

西北黄土地区河谷城市地震动参数小区划研究 ——以兰州为例

孙崇绍

(中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:以兰州为例研究了中国西北黄土地区河谷城市的地震动参数小区划特征, 论证了选择输入地震动的重要性以及地震动参数分区和当地场地特征、土层分类以及地貌分区的关系。根据兰州市区的场地条件和大量的计算结果将市区划分为三个小区, 给出了各小区的设计地震动参数, 编制出设计地震动参数小区划图。

关键词:黄土; 黄河河谷城市; 兰州; 地震小区划

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2007)01-0003-09

Study on the Ground Motion Parameter Microzoning for Cities in the Yellow River Valley——Taking Lanzhou as An Example

SUN Chong-shao

(Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Taking Lanzhou city as an example, the characteristics of ground motion parameter microzoning in cities which are located in the yellow river valley in northwestern China are studied. The importance of input data for calculating the parameter during strong earthquakes is demonstrated, the relationships between the ground motion parameter microzoning and the local site conditions, the essences of soil layers, the geomorphological condition are analysed. According to the site conditions and calculating results the urban part of Lanzhou city is divided into 3 regions, and the parameters of each region for aseismic design are also illustrated.

Key words: Loess; Cities in valley of yellow river; Lanzhou; Seismic microzonation

0 前言

中国西北黄土地区山峦起伏, 地形崎岖。中心城市多位于大河谷地, 其市区大都沿河谷展布, 老市区分布在平坦的河谷低阶地上, 沿河谷呈长条形。随着城市规模的不断扩大, 市区往往向高阶地和河漫滩方向发展, “向山要地向河要地”, 一直扩展到毗邻的高陡山区。扩展的结果使得城市的场地条件发生了变化, 除了老市区由于地形条件以及多年人类活动的结果自身形成了较复杂的场地条件而外, 新扩展的建设区与老市区相比处于不同的地貌单元上, 使得这些城市的建设场地在整体上的分区更加

复杂, 在地震时各小区的地震动参数将有显著的差异。比较典型的这类城市见表1所示。

表1 西北黄土地区的主要河谷城市

城市	临近河流	河谷宽度/km	市区所处地貌单元
兰州	黄河	6~8	漫滩及 T _I 、T _{II} 为主, T _{IV} 为新区
天水	藉河、渭河	2~3(秦城), 4~5(北道)	T _I 、T _{II} 为主
西宁	湟水	3~5	T _I 、T _{II} 为主
宝鸡	渭河	5~6	漫滩, T _I ~T _{III}
平凉	泾河	3~4	T _I 、T _{II} 为主
靖远	黄河	4~5	T _I 为主

上述各城市的共同特点是: 场地特性以及地震动参数与所在的地貌单元有密切的依存关系, 不同

收稿日期: 2006-05-12

中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC20070014

作者简介: 孙崇绍(1936-), 男(汉族), 山东济宁人, 研究员, 主要从事工程地震、地震动参数研究。

地貌单元上的场地特点和地震动参数有明显的差别;在地貌突变、地形陡峭的地段,除一些常见的与抗震不利的地质因素,如滑坡、崩塌、泥石流等而外,强震地震动参数也有较大的变化,这是城市规划和建筑场地的选择上不可忽视的问题。

为提高城市的防震减灾能力,做好地震小区划是一个很重要的问题。本文以兰州市为例研究这类城市地震动参数小区划的特点与其中所遇到的问题,本文不涉及场地地震灾害的区划。

兰州市地处青藏高原东北边缘、黄土高原的西部,临近我国的南北地震带。城区坐落在相对开阔的黄河谷地之中,在表 1 列出的各城市中,兰州市区的河谷宽度最大。随着城市建设的迅速发展,近年来逐渐向两侧的高阶地发展,使得市区的场地条件变得复杂起来。早在上世纪的 70 年代后期兰州市就开始了市区地震小区划的研究工作,编制了相应的地震小区划分区图^[1]。稍后,随着研究工作的不断深入及抗震设计要求的变化,小区划的结果不断得到改善更新^[2],可以说是西北地区大城市中对地震小区划研究得最深的城市之一。尽管上世纪 90 年代已就市区地震小区划的结果已经专家评审通过,用于城市的总体规划,但随着城市建设的迅速发展,随着对周围地震地质背景以及市区地质构造研究的不断深入,对市区地震危险性、各小区地震动参数需要在新的基础上进一步的研究。

近年来,国家相继颁布了《中国地震动参数区划图》(GB18306—2001)、《工程场地地震安全性评价》(GB17741—2005)以及修订后的《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001),使得地震安全性评价能在新的标准和要求之下进行。本文就是在这些有关的法规和要求指导下,对兰州市地震动参数小区划所作的研究。

1 兰州市周围的地震地质背景及基岩地震动参数

对兰州市区周围的地震地质背景前人已作了深入的研究^[3-6]。在地震动参数的计算中,最重要的环节是弄清本地区的地震背景,确定基岩地震动参数。兰州市区自上世纪 60 年代开始架设强震台以来,历时 40 余年未曾遭受过破坏性地震的袭击,周围地区也没有取得合适的强震纪录。1976 年 8 月 26 日四川松潘、平武间发生了两次 7.2 级地震,在我省南部的文县成功取得了该地震的良好记录^[7],成为距离本市最近的强震纪录。过去在进行市区地震小区划

