

DOI: 10.11779/CJGE201707015

# 易液化深厚覆盖层地震动放大效应台阵观测与分析

周燕国<sup>1, 2, 3</sup>, 谭晓明<sup>1, 2, 4</sup>, 陈捷<sup>1, 2</sup>, 裴向军<sup>\*3</sup>, 陈云敏<sup>1, 2</sup>

(1. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310058;  
3. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 4. 中建三局投资发展有限公司, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 基于美国加州 Caltrans/CDMG 的两个井下台阵加速度记录, 从时域和频域分析了百米级易液化深厚覆盖层在不同地震下的地震动放大效应, 揭示了地震动从基岩向覆盖层传播的 4 个重要特征: ①加速度放大效应受土层深度影响, 近地表 20~30 m 以内放大效应突出; ②地震动三分量的放大效应具有方向性, 水平向与竖向地震动放大效应差异显著; ③基岩加速度呈现“小震放大、大震衰减”的规律; ④加速度放大规律与频率相关, 深厚覆盖层放大频带较宽。初步分析了造成上述放大效应的可能原因。在此基础上, 基于平面波动假设提出了考虑层间波阻抗比放大和传播路径衰减的深厚覆盖层加速度放大效应简化函数, 改进了 1/4 波长法的参数取值, 并结合自由表面效应, 对前述台阵记录的放大效应进行了估算, 发现无论时域还是频域, 预测结果与实际观测都较接近。本文研究成果可为深厚覆盖层液化判别和抗震设计的加速度选取提供理论依据和简化分析方法。

**关键词:** 深厚覆盖层; 地震动; 放大效应; 井下台阵; 峰值加速度; 反应谱; 平面波

**中图分类号:** TU435; P315 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)07-1282-10

**作者简介:** 周燕国(1978-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与地震工程, 岩土工程减灾, 土工离心机物理模拟方面的研究和教学工作。E-mail: qzking@zju.edu.cn。

## Observations and analyses of site amplification effects of deep liquefiable soil deposits by geotechnical downhole array

ZHOU Yan-guo<sup>1, 2, 3</sup>, TAN Xiao-ming<sup>1, 2, 4</sup>, CHEN Jie<sup>1, 2</sup>, PEI Xiang-jun<sup>3</sup>, CHEN Yun-min<sup>1, 2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Hangzhou 310058, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. Investment Development Co., Ltd., CCTEB, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Based on the accelerations recorded from two downhole arrays instrumented by the Caltrans/CDMG project, the site amplification effects of deep liquefiable soil deposits are analyzed in both time and frequency domains, and several important features of the wave propagation from the bedrock to the overlying soil layers are observed: (1) The depth of soil deposit affects the site amplification considerably, and large part of the amplification occurs in the near-surface zone within the depth of 20~30 m; (2) The amplification differs from one to another direction, and the difference between the horizontal and vertical shakings is significant; (3) The amplification occurs when the input bedrock motion is small, while the de-amplification effects are observed when the bedrock input motion is large enough; (4) The amplification is frequency dependent, and the deep deposits amplify the bedrock ground motion in a wide frequency band. The underlying mechanisms are preliminarily analyzed. The simplified function accounting for the impedance contrast amplification and thickness attenuation effects is proposed based on the plane wave assumptions, and the parameters are improved for the quarter wave length method. The amplification ratios are predicted for all four events in conjunction with "free-surface effect", where the predictions are found in good agreement with the observations either in time or frequency domain. The present study provides a theoretical basis and simplified method for estimating the ground motions for liquefaction evaluation and seismic design of deep liquefiable soil deposits.

**Key words:** deep deposit; ground motion; site amplification; geotechnical downhole array; peak acceleration; response spectrum; plane wave

## 0 引言

近年来中国西南水利水电开发和交通基础设施迅猛发展, 大批高坝大库、高填方机场、高速交通设施

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51578501); 浙江省自然科学基金项目(LR15E080001); “国家特支计划”青年拔尖人才项目(2013); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2014CB047005); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(SKLG2015K017)

**收稿日期:** 2016-06-17

**\*通讯作者** (E-mail: peixj0119@tom.com)

相继建设。西南地区主要流域（包括大渡河、金沙江、岷江、雅砻江等）均不同程度地发育深厚覆盖层<sup>[1]</sup>。深厚覆盖层一般指堆积于河谷之中，厚度大于 30 m 的第四纪松散堆积物。例如，在金沙江流域，其宗水电站沿河段覆盖层厚 60~120 m，虎跳峡大峡谷地段河床覆盖层厚 40~50 m，龙蟠盆地河床覆盖层厚 100~250 m，塔城坝址河床覆盖层厚 100 m，上江坝址河床覆盖层最厚达 206 m。深厚覆盖层通常具有结构松散、层次不均匀、物理力学性质差异大的特点，分布有粉土、粉细砂、砾砂等可液化夹层<sup>[2]</sup>。由于西南地区地震活动频繁、地震烈度高<sup>[3]</sup>，突出的场地效应将导致近地表地震动显著放大，极易触发深厚覆盖层液化灾害。例如，2008 年汶川地震在岷江流域河漫滩触发大范围液化侧移，2013 年芦山地震也有场地液化报导<sup>[4]</sup>。当前以 Seed 简化方法为代表的地震液化判别，主要考虑近地表 30 m 内的地震动放大规律，根据地表台站记录推算一定深度处地震动强度指标，例如对地震剪应力比 CSR 中的剪应力折减系数  $r_d$  的估算<sup>[5-6]</sup>，但没有关注更深土层对地震动传播及场地液化的影响规律。因此，研究易液化深厚覆盖层场地的地震动放大效应，对高烈度区的高库大坝、机场高填方地基的液化评价、抗液化处理和抗震设计具有重要科学意义和工程价值。

在场地地震动放大效应研究中，国内外学者采用解析分析、数值模拟和强震动观测开展了一系列研究<sup>[7-8]</sup>。其中，基于一维弹性波动理论的弹性半空间上覆土层解析方法（以传递函数为代表）具有概念明确、计算简便的优点，但其理论假设和土层条件简单，未考虑实际强震下土体变形强非线性和可能产生的孔压增长对场地土层的影响，得到的预测值与实际观测有一定差异<sup>[9]</sup>。以场地响应理论为基础的数值分析（如 SHAKE 和 DeepSoil 等软件）可较好地描述土体在地震荷载下的应力应变响应，是目前研究场地放大作用的重要手段，但对工程技术人员而言计算复杂、不易掌握<sup>[10-13]</sup>。因此，发展物理意义明确、计算简便可靠的场地放大效应评价方法具有较大的工程价值，这主要体现在国内外规范方面。中国规范基于场地覆盖层厚度和土层等效剪切波速（如 GB50011—2010）进行场地分类，然后进行场地效应评价；美国规程（如 FEMA 450）主要基于地表 30 m 内的土层的平均剪切波速进行场地分类。李平等<sup>[14]</sup>研究后发现，深厚土层场地对地震动的低、高频分量都有显著的放大作用，并指出当前规范采用双指标法进行场地分类有时可能低估地震动效应。国外也有学者指出了相同问题，并试图从覆盖层厚度和衰减参数方面改进  $V_{s,30}$  指标的适用性<sup>[15]</sup>。基于强震记录的经验分析法被公认为研究场地效应最直

