

关于抗震设计规范与地震动 区划图的有关探讨¹

王克海¹⁾ 李刚²⁾ 韦韩¹⁾ 姜震宇¹⁾ 李茜¹⁾

1) 交通部公路科学研究院, 北京 100088

2) 黑龙江省公路勘察设计院, 哈尔滨 150080

摘要 本文总结了国内外桥梁抗震设计规范和建筑结构抗震设计规范的设计思想和设计方法, 介绍了我国和美国地震动参数区划图的发展和现状, 对比分析了抗震规范使用地震区划图的情况。针对我国抗震设计规范和地震动参数区划图的现状, 提出了两条建议: (1) 地震动参数区划图编制部门应直接提供多水准的地震动参数区划图; (2) 抗震设计规范应彻底抛弃设防烈度概念, 以地震重现期取代原地震危险程度标示方法。

关键词: 桥梁 抗震 设计 规范 地震动参数 区划图 设计思想 设计方法

引言

随着人类对地震以及结构地震反应认识的不断提高, 结构的抗震设计思想也在不断发展和完善。早期结构抗震设计规范一般采用单一设防水准, 目前世界上许多国家的规范仍然还在采用这一抗震设防思想, 单一设防水准一般只进行强度验算, 以保障人身安全为主。实践表明: 单一水准设防、一阶段设计存在许多不足, 正逐渐被多水准设防、多性能目标的设计方法所取代(胡聿贤, 2006)。以我国公路桥梁抗震设计规范为例, 1970年以前我国基本上处于无抗震设计规范阶段; 从1970年到1976年为我国公路桥梁抗震研究和制定抗震设计规范的阶段; 直到1977年交通部编制了《公路工程抗震设计规范》, 才使公路桥梁抗震设计有了依据(王克海, 2007), 该抗震规范的主要特点是: 反映了海城及唐山地震对铁路和公路交通干线桥梁的震害教训, 在抗震措施上强调了要特别重视可液化土和软土地基上修建的桥梁; 从1978年到1990年, 按照1978年国家地震局正式颁布的《中国地震烈度区划图》, 公路部门的抗震设计和研究工作都按该区划图的规定执行, 做了一些地震区桥梁的现场调研及抗震评估和维修加固工作, 并于1989年制定了新的《公路工程抗震设计规范(JTJ004-89)》(交通部公路规划设计院, 1989), 该规范仍采用单一水准设防、一阶段设计的设计思想; 《中国地震动参数区划图(GB18306-2001)》(中国地震局, 2001)颁布后, 相关部门抓紧研究, 于

1 基金项目 国家自然科学基金资助项目(50778085)

[收稿日期] 2008-11-13

[作者简介] 王克海, 男, 生于1964年。研究员。主要研究方向为桥梁抗震。E-mail: kh.wang@rioh.cn

2008 年又颁布了《公路桥梁抗震设计细则 (JTG/T B02-01-2008)》(重庆交通科研设计院, 2008), 该细则采用了两水平设防、两阶段设计的抗震设计思想。

地震动参数是各国抗震设计规范的根本。我国从 20 世纪 50 年代以来, 已经完成了 4 幅全国地震区划图, 最新的第四代地震动参数区划图将地震动参数作为指标标示地震危险程度, 所对应的标准为 50 年超越概率 10% (地震重现期为 475 年)。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) 两个地震动参数为指标的地震动参数区划原则; 2002 版已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, 且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 Backle 等, 2008)。

本文结合我国的抗震设计规范现状, 介绍了世界各国桥梁结构和建筑结构抗震设计规范的基本思想和设计方法, 探讨了抗震设计规范使用地震动区划图的情况, 最后对我国抗震设计规范和地震动参数区划图的改进提出了建议。