时,也曾使用过该强震记录作为计算地震动参数的输入。但由于各种条件的巨大差异,那次地震的纪录不适用于兰州市区,而且其他地区获得的强震纪录也不能不作修正直接用于本地。图 1 中列出了若干强震记录及本地拟合的人造地震动的加速度反应谱,同时也列出了根据《中国地震动参数区划图》和《建筑抗震设计规范》确定的兰州地区的标准谱。上世纪 90 年代在研究兰州市的地震动参数时,曾使用过多条天然或人工拟合的地震动输入,如文县波、Taft 波、El Centro 波等,这些地震动时程的频谱成分相差极大(图 1)。为了比较这些地震波的差异,选择了八个不同的场地,场地土层的厚度依次增大,输入了不同的地震动时程。计算的局部结果列入表 2、表 3,加速度反应谱绘入图 2。可以看到用不同地震动时程求得地震动参数的巨大差异。不仅是文县波,其他任何强震记录也不能不加选择或不作修正直接用于本地,外地的人工拟合波更不能随意用于本地的小区划或建筑物的抗震设计上。

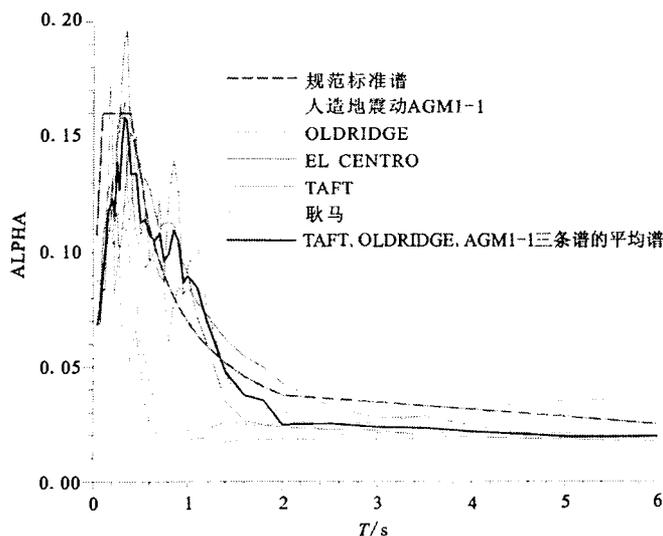


图 1 兰州市人造地震动和若干天然强震记录反应谱的比较(据孙家骥、孙崇绍^①)

Fig. 1 Response spectra of some accelerograms and art acceleration time histories in Lanzhou.

进一步的比较分析(表 2、3,图 2)不难看到:(1)地面峰值加速度相对比较随机,随着计算土层厚度的增大有上升的趋势,但这一趋势又不太明显,当土层的厚度在 30 m 以上时,反而有下降的趋势^[8-9]。其中 Taft 和 Cast Old Ridge 波输入的计算结果较之兰州地震安全性评价的计算结果略低,而 El Centro 波得到的峰值加速度高出较多,而且峰值加速度

① 孙家骥,孙崇绍. 浅探建筑工程时程分析中地震波选用(手稿,私人通信).

