

基岩输入参数对场地地震反应的影响分析

曾金艳^{1,3}, 李自红^{1,3}, 陈文^{2,3}

(1. 太原理工大学, 山西 太原 030024; 2. 吉林大学, 吉林 长春 130012;

3. 山西省地震局, 山西 太原 030002)

摘要:基岩输入参数主要包括基岩面埋深、基岩剪切波速和基岩地震动强度等因素。本文通过分析某场地在选择不同深度的假想基岩面、不同的基岩剪切波速以及不同基岩地震动强度条件下的场地地震反应结果,得出在不同的基岩输入参数条件下,地表的地震动峰值加速度和加速度反应谱存在很大差异。

关键词:基岩输入参数; 场地地震反应分析; 地面运动参数

中图分类号: TU435; P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2009)02-0110-05

Analysis on Influence of the Input Parameters of Bedrock on Site Earthquake Response

ZENG Jin-yan^{1,3}, LI Zi-hong^{1,3}, CHEN Wen^{2,3}

(1. Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Jilin University, Changchun 130012, China;

3. Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030002, China)

Abstract: The input parameters of bedrock includes depths of rock interface, rock shear wave velocity, earthquake motion intensity and so on. Through analyzing the result of site earthquake response that gained by selecting different rock interface depths, shear wave velocities and earthquake motion intensities, the conclusion is obtained: with different input parameters of bedrock, the peak values of acceleration and spectra of acceleration on the ground surface have great differences.

Key words: Input parameter of bedrock; Analysis on site earthquake response; Parameters of ground motion

0 前言

场地地震反应分析结果即场地地震动参数是工程结构抗震设计和结构可靠性分析时需考虑的重要因素。影响场地地震反应分析结果的主要因素有:土层底部的基岩输入参数、场地地震反应分析方法以及场地土的动力学特征。这三个因素中,场地的动力学特征对场地地震反应分析起主导作用,很多研究者对此作了较深入的讨论。而实际工作中,基岩输入参数对场地地震反应分析中的地表地震动峰值加速度和加速度反应谱也起着不可忽略的影响。基岩输入参数主要包括基岩面深度、基岩剪切波速

以及基岩地震动强度等。本文通过分析在深厚覆盖层的条件下,选择不同的假想基岩界面深度、不同的基岩剪切波速以及不同的基岩地震动强度进行场地地震反应分析,以研究在不同基岩参数条件下场地地震反应的变化规律。

1 场地地震反应分析方法及土力学性能参数的选取

1.1 场地地震反应分析方法选取

场地地震反应分析方法采用目前工程界普遍应

收稿日期:2008-06-10

作者简介:曾金艳(1970—),女(汉族),湖南邵东人,工程硕士,高级工程师,主要从事地震安全性评价、岩土工程测试、以及工程物探等工作。

用的一维等效线性波动法。根据国内外的文献资料证明,该方法是可行的^[1]。该方法假定地面、土层界面和基岩面近似水平无限延伸,基岩为半无限空间,并且地震效应简化为剪切波的竖向方向传播。

1.2 土力学性能参数的选取

土力学性能参数包括剪切波速 V_s 、密度 ρ 、土层的剪变模量比 $G/G_{\max}$ 以及阻尼比 $\lambda/\lambda_{\max}$ 。这些参数在实际工程中一般通过钻孔土样测试取得,但在覆盖层深厚、设备和技术条件无法实现实际测定时,可采用经验方法获取^[2]。本文除剪切波速、密度和土层岩性根据实际钻孔资料获取,其余采用经验公式进行估算。根据文献^[3]的结论,土层的剪变模量比 $G/G_{\max} - \lambda$ 以及阻尼比 $\lambda/\lambda_{\max} - \lambda$ 关系采用 Dvidenkov 模型:

$$G = G_{\max} \cdot (1 - H(\gamma)) \quad (1)$$

$$H(\gamma) = \left[\frac{(|\gamma|/\gamma_0)^{2\beta}}{1 + (|\gamma|/\gamma_0)^{2\beta}} \right]^A \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_{\max} (1 - G/G_{\max})^\beta \quad (3)$$

式中 A 、 B 、 γ_0 、 β 的取值如下^[3]:

(1) $G/G_{\max} - \lambda$ 曲线

对于无粘性土: $A=0.9$, $B=0.46$, $\gamma_0=3.16 \times 10^{-2} \%$;

