

具有地域特性的设计地震动参数确定 ——以武罐高速公路为例*

赵泽贤^{1,2}, 王爱国^{1,2}, 孙崇绍²

(1. 中国地震局地震预测研究所兰州基地, 甘肃 兰州, 730000; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州, 730000)

摘要: 分析了甘肃陇南武罐高速公路所处陇南地区强震动记录的地形效应及频谱特征, 研究了在地震危险性概率计算中地震动地域特性的简化与抽象过程, 应用地震动记录地形效应及地域频谱特征对重大工程地震危险性计算结果进行调整, 从而给出具有地域特性的设计地震动参数。结果表明: 地震危险性概率分析计算结果与地域地震动特征分析结果之间有一定差异, 根据地震动特征分析结果, 对危险性计算结果中动力放大系数 β_{\max} 和特征周期 T 进行一定的调整, 以给出适合本区特征的抗震设计地震动参数。

关键词: 设计地震动参数; 地域特性; 反应谱; 特征周期; 武罐高速公路

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2012)03-0367-07

0 引言

地震动参数的确定是工程抗震与灾害防御的基础。影响一个地区的地震动特征的因素包括震源特性、传播介质及局部场地条件等(胡聿贤, 2006)。在目前广泛采用的地震动参数确定方法——基于地震时空分布不均匀性的地震危险性综合概率法中(胡聿贤, 1999), 这些因素都是通过一定的模型简化或拟合关系来表达的。根据我国目前对于地震活动特征的研究进展和水平, 对于某个研究区域来说, 该区的震源特性、震级大小、震中距等是相对易于考虑的因素(俞言祥, 汪素云, 2006), 这些因素在区域地震构造背景、区域地震活动性研究的基础上, 通过地震区带与地震潜在震源区划分及相关地震活动性参数的确定, 可以科学合理地进行考虑; 场地条件影响通过勘察工作及反应分析计算也能进行科学预测。由于区域地壳结构及地形地貌的差异及地下结构的不可见性, 传播途径是地震动参数确定中的最不确定因素之一。在地震危险性概率分析方法中, 对于地震波传播途径的表达是通过地震动衰减关系来体现的。

由于我国强地震动记录数量有限, 还不能建立起各地地震动衰减关系模型, 因此目前普遍采用转换方法得到的我国分区地震动衰减关系来确定地震动参数(汪素云等, 2000; 俞言祥, 汪素云, 2004), 即利用我国丰富的地震烈度等震线资料, 确定我国分区地震烈度衰减关系, 然后选择既有丰富的强震记录又有烈度衰减关系的美国西部地区作为参考区, 转换得到相应的地震动衰减关系。随着各地区地震工作的深入, 为尽可能体现区域地震动特征, 这种转换方法也逐渐应用到小范围的区域中(俞言祥, 汪素云, 2004; 崔建文等, 2006)。转换方法得到的衰减关系虽然可以近似代替本区地震动衰减关系, 但对于重大工程和有一定强震记录的地区, 仍要根据记录的地震动特征进行地震动衰减关系的对比研究和调整。

武都—罐子沟高速公路(以下简称武罐高速)是“国家高速公路网”——兰州至海口高速公路在甘肃省的重要组成路段, 公路沿线处于青藏高原北部地震区的南北地震带内, 地形及地质条件复杂, 属于地震高烈度区和易发生地震地质灾害的区域。该区构造位置独特, 积累了一定的强震记录, 2008年汶川8.0级地震中, 该区又积累了部分强震记录(孙崇绍, 卢育霞, 2010; 姚凯等,

* 收稿日期: 2012-05-31.

