育霞^{1,2}, 徐舜华^{1,2}

(1. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;
3. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以黄土丘陵沟壑地区大规模平山填沟造地工程为背景,结合相关工程实例,定量分析新型挖填场地在地震作用下场地动力响应特征及其关键影响因素。以场地地球物理勘测和压实黄土室内动三轴试验为基础,构建考虑场地横向不均匀性的场地地震反应分析模型,给出场地填方厚度、挖填交界面和土层参数对场地挖方区、填土区和界面区地震动特征参数的影响规律。研究发现:场地覆盖土层厚度在一定范围内对地震动峰值加速度影响明显,而大厚度覆盖层对地震波能量传递有抑制作用;填方土层压实参数影响填方区地震动放大范围;挖填界面的平均坡度和界面阻抗对平面内地震波场折射和反射影响较大。研究结果可为黄土地区大规模挖填场地地震稳定性分析提供参考依据。

关键词:挖填场地; 场地效应; 横向不均匀性; 横向波阻抗; 动力响应

中图分类号: TU444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1096-09

Study on Characteristics of Dynamic Response at Digging-filling Sites in the Loess Hilly and Gully Region

LIU Kun^{1,2,3}, LU Yuxia^{1,2}, XU Shunhua^{1,2}

(1. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;
2. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China;
3. College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the large-scale reclamation project by digging hill and filling gully in the loess hilly and gully region, combined with relevant engineering examples, the dynamic response characteristics and key influencing factors of the new digging-filling sites under earthquake action are quantitatively analyzed. Considering site geophysical survey and dynamic triaxial tests of compacted loess, a site seismic response analysis model for lateral heterogeneity is constructed. The influence of site filling thickness, digging-filling interface and loess mechanical parameters on ground motion characteristic parameters in the digging, filling, and transition areas is given. It is found that: the overburden thickness of loess has a significant effect on the peak acceleration of ground motion in a certain range, while the overburden thickness beyond a given height has a restraint effect on seismic waves; the compaction parameters of the filling layer affect the range of ground motion amplification in the filling area; the aver-

* 收稿日期:2019-08-06;修回日期:2019-09-19

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC1500900)、甘肃省科技计划项目(18JR3RA415)资助

作者简介:刘琨(1985—),男,助理研究员,博士。主要从事岩土地震工程及防灾减灾技术研究。E-mail: liukun@gdszj.gov.cn

age slope of the digging-filling interface and the interface impedance affect refraction and reflection of the seismic waves fields in plane. The research results can provide a reference for seismic stability analysis of large-scale digging-filling sites in the loess region and have certain practical significance.

Keywords: digging-filling sites; site effects; lateral heterogeneity; lateral wave impedance; dynamic response

引言

近年来中国城镇化进程加速,城镇人口剧增、城市土地资源愈加紧缺,特别是在受自然地貌制约的城市^[1]。造地是增加建筑用地资源的有效途径,围海造地在环渤海、长三角和香港等地区取得了非常显著的成效。而对于处在内陆的干旱、半干旱带城市,平山填沟造地是一个可取的选择,合理的设计与施工能够开发出可用的土地资源,重庆、兰州、十堰等山地丘陵城市已进行过规模不大的城郊开山造地。随着“一带一路”战略地稳步推进,不难预料在中国西北部黄土地区,大规模黄土工程即将展开^[2]。但是面对大规模黄土工程,相关工程地质和工程地震问题必须予以重视,而且会产生新问题。城市近郊平山造地多为城市扩容,相关城市功能建筑和民居小区会出现在挖填场地,对于此类场地的工程地质稳定性评价和地震危险性研究已经是一项刻不容缓的工作。

由于土体具有大孔隙微结构特征,黄土通常被作为特殊土进行研究^[3]。天然状态下黄土含水量较低,以及特殊的微观结构使得天然黄土强度较高。而在水或者外部动力干扰下,黄土的微观结构性会受到严重破坏,易诱发黄土湿陷、黄土震陷和饱和黄土液化等地质灾害,进而可能造成工程灾难。研究表明,黄土水敏性和动力易损性是形成相关灾害与病害的主因。同时,黄土波速较低,大厚度黄土对远场地震的长周期成分反应较为敏感,汶川地震发生后,远离震中600 km的黄土塬区仍出现烈度异常。以兰州、延安地区为例,大规模挖方填方工程均在湿陷黄土区内进行,填土动力性质、土层结构、潜在软弱面和横向结构面等因素都会对地震动产生影响^[4]。

黄土力学参数对场地类别划分和地震动参数影响的研究较多^[5],但多偏重对土体非线性地震反应分析方法的研究,而对于土体力学参数的获取和不确定性对地震动影响的研究较少。压实黄土可

