

基于试验的斜交网格-核心筒结构概率地震易损性分析

吴 迪¹, 熊 焱²

(1. 广州大学工程抗震研究中心, 广州 510405; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510640)

摘 要: 利用外部网状斜交框架和内部钢筋混凝土核心筒, 斜交网格-核心筒结构形成具有较强抗侧刚度的筒中筒结构形式, 被广泛应用于超高层建筑结构。采用模拟地震振动台试验获得不同地震动水准下模型结构的地震动响应结果。在结构抗震可靠度的经验和计算分析方法基础上, 分析不同水准下结构发生各级破坏的概率, 研究斜交网格-核心筒结构体系的整体抗震性能。最后, 由振动台试验结果显示斜交网格结构构件的截面尺寸改变所在楼层的斜柱先于底部楼层的斜柱发生破坏。提出基于模型结构的振动台试验的概率地震易损性分析方法, 对不同地震设防水准下原型结构的破坏概率进行研究, 获得斜交网格-核心筒原型结构的概率地震易损性水平。

关键词: 网格框架-核心筒; 振动台试验; 地震分析; 易损性; 高层建筑抗震

中图分类号: TU318.1; TB114.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.08.0631

TEST-BASED PROBABILISTIC SEISMIC FRAGILITY ANALYSIS OF DIAGRID-CORE TUBE STRUCTURES

WU Di¹, XIONG Yan²

(1. Earthquake Engineering Research & Test Center, Guangzhou University, Guangzhou, 510405, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: By utilizing an external diagrid frame and an inner reinforced concrete core-tube, the diagrid-core tube structure forms a tube-tube structure with strong lateral stiffness. This structure form has been widely used in super high rise building structures. The seismic response results of the model structure with different seismic fortification levels have been obtained by the simulated earthquake shaking table test. Based on the empirical and analytical methods for the seismic reliability analysis of structures, the failure probabilities of the structure with different seismic fortification levels were analyzed, and the seismic performance and reliability of the diagrid-core tube structure system are studied. The shaking table test results show that the inclined columns in the layer where the section sizes of the structural members of the diagrid are changed were damaged before the inclined columns in the substructure. Furthermore, a shaking table test-based probabilistic seismic fragility analysis method was put forward. The damage probabilities of the prototype structure under different seismic fortification levels have been studied. The probabilistic seismic fragility level of the diagrid-core tube prototype structure system is obtained.

Key words: diagonal frame-core tube; shaking table test; seismic risk; fragility; aseismic of high-rise building

收稿日期: 2017-08-23; 修改日期: 2018-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778160, 51108105); 广东省教育厅特色创新项目(2016KTSCX101); 广州市科技计划项目(201707010258); 广州市番禺区珠江科技新星专项项目(2013-专 15-3.05); 国家重点研发计划项目(2017YFC0703600, 2016YFC0701500)

通讯作者: 熊焱(1978—), 女, 江西人, 副教授, 博士, 硕导, 从事结构防灾减灾研究(E-mail: xyan@scut.edu.cn).

作者简介: 吴迪(1978—), 男, 江西人, 副研究员, 博士, 硕导, 从事结构防灾减灾研究(E-mail: 11795234@qq.com).

在摩天大楼时代高层建筑结构的历史与其建筑风格的历史相似^[1-2]。高层建筑结构技术的发展具有阶段性,主要阶段的高层建筑结构形式包括刚性框架、筒体、核心筒-伸臂、斜交网格-核心筒等。斜交网格-核心筒与普通框架-核心筒结构体系相似之处在于它们都由核心筒与外围的框架柱组成,特殊之处在于斜交网格-核心筒结构体系的外围框架为网状斜柱,与内部核心筒共同形成类似于筒中筒的结构体系。近年来,在斜交网格-核心筒结构体系的抗震性能分析方面已经取得了一定研究成果^[3-5]。主要研究认为在水平荷载作用下,不同于普通框架结构中竖向构件主要承受弯矩,斜交网格结构中斜柱主要承受轴力。因此,相比于普通框架-核心筒结构体系,斜交网格-核心筒结构体系具有较大的水平抗侧刚度,能有效减小在地震作用下建筑结构的水平变形。

最早采用斜交网格结构形式的高层建筑是 1963 年建于美国匹兹堡 13 层高的 IBM 大楼^[6],如图 1 所示,在此后还有赫斯特大楼和新世贸中心等。21 世纪初以来,我国已有大量高层建筑采用斜交网格结构体系,例如 450 m 高的广州电视塔^[7]、103 层 432 m 高的广州西塔^[8]、77 层 338 m 高位于镇江的苏宁广场,45 层 198 m 高位于大连的中国石油大厦^[9]等。

