

[文章编号] 1002-8412(2011)06-0001-07

三维地震动输入对 IDA 倒塌易损性分析的影响

陆新征,施 炜,张万开,叶列平,马玉虎

(清华大学 土木工程系,清华大学 土木工程安全与耐久性教育部重点实验室,北京 100084)

[摘 要] 地震作用下建筑结构抗倒塌能力是性能化抗震设计的核心目标,基于 IDA 的倒塌易损性分析能够定量评价结构的抗地震倒塌安全性。本文通过一个 8 层 RC 框架结构和一个 20 层 RC 框架-核心筒结构的算例,指出仅考虑地震动单一水平分量的 IDA 分析会高估结构抗地震倒塌安全性;而三维地震动输入下结构可能出现更多的倒塌模式,可更全面地体现整体结构的抗震薄弱部位。

[关键词] 动力增量分析;三维地震动;倒塌模式;抗地震倒塌安全性

[中图分类号] P315.9; TU311.3 [文献标识码] A

Influence of Three-dimensional Ground Motion Input on IDA-based Collapse Fragility Analysis

Lu Xin-zheng, Shi Wei, Zhang Wan-kai, Ye Lie-ping, Ma Yu-hu (Department of Civil Engineering, Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Collapse safety is the most important objective of performance-based seismic design, and IDA (incremental dynamic analysis)-based collapse fragility analysis is able to quantitatively evaluate structural collapse safety under earthquakes. In this paper, it is illustrated that IDA considering single horizontal component of ground motion will over-estimate structural collapse safety through examples of an 8-storey RC frame structure and a 20-storey RC frame-core wall structure. More collapse modes may be appear with three-dimensional ground motion input, so that more potential seismic vulnerability is clearly exposed. Therefore, IDA considering three-dimensional ground motion input should be adopted for collapse safety evaluation.

Keywords: incremental dynamic analysis; three-dimensional earthquake ground motion; collapse mode; collapse safety subjected to earthquake

E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn

1 引言

近年来,我国发生的汶川、玉树地震导致大量建筑物倒塌,造成重大人员伤亡,故建筑结构抗地震倒塌能力,尤其是遭遇超设防大震烈度地震下的抗倒塌能力,受到工程界的高度重视。过去因分析能力所限,对工程结构抗倒塌能力的研究往往局限于定性和概念性层次,且现行规范关于大震不倒的规定,其实际抗倒塌能力到底能在多大程度上得到保证,也无科学定量的评价依据。随着结构在地震作用下

动力倒塌过程准确模拟技术的发展,基于大量地震动输入的结构弹塑性时程计算的 IDA^[1] (增量动力分析,Incremental Dynamic Analysis) 倒塌易损性评价方法可科学地定量化评价建筑结构抗倒塌能力,因而近年来得到各国抗震工程研究人员的重视,并相继开展了相关研究。

由于 IDA 分析采用弹塑性动力时程分析方法,能较好地反映结构在未来可能遇到的不同水准强震作用下的刚度、强度和变形能力变化的全过程,因此被广泛用于结构抗震需求的计算^[2]、结构抗震性能的评估^[3-4]和近似抗震分析方法精度的评价^[5-6]。

基于 IDA 方法的结构倒塌易损性分析,是通过结构输入一组逐步增大强度的地震动记录(记地震动总数为 N_{total}),直至结构发生倒塌破坏。如果

[收稿日期] 2011-01-12

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2009BAJ28B01);中国工程院重大咨询项目(2010-ZD-4);国家自然科学基金重点项目(90815025);上海市工程结构新技术重点实验室开放课题(2010-KF04)

在某一地面运动强度 IM (Intensity Measure) 下有 $N_{collapse}$ 条地震动导致结构发生倒塌, 则记在 IM 下结构的倒塌率为 $N_{collapse}/N_{total}$ 。当地震动记录数足够多(如 FEMA P695 报告建议取 20 条以上^[7]) 且具有足够的代表性, 则通过分析结构的倒塌率, 就可以对结构的抗倒塌能力进行定量的评价, 进而对抗震设计提出相应的建议, 国内外学者在这方面已经开展了大量成功的研究工作^[7-12]。

