

Study on Seismic Response Difference of RC Frame Under Excitation of Single and Bidirectional Strong Ground Motion

Wang Zizhao^{1,2}, Gong Maosheng^{1,2,*}, Wang Kunyang^{1,2}

¹Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, China

²Key Laboratory of Earthquake Disaster Mitigation, Ministry of Emergency Management, Harbin, China

Email address:

1769194439@qq.com (Wang Zizhao), gmshiem@163.com (Gong Maosheng), icesper@hotmail.com (Wang Kunyang)

*Corresponding author

To cite this article:

Wang Zizhao, Gong Maosheng, Wang Kunyang. Study on Seismic Response Difference of RC Frame Under Excitation of Single and Bidirectional Strong Ground Motion. *Science Discovery*. Vol. 10, No. 3, 2022, pp. 146-152. doi: 10.11648/j.sd.20221003.21

Received: May 6, 2022; Accepted: May 31, 2022; Published: June 1, 2022

Abstract: In order to compare the difference of seismic response of RC frame structure under single and bidirectional strong ground motions, a 3-story RC frame structure is designed according to the Chinese seismic design code, and the structural seismic response is analyzed under the excitation of 4 sets of bidirectional strong ground motions by using OpenSEES. Then the seismic response parameters are analyzed and compared between the excitation of single and bidirectional strong ground motions. The result shows that the structural inter-story drift ratio under bidirectional strong ground motion is larger than that of excitation of the single component of strong motion and the column concrete compressive strain and rebar tensile strain increase, while the beam concrete compressive strain and rebar tensile strain decrease. The plastic hinge of RC frame is more likely to be formed at the end of column, and the amount of plastic hinge at column ends increases, but decreases at beam ends respectively, compared with excitation of single component of strong motion. Moreover, it is found that different bidirectional seismic input modes have large influence on the inter-story drift ratio and fiber strain, while have small influence on axial compression ratio and failure mode of beam-column joints. The result provides some reference for the seismic design of RC frame considering the effect of the bidirectional seismic action.

Keywords: Structural Nonlinear Analysis, RC Frame Structure, Bidirectional Seismic Action, Plastic Hinge

单双向地震动下RC框架地震反应差异性研究

王子昭^{1,2}, 公茂盛^{1,2,*}, 王坤阳^{1,2}

¹中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨, 中国

²地震灾害防治应急管理部重点实验室, 哈尔滨, 中国

邮箱

1769194439@qq.com (王子昭), gmshiem@163.com (公茂盛), icesper@hotmail.com (王坤阳)

摘要: 为探究单、双向地震动作用下RC框架结构地震反应差异性, 本文按照中国规范设计了一个抗震设防烈度为7度(0.1g)、抗震等级为3级的空间框架结构, 采用OpenSEES有限元软件, 基于柔度法纤维模型建立了结构三维数值模型, 并以40条地震动分为4种工况为输入对结构进行了地震反应分析, 根据地震反应分析结果比较了结构在单、双向地震动下各类反应参数的差异性。结果表明: 与单向地震动输入相比, 在双向地震动作用下, RC框架的层间位移角更大, 柱端纤维应变增大梁端纤维应变减小, 柱混凝土压应变与钢筋拉应变增大, 梁混凝土压应变与钢筋拉应变减小;

RC框架塑性铰结构更偏向于在柱端产生，柱端截面出铰率增大，梁端出铰率减小，RC框架节点未能实现“强柱弱梁”的概率增大，柱截面塑性铰部分呈现双向屈服的形式。不同双向地震动输入方式对于层间位移角以及纤维应变影响较大，对于梁、柱截面出铰概率以及节点实现“强柱弱梁”概率影响较小。本文结果为探究考虑双向地震动作用的结构抗震设计方法提供了参考。