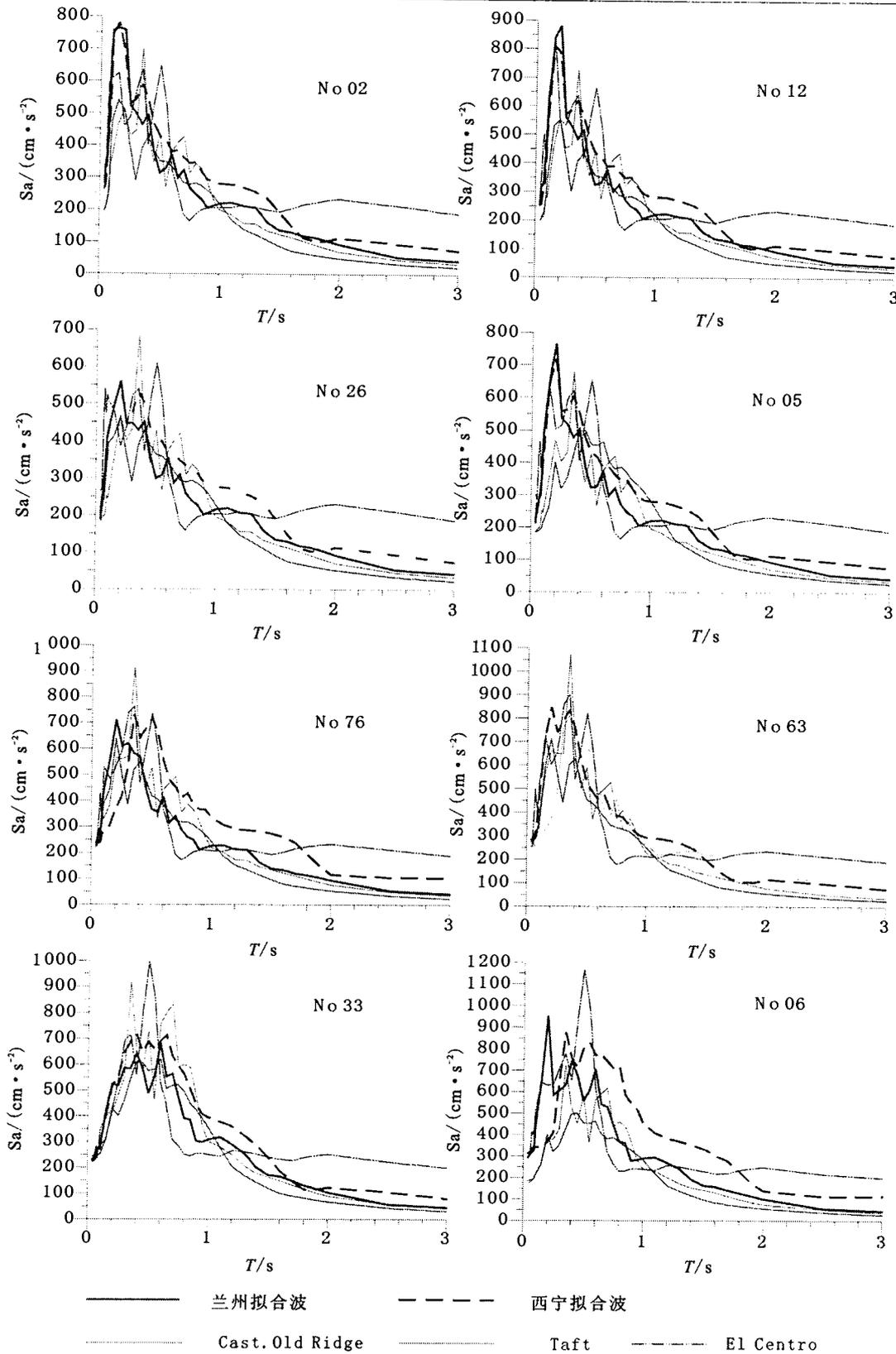


图 2 不同输入波计算得到的加速度反应谱

Fig. 2 Calculated response acceleration spectra from different inputing histories.

都出现在高频段并有一定的偶然性,仅以此结果比较尚不能充分说明输入波的差异。(2)不论用那种

波作为输入,计算得到的反应谱的长周期分量随着土层厚度的增大都依次增大,说明了场地土层的影响

响。但是频谱成分的差别更为显著,有的(如西宁波、El Centro 波)输入计算结果差别相当大,特别在长周期部分,这和输入波的频谱成分有直接的关系,

其中频谱成分与本地安全性评价较为接近的是 Cast. Old Ridge 波和 Taft 波,El Centro、文县、耿马等波相差太大不适于在兰州地区应用。

表 2 不同地震动输入计算得到的地面峰值加速度

点号	输入地震动/[cm·s ⁻²]					计算土层 厚度/m	黄土层 厚度/m	备注
	兰州拟合波	西宁拟合波	Cast. OldRidge	Taft	El Centro			
2	270.7	258.3	195.8	203.8	269.5	10.0	2.5	黄河 I 级阶地
12	246.1	247.4	201.4	200.3	331.0	10.0	5.0	高漫滩
26	189.2	201.5	198.4	94.8	266.0	18.0	4.7	I 级阶地
5	209.4	225.0	183.6	183.7	300.8	20.0	12.0	II 级阶地
76	223.1	235.4	222.5	242.4	246.3	25.0	9.0	II 级阶地
63	248.9	261.8	254.6	263.9	274.5	28.0	8.0	III 级阶地
33	232.7	225.4	222.5	229.1	243.4	46.0	21.0	III 级阶地
6	286.9	311.9	184.4	175.0	312.2	49.6	49.6	III 级阶地(后缘)

表 3 不同地震动输入计算得到的加速度反应谱峰值及峰点对应的周期

点号	兰州拟合波		西宁拟合波		Cast. OldRidge		Taft		El Centro	
	峰值	周期	峰值	周期	峰值	周期	峰值	周期	峰值	周期
	/[cm·s ⁻²]	/s	/[cm·s ⁻²]	/s	/[cm·s ⁻²]	/s	/[cm·s ⁻²]	/s	/[cm·s ⁻²]	/s
2	661.5	0.20	780.9	0.15	540.1	0.15	700.8	0.35	647.4	0.50
12	704.7	0.20	810.8	0.15	553.3	0.20	724.5	0.35	664.7	0.50
26	476.9	0.20	535.5	0.20, 0.35	464.6	0.20	691.7	0.35	610.4	0.50
5	582.6	0.20	717.8	0.20	485.2	0.20	683.4	0.35	655.0	0.50
76	505.9	0.20	719.0	0.50	637.7	0.20	916.8	0.35	737.0	0.30, 0.50
63	555.3	0.20	848.7	0.20	712.2	0.20	1072.4	0.35	900.6	0.35
33	480.3	0.60	717.0	0.40	610.4	0.40	919.0	0.35	998.7	0.50
6	514.9	0.40	878.0	0.35	499.7	0.45	726.7	0.35	1166.0	0.50
	510.0	0.60	829.9	0.55						

