

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201804077

条件均值谱选取记录的结构抗倒塌易损性分析

尹建华^{1,2}, 冀 昆^{1,2}, 任叶飞^{1,2}, 温瑞智^{1,2}

(1. 中国地震局 工程力学研究所, 哈尔滨 150080; 2. 地震工程与工程振动重点实验室(中国地震局), 哈尔滨 150080)

摘 要: 以抗倒塌易损性分析方法中的强震记录选取环节为研究对象, 为了更好体现不同场址的地震动危险性差异, 利用目标地区地震概率危险性分析的设定地震解耦结果构建条件均值谱(CMS), 进而将其进行多次调幅得到对应的目标谱, 将匹配选波结果作为增量动力分析方法(IDA)的输入。以自振周期为 0.5、1.0 和 1.5 s 的 3 个平面框架为算例, 在中国两个城市的地震安全性评价工作的基础上构建 CMS 谱, 进行 IDA 分析, 并将与当地一致概率谱、罕遇地震规范谱以及 ATC63 数据集得到的结果进行对比讨论, 结果表明基于规范目标谱得到的抗倒塌易损性概率曲线最陡峭, 基于一致概率谱与 ATC63 数据集得到的抗倒塌易损性概率曲线次之, CMS 对应的抗倒塌易损性概率曲线最平缓。同时, 对于较长周期的 1.5 s 结构, 本文建议采用包络 CMS 谱来考虑多阶振型的影响, 否则采用单点周期 CMS 谱会使得倒塌易损性计算结果显著低估实际的倒塌超越概率。

关键词: 强震记录选取; IDA; 地震危险性; 条件均值谱; 抗倒塌易损性概率曲线

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)12-0119-06

Structural collapse fragility analysis based on strong ground-motion records selection using conditional mean spectrum

YIN Jianhua^{1,2}, JI Kun^{1,2}, REN Yefei^{1,2}, WEN Ruizhi^{1,2}

(1. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;

2. Key Lab of Earthquake Engineering and Engineering Vibration(China Earthquake Administration), Harbin 150080, China)

Abstract: The strong ground-motion records selection in structural collapse fragility analysis was studied. To consider the seismic hazard difference within target sites, the conditional mean spectrum (CMS) was used as the target spectrum for ground-motion records selection in the increment dynamic analysis (IDA) method. The CMS was constructed through the China seismic deaggregation and probability seismic hazard analysis. Taking three different 2D structures as examples and based on the seismic safety evaluation of two cities in China, the CMS was constructed to analyze the collapse fragility curves with IDA method, and the results were compared with the results obtained from the uniform hazard spectrum, the code spectrum, and recommended recordings in ATC63. The results indicate that the collapse fragility curve using code spectrum is the steepest, the results of the uniform hazard spectrum and ATC63 are the next, and the suggested method is the flattest. Meanwhile, for the long period 1.5 s structure, the envelope CMS is implemented to consider the influence of the multiple model period effect instead of the single period CMS which underestimates the collapse fragility calculation result significantly for the long period structures.

Keywords: ground-motion records selection; IDA; seismic hazard; CMS; collapse fragility probability curve

增量动力分析方法^[1](IDA)是结构抗倒塌易损性分析的主要手段,而地震动选取是地震动不确定性的主要控制环节以及目标场地地震危险性的主要体现,直接影响到后期的抗倒塌易损性概率计算。目前 IDA 强震记录选取中常采用 3 种方法之一:1)粗略限制地震动特性范围,以目标场地地震危险性分析得到的设定地震为依据,确定震级和震中距($M -$

R)一定范围内的强震记录^[2];2)依据美国应用技术委员会(ATC, applied technology council)开展了一项名为“建筑结构抗震性能指标评估”的研究报告(ATC63)中建议的限制条件,依据震级、断层类型以及场地等参数上进行遴选得到数据库^[3];3)直接采用 ATC63 报告推荐的 22 组远场强震记录作为备选记录库^[4]。强震记录数量积累到目前阶段,仅仅依靠地震动参数进行限制(方法 1 和方法 2)往往过于宽泛,虽然能体现部分场地特征,但导致备选强震记录数量过多^[5],地震动不确定性也无法量化和评估,往往会导致抗倒塌易损性结果不具有鲁棒性。而方法 3 虽然有利于得到一般适用的结果,但忽略了

收稿日期: 2018-04-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1500801);

国家自然科学基金(51778589, 51878632);

黑龙江省自然科学基金(E2017065)

作者简介: 尹建华(1984—),男,博士研究生;

温瑞智(1967—),男,研究员,博士生导师

通信作者: 温瑞智, ruizhi@iem.ac.cn

对目标场址潜在地震动特性的考虑,不利于与最新一代性态工程后续环节衔接^[6]. 综上,在强震记录选取中在控制地震动参数外,通过体现场址危险性特征的目标谱对谱型进行控制就显得尤为重要.

