

DOI: 10.11779/CJGE201906010

场地放大系数的理论解答

李瑞山, 袁晓铭*

(中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 场地系数是各个国家和地区规范中考虑地震动场地效应的关键指标, 决定着各类工程结构设防水准, 但国内外规范就此存在显著差别。采用土层-基岩理想场地模型, 导出了土层场地与参考基岩场地地震动响应定量关系解析表达。提出了场地放大系数一般规律, 并通过数值模拟验证了其可靠性, 在此基础上对国内外规范场地系数的合理性进行检验。结果表明: 土层场地地震动响应与参考基岩场地相比, 在全频域空间恒定表现为放大, 场地放大系数随场地变软整体表现出增大趋势, 这与美国新规范场地系数取值和规律一致; 中国规范中软场地系数取值严重偏于保守, 强烈地震作用下软场地系数小于1的现象不合理, 中国规范IV类场地系数普遍小于III类的取值方案有待商榷。

关键词: 场地放大系数; 理论解答; 地震动参数区划图; NEHRP; 土层地震反应分析

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)06-1066-08

作者简介: 李瑞山(1987—), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: lrshan22@hotmail.com。

Theoretical solution of site amplification coefficient

LI Rui-shan, YUAN Xiao-ming

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China)

Abstract: The site coefficient is a key index for considering the seismic site effects in various national and regional standards, which determines the criterion of earthquake-resistant design, but there exist significant differences between domestic and foreign standards. Based on the ideal soil-bedrock site model, an analytical expression for the quantitative relationship between soil site and reference bedrock is derived and examined through numerical simulation. The general rules of site amplification coefficient are put forward, and the reliability of different recommended values are verified. The results indicate that the soil ground motion is always amplified in the whole frequency domain compared to the reference bedrock. The site amplification coefficients show the overall increasing trend with the softening of the site, and are consistent with the suggested values in the new NEHRP provisions of the United States of America. The coefficient of soft site in China is seriously conservative and the value is less than 1.0 under strong vibration, which is clearly unreasonable. It is debatable whether the site coefficient of class site IV should be generally less than that of class site III in China's code.

Key words: site amplification coefficient; theoretical solution; seismic ground motion parameters zonation map; NEHRP; ground seismic response analysis

0 引言

历次大地震经验表明震害严重程度与局部场地条件密切相关, 大量强震观测资料显示浅表覆盖土层对地震动幅值、频谱特性和强烈震动持续时间都有重要影响^[1-6]。对各类工程结构进行抗震设计是防震减灾的最主要途径, 其首要任务是合理地确定设计地震动参数, 其中地震动场地效应要给予充分考虑。

强震观测记录对比分析^[7-11]和土层地震响应数值模拟^[12-16]是目前探讨场地条件对地震动影响的两种最主要的手段。基岩和土层场地强震记录对比分析是获取覆盖土层对地震动特征影响的最直接方法, 但由

于实际强震记录标准基岩面埋深和剪切波速各异, 再加上地震作用的随机性和介质中波动传播的复杂性, 这种基于统计意义的平均结果往往表现出很大的离散性^[17], 还没有达到具有普适性和广泛性的程度。另一方面, 对现有的土层地震反应数值分析方法, 强地震动和软土地场等强非线性情况下的地震响应计算仍是一个尚未攻克的难题^[18], 导致仅依据数值模拟得到的

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2018B01, 2018A01); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2019E093)

收稿日期: 2018-05-04

*通讯作者(E-mail: yxmim@163.com)

土层震动特征和规律的把握不足,有些认识模糊甚至错误^[15, 19-20]。采用简单模型的理论分析工作,能够深化该问题的认识,弥补以上两方面的不足和缺欠,指导工程实践,但该方面目前的成果尚少。

在抗震设计实践中,包括中国大陆地区在内的各个国家和地区规范普遍都采用划分场地类别的方式来考虑地震动的场地效应。场地系数 F_{PGA} , 则是以硬场地(基岩或二类场地)作为参考场地,其他类别场地峰值加速度与参考场地峰值加速度之间的一般性定量比例关系。场地系数反映了土层和基岩对地震动放大效应的相对强弱,代表了各类场地放大作用的一般性认识。同时,通过场地系数,结合区划图便可得到任意类别目标场地震动作用大小。场地系数代表着场地放大作用认识水平,同时对工程设计有普遍性的指导作用,其研究工作十分重要。

