

王珊、张郁山,2017,各类抗震设计规范对设计地震动时程规定的对比分析,中国地震,33(1),56~67。

# 各类抗震设计规范对设计地震动时程规定的对比分析

王珊<sup>1,2)</sup> 张郁山<sup>2)</sup>

1) 中国地震局地球物理研究所,北京市民族大学南路5号 100081

2) 中国地震灾害防御中心,北京市朝阳区民族园路9号 100029

**摘要** 系统介绍了国内外各类抗震设计规范和导则中关于设计地震动时程方面的规定。分别从时程分析范围、时程组数以及天然时程所占比例、设计地震动时程的峰值和反应谱特性、设计地震动时程的持时特性以及设计地震动时程的相关性等5个方面,对比了不同行业抗震设计规范中关于地震动时程相关规定的异同。以我国现行《建筑抗震设计规范》为例,给出了满足相关要求的设计地震动时程,并针对设计地震动时程确定过程中需要关注的问题进行了讨论,以期为我国地震安全性评价工作中设计反应的确定谱提供参考。

**关键词:** 抗震设计规范 设计地震动时程 反应谱 时程分析

[文章编号] 1001-4683(2017)01-056-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

工程结构的抗震设防是减少地震灾害对人类生命财产安全造成损害的有效措施。美国、日本、欧洲各国等的建筑在历史上历次地震中都显示了优良的抗震性能。因此,将我国的抗震规范与这些国家的抗震规范进行对比,取其先进的成果和经验,使得我国抗震规范更加完善,可为中国的抗震设防提供更加安全的保障。郭明珠等(2003)、李小军等(2001)对不同抗震规范中场地类别的划分方法进行了比较,研究发现场地分类主要由场地分类指标和考虑因素2个方面所决定。郭明珠等(2003)、余湛等(2008)比较了中国、美国和欧洲各国3种抗震设计反应谱,主要针对设计地震反应谱平台段宽度和反应谱值等2个方面进行了研究。范力等(2006)将抗震设防目标、设计方法与欧洲规范进行比较后发现,不同规范具有不同水准的设防目标,为达到设防目标应采用相对应的抗震设计方法。而关于设计地震动时程方面的研究,只有侯春林等(2012)对中、美两国有关核电厂的不同法规中涉及人造地震动方面的规定作了详细的对比分析。

复杂工程结构的抗震设计均需要开展时程分析工作。作为时程分析的输入,设计地震动时程的确定是时程分析工作中至关重要的技术环节。限于技术条件,早期获得的地震动

[收稿日期] 2016-08-25; [修订日期] 2016-12-06

[项目类别] 地震行业科研专项项目(201408020)资助

[作者简介] 王珊,女,1988年生,本科,助理研究员,主要从事地震工程研究。E-mail:huli\_077@163.com

张郁山,通讯作者,男,1974年生,博士,研究员。E-mail:hyszhang@163.com

时程的数量和质量都存在一定的问题,难以满足工程的实际需要(肖遥等,2014)。近几年,尽管获得了较为丰富的地震动观测资料,但设计人员仍面临着一个难题,那就是如何选择 1 组合理的输入地震动时程,以使得不同的输入地震动样本计算所得结果之间的差异尽可能小。通常在时程分析计算中,往往由于所选择地震波的不同而导致计算结果相差数倍甚至十几倍(王亚勇等,1991)。为了合理考虑输入地震动时程的不确定性对抗震分析结果的影响,国内外各类抗震设计规范均对设计地震动时程的确定作出了较为详细的规定。但是,由于不同类型结构存在自身动力特性的差异,故其对不同地震动特性的敏感程度也不同,如相对于短周期结构,中长周期结构对输入地震动的速度和位移特性更为敏感,因此,不同行业的抗震设计规范对设计地震动时程的确定准则也是有所不同的。本文在收集不同行业抗震设计规范的基础上,系统地对比研究了不同抗震设计规范中有关确定设计地震动时程方面的规定,并以我国现行的《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)为例,给出了满足相关要求的设计地震动时程。

## 1 规范收集

为了便于研究不同行业抗震设计规范中关于地震动时程的相关规定,本文收集的国内现行抗震设计规范主要包括《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)、《构筑物抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012)、《核电厂抗震设计规范》(中华人民共和国建设部,1997)、《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(国家能源局,2015)、《城市桥梁抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2011)、《公路桥梁抗震设计细则》(中华人民共和国交通运输部,2008)、《石油化工构筑物抗震设计规范》(中华人民共和国工业和信息化部,2014)、《电力设施抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2013)、《石油化工钢制设备抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012)。这些规范较为全面地代表了我国抗震设计规范在设计地震动确定准则方面的规定。其次,为与国外抗震设计规范进行对比,本文重点分析了具有代表性的国外相关抗震设计规范,其中包括美国的 FEMA(FEMA 450,2003)、UBC 97(UBC,1997)、《美国建筑荷载规范》(ASCE7-10,2010)、欧洲的 Eurocode 8(BS EN 1998-1,2004)和日本的《道路桥示方书·同解说·V 耐震设计篇》(社团法人日本道路协会,2012)。