基金项目: 交通部西部交通建设科技项目《武罐高速公路抗震优化设计及灾害防治技术研究》与中国地震局地震预测所基本科研业务专项《甘肃古浪和四川汶川两次8级大震构造区对比研究》联合资助。

2009; 卢育震等, 2011)。因此, 为合理给出抗震优化设计所需地震动参数, 笔者在常规地震危险性分析的基础上, 结合公路所处的陇南地区强地震记录峰值加速度及频谱特征, 对公路沿线重点工程场地地震动参数进行了综合研究和确定, 并结合地震危险性分析结果与区域地震动记录特征研究, 给出了该项目工程场地具有地域特性的抗震设计地震动参数。

1 工程场地地震构造背景及地震危险性分析

武罐高速公路位于甘肃省陇南市境内 (图 1), 为扬子断块区的摩天岭台隆, 区域 150 km 半径范围属于华北断块区的鄂尔多斯块体、秦祁昆断褶系的祁连山断褶带、秦岭断褶带及扬子断块区的摩天岭台隆、龙门山—大巴山台缘褶带、四川台拗和巴颜喀拉山断褶带的松潘甘孜褶带、后龙门山褶带。

工程场地区域范围新构造运动与地震活动强

烈, 区域内共发育 11 条大的活动断裂带 (图 1)。在这些活动断裂带上及断裂交汇部位, 均发生过强烈地震, 如公元前 186 年武都西 $M_s7.0$ 地震、1654 年天水南 $M_s8.0$ 地震、1879 年武都南 $M_s8.0$ 地震、1986 年四川松潘—平武两次 $M_s7.2$ 地震、2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震等。这些地震对武罐高速公路沿线工程场地的烈度影响均在Ⅷ度以上, 局部达到Ⅸ度甚至Ⅹ度。

在地震区带上, 研究区域主要涉及青藏高原地震区的龙门山地震带和六盘山—祁连山地震带, 属于强烈地震活动区; 同时还涉及华南地震区的长江中游地震带的一部分, 属于中强地震带。根据区域地震构造特征、地震活动特征、深部地球物理特征等, 确定了在研究区域共有 26 个潜在震源区 (图 1)。经过反复对比验算, 本工作选择俞言祥和汪素云 (2006) 转换得到的中国西部地震动衰减关系来进行工程场地地震危险性计算, 得到了公路沿线及重点工程场地 50 年基准期不同超越概率水准下的基岩水平峰值加速度及基岩地震动反应谱。

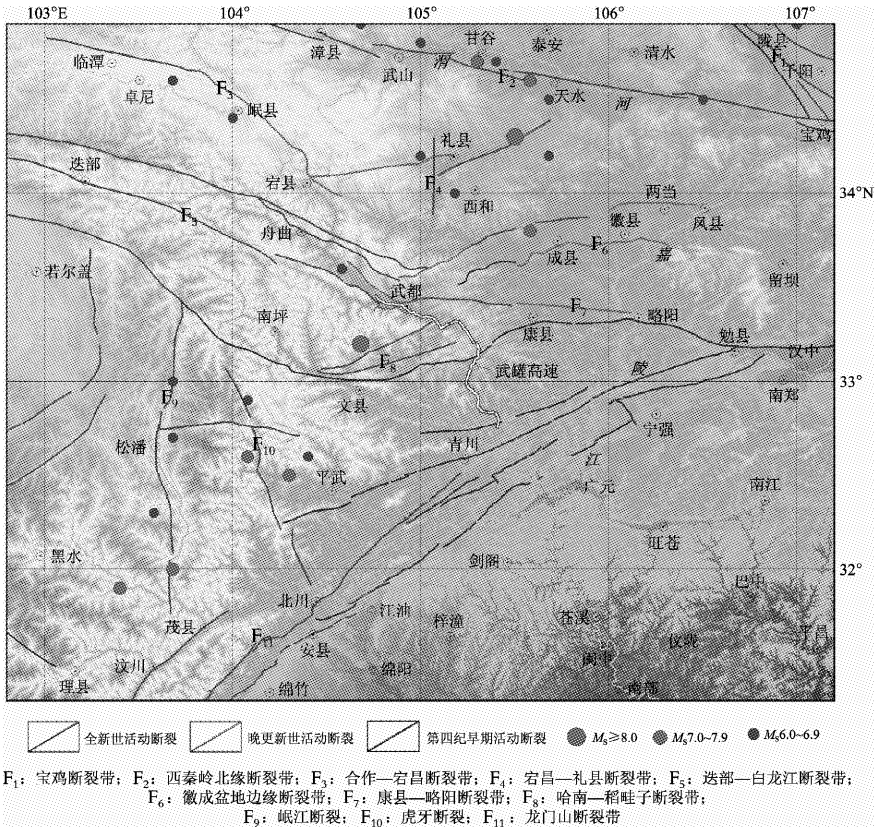


图 1 武罐高速公路构造位置及区域地震构造分布图

Fig. 1 Tectonic position and regional seismic tectonic distribution of Wu-Guan freeway