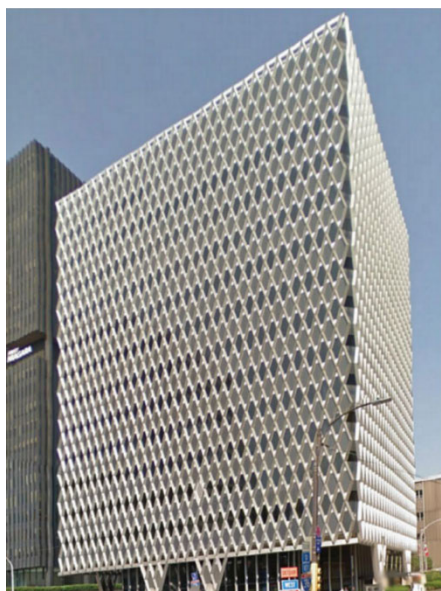


图 1 IBM 大楼外观^[6]

Fig.1 Appearance of IBM building^[6]

建筑结构在使用期限内的抗震可靠度主要指该抗震结构在使用期限内因为地震作用而发生破坏的概率。易损性曲线和破坏概率矩阵可以准确的反映不同地震动水平条件下结构发生破坏的概率

水平,易损性曲线求解方法主要包括经验方法^[10-11]、计算分析方法^[12-14]和试算法^[15]。

目前,根据有限元方法建立结构动力分析模型研究复杂高层结构的整体抗震可靠度方面已经取得了一定研究积累^[16-17]。吕西林等^[18]基于有限元程序 ABAQUS 对某复杂超限高层结构进行弹塑性分析,根据增量动力分析方法对该高层建筑结构进行抗震性能评估,分别获得 3 种地震水准下高层结构超越不同极限状态的地震破坏概率。卢啸^[19]基于超高巨柱-核心筒-伸臂结构的 MSC. Marc 2007 有限元分析模型,研究特大地震作用下结构的倒塌灾变过程模拟方法,分析不同地震动记录对超高层建筑结构倒塌概率的影响,根据不同地震动强度指标与超高层结构抗震设计控制指标的相关性、离散度及其随结构基本周期的变化规律,提出了适用于超高层抗震分析的地震动强度指标。张令心等^[20]提出基于增量动力分析的超高层结构的地震易损性分析方法,采用 SATWE 软件以某 50 层的超高层混合结构为算例,依据不同强度地震作用下各极限状态情况下结构地震易损性分析结果,对该结构的抗震性能进行评价。

目前,对于超过规范规定的超限高层建筑结构,一般采取模型模拟地震振动台试验研究其抗震性能和薄弱位置。基于模拟地震振动台试验结果研究结构概率地震易损性方面的论著较少。因此,根据某斜交网格-核心筒建筑结构模型的模拟地震振动台试验,利用不同地震水准下所测量和观察得到模型结构的地震响应和震害情况,研究在不同地震水准下该建筑结构发生破坏的概率,通过试验和理论分析相结合的方法揭示网格框架-核心筒结构整体的抗震性能和概率地震易损性。

1 基于试验的结构概率地震易损性研究

在某一地震荷载水平(IM)条件下,地震易损性可表示为结构的地震需求(D)超越结构抗震能力(C)的概率($P_{C|IM}$)^[12,21],因此该易损性是在一定地震荷载水平下的条件概率,可表示为下式:

$$P_{C|IM}=P(D>C | IM) \quad (1)$$

获得结构的地震需求首先需要确定结构的需求模型。在结构概率地震需求分析中,通常将非线性的需求估计过程称为“云分析”过程。通过统计回归可得地震荷载水平与地震需求的模型关系,从

而确定结构的概率地震需求模型参数。Cornell 等^[22]提出结构地震需求模型的参数估计(\hat{D})可表示为:

$$\hat{D} = a \cdot IM^b \quad (2)$$

式中, a 和 b 是结构的概率地震需求模型的参数。本研究中结构的地震需求参数采用最大层间位移角, 地震荷载水平采用地震动加速度反应谱峰值。

不同建筑结构形式的抗震性能状态限值并不一致, 对于框架-核心筒结构体系而言, 根据太平洋地震工程研究中心^[23]和 Wong^[24]关于钢筋混凝土核心筒结构最大层间位移角的研究结论, 将结构抗震能力按照结构抗震性能可划分为五种性能状态: 正常运行(FO)、立即使用(IO)、生命安全(LS)、防止倒塌(CP)和倒塌(CL)。五种结构性能状态所对应最大层间位移角的限值具体见表 1。

