

陇东黄土高原地区建筑抗震设防参数研究

王爱国^{1,2}, 赵泽贤^{1,2}

(1. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局地震预测研究所兰州科技创新基地, 甘肃 兰州 730000)

摘要:通过对陇东黄土高原区地质构造环境、历史地震影响与破坏特征、概率地震危险性计算等几方面的研究,对该区地震动参数特征进行了分析,研究了该区黄土场地及地形地貌对地震动参数的放大效应与分区特征。研究表明,陇东黄土高原地区的地震影响主要来自中远距离的大震,地震动持续时间长,长周期部分相对丰富,黄土场地及地形对地震动具有明显的放大效应,地震动参数具有明显的地貌分区特性。最后对比地震动参数区划图给出了陇东黄土高原地区建筑抗震设防参数的一些建议,认为在抗震设防参数取值中适当提高特征周期,对峰值加速度则按地貌分区取值。

关键词: 抗震设防参数; 黄土高原; 陇东

中图分类号: P315.911

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2012)01-0078-06

Study on the Seismic Fortification Parameters in the Loess Plateau of Eastern Gansu Province

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

(1. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, China;

2. Lanzhou Base of Institute of Earthquake Prediction, CEA, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The feature of earthquake ground motion parameters of loess plateau in the eastern Gansu province are analyzed on the basis of geological tectonic environment, historic earthquake influence, building damaging features and earthquake risk probability calculation. The amplification factor and landform zoning of the seismic parameters are studied by the seismic response analysis of loess site and topography characters. The research shows that the earthquake impact is mainly caused by strong earthquake from long distance and the earthquake duration time of ground motion is longer in which the long-period component is abundant. The thick loess and landform have significant amplification to the earthquake ground motion and the seismic parameters have landform zoning behavior. Comparison with the seismic ground motion parameter zonation map, some suggestions to the seismic fortification parameters are proposed for the loess plateau in eastern Gansu province.

Key words: Earthquake fortification parameters; Loess plateau; The eastern Gansu province

0 引言

陇东黄土高原主要指位于六盘山以东、子午岭以西的甘肃庆阳地区,是我国典型的黄土发育区(图1)。黄土分布高程一般为1 400~1 600 m,地势西

北高,东南低,第四系黄土沉积厚度由北向南逐渐减薄,至董志塬厚约250 m。区内泾河及其支流纵横其中,形成南部保存最完好的黄土塬及北部沟壑纵

收稿日期: 2009-05-20

基金项目: 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); 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2012006

作者简介: 王爱国(1972-),男(汉族),湖北洪湖人,副研究员,主要从事地震地质、工程地震及数值模拟方向的研究。

横的黄土梁峁地貌^[1],河流最大切割深度达 300 m。

该区位于鄂尔多斯台地西南部,大地构造属于华北地台鄂尔多斯中坳带南段和鄂尔多斯西缘褶皱带^[2]。根据《中国地震动参数区划图》(GB18306—2001),该区基本水平地震动峰值加速度 0.05~0.10 g,特征周期 T_g 为 0.45 s,相应地震烈度 VI~VII 度^[3]。由于区内活动构造不发育,地震活动水平较低,建筑抗震设防工作一直重视不够。2008 年 5 月 12 日四川省汶川 $M_s8.0$ 特大地震给距离震中最近 540 km 的陇东地区带来巨大损失^{[4]①},特别是几栋新建小高层建筑的受损,引起政府对于抗震设防工作的高度重视。在灾后重建工作中,庆阳市人民政府印发通知^②,要求灾后重建工程设防在国家新的标准未颁布以前将灾后重建项目及新建建筑设

防标准统一提高 1 度进行设防,对学校、医院、商场、高大公共建筑等人流密集、使用功能特殊的房屋建筑和电力、广播电视、邮电、通讯、道路桥梁、交通运输等生命线工程及抗震防灾、党政军首脑、应急指挥中心所在的办公建筑,则要求按 VIII 度加强抗震构造措施。

