黄信,王龙鑫,吴堃,等.机场高填方场地地震动参数特性研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1251-1258.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250207002

Huang Xin, Wang Longxin, Wu Kun, et al. Characteristics of ground motion parameters for airport high-fill sites[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1251-1258. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250207002

机场高填方场地地震动参数特性研究

黄 信,王龙鑫,吴 堃,冯 兴

(中国民航大学 交通科学与工程学院,天津 300300)

摘要:研究机场高填方场地对地震动参数的影响,对提升机场工程结构抗震安全至关重要。采用时域分析方法建立机场高填方场地三维数值分析模型,利用无限元考虑场地边界效应。考虑填方场地位置、填方高度和地震动幅值等影响因素,以峰值地面加速度(PGA)动力放大系数为指标,分析机场高填方场地的地震动参数特征。研究表明:高填方场地具有明显的地震动放大效应,并受竖向和水平位置影响,随着竖向高度位置增加而增大,同时随输入地震波不同而存在差异,如天然波1和天然波2作用下的场地表面中心PGA动力放大系数分别为2.48和2.05;地基会显著过滤输入地震动中的高频成分,如天然波1以及其传递到高填方场地底部和表面时所产生波形中,在2 Hz以下成分占比分别为46.7%、96.1%和97.3%;随着填方高度的增加,场地表面地震动放大效应先增大后下降,如天然波1作用下,填方高度分别为30 m、40 m和50 m时的PGA动力放大系数分别为2.24、2.48和2.29;相对多遇地震和设防地震作用而言,罕遇地震作用下机场高填方场地的地震动放大效应较低。

关键词:机场高填方场地;地震动放大效应;无限元边界;滤波作用;填方高度

中图分类号:TU318 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1251-08

DOI:10.20000/j.1000-0844.20250207002

Characteristics of ground motion parameters for airport high-fill sites

Huang Xin, Wang Longxin, Wu Kun, Feng Xing

(*School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*)

Abstract: Investigating the influence of airport high-fill sites on ground motion parameters is crucial for enhancing the seismic safety of airport engineering structures. A three-dimensional numerical analysis model of an airport high-fill site was established using a time-domain analysis method with infinite elements to account for site boundary effects. Considering factors such as fill location, fill height, and ground motion amplitude, the characteristics of ground motion parameters at the airport high-fill site were analyzed using the peak ground acceleration (PGA) amplification factor as an index. The results

收稿日期:2025-02-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52278542);中国民航大学基金配套专项(3122023PT05)

第一作者简介:黄 信(1983-),男,博士,教授,从事机场工程防灾减灾与韧性安全研究。E-mail: huangxin1395602@163.com。

indicate that high-fill sites exhibit a pronounced ground motion amplification effect, which is influenced by vertical and horizontal positions and increases with vertical height. This effect also varies with different input seismic waves; for example, the PGA amplification factors at the site surface center under natural waves 1 and 2 are 2.48 and 2.05, respectively. The foundation filters the high-frequency input ground motion components substantially. For natural wave 1, the proportions of components below 2 Hz in the input ground motion and in the ground motions transmitted to the high-fill site′s bottom and surface are 46.7%, 96.1%, and 97.3%, respectively. With increasing fill height, the ground motion amplification effect on the site surface first increases and then decreases. Under natural wave 1, the PGA amplification factors for fill heights of 30, 40, and 50 m are 2.24, 2.48, and 2.29, respectively. Compared with frequent and fortification-level earthquakes, the ground motion amplification effect at the airport high-fill site is reduced under rare earthquakes.

Keywords: airport high-fill site; ground motion amplification effect; infinite element boundary; filtering effect; fill height

0 引言

我国中西部地区地形复杂,为满足机场建设要求,多采用削山填谷的高填方建造方式,如九黄机场、攀枝花机场[1]。确保高填方机场建设与运行安全至关重要,目前国内外学者针对高填方场地的研究多集中在沉降变形[2],如刘维正等[3]分析了复合桩基在红黏土高填方场地的加固效果;Jie等[4]对施工期的地基沉降进行预测研究。然而,我国地震灾害频发,工程场地会影响地震动的传播[5],因此,工程结构动力响应的影响不容忽视。为提升复杂场地工程结构的抗震安全,目前学者多采用数值方法和试验法对黄土区、冻土区等特殊场地的地震动效应开展了研究。吴晓磊等[6]基于波动理论和极限分析上限定理提出了一种地震作用下冻土边坡的稳定性计算方法。Wu[7]分析了地震横波在弹性介质和饱和冻土交界处的复杂动力学行为。刘国光等[8]结合振动台试验研究了寒区高填方边坡坡顶的动力响应规律。Ba等[9]结合了二维和三维模拟计算的优点,运用二维半空间法改善了地震动评估的模拟效率。李小军等[10]分析了不同形状的凹陷场地对地震动的影响,结果表明凹陷地形对地震动的影响显著,其影响主要集中在地震波的中频范围内。Huang等[11]建立了一种间接边界积分方法,分析了土体孔隙度对饱和土体地震响应的影响。Liang等[12]提出了考虑水和地震耦合效应的黄土边坡滑坡的定量评价方法。Chang等[13]采用离散单元法分析了地震作用下黄土边坡的破坏模式,研究了破坏过程中的边坡应力和加速度分布特征。张江伟[14]采用数值分析方法建立了土质边坡分析模型,研究了边坡的地震动力响应特性。上述研究表明场地对地震动效应的影响机理复杂,应考虑场地土质条件、场地地形等因素影响。

