

黄土地区场地的地震地面运动参数特征^{*}

石玉成 蔡红卫 孙崇绍

(中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 结合近年来中国西部黄土地区城市或厂矿企业地震小区划和岩土地震工程的最新研究成果, 归纳分析了黄土的波速特征和非线性特征, 结合实例阐述了影响黄土地区地震地面运动参数的主要因素。

主题词 黄土 地面运动 峰值加速度 加速度反应谱

中国图书分类号 P642.13; P315.3

1 前言

实际震害分布表明, 场地覆盖土层、地形地貌或地下复杂的地质结构对地震动有十分重要的影响。它所引起地震动差别可以造成不同场地上建筑物震害的差异。地震地面运动参数研究就是在地震危险性分析的基础上, 分析和估计场地特性对地震动的影响, 预测在一定基岩地震动下不同场地地震地面运动的强度和特征, 为工程抗震设计提供合理的地震输入。

中国黄土地区地域辽阔, 跨陕、甘、宁、青、蒙、豫、晋等省(区), 自然条件复杂, 区域性变化明显。黄土特殊的物质来源、沉降方式和堆积环境决定了其在地形地貌、地质结构、厚度、物质组成和物理力学性质等方面具有地区性差异。另一方面, 不同时代和不同成因黄土的工程特性也有显著区别, 这在客观上决定了黄土地区具有独特的地震地面运动规律。

为了提高城市 and 大型厂矿企业的综合抗震能力, 近年来不少城市(西安、宝鸡、天水、兰州、西宁、太原)进行了以减轻地震灾害为目标的地震小区划工作。从而, 大大促进了我们对黄土地区地震地面运动特性的了解。

2 黄土覆盖层特点

黄土覆盖地区场地的特点取决于黄土分布的区域特征和局部地形条件。按照场地分析的要求, 从黄土分布的区域特征看, 大体可分为 3 个区域: (1) 西部地区——位于乌鞘岭与六盘山之间。该区黄土下伏的地层主要是第三纪的甘肃群, 区内因地层抬升构成若干山系, 黄土分布在山间盆地、山地斜坡及高阶地上。该区主要是新黄土沉积覆盖区, 较薄的老黄土埋藏于新黄土之下; (2) 中部地区——位于六盘山与吕梁山之间。黄土在该区形成连续盖层, 填平了多数原始河谷和盆地。仅在少数深切河谷底部见有基岩出露, 一些地区黄土深逾百米, 地层完整。塬区不同时期黄土平行接触, 古土壤与黄土交替叠覆; (3) 东部地区——位于吕梁山与太行山

收稿日期: 1998-02-12

^{*} 地震科学联合基金资助课题(批准号: 196133)。

第一作者简介: 石玉成, 男, 1966 年 11 月生, 副研究员, 现主要从事工程地震和黄土地震灾害研究工作。

之间. 该区山地和盆地地形对照明显, 黄土覆盖于盆地边缘及河流阶地之上, 有的盆地间的分水岭也披覆有薄层黄土, 下伏上新世地层.

局部地形条件对黄土覆盖层厚度影响很大, 河谷阶地、黄土塬及黄土梁、峁是黄土地区 3 种主要的地貌类型, 它们对黄土覆盖层的厚度起控制作用. 因此, 黄土地区强震地面运动特征既受区域性条件的控制, 又受局部地形和场地条件的制约, 出现了极其复杂多样的地震动参数分布特征.

3 黄土的动力学特性

黄土的动力特性是影响黄土场地地震地面运动参数的重要因素之一. 土的动力特性包括动荷载作用下的本构关系, 诸如应力-应变性能、波速、模量和阻尼随应变而变化的各种非线性特征等.

3.1 波速特征

尽管西部黄土层的成因类型基本相同, 但由于西部各地区黄土层的沉积环境不同, 其波速值差异较大. 至于不同时代黄土的波速, 则更有明显的差异. 自 80 年代以来, 中国地震局兰州地震研究所在从事西北地区城市和厂矿企业地震小区划工作中, 积累了大量的实测波速资料. 同一类土的波速大都随深度增加, 波速(尤其是剪切波速)与土质、深度的统计关系对地震地面运动规律具有重要意义. 我们选取了一些典型的有代表性的地区的实测资料, 进行归纳和总结, 其统计结果列于表 1.