黄土地区的地震地质背景和地震活动环境以及其特有的地形地貌和黄土厚度等决定了其地震地面运动规律有其自身的特性^[5],陇东黄土高原地区尤为特殊。本文以陇东黄土高原西峰市及环县为例,对黄土高原地区建筑抗震设防参数进行研究,以期对黄土高原地区建筑抗震设防提供合理有效的参考。

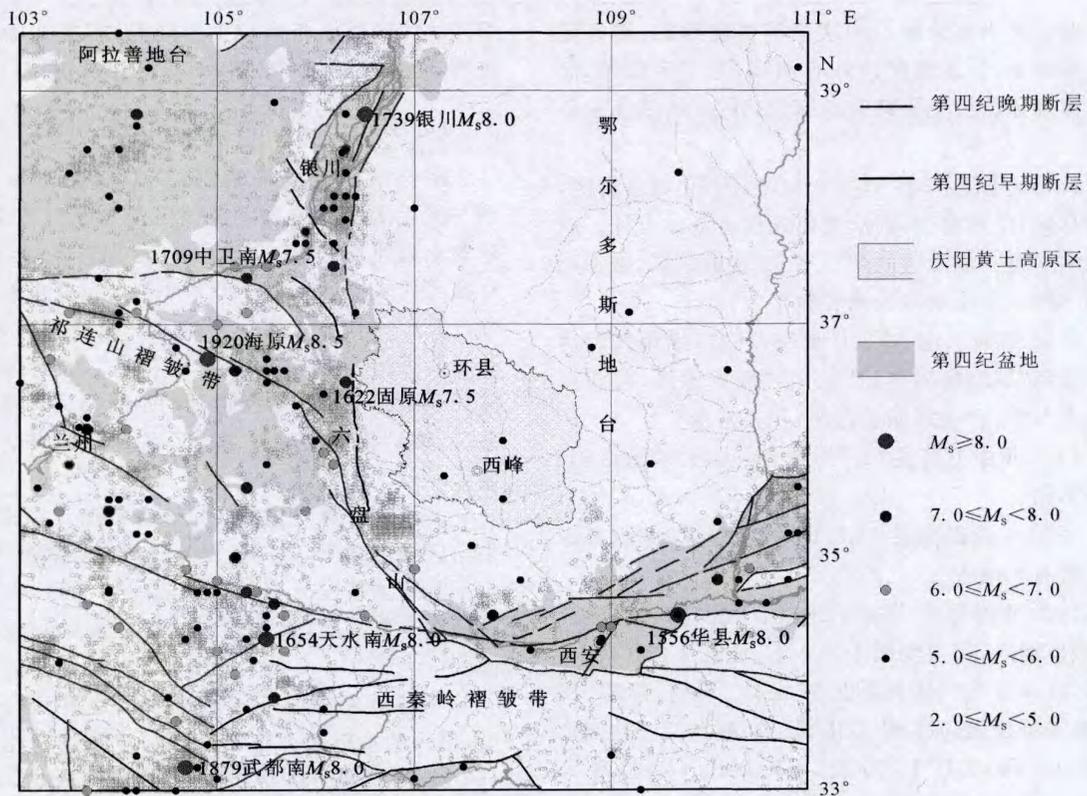


图 1 陇东黄土高原地理位置及区域地震构造图

Fig. 1 The geographical position and the seismotectonic map of eastern Gansu province.

1 历史地震影响及破坏特征 陇东黄土高原地区历史地震及近代小震活动水

平均较低,对该区造成的地震破坏主要来自鄂尔多

① 甘肃省地震局. 2008 年 5 月 12 日四川汶川 $M_s8.0$ 级地震灾害损失评估报告(甘肃灾区). 2008.

② 庆阳市人民政府办公室. 关于灾后重建工程质量管理地震设防工程监督检查验收的意见(庆政办发[2008]100 号). 2008.

