

# 单一均质土覆盖层厚度对地表峰值加速度 和反应谱平台值的影响\*

文雯<sup>1,2</sup>, 宋廷苏<sup>2</sup>, 王珏<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 2. 云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 选择粘土、粉土、砂土、砾石 4 类土场地构造了 140 个单一均质土剖面, 输入峰值分别为 50、100、150、200、300 Gal 的各 3 条人工合成地震动时程, 使用一维等效线性波动法, 进行了土层地表地震反应计算, 并对计算得到的地表峰值加速度和反应谱平台值做了统计分析和讨论。结果表明: 不同土类地表峰值加速度和反应谱平台值随覆盖层增大达到最大值的厚度不同; 不同幅值的基底输入, 不同土类的覆盖层情况下, 地表峰值加速度相对于基岩值加速度的放大倍数并不具有规律性, 同是 II 类场地, 中软和中硬场地土条件下放大倍数的差异也是明显的。

**关键词:** 覆盖层厚度; 峰值加速度; 反应谱平台值; 放大倍数

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)04-0548-07

## 0 前言

早在 1923 年日本关东大地震时, 覆盖层厚度对地震动的影响就已为人们所关注。之后众多的学者选择不同的计算模型, 使用不同的方法在覆盖层厚度对地表地震动的影响上做了很多研究(胡聿贤, 2006)。

薄景山等(2003a, b, c)的研究表明, 在不存在软弱夹层的情况下, 地震动峰值加速度和反应谱平台值随覆盖层厚度的增加先增大后减小, 从他们计算的模型得出增大的极值在覆盖层厚度 15 m 左右, 当覆盖层厚度大于 15 m 时放大作用逐步减小, 当大于 30 m 时, 其变化对地表加速度峰值的影响不大。李媛媛等(2006)使用所提出的模型得到不同幅值的基底输入地震动, 峰值加速度随覆盖层厚度增加取得极值的厚度也不同。基底输入较小时, 取得极值对应的厚度较厚; 基底输入较大时, 取得极值对应的厚度较薄。冯希杰和金学申(2001)认为不同地基、不同超越概率的基底输入, 地表峰值加速度与基岩峰值加速度的放大倍数不同, 高概率的输入放大倍数较低概率的小, 黄土类场地的放大倍数较岩石类场地的放大倍数多分布于 1.0~2.0 之间。

这些研究表明, 土层对地震动的放大作用并

不完全随覆盖层厚度的增大而增大, 其增大的幅值也并不随基底输入强度的增大而增大(薄景山等, 2003a, b, c; 李媛媛等, 2006; 冯希杰, 金学申, 2001; 刘红帅等, 2005)。在 30 m 以内, 覆盖层厚度对地表峰值加速度的影响比较明显, 但上述研究在这个范围内的剖面较少, 平均每 5 m 为一个剖面, 不足以反映变化情况。对不同的土类性质而言, 土层放大作用达到极限时相对应的覆盖层厚度也不一样。为更好地讨论这些问题, 笔者选择多条峰值不同、相位不同的人造地震动作为输入, 以单一均质土类为例构造剖面, 在 30 m 以内每增加 1 m 构造一个剖面, 使用一维等效线性波动法及一维土层反应程序(廖振鹏, 李小军, 1989), 研究单一均质的粘土、粉土、砂土及砾石场地, 在不同地震动输入条件下, 峰值加速度和反应谱平台值随覆盖层厚度变化的影响。

## 1 计算模型及相关参数的确定

假定场地为平坦的水平成层模型, 上覆覆盖层分别为均质的粘土、粉土、砂土、砾石, 选取基岩面作为场地土层地震反应的输入界面, 基岩的剪切波速为 500 m/s, 密度为 2.30 g/cm<sup>3</sup>。地震输入界面以下无软弱层存在。土壤剪切模量比  $G/G_{\max}$ 、阻尼比  $\lambda$  与剪应变  $\gamma$  的动态变化关系采用了