2 陇南地区强地震动记录及特征分析

武罐高速公路所处甘肃陇南地区是甘肃强震多发区之一，也是我国进行强地震动记录研究的重点区域之一。1986 年四川松潘—平武两次 $M_s7.2$ 地震时，陇南文县遭受到了Ⅶ度强的波及。该次地震之前，中国地震局兰州地震研究所曾在文县中学架设临时强震台，用 I 型强震仪记录到两次松潘—平武主震强震的加速度记录，成为当时我国记录到的加速度值最大的强震记录。

在 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震前，陇南地区建成了文县、武都、宕昌、沙湾、舟曲、岷县、临潭等强震观测台站，并配备了先进的观测仪器。汶川地震时，上述各台都获得了主震记录。汶川地震后，兰州地震研究所在靠近震中的地区架设了 15 个流动强震观测台，记录了自架设之日起截至 2008 年 9 月，共记录 $M \geq 4.0$ 的余震 35 次。

2.1 地形与地震动峰值加速度的关系研究

大震作用下地形对烈度的影响已被历次地震的震害分布所证明。姚凯等（2009）及卢育霞等（2011）分析了陇南文县不同强震台同时记录到的汶川地震余震记录，结果均表明地形起伏对于观测点的峰值加速度影响明显，山顶加速度

被明显放大。

为研究地形对地震动放大效应的定量影响，本研究在姚凯等（2009）、卢育霞等（2011）研究基础上，选取文县上城台地 3 个不同地形位置的强震台（G：山脚、B：半山腰、I：山顶）所记录到的峰值加速度大于或接近 10 Gal，能较好反映地形高差影响的 7 次较强的余震记录作为分析资料（表 1）。

由于峰值加速度的分布很复杂，最大和次大的加速度值以及总体的加速度的分布往往没有一定的规律可循，峰值加速度具有偶然性，不能从整体上反映地震动的强度，为此计算了水平向震动加速度的均方值（RMS）：

$$RMS = \frac{\sum_{i=1}^N X(i)^2}{N}.$$

(1)

式中， $X(i)$ 为每一离散点的加速度值； N 为离散点总数。

在计算地震动的均方值时，首先对各台站的记录进行零线校正；对于同一个地震事件，需要确定统一的取值段持时，我们采用了整个记录的主要部分作为计算长度，均方值比值计算结果列入表 1。

表 1 各次强余震不同高度流动台站所记录的地震加速度均方值的比值
Tab. 1 Ratio of mean square values of the seismic acceleration records of several strong aftershocks recorded by temporary stations of different height

余震编号	发震日期/年-月-日	震级 M_s	震中位置		半山腰(B)/山脚(G) (高差: 33 m)		山顶(I)/山脚(G) (高差: 42 m)	
			$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	EW	NS	EW	NS
1	2008-05-18	6.0	32.370	105.080	1.71	1.69	2.04	2.11
2	2008-05-21	4.4	32.530	105.180	1.43	1.75	1.52	3.13
3	2008-05-21	4.3	32.440	105.100	1.37	1.69	1.49	2.03
4	2008-05-25	6.4	32.667	105.383	1.38	1.66	—	—
5	2008-05-27	5.7	32.800	105.600	1.30	1.71	1.37	3.74
6	2008-08-01	6.1	32.100	104.700	1.48	1.67	2.03	2.29
7	2008-08-05	6.1	32.800	105.500	1.50	1.76	2.15	3.78
平均值					1.45	1.70	1.77	2.85

由表 1 可见，7 次强余震加速度都随局部地形的高度增加而增大，反映了局部地形的放大作用。特别是在半山腰和山脚之间，2 个流动台的高差达 33 m，余震加速度都随局部地形的高度放

大更为明显。水平向地震动的放大倍数可达 1.30 ~ 1.76 倍；山脚和山顶间高差为 42 m，水平向地震动均方值的放大倍数达 1.77 ~ 2.85 倍。换算成宏观烈度，局部地形高差在 50 m 左右时，