斯块体西缘和南缘及外围 7 级以上强震的影响(图 1)。根据历史资料记载^[6-7],历史地震对陇东黄土高原最大影响烈度为Ⅶ度,影响烈度达到Ⅵ度以上的地震有 8 次(表 1),其中有确切资料达到Ⅶ度有 4

次。这些地震除 1622 年固原北 7 级地震与环县相距约 100 km 外,其余震中与陇东黄土高原的最近距离均大于 200 km,反映该区主要地震灾害来自远距离大震的影响。

表 1 主要历史地震对陇东黄土高原的影响烈度

序号	发震时间	震中位置			震级/M	震中烈度/I	最近距离/km	最大影响烈度/I
		纬度/°	经度/°	参考地名				
1	1556-02-02	34.50	109.70	陕西华县	8	XI	>200	Ⅶ
2	1622-10-25	36.50	106.30	宁夏固原北	7	IX	>90	Ⅵ~Ⅶ
3	1631-07-00	35.50	107.90	甘肃宁县	5	Ⅵ	本地	Ⅵ
4	1634-12-00	35.10	107.60	甘肃灵台	5½	Ⅶ	本地	Ⅶ
5	1654-07-21	34.30	105.50	甘肃天水南	8	XI	>200	Ⅶ
6	1709-10-14	37.40	105.30	宁夏中卫	7½	IX~X	>200	Ⅵ
7	1718-06-19	35.00	105.20	甘肃通渭南	7½	X	>190	V
8	1879-07-01	33.20	104.70	甘肃武都南	8	XI	>340	Ⅵ
9	1920-12-16	36.70	104.90	宁夏海原	8.5	XII	>210	Ⅵ~Ⅶ
10	2008-05-12	31.00	103.40	四川汶川	8.0	XI	>540	V~Ⅵ

对于黄土高原区的两次中等强度地震,震害记载比较简单,只是说明该区有地震,有一定破坏,而无具体描述。历史资料有详细记载的震害破坏主要有:

1556 年陕西华县 $M_s 8.0$ 地震:庆阳“城垣坍塌,城榭尽倾,山崖崩覆,穴居之民死伤者众以万计。府治后宅尽覆。城隍庙倾颓”;平凉“城垣尽摧,城中死者 10 余人,而山居穴处死者数千”。

1654 年天水南 $M_s 8.0$ 地震:环县“崩塌城垣房屋”;庆阳“城垣房屋俱圮”;宁县“墙屋悉倾,覆穴多压死者”;崇信“崩塌城堡窑庄,伤人甚众”。

1709 年中卫南 $M_s 7.5$ 地震:庆阳“墙垣多倒,人物不伤”。

1879 年武都南 $M_s 8.0$ 地震:镇原“城垣及四乡土窑有坍塌者”。

1920 年海原 $M_s 8.5$ 地震:宁县“衙署房屋摇平,城垣崩陷,房窑倒塌十之六七,压死 4 000 余人,牲畜 10 000 头”;庆阳“城楼、垛口、学校、寺庙、民房、衙署等建筑均震塌,东南城门崩裂尤甚。共倒窑房 15 394 间,民庄 1 209 处,压死 2 405 人,牲畜 26 000 余头”;环县“倒塌房屋十分之七,死 3 000 余人,牲畜 75 000 余头”。

看出上述破坏形式及人员伤亡主要以窑洞为主。由于黄土裂隙发育,加上窑洞本身无抗震措施,因此地震破坏相对较重。

2008 年汶川地震对陇东黄土高原建筑破坏也表现出明显的结构选择性和场地分区性^[3],以窑洞破坏最为严重,其次为高耸烟囱、水塔、薄长围墙、大跨度结构及高层建筑,反映出无抗震性能结构及长

周期结构的破坏相对较重。同时,震害在梁塬上比较重,而沟谷区相对较轻;黄土区相对重,基岩区轻。

2 陇东地区概率地震危险性计算

综合中国地震局编制 2001 地震动参数区划图^[3]所用潜源划分方案及该区最新研究成果,取陇东黄土高原周边 250 km 半径范围作为计算区域,对该区代表性地点西峰市和环县进行概率地震危险性计算。计算中地震动衰减关系经过对比分析,选用了俞言祥 2004 年对青藏高原东北缘地区烈度衰减关系统计结果及转换得到的地震动反应谱衰减关系^[8],该结果能比较真实的反映本区地震动传播特性。