对于粘性土 ($5 \leq I_p \leq 100$):

$$A = 1.0 + 0.25 I_p, \quad (4)$$

$$B = 0.44 - 0.0018 I_p, \quad (5)$$

$$\gamma_0 = 4.0 \times 10^{-2} \%$$

(2) $\lambda/\lambda_{\max} - \lambda$ 曲线 ($0 \leq I_p \leq 100$):

$$\beta = 0.22 + 0.91 e^{-0.022 I_p} \quad (6)$$

I_p 为塑性指数,通过常规土工实验数据得到。

2 计算模型

2.1 场地地质条件

本文的计算以太原市活断层探测标准钻孔点为算例。场点位于太原市长风街北,场地施工的钻孔深度为 257.0 m,揭露的土层岩性及其剪切波速随深度的变化见表 1^①。

2.2 输入基岩地震动

输入基岩地震动参数通常为基岩表面的地震动峰值加速度、加速度反应谱以及基岩加速度时程。由于缺乏实际的基岩地震动资料,本文通过概率地震危险性分析方法获取前 2 者;根据地震危险性分析所得的结果以及持时参数人工合成基岩地震动加速度时程。以计算场点 50 年超越概率 63%、10%、2% 三个超越概率水平的危险性分析结果和人造地

震波作为场地的输入地震动,输入的地震动强度分别为 0.44 m/s^2 、 1.72 m/s^2 、 3.49 m/s^2 。输入基岩反应谱见图 1。

表 1 场地土层以及剪切波速

层号	层厚/ m	层底深度/ m	岩性	密度/ [g · cm ⁻³]	剪切波速/ [m · s ⁻¹]
1	19.50	19.50	细砂	1.950	204
2	20.00	39.50	粉土	1.950	237
3	4.30	43.80	细砂	1.940	256
4	8.90	52.70	粉土	1.960	321
5	5.13	57.83	中砂	1.960	396
6	20.97	78.80	粉质粘土	1.950	465
7	12.80	91.60	中细砂	2.000	506
8	50.70	97.30	粉质粘土	2.005	525
9	28.50	125.80	中砂	2.004	534
10	37.30	163.10	粉质粘土	2.006	512
11	6.50	169.60	中砂	2.008	553
12	38.83	208.43	粉质粘土	2.020	595
13	3.39	211.82	中粗砂	2.020	617
14	10.08	221.90	粉质粘土	2.050	580
15	5.30	227.20	粗砂	2.060	636
16	6.06	233.26	粉质粘土	2.050	612
17	13.46	246.66	中砂	2.100	654
18	10.00	256.66	细砂岩	2.300	900

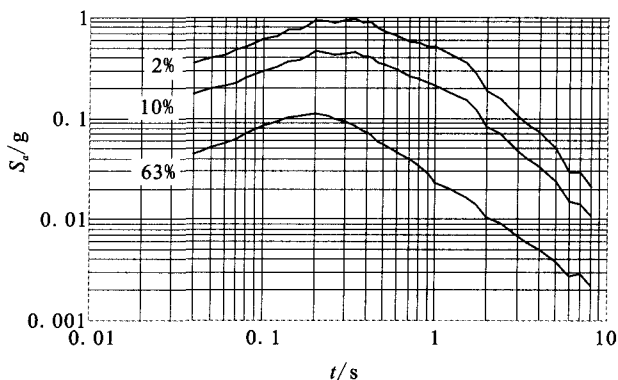


图 1 50 年不同超越概率基岩水平加速度反应谱

Fig. 1 Horizontal acceleration response spectra for different exceedance probabilities in 50 years.

3 计算结果及分析

3.1 基岩面深度对场地地震反应分析的影响

在场地地震反应分析中,真实的基岩面往往难以确定,因此需将假想基岩面作为地震输入界面。按照现行的地震安全性评价技术规范,以剪切波速不小于 500 m/s (Ⅱ级工作)或 700 m/s (Ⅰ级工作)的界面为地震输入界面^[2]。为了研究不同深度的假

① 山西省地震工程勘察研究院. 太原市活断层探测与地震危险性评价控制性钻孔探测与第四纪地层剖面. 2006: 13, 29-31.

