

石树中, 沈建文. 2012. 抗震设计中多遇地震的问题和讨论. 地震学报, 34(1): 105-110.
Shi Shuzhong, Shen Jianwen. 2012. Discussion on the problem of frequent earthquakes in seismic design. *Acta Seismologica Sinica*, 34(1): 105-110.

抗震设计中多遇地震的问题和讨论^{*}

石树中¹⁾ 沈建文^{2),*}

1) 中国杭州 310013 浙江省地震局

2) 中国上海 200062 上海市地震局

摘要 指出作为截面抗震验算标准的“小震”混淆了两种明显不同的概念: 其一是对应于 50 年超越概率 63% 的地震动参数(以下简称“多遇小震”); 其二是 50 年超越概率 10% 的地震动参数经过折算得到的参数(以下简称“折算小震”). 上述混淆导致抗震设计中实际上执行着不同的标准. 文中讨论了中、小地震动参数之间关系的复杂性, 包括从地震危险性分析得到的基岩面中、小地震峰值加速度的离散性, 一致概率谱的差异, 以及中、小地震由于土层反应非线性影响导致的场地相关谱的系统性差异. 指出重大工程的抗震设计以“多遇小震”取代“折算小震”进行截面验算可能导致反应谱特征周期 T_g 明显低估的问题, 并提出了相应建议.

关键词 多遇地震 折算小震 设计地震动参数 峰值加速度 反应谱特征周期

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2012.01.010

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

Discussion on the problem of frequent earthquakes in seismic design

Shi Shuzhong¹⁾ Shen Jianwen^{2),*}

1) Earthquake Administration of Zhejiang Province, Hangzhou 310013, China

2) Earthquake Administration of Shanghai Municipality, Shanghai 200062, China

Abstract: “Small earthquakes” used as the standard of section seismic checking in seismic design confuses two significantly different concepts. One is the ground motion parameters corresponding to 63% exceeding probability in 50 years (hereinafter referred to as “frequent earthquakes”), and the other is the parameters received by reducing that corresponding to 10% exceeding probability in 50 years (hereinafter referred to as “reduction small earthquakes”). Above confusion leads to a result that two different standards are actually followed in seismic design. Complexity of the relation of ground motion parameters corresponding to medium and small earthquakes is discussed, such as dispersion of peak acceleration, differences of consistent probability spectra on the bedrock obtained from seismic hazard analysis, and systematic differences of site-related response spectra between medium and small earthquakes by soil non-linear effect. Substitution frequent earthquakes for reduction small earthquakes in section seismic checking for major engineering projects may result in underestima-

^{*} 基金项目 浙江省重点科研社会发展项目(2005C23075)资助.

收稿日期 2011-04-10 收到初稿, 2011-05-30 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: jianwenshen@126.com

tion of response spectrum characteristic period T_g . Some suggestions are put forward.

Key words: frequent earthquake; reduction small earthquake; design ground motion parameter; peak acceleration; characteristic period of response spectrum

引言

按照《中华人民共和国防震减灾法》，我国建设工程抗震设防要求的确定目前采用两种做法：重大建设工程和可能发生严重次生灾害的建设工程，根据地震安全性评价（以下简称“安评”）的结果，确定抗震设防要求，进行抗震设防；对于一般工业和民用建筑，则按照地震区划图规定的抗震设防要求，进行抗震设防。

随着安评工作的广泛开展，安评工作的水平和质量对于我国的经济建设和防震减灾的影响也越来越大。为此，加强对于安评工作的管理，规范统一安评的技术要求应是我国工程地震界的重要任务。

目前，我国重大工程可能直接用安评得到的 50 年超越概率 63% 的“多遇小震”地震动作为设计地震动参数。一般工业与民用建筑按《中国地震动参数区划图》(GB18306—2001) 给定的地震动参数作为抗震设防要求。该区划图给出的地震动参数相应的超越概率为 50 年 10% (以下简称“中震”) (国家质量技术监督局, 2001)。实际上，抗震验算时使用的设计地震动参数是经过折算的“折算小震”。两者的意义有所不同，地震动参数的大小与反应谱形态实际上可能有很大的差别。

沈建文和石树中(2004)通过危险性分析的实际例子等，讨论了 50 年超越概率 2%—3%、10% 和 63% 的地震动，即“大震”、“中震”和“小震”的相对大小关系，指出了上述 3 者比例关系的不确定性。并提出建议：“由业主根据工程的性质确定结构系数，将中震进行折算(在业主无法确定结构系数时，暂取 1/3 作为折算系数)，并与小震地震动相比取保守值作为截面验算的标准。”