美国国家减轻地震灾害计划(National Earthquake Hazards Reduction Program, NEHRP)通过不断吸收抗震领域最新研究成果而对 NEHRP Provision 持续修订。ASCE/SEI 7 (Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures) 和 IBC (International Building Code) 在抗震方面主要引用 NEHRP 规定。最新版 NEHRP 2015^[21] (简称 NEHRP, 下同) 相比 2009 版本的一个显著的变化是大幅提高了场地系数 F_{PGA} , 其中一个重要原因是所选择的标准基岩场地剪切波速由 1050 m/s 减小为 760 m/s^[22], ASCE/SEI 7-16^[23] 在修订时也进行了相应的调整。中国第五代地震动参数区划图 GB 18306—2015^[24] (简称中国规范, 下同) 第一次明确指出需要依据场地类别对地震动峰值加速度进行调整, 并给出了相应的场地系数(表 1), 其中一个明显特征是软场地系数随震动强度增大而逐渐减小, 当峰值加速度大到一定程度时(比如 0.4g)软场地系数小于 1。NEHRP 场地系数 F_{PGA} (表 2) 显著高于中国现行标准, 如果将中国 I_0 类场地 ($v_s > 800$ m/s) 与美国 B 类场地 ($v_{s30} > 760$ m/s) 等同, 中国规范 $PGA \geq 0.4g$ 时, IV 类软场地系数取 0.9, 而 NEHRP 中当 PGA 分区为 0.4g、0.5g 和 $\geq 0.6g$ 时, F_{PGA} 分别取 1.4、1.2 和 1.1。虽然不同地区场地类别划分方法和区划图编制基本准则不尽相同, 但中国规范和 NEHRP 规范在场地系数取值方面显然是存在本质的差别。NEHRP 的规定意味着土层场地震动响应必然大于周围基岩场地, 而按中国规范取值来看则很有可能不放大甚至缩小。中国规范这一认识主要来源是中国现行地震安全性评价程序计算所得软场地震动响应普遍小于基岩, 但事实上这一结论与强震观测结果严重不符^[15, 17, 19-20]。此外, 中国规范和 NEHRP 规范中场地系数取值的另

外一个重要区别是 NEHRP 场地系数随场地变软整体表现为增大, 在小震或中等强度地震作用下 ($PGA \leq 0.4g$) 这一特征十分明显, 而在强地震作用下 C、D、E 类场地系数非常接近。中国规范中则是 III 类场地系数最大, 任何强度地震作用下 IV 类放大均小于 III 类。显然, NEHRP 规范和中国规范的显著差别, 需要认真甄别。

场地系数是地震动参数区划图编制和修订工作的一项重要内容, 其实质是各类场地放大作用之间的一般定量关系, 通过理论分析对其进行解答有助于人们对这一问题有更加深刻的认识。本文采用土层-基岩理想场地模型, 从弹性半空间中波动传播基本原理出发, 建立土层场地与参考基岩场地震动响应特征关联函数, 给出二者定量关系解析表达, 通过理论分析揭示场地放大作用的一般规律, 为场地系数的深入认识和区划图修订提供指导。

表 1 中国地震动参数区划图 GB 18306—2015 峰值加速度调整系数

Table 1 Site coefficients of PGA in China's code GB 18306—2015

场 地	II 类场地峰值加速度					
	$\leq 0.05g$	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	$\geq 0.40g$
I_0	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
I_1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
II	1.25	1.22	1.20	1.18	1.05	1.00
III	1.63	1.53	1.38	1.18	1.05	1.00
IV	1.56	1.46	1.33	1.18	1.00	0.90

表 2 美国 NEHRP 2015 峰值加速度调整系数

Table 2 Site coefficients of PGA in NEHRP provision 2015

场地	Mapped MCE Geometric Mean Peak Ground Acceleration, PGA					
	$\leq 0.1g$	0.2g	0.3g	0.4g	0.5g	$\geq 0.6g$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
C	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
D	1.6	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1
E	2.4	1.9	1.6	1.4	1.2	1.1
F	F 类场地需专门开展场地地震反应分析					

1 分析模型

实际土层场地和参考基岩场地在 SH 波垂直入射下的力学模型如图 1 所示, 在距离界面一定范围外的场地可以简化为一维土层模型, 为了便于分析, 假定土层和基岩都是单一均匀介质, 土层和基岩场地分别由其密度 ρ 和剪切波速 v_s 等参数来表征, 下标 s 代表土层场地, r 代表露头基岩场地。图中 h 为覆盖土

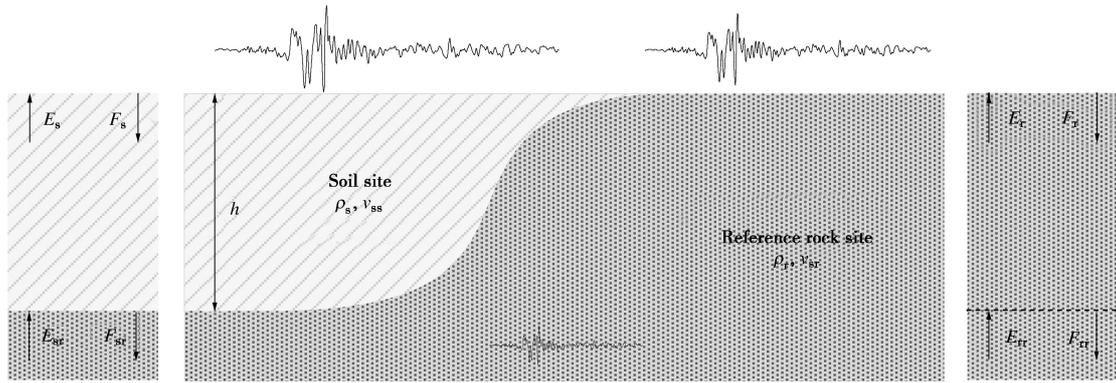


图1 场地模型示意图

Fig. 1 Illustration of simplified site model

层厚度, E_s 和 F_s 分别为剪切波从基岩垂直入射往地表传播过程中引起的土层中稳态上行波和下行波波幅系数, E_{sr} 和 F_{sr} 分别为土层场地下卧基岩层中上、下行波波幅系数, E_r 和 F_r 分别为参考基岩场地近地表波幅系数, E_{rr} 和 F_{rr} 分别为参考基岩场地 h 深度处的波幅系数。