表 2 为计算得到的结果综合数据。对比计算结果与区划图结果,以中硬场地进行系数调整^[9],该区水平峰值加速度分档与区划图保持一致,但西峰地震烈度有所提高,反映黄土地区烈度的衰减相对较慢。

对各概率水准下的基岩水平地震动峰值加速度,最大的贡献潜源主要来自与计算场地相距大于 150 km 的海原 8.5 级潜源,其次有固原北 7.5 级潜源、礼县 8.0 级潜源及中卫 8.0 级潜源。相应的等效震级 M 与等效距离 R 均比较大,显示本区的地震影响主要来自远距离大震,与历史地震破坏记载一致。采用麦圭尔 90% 能量持时公式^[10]

$$\ln(T_d) = 0.19 + 0.15M + 0.35\ln R$$

计算地震动持续时间,得到各概率水准下地震动 90% 能量持时均大于 20 秒,比西北地区一般场地持时高出约一倍,可见远距离大震的直接影响之一是地震动持时的大幅增加,加大了结构特别是软弱结

构破坏的可能性。

表 2 陇东黄土高原地震危险性分析计算结果

场点	50 年超越概率	地震烈度/ <i>I</i>	PGA/gal	等效震级/ <i>M</i>	等效距离 <i>R</i> /km	90% 能量持时/s	最大贡献潜源
西峰	63.5%	5.6	20.0	7.51	207.4	23.9	海原 8.5, 固原 7.5, 礼县 8.0
	10%	7.0	55.1	8.17	175.6	25.1	海原 8.5
	2%	7.7	94.5	8.39	159.2	25.2	海原 8.5
环县	63.5%	5.7	22.8	7.38	151.0	21.2	海原 8.5, 固原 7.5, 中卫 8.0
	10%	7.1	67.3	8.23	146.2	23.8	海原 8.5
	2%	7.9	111.0	8.44	140.7	24.2	海原 8.5

图 2 为计算得到的西峰及环县不同概率水准下的基岩地震动反应谱曲线。从图可以看出,两地的基岩反应谱特征周期均比较大,在 50 年超越概率 63.5%、10% 和 2% 三个水准下,特征周期 T_g 分别为 0.4 s、0.5 s 和 0.6 s,已经比地震动参数区划图一般场地条件高,低概率事件情况下尤为突出。

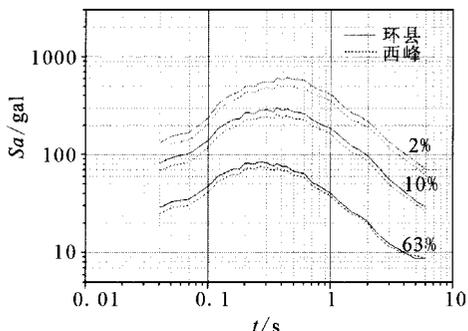


图 2 西峰与环县不同概率水准下的基岩地震动反应谱曲线

Fig. 2 The response spectrum curves of bedrock ground motion in Xifeng and Huanxian under different exceeding probabilities.

3 黄土场地的放大作用

本区地表虽然沟壑纵横交错,但梁塬顶面基本为一微倾斜的平面,地层发育情况也很稳定。根据

表 3 浅部黄土相应剪应变下的平均剪模比 G/G_0 和阻尼比 D 值

参数	剪应变 $\gamma/10^{-4}$							
	0.005	0.1	0.5	1	5	10	50	100
G/G_0	0.996 7	0.993 4	0.968 0	0.938 0	0.751 5	0.601 9	0.232 2	0.131 3
D	0.003 5	0.006 9	0.030 1	0.051 9	0.123 4	0.149 1	0.178 8	0.183 4

根据前面概率地震危险性分析计算结果,生成西峰及环县不同概率水准下的基岩地震动时程各 3 条,采用一维等效线性化方法,进行剪切土层地震反应分析,得到地表地震动时程及反应谱(图 4)。表 4 对计算结果进行了总结。可以看出,在黄土高原区

