

汶川地震动弹性和弹塑性反应谱分析

王东升^{1,2}, 李晓莉^{1,2}, 孙治国^{1,2}, 陈宝魁^{1,2}, 石岩^{1,2}

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所 辽宁 大连 116026; 2. 辽宁省公路工程重点实验室 辽宁 大连 116026)

摘要: 利用汶川地震获得的数字强震记录研究了汶川近场无速度脉冲、近场含速度脉冲和远场(盆地效应)地震动的弹性和弹塑性反应谱,后者包括等延性强度折减系数谱 R_u 、等延性位移比谱 C_u 和等强度折减系数位移比谱 C_R 。与相同场地条件 PEER 近场无速度脉冲、集集近场含速度脉冲地震动的谱进行了比较。汶川近场含速度脉冲地震动的弹性反应谱在 0.2 ~ 0.8s 周期内明显偏小,而它的弹塑性反应谱在短周期段(0.1 ~ 0.4 s)与汶川近场无速度脉冲地震动谱差别不大,但等延性强度折减系数谱 R_u 要大于集集地震含速度脉冲地震动的谱,而等延性位移比谱 C_u 和等强度折减系数位移比谱 C_R 则小于集集地震情况,此后随周期增长(至 0.6 ~ 1.0 s 后)它们都逐渐过渡至与集集地震动的谱相当。汶川远场(盆地效应)地震动的弹性反应谱具有较宽并随周期缓慢增长的平台值和较长的特征周期,可达 1.7s 及以上。提出了远场(盆地效应)与近场地震动的弹性反应比谱和弹塑性位移比谱的概念。

关键词: 汶川强震记录; 弹性反应谱; 弹塑性反应谱; 近场; 速度脉冲; 盆地效应

中图分类号: P315.9; U443.21; P315.6

文献标志码: A

Elastic and elastoplastic response spectra of the Wenchuan earthquake ground motions

WANG Dongsheng^{1,2}, LI Xiaoli^{1,2}, SUN Zhiguo^{1,2}, CHEN Baokui^{1,2}, SHI Yan^{1,2}

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Key laboratory of Highway Engineering of Liaoning Province, Dalian 116026, China)

Abstract: The elastic and the elastoplastic response spectra of the near field records without pulse-like wave, near-field records with pulse-like wave and far field records with basin effects were studied by statistic analysis method using digital ground motion records in Wenchuan earthquake. The strength reduction factor spectra with constant ductility(R_u), the displacement ratio spectra with constant ductility(C_u), and the displacement ratio spectra with constant strength reduction factor(C_R) were included in the inelastic spectra of the Wenchuan earthquake records. By comparing with the response spectra of the PEER near field ground motions without pulse-like wave and the Chi-Chi ground motions with pulse-like wave on the same site, it can be drawn that the elastic response spectra of the Wenchuan near-field ground motions with pulse-like wave are obviously small in periods between 0.2 s and 0.8 s, and its elastoplastic spectra are almost the same with that of the Wenchuan near-field ground motions without pulse-like wave in periods between 0.1 s and 0.4 s, but the R_u spectrum is bigger and the displacement ratio C_u and C_R spectrum are smaller than that of the Chi-Chi ground motions. When the period is longer than 0.6 ~ 1.0 s, all the inelastic spectra of the Wenchuan pulse-like wave ground motions are beginning to be equal to that of the Chi-Chi

收稿日期: 2013 - 02 - 07; 修订日期: 2013 - 03 - 10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178071, 51008041, 50878033); 国家重点基础研究发展计划(973项目)(2011CB013605); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-12-0751)

作者简介: 王东升(1974 -), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁及结构抗震研究。E-mail: dswang@dlmu.edu.cn

ground motions. The platform of the elastic response spectra of the Wenchuan far field ground motions with basin effects is wide and the values are increasing with the periods gently, and the characteristic period of the spectra can reach to exceed 1.7s. The concept of elastic displacement response ratio spectra and elastoplastic displacement ratio spectra between far-field ground motions with basin effects and near-field ground motions are proposed.

Key words: records of Wenchuan earthquake; elastic response spectra; elastoplastic response spectra; near field; pulse-like wave; basin effects

引言

2008年汶川大地震获得了大量高质量的数字强震记录,填补了中国大陆大震近场加速度记录空白,从世界范围看也是首次获得8级内陆大震强震记录,与其相关的地震动特性研究将具有重要价值。本文将汶川强震记录依台站区分为近场(断层距小于50 km)无速度脉冲、近场含速度脉冲和远场盆地(震中距大于400 km的陕西省关中盆地)3类,考虑场地条件后以弹性和弹塑性反应谱为手段,并与1999年台湾集集地震近场含速度脉冲地震动和PEER近场无速度脉冲强震记录作比较分析,以获得汶川地震动特性的深入理解与认识。

1 弹塑性反应谱基本方程与类别

1.1 弹塑性反应谱的基本方程

作者在文献[1,2]给出了以强度折减系数表示的小阻尼比下弹塑性反应谱的基本方程:

$$\ddot{\mu}_x(t) + 2\xi_x \omega_x \dot{\mu}_x(t) + \omega_x^2 \frac{f(x,t)}{f_{x,y}} = -\frac{\omega_x^2 \cdot R_x}{\beta_x(\omega_x, \xi_x)} \frac{\ddot{x}_g(t)}{\max(|\ddot{x}_g|)} \quad (1)$$

式中 μ_x 为反应的位移延性系数; ω_x 为系统圆频率; ξ_x 为阻尼比; $f_{x,y}$ 为系统屈服力; $f(x,t)$ 是系统的恢复力; R_x 为强度折减系数,为体系弹性地震力与屈服力的比值; $\beta_x(\omega_x, \xi_x)$ 为地震波 $\ddot{x}_g(t)$ 的弹性反应谱(放大系数谱)。

式(1)中 $\beta_x(\omega_x, \xi_x)$ 反映了地震动的频谱特性, $f(x,t)/f_{x,y}$ 反映了系统的滞回特性,因此弹塑性反应谱是地震动频谱特性和结构反应非线性性质的综合反映。利用该式和弹性反应谱极限性质,可以在数学上相对严格地证明:(理想弹塑性系统)强度折减系数的两个极限性质:(1) $\omega_x \rightarrow 0, R_x = \mu_x$;(2) $\omega_x \rightarrow \infty, R_x = 1$ ^[3,4]若假定 R_x 为常数,对式(1)直接进行数值积分可获得等强度折减系数的延性需求谱(简称等强度延性需求谱 μ_R);若假定 μ_x 保持恒定,可通过一定迭代算法获得等延性系数的强度折减系数谱(简称等延性强度折减系数谱 R_μ)。因为同一个位移延性系数可对应多个强度折减系数 R_x ,计算中要取最小的强度折减系数值。另外,等强度延性需求谱 μ_R 在理论上不很完备,因 $\omega_x \rightarrow \infty, R_x = 1$,而假定 R_x 的值不满足此条件,将在短周期处产生较大误差和较大的统计变异系数。

式(1)明确了弹塑性反应谱涉及的基本参数。若以其它强度参数,如屈服力与重力比、屈服力与地震拟静力(质量乘以加速度峰值)比等建立弹塑性谱,因其与结构周期对应的弹性反应存在耦联,不很可取。式(1)的隐含假定是以PGA作为地震动标定参数,若引入其它标定参数,如PGV或谱加速度 $S_a(T)$ 等则需要对式(1)适当修改。