2 基本解答

假设土体为 Kelvin-Voigt 黏弹性体, 代表图 1 所示简化一维场地模型中剪切波传播的波动方程表达如下, 其中剪切模量 $G = \rho v_s^2$, η 为黏性系数, 与阻尼比 ξ 的关系为 $\eta = 2G\xi/\omega$ 。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} \quad (1)$$

在圆频率为 ω 的谐波输入下, 其位移 u 一般表达式为

$$u(z, t) = [E \exp(ikz) + F \exp(-ikz)] e^{i\omega t} \quad (2)$$

式中 z 为空间坐标, 原点位于自由地表面, 方向垂直向下为正; E 和 F 分别为上行波和下行波波幅系数; k 为复波数,

$$k = \frac{\omega}{v_s} (1 - i\xi) \quad (3)$$

自由地表 ($z=0$) 力的边界条件表达为

$$\tau(z, t)|_{z=0} = G \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (4)$$

式中, G 为土体剪切模量。

将式 (2) 代入式 (4) 可以得到上下行波波幅系数关系:

$$E = F \quad (5)$$

需要说明的是, 这一关系是根据自由地表边界条件给出, 只对地表层成立, 对下覆土层和下卧基岩不适用。

2.1 露头基岩场地

根据式 (5) 参考基岩场地自由地表边界条件可以

具体化为

$$E_r = F_r \quad (6)$$

根据介质中力和位移的连续条件, 深度 $z=h$ 处参考场地中上行波波幅为

$$E_{rr} = E_r \exp(ik_r h) \quad (7)$$

式中, k_r 为与基岩场地对应的波数, 将式 (3) 中 v_s 用 v_{sr} 代入来计算。利用欧拉公式, 式 (7) 可以进一步写为

$$E_{rr} = [\cos(k_r h) + i \sin(k_r h)] E_r \quad (8)$$

定义露头基岩场地自由地表震动响应与输入波幅之间的放大系数如下:

$$F_{rock}(\omega) = \frac{E_r + F_r}{E_{rr}} = \frac{2}{\cos(k_r h) + i \sin(k_r h)} \quad (9)$$

其幅值为

$$|F_{rock}(\omega)| = \frac{2}{\sqrt{\cos^2(\omega h / v_{sr}) + \sin^2(\omega h / v_{sr})}} = 2 \quad (10)$$

从式 (10) 可以看出, 露头基岩场地地表震动响应幅值恒为输入地震动的 2 倍。

2.2 覆盖土层场地

根据式 (5) 覆盖土层场地自由地表边界条件可以具体化为

$$E_s = F_s \quad (11)$$

根据下卧基岩和覆盖土层界面力和位移连续条件可以得到上下层波幅矢量之间的传递矩阵可以表达为^[25]

$$\begin{bmatrix} E_{sr} \\ F_{sr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+\alpha}{2} \exp(ik_s h), & \frac{1-\alpha}{2} \exp(-ik_s h) \\ \frac{1-\alpha}{2} \exp(ik_s h), & \frac{1+\alpha}{2} \exp(-ik_s h) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s \\ F_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, k_s 为与土层场地对应的波数, 将式 (3) 中 v_s 用 v_{ss} 代入来计算, α 为土层和基岩之间的波阻抗,

$$\alpha = \rho_s v_{ss} / \rho_r v_{sr} \quad (13)$$

在两层土密度相差不大的情况下, 阻抗比 α 可以用两层土之间的剪切波速比来代替。将式 (11) 代入式 (12) 可以得到土层和基岩入射波幅之间的关系为 $E_{sr} = 1/2[(1 + \alpha) \exp(ik_s h) + (1 - \alpha) \exp(-ik_s h)] \cdot E_s$ 。(14)

利用欧拉公式, 式 (14) 可以改写为 $E_{sr} = [\cos(k_s h) + i\alpha \sin(k_s h)] E_s$, (15)

定义覆盖土层场地自由地表震动响应与基岩输入波幅之间的放大系数如下:

$$F_{soil}(\omega) = \frac{E_s + F_s}{E_{sr}} = \frac{2}{\cos(k_s h) + i\alpha \sin(k_s h)} \quad (16)$$

其幅值为:

$$|F_{soil}(\omega)| = \frac{2}{\sqrt{\cos^2(\omega h / v_{ss}) + \alpha^2 \sin^2(\omega h / v_{ss})}} \quad (17)$$