中国地震行业标准（DB001 - 94）中的推荐值。

粘土、粉土、砂土地覆盖层厚度从 2 m 至 30 m，每增加 1 m 构造一个剖面，30 m 至 50 m 每增加 5 m 构造一个剖面，每种单一土类共 33 个计算剖面，3 类单一土地地共计 99 个计算剖面；砾石场地从 2 m 至 40 m，每增加 1 m 构造一个剖面，40 m 至 50 m 每增加 5 m 构造一个剖面，共 41 个剖面。4 类单一土地地全部合计 140 个剖面，每个剖面各层厚度平均分配，如计算 10 m 覆盖层，分为 10 层，每层层厚 1 m。

在收集、整理了多个场地各层土类剪切波速和密度的基础上，假定构造的模型为均质土类，密度不随深度变化，各层剪切波速值见表 1。粘土覆盖层场地的剪切波速值随深度递增选取 155 ~ 230 m/s，

等效剪切波速值  $v_{粘}$  为 188 m/s；粉土覆盖层场地的剪切波速值随深度递增选取范围为 175 ~ 270 m/s，等效剪切波速值  $v_{粉}$  为 211 m/s；砂土覆盖层场地的剪切波速值随深度递增选取范围为 180 ~ 290 m/s，等效剪切波速值  $v_{砂}$  为范围为 223 m/s；砾石覆盖层场地的剪切波速逐渐值随深度递增选取范围内 220 ~ 460 m/s，等效剪切波速值  $v_{砾}$  为 320 m/s。用于构造的粘土、粉土、砂土、砾石的等效剪切波速逐渐递增  $v_{粘} < v_{粉} < v_{砂} < v_{砾}$ ，而场地刚度与场地剪切波速的平方成正比，可以认为粘土、粉土、砂土、砾石场地的刚度也是递增的。

限于篇幅，计算模型仅给出 10 m 覆盖层剖面，如表 1 所示，其余剖面各参数均相同，仅每层层厚按上述类推。

表 1  粘土、粉土、砂土、砾石 10 m 覆盖层计算模型									
Tab. 1  Calculation model of overburden layers of 10 m with clay, silt, sand and gravel									
层号	层厚 /m	粘土剪切 波速/ $m \cdot s^{-1}$	粘土密度 / $g \cdot cm^{-3}$	粉土剪切 波速/ $m \cdot s^{-1}$	粉土密度 / $g \cdot cm^{-3}$	砂土剪切 波速/ $m \cdot s^{-1}$	砂土密度 / $g \cdot cm^{-3}$	砾石剪切波速 / $m \cdot s^{-1}$	砾石密度 / $g \cdot cm^{-3}$
1	1.0	155	1.80	175	1.90	180	1.95	220	2.10
2	1.0	160	1.80	180	1.90	185	1.95	230	2.10
3	1.0	165	1.80	185	1.90	190	1.95	250	2.10
4	1.0	170	1.80	190	1.90	200	1.95	270	2.10
5	1.0	180	1.80	200	1.90	210	1.95	290	2.10
6	1.0	190	1.80	210	1.90	220	1.95	320	2.10
7	1.0	200	1.80	220	1.90	235	1.95	360	2.10
8	1.0	210	1.80	230	1.90	250	1.95	380	2.10
9	1.0	220	1.80	250	1.90	270	1.95	420	2.10
10	1.0	230	1.80	270	1.90	290	1.95	460	2.10

按照《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010）关于场地类别和场地类型的划分，上述构造的场地均属于Ⅱ类建筑场地，其中砾石覆盖层场地类型为中硬场地土，砂土、粉土、粘土覆盖层场地类型为中软场地土。

在考虑构造模型时，选择均质土类构造模型剖面，可以更好地突出厚度的影响；每增加 1 m 构造一个剖面，能更好地反映受厚度影响的连续变化；以 500 m/s 波速界面作为地震输入面是现今主要规范的规定；而粘土、粉土、砂土、砾石所构成的Ⅱ类建筑场地在实际工程场地中最为常见。因此笔者构造的模型在突出厚度变化的同时具有一定的代表性和工程意义。