表 1 性能状态的层间位移限值^[24]
Table 1 Drift limits of performance states^[24]

性能状态	简写	结构破坏	层间位移角/(%)
正常运行	FO	轻微破坏: 结构和非结构构件发生轻微破坏, 地震后结构仍可以继续使用。	0~0.2
立即使用	IO	轻度破坏: 主体结构和非结构构件的破坏微不足道, 大部分功能可以立即使用, 对一些非重要构件进行维修。地震后结构安全可以继续使用。主要的功能被保护, 不必要的功能可被中断。	0.2~0.5
生命安全	LS	中等破坏: 结构属于轻度至中度破坏, 非结构构件属于中度到严重破坏, 建筑系统、功能等受到保护, 不受损坏。生命安全受保护, 且结构发生破坏但仍然稳定。	0.5~1.5
防止倒塌	CP	严重破坏: 房屋结构已经进入弹塑性阶段, 结构发生严重破坏, 但未达到结构倒塌的状态。	1.5~2.5
倒塌	CL	倒塌: 结构系统的主要部分或者结构整体发生倒塌。	2.5 以上

结构抗震可靠度评价包括两类基本的不确定性, 偶然(或本质)(Aleatoric)和认知(或知识)(Epistemic)不确定性。偶然不确定性源于其固有的随机因素造成的, 并且是无法重复的。与此不同的是, 认知不确定性是源于系统分析的假设和数据的限制。而在基于性能的抗震可靠度分析方法中, 地震强度需求、结构的地震需求和结构能力的不确定性都需要考虑^[25]。总之, 偶然的 uncertainty 一般是由于客观的随机性产生的, 而认知不确定性一般是由于主观的认识水平产生的。

Ellingwood 等^[12]重点研究了建筑结构抗震性能

评估方法中结构随机性和模型不确定性等因素的影响, 根据正态累计分布函数将地震易损性曲线表示为:

$$P_{C|IM} = 1 - \Phi \left(\frac{\ln \hat{C} - \ln(a \cdot IM^b)}{\sqrt{\beta_{D|IM}^2 + \beta_C^2 + \beta_M^2}} \right) \quad (3)$$

式中: $\beta_{D|IM}$ 和 β_C 分别表示在一定地震荷载水平条件下, 结构地震需求和抗震能力的不确定性, 属于偶然的不确定性; \hat{C} 表示结构抗震能力的中值; β_M 表示模型偏差, 属于认知不确定性^[26]。

2 结构模型试验与概率地震易损性分析

2.1 模型设计和制作

某超高层斜交网格-核心筒建筑结构, 高度为 162 m, 平面尺寸 45 m×45 m 呈正方形, 建筑为地上 33 层(结构 36 层)。该结构主要由核心筒和周边棱形钢斜交网格两部分组成, 结构系统包括菱形斜交网格支撑的巨型框架和钢筋混凝土核心筒墙。幕墙和结构楼板自斜交网格系统向内偏移。结构的斜交网格和角柱钢材等级分别为 Q420 和 Q390, 其中钢结构斜柱的底部到顶部分别采用的截面尺寸为方钢管 450 mm×800 mm×70 mm~425 mm×425 mm×70 mm, 顶部斜柱采用的截面尺寸为 H 型钢 350 mm×425 mm×25 mm×20 mm。限于篇幅原因其它结构构件的尺寸参见相应模拟地震振动台试验文献^[27]。

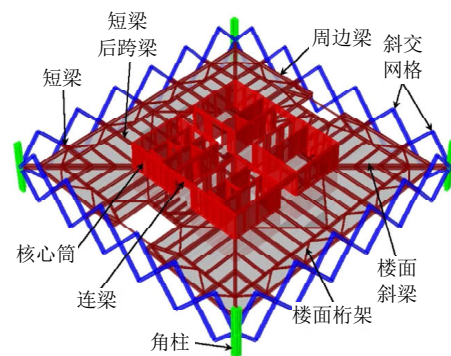


图 2 结构标准层示意图

Fig.2 Schematic drawing of structure standard story

该建筑的结构标准层示意图如图 2 所示。斜交网格与周边水平拉梁偏移, 短梁不参与周边框架系统, 在距离外墙约 1.5 m 处设置钢结构斜交网格。周边斜交网格刚度较大, 结构的主要抗侧系统包括斜交网格和钢筋混凝土核心筒剪力墙。结构周边斜交网格与剪力墙的剪力由楼板和连接斜交网格角