定义无量纲频率 (频率比) λ 如下, 表征了输入波频率与覆盖土层场地基频之间的相对关系, 当 $\lambda = 0.5$ 时, 输入波频率 f 与场地基频 f_s 相等, 其中场地基频按式 (19) 计算。通过无量纲化处理, 减少了变量个数, 为后续分析带来了极大的方便。

$$\lambda = \omega h / \pi v_{ss} = f / 2f_s \quad (18)$$

$$f_s = v_{ss} / 4h \quad (19)$$

土层场地放大系数幅值用频率比 λ 重新改写为

$$|F_{soil}(\omega)| = \frac{2}{\sqrt{\cos^2(\pi\lambda) + \alpha^2 \sin^2(\pi\lambda)}} \quad (20)$$

3 场地放大系数解答及分析

假定同一次地震中在一定距离范围内相同深度基岩面入射震动响应幅度相差不大, 即土层场地基岩入射波幅与参考基岩场地深度 h 处的上行波幅相等:

$$|E_{sr}| = |E_{tr}| \quad (21)$$

定义覆盖土层自由场震动响应与露头基岩面震动响应之间的比值为场地放大系数 (简称放大系数, 下同), 结合式 (10), (20) 可以给出其表达为

$$|F(\omega)| = \left| \frac{F_{soil}(\omega)}{F_{rock}(\omega)} \right| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(\pi\lambda) + \alpha^2 \sin^2(\pi\lambda)}} \quad (22)$$

式 (22) 中有两个变量, 分别是阻抗比 α 和无量纲频率 λ , 从中可以得出以下几方面信息: ①该函数是关于频率比 λ 的周期函数, 周期为 1; ②当阻抗比 α 不大于 1 时 (土层比参考基岩场地软), 放大系数值恒不小于 1, 当且仅当 $\alpha = 1$ 时放大系数值取 1; ③当频率比 $\lambda = 0.5$ ($f = f_s$) 且阻抗比 $\alpha \rightarrow 0$ 时, 理论上放大系数值可达到无穷 (不考虑阻尼比); ④当 $\alpha \rightarrow 1$ 时, 式 (22), (22) 结果可以退化至单层结果 (式 (10)); ⑤当 $h \rightarrow 0$ 时 $\lambda \rightarrow 0$, 式 (22), (22) 结果也可退化至

单层土结果。

针对本文所研究的问题, 取阻抗比范围为 $0.1 \leq \alpha \leq 1$ 可基本满足所有场地情况, 在一个周期内 ($0 \leq \lambda \leq 1$) 给出 $|F(\omega)|$ 随阻抗比 α 和无量纲频率 λ 变化曲面如图 2 所示。从图中可以看出放大系数都大于 1, 并且在绝大多数情况下该值很接近于 1, 将阻抗比 α 以自然分布或对数分布方式离散, 并取不同的网格密度, 计算所得全频段放大系数均值在 1.40~1.66, 可以认为土层场地地震动响应相比露头基岩场地平均放大 1.5 倍。

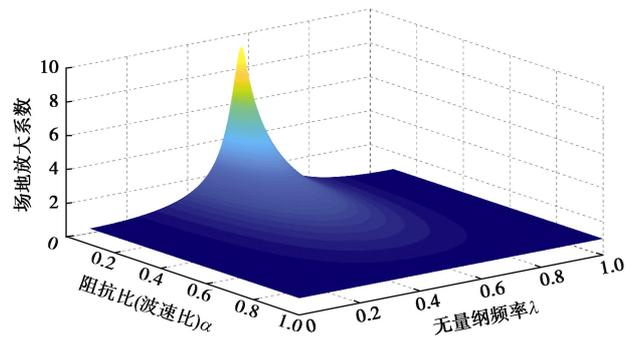


图 2 场地放大系数曲面图

Fig. 2 Surface plot on dynamic response amplification of soils to reference rock sites

图 3 所示为取不同阻抗比 α 时放大系数随无量纲频率 λ 变化曲线, 从中可以明显看出只有在输入波频率与土层场地基频比较接近 (λ 取值接近 0.5) 且覆盖土层与基岩波速差异较大 (阻抗比较小) 时放大系数才有显著增大, 在本文离散点计算结果中, 最大达到 10 倍。

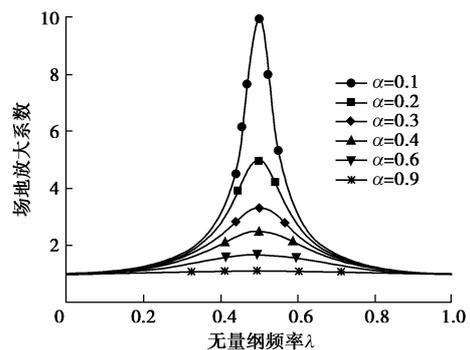


图 3 不同阻抗比下场地放大系数随频率比变化曲线

Fig. 3 Amplification curves under different impedance ratios

图 4 所示为取半个周期内不同频率比 λ 时放大系数随土层与基岩之间阻抗比 α 变化曲线, 从中可以明显看出放大系数随着阻抗比的减小 (土层变软) 而增大, 但要达到较高的放大水平需要土层等效剪切波速小于基岩的 1/3 甚至 1/5。另外需要说明的是, 在不同的阻抗比下要满足相同频率比的条件, 实际上输入波的频率是不完全一样的。