合适的地震动输入对基于 IDA 的结构倒塌易损性分析结果有着至关重要的影响。目前 IDA 分析一般仅考虑单向水平地震动输入; 而实际地震动是一个空间三维的地面运动。统计结果表明^[13], 地震动竖向分量 PGA_v 与水平向最大 PGA 之比 PGA_v/PGA_{Hmax} 的平均值一般在 0.5 左右, 并具有较大的离散性。并且, 有些地震动的竖向分量较大, 如 1979 年 10 月 15 日 Imperial Valley 地震所获得的 30 个地震动记录的 PGA_v/PGA_{Hmax} 平均值达 0.77, 其中靠近断层 ($<10\text{km}$) 的 11 个记录的平均 PGA_v/PGA_{Hmax}

达到 1.12, 最大值达 2.4^[13]。此外, 传统上一般认为远场的竖向地震动分量较小, 故只需要考虑水平地震作用。但是随着强震记录数据库的不断丰富, 这一传统观点正在受到挑战。以美国 FEMA P695 报告建议的 22 条用于 IDA 倒塌易损性分析的远场地震动记录^[7] (见表 1) 为例, 竖向 PGA 和水平向最大 PGA 之比的平均值达到 0.522, 即竖向地震动大致相当于水平地震动的 50% 以上。此外, 水平双向平均 PGA 比值也达到了 0.805, 也就是说水平双向作用大致相当于单向地震作用的 $\sqrt{0.805^2 + 1^2} = 1.28$ 倍。所以, 仅考虑单向水平地震动分量的 IDA 结构倒塌易损性分析所得到的结构抗倒塌易损性分析结果未必能反映实际地震中结构的真实抗倒塌能力。

本文以一个 8 层钢筋混凝土框架结构和一个 20 层钢筋混凝土框架-核心筒结构为例, 研究了三维地震动输入对 IDA 结构倒塌易损性分析结果的影响。地震动记录仍选用表 1 所列 FEMA P695 报告建议的远场地震动集的 22 组记录, 对 RC 框架结

表 1 FEMA P695 报告建议的用于 IDA 结构倒塌易损性分析的远场地震动记录

Table 1 Far-field ground motion records proposed by FEMA P695 report for IDA-based collapse analysis

序号	震级	发生年份	地震名称	地震台	震中距 (km)	相对竖向 (PGA)	相对水平分量 (PGA) (小)	相对水平分量 (PGA) (大)
1	6.7	1994	Northridge	Beverly Hills-Mulhol	17.2	0.632	0.805	1.000
2	6.7	1994	Northridge	Canyon Country-WLC	12.4	0.661	0.851	1.000
3	7.1	1999	Duzce, Turkey	Bolu	12.0	0.246	0.885	1.000
4	7.1	1999	Hector Mine	Hector	22.5	0.446	0.789	1.000
5	6.5	1979	Imperial Valley	Delta	13.5	0.413	0.677	1.000
6	6.5	1979	Imperial Valley	EI Centro Array #11	25.2	0.367	0.964	1.000
7	6.9	1995	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	28.5	0.728	0.987	1.000
8	6.9	1995	Kobe, Japan	Shin-Osaka	15.4	0.242	0.871	1.000
9	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Duzce	13.5	0.638	0.872	1.000
10	7.5	1999	Kocaeli, Turkey	Arcelik	23.8	0.392	0.685	1.000
11	7.3	1992	Landers	Yermo Fire Station	20.0	0.555	0.619	1.000
12	7.3	1992	Landers	Coolwater	35.5	0.407	0.679	1.000
13	6.9	1989	Loma Prieta	Capitola	12.8	1.004	0.848	1.000
14	6.9	1989	Loma Prieta	Gilroy Array #3	13.0	0.601	0.661	1.000
15	7.4	1990	Manjil, Iran	Abbar	18.5	1.045	0.965	1.000
16	6.5	1987	Superstition Hills	EI Centro Imp. Co.	11.7	0.347	0.725	1.000
17	6.5	1987	Superstition Hills	Poe Road (temp)	14.3	NA	0.673	1.000
18	7.0	1992	Cape Mendocino	Rio Dell Overpass	15.5	0.356	0.702	1.000
19	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	CHY101	26.8	0.375	0.803	1.000
20	7.6	1999	Chi-Chi, Taiwan	TCU045	25.9	0.644	0.926	1.000
21	6.6	1971	San Fernando	LA - Hollywood Stor	15.8	0.648	0.830	1.000
22	6.5	1976	Friuli, Italy	Tolmezzo	18.46	0.754	0.895	1.000
			平均			0.522	0.805	1.000

