

抗地震倒塌能力谱研究

施 炜, 叶列平, 陆新征

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要: 应用基于 IDA 的倒塌易损性分析方法, 定量评估了单自由度结构体系的抗地震倒塌能力, 提出了结构抗地震倒塌能力谱的概念。抗地震倒塌能力谱由抗倒塌能力均值谱和离散度谱两部分构成, 不仅可用于估计结构在不同超越概率地震作用下的倒塌率, 还可根据罕遇地震/特大地震作用下的倒塌率目标, 建立基于倒塌率目标的抗震设计方法。由于传统抗震设计的 $R-\mu-T$ 谱未考虑结构的倒塌状态, 因此, 建议采用 $R-\mu-T$ 谱和抗地震倒塌能力谱分别折减设防地震和罕遇地震/特大地震作用下的弹性地震作用需求, 以实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设计目标。

关键词: 抗地震倒塌能力谱; 倒塌易损性分析; $R-\mu-T$ 谱; 性能化抗震设计; 承载力折减系数

中图分类号: TU375.404 **文献标志码:** A

Study of collapse resistant capacity spectrum

SHI Wei, YE Lieping, LU Xinzheng

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

Abstract: This paper quantitatively evaluates the earthquake-induced-collapse resistance of the single-degree-of-freedom structural system through collapse fragility analysis based on incremental dynamic analysis, and proposes the concept of the collapse resistant capacity spectrum. The collapse resistant capacity spectrum is composed of the median spectrum and the dispersion spectrum. The CRC spectrum is useful to estimate the collapse probability of building structures subjected to the earthquake of given intensity level. And it is also utilized to establish the collapse probability targeted seismic design by which the structure is designed to satisfy the prescribed collapse probability under collapse-prevention-level earthquakes/mega-earthquakes. Since the $R-\mu-T$ spectrum does not focus on the collapse state, it is proposed that, the elastic seismic action required by the fortification-level earthquake and the collapse-prevention-level earthquake/mega-earthquake are reduced by the classical $R-\mu-T$ spectrum and the CRC spectrum, respectively, so as to rationally realize the three level seismic design target as prescribed in the Chinese code for seismic design.

Keywords: collapse resistant capacity spectrum; collapse fragility analysis; $R-\mu-T$ spectrum; performance-based seismic design; strength reduction coefficient

基金项目: 国家自然科学基金项目(51222804, 51178249) 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0528)。

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

通信作者: 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: 2012 年 4 月

0 引言

保证建筑结构抗地震倒塌能力是性能化抗震设计的核心目标^[1]。随着结构地震响应数值模拟技术的发展和计算机软硬件水平的提高,基于逐步增量动力分析(incremental dynamic analysis, IDA)^[2]的倒塌易损性分析方法^[3]已用于结构抗地震倒塌能力的定量评价^[4-6]。美国 FEMA 695 报告中^[4]采用基于 IDA 倒塌易损性分析方法,以结构在最大考虑地震(maximum considered earthquake, MCE)作用下的倒塌率为目标,对 FEMA 450^[7]中定义的建筑结构抗震性能系数(包括承载力折减系数 R 、超强系数 Ω_0 和响应放大系数 C_d)进行了验证和调整。Luco 等^[8]考虑结构抗地震倒塌能力的随机性,应用基于 IDA 的倒塌易损性分析结果,以结构在设计基准期内的地震倒塌风险为目标,定义结构抗震设防的地震水准,并编制基于一致倒塌风险的设计地震区划。

大多数多层规则建筑结构可简化为单自由度体系(single degree of freedom, SDOF 体系)来研究其抗震性能。对于多自由度体系(multiple degree of freedom, MDOF 体系)在既定侧力模式下也可退化成 SDOF 体系^[9]。为此,本文基于 IDA 的倒塌易损性分析方法对 SDOF 体系的抗地震倒塌能力进行定量评价,提出抗地震倒塌能力谱(collapse resistant capacity spectrum, CRC 谱)分析抗地震倒塌能力谱的应用及其与传统 $R-\mu-T$ 谱^[10-11]的相互关系。在此基础上,提出基于倒塌率目标的结构抗震设计思路,以及实现基于倒塌率目标的结构抗震设计方法需研究的问题。

