

基于一致倒塌风险的建筑抗震评价方法研究

施 炜, 叶列平, 陆新征

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要: 建筑结构的抗震能力、尤其是抗倒塌能力设计目标应根据其所在场地未来一定设计使用年限内可能遭遇的地震危险性来设定。首先介绍了基于动力增量分析(IDA)的结构倒塌易损性分析方法,随后结合地震危险性分析,分别给出了结构抗倒塌能力和结构所面临地震危险性的概率模型,进而根据结构在未来一定设计使用年限内的倒塌概率,对建筑结构的抗震倒塌风险进行定量评价,并给出了相应的计算方法。以一座7度抗震设防的RC框架结构为例,计算了该RC框架结构在3个同为7度抗震设防而地震危险性不同地区的地震倒塌风险,指出仅以抗震设防烈度作为建筑结构抗震设计的依据所存在的不足,建议应基于一致倒塌风险进行结构抗震设计,并提出了相关结构抗震设计方法需开展的研究工作。

关键词: 建筑结构; 地震需求; 结构倒塌易损性; 地震危险性; 一致倒塌风险

中图分类号: TU352.104 TU311.4 文献标志码: A

Study on uniform collapse risk evaluation method for building structures under earthquakes

SHI Wei, YE Lieping, LU Xinzheng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Seismic design should quantitatively evaluate and control the earthquake collapse risk that building structures are likely to encounter during the design service life, which needs taking both the structural collapse resistant capacity and the earthquake demand into consideration. Firstly, this paper introduced IDA-based collapse fragility analysis and seismic hazard analysis, which evaluated the structural collapse resisting capacity and the earthquake demand in terms of probability, respectively. Furthermore, the structural collapse probability was proposed for measuring the earthquake collapse risk and its calculation method was provided. Finally, the collapse probabilities of RC frame structure for three seven-fortification areas with different seismic hazards were calculated as an example. The result shows the inadequacy of evaluating earthquake collapse risk only based on seismic fortification. The uniform-risk-targeted seismic design was proposed for collapse safety.

Keywords: building structure; earthquake demand; collapse fragility; seismic hazard; uniform-risk-targeted collapse safety

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2009BAJ28B01), 国家自然科学基金重点项目(90815025), 中国工程院重大咨询项目(2010-ZD-4)。

作者简介: 施炜(1986—), 男, 上海人, 博士研究生。E-mail: shi-w05@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 叶列平(1960—), 男, 浙江温州人, 工学博士, 教授。E-mail: ylp@mail.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2011年1月

0 引言

强烈地震作用下建筑结构的倒塌破坏是造成人员伤亡和财产损失的主要原因,保证强震作用下建筑结构的抗倒塌能力是抗震设计的核心目标^[1]。近年来基于动力增量分析(incremental dynamic analysis, IDA)^[2]的倒塌易损性分析方法(collapse fragility analysis)^[3],可以更合理地评价强震作用下建筑结构的抗倒塌能力^[4-5]。基于结构倒塌易损性评价结果,进一步结合建筑结构所在场地的地震危险性^[6],能够定量评价建筑结构在未来设计使用年限内可能遭遇的地震倒塌风险,从而实现基于一致倒塌风险的结构抗震设计。所谓一致倒塌风险是指在将来给定设计基准期内,对不同地震风险场地上的建筑结构,其地震倒塌风险一致,并控制在可接受范围内^[7-8]。地震倒塌风险采用倒塌概率定量评价。

目前,我国建筑结构抗震设计的地震动强度来源于地震(动)区划。地震(动)区划是根据各地区地震危险性分析结果,按照一定的超越概率确定设计地震水准和相应地震动参数。例如,我国第四代地震区划^[9-10]是根据50年超越概率为10%的地震水准(抗震设防烈度地震,即“中震”)编制相应地用于建筑结构抗倒塌能力设计的罕遇地震(大震)水准,由中震地震动参数乘以一定的系数外推得到^[10]。尽管目前以“中震”地震(动)区划为依据的建筑抗震设计方法已考虑了大震抗倒塌要求,但由于地震机制的复杂性,目前仍无法全面反映工程所在场地的地震危险性水平,即目前由“中震”乘以一定系数外推得到的“大震”可能与工程所在场地50年超越概率为2%的大震并不一致,如果外推得到的“大震”小于工程所在场地50年超越概率为2%的罕遇地震,则建筑结构所面临的倒塌风险会增大。因此,我国现行的以地震区划设防烈度为依据的建筑结构大震抗倒塌设计措施,无法科学合理地保证其抗倒塌风险。此外,即使大震的地震动参数按建筑结构所在场地50年超越概率2%的水平确定,但如果结构设计未能全面考虑所在场地遭遇特大地震风险的差异,也未必能够实现一致倒塌风险目标。1997年前,美国的抗震区划是以50年超越概率10%为基准编制的,1997年后,则调整为以50年超越概率2%的最大考虑地震(maximum consider earthquake, MCE)为基准编制。近年来,美国又基于结构50年超越概率1%的一致倒塌概率目标对50年超越概率2%的MCE进行了局部调整^[7]。

