

王克海, 李悦, 颜文晖, 李茜, 韦韩, 2012. 关于在基础设施抗震规范中规定最低设防要求的一点建议. 震灾防御技术, 7 (2): 137—143.

关于在基础设施抗震规范中规定最低设防要求的一点建议¹

王克海¹⁾ 李悦¹⁾ 颜文晖²⁾ 李茜¹⁾ 韦韩¹⁾

1) 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088

2) 美国联邦公路局 Turner-Fairbank 公路研究中心

摘要 作者针对目前我国基础设施抗震设计时遇到的问题, 给出了以下建议: ①根据地震作用水平, 对结构不同部位、不同构件制定不同的设计目标, 明确设计构件所用的强度、延性参数指标; ②我国地震动区划图提供的地震动参数仅仅是中震水平(地震重现期 475 年), 实际发生的地震可能远远超过中震水平, 在基础设施设计时应应对大震(罕遇地震)有所考虑, 甚至应考虑超预期地震发生后的应对、应急措施; ③提高最低设防水准, 并非是提高一度设防, 应通过确定最小地震动参数满足最低设防要求, 并在地震动区划图中以地震重现期代表地震危险程度; ④对于 VI 度以下设防地区的基础设施结构物, 都应按照 VI 度设防标准设计并考虑采取相应的抗震措施。

关键词: 规范 地震 设防 建议

引言

在对地震灾害预防较为重视的国家, 7 级(震中 9 度, 对应峰值加速度 0.4g) 以下地震一般不会对社会造成较大影响(高孟潭等, 2006)。而 2005 年 11 月 26 日发生在江西九江的 M5.7 级地震, 造成了 13 人死亡, 1.8 万多间房屋倒塌, 16 万间房屋受损, 地震对当地社会生活的冲击持续了 3 至 4 个月。而 2008 年 5 月 12 日发生在汶川的 M8.0 级地震则又一次提醒我们, 即特大地震也可能发生于基本烈度较低的地区。而我国目前位于低烈度区的建筑结构, 特别是 1980 年前的建筑结构, 普遍没有考虑抗震设防的要求, 抗震能力较为低下, 将 2008 年汶川地震、2010 年玉树地震与智利 2010 年地震、日本 1995 年阪神地震的震害现象相比较, 可知我国大量建筑缺乏抗震能力, 建筑的设防水准比智利、日本等国家低得多。随着我国城市化建设步伐的加快, 以及城市生命线工程的脆弱性, 强制规定最低抗震设防要求, 使 VI 度及以下地区的建筑结构物也具有一定的抗震能力, 已成为中国社会发展的一个十分紧迫的问题。

1 基金项目 科技部国际科技合作项目(2009DFA82480); 交通运输部西部交通建设科技项目(2009318223094); 交通运输部行业标准项目(JTG-C-201012); 中国博士后科学基金资助项目(2011M500017)