想基岩面对场地地震反应分析的影响,选取算例钻孔中的不同深度作为地震输入界面进行分析计算。基岩面以上为原钻孔土层保持不变。

表2 不同基岩深度的地表地震动峰值加速度/ $[m \cdot s^{-2}]$

基岩面埋深/m	80	120	150	200	230	260
50年63%地震波	0.535	0.538	0.451	0.469	0.460	0.455
50年10%地震波	1.883	1.727	1.647	1.640	1.628	1.624
50年2%地震波	2.836	2.810	2.319	1.877	1.836	1.841

表3 不同基岩深度的地震动峰值加速度放大系数

基岩面埋深/m	80	120	150	200	230	260
50年63%地震波	1.22	1.23	1.025	1.065	1.045	1.034
50年10%地震波	1.095	1.004	0.958	0.953	0.947	0.946
50年2%地震波	0.822	0.814	0.672	0.544	0.532	0.534

表2、表3为取不同的基岩面深度时各超越概率水平下场地地震反应分析结果。由表可以看出,假想基岩面深度的选取对场地地表的地震动峰值加速度及峰值加速度 A_{max} 的放大系数产生明显的影响,并且具有一定的规律:

(1) 对于某一概率水平在选择不同基岩面埋深情况下,场地地震反应后地表地震动峰值加速度 A_{max} 在某一深度达到最大值,不同概率水平峰值对应不同的基岩界面深度。输入63%的地震波时对应的界面为120 m;输入10%和2%的地震波时对应界面为80 m。

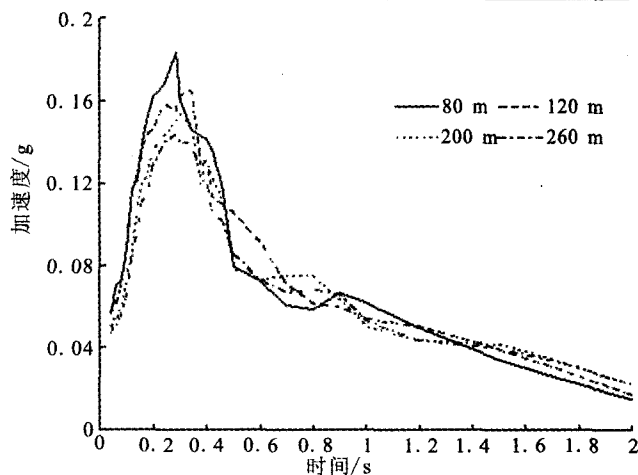
(2) 地震动峰值加速度放大倍数随着假想基岩面的埋深加大逐渐减小,超过一定的界限深度其变化趋于平缓。该界限深度在不同概率水平的地震动强度下也不尽相同,输入63%的地震波时对应的界面为150 m;输入10%和2%的地震波时分别对应界面为150 m和200 m。

(3) 当输入的地震动强度较大时,基岩面的埋深超过一定的深度,场地地震动峰值加速度的放大倍数小于1,这种深度随着输入地震动强度的增大而逐渐减小。

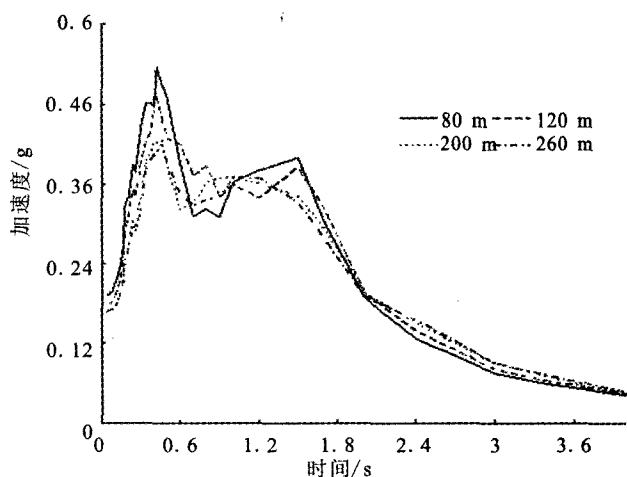
图2为在不同的假想基岩面埋深时50年各超越概率水平地表加速度反应谱。由图可知:(1)随着假想基岩面的深度的增加,场地地表加速度反应谱谱值逐渐减小;(2)不同概率水平的加速度反应谱在同一周期处的相对差异随着假想基岩面深度的增加而减小,表现出同峰值加速度相类似的特征;(3)随着假想基岩面深度的增加,长周期成份逐渐被放大且变得丰富,并且随着输入地震动强度的增加而逐渐明显。