关键词：结构非线性分析，框架结构，双向地震动，塑性铰

1. 引言

多次地震灾害调查发现，钢筋混凝土（RC）框架结构柱会出现双向受力破坏，柱端更容易形成塑性铰。这是因为结构不对称，导致结构扭转地震反应，二是因为实际地震中结构受到两个水平方向的地震动作用，如：1999年我国台湾集集地震中，多栋RC框架结构等典型结构出现了比较明显的扭转破坏[1]；2014云南鲁甸6.5级地震中，龙头山中心幼儿园一层在2个水平方向均出现了明显的残余侧移，框架柱顶出现了双向受力破坏[2]。此外，在2008年汶川地震中，大量RC框架结构也出现了较多的柱铰机制，这种“强梁弱柱”破坏模式，双向水平地震动作用也是其中一种重要的影响因素[3, 4]。RC框架柱在双向作用下承载能力与单向有较大的不同，在双向地震动作用下处于双向偏压状态[5, 6]，增大了结构破坏概率。因此，探究单向水平地震动作用下与双向水平地震动作用下的RC框架地震反应差异，可以为考虑双向地震动作用的结构抗震设计方法提供参考依据。

Seki和Okada对RC框架结构分别进行了单向拟动力实验和双向拟动力实验，结果表明双向加载下RC框架的基底剪力与顶层位移比单向加载增大约30%[7]。Okada分别对6个RC框架进行振动台试验，其中3个为单向地震动输入，3个为双向地震动输入，结果表明双向地震动输入下RC框架的层间位移反应是单向地震动输入下的1.1-2.2倍[8]。张昊宇[9]对9个RC框架柱进行了水平双向拟静力实验，结果表明相同侧移下双向加载柱的塑性铰区破坏程度重于单向加载柱。曲博文[2]对9个悬臂柱进行了拟静力实验，得到双向加载下柱的受力不均匀程度重于单向加载柱。付青青[10]设计了3、9、15层RC框架进行分析，得出结构在双向地震动下层间位移角约是单向地震动下的1.3倍。李忠献[11]对5根RC矩形截面短柱开展了拟静力试验，结果表明双向加载下试件的延性比单向加载下降了约10%。

上述研究表明，双向地震动下RC框架柱破坏程度加重，延性下降，层间位移角增大。为了进一步定量分析单向和双向地震动下RC框架结构地震反应差异，本文按照中国抗震设计规范[12]设计了一个3层RC框架结构，并选取40条地震动，分为4种工况对其进行了地震反应分析，比较了结构在单、双向地震动加载下结构层间位移角及塑性铰等参数的差异，同时分析了双向地震动不同输入方式下结构反应的差异，初步得到了单、双向地震动作用下RC框架结构地震反应的规律。研究结果为RC框架结构考虑双向地震动作用抗震设计提供了参考。

2. 结构模型与输入地震动

2.1. RC框架结构算例

为分析单、双向地震动作用下结构反应的差异，本文设计了一3跨×2跨3层空间框架结构，其抗震设防烈度为7度（0.1g），第一设计地震分组，二类场地，抗震等级为3级，结构立面图如图1所示。框架柱截面尺寸为400mm×400mm，框架梁截面尺寸为200mm×300mm，楼板厚度为120mm，结构层高均为3m。结构梁、柱、板采用C30混凝土，钢筋采用HRB400级热轧钢筋。结构楼面荷载标准值取恒荷载4.0kN/m²，活荷载2.0kN/m²，考虑填充墙荷载为3.8kN/m，屋面为上人屋面，恒荷载4.5kN/m²，活荷载2.0kN/m²，考虑女儿墙影响，在顶层外围框架梁施加3kN/m的均布线荷载。

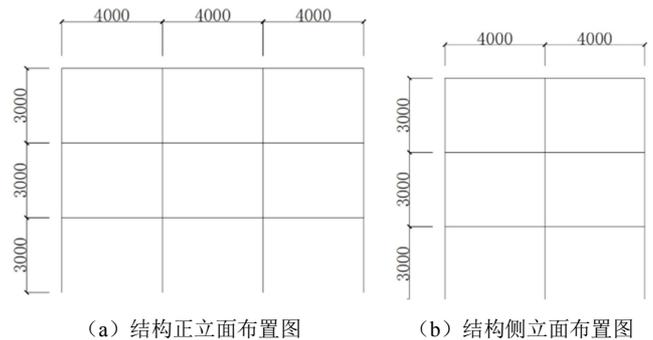


图1 结构立面布置图。

2.2. 结构数值建模

本文采用OpenSEES有限元软件进行结构建模与弹塑性时程分析，混凝土采用Scott和Park[13]等人在Kent-Park混凝土本构模型的基础上扩展而来的本构模型，即Concrete01本构模型，钢筋采用Filippou在Menegotto和Pinto的本构模型基础上改进的单轴各向同性强化的模型[14]，即Steel02本构模型。梁柱截面采用纤维模型，即fiber section，梁柱杆件采用基于柔度法的梁柱单元，其中，梁与柱的积分点都为4个[15]。