部与核心筒角部的斜撑传递, 钢结构边梁把“箍”的水平轴向力分量从斜交网格的一个角部传递到相反的角部, 斜交网格节点的钢箱梁将网格中的水平剪力传递给楼板, 在各层楼板周边设置水平桁架以承受网格与边梁间偏心产生的力偶。结构的第 4 层~5 层、第 6 层~9 层、第 11 层~12 层、第 28 层~29 层是斜交网格的斜柱构件截面尺寸改变楼层位置。

根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3—2010)^[28]条文规定, 该建筑属特殊类型超限高层建筑。由试验模型结构模拟考虑刚度相似关系, 兼顾强度相似^[29]。试验确定模型与原型长度相似比为 1:20、弹性模量相似比为 1:3.5、加速度相似比为 1:0.25^[27]。在应力-应变关系方面模型尽可能与原材料相似, 选用微粒混凝土模拟混凝土, 镀锌铁丝模拟钢筋, 型钢模拟周边斜交网格钢框架。试验中混凝土构件的尺寸根据实际结构的尺寸按相似关系折算, 混凝土构件配筋设计时, 对正截面承载能力的控制, 按照抗弯能力等效的原则进行设计; 对斜截面承载能力的控制, 按照抗剪能力等效的原则进行设计; 钢结构构件的尺寸按照刚度等效的原则进行设计。根据振动台承载能力, 确定质量相似比为 1:5600, 增加一定的人工质量以满足质量相似要求, 模型与原型时间相似比为 0.11。由底层至顶层模型核心筒采用微粒混凝土强度等级依次为 M12、M10、M8, 楼板的强度等级为 M6, 模型所用钢材的强度等级为 Q235。该模型结构加工制作完成后的外观如图 3 所示。



图 3 试验模型

Fig.3 Test model

2.2 试验测量方案与地震动参数

本试验共使用了 67 个压电式加速度传感器测量模型结构的动力特性和动力响应, 传感器具体的布置在内筒的中心与外筒的角部位置, 每隔 4 层布

置三向加速度传感器, 测试结构各层水平加速度和扭转响应。关键构件位置共布置 12 个应变测点, 测量模型结构在地震作用下关键部位, 例如核心筒、钢框架角柱、楼面斜梁的受力情况。模型进行每个工况模拟地震振动台试验之前, 采用白噪声振动测量模型结构的动力特性。

根据该工程场地的地震安全性评价报告可确定该地区的抗震设防为 7 度, 建筑场地类别为 II 类, 场地卓越周期为 0.35 s, 50 年超越概率 63%(多遇地震)时的加速度峰值 41 cm/s^2 , 50 年超越概率 10%(设防烈度地震)时加速度峰值 119 cm/s^2 , 50 年超越概率 2%~3%(罕遇地震)时加速度峰值 216 cm/s^2 。试验采用地震安评报告所提供的一组人工地震波(人工波 1)以及两组天然波地震记录(天然波 4、天然波 5)。考虑到罕遇地震后结构进入弹塑性阶段, 避免强震对建筑结构的损伤累积效应, 因此罕遇地震试验时采用响应最大的地震波。不同地震水准下所采用地震记录(原型) x 方向的加速度反应谱曲线如图 4 所示。

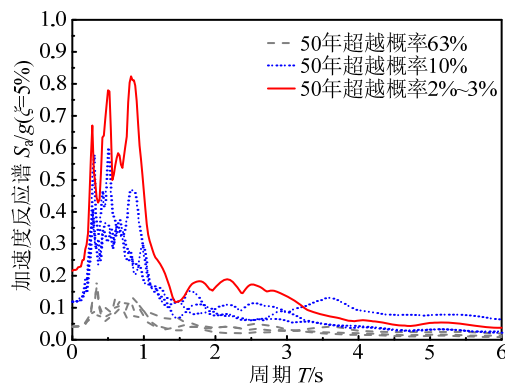


图 4 加速度反应谱

Fig.4 Acceleration response spectrum

根据比例相似关系换算得模型结构多遇地震水准时地震动加速度峰值为 164 cm/s^2 、设防烈度地震水准时的加速度峰值为 476 cm/s^2 、罕遇地震水准时加速度峰值为 864 cm/s^2 。

2.3 模型结构的动力特征与响应

在模型结构基底输入有限带宽的白噪声激励振动, 并根据模型结构的响应输出信号进行功率谱密度函数分析得到结构的模态参数。对模型结构各测点加速度响应信号进行模态分析表明: 1) 模型结构两个方向上基本对称, 模型结构 x 、 y 向频率与设计计算结果一致。2) 模型结构的地震响应位移以平动为主, 扭转效应不明显。3) 在多遇地震作用后, 模型结构振型变化不大, 前 5 阶频率平均下降 1.36%, 可认为在遭受多遇地震之后模型结构处于

