

用美国西部强震记录讨论厚覆盖土层峰值加速度的放大效应

刘 峥^{1,2}, 石树中³, 沈建文²

(1. 同济大学, 上海 200092; 2. 上海市地震局, 上海 200062; 3. 浙江省地震局, 浙江 杭州 310013)

摘要:以美国西部强震观测数据资料为基础, 分别建立基岩和厚土层上的峰值加速度衰减规律, 探讨厚土层对基岩峰值加速度的放大作用。结论为: 平均而言, 对美国西部这样的厚土层峰值加速度放大作用不大。但基岩峰值加速度越大, 厚土层放大作用越小; 震中距越远, 厚土层放大作用越大。

关键词: 深厚土层; 土层反应; 衰减规律; 峰值加速度; 强震记录

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2008)03-0245-04

Amplification of PGA on Deep Soft Sites Based on the Digital Records of Strong Motion Obtained in the Western U. S. A.

LIU Zheng^{1,2}, SHI Shu-zong³, SHEN Jian-wen²

(1. Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China;

3. Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China)

Abstract: Based on the digital records of strong motion on deep soft soil sites and bed rock sites in the western U. S. A., the attenuation laws of PGA on deep soil and bed rock are obtained respectively, and the amplifying effect of the soil is discussed. The results shows that the average amplifying effect of deep soft soil is not large. In detail the larger the PGA on bed rock is, the smaller the amplifying effect of deep soft soil is; the larger the epicentral distance is, the smaller the amplifying effect of deep soft soil is.

Key words: Deep soft sites; Soil response; Attenuation law; Peak ground acceleration; Strong motion record

0 前言

土层的地震反应对于震害有较大的影响, 故土层反应的研究历来是工程地震学的热门课题, 对厚覆盖土层的研究也逐渐受到许多研究者的重视^[1]。由于强震资料和方法的限制, 目前国内主要是通过强地面运动随机模拟或土层反应计算来进行研究。但笔者注意到, 不同的文献所得出的结论仍然有较大的差异。姜慧根据强地面运动随机模拟方法用联合方法研究了伽师—巴楚地区厚覆盖土层的场地效应, 场地地表峰值加速度放大系数大致为1.8~3.0^[2]。陈继华通过理论计算研究了上海、南京、常州等长江下游厚覆盖土层的情况, 计算结果为地表

峰值加速度放大系数在0.411~2.651^[3]。周锡元在总结场地条件对地面运动峰值加速度的影响时, 对1995年日本阪神地震许多软土上的强震观测资料整理, 得到全新世软土地层对地面运动的放大系数约为1.75。而美国在1989年Loma Prieta地震中测到的平均放大系数达2.0^[4]。

由于场地覆盖土层对基岩地震动放大作用的结论也不尽一致, 以至造成严重震害的报道很多。1967年委内瑞拉6.5级地震中, 加拉加斯市(距震中60 km)建于厚160~230 m土层上的高层建筑(14~24层)有75%受到破坏。1999年台湾集集地

收稿日期: 2007-04-17

基金项目: 浙江省重点科研社会发展项目(2005C23075)

作者简介: 刘 峥(1966-), 男, 湖南邵阳人, 在职博士生, 高级工程师, 主要从事地震工程和岩土工程工作。

震也是如此。

但仔细比较基岩和土层地表的强震记录,我们也注意到峰值加速度在土层上不放大甚至缩小的情况。如1999年10月16日发生在美国西部的 Hector Mine 7.2 级地震,在距离震中 75.4 km 的 Joshua Tree N. M. - Keys View 基岩台站记录两个水平方向分别为 85.9 cm/s^2 和 66 cm/s^2 ,而在同一方向且相距仅 2 km 的 Desert Hot Springs-Fire Station 土层台站的水平记录分别为 80.3 cm/s^2 和 65.7 cm/s^2 。说明土层对基岩地震动中地表加速度的影响是非常复杂的,研究有必要进一步深入。

对于美国西部基岩峰值加速度衰减规律,霍俊荣、俞言祥、石树中等不少学者做过研究。但在相同地震作用下用地震记录来研究沉积环境相同,性质类似的土层放大作用的不多。霍俊荣曾用大量强震记录分别建立基岩和土层的峰值加速度衰减规律^[5],并作了对比讨论。但霍俊荣的文献完成较早,且未对场地进行分类,也未说明土层厚度。近20年来美国西部又增加了很多记录数据,这为进一