1 桥梁结构抗震规范

当前, 在世界一些主要地震发生国家的桥梁抗震设计规范中, 设计地震作用基本上分为两个等级, 即可归纳为功能设计地震和安全设计地震。虽然各国规范使用的名词不同, 但其抗震设计基本思想是一致的 (见表 1)。功能设计地震具有较大的发生概率; 而安全设计地震则具有很小的发生概率。在功能设计地震作用下, 桥梁结构只允许发生十分轻微的破坏, 不影响正常的交通, 不经修复也可以继续使用; 而在安全设计地震的作用下, 允许桥梁结构发生较大的破坏, 但不允许发生整体破坏, 如倒塌、落梁等。

表 1 桥梁抗震设计基本思想

Table 1 The basic concepts in anti-seismic design of bridges

规范名称	设计思想和性能准则	设计方法
AASHTO (1994) 美国国家公路与 运输协会	在中、小地震作用下, 桥梁结构构件应保持在弹性范围内, 不发生大的破坏; 在大地震作用下, 桥梁结构不发生部分或整体倒塌, 若出现破坏, 应尽量使其出现在易于检测和修复的部位。	一水平设计
Caltrans (1999) 加州	在最大可信地震 (MCE) 作用下, 桥梁可以发生大的破坏, 但应该出现在易于检测和维修的部位。在中、小地震作用下, 桥梁结构不发生大的破坏。	一水平设计
ATC-32 (1996) 美国	功能评估地震: ①最小性能水平, 即时可修复的破坏; ②重要桥梁性能水平, 即时的最小破坏。 安全评估地震: ①最小性能水平, 有限的重大破坏; ②重要桥梁性能水平, 即时可修复的破坏。	重要桥梁两水平设计; 普通桥梁一水平设计
美国的公路桥梁 抗震加固改造手 册 (2006)	共设四个性能水平: 最低、生命安全、基本运营、完全运营。地震地面运动水平可分为两个水平: 水平 I 和水平 II。	两阶段设计
NZ 新西兰	遭受设计水平地震后, 可出现损坏并需要一些临时的修复, 但桥梁可以供紧急通车使用, 并且损坏的修复应当是可行和合理的; 在小于设计水平地震的作用下, 损坏应当很小并且不应导致交通的中断; 在大于设计水平地震的作用下, 桥梁不应倒塌, 但可以发生严重的破坏, 经过紧急修复后可重新使用, 但只允许超载过桥。	一水平设计, 低水平地震作用下的结构性能是隐含实现的
EC8 欧洲 (1998)	设计地震出现后, 桥梁应保持其结构的完整性和适度的残余抗力, 容许桥梁的部分构件发生重大的破坏; 易于损坏的构件, 应使其耗能作用能够保证结构在震后仍有紧急交通功能, 并易于检测与维修; 允许在桥墩中指定的断面出现弯曲屈服; 防止主梁或桥面由于位移过大而发生落梁。	一水平设计, 低水平地震作用下的结构性能是隐含实现的

续表

规范名称	设计思想和性能准则	设计方法
日本 (1996)	对于 A 类桥, 要求在设计基准期内在大概率地震作用下, 桥梁不产生严重的破坏; 对于 B 类桥, 在设计基准期内在大概率地震作用下, 不出现损害桥梁整体性的破坏; 在小概率地震作用下, 桥梁仅产生有限的破坏。	使用功能地震: 允许应力法; 大地震: 校核柱的延性和位移
中国公路 (1989)	公路工程, 经一般整修即可正常使用; 位于一般地段的三级公路工程, 经短期抢修即可恢复使用; 三、四级公路工程和位于抗震危险地段的高速公路、一级公路工程, 保证桥梁、隧道及重要构筑物不发生严重损坏。	一水平设计
中国公路抗震设计细则 (2008)	根据桥梁的跨径、重要性划分抗震设防类别: A、B、C、D。所采用的地震动水准可分为: ①E1 地震作用; ②E2 地震作用。	两水平设防、两阶段设计
中国铁路 (2006)	按多遇地震、设计地震、罕遇地震三个地震动水准进行抗震设计。	一阶段设计