2.3. 地震动选取

已有研究表明，结构双向地震动弹塑性时程分析时，建议采用“6+3”或更多的输入组合以确保分析结果的可靠性[16]，本文依据双频段选波方法[17]，共选取40条地震动作为结构单、双向输入地震动，为探究不同双向输入地震动方式及峰值比对单、双向地震动下结构反应的影响，

将40条地震动分为4个工况进行输入, 详细信息见表1。工况1共10条天然地震动双向输入相同水平分量, 峰值比按照抗震规范要求取1: 0.85; 工况2共10条天然地震动双向输入不同水平分量, 峰值比按照抗震规范要求取1: 0.85; 工况3共10条天然地震动双向输入不同水平分量, 峰值比

取用实际记录的峰值比; 工况4共10条人工地震动, 双向输入相同水平分量, 峰值比按照抗震规范要求取1: 0.85。

工况1至工况4结构单向地震动均输入峰值较大的方向分量, 加速度峰值按照抗震规范要求调幅至0.22g。

表1 地震动输入工况。

地震动工况	地震动类别	地震动输入方式	峰值比
工况1	10条天然地震动	双向输入相同水平分量	1: 0.85
工况2	10条天然地震动	双向输入不同水平分量	1: 0.85
工况3	10条天然地震动	双向输入不同水平分量	实际峰值比
工况4	10条人工地震动	双向输入相同水平分量	1: 0.85

双向地震动主方向分量选取峰值较大的方向分量, 加速度取值按照抗震规范要求调幅至0.22g, 工况1至工况3各条天然地震动详细信息见表2。

表2 天然地震动详细信息。

工况	编号	地震事件	台站名称	峰值比	地震年份	震级
工况1	1	Imperial Valley-02	El Centro Array #9	1:0.85	1940	6.95
	2	Kern County	Taft Lincoln School	1:0.85	1952	7.36
	3	Southern Calif	San Luis Obispo	1:0.85	1952	6.00
	4	Central Calif-01	Hollister City Hall	1:0.85	1954	5.30
	5	Northern Calif-03	Ferndale City Hall	1:0.85	1954	6.50
	6	San Fernando	2516 Via Tejon PV	1:0.85	1971	6.61
	7	San Fernando	Anza Post Office	1:0.85	1971	6.61
	8	San Fernando	Bakersfield - Harvey Aud	1:0.85	1971	6.61
	9	San Fernando	Borrego Springs Fire Sta	1:0.85	1971	6.61
	10	San Fernando	Castaic - Old Ridge Route	1:0.85	1971	6.61
工况2	1	Imperial Valley-05	El Centro Array #9	1:0.85	1955	5.40
	2	El Alamo	El Centro Array #9	1:0.85	1956	6.80
	3	Central Calif-02	Hollister City Hall	1:0.85	1960	5.00
	4	Northern Calif-04	Ferndale City Hall	1:0.85	1960	5.70
	5	Hollister-02	Hollister City Hall	1:0.85	1961	5.50
	6	San Fernando	Cedar Springs_ Allen Ranch	1:0.85	1971	6.61
	7	San Fernando	Cholame - Shandon Array	1:0.85	1971	6.61
	8	San Fernando	Hemet Fire Station	1:0.85	1971	6.61
	9	San Fernando	LA - Hollywood Stor FF	1:0.85	1971	6.61
	10	San Fernando	Maricopa Array #2	1:0.85	1971	6.61
工况3	1	Parkfield	San Luis Obispo	1:0.8589	1966	6.19
	2	Northern Calif-06	Hollister City Hall	1:0.7819	1967	5.20
	3	Borrego Mtn	LB - Terminal Island	1:0.7819	1968	6.63
	4	Borrego Mtn	San Onofre - So Cal Edison	1:0.8753	1968	6.63
	5	Lytle Creek	Castaic - Old Ridge Route	1:0.7883	1970	5.33
	6	San Fernando	Maricopa Array #3	1:0.7960	1971	6.61
	7	San Fernando	Pacoima Dam	1:0.9844	1971	6.61
	8	San Fernando	San Diego Gas & Electric	1:0.7371	1971	6.61
	9	San Fernando	San Juan Capistrano	1:0.7841	1971	6.61
	10	San Fernando	UCSB - Fluid Mech Lab	1:0.9560	1971	6.61