从目前安评工作的实际情况来看，仍有许多研究者简单地建议以多遇小震作为截面验算的标准。

本文在讨论多遇小震与折算小震差异的基础上，指出以多遇小震作为截面验算标准存在的问题，提出安评工作中作为截面验算标准的地震动参数的确定方法。

1 以多遇地震作为设计基准的由来和现状

1.1 三水准二阶段设计思想

以“三个水准”作为抗震设防目标，即“小震不坏，中震可修，大震不倒”，是由《建筑抗震设计规范(GBJ11—89)》(中华人民共和国城乡建设环境保护部, 1989)正式提出，其含义包括以下两个方面：

其一为定义大、中、小震分别与危险性分析超越概率 2%—3%、10% 和 63% 的烈度对应，根据当时中国建筑科学院抗震研究所对全国 60 多个城市地震危险性分析结果的统计，大、中震烈度之间的差值平均为 1 度(峰值加速度之比为 4 : 3—2 : 1)，中、小震烈度之间的差值大体为 1.55 度(峰值加速度之比为 3 : 1)。

其二为三水准二阶段设计思想，即要求“小震不坏，中震可修，大震不倒”。三水准的

设防目标通过“二阶段设计”来实现. 第一阶段设计是承载力验算, 即采用第一水准的地震动参数, 计算结构的弹性地震作用标准值和相应的地震作用效应, 进行结构构件的截面承载力验算, 以期满足在第一水准下具有必要承载力可靠度, 即小震不坏; 又满足第二水准的损坏可修, 即“中震可修”的目标. 对于有特殊要求的建筑, 地震时易于倒塌的结构等, 除进行第一阶段设计外, 还需进行结构薄弱部位的弹塑性变形验算, 要求变形不超过容许的限值以防倒塌. 上述思想在《建筑抗震设计规范(GB50011—2001)》(中华人民共和国建设部, 2001)中得以延续.

显而易见, 地震危险性概率分析得到的多遇小震与建筑抗震设计规范中使用的折算小震, 其含义与计算方法有明显的不同, 只是存在统计上的对应关系. 一般工业与民用建筑抗震验算使用的小震并不是 50 年超越概率 63% 的多遇小震, 而是中震(50 年超越概率 10% 的基本烈度或设计基本地震加速度)按 0.35 倍折算得到的折算小震. 统计结果针对的是多遇小震, 实际使用的是折算小震.

我国 64、74、78 抗震规范中都引入了“结构影响系数”的概念, 采用对基本烈度按弹性反应谱计算的地震作用进行折减来确定设计地震作用的设计方法. 结构影响系数 C 值因结构不同而异, 延性较大、抗倒塌能力较强的结构, 结构影响系数较小. 我国一般认为结构的 C 值在 0.25—0.5 之间, 常粗略认为接近 1/3. 抗震设计规范 GBJ11—89 与 GB50011—2001 认为, 用折算小震取代中震作截面验算与用 C 值折减效果相当, 实际上相当于对不同结构统一粗略地取结构影响系数 0.35. 由以上分析可见, 对于不同类型的工程结构, 结构影响系数取值不同, 对应于多遇小震的超越概率水准也会有所不同.

对于不同结构取统一结构影响系数的做法, 不少学者持有疑义(翟长海, 谢礼立, 2006). 我国某些行业抗震设计规范仍以中震为基准, 辅以折减系数, 如水工建筑物抗震设计规范(DL5073—2000)(中华人民共和国经济贸易委员会, 2001).

1.2 重大工程抗震设防要求关于多遇地震的确定

从我国现行安评工作看, 对于大部分重大工程, 危险性分析的超越概率通常包括 3 种超越概率, 即 50 年 63%、10% 和 2%—3%(吴健, 高孟潭, 2004). 我国安评规范中并未具体规定概率标准. 仅《工程场地地震安全性评价》宣贯教材 13.2.3 中提及“对一般建设工程的地震小区划工作中, 设防地震的概率水平通常取 50 年超越概率 63%、10% 和 2%—3%”(卢寿德, 2006). 既然安评给出 3 种超越概率的地震动参数, 多遇小震可能理所当然地被推荐为截面验算标准.

1.3 国际上关于抗震设防的概率标准

各国区划和抗震设计并不采用 50 年超越概率 63% 多遇小震作为基准, 如美国 UBC 规范以 50 年超越概率 10% 的地震动作为设计基准, NEHRP2003 规范以 50 年超越概率 2% 地震动的 2/3 作为设计基准, 欧洲 Eurocode 8 以 50 年超越概率 10% 的地震设计为基准.

据作者掌握的资料, 国外重大工程安评一般也不采用 50 年超越概率 63% 的地震动参数.