1 基于 IDA 分析的结构抗地震倒塌能力评价方法

1.1 地震动输入

结构倒塌易损性分析的合理性主要依赖于 IDA 分析中地震动集合的样本量和代表性。本文采用 FEMA 695^[4]报告推荐的 22 组远场地震动(共 44 条水平分量)作为 IDA 分析的地震动输入,详细信息见表 1。

表 1 中的地震动记录按照文献[4]的规则,选自美国太平洋地震工程研究中心 NGA Database 数据库^[12]。文献[4]选取地震波的规则是选取可能导致实际结构发生倒塌破坏的强烈地震动记录,并避免对某一特定地震事件的倾向性,同时尽量降低局部场地条件和土-结构共同作用引起的地震动离散性。根据文献[13],表1所列的地震动集合大致对应

表 1 地震动集合信息

Table 1 Information about ground motion

分组编号	震级	年份	地震名称	记录台站名称
1	6.7	1994	Northridge, USA	Beverly Hills-Mulhol
2	6.7	1994	Northridge, USA	Canyon Country-WLC
3	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu
4	7.1	1999	Hector Mine, USA	Hector
5	6.5	1979	Imperial Valley, USA	Delta
6	6.5	1979	Imperial Valley, USA	EI Centro Array #11
7	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi
8	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka
9	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce
10	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelik
11	7.3	1992	Landers, USA	Yermo Fire Station
12	7.3	1992	Landers, USA	Coolwater
13	6.9	1989	Loma Prieta, USA	Capitola
14	6.9	1989	Loma Prieta, USA	Gilroy Array #3
15	7.4	1990	Manjil Iran	Abbar
16	6.5	1987	Superstition Hills, USA	EI Centro Imp. Co.
17	6.5	1987	Superstition Hills, USA	Poe Road (temp)
18	7.0	1992	Cape Mendocino, USA	Rio Dell Overpass
19	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHY101
20	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU045
21	6.6	1971	San Fernando, USA	LA-Hollywood Stor
22	6.5	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo

GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[14]的 II 类场地土。

1.2 逐步增量动力分析

首先选择合理的地震动强度指标(intensity measure, IM)对表 1 中的地震动集合进行归一化,然后逐步提高地震动强度指标 IM ,将表 1 所列地震动记录逐条输入结构进行弹塑性时程分析,可得如图 1 所示的 IDA 曲线(又称动力推覆曲线)^[2]。

对 SDOF 体系进行 IDA 分析,其滞回模型见图 2,滞回模型的规则、参数及其用于多层建筑结构地震倒塌易损性分析的合理性参见文献[9]。对于给定结构,图 1 中每条 IDA 曲线对应地震动集合中的一条地震动记录,曲线上的每个数据点对应一次给定地震动强度下的弹塑性时程分析结果。通过 IDA 分析,可获得随地震动强度逐步增大过程中结构从弹性到弹塑性直至临界倒塌的全过程。

图 1 所示的 IDA 分析得到的动力推覆曲线中,其纵坐标为地震动强度指标 IM ^[2]。根据文献[15],对应结构自振周期阻尼比为 5% 的谱加速度 $S_a(T_1)_{5\% \text{ Damped}}$ 与结构地震响应的相关性较高。本文采用无量纲地震动强度指标 IM ,该指标是考虑 SDOF 体系的有效振动质量 M 、初始弹性刚度 K_e 和屈服位移 D_y ,采用式(1)将地震动强度指标 $S_a(T_1)_{5\% \text{ Damped}}$ 进行归一化。