视作重塑黄土,其力学参数只能依赖于室内实验和现场测试,人工填筑使得土体力学参数不再像正常固结土体那样具有规律性,也使得回填土地类型判别变得复杂和困难。

黄土场地对地震动的改造作用已在多次震害调查中被证实,前人进行了大量针对性工作,得到许多具有重要工程意义的相关结论。关于土层结构对地表地震动特征参数的影响,薄景山等^[6-7]基于统计分析方法提出“基于土层结构”的场地分类新方法,详细分析讨论了土层结构特征参数对地表加速度峰值、地表加速度反应谱、地表反应谱卓越周期、地表反应谱平台值等因素的影响。周锡元等^[8]认为低速层对地表地震动反应谱形状和最大加速度的影响都较大,相对同类场地也能起隔震减震效果,定量分析结果与地层波速结构和软夹层组合等因素相关。刘曾武等^[9]基于一维土层反应分析模型对不同场地类型土层剖面的岩性排列和组合进行参数化分析,认为土层剖面中软夹层位置对地表加速度反应有明显影响。低速土层埋深越大,地表地震动反应谱峰值愈小,卓越周期向长周期移动。黄土作为低速土层,其场地效应已开展了大量研究^[10],认为夹有低速土层的大厚度覆盖层场地的地震地面运动有两个重要特征:地表加速度峰值相对基岩的放大作用被削弱,而削弱程度与低速土层的波阻抗、剪切波速、低速层厚度及埋深位置有关;地表加速度反应谱曲线呈现出双峰特征,其卓越周期分别与低速层上下的土层动力学参数有关^[11]。

土层结构对地震动幅值、频谱的特性影响较大。黄土土层结构包括竖向不均匀结构组合和水平不均匀结构组合^[12],显然以往偏重于竖向不均匀性的研究。而挖填场地的横向不均匀性十分明显,横向不均匀性对场地地震动的研究明显不足。本文针对挖山填沟所形成的场地土体动力响应特性及其场地效应展开研究。考虑场地挖填交界面、填方区底层界面和回填地层结构面对挖填场地动力响应特性的影响,采用二维等效线性分析方法进行土层地震反应计算。通过对挖填场地勘察,建立典

型二维场地分析模型,采用单频脉冲波作为地震动输入,通过二维土层地震反应分析给出横向不均匀结构面对场地地震动峰值加速度和频谱特征的影响规律。

1 工程背景

青白石场地位于甘肃省兰州市青白石片区和皋兰县什川镇交界(图1)。场地位于兰州盆地北部黄土沟壑丘陵地带,地势总体由西南向东北升高,地形起伏大,冲蚀沟谷与黄土低山陡坡交错分布,地貌类型属于基岩丘陵侵蚀与黄土梁峁冲沟复合地貌,场地主要冲沟从西向东为直岔沟、大、小庙岔、粪圈沟,其余为小支沟,3条大型冲沟把场地分为5梁3冲沟。地面高程在1 640~1 920 m,高差达280 m。

根据工程地质测绘资料,将建场地分为黄土梁区和冲沟区。黄土梁区为风积马兰黄土(Q_{3eol})及离石黄土(Q_2)层覆盖,下部为下白垩统河口群砂岩层及加里东期花岗岩层;冲沟区由于受第四系冲洪积的影响,表层为冲洪积马兰黄土(Q_{3al+pl})及新近堆积黄土(Q_{4al+pl}),下部为下白垩统河口群砂岩层及加里东期花岗岩层。

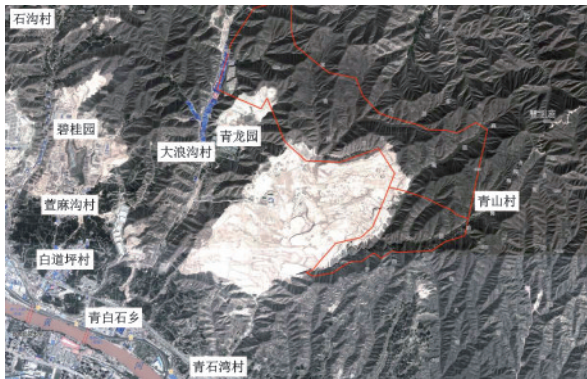


图1 黄土丘陵沟壑区青白石挖填场地

Fig.1 Qingbaishi sites in the loess hilly and gully area

2 挖填结构面勘定

通过场地施工资料收集和地形图解译,采用高分辨率地形图解译场地未开挖之前的DEM高程图,再结合场地现场地形测绘结果,初步勘定该场地挖方区、填方区及其界面位置(图2)。

土体的电阻率特性与其内部细观结构特征变

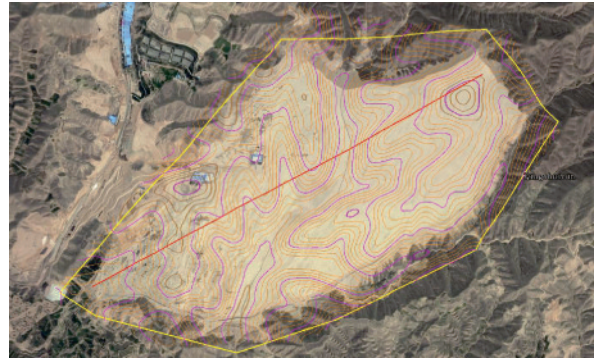


图2 场地挖填后影像图及开挖前地形

Fig.2 Satellite image and contour of sites after digging and filling

化相关,通过土体电阻率变化可间接分析土体的宏观力学参数^[13]。通过测试土体的电阻率特性进而获取土体的宏观物理力学参数是可行的。高密度电阻率法以岩、土导电性的差异为基础,研究人工施加稳定电流场的作用下地中传导电流分布规律,推断地下具有不同电阻率的地质体赋存情况。高密度电阻率法的物理前提是地下介质的导电性差异。高密度电阻率法成本低、效率高、显示直观,可广泛用于黄土挖填方场地的工程勘察。但受探测精度及深度的限制,对于较小体积的勘探目标可能存在解释偏差。因此,将高密度电法与其他勘探手段相结合可提高探测精度^[14]。