3.2 基岩剪切波速对场地地震反应的影响

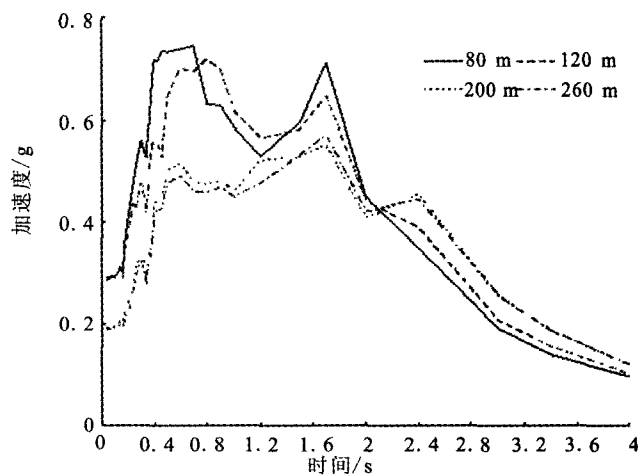
在进行场地地震反应分析时,需考虑地震波入



(a) 63%超越概率



(b) 10%超越概率



(c) 2%超越概率

图2 不同基岩埋深时50年不同超越概率的水平地表加速度反应谱

Fig. 2 The horizontal acceleration response spectra for different exceedance probability 50 years with different depths of bedrocks.

射时土层与基岩面处的入射和反射系数,因此关联

到剪切波速。为了研究剪切波速对场地地震反应的影响,仍以该钻孔为计算场点,假定基岩面为100 m处的中砂层,输入的基岩波速见表4。

表4 不同的输入基岩剪切波速

模型编号	1	2	3	4	5	6
$v_s/[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	500	900	1 500	2 000	2 500	3 000

表5为场地地震反应分析后50年各超越概率水平地表地震动峰值加速度,图3为基岩输入深度相同时不同基岩波速值的地表加速度反应谱曲线。

表5 不同计算模型场地地震反应分析结果

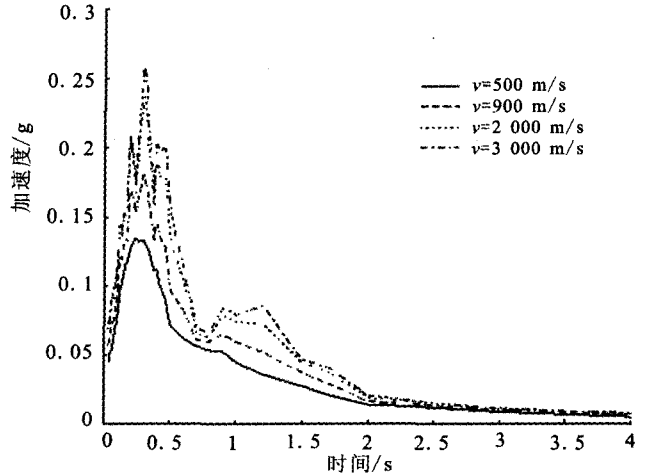
基岩剪切波速 $v_s/[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	地表峰值加速度/ $[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$			反应谱值/g		
	63%	10%	2%	63%	10%	2%
500	0.135	1.657	2.600	0.135	0.45	0.66
900	0.540	1.806	2.643	0.169	0.52	0.76
1 500	0.639	1.836	2.671	0.196	0.54	0.85
2 000	0.675	1.892	2.688	0.206	0.58	0.95
2 500	0.692	1.949	2.758	0.209	0.63	0.97
3 000	0.701	1.959	2.797	0.209	0.64	0.99

由图3和表5可知:基岩波速对地表的地震动峰值加速度和加速度反应谱的影响规律基本一致:

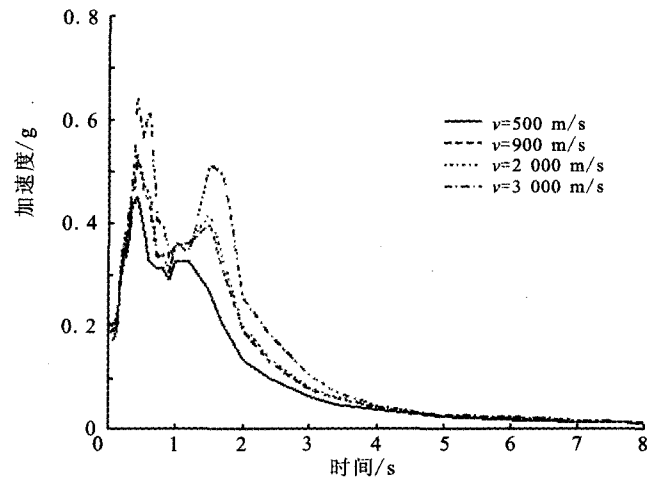
(1)随着基岩波速的增高,地表水平峰值加速度和加速度反应谱值增大,增大的幅度随着输入的地震动的强度的增大而减小;(2)基岩波速对不同超越概率水平的地震动反应影响也不相同并且呈现很大差异,50年63%超越概率水平地震动反应受基岩剪切波速影响明显,在不同的基岩波速情况下,地表地震动峰值加速度放大系数之比(最大放大倍数与最小放大倍数之比)为1.64,50年10%的为1.18;而50年2%的仅为1.08,反应谱的谱值呈现出与地震动峰值加速度相同的特征;(3)剪切波速对反应谱的谱形的影响在不同的地震动强度下并不相同,随着地震动强度的增大影响范围逐渐后移。在较弱地震动作用下(50年63%超越概率水平),对反应谱的影响集中在0.2~0.4 s;在中等强度的地震动作用(50年10%超越概率水平)下,影响集中在0.4~1.8 s;而在强震动作用下(50年2%超越概率水平)则位于0.8~3.0 s之间。因此在进行场地地震反应分析时,选择过低或过高的基岩波速将对长周期建筑物产生不利的影响,因此在选择假想基岩波速进行地震反应分析应慎重。