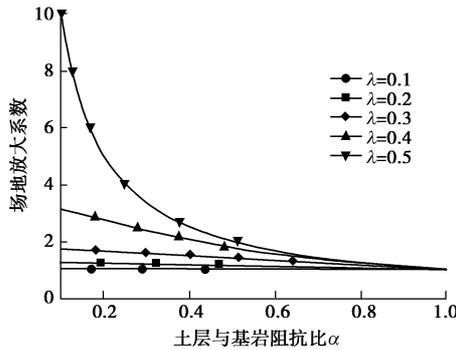


图4 不同频率比下场地放大系数随阻抗比变化曲线

Fig. 4 Amplification curves under different non-dimensional frequencies

图5所示为放大系数曲面在 $\alpha-\lambda$ 面上的等值线图,需要说明的是这里所给变量范围只是图2中的一部分,以便更好地显示结果。从图5中可以看出以下信息:①只有阻抗比为 $\alpha \leq 0.5$ 时,放大系数才有可能大于2;②只有当无量纲频率满足 $0.4 \leq \lambda \leq 0.6$ 时($0.8f_s \leq f \leq 1.2f_s$),放大系数才有可能大于3;③整体上阻抗比越小(土层相比基岩越软),放大系数越大。表3中给出了当放大系数取整倍数时满足条件的最大阻抗比 α 取值,即图5中每条等值线的顶点。

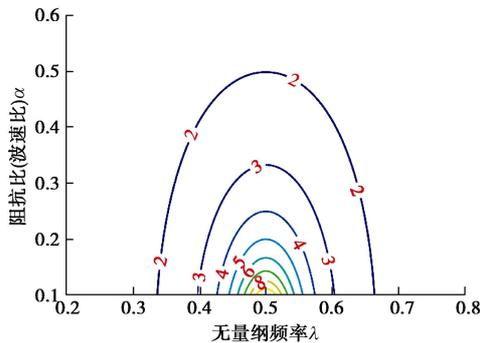


图5 场地放大系数等值线图

Fig. 5 Contour map of site amplification coefficients

表3 整倍数场地放大系数满足条件的最大阻抗比 α 取值

Table 3 Maximum values of α satisfying conditions of integral multiple amplification ratios

放大倍数	α_{max}	放大倍数	α_{max}
2	0.500	6	0.177
3	0.333	7	0.143
4	0.250	8	0.125
5	0.200	9	0.111

令式(22)放大系数等于2,得到用无量纲频率 λ 表达的临界阻抗比 α_{cr2} 形式如式(23),也就是说当 $\alpha < \alpha_{cr2}$ 时放大系数方可取得2倍以上的值。表4中给出了半个周期内不同无量纲频率 λ 所对应的2倍放大临界阻抗比 α_{cr2} 的取值,其它范围的取值可以通过周期性和对称性相应得到。

$$\alpha_{cr2} = \sqrt{1 - \frac{3}{4 \sin^2(\pi\lambda)}} \quad (23)$$

表4 不同无量纲频率 λ 所对应的2倍放大临界阻抗比 α_{cr2}

Table 4 Double amplification critical values of α_{cr2} under different normalized frequencies λ

无量纲频率 λ	0.335	0.35	0.40	0.45	0.50
临界阻抗比 α_{cr2}	0.0774	0.2351	0.4133	0.4808	0.5000

引言当中提到 NEHRP 建议值明显高于中国规范,在强地震作用下软场地系数存在定性差别。除此之外,NEHRP 场地系数整体随场地变软而变大,但中国规范IV类场地系数却普遍小于III类场地。根据前面理论解答及分析可以看出,土层场地地震动响应与参考基岩场地相比恒定表现为放大,且随场地变软放大系数有增大的趋势。在强地震动作用下,土体会产生明显的非线性效应,主要体现为土体等价动剪切模量减小和阻尼比的增大,会使土体和基岩之间阻抗比发生变化,进而导致场地放大系数增大或减小,但不会使本文模型和恒定放大的基本结论产生定性改变。中国第五代地震动参数区划图中软场地系数在强烈非线性阶段取小于1,明显不合理。NEHRP 2015 软场地调整系数 F_{PGA} 在 $PGA \geq 0.6g$ 时仍大于1,充分体现了其认识的先进性。另一方面,NEHRP 场地系数随场地类别整体变化规律与理论分析结果定性一致,但中国区划图IV类场地系数却显著偏于保守,与理论分析结果定性不符,有待于进一步研究和完善。