基底输入选择人造地震动时程，目标谱峰值

分别为 50、100、150、200、300 Gal，特征周期选择 0.35 s，为保证合成的结果有统计代表性，对每个目标峰值合成 3 条不同随机相位地震动时程，将此合成地震动时程减半作为场地地震反应分析的基岩输入，最后结果取这 3 条随机地震动计算结果的平均值。

## 2  覆盖层厚度对地表峰值加速度 $A_{max}$ 的影响

2.1  不同覆盖层厚度的地表峰值加速度  $A_{max}$  值

图 1 为粘土、粉土、砂土、砾石场地不同覆盖层厚度对应的地表峰值加速度  $A_{max}$  值，A、B、C、D、E 分别表示输入峰值为 50、100、150、200、

300 Gal 的人造地震动土层地表地震反应得到的地表峰值加速度值,输入不同随机相位同一峰值的 3 条时程计算得到的结果取平均值。

从图 1 中可以看出在单一粘土、单一粉土、单一砂土、单一砾石覆盖层条件下,各强度输入的地表峰值加速度  $A_{\max}$  均表现出随覆盖层厚度增加先增大后减小的趋势,但是不同的土类  $A_{\max}$  增大达到最大值对应的厚度不同。

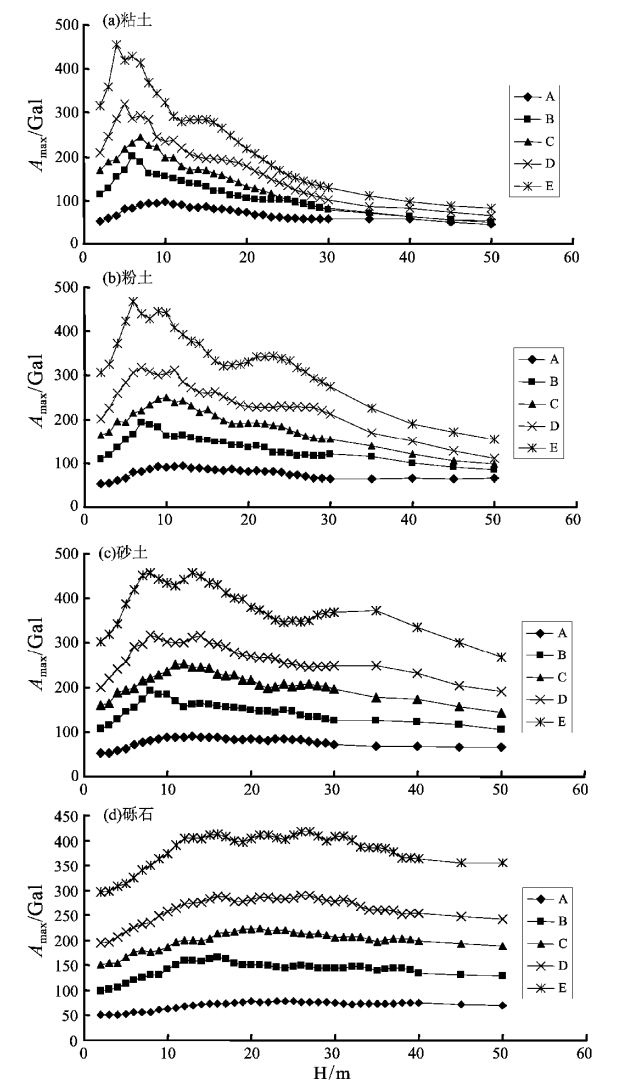


图 1 单一均质土覆盖层厚度对地表峰值加速度  $A_{\max}$  值的影响

(a) 粘土场地; (b) 粉土场地; (c) 砂土场地; (d) 砾石场地

Fig. 1 Effects of the thickness of overburden layer with single homogeneous on peak accelerations  $A_{\max}$  of ground motions