步研究提供了可贵的基础资料。我们认为统计大量震例可以从平均意义上更全面地认识相同场地类型土层对基岩地震动的影响。本文基于美国西部70年代以来地震记录资料,收集了厚度大于100 m 的第四纪冲积层的地表的加速度记录,这些冲积层土层根据美国分类标准为D类场地,统计分析此类厚覆盖土层对地震动峰值加速度的放大效应问题。

1 数据基础

1.1 资料来源

资料部分来源于1996年美国出版发行的一套包括世界上27个国家和地区的强震记录的CD光盘,主要通过internet获得的美国强震观测系统组织协会(COSMOS)数据中心提供的强震记录。美国西部的大致范围为: $N105^\circ \sim 125^\circ$, $W30^\circ \sim 49^\circ$,不包括阿拉斯加和夏威夷等地区。本文选取了1971年到2005年所发生的4.3~7.5级地震共30次,目录见表1。

表1 美国西部强震记录地震目录

发震时间	地点	纬度/ $^\circ$	经度/ $^\circ$	震级/ M_s
2005-09-02	Obsidian Butte	33.160	-115.637	4.6
2005-06-16	Greater Los Angeles	34.058	-117.011	4.3
2005-06-15	Off the coast of northern California	41.328	-125.868	7.2
2005-06-12	Anza	33.533	-116.578	5.4
2005-04-16	Mettler	35.027	-119.178	4.7
2004-09-28	Parkfield	35.815	-120.374	6.0
2003-12-22	San Simeon	35.706	-121.102	6.5
2003-02-22	Big Bear City	34.310	-116.848	5.1
2001-10-31	Anza	33.508	-116.514	4.6
2001-02-10	Big Bear Lake	34.291	-116.940	4.6
2000-09-03	Yountville	38.377	-122.414	4.7
1999-10-16	Hector Mine	34.594	-116.271	7.2
1994-01-17	Northridge	34.209	-118.541	6.8
1992-06-28	Big Bear	34.201	-116.826	6.6
1992-06-28	Landers	34.201	-116.436	7.5
1991-06-28	Sierra madre	34.259	-118.001	5.4
1989-10-18	Loma prieta	37.040	-121.882	7.1
1987-11-24	Superstition hills	33.022	-115.831	6.6
1987-10-01	Whittier narrows	34.049	-118.081	5.8
1986-07-21	Chalfant valley	37.538	-118.443	6.7
1986-07-08	North palm springs	34.000	-116.611	6.0
1984-04-24	Morgan hill	37.306	-121.695	6.1
1983-05-02	Coalinga	36.233	-120.310	6.5
1981-04-26	Westmorland	33.098	-115.632	6.0
1980-01-27	Livermore	37.737	-121.740	5.8
1980-01-24	Livermore	37.855	-121.816	5.5
1979-10-15	Imperial valley	32.643	-115.308	6.9
1979-08-06	Coyote lake	37.084	-121.505	5.7
1978-08-13	Santa barbar	34.398	-119.681	5.6
1971-02-09	San Fernando	34.440	-118.410	6.5

1.2 震级的统一

基础资料中有时同一次地震提供了多种震级数据,需要进行统一。原则上矩震级 M_w (Kanamori 1977; Hanks 和 Kanamori 1979; Hanks 和 Boore, 1984) 能解决震级饱和问题,因此近年使用较多。但早年记录的地震无法确定 M_w , 故统一用它来表示有一定困难^[6]。由于面波震级 M_s 的震级饱和值较高,因此在本文中统一使用面波震级作为地震动衰减模型的统计参数。

统计中对地震记录资料中只提供 M_L 的,用公式 $M_s = 1.7M_L - 4.1$ 换算^[7];对于只提供矩震级 M_w 的记录,采用表2^[8]的对应关系换算,中间震级确定时用线性插值确定。

表2 地震面波震级与矩震级的对应关系

M_s	4.0	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	8.5
M_w	4.7	5.4	5.7	6.1	6.9	8.1	9.1

1.3 冲积厚覆盖土层剪切波速与深度的关系

土层对地震动的放大效应是一个复杂的问题,不仅与土层的厚度和波速有关,还与场地土的组合特性有关。由于土质分层情况极为复杂,且受资料的限制难以获得各个不同台站的钻孔柱状图,因此在收集利用资料时为尽量使土层场地条件相同,选取的土层台站所在场地地层全部为美国西部第四纪冲积地层,沉积厚度均大于100 m。这些场地根据美国分类标准大致为D类场地。

图1为统计意义上的美国西部D类场地100 m以内土的波速随厚度变化的情况,图中中间粗黑线为平均值^[9],图中可以看出100 m以下土的平均剪切波速已大于500 m/s。