由于高填方机场具有填方范围及高度大,填料为土石混合料等特征,目前尚未见针对机场高填方场地地震效应的研究报道。为确保我国中西部地区机场工程的抗震安全,有必要开展机场高填方场地地震动效应研究。

本文采用有限元分析方法建立机场高填方场地数值分析模型,利用无限元法模拟场地边界效应,考虑填方场地位置、填方高度等因素影响。以峰值地面加速度(Peak Ground Acceleration,PGA)动力放大系数为指标,通过分析多遇地震、设防地震和罕遇地震下高填方场地的地震动效应,研究机场高填方场地地震动参数的变化规律,为高填方机场工程结构抗震设计提供依据。

1 数值分析方法

1.1 场地动力响应计算方法

采用时域分析法进行土层地震反应分析,利用式(1)所示动力平衡方程进行求解分析[14],采用Rayleigh阻尼。

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{u}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{u}=-\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{g}}(t) \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{M}$为结构的质量矩阵;$\boldsymbol{C}$为结构的阻尼矩阵;$\boldsymbol{K}$为结构的刚度矩阵;$\ddot{\boldsymbol{u}}$为结构的加速度列阵;$\dot{\boldsymbol{u}}$为结构的速度列阵;$\boldsymbol{u}$为结构的位移列阵,$\ddot{\boldsymbol{u}}_{\mathrm{g}}(t)$为$t$时刻地震荷载加速度列阵。

利用Newmark-β法将地震荷载离散化,并假定

已知结构体系在 t_i 时刻的 $\boldsymbol{u}_i$、$\dot{\boldsymbol{u}}_i$、$\ddot{\boldsymbol{u}}_i$，可按式(2)求得结构体系在 t_{i+1} 时刻的加速度。

$$\ddot{\boldsymbol{u}}_{i+1}=\frac{\lambda}{\theta\Delta t^2}(\boldsymbol{u}_{i+1}-\boldsymbol{u}_i)-\frac{1}{\theta\Delta t}\dot{\boldsymbol{u}}_i-(\frac{1}{2\theta}-1)\ddot{\boldsymbol{u}}_i \tag{2}$$

式中：Δt 为 t_i 到 t_{i+1} 之间的时间差；λ 和 θ 分别为精度和稳定性控制系数，$0\leqslant\lambda\leqslant1$，$0\leqslant\theta\leqslant\frac{1}{2}$。

1.2　无限元边界法

为考虑机场高填方场地的边界效应，提高数值分析的计算效率，本文采用无限元边界法考虑场地边界效应。针对外源地震动入射问题，运动方程和地震等效动应力可表示为式(3)、(4)[15]。

$$\rho\ddot{u}_i=G\frac{\partial^2u_i}{\partial x_j\partial x_j}+(\lambda+G)\frac{\partial^2u_j}{\partial x_i\partial x_j} \tag{3}$$

$$\sigma_{ij}^{V}=\sigma_{ij}^{V_0}+B_0V_0 \tag{4}$$

式中：ρ 为材料密度；$\ddot{u}_i$ 为质点空间加速度分量；u_i、u_j 为质点空间位移分量；x_i、x_j 为质点空间坐标；G 为介质剪切模量；λ 为拉梅常数；σ_{ij}^{V} 为外源输入地震波产生的等效动应力；$\sigma_{ij}^{V_0}$ 为有限元边界等效动应力；B_0 为阻尼常数；V_0 为有限元边界速度波。