烈度几乎可提高一度。

汶川 8.0 级地震以后, 陇南地区大量的宏观震害调查结果都明显反映了局部地形高度的放大作用。考虑到这一点, 甘肃省建设厅在编制《甘肃省陇南、甘南灾区恢复重建建筑抗震技术规程》时, 规定了调整系数 (表 2)。

表 2 地震影响系数最大值随地形高度的调整系数
Tab. 2 Adjusting coefficients of maximum earthquake affecting coefficient in different terrain height

地形相对高差 $\Delta H/\text{m}$	$30 \leq \Delta H < 50$	$50 \leq \Delta H < 100$	$\Delta H \geq 100$
调整系数 λ	1.1	1.3	1.6

本研究所用的流动台站的数据取自孤突的山梁, 除地形的高差外, 还有孤突山梁的影响, 所以比单纯地形高差的影响大。流动台的记录没有取得高差大于 50 m 的实际资料。更多历史地震的震害调查表明, 地震动的强度不是随高差的增大而无止境地放大。表 2 中的数据是为了增加孤突地形高处民居的安全度而制定的, 反映了地形放大的总体趋势。本文所引用的几次强余震的记录表明, 表 2 中规定的标准是可行的。

武灌高速公路采用了大量高架桥和隧洞, 虽然隧洞洞身多位于基岩山体内, 但隧道洞口多位于山体山腰一定高度部位, 此种结构对地震会产生一定的放大作用, 因此, 对于基岩隧洞洞口, 可参照表 1 来考虑地形对地震动的放大作用。

2.2 地震震级对反应谱特征周期的影响

特征周期是反应谱的重要参数, 对工程抗震设计意义重大。现在越来越多的研究表明, 根据抗震设计规范 (GB50011-2010) 计算得到的特征周期小于实际场地情况的统计平均值 (吴建, 高孟潭, 2004)。徐扬 (2000) 通过理论分析初步讨论了潜在震源区震级上限对基岩加速度反应谱特征周期的影响。为了进一步说明地震震级对基岩反应谱特征周期的影响, 笔者对主震及部分余震地震动记录的频谱特性进行分析, 以研究本区地震动特征周期与地震震级之间的关系。

通过对比分析 2008 年汶川 $M_s8.0$ 地震和 1976 年松潘—平武 $M_s7.2$ 地震在文县台的强震记录加速度反应谱 (图 2) 可以看出, 地震动的频谱成分随地震震级的增大, 其长周期分量迅速增加。两次地震强震记录台的位置相距不远, 台址均为基岩场地。2008 年汶川地震的震中距为 249 km (从

地震的始破裂点映秀计起), 1976 年松潘—平武地震的震中距为 65 km, 基本位于同一条线上, 传播路径相近。因此, 两次地震反应谱具有可比性。由图 2 可以看出, 汶川 $M_s8.0$ 级地震加速度反应谱的“特征周期”接近 1 s, 而松潘—平武 $M_s7.2$ 地震的“特征周期”只有 0.3 s 左右。

由于震级的差异, 余震与主震频谱成分之间有一定的差别。2008 年 8 月 5 日青川 $M_s6.1$ 强余震的反应谱如图 3 所示, 其中姚渡流动台的震中距为 6.0 km, 处于极震区内, 记录到的峰值加速度达 370 Gal; 文县流动台震中距为 79 km, 处于山脚下, 记到的峰值加速度仅为 33 Gal, 已属于“远场”的范围。对比可以看到, 对于 6 级左右的中强震, 其反应谱的“特征周期”在 0.3 s 左右, 与震中距的关系不大。

图 4 是文县流动台记到的 7 次震级在 4.3 ~ 6.4 之间中强震 (汶川地震的余震) 的反应谱。从图中可以看到, 除了 1 次地震以外 (图 4 中紫色线, 该次地震为 6.1 级, 震中距 94 km), 其余 6 次地震的反应谱“特征周期”都在 0.3 s 左右。