从表 1 可看出, 2000 年以前, 各国桥梁抗震设计规范中虽然设定了两个水准, 但在具体的设计程序上, 绝大多数国家仍坚持以安全设计地震为准的单一水平设计方法, 并认为第一设计水准的要求自动满足; 2000 年以后, 这种情况得到了改善, 中国、美国和日本在新的桥梁抗震设计规范中, 都建议对两个设计地震动水准进行直接设计。

2 建筑结构抗震设计规范

我国的《工业与民用建筑抗震设计规范 (TJ11-78)》只采用单一设防水准, 提出的抗震设防目标是: “在遭遇相当于设计烈度的地震影响时, 建筑物的损坏不致使人民生命和重要生产设备遭受危害, 建筑物不需修理或经一般修理仍可继续使用”。《建筑抗震设计规范 (GBJ11-89)》采用多级设防思想, 提出了“三水准”的抗震设防目标, 即“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”, 它和现行规范采用二阶段设计实现“三水准”的设防目标是一致的: 即第一阶段设计是“小震”水准的强度验算和弹性变形验算; 第二阶段设计是“大震”水准下的弹塑性变形验算 (中国建筑科学研究院, 2008)。

日本建筑标准法 (BSL) 规定了两个水准的设计地震: 即第一水准的中等强度地震和第二水准的强烈地震。要求结构在中等强度地震作用下, 几乎不遭受损坏; 而在强烈地震作用下, 则要求建筑不发生倒塌或危及人员伤亡。日本的建筑抗震设计采用了两次设计: 一次设计针对第一水准, 采用容许应力设计法进行强度验算, 同时验算各层的层间角变位是否满足要求; 二次设计针对第二水准, 验算采用极限分析所获得的楼层极限承载能力是否大于极限承载能力。

美国 SEAOC 抗震规范指出: 抵抗小地震, 结构和非结构部分都不能损坏; 抵抗中等地震, 结构不坏, 非结构部分可有某些损坏; 抵抗大震时, 结构和非结构部分可损坏, 但不倒塌。美国规范 (如 SEAOC、UBC-97) 规定的设计水准为 50 年超越概率为 10% 的地震 (相当于我国的“中震”), 并在此水准下进行结构的承载力验算和变形验算。

新西兰规范要求结构满足三种极限状态: 即遭遇到强度较小的相对频繁的地震时, 结构满足使用极限状态; 遭遇到中等强度的地震时, 满足破坏控制极限状态; 遭遇到强烈而罕遇的特大地震时, 满足免坍极限状态。新西兰规范 (NZS) 采用非弹性设计反应谱, 直接考虑结构延性的影响, 规范规定的非弹性反应谱来自对弹性反应谱的修正, 修正系数 R_d 是结构位移延性系数和结构自振周期的函数。

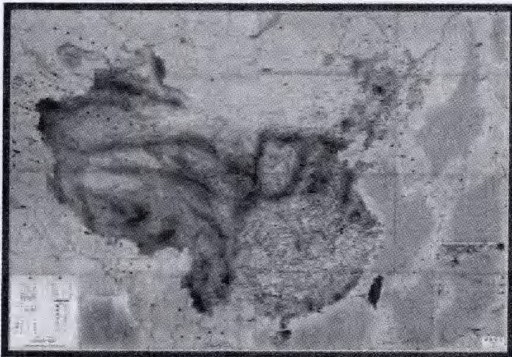
以上所介绍的规范都允许结构在设防水准下进入非弹性工作阶段, 结构可有轻微的损坏, 故都对安全设防水准采用了一个系数来折减弹性地震作用: 即都考虑了结构弹塑性变形对弹性反应谱的折减; 并且由于这些折减系数均与结构的位移延性有关, 各国规范都规定了各自的用于保证结构位移延性的相关要求。