## 2 确定设计地震动时程的准则

现行各类抗震设计规范对设计地震动时程的规定主要涉及时程分析的应用范围、时程分析中输入地震动样本数量及天然地震动所占比重、设计地震动时程的反应谱特性、峰值特性、持时特性以及不同样本之间的相关性等方面。

### 2.1 时程分析范围

反应谱法(包括底部剪力反应谱法和振型分解反应谱法)是最基本的结构抗震计算方法,仅在某些特定条件下才需要开展结构地震反应的时程分析计算。因此,各类规范均对时程分析法的应用范围进行了规定(表 1)。

表 1 采用时程分析的房屋高度范围

烈度、场地类别	房屋高度/m
8 度 I、II 类场地和 7 度	>100
8 度 III、IV 类场地	>80
9 度	>60

我国《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)第5.1.2条第3款中明确规定:“特别不规则的建筑、甲类建筑和表1所列高度范围的高层建筑,应采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算。”针对罕遇地震,第3.6.2、5.5.2、5.5.3条规定:“不规则且具有明显薄弱部位可能导致重大地震严重破坏的建筑结构、7度Ⅲ、Ⅳ类场地和8、9度的大跨度空间结构应按规定进行罕遇地震作用下的弹塑性变形分析,可根据结构特点采用静力弹塑性分析或弹塑性时程分析方法。”

其他部分规范对于时程分析应用范围的规定见表2。由表2可见,一般需要采用时程分析法进行补充计算的建(构)筑物主要是甲类和特别不规则的结构。《建筑工程抗震设防分类标准》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2008)中规定:“甲类在设防类别中被定义为特殊设防类,是指使用上有特殊设施,涉及国家公共安全的重大工程和地震时可能发生严重次生灾害等特别重大灾害后果,需要进行特殊设防的建(构)筑物。而特别不规则型指的是存在多项不规则或某项不规则超过规定的参考指标较多时,均属于特别不规则的建(构)筑物。”同样,美国、欧洲等的抗震规范分别对平立面不规则的建筑、有大跨构件、超过一定高度的高层建筑和特别重要的建筑也提出了按时程分析法进行抗震计算的要求。日本《道路桥示方书·同解说·V耐震设计篇》(社团法人日本道路协会,2012)中规定时程分析法适用于地震时“举动复杂”的桥梁。而对于“举动复杂”的桥梁,具体给了如下例子:固有周期较长的桥梁(一般情况下指固有周期大于1.5s的桥梁);另外,桥墩高度较高的桥梁(一般情况下指高于30m的桥梁);拥有使用橡胶支承的地震时水平力分散构造的桥梁;抗震桥;Rahmen桥;塑性化钢制桥墩桥;斜拉桥、吊桥等钢缆类桥梁;上、中路式拱桥;曲率半径小、上部构造两端形成的角度较大的曲线桥等。

表2 时程分析应用范围的对比

规范名称	应用范围
构筑物抗震设计规范	甲类构筑物和特别不规则的构筑物
水电工程水工建筑物抗震设计规范	甲类工程
石油化工构筑物抗震设计规范	甲类构筑物和规范另有规定的构筑物
电力设施抗震设计规范	特别不规则或有特殊要求的电气设施
城市桥梁抗震设计规范	复杂立交工程、斜桥和非规则曲线桥,宜采用非线性时程分析方法
石油化工钢制设备抗震设计规范	设计基本地震加速度 $\geq 0.30g$ ,高度 $> 120m$ ,且高径比 $> 25$ 的直立设备和 $15 \times 10^4 m^3$ 以上的超大型储油罐

## 2.2 时程组数以及天然时程所占比例

时程分析工作中,有关输入地震动样本的数量(时程组数)方面的规定主要是保证结构地震反应的数值模拟结果能够充分考虑输入地震动的不确定性。相比基于随机过程理论生成的“人工”地震动,“天然”地震动时程蕴含了实际地震的震源、地震波传播路径和局部场地条件等信息,能更真实地反映工程所在场址的地震环境和局部场地条件特征。因此,随着强震观测资料的丰富,时程分析工作中天然地震动所占的比例会越来越大。

我国《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)规定(第5.1.2条第3款):“采用时程分析法进行多遇地震下的补充计算时,可以采取3组、7组或7组以上的设计地震动时程,其中实际强震记录的数量不应少于总数的2/3。当取3组加速度时程曲

线输入时,计算结果宜取时程法的包络值和振型分解反应谱法的较大值;当取 7 组及 7 组以上的时程曲线时,计算结果可取时程法的平均值和振型分解反应谱法的较大值。”对于罕遇地震下弹塑性变形验算的时程分析工作,规范对输入时程的组数并未作明确规定,实际工作中均是参照有关多遇地震的规定。

规范的这种有关时程组数的规定,主要是保证小样本容量下的计算结果能够合理地估计地震作用效应值。时程组数的具体量化指标则是基于对大量地震加速度记录输入不同类型结构进行时程分析所得结果的统计分析,该分析表明,若选用不少于 2 组实际记录和 1 组人工模拟的加速度时程曲线作为输入,计算的平均地震效应值不小于大样本容量平均值的保证率大于 85%,而且一般也不会偏大很多;当选用数量较多的地震波,如 5 组实际记录和 2 组人工模拟时,则保证率更大(《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010))。