本文首先介绍基于IDA的建筑结构倒塌易损性评价方法;然后根据结构倒塌易损性和结构所在场

地地震危险性分析结果,给出建筑结构地震倒塌风险评价模型;以某7度设防RC框架结构为例,计算该结构分别位于3个不同地震危险性地区的地震倒塌风险,分析仅以抗震设防烈度(中震)为依据的结构抗震设计在抗倒塌安全性方面所存在的不足。以此说明基于一致倒塌风险进行结构抗震设计的重要性,并就相关结构抗震设计方法需开展的研究工作提出建议。

1 基于IDA的结构倒塌易损性评价方法

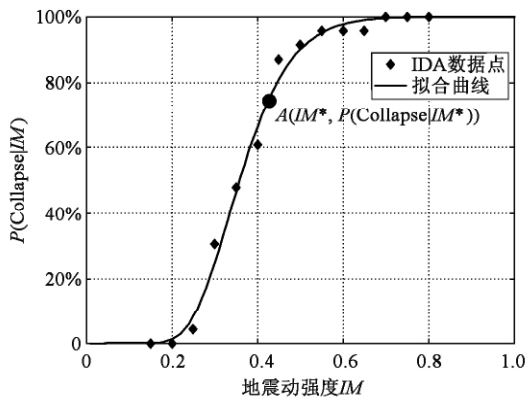
1.1 方法简介

基于增量动力分析(IDA)^[2]的结构倒塌易损性评价方法^[3-5],是通过对建筑结构输入一组地震动强度(intensity measure, IM)逐步增大的地震动记录(记地震动总数为 N_{total}),根据一定的倒塌准则,通过弹塑性时程分析方法获得该结构在不同地震动强度下的倒塌概率。如果在某一地震动强度下有 $N_{collapse}$ 个地震动导致结构倒塌,则记在该地震动强度下结构的倒塌概率 $P_{collapse} = N_{collapse} / N_{total}$ 。由一系列的($IM, P_{collapse}$)可得到结构随地震动强度增大的倒塌概率分析结果(图1a中的数据点),按照一定的概率分布(如对数正态分布^[3-4]等)进行参数估计得到结构的倒塌概率曲线(图1a中曲线),称为结构倒塌易损性曲线。当地震动记录数量足够多(如FEMA 695报告建议取20条以上^[11])且具有足够的代表性时,结构倒塌易损性曲线能够客观反映结构的抗地震倒塌能力。

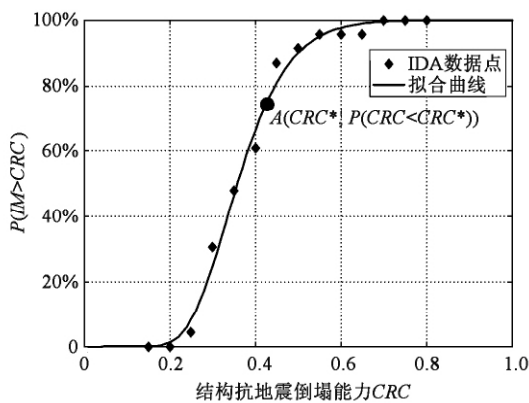
1.2 倒塌易损性曲线的概率意义

上述倒塌易损性曲线表示结构在遭遇强度为IM地震作用时发生倒塌的条件概率^[12],即 $P(\text{collapse} | IM)$ (图1a)。对于某一给定的地震动输入,如果将导致结构倒塌的地震动强度阈值 $IM_{threshold}$ 表征为结构抗地震倒塌能力(collapse resistant capacity, CRC),即当遭遇地震动强度IM大于 $IM_{threshold}$ 时结构发生倒塌,当地震动强度IM小于 $IM_{threshold}$ 时结构不会发生倒塌。由于地震动的不确定性(包括频谱和持时等),不同的地震动导致结构倒塌的强度阈值 $IM_{threshold}$ 是不确定的,因而以 $IM_{threshold}$ 定义的抗地震倒塌能力CRC也是不确定的,即对于不同的地震动, $IM_{threshold}$ 也不同。将结构的CRC视为随机变量,利用IDA分析结果估计CRC概率分布^[12],可得到CRC的累积概率分布函数(图1b)。