以上的比较说明,对任何一个地区,输入地震动的选择都应极慎重。在缺乏本地的强震记录的情况下,最好是用分析和推理的方法,即以本地的地震危险性计算结果并参照《中国地震动参数区划图》上所给出的数据为准,这种计算和分析首先应该建立在充分研究区域地震构造、区域地震活动特点上。在缺乏强震记录的地区,可以在地震危险性分析计算的基础上拟合得到人造地震动,作为输入的依据^[10]。但是地震的随机性较大,地震的发震机制和地点不可能预报准确,特别是地震动的衰减规律对目标谱的影响极大。不少研究者指出,一致性衰减规律不能直接用于反应谱的衰减上^[11]。在进行地震小区划时,应该用多条人造地震动时程以及合适的强震记录输入,以防止地震的随机性造成的影响,这在目前有时也不易做到。基于以上情况,我们以地震安全性评价的结果为准,根据兰州市区若干重大工程地震安全性评价结果,拟合得到了本地的基岩地震动时程^②,作为计算场地地震动参数的依据。本文以 13 处地震危险性分析计算的基岩场地的峰值加速度结果作为输入的依据,使拟合得到的人造地震动满足最基本的要求。

兰州市区的地震危险性分析计算结果表明,影响市区的强震震源都分布在近处,主要的几条活动断裂分布在市区周围的 50~80 km 范围之内(表 4),拟合的人造地震动符合要求。

可见,进行地震小区划首先要深入研究区域地震地质、地震构造、地震活动性等区域背景资料,以地震安全性评价的结果为基础;在缺乏强震记录的地区,需拟合人造地震动,以弥补天然地震记录的不足。目前我国的地震安全性评价是具概率意义的,其危险性分析计算结果往往不能给出确定的震源位置和震级,必要时须与确定性的危险性分析互相配合,以给出更合理的震源位置。这项工作超出了现行规范的要求,对于重大工程今后会提到日程上来。由此看来,地震小区划前期的研究工作涉及的方面多、工作量极大。

2 兰州市地震动参数小区划的结果

根据场地地形的差异,分别采用了一维^[12]、二维方法计算了兰州市区各地的地震动参数,地震动

② 资料来自甘肃省地震安全性评定委员会审查通过的 13 项实际工程项目。

参数(包括峰值加速度及频谱成分)可以明显划分为三种不同的类型。分区有以下特征。

(1)地震动参数的分区与地貌单元及场地土的厚度、性质有密切的关系。兰州市区的三种不同类型的地震动参数和地貌单元有密切的依存关系,反映了典型的大河谷地城市的特点。旧市区范围内尽管由于人为活动对地形的改造使得自然的地貌分界

已显模糊,但地貌单元与场地土的类型及厚度仍可作为划分小区的重要参照依据(表 4)。地震动参数的差异首先表现在反应谱的形状上,以加速度反应谱的特征周期为依据可将其从宏观上分为短周期、中周期和长周期场地,将它们所对应的小区命名为 A、B、C 区。各区场地土的厚度变化范围见表 5。

表 4 兰州市附近主要潜在震源对地震危险性的贡献(据马尔曼)

震源名称	到市区中心处的距离/km	烈度			水平向加速度峰值/gal		
		VI	VII	IX	80	200	400
兰州震源	0~60	0.070 4	0.009 4	0.000 9	0.020 7	0.005 6	0.000 3
定西震源	50~110	0.007 8	0.000 0	0.000 0	0.005 6	0.000 1	0.000 0
永登震源	50~120	0.005 5	0.000 0	0.000 0	0.004 4	0.000 0	0.000 0
海原震源	110~180	0.013 6	0.000 0	0.000 0	0.006 3	0.000 6	0.000 0
临洮震源	60~120	0.006 3	0.000 0	0.000 0	0.004 6	0.000 0	0.000 0

表 5 各类反应谱所对应的土层厚度

场地类别	黄土(及其他粘性土)厚度/m		计算土层厚度/m	
	变化范围	平均	变化范围	平均
A类(短周期)	0~8.6	4.0	4.0~18.8	12.2
B类(中周期)	2.5~12.0	7.4	7.0~26.5	16.3
C类(长周期)	7.0~49.6	22.6	10.0~49.6	28.9

由各类场地的分布来看, A 类场地对应的是黄河漫滩、高漫滩及 I 级阶地, 场地土层多半是双层结构, 上部为冲积成因的次生黄土, 下部为黄河冲积的卵石层。底部的基岩在七里河向斜内外不同, 向斜以外是上新世的泥岩、泥砂岩或砂岩, 向斜以内是早更新世的卵砾石层。计算土层(按: 取剪切波速 $V_s > 500$ m/s 作为输入基盘界面)的下限大都在阶地卵石层或下伏的泥砂岩内, 向斜内外基盘岩性的变化对地震动参数的计算结果影响不大。B 类场地对应的主要区段是黄河 I 级阶地后缘的洪积扇覆盖的部分及 II 级阶地, 场地土层也多半是双层结构, 但是