我国其他大部分行业的抗震设计规范与《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)基本一致,即“应至少选择类似场地地震地质条件的 2 条实测加速度记录和 1 条以设计反应谱为目标谱的人工生成模拟地震加速度时程”。中国《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(国家能源局,2015)仅对于人工模拟地震加速度时程的数量进行了规定;《城市桥梁抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2011)对时程组数进行了规定,但未对天然地震动以及人工地震动的比例进行规定。其他规范对时程组数的相关规定详见表 3。

对于时程分析中时程组数的选择,国外规范的规定大体一致的。其中,美国的 FEMA (FEMA 450, 2003)、UBC 97 (UBC, 1997) 以及美国土木工程师学会的《美国建筑荷载规范》(ASCE7-10, 2010) 均规定采用时程分析法进行计算时应选择不少于 3 组的水平地震动记录,所选的时程应与控制设计基本地震

(或最大考量地震)在震级、断层距和震源机制等 3 个方面保持一致。Eurocode8 (BS EN 1998-1, 2004) 规范中对于选用的时程组数并没有明确的规定,只有在三维模型计算时需要同时输入 3 个方向的地震动加速度分量,且不同方向的地震动加速度输入需使用不同的加速度时程分量。

FEMA (FEMA 450, 2003) 和 UBC 97 (UBC, 1997) 对时程分析最终结果处理方式的规定是相同的,当采用 3 组地震加速度时程计算时,应取各组计算结果的最大值;当采用 7 组及以上地震加速度时程计算时,可取结果的平均值。这一点与中国《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)是一致的。

### 2.3 设计地震动时程的峰值和反应谱特性

反应谱是现阶段描述地震工程特性的基本参数,反应谱法也是各类抗震设计规范规定的基本抗震计算方法。工程场址的设计地震动反应谱综合反映了其所处的地震环境特征

表 3 时程组数规定的对比

规范名称	时程组数
构筑物抗震设计规范	≥3(2 实际+1 人工)
水电工程水工建筑物抗震设计规范	总数无明确规定, ≥3 组人工
石油化工构筑物抗震设计规范	≥3(2 实际+1 人工)
电力设施抗震设计规范	≥3(2 实际+1 人工)
城市桥梁抗震设计规范	≥3
石油化工钢制设备抗震设计规范	≥3(2 实际+1 人工)

和局部场地条件特征。因此,工程结构的设计地震动反应谱是确定时程分析中输入地震动时程的重要约束性条件。

我国《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)规定的地震影响系数曲线是工程设计地震动反应谱与重力加速度  $g$  的比值,将其乘以结构的重量即可得到作用在结构上的地震力。因此,地震影响系数曲线可以视为工程结构设计地震动反应谱的另一种形式。《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)规定,多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符;“在统计意义上相符”意味着多组时程波的平均地震影响系数曲线与反应谱法所用的地震影响系数曲线相比,在对应于结构主要振型的周期点上相差不大于 20%。但具体取多少阶结构振型,规范并未给出明确规定。在计算结果方面,时程法计算结果在结构主方向的平均底部剪力一般不应小于振型分解反应谱法计算结果的 80%,每条地震波输入的计算结果不应小于 65%;但计算结果也不能太大,每条地震波输入计算不大于 135%,平均不大于 120%。

我国《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(国家能源局,2015)要求以 5% 阻尼比的设计反应谱为目标谱合成人工地震动时程。但针对设计时程对目标谱的拟合误差未加以明确规定。

《城市桥梁抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2011)规定:“已作地震安全性评价的,设计地震动时程要根据其结果确定;未作地震安全性评价的,可根据规范规定的设计加速度反应谱,合成与其兼容的设计加速度时程,也可选用与设定地震震级、距离大体相近的实际地震动加速度记录,通过时域方法调整,使其反应谱与规范设计加速度反应谱兼容。”该规范规定的方法是以强震记录为“种子”生成设计地震动时程的方法,此方法生成的时程不仅能够拟合设计反应谱,而且具有天然地震动波形的基本特征。因此,该方法在美国核安全管理委员会(NRC)的标准审查大纲 SRP3.7.1(USNRC,2014)中被规定用于核电站抗震分析中设计地震动的合成,是一种具有应用前景的合成方法。张郁山等(2014)提出的基于小波函数的地震动反应谱拟合方法能够实现这种地震动时程的合成。将《城市桥梁抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2011)规定的标准设计地震动反应谱作为目标谱,其中,  $T_g = 0.4s$  (II类场地、2区),  $A_{max} = 0.22g$  (7度, E2地震作用,抗震设防分类为乙类)。目标反应谱曲线如图 1(a)中灰色实线所示。选取 1999 年台湾集集地震 ( $M_w = 7.62$ )、TCU085 台站(震中距 107km)获取的 SN 方向加速度记录作为“种子”地震动,其加速度、速度和位移时程曲线如图 2所示。对图 2(a)所示加速度进行调整后,所得设计地震动加速度时程曲线如图 3(a)所示,对其积分所得速度和位移如图 3(b)、3(c)所示。图 2(a)、图 3(a)所示加速度的反应谱分别如图 1(a)中蓝色、红色点线所示,它们与目标谱之间的相对误差如图 1(b)所示。可以看出,利用该方法调整后,不仅所得设计地震动的反应谱以较高精度逼近目标设计谱(相对误差小于 5%)(图 1(b)),而且其加速度、速度、位移波形曲线非常好地保留了原始天然地震动时程曲线的基本特征(图 2、3)。