构和 RC 框架-核心筒结构分别进行仅考虑单向水平地震动和考虑三维地震动输入的 IDA 分析,以比较两者分析结果的差异。

2 基于 IDA 的结构倒塌易损性分析

2.1 分析流程

基于 IDA 的结构倒塌易损性分析的基本流程如下^[10]:

(1) 建立能准确模拟结构地震倒塌行为的数值模型,这对分析结果的可靠性至关重要。

(2) 选择一组地震动记录,地震动记录数记为 N_{total} 。这些地震动记录能够反映结构所在场地的地震动特性,且地震记录数量足够多,以反映地震动的不确定性,并选择合适的地震动强度指标 IM 对该组地震记录进行归一化处理。

(3) 在某一地震动强度下,对结构输入上述地震记录进行弹塑性动力时程分析,得到该地震动强度下结构发生倒塌的地震动数(记为 $N_{collapse}$),由此得到该地震动强度下结构的倒塌概率($N_{collapse} / N_{total}$)。

(4) 单调增加地震动强度 IM ,重复上一步骤,得到结构在不同地震动强度输入下的倒塌概率,由此得到结构地震倒塌易损性曲线(Collapse Fragility Curve)。

(5) 根据结构地震倒塌易损性曲线,评估结构在不同水准地震作用下的抗倒塌安全性和相应的可靠度。

2.2 弹塑性模型与倒塌判据

由于结构倒塌是一个非常复杂的非线性动力过程,以往受到计算手段的限制,一般以间接手段,如层间位移角超过 $1/50$ 等,作为结构倒塌的判据,但该判据并不能反映结构是否倒塌。随着计算手段的发展,先进的结构非线性分析工具已经可以准确模拟结构倒塌的整个非线性过程,包括相应的材料非线性、几何非线性、接触非线性等。清华大学在 MSC.MARC 软件上开发的 TECS 系列程序,可以实现复杂钢筋混凝土结构在地震作用下倒塌全过程的模拟^[14-15]。因此,本文直接以“结构丧失竖向承载力而不能维持保障人员安全的生存空间”作为倒塌的判据。

2.3 地震动强度指标 IM 与地震动调幅

FEMA P695^[7]报告和文献[1]等建议的单向地震动强度的相对指标为:

$$IM = S_a(T_1) / S_a(T_1)_{MCE} \quad (1)$$

其中 $S_a(T_1)$ 为地震动记录对应结构一阶周期的谱加速度; $S_a(T_1)_{MCE}$ 为规范建议的罕遇地震(MCE: Maximal Considered Earthquake)下对应结构一阶周期设计反应谱值的谱加速度,根据我国《建筑抗震设计规范》所给设计反应谱,可以按下式确定谱加速度 $S_a(T_1)_{MCE}$:

$$S_a(T_1)_{MCE} = \alpha(T_1)_{罕遇地震} g \quad (2)$$

其中 $\alpha(T_1)_{罕遇地震}$ 为我国《建筑抗震设计规范》规定的对应周期 T_1 的罕遇地震下水平地震影响系数; g 为重力加速度。

因为三维地震动输入的每个分量都有一个 $S_a(T_1)$,为了便于比较单一方向和多维地震动输入的计算结果差异,都以 PGA 最大的水平向分量作为地震动主输入分量,以其 $S_a(T_1)$ 为基准,由式(1)计算得到地震动输入的相对强度指标,并以此强度指标对地震动的 3 个分量等比例地调幅。

3 8 层 RC 框架算例

3.1 结构设计

算例为一个 8 层 RC 框架结构,按照我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)^[17]采用 PKPM 软件设计。结构首层层高 4.2m,其余层高 3.6m,结构标准层平面布置见图 1 所示。按照 II 类场地、第二设计地震分组的丙类结构进行设计,抗震设防烈度为 8 度。框架梁、柱和楼板均为现浇,混凝土等级为 C30,纵筋采用 HRB335,箍筋采用 HPB235;柱截面尺寸 550mm × 550mm,纵梁截面尺寸 300mm × 500mm,横梁截面尺寸 300mm × 550mm,楼板厚度取 120mm。楼面恒载取 5.0kN/m²;活载取 2.0kN/m²,屋面恒载取 7.5kN/m²,活载取 0.5kN/m²;隔墙荷载为 8.0kN/m²,顶层女儿墙荷载取 6.0kN/m²。梁柱配筋由 PKPM 软件计算结果给出。在此基础上采用 TECS 程序^[14-15]建立该结构的三维弹塑性有限元模型,以进行 IDA 分析。地震动主输入分量的方向均为结构的纵轴方向。