3. 计算结果及分析

本文在对比单、双向地震动输入下RC框架地震反应差异时, 采用层间位移角、混凝土纤维应变以及钢筋纤维应变、塑性铰特征等参数为指标进行分析。

3.1. 层间位移角

图2给出了工况1至工况4下结构最大层间位移角对比结果, 可以发现双向地震动下结构各层最大层间位移

角明显较单向地震动作用下增大。其中, 在层间位移角较大的二层, 增大的比例也相对较大, 第1工况增大了17.8%, 第2工况增大了24.1%, 第3工况增大了20.6%, 第4工况增大了18.2%, 一层与三层增大的比例相对较小。将工况1至工况4进行对比, 双向加载不同水平分量的工况1以及工况3增大的比例较大, 加载相同分量的工况相对较小。说明在进行结构双向地震动下地震反应分析时, 两个方向输入地震动不要选为一致, 尽量采用实际地震动两个水平分量。

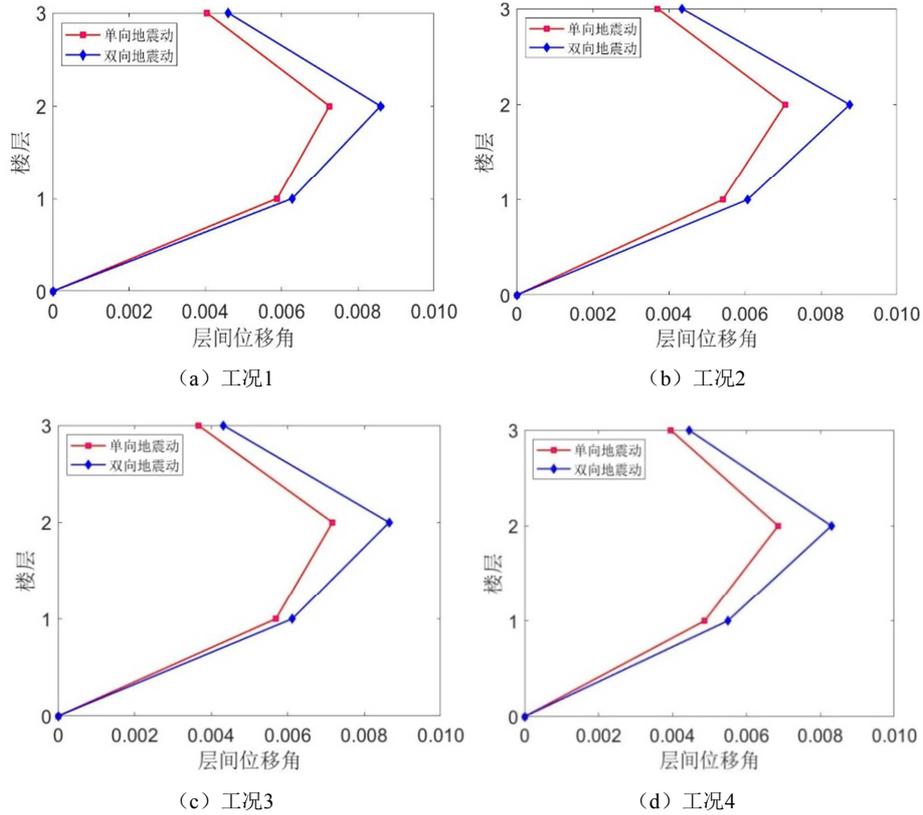


图2 工况1至工况4结构最大层间位移角对比图。

3.2. 混凝土及钢筋应变

图3给出了4个工况单、双向地震动作用下所有梁、柱杆端截面混凝土纤维的压应变平均值，通过比较可知，单向与双向地震动作用下，柱混凝土压应变的平均值均大于梁混凝土的平均值，单向地震动下柱混凝土平均值是梁的1.6倍，双向地震动下混凝土压应变平均值是梁的4.5倍；工况1至工况4双向地震动作用下的柱混凝土压应变平均