兰州青白石场地的高密度直流电法测试仪器采用重庆奔腾数控技术研究所生产的WDA-1超级数字直流电法仪。针对场地布置1条电阻率法测线,测量系统采用温纳装置(断面测量)。测量参数为:电极距5 m,最小隔离系数1,最大隔离系数10,起始电极号1,电极总数为60,测量深度为10层,每层之间相距2.5 m,每层测点间距5 m,测线总长3.6 km。测试结果如图3所示。

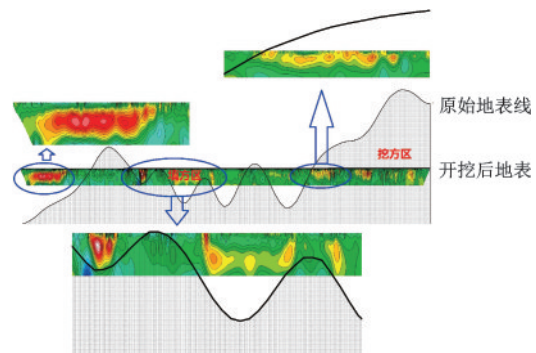


图3 高密度电法测试结果

Fig.3 Results of high-density electrical survey

通过对比反演电阻率剖面 and 地貌分析的结构面位置发现,在局部场地高密度电法能够反映出因为压实度差异而引起的横向不均匀性。在靠近测线起点位置为冲沟出口,填方厚度较大,填方压实度较高,反演剖面出现高电阻值,其位置与推测结构面较为符合。在场地中部,挖方区与填方区交替出现,反演界面也出现类似规律,对应较好。而在测线末端,全部属于挖方区,但仍然出现高电阻率值,可能挖填过程中机械车辆的碾压有关。总体来说,高密度电法在场地压实度测试当中具有一定适用性。

3 土层厚度对地表地震动参数的影响

3.1 一维土层地震反应分析

土层厚度对场地地震反应的影响问题通常被简化为一维波动问题,将场地介质模型简化为一维场地模型,也就是说所有的模型参数和反应参数的空间变化仅取决于一个沿深度方向的坐标。土层地震反应分析是一种非线性分析方法,等效线性化是一种间接考虑土体非线性特性的处理方法,在时域或者频域线性波动分析方法的基础上,利用非线性动力方程进行等效线性化处理,可分为线性方程的频域波动求解和土体非线性的等效线性化处理两部分。

黄土动力学试验结果表明,循环荷载作用下土体具有明显的应力—应变滞回效应。基于统计方法可给出等效动剪切模量及阻尼比。试验的结果表明,等效动剪切模量及阻尼比与循环荷载频率基本无关,但随应变振幅而变化。

PROSHAKE 程序是在地震反应分析程序 SHAKE91 的基础上开发的用户界面版本。土体非线性滞回性能可以用等效的线性分析方法来模拟^[15]。PROSHAKE 程序基于总应力分析方法,假设覆盖土层是水平成层,输入地震波为垂直向上入射并传播的剪切波。由于土的垂直剪切应变分布未知,所以必须选择一个可以对应预期的地震荷载的小应变。基于使用传递函数的经典的波传导理论求解地震运动方程。

本文参考兰州地震危险性分析结果合成基岩加速度时程,以基岩地震动反应谱为目标谱,通过迭代使合成的加速度时程反应谱与目标谱的相对误差小于 5%,合成加速度时程的反应谱拟合曲线如图 4 所示。

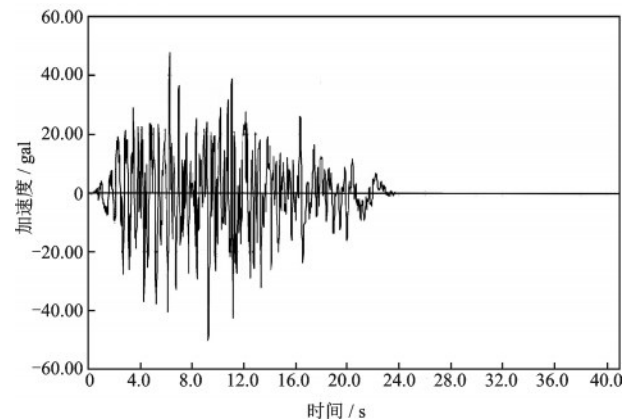


图4 兰州市区人工合成基岩地震动时程

Fig.4 Artificial synthetic time history of ground motion in Lanzhou city

填方土层动力学参数获取来自现场勘察及土工试验^[16],基于室内试验结果得到了覆盖层(黄土、粉质黏土)和基岩(砂砾石和泥岩)剪模比曲线和阻尼比曲线,见表 1。

3.2 土层厚度对地表峰值加速度的影响

为了分析不同等效剪切波速范围内黄土覆盖层厚度对地表加速度峰值(PGA)的影响,在等效剪切波速 150~250 m/s 内,设置了 11 个剖面,覆盖层厚度分别为:50、55、60、65、70、75、80、85、90、95、100 m。如图 5 所示,在等效剪切波速小于等于 150 m/s,覆盖层厚度 15~80 m 内,除了输入地震动强度为 50 gal 时 PGA 在 16 m 处达到最大值,在其他地震动强度输入时,都在覆盖层厚度 20 m 时达到最大值,在 20 m 后 PGA 随着覆盖层厚度的增大呈下降趋势。