(a) clay; (b) silt; (c) sand; (d) gravel

同一个单一土类覆盖层场地,覆盖层厚度在 30 m 以内,输入强度越大,对应的  $A_{\max}$  越大,且输入强度大的地震动计算得到的  $A_{\max}$  随覆盖层厚度变化的幅度比输入强度小的地震动对应的变化幅度大。覆盖层厚度大于 30 m 时,曲线的走势不同,按砾石、砂土、粉土、粘土的顺序来看,曲线收缩汇聚状态逐渐明显,反映了土层非线性的特点,即较软的土非线性强,超过一定厚度时,不同强度的输入计算得到的  $A_{\max}$  趋于相同。

2.2 地表峰值加速度  $A_{\max}$  最大值对应的厚度

本文中地表峰值加速度  $A_{\max}$  最大值是指地表峰值加速度随覆盖层厚度  $H$  先增大后减小的过程中达到的极值。不同强度的输入取得  $A_{\max}$  最大值的覆盖层厚度不同,在同一输入不同覆盖层条件下,取得最大值的覆盖层厚度也不同。如表 2 所示,同一输入条件下,按粘土、粉土、砂土、砾石的顺序,最大值对应的厚度递增。相同的覆盖层条件,粘土、粉土场地  $A_{\max}$  最大值对应的厚度有随输入强度增大而递减的趋势;砂土场地在  $E$  输入时分别于 8 m 和 13 m 时出现两个最大值。砾石场地峰值加速度  $A_{\max}$  最大值对应的厚度  $H$  除  $A$  输入外,有随输入强度增大递增的趋势。

表 2 地表峰值加速度  $A_{\max}$  最大值对应的厚度

Tab. 2 Maximum of peak accelerations $A_{\max}$ corresponding to the thickness						
厚度 $H$	输入	$A$	$B$	$C$	$D$	$E$
土类						
粘土		10 m	6 m	7 m	5 m	4 m
粉土		12 m	7 m	10 m	7 m	6 m
砂土		13 m	8 m	12 m	14 m	8 m / 13 m
砾石		24 m	16 m	21 m	27 m	26 m

地表峰值加速度  $A_{\max}$  最大值对应的厚度与场地条件有关,相同输入条件下,较硬的覆盖层场地,达到  $A_{\max}$  最大值对应的厚度较厚;较软的覆盖层场地,达到  $A_{\max}$  最大值对应的厚度较薄。较软的场地,输入强度越大,达到  $A_{\max}$  最大值对应的厚度越薄;较硬的场地,输入强度越大,达到  $A_{\max}$  最大值对应的厚度越厚。

3 覆盖层厚度对放大倍数  $M$  的影响

放大倍数  $M$  是指经地表土层地震反应后得到的地表峰值加速度与基岩输入峰值加速度的比值。

这个比值通常用来描述覆盖土层对基岩输入地震动幅值的放大作用。

3.1 不同覆盖层厚度的放大倍数  $M$  值

图 2 为粘土、粉土、砂土、砾石场地不同覆盖层厚度对应的放大倍数  $M$  值,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  分别表示输入峰值为 50、100、150、200、300 Gal 的人造地震动土层地表地震反应得到的放大倍数  $M$  值, 输入不同随机相位同一峰值的 3 条时程计算得到的结果取平均值。