式(1)左右乘以屈服位移 x_y ,就可以获得弹塑性单自由度体系的一般方程。从而可明确单自由度体系弹塑性反应的计算参数为:屈服位移、强度折减系数和位移延性系数,前者为独立参数,后两者由式(1)约束($R-\mu-T$ 关系)。为此有学者发展了屈服位移(或屈服点)谱,作者亦将其组合提出了 A_y-D_y 格式的地震需求谱^[5,6]。

1.2 弹塑性反应谱分类与统计特性

早期弹塑性反应谱研究目的更多是为基于强度抗震设计提供“折减系数”的理论依据^[7],二十世纪90

年代中期随基于性能抗震设计的提出, 弹塑性反应谱研究更多关注位移或延性需求的求解, 由此发展了位移比谱, 以利用弹性反应位移估计弹塑性位移^[4, 8-13]。

在地震动 i 作用下, 单自由度系统弹性和弹塑性反应的最大位移可表示为如下关系:

$$\frac{S_{d_p}^{(i)}}{S_{d_e}^{(i)}} = \frac{\mu^{(i)}}{R^{(i)}} \quad (2)$$

式中, $S_{d_e}^{(i)}$ 为系统弹性最大位移; $S_{d_p}^{(i)}$ 为系统弹塑性最大位移; $R^{(i)}$ 为在第 i 条地震动作用下系统的强度折减系数 $R^{(i)} = F_e^{(i)} / F_y$, $F_e^{(i)}$ 为系统弹性反应地震力, F_y 为系统的屈服力; $\mu^{(i)}$ 为位移延性系数。

式(2)也可理解为地震动 i 对应的不同“谱”之间的关系, 等号左侧可定义为位移比谱。考虑多条地震动的统计平均(用数学期望 $E(\cdot)$ 表述), 当 $R^{(i)}$ 为常数时为等强度折减系数位移比谱($= E(u^{(i)}) / R$), 其与等强度延性需求谱 $\mu_R (= E(\mu^{(i)}))$ 仅相差 $1/R$ 常数倍, 二者统计特性具有确定性关系; 当 $\mu^{(i)}$ 为常数时为等延性位移比谱 $C_u (= E(1/R^{(i)}) \cdot \mu)$, 其与等延性强度折减系数谱 $R_\mu (= E(R^{(i)}))$ 在统计特性上不存在确定性关系, 并且理论和地震动统计分析都可证明: 当采用前者计算弹塑性位移时, 准确性要好于后者^[14, 15]。

综上所述, 汶川地震动弹塑性反应谱主要考虑等延性强度折减系数谱 R_μ 、等延性位移比谱 C_u 和等强度折减系数位移比谱 C_R 。前两者主要用于新建结构的抗震设计, 后者主要用于既有结构的抗震评估。

2 汶川强震记录选择与分组

在汶川地震公开的强震记录数据库中选择断层距 ($R < 50$ km) 以内的 II 类场地 14 个近场台站记录^[16-20], 并依据台站水平强震记录速度时程中至少一个分量是否含有速度脉冲分为 2 组: 不含速度脉冲的为第 1 组, 共 9 个台站, 18 条水平向地震动; 含速度脉冲的为第 2 组, 共 5 个台站, 10 条水平向地震动。这种分组的目的是满足同一台站双向水平强震记录物理上不宜分割。我们曾采用同样方式对 1999 年台湾集集地震近场强震记录进行过分析, 含有速度脉冲的记录较多发生在垂直断层的 EW 分量, 但在 EW 和 NS 两个分量上都存在速度脉冲的台站记录也不少, 计算表明 EW 分量和 NS 分量的弹性放大系数谱相差不大^[21]。

本文采用人工方式判读强震记录是否具有速度脉冲, 综合采用自编、Bispec 和 Seismosignal 等软件由加速度记录获得速度时程。文献[22]采用小波方法分析了汶川近场地震动的速度脉冲特性, 主要研究震级、距离对速度脉冲的周期和幅值参数的影响。其识别的含有速度脉冲的强震记录的台站与本文比较: 安县塔水(本文划分为第 1 组)和大邑银屏(文献[22]认为其属于晚到脉冲而被剔除); 其余 4 个台站结论相同。至目前为止速度脉冲尚未有严格定义。

参考上述近场台站场地 30 m 深度平均剪切波速, 以 PEER 强震记录数据库为基础, 分别选取了中硬土地(对应 USGS 的 C 类) 10 个台站记录(断层距 $20 \text{ km} < R < 60 \text{ km}$) 和 1999 年台湾集集地震中硬土地 11 个含有速度脉冲的近场台站地震动记录(断层距 $R < 10 \text{ km}$), 以开展汶川近场地震动弹性和弹塑性反应谱研究及对比分析工作。

还选择了位于 III 类场地陕西省关中盆地的 5 个台站记录(震中距 400 km 以上)和甘肃省的 1 个台站记录(武都台, 断层距 $R = 50 \sim 100 \text{ km}$), 目的是研究大震在具有盆地地质构造背景的深厚覆盖层软土地产生的远场长周期放大效应(盆地效应)。

公开的汶川强震记录仅做了简单的零线调整, 本文在计算中首先对强震记录进行了滤波处理, 考虑仪器响应特性和数字强震仪的长周期特性采用 50 Hz ~ 0.1 Hz 的带通滤波。彭小波等^[19]对汶川强震记录处理后认为: 在周期 15 s 以内其对弹性反应谱和傅氏谱的影响较小。国外学者^[23-25]对滤波对

表 1 汶川地震近场强震记录基本情况
Table 1 Near field ground motion records in Wenchuan earthquake

台站 编号	台站 名称	场地 条件	加速度峰值 PGA(g)		分组
			EW 方向	NS 方向	
51JYC	江油重华	II 类	0.297	0.278	第 1 组
51QLY	邛崃油榨	II 类	0.173	0.199	第 1 组
51LXT	理县桃平	II 类	0.339	0.342	第 1 组
51LXM	理县木卡	II 类	0.320	0.283	第 1 组
51WCW	汶川卧龙	II 类	0.957	0.652	第 1 组
51SFB	什邡八角	II 类	0.556	0.581	第 1 组
51AXT	安县塔水	II 类	0.289	0.203	第 1 组
51MXN	茂县南新	II 类	0.421	0.349	第 1 组
51MXD	茂县叠溪	II 类	0.246	0.206	第 1 组
51JYD	江油地震台	II 类	0.511	0.458	第 2 组
51JYH	江油含增	II 类	0.519	0.350	第 2 组
51MZQ	绵竹清平	II 类	0.824	0.622	第 2 组
51DYB	德阳白马	II 类	0.126	0.136	第 2 组
51DXY	大邑银屏	II 类	0.135	0.127	第 2 组

弹性位移谱和弹塑性反应谱的影响亦有研究,一般情况下滤波对弹塑性谱影响要大,但总体上可认为本文计算周期至5 s的谱值是可信的。

表1给出了汶川地震近场强震记录基本情况及分组。表2给出了汶川地震III类场地强震记录基本情况(除武都台外,均属远场盆地效应)。PEER中硬土强震记录和集集地震强震记录情况,限于篇幅,可参考文献[2, 21]。