从以上反应谱的对比分析不难看出, 反应谱的形状特别是其“特征周期”与地震震级有密切的关系。7 级以上的大震和 7 级以下的中强震之间的反应谱的形状有很大的差别。对陇南地区一般的中硬土地来说, 7 级以上的地震其反应谱的“特征周期”可达 0.5 ~ 0.7 s 以上, 而 7 级以下的中强地震, “特征周期”仅在 0.3 ~ 0.4 s 之间。据汶川地震主震和强余震的强震观测, 陇南地区的地面运动反应谱应与地震震级联系起来, 特别是 7 级以上的大震, 其反应谱的长周期分量增长非常快。观测的结果没有覆盖全部震级, 但特征周期随震级增大有明显的增大趋势很明显。

由于受观测资料的限制, 在实际应用中, 可采用汶川 $M_s8.0$ 地震及其强余震的观测结果, 把反应谱的“特征周期”放长一些。建议采用表 3 中的数值对安全性评价中计算得到的反应谱做适当的调整。

表 3 陇南地区反应谱特征周期调整建议取值
Tab. 3 Suggested value according to adjusting characteristic period of response spectrum in Longnan area

震级 M_s	$M_s < 6.0$	$6.0 \leq M_s < 7.0$	$7.0 \leq M_s < 7.5$	$M_s \geq 7.5$
特征周期 T_g	0.3 ~ 0.35 s	0.35 ~ 0.4 s	0.5 ~ 0.6 s	0.6 ~ 0.8 s

3 设计地震动参数的调整

地震危险性分析计算给出武罐高速公路沿线场地的基岩峰值加速度和基岩反应谱曲线，还可以给出各场地在不同超越概率水准下遭受相应地震影响的等效震级和等效距离。陇南地区具备山区的特点，场地土较坚硬，地震动的高频分量表现明显。对于一般场地，可按照《中国地震动参数区划图》（GB18306-2001）中地震动峰值加速度（中硬场地）与基岩场地地震动峰值加速度的对应关系对设计地震动参数进行调整。对于重要场地，除根据地形、场地条件进行峰值加速度和特征周期的计算与调整外，为体现本区地震动特征，本研究还根据等效震级和等效距离对照表 3 调整了特征周期，给出体现本区地域特性的设计地震动参数。

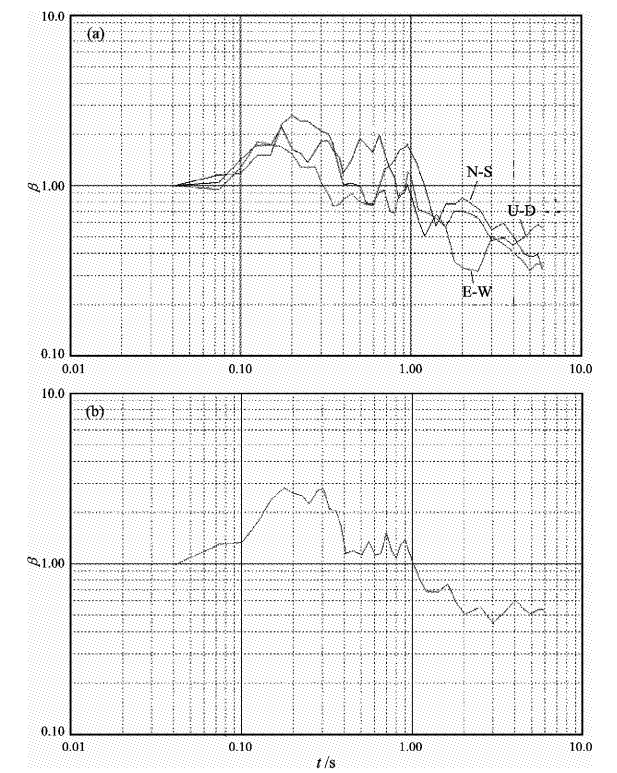


图 2 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s8.0$ 地震 (a) 和 1976 年 8 月 16 日松潘—平武 $M_s7.2$ 地震 (b) 在文县台的强震记录加速度反应谱 (β 谱)

Fig. 2 Acceleration response spectrum (β -spectra) of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake on May 12, 2008 (a) and Songpan-Pingwu $M_s7.2$ earthquake on Aug. 16, 1976 (b) recorded in Wenxian Station