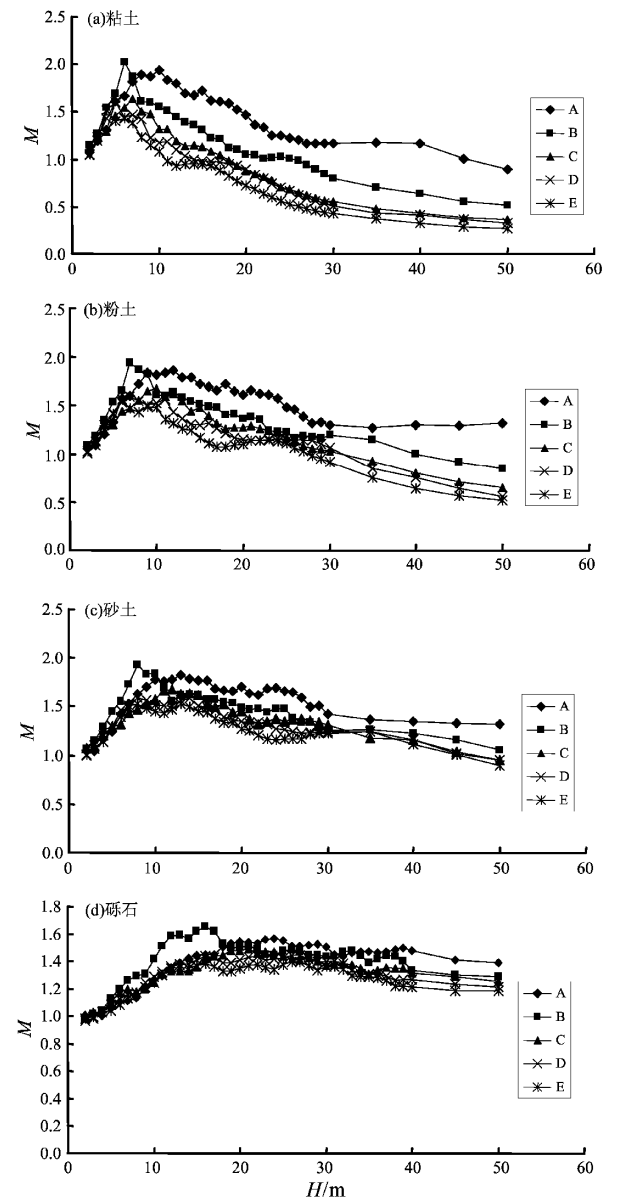


图 2 单一均质土覆盖层厚度对放大倍数  $M$  的影响  
Fig. 2 Effects of the thickness of overburden layer with single homogeneous on amplification  $M$   
(a) clay; (b) silt; (c) sand; (d) gravel

不同峰值的基岩输入地震动, 不同场地条件, 地表地震反应后得到的放大倍数  $M$  是不一样的。粗略统计看来, 在较软的场地如粘土、粉土场地上较强的输入对应的放大倍数比较弱的输入对应的放大倍数低, 在较硬的场地如砾石场地上较强的输入和较弱的输入对应的放大倍数则差别不明显。

图 3 为粘土场地、粉土场地、砂土场地的放大倍数  $M_{\text{粘}}$ 、 $M_{\text{粉}}$ 、 $M_{\text{砂}}$  与砾石场地放大倍数  $M_{\text{砾}}$  的比值随覆盖层厚度的折线图。