弹性工作状态。设防烈度地震后模型结构前 5 阶频率较震前相比平均下降了 2.92%。罕遇地震后模型结构前 5 阶频率较震前相比平均下降了 3.83%。说明模型随地震动输入强度的增加,模型结构的自振周期逐渐延长。

根据所布置加速度传感器的时程响应结果,通过数值积分得到各测点的位移响应时程,由各测点的响应时程得到模型结构位移响应的最大值。试验过程中多遇地震和设防烈度水准地震分别采用了 3 组地震记录,罕遇地震水准仅采用 1 组设防烈度地震作用响应最大地震记录。图 5 为模型结构在单向多遇、设防烈度、罕遇地震水准作用下楼层层间位移角包络图。

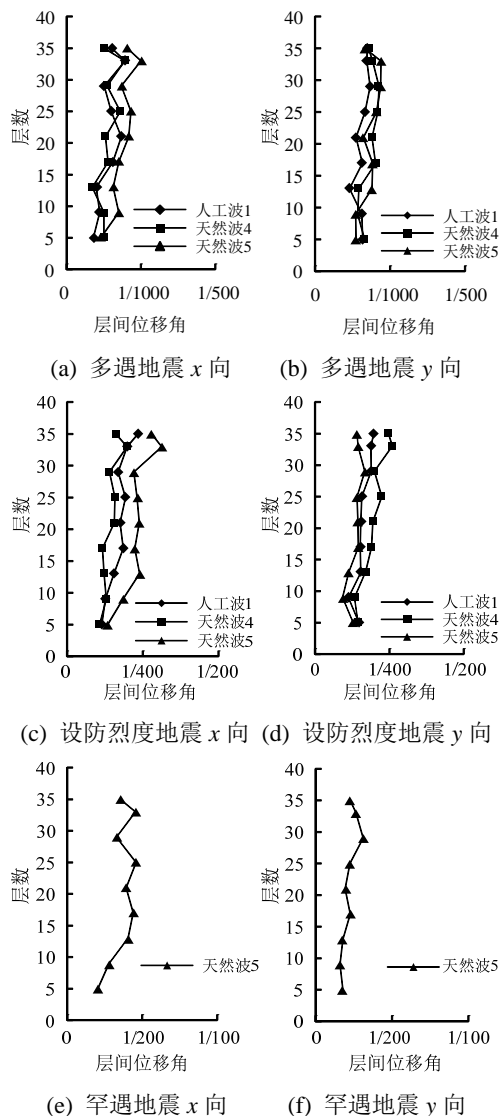


图 5 层间位移角包络图

Fig.5 Envelope diagram of story drift angle

多遇地震作用下, x 向地震动作用下平均最大层间位移出现在第 29 层~33 层; y 向地震作用下平

均最大层间位移出现在第 25 层~29 层,两个方向上的层间位移角均小于规范的限值 1/765。设防烈度地震作用下, x 向地震作用下最大层间位移出现在第 29 层~33 层。 y 向地震作用下平均最大层间位移出现在第 29 层~33 层。罕遇地震作用下, x 向地震作用下最大层间位移出现在第 21 层~25 层; y 向作用下最大层间位移出现在第 29 层~33 层,两个方向上的层间位移角均小于规范的限值 1/100,试验表明模型结构满足我国抗震设防标准。不同烈度地震作用下楼层的最大层间位移角出现位置和沿高度的变化趋势基本一致,模型结构的最大层间位移角均主要出现在楼层较高且结构构件截面尺寸改变的楼层位置,并且在这一位置区域结构的破坏情况也比较显著。

2.4 结构的地震破坏

经过对模型结构破坏情况观察可知,结构模型经历了 7 度多遇地震模拟试验后,模型结构整体振幅较小,主体结构和非结构构件的破坏比较轻微,结构基本安全可以继续使用。设防烈度地震后,模型结构属于轻度至中度破坏,结构发生局部破坏但整体仍然保持稳定。罕遇地震后,模型结构已经进入塑性阶段,试验过程中结构模型出现明显破坏,但未达到结构倒塌的状态。

试验结束后,模型结构核心筒剪力墙局部出现裂缝及部分主要结构构件出现严重破坏,模型结构的实际破坏情况如图 6 所示。在模型结构外筒的钢斜交网格,如图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)所示,在模型结构的 11 层、12 层、28 层、30 层等多处斜柱出现不同程度的受压屈曲损伤或破坏现象,主要是由于模型结构在以上楼层位置处斜柱截面尺寸有所改变。在混凝土核心筒的破坏方面,如图 6(d)所示,较多楼层核心筒剪力墙底部出现较多的水平裂缝,且核心筒剪力墙连梁发生局部破坏。同时,多个楼层连接的内筒与外部斜交网格的工字钢短梁、斜梁和楼板的接处出现破坏现象。