3 我国地震动区划图简介

自 20 世纪 50 年代至今, 我国已完成了 4 幅全国地震区划图, 其中前 3 幅图是以地震烈度为指标, 第四代地震区划图以地震动参数为指标标示地震危险程度, 于 2001 年 8 月以国家强制性标准的形式在全国颁布执行。

中国地震动参数区划图的结果可以概括为“两图一表”。“两图”(如图 1)是指 II 类场地 50 年超越概率 10% 的峰值加速度分区图(分为 $<0.05g$ 、 $0.05g$ 、 $0.10g$ 、 $0.15g$ 、 $0.20g$ 、 $0.30g$ 、 $\geq 0.40g$ 七档)和 II 类场地阻尼比 0.05 的加速度反应谱特征周期分区图(分为 0.30s、0.35s 和 0.40s 三档), 它强调了地震环境对反应谱形状的控制作用。“一表”是指不同场地的地震动反应谱特征周期调整表(如表 2)。

中国地震动峰值加速度区划图



中国地震动反应谱特征周期区划图



图 1 中国地震动参数区划图

Fig. 1 Seismic zonation map with ground motion parameters of China

表 2 中国地震动反应谱特征周期调整表

Table 2 Seismic response spectrum period of China

特征周期分区 (单位: s)	场地类型划分			
	坚硬	中硬	中软	软弱
1 区	0.25	0.35	0.45	0.65
2 区	0.30	0.40	0.55	0.75
3 区	0.35	0.45	0.65	0.90

4 美国地震动区划图简介

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) 两个地震动参数为指标的地震区划原则, 并于 20 世纪 80 年代完成了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。

美国的 2002 年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, 同时还提供了标准危险谱和危险性曲线。区划图是坚硬岩石场地的结果, 这种场地上部 30m 内的平均等效剪切波速为 760m/s (Ian Buckle 等, 2008)。

5 抗震规范与地震动区划图

中、美两国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。

我国《建筑抗震设计规范 (GB50011-2001)》采用了二阶段设计方法, 第一阶段设计是在方案布置符合抗震原则的前提下, 按与基本烈度相对应的众值烈度, 用弹性反应谱法求得结构在弹性状态下的地震作用标准值和相应的地震作用效应, 然后与其它荷载效应按一定的组合系数进行组合, 对结构构件截面进行承载力验算, 对较高的建筑物还要进行变形验算, 以控制侧向变形不要过大。这样, 既满足了必要的强度可靠性, 又满足了设防要求的损坏可修。对大多数结构, 可只进行第一阶段设计。对少部分结构, 如有特殊要求的建筑和地震时易倒塌的结构以及有明显薄弱层的不规则结构, 除进行第一阶段设计外, 还要进行第二阶段设计, 即按与基本烈度相对应的罕遇烈度 (大震), 验算结构薄弱部位的弹塑性层间变形是否小于限值, 如果变形过大, 应修改设计或采取相应的构造措施。目前, 我国区划图编制部门只提供了重现期为 475 年的地震动参数区划图。对于建筑结构的抗震设计, 当前采用的是统计分析方法, 给出了重现期为 50 年 (小震) 和 1000 年 (大震) 的峰值加速度与重现期为 475 年的峰值加速度的经验关系。

而我国的《公路工程抗震设计规范 (JTJ004-89)》仍采用单水准设防、一阶段设计的原则, 不仅落后于建筑结构抗震设计规范, 更远远落后于日本、美国等国的公路工程抗震设计规范。表 3 给出了目前世界上几个具有代表性的桥梁抗震设计规范所使用的地震区划图情况。