厚度较之阶地的前缘增大了很多, 上部为冲积成因的次生黄土或洪积土层, 下部为黄河冲积的卵石层。计算土层的下限大都在阶地卵石层内, 由于厚度增大, 土层对地面加速度峰值的放大作用比 I 类场地更强, 因而 PGA 值比 I 类场地上高出 5% 左右(见表 6), C 类场地分布在高坪, 场地土层的厚度增至 40~50 m, 与前两类场地的地震动参数相比差别显著, 最主要的是反应谱长周期分量增多, 特征周期加长, 峰值加速度同时也有所增大, 这既有地形的放大作用又有场地土层厚度增大的作用^[8-9]。

(2) 为便于应用, 需将地震反应谱作必要的规范处理, 归准后的结果应和现行《规范》中的标准谱接近。表 7 即是规范后的设计地震动参数, A、B 两类场地上地震影响系数最大值取得一样是考虑了地区的特点后人为调整的结果。

表 6 不同类场地的反应谱平台高度及长周期部分的衰减指数

场地	A 类场地(短周期)			B 类场地(中周期)			C 类场地(长周期)			
	50 年超越概率/%	63.5	10	2	63.5	10	2	63.5	10	2
平台高度/[$\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$]	164.1	466.7	926.2	180.1	518.8	1002.2	167.5	446.1	883.0	
平台高度/ β	2.56	2.49	2.36	2.61	2.58	2.55	2.51	2.43	2.37	
调整后的平台高度/ α 谱	0.16	0.45	0.90	0.16	0.45	0.90	0.18	0.50	1.00	

表 7 各小区地震反应谱参数影响系数

分区	T_1	T_g/s			A_{max}			γ	PGA/g		
		63.5%	10%	2%	63.5%	10%	2%		63.5%	10%	2%
A	0.1	0.35	0.35	0.35	0.16	0.45	0.90	0.9	0.07	0.20	0.40
B	0.1	0.40	0.40	0.40	0.16	0.45	0.90	0.9	0.07	0.20	0.40
C	0.1	0.50	0.50	0.55	0.18	0.50	1.00	0.9	0.08	0.22	0.44

在进行地震动参数小区划时, 小区的划分不宜过细, 细微的差别不宜过分强调。小区之间反应谱特征周期的差别依照《工程场地地震安全性评价》规

范的要求, 应不小于 0.05 s, 各小区的地震动参数是大量计算的统计结果, 在总体上符合当地的情况。同时, 规整时根据本地的实际情况, 对设计地震动参

数作了适当的调整,如 $5T_g$ 以后按《规范》中给出的方式衰减,显然比实际计算的结果要保守得多^[13](图3)。

各图中的加速度谱除以 g (取 $g=1\ 000\text{ cm/s}^2$)即相当于《规范》中的地震影响系数,形状相同,无须赘述。由归准后的反应谱形状推定,兰州市A、B区场地属于GB50011-2001《规范》中的II类场地的第一、二组,C类场地介于III类场地的第一、二组之间。

兰州市地震动参数小区划结果示于图4。

3 小结与建议——研究兰州市地震小区划的意义

兰州市是典型的黄土地区的河谷城市,也是这类城市中规模最大、最重要的城市。研究的方法以及地震动参数的分区特征可供在同类城市中借鉴。黄土地区城市的老区都坐落在临河的低阶地上,而新扩展的建设区不仅是毗邻高陡山地或邻近河边的场地,有时甚至需要挖填沟谷造地,这种场地的条件更差。如兰州市近期开发的罗锅沟九洲开发区,将原来的冲沟挖、填造成新的建筑场地,由于填挖界线复杂,且填土非一时形成,夯实度不同,密实度极不

均匀,挖方地区对边坡的处理也不尽一致,场地条件和地震动参数在短距离之内变化迅速,于场地选择和建筑抗震十分不利。不仅如此,不少地段由于在山前挖方造地,造成新的高陡斜坡,改变了局部山坡的抗震稳定性,也改变了当地的地震动参数。近年来,我国城市发展极为迅速,要做好相应的地震小区划是不容易的,研究工作要尽量走在前面。随着我国建筑抗震设计标准的不断改变,标准的提高,超限高层的建筑时有发生,新的建筑结构形式及类型的应用,地震小区划的研究范围也必须相应的扩展,涉及到新的、原来未曾接触过的问题,如超长周期反应谱、不同阻尼比的反应谱等等,都需要认真加以研究。

从兰州市的地震动参数小区划中,我们看到:

(1) 河谷城市场地显著的特点是:场地特性与所在的地貌单元有密切的依存关系;不同地貌单元上的场地特点有明显的差别,各项地震动参数往往都和地貌有着密切的联系;地震动参数的分界与地貌分界或多或少地一致。表8是天水等同类城市的小区划结果,看出这一类城市的地震动参数都和市区的地貌单元有密切的关系。

表8 天水等城市地震动参数小区划的简要结果(据[14],略有删减)