笔者以武罐高速洛塘河双层高架桥工程场地为例，给出了场地反应分析计算后的地震动参数与调整后的地震动参数对比（表 4）。洛塘河双层

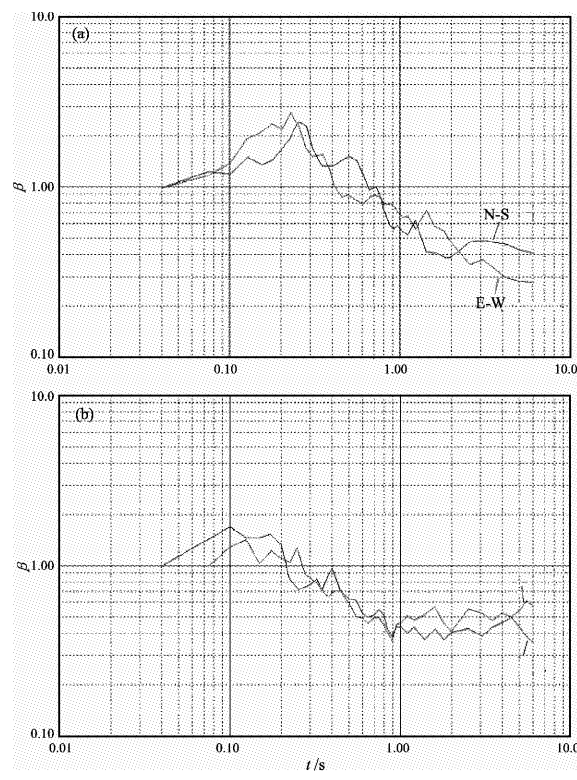


图 3 2008 年 8 月 5 日青川 $M_s6.1$ 余震记录的加速度反应谱曲线 (β 谱)
(a) 姚渡强震台；(b) 文县山脚处流动台
Fig. 3 Acceleration response spectra (β -spectra) of Qingchuan $M_s6.1$ aftershock on Aug. 5, 2008
(a) Yaodu strong motion station; (b) temporary stations at the foot of Wenxian County

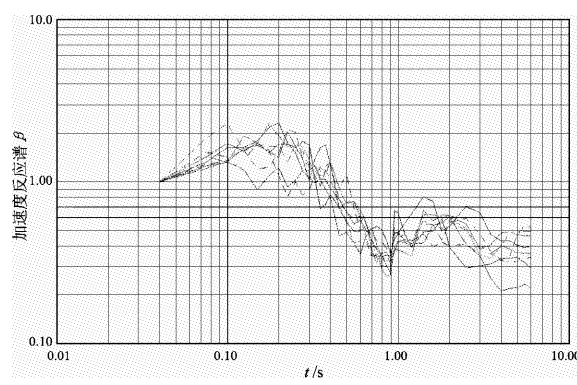


图 4 文县附近流动台 7 次中强地震的 β 反应谱
Fig. 4 β -response spectra of 7 moderate-strong earthquakes recorded by temporary stations at the foot of Wenxian County

高架桥沿洛塘河西岸展布,地层主要为第四系河床(漫滩)冲积卵石漂石以及下古生界碧口群砂质板岩、变砂岩夹千枚岩,其中第四系河床(漫滩)冲积卵石漂石最大厚度 7.5 m。根据地震危险性计算得到的基岩反应谱,进行人造地震动拟合;然后根据钻孔剖面,选取合理的计算模型,得到该工程场地地表反应谱曲线。根据计算结果确定的地震动参数如表 4 中“调整前”所示,可以看出,特征周期相对较小,与该区强震记录频谱特征有一定差异,因此,根据等效震级对特征周期进行了调整,如表 4“调整后”所示,并以此作为模拟实验用的抗震设计地震动参数。

表 4 洛塘河双层高架桥地震动参数及模拟实验用抗震设计地震动参数的调整

Tab. 4 Ground motion parameters and the adjusting of ground motion parameters of anti-seismic design used in simulation experiment of Luotanghe double-deck viaduct