接有效的方法，能客观反映场地覆盖层对地震的影响程度<sup>[16-18]</sup>。但已有研究大多基于地表台站记录（土体台站与基岩台站对比），无法揭示地震动沿覆盖层深度变化规律。近几十年来，美国、日本和中国台湾地区相继建设了多个竖向钻井台阵并测得了大量强震数据，为深厚覆盖层场地地震动放大效应研究提供了直接观测手段<sup>[19]</sup>。

针对上述问题，本文选择了美国加州交通局（Caltrans/CDMG）台网中的 Treasure Island 和 La Cienega 两个百米级易液化深厚覆盖层的井下岩土强震台阵，根据 4 次地震动记录，从时域和频域分析了不同地震下的地震动放大效应，揭示了地震动从基岩向上传播的几个显著特征，并对造成放大的可能机制进行了探讨。在此基础上，基于一维波动理论提出了考虑层间阻抗比放大效应和传播路径衰减的深厚覆盖层加速度简化放大函数，并结合自由表面效应，对前述台阵记录进行了时域和频域估算，初步揭示了深厚覆盖层场地放大效应的主要影响因素，为深厚覆盖层加速度的合理选取提供参考依据。

1 台阵场地与地震事件简介

Treasure Island 位于加州旧金山地区，表层填土松散且易液化，地下水位为地表以下 2 m。台阵编号 58642，地表海拔 2 m，坐标（37.825°N，122.374°W），在 0，7，16，31，44，104 和 122 m 共 7 个深度布置了三向加速度计<sup>[20]</sup>。该台阵土层剖面为：地表以下 12 m 厚的水力充填物（黏质粉细砂）和砂，15 m 厚的中硬全新世湾泥，60 m 厚的坚硬更新世湾泥，基岩在地表以下 89 m 位置。台阵场地土层剖面、波速和饱和密度信息见图 1，地表以下 30 m 的等效剪切波速为 181.5 m/s，基岩剪切波速为 650 m/s<sup>[21]</sup>。该台阵地震事件选为：1999 年 Bolinas 地震，发生在圣安地列斯断层，旧金山湾区大部有震感；2014 年 South Napa 地震发生在旧金山湾区北部，是自 1989 年 Loma Prieta 地震（ $M_s=7.1$ ）以来在湾区发生的最大地震。

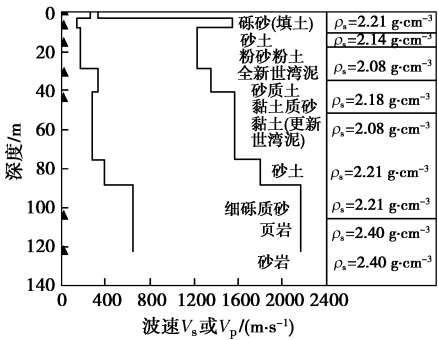


图 1 Treasure Island 台阵钻孔柱状图与波速剖面  
Fig. 1 Soil profile and wave velocities of Treasure Island

La Cienega位于南加州圣莫妮卡高速公路(I-10), 台阵编号24703, 地表海拔26 m, 坐标(34.036°N, 118.378°W), 地下水位为地表以下9.1 m, 在0, 18, 100和252 m共4个深度布置了三向加速度计。该场地近地表30 m内土层为河流沉积物(饱和密度平均值1.99 g/cm<sup>3</sup>), 30 m深度以下为海相沉积物, 包括砂、淤泥、黏土及砂砾等(饱和密度平均值2.09 g/cm<sup>3</sup>)<sup>[22]</sup>。台阵剖面见图2, 近地表30 m深度平均剪切波速为241 m/s, 深度100 m处的剪切波速为650 m/s。La Cienega台阵基岩上覆土层的波速要高于Treasure Island台阵, 尤其是海相沉积土层。该台阵地震事件选为: 1999年Hector Mine地震, 发生在莫哈韦沙漠的偏远地区; 2001年加州Beverly Hills地震, 峰值加速度大, 持时短。两个台站的4次地震事件信息详见表1。

图3(a), (b)分别给出了Treasure Island台阵990817地震经过带通(0.5~46 Hz)滤波后的三向加速度时程和加速度反应谱(阻尼比取0.05)。

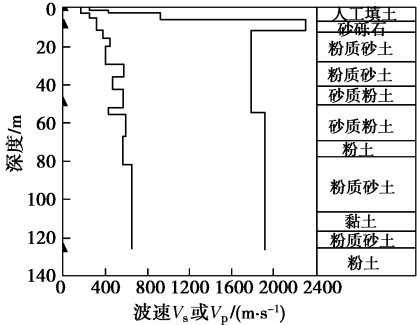


图2 La Cienega 台阵钻孔柱状图与波速剖面  
Fig. 2 Soil profile and wave velocities of La Cienega

2 地震动放大效应观测

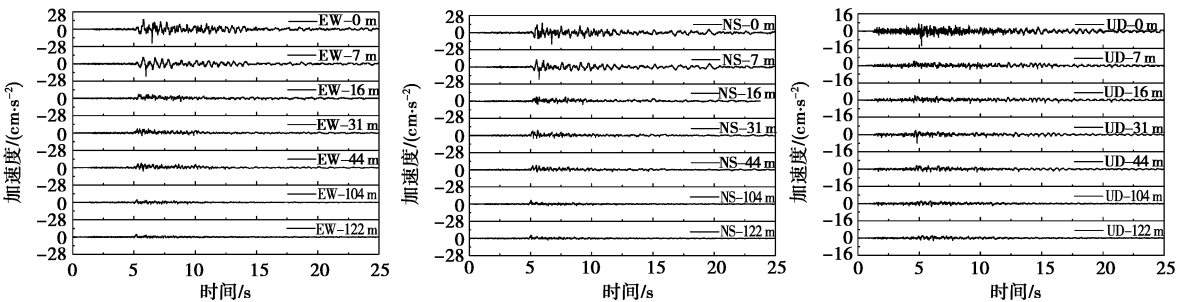
2.1 峰值加速度放大效应

针对每次地震事件, 将两个台阵在不同深度加速度分量的峰值绘于图4, 5。尽管四次地震事件的震源特性、传播路径、台阵场地条件不同, 峰值加速度随深度的放大呈现一定的规律性:

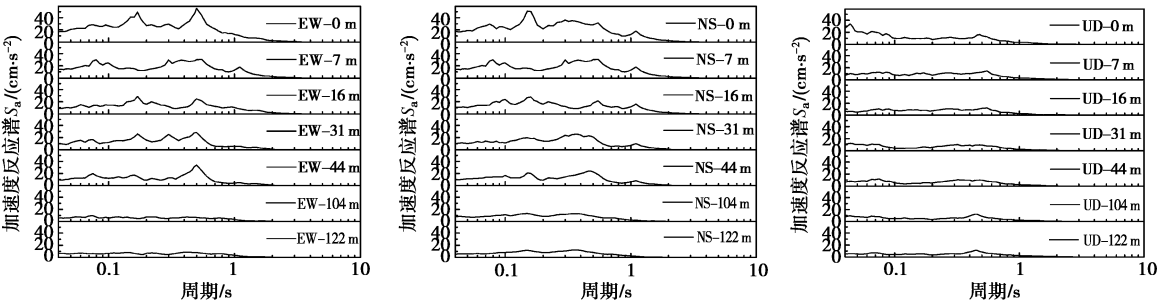
表 1 两个台站的 4 次地震事件信息

Table 1 Information of 4 earthquakes recorded in two geotechnical arrays

地震 编号	地震日期 YY/MM/DD	地震地点 (震中)	纬度 (° N)	经度 (° W)	震级	MMI (° )	深度 /km	震中距 /km	方位角 (° )	峰值地表 加速度/g
990817	99/08/18	Bolinas	37.907	122.687	$M_L$ 5.0	6	6.7	29.0	108	0.017
140824	14/08/24	South Napa	38.220	122.310	$M_w$ 6.0	8	11.3	44.1	193	0.017
991016	99/10/16	Hector Mine	34.594	116.271	$M_L$ 7.1	8	6.0	203.9	253	0.035
010909	01/09/09	Beverly Hills	34.060	118.390	$M_L$ 4.2	6	7.9	4.3	151	0.490



(a) 三向加速度时程(从左至右方向分别为EW, NS, UD)



(b) 三向加速度反应谱(从左至右方向分别为EW, NS, UD)

图3 Treasure Island 台阵加速度记录(990817 地震)

Fig. 3 Acceleration time histories and ARS of 990817 event at Treasure Island station



首先, 无论哪个方向的地震动分量, 时程的峰值加速度从基岩至地表随传播距离增加而逐渐放大, 最显著的放大发生在地表以下 20~30 m 以内的浅层。主要原因在于深部主要由土层阻抗比放大和传播路径衰减制约, 而浅表还受自由地表效应(反射叠加效应、面波等)影响, 放大机制更复杂, 放大幅度更显著。

其次, 对于某次地震事件, 3 个分量放大效应不同, 水平向与竖直向差异显著。Penzien 等<sup>[23]</sup>将地震传播方向定义为近主轴方向(水平)、垂直主轴方向的近中主轴方向(水平)以及小主轴方向(上下)。上下方向深度放大特征和水平方向地震动差异明显, 主要表现为 UD 分量沿深度方向变化更小、而浅层放大更显著, 这与两种波动机制和土层波速分布及饱和度有关<sup>[24]</sup>。另外, 4 次地震的近主轴方向分别为 EW、NS、EW 和 NS。同为水平分量, 近中主轴方向的水平剪切波沿深度衰减要比近主轴方向更明显, 说明地震动深度放大(或衰减)具有方向性。

再次, 比较图 5 的左右两边可发现, 地震动放大效应随着基岩地震动强度增大而减弱, 在基岩峰值加速度超过 150 cm/s<sup>2</sup> 时, 土层中的加速度出现了衰减。已有研究表明, 这主要由土体非线性响应导致<sup>[25]</sup>。一方面, 随着振动幅值增大, 土体阻尼比增大, 波动能量衰减加剧, 因而小震输入的放大效应比大震输入更明显; 另一方面, 土体应力应变关系的非线性也意味着材料弹性模量和波速是应变相关的, 因此共振频率也是应变相关, 大震与小震激发的共振频率有所不同。

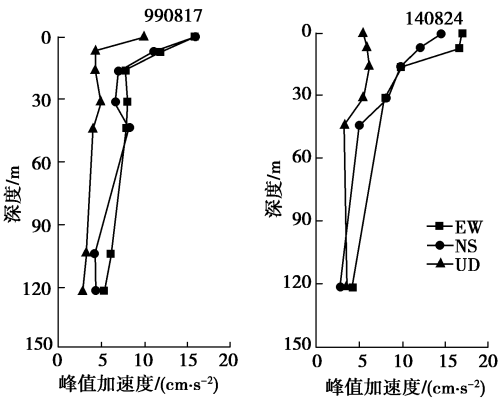


图 4 990817 与 140824 地震峰值加速度深度分布

Fig. 4 Peak acceleration profiles of 990817 and 140824 events

2.2 加速度反应谱放大效应

鉴于加速度反应谱在抗震设计中的重要作用, 本节在前述加速度时程观测的基础上, 进一步分析加速度反应谱的深度放大规律。按下式定义加速度反应谱谱比:

$$SR_z = \frac{ARS_z}{ARS_b}, \tag{1}$$

式中,  $SR_z$  为地表以下深度  $z$  位置处的土层加速度反应谱谱比,  $ARS_z$  为该位置的加速度反应谱,  $ARS_b$  为覆盖层底部(基岩)的加速度反应谱。