3.3 土层厚度对地表峰值加速度放大系数的影响

共选取了 14 个剖面在等效剪切波速小于等于 150 m/s、覆盖层厚度为 15~80 m,发现基岩输入地震动强度较低(50 gal)时(图 6),放大倍数在 20 m 处最大,总体上大于 20 m 后,不同强度的地震波输入时,放大倍数都随覆盖层厚度的增大而明显减小,

表1 青白石场地各类土的非线性参数

Table 1 Non-line parameters of soils at Qingbaishi sites

土类	参数	剪应变 $\gamma/10^{-4}$							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
黄土状土	G/G_{max}	0.965	0.914	0.885	0.75	0.634	0.288	0.11	0.055
	ζ	0.008	0.016	0.031	0.042	0.072	0.129	0.174	0.215
粉质黏土	G/G_{max}	0.98	0.93	0.875	0.735	0.62	0.275	0.103	0.053
	ζ	0.011	0.015	0.034	0.047	0.079	0.132	0.18	0.224
砂砾石	G/G_{max}	0.99	0.97	0.9	0.85	0.7	0.55	0.32	0.21
	ζ	0.004	0.006	0.019	0.031	0.076	0.09	0.113	0.122
泥岩	G/G_{max}	1	1	1	1	1	1	1	1
	ζ	0.005	0.008	0.01	0.015	0.021	0.03	0.036	0.046

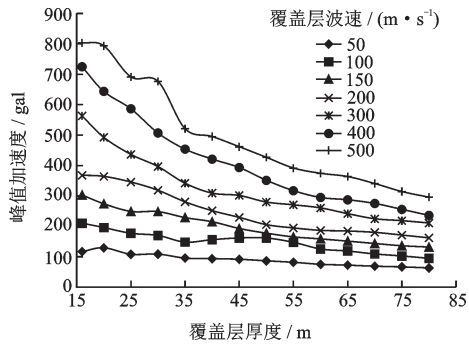


图5 场地覆盖层厚度对地表加速度峰值的影响

Fig.5 Relation between ground peak acceleration and site overburden thickness

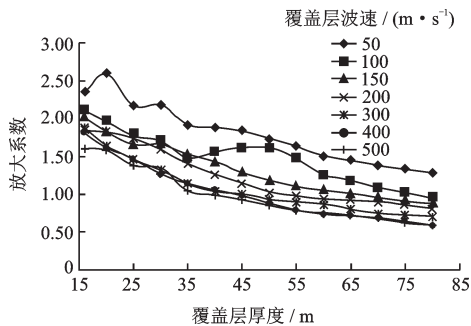


图6 覆盖层厚度对场地放大倍数的影响

Fig.6 Relation between amplification factors of ground peak acceleration and site overburden thickness

放大倍数随着基岩输入强度的增大也逐渐减小;当输入强度较大(200、300、400、500 gal)时,在55、50、45、40 m及更厚的土层,放大倍数 M 开始小于1。当场地覆盖层厚度达到某一厚度时,地表峰值加速度放大倍数随覆盖层厚度的增大而减小,同一土层随着输入地震动强度的增大,峰值加速度放大倍数逐渐减小。

4 场地横向不均匀性对地表地震动参数的影响

4.1 二维土层地震反应分析与计算工况

二维时域等效线性化动力反应分析程序 QUAD4M 是 QUAD4 的修正版本,由 Idriss 在伯克利大学开发^[17]。计算土层被离散成一系列的三角形或者四边形单元,可以有效模拟土层接触面、不平衡的地形表面及地层接触面。QUAD4M 使用 Newmark 积分方法求解运动方程。程序使用梯形法则来提供没有数值阻尼和无条件稳定的算法,采用等效线性化方法模拟土体非线性^[18]。

以青白石挖填场地为研究对象,基于场地黄土室内土工试验和浅层地震波速结构勘探结果,考虑场地挖方区、填方区和边坡区土层动力学参数和地层结构的差异性,构建典型平填场地地震反应分析模型,如图7所示。