从图 3 可以看出, 较薄的覆盖层, 在较弱的地震动输入条件下, 粘土、粉土、砂土场地地表峰

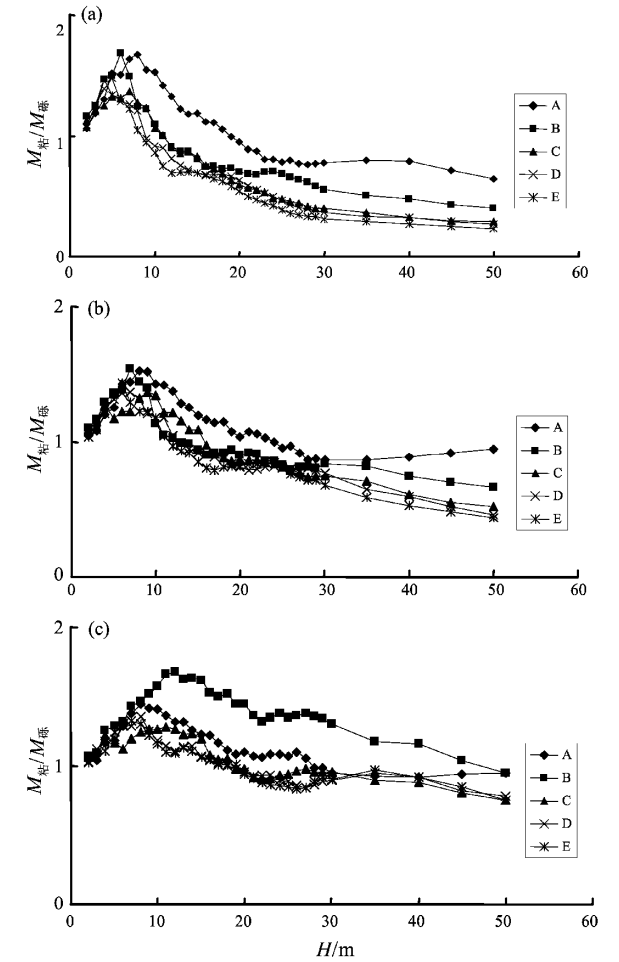


图 3 粘土、粉土、砂土场地放大倍数与砾石场地放大倍数的比值图  
(a)  $M_{\text{粘}}/M_{\text{砾}}$ ; (b)  $M_{\text{粉}}/M_{\text{砾}}$ ; (c)  $M_{\text{砂}}/M_{\text{砾}}$   
Fig. 3 The amplification ratio of the clay, silt and sand to gravel  
(a)  $M_{\text{clay}}/M_{\text{gravel}}$ ; (b)  $M_{\text{silt}}/M_{\text{gravel}}$ ; (c)  $M_{\text{sand}}/M_{\text{gravel}}$

值加速度相对于基岩峰值加速度的放大倍数较砾石场地的放大倍数大;较厚的覆盖层,在较强的地震动输入条件下,粘土、粉土、砂土场地的放大倍数较砾石场地的放大倍数小。也就是说,即使归属同一类建筑场地,不同的场地土类型,其放大倍数随覆盖层厚度变化有不同的变化,中软场地的放大倍数并不一定比中硬场地的小,规范中忽略了这两种场地的差别,这样的差别在工程设计中有多大影响,有待于进一步研究。

3.2 放大倍数  $M < 1$  对应的最薄厚度

表 3 是在覆盖层厚度 50 m 以内,地表峰值加速度  $A_{\max}$  随覆盖层厚度变化时,相应的放大倍数最先小于 1 的厚度。从同一类覆盖层场地来看,输入的地震动强度越大,使地表峰值加速度  $A_{\max}$  最先达到小于基岩峰值加速度  $A_{\max}$  的厚度越薄;从不同的土类来看,较软的土在覆盖层由薄变厚的过程中较早出现放大倍数  $M < 1$  的情况,较硬的土这种情况出现的较晚。

表 3 放大倍数  $M < 1$  对应的最薄厚度  
Tab. 3 Amplification of  $M < 1$  corresponding to the thinnest thickness

厚度 $H$ 输入 土类	A	B	C	D	E
粘土	50 m	26 m	18 m	14 m	11 m
粉土	> 50 m	40 m	35 m	35 m	28 m
砂土	> 50 m	> 50 m	50 m	50 m	50 m
砾石	> 50 m	> 50 m	> 50 m	> 50 m	> 50 m

覆盖层场地并不一定对基底输入地震动表现为放大作用,通过土层地表地震反应后得到的地表峰值加速度  $A_{\max}$  有可能比基岩峰值加速度小,这种情况一般出现在较软的深厚场地和较强的地震动作用下。

4 覆盖层厚度对反应谱平台值  $\alpha_{\max}$  的影响

反应谱平台值  $\alpha_{\max}$  定义为有效峰值加速度 EPA 乘以 2.5 (田启文, 2009)。图 4 为粘土、粉土、砂土、砾石场地地表地震动反应谱平台值随覆盖层厚度的变化图, A、B、C、D、E 分别表示输入峰值为 50、100、150、200、300 Gal 的人造地震动