3.2 结构倒塌易损性分析结果

计算得到单一水平分量和多维地震动输入下的倒塌易损性曲线如图 2 所示,设计大震和特大地震下结构倒塌率如表 2 所示。可见相对而言,同时考虑水平双向地震动输入,倒塌率有所增大,再考虑竖向地震动输入后结构倒塌率进一步增大。因此,只进行单向水平分量的地震动输入,会高估结构的抗

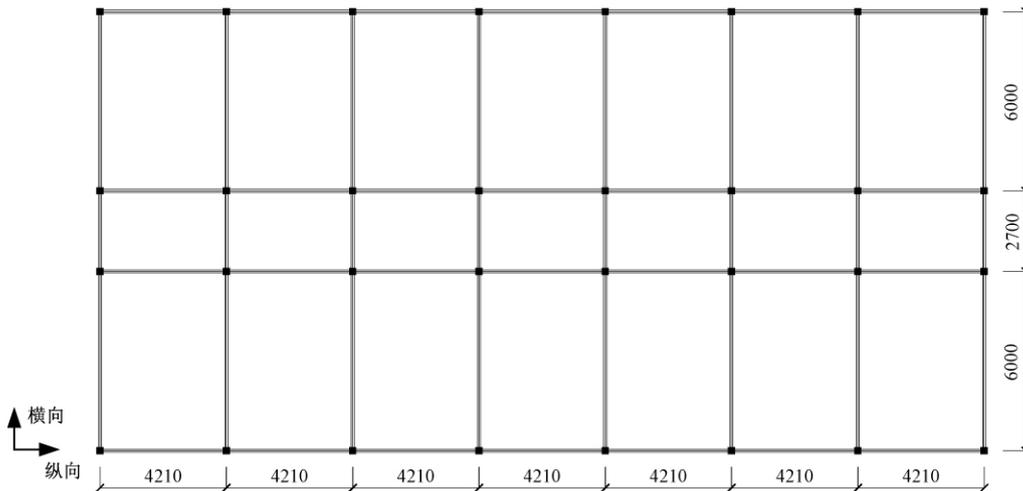


图1 8层RC框架结构标准层平面布置

Fig. 1 Standard plan layout of the 8-storey RC frame structure

倒塌能力。

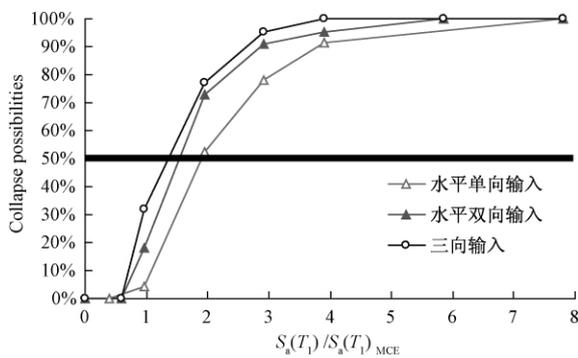


图2 8层RC框架结构在不同维度地震动输入下的倒塌易损性曲线

Fig. 2 Collapse fragility curves of the 8-storey RC frame structure considering multiple-dimensional earthquake ground motion

表2 8层RC框架结构在设计大震和特大地震下的倒塌概率

Table 2 Collapse probabilities of the 8-storey RC frame structure under MCE level earthquakes and mega-earthquakes

地震输入方向	倒塌率	
	设计大震 $S_a(T_1) / S_a(T_1)_{MCE} = 1.0$	特大地震 $S_a(T_1) / S_a(T_1)_{MCE} = 2.0$
水平单向地震动输入	5.6%	53.5%
水平双向地震动输入	19.4%	73.9%
三维地震动输入	33.1%	77.9%

4 20层RC框架-核心筒结构算例

4.1 结构设计

算例为某综合办公楼,主体结构20层,裙房4层,楼高79.47m。主楼为RC框架-核心筒结构,裙房为RC框架结构。结构主要构件尺寸:框架柱从下至上依次为800mm×800mm,700mm×700mm和600mm×600mm,主要框架梁尺寸为350mm×650mm(Y向),350×600mm(X向),核心筒墙厚350mm。建筑场地类型为II类,设计地震分组为第一组,抗震设防烈度为8度。