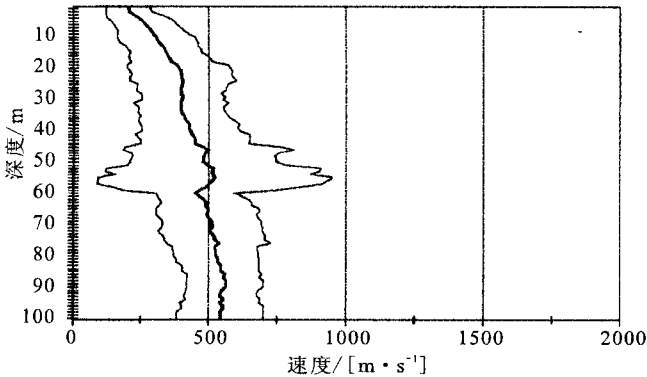


图1 美国西部覆盖土层剪切波速随深度变化曲线图
Fig.1 Variation curves of shear wave velocity with depth on soft sites in the western U. S. A. .

2 经验衰减模型的选取和统计回归

衰减关系采用霍俊荣衰减关系式^[5]:

$\lg Y = C_1 + C_2M + C_3M^2 + C_4\lg[R + C_5\exp(C_6M)]$
式中 Y 为峰值加速度或加速度反应谱(单位: cm/s^2); M 为面波震级; R 为震中距(km); C_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) 为回归系数值。该式为霍俊荣衰减关系Ⅲ型,当 $C_3 = 0$ 时,为霍俊荣衰减关系Ⅱ型。本文采用Ⅱ型。

为了消除数据分布不均匀带来的不利影响,使用震级和距离均分档加权的方案。震级按 $M = 4.0 \sim 4.4, 4.5 \sim 4.9, 5.0 \sim 5.4, 5.5 \sim 5.9, 6.0 \sim 6.4, 6.5 \sim 6.9, 7.0 \sim 7.4, 7.5 \sim 8.0$ 分档;距离按 $R = 0 \sim 10.0 \text{ km}, 10.10 \sim 30.0 \text{ km}, 30.10 \sim 60.0 \text{ km}, 60.10 \sim 100.0 \text{ km}, 100.10 \sim 300.0 \text{ km}$ 分档。在含有记录的各分档区间 $[R_i, M_i]$ 赋予等权。表3与表4分别为厚覆盖土层与基岩地震动的 M, R 分档数据。

表3 厚覆盖土层地震动中 M, R 分档数据

震级 /M	距离 R/km				
	0~10.0	10.1~30.0	30.1~60.0	60.1~100.0	100.0~300.0
4.0~4.4	0	2	0	0	0
4.5~4.9	2	12	10	12	26
5.0~5.4	0	6	40	22	34
5.5~5.9	2	20	4	0	0
6.0~6.4	8	8	24	12	10
6.5~6.9	6	22	32	6	44
7.0~7.4	0	4	8	12	36
7.5~8.0	0	0	0	2	6

表4 基岩地震动中 M, R 分档数据

震级 /M	距离 R/km				
	0~10.0	10.1~30.0	30.1~60.0	60.1~100.0	100.0~300.0
4.0~4.4	0	2	2	0	0
4.5~4.9	0	4	10	6	2
5.0~5.4	2	8	6	10	0
5.5~5.9	0	0	0	0	0
6.0~6.4	4	4	4	4	0
6.5~6.9	2	10	14	14	16
7.0~7.4	0	2	4	4	30
7.5~8.0	0	0	0	0	0

利用最小二乘回归方法进行统计,得到美国西部厚度大于100 m深的第四纪厚冲积土层及基岩水平加速度的衰减关系中的系数如表5。

3 比较与分析

表5中给出了本文利用美国西部强震记录得到的厚冲积土层与基岩水平加速度峰值的统计回归结果。图2对比了在相同衰减关系式下霍俊荣、俞言祥、石树中所做的美国西部基岩地表加速度的情况^[5,10-11]。图中可以看出,除霍俊荣在较小地震的衰

减较快外,本文的结果与俞言祥、石树中的结果相差不大,但俞言祥与石树中均未统计过土层中地表加速度的情况。图3对比了在相同衰减关系式下本文与霍俊荣土层中的地表加速度的情况。从图2、3中可以看出,不管是土层还是基岩霍俊荣的衰减在小震都较快,由于霍俊荣用的资料较早,且存在土层不分类与厚度等缺点,因此本文在相同地震条件下对基岩与厚冲积土层的统计对比更趋合理。