图1a中的A点($IM^*, P(\text{collapse} | IM^*)$)表示遭遇强度为 IM^* 的地震动时结构倒塌的条件概率为



(a) 结构条件倒塌概率曲线



(b) 结构抗倒塌能力 CRC 的累积概率分布曲线

图1 结构倒塌易损性曲线

Fig.1 Collapse fragility curve

$P(\text{collapse} | IM^*)$; 图1b中的A点(CRC^* , $P(CRC < CRC^*)$)表示结构的抗地震倒塌能力 CRC 小于 CRC^* 的概率。可以证明,当结构遭遇强度为 $IM^* = CRC^*$ 的地震时,结构倒塌的条件概率 $P(\text{collapse} | IM^*)$ 即为结构的抗倒塌能力 CRC 小于地震需求 $IM^* = CRC^*$ 的概率,即 $P(CRC < CRC^*)$ 。因此,无论是从遭遇给定强度地震动的条件倒塌概率角度,还是从结构抗倒塌能力累积分布概率角度来理解倒塌易损性曲线,两者是一致的。

2 结构倒塌风险评估方法

结构倒塌易损性分析给出了结构在遭遇给定地震动强度下发生倒塌的条件概率 $P(\text{collapse} | IM)$ 或抗地震倒塌能力 CRC 的概率密度分布,而建筑结构抗震设计需要评估和控制设计使用年限 (Y 年) 内发生倒塌的全概率,故还需要考虑设计使用年限内遭遇不同强度地震动的可能性。地震危险性分析给出了设计使用年限 (Y 年) 内建筑结构所在场地遭遇不同地震动强度 IM 的概率密度,用 $P(IM)$ 表示。因此,结构在设计使用年限 (Y 年) 内的抗倒塌安全性 (即结构在设计使用年限 Y 年内倒塌的风险),可用

设计使用年限 Y 年内结构倒塌的全概率^[12]来量度,其表达式如式(1)所示。

$$P(\text{collapse in } Y \text{ years}) = \int_0^{+\infty} P(\text{collapse} | IM) P(IM) dIM \quad (1)$$

其中: $P(\text{collapse in } Y \text{ years})$ 为结构在设计使用年限 Y 年内发生地震倒塌的概率,称为“结构地震倒塌风险”; $P(IM)$ 为结构所在场地在设计使用年限 Y 年内发生强度为 IM 地震的可能性,由地震危险性分析给出。

由前述介绍可知,结构倒塌易损性分析给出了结构抗倒塌能力 CRC (即 $IM_{\text{threshold}}$); 地震危险性分析给出设计使用年限 (Y 年) 内不同地震强度需求 IM ,两者均可视为随机变量。结构倒塌事件等价于结构抗倒塌能力 CRC 小于地震强度需求 IM 的事件,即 ($IM > CRC$) 的事件,因此结构在设计使用年限 Y 年内的地震倒塌概率可表示为:

$$P(\text{collapse in } Y \text{ years}) = \int_0^{+\infty} P(CRC) P(IM > CRC) dCRC \quad (2)$$

其中: $P(CRC)$ 为结构抗倒塌能力等于 CRC 的概率密度,由倒塌易损性分析得到的 CRC 累积概率分布函数确定; $P(IM > CRC)$ 为设计使用年限 Y 年内结构所在场地对应地震动强度 CRC 的超越概率。可以证明,式(1)和式(2)是等价的,其证明见本文附注。