表 1 各地区黄土的剪切波速特征

编号	地区	黄 土 种 类	波速 /[m° s ⁻¹]	平均值 /[m° s ⁻¹]	回归统计公式	相关 系数	统计深度 / m	抽样数
1	西宁	黄土状土(Q ₄)	123 ~ 350	223	$V_s = 134.6H^{0.264}$	0.815	1.00 ~ 18.00	106
2	兰州	黄土(Q ₃)	150 ~ 340	264	$V_s = 101 + 14H$	0.964	5 ~ 20	18
		黄土状土(Q ₄)	100 ~ 300	180	$V_s = 73 + 21H$	0.874	1 ~ 12	54
3	宝鸡	黄土(Q ₃)	124 ~ 453	280	$V_s = 145.6 + 16.8H$	0.803	1 ~ 20	21
		黄土状亚粘土(Q ₄)	160 ~ 380	265	$V_s = 187.3 + 10.7H$	0.456	2.2 ~ 15.1	22
4	天水	黄土(Q ₃)	150 ~ 390	250	$V_s = 140 + 16H$	0.904	1.0 ~ 14.3	22
		黄土状亚粘土(Q ₄)	110 ~ 340	119	$V_s = 146 + 6H$	0.836	1.2 ~ 31.5	57
5	西安	黄土状土(Q ₄)	132 ~ 365	206	$V_s = 146.3H^{0.198}$	0.57	0.9 ~ 13.0	19
		黄土状土(Q ₃)	115 ~ 470	278	$V_s = 141.2H^{0.28}$	0.76	1.6 ~ 40.0	215
		黄土状土(Q ₂)	279 ~ 484	364	$V_s = 152.4H^{0.243}$	0.64	17.0 ~ 77.3	36
		古土壤(Q ₃ , Q ₂)	215 ~ 454	329	$V_s = 188.7H^{0.198}$	0.46	3.8 ~ 41.0	77
6	太原	黄土状土(包括亚粘土、轻亚粘土)	126 ~ 555	295	$V_s = 163.0H^{0.213}$	0.74	5.4 ~ 38	28

3.2 黄土的非线性特征

土的非线性特征是影响土层动力反应的一个重要因素. 黄土属粘性土类, 其应力-应变关系具有非线性特征. 加之黄土具有大孔隙结构特征, 因而其动力特性也较为特殊. 总体看来, 影响黄土的模量和阻尼比的因素很多, 从黄土本身来说, 有颗粒大小和形状、结构状况、密实程度和饱和度等; 从外部条件看有固结压力、应变幅值、加荷频率、振动次数和测试方法等^[1]. 近十几年来, 我们在黄土地区的兰州、天水、西安、宝鸡、西宁等城市进行的地震小区划工作中, 开展了大量的土动力学试验, 现将其部分成果即剪模比 (G/G_0) 与剪应变 (γ) 及阻尼比 (λ) 与剪应变 (γ) 关系曲线列于图 1 中.