土层地表反应谱平台值的结果,输入不同随机相位同一峰值的 3 条时程计算得到的结果取平均值。

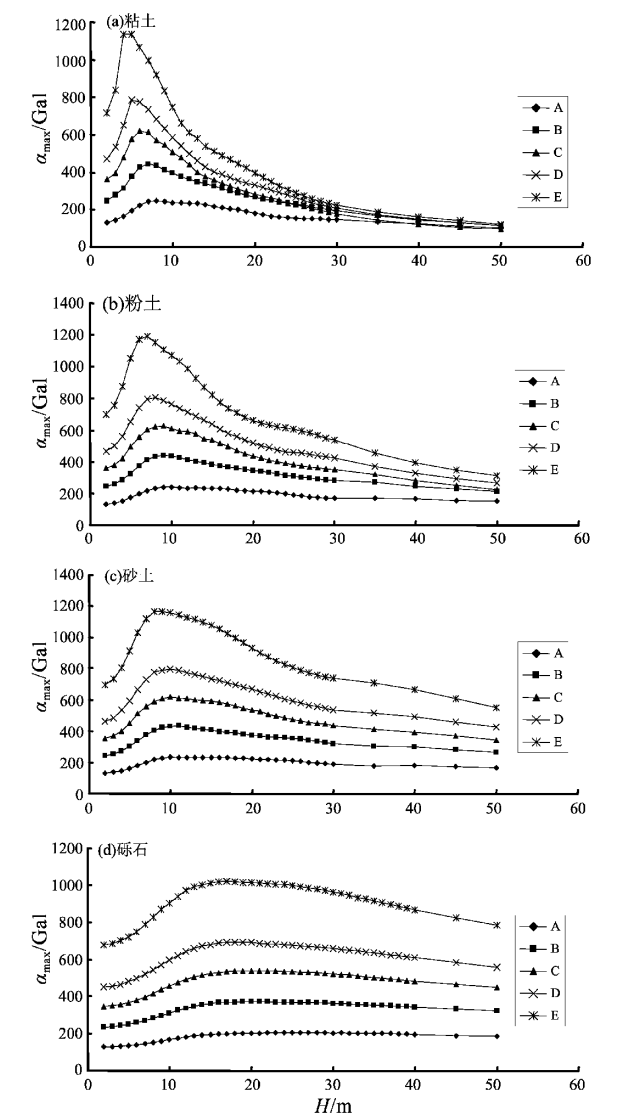


图 4 单一均质土覆盖层厚度对地表地震动反应谱平台值的影响  
(a) 粘土场地; (b) 粉土场地; (c) 砂土场地; (d) 砾石场地  
Fig. 4 Effects of the thickness of overburden layer with single homogeneous on plateau value of response spectra of ground motions on the ground  
(a) clay; (b) silt; (c) sand; (d) gravel

单一土类覆盖层场地地表地震动反应谱平台值随厚度的增加均表现出先增大,达到一最大值后减小的趋势。

不同的基底输入,不同的场地,地表地震动

反应谱平台值随覆盖层厚度变化对应的最大值出现的厚度不同,随覆盖层厚度变化曲线的形状也不同。较软的场地,较强的基底输入,最大值对应的厚度较薄,地表地震动反应谱平台值随厚度变化的曲线较陡,即最大值附近的上升和下降段变化幅度均较大;较硬的场地,较弱的基底输入,最大值对应的厚度较厚,地表地震动反应谱平台值随厚度变化的曲线较缓,即最大值附近的上升和下降段变化幅度均较小。

## 5 结论与讨论

(1) 随着覆盖层厚度的增加,地表峰值加速度和反应谱平台值先增大后减小的特征反映了土体由线性向非线性的过渡,而不同土类地表峰值加速度和反应谱平台值随覆盖层增大达到最大值的厚度不同,也表现了不同土类的非线性特性不同。较软的场地土在较强的地震作用下表现为较强的非线性变形特性,使得大量地震波能量耗散,降低了地表地震动幅值,放大倍数  $M$  减小,地表峰值加速度可能比基岩峰值加速度小。