区域地质图^[11]及该区实地调查情况,该区典型地层剖面如图 3 所示,地表为厚度大于 250 m 的第四纪黄土,下部为第三系及白垩系粘土岩、砂岩、砂质泥岩、泥岩。塬面区岩土工程勘察资料及地震安评报告揭示^{[12]③},第四系黄土剪切波速总体随深度线性增大,地表剪切波速约 150 m/s,至约 60 m 深度达到 500 m/s。该区场地土总体为中软土,场地类别为 III 类,浅部黄土的平均土动力学参数如表 3。

时代	柱状图	厚度/m	岩性
Q_4^u		1	表层耕土及人工填土
Q_{3m}		10	浅灰黄疏松黄土,底部占土壤
Q_{3s}		32	上部淤积黄土,下部灰黄色砾石层及灰色亚砂土
Q_{21}		91	浅灰黄色黄土夹棕红色古土壤
Q_{1s}		155	上部淡褐红色石质黄土,下部砂砾层夹砂质土
N_1		20	砖红色粘土
K_1		>200	紫红色泥岩、砂质泥岩夹砂岩

图 3 黄土高原典型黄土地层剖面

Fig. 3 Typical stratigraphic section in loess plateau.

场地土对地震动峰值加速度的放大倍数基本为 1.8 ~ 2.0,超越概率越大,放大倍数越大。考虑深部黄土相对较硬且密实,而计算采用的黄土动力学参数为浅层黄土参数,建议放大倍数取为 1.8。黄土场地对高概率地震动反应谱特征周期有放大作用,但

③ 兰州地震工程研究院. 甘肃庆阳电信枢纽楼工程场地地震安全性评价报告. 2004.

低概率事件则不明显,反应谱特征周期总体在 0.6 s 左右。对比《建筑抗震设计规范》GB50011-2001,西峰与环县设计地震分组均为第三组,对Ⅲ类场地,特征周期对应为 0.65 s,与计算结果基本一致,可直接采用。

表 4 陇东黄土高原场地对地震动参数的放大结果

场地	50年超越概率	基岩 PGA/gal	地表平均 PGA/gal	PGA放大系数	地表 T _g /s
西峰	63.5%	20.0	38.4	1.92	0.6
	10%	55.1	105.9	1.92	0.6
	2%	94.5	171.0	1.81	0.6
环县	63.5%	22.8	47.05	2.06	0.5
	10%	67.3	125.4	1.86	0.6
	2%	111.0	200.4	1.81	0.6

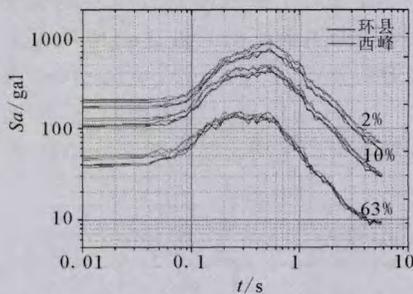


图 4 黄土地层地表地震动反应谱曲线

Fig. 4 The response spectrum curves of ground motion on the loess surface.

4 黄土高原地形的放大作用

陇东黄土高原地形地貌特殊,沟谷切割深度大,地貌上以梁塬为主(图 5),这种地形地貌对于地震动也有较强的放大作用。《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)对于地形放大调整系数有一定的规定^[13],以突出地形的相对高差 H 、坡降角度的正切 H/L 以及场址距突出地形边缘的相对距离 L_1/H 为参数,归纳了各种地形的地震力放大作用调整系数 λ :

$$\lambda = 1 + \xi\alpha$$

其中 ξ 为附加调整系数,与场址距突出地形边缘的相对距离 L_1/H 相关; α 为突出地形地震动参数的增大幅度,与突出地形的相对高差 H 及坡降角度的正切 H/L 相关。