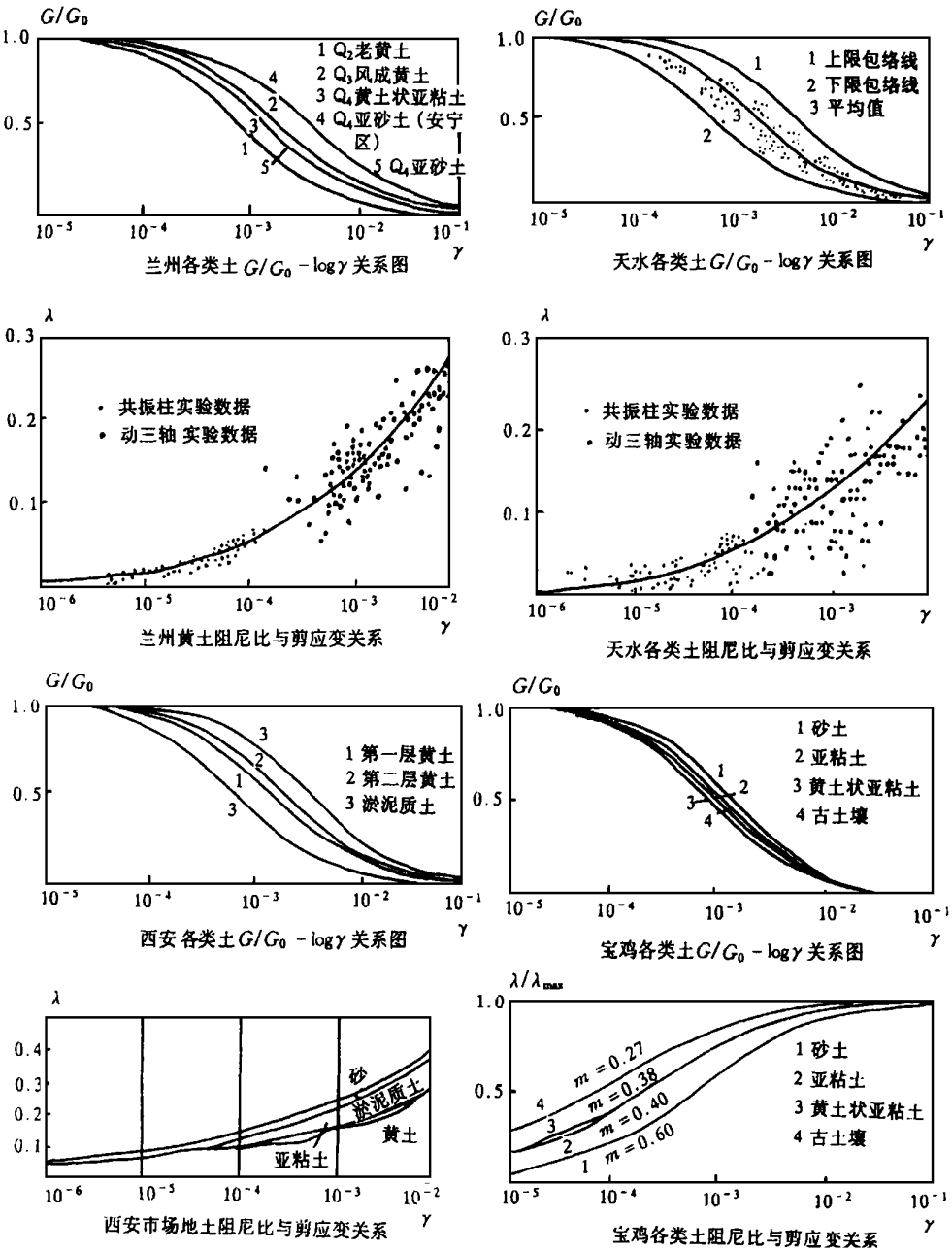


图 1 几个大、中城市黄土的非线性特征

Fig. 1 Dynamic properties of loess in some cities.

4 黄土地区地面运动参数的主要影响因素

黄土地区的地面运动参数特点服从于地震地面运动的总体规律, 即影响场地地震动参数的基本因素仍然是震源机制、传播路径、场地条件等诸多方面的因素. 其中, 震源机制因素对地震动参数的影响与非黄土地区差别不大, 但土层厚度与局部地形条件在黄土地区所起的作用要大得多.

4.1 土层厚度的影响

表 2 为黄土地区部分场地地震动参数分析计算结果, 它在一定程度上反映了不同覆盖层厚度对地面运动参数的影响规律, 即土层愈厚, 长周期分量愈多, 峰值加速度呈递增趋势. 超过一定厚度, 土层越厚, 峰值加速度的递增越缓慢, 在某些情况下也可能降低. 在黄土地区, 土层的厚度和其所在的地貌单元及其部位关系密切. 故反应谱的形状在区域上首先受地貌的控制, 地貌界线一般来说也是反应谱形状分区的天然界线, 特别是那些高差悬殊, 土层结构差异颇大的地貌界线, 必定是反应谱类型的分界线. 以天水市为例, 该市总体上处于剥蚀堆积区, 市区内发育有河谷堆积地貌和两侧山坡 2 个大的区域, 场地地震反应谱分析结果表明, 随着阶地的增高, 土层厚度增加, 尽管地面运动的峰值加速度 (PGA) 的增加幅度不大, 但反应谱周期明显向长周期方向移动, 反应谱类型分区与地貌分区基本吻合 (图 2).