《日本公路桥梁抗震设计规范释义》(刘健新等,2014)中介绍,日本《道路桥示方书·同解说·V 耐震设计篇》(社团法人日本道路协会,2012)对于采用时程分析方法进行动力计算时要求,最好采用建设场地实测的强震记录。但是大多情况下,很难观测到此强震记录,因

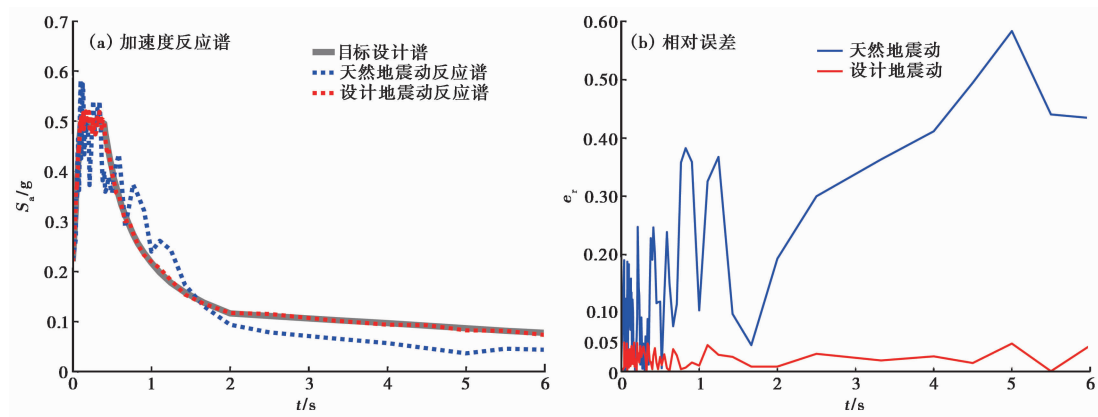


图 1 天然地震动与设计地震动的反应谱与目标反应谱之间的比较

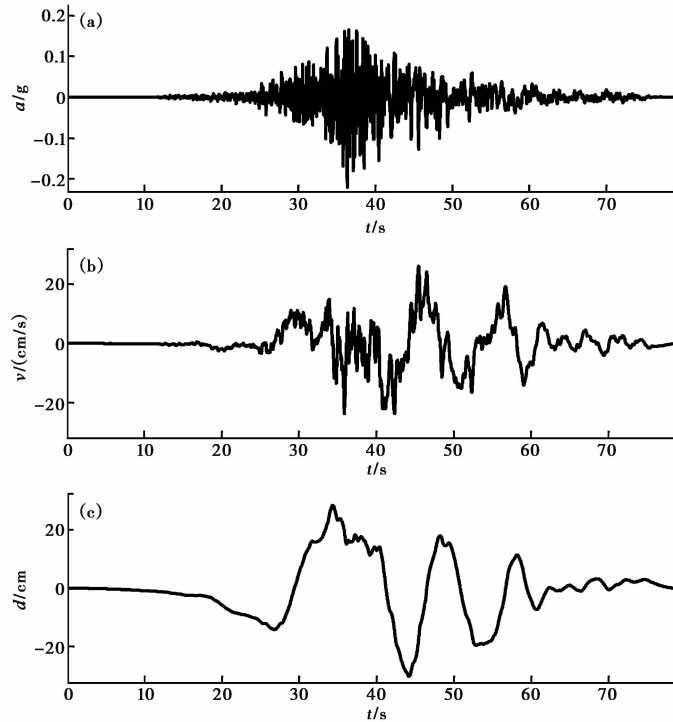


图 2 天然地震动时程

(a)天然地震动加速度;(b)天然地震动速度;(c)天然地震动位移

此,输入的地震动需要考虑地震动的强度、周期特性、持续时间以及桥梁的固有周期、阻尼比等,并且将以往发生的具有代表性的强震记录通过振幅调整(使地震波与加速度反应谱具有相似的特性)后使用。为此,日本《道路桥示方书·同解说·V 耐震设计篇》(社团法人日本道路协会,2012)给出了 21 条(水平 1 地震动的 3 个+水平 2 地震动的 18 个)经振幅调整后与规范反应谱特性相一致的地震加速度时程波。正是由于将地震时程标准化,方便了工程上