表2 汶川地震III类场地强震记录情况

Table 2		Ground motion records of Wenchuan earthquake on site III			
台站 编号	台站 名称	场地 条件	加速度峰值 PGA(g)		备注
			EW 方向	NS 方向	
62WUD	武都	III类	0.184	0.164	近场
61CAT	草滩	III类	0.054	0.048	远场
61DAL	大荔	III类	0.031	0.031	远场
61HUX	华县	III类	0.030	0.028	远场
61LID	齐店	III类	0.033	0.036	远场
61WEN	渭南	III类	0.036	0.030	远场

3 汶川近场地震动的弹性和弹塑性反应谱

3.1 汶川近场地震动的弹性反应谱

图1给出了汶川地震近场第1组地震动和第2组地震动弹性反应谱(放大系数),比较汶川第1组和第2组地震动的差别:(1)第2组地震动反应谱在0.15 s前与第1组基本相同,但在达到峰值点后的0.2 s~0.8 s中短周期段,第2组地震动反应谱明显低于第1组地震动。在汶川地震部分极震区,水塔等高耸结构表现良好,其周期一般在上述范围之内,可能与此有关。(2)在大于1.0 s的长周期段,第2组地震动反应谱开始大于第1组地震动。这点与通常认为近场含速度脉冲地震动含有更多长周期成份是相符的。

图2给出了汶川地震近场II类场地弹性反应谱(放大系数)与建筑抗震设计规范(2010)反应谱的对比,可以看出汶川地震动的反应谱平台值约为2.50,大于规范谱值(2.25)。在长周期段当周期大于1 s时,规范II类场地反应谱值要大于汶川地震动的统计平均反应谱。在大于1.0 s的长周期段,第2组地震动反应谱虽然大于第1组地震动,但仍小于规范II类场地反应谱。

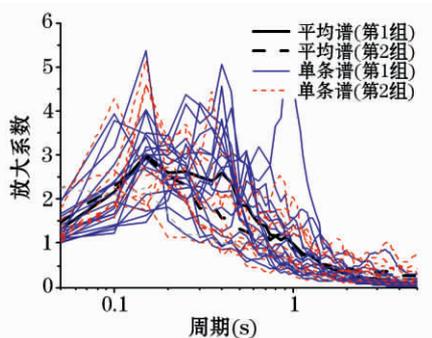


图1 汶川近场地震动弹性反应谱

Fig. 1 Elastic response spectra of Wenchuan near-field earthquake records

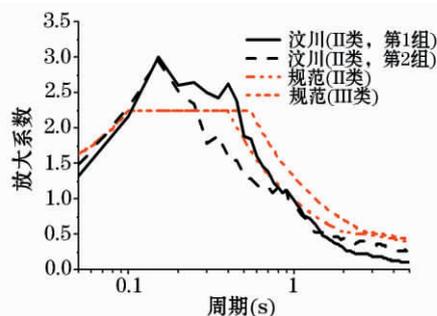


图2 汶川近场地震动弹性反应谱与规范谱的比较

Fig. 2 Comparison between elastic response spectra of Wenchuan near-field earthquake records and design spectra in code

图3给出了汶川地震动与PEER近场无速度脉冲地震动和1999年台湾集集地震近场含速度脉冲地震动反应谱的比较,后二者场地条件为USGS的C类,近似对应我国规范的II类及III类。仍可以看出汶川地震动的反应谱平台值要明显高于PEER地震动和集集地震动,但后两者的特征周期要大于前者。在大于1.0 s的长周期段,含速度脉冲的集集地震波和汶川第2组地震动亦表现出长周期成份丰富的特点;在0.1~0.8 s的中短周期段,集集地震动反应谱与PEER地震动反应谱呈现基本一致略小的特点,与汶川地震动第1组和第2组地震动存在明显差异有所不同。同时研究了这4组地震动平均反应谱的变异系数,总体认为差别不大。

通过上述比较,总体上认为汶川地震动在0.1~0.2 s附近的短周期成份更为丰富,其平台值约2.5,略大于规范反应谱平台值2.25。至于汶川近场含速度脉冲地震动在0.2~0.8 s周期内反应

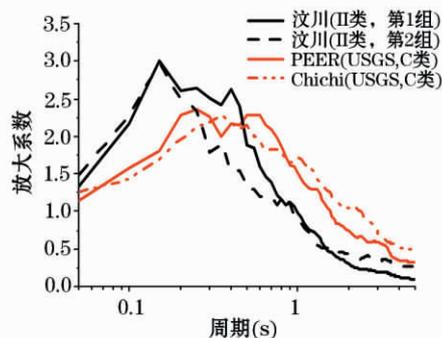


图3 汶川近场地震动反应谱与其它地震动平均反应谱的比较

Fig. 3 Comparison of response spectra between Wenchuan near-field ground motions and other earthquake records

较小的问题,可能与 Kagawa 等^[26]基于数值计算提出的大震伴随地表破裂,将使周期 1s 左右地震动成份缺失的地震学研究结论有关,但仍需对断层及场地破裂过程对不同距离强地震动的影响作深入研究。我国学者在汶川地震震害调查时也部分提到地震动成份缺失问题^[27]。另陆鸣等^[28]基于汶川卧龙、什邡八角和绵竹清平 3 个台站强震记录的分析,亦认为在 0.5 ~ 2 s 的周期段,汶川地震动弹性反应谱值很明显地小于未产生地表破裂的强震动的谱,后者如 1989 年美国 Loma Prieta 地震和 1994 年美国 Northridge 地震。

3.2 汶川近场地震动的弹塑性反应谱

3.2.1 等延性强度折减系数谱 R_μ

图 4 给出了汶川地震 II 类场地强震记录的等延性强度折减系数谱 R_μ ,可以看出:(1)在等位移准则成立前周期段(近似对应弹性反应谱的特征周期并随延性系数增长略有延长),汶川地震强震记录第 1 组的 R_μ 大于对照的 PEER 近场地震动和集集地震近场含速度脉冲地震动记录。(2)汶川地震动第 2 组和第 1 组在周期 0.05 ~ 0.3 s 左右相差不大,此后第 2 组很快(至 0.5 s)过渡到与集集近场含速度脉冲强震记录谱值相当,其等位移准则成立的初始周期也接近于集集地震近场含速度脉冲强震记录。(3)当位移延性系数为 6 时集集地震近场含速度脉冲强震记录和汶川地震第 2 组记录都表现出在相当长的周期范围内(至 4.0 s)等位移准则不成立,强度折减系数要小于位移延性系数,即此时采用等位移准则进行结构抗震设计将偏于不安全。

研究了它们的统计变异系数,总体上看是相当的。变异系数在 μ 等于 2 时,大约在 10% ~ 30%;在 μ 等于 4 和 6 时,可达 30% ~ 60%。

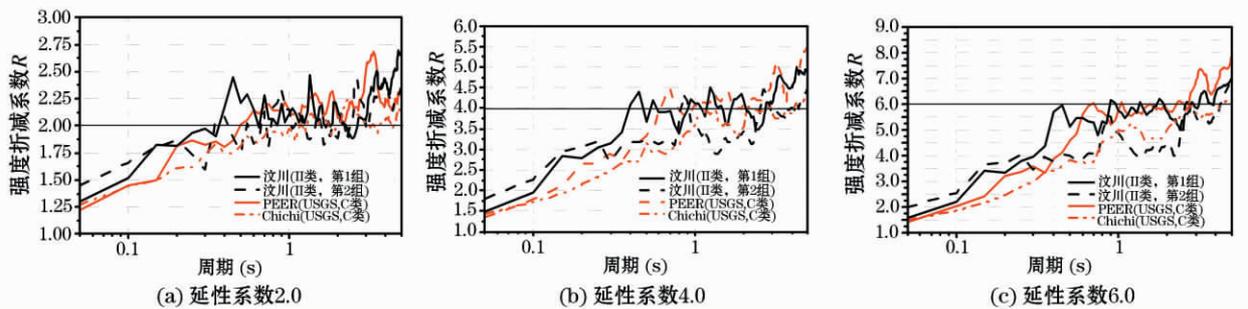


图 4 汶川近场地震动的等延性强度折减系数谱

Fig. 4 Strength reduction factor spectra with constant ductility for Wenchuan near field ground motions