表5 厚冲积土层与基岩水平加速度衰减关系系数

系数	C_1	C_2	C_4	C_5	C_6	ε
深厚冲积土层	1.941	0.389	-1.450	0.95	0.431	0.237
基岩	1.719	0.486	-1.671	0.95	0.431	0.243

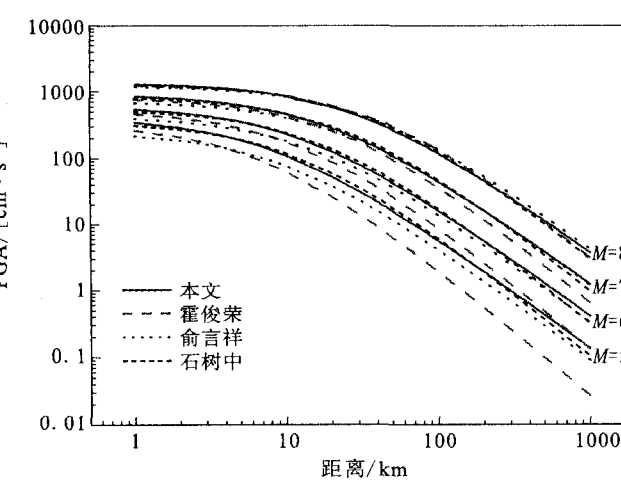


图2 不同研究者的美国西部基岩水平峰值加速度衰减曲线对比图

Fig.2 Comparison of attenuation curves of PGA on bed rock sites in the western U. S. A. from different reserachers.

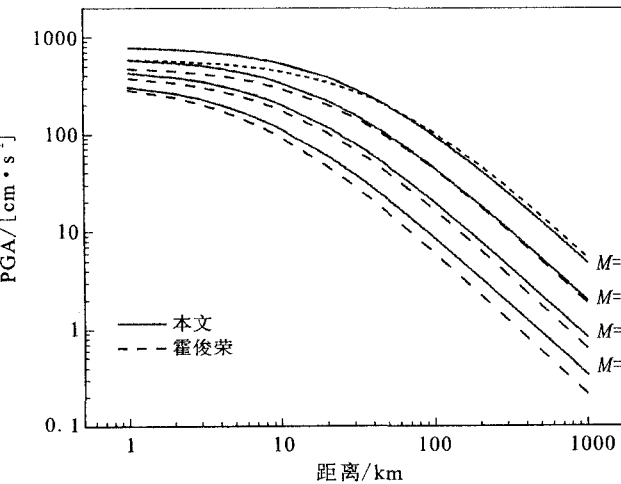


图3 不同研究者的美国西部土层水平峰值加速度衰减曲线对比图

Fig.3 Comparison of attenuation curves of PGA on deep soft sites in the western U. S. A. from different reserachers.

为认识厚覆盖土层峰值加速度的放大效应,图4绘出了本文中美国西部厚覆盖土层与基岩地表峰值加速度衰减曲线,从图4衰减曲线中可以看出,厚覆盖土层的放大效应随震级与距离的组合而发生变化,表6给出了不同震级在50 km、100 km、200 km、300 km处的放大倍数。

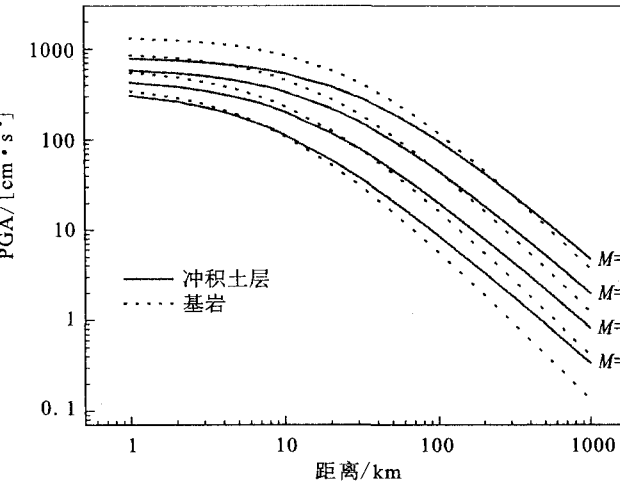


图4 美国西部厚覆盖土层与基岩地表峰值加速度衰减曲线

Fig.4 Attenuation curves of PGA on deep soft soil and bed rock sites in the western U. S. A. .