1.3　网格划分原则

在动力分析问题中，将连续介质离散为有限单元时会产生滤波和散射作用，土体单元过大会导致输入地震动的高频部分丢失，造成计算结果的失真。在保障计算精度的前提下提高计算效率，需对有限元的网格尺寸进行限制，土体单元网格最大尺寸如式(5)所示[16]。

$$h_{\max}\leqslant(\frac{1}{5}\sim\frac{1}{8})\frac{v_S}{f_{\max}} \tag{5}$$

式中：$h_{\max}$ 为土体单元网格最大尺寸；v_S 为土体剪切波速；$f_{\max}$ 为输入地震波最大波动频率。

土体剪切波速按式(6)求取[17]。

$$v_S=215.99+6.448H-0.0218H^2 \tag{6}$$

式中：H 为土体埋深。

2　机场高填方场地分析模型

2.1　模型建立

机场高填方场地地基的平面尺寸为 1 400 m(长)×1 100 m(宽)，以九寨黄龙机场高填方工程土层参数为参考，将地基概化为三个参数层，由上至下依次编号为 P1、P2 和 P3，且厚度分别为 10 m、20 m 和 10 m[18]。在地基上建立底部平面尺寸为 1 300 m(长) × 1 000 m(宽)，填方高度为 40 m，共四层土体，每层厚度为 10 m，填方坡度为 1∶2。边坡支护形式为锚杆支护，边坡为四级边坡，每级边坡高 10 m。在模拟分析无限体的动力问题时，为了消除边界对地震波传播的影响，在模型地基底部采用静态边界条件，地基四周设置无限元边界。水平向网格尺寸为 10 m，竖向网格尺寸为 3.5 m，根据式(5)计算可得网格尺寸满足精度要求。高填方场地有限-无限元模型示意如图 1 所示。

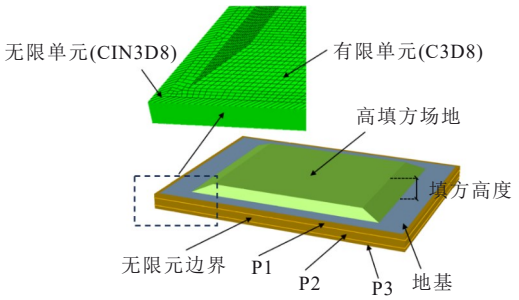


图 1　机场高填方场地有限元-无限元模型示意图

Fig. 1　Schematic diagram of finite element-infinite element model for the airport high-fill site

本文采用 Mohr-Coulomb 本构模拟场地土体材料特性，该模型通过应力-应变关系来描述材料的变形和破坏行为，可用于模拟地震荷载作用下土体和岩体的响应。高填方场地土体力学性能参数如表 1 所列[18]。土体的剪切波速是影响土体动力响应的重要因素，本文场地条件为Ⅱ类场地，抗震设防烈度为 8 度、0.20g，填土为土石混填。以每层土的中间位置处剪切波速为该层土体的等效剪切波速，根据式(6)求得不同埋深处填土的剪切波速，填土剪切波速具体数值如表 2 所列[17]。

表 1　高填方场地土体力学性能参数

Table 1　Mechanical properties of soil at the high-fill site

	介质	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 ρ/(kg/m^3)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
填方土体	层 1	40	0.35	2 000	20	28
	层 2	50	0.35	2 000	30	29
	层 3	60	0.34	2 000	40	29
	层 4	70	0.33	2 100	50	30
地基	P1	50	0.33	2 250	45	23
	P2	80	0.33	2 300	80	32
	P3	65	0.32	2 300	90	30

表 2 高填方场地填土剪切波速

Table 2 Shear wave velocities of soil at the high-fill site

埋深 H/m	5	15	25	35
剪切波速 v_S/(m/s)	247.69	307.81	363.57	414.97

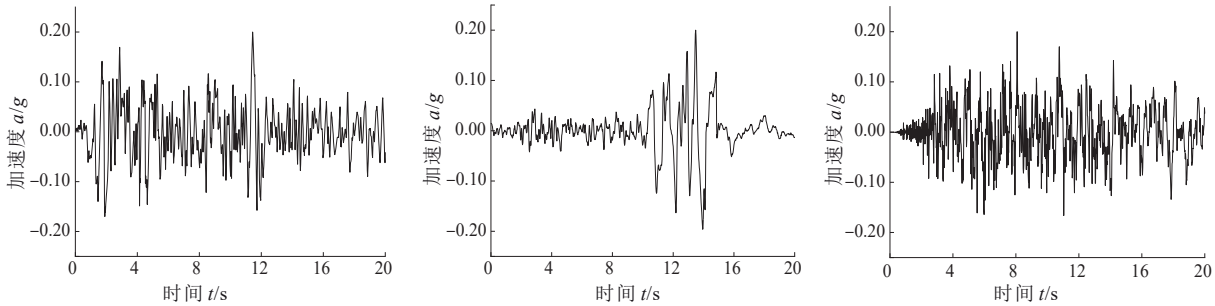
2.2 输入地震动

本文选择 2 条天然波和 1 条人工波进行场地地震动效应分析，两条天然波分别为 El-Centro 波（1940，EW 方向）和 Loma-Prieta 波（1989，EW 方向），以下命名为天然波 1 和天然波 2。选三条地震波反应谱峰值频率和最大波动频率如表 3 所列，8 度设防地震下加速度时程曲线如图 2 所示。