2011 年 Baker^[7] 提出了条件均值谱 (CMS) 概念,基于概率地震危险性分析 (PSHA) 结果构建目标地震危险性水平下具有真实谱型特征的目标谱. 相比传统的一致概率谱 (UHS) 和规范谱,摒弃了其内在的保守性、包络性及谱型模型化等特点^[8]. 2013 年 Chandramohan 等^[9] 以 CMS 谱为目标谱基于条带法和 IDA 方法研究了二榀五层钢框架结构抗倒塌易损性. 而国内对 CMS 谱的研究及在易损性中的运用还处于起步阶段. 陈波^[10] 通过弹塑性时程分析验证了 CMS 谱对于结构响应离散性控制的作用. 冀昆等^[11] 从实际地震安全性评价工程现有产出出发,利用中国 PSHA 的结果进行设定地震解耦,得到了适用于中国现行危险性分析框架思路的条件均值谱.

本文在课题组已有研究基础上,将 CMS 谱的概念引入到中国结构抗倒塌易损性分析中,对中国传统的 IDA 计算中的强震记录选取环节进行了改进. 以 3 个不同周期平面框架为算例,在中国两个不同城市工程的地震安全性评价工作基础上构建 CMS 谱,进行 IDA 倒塌易损性分析,并将与一致概率谱、规范谱以及 ATC63 数据集得到的结果进行讨论.

1 基于 IDA 中强震记录选取的条件均值谱方法

本文将中国 CMS 谱的选波方法与中国传统的 IDA 方法相结合,并对其中的选波环节进行修改,从而得到基于 IDA 中强震记录选取的条件均值谱方法 (图 1),改进后方法描述如下:

- 1) 建立结构模型并获取其自振周期 T_1 .
- 2) 从 PSHA 及 UHS 谱中获取 T_1 时的 $S_a(T_1)$, 同时根据附近潜源分布解耦得到对应的 M 和 R .
- 3) CMS 谱构造公式^[7] 为

$$\mu_{\ln S_a(T_i) | \ln S_a(T_1)} = \mu_{\ln S_a(M, R, T_i)} + \rho(\varepsilon(T_i), \varepsilon(T_1)) \varepsilon(T_1) \sigma_{\ln S_a(M, T_i)}, \quad (1)$$

式中: $\mu_{\ln S_a(M, R, T_i)}$ 为由衰减关系确定平均加速度谱值, $\varepsilon(T_i)$ 为目标超越概率下的 UHS 谱值 $\ln S_a(T_i)$ 与 $\mu_{\ln S_a(M, R, T_i)}$ 之差与该周期点对数谱值标准差 $\sigma_{\ln S_a(M, T_i)}$ 的比值^[7] (式(2)). 各周期点之间 $\varepsilon(T_i)$ 的关系为 $\rho(\varepsilon(T_i), \varepsilon(T_1))$.

$$\varepsilon(T_i) = \frac{\ln S_a(T_i) - \mu_{\ln S_a(M, R, T_i)}}{\sigma_{\ln S_a(M, T_i)}}. \quad (2)$$