结合室内试验统计结果,针对不同压实程度黄土设计不同工况,对填方区黄土干重度进行参数化

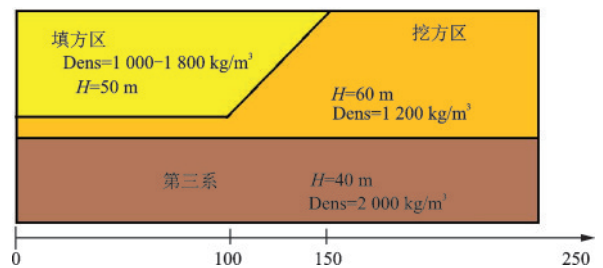


图7 典型挖填场地地震反应分析模型

Fig.7 Typical model of earthquake response of digging-filling sites

表 2 挖填场地地震反应分析工况设计

Table 2 Cases of earthquake response of digging-filling sites

计算 工况	填方区		挖方区		基底		横向波速比
	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	
C1	1 000	165	1 200	233	2 000	505	0.70
C2	1 100	199	1 200	233	2 000	505	0.85
C3	1 200	233	1 200	233	2 000	505	1.00
C4	1 300	267	1 200	233	2 000	505	1.14
C5	1 400	301	1 200	233	2 000	505	1.29
C6	1 500	335	1 200	233	2 000	505	1.44
C7	1 600	369	1 200	233	2 000	505	1.58
C8	1 700	403	1 200	233	2 000	505	1.73
C9	1 800	437	1 200	233	2 000	505	1.88

分析,同时考虑横截面倾角的变化和输入频率的变化,共计 252 种工况计算,具体工况设计见表 2。

为了研究具有横向可比较性,分类模型采用相同的本构模型和物理参数,计算模型侧面采用自由场边界条件,模型底面采用黏弹性人工边界条件。另外基于计算量和波形复杂程度的考虑,本文选用单频雷克波形脉冲加速度作为输入波,其波形如图 8 所示。

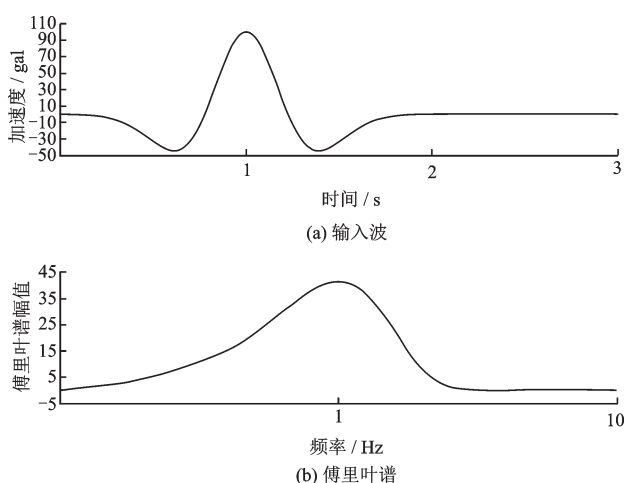


图 8 输入脉冲曲线

Fig.8 Waveform of input pulse

根据模型设计,场地横向可分为 3 个区:0~100 m 为填方区,100~150 m 为界面区,150~250 m 为挖方区。挖方区波速为 233 m/s,填方区波速为 335 m/s,在各工况下均保持不变。为地表监测点自填方区至挖方区每间隔 5 m 设置。通过改变倾角来改变模型填方区厚度,倾角对地震动的影响规律反应

为填方厚度的影响。输入 1、2、4 和 10 Hz 等 4 种不同频率特征脉冲,分别刻画挖填场地不同分区的地震动特征。通过参数化分析给出其对场地动力响应参数的影响。

4.2 横向挖填结构面倾角对地表地震动参数的影响

图 9 为不同频率输入工况下地表各监测点峰值加速度放大系数分布的计算结果。

由此结果分析可知,填方区土层波速较低,填方厚度较大,总体呈现挖方区 PGA 大于填方区,在界面区表现出一定的波动。输入频率小于 4 Hz 的工况内,地表 PGA 放大系数均大于 1,而在 10 Hz 输入情况下,地表 PGA 放大系数均小于 1,最小为 0.24,说明场地对地震动输入较为敏感。对比各工况可发现,界面两侧 PGA 分布呈现反对称特征,在界面区从填方边界到挖方边界 PGA 分布依次减小,挖方区自边界向远处 PGA 分布呈现增大趋势,而填方区则在不同的输入频率下变化规律有所不同。在填方区,自填方边界向远处总体呈现先增后减的特征,出现明显的极值点,只是极值点出现的位置随输入而发生变化。随着输入频率增大,极值点向填方边界移动,10 Hz 输入工况下极值点已进入界面区,说明高频震动情况下,界面区地震动变得极为复杂。在低频工况下填方区中部会出现放大与减小交替出现的现象,这一点可用地震波在边界产生转换面波改变边界以内的地震动分布,类似于盆地效应,而此类效应与地震动频谱特征和边界尺寸有关。从各工况可发现随着距边界区距离的增大,