值，均大于单向地震动作用下的平均值，双向地震动作用下柱混凝土压应变平均值为单向地震动作用下的1.8倍；双向地震动作用下梁混凝土压应变平均值小于单向地震动作用，双向地震动下梁混凝土压应变平均值为单向地震动作用下的60%。相比于单向地震动作用下，双向地震动下柱混凝土压应变增大，梁混凝土压应变减小，混凝土更倾向于在柱端发生变形。

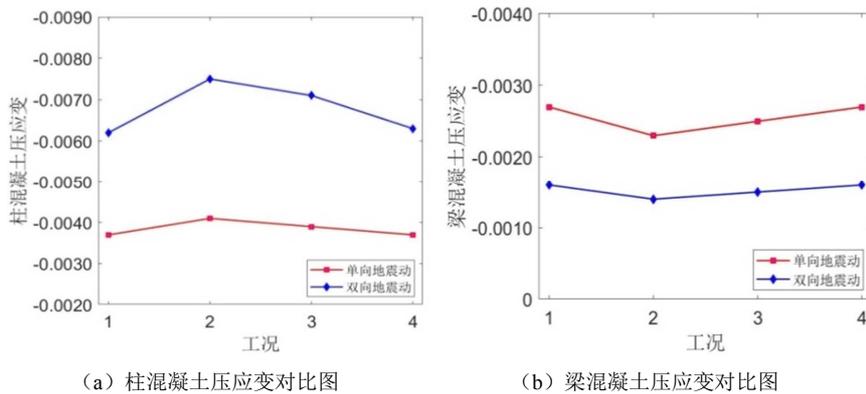


图3 梁、柱混凝土压应变平均值对比图。

图4给出了4个工况下单、双向地震动作用下所有梁、柱杆端截面钢筋纤维拉应变的平均值。通过比较图中数据可得，单、双向地震动作用下柱钢筋拉应变平均值均大于梁钢筋拉应变平均值，单向地震动作用下柱钢筋拉应变平均值为梁的1.6倍，双向地震动作用下柱钢筋拉应变平均

值为梁的3.1倍；工况1至工况4双向地震动作用下的柱钢筋拉应变平均值，均大于单向地震动作用下的平均值，双向地震动作用下柱钢筋拉应变平均值为单向地震动作用下的1.6倍；双向地震动作用下梁钢筋拉应变平均值小于单向地震动作用，双向地震动下梁钢筋拉应变平均值为单

向地震动作用下的80%。相比于单向地震动作用下，双向地震动下柱钢筋拉应变增大，梁钢筋拉应变减小，钢筋更

倾向于在柱端发生变形。

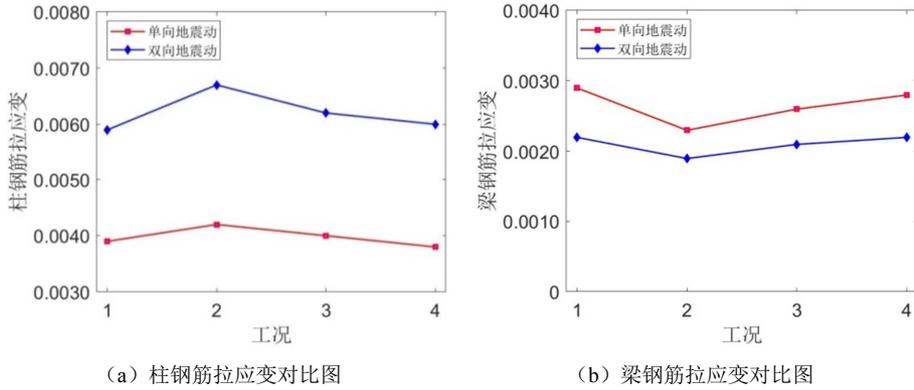


图4 梁、柱钢筋拉应变对比图。

3.3. 塑性铰特性

图5给出了结构单、双向地震动下梁、柱杆端截面的出铰率，单、双向地震动下，RC框架的柱端（梁端）出铰率等于每个工况下发生屈服的柱端（梁端）数量，与RC框架总柱端（梁端）数量之比。其中，杆端单向屈服与双向屈服均按照一次屈服计算。通过比较图中数据可得，双

