

[编者按] 在网络时代全面到来之际,为更好地与广大一线结构工程师进行互动交流,《建筑结构·技术通讯》从2012年第5期开设“建闻天下”栏目,精选近期专业网站、论坛、博客、微博中精彩的文章和观点整理刊出,您也热爱结构设计?您也是个网络达人?那就加入到我们的队伍中来吧!把您对专业技术、工作技巧的思考以及在工作中对职业生涯的感悟等与大家分享(联系邮箱 yanglin@cadg.cn),本刊网站(<http://www.buildingstructure.com.cn/>)及博客(<http://blog.sina.com.cn/u/1928744817>)也将进行同步报道。

通过芦山地震重新思考地震作用

——写给成长中的结构工程师

徐 珂

(北京清华同衡规划设计研究院,北京 100085)

(北京清城华筑建筑设计研究院,北京 100085)

芦山地震极震区地震烈度为9度,与汶川地震同烈度区的震害相比,房屋倒塌数量、破坏程度均处于较低水平,整体受损不严重。通过震后应急鉴定结果分析,2008年以后按照修订后抗震规范设计的房屋,主体结构基本未发生破坏,震害以填充墙破坏为主,工程界普遍认为结构主体到达抗震设防目标,较汶川地震前房屋抗震性能有较大提升。结构工程师如果就此对比,得出我国现行规范的抗震设计标准已完善,则有只见表象不见原委之嫌,因为地震具有极大的偶然性,灾害只是地震作用的表现,大量倒塌房屋有结构失效的共性,认识地震能量输入不同点才是理解震害差异的根本。

1 强震台网监测数据对比

芦山县抗震设防烈度为7度,设计基本地震加速度值为0.15g。根据中国地震局强震动台网监测,芦山地震中各测点中最大加速度峰值为400cm/s²(扣除宝兴地办点1005 cm/s²),该数值与抗震规范第5.1.2条计算8度罕遇地震时程分析所用地震加速度时程的最大值相同,数值见表1,表中三个点距离震中较近,具体位置及烈度分布见图1,其中邛崃油榨点位于7度区,加速度峰值低于8度区的名山科技和芦山飞仙点数值,高于规范对7度0.15g罕遇地震时程分析所用地震加速度时程的最大值310 cm/s²,说明测量点地面地震烈度响应超过场地设防烈度值,就此推断场地上建筑抗震经受过中震或大震考验是很自然的事情,芦山震后应急鉴定评估总体结论是,经过正规设计施工的建筑物结构主体未见明显破坏,震害表现主要为填充墙、内装饰、碰撞破坏,似乎可以推断现有抗震计算和措施满足设防烈度要求。

表1 芦山地震观测点加速度峰值数据

台站名称	震中距离	方向	加速度峰值 cm/s ²
名山科技 (8度区)	28km	EW	400.705
		NS	349.850
		UD	105.102
芦山飞仙 (8度区)	33km	EW	387.410
		NS	356.989
		UD	267.381
邛崃油榨 (7度区)	28km	EW	270.461
		NS	315.486
		UD	111.231

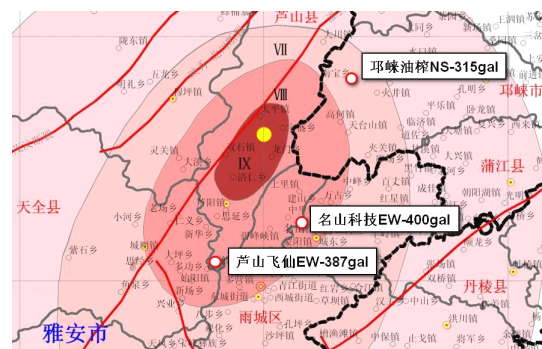


图1 芦山地震烈度图及地震台网测点

再看汶川地震情况,选取三个观测点,场地设防烈度均为为7度,三点位置关系见图2。其中汶川卧龙点位于震中区,实际烈度为11度,最大加速度峰值957 cm/s²,接近1g加速度。绵竹清平点位于9~8度交界区,什邡八角点位于8~7度交界区,两点间地区实际烈度为8度,两点最大加速度峰值均大于9度罕遇地震时程分析所用地震加速度时程的最大值620 cm/s²。震后这两个地区均

被定位受灾极重地区，房屋大量倒塌，很多未倒塌房屋破损严重，无法继续使用。结构工程师可以简单的根据实际烈度表现得出结论，地震作用已经远超过结构设防标准，房屋倒塌难以避免。

表 2 汶川地震观测点加速度峰值数据

台站名称	震中距离	方向	加速度峰值 cm/s^2
汶川卧龙 (11 度区)	19km	EW	957.800
		NS	658.100
		UD	948.400
绵竹清平 (9~8 度区)	88km	EW	824.300
		NS	802.500
		UD	622.800
什邡八角 (8~7 度区)	106km	EW	556.169
		NS	-581.592
		UD	633.090