(a) 11 层~12 层斜柱破坏

(b) 28 层斜柱破坏



(c) 30 层斜柱破坏 (d) 28 层剪力墙水平裂缝

图 6 模型结构破坏情况

Fig.6 Damage to structure model

3 原型结构的概率地震易损性分析

根据抗震设防烈度 7 度及 II 类场地按照 50 年 PE 2%~3%、10% 和 63% 的地震水准情况下所提供的地震动参数。由于原型结构与模型结构的层间位移角的相似比例为 1, 可根据模拟地震振动台试验所获得的不同地震设防水平下模型结构的层间位移角确定原型结构相应楼层的层间位移角。

本结构模型 x 方向和 y 方向基本对称, 因此以下仅对 x 方向输入地震动作用下结构的概率地震需求模型进行分析。参照式(2)回归可得地震荷载水平与结构的地震需求的关系, 根据试验分析结果建立原型结构的概率地震需求模型如图 7 所示。

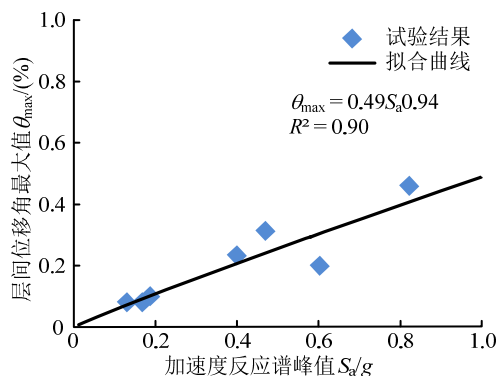


图 7 原型结构的地震需求

Fig.7 Seismic demand on prototype structure

根据 Cornell 等^[22]和吕大刚等^[13]关于结构地震需求不确定性的定义和推导, 该结构地震需求的不确定性(离散)可表示为:

$$\beta_{DIM} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\ln D_i - \ln \hat{D})^2}{N - df}} \quad (4)$$

式中: N 表示样本数; df 表示自由度。

采用以上试验分析结果确定结构的试验样本, 根据式(4)获得结构地震需求的不确定性 β_{DIM} 为 0.21。根据之前相关研究文献[24—25]提出的建筑结

构抗震性能水平, 选取地震作用下结构的性能水平对应的 IO、LS、CP、CL 状态层间位移角限值。由于某一个试验结构而言其抗震能力是确定的, 但是为了考虑结构能力不确定性对结构概率地震易损性水平的影响, 参考已有文献[26]研究成果, 原型结构抗震能力不确定性 β_C 取 0.25。并且假设模型结构的计算结果与实际响应之间存在 $\pm 30\%$ 以内误差, 那么置信度为 90% 时 β_M 取 0.2^[30-32]。根据以上参数可分别建立不同地震荷载水平下原型结构的概率地震易损性分析结果如图 8 所示。

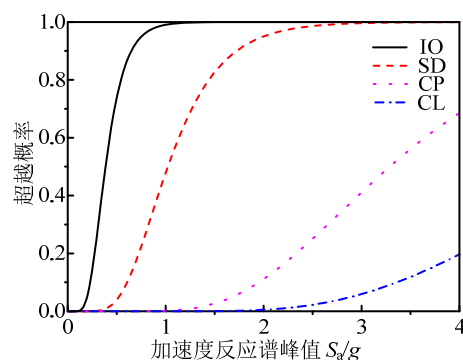


图 8 原型结构的易损性曲线

Fig.8 Seismic fragility curves of prototype structure

中国抗震规范地震影响系数确定不同烈度下多遇、设防、罕遇设防水准地震动反应谱峰值分别为 0.08 g、0.23 g、0.5 g。根据图 8 可知在设防烈度地震作用下, 模型结构发生轻度破坏的概率为 10.24%; 在 7 度罕遇地震下, 模型结构发生轻度破坏的概率为 73.85%, 发生中等破坏的概率为 3.97%, 以上分析结果说明在不同设防地震水准下原型结构整体保持了较好的抗震性能。

4 结论

采用本文提出的基于模型结构的振动台试验的概率地震易损性分析方法, 对不同地震设防水准下原型结构的概率地震易损性水平开展研究, 主要结论如下:

(1) 在地震作用下, 斜交网格-核心筒结构振动台试验的破坏情况主要为外部斜交网格构件发生屈服、核心筒剪力墙连梁发生破坏和楼层底部出现水平裂缝, 这一试验结果与相关文献[5]采用位移控制的拟静力试验和有限元分析所得到的研究结论基本一致。