向地震动作用下柱截面出铰率大于单向，约为单向地震动作用下的1.2-1.3倍，双向地震动作用下梁截面出铰率小于单向，约为单向地震动下的70%，不同工况下梁、柱截面出铰率差别较小。相比于单向地震动作用下，双向地震动下RC框架结构柱端更易出现塑性铰，即结构更容易发生“强梁弱柱”破坏模式。

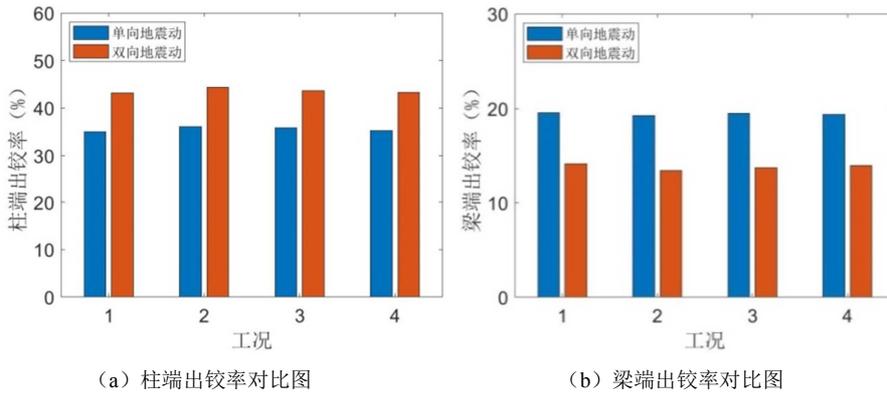


图5 RC框架梁、柱出铰率对比图。

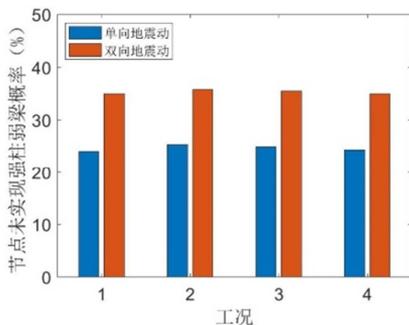


图6 RC框架节点未实现“强柱弱梁”概率对比图。

图6给出了结构单、双向地震动下节点实现“强柱弱梁”的概率对比，单（双）向地震动下节点未实现“强柱弱梁”的概率等于每个工况单（双）向地震动作用下未实

现“强柱弱梁”的节点数量与RC框架总节点数量之比。其中，梁（柱）杆件未发生屈服节点，以及梁（柱）杆件按照“强柱弱梁”形式发生屈服破坏的节点均计为实现“强柱弱梁”型节点。通过比较图中数据可得，双向地震动下节点未能实现“强柱弱梁”的概率明显增大，为单向地震动下1.4倍；不同工况下节点未能实现“强柱弱梁”的概率差别不大。

为了更清楚说明和对比节点出铰情况，本文给出了工况1至工况4编号1地震动作用下的框架塑性铰分布图，如图7所示，其中空心圆表示截面单向屈服，实心圆表示截面双向屈服。通过对比4组单、双向地震动作用下塑性铰分布图，可以发现，双向地震动下柱端塑性铰多于单向地震动作用，梁端塑性铰少于单向地震动作用，双向地震动作用下RC框架部分杆端塑性铰会呈现双向屈服的形式。