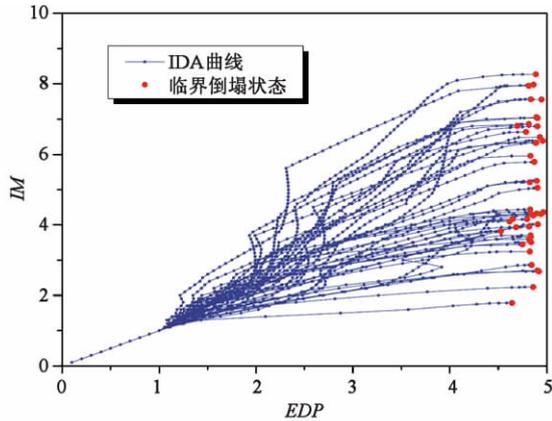


图1 动力推覆曲线

Fig.1 IDA curves

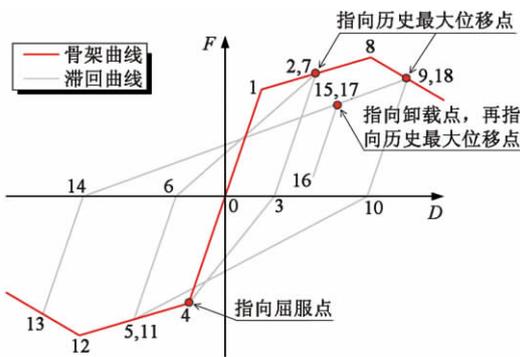


图2 SDOF模型滞回规则^[9]

Fig.2 SDOF model and basic hysteretic rule

$$IM = \frac{MS_a(T_1)_{5\% \text{ Damped}}}{K_e D_y} \quad (1)$$

式中: $MS_a(T_1)_{5\% \text{ Damped}}$ 为 SDOF 体系在给定强度地震作用下的弹性地震作用需求; $K_e D_y$ 为 SDOF 体系的屈服承载力 F_y 。因此,式(1)定义的无量纲地震动强度指标 IM 为给定强度地震作用下结构弹性地震作用需求 F_e 与结构屈服承载力 F_y 之比。

图 1 中的横坐标为结构抗震需求参数 (engineering demanding parameter, EDP)^[2],如最大层间位移响应或最大层间位移角响应。定义结构的无量纲抗震需求参数 EDP 为:

$$EDP = \frac{|D|_{\max}}{D_y} \quad (2)$$

式中, $|D|_{\max}$ 为给定无量纲地震动强度 IM 作用下弹塑性时程分析得到的结构峰值位移响应。

图 1 所示 SDOF 体系的 IDA 曲线即是根据式(1)定义的无量纲地震动强度指标 IM 和式(2)定义的无量纲结构抗震需求参数 EDP 给出的,也称为 IM -EDP 关系曲线。由图 1 可知,当无量纲地震动强度 $IM = 1.0$ 时,结构恰好屈服,即 $EDP = 1.0$,因此图 1 中所有 IDA 曲线均通过点 $(1.0, 1.0)$,且在弹性范围内(即 $IM \in [0.0, 1.0]$ 或 $EDP \in [0.0, 1.0]$) IDA 曲线的切线斜率均为 1.0。

1.3 倒塌易损性分析

在文献[2-4]中,结构临界倒塌状态是通过 IDA 曲线趋于水平或者 IDA 曲线的切线斜率达到初始斜率的 20% 进行识别。但由图 1 可知,IDA 曲线并非单调变化^[2],尤其对长周期结构,某些地震动输入下结构的 IM -EDP 关系并非一一映射的单值关系,因此仅通过 IDA 曲线识别结构倒塌破坏的临界状态存在一定的偶然误差。为此,本文将结构完全丧失水平承载力(图 3 中的倒塌点)作为结构动力失稳的判据^[16]。

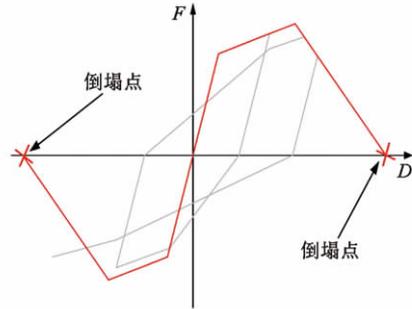


图3 结构的倒塌破坏

Fig.3 Limit state of collapse

图 1 中每条 IDA 曲线末端的点表示结构的临界倒塌状态,相应的 IM 阈值用 $IM_{\text{Threshold}}$ 表示。对于某一条地震动输入,当地震动强度为 $IM_{\text{Threshold}}$ 时,结构达到临界倒塌状态(但未倒塌);当地震动强度达到 $(IM_{\text{Threshold}} + \varepsilon_{IM})$ (其中, ε_{IM} 为计算 $IM_{\text{Threshold}}$ 的数值精度,本文取 5×10^{-4}) 时,结构发生倒塌,即结构弹塑性时程分析达到图 3 所示的“倒塌点”。