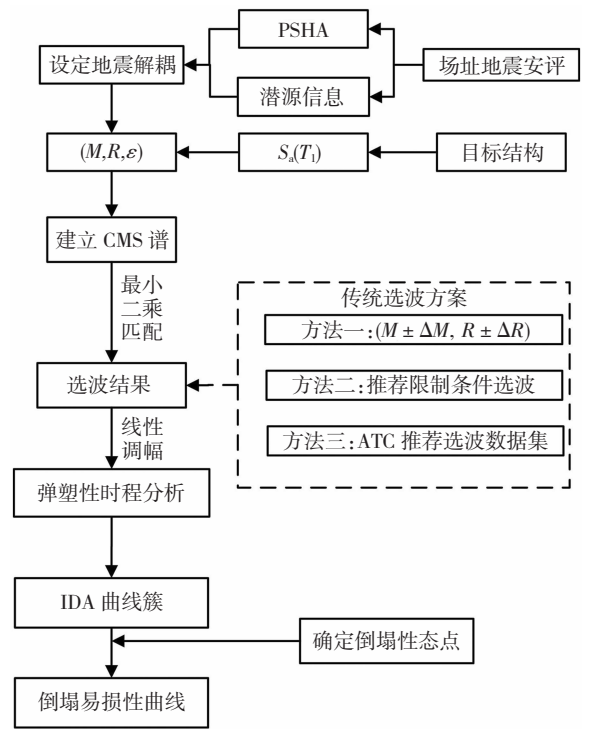


图 1 基于 CMS 谱选波基础下的 IDA 计算流程

Fig. 1 Calculation flow of IDA method for CMS

4) 以罕遇地震的 50 a 2% 超越概率为目标危险性水平构建条件均值谱,采用全周期最小二乘法匹配方法从由中国 NSMONS 强震记录数据库和美国 NGA-west1 数据库组成的新数据库中选取与之相匹配的一定数量的强震记录^[12].

5) 选取结构 T_1 的谱加速度值 $S_a(T_1)$ 作为 IM 指标,结构最大层间位移角 $\theta_{\max}$ 作为损伤指标 DM^[13].

6) 对每条强震记录以 IM 指标作为目标进行等步长线性调幅后,进行非线性时程分析,得到若干条与 IM 指标相关的曲线簇,即为 IDA 曲线簇.

7) 在 IDA 曲线上确定倒塌性态点,一般取 IDA 斜率小于等于初始弹性斜率 20% 的 $\theta_{\max}$ 以及 0.10 的较小值,来获取各倒塌性态点 IM 值.

8) 根据最大似然估计法计算 IM 的对数均值以及对数标准差^[14]:

$$\ln \hat{\theta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \text{IM}_i, \quad (3)$$

$$\hat{\beta} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\ln(\text{IM}_i / \hat{\theta}))^2}. \quad (4)$$

9) 结构抗倒塌易损性计算:将 $\hat{\theta}$ 及 $\hat{\beta}$ 代入下面公式,从而得到了 $\text{IM} = x$ 时的结构地震反应超过倒塌性态点的条件超越概率 P .

$$P(C | \text{IM} = x) = \Phi\left(\frac{\ln(x/\hat{\theta})}{\hat{\beta}}\right). \quad (5)$$

2 结构模型

根据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[15] 及 JGJ 3—2010《高层建筑混凝土结构技术规程》^[16] 等规范要求,本文采用 PKPM 软件分别设计了三层、八层及十五层等 3 种钢混框架结构,平面图、中间一榀框架的首层层高 4.5 m,其余层高均为 3.3 m,楼板厚度为 120 mm. 结构梁、柱和楼板均为现浇,混凝土等级为 C40,纵筋采用 HRB335,箍筋采用 HPB235. 结构顶层恒载 4.0 kN/m²,活载 2.0 kN/m²;其余层恒载 6.0 kN/m²,活载 2.0 kN/m². 建筑场地均为 I 类,抗震设防烈度 7 度,设计基本地震加速度 0.10 g,设计

地震分组第二组. 本文基于 OpenSees 软件对 3 种结构进行数值模拟分析,其中 3 种框架结构的自振周期及有效质量参与系数见表 1. 由于结构平面对称,故只选用其中一榀框架进行数值分析. 混凝土本构关系采用 concrete02,钢筋本构关系采用 steel02.

表 1 算例结构自振周期及有效质量参与系数
Tab.1 Structural natural periods and effective mass participation coefficient

自振周期/s	一阶	二阶	三阶
三层	0.5(92.2%)	0.18(6.9%)	0.12(0.9%)
八层	1.0(89.6%)	0.30(8.3%)	0.16(2.1%)
十五层	1.5(78.9%)	0.42(11.9%)	0.22(4.0%)

注:括号内为有效质量参与系数.