表 3 地震波反应谱峰值频率与最大波动频率

Table 3 Peak frequencies and maximum fluctuation frequencies of response spectra of seismic waves

地震波	反应谱峰值频率 f/Hz	最大波动频率 f/Hz
天然波 1	1.923 077	0.799 201
天然波 2	1.041 667	0.999 001
人工波	2.631 579	1.398 601



(a) 天然波 1 (b) 天然波 2 (c) 人工波

图 2 输入地震波加速度时程曲线

Fig. 2 Acceleration time histories of input ground motions

3 地震动参数特性分析

3.1 填方场地位置影响

对高填方场地模型设置输出加速度提取点，沿竖直方向每 10 m 设置一个提取点，沿水平方向每 25 m 设置一个提取点。提取点具体位置如图 3 所示（图示为场地短边方向中心位置处的截面，单位：m），图 3 中的 i、j 分别从上至下、从左至右依次取 1、2、3、4、5。图 4 所示为天然波 1 下 V_{11} 和 V_{41} 的加速度时程曲线。

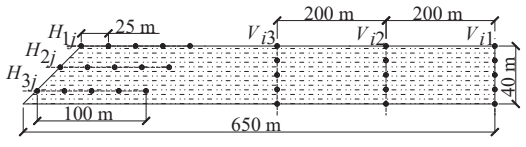
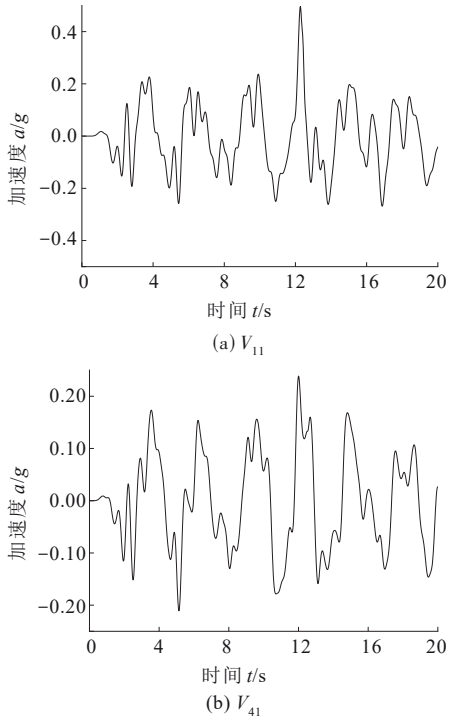


图 3 高填方场地模型输出加速度的特征点位置示意

Fig. 3 Schematic diagram of characteristic points for acceleration in the high-fill site model

由图 4 可知，V_{11} 和 V_{41} 输出的加速度峰值分别为 0.496g 和 0.239g，分别出现在 12.28 s 和 12.00 s，与天然波 1 在 11.44 s 出现峰值加速度 0.200g 相比，两处位置对输入地震动均有放大作用，且峰值的出现均有滞后现象。



(a) V_{11} (b) V_{41}

图 4 特征点加速度时程曲线

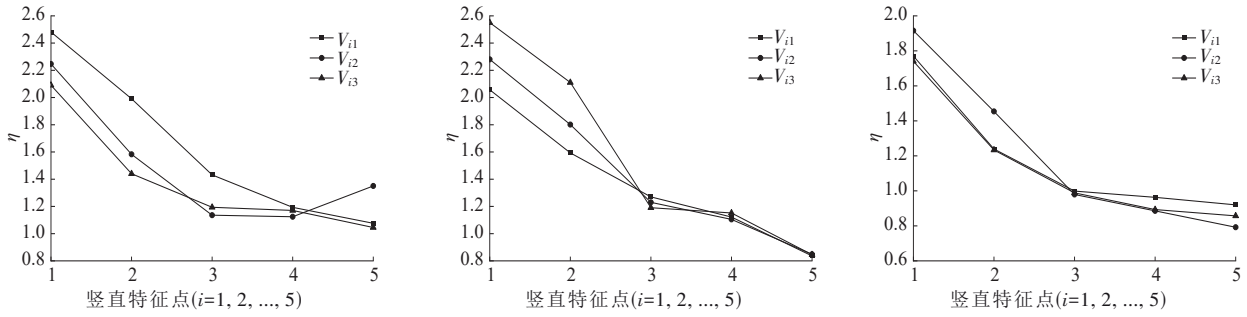
Fig. 4 Acceleration time histories at characteristic points