表 3 桥梁抗震规范所使用的地震区划图

Table 3 Seismic zonation maps applied in anti-seismic design of bridges

规范名称	备 注
AASHTO (1994) 美国国家公路 与运输协会	50 年超越概率 10%, 地震加速度区划, 美国一些州有地区性的区划图, 下列情况需要进行专门研究: ①场地位于活动断层附近; ②预期发生长时间持续时间的地震动; ③重要桥梁, 需要考虑更长的重现期。
Caltrans (1999) 加州	场地最大可能地震动加速度 (MCE)。
ATC-32 (1996) 美国	两个设计地震动水平: ①功能评估地震, 重现期 500 年左右; ②安全评估地震 (MCE), 重现期 1000—2000 年。
NZ 新西兰	基本加速度系数和一个风险系数, 基本加速度系数在零周期处取值 0.4, 区划系数 0.6—1.2, 风险系数 1.0—1.3, 风险系数 1.0 时的重现期是 450 年。
EC8 欧洲	地震加速度区划, 重现期 475 年, 对应于 50—100 年的结构寿命, 区划图的超越概率为 10%—20%, 当加速度小于 0.04g 时, 可以不按 UC8 执行, 欧共体各国需要制定各自的加速度系数区划图。

续表

规范名称	备 注
日本	地震荷载分 2 级 3 类: I 级 (仅一类) 为桥梁使用寿命期间发生概率较大的地震, 标准地震加速度为 0.3g。II 级分为两类: 第一类为发生于大陆板块边缘的地震; 第二类为发生在板块内部断层的都市直下型地震, 这两类地震的强度和频谱特性有所不同, 前者最大 1.0g, 后者最大 2.0g, 分为 A、B、C 三个地震地区类型, 区域修正系数分别为 1.0、0.85 和 0.7。
中国公路 (89、2008)	烈度区划与地震动参数区划, 规范给出烈度与地面运动加速度最大值之间的对应关系, 50 年超越概率约 10%, 适用于一般结构, 重要和特殊结构进行专门的工程场地地震危险性评估。

从表 3 可以看出, 除了我国现行区划图外, 其它主要地震国家均采用了地震动参数区划。采用烈度进行桥梁结构抗震设计无论是在概念上, 还是在数值方面都存在很多问题, 我国由于在 2001 年才公布第四代地震动参数区划图, 为了保持新、老规范的衔接, 继续保留了烈度概念, 提供了烈度与地震动峰值加速度的对应关系。

由表 3 还可以看到, 日本规范确定设计地震动的方法比较独特: 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。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。

2008 年, 我国交通部又出台了《公路桥梁抗震设计细则 (JTG/T B02-01-2008)》, 该细则已采用两水平设防、两阶段设计的抗震设计思想, 并作为行业推荐性标准进行推广应用。各设防类别桥梁的抗震设防目标如表 4 所示。与建筑抗震设计规范一样, 对重现期不等于 475 年的地震作用, 该细则采用统计分析的方法, 给出 E1 地震作用和 E2 地震作用的峰值加速度与重现期为 475 年的峰值加速度的经验关系, 带有较强的主观判断。

表 4 各设防类别桥梁的抗震设防目标

Table 4 Basic objects of various types of anti-seismic design for bridges

桥梁抗震 设防类别	设 防 目 标	
	E1 地震作用	E2 地震作用
A 类	一般不受损坏或不需 修复可继续使用	可发生局部轻微损伤, 不需修复或经简单修复可继续使用
B 类		应保证不致倒塌或产生严重结构损伤, 经临时加固后可供维持应急交通应用
C 类		应保证不致倒塌或产生严重结构损伤, 经临时加固后可供维持应急交通应用
D 类		

6 结语

不管是桥梁的抗震设计规范, 还是建筑结构的抗震设计规范, 逐步采用多水准设防、多性能目标的设计方法是一种发展趋势, 目前国内外很多新修订的抗震设计规范已经采用多级设防的设计思想。我国建筑抗震设计规范从 89 版就开始采纳了“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的三级设防原则; 公路桥梁抗震设计细则 (2008) 已经采用了两水平设防、两阶段设计的抗震设计思想; 铁路工程抗震设计规范 (2006) 规定铁路工程应按三个地震动水准进行抗震设计。上述三个规范皆以我国地震动参数区划图为基准, 即所取用的设计地震动是以 50 年超越概率 10% (地震重现期为 475) 为基准, 对应不同的设防水准乘以相应的“经验”系