结构倒塌易损性评价方法以结构达到临界倒塌状态的地震动强度阈值 $IM_{\text{Threshold}}$ 作为结构抗地震倒塌能力 (collapse resistant capacity, CRC) 的度量指标^[17],即 $IM_{\text{Threshold}}$ 越大,结构的抗地震倒塌能力也越大。由于地震动的随机特性,每条地震动对应结构临界倒塌的强度阈值 $IM_{\text{Threshold}}$ 不同。将 IDA 分析得到各条地震动输入下的 $IM_{\text{Threshold}}$ 作为随机变量 CRC 的统计样本,按对数正态分布进行参数估计^[3,6],可以得到结构抗地震倒塌能力 CRC 的概率分布,图 4 所示为某结构抗地震倒塌能力 CRC 的累积概率分布函数 $P(CRC)$ 和概率密度函数 $p(CRC)$ 。CRC 的概率分布是定量评价结构抗地震倒塌能力的基础。假设抗地震倒塌能力 CRC 满足对数正态分布,其累积概率分布函数 $P(CRC)$ 和概率密度函数 $p(CRC)$ 分别为:

$$P(CRC) = \frac{1}{\eta \sqrt{2\pi}} \int_0^{CRC} \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{(\ln t - \ln CRC^{50\%})^2}{2\eta^2}\right] dt \quad (3)$$

$$p(CRC) = \frac{1}{CRC\eta\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln CRC - \ln CRC^{50\%})^2}{2\eta^2}\right] \quad (4)$$

式中: t 为用于表示定积分的形式变量; $CRC^{50\%}$ 为 CRC 的中位值, 即随机变量 CRC 有 50% 的概率不大于 $CRC^{50\%}$; η 为随机变量 CRC 离散程度, η 越接近 0, CRC 的离散程度越小。

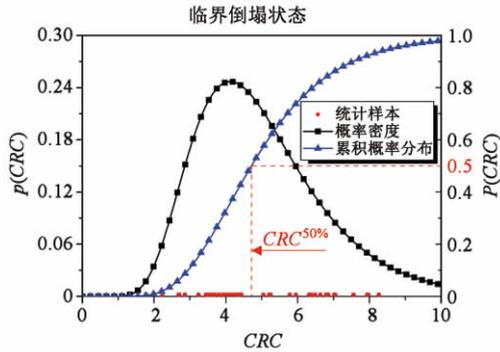


图 4 抗地震倒塌能力的概率表达

Fig. 4 Expression of collapse resistant capacity in term of probability

2 结构抗地震倒塌能力谱

2.1 结构抗地震倒塌能力谱的概念

以基准 SDOF 模型为例(强化段刚度系数 $\alpha_s = 0.00$ 、名义延性系数 $\mu = 4.0$ 、软化段刚度系数 $\alpha_c = 1.0$ 、不考虑滞回捏拢和往复荷载作用下的承载力及刚度退化、稳定系数 $\theta = 0.00$, 各参数物理意义参见文献 [9]), 其抗倒塌能力中位值 $CRC^{50\%}$ 谱曲线及其相应的离散度 η 谱曲线见图 5。 CRC 的中位值 $CRC^{50\%}$ 值越大, 表明结构的抗地震倒塌能力越强; η 谱值越大, 则表明结构抗倒塌能力的离散性越大。由图 5 可见, $CRC^{50\%}$ 谱随结构自振周期 T_1 的增加而增大, 即在结构其他参数相同的情况下, 结构自振周期 T_1 越大, 抗倒塌能力越大, 故结构自振周期是抗倒塌能力的重要影响因素。因此, 对于给定的结构类型, 如果获得 $CRC^{50\%}$ 谱曲线和 η 谱曲线, 即可在统计意义上给出这类结构的抗倒塌能力评价, 为此本文将图 5 结构的抗地震倒塌能力中位值 $CRC^{50\%}$ 谱和离散度 η 谱称为“结构抗地震倒塌能力谱”。

2.2 抗倒塌能力谱的工程意义

本文定义的无量纲地震动强度指标 IM 为结构在地震作用下的弹性地震作用需求与结构屈服承载力之比(式(1))。抗地震倒塌能力 CRC 与 IM 具有类似的物理意义, 但 CRC 考虑了地震动影响的不确定性, 具有概率意义。根据抗倒塌能力谱(包括 $CRC^{50\%}$ 谱和 η 谱), 可由式(5) 得到 CRC 的任意分位