[收稿日期] 2012-01-29

[作者简介] 王克海, 男, 生于 1964 年。博士, 研究员, 博士生导师。主要研究方向为桥梁抗震。

E-mail: kh.wang@rioh.cn

1 我国抗震设计规范中最低设防要求的演变

我国抗震设计规范中对建筑结构物的抗震最低设防要求经历了一个从无到有、从初级到逐步完善的过程。

我国的第一个抗震规范草案编制于 1957 年,其后分别于 1964 年、1974 年和 1978 年完成了《地震区建筑设计规范(草案)》(中华人民共和国国家标准,1964)、《工业与民用建筑抗震设计规范(TJ11-74)》(中华人民共和国国家标准,1974)(以下简称“74 规范”)以及《工业与民用建筑抗震设计规范(TJ11-78)》(中华人民共和国国家标准,1978)(以下简称“78 规范”)。“74 规范”和“78 规范”大体沿用了 1964 年规范草案的规定,“78 规范”对“74 规范”作了一些提高和改进,但仍比较简单,其设防水准也还是比较低。上述三版规范设防烈度均为 7—9 度,而对 6 度及 6 度以下地区的建筑为抗震不设防,没有抗震最低设防的要求。第四版是 1989 年制订的《建筑抗震设计规范(GBJ11-89)》(以下简称“89 规范”),设防烈度为 6—9 度,即将 6 度首次列为设防烈度。这主要是由于 1976 年的唐山大地震,将位于 6 度区的唐山市夷为平地,使抗震工作者认识到 6 度区建筑抗震不设防将带来巨大的灾难。“89 规范”总结了唐山地震的许多震害经验,对“74 规范”、“78 规范”进行了很大的修改,指出抗震设计应符合概念设计原则,明确三水准、二阶段的设计思想,使建筑的抗震设计有了较大的提高和完善。在 2001 年制定并颁布的第五版《建筑抗震设计规范(GB 5001-2001)》(中华人民共和国国家标准,2001)中延续了“89 规范”中将 6 度区列为设防烈度的相关规定,而在 2010 年发布并实施的第六版《建筑抗震设计规范(GB 5001-2010)》(中华人民共和国国家标准,2010)中补充给出了 6 度区最小地震剪力控制和罕遇地震影响系数取值,然而这两版规范中对于最低设防要求没有更进一步的明确规定。

2 抗震规范中强制规定最低设防要求的必要性

2.1 地震动区划图中基本烈度的不确定性

我国地震动区划图是依据历史记录的地震情况,结合有限的地震地质资料,以地震重现期 475 年(50 年超越概率 10%,相当于中震水平)的概率地震危险性分析为基础,并考虑该地区社会重要性及经济条件而确定的。由于地震是偶然、随机的极端事件,可能出现实际发生的地震重现期远大于 475 年的情况,这样实际地震烈度就会远大于基本烈度,使地震区划图标示的基本烈度与实际发生的地震情况有非常大的出入。表 1 列出了 1966—2010 年 40 多年间在地震区划图 VI—VII 度区内发生的高于及远高于该烈度的强震实例(王克海,2007)。2008 年的汶川地震也发生在地震区划图所标示的中低烈度区,再次暴露了我国地震动区划图指导工程设计的局限性。汶川所在地区位于地震多发地带,自有地震记载以来,震中附近 200km 范围内发生过 10 次 7 级以上地震,最大的是 1933 年四川茂汶北迭溪 7.5 级地震。汶川地震震区最大烈度达到 XI 度,而根据《中国地震动峰值加速度区划图(GB18306-2001)》(中华人民共和国国家标准,2001),这一地区的峰值加速度为 0.1g,即 VII 度,也就是说,实际烈度远远大于抗震设防烈度。汶川地震后,经国家标准化委员会的批准,对《中国地震动峰值加速度区划图(GB18306-2001)》(中华人民共和国国家标准,2001)进行了修改,修改后该地区的地震动峰值加速度调整为 0.2g。

目前,我国地震基本烈度为 VI 度的地区约占我国国土面积的 27.4%,VI 度以下地区约

占国土面积的 21%。然而，历史事实证明在这些地区发生强烈地震是有可能的，地震动区划图中的基本烈度具有很大的不确定性，应正确认识和使用地震动区划图。对于工程结构尤其是生命线工程，仅根据地震动区划图提供的信息进行抗震计算或仅采取简单的抗震构造措施是远远不够的，应结合详细的地震地质调查研究，并视结构物的重要程度分别针对中震和大震给出相应的、可供抗震设计使用的地震动参数指标。