为研究陇东黄土高原地形对地震动的放大作用,对该区梁塬崩地形的边坡进行了统计研究。统计数据表明,黄土高原区边坡类型基本可划分为三类,即塬边坡、梁边坡与梁塬崩地貌边坡带发育的深切冲沟(图 5)。其中塬边坡相对比较缓,梁边坡次之,深切冲沟坡度最陡,各类边坡的参数如表 5。

对比《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001),梁边坡与塬边坡的地震动增大幅度 α 为 0.3,深切

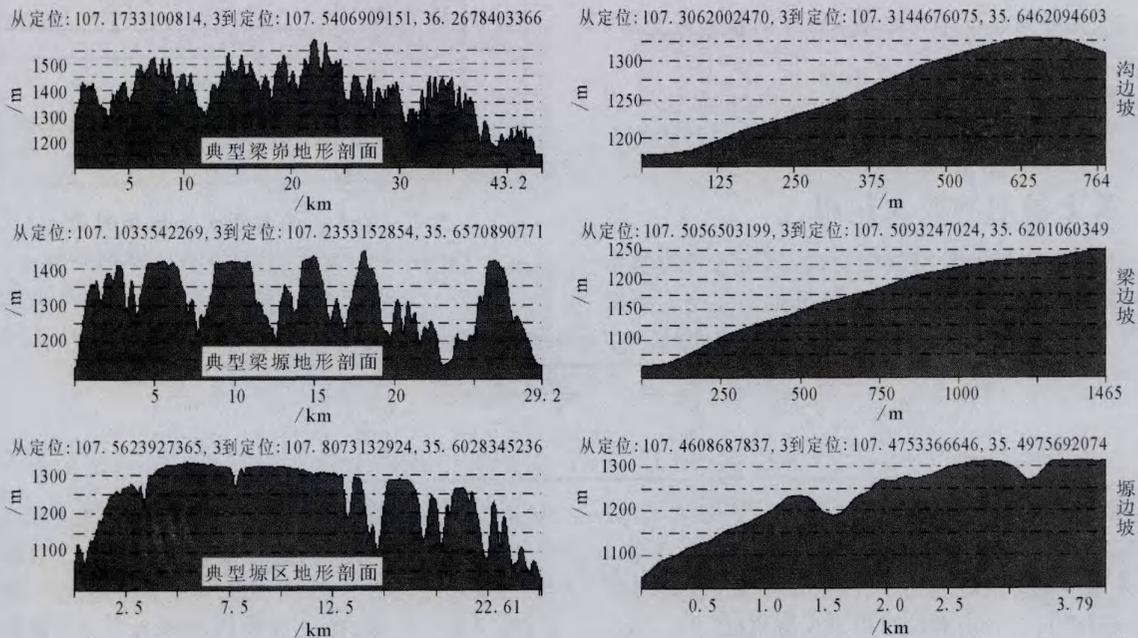


图 5 陇东黄土高原区典型地貌剖面及边坡

Fig. 5 Typical geomorphology profiles and side slopes in eastern Gansu province.

表 5 陇东黄土边坡地形参数及地震动地形调整系数

参数	塬边坡	梁边坡	深切冲沟
切割深度 H/m	250±	200±	150~200
边坡宽度[平均] L/km	2.5~4.0[3.0]	1.3~2.0[1.5]	0.4~0.6[0.5]
坡降角正切值 H/L	0.08	0.13	0.35
地震动增大幅度 α	0.3	0.3	0.4
附加调整系数 ξ	1、0.6、0.3	1	1
地形放大系数 λ	1.3、1.18、1.09	1.3	1.4
总放大系数($\times 1.8$)	2.3、2.1、2.0	2.3	2.5

冲沟的地震动增大幅度 α 为 0.4。由于梁峁与深切冲沟顶面无宽阔台地,其附加调整系数 ξ 均取 1;而对于黄土塬来说,以距塬面边坡距离 0.62 km、1.25 km 为界, ξ 分别取 1、0.6 和 0.3。因此,深切冲沟地震动参数放大系数 λ 为 1.4,梁边坡 λ 为 1.3,塬边坡 λ 则以距塬面边坡距离 0.62 km、1.25 km 为界,可分别取 1.3、1.18、1.09。可见,塬面中间黄土地形放大作用不明显,而梁峁地貌区地震动则有较大的放大作用。综合黄土场地放大效应,该区地震动放大达 2.0~2.5 倍。