表 2 黄土地区土层厚度对地面运动参数的影响

序号	地貌单元	黄土覆盖层 厚度/ m	输入地震动参数		输出地震动参数			
			PGA / g	T_g / s	PGA / g	T_g / s		
1	I 级阶地(Q_4^2)	1~3.0	0.070	0.1~0.3	0.130	0.1~0.2		
	II 级阶地(Q_4^1)	2~10.0			0.180	0.2~0.3		
	III级阶地(Q_3^3)	15~20.0			0.200	大于 0.3		
	IV级阶地(Q_3^1)	大于 80			0.250	0.5		
	河漫滩(Q_4^3)	小于 2.0			0.165~0.260	0.15~0.20		
2	I 级阶地(Q_4^{2+1})	2~20.0	0.135	0.2			0.170~0.280	0.275~0.40
	II 级阶地(Q_4^1)	8~20.0						
	III级阶地(Q_3^3)	大于 20						
	IV级阶地(Q_3^3)	大于 50						
	VI级阶地(Q_2^1)	大于 250						
3	河漫滩(Q_4^{2+1})	小于 4.0	0.225	0.2	0.240~0.360	0.20~0.35		
	I 级阶地(Q_4^{2+1})	4.0~7.0						
	II 级阶地(Q_4^1)	18~25.0						
	III级阶地(Q_3 - Q_2^1)	大于 25						
	河漫滩(Q_4^{2+1})	小于 4						
4	I 级阶地(Q_4^1)	5~16	0.075	0.38	0.100~0.125	0.40~0.50		
	II 级阶地(Q_3^3)	15~35			0.125~0.200	0.50~0.55		
	III级阶地(Q_3^3)	35			0.175~0.220	大于 0.65		
	IV级阶地(Q_2^1)	大于 40						
	河漫滩(Q_4^3)	2~6			0.206~0.332	0.25~0.35		
5	I 级阶地(Q_4^1)	6~11	0.14~0.18	0.25~0.45			0.176~0.360	0.32~0.55
	II 级阶地(Q_3^3)	13~25						
	III级阶地(Q_3^3)	38~50						
	黄土塬(Q_3 - Q_2)	36~80						
					0.219~0.378	0.55~0.60		
					0.210~0.390	0.55~0.65		

不同超越概率水平下的反应谱形状的差异程度除了与基岩输入波有关外, 黄土的覆盖层厚度和黄土的非线性特征也是一个重要的影响因素. 一般来说, 由厚层土构成的场地土层对反应谱形状的影响大于输入波自身的影响, 所以厚度大而土质相对较软的黄土场地上, 随输入地震动的加强, 反应谱峰值向长周期方向移动. 反之, 若覆盖层相对较薄则反应谱受输入波的影响明显.

同一地貌单元上, 有时峰值加速度的离散程度远大于反应谱形状的离散程度, 这主要与土

层结构和场地土层刚度的局部变化有关.

4.2 局部地形的影响

黄土地区地形比较复杂, 斜坡发育, 孤突地形和高陡斜坡的上部边缘部位(即塬边和高阶地前缘)对震害的加重影响十分明显, 这已为国内外黄土地区大量的宏观震害经验所证实, 同时大量的理论研究也证实了这些结论.

黄土地区局部地形对震害的影响不仅与地形的高度、宽度、长度、坡度等几何形态有关, 而且与构成该地形的岩土条件有关. 对于相似的几何形态(绝对高差及高宽比等)的地形, 如果构成地形的岩土性质愈松软, 则其对震害的不利影响也就愈严重. 由于黄土是一种比较松软的土类, 震害经验表明, 在黄土地区局部地形对震害的不利影响, 一般要比非黄土地区更为严重.

实例 1:

兰州市区系典型的大河谷地形, 南北方向地形起伏明显, 东西向狭长, 市区在临近南北两山的地带受地形起伏的影响较大, 黄土斜坡大多是高阶地的前缘. 采用二维模型进行的计算表明, 当斜坡高差超过 30 m 时, 坡上下强震地面运动峰值加速度相差 1.4 ~ 1.9 倍(表 3)^[2]. 同时, 由于斜坡上下土层的厚度和结构往往相差悬殊, 反应谱的形状也有较大的差异.