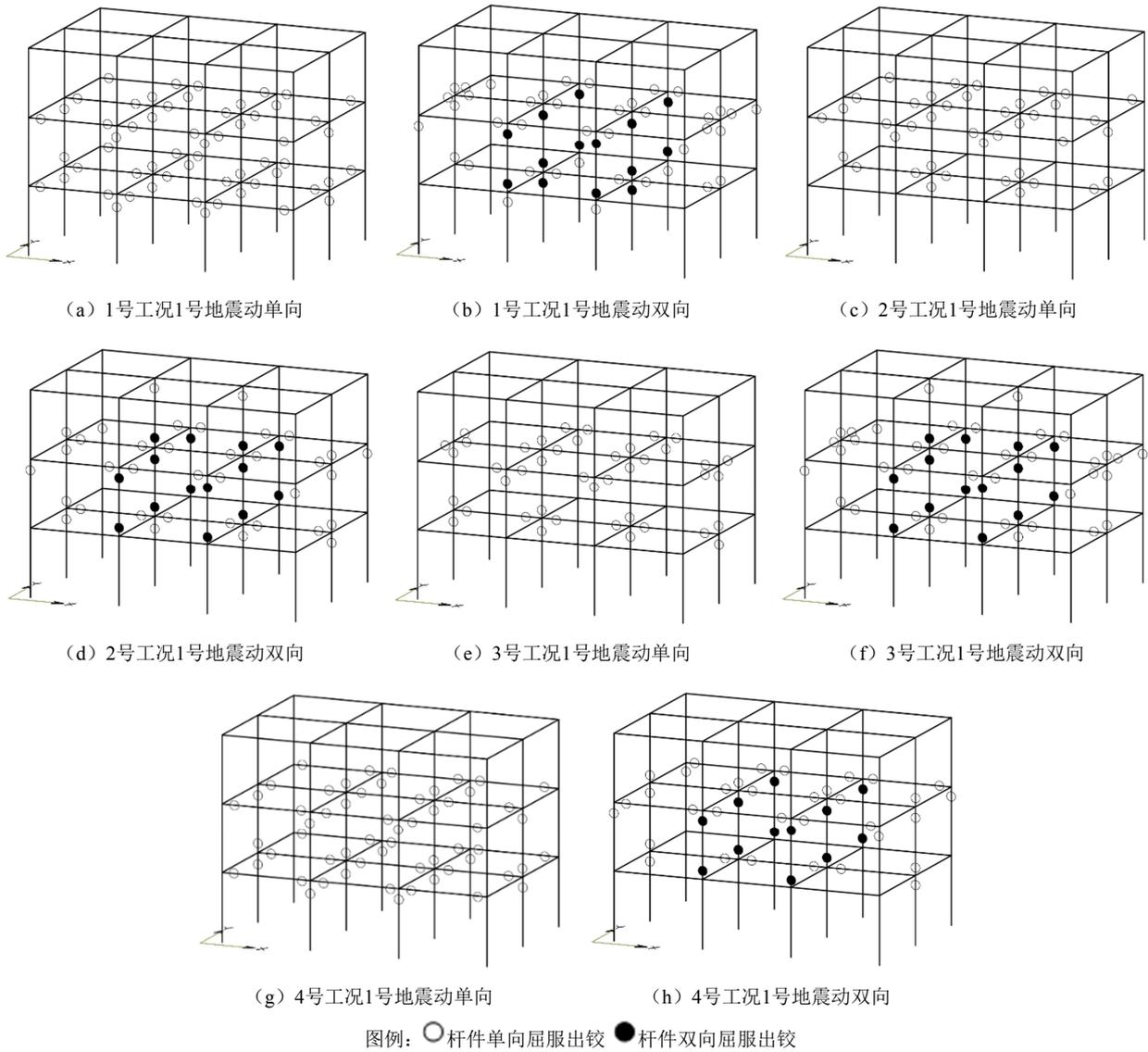


图7 结构塑性铰分布对比图。

4. 结论

本文以40条地震动作为输入，分为4种工况对某3层RC框架结构进行弹塑性时程反应分析，统计对比了单向与双向地震动作用下结构层间位移角、混凝土以及钢筋纤维应变、梁柱塑性铰特征等参数的差异。得到结论如下：