图 2 汶川地震部分台网测点

2008 年我在汶川几个极震地区调研时也是这样想的，超过设防烈度的房屋，从结构安全角度评价不倒塌的房屋就是成功的。但是 2013 年我在芦山地震三个极震地区调研情况总体上是破坏轻微，相比汶川地震同烈度区倒塌房屋数量少、破坏不严重，为什么会出现两种反差极大的震害现象？如果以新旧抗震规范差异的角度无法解释农民自建房破坏差异。地震台网测点实测加速度峰值能给结构设计带来什么思考？以烈度值很难看出区别，对比各点在三个方向加速度峰值，可以有以下区别：

1、两次地震震中测点加速度值峰值接近，宝兴地办点和汶川卧龙点接近 1000gal。

2、震中周边测点加速度数值差异。芦山地震值低于汶川地震值，这点容易理解，两者地震里氏级别相差一级，数值相差近一倍。

3、两次地震测点，在水平两个方向的加速度峰值差异小，但竖向与水平向加速度峰值比例关系差异大，芦山地震比例是 1:3 左右，汶川地震比例是 1:1 左右，说明汶川地震作用的竖向分量比重大。其中，什邡八角点竖向加速度峰值比水平值高 10%左右。

4、芦山地震中，震中宝兴地办台记录到中国首条加速度峰值超过 1000gal 的曲线，扣除偶然因素，也与绵竹清平点水平向峰值接近，其竖向峰值也超过 8 度罕遇地震时程分析所用地震加速度时程的最大值，但该监测点附近建筑物震害不严重。汶川地震中没有超过 1000gal 的记录数据，原因是震中的观测点可能在地震中就被破坏掉，没有数据留存下来，并不能说明两者震级的差异。

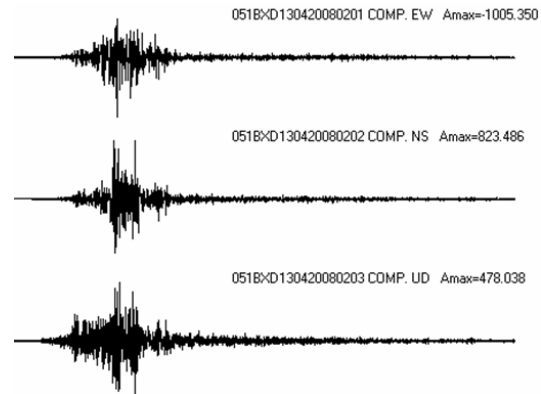


图 3 芦山地震宝兴地办台加速度记录曲线

在常规地震分析中，普通结构不计算竖向地震作用，目前规范仅规定 8 度大跨度、长悬臂结构及 9 度高层建筑应计算竖向地震作用。根据汶川地震当事人后来回忆，大量倒塌的预制板砌体房屋，在地震过程中，地面跳动感觉明显，很多物体被上下抛起，从这些情况需要思考普通建筑如何保证竖向地震延性？规范中对竖向地震分量考虑是否合适？

2 地震能量释放对比

地震作用是地震能量释放后结构响应结果，震害表现是地震作用后结构发生微观改变形成宏观损伤结果。目前结构地震作用分析主要采用静力法和反应谱法，以一个假定荷载模拟地震力施加结构上，实际地震响应是不断变化的惯性力作用，规范提出时程分析法模拟结构在地震过程的实时状态，规范建议地震加速度时程曲线的有效时间为结构基本周期 5~10 倍，即结构顶点位移按基本周期往复 5~10 次。

芦山地震释放地震矩为 $1.69 \times 10^{19} \text{Nm}$ ，释放持续时间约 30 秒。芦山地震能量主要释放在前 10s，地震矩释放约 $1.12 \times 10^{19} \text{Nm}$ ，占全部地震矩释放的 2/3。在 10s 至 30s 有连续小的地震矩释放阶段，具体过程见图 4。

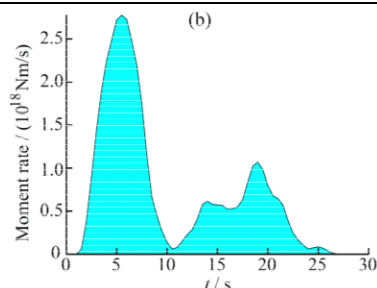


图4 芦山地震中地震矩释放率随时间变化曲线

汶川地震释放地震矩为 $1.80 \times 10^{21} \text{Nm}$ ，释放持续时间约 95 秒。汶川地震能量释放分为四个阶段，第一阶段是前 10 秒，释放全部地震矩约 7%，第二阶段是 10 至 42 秒，释放全部地震矩约 61%，第三阶段是 42 至 60 秒，释放全部地震矩约 9%，第四阶段是 60 至 95 秒，释放全部地震矩约 23%，释放具体过程见图 5。