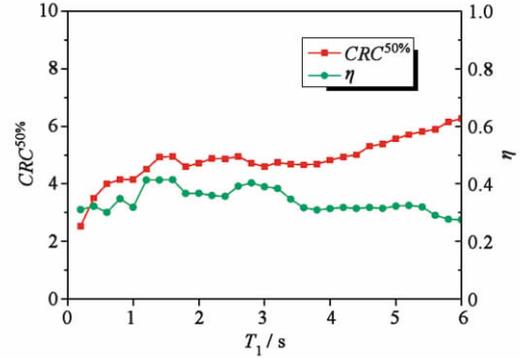


图 5 SDOF 体系的 $CRC^{50\%}$ 谱和 η 谱

Fig. 5 Effect of natural vibration period on SDOF's collapse resistant capacity

值 $CRC^{a\%}$ 为:

$$CRC^{a\%} = \exp[\ln(CRC^{50\%}) + \Phi^{-1}(a\%) \eta] \quad (5)$$

式中: 分位值 $CRC^{a\%}$ 的累积概率 $P(CRC^{a\%})$ 为 $a\%$, 即结构抗地震倒塌能力 CRC 指标小于 $CRC^{a\%}$ 的概率为 $a\%$; Φ^{-1} 为标准正态分布累积概率的反函数。

在评价结构抗地震倒塌能力时, 如果结构的屈服承载力为 F_{Yield} , 则在弹性地震作用需求为 $F_{Yield} \times CRC^{a\%}$ 的地震作用下, 该结构具有 $(1 - a\%)$ 的保证率能够避免倒塌破坏。在抗震设计中确定结构的承载力需求时, 假设结构在罕遇地震或特大地震作用下的弹性地震作用需求为 F_{Demand} (可由罕遇地震或特大地震的加速度反应谱确定), 在结构倒塌模式得到有效控制的前提下, 若按承载力需求为 $F_{Demand} / CRC^{a\%}$ 进行设计, 那么该结构在罕遇地震或特大地震下不发生倒塌的可靠概率为 $(1 - a\%)$, 即在弹性地震作用需求为 F_{Demand} 的罕遇地震或特大地震作用下结构的倒塌概率为 $a\%$ 。

3 与传统 $R-\mu-T$ 谱的比较

CRC 的 $a\%$ 分位值 $CRC^{a\%}$ 在抗震设计中可用于折减罕遇地震或特大地震作用下的结构弹性地震作用需求 F_{Demand} , 与传统 $R-\mu-T$ 谱^[10-11] 中的地震作用折减系数 R 具有类似的意义, 但 CRC 谱与 $R-\mu-T$ 谱中的地震作用折减系数 R 是有区别的。

3.1 CRC 谱具有概率意义

CRC 谱具有明确的概率意义。如图 5 所示的基准 SDOF 模型的 CRC 谱, CRC 谱包含中位值 $CRC^{50\%}$ 和离散度 η 两部分, 由此可根据式(5) 求得任意分位值 $CRC^{a\%}$ 。其中, 分位数 $a\%$ 的选取与罕遇地震或特大地震作用下结构的倒塌率目标有关, $a\%$ 即结构的目标倒塌率。因此, CRC 谱可用于建立基于倒塌率目标的抗震设计方法, 即可根据结构的重要性和在地震中发生倒塌破坏的严重性以及业主要求, 确定合理

的倒塌率目标 $a\%$,再由抗倒塌能力谱得到 $CRC^{a\%}$ 来确定满足结构抗倒塌性能目标的承载力需求。

3.2 CRC 谱基于结构倒塌的极限状态

CRC 谱考虑了结构的软化段,而传统的 $R-\mu-T$ 谱通常不考虑结构的软化段,认为结构一旦进入软化段即发生动力失稳。例如文献 [10] 中所考虑的修正 Clough 模型 (MC)、理想弹塑性模型 (EPP)、剪切滑移模型 (SSP) 和双折线弹性模型 (BIL) 的骨架线均为二折线,均未考虑结构软化段。一般整体结构的能力曲线均存在软化段,且在地震作用下结构进入软化段后并不会立即发生动力失稳或倒塌破坏。图 6 为前述基准 SDOF 模型 [9] 在临界倒塌状态时的位移响应 $EDP_{Threshold}$,这与图 1 中临界倒塌状态点 ($IM_{Threshold}$, $EDP_{Threshold}$) 的 $IM_{Threshold}$ 相对应。基准模型的名义延性系数 $\mu = 4.0$,当式 (2) 的 EDP 超过 4.0 时结构已经进入软化段,由图 6 可知,基准模型的 $EDP_{Threshold}$ 普遍超过 4.0,且随着结构自振周期 T_1 的增加而增大并趋于稳定,因此结构进入软化段并不意味着发生动力失稳(倒塌)。