5 陇东黄土高原抗震设防参数特征与建议

以上分析、计算及统计数据均表明,陇东黄土高原地区由于地理位置、构造环境、场地土条件、地形地貌等多方面的影响,地震动参数的确定有其特殊性。综合各项研究结果该区地震动具有如下几个特征:

(1) 基岩峰值加速度与区划图基本一致,但特征周期比区划图大;

(2) 地震影响以远距离大震为主,地震动持时,长周期成分明显丰富;

(3) 黄土场地覆盖层厚,岩层稳定,场地土多为中软土,场地类别为 III 类,厚层黄土场地对地震动峰值放大倍数集中于 1.8,对反应谱特征周期有放大并集中于 0.6 s 附近;

(4) 陇东黄土高原地区黄土地形具有明显的边坡分类特征与一致性,塬梁峁边坡及边坡深切冲沟均有相对稳定的边坡形状,地形对地震动的放大有明显的地貌分类性。

因此,简单按照《中国地震动参数区划图》(GB18306-2001)确定抗震设防参数,许多地区不能满足抗震设防的要求。根据该区地貌特征建议对地震动参数的确定以地貌来分区。

由于梁塬边坡附近的深切沟谷一般没有建筑,加之现有建筑多搬迁至平整场地,综合考虑地震动

持时、反应谱和峰值加速度的特征,对陇东黄土高原地区一般建筑抗震设防方法提出如下地貌分区设防建议:

(1) 基岩及河谷地区 峰值加速度按区划图取值,特征周期适当提高取 0.55 s;

(2) 梁峁、塬边(塬边距小于 1 km)和沟谷黄土场地区 峰值加速度按区划图取值放大,0.05 g → 0.15 g,0.10 g → 0.20 g,0.15 g → 0.20 g;特征周期取 0.65 s;

(3) 塬区中部(塬边距大于 1 km) 峰值加速度按区划图取值放大,0.05 g → 0.10 g,0.10 g → 0.15 g,0.15 g → 0.20 g;特征周期取 0.65 s。

[参考文献]

- [1] 李萍,薛振年,王治军,等. 陇东地区黄土工程地质特征[J]. 地球科学与环境学报,2004,26(2):59-62.
- [2] 李清河,郭守年,吕德徽. 鄂尔多斯盆地西缘与西南缘深部结构与构造[M]. 北京:地震出版社,1999.
- [3] 中华人民共和国国家标准. 中国地震动参数区划图(GB18306-2001)[S]. 北京:地震出版社,2001.
- [4] 王爱国,杨晓鹏,李明水,等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震对甘肃陇东地区的破坏影响与特征分析[J]. 西北地震学报,2009,31(1):80-85.
- [5] 石玉成,卢育霞. 甘肃黄土地区地震动持续时间预测研究[J]. 甘肃科学学报,2005,17(3):35-39.
- [6] 国家地震局震害防御司. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)[M]. 北京:地震出版社,1995.
- [7] 国家地震局震害防御司. 中国近代地震目录(公元 1912 年—1990 年 $M_s \geq 4.7$)[M]. 北京:中国科学技术出版社,1999.
- [8] 俞言祥,汪素云. 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,2004,26(6):591-600.
- [9] 寿德主编. GB17741-2005《工程场地地震安全性评价》宣贯教材[S]. 秦皇岛:中国标准出版社,2006.
- [10] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京:地震出版社,1999.
- [11] 甘肃省地质局区域地质调查队. 1/20 万区域地质图 I-48-06(镇原幅)[M]. 兰州:甘肃省地质局,1980.
- [12] 石玉成,蔡红卫,孙崇绍. 黄土地区场地的地震地面运动参数特征[J]. 西北地震学报,1998,20(3):66-72.
- [13] 中华人民共和国国家标准. 《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.