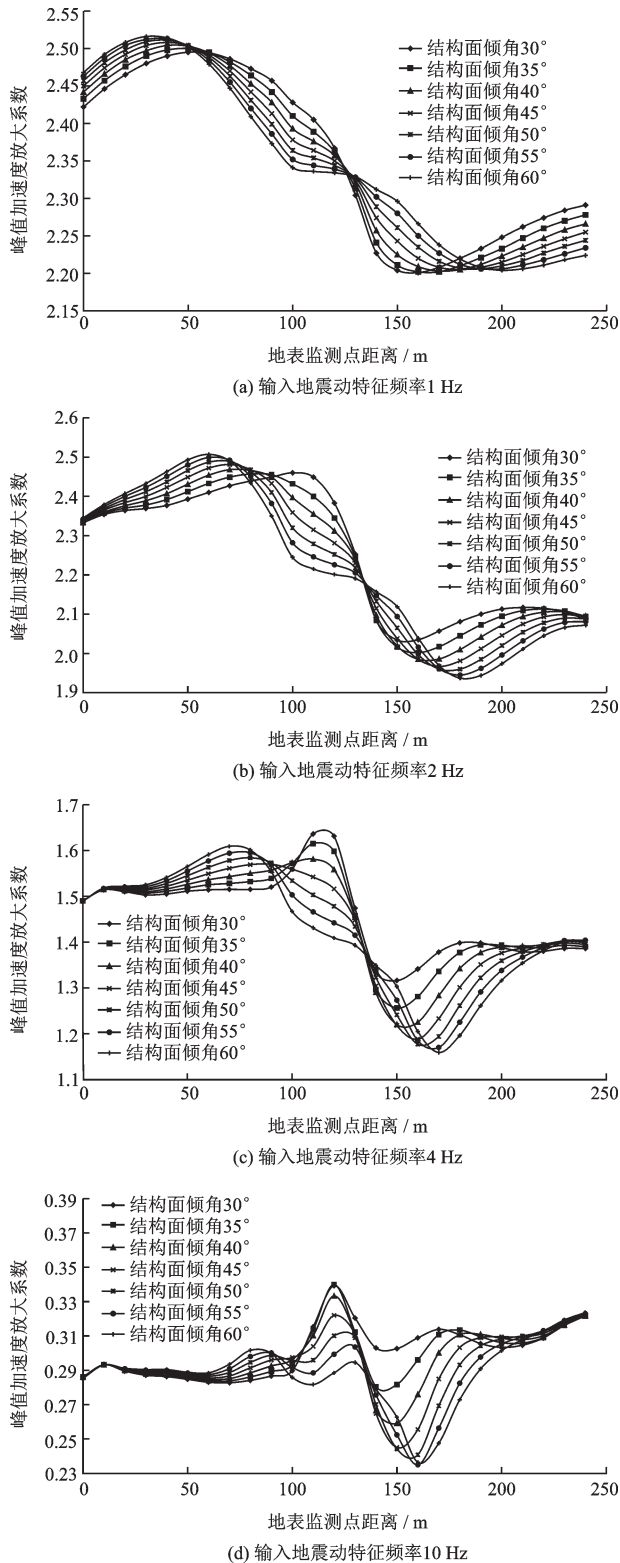


图9 不同特征频率脉冲输入情况下结构面倾角对地表地震动峰值加速度放大系数分布的影响

Fig.9 Relation between interface angle and amplification factor of peak ground acceleration under the inputs of pulse waveform with different characteristic frequency

地表地震动呈现收敛的趋势,输入频率越高,收敛趋势越明显,说明高频振动会在边界附近反复折射

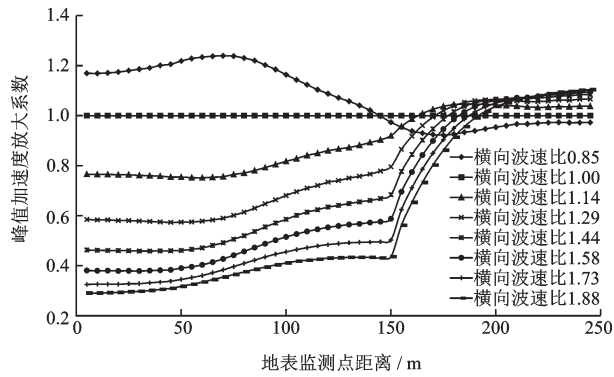
散射消散,而低频长周期振动则会传播较远的距离,这一点与以往的震害现象具有可对比性。

从结构面倾角影响来看,各输入工况下地表地震动分布特征较为类似,影响不是很明显。从各分区来看,倾角越小PGA越大,说明填方厚度只对填方区远离界面区的区域影响较大,而对边界区和挖方区影响较小(图9)。结合青白石挖填场地,界面倾角较小,分布为 $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$,填方厚度为 $10\sim 100\text{ m}$,填方区地震动特征变化范围不大,填方厚度对挖方区场地影响较小,填方厚度可不作为关键影响参量。

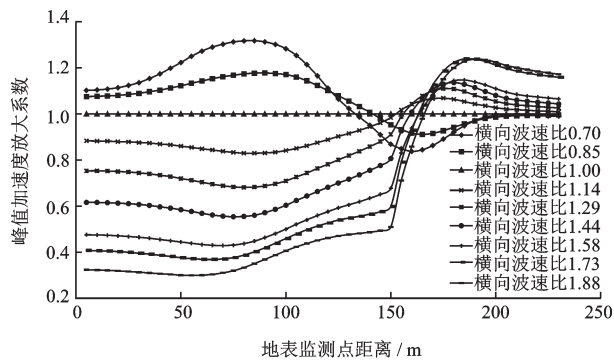
4.3 横向压实土波速比对地表地震动参数的影响

根据模型设计, $0\sim 100\text{ m}$ 为填方区, $100\sim 150\text{ m}$ 为界面区, $150\sim 250\text{ m}$ 为挖方区,监测点每间隔 5 m 设置,通过改变填方区土体波速进行参数化分析,其中挖方区土体波速固定在 233 m/s ,而填方区波速变化范围 $165\sim 437\text{ m/s}$ 。输入工况同上节,界面倾角设置为 40° 。