2 以多遇小震作为设计基准产生的问题

3 种超越概率水平的地震动参数之间的关系取决于多方面的因素. 沈建文和石树中

(2004)在“大中小震与设防标准”一文中仅考虑危险性分析的影响,且主要是峰值加速度.实际上,对于土层场地,三水准地表地震动参数的差异还会受到土层地震效应的影响;地震动参数也不仅是峰值加速度,还有反应谱等,情况要复杂得多.

2.1 三水准地震动峰值加速度比值的不确定性

1992年,高孟潭等采用编制1990区划图的大量基础数据进行统计分析,研究表明,50年超越概率10%与50年超越概率63%之间,50年超越概率2%—3%与50年超越概率10%之间,烈度差值较为离散,中、小震的烈度差为0.5—2.8度,大、中震为0.3—1.2度,其分布与区域有关(高孟潭,韩炜,1992).

美国加利福尼亚海岸,50年10%与2%概率水平地震动的差别,明显比美国东部和中部地震较不活跃地区的相应地震动的差别小(Nordenson, Bell, 2000).

大、中、小地震差值离散的情况在国外也存在,但是由于我国采用地震危险性分析的综合概率法,地震带内各潜在震源的地震活动性参数可以根据地震预报的经验作人为二次调整,故上述离散可能更显著.以上海市地震动参数区划为例,根据地震危险性概率分析计算结果,对比上海市行政区较小范围内选择的4个场地的基岩峰值加速度,小震峰值加速度仅略有差异(0.190—0.213 m/s²),中震的差别却增大了1倍(0.635—1.339 m/s²),而大震的差别则已经增加了2倍(1.125—3.453 m/s²)(上海市地震局,同济大学,2004).由此可见,大、中、小震之间的关系并不统一.在这种情况下若以多遇小震作为设计基准,则显然对4个场地满足“中震可修”和“大震不倒”的抗震设防要求是不同的.这种人为不当的处理可能造成抗震设计标准的重大失误.

在绝大多数情况下,我国安评得到的中震的地震动参数显然会受中国地震动参数区划图的影响.但在安评给出的50年超越概率10%的基本烈度或设计基本地震加速度与国家地震区划图完全相同的条件下,即使不考虑土层反应的影响,仅由于地震危险性分析导致的中震和小震的离散性,就可以使不同工程多遇小震的烈度和峰值加速度产生重大差异.

2.2 三水准地震动反应谱的不确定性

上面仅讨论了烈度和基岩面的峰值加速度,实际上,多遇小震与折算小震在基岩面危险性分析的环节,对基岩面反应谱也可以造成很大的差异.基岩面一致概率谱取决于潜在震源的分布、参数以及衰减规律,超越概率不同,一致概率谱肯定也会有差异.

吴健和高孟潭(2004)统计了经过国家地震安全性评价委员会评审的56份工程场地地震安全性评价报告和地震小区划报告,共涉及全国19个省、市、自治区的130个场点,得到了Ⅱ类场地3个不同超越概率水平的统计结果,分别对应抗震设计规范中的大、中、小地震,如表1所示.

表1 Ⅱ类场地上场地相关设计反应谱特征周期 T_g 统计特征(单位: s)

Table 1 Statistical features of site-related design spectrum characteristic period T_g (unit: s) for class Ⅱ site

| 50年超越概率 | 样本数 | 平均值 | 最大值 | 最小值 |
|---------|-----|-------|------|------|
| 2%—3% | 95 | 0.567 | 1.20 | 0.20 |
| 10% | 95 | 0.457 | 0.90 | 0.20 |
| 63% | 95 | 0.373 | 0.70 | 0.18 |

从表 1 中可以看出，不同的超越概率水平下，特征周期 T_g 取值有显著差异，随着超越概率的减小，特征周期值明显有增加的趋势。

事实上，对于Ⅱ类场地，由于土层的非线性不强，上述特征周期 T_g 的取值差异还不显著。对Ⅳ类场地，由于土层较强的非线性影响，3 个超越概率的地表场地相关谱将有更大的差异，且规律性更明显。例如，上海地区大部分为Ⅳ类场地，上海市地震动参数区划收集了上海市的安评资料，包括上海行政区内不同位置，不同超越概率的基岩地震动，以及不同土层柱状图土层反应的组合结果共 328 个。地表水平加速度反应谱的特征周期 T_g 与基岩地震动水平峰值加速度 X 的回归关系式(1)，及散点图与回归直线均示于图 1(上海市地震局，同济大学，2004)。

$$T_g = 0.414X + 0.428$$

(1)