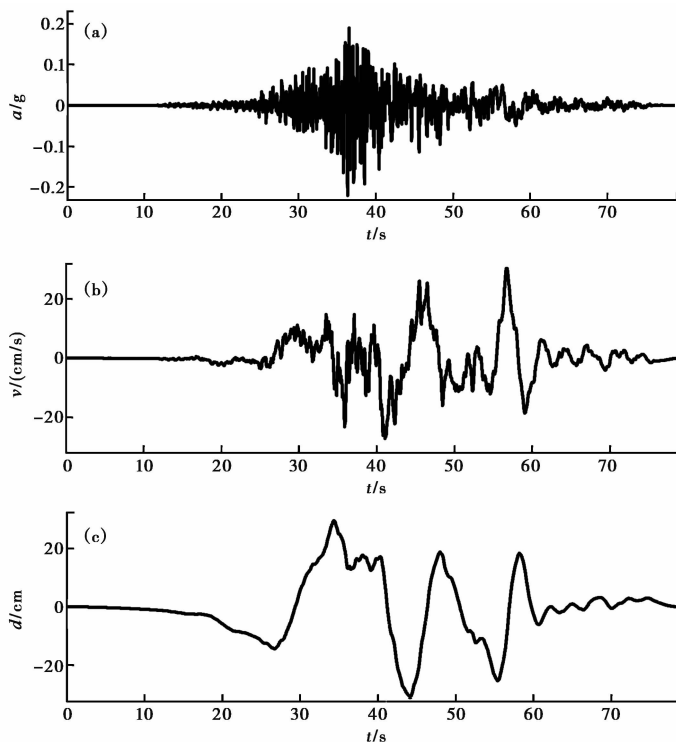


图3 设计地震动时程

(a)设计地震动加速度;(b)设计地震动速度;(c)设计地震动位移

的应用,才使得时程分析法得到了广泛的应用(伊藤吉隆,2001)。

我国《核电厂抗震设计规范》(中华人民共和国建设部,1997)规定,设计地震动时程应包络多阻尼设计谱(阻尼比为5%~20%)。“包络”的定义为:针对任一阻尼比,设计地震动时程的反应谱低于目标反应谱的控制点数不得多于5个,其相对误差不得超过10%,且反应谱控制点处纵坐标总和不得低于目标反应谱的相应值。其中,在0.03~5.00s周期内,反应谱控制周期点数不得少于75个,且应大体均匀地分布于周期的对数坐标上,其各频段的频率增量可采用表4的人工生成模拟地震振动控制点的频段及其增量。规范中规定,既可以使用实际地震动记录作为“种子”,也可以使用三角级数叠加法生成初始地震动。当采用三角级数叠加法生成时,相角要求既可采用相当于厂区地震条件的实际加速度记录的相角,也可采用在 $0 \sim 2\pi$ 之内随机均匀分布的相角,并且时程应满足时间过程包络函数的要求。

表4 控制点的频段及其增量

频段/Hz	0.2~3.0	>3.0~3.6	>3.6~5.0	>5.0~8.0	>8.0~15.0	>15.0~18.0	>18.0~22.0	>22.0~33.0
频率增量/Hz	0.10	0.15	0.20	0.25	0.50	1.00	2.00	3.00

UBC 97(UBC,1997)中规定当没有合适的3组强震记录时,可采用人工地震动,以保证时程样本总数不低于所需数量。针对任一水平分量实际记录,可对其调整,使其位于 $0.2T \sim$

1.5T 周期范围内任一点的 5% 阻尼比反应谱不得小于设计谱的 1.4 倍,其中, T 为结构基本自振周期。

美国土木工程师学会的《美国建筑荷载规范》(ASCE7-10,2010)中规定:①在二维模型计算时,应包含 1 条实际强震记录,在 0.2T~1.5T 周期范围内,所有地震动样本 5% 阻尼比反应谱的均值不小于设计谱;②在三维模型计算时,应包含 2 条从独立强震记录中选出的水平分量,可通过调整强震记录,使得位于 0.2T~1.5T 周期范围内所有样本反应谱的均值不小于设计谱值的 1.3 倍。

Eurocode8 (BS EN 1998-1,2004) 规范中对人工地震动以及模拟地震动提出了约束性的要求。首先,人工地震动加速度,即基于随机过程理论生成的人工地震动加速度,应与 5% 阻尼比的弹性反应谱相匹配:①每条时程的峰值加速度不小于目标设计地震动峰值加速度(经场地效应调整);②在 0.2T、2T 周期范围内,所有时程 5% 阻尼比反应谱的平均值不小于目标谱的 90%。其次,针对模拟地震动加速度,即通过参考震源、传播路径的物理模拟方法得到的加速度,假若选用的地震事件与场址特定的地震活动特性、场地的土层条件等足够相似,则可利用设计地震动峰值加速度(经场地效应调整)对模拟地震动进行标定,并且要验证土层的放大效应和动态稳定性。

#### 2.4 设计地震动时程的持时特性

地震动持时是影响结构地震反应尤其是弹塑性地震反应的重要因素之一,因此是确定设计地震动时程的重要约束性指标之一。地震动持时包括总持时、有效持时和强震平稳段持时等。我国《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)将地震动加速度时程曲线的有效持时定义为,从首次达到该时程曲线最大峰值 10% 的时刻算起,至最后达到最大峰值 10% 的时刻为止的持续时间,并要求不论是实际的强震记录还是人工模拟波形,有效持续时间一般为结构基本周期的 5~10 倍,即结构顶点的位移可按基本周期往复 5~10 次。其他规范对地震动持时的相关规定见表 5。