结构建模过程中,外框架部分的梁、柱构件均采用TECS程序中的纤维梁单元来模拟;筒体的各剪力墙及其钢筋(骨)混凝土连梁均采用TECS程序中的分层壳墙模型,其中墙体暗柱和连梁等关键部位的配筋采用离散钢筋模型;楼板采用壳单元来模拟,以考虑楼板变形对结构抗倒塌能力的影响^[14-15]。图3和图4给出了结构三维有限元模型示意图。地震动的主输入分量的方向为结构的X轴方向。

4.2 结构倒塌易损性分析结果

计算得到单一水平分量和多维地震动输入下的倒塌易损性曲线如图5所示。此外,为考察三维地震动输入方向对IDA抗倒塌分析的影响,还比较了不同地震动输入方向(地震动最大水平分量方向与X轴分别成0度、45度、90度)的计算结果。

从上述计算结果比较可以看出,由于本结构设计得相对比较合理,故不同地震动输入方向对倒塌率影响相对较小。与8层RC框架结构类似,在同

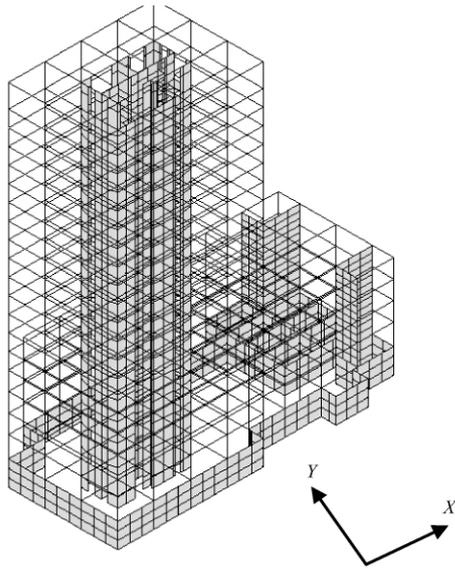


图 3 结构三维有限元模型
Fig. 3 Three-dimensional FE model of the 20-storey RC frame-core wall structure

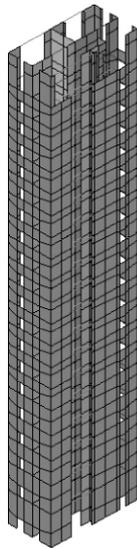


图 4 内核心筒三维有限元模型
Fig. 4 Three-dimensional FE model of the core wall

一地震水准情况下,考虑水平双向地震动输入时结构倒塌率比水平单向输入显著提高,结构抗地震倒塌安全性降低。相对而言,在考虑水平双向地震动输入的基础上再增加竖向地震动输入,对结构抗倒塌安全性影响较小。

4.3 结构倒塌模式

结构的倒塌模式是指结构在强震作用下损伤部位依次出现、损伤程度逐渐发展,最终导致结构倒塌

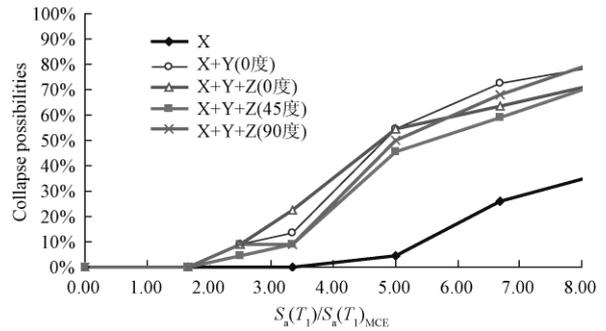


图 5 20 层 RC 框架 - 核心筒结构在不同维度、不同输入角度地震动作用下的倒塌易损性曲线
Fig. 5 Collapse fragility curves of the 20-storey RC frame-core wall structure considering multiple-dimensional and variant input directions of the earthquake ground motions

的整个过程以及结构倒塌的具体部位和形式。由于该高层结构相对较为复杂,以及输入地震动的不确定性,该结构在地震作用下存在多种倒塌模式,如图 6 所示的第 10 层倒塌模式或图 7 所示的首层模式倒塌。统计不同地震动输入下结构的倒塌模式,如表 3 所示。可以看出,考虑三维地震动输入后,结构出现了新的倒塌模式,即发生在第 6 层的倒塌。由此可见,考虑三维地震动输入,不仅会影响到结构抗地震倒塌安全性的判断,而且还会暴露出结构新的薄弱环节,这对于发现结构抗震能力的“短板”,改进抗震设计以避免薄弱部位过早破坏而导致结构整体抗震能力难以得到充分发挥是极具价值的。