3.2.2 等延性位移比谱 C_u

图 5 给出了等延性位移比谱 C_u ,可以看出:(1)在短中周期段(0.05 ~ 0.6 s) C_u 随周期增长而较快下降,相同周期对应的谱值随位移延性系数增加而增加。以 0.1s 结构为例,对应延性系数 $\mu = 2, 4$ 和 6 时,所有地震动的平均 C_u 分别为接近 1.3、2.1 和 3.1。(2)在中及更长周期段 C_u 逐渐接近 1.0,即等位移准则开始成立,但其初始成立的拐点周期与位移延性系数有关,随位移延性系数增长稍有延长。注意到位移延性系数 $\mu = 6$ 时, C_u 在较长的周期范围内(PEER 近场和汶川第 1 组地震动可达 3 s 以上)大于 1.0;对含速度脉冲的汶川地震动第 2 组和集集地震动几乎在整个周期内(至 5s), C_u 要大于 1.0(至少在 25% 以上),此时若利用等位移准则估计弹塑性位移将会得到偏于危险的结果,对近场有速度脉冲地震动尤甚。这点对近场含速度脉冲地震动在位移延性系数为 4 时也已显现。(3)比较近场含速度脉冲与无速度脉冲地震动差别:在 0.05 ~ 0.6 s 的短中周期段,具有速度脉冲的 C_u 汶川地震动第 2 组和集集地震动的分别为最小和最大值,汶川地震动第 1 组和第 2 组谱值差别要小。此后进入中长周期段,集集地震动 C_u 仍表现出大于 PEER 近场对照组的谱值,但汶川第 2 组地震动的 C_u 与第 1 组开始出现明显差别,并逐步过渡到与集集地震动的谱相当或略大。

研究了它们的统计变异系数,不同地震动间差异不大,总体上看其随位移延性系数的增加而增加,随周期的增长而略有增加。延性系数 $\mu = 2, 4$ 和 6 时对应的变异系数分别接近 10% ~ 30%、20% ~ 40% 和 20% ~ 50%。

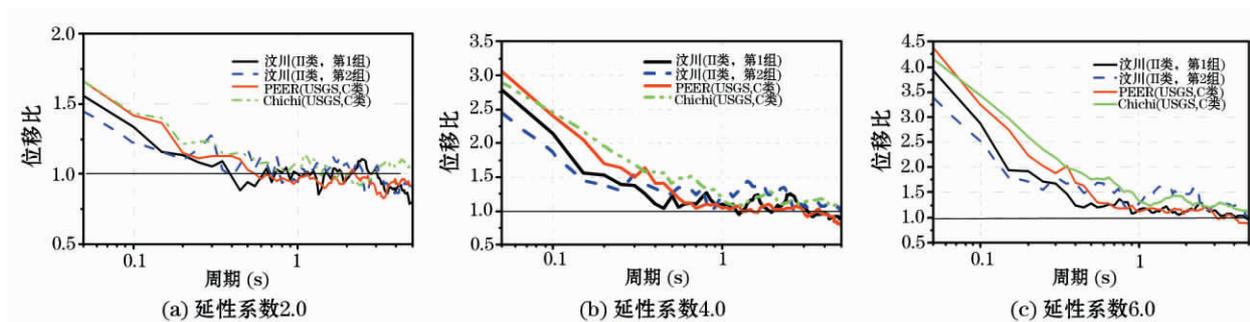


图5 汶川近场地震动的等延性位移比谱

Fig. 5 Displacement ratio spectra with constant ductility for Wenchuan near field ground motions

3.2.3 等强度折减系数位移比谱 C_R

图6给出了等强度折减系数位移比谱 C_R ,可以看出:(1)在短中周期段(0.05~0.6s) C_R 随周期增长急剧下降,汶川地震动的 C_R 显著小于对照的PEER近场地震动和集集地震含速度脉冲地震动的谱值。对0.2s结构 $R=2$ 时汶川地震动的 C_R 不超过1.5,而PEER和集集地震动则分别接近3.0和4.0,并且上述数值和差异随着折减系数的增加而增加;(2)在中及更长周期段位移比谱逐渐接近1.0,即等位移准则成立,其在短中周期段上的拐点周期与强度折减系数有关,随其增长略有延长;但是当强度折减系数为6时, C_R 在相当长的周期范围(对PEER近场地震动可至3.0s)内大于1.0(约大10%)。对具有速度脉冲的汶川地震动第2组和集集地震动几乎在整个周期内(至5s) C_R 要大于1.0(至少在20%以上)。这点对近场含速度脉冲地震动在强度折减系数为4时也已显现。(3)具有速度脉冲的汶川地震动第2组 C_R 在0.1~0.3s与汶川地震动第1组相近,此后随周期增长逐渐过渡到与集集地震动谱值相近。(4)当周期大于3.5~4s后,PEER近场地震动和汶川地震动第1组的位移比谱略小于1.0。

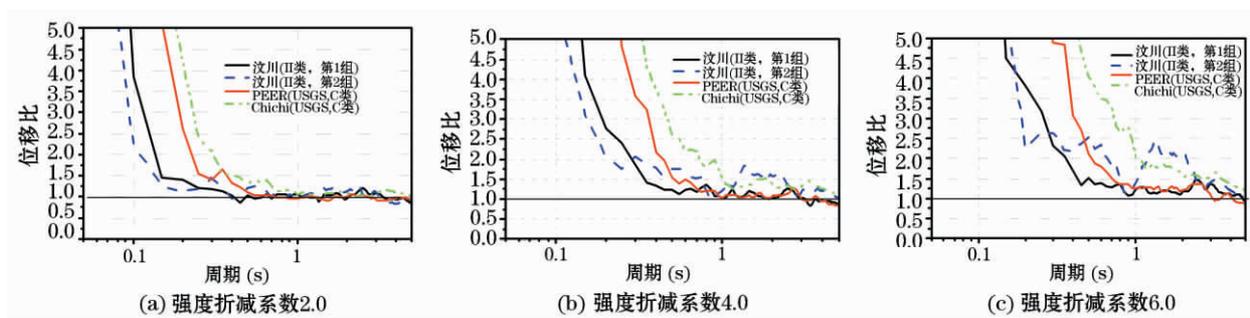


图6 汶川近场地震动等强度折减系数位移比谱

Fig. 6 Displacement ratio spectra with constant strength reduction factors for Wenchuan near field ground motions