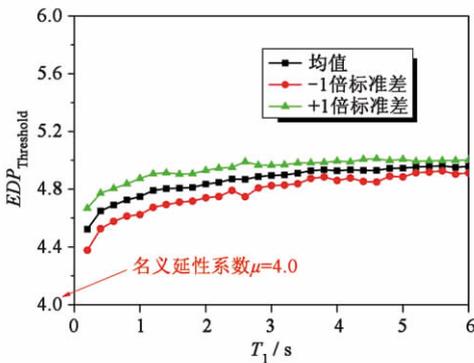
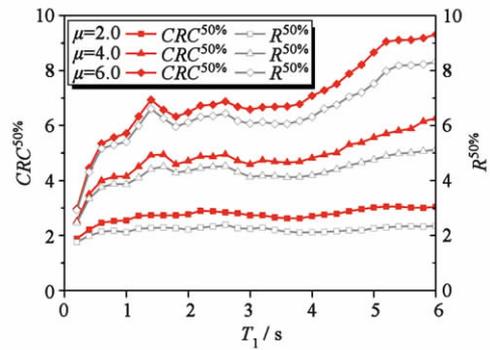


图 6 结构临界倒塌状态时的位移响应
Fig. 6 Displacement response corresponding to limit state of collapse

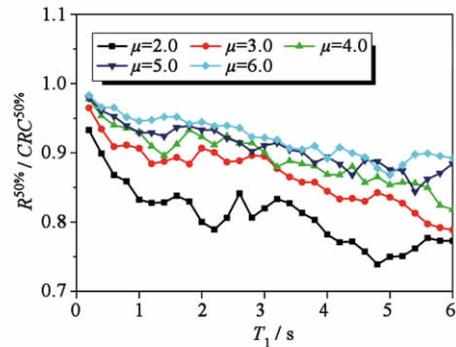
在 CRC 谱的计算中,将结构进入软化段作为动力失稳或倒塌的判据,则退化为传统意义的 $R-\mu-T$ 谱。图 7 给出了不同名义延性系数 μ 下(其他参数均相同,强化段刚度系数 $\alpha_s = 0.00$,软化段刚度系数 $\alpha_c = 1.0$,不考虑滞回捏拢和往复荷载作用下的承载力及刚度退化,稳定系数 $\theta = 0.00$)的 $CRC^{50\%}$ 和 $R^{50\%}$ (图 7a) 以及 $R^{50\%}/CRC^{50\%}$ (图 7b)。如图 7b 所示,由于 $R-\mu-T$ 谱未考虑结构软化段,其结果相比 CRC 谱偏于保守,而且自振周期越长则 $R^{50\%}/CRC^{50\%}$ 越小,这与图 6 中 $EDP_{Threshold}$ 普遍超过 4.0 且随着自振周期的增大而增大的现象是一致的。因此,在结构的抗倒塌分析中应考虑软化段的影响。

3.3 “三水准”抗震设计建议

针对“小震不坏、中震可修、大震不倒”的“三水准”抗震设计目标 [14],建议 $R-\mu-T$ 谱用于中震(设防



(a) $CRC^{50\%}$ vs. $R^{50\%}$



(b) $R^{50\%}/CRC^{50\%}$

图 7 CRC 谱与 $R-\mu-T$ 谱的比较

Fig. 7 Comparison of collapse resistant spectrum and $R-\mu-T$ spectrum

地震)作用下的地震作用折减,而 CRC 谱用于大震(罕遇地震或特大地震)作用下的地震作用折减。从地震作用的角度讲,小震、中震和大震的地震动谱加速度对结构周期的衰减关系存在差异,因此小震作用或中震作用并非简单地由大震作用倍乘单一的折减系数得到。GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》[14]规定“计算罕遇地震作用时,特征周期应增加 0.05 s”,即间接考虑了这种衰减关系的差异。