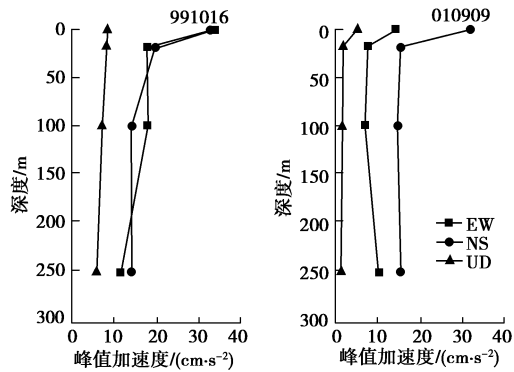


图 5 991016 与 010909 地震峰值加速度深度分布

Fig. 5 Peak acceleration profiles of 991016 and 010909 events

以 Treasure Island 台阵的 990817 地震和 La Cienega 台阵的 010909 地震为例, 将台阵基岩加速度反应谱作为基准, 获得各深度覆盖土层的反应谱比绘于图 6。由图 6 可见, 加速度放大效应具有显著的频率相关性, 并出现多个共振频率的放大。以 Treasure Island 台阵的剪切波动为例, 根据图 1 的波速剖面 and 式(2)易得基岩以上土层平均剪切波速为 251 m/s, 再根据式(3)可估算该覆盖层场地水平 SH 波的前 5 阶自振周期分别为 1.45, 0.48, 0.29, 0.21 和 0.16 s。将式(2)、(3)中的  $V_s$  改为  $V_p$ , 即可算的竖向 P 波的前 5 阶自振周期分别为 0.28, 0.09, 0.206, 0.04 和 0.03 s。

$$\bar{V}_s = \frac{\sum H_i}{\sum (H_i / V_{si})}, \tag{2}$$

$$T_n = \frac{4H}{(2n-1)\bar{V}_s}. \tag{3}$$

由图 6 (a) 可知, 990817 地震 EW 方向反应谱自振周期分别为 1.41, 0.50, 0.30 和 0.16 s, NS 方向分别为 1.10, 0.55, 0.30 和 0.16 s。可见, 地震动记录反映的场地自振周期与理论估算值接近, 但并不是所有振型都会被某次地震所激励。

图 6 (a) 表明, 共振与非共振频段的放大效应差异显著, 非共振频段放大倍数在 1~2 倍之间, 但共振频段的放大倍数达到 5~10 倍, 在近地表的放大倍数更高。而且, 小震情况下场地反应接近线弹性, 会有多个反应谱峰值出现, 而大震情况非线性反应下通常只有一个峰值(即卓越周期)。例如, 图 6 (b) 中, 010909 地震 EW 方向反应谱共振周期分别为 1.88, 0.74, 0.25 和 0.07 s, NS 方向分别为 0.95, 0.66, 0.42, 0.22 和 0.075 s, 但谱放大集中在周期 1~2 s 的频段, 且放大倍数不大, 这与 990817 地震不同。

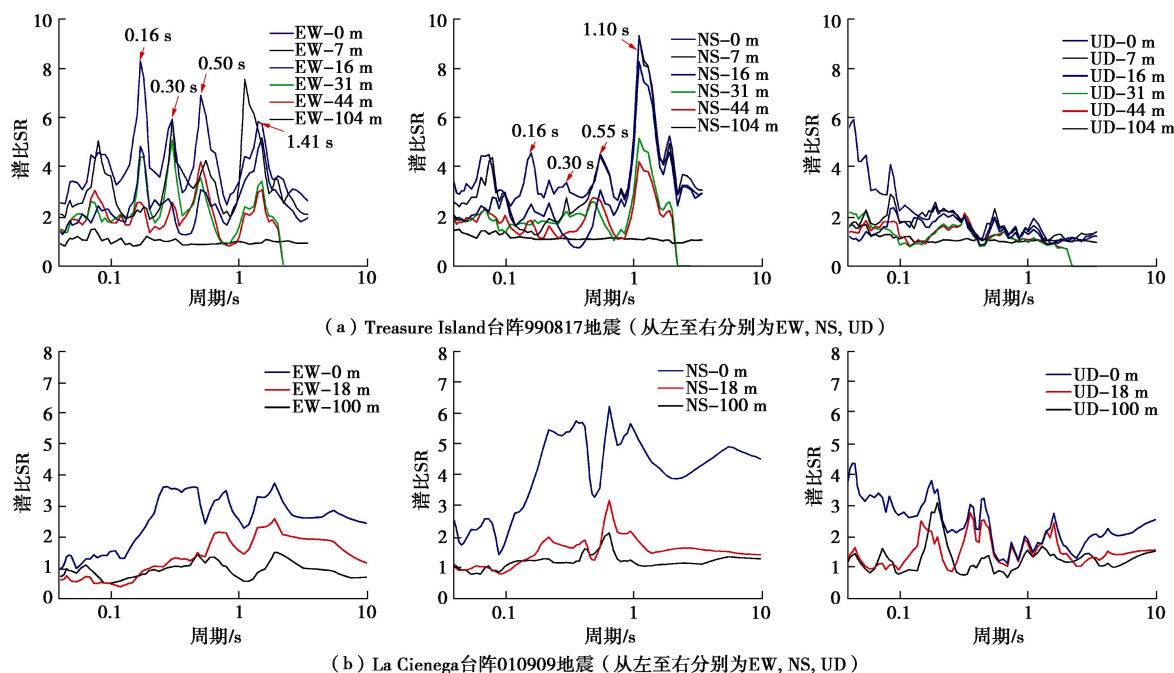


图 6 两次地震加速度反应谱比

Fig. 6 Acceleration response spectral ratios in two events

通过上述分析,可得到地震动反应谱放大效应的几点认识:首先,谱加速度自下而上逐步放大,从基岩过渡到土层时存在明显的频谱放大,但之后在不同深度土层之间的放大倍数较接近,意味着深部土层对地震动谱加速度的放大并不显著;在接近地表土层,由于自由表面和浅层层间反射作用,高频成分放大大增,这一点与王海云<sup>[26]</sup>的研究认识一致;其次,水平方向振动与竖直方向振动反应谱比差别显著,后者的放大效应小得多,土体竖向振动的非线性特征要比水平剪切运动弱;再次,结合图 3 的谱加速度幅值注意到随着地震动谱加速度的增大,整个频带上的放大倍数随之下降,这与 2.1 节中对加速度峰值深度放大规律呼应。另外,注意到 La Cienega 台阵反应谱的低频放大不如 Treasure Island 明显,主要原因可能是前者场地覆盖土层的剪切波速(即共振频率)高于后者。

### 2.3 场地非线性响应特征

鉴于土体非线性响应特征对地震动放大效应的显著影响,这里以 Treasure Island 场地的 990817 地震事件为例说明场地土体非线性特性。首先根据 Seed 提出的可变形土柱假设,根据地震加速度记录计算不同深度处土柱底部剪应力 $\tau_d$ ,然后利用地震加速度记录时程两次积分方法得到不同深度处动态位移时程,然后根据文献[25]推荐的方法反演出不同深度土层的平均剪应力-剪应变关系。在此基础上,计算滞回圈的割线模量( $G/G_{\max} - \gamma$ )和阻尼比( $\xi - \gamma$ )衰减曲线。其