3 RC 框架算例

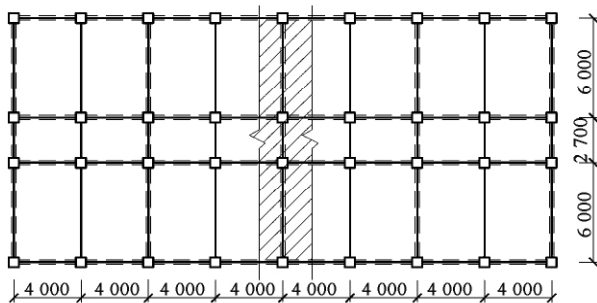
3.1 结构设计

以图2所示的RC框架结构作为算例来分析其地震倒塌风险。该算例根据我国GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》^[9]设计,抗震设防烈度7度(0.10g)、II类场地、第2设计地震分组、丙类结构,共6层,除底层层高4.1m外,其他层高均3.7m,总高22.6m。梁柱截面尺寸、配筋等其他详细设计参数见文献[5]。

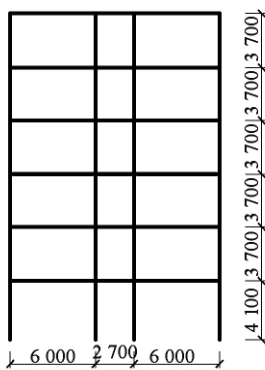
3.2 倒塌易损性分析

结构弹塑性建模和IDA倒塌分析采用清华大学基于通用有限元软件MSC.MARC开发的结构倒塌模拟分析程序TECS^[13-14]。所选输入地震动采用FEMA 695报告推荐的22条远场地震动记录^[11],以结构1阶周期谱加速度 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标^[3-4],按照“结构丧失竖向承载力不能维持保障人员安全的生存空间”作为倒塌判据^[13-14],IDA倒塌易损性分析结果见图3的数据点。

根据IDA分析结果,按照对数正态分布进行拟合,得到该结构条件倒塌概率分布的参数估计: $\mu =$



(a) 平面布置



(b) 立面布置

图2 结构布置

Fig. 2 Structural layout

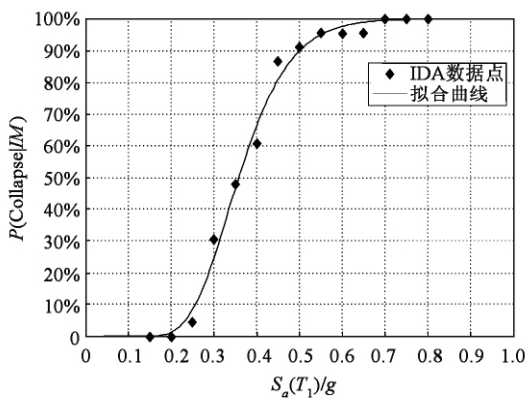


图3 RC 框架结构的倒塌易损性曲线

Fig. 3 Collapse fragility curve of RC frame Structure

-1.0257, $\sigma = 0.2596$ 。根据对数正态概率分布模型按照式(3)、式(4)^[12]可得到结构抗倒塌能力CRC的累积概率分布函数(即图3中拟合的倒塌易损性曲线)和相应的概率密度函数(图4)。

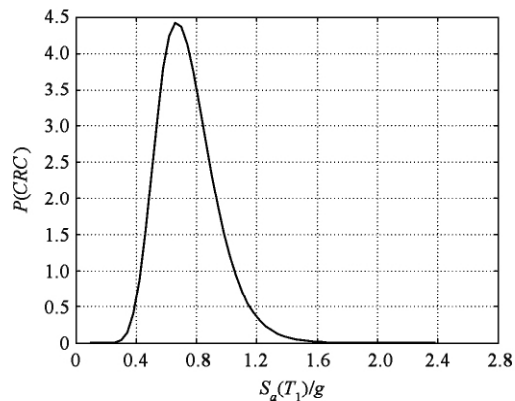


图4 结构抗倒塌能力CRC的概率密度函数

Fig. 4 Probability density function of CRC

$$P(\text{collapse} | IM) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{IM} \frac{e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{t} dt \quad (3)$$

$$P(CRC) = \frac{1}{CRC \times \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln CRC - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

式中, t 为积分变量。

3.3 地震危险性分析

本文选取了我国3个同为7度抗震设防而地震危险性存在差异的地区:山西蒲县、山东日照和云南墨江。根据这3个地区的地震危险性特征分区^[15],其多遇地震、设防地震和罕遇地震的设计地震动强度PGA取值如表1所示,上述3个地震水准对应的50年超越概率分别为63%、10%和5%^[15]。3个地区设防烈度的设计地震动强度PGA相同,而多遇地震和罕遇地震的地震动强度PGA存在差异。