4 可靠性验证

鉴于本文理论推导是在频域空间展开,拟采用数值分析方法对导出的解析表达式进行进一步检验,以验证结论的可靠性。从理论上讲,利用土层场地和邻近参考基岩场地强震动记录对比的标准谱比法(Standard Spectral Ratio, SSR)是研究场地放大效应的最理想手段,但实际当中由于基岩表面的风化等原因很难找到真正的基岩场地,资料收集的代表性和广泛性受到一定程度的限制。随着竖向钻孔台站数量的不断增加,越来越多的学者开始利用井上-井下强震动记录对比来研究浅表覆盖土层对地震响应的影响。最新研究成果表明^[26],相对于井下记录,地表记录 PGA、PGV 和短周期反应谱均有较明显的放大效应,且表现出随浅层场地剪切波速 v_{s30} 减小而增大的趋势,而长周期的放大效应相对较弱,比值接近于1,与 NEHRP 场地系数取值规律基本一致。

土层地震反应分析数值模拟作为对强震动观测的有效补充,是研究地震动场地效应的重要手段。采用覆盖土层厚度 h 分别为 10, 25, 40 m, 剪切波速 v_s 分别为 150, 280, 400 m/s 构造了共 9 个理想场地模型,参考基岩场地剪切波速取 800 m/s。按简化公式 T

$=4h/v_s$ 计算得到的场地基本周期分布范围为 0.10~1.07 s, 能够代表相当范围的一般工程场地情形。另一方面, 由于输入地震动的频谱特性差异对数值模拟结果影响显著, 为了使分析结果尽可能全面地反映不同类别地震动作用下的一般规律, 从 KiK-net 台网 ABSH12、AKTH03、AKTH09 和 AOMH01 等 4 个场地实际井下基岩记录中选择输入地震动。4 个场地剪切波速剖面如图 6, 具有以下共同特征: ①地表至基岩剪切波速依此增大, 不存在软硬夹层; ②具有一定深度的覆盖土层厚度; ③基岩剪切波速在 500~800m/s 范围内。截止 2018 年 8 月 31 日, 4 个台站已记录到 1686 组三分量基岩地震动, 最终挑选了其中 33 次地震共 59 条加速度记录(单向)组成本文基岩输入地震动数据库。这 33 次地震震级变化范围为 3.2 级~7 级, 震源深度范围为 5~40 m, 震级-震源深度分布详情如图 7, 不同的震级-震源深度组合在某种意义上代表了不同的地震类型和不同的地震动频谱特性。地震动挑选具体原则: ①震中距不大于 300 km; ②震源深度不大于 40 km; ③单方向峰值加速度在 2~20 gal 范围内; ④加速度反应谱满足 $SA_{3.0}/SA_{0.01}<0.2$ 。筛选后的 59 条地震动卓越周期(加速度反应谱峰值对应周期)分布范围为 0.06~0.3 s (图 8), 频谱成分相当丰富。所有地震动经带宽为 0.01~40 Hz 的 4 阶巴特沃斯带通滤波后作为输入, 采用基于经典波动理论^[25]的频率线性计算方法给出了不同土层场地与参考基岩场地加速度反应谱谱比。图 9 所示为厚度 $h = 25$ m, 剪切波速 $v_s = 280$ m/s 场地的结果, 图中同时给出了平均(50%分位)谱比曲线, 9 个构造场地平均谱比结果汇总如图 10。从图 9, 10 中可以清楚地看到土层场地与参考基岩场地加速度反应谱谱比在图示周期范围内均大于 1, 不同的输入地震动会影响谱比结果但不影响恒定放大的基本规律, 这与前面通过理论解析所给出的结论完全一致。需要说明的是, 本文数值模拟采用了和理论解析相同的边界条件, 即假定土层场地入射波和参考基岩场地入射波相同(式(21))。此外, 本文模拟并未考虑土体非线性效应, 在筛选输入地震动时采用 20gal 的峰值加速度上限也是基于这一考虑。其原因一是为了和理论解析保持一致, 二是因为强非线性状态下土体地震响应模拟影响因素过多, 结果可靠性相对较差^[18]。事实上, 理论解析采用无量纲频率比给出了全频域空间的解答, 实际上已经包括了土体在强震动作用下等价剪切模量降低的情形。

综上所述, 基于强震观测记录的最新认识和数值模拟结果均很好地验证了本文理论解析方法的合理性和结论的可靠性。

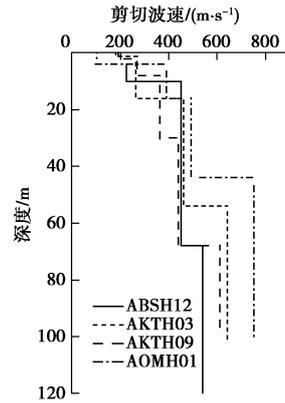


图 6 ABSH12、AKTH03、AKTH09 和 AOMH01 场地剪切波速剖面

Fig. 6 Shear wave velocity profiles of sites ABSH12, AKTH03, AKTH09 and AOMH01

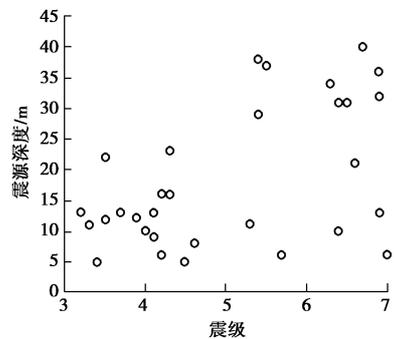


图 7 输入地震动震级 - 震源深度分布

Fig. 7 Magnitude and distribution of hypocenter depth of selected input bedrock motions