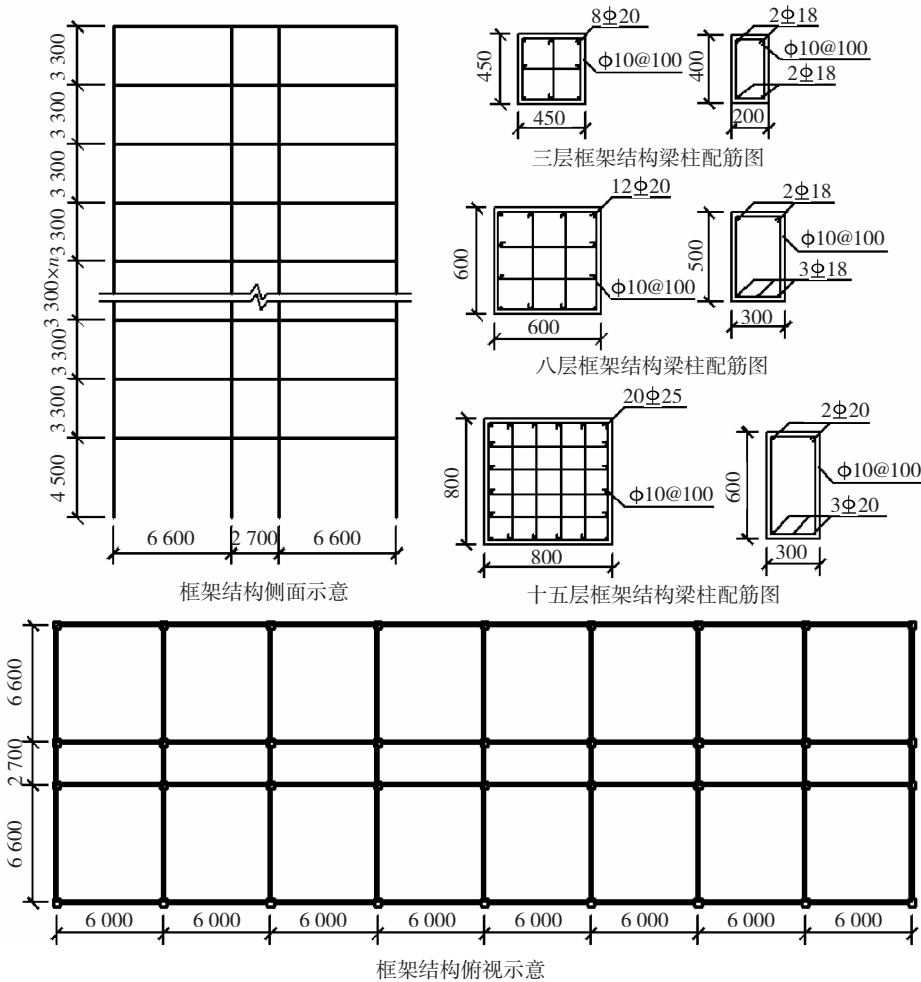


图 2 结构模型

Fig.2 Model of Structure

3 中国抗倒塌易损性分析实例

3.1 建立条件均值谱

选取位于河北省廊坊地区(场地一)以及四川省雅安地区(场地二)作为算例对上述方法进行示例说明,两个地区的地理位置分别为 N39.309°/E116.502°和 N29.795°/E102.846°,设防烈度均为

7 度,设计基本地震加速度 0.10 g,设计地震分组第二组. 以目标场址 250 km 范围内的潜源为研究对象,场地一潜源的地震带均为华北平原地震带,地震活动参数 a 值为 4.2, b 值为 0.83;场地二潜源存在两个地震带,一个为龙门山地震带(a 值为 5.2, b 值为 0.716),另一个为鲜水河东淀地震带(a 值为 33.1, b 值为 0.855). 地震动衰减关系采用在中国地

震安全性评价工程中广泛使用的霍俊荣(1989)^[17]的西南地区和华北地区衰减关系.安全性评价中通过PSHA得到这两个地区50 a 2%超越概率的UHS谱.根据PSHA解耦,分别得到3种结构在场地一和场地二下该危险性水平下的平均设定地震解耦结果,见表2.根据式(1)构建对应的50 a 2%超越概率下不同目标周期点条件均值谱.图3为场地一的UHS谱以及各个周期点的CMS谱.

表 2 50 a 2%超越概率下设定地震解耦结果
Tab.2 Deaggregation results for 50 a 2% exceedance probability

场地	周期 T/s	震级 M	距离 R/km	Epsilon	S_a/g
场地一	0.4	6.5	59.0	1.8	0.592
	0.5	6.5	59.0	1.8	0.494
	1.0	6.5	59.8	1.9	0.350
	1.5	6.5	60.0	1.7	0.232
场地二	0.4	6.9	85.7	1.8	0.695
	0.5	6.9	84.5	1.9	0.599
	1.0	6.9	89.3	2.5	0.322
	1.5	6.9	91.4	1.6	0.193