以结构1阶周期 T_1 的谱加速度值 $S_a(T_1)$ 作为地震动强度指标IM,相应结构抗地震倒塌能力指标CRC也以 $S_a(T_1)$ 表示。联系倒塌易损性分析和地震危险性分析的纽带是地震动强度指标IM,即本文中的 $S_a(T_1)$,因此将表1设计地震动PGA转换成 $S_a(T_1)$ 。算例RC框架结构的 $T_1 = 0.9671$ s根据GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》设计反应谱^[9],由式(5)得到的对应于PGA的 $S_a(T_1)$ 值如表1所示。

$$\frac{S_a(T_1)}{PGA} = \frac{\alpha(T_1)}{\alpha(T=0)} \quad (5)$$

式中, $\alpha(T_1)$ 为对应结构1阶周期 T_1 的地震影响系

表1 不同抗震设防水准丙类建筑的地震动强度值

Table 1 Design IM values of three earthquake levels for group C building

地区	抗震设防烈度	特征周期分区	地震危险性特征分区	抗震设防水准						RC 框架算例的50年倒塌全概率
				多遇烈度地震		设防烈度地震		罕遇烈度地震		
				PGA/g	$S_a(T_1)/g$	PGA/g	$S_a(T_1)/g$	PGA/g	$S_a(T_1)/g$	
山西蒲县	7	二	I	0.0145	0.01456	0.10	0.1004	0.1619	0.1625	2.75%
山东日照	7	二	II	0.0342	0.03434	0.10	0.1004	0.1344	0.1349	1.12%
云南墨江	7	二	III	0.0603	0.06054	0.10	0.1004	0.1163	0.1168	0.14%

数; $\alpha(T=0)$ 为对应 $T=0$ 的地震影响系数,理论上 $\alpha(T=0) = PGA/g$ 。

50 年超越概率是指未来 50 年内工程场地至少发生一次地震动强度超过给定值 IM 的概率,因此地震危险性曲线(50 年超越概率与地震动强度的关系,用函数 $E(IM)$ 表示)需要满足如下两个边界条件:当 $S_a(T_1) = 0$ 时,50 年内工程场地遭受地震动强度大于 $S_a(T_1) = 0$ 的地震是必然事件,其 50 年超越概率 $E(S_a(T_1) = 0)$ 应为 100%;当 $S_a(T_1) = +\infty$ 时,50 年内工程场地遭遇地震动强度大于 $S_a(T_1) = +\infty$ 的地震是不可能事件,其 50 年超越概率 $E(S_a(T_1) = +\infty)$ 应为 0%。为了满足地震危险性曲线的边界条件,并使得拟合的地震危险性曲线在 3 个地震水准处尽量接近表 1 所列出的 $S_a(T_1)$ 值,故地震危险性曲线采用式(6)形式进行拟合。

$$E(S_a(T_1)) = \begin{cases} 1.0 & (S_a(T_1) < S_a(T_1)_{\text{Critical}}) \\ aS_a(T_1)^b & (S_a(T_1) \geq S_a(T_1)_{\text{Critical}}) \end{cases} \quad (6)$$

具体拟合方法是,先按 $E[S_a(T_1)] = aS_a(T_1)^b$ 对数据点进行拟合得到参数 a 和 b ,然后根据方程 $aS_a(T_1)^b = 1.0$ 求得 $S_a(T_1)_{\text{Critical}}$, $S_a(T_1)_{\text{Critical}}$ 是式(6)分段函数的分界点,由此得到 3 个地区的地震危险性曲线如图 5 所示。3 个地区的地震危险性曲线在 50 年超越概率为 10% 处的地震动强度值(即设防烈度的地震动强度)大致相当,但在小于和大于设防烈度地震动强度值的范围内差异明显。相比于山东日照和云南墨县,山西蒲县未来 50 年内遭遇超越罕遇地震的概率最高;山东日照次之,云南墨县最小。

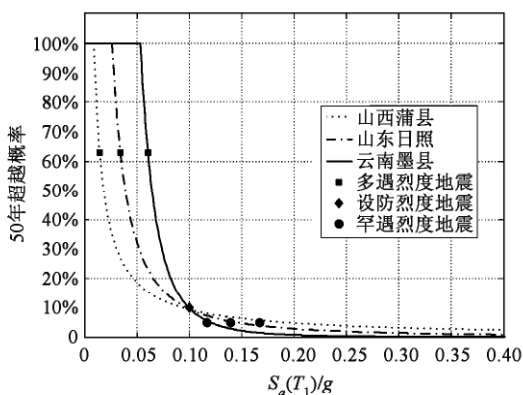


图 5 建筑场地 50 年超越概率曲线

Fig. 5 Exceedance probability in 50 years vs. $S_a(T_1)$

3.4 计算结果

根据倒塌易损性分析得到的式(4)结构抗地震倒塌能力 CRC 的概率密度函数和图 5 所示的地震危险性分析结果,利用式(2)计算得到前述 RC 框架位于 3 个不同地震危险性 7 度抗震设防地区时,其 50