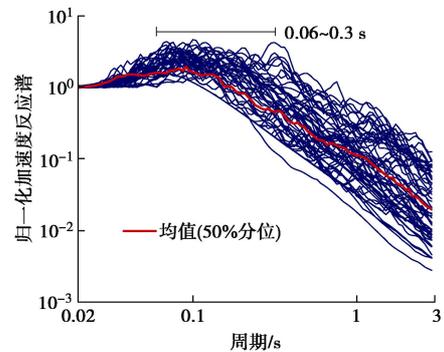


图 8 输入地震动归一化加速度反应谱

Fig. 8 Normalized spectral accelerations of input motions

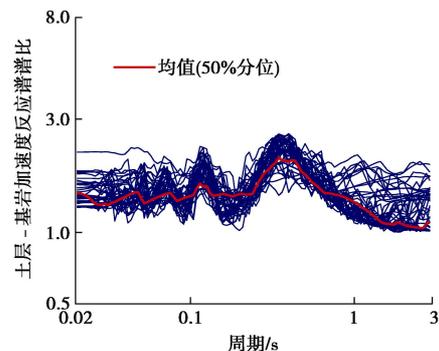


图 9 土层场地与基岩参考场地加速度反应谱谱比

Fig. 9 Acceleration response spectral ratios between soils and reference rock sites (case $h = 25$ m, $v_s = 280$ m/s)

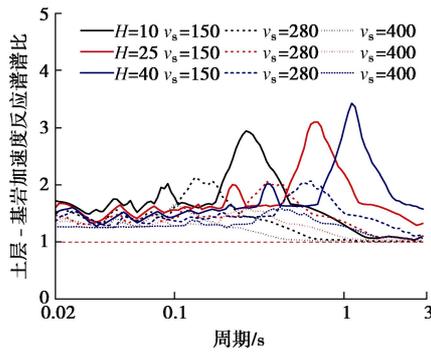


图 10 不同场地平均谱比曲线

Fig. 10 Medium spectral ratio curves in different sites

5 结 论

本文采用土层-基岩理想场地模型,从弹性半空间工程波动理论出发,导出了土层场地与参考基岩场地地震响应定量关系解析表达,并通过数值模拟进行了验证,在此基础上对覆盖土层自由场与露头基岩面震动响应比值的场地放大系数规律进行了研究,得出了以下主要结论:

(1) 土层场地自由地表震动响应与参考基岩场地相比理论上恒定表现为放大,绝大多数情况下放大倍数介于 1 和 2 之间,在全频域空间平均放大 1.5 倍,即便考虑土体非线性效应,恒定放大的基本结论不会改变。

(2) 当土层与基岩阻抗比大于 0.5 (土层波速大于基岩波速一半) 时,场地放大系数小于 2; 当输入波频率与土层场地基频比较接近且覆盖土层与基岩波速差异较大时场地放大系数显著增大。

(3) NEHRP 2015 场地系数与本文理论解答规律一致,特别是软场地系数取值及场地系数随场地类别变化规律都与本文分析结果吻合。

(4) 中国地震动参数区划图 GB 18306—2015 中软场地系数显著偏小,强烈地震动作用下软场地系数小于 1 的现象不合理,取值严重偏于保守。

(5) 场地放大系数随场地变软整体表现出增大的趋势,中国规范 IV 类场地系数普遍小于 III 类的取值方案有待商榷。

参考文献:

[1] SEED H B, ROMO M P, SUN J I, et al. The Mexico earthquake of September 19, 1985: relationships between soil conditions and earthquake ground motions[J]. *Earthquake Spectra*, 1988, **4**(4): 687 - 729.

[2] HANKS T C, BRADY A G. The loma prieta earthquake, ground motion, and damage in Oakland, Treasure Island, and San Francisco[J]. *Bulletin of the Seismological Society of*

America, 1991, **81**(5): 2019 - 2047.