(2) 在地震作用下斜交网格外筒的失效路径方面, 振动台试验与拟静力试验结果存在一定差异, 拟静力试验分析结果^[5]显示斜交网格中斜柱的塑性

发展和破坏由底部区域向上部楼层发展,而振动台试验结果显示在结构构件截面尺寸改变楼层位置处斜交网格的斜柱有可能先于底部斜柱发生破坏。

(3) 在罕遇地震作用下斜交网格的斜柱在试验中出现受压屈曲破坏,斜柱屈服破坏机制对地震作用下斜交网格结构的破坏过程和失效模式产生显著的影响,从而影响整个结构的抗震性能。

(4) 根据模型结构的模拟振动试验结果建立原型结构的地震概率需求模型,分析不同地震设防水准下结构发生各级破坏的概率,初步揭示了斜交网格-核心筒原型结构的概率地震易损性与风险水平。

参考文献:

- [1] Ali M M. Evolution of concrete skyscrapers: from Ingalls to Jin mao [J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2001, 1(1): 2—14.
- [2] Huxtable A L. The tall building artistically reconsidered: the search for a skyscraper style [J]. Architectural Record (U.S.A.), 1984, 172(1): 63—79.
- [3] Ali M M, Moon K S. Structural developments in tall buildings: current trends and future prospects [J]. Architectural Science Review, 2007, 50(3): 205—223.
- [4] 韩小雷, 唐剑秋, 黄艺燕, 等. 钢管混凝土巨型斜交网格筒体结构非线性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2009, 29(4): 77—84.
Han Xiaolei, Tang Jianqiu, Huang Yiyan, et al. Nonlinear analysis of huge oblique crossing lattice structure with concrete filled steel tube [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2009, 29(4): 77—84. (in Chinese)
- [5] 滕军, 郭伟亮, 张浩, 等. 斜交网格筒-核心筒结构地震非线性性能研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(8): 90—96.
Teng Jun, Guo Weiliang, Zhang Hao, et al. Study of the nonlinear seismic performance of diagrid tube-core tube structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(8): 90—96. (in Chinese)
- [6] John S, Leslie R. IBM Building [R]. USA: RIGIDIZED METALS, 2015: 1—3.
- [7] 黄襄云, 周福霖, 金建敏, 等. 广州新电视塔结构模型振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43 (8): 21—29.
Huang Xiangyun, Zhou Fulin, Jin Jianmin, et al. Shaking table test of Guangzhou new TV tower [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(8): 21—29. (in Chinese)
- [8] 方小丹, 韦宏, 江毅, 等. 广州西塔结构抗震设计[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(1): 47—55.
Fang Xiaodan, Wei Hong, Jiang Yi, et al. Seismic design of the Guangzhou West Tower [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(1): 47—55. (in Chinese)
- [9] 张小冬, 刘界鹏. 大连中国石油大厦结构方案优化设计[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(增刊 1): 27—33.
Zhang Xiaodong, Liu Jiepeng. Optimum design on Dalian China petrol tower [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(Suppl1): 27—33. (in Chinese)
- [10] Rossetto T. Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data [J]. Engineering Structures, 2003, 25(10): 1241—1263.
- [11] Shinozuka M, Feng M Q, Lee J, et al. Statistical analysis of fragility curves [J]. Journal of engineering mechanics, 2000, 126(12): 1224—1231.
- [12] Ellingwood B R, Celik O C, Kinali K. Fragility assessment of building structural systems in Mid-America [J]. Earthquake Engineering Structural Dynamics, 2007, 36(13): 1935—1952.
- [13] 吕大刚, 于晓辉, 潘峰, 等. 基于改进云图法的结构概率地震需求分析[J]. 世界地震工程, 2010, 26(1): 7—15.
Lu Dagang, Yu Xiaohui, Pan Feng, et al. Probabilistic seismic demand analysis of structures based on an improved cloud method [J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(1): 7—15. (in Chinese)
- [14] Wu Di, Tesfamariam S, Stiemer S F, et al. Comparison of seismic performance of a RC frame building before and after the Wenchuan earthquake in Sichuan province [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2013, 29(1): 1—7.
- [15] Applied Technology Council (ATC-13). Earthquake damage evaluation data for California [R]. Redwood City, California: Applied Technology, 1985: 1—492.
- [16] 叶列平, 陆新征, 马千里, 等. 混凝土结构抗震非线性分析模型, 方法及算例[J]. 工程力学, 2006, 23(增刊 2): 131—140.
Ye Lieping, Lu Xinzheng, Ma Qianli, et al. Seismic nonlinear analytical models, methods and examples for concrete structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(Suppl 2): 131—140. (in Chinese)
- [17] 陆新征, 林旭川, 叶列平, 等. 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, et al. Numerical Models for the Progressive Collapse of High-rise Buildings due to Earthquake [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(11): 64—70. (in Chinese)
- [18] 吕西林, 苏宁粉, 周颖. 复杂高层结构基于增量动力分析法的地震易损性分析[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(5): 19—25.
Lu Xilin, Su Ningfen, Zhou Ying. IDA-based seismic fragility analysis of a complex high-rise structure [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(5): 19—25. (in Chinese)