- (1) 双向地震动作用会增大RC框架的层间位移角，最大可增大20%左右，在双向输入不同水平分量，峰值比为1: 0.85条件下，结构单、双向地震动作用下层间位移角差异最大。
- (2) 双向地震动作用下，柱混凝土压应变与钢筋拉应变均大于单向地震动，梁混凝土压应变与钢筋拉应变均小于单向地震动，双向地震动作用下柱混凝土压应变约为单向地震动作用下的1.8倍；梁混凝土压应变约为单向地震动作用下的60%。双向地震动作用下柱钢筋拉应变约为单向地震动作用

下的1.6倍，梁钢筋拉应变约为单向地震动作用下的80%。

- (3) 双向地震动下，RC框架结构柱端更易出现塑性铰，结构更容易产生“强梁弱柱”破坏模式，且部分构件呈现双向屈服的形式；双向地震动作用下RC框架柱截面出铰率约为单向地震动下的1.2倍，梁截面出铰率约为单向地震动下的70%，双向地震动下节点未能实现“强柱弱梁”的概率相比单向地震动下增大43%。
- (4) 基于本文研究结果，未来应对更符合实际地震动情况的三向地震动下RC框架的地震反应进行分析研究，并与单、双向地震动下RC框架结构反应进行对比。同时基于已得到的双向地震动下框架反应差异的研究结果，应继续对于我国规范中规定的柱端弯矩增大系数是否在双向地震动下依然适用进行探究，提出合理的柱端弯矩增大系数的取值，为建筑结构抗震设计提供参考。

致谢

本研究得到中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项(2019A01, 2021EEEEVL0301)和国家自然科学基金项目(52178514)资助, 特此致谢。

参考文献

- [1] 李英民, 赖明. 工程地震动模型化研究综述及展望(I)——概述与地震学模型[J]. 重庆建筑大学学报, 1998 (02): 73-80.
- [2] 曲博闻. 水平双向加载下钢筋混凝土柱抗震性能研究[D]. 中国地震局工程力学研究所, 2018.
- [3] 叶列平, 曲哲, 马千里, 林旭川, 陆新征, 潘鹏. 从汶川地震框架结构震害谈“强柱弱梁”屈服机制的实现[J]. 建筑结构, 2008 (11): 52-59+67.
- [4] 杨红, 王建辉, 白绍良. 双向地震作用对框架柱端弯矩增大系数的影响分析[J]. 土木工程学报, 2008 (09): 40-47.
- [5] 邱法维, 李文峰, 潘鹏, 钱稼茹. 钢筋混凝土柱的双向拟静力实验研究[J]. 建筑结构学报, 2001 (05): 26-31.
- [6] 张望喜, 王雄, 张瑾熠, 史佳佳, 卫永涛. 带现浇楼板RC框架结构抗震性能的多因素影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38 (01): 77-88.
- [7] Seki M, Okada T. Nonlinear earthquake response test of torsionally coupled reinforced concrete buildings frames [J]. Proceedings of the 8th World Conference, Earthq. Eng. 1984, 6: 315-322.
- [8] Okada T, Seki M, Park Y J. A simulation of earthquake response of reinforced concrete building frames to bidirectional ground motion by IIS computer-actuator on-line system [C]. Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey. 1980: 8-13.
- [9] 张昊宇, 曲博闻, 毛晨曦. 水平双向加载下钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52 (08): 49-61+71.
- [10] 付青青. 双向地震作用下SRC框架结构抗震性能分析[D]. 河北工程大学, 2020.
- [11] 李忠献, 尉迪, 高营. 不同加载路径下RC短柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2018, 48 (02): 55-59+71.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [13] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. ACI Journal, 1982, 79 (01): 13-27.
- [14] Spacone E, Filippou F C, Taucer F F. Fiber beam-column model for non-linear analysis of R/C frames: part 1. Formulation [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25 (07): 711-725.
- [15] 杨红, 朱振华, 白绍良. 双向地震作用下我国“强柱弱梁”措施的有效性评估[J]. 土木工程学报, 2011, 44 (01): 58-64.
- [16] 董银峰, 梁文举, 姚鹤彬, 何铠岐. 双向地震动输入方法对结构时程分析反应的影响[J]. 建筑结构学报, 2018, 39 (S1): 168-174.
- [17] 杨溥, 李英民, 赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J]. 土木工程学报, 2000 (06): 33-37.