实例 2:

宝鸡市位于渭河河谷, 地形复杂. 其南北两侧的黄土塬, 由于冲沟切割, 常形成孤突的黄土梁地貌, 其中最为典型的有市区南面黄鹿塬和市区内的金台观 2 处. 历史地震分布表明, 这 2 处都是局部的高烈度异常区, 黄鹿塬三面为冲沟环绕, 只有其后面与更高的完整的黄土塬相连, 形成一个孤突的黄土梁, 其地形相对高差 120 余米, 梁顶面最窄处宽不足 100 m, 最宽处也只有 200 m, 山梁长约 1.5 km. 1920 年黄鹿塬附近曾发生过一次 5 ¼ 级地震, 塬上的震害达 VII 度强, 房屋倒塌达 30%, 比其塬下的较平坦的场地震害高出约 II 度多. 与黄鹿塬紧紧相连的冯家塬, 其相对高差也在 120 m 以上, 同样为三面冲沟切割, 但塬面比黄鹿塬开阔得多, 其烈度比黄鹿塬低 I 度多, 仅为 VI 度左右. 而冯家塬脚下的二队, 这次地震时仅强烈有感, 房屋没有破坏, 烈度约为 V 度^②. 用双面剪切变形的有限元模型进行计算, 结果表明(图 3), 黄鹿塬对地震地面运动的放大作用是十分明显的, 其顶部的地面峰值加速度要比其下

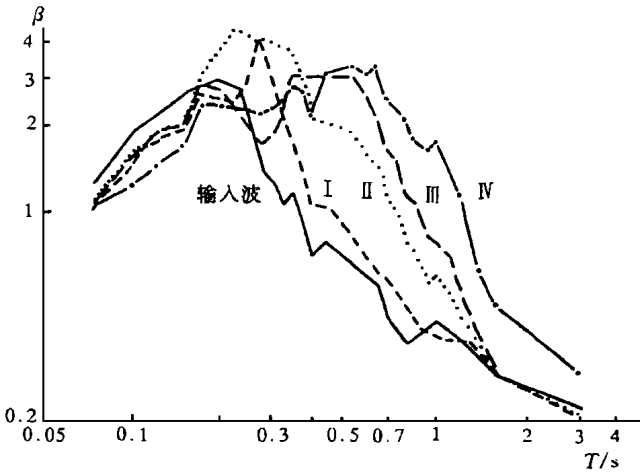


图 2 天水市各小区加速度反应谱(β 谱)^①
Fig. 2 Acceleration response spectra for each district of Tianshui city.

表 3 斜坡上下方峰值加速度比值

地点	比高 / m	峰值加速度放大系数	
		63.5 %	2 %
柳沟大坪	100	1.38	1.31
西大坪	50	1.86	1.23
东大坪	35	2.19	1.89
五星坪	75	1.51	1.40
桃树坪	65	1.7	1.50
古城坪	25	1.6	1.30

① 参见: 中国地震局兰州地震研究所. 天水市地震危险性分析与地震小区划. 1987.

② 参见: 中国地震局兰州地震研究所. 宝鸡市地震小区划. 1986.

(4)

- 1 , . , 1997, 19(); 144 ~ 150.
- 2 Sun Chongshao, Cai Hongwei, Shi Yucheng. The Characteristics of ground motion during strong earthquake in Lanzhou. Proc 7
International Cong. IAEG, Lisbon. 1994. 1971 ~ 1978.

CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE GROUND MOTION PARAMETERS IN LOESS AREAS

SHI Yucheng CAI Hongwei SUN Chongshao
(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000)

Abstract

In accordance with the achievements of seismic microzonation and earthquake geotechnical engineering of cities or important engineering sites in loess areas of western China, the characteristics of wave velocity and nonlinearity of loess are summed up. In connection with the typical instance, the factors influencing on ground motion parameters for loess areas are discussed.

Key words Loess, Ground motion, Peak ground acceleration, Acceleration response spectrum