(2) 在不同幅值的基底输入情况下,地表峰值加速度相对于基岩峰值加速度的放大倍数并不具有规律性;在相同的基底输入条件下,不同土类覆盖层的地表峰值加速度与基岩峰值加速度的放大倍数也不同。现行规范中仅以一数值,或定量关系描述基岩峰值加速度与一般中硬场地土峰值加速度的对应关系,较为粗略,对于重大工程,应进一步考虑不同场地的差异。

(3) 覆盖层在 30 m 厚度以内的变化对地表地震动的影响显著,这同前人的研究成果相同。因此,在场地地表地震反应工作中,应对这个厚度范围内的工程地质勘察工作尽可能做的更细,使得计算剖面模型参数的确定更加细致和完整。

(4) 本文工作是基于单一的均质土类构造模型基础上,事实上自然形成的土层模型剖面是非常复杂的,随着覆盖层厚度的增加,不同层位同一类土的密度、剪切模量和阻尼比是不同的,波速也不一定就是从表层到底层依次增大,这些用于计算的不同参数的不同组合更增加了覆盖层厚度对地表地震动参数影响的复杂性。

## 参考文献:

- 薄景山,李秀领,李山有. 2003a. 场地条件对地震动影响研究的若干进展[J]. 世界地震工程,19(2):11-15.
- 薄景山,李秀领,刘德东,等. 2003b. 土层结构对反应谱平台值的影响[J]. 地震工程和工程振动,23(4):29-33.
- 薄景山,李秀领,刘红帅. 2003c. 土层结构对地表加速度峰值的影响[J]. 地震工程和工程振动,23(3):29-33.
- 冯希杰,金学申. 2001. 场地土对基岩峰值加速度放大效应分析[J]. 工程地质学报,9(4):385-388.
- 胡聿贤. 2006. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社.
- 李媛媛,徐扬,吴东. 2006. 覆盖层厚度对反应谱峰值的影响[J]. 地震地磁观测与研究,27(4):33-38.
- 廖振鹏,李小军. 1989. 地表土层地震反应的等效线性化解法[A]//廖振鹏. 地震小区化一理论与实践[M]. 北京:地震出版社.
- 刘红帅,薄景山,吴兆营,等. 2005. 土体参数对地表加速度峰值和反应谱的影响[J]. 地震研究,28(2):167-171.
- 田启文. 2009. 工程地震学基础[M]. 防灾科技学院教材.
- DB001-94,工程场地地震安全性评价工作规范[S].
- GB50011-2010,建筑抗震设计规范[S].

# Effects of the Thickness of Overburden Layer with Signal Homogeneous Soil on Peak Acceleration of Ground Motions and Platform Value of the Acceleration Response Spectrum

WEN Wen<sup>1,2</sup>, SONG Ting-su<sup>2</sup>, WANG Jue<sup>2</sup>

(1. *School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

(2. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China*)

## Abstract

We build 140 single homogeneous soil profiles by using four types of soil, such as clay, silt, sand and gravel. Then using one-dimensional equivalent linear wave method, we calculate the seismic response of soil surface when inputting 3 time histories of synthetic ground motion with the peak of 50, 100, 150, 200, 300 Gal, and make a statistical analysis of calculated surface peak acceleration, platform value of the acceleration response spectrum. The results show that the surface peak acceleration, platform value of the acceleration response spectrum of different soil increase with thickness of overburden layer, then gradually decreased after reaching the peak. The thickness corresponding to the maximum peak is different. When inputting the time histories of synthetic ground motion with different peak or under condition of overburden layer with different soil, amplification factor of surface peak acceleration is less regularity than that of bedrock peak acceleration. The difference of amplification factor between the medium soft site and medium hard site which are in the same site type II is obvious.

**Key words:** thickness of overburden layer; peak accelerations; platform value of acceleration response spectrum; amplification factor