城市	所在烈度区	PGA/g*	地貌单元	黄土厚度 /m	地震动参数(50年超越概率10%)		
					PGA/gal	α_{max}	T_g/s
兰州	8/0.20		漫滩及I级阶地前沿	0~8	181.4	0.45	0.35
			I级阶地后沿及II级阶地	8~20	200.9	0.45	0.40
			III级以上高阶地(高坪)	>30	201.9	0.50	0.50
天水	8/0.30		漫滩及I、II级阶地	4~7	0.24~0.36	0.50~1.10	0.20~0.35
			III级以上高阶地	>25	275	0.60	0.4~0.5
			洪积扇	15~50	275	0.60	0.55~0.65
西宁	7/0.10		I级阶地	1~3	130	0.28	0.1~0.2
			II级阶地	2~10	180	0.40	0.2~0.3
			III级阶地	15~20	200	0.45	>0.3
			IV级阶地	>80	250	0.56	0.5
宝鸡	7/0.15		漫滩及I级阶地	0~16	135	0.30	0.30
			II级阶地	15~35	160	0.36	0.35
			III级阶地	35	160	0.36	0.45
			IV级阶地	>40	210	0.45	0.65

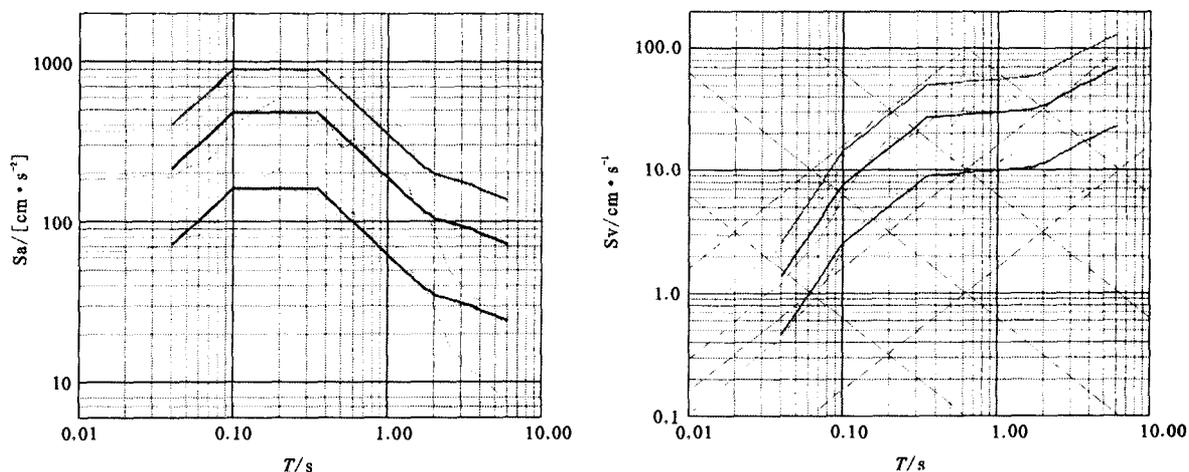
* 所在烈度区为《建筑抗震设计规范》中指定的烈度,PGA系50年超越概率10%的数值。

(2) 这类城市的场地问题多样,引起地基失效的因素,如滑坡、崩塌、泥石流等,可能比确定地震动参数更加复杂。而确定这些因素需要掌握大量的水文地质与工程地质资料,单靠某种计算不容易达到预期的效果,需要具备一定的经验。

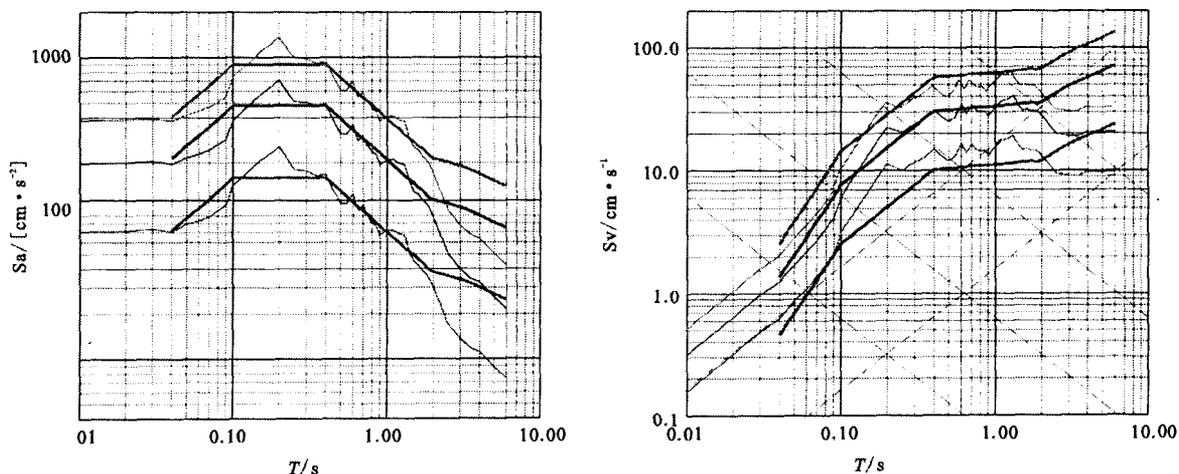
(3) 黄土地区的河谷城市的地震小区划最好用多指标综合方式予以表达,分别用不同的图件表示