表 1 VI—VII 度区发生强震实例表

Table 1 Examples of strong earthquake in the region with intensity VI—VII

序号	时 间	地 点	震 级	震中烈度
1	1966.03.08	河北邢台	6.5	8 度
2	1966.03.22	河北邢台	7.2	9—10 度
3	1969.07.26	广东阳江	6.4	8 度
4	1974.04.22	江苏溧阳	5.4	7 度
5	1979.07.09	江苏溧阳	6.0	8 度
6	1975.02.04	辽宁海城	7.3	9 度
7	1976.07.28	河北唐山	7.8	11 度
8	1981.04.26	内蒙古博克图	5.6	7 度
9	1981.08.13	内蒙古丰镇	5.8	7 度强
10	1982.03.20	新疆布尔津	5.2	7 度弱
11	1986.01.28	广东阳江	5.0	7 度弱
12	1986.02.09	黑龙江龙镇	5.0	7 度
13	1986.03.01	黑龙江北安	5.3	7 度
14	2005.11.26	江西九江	5.7	7 度
15	2008.03.21	新疆于田	7.3	7 度
16	2008.05.12	四川汶川	8.0	11 度
17	2010.04.14	青海玉树	7.1	9 度

2.2 VI 度及以下区域遭受地震破坏后的严重性

根据中国社科院《国际城市发展报告 2012》，我国到 2020 年城市化率将由目前的 51.27% 增长到 55% 左右。由此必然引发大量的城市建设，因而，在 VI 度及以下区域规定最低设防要求，对保障城市的防灾减灾工作具有十分重要的意义。2010 年《中国城市发展化报告》指出，百强城市利用全国 2.65% 的土地面积，承载着 17.57% 的人口，贡献了 52.52% 的 GDP。中国已经形成了以京津环渤海、长三角和珠三角 3 个城市群，并以若干个大城市为核心形成区域性的经济带或经济走廊。有效地减轻地震对这些经济发达城市地区的冲击，减少地震对公众生命财产造成的损失，是每一位抗震工作者必须要考虑的重要问题。而设置最低抗震设防要求，将大大减少地震应急处理的时间，并有效控制大地震破坏的空间范围和破坏程度，尽可能缩短发生地震后的恢复重建时间。在经济发达地区，特别是在城市群地区，设置最低抗震设防要求，以保证发生 6.0 级（震中 8 度，对应峰值加速度 0.2g）以下地震时结构物不发生破坏，这将对降低地震对社会的影响具有重要的作用。而对于以中强地震活动为主的地

区, 如果实现了这一目标, 将会在较少经济投入的情况下, 得到十分巨大的回报。

2.3 规定最低设防要求的必要性

我国过去是在计划经济体制下, 国家是基本建设投资的主体, 再加上受经济发展水平的制约, 从成本考虑较多, 因而建设工程抗震设防水准普遍偏低。国家制定的设防水准和抗震设计规范是刚性要求, 各种建筑物在抗震标准设计的执行上不能自主提高。而日本自 1923 年关东地震后, 就提出建筑设计按照 0.1 的系数考虑地震力 (相当于我国的 7 度); 1950 年在全国范围内提高到 0.2 (相当于我国的 8 度)。在美国, 抗震设防水准是最低要求, 设计人员可以根据业主要求在其基础上提高抗震标准。在智利, 由于境内地震多发, 因而所有建筑被强制按能抵抗 $M9.0$ 级地震 (峰值加速度 $0.4g$, 震中相当于 11 度) 的标准进行设计, 并且在建筑的建造过程中, 有严格的监督贯穿始终。所以在 2010 年 2 月智利发生的 $M8.8$ 级地震中, 90% 的建筑物成功地经受了强震的考验。而我国青海玉树 2010 年 4 月 14 日发生的 $M7.1$ 级地震中, 州府所在地结古镇 90% 的居民房屋倒塌。更可悲的是, 2005 年 11 月 26 日 $M5.7$ 级地震便导致我国江西九江房屋倒塌 1.8 万间, 损坏 16 万多间。这些都是非常值得反思的事件。

目前, 我国与日本抗震设防大体相当的只有北京、唐山、西安等少数几个地区, 绝大多数国土面积缺乏最低抗震设防要求。据统计, 20 世纪全世界由地震导致死亡的事件有一半发生在中国, 其中 49% 是因房屋倒塌致死。