为定量描述填方场地对地震动峰值加速度的影响，采用 PGA 动力放大系数进行对比分析。PGA 动力放大系数定义如式(7)所示，PGA 动力放大系数越大，说明场地对地震动的放大效应越强烈。

$$\eta=\frac{a_{x\max}}{a_{\max}} \tag{7}$$

式中：η 为 PGA 动力放大系数；$a_{x\max}$ 为场地各点位置输出的加速度时程的最大绝对峰值；$a_{\max}$ 为基底输入地震动加速度时程的最大绝对峰值。

场地不同高度位置处的 PGA 动力放大系数 η 分布规律如图 5 所示。



(a) 天然波 1　(b) 天然波 2　(c) 人工波

图 5　场地竖向 PGA 动力放大系数

Fig. 5　Vertical PGA dynamic amplification factors of the site

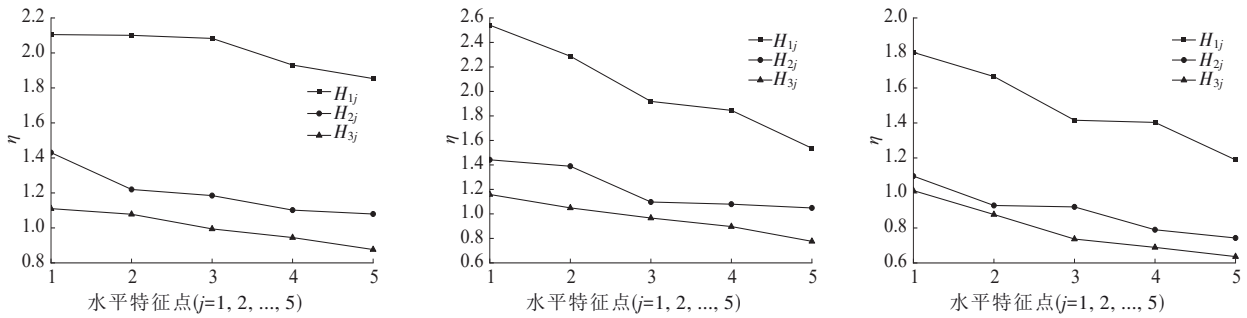
由图 5 可知，高填方场地地震动效应随着所处位置的高度增加而增大，在场地顶部处加速度放大效应最大。例如，天然波 1 作用下，V_{11}、V_{21}、V_{31}、V_{41} 和 V_{51} 的 PGA 动力放大系数分别为 2.48、1.99、1.43、1.19 和 1.08，所以高填方场地会增大机场工程结构的地震效应，高方场地的地震效应不容忽视。

同时可知，场地地震效应影响随输入地震波不同而存在差异，如天然波 1、天然波 2 和人工波作用下 V_{11} 点的 PGA 动力放大系数分别为 2.48、2.05 和 1.77，这主要是由于天然波 1、天然波 2 和人工波的最大波动频率及其波形等频谱特性不同；在天然波 1、天然波 2 和人工波作用下，场地顶部表面的 PGA 动力放大系数最大值分别出现在 V_{11}、V_{31} 和 V_{21} 处，为 2.48、2.55 和 1.91。

为探明高填方场地沿水平位置坡体内、外对输入地震动放大效应的影响规律，在距场地侧面边界 100 m 的范围内设置提取点。对不同点处的 PGA 动力放大系数进行分析，提取点的布置如图 3 所示，结果如图 6 所示。

由图 6 可知，距高填方场地边界越近位置处的 PGA 动力放大系数越大，并在高填方场地表面上达到最大值，如在天然波 2 作用下，H_{11}、H_{12} 和 H_{13} 对应的 PGA 动力放大系数分别为 2.54、2.29 和 1.92；同时可知，高填方场地表面处，随着提取点高度的增加其 PGA 动力放大系数增大，如在天然波 2 作用下，H_{11}、H_{21} 和 H_{31} 对应的 PGA 动力放大系数分别为 2.54、1.44 和 1.16。这表明场地效应对输入地震波的最大加速度绝对峰值具有放大效应。

综上可知，机场高填方场地对输入地震动有明显的放大效应。在高填方场地竖向而言，随着高度



(a) 天然波 1　(b) 天然波 2　(c) 人工波

图 6　场地水平向 PGA 动力放大系数

Fig. 6　Horizontal PGA dynamic amplification factors of the site

的增加，PGA 动力放大系数不断增大，在高填方场地表面时达到最大值。例如，如天然波 1 作用下的 PGA 动力放大系数为 2.48，所以在机场工程抗震分析时高填方场地效应不容忽视，需考虑场地边界会对地震波产生反射作用[10]。对于本文高填方场地水平向而言，接近场地边界时的 PGA 动力放大系数最大，主要是高填方场地边坡面会对地震波产生反射作用，在场地反射波叠加下，场地在水平向整体表现为边坡处的 PGA 动力放大系数大于场地内部。