表 5 地震动持时特性的规定

规范名称	相关规定
构筑物抗震设计规范	起始点和终止点均按最大峰值的 10% 确定;不论是实际的强震记录还是人工模拟波,一般应大于结构基本自振周期的 5 倍(一般为 5~10 倍)
水电工程水工建筑物抗震设计规范	无明确要求
石油化工构筑物抗震设计规范	无明确要求
电力设施抗震设计规范	时程的总持续时间不应少于 30s,其中,强震动部分不应小于 6s
城市桥梁抗震设计规范	无明确要求
石油化工钢制设备抗震设计规范	无明确要求

《构筑物抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2012)与《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)的规定基本一致,《电力设施抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2013)则给出了其明确的规定,详见表 5。

国外的规范中只有 Eurocode8 (BS EN 1998-1,2004) 提出了人工地震动加速度的持时应与地震危险性分析中控制地震动峰值加速度的最大潜在地震的震级和其他相关特征一致。



当没有相关场地数据时,加速度时程强震平稳段的持时不应小于 10s。

### 2.5 设计地震动时程的相关性

不同设计地震动样本之间应是统计上相互独立的,即应满足彼此互不相关的要求。规范对此通过时程之间的相关系数予以规定。我国《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(国家能源局,2015)中要求设计地震动各分量之间的相关系数不大于 0.3;《城市桥梁抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2011)中规定任意两组间同方向时程的相关系数的绝对值小于 0.1。其余各规范并没有明确的规定。

## 3 数值算例

以我国现行《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)为例,给出满足规范要求的设计地震动时程。设结构基本自振周期为 2.0s,阻尼比为 0.05;设计地震分组为第 1 组,场地为 II 类场地,考虑 7 度(0.10g)条件下的罕遇地震作用。相应地,设计地震动峰值加速度  $A_{\max} = 220\text{cm/s}^2$ ,特征周期  $T_g = 0.40\text{s}$ 。根据规范给定的地震影响系数曲线的标准形式,可确定设计地震动反应谱曲线如图 4(a)中灰色实线所示。关于强震观测记录的选取,不同研究者均开展了相关的研究工作,并给出了相应的选取准则或选取条件(李琳等,2013;冀昆等,2016)。参照这些研究结果,本文根据与目标谱之间相对误差最小的原则(USNRC,2014),并综合考虑地震震级和场地条件等因素(USNRC,2007),从 NGA 数据库中选取 2 条天然地震动,利用数值方法合成 1 条人工地震动,其加速度时程曲线如图 5 所示。其中,第 1 条天然地震动为 1979 年美国 Imperial Valley 地震( $M_w = 6.53$ )El Centro 5#台站(震中距 28km)获取的水平分量记录;第 2 条天然地震动为 1999 年台湾集集地震( $M_w = 7.62$ )TTN040 台站(震中距 87km)获取的水平分量记录;人工地震动为采用三角级数叠加法生成的地震动时程,其反应谱与目标谱之间的相对误差均小于 5%。这 3 条地震动的有效持续时间分别为 11、60、23s,均大于 5 倍结构自振周期;这 3 条地震动加速度反应谱的均值曲线如图 4(a)中黑色点线所示,其与目标谱之间的相对误差如图 4(b)所示。可以看出,这 3 条地震动反应谱的均值与目标谱之间的相对误差不超过 20%,满足“在统计意义上相符”的要求。