表 3 不同地震动输入下结构的倒塌模式统计

Table 3 Statistics of structure collapse modes under variant earthquake ground motions

地震输入模式	第 2 层倒塌 (%)	第 6 层倒塌 (%)	第 11 层倒塌 (%)	其他* (%)
单向地震输入	85.7	0	14.3	0
三向地震输入	60.0	15.0	15.0	10.0

注: * 表示同时在多个楼层发生倒塌破坏

5 结论

本文通过对一个 8 层 RC 框架结构和一个 20 层 RC 框架 - 核心筒结构基于 IDA 的倒塌易损性分析对比,表明在三维地震动输入下,结构的倒塌率会增大,且双向地震动输入的影响最大,竖向地震动影响稍小一些。

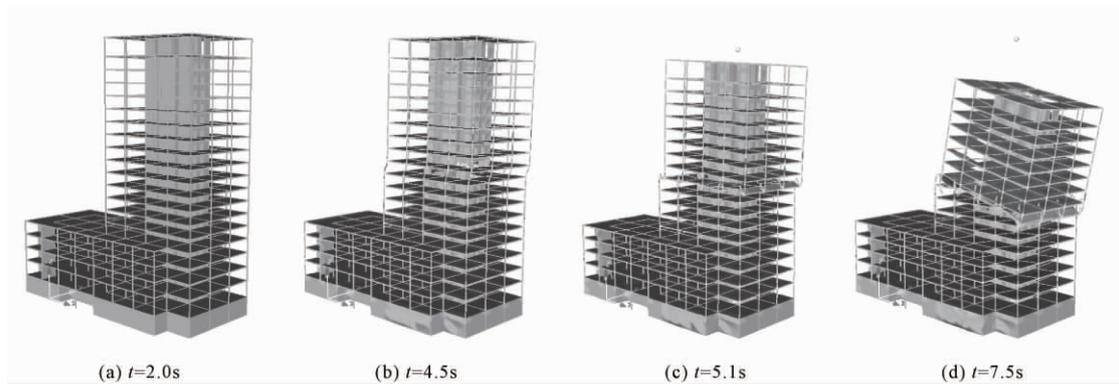


图 6 结构第 10 层倒塌过程 (输入 El-Centro 地震动记录)

Fig. 6 Collapse process at tenth storey (under El-Centro earthquake ground motion)

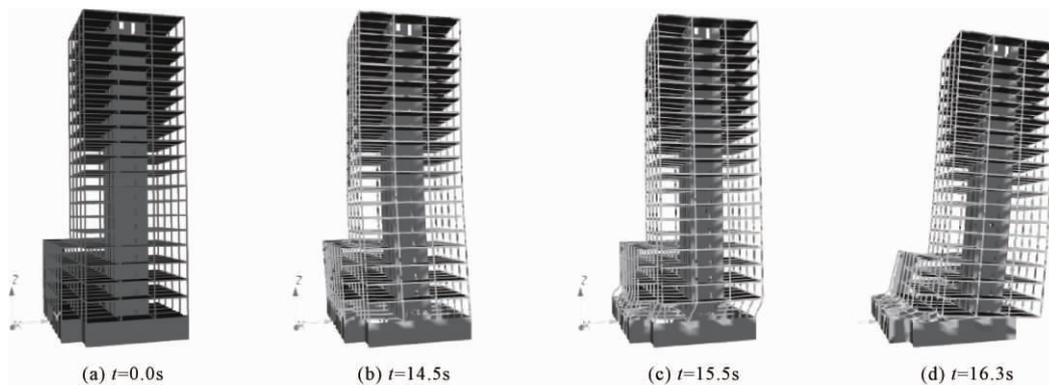


图 7 结构第 1 层倒塌过程 (输入 Kocaeli, Turkey 地震动记录)

Fig. 7 Collapse process at first storey (under Kocaeli, Turkey earthquake ground motion)

另外,结构在三维地震动输入下有可能出现单一水平输入下所没有的倒塌模式,可更全面地发现结构的薄弱环节。而倒塌模式是结构抗倒塌研究重要的关注点,发现整个结构的各个薄弱环节对提高结构抗倒塌能力具有重要意义。