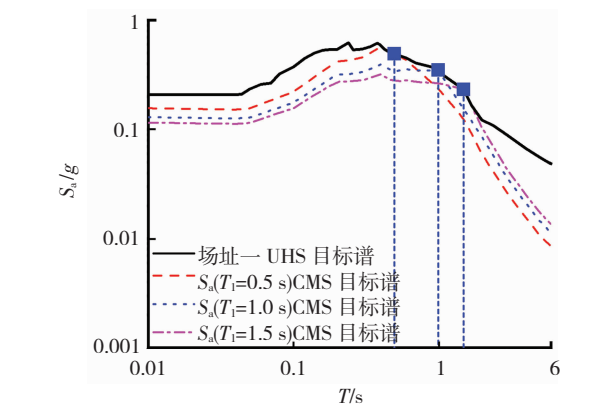


图 3 场地一的 UHS 目标谱与对应 CMS 谱
Fig.3 UHS and CMS for the first site

3.2 包络 CMS 谱

对于长周期结构来说,准确估计结构响应必须考虑高阶振型影响,而 CMS 谱无法同时兼顾多个振型周期点反应谱地震危险性相同的^[8],为了避免该问题对本文长周期算例结构的影响,参考国外学者的做法^[18],采用多周期 CMS 谱包络的方法来解决该问题.在确定参与高阶振型周期 $T_1, T_2 \cdots T_n$ 后,分别对 $S_a(T_1), S_a(T_2), S_a(T_n)$ 进行地震危险性概率

分析(PSHA)解耦以及 CMS 谱构建;最后对各个周期点条件谱之间的部分用 UHS 谱进行包络处理.这种基于多条 CMS 谱包络组合的方法在最小程度“损害”CMS 谱的谱型真实性的前提下,采用 UHS 谱进行包络处理,在较好考虑高阶振型影响的同时保证了主要考虑振型点的超越概率一致,对于考虑二到三阶振型的结构具有较好的适用性,当考虑振型过多时,其有效性仍待进一步研究.根据中国现行抗震规范,以 90% 振型参与系数作为标准来判断参与振型,对于 0.5 s 和 1.0 s 结构来说,仅考虑一阶振型即已超过或近似达到了 90%,而对于 1.5s 结构来说,需要同时考虑 $T_1 = 1.5$ s 和 $T_2 = 0.4$ s 两阶振型,以 $S_a(T_1 = 0.4$ s)重新构建 CMS 谱,得到最终两个场地的包络 CMS 谱.图 4 为场地一的包络 CMS 谱.

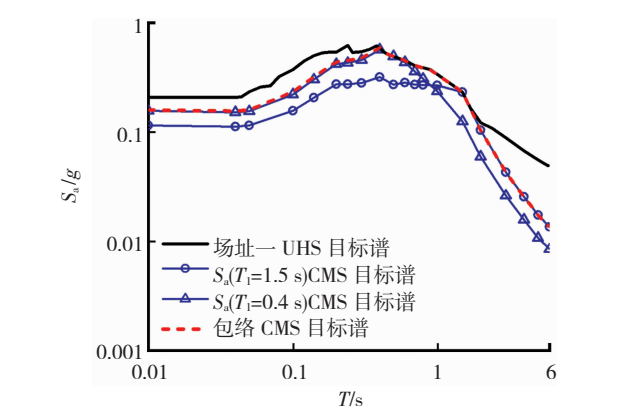


图 4 场地一包络 CMS 谱构造示意
Fig.4 Schematic diagram for envelop CMS

3.3 强震记录选取结果

在进行目标谱匹配之前,首先参照本文的设定地震解耦结果对强震记录的 M 和 R 的范围进行约束来缩小备选记录范围.在对目标周期进行线性调幅后,采用最小二乘法对 CMS 目标谱、UHS 目标谱以及规范设计谱进行匹配,逐条进行目标谱与记录反应谱的误差平方和计算,然后选取误差最小的 30 条强震记录作为最终结果,以场地一的八层结构为例,给出了 UHS 谱和 CMS 谱的匹配结果见图 5,同时作为对比,给出了 ATC63 数据集的强震记录反应谱结果以及对应的平均谱.可以看到,不同 $S_a(T_1)$