近年来, 不少地震工程专业人员都意识到提高 VI 度及以下地区建筑抗震能力的重要性, 中国地震局工程力学研究所研究员郭迅在 2011 年的《环球时报》上呼吁, 我国应痛下决心, 提高建筑抗震设防水准。2011 年 6 月住房和城乡建设部发布的《农村危房改造抗震安全基本要求 (试行)》对农村危改房的抗震能力做出了具体规定, 并要求非抗震设防地区的危改房按照 VI 度设防标准采取相应的抗震构造措施。这是我国首次对普通建筑抗震能力提出了最低设防的要求。根据测算, 合理提高抗震标准并不会大幅提高建筑的造价。并且随着我国经济快速发展, 人口更为集中, 易造成严重震害。因而, 强制规定最低抗震设防要求, 使 VI 度及以下地区的建筑也具有一定的抗震能力, 已成为我国社会发展的一个十分紧迫的问题。

3 多水准地震动区划图最低设防要求的体现

这里所讲的强制规定最低设防要求, 并非简单的“提高一度设防” (魏琏, 1991; 谢礼立等, 2009)。这是由于简单的提高一度设防, 有可能使得地震重现期从原来的 500 年提高到 1500 年, 也有可能只提高到 800 年。如前所述, 地震动区划图给定地震参数是中震水平, 如果中震时的抗震按地震重现期 1500 年设计, 大震 (罕遇地震) 的抗震设计如何做? 比如 VIII 度区的地震峰值加速度为 $0.2g$, 提高一度 IX 度就是 $0.4g$, 而我国地震动区划图提供的是 50 年超越概率 10% 的加速度峰值, 也就是地震重现期是 475 年, 那么提高一度后加速度峰值所对应的地震重现期, 在不同地区是不同的 (王克海, 2010)。据统计, 50 年超越概率 2% (地震重现期为 2475 年) 与 50 年超越概率 10% (地震重现期为 475 年) 的基岩加速度的比值为 1.4—2.4, 平均值为 1.8。并且, 地震烈度为地震时包含震害在内的多种宏观地震现象的总合, 其要求简单而综合, 但抗震设计则要求分清引起结构破坏的不同因素, 以便对症下药采取有效的抗震措施 (胡聿贤, 1983)。采用地区抗震设防烈度对结构进行抗震设计, 往往采用的是基于强度的“一水准一阶段”的抗震设计方法, 这也与“多水准多阶段”的抗震设计方法相矛盾。据统计, 在 1973 年的各国抗震规范中, 采用烈度一词的占有规范的 52%; 1983 年

占 32.5%；1992 年仅占 31.5%；而到了 1996 年只占 27%，呈逐渐下降的趋势。日本在其抗震规范中历来不采用烈度，美国在 1978 年 ATC-3 样板规范后也直接采用地震动分区。并且，在 1992 年采用地震动参数区划的国家占总调查样本的 68%，到 1996 年上升到了 73%；而按烈度区划的国家由 1992 年的 32% 下降到 1996 年的 27%（谢礼立等，2009）。因而，在抗震规范中不用烈度而直接使用地震动物理量已成为国际的共同趋势。因此，应采用地震重现期来确定地震动参数，通过设定最小地震动参数满足最低设防要求，以地震动区划图中不同地震重现期代表地震危险程度。

地震区划图是震灾防御的基础，是震灾防御的核心技术之一。目前广泛采用的确定地震动的途径有两种：第一种是通过地震烈度的估计，再利用烈度与地震动的对应关系将烈度换算为地震动设计参数，这种是过去广泛使用而现在仍为许多国家和地区使用的途径；第二种是根据过去的强震观测结果，寻求地震动与地震大小、震源特性、传播介质、场地影响的统计规律（称为衰减规律），然后直接用此衰减规律来估计地震动，这种方法主要应用于美国、日本、印度、加拿大等国家。美国的地震动参数区划开始较早，1978 年即提出以有效峰值加速度（EPA）和有效峰值速度（EPV）这 2 个地震动参数为指标的地震区划原则，并于 20 世纪 80 年代完成具有概率意义的地震区划图。目前，最新的地震区划图为美国地质调查局负责完成的 2002 年版。2002 年版的地震区划图提供了重现期为 500 年（475）、1000 年（975）和 2500 年（2475）的峰值加速度（PGA）等值线（间隔 0.02g），以及阻尼比 5% 的 0.2s 和 1.0s 的加速度反应谱等值线，并且给出了 0.1s、0.3s、0.5s、1.0s 和 2.0s 周期的加速度谱值和标准危险谱和危险性曲线，通过计算可以得到任何地震重现期的地震动参数，并以邮政编码查询地震动参数，其地震动区划图具有良好的操作性（Ian Buckle 等，2008）。