图7给出了等强度折减系数位移比谱 C_R 的统计变异系数,总体上看:(1)在0.1~0.2s短周期段,变异系数会出现大于1.0以上的峰值,该峰值随强度折减系数增大而降低;(2)至0.5s中长周期以后,变异系数趋于稳定,对强度折减系数 $R=2, 4, 6$ 时,变异系数范围主要接近20%~30%、30%~50%和30%~80%。集集含速度脉冲地震动变异系数随强度折减系数增加而增大, $R=4$ 和6时要明显大于汶川地震动和对照的PEER近场地震动,且达到峰值后随周期的降低要缓慢。(3)汶川地震动第1组和第2组变异系数与前述规律稍有不同, $R=2$ 时在0.1~0.3s的短周期段其随周期增长而呈单调快速降低趋势; $R=4$ 时汶川地震动第1组变异系数与前述的PEER近场及集集地震动变化规律接近相同,而含速度脉冲的第2组仍在保持 $R=2$ 时的变化趋势; $R=6$ 时,汶川地震动第1组和第2组与PEER近场及集集地震动呈现出随周期相近的变化规律:首先增长至峰值,然后随周期较快降低,最后趋于相对稳定。汶川地震动第1组和第2组此时差距不很明显。

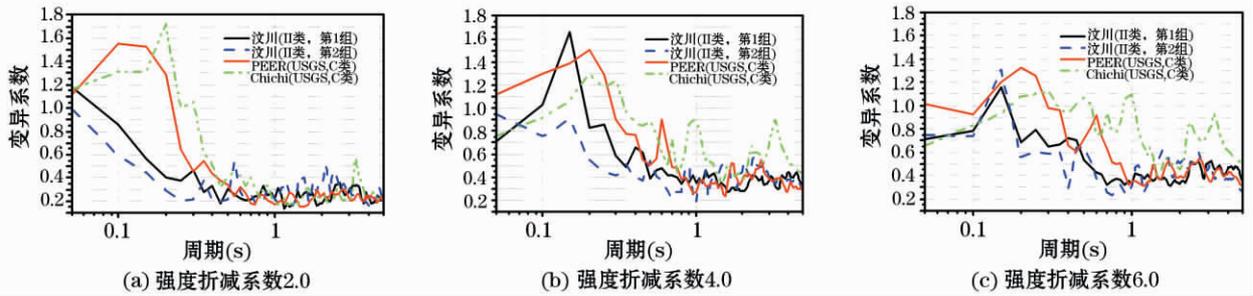


图 7 等强度折减系数位移比谱统计变异系数

Fig. 7 Coefficients of variation of displacement ratio spectra with constant strength reduction factor

综合位移比谱的研究,可认为对汶川含速度脉冲近场地震动输入,当位移延性系数(或强度折减系数)达到 4 时,利用等位移准则估计弹塑性位移将会得到偏于危险的结果。

4 汶川远场地震动弹性和弹塑性反应谱

大震在具有盆地地质构造背景的深厚覆盖层软土地面会产生显著的远场长周期放大效应(盆地效应)已被震害及研究证实,如 1985 年墨西哥地震,远离震中近 400 km 的墨西哥城大量高层建筑发生严重破坏或倒塌。2008 年汶川大地震中,地处关中盆地的距离震中 500 余 km 的宝鸡市和 700 余 km 的西安市,较多高层建筑发生了填充墙开裂、伸缩缝碰撞等明显震害,分别为 VII 度和 VI 度烈度异常区^[29-30]。本节主要以汶川地震陕西省关中盆地获得的 5 个台站记录,并辅以甘肃武都台站记录和 PEER 近场强震记录,研究大震远场深厚覆盖层场地地震动特性。

4.1 汶川远场地震动的弹性反应谱

图 8 给出了汶川远场地震动(震中距大于 400 km)平均反应谱与 PEER 近场(20 km < 断层距 R < 60 km)平均反应谱的比较,可以看出前者具有较宽的并随周期缓慢增长的平台值(较宽周期范围的加速度敏感区)和较大的特征周期(可达 1.7s 及以上),且在特征周期处存在较明显的峰值。长周期至 3 s 时放大系数仍不小于 1.5,约是对照的 PEER 近场地震动放大系数谱值 0.6 的 2.5 倍。图中还给出了断层距在 50 km 和 100 km 之间的武都台站强震记录反应谱,可以看出它更接近于 PEER 近场强震记录反应谱。以上比较表明了大震远场地震动与近场地震动弹性反应谱的显著差别。

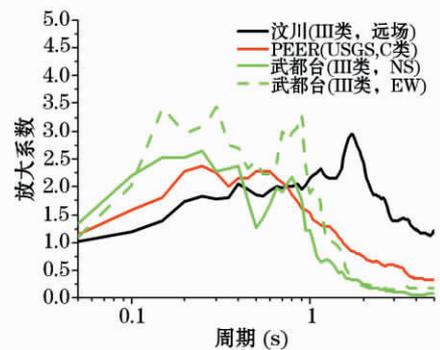


图 8 汶川远场地震动平均反应谱与其它地震动平均反应谱的比较

Fig. 8 Comparison of the mean elastic response spectra between Wenchuan far filed and other earthquake records

4.2 汶川远场地震动弹塑性反应谱

4.2.1 等延性强度折减系数谱 R_{μ}

图 9 给出了汶川远场地震动和 PEER 近场地震动的等延性强度折减系数谱 R_{μ} , 比较它们谱的异同可以看出: (1) 汶川地震动远场地震动的折减系数谱在其弹性反应特征周期 T_c (约 1.7s) 附近会出现明显的峰值, 峰值一般要大于其对应的位移延性系数, 并随位移延性系数增加而逐渐变得接近; (2) 在小于 T_c 直至短周期的较宽周期范围内, 远场地震动的折减系数值要很大程度上小于 PEER 近场地震动的强度折减系数; (3) 在大于 T_c 的较长周期范围, 远场地震动的强度折减系数开始降低, 除位移延性系数 = 2 时需要周期达到 2.5 s 外, 其值仍小于近场地震动时的情况。最后, 与弹性反应谱结合及图 9 显示等位移准则在较长周期范围内均不成立(特别是位移延性系数为 6 及 4 时), 就意味着对相同的位移延性系数, 远场地震动将要求结构满足更高的强度需要, 对结构具有更强的潜在破坏能力。此外, 武都台站强震记录的 R_{μ} 谱仍表现出接近于 PEER 近场强震记录的情况。在变异系数方面, 汶川远场地震动在周期小于 T_c 时略小于 PEER 近场地震动情况; 当周期大于 T_c 后, 二者基本一致。

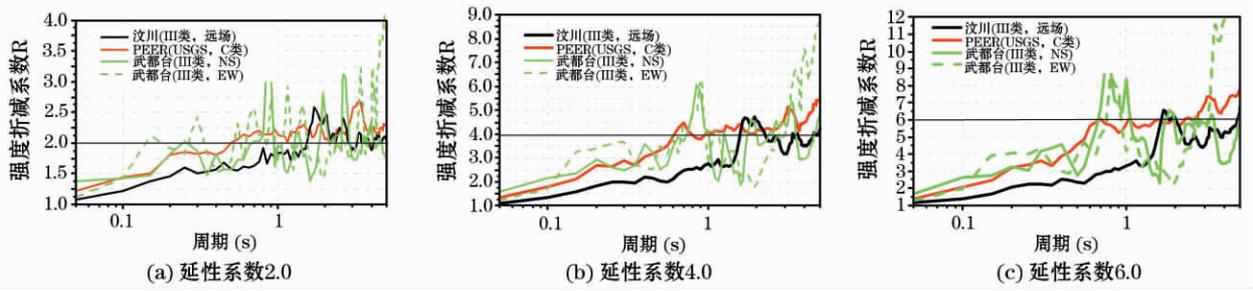


图9 汶川远场地震动等延性强度折减系数谱

Fig. 9 Strength reduction factor spectra with constant ductility factors for Wenchuan far field ground motion records