3.3 输入基岩地震动强度对场地地震反应分析的影响

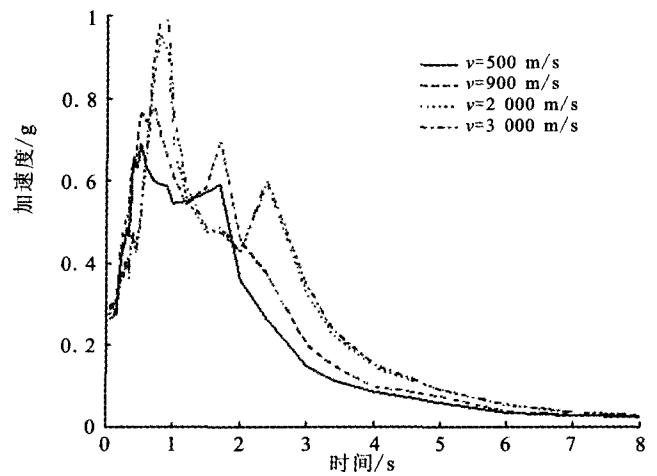
由表5可以看出:(1)在相同基岩面深度且剪切波速也相同的条件下,输入不同的地震动强度对场地地震动反应产生的影响也不同。在输入弱地震动



(a) 63%超越概率



(b) 10%超越概率



(c) 2%超越概率

图3 不同波速时50年不同超载概率下水平地表加速度反应谱

Fig. 3 The horizontal acceleration response spectra for different exceedance probability in 50 years with different input shear wave velocities.

强度(63%)的情况下,场地对加速度峰值具有放大

作用;而在强地震动作用下,场地地震反应后地表的地震动峰值加速度反而减小。这是因为在较强的地震动作用下,场地土的非线性特征明显,土的塑性变形增大,滞回阻尼增大,场地地震反应后地表的地震动强度也随之减小。(2)输入地震动强度对场地地震反应的影响在反应谱形状上的表现为:随着基岩地震动强度的增大,反应谱曲线向长周期方向移动,长周期成分变得丰富,特征周期增大。这是因为场地土呈线性变形时,刚度相对减小,卓越周期增大,基岩地震波在场地地震反应中长周期成份被放大。

4 结束语

(1)场地在深厚覆盖层条件下,随着假设基岩面深度的增加,地表地震动峰值加速度的变化变得平缓;对于反应谱的影响是长周期部分被放大。因此在太原市地震安全性评价工作中选取以剪切波速 500 m/s(约 80 m)深度土层作为地震动输入界面是

不妥的,特别是对于高层(超高层)建筑需考虑长周期的重大工程应尽可能选择较深的假想基岩面作为场地地震反应的地震动输入界面。

(2)基岩波速的增加使地表的地震动峰值加速度和加速度反应谱也增大,增加的幅度随着地震动输入强度的增加而减小,基岩剪切波速对加速度反应谱的影响范围随着输入地震动强度的增加而后移。

[参考文献]

- [1] 上海市地震局,同济大学. 上海市地震动参数区划[M]. 北京:地震出版社,2004:157-157.
- [2] 卢寿德. GB1774-2005《工程场地地震安全性评价》宣贯教材[M]. 北京:中国标准出版社,2006:99,101-102.
- [3] 陈国兴,谢君斐,张克绪. 土的动模量和阻尼比的经验估计[J]. 地震工程与工程振动,1995,15(1):80-83.