而日本由于国土面积较小，地震类别较为单一，故其抗震规范中确定设计地震动的方法独特：①设计地震动的概率特征十分不明显，第一级设计地震虽有统计意义，但仍是主观确定成分较多；②第二级设计地震以确定性方法规定，其中第一类主要参考了 1923 年关东地震（大陆边缘地震），第二类主要参考了 1995 年阪神地震（都市直下型地震）。这与日本地域狭小和地震类型相对比较清楚有关。

我国自 20 世纪 50 年代至今，已经完成了 4 幅全国地震区划图，之前的地震烈度区划图均以震害的宏观描述——地震烈度为依据，而最新的第四代地震动参数区划图则将地震动峰值加速度参数和地震动反应谱特征周期作为指标，直接作为设计之用，对应的标准为 50 年超越概率 10%（地震重现期为 475 年）。我国与美国的地震动区划图的总体思路是相同的，都是以 Cornell 概率地震危险性分析为基础，代表了世界地震区划研究的先进水平。采用地震反应谱的双参数作为地震动区划图的参数，目前在世界上只有中国和美国采用，可以说两国地震动区划图的编制是先进的。从对比中也可以发现，由于美国规范能提供三种地震重现期的地震动参数，通过计算可以得到任何地震重现期的地震动参数，使实现多水准、多阶段的抗震设计成为可能。而我国只提供了 50 年超越概率为 10%（地震重现期 475 年）的地震动水准，因此，对于我国大量工程结构，如果不做地震安全性评价，目前尚不具备做多水准多阶段设计的技术条件。

我国前四代地震区划图编图原则关注的重点在地震科学方面，没有着重考虑地震区划的综合防震减灾作用，特别是没有充分考虑地震区划图在保障人民生命安全方面所起的作用。而于 2007 年 7 月启动的第五代地震区划图编制工作的基本原则，将首先考虑以抗倒塌地震动

参数作为编图的基准,在新一代区划图中将出现“超预期地震”或“最大可信地震”的概念,可直接用于抗倒塌设计,同时根据该参数折减给出小震的相应数值以满足弹性阶段的设计需要,并按一定比例给出中震以满足采取构造措施的需要。这将为结构抗震设计的发展提供必要的基础条件。研究和设计人员可以根据业主要求和管理部门的意见,通过费用-效益分析对设防标准进行优化和决策分析,并在此基础上制定设计方案,根据地震可能导致的后果严重性考虑防御措施,为新技术新方法的应用提供更多的机会。

4 建议

(1) 目前我国建筑物抗震设防的目标是:“小震不坏,中震可修,大震不倒”,笔者认为从设计人员、科研人员的角度看太宏观、太笼统,为此建议:在不同的地震作用水平下,对结构不同部位、不同构件制定不同的设计目标。有些部位、构件在中震作用水平(地震重现期约 500 年)下在弹性范围内;有些部位、构件在中震作用水平下可以进入延性;有些部位、构件在大震水平下(如:地震重现期 1000—2500 年)才进入延性,如果这些部位、构件进入延性,应明确不同地震水平作用下这些部位、构件的强度、延性参数是多少。

(2) 一定要切记:我国地震动区划图提供的地震动参数仅仅是中震水平(地震重现期 475 年),实际发生的地震可能远远超过中震水平,在设计时应应对大震(罕遇地震)有所考虑,甚至应考虑超预期地震发生后的应对措施和应急措施。