数；而美国对于不同的设防水准，均有一套地震动参数区划图与之相对应。相对而言，我国的抗震设计规范更偏于主观经验和判断，不是真正的多水准设防、多阶段设计。可以说，对我国量大面广的工程结构包括桥梁结构，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，我国编制多个地震重现期的地震动区划图是工程界的迫切需求。

作为抗震设计规范根本的地震动区划图，我国自 20 世纪 50 年代以来，已完成了 4 幅全国地震区划图，其中第四代地震动参数区划图将地震动参数作为指标标示地震危险程度。同时，我国抗震设计规范根据区划图的改动进行了相应的修订，但规范中还是残留了很多烈度的概念。抗震设防烈度偏向于主观经验，而以地震重现期来标示地震危险程度，从概念的清晰度、使用的方便性和理论基础的准确度等来说，都大大优于抗震设防烈度。为此笔者建议：

(1) 为适应抗震设计规范多级设防、多阶段设计的发展需要，地震动参数区划图编制部门应直接提供多水准的地震动参数区划图，即：不同地震重现期的地震动区划图。我国编制多个地震重现期的地震动区划图是工程界的迫切需求，建议地震行业主管部门借鉴国外经验（特别是美国 USGS 编制的地震动区划图）尽快修订我国的地震动区划图，以适应我国蓬勃发展土木工程的迫切需求。

(2) 目前，国内不少人提出“提高一度设防”的概念，笔者认为缺乏科学依据，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。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（高孟潭等，2006）。简单的提高一度设防，有可能使得地震重现期从原来的 475 年提高到 3000 年，也有可能只提高到 800 年，这是非常不科学的。因此，笔者建议：采用地震重现期来确定地震动参数，抗震设计规范应彻底抛弃设防烈度概念，以地震重现期取代原地震危险程度标示方法。

参考文献

- 重庆交通科研设计院，2008. 公路桥梁抗震设计细则（JTG/T B02-01-2008）. 北京：人民交通出版社.
- 高孟潭，卢寿德，2006. 关于下一代地震区划图编制原则与关键技术的初步探讨. 震灾防御技术，1（1）：1—6.
- 胡聿贤，2006. 地震工程学（第二版）. 北京：地震出版社.
- 交通部公路规划设计院，1989. 公路工程抗震设计规范（JTJ 004-89）. 北京：人民交通出版社.
- 王克海，2007. 桥梁抗震研究. 北京：中国铁道出版社.
- 中国地震局，2001. 中国地震动参数区划图（GB 18306-2001）. 北京：中国标准出版社.
- 中国建筑科学研究院，2008. 建筑工程抗震设防分类标准（GB 50223-2008）. 北京：中国建筑工业出版社.
- Ian Buckle, Ian Friedland, John Mander, Geoffrey Martin, Richard Nutt and Maurice Power, 2008. 公路结构物抗震加固改造手册（上册：桥梁），王克海、李茜、莫勋涛等译. 北京：人民交通出版社.

Study on Seismic Design Code and Seismic Ground Motion Parameter Zonation Map

Wang Kehai¹⁾, Li Gang²⁾, Wei Han¹⁾, Jiang Zhenyu¹⁾ and Li Qian¹⁾

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

2) Heilongjiang Provincial Highway Surveying and Design Institute, Harbin 150080, China

Abstract In paper, the philosophy and methodology of seismic design code for bridge and building around the world are introduced. Based on the present situation about seismic ground motion parameter zonation maps of China and USA, as well as the usage of seismic ground motion zonation maps for certain structural design code in China and USA, we propose some suggestions for the improvement of anti-seismic design regulation in China in the future as follows: 1) multi-level zonation map should be provided; 2) the concept of fortification intensity should be abandoned, earthquake recurrence interval should be added instead.

Key words: Bridge seismic design code; Seismic design code for building; Seismic ground motion parameter zonation map; Design philosophy; Design methodology