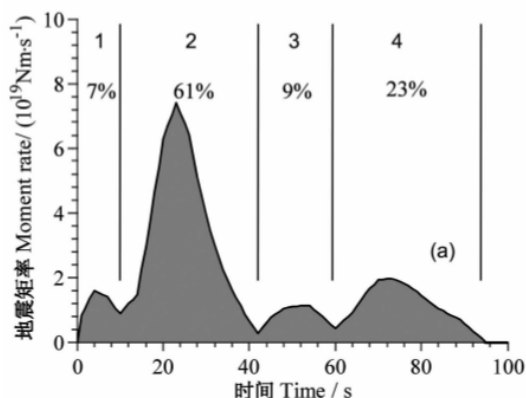


图5 汶川地震中地震矩释放率随时间变化曲线

存在缺陷的砌体结构在芦山地震中发生坍塌，这是容易理解的，以“多病体弱”的结构去抵抗强烈地震作用，然后工程师以规范方式看待各种破坏机理，是不是非常好的认知方式？汶川地震四次能量释放，相当于发生四次 7 级地震，每次释放地震矩值均比芦山地震全部值高。能量释放过程意味着结构不断承受地震作用冲击，设计符合规范要求、施工质量好的砌体就一定承受汶川地震的多重打击吗？

以汶川地震成都 CD2 测点记录地面加速度峰数据做一个比较，这里截取震动前 95s 的数据，由于四次能量释放过程间隔很短，测量图表并没有明显的间隔。

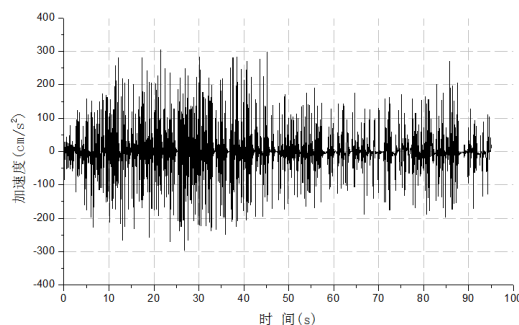


图6 成都 CD2 测点 EW 方向加速度数据 (95s)

如果不考虑汶川地震能量释放过程时间因素，将 95s 地面加速度数据转换成结构拟加速度谱（图 7，结构阻尼比 5%），这样做分析符合结构工程师应用反应谱设计方式去认知一次地震作用对结构的影响。

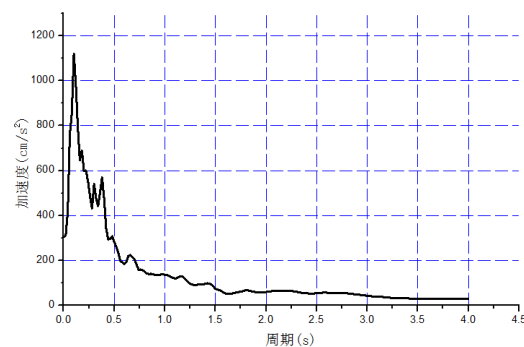


图7 成都 CD2 点 0~95s 地震波转换拟加速度反应谱

如果将汶川地震四次能量释放过程，按时间段分别将地面加速度数据转换成结构拟加速度谱，以四次地震作用的反应谱表达方式去认知汶川地震作用对结构的影响（图 8~11），可以看看不同时段对结构影响的差异。