3.2 填方场地对频谱响应的影响

傅里叶谱曲线能够反映出地震波中的各种频率成分及其对应的幅值，所以通过频谱分析可以明确地震波对结构响应的影响。由于地震波加速度幅值的变化对地震波的频率特性不产生影响，因此考虑地震波加速度幅值为 0.20g 时，分析场地对频谱响应的影响。

对输入天然波 1 下机场高填方场地点 V_{11}、V_{31} 和 V_{51} 的加速度时程进行傅里叶变换，得到三点处的加速度响应的傅里叶谱值。与天然波 1 的加速度时程的傅里叶谱进行相比分析，输出的频谱均有明显的变化，如图 7 所示。

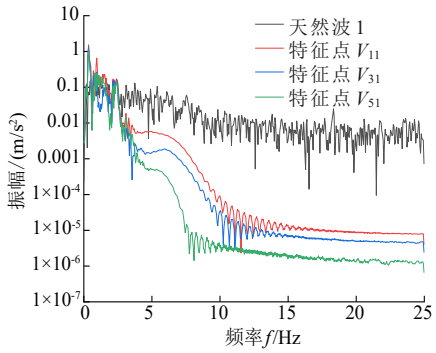


图 7 天然波 1 高填方场地特征点的傅里叶谱

Fig. 7 Fourier spectra at characteristic points of the high-fill site under seismic wave 1

对比图 7 中的天然波 1 和三个特征点处的傅里叶谱可知，天然波 1 的傅里叶谱的频率分布范围较为广泛，频率在 25 Hz 时依然占有一定成分；而提取点 V_{51} 的傅里叶谱中 7.5 Hz 以上的成分几乎为 0，并随着高程增加场地各点傅里叶谱中的高频成分持续减少，低频占比显著增大。

同时可知，随着竖向高度的增加，地基和高填方场地对低频地震动有明显的放大作用，如天然波 1 和提取点 V_{51}、V_{31} 和 V_{11} 的傅里叶谱最大振幅分别为 0.19、1.04、1.37 和 1.53。

傅里叶谱中不大于特定频率的成分占比可按式(8)计算。

$$P_{f\leqslant f_0}=\frac{E_{f\leqslant f_0}}{E_{\text{total}}}=\frac{\int_0^{f_0}\left|F(f)\right|^2\mathrm{d}f}{\int_0^{f_1}\left|F(f)\right|^2\mathrm{d}f} \tag{8}$$

式中：f_0 为计算的特定频率；f_1 为频谱的最大频率；$F(f)$ 为对应频率的幅值。

由式(8)计算可得，不大于 2 Hz 的频率成分在天然波 1 及天然波 1 传递到高填方场地底部 V_{51} 和表面 V_{11} 时的占比分别为 46.7%、96.1%、和 97.3%，说明地基会显著过滤输入地震动中的高频成分，此时高填方场地中的地震动高频成分较少。在输入天然波 2 和人工波时填方场地的频谱响应表现出了同样的规律。由于地基的滤波作用导致输入地震动在 2 Hz 的低频成分增大，对于机场塔台结构的第一自振频率在 1.7 Hz 左右而言[19]，高填方场地的地基滤波效应会增加塔台结构的共振现象，从而增大塔台结构的地震响应。

3.3 填方高度及地震动输入幅值影响

为了定量分析填方高度和地震动输入幅值对机场高填方场地表面地震动峰值加速度的影响，分别考虑填方高度为 20 m、30 m、40 m 和 50 m 时，机场高填方场地表面的地震响应结果。填方分层土体以 10 m 为一层，土体参数详见表 1 所列。当填方高度为 50 m 时，第 5 层的填方土体弹性模量为 80 MPa，泊松比为 0.32，密度为 2 200 kg/m^3，黏聚力为 50 kPa，内摩擦角为 30°，等效剪切波速为 462.01 m/s。8 度抗震设防下的多遇地震、设防地震和罕遇地震下的输入地震波峰值加速度分别为 0.07g、0.20g 和 0.40g，分析得到高填方场地表面中心点 V_{11} 处的 PGA 动力放大系数 η 如图 8 所示。