由于 $R-\mu-T$ 谱未考虑结构倒塌的极限状态,因此仅适用于“中震可修”的抗震设计目标。结构抗震设计时,应考虑同时满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的抗震设计目标,即:

- 1) 由多遇地震反应谱得到小震弹性地震作用需求。
- 2) 由设防地震反应谱得到中震弹性地震作用需求。根据“中震可修”性能点对应的 μ^* (图 8) 计算 $R-\mu-T$ 谱,经过 R 折减得到“中震可修”承载力需求。
- 3) 由罕遇地震反应谱得到大震弹性地震作用需求。根据“峰值点”对应的名义延性系数 μ (图 8) 计算 CRC 谱,经过 CRC 折减得到“大震不倒”承载力需求。

综上所述,结构实际的弹性承载力需求应取小震弹性地震作用、“中震可修”承载力需求和“大震不倒”承载力需求三者的最大值。需要指出的是,用于

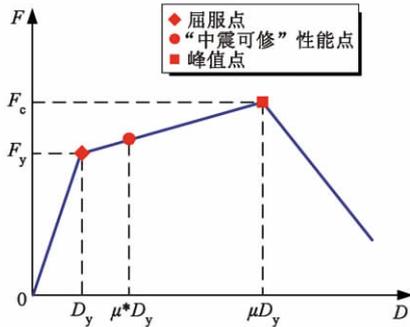


图8 “中震可修”性能点

Fig.8 Performance level corresponding to ‘repairable’

折减中震和大震弹性地震作用需求的 R 和 CRC 均应具有一定的保证率,而且采用 CRC 谱旨在实现“大震不倒”的性能目标,故 CRC 应比 R 具有更高的保证率。

4 需研究的问题

根据基于倒塌率目标的抗震设计方法,以下问题需要进一步的研究:

1) 地震动的研究。基于倒塌率目标的抗震设计是性能化抗震设计的一个最重要的方面,旨在保证结构在罕遇地震/特大地震作用下的抗倒塌安全性。因此,需要从两方面对地震动进行深入研究:一方面,基于倒塌率目标的抗震设计需要定义与罕遇地震/特大地震的重现期相对应的弹性反应谱,并且该弹性反应谱应能反映可能导致结构倒塌破坏的强烈地震的衰减规律,并与罕遇地震/特大地震的重现期保持一致;另一方面,结构抗地震倒塌能力谱的计算需要选择合适的地震动集合作为 IDA 分析的地震动输入,地震动集合不仅需要一定样本数量,还应尽可能地反映所在地区的震动衰减规律。

2) 结构延性能力的定量评价。现代结构抗震设计主要采用在充分保证结构延性能力、滞回耗能能力的前提下,适当折减弹性地震作用需求的抗震设计方法。我国现行抗震设计规范中,结构承载力折减系数为定值(从设防地震的反应谱由单一的折减系数折减至频遇地震的设计地震反应谱),而根据结构抗侧力体系的类型、材料、结构重要性等因素,采用不同程度的抗震措施以保证延性需求和耗能需求。而基于倒塌率目标的抗震设计允许结构通过延性能力、滞回耗能能力与承载力的不同组合来满足罕遇地震/特大地震下结构的抗倒塌安全,因此结构不同抗震措施下延性能力的影响因素分析和定量评价是实现基于倒塌率目标抗震设计的基础。

3) 原型结构与单自由度体系倒塌易损性的差别。结构抗倒塌能力谱用于基于倒塌率目标的抗震

设计,其假定是采用简化的单自由度体系的倒塌易损性分析来评价原型结构的抗倒塌能力。文献[9]指出,简单自由度体系的倒塌易损性与原型结构吻合良好,并且简单自由度体系的抗倒塌能力略低于原型结构。从系统的角度讲,原型结构是比单自由度体系更为复杂的结构系统,系统的层次性越丰富、复杂程度越高,那么系统在遭到局部破坏后重新恢复稳定的能力也越强。以钢筋混凝土框架结构为例,若底层某一根中柱遭到破坏,跨越失效中柱的梁可能产生悬链线机制或者失效中柱上方某几层的梁、柱产生一定的桁架作用,结构体系能够避免发生连续倒塌破坏。类似的,原型结构在遭遇强烈地震后,通过传力路径重新组织而恢复稳定的潜在能力比单自由度体系更强,也许重新组织的传力路径和构件的力学行为并不是抗震设计预想的情况,但是客观上避免了结构的倒塌破坏。从抗震设计方法的角度而言,有必要对简单自由度体系与原型结构两者抗倒塌能力的偶然误差和系统误差(由结构系统复杂性的差异造成)进行深入研究。