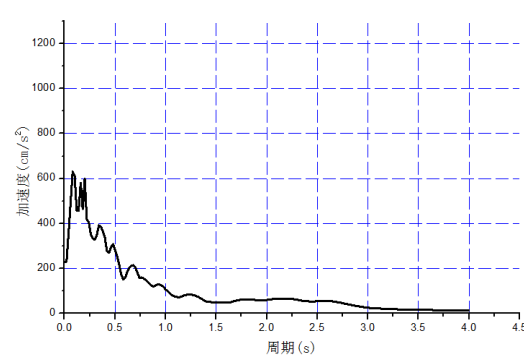


图8 成都 CD2 点 0~10s 地震波转换拟加速度反应谱

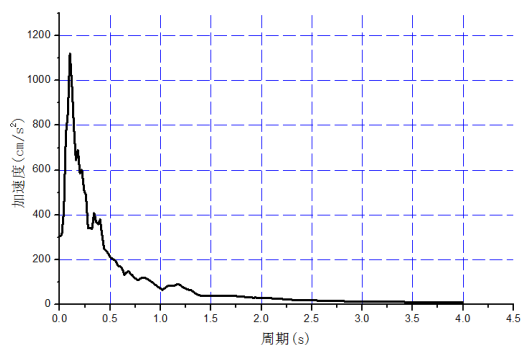


图9 成都 CD2 点 10~42s 地震波转换拟加速度反应谱

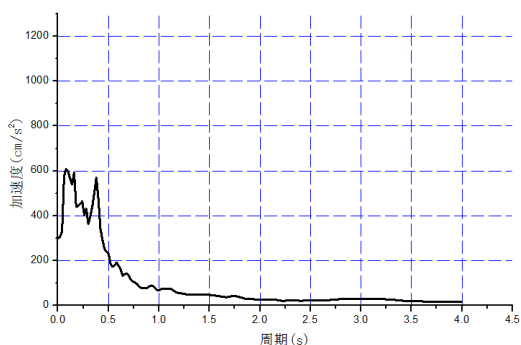


图10 成都 CD2 点 42~60s 地震波转换拟加速度反应谱

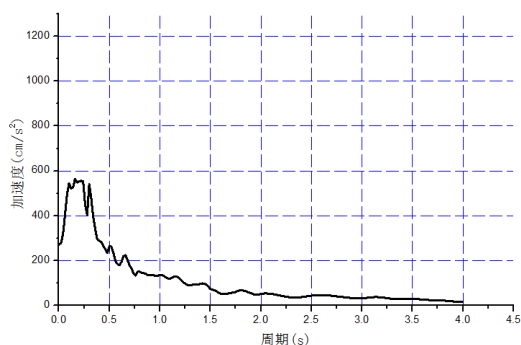


图11 成都 CD2 点 60~95s 地震波转换拟加速度反应谱

表3 拟加速度谱中各结构周期对应加速度值 (cm/s²)

结构周期	时程区间				
	0~95s	0~10s	10~42s	42~60s	60~95s
0.1	1119.7	612.5	1119.7	598.4	544.1
0.5	281.6	281.6	211.8	232.6	265.5
1.0	137.0	106.6	71.1	68.6	136.9
1.5	73.7	49.7	40.5	47.6	73.8
2.0	60.3	60.3	30.3	26.5	52.3
2.5	55.1	55.1	19.1	23.6	44.2
3.0	43.4	25.9	12.9	30.2	31.8
3.5	30.8	16.4	10.7	20.1	30.5
4.0	30.9	14.5	9.5	17.1	16.9

提取各谱中结构周期为 0.1 秒至 4.0 秒对应的加速度值(表 3)。以总时段和分四个时段去分析地震作用有以下几点思考:

1、 总体上看,全时段反应谱中加速度值为各时段反应谱的最大值。其中 3.0 秒以前的最大值数据是相同的,3.0 秒以后的数据不相同,全时段数据比分时段数值大,可以简单认为,长周期结构对时程输入时间越长则地震作用响应越大。

2、 分时段中,短周期对应加速度值与能量释放比例接近,下降段最大值分布在各时段中,比较特殊的是能量释放最大的第二阶段在下降段中没有出现最大值,这与预想偏差较大。检查全部数据,其最大值出现在 0~0.2 秒时段,与全时段的加速度值相同。

3、 做这样的分解对比,基于地震能量释放过程不是一次释放完成的,汶川地震后余震不断,最大震级为 6.5 级,而震害调查是在震后不同时段进行的,可能同一结构破损情况在余震中不断发生变化,在破坏机制判断上就会有偏差,主震发生后的震害更符合结构设计目标。芦山地震后余震级别小,震害表现可能更符合调研目标。

4、 低周期砌体结构在第一时段就已经发生脆性破坏,如何提供后面阶段的抗震延性?构造柱起到一定作用,估计在第二时段被破坏掉,三四时段发生倒塌并不能简单推断砌体结构抗震性能差,而是地震作用大,反复打击下更容易破坏,因此砌体结构的适用范围应在规范层面上予以减少,对于其它类结构在合理的范围内,设计上宜适当降低结构刚度。

结构破坏是不断吸收地震作用的结果,地震持续时间越长,对结构危害性越大。静力法和反应谱法不能体现地震时长对结构的影响,结构工程师如果不能理解这个差异,也就无法理解时程分析的目的。

【正式稿件发表于 2013 年 05 月《建筑结构》的技术通讯中建闻天下,欢迎斧正,也欢迎留言提供讨论话题!】

徐珂: 一个普通的结构工程师,参与计算、画图 20 年,关注结构新技术及精细化设计,目前就职北京清华同衡规划设计研究院。从 2006 年开始写个人博客(<http://www.jiegoublog.cn/>),记录工作中的想法和解决方案,希望通过不断地积累与更新,为下一个满意的结构作品做准备。