地震动参数及地基失效的因素^[13]。

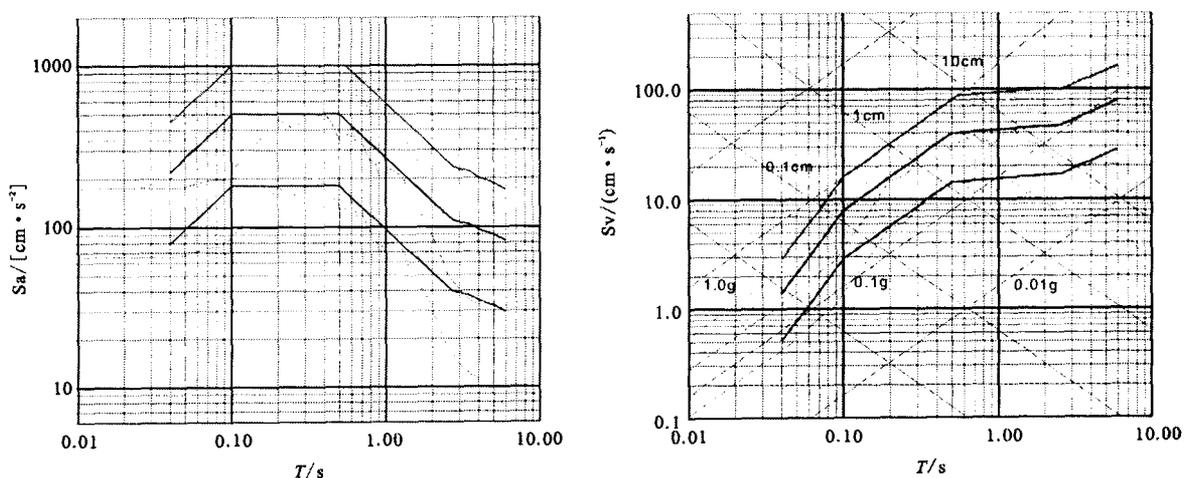
(4) 地震小区划中有着大量的研究性的工作,又面临着城市规划和抗震设计的应用,工作期限的紧迫往往使得某些问题难以深入地探讨。城市地震小区划地结果是针对一般性的建筑、构筑物进行的,不适用于重大和特殊建筑(如抗震设计规范中所规定的甲类建筑等)。



(a) A类(短周期)场地(左为示于双对数坐标,右为示于三坐标)



(b) B类(中等周期)场地(左为示于双对数坐标,右为示于三坐标)



(c) C类(长周期)场地(左为示于双对数坐标,右为示于三坐标)

图 3 不同场地反应谱与标准谱的比较(粗线为规范后的设计地震动参数标准谱;细线为计算结果的平均谱,自下而上分别为 50 年超越概率 63.5%、10%、2%)

Fig. 3 Comparison of the acceleration response spectra between the average spectras and the standard spectras for different sites.