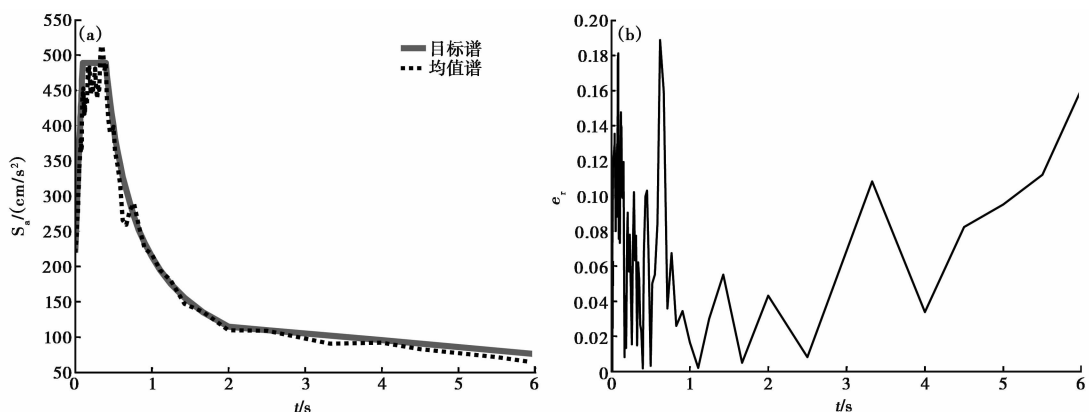


图 4 目标设计谱与设计地震动加速度反应谱均值的比较

(a) 加速度反应谱; (b) 相对误差

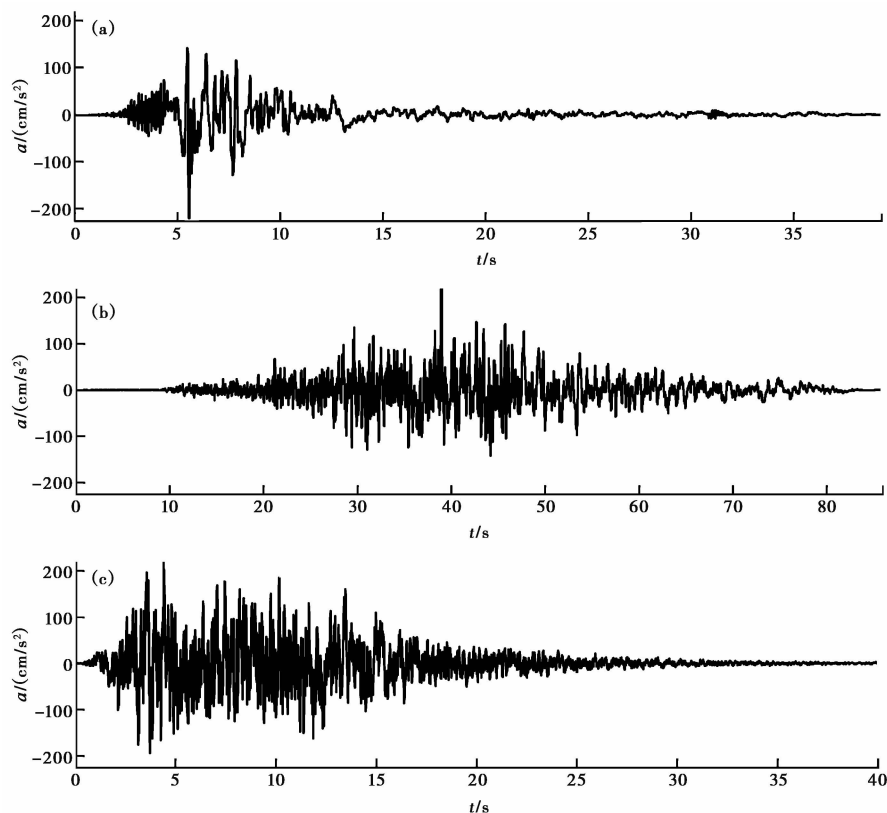


图5 设计地震动加速度时程  
(a)天然地震动-1;(b)天然地震动-2;(c)人工地震动

## 4 讨论与结论

在结构地震反应的时程分析工作中,合理地确定输入地震动是一个至关重要的技术环节。现阶段,反应谱理论仍是主流的结构地震反应分析方法,故在抗震设计规范和重大工程的场地地震安全性评价工作中,设计地震动均以反应谱的形式予以定义。因此,反应谱是各类规范中确定输入地震动时程的重要约束性指标。但是,目前除《核电厂抗震设计规范》(中华人民共和国建设部,1997)外,其他大部分规范均未对反应谱控制周期点的总数及其分布加以明确的规定;《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)尽管要求设计地震动时程在结构“主要振型”的周期点上与设计谱“在统计意义上相符”,但具体要考虑到第几阶主要振型,规范中并未加以明确规定。此外,除《建筑抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2010)外,大部分规范对设计地震动时程的反应谱与目标谱之间的匹配性(可通过它们之间的相对误差描述)缺乏可操作性的量化指标予以约束。因此,为了使得设计地震动时程的确定具有更强的可操作性,规范中应对反应谱控制周期点总数及其分布、设计地震动时程的反应谱与目标设计谱之间的相对误差加以明确的规定。

输入地震动时程的确定,除了可以选用以地震危险性分析得到基岩地震动反应谱为目

标合成的自由基岩地震动时程以外,亦可以选用基于随机过程理论生成的时间函数或强震观测记录作为初始地震动时程,只不过应对合成自由基岩地震动的速度和位移波形曲线进行检验,以排查基线漂移的问题。对于结构非线性分析问题,一般需要合成多组自由基岩地震动时程,建议不同地震动时程样本之间的相关系数应不大于0.16。此外,强震记录的选取对后续结构地震反应的分析结果有重要影响,因此,建议在抗震设计规范的修订过程中,应参考相关研究结果(李琳等,2013;冀昆等,2016),以明确规定具有可操作性的强震记录选取准则。

现有研究工作表明,除反应谱外,地震动的速度和位移特性对结构的地震反应尤其是弹塑性地震反应谱有显著的影响(张郁山等,2011;赵凤新等,2008;王飞,2016)。因此,确定输入地震动时程时,如何更全面地考虑地震动对结构的影响效应是一个值得深入研究的问题。此外,目前国际主流的确设计地震动时程的方法,是以实际天然地震动为“种子”,通过对其调整,使其反应谱逼近目标设计谱,最终所得时程作为结构抗震分析所用的设计地震动时程。美国核安全管理委员会(NRC)在其标准审查大纲SRP3.7.1(USNRC,2014)中明确规定该方法确定的设计地震动时程可用于核岛结构的抗震分析;我国《城市桥梁抗震设计规范》(中华人民共和国住房和城乡建设部,2011)和《公路桥梁抗震设计细则》(中华人民共和国交通运输部,2008)也作了同样的规定。如何将该方法推广到其他结构类型的抗震设计中是另一个需要考虑的重要问题。