因此,在基于 IDA 的结构易损性分析中,应采用更为客观的三维地震动输入,其分析结果比仅考虑单一水平分量的分析结果偏于安全,也更为全面。

参考文献 (References):

[1] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 2002, 31(3): 491 ~ 514

[2] 杨俊芬,顾强,何涛,彭奕亮. 用增量动力分析方法求解人字形中心支撑钢框架的结构影响系数和位移方法系数(I) - 方法[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 64 ~ 71

Yang J F, Gu Q, He T, Peng Y L. Response modification factor and displacement amplification

factorfor inverted V-CBSFs based on IDA (I): Method [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30 (2): 64 ~ 71 (in Chinese)

[3] 周颖,吕西林,卜一. 增量动力分析法在高层混合结构性能评估中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 183 ~ 193

Zhou Y, Lv X L, Bo Y. Application of incremental dynamic analysis to seismic evaluation of hybrid structure [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(2): 183 ~ 193 (in Chinese)

[4] 汪梦甫,曹秀娟,孙文林. 增量动力分析方法的改进及其在高层混合结构地震危害性评估中的应用[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(1): 104 ~ 121

Wang M F, Cao X J, Sun W L. Incremental dynamic analysis applied to seismic risk assessment of hybrid structure [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(1): 104 ~ 121 (in Chinese)

[5] 马千里,叶列平,陆新征,缪志伟. 采用逐步增量弹塑性时程方法对 RC 框架结构推覆分析侧力模式的

- 研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(2): 132~140
Ma Q L, Ye L P, Lu X Z, Miao Z W. Study on lateral load patterns of pushover analysis using incremental dynamical analysis for RC frame structures [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(2): 132~140 (in Chinese)
- [6] 缪志伟, 马千里, 叶列平, 陆新征. Pushover 方法的准确性和适用性研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2008, 30(1): 55~59
Miao Z W, Ma Q L, Ye L P, Lu X Z. Study on the accuracy and applicability of the pushover analysis [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2008, 30(1): 55~59 (in Chinese)
- [7] Applied Technical Council, Federal Emergency Management Agent. Quantification of Building Seismic Performance Factors [R]. California, 2009
- [8] 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 X Z, Ye L P. Study on the seismic collapse resistance of structural system [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(1): 13~18 (in Chinese)
- [9] Federal Emergency Management Agent. NEHRP Recommended Seismic Provisions [S]. Washington, D. C., 2009
- [10] 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, 27(12)
Shi W, Ye L P, Lu X Z, Tang D Y. Study on the collapse-resistant capacity of RC frames with different seismic fortification levels [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(2) (in Chinese)
- [11] 唐代远, 陆新征, 叶列平, 施炜. 柱轴压比对我国 RC 框架结构抗地震倒塌能力的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(5)
Tang D Y, Lu X Z, Ye L P, Shi W. Influence of axial compression ratio to the seismic collapse resistance of RC frame structures [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2010, 32(5) (in Chinese)
- [12] 叶列平, 陆新征, 赵世春, 李易. 框架结构抗地震倒塌能力的研究——汶川地震极震区几个框架结构震害案例分析[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(6): 67~76
Ye L P, Lu X Z, Zhao S C, Li Y. Seismic collapse resistance of RC frame structures——Case studies on seismic damages of several RC frame structures under extreme ground motion in Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(6): 67~76 (in Chinese)
- [13] 余师和. 竖向地震反应谱[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1982, (2): 26~39
She S H. Response spectrum of vertical earthquake [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1982, (2): 26~39 (in Chinese)
- [14] Lu X Z, Lin X C, Ma Y H, Li Y, Ye L P. Numerical simulation for the progressive collapse of concrete building due to earthquake [A]. Proc. the 14th World Conference on Earthquake Engineering [C]. October 12~17, 2008, Beijing, China, CDROM
- [15] 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)
Lu X Z, Lin X C, Ye L P, Li Y, Tang D Y. Numerical models for earthquake induced progressive collapse of high-rise buildings [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(11) (in Chinese)
- [16] 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
Lu X Z, Ye L P, Miao Z W. Elasto-plastic Analysis of Building Against Earthquake [M]. Beijing, China Architecture and Building Press, 2009 (in Chinese)
- [17] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范 [S]
GB 50011-2001, Code for Seismic Design of Buildings [S] (in Chinese)

[作者简介] 陆新征(1978~),男,博士,副教授,从事防灾减灾研究和非线性计算分析