年的倒塌全概率见表 1 最后一列。3 个地区的抗震设防烈度均为 7 度,均根据相同的设计条件,按照 GB 50011—2001《建筑抗震设计规范》^[9] 设计。根据我国目前的建筑抗震设计方法,3 个地区以中震地震动强度外推得到的小震和大震的地震动强度也相同。但是,实际上 3 个地区面临的地震风险存在差异,因此按现行建筑抗震设计方法设计的结构,在不同的地区,其地震倒塌风险存在明显差异。

3 个地区中,山西蒲县的小震地震动强度较小,而大震地震动强度较大,50 年倒塌概率最高,为 2.75%;云南墨江的小震地震动强度较大,而大震地震动强度较小,50 年倒塌全概率仅为 0.14%。结构 50 年的倒塌概率与建筑结构所在场地遭遇特大地震的概率关系较大,由于山西蒲县遭遇大震及特大震的概率最大(图 5),所以其 50 年倒塌全概率最高,而云南墨江的 50 年倒塌全概率最低。尽管云南墨江在小于抗震设防烈度地震动强度值的范围内超越概率较高,但在该范围内结构抗地震倒塌能力 CRC 的概率密度 $P(CRC)$ 极小,所以小于抗震设防烈度地震动强度值的范围的超越概率对于结构的倒塌率影响不大。

4 结论与建议

结构抗地震倒塌评价应同时考虑结构倒塌易损性分析和地震危险性分析的结果,本文提出了以结构在设计年限内的倒塌全概率度量结构倒塌风险的评价指标和评价方法,并以一座 7 度抗震设防的 RC 框架结构为例,说明了仅以设防区划的设防烈度作为结构设计的依据,在地震危险性水平不同的地区,其倒塌风险会存在明显差异。美国新一轮的建筑抗震设计规范已考虑到地震危险性对于结构倒塌安全的影响,对其设防地震动参数 MCE 作了相应调整,以实现结构设计年限内倒塌风险的控制^[6-7]。这对我国未来制定抗震设计方法具有较好的借鉴意义。

基于一致倒塌风险的结构抗震设计应保证所设计的结构在规定的设计年限内,其地震倒塌概率大致相当、且低于社会和经济可接受的倒塌概率水平。由于实用建筑抗震设计无法直接采用本文所述的基于一致倒塌风险方法确定其在设计年限内的倒塌概率,为此需要开展以下研究工作:

(1) 根据地震危险性分析的结果,按照一定的超越概率(例如 50 年超越概率 2%)确定大震水准及其地震动参数,并以大震水准为基准给出地震(动)区划。由于结构的地震倒塌概率与所在场地遭遇大震和特大震的概率关系较大,对以大震为基准的地震(动)区划中的同一地震设防区域,应根据特大地震

的发生概率进一步评定地震危险性;

(2) 以“大震不倒”为目标,研究建筑抗震设计的设计地震力与大震水准地震动强度的关系,进而由大震区划直接确定设计地震作用;

(3) 对按上述方法设计的典型结构进行倒塌易损性分析,并根据地震危险性类别引入地震危险性调整系数对设计地震作用进行调整,以满足一致倒塌风险目标。

附注:

式(2)与式(1)等价的证明:

$$P(\text{collapse in } Y \text{ years}) = \int_0^{+\infty} P(\text{collapse} | IM) P(IM) dIM \quad (1)$$

$$P(\text{collapse in } Y \text{ years}) = \int_0^{+\infty} P(CRC) P(IM > CRC) dCRC \quad (2)$$

证明如下:

为了便于数学表达,将式(1)、(2)中的概率表达以函数的形式替代。

$$P(\text{collapse} | IM) = F(x) \quad (7)$$

$$P(IM) = g(x) \quad (8)$$

$$P(CRC) = f(x) \quad (9)$$

$$P(IM > CRC) = G(x) \quad (10)$$

$P(\text{collapse} | IM) = F(x)$ 表示建筑结构在遭遇给定强度 IM 的地震时发生倒塌的条件概率,正文已经论述遭遇给定强度 IM 的条件倒塌概率亦即结构抗倒塌能力 CRC 的累积分布函数;而 $P(CRC) = f(x)$ 为结构的抗倒塌能力等于 CRC 的可能,即 CRC 的概率密度函数,因此 $F(x)$ 与 $f(x)$ 满足式(11)。

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (11)$$

$P(IM) = g(x)$ 表示建筑结构所在场地在设计使用年限内遭遇强度为 IM 的地震的概率密度,而 $P(IM > CRC) = G(x)$ 表示工程所在场地在设计使用年限内遭遇强度大于 CRC 的地震的概率,因此 $g(x)$ 与 $G(x)$ 满足式(12)。

$$G(x) = 1 - \int_0^x g(x) dx \quad (12)$$

对式(1)进行分部积分并将式(12)代入,可得

$$\begin{aligned} P(\text{collapse in } Y \text{ years}) &= \int_0^{+\infty} P(\text{collapse} | IM) P(IM) dIM = \\ &= \int_0^{+\infty} F(x) g(x) dx = F(x) [1 - G(x)] \Big|_0^{+\infty} - \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{dF(x)}{dx} [1 - G(x)] dx \quad (13) \end{aligned}$$

对于式(13)中的 $F(x) [1 - G(x)] \Big|_0^{+\infty}$: 当 $x = +\infty$ 时, $F(x) = P(\text{collapse} | IM)$ 表示结构在遭遇 IM 为 $+\infty$ 的地震时发生倒塌的条件概率,取值为1; $G(x) = P(IM > CRC)$ 表示结构所在场地遭遇强度大于 $+\infty$ 的地震的概率,取值为0,则 $1 - G(x)$ 取值为1。当 $x = 0$ 时, $F(x) = P(\text{collapse} | IM)$ 表示结构在遭遇 IM 为0的地震时发生倒塌的条件概率,取值为0; $G(x) = P(IM > CRC)$ 表示建筑结构所在场地遭遇强度大于0的地震的概率,取值为1,则 $1 - G(x) = 0$ 。因此有:

$$F(x) [1 - G(x)] \Big|_0^{+\infty} = 1 \quad (14)$$

将式(11)和式(14)代入式(13),有:

$$\begin{aligned} P(\text{collapse in } Y \text{ years}) &= \\ &= F(x) [1 - G(x)] \Big|_0^{+\infty} - \\ &= \int_0^{+\infty} \frac{dF(x)}{dx} [1 - G(x)] dx = \\ &= 1 - \int_0^{+\infty} \frac{dF(x)}{dx} [1 - G(x)] dx = \\ &= 1 - \int_0^{+\infty} f(x) [1 - G(x)] dx \quad (15) \end{aligned}$$

由于 $f(x) = P(CRC)$ 表示结构抗地震倒塌能力的概率密度函数,因此有:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = \int_0^{+\infty} f(x) dx = 1 \quad (16)$$

将式(16)代入式(15),有:

$$\begin{aligned} P(\text{collapse in } Y \text{ years}) &= \\ &= 1 - \int_0^{+\infty} f(x) [1 - G(x)] dx = \\ &= \int_0^{+\infty} f(x) dx - \int_0^{+\infty} f(x) [1 - G(x)] dx = \\ &= \int_0^{+\infty} f(x) \{1 - [1 - G(x)]\} dx = \\ &= \int_0^{+\infty} f(x) G(x) dx = \\ &= \int_0^{+\infty} P(CRC) P(IM > CRC) dCRC \quad (17) \end{aligned}$$

所以,式(1)与式(2)等价,证毕。

参考文献

- [1] 叶列平,曲哲,陆新征,冯鹏. 提高建筑结构抗地震倒塌能力的设计思想与方法[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 42-50. (YE Lieping, QU Zhe, LU Xinzhen, FENG Peng. Collapse prevention of building structures: a lesson from the Wenchuan earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(4): 42-50. (in Chinese))
- [2] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [3] Zareian F, Krawinkler H. Assessment of probability of collapse and design for collapse safety [J]. Earthquake