- [3] GAO S, LIU H, DAVIS P M, et al. Localized amplification of seismic waves and correlation with damage due to the Northridge earthquake: evidence for focusing in Santa Monica[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, **86**(1B): S209 - S230.
- [4] KIM B, HASHASH Y M A. Site response analysis using downhole array recordings during the March 2011 Tohoku-Oki earthquake and the effect of long-duration ground motions[J]. *Earthquake Spectra*, 2013, **29**(S1): S37 - S54.
- [5] 薄景山, 李秀岭, 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 Jing-shan, LI Xiu-ling, LIU De-dong, 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))
- [6] 薄景山, 李秀岭, 刘红帅. 土层结构对地表加速度峰值的影响[J]. *地震工程与工程振动*, 2003, **23**(3): 35 - 40. (BO Jing-shan, LI Xiu-ling, LIU Hong-shuai. Effects of soil layer construction on peak accelerations of ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2003, **23**(3): 35 - 40. (in Chinese))
- [7] DARRAGH R B, SHAKAL A F. The site response of two rock and soil station pairs to strong and weak ground motion[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1991, **81**(5): 1885 - 1899.
- [8] AKI K. Local site effects on weak and strong ground motion[J]. *Tectonophysics*, 1993, **218**(1): 93 - 111.
- [9] KOKUSHO T, SATO K. Surface-to-base amplification evaluated from KiK-net vertical array strong motion records[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, **28**(9): 707 - 716.
- [10] 郭晓云, 薄景山, 巴文辉. 汶川地震不同场地反应谱平台值统计分析[J]. *地震工程与工程振动*, 2012, **32**(4): 54 - 62. (GUO Xiao-yun, BO Jin-shan, BA Wen-hui. Statistical analysis of peak flat values of response spectra in different site condition based on Wenchuan strong ground motions[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2012, **32**(4): 54 - 62. (in Chinese))
- [11] 崔昊, 丁海平. 基于 KiK-net 强震记录的场地调整系数估计[J]. *地震工程与工程振动*, 2016, **36**(4): 147 - 152. (CUI Hao, DING Hai-ping. Estimation of site coefficient based on KiK-net strong-motion seismograph network[J].

- Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2016, **36**(4): 147 - 152. (in Chinese))
- [12] HWANG H H M, LIN H, HUO J R. Site coefficients for design of buildings in eastern United States[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1997, **16**(1): 29 - 40.
- [13] 李小军, 彭青. 不同类别场地地震动参数的计算分析. 地震工程与工程振动, 2001, **21**(1): 29 - 36. (LI Xiao-jun, PENG Qing. Calculation and analysis of earthquake ground motion parameters for different site categories[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, **21**(1): 29 - 36. (in Chinese))
- [14] 吕悦军, 彭艳菊, 兰景岩, 等. 场地条件对地震动参数影响的关键问题[J]. 震灾防御技术, 2008, **3**(2): 126 - 135. (LU Yue-jun, PENG Yan-ju, LAN Jing-yan, et al. Some key problems about site effects on seismic ground motion parameters[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, **3**(2): 126 - 135. (in Chinese))
- [15] 李瑞山. 新一代土层地震反应分析方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016. (LI Rui-shan. Research on a new generation technique for ground seismic response analysis[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016. (in Chinese))
- [16] KAKLAMANOS J, BAISE L G, THOMPSON E M, et al. Comparison of 1D linear, equivalent-linear, and nonlinear site response models at six KiK-net validation sites[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, **69**: 207 - 219.
- [17] 王亮. 基于 KiK-net 强震台网的土层地震动特性研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2014. (WANG Liang. The research of soil layer seismic characteristic based on KiK-net strong-motion network[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2014. (in Chinese))
- [18] GRIFFITHS S C, COX B R, RATHJE E M. Challenges associated with site response analyses for soft soils subjected to high-intensity input ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, **85**: 1 - 10.
- [19] 袁晓铭, 李瑞山, 孙锐. 新一代土层地震反应分析方法[J]. 土木工程学报, 2016, **49**(10): 95 - 102, 122. (YUAN Xiao-ming, LI Rui-shan, SUN Rui. A new generation method for earthquake response analysis of soil layers[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, **49**(10): 95 - 102, 122. (in Chinese))
- [20] 李兆焱, 袁晓铭, 王鸾, 等. 巨厚场地三种土层地震反应分析程序对比检验[J]. 地震工程与工程振动, 2017, **37**(4): 42 - 50. (LI Zhao-yan, YUAN Xiao-ming, WANG Luan, et al. Verification of three methods for calculating earthquake response of soil layers in deep sites[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, **37**(4): 42 - 50. (in Chinese))
- [21] Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences. NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures[S]. 2015.
- [22] SEYHAN E, STEWART J P. Semi-empirical nonlinear site amplification from NGA-West2 data and simulations[J]. Earthquake Spectra, 2014, **30**(3): 1241 - 1256.
- [23] ASCE/SEI 7-16 American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures[S]. 2016.
- [24] GB 18306—2015 中国地震动参数区划图[S]. 2015. (GB 18306—2015 Seismic ground motion parameters zonation map of China[S]. 2015. (in Chinese))
- [25] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2002. (LIAO Zhen-peng. Introduction to wave motion theories for engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [26] 罗诚, 谢俊举, 温增平. 熊本 $M_w7.0$ 地震近场地表与井下地震动对比研究[J]. 地震学报, 2018, **40**(1): 108 - 120. (LUO Cheng, XIE Jun-ju, WEN Zeng-ping. Comparison of near-field surface and borehole ground motion observed during the Kumamoto $M_w7.0$ earthquake[J]. Acta Seismologica Sinica, 2018, **40**(1): 108 - 120. (in Chinese))