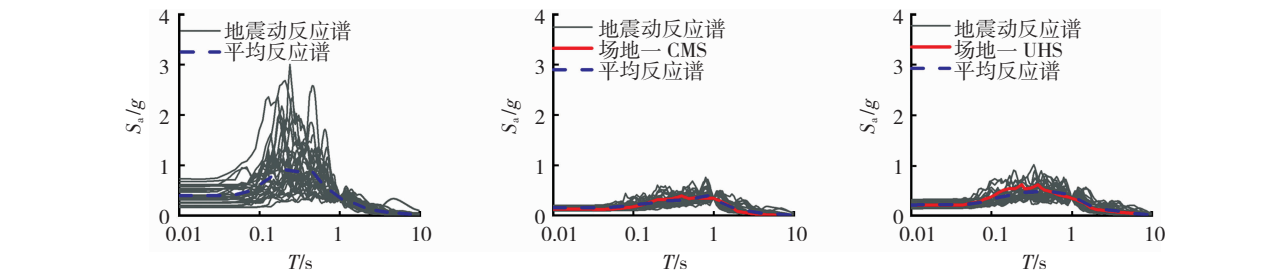


图 5 场地一八层结构不同目标谱选波结果与 ATC63 推荐记录数据集
Fig.5 Ground-motion selection records matching different target spectrum and ATC63 for 8-layer structure at the first site

周期下归一化后的 ATC63 选波数据集结果离散性明显大于通过目标谱控制选取强震记录的离散性,而 CMS 谱由于其内在谱型的合理性,得到的匹配结果不仅离散性最小,而且平均反应谱在全周期段均更加贴近目标谱^[15],而 UHS 谱由于其内在谱型的不真实或者说偏向保守,在非目标周期段与平均目标谱还是出现了一些偏差,而且记录之间的离散性也更大。

3.4 IDA 抗倒塌易损性分析结果

对三层、八层以及十五层结构在不同强震记录集下进行 IDA 计算分析.并根据式(3)和(4)计算各个工况对应的平均倒塌性态点对应 $S_a(T_1)$ 估计值 $\hat{\theta}$ 以及对数标准差 $\hat{\beta}$ 结果.以八层结构场地一工况为例,表 3 为倒塌性态点参数 $\hat{\theta}$ 和 $\hat{\beta}$.从表 3 中可知,八层结构的 $\hat{\theta}$, CMS 选波结果的估计值最小,ATC63 数据集与 UHS 数据集次之,规范谱下计算结果最大;ATC63 数据集的 $\hat{\beta}$ 显著高于其余目标谱的结果,而各目标谱控制下选波结果的 $\hat{\beta}$ 相差并不大。

通过式(5)获得 3 种结构在不同强震记录集下的抗倒塌易损性曲线,见图 6.规范谱得到的抗倒塌易损性概率曲线最陡峭,UHS 谱与 ATC63 数据集得

到的次之,CMS 谱对应的最平缓.计算不同选波工况下倒塌超越概率 $P = 0.16、0.50$ 和 0.84 处对应的 $S_a(T_1)$ 值以及本文 CMS 谱选波结果下与 ATC 数据集的相对误差(%),对于短(0.5 s)和中周期(1.0 s)结构来说,在两种场地下 CMS 谱在 $P = 0.16$ 处 $S_a(T_1)$ 的低估比例为 10% ~ 20%, $P = 0.50$ 处低估比例为 10% ~ 15%, $P = 0.84$ 处低估比例在 10% 以内.而长周期(1.5 s)结构,两个城市基于单条 CMS 谱的计算结果在 $P = 0.16、0.50$ 和 0.84 处的低估比例均超过 20%,这一比例在雅安地区算例一度达到了 45%,这显然过于低估了实际的倒塌危险性,而本文采用包络 CMS 谱来考虑两阶振型的影响,最终计算结果超越概率低估比例约为 18%、14%和 8%,与中短周期结构的低估程度相仿.这一对比案例说明,对于长周期结构来说,如果不考虑高阶振型的影响,与 ATC63 计算结果相比,

表 3 八层结构场地一的倒塌性态点参数

Tab. 3 Parameters of 8-layer structure at the first site

数据集	ATC	CMS	UHS	规范谱
$\hat{\theta}$	0.579	0.768	0.535	0.442
$\hat{\beta}$	0.414	0.340	0.389	0.335