## 参考文献

- 范力、赵斌、吕西林,2006,欧洲规范8与中国抗震设计规范关于抗震设防目标和地震作用的比较,结构工程师,22(6),59~63。
- 郭明珠、陈厚群,2003,场地类别划分与抗震设计反应谱的讨论,世界地震工程,19(2),108~111。
- 国家能源局,2015,NB35047-2015 水电工程水工建筑物抗震设计规范,北京:中国电力出版社。
- 侯春林、李小军、潘蓉,2012,不同法规要求的核电厂设计地震动时程,核安全,(4),46~50。
- 冀昆、温瑞智、任叶飞,2016,中国抗震规范强震记录选取的初选条件研究,防灾减灾工程学报,(1),44~49。
- 李琳、温瑞智、周宝峰等,2013,基于条件均值反应谱的特大地震强震记录的选取及调整方法,地震学报,35(3),380~389。
- 李小军、彭青、刘文忠,2001,设计地震动参数确定中的场地影响考虑,世界地震工程,17(4),34~41。
- 刘健新、葛胜锦,2014,日本公路桥梁抗震设计规范释义,33~36,北京:人民交通出版社。
- 社团法人,2002,道路橋示方書・同解説・V 耐震設計篇,日本:日本道路協會。
- 王飞,2016,峰值速度和峰值位移对钢结构弹塑性地震反应影响研究,博士学位论文,北京:中国地震局地球物理研究所。
- 王亚勇、刘小弟、程民宪,1991,建筑结构时程分析法输入地震波的研究,建筑结构学报,12(2),51~60。
- 肖遥、张郁山、靳超宇,2014,高层建筑时程分析中地震动时程选择和修改方法研究,震灾防御技术,9(3),400~410。
- 伊藤吉隆,2001,中日桥梁抗震设计规范比较研究,硕士学位论文,上海:同济大学。
- 余湛、石树中、沈建文等,2008,从中国、美国、欧洲抗震设计规范谱的比较探讨中国的抗震设计反应谱,震灾防御技术,3(2),136~143。
- 张郁山、赵凤新,2011,地震动峰值位移对单自由度体系非线性动力反应的影响,工程力学,28(1),55~64。
- 张郁山、赵凤新,2014,基于小波函数的地震动反应谱拟合方法,土木工程学报,47(1),70~81。
- 赵凤新、韦韬、张郁山,2008,近断层速度脉冲对钢筋混凝土框架结构地震反应的影响,工程力学,25(10),180~186。
- 中华人民共和国工业和信息化部,2014,石油化工构筑物抗震设计规范(SH/T3147-2014),北京:中国石化出版社。
- 中华人民共和国建设部,1997,核电厂抗震设计规范(GB50267-1997),北京:中国计划出版社。
- 中华人民共和国交通运输部,2008,公路桥梁抗震设计细则(JTG/TB02-01-2008),北京:人民交通出版社。
- 中华人民共和国住房和城乡建设部,2008,建筑工程抗震设防分类标准(GB50223-2008),北京:中国建筑工业出版社。

- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010, 建筑抗震设计规范(GB50011-2010), 北京: 中国建筑工业出版社。
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2011, 城市桥梁抗震设计规范(CJJ166-2011), 北京: 中国建筑工业出版社。
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012, 构筑物抗震设计规范(GB50191-2012), 北京: 中国计划出版社。
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012, 石油化工钢制设备抗震设计规范(GB50761-2012), 北京: 中国计划出版社。
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2013, 电力设施抗震设计规范(GB50260-2013), 北京: 中国计划出版社。
- American Society of Civil Engineers, ASCE7-10, 2010, Minimum design loads for buildings and other structures, published by American Society of Civil Engineers.
- European Prestandard, BS EN 1998-1, 2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, published by the authority of the Standards Policy and Strategy Committee.
- Federal Emergency Management Agency, FEMA 450, 2003, Nehrp recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, published by Building Seismic Safety Council.
- Uniform Building Code, UBC 97, 1997, Structural engineering design provisions, published by International Code Council.
- USNRC, 2007, Standard review plan, NUREG-0800, 3.7.1 seismic design parameters(Rev4), published by U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- USNRC, 2014, Standard review plan, NUREG-0800, 3.7.1 Seismic Design Parameters(Rev4), published by U.S. Nuclear Regulatory Commission.

## Comparison of various seismic design codes on design ground motion time history

Wang Shan<sup>1,2)</sup> Zhang Yushan<sup>2)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China

**Abstract** The codes of various types of seismic design in China and abroad are introduced. We compare the range of the time history analysis, the number of time history groups and the ratio of groups of natural history, the peak value of the design ground motions and the characteristics of response spectrum, the duration and correlation of the design ground motions, the similarities and differences of seismic design codes about ground motion time history. In China's current "Code for Seismic Design of Buildings" is given as an example, and meets the requirements of the relevant design ground motion time history. Some problems of the design ground motion time history which need paying attention to are also discussed in order to provide references for determining the design response spectrum for seismic safety evaluation in China.

**Key words:** Seismic design code; Design ground motion time history; Response spectrum; Time history analysis