- Engineering and Structure Dynamics ,2007 ,36(13) : 1901-1914.
- [4] 施炜,叶列平,陆新征,唐代远. 不同抗震设防 RC 框架结构抗倒塌能力的研究[J]. 工程力学,2010 , 28(3) : 41-48. (SHI Wei ,YE Lieping ,LU Xinzheng , TANG Daiyuan. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. Engineering Mechanics ,2010 ,28(3) : 41-48. (in Chinese))
- [5] 陆新征,叶列平. 基于 IDA 分析的结构抗地震倒塌能力研究[J]. 工程抗震与加固改造,2010 ,32(1) : 13-18. (LU Xinzheng , YE Lieping. Study on the seismic collapse resistance of structural system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting , 2010 ,32(1) : 13-18. (in Chinese))
- [6] Robin K M. Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: closing the loop [J]. Bulletin of the Seismological Society of America ,1995 ,85(5) : 1275-1284.
- [7] Luco N ,Ellingwood B R ,Hamburger R O ,et al. Risk-targeted versus current seismic design maps for the conterminous United States [C]// Proceedings of the 2007 Structural Engineers Association of California Covention. California: Structural Engineering Association of California ,2007: 1-13.
- [8] Li Y ,Yin Y J ,Ellingwood B R ,Willian M B. Uniform hazard versus uniform risk bases for performance-based earthquake engineering of light-frame wood construction [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics , 2010 ,39(11) : 1199-1217.
- [9] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国工业建筑出版社,2001. (GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press ,2001. (in Chinese))
- [10] 高孟潭,卢寿德. 关于下一代地震区划图编制原则与关键技术的初步探讨[J]. 震灾防御技术,2006 , 1(1) : 1-6. (GAO Mengtan , LU Shoude. The discussion on principles of seismic zonation of the next generation [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention ,2006 ,1(1) : 1-6. (in Chinese))
- [11] Federal Emergency Management Agency. Quantification of building seismic performance factors [R]. FEMA P695. Washington DC: Federal Emergency Management Agency ,2009.
- [12] 葛余博. 概率论与数理统计[M]. 北京: 清华大学出版社,2005: 19-26. (GE Yubo. Probability theorem and mathematical statistics [M]. Beijing: Tsinghua University Press ,2005: 19-26. (in Chinese))
- [13] 陆新征,林旭川,叶列平,李易,唐代远. 地震下高层建筑连续倒塌的数值模型研究[J]. 工程力学, 2010 ,27(11) : 64-70. (LU Xinzheng , LIN Xuchuan , YE Lieping , LI Yi , TANG Daiyuan. Numerical models for earthquake induced progressive collapse of high-rise buildings [J]. Engineering Mechanics ,2010 ,27(11) : 64-70. (in Chinese))
- [14] 陆新征,叶列平,缪志伟. 建筑抗震弹塑性分析 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社,2009: 271-283. (LU Xinzheng , YE Lieping , MIAO Zhiwei. Elasto-plastic analysis of building against earthquake [M]. Beijing: China Architecture & Building Press ,2009: 271-283. (in Chinese))
- [15] CECS 160: 2004 建筑工程抗震性能化设计通则[S]. 北京: 中国计划出版社,2004. (CECS 160: 2004 General rule for performance-based seismic design for buildings [S]. Beijing: China Planning Press ,2004. (in Chinese))

2012 年中国建筑学会年会将在京举办

2012 年中国建筑学会年会将于今年 10 月在北京国际会议中心举办。年会主题为“建筑我们的和谐家园”,内容包括大会开幕式、大会报告、专题论坛、大会展览以及颁奖典礼,同时将召开中国建筑学会第十二届二次理事会议。

2012 年会设大会主报告会场和 10 个论坛分会场,以讨论各专业学术问题及建筑学界涉及到的社会热点问题等。大会期间的展览内容将集中展示建筑界各专业理论研究、科研创新、技术成果,以及学界精英推介、学会和分会介绍等。展览分为荣誉篇、科技篇、安全篇、绿色篇、成就篇、家园篇等 6 个展区部分。大会颁奖典礼将颁发“中国建筑设计百家名院”和“当代中国百名建筑师”荣誉证书,同时颁发中国建筑学会资深会员荣誉证书、中国建筑学会专家库专家荣誉证书、2012 年会优秀论文证书。

大会欢迎热心于中国建筑文化与建筑科技事业繁荣与发展的企业及人士积极支持和参与年会筹备工作,同时本次会议将记录注册人员继续教育选修课 20 学时。大会报名时间截止为 9 月 16 日,会议具体内容及报名方式详见中国建筑学会网站(www. chinaasc. org)。