中某个深度土层的  $G_{\max}$  根据场地波速剖面,由公式  $G_{\max} = \rho V_s^2$  算得。

据此算得 990817 事件 EW 方向的应力应变关系如图 7 所示。由图 7 可见,随着地震动向上传播,土层中剪应变逐渐增大,但在近地表有所降低(因为地表是剪应力自由边界条件)。相应 16 m 深度处的模量与阻尼比衰减数据见图 8。由图 8 可见,从场地加速度记录反演得到的动力特性参数,由于地震动本身频

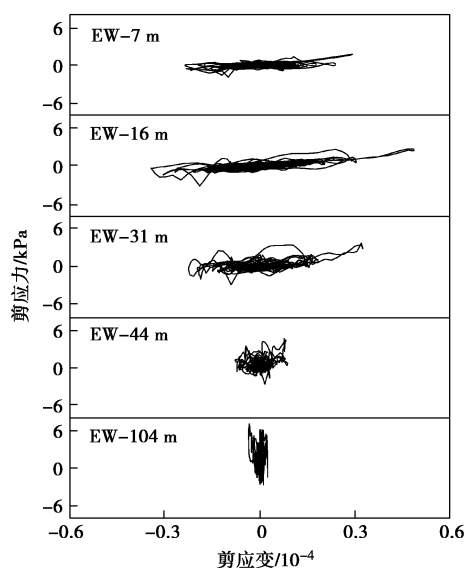


图 7 不同深度应力应变关系(990817 EW)

Fig. 7 Shear stress-strain loops (990817 EW)

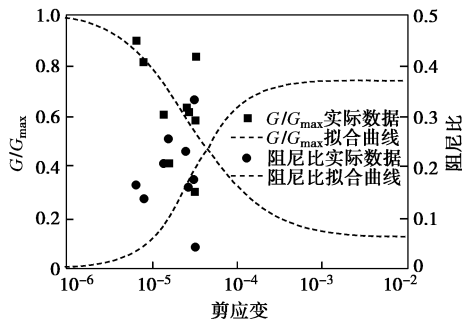


图 8 模量和阻尼比衰减数据 (EW-16 m)

Fig. 8 Shear moduli and damping data (EW-16 m)

谱成分复杂, 离散性较大; 但剪切模量随剪应变增大而衰减, 阻尼比随剪应变增大而增大, 这个整体趋势符合已有研究认识<sup>[27]</sup>。正是土体的这种非线性行为, 使得深厚覆盖层对不同频谱和幅值的地震动具有显著不同的放大效应。

### 3 基于平面波动假设的简化分析

#### 3.1 简化分析方法与步骤

鉴于两个台阵场地都为水平场地, 假设台阵测得的水平振动为 SH 波, 上下振动为垂直入射的 P 波, 则可用平面波动理论对上述观测进一步分析。严格意义上, 水平土层放大效应需基于上行平面波波动规律加以分析<sup>[28]</sup>。为便于应用, 本文做如下简化分析: 首先, 根据成层地基阻抗比放大与传播衰减两种作用, 得到覆盖层上行平面波放大效应函数; 然后, 进一步考虑自由表面效应<sup>[29]</sup>, 得到地表的放大系数。具体计算步骤如下:

首先, 根据平方根波阻抗比放大效应<sup>[30]</sup>, 由深到浅土层因地震阻抗不同而导致的场地线性响应放大, 在非共振工况下如下式:

$$A_{21}(f, z) = \sqrt{\rho_1 \beta_1 / \rho_2 \beta_2} \quad (4)$$

式中,  $\rho$  和  $\beta$  分别是土体密度和剪切 (或压缩) 波速, 下标 2 和 1 分别表示上、下两个相邻土层。注意对于共振工况, 上式需改写为<sup>[17]</sup>

$$A_{21}(f, z) = \rho_1 \beta_1 / \rho_2 \beta_2 \quad (5)$$

其次, 需考虑地震动随向上传播距离产生的衰减, 由下式表示:

$$D(f, z) = \exp(-\pi \kappa_0 f) \quad (6)$$

式中,  $f$  为频率,  $\kappa_0$  为与传播路径 (从震源深度  $H$  到研究深度  $z$ ) 有关的谱衰减参数, 与土层剪切波速和波动衰减质量因子  $Q$  有关,  $\kappa_0 = \int [1/(\beta Q)] dz$ , 其积分限为传播路径。 $Q$  为岩土体阻尼相关的波动传播品质因子, 随着岩土体波速增大而增大, 对基岩上覆软弱土层可取  $Q \approx 10 \sim 16$ 。本文结合已有研究<sup>[31]</sup>, 进一步提出采用下式拟合:

$$Q = 0.873 \beta^{0.556} \quad (7)$$

结合式 (4)、(6), 得到深厚覆盖层任意深度处的实际放大, 应该是上述两个函数的乘积, 即

$$F_a(f, z) = A(f, z) \cdot D(f, z) \quad (8)$$

再次, 注意到上述式 (8) 仅考虑了行波效应, 实际上当地震波上行到地表后, 会在自由地表反射 (甚至在浅部土层界面多次反射形成高频能量), 因此需要考虑自由地表效应, 对式 (8) 估算得到的地表放大系数再乘以 2 才能得到合理结果。

需要指出, 上述公式也可对频域放大效应做简化分析。根据 1/4 波长近似法<sup>[32-33]</sup>, 非共振情况下场地放大效应可以用地表到 1/4 波长 (该波长对应于某个频率) 深度范围土层的波阻抗, 结合基岩的波阻抗, 通过平方根阻抗比方法估算。具体算法与上述公式相同, 只需要将公式中的深度  $z$ 、密度  $\rho$  和波速  $\beta$  表达为与 1/4 波长对应的频率相关值, 具体公式如下:

$$z(f) = \bar{\beta}(f) / (4f) \quad (9)$$

$$\bar{\rho} = \frac{1}{z(f)} \int_0^{z(f)} \frac{1}{\rho(z)} dz \quad (10)$$

$$f(z) = 1 / \left[ 4 \int_0^{z(f)} \frac{1}{\beta(z)} dz \right] \quad (11)$$

$$\bar{\beta} = z(f) / \left[ \int_0^{z(f)} \frac{1}{\beta(z)} dz \right] \quad (12)$$