表6 厚覆盖土层随震级和距离的放大倍数

距离/km	放大倍数			
	$M=5$	$M=6$	$M=7$	$M=8$
50	1.34	1.09	0.89	0.74
100	1.54	1.24	1.00	0.82
200	1.78	1.43	1.15	0.93
300	1.94	1.55	1.25	1.01

4 结论

通过对美国西部强震记录的统计和分析,研究了该地区第四纪冲积土层厚度大于100 m的D类场地地表地震动放大效应的一般规律。结果表明:从总体上说美国西部厚冲积土层对峰值加速度放大作用不大,且:

(1) 对较小地震动,土层加速度峰值具有明显的放大作用,随着基岩地震动的加强,放大倍数逐渐减小。

(2) 土层的放大作用同时随震中距的远近而变化。在地震波能到达的范围内,距离近,放大作用小或不放大;距离远,放大作用增强。

(下转 254 页)

- [2] 王恭先,徐峻岭,刘光代. 滑坡学与滑坡防治技术[M]. 北京: 中国铁道出版社,2004.
- [3] 刘惠军,孙冠平,刘小伟. 天池滑坡坝在地震作用下稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(Supp. 2):2809-2812.
- [4] 夏正楷,杨晓燕,叶茂林. 青海喇家遗址史前灾难事件[J]. 科学通报,2003,48(11):1200-1204.
- [5] 孙广忠,张文彬. 一种常见的岩体结构-板裂结构及其力学模型[A]//中国科学院地质研究所编. 工程地质研究文集(二)[G]. 1985:275-282.
- [6] 李吉均,方小敏,马海洲. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J]. 中国科学,1996,26(4):316-322.
- [7] Panizza M. Geomorphology and seismic risk[J]. Earth - Science Review,1991,31(1):11-20.
- [8] Jibson R W, Harp E L. Landslides triggered by the Northridge earthquake[J]. Earthquakes & Volcanoes, 1991, 25(1): 31-35.
- [9] 卢育霞. 宁夏西吉县境地震滑坡的地貌特征及其减灾开发对策探讨[J]. 西北地震学报,2007,29(1):79-83.
- [10] 李元池. 地震与滑坡的关系及地震滑坡预测的探讨[A]//滑坡文集(第二集)[G]. 北京:人民铁道出版社,1979:127-132.
- [11] Keefer D K. Landslides caused by earthquakes[J]. Geo. Soc. America Bulletin. 1984, 95: 406-421.

(上接 248 页)

本文探讨了美国西部第四纪冲积土中覆盖土层厚度大于 100 m 的 D 类场地的地表地震反应的一般情况。由于地震安全性评价中的基岩面一致概率谱依据的是“基岩”场地强震记录建立的衰减规律,故与立体台阵资料得到的土层放大效应或理论分析的结果相比,直接比较“基岩面”和地表强震记录的结果不确定性最小,最接近安评中的实际情况。在我国,对于象上海、温州等具有厚覆盖土层的地区,厚土层对地震动的影响是人们普遍关注的课题,故本研究结果将有助于认识这些地区安评中厚土层地表峰值加速度的放大作用。

[参考文献]

- [1] 徐永林. 软土覆盖层地震面波的地震动反应及台湾 8 级地震对上海高层建筑影响估计[J]. 西北地震学报,2004,26(4):309-314.
- [2] 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.
- [3] 陈继华. 新近沉积土动力性能及深软场地地震效应研究[D]. 南京:南京工业大学,2004.
- [4] 周锡元. 场地条件对地面运动峰值加速度的影响[A]//房屋建筑抗震设计[G]. 北京:地震出版社,2005:365-377.
- [5] 霍俊荣. 近场强地面运动衰减关系规律的研究[D]. 哈尔滨:国家地震局工程力学研究所,1989.
- [6] 钟羽云,朱新运,张震峰. 不同类型地震的地震矩-震级标度关系研究[J]. 西北地震学报,2004,26(1):57-61.
- [7] 国家地震局震害防御司. 地震工作手册[M]. 北京:地震出版社,1990.
- [8] 陈培善,白彤霞. 震源参数之间的定量关系[J]. 地震学报,1991,13(4):401-411.
- [9] C J Wills, M Petersen, W A Bryant, et al.. A Site-Conditions Map for California Based on Geology and Shear-Wave Velocity[J]. Bulletin of the Seismological Society of America,2000,90(6B):187-208.
- [10] 石树中. 上海及邻近地区地震动衰减关系研究[D]. 上海:同济大学,2004.
- [11] 俞言祥. 长周期地震动衰减关系研究[D]. 北京:中国地震局地球物理研究所,2002.
- [12] POTAPOV V A, CHERNOV E A. Strong Seismic Effects on Systems of "Ground-building" in the Presence of Softened Grounds[J]. 西北地震学报,2005,27(1):30-34.