由图 8 可知，在不同填方高度下，场地表面中心点处的 PGA 动力放大系数大于 1，表现出对输入地震动的放大效应。随填方高度的增加，PGA 动力放大系数表现为先增大后减小的趋势，并具有明显的非线性特点。例如，天然波 1 在多遇地震作用下，填方高度为 20 m、30 m、40 m 和 50 m 下的 PGA 动力放大系数分别为 1.58、2.25、2.53 和 2.32，其原因主要是随着填方高度的增加，场地下方土体的压实度不断升高，导致填方土体的剪切波速和剪切模量不断变大。但当填方高度到达一定程度后土体的力

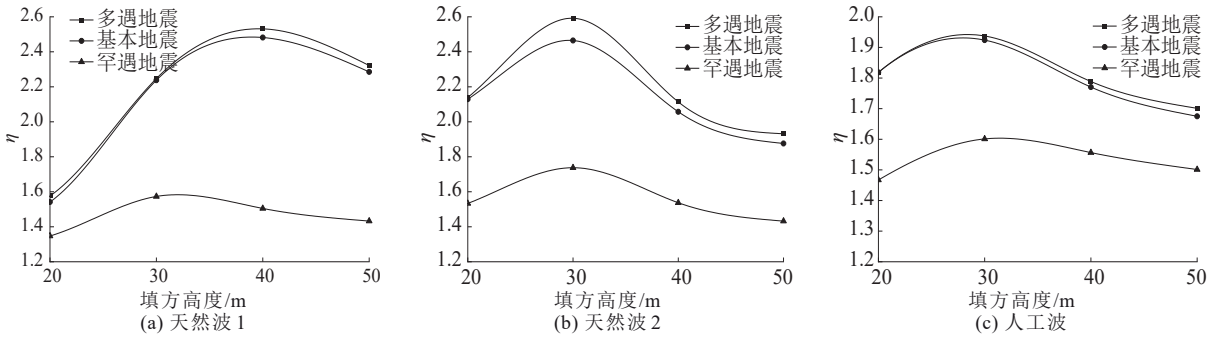


图 8　场地表面 PGA 动力放大系数随填方高度变化曲线

Fig. 8　Variation of PGA dynamic amplification factors at the site surface with fill height

学性质参数会逐渐趋于稳定，此时场地对地震动的放大效应也会逐渐稳定。因此，为减小机场高填方场地的地震动放大效应，应提高填土的压实度。

高填方场地表面的 PGA 动力放大系数受输入地震动的强度影响，相对多遇地震和设防地震作用而言，罕遇地震下高填方场地的动力放大效应降低。例如，天然波 1 作用下，填方高度为 40 m 时，多遇地震、设防地震和罕遇地震下的填方表面处的 PGA 动力放大系数分别为 2.53、2.48 和 1.50。

4　结论

本文利用无限元法考虑机场高填方场地的边界效应，采用时域分析方法分析机场高填方场地的地震动响应，研究了机场高填方场地的地震动参数特性分布规律，通过分析得出以下结论：

（1）机场高填方场地会显著放大输入地震动效应，其地震动放大效应在竖向沿高度增加而放大，在场地表面达到最大值，场地地震动效应不容忽视。例如，天然波 1 作用下填方表面中间点的 PGA 动力放大系数为 2.48，对于水平向而言，距高填方边界越近位置处的 PGA 动力放大系数越大。

（2）场地地震动效应随输入地震波不同而存在差异，如天然波 1、天然波 2 和人工波作用下场地表面中点的 PGA 动力放大系数分别为 2.48、2.05 和 1.77。

（3）地基会显著过滤输入地震动中的高频成分，如天然波 1 以及其传递到高填方场地底部和表面时产生波形中在 2 Hz 以下成分占比分别为 46.7%、96.1% 和 97.3%。随着填方场地竖向高度的增加，地基和高填方场地对低频地震动有明显的放大作用。

（4）机场高填方场地表面的地震动放大效应随填方高度的增大，呈现出先升高后下降的趋势。高填方场地的地震动放大效应受地震烈度影响，相对多遇地震和设防地震作用而言，罕遇地震作用下的动力放大效应降低。

参考文献（References）

[1] 安鹏，张杰，倪万魁，等. 安康机场罗家河膨胀土高填方沉降变形特征研究[J]. 岩土工程学报，2023，45(4)：833-839.
An Peng，Zhang Jie，Ni Wankui，et al. Settlement and deformation characteristics of high fill of Luojiahe expansive soil in Ankang Airport[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2023，45(4)：833-839.

[2] 冯兴，姚仰平，李汝宁，等. 山区机场高填方地基变形分析[J]. 北京航空航天大学学报，2021，47(10)：2013-2023.
Feng Xing，Yao Yangping，Li Runing，et al. Deformation of high-fill subgrade of airport in mountain areas[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2021，47(10)：2013-2023.