地震动参数	调整前			调整后		
	50 年基准期超越概率			50 年基准期超越概率		
	63.5%	10%	2%	63.5%	10%	2%
基岩 PGA/Gal	53	172	342			
等效震级	6.7	7.5	7.7			
场地 PGA/Gal	60	199	380	60	199	380
场地 PGA/g	0.06	0.20	0.39	0.06	0.20	0.39
Kh	0.06	0.20	0.39	0.06	0.20	0.39
Ky	0.04	0.14	0.26	0.04	0.14	0.26
β_{\max}	2.1	2.1	2.2	2.1	2.1	2.2
Tl	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Tg	0.35	0.40	0.45	0.40	0.60	0.65
Ta	3.04	3.48	4.12	3.5	4.3	5.5

4 结论

不同地区所处的大地构造环境与地震活动背景,决定了该区具有其特殊的地震动特征。根据分区地震动衰减关系计算得到的地震危险性分析结果还不能完全体现地震动的地域特性。

武罐高速公路所处甘肃陇南地区,山大沟深,地形对地震动的放大效应比较明显,因此对重要工程场地根据其地形位置进行地震动峰值加速度的放大调整是有必要的。

甘肃陇南地区地震动特征分析结果与工程场地地震危险性分析结果表明,两者之间在地震动特征上有一定差异,因此对于重大工程场地,需要根据本区强震记录特征分析,对危险性计算结果进行一定的调整,以获得适合本区特征的抗震设计地震动参数。

笔者提出的根据地震危险性计算结果得到的等效震级及地震震级与地震动记录频谱特征关系,对地震动参数进行一定的调整,是一种有益的尝试,试验证明是可行的,可作为其它有一定强震记录地区重大工程场地地震动参数确定的参考。

参考文献:

崔建文,李世成,高东,等. 2006. 云南分区地震动衰减关系. 地震研究[J],29(4):386-391.

胡律贤. 2006. 地震工程学(第二版)[M]. 北京:地震出版社.

胡聿贤. 1999. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京:地震出版社.

卢育霞,刘琨,姚凯,等. 2011. 甘肃文县上城台地的地震记录分析[J]. 西北地震学报,33(S):393-397.

孙崇绍,卢育霞. 2010. 甘肃省若干地段强震地面运动特征[J]. 西北地震学报,1-10.

汪素云,俞言祥,高阿甲,等. 2000. 中国分区地震动衰减关系的确定[J]. 中国地震,16(2):99-106.

吴建,高孟潭. 2004. 场地相关设计反应谱特征周期的统计分析[J]. 中国地震,20(3):263-268.

徐扬. 2000. 潜在震源区震级上限对基岩加速度反应谱特征周期的影响[J]. 华北地震科学,18(2):45-49.

姚凯,卢大伟,刘旭宙,等. 2009. 利用汶川余震流动观测资料探讨地形对峰值加速度的影响[J]. 西北地震学报,31(1):46-50.

俞言祥,汪素云. 2004. 青藏高原东北地区水平向基岩加速度峰值与反应谱衰减关系[J]. 地震学报,26(6):591-600.

俞言祥,汪素云. 2006. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J]. 震灾防御技术,1(3):206-217.

周锡元,樊水荣,苏经宇. 1999. 场地分类和设计反应谱的特征周期——《建筑抗震设计规范》修订简介(八)[J]. 工程抗震,8(4):3-8.

GB18306-2001,中国地震动参数区划图[S].

GB50011-2010,建筑抗震设计规范[S].

Defining on Design Ground Motion Parameters with Regional Characteristics
——A Case Study of Wu-Guan Freeway

ZHAO Ze-xian^{1,2}, WANG Ai-guo^{1,2}, SUN Chong-shao²

(1. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

(2. Lanzhou Seismological Institute, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract

We analyzed the topographic effects and frequency spectrum characteristics of strong motion recordings in Longnan region where Wu-Guan freeway located and studied the simplifying and abstract process to regional characteristics of ground motion in seismic risk probability calculation. Applying the topographic effects and frequency spectrum characteristics of strong motion recordings to adjust the calculation results of seismic risk probability for major engineering, we obtained the design ground motion parameters with regional characteristics. The results show that there are certain differences between the calculation results of seismic risk analysis and the analysis results of regional seismic characteristics. Basing on ground motion characteristics, we adjusted the power amplification coefficient β_{\max} and characteristic period T in the calculation results of seismic risk analysis to give the seismic design ground motion parameters which was fit for the study region.

Key words: design ground motion parameters; regional characteristics; response spectrum; characteristic period; Wu-Guan freeway