4.2.2 等延性位移比谱

图10给出了汶川远场地震动的等延性位移比谱 C_u 与 PEER 近场地震动的 C_u 相比,在位移延性为2和4时表现出相同的特点:在各自特征周期 T_c (近场约0.7s,远场约1.7s)附近谱值达到或接近1.0,此后等位移准则近似成立,但位移延性系数为4时远场地震动 C_u 略大于1.0。在短周期至特征周期 T_c 段, C_u 都随周期(对数坐标)呈线性下降并且远场和近场的谱曲线接近平行,但远场地震动 C_u 明显要大于近场地震动,相同周期对应的谱值随位移延性系数增大而增大。在位移延性系数达到6时,主要表现为对近场地震动等位移准则至3s长周期范围始成立,而远场地震动在周期大于 T_c 后的 C_u 仍大于1.0,平均约为1.2左右。总体上看远场地震动的等延性位移比谱总是在其特征周期 T_c 处取得最小值(约1.0)。同样作为参照的武都强震记录的 C_u 仍接近 PEER 近场的统计结果。等延性位移比谱 C_u 的统计变异系数情况与等延性强度折减系数谱 R_{μ} 情况相近,但数值要小。

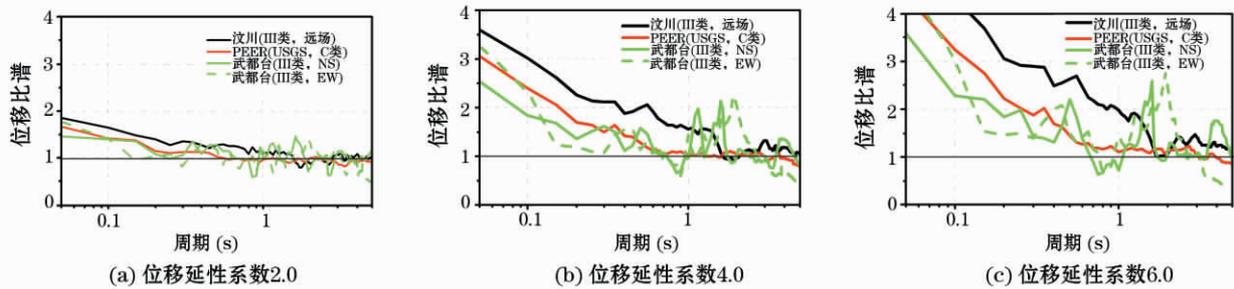


图10 汶川远场地震动等延性的位移比谱

Fig. 10 Displacement ratio spectra with constant ductility factor for Wenchuan far field ground motion records

4.2.3 等强度折减系数位移比谱 C_R

图11给出了汶川远场地震动等强度折减系数位移比谱 C_R ,主要比较远场和近场地震动 C_R 的不同。可以看出:(1)远场地震动和近场地震动的 C_R 有着相近的形状,从短周期至各自特征周期 T_c 处(近场约0.7s,远场约1.7s)都随着周期增长而快速下降,但远场的 C_R 值远大于近场地震动,其差异随着强度折减系数的增大而增大;(2)各自特征周期 T_c 处远场和近场地震动的 C_R 开始达到或接近1.0,但远场地震动谱值,此后随周期增长显现略大于1.0,其增大值与强度折减系数呈正相关,为6时平均可达30%以上,仅在强度折减系数为2时等位移准则近似成立。而近场地震动在强度折减系数为2和4时,周期大于其弹性反应谱特征周期 T_c 后可近似认为等位移准则成立,在强度折减系数为6时周期至3s等位移准则始成立。就是说在长周期段远场地震动仍更多表现出塑性反应位移大于弹性反应位移的特点。

汶川远场地震动和 PEER 近场强震记录的等强度折减系数位移比谱 C_R 统计变异系数在短周期至0.4s左右时相差较大,此后二者逐渐趋于一致。

综合位移比谱的研究,仍可认为对汶川远场(盆地效应)地震动输入,当位移延性系数(或强度折减系数)达到4时,利用等位移准则估计弹塑性位移将会得到偏于危险的结果。

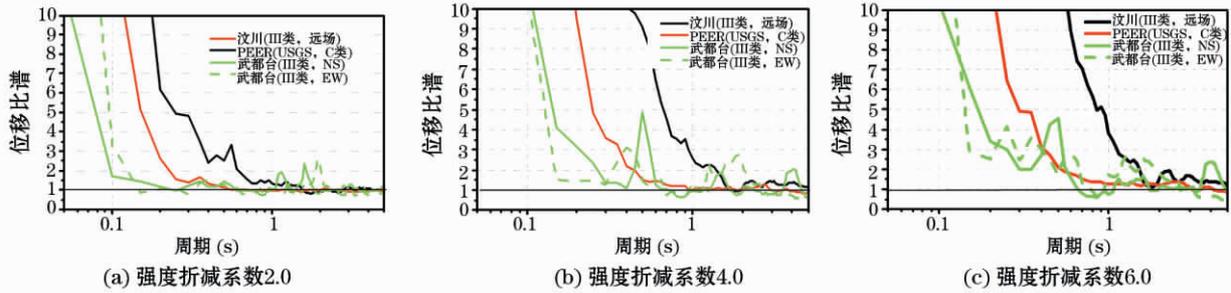


图 11 汶川远场地震动等强度折减系数位移比谱

Fig. 11 Displacement ratio spectra with constant strength reduction factor for Wenchuan far field ground motions

5 抗震设计大震远场(盆地)效应初步考虑

我国原建筑结构抗震设计“89 规范”以“近震”和“远震”区分震级和距离对反应谱形状的影响,现行规范则修订以“设计地震分组”和“反应谱特征周期”考虑。胡聿贤院士^[31]针对原“89 规范”认为:是很大进步,但在反映大远震与柔性场地组合产生的巨大长周期共振效应方面还很不足,强调我国上海、北京、天津等特大城市应特别注意这一可能。事实上我国西部的宁夏银川、云南昆明、山西太原等省会级城市均位于具有盆地地质构造背景的深厚覆盖层软土地地之上。汶川地震中地处关中盆地的西安、宝鸡等城市地震烈度异常,再次提醒我们对大震远场(盆地)效应适当重视。由此本文基于汶川强震记录,初步提出了远场地震动与近场地震动的比谱概念。

5.1 远场地震动与近场地震动的比谱

5.1.1 弹性反应比谱 β_{ratio}

β_{ratio} 定义为相同加速度峰值下相同周期弹性单自由度系统,分别在远场地震动和近场地震动作用下的平均弹性反应(加速度或位移)之比,具有统计一致性。理论上可用远场地震动放大系数谱值 β_{FF} 与近场地震动放大系数谱值 β_{NF} 的比计算。图 12 给出了由汶川远场地震动与 PEER 近场地震动统计得到的弹性反应比谱。其随周期可以近似划分为 3 个阶段:近似水平段($0\text{ s} - T_{c,NF}$)、上升段($T_{c,NF} - T_{c,FF}$)和相对平稳段($T_{c,FF} - 5\text{ s}$)。其中 $T_{c,NF}$ 和 $T_{c,FF}$ 分别为近场地震动和远场地震动反应谱的特征周期,对 III 类场地分别取 0.6 s 和 1.7 s 。说明大震远场(盆地)效应对于周期大于 $0.6 \sim 0.7\text{ s}$ 的结构都会产生相对近场大得多的地震反应,汶川地震中未产生强烈结构震害主要原因是加速度峰值水平较低。