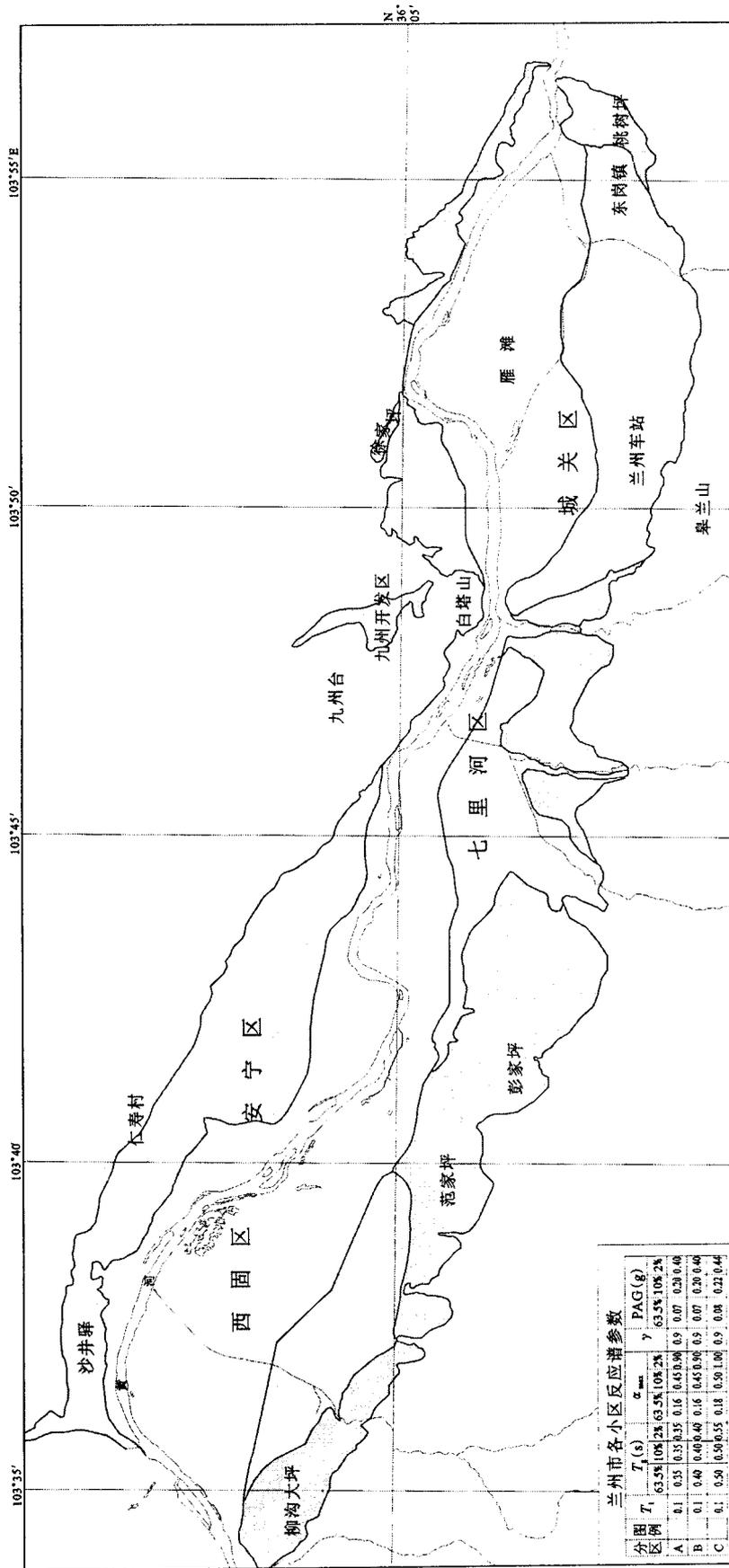


图4 兰州市设计地震动参数区划图

Fig. 4 The microzoning map of design parameters of ground motion during strong earthquake in Lanzhou city.

(5) 近年来,我国地震小区划工作已经走向市场化,在某种程度上对小区划的工作质量会产生一定的影响,如何对小区划的结果作严格的鉴定,也是管理上的一个重要问题。

地震小区划在国际上城市规划及抗震设计中也是一项重要的工作,早已引起了各国地震工程界的密切关注。几乎就在我国颁布执行 GB50011 2001《建筑抗震设计规范》的同时,国际标准组织 ISO 颁布了 International Standard ISO 3010 国际标准抗震设计规范^[15],该规范中多次指出确定设计地震参数要采用地震小区划的结果,由此可见地震小区划在国际上的地位和作用。

地震小区划在国际上城市规划及抗震设计中也是一项重要的工作,早已引起了各国地震工程界的密切关注。几乎就在我国颁布执行 GB50011 2001《建筑抗震设计规范》的同时,国际标准组织 ISO 颁布了 International Standard ISO 3010 国际标准抗震设计规范^[15],该规范中多次指出确定设计地震参数要采用地震小区划的结果,由此可见地震小区划在国际上的地位和作用。

[参考文献]

- [1] 孙崇绍,陈丙午.兰州市区场地地震区划[J].地震工程与工程震动,1983,1(4):1-6.
- [2] Sun Chongshao, Cai Hongwei, Shi Yucheng. The Characteristics of Ground Motion during Strong Earthquake in Lanzhou City, China[A]//Proc. 7th Int. Cong. Int. Ass. of Engineering Geology[C]. Lisboa Portugal, 1994:1971-1978.
- [3] 袁道阳,刘小凤,等.兰州马衔山—兴隆山活动断裂系的构造变形特征和机制[J].中国地震,2003,(2):125-131.
- [4] 袁道阳,何文贵,等.10余年来甘肃省中强地震的发震构造特征[J].西北地震学报,2006,28(3):235-241.
- [5] 刘小凤,袁道阳,刘百麓.兰州及邻近地区河流阶地变形特征[J].西北地震学报,2003,25(2):119-124.
- [6] 袁道阳,雷中生,等.兰州1125年7级地震考证与发震构造分析[J].中国地震,2002,(1):67-75.
- [7] 何韞如,邵世勤,等编著.松潘强震纪录的谱分析[M].北京:地震出版社,1979.
- [8] 孙崇绍.对兰州市高坪不利场地地震动参数调整方案的研究[A]//西部开发中的岩土工程问题[C].上海:同济大学出版社,2005:128-134.
- [9] 孙崇绍.黄土场地的强震地震动参数[A]//罗宇生,汪国烈.湿陷性黄土研究与工程[C].北京:中国建筑工业出版社,2001:495-501.
- [10] Hu Y, Zhang M Z. Attenuation of Ground Motion for Regions with no Ground Motion Data[A]//proc. 4CCEE[C]. 1983:485-494.
- [11] 陈厚群,李敏,石玉成.基于设定地震的重大工程场地设计反应谱的确定方法[J].水利学报,2005,36(12):1399-1404.
- [12] 廖振鹏,李小军.地表土层地震反应的等效线性化解法[A]//廖振鹏.地震小区划理论与实践[C].北京:地震出版社 1989:141-153.
- [13] 胡聿贤著.地震工程学(第二版)[M].北京:地震出版社,2006:84-124,404-406,508-512.
- [14] 张振中.黄土地震灾害预测[M].北京:地震出版社,1999:36-37.
- [15] Wang Yayong. Comparison of seismic actions and structural design requirements in Chinese Code GB 50011 and International Standard ISO 3010 [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004,3(1):1-9.