[3] 刘维正，吴民晖，冯瑜，等. 机场高填方红黏土地基GC-CFG组合桩处理试验研究[J]. 铁道科学与工程学报，2023，20(1)：156-168.
Liu Weizheng，Wu Minhui，Feng Yu，et al. Experimental study on treatment of high fill lateritic clay foundation airport with GC-CFG composite pile[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2023，20(1)：156-168.

[4] Jie Y X，Wei Y J，Wang D L，et al. Numerical study on settlement of high-fill airports in collapsible loess geomaterials：a case study of Lüliang Airport in Shanxi Province，China[J]. Journal of Central South University，2021，28(3)：939-953.

[5] 冯细霞，姜清辉，张慧超，等. 岩质边坡地震响应振动台试验研究[J]. 振动、测试与诊断，2018，38(3)：575-582.
Feng Xixia，Jiang Qinghui，Zhang Huichao，et al. Shaking table test on seismic response of rock slope[J]. Journal of Vibration，Measurement & Diagnosis，2018，38(3)：575-582.

[6] 吴晓磊，董建华，王璐，等. 地震作用下热锚管框架支护多年冻土边坡稳定性分析方法[J]. 中国公路学报，2023，36(10)：106-118.
Wu Xiaolei，Dong Jianhua，Wang Lu，et al. Stability analysis

method of frozen soil slopes supported by thermal anchor pipe frames under seismic action[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 106-118.

[7] Wu Z. Numerical simulation of seismic transverse waves on the interface between an elastic medium and saturated frozen soil [J]. Mechanics of Solids, 2024, 59(3): 1496-1516.

[8] 刘国光, 裴磊洋, 牛富俊. 寒区高边坡机场坡顶土体振动响应研究[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(5): 938-944, 1039.
Liu Guoguang, Pei Leiyang, Niu Fujun. Research on dynamic response of top soil on the high-filled slope of cold region airport [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(5): 938-944, 1039.

[9] Ba Z N, Sang Q Z, Lee V W. 2.5D scattering of obliquely incident seismic waves due to a canyon cut in a multi-layered TI saturated half-space[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 129: 105957.

[10] 李小军, 任朋亮, 王玉石, 等. 不同形状三维凹陷地形场地对地震动影响比较分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3327-3338.
Li Xiaojun, Ren Pengliang, Wang Yushi, et al. Comparison and analysis of the influence of different shapes of 3D concave topographies on site ground motion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(11): 3327-3338.

[11] Huang L, Liu Z X, Wu C Q, et al. A three-dimensional indirect boundary integral equation method for the scattering of seismic waves in a poroelastic layered half-space[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2022, 135: 167-181.

[12] Liang C Y, Zhang Y G, Liu J M, et al. Quantitative evaluation of landslide hazard under the coupling of water and earthquake: a case of co seismic landslides induced by the 2013 M_W6.6 Minxian—Zhangxian earthquake[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(7): 293.

[13] Chang W B, Xing A G, Wang P. Initiation mechanism of an earthquake-triggered loess-mudstone interface landslide: insights from DEM numerical simulation[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(7): 277.

[14] 张江伟. 土质边坡地震动力响应特性分析及稳定性评价[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2015: 17-30.
Zhang Jiangwei. Analysis of seismic dynamic response characteristics and stability evaluation of soil slope [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administation, 2015: 17-30.

[15] 戚玉亮, 大塚久哲. ABAQUS动力无限元人工边界研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 3007-3012.
Qi Yuliang, Hisanori Otsuka. Study of ABAQUS dynamic infinite element artificial boundary[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(10): 3007-3012.

[16] 丁阳, 刘倩, 宗亮, 等. 场地土对枢纽车站屋盖空间结构地震响应影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(2): 34-41.
Ding Yang, Liu Qian, Zong Liang, et al. Analysis of the influence of site soil on the seismic response of space roof structure of the hub station[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(2): 34-41.

[17] 刘红帅, 郑桐, 齐文浩, 等. 常规土类剪切波速与埋深的关系分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1142-1149.
Liu Hongshuai, Zheng Tong, Qi Wenhao, et al. Relationship between shear wave velocity and depth of conventional soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1142-1149.

[18] 徐则民, 张倬元, 许强, 等. 九寨黄龙机场填方高边坡动力稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1883-1890.
Xu Zemin, Zhang Zhuoyuan, Xu Qiang, et al. Dynamic stability analysis of high fill slope of Jiuzhai-Huanglong airfield[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1883-1890.

[19] 黄信, 谭成松, 陈宇, 等. 强震作用下机场高耸塔台结构抗震性能分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(1): 36-45.
Huang Xin, Tan Chengsong, Chen Yu, et al. Seismic performance of high-rise control tower of airport under strong earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(1): 36-45.

（本文编辑：贾源源）