式中  $\rho(z)$  和  $\beta(z)$  为实际深度  $z$  处的密度和波速的实测值;  $z(f)$  是所研究的深度 (从地表算起), 等于某个频率  $f(z)$  对应波的 1/4 波长, 这个频率对应的波速为  $\bar{\beta}(f)$ , 等于  $z(f)$  范围土层的等效剪切波速;  $\bar{\rho}$  是  $z(f)$  范围内的深度加权平均值。并且注意上述几个频率相关量需要迭代计算, 迭代初始值为深度  $z(f)$ 、 $\bar{\rho}$  和  $\bar{\beta}$ 。

#### 3.2 简化分析结果

下面分时域和频率两种方式进行简化分析。首先, 在时域对不同深度地震动加速度峰值的放大效应进行估算, 便于与图 4、5 的时程 PGA 观测结果比较。本文假定弹性波速即为实测值 (不随频率变化), 式 (6) 中的  $Q$  值按式 (7) 对 Treasure Island 取 16, 对 La Cienega 取 25, 并取加速度反应谱的卓越频率进行计算。参照图 1 和图 2 给出的波速剖面, 并近似取土体密度如下: 地下水位以上取  $1.80 \text{ g/cm}^3$ , 地下水位以下砂土  $1.95 \text{ g/cm}^3$ , 砂砾土  $2.20 \text{ g/cm}^3$ , 基岩  $2.40 \text{ g/cm}^3$ 。

以 Treasure Island 台阵的 990817 地震和 La Cienega 台阵的 010909 地震为例, 按式 (4) ~ (8) 计算得到的深度放大系数分别绘于图 9、10, 图中给出了相应地震事件的基岩加速度峰值。注意地表处 ( $z = 0$ ) 的 SH 波放大系数值为式 (8) 计算值的 2 倍,



但P波即为式(8)的计算值(考虑到近地表P波在地下水位上下差异巨大,不能真实反应土骨架阻抗比<sup>[34]</sup>,因此暂不做调整)。图9,10表明,对于两个台阵场地的三向地震动峰值加速度,简化分析的计算值都能合理预测台阵记录观测得到的加速度峰值放大规律,例如图10中计算值正确揭示了基岩振动幅值较大时上部覆盖层深部加速度峰值的衰减现象。

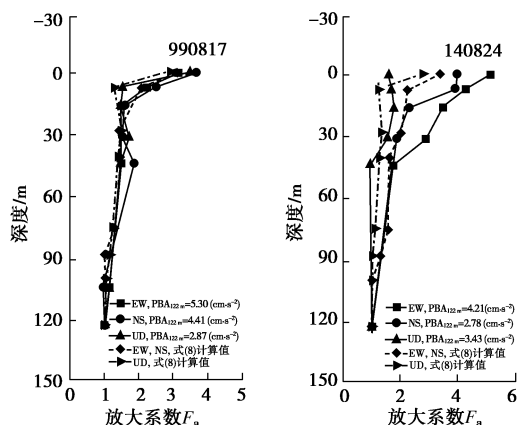


图9 990817与140824峰值加速度放大估算

Fig. 9 Amplification factors of 990817 and 140824 events

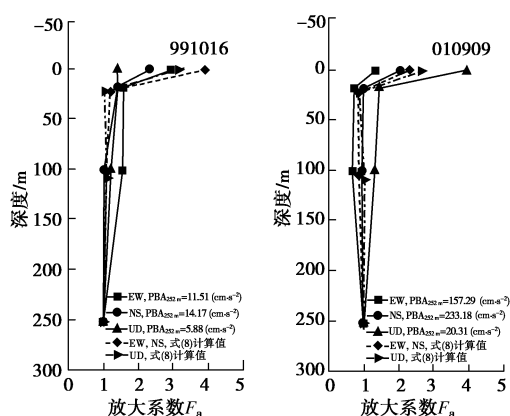


图10 991016与010909峰值加速度放大估算

Fig. 10 Amplification factors of 991016 and 010909 events

其次,对反应谱频域放大的估算,便于与图6的观测结果直接比较。这里以Treasure Island台阵的990817地震为例,结合图1,2的实测波速和前述假设密度,对非共振与共振工况的放大效应进行估算。图11(a)为EW方向SH波的估算, $T=0.08\text{ s}$ ( $f=12.5\text{ Hz}$ )共振频率附近,反应谱比从120 m到104 m仅有小幅放大(在基岩附近),进入覆盖土层后谱比整体放大,但从44 m一直到16 m该放大系数因高频衰减显著而逐步降低,然后近地表的7 m和0 m又开始显著放大,意味着层间反射效应突出,激发出高频能量;而对于长周期 $T=1.48\text{ s}$ ,谱比从104 m进入覆盖土层后就显著放大,之后从44 m到16 m进一步放大,到近地表7 m和0 m再次剧烈放大。整体上,基于波阻抗比放大的1/4波长法对非共振频段的谱加速度放大

效应预测合理,结合式(5)对共振频率附近的谱放大也能合理估计,但低估了低频段谱放大效应,也无法估计地表效应引起的地表共振放大。该认识对图11(b)的P波放大同样适用。

若对La Cienega台阵记录进行分析可发现类似规律。例如,对010909地震分析结果如图12所示。由于此次地表加速度峰值较大( $0.49g$ ),场地非线性反应特征明显,自下而上的高频衰减和低频放大显著。图12表明,除了地表需要额外考虑自由地表效应的影响外,利用式(4)的1/4波长法能合理预测覆盖层内部中、高频地震动的频域放大,但对大应变强非线性造成的低频成分的预测能力有限。同时,由于大振幅工况下场地共振现象不明显(图中箭头标明的几个峰值周期,大多与按式(2)、(3)的计算值不吻合),基于式(5)的共振放大计算对高频成分的预测并不合理,相应的谱比预测值明显偏大。

另外,注意上述谱比放大效应需结合反应谱绝对值来看,才能认识其工程意义:有些谱比虽然很大,但因为基岩反应谱幅值很小,对地表地震动能量的贡献不大,因此对场地液化的致灾效应也不明显。

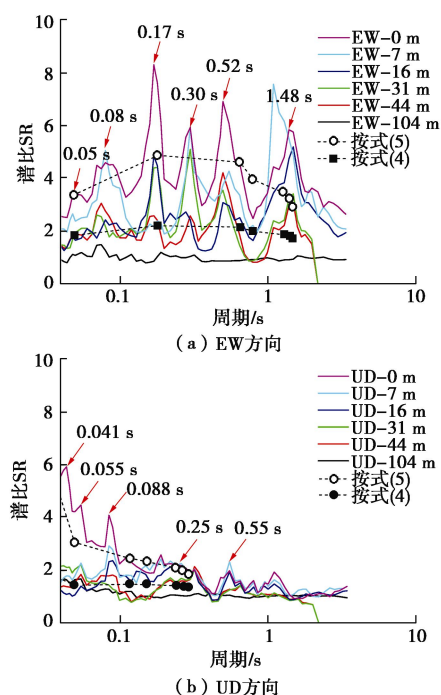


图11 加速度反应谱放大规律估算(990817)