(3) 建议抗震规范中提高最低设防水准,并非是提高一度设防。笔者认为提高一度设防是错误概念(王克海等,2008;2010),谢礼立等(2009)认为是不科学的提法。抗震规范中提高最低设防水准,应通过确定最小地震动参数满足最低设防要求,并在地震动区划图中以地震重现期代表地震危险程度。

(4) 基于地震动区划图的背景是地震重现期 475 年,实际是一个中震设防水平,加之我国大量灾难性地震发生在低烈度区,即实际发生的地震常常远远超出设防水平,为此笔者建议:对于 VI 度以下设防地区的基础设施结构物,都应按照 VI 度设防标准设计并考虑采取相应的抗震措施。

(5) 本文建议的最低设防水准是 6 度(对应峰值加速度 0.05g),但随着人们对震害认识水平的提高及我国国力的提升,以后最低设防水准有可能到 7 度(对应峰值加速度 0.1g),甚至更高。

参考文献

- 高孟潭,卢寿德,2006.关于下一代地震区划图编制原理与关键技术的初步探讨.震灾防御技术,1(1):1—6.
- 胡聿贤,1983.在抗震规范中不用地震烈度的一个建议.建筑结构学报,1(1):32—39.
- 王克海,2007.桥梁抗震研究.北京:中国铁道出版社.
- 王克海,李刚,韦韩等,2008.关于抗震设计规范与地震动区划图的有关探讨.震灾防御技术,3(4):413—420.
- 王克海,李茜,韦韩,2010.汶川地震对我国地震区划图与桥梁抗震设计的启示.工程力学,27(6):120—126.
- 魏琏,1991.建筑结构抗震设计.北京:万国学术出版社.
- 谢礼立,马玉宏,翟长海,2009.基于性态的抗震设防与设计地震动.北京:科学出版社.

- 中华人民共和国国家标准, 2001. 中国地震动峰值加速度区划图 (GB18306-2001). 北京: 地震出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 1964. 地震区建筑设计规范 (草案). 未颁布.
- 中华人民共和国国家标准, 1974. 工业与民用建筑抗震设计规范 (TJ11-74). 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 1978. 工业与民用建筑抗震设计规范 (TJ11-78). 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2001. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2001). 北京: 中国建筑工业出版社.
- 中华人民共和国国家标准, 2010. 建筑抗震设计规范 (GB 50011-2010). 北京: 中国建筑工业出版社.
- Ian Buckle, Ian Friedland, John Mander, 2008. 公路结构物抗震加固改造手册. 王克海, 李茜等译, 北京: 人民交通出版社.

Suggestion of Adding Foundational Seismic Fortification Criterion in Seismic Specification of Infrastructure

Wang Kehai¹⁾, Li Yue¹⁾, W. Phillip Yen²⁾, Li Qian¹⁾ and Wei Han¹⁾

1) Research Institute of Highway, Ministry of Communications, Beijing 100088, China

2) Federal Highway Administration, Turner-Fairbank Highway Research Center, USA

Abstract Aimed at the current problems encountered in the seismic design of infrastructure in China, we propose the following suggestions: (1) The seismic design goals, strength and ductility factor of varying elements and components should be determined according to the earthquake intensity level; (2) Only the earthquake ground motion parameters of medium earthquake level (475 years returning period) are provided by the seismic zoning map, and actual earthquake is very likely to exceed the medium level, thus strong earthquake (rare earthquake) should be considered in the seismic design, even the aftermath and emergency measures should be considered when the unexpected earthquake occurs. (3) Improving the seismic fortification standards is not simple to increase one degree, but the minimum fortification requirement should be satisfied by setting the minimum parameters of ground motion and the earthquake risk should be represented by the seismic returning period in the seismic zoning map. (4) For the infrastructure in the district below intensity VI, the seismic design and construction measure should be adopted according to the intensity VI.

Key words: Criterion; Earthquake; Fortification; Suggestion