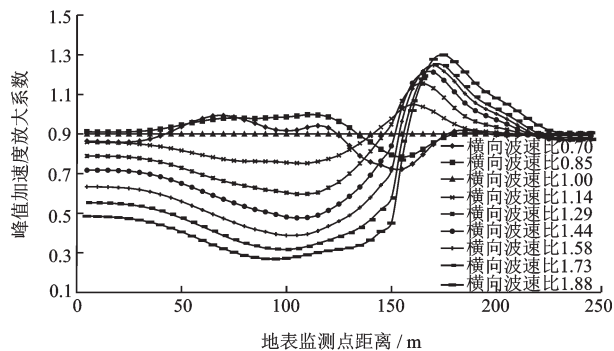
图10为不同工况输入下地表各监测点PGA分布结果。根据计算结果分析可知,地表PGA对输入频率较为敏感,随着输入频率的增大,地表PGA整体有减小趋势,PGA放大系数也在减小。在小于 4 Hz 的工况内PGA沿地表变化趋势较为一致,而在高频的时候其分布特征较复杂。按照各分区来看,各区在不同输入工况下变化较大,界面区与挖方区边界呈现拐点特征,拐点两侧地震动分布特征差异较大,说明挖方区地表地震动区与界面区和填方区地震动分布特征应区别对待分区研究。挖方区PGA分布曲线随着输入频率增大出现明显的极值点,在低频工况下,挖方区各点PGA变化较小,保持同一水平。高频工况下,在 160 m 界面附近出现明显的PGA极值点,放大系数远大于挖方区其它各点,这与以往认识不同。按照挖填场地规划,填方区在短期内不做建筑基础,而在挖方区进行基础建设,通过上面分析可知并不是所有的挖方区域是稳定的,在靠近挖填边界一定范围内存在一个安全距离,安全距离不仅与填方土层密实度、波速有关,还与场地基底地震动特征有关。在填方区PGA总体较小,低频输入工况下PGA分布变化范围不大,随着输入频率增大也出现极值点,并逐渐靠近边界区,但总体量值小于挖方区。界面区PGA分布特征以挖方区拐点为界,变化趋势整体服从填方区特征,随着输入频率增



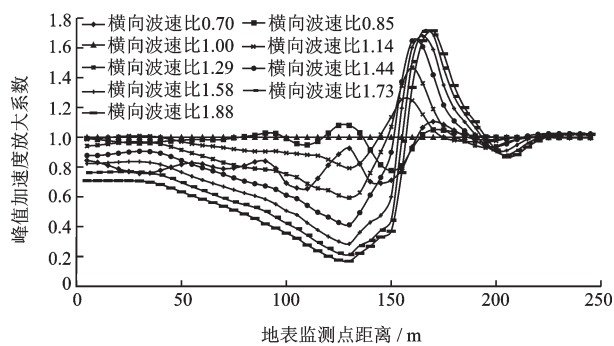
(a) 输入地震动特征频率1 Hz



(b) 输入地震动特征频率2 Hz



(c) 输入地震动特征频率4 Hz



(d) 输入地震动特征频率10 Hz

图10 不同特征频率脉冲输入情况下横向波速比对地表地震动峰值加速度放大系数分布的影响

Fig.10 Relation between ratio of shear velocity and amplification factor of peak ground acceleration under the inputs of pulse waveform with different characteristic frequency

大填方区极值点逼近界面区。高频输入影响范围远远小于低频长周期输入,高频能量在界面附近消散,而长周期输入则会在界面以内产生持续时间较长的波动,这一点将在下节分析。

从横向波速比影响来看,不同输入情况下PGA分布特征变化较大。在低频输入条件下,随着填方区波速、密度和压实度增大,场地反应越小,与以往场地反应计算结果类似,场地越硬地震反应越小。在高频输入条件下也出现类似现象,只是场地越硬,PGA分布极值点越明显,极值点意外PGA衰减较快,说明高频反应与场地硬度直接相关。整体看填方区压实度、波速和密度会对挖方区PGA分布产生直接影响,随着输入频率减小,这种影响越明显,这一点应当值得重视,填方区施工质量和稳定性会影响到挖方区地表PGA分布特征。

5 结论

(1) 场地覆盖层厚度达到某一临界值后,放大倍数随覆盖层增厚而减小,同一剖面随输入地震动强度的增大,放大倍数逐渐降低。

(2) 高频震动情况下,挖方填方界面区震动变得极为复杂。低频条件下,震动在填方区中部会交替出现放大或减小。这一现象类似于盆地效应,地震波在交界面产生转换面波使得边界以内的震动分布发生改变,与震动频谱特征和边界尺寸有关。

(3) 挖填场地内随距边界区距离增大,地表震动呈现收敛趋势,输入振动频率越高,收敛趋势越明显,说明高频振动会在边界附近反复折射散射而消散。低频长周期振动则会传播较远的距离,这与以往的震害现象具可比性。结构面倾角越小峰值加速度越大,说明填方厚度只对填方区远离界面区的区域影响较大,而对边界区和挖方区影响较小。

(4) 填方区施工质量和稳定性会影响挖方区地表峰值加速度分布特征。从横向波速阻抗比来看,低频输入条件下,随填方区波速、密度和压实度增大,场地反应强度逐渐变小。

参考文献:

[1] 王衍汇,倪万魁,石博溢,等.延安新区黄土高填方边坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2014,12(5): 52-56.