5 结论

1) 采用基于 IDA 倒塌易损性分析方法,定量评估了单自由度结构体系的抗地震倒塌能力,并提出了抗倒塌能力谱。结构抗倒塌能力谱包含中位值 $CRC^{50\%}$ 谱和离散度 η 谱两部分,具有明确的工程物理意义和概率意义。 CRC 谱可用于既有结构的抗倒塌能力评价;在性能化抗震设计中,根据大震(罕遇地震或特大地震)作用下的抗倒塌性能目标,应用 CRC 谱可以确定结构满足大震作用下倒塌率目标的承载力需求。

2) 通过 CRC 谱与传统 $R-\mu-T$ 谱的对比分析,表明抗倒塌分析应考虑结构软化段。建议 $R-\mu-T$ 谱与 CRC 谱应分别用于中震和大震弹性地震作用需求的折减,以满足“中震可修”和“大震不倒”的抗震设计目标。

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 Xinzheng, 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 Structural 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 Structural Dynamics*, 2007, 36(13): 1901-1914.
- [4] Federal Emergency Management Agency. Quantification of building seismic performance factors [R]. FEMA P695. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2009: 1.1-4.11.
- [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] 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*, 2011, 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*, 2011, 28(3): 41-48. (in Chinese))
- [7] Federal Emergency Management Agency. Recommended provisions for new buildings and other structures [R]. FEMA P450a. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2004: 95-97.
- [8] 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 Convention. California, USA: Structural Engineers Association of California, 2007: 1-13.
- [9] 施炜, 陆新征, 叶列平, 曲哲. 建筑结构倒塌分析的单自由度模型 [J]. *工程力学*, 2012, 29(10): 5-12. (SHI Wei, LU Xinzheng, YE Lieping, QU Zhe. Single-degree-of-freedom hysteretic model for collapse analysis of building structures [J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(10): 5-12. (in Chinese))
- [10] 赵永峰, 童根树. 修正 Clough 滞回模型下的地震力调整系数 [J]. *土木工程学报*, 2006, 39(10): 34-41. (ZHAO Yongfeng, TONG Genshu. Seismic force modification factors for structures with modified-Clough hysteretic model [J]. *Chinese Civil Engineering Journal*, 2006, 39(10): 34-41. (in Chinese))
- [11] Chopra A K. Dynamic of structures: theory and applications to earthquake engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 288-295.
- [12] Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). NGA: next generation attenuation project [DB/OL]. [2011-09-10]. <http://peer.berkeley.edu/nga/>.
- [13] 罗开海, 王亚勇. 中美欧抗震设计规范地震动参数换算关系的研究 [J]. *建筑结构*, 2006, 36(8): 103-107. (LUO Kaihai, WANG Yayong. Research on conversion relationships among the parameters of ground motions in seismic design codes of China, America and Europe [J]. *Building Structure*, 2006, 36(8): 103-107. (in Chinese))
- [14] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese))
- [15] 叶列平, 马千里, 缪志伟. 抗震分析用地震动强度指标的研究 [J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(4): 9-22. (YE Lieping, MA Qianli, MIAO Zhiwei. Study on earthquake intensities for seismic analysis [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2009, 29(4): 9-22. (in Chinese))
- [16] Araki Y, Hjelmstad K D. Criteria for assessing dynamic collapse of elastoplastic structural systems [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2000, 29(8): 1177-1198.
- [17] 施炜, 陆新征, 叶列平. 基于一致倒塌风险的建筑抗震评价方法研究 [J]. *建筑结构学报*, 2012, 33(6): 1-7. (SHI Wei, LU Xinzheng, YE Lieping. Study on uniform collapse risk evaluation method for building structures under earthquakes [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33(6): 1-7. (in Chinese))