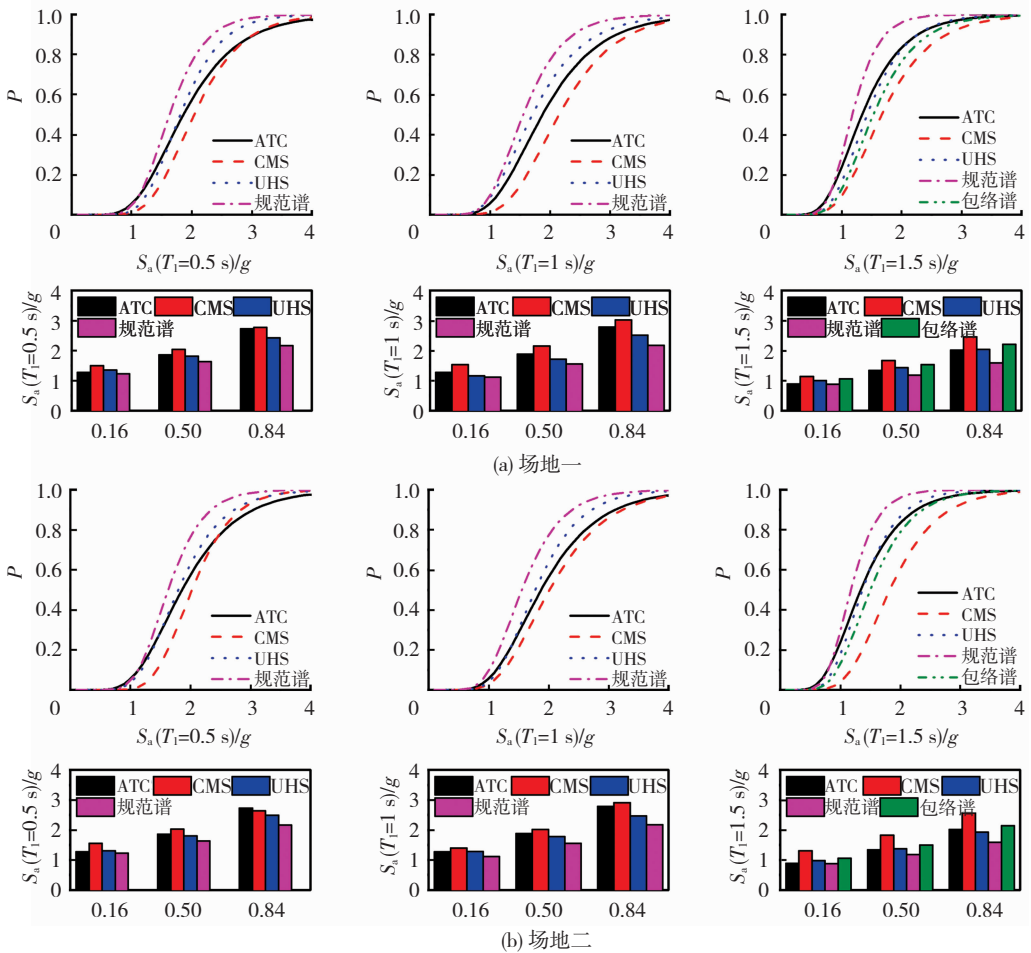


图 6 抗倒塌易损性曲线

Fig.6 Collapse fragility probability curves

单条 CMS 谱的倒塌易损性计算结果可能显著低估同倒塌的超越概率,容易造成偏危险的性态分析结果.

4 结 论

1)以中国现行地震安全性评价工作为基础进行设定地震解耦工作,进而建立 50 a 2% 超越概率对应的 CMS 谱,最后进行最小二乘法匹配得到各个幅值下的强震记录数据集并应用到后续 IDA 计算中.所得到的强震记录数据集考虑了不同目标场址的地震危险性差异.

2)以自振周期分别为 0.5、1.0 和 1.5 s 的二维平面框架为目标结构,基于中国两个城市的地震安全性评价工作构建 CMS 谱,选波结果与当地 50 a 2% 超越概率的一致概率谱以及罕遇地震规范谱进行对比后发现,由于 CMS 谱内在谱型的合理性,得到的匹配结果离散性最小且平均反应谱在整个全周期段均更加贴近目标谱. ATC63 数据集记录之间的离散性远大于通过目标谱控制的选波结果数据集.

3)对两个算例进行抗倒塌易损性分析后发现,基于规范谱得到的抗倒塌易损性概率曲线最陡峭,而基于 UHS 谱与 ATC 数据集次之,CMS 最平缓.对于短(0.5 s),中周期(1.0 s)结构来说,基于 CMS 谱的选波结果在 $P = 0.16$ 处倒塌点对应的 $S_a(T_1)$ 比 ATC63 数据集低 10% ~ 20%, $P = 0.50$ 处低 10% ~ 15%, $P = 0.84$ 处低 10% 以内.