- Wang Y H, Ni W K, Shi B Y, et al. Stability analysis of high-filled loess slope in Yan'an New District[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(5): 52-56. (in Chinese)
- [2] Liu Y, Li Y. Environment: China's land creation project stands firm[J]. Nature, 2014, 511(750): 410-410.
- [3] 王兰民, 孙军杰. 特殊土动力学的发展战略与展望[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1): 88-93.
Wang L M, Sun J J. Development strategy and prospects for study of special soil dynamics [J]. Northern Seismological Journal, 2007, 29(1): 88-93. (in Chinese)
- [4] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
Wang L M. Loess dynamics[M]. Beijing: Seismological Press, 2003. (in Chinese)
- [5] 田文通, 孙军杰, 王兰民, 等. 黄土动力学研究进展与前沿科学问题[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2119-2127.
Tian W T, Sun J J, Wang L M, et al. Research progress and frontier scientific problems in loess dynamics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(11): 2119-2127. (in Chinese)
- [6] 薄景山, 李秀领, 刘德东, 等. 土层结构对反应谱特征周期的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(5): 42-45.
Bo J Sh, Li X L, Liu D D, et al. Effects of soil layer construction on characteristic periods of response spectra [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(5): 42-45. (in Chinese)
- [7] 薄景山, 李秀领, 刘德东, 等. 土层结构对反应谱平台值的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(4): 29-33.
Bo J Sh, Li X L, Liu D D, et al. Effects of soil layer construction on platform value of response spectra [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(4): 29-33. (in Chinese)
- [8] 周锡元, 苏经宇. 烈度、震中距和场地条件对地面运动反应谱的影响[J]. 地震工程与工程振动, 1983, 4(2): 31-43.
Zhou X Y, Su J Y. Effects of intense epicenter and site condition on response spectra of ground motion [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1983, 4(2): 31-43. (in Chinese)
- [9] 刘曾武, 朱镜清. 场地的某些参数对地面振动反应的影响[C]//中国科学院工程力学研究所地震工程研究报告集(四). 北京: 科学出版社, 1981.
Liu Z W, Zhu J Q. Effect of site parameters on ground vibration response [C] //Earthquake Engineering Reports of Institute of Engineering Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Beijing: Science Press, 1981. (in Chinese)
- [10] 钱胜国. 软土夹层地基场地土层地震反应特性研究[J]. 工程抗震, 1994(1): 32-36.
Qian Sh G. Study on seismic response characteristics of soil layer [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 1994(1): 32-36. (in Chinese)
- [11] 王钟琦, 谢君斐, 石兆吉. 地震工程地质导论[M]. 北京: 地震出版社, 1983.
Wang Zh J, Xie J P, Shi Zh J. Introduction to earthquake engineering geological[M]. Beijing: Seismological Press, 1983. (in Chinese)
- [12] 刘琨, 卢育霞, 李倩, 等. 软弱夹层对土层地震反应的影响[C]//第十一届全国土力学及岩土工程学术会议论文集. 兰州: 兰州大学出版社, 2011: 853-858.
Liu K, Lu Y X, Li Q, et al. Influence of soft interlayer on soil layers seismic response analysis [C] //Proceedings of the 11th National Conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2011: 853-858. (in Chinese)
- [13] 刘智, 张继文, 于永堂, 等. 高密度电法在黄土高填方工程中的应用研究[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 88-93.
Liu Zh, Zhang J W, YU Y T, et al. Application of high-density electrical method to the investigation of loess high-fill foundation [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(1): 88-93. (in Chinese)
- [14] 朱才辉, 李宁. 基于土电阻率的黄土高填方地基细观变形机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(3): 640-648.
Zhu C H, Li N. Mesoscopic deformation mechanism of loess high-fill foundation based on soil electrical resistivity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 640-648. (in Chinese)
- [15] Chen G, Jin D, Zhu J, et al. Nonlinear analysis on seismic site response of Fuzhou Basin, China [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2015, 105: 928-949.
- [16] 阮永芬, 刘文连, 刘永芳, 等. 高填土抗剪强度指标的影响因素分析[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2007, 32(2): 56-60.
Ruan Y F, Liu W L, Liu Y F, et al. Analysis of factors affecting shear strength of high fill soil [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology), 2007, 32(2): 56-60. (in Chinese)
- [17] Mayoral J M, Ramirez J Z. Site response effects on an urban overpass [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31: 849-855.
- [18] 刘琨, 卢育霞, 李倩. 复杂地形条件对强地震动特征的影响[J]. 世界地震工程, 2012, 28(4): 80-88.
Liu K, Lu Y X, Li Q. Influence of complicated topography conditions on strong ground motion characteristics [J]. World Earthquake Engineering, 2012, 28(4): 80-88. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)