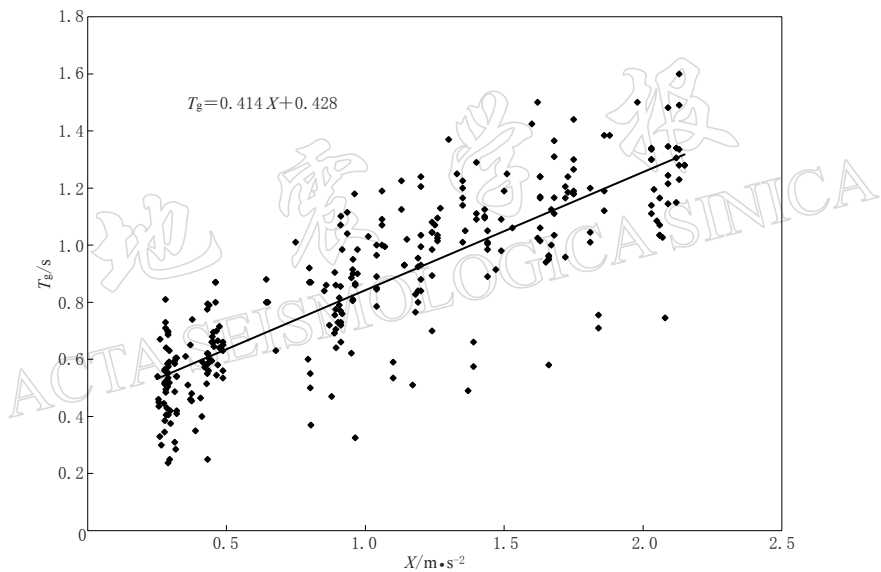


图 1 地表加速度反应谱的特征周期 T_g 与基岩地震动峰值加速度 X 的关系
Fig. 1 Relationship between characteristic periods (T_g) of surface acceleration response spectra and bedrock peak acceleration (X)

从图 1 可以看出，地表水平加速度反应谱的特征周期 T_g 与基岩水平峰值加速度 X 有较好的线性关系。基岩水平峰值加速度越小，特征周期 T_g 越小；随着基岩地震动加大，特征周期 T_g 则明显加大。按照回归结果，当 X 取图中最小值 0.252 m/s^2 时，特征周期 T_g 为 0.53 s ；而当 X 取图中最大值 2.15 m/s^2 时，特征周期 T_g 为 1.32 s 。实际上，随着基岩输入的增大，由于土层非线性的影响和土层对于输入地震动某频段的共振等效应，在地震波中高频成分缩减的同时，某频段的反应谱得到了放大，地表反应谱峰值向较长周期部分移动，上述现象也不难理解。

3 讨论与结论

关于大、中、小地震动峰值加速度比值的离散性早已提出，但至今未引起重视。“小震不坏”也可以有两种不同的理解：一是确实有多遇地震不坏的要求，如特殊结构或其中的

设备确需保证遭遇多遇地震时不坏；二是仅试图通过“小震不坏”的设计达到“中震可修”和“大震不倒”的目的。对绝大多数工程而言，“小震不坏”取第二种理解。小震有多遇小震和折算小震之分。此时，合理的做法显然应该是：对一般工程，采用折算小震参数作为设计基准；对于需要确保“多遇地震不坏”的重大工程，应取多遇小震与折算小震的较大地震动峰值加速度和较长的反应谱特征周期作为设计基准。

参 考 文 献

- 高孟潭, 韩炜. 1992. 抗震设计中大、中、小地震的确定[M]//地震工程研究文集. 北京: 地震出版社: 14-20.
- 国家质量技术监督局. 2001. GB18306—2001 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国标准出版社: 1-2.
- 卢寿德主编. 2006. GB17741—2005《工程场地地震安全性评价》宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社: 111-112.
- 上海市地震局, 同济大学. 2004. 上海市地震带参数区划[M]. 北京: 地震出版社: 188-191.
- 沈建文, 石树中. 2004. 大中小震与抗震设防标准[J]. 地震学报, 26(5): 533-538.
- 吴健, 高孟潭. 2004. 场地相关设计反应谱特征周期的统计分析[J]. 中国地震, 20(3): 263-268.
- 翟长海, 谢礼立. 2006. 抗震规范应用强度折减系数的现状及分析[J]. 地震工程与工程振动, 26(2): 1-7.
- 中华人民共和国城乡建设环境保护部. 1989. GBJ11—89 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 18-24.
- 中华人民共和国建设部. 2001. GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社: 10-11.
- 中华人民共和国经济贸易委员会. 2001. DL5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社: 274-277.
- Nordenson G J P, Bell G R. 2000. Seismic design requirements for regions of moderate seismicity[J]. *Earthquake Spectra*, 16(1): 205-225.