4)对于较长周期的 1.5 s 结构,本文采用包络 CMS 谱来考虑高阶振型的影响,通过与单周期点 CMS 谱结果进行对比后发现,后者的抗倒塌易损性计算结果显著低估实际的倒塌超越概率,容易造成偏危险的性态分析结果.

综上,本文采用的基于中国 CMS 谱的强震记录选取方法是对中国现有 IDA 选波方法的补充,使地震危险性与中国结构易损性良好衔接,所得易损性分析结果因所选强震记录考虑了场址地震危险性更能体现目标结构的实际地震风险水平.

参考文献

[1] 于晓辉,吕大刚. 考虑结构不确定性的地震倒塌易损性分析[J]. 建筑结构学报,2012,33(10):9
YU Xiaohui, LÜ Dagang. Seismic collapse fragility analysis considering structural uncertainties [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10): 9

[2] 吴巧云,朱宏平,樊剑. 基于性能的钢筋混凝土框架结构地震易损性分析[J]. 工程力学,2012,29(9):120
WU Qiaoyun, ZHU Hongping, FAN Jian. Performance-based seismic fragility analysis of RC frame structures [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(9): 120

[3] 于晓辉,吕大刚,王光远. 关于概率地震需求模型的讨论[J]. 工程力学,2013,30(8):174
YU Xiaohui, LÜ Dagang, WANG Guangyuan. Discussions on

probabilistic seismic demand models,2013,30(8):174

[4] 施炜,叶列平,陆新征,等. 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):42
SHI Wei, YE Lieping, LU Xinzhen, et al. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(3): 42

[5] 马海滨,卓卫东,林杰,等. 基于云图法的规则桥梁概率地震需求模型[J]. 工程力学,2016,33(增刊1):121
MA Haibin, ZHUO Weidong, LIN Jie, et al. A probabilistic seismic demand model for regular highway bridges by cloud approach [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(S1): 121

[6] 王敏,朱爱萍,丁袁媛,等. 考虑地面运动不确定性的地面运动记录选择方法研究[J]. 土木工程学报,2016(9):43
WANG Min, ZHU Aiping, DING Yuanyuan, et al. Study on method for ground motion selection considering uncertainties of ground motions [J]. China Civil Engineering Journal, 2016(9): 43. DOI:10.15951/j. tmgxb. 2016. 09. 005

[7] BAKER J W. Conditional mean spectrum: tool for ground-motion selection [J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(3): 323. DOI: 10.1061/(ASCE)ST. 1943-541X. 0000215

[8] KWONG N S, CHOPRA A K. A generalized conditional mean spectrum and its application for intensity-based assessments of seismic demands [J]. Earthquake Spectra, 2016, 33(1): 124. DOI: 10.1193/040416EQS050M

[9] CHANDRAMOHAN R, BAKER J W, DEIERLEIN G G. Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records [J]. Earthquake Spectra, 2016, 32(2): 936

[10] 陈波. 结构非线性动力分析中地震动记录的选择和调整方法研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所,2013:112
CHEN Bo. Ground motion selection and modification methods for performing nonlinear dynamic analysis of buildings [D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2013: 112

[11] 冀昆,温睿智,任叶飞. 中国地震安全性评价中天然强震记录选取[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(12):184
JI Kun, WEN Ruizhi, REN Yefei. Real strong ground-motion selection for Chinese seismic safety evaluation work [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 184. DOI: 10.11918/j. issn. 0367-6234. 2016. 12. 000

[12] EADS L, MIRANDA E, KRAWINKLER H, et al. An efficient method for estimating the collapse risk of structures in seismic regions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(1): 25

[13] VAMVATSIKOS D, CORNELL CA. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 494

[14] BAKER J W. Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis [J]. Earthquake Spectra, 2015, 31(1): 582. DOI: 10.1193/021113EQS025M

[15] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京: 建筑工业出版社,2006:162
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 162

[16] 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2011:55
Technical specification for concrete structures of tall building: JGJ 3—2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 55

[17] 霍俊荣. 近场强地面运动衰减规律的研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所,1989:206
HUO Junrong. Study on the near-field strong ground motion attenuation relationship [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 1989: 206

[18] CARLTON B, ABRAHAMSON N. Issues and approaches for implementing conditional mean spectra in practice [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(1): 504. DOI: 10.1785/0120130129