远场地震动和近场地震动的弹性反应比谱 β_{ratio} 可以用下式表示(阻尼比 $\xi = 0.05$):

$$\beta_{ratio} = \begin{cases} 0.8 & T < T_{c,NF} \\ 0.8 + \frac{2.7}{(T_{c,FF} - T_{c,NF})} (T - T_{c,NF}) & T_{c,NF} \leq T \leq T_{c,FF} \\ 3.5 & T > T_{c,FF} \end{cases} \quad (3)$$

式中 β_{ratio} 为弹性反应比谱; $T_{c,NF}$ 和 $T_{c,FF}$ 分别为近场地震动和远场地震动反应谱的特征周期,对 III 类场地分别取 0.6 s 和 1.7 s ; T 为结构的周期。

利用弹性反应比谱 β_{ratio} 可以相对容易地完成以下工作: (1) 判断是否需要“大震远场(盆地)效应”的抗震分析。如汶川地震关中盆地的西安市地表加速度峰值约 $50 \sim 60\text{ Gal}$,对 20 层左右的高层建筑假定基本周期按 $0.1N$ (N 为层数) 估计为 2.0 s ,乘以比谱后相当于近场加速度峰值为 $175 \sim 210\text{ Gal}$,接近 8 度中震

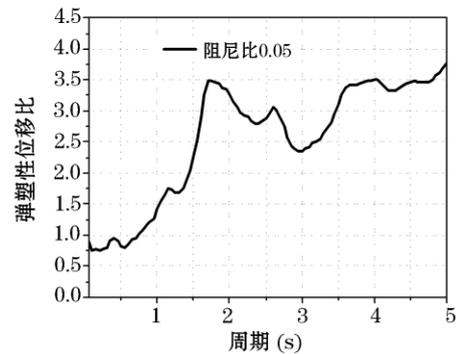


图 12 远场地震动与近场地震动的弹性反应比谱

Fig. 12 Elastic response spectra ratio of far-field ground motions with basin effects to near-field ground motions

的地震作用水平。而西安市建筑结构按8度小震(70 Gal)强度设计,需要进行“大震远场(盆地)效应”计算。再如汶川地震处于太原盆地的太原市,地表加速度峰值约20 Gal,对同样结构仅相当于近场加速度峰值70 Gal地震作用,与其8度抗震设防小震强度设计一致,则不需要考虑“大震远场(盆地)效应”的计算。汶川地震1000 km外的太原市亦有少量高层建筑发生开裂等震害现象^[32]。(2)利用比谱与规范谱相乘后形成的“新”谱进行结构抗震的弹性振型分解反应谱计算,以考虑“大震远场(盆地)效应”。说明一点:上述计算是在假定获得场地加速度峰值基础上作出的,并仅就汶川地震提供讨论。事实上抗震设计远场盆地效应考虑的困难仍在于综合考虑震源、传播路径后,对涉及场地的加速度峰值及反应谱的合理估计。

5.1.2 弹塑性位移比谱 S_{ratio}

定义为相同加速度峰值下相同(弹性)周期的弹塑性单自由度系统,分别在远场地震动和近场地震动作用下的(平均)弹塑性位移之比,具有统计一致性。考虑满足理论完备性和加速度峰值几乎不影响的要求,取为等延性位移比谱。

图13给出了远场地震动与近场地震动的弹塑性位移比谱 S_{ratio} ,总体上看其受位移延性系数影响要弱,特别是延性系数4和6时谱值比较接近,略大于位移延性2时情况。 S_{ratio} 值随周期增长可近似划分为4个阶段:(1)0~0.4 s左右的近似水平段,比谱值接近1.0;(2)0.5~1.4 s左右随周期近似线性快速增长阶段,比谱值最大达到3.0;(3)1.5~4.0 s随周期近似线性缓慢增长阶段,比值谱最大达到4.5;(4)大于4 s后的稳定段,谱值保持在3.5~4.5范围。

从弹塑性位移比谱仍可看出相同峰值加速度下,具有“盆地效应”的深厚覆盖层场地上大震远场地震动对大于0.6~0.7 s的长周期结构地震反应的强烈放大作用。强调一点,远场地震但若加速度峰值较小,以此加速度峰值进行近场地震动下抗震分析时,结构可能不发生屈服,因此远场和近场地震动弹塑性位移比谱的概念化意义更强些。

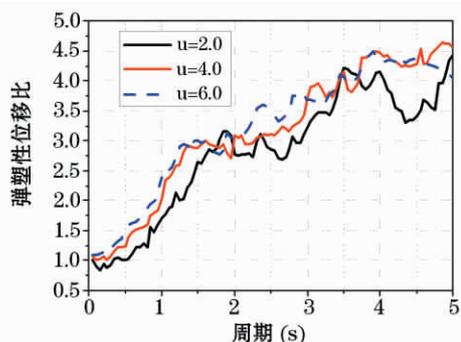


图13 远场地震动与近场地震动的弹塑性位移比谱

Fig. 13 Inelastic displacement ratio spectra for far-field ground motions with basin effects to near-field ground motions

6 结论

目前国内关于弹性和弹塑性谱的研究仍主要采用国外强震记录,特别是美国西部,使用过程中由此存在场地条件分类、近场及远场分组、长周期成份缺失等方面的问题。本文利用汶川地震获得的大量高质量数字强震记录,依台站分类详细研究了汶川近场无速度脉冲、近场含速度脉冲和远场深厚覆盖层场地(盆地效应)地震动的弹性和弹塑性反应谱,并与相近场地条件的 PEER 近场无速度脉冲地震动、集集近场含速度脉冲地震动的谱进行了比较。初步获得如下认识:

(1) 汶川近场地震动在0.1~0.2 s附近短周期(高频)成份更为丰富,其含速度脉冲的近场地震动在0.2~0.8 s周期内弹性反应谱值明显偏小。

(2) 汶川含速度脉冲的近场地震动弹塑性谱在短周期(0.1~0.4 s)与其近场无速度脉冲地震动差别不大,但等延性强度折减系数谱 R_u 要大于集集地震含速度脉冲地震动的谱,而等延性位移比谱 C_u 和等强度折减系数位移比谱 C_R 则小于集集地震动。以后随周期增长(至0.6~1.0 s后)它们逐渐过渡至与集集地震动的谱相当。

(3) 汶川远场(盆地效应)地震动弹性反应谱具有较宽并随周期缓慢增长的平台值和较长的特征周期值(可达1.7s及以上),且在特征周期处存在较明显的峰值。

(4) 提出远场(盆地效应)与近场地震动的弹性反应比谱和弹塑性位移比谱概念。利用汶川远场(盆地效应)地震动与 PEER 近场地震动的统计分析,初步认为远场地震动会显著放大0.6 s以上长周期结构的地震反应。在相同加速度峰值条件下,对1.5 s以上周期结构弹性反应可放大2.5~3.5倍,弹塑性位移反应可放大3.0~4.5倍。

参考文献:

- [1] 王东升,李宏男,王国新.双向地震动作用的拟等延性系数谱[J].地震工程与工程振动,2004,24(4):25-31.
WANG Dongsheng,LI Hongnan,WANG Guoxin. Pseudo-constant ductility inelastic spectra for bi-directional ground motions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2004,24(4):25-31. (in Chinese)
- [2] 王东升,李宏男,王国新等.弹塑性地震反应谱的长周期特性研究[J].地震工程与工程振动,2006,26(2):49-55.
WANG Dongsheng,LI Hongnan,WANG Guoxin. Study on characters of long period portion of inelastic spectra [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2006,26(2):49-55. (in Chinese)
- [3] Newmark N M, Hall W J. Earthquake Spectra and Design [M]. Berkeley: EERI, USA, 1982.
- [4] Chopra A K, Chintanapakdee C. Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: single-degree-of-freedom bilinear systems [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2004, 130(9): 1309-1319.
- [5] Aschheim M. Seismic design based on the yield displacement [J]. Earthquake Spectra, 2002, 18(4): 581-600.
- [6] 王东升,李宏男,赵颖华等. A_y-D_y 格式地震需求谱及其在结构性能抗震设计中的应用[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(1): 60-65.
WANG Dongsheng, LI Hongnan, ZHAO Yinghua, et al. Inelastic seismic demand spectrum with A_y-D_y format and its application in performance based seismic design [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27(1): 60-65. (in Chinese)
- [7] Miranda E, Bertero V V. Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design [J]. Earthquake Spectra, 1994, 10(2): 357-379.
- [8] Fajfar P. Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28(9): 979-993.
- [9] Chopra A K, Goel R K. Direct displacement-based design: use of inelastic vs. elastic design spectra [J]. Earthquake Spectra, 2001, 17(1): 47-64.
- [10] Ruiz-García J, Miranda E. Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32(8): 1237-1258.
- [11] Ruiz-García J, Miranda E. Inelastic displacement ratios for evaluation of structures built on soft soil sites [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(6): 679-694.
- [12] 肖明葵,王耀伟,严涛等.抗震结构的弹塑性位移谱[J].重庆建筑大学学报,2000,22(S1):34-40.
XIAO Mingkui, WANG Yaowei, YAN Tao, et al. The response spectrum of elasto-plastic displacement for seismic structures [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2000, 22(S1): 34-40. (in Chinese)
- [13] 翟长海,谢礼立,张敏政.工程结构等强度位移比谱研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(1):45-48.
ZHAI Changhai, XIE Lili, ZHANG Minzheng. A study on constant-relative-strength inelastic displacement ratio spectra for evaluation of existing structures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(1): 45-48. (in Chinese)
- [14] Miranda E. Estimation of inelastic deformation demands of SDOF systems [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001, 127(9): 1005-1012.
- [15] 王东升,李宏男,王国新.统计意义一致的弹塑性设计位移谱[J].大连理工大学学报,2006,46(1):87-92.
WANG Dongsheng, LI Hongnan, WANG Guoxin. Statistical property-consistent elastic-plastic displacement design spectra [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(1): 87-92. (in Chinese)
- [16] 卢寿德,李小军.汶川8.0级地震未校正加速度记录[M].北京:地震出版社,2008.
LU Shoude, LI Xiaojun. Uncorrected acceleration records of the Wenchuan M_s 8.0 earthquake [M]. Beijing: Earthquake Press, 2008. (in Chinese)
- [17] 于海英,王栋,杨永强等.汶川8.0级地震强震动加速度记录的初步分析[J].地震工程与工程振动,2009,29(1):1-13.
YU Haiying, WANG Dong, YANG Yongqiang, et al. The preliminary analysis of strong ground motion records from the M_s 8.0 Wenchuan earthquake [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(1): 1-13. (in Chinese)
- [18] 郭晓云.汶川地震反应谱研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2011
GUO Xiaoyun. Study on response spectrum of Wenchuan earthquake [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011. (in Chinese)
- [19] 彭小波.汶川地震强震动记录分析与应用[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2011.
PENG Xiaobo. Analysis of strong motion recordings and its application from Wenchuan earthquake [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2011. (in Chinese)
- [20] Li Xiaojun, Zhou Zhenghua, Yu Haiying, et al. Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan Earthquake [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 7(3): 235-246.
- [21] 岳茂光.场地-结构体系基于性能抗震设计分析方法研究[D].大连:大连理工大学,2009.
YUE Maoguang. Studies on analysis method of performance-based seismic design of site-structure system [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [22] 谢俊举,温增平,李小军等.基于小波方法分析汶川地震近断层地震动的速度脉冲特性[J].地球物理学报,2012,55(6):1963-1972.
XIE J J, WEN Z P, LI X J, et al. Analysis of velocity pulses for near-fault strong motions from the Wenchuan earthquakes based wavelet methods [J]. Chinese J. Geophys. 2012, 55(6): 1963-1972. (in Chinese)

- [23] Boore D M, Akkar S. Effect of causal and acausal filters on elastic and inelastic response spectra [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, 32(11): 1729 – 1748.
- [24] Faccioli E, Paolucci R, Rey J. Displacement spectra for long periods [J]. *Earthquake Spectra*, 2004, 20(2): 347 – 376.
- [25] Akkar S, Bommer J J. Influence of long – period filter cut – off on elastic spectral displacement [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35(9): 1145 – 1165.
- [26] Kagawa T, Irikura K, Somerville P G. Differences in ground motion and fault rupture process between the surface and buried rupture earthquakes [J]. *Earth Planets Space*, 2004, 56(1): 3 – 14.
- [27] 周庆, 张春山, 陈献程. 汶川 MS8.0 地震灾害的非对称分布与成因分析 [J]. *地震学报*, 2011, 33(4): 492 – 504.
ZHOU Qing, ZHANG Chunshan, CHEN Xiancheng. Asymmetric disaster distribution and its cause analysis of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2011, 33(4): 492 – 504. (in Chinese)
- [28] LU M, Li X J, An X W, et al. A preliminary study on the near-source strong-motion characteristics of the great 2008 Wenchuan earthquake in China [J]. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2010, 100(5B): 2491 – 2507.
- [29] 梁兴文, 董振平, 王应生, 等. 汶川地震中离震中较远地区的高层建筑的震害 [J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(1): 24 – 31.
LIANG Xingwen, DONG Zhenping, WANG Yingsheng, et al. Damage to tall buildings in areas with large epicentral distance during M 8.0 Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(1): 24 – 31. (in Chinese)
- [30] 孙景江, 唐玉红, 孙忠贤, 等. 汶川地震 VIII 度和 VII 区城市房屋震害及若干典型震害讨论 [J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(6): 65 – 73.
SUN Jingjiang, TANG Yuhong, SUN Zhongxian, et al. Damage to urban buildings in zones with intensity VIII or VII during Wenchuan earthquake and discussions on some typical damage [J]. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(6): 65 – 73. (in Chinese)
- [31] 胡聿贤. 有关设计地震动的几个问题 [J]. *土木工程学报*, 1993, 26(2): 1 – 8.
HU Yuxian. Some problems on design earthquake motion [J]. *China Civil Engineering Journal*, 1993, 26(2): 1 – 8. (in Chinese)
- [32] 徐扬, 赵晋泉, 李小军. 基于汶川地震远场强震动记录的厚覆盖土层对长周期地震动影响分析 [J]. *震灾防御技术*, 2008, 3(4): 345 – 351.
XU Yang, ZHAO Jinquan, LI Xiaojun. Study on effect of thick sedimentary layers on long-period ground motion from far-field strong motion records of Wenchuan earthquake [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2008, 3(4): 345 – 351. (in Chinese)