Fig. 11 Prediction of ARS amplification (990817)

需要指出,上述简化分析未考虑场地非线性响应对地震动放大效应的影响,因此理论上适用于中低强度的地震动放大分析。在易液化土层中,当基岩地震动引起的剪应变超过土体门槛剪应变,会引起超静孔压累积,则土体非线性响应除了应变因素还有有效应力降低造成的刚度下降,其加速度放大响应将更为复



杂,而且通常强震下峰值加速度会衰减,这种强震工况下的加速度放大效应值得进一步研究<sup>[35]</sup>。另外,当场地地形不符合水平场地条件,比如河谷、盆地地形,则由于能量聚集效应等使得地表地震动放大更复杂,也需要专门研究<sup>[36]</sup>。

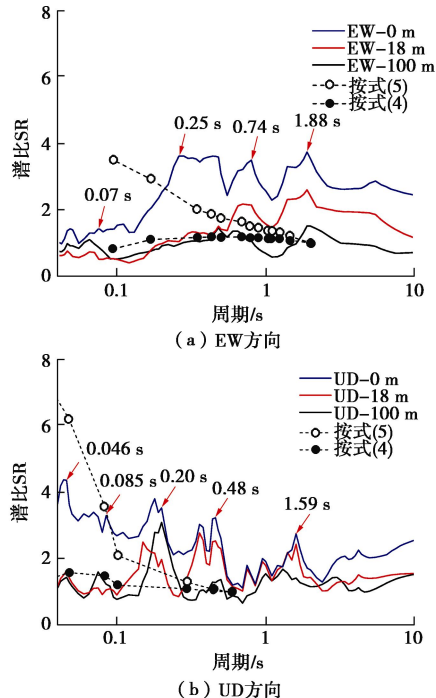


图12 加速度反应谱放大规律估算(010909)

Fig. 12 Prediction of ARS amplification (010909)

## 4 结 论

本文基于美国加州 Caltrans/CDMG 两个井下台阵记录,分析了百米级易液化深厚覆盖层在不同地震下的地震动放大效应,揭示了地震动从基岩向覆盖层传播的几个重要特征,发现深厚覆盖层场地的地震放大效应主要取决于覆盖层厚度、土层地震阻抗比以及弹性波速分布结构。并基于平面波动假设建议了深厚覆盖层加速度放大效应的简化算法。主要研究结论如下:

(1) 覆盖层厚度对地震动放大效应有重要影响。覆盖层厚度越深则激发更低频的能量,因此造成显著的低频放大与高频衰减效应;加速度峰值放大主要发生在近地表 20~30 m 以内,处于常规地震液化判别的考虑深度范围,但必须注意频谱成份改变会影响浅地表易液化层的液化可能性,深厚覆盖层对长周期成分的放大可能会加剧砂土液化危害性。

(2) 地震动方向性对放大效应有重要影响。地震动三分量的放大规律不同,尤其是水平向与竖向地震动放大效应差异明显:竖向地震动分量沿深度方向变化更小、而浅层放大更显著。

(3) 基岩地震动输入大小对地震动放大效应有重

要影响。小震激发场地自振频率较丰富,大震主要激发出场地的卓越频率。地表峰值加速度呈现“小震放大、大震衰减”的规律,放大与衰减的基岩加速度分界值在 150 cm/s<sup>2</sup> 左右。

(4) 基于平面波动假设的加速度放大函数,综合考虑层间阻抗比放大和传播路径衰减,结合自由表面效应,能合理预测深厚覆盖层加速度放大效应,可为深厚覆盖层抗震设计的加速度估算提供简化方法。

需要指出,由于本文台阵观测和简化方法都只针对水平场地中小地震的线性放大效应,对于不符合水平场地条件的河谷、盆地等地形,以及强震下场地土体非线性响应,都会使得地表放大效应更复杂、剧烈,本文虽已做初步分析,需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 许强,陈伟,张倬元. 对我国西南地区河谷深厚覆盖层成因机理的新认识[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 448 - 456. (XU Qiang, CHEN Wei, ZHANG Zhou-yuan. New views on forming mechanism of deep overburden on river bed in southwest of china[J]. Advance in Earth Science, 2008, 23(5): 448 - 456. (in Chinese))
- [2] 王启国. 金沙江虎跳峡河段河床深厚覆盖层成因及工程意义[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1455 - 1466. (WANG Qi-guo. Causes of riverbed deep cover and engineering significance of tiger leaping gorge reach of jinsha river[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1455 - 1466. (in Chinese))
- [3] 裴向军,黄润秋.“4·20”芦山地震地质灾害特征分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(3): 257 - 262. (PEI Xiang-jun, HUANG Run-qiu. Analysis of Characteristics of geological hazards by “4·20” Lushan earthquake in Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(3): 257 - 262. (in Chinese))
- [4] LIU Y F, HUANG R Q. Seismic liquefaction and related damage to structures during the 2013 Lushan  $M_w$ 6.6 earthquake[J]. Disaster Advances, 2013, 6(10): 55 - 64.
- [5] CETIN K O, SEED R B. Nonlinear shear mass participation factor ( $r_d$ ) for cyclic shear stress ratio evaluation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(2): 103 - 113.
- [6] 韩超,周燕国,凌道盛,等. 液化判别应力折减系数分布特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1833 - 1839. (HAN Chao, ZHOU Yan-guo, LING Dao-sheng, et al. Study of distribution features of stress reduction coefficient