(参考文献[19]—[32]转第 171 页)

- Elsevier Science, 2017: 19—41.
- [33] 曹胜涛, 李志山, 刘春明, 等. 大规模建筑结构非线性显式动力分析的振型阻尼实现[J]. 建筑结构, 2016, 46(1): 30—37.
- Cao Shengtao, Li Zhishan, Liu Chunming, et al. On the applying modal damping in nonlinear explicit dynamic analysis of large-scale structure [J]. Building Structure, 2016, 2016(1): 30—37. (in Chinese)
- [34] Belytschko T, Bachrach W E. Efficient implementation of quadrilaterals with high coarse-mesh accuracy [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1986, 54(3): 279—301.
- [35] Belytschko T, Stolarski H, Carpenter N. A C^0 triangular plate element with one-point quadrature [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1984, 20(5): 787—802.
- [36] Belytschko T, Wong B L, Chiang H Y. Advances in one-point quadrature shell elements [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1992, 96(1): 93—107.
- [37] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892—900.
- [38] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete [J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299—326.
- [39] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- GB 50010—2010, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- (上接第 161 页)
- [19] 卢啸. 超高巨柱-核心筒-伸臂结构地震灾变及抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- Lu Xiao. Study on the collapse simulation and seismic performance of super tall mega column-core tube-outrigger buildings [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [20] 张令心, 徐梓洋, 刘洁平, 等. 基于增量动力分析的超高层混合结构地震易损性分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(9): 19—25.
- Zhang Lingxin, Xu Ziyang, Liu Jieping, et al. Seismic vulnerability analysis of super high-rise hybrid structures based on incremental dynamic analysis [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(9): 19—25. (in Chinese)
- [21] Singhal A, Kiremidjian A S. Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(12): 1459—1467.
- [22] Cornell C A, Jalayer F, Hamburger R O, et al. Probabilistic basis for 2000 SAC federal emergency management agency steel moment frame guidelines [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(4): 526—533.
- [23] Ghobarah A. On drift limits associated with different damage levels [C]// Performance-Based Seismic Design Concepts and Implementation: Proceedings of the International Workshop, Bled, Slovenia: PEER Press, 2004, 28: 321—332.
- [24] Wong S. Seismic performance of reinforced concrete wall structures under high axial load with particular application to low-to moderate seismic regions [D]. Hong Kong: The Thesis of Master of Philosophy at University of Hong Kong, 2005: 1—249.
- [25] Wen Y K, Ellingwood B R, Bracci J M. Vulnerability function framework for consequence-based engineering [R]. USA: MAE Center Report, 2004: 1—101.
- [26] Celik O C, Ellingwood B R. Seismic risk assessment of gravity load designed reinforced concrete frames subjected to Mid-America ground motions [J]. Journal of structural engineering, 2009, 135(4): 414—424.
- [27] Wu D, Xiong Y. Tests Study of a 1:20 Scale Steel-concrete Hybrid Structure [J]. Procedia Engineering, 2017, 210(1): 441—448.
- [28] JGJ 3—2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 建筑工业出版社, 2011.
- JGJ 3—2010, Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [29] 周颖, 吕西林. 建筑结构振动台模型试验方法与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- Zhou Ying, Lu Xilin. Method and technology for shaking table model test of building structure [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [30] Wen Y K, Ellingwood B R, Veneziano D, et al. Uncertainty modeling in earthquake engineering[R]. USA: MAE center project FD-2 report, 2003: 1—113.
- [31] 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研究[J]. 工程力学, 2011, 28(3): 41—48.
- Shi Wei, Ye Lieping, Lu Xinzheng, et al. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 41—48. (in Chinese)
- [32] 于晓辉, 吕大刚, 范峰. 基于易损性指数的钢筋混凝土框架结构地震损伤评估[J]. 工程力学, 2017, 34(1): 69—75.
- Yu Xiaohui, Lu Dagang, Fan Feng. Seismic damage assessment of RC frame structures based on vulnerability index [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(1): 69—75. (in Chinese)