- in liquefaction evaluation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(9): 1833 - 1839. (in Chinese))
- [7] GAO Y F, ZHANG N, ZHANG D Y. Effects of topographic amplification induced by a U-Shaped canyon on seismic waves[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2012, **102**: 1748 - 1763.
- [8] 金丹丹, 陈国兴, 董菲蕃. 多地貌单元复合场地非线性地震效应特征二维分析[J]. 岩土力学, 2014, **35**(6): 1818 - 1825. (JIND Dan-dan, CHEN Guo-xing, DONG Fei-fan. 2D analysis of nonlinear seismic effect characteristics of multi-geomorphic composite site[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(6): 1818 - 1825. (in Chinese))
- [9] KRAMER S L. Geotechnical earthquake engineering[M]. New York: Prentice-Hall, 1996.
- [10] 陈国兴, 陈继华. 软弱土层的厚度及埋深对深厚软弱场地地震效应的影响[J]. 世界地震工程, 2004, **20**(3): 66 - 73. (CHEN Guo-xing CHEN Ji-hua. The effect of depth and thickness of soft soil layer on earthquake response for deep soft sites[J]. World Earthquake Engineering, 2004, **20**(3): 66 - 73. (in Chinese))
- [11] 庄海洋, 刘雪珠, 陈国兴. 互层土的动参数试验研究及其地震反应分析[J]. 岩土力学, 2005, **26**(9): 1495 - 1498. (ZHUANG Hai-yang, LIU Xue-zhu, CHEN Guo-xing. A study on dynamic parameters and seismic response of interbedded soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(9): 1495 - 1498. (in Chinese))
- [12] 高广运, 陈青生, 何俊锋, 等. 地下水位上升对上海软土场地地震反应的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(7): 989 - 995. (GAO Guang-yun CHEN Qing-sheng, HE Jun-feng, et al. Effect of rise of groundwater table on seismic ground response of soft soil in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(7): 989 - 995. (in Chinese))
- [13] 黄雨, 叶为民, 唐益群, 等. 上海软土地震反应特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, **1**(5): 773 - 778. (HUANG Yu, YE Wei-min, TANG Yi-qun, et al. Characteristic analysis for seismic ground response of soft soils in Shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, **1**(5): 773 - 778. (in Chinese))
- [14] 李平, 薄景山, 李孝波, 等. 安宁河河谷及邛海地区土层场地对地震动的放大作用[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 362 - 369. (LI Ping, BO Jing-shan, LI Xiao-bo, et al. Amplification effect of soil sites on ground motion in Anning River valley and Qionghai Lake area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 362 - 369. (in Chinese))
- [15] WALD L A, MORI J. Evaluation of methods for estimating linear site-response amplifications in the Los Angeles region[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, **90**(6B): 32 - 42.
- [16] 王海云. 渭河盆地中土层场地对地震动的放大作用[J]. 地球物理学报, 2011, **54**(1): 137 - 150. (WANG Hai-yun. Amplification effects of soil sites on ground motion in the Weihe basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, **54**(1): 137 - 150. (in Chinese))
- [17] 任叶飞, 温瑞智, 山中浩明, 等. 运用广义反演法研究汶川地震场地效应[J]. 土木工程学报, 2013, **46**(增刊): 146 - 151. (REN Ye-fei, WEN Rui-zhi, HIROAKI Yamanaka, et al. Research on site effect of Wenchuan Earthquake by using generalized inversion technique[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, **46**(S0): 146 - 151. (in Chinese))
- [18] 迟明杰, 陈永新, 李小军. 地表岩土层对地震动特性的影响分析[J]. 国际地震动态, 2015, **37**(3): 743 - 747. (CHEN Yong-xin, CHI Ming-jie, LI Xiao-jun. Effect of overlaying rock and soil layers on ground motion characteristics[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, **37**(3): 743 - 747. (in Chinese))
- [19] ELGAMAL A W, ZEGHAL M, PARRA E, et al. Identification and modeling of earthquake ground response: I site amplification[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, **15**(8): 499 - 522.
- [20] GRAIZER V, CAO T, SHAKAL A, et al. Data from downhole arrays instrumented by the California Strong Motion Instrumentation Program in studies of site amplification effects[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Seismic Zonation. Palm Springs, 2000.
- [21] YOUD T, CARTER B. Influence of soil softening and liquefaction on spectral acceleration[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(7): 811 - 825.
- [22] SALVATI L, PESTANA J. Small-strain behavior of granular soils: II seismic response analyses and model evaluation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(8): 1082 - 1090.
- [23] PENZIEN J, WATABE M. Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motions[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1974, **3**(4): 365 - 373.

- [24] YANG J, SATO T. Interpretation of seismic vertical amplification observed at an array site[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2000, **90**(2): 275 - 285.
- [25] ZEGHAL M, ELGAMAL A W, TANG H T, et al. Lotung downhole array: II evaluation of soil nonlinear properties[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **121**(4): 363 - 378.
- [26] 王海云. 土层场地的放大作用随深度的变化规律研究——以金银岛岩土台阵为例[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(5): 1498 - 1509. (WANG Hai-yun. Study on variation of soil site amplification with depth: a case at Treasure Island geotechnical array, San Francisco bay[J]. Chinese journal of Geophysics, **57**(5): 1498 - 1509. (in Chinese))
- [27] PESTANA J, SALVATI L. Small-strain behavior of granular soils: I model for cemented and uncemented sands and gravels[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(8): 1071 - 1081.
- [28] YANG J, YAN X R. Site response to multi-directional earthquake loading: a practical procedure[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009, **29**: 710 - 721.
- [29] SHEARER P M, ORCUTT J A. Surface and near-surface effects on seismic waves—theory and borehole seismometer results[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, **77**(4): 1168 - 1196.
- [30] BOORE D M. The uses and limitations of the square-root-impedance method for computing site amplification[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, **103**(4): 2356 - 2368.
- [31] ANDERSON J G, LEE Y, ZENG Y, et al. Control of strong motion by the upper 30 meters[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1996, **86**: 1749 - 1759.
- [32] 姜 慧. 地震动随机模拟方法中的场地效应研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2005. (JIANG Hui. Study on site effects of stochastic simulation of earthquake ground motions[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2015. (in Chinese))
- [33] 曾立峰, 吴志坚, 陈 拓, 等. 天水黄土地区覆盖层厚度的反演研究[J]. 岩土力学, 2012, **33**(6): 1912 - 1916. (ZENG Li-feng, WU Zhi-jian, CHEN Tuo, et al. Inversing study of overburden thickness in loess area of Tianshui[J]. Rock and Soil Mechanic, 2012, **33**(6): 1912 - 1916. (in Chinese))
- [34] BERESNEV I A, WEN K L. P-wave amplification by near-surface deposits at different excitation levels[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1995, **85**(5): 1490 - 1494.
- [35] IDRIS I M. An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes[J]. Earthquake Spectra, 2008, **24**(1): 217 - 242.
- [36] 李伟华, 赵成刚. 含软夹层的层状沉积河谷场地的地震动力响应分析[J]. 岩土力学, 2009, **30**(1): 45 - 51. (LI Wei-hua, ZHAO Cheng-gang. Analysis of seismic dynamic response of layered alluvial valleys with soft interlayer[J]. Rock and Soil Mechanic, 2009, **30**(1): 45 - 51. (in Chinese))