

陈竣, 罗凡. 地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复性模拟研究[J]. 地震工程学报, 2019, 41(3): 568-573. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.568

CHEN Jun, LUO Fan. Simulation of the Resilience of Reinforced Concrete Frame Structures after Earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 568-573. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.568

地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复性模拟研究

陈竣¹, 罗凡²

(1. 武汉职业技术学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074)

摘要: 钢筋混凝土框架结构在地震冲击后, 其刚度退化特性复杂, 存在模拟时结果失真明显的问题。为此, 在考虑刚度退化规律的基础上进行分析模拟, 研究地震冲击下钢筋混凝土框架结构的恢复性。提取地震作用下钢筋混凝土框架结构滞回曲线, 通过有限元分析获取不同的特征点, 形成恢复力模型的骨架曲线; 依据恢复力模型骨架曲线和刚度退化规律, 构建滞回曲线, 模拟地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复过程。在模拟的钢筋混凝土框架结构恢复实验中, 层间位移结果低于 5 mm、层间绝对加速度和柱底抬升结果的误差均低于 0.1 mm; 模拟得到结构的弯矩缝隙都能够实现闭合, 钢筋混凝土结构未出现屈服现象, 说明模拟的结果较好。

关键词: 地震; 钢筋混凝土; 框架结构; 恢复性; 模拟; 骨架曲线; 刚度退化

中图分类号: TU392.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)03-0568-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.568

Simulation of the Resilience of Reinforced Concrete Frame Structures after Earthquake

CHEN Jun¹, LUO Fan²

(1. Wuhan Polytechnic, Wuhan 430074, Hubei, China;

2. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: After an earthquake shock, reinforced concrete frame structures feature complex stiffness degradation, and the simulation results are considerably distorted. Therefore, analysis and simulation were performed considering the stiffness degradation law to study the resilience of a reinforced concrete frame structure under earthquake impact. The hysteretic curve of the reinforced concrete frame structure under earthquake was extracted, and different characteristic points were obtained via finite element analysis to form the skeleton curve of restoring force model. According to the skeleton curve and stiffness degradation rule of the restoring force model, the hysteretic curve was constructed to simulate the restoration process of the reinforced concrete frame structure after the earthquake. The restoration experiment simulation results of the reinforced concrete frame structure showed that the story drift was less than 5 mm, and the errors of absolute story acceleration and column bottom lifting were both less than 0.1 mm. The bending moment gap could be closed, and there was no yield phenomenon in the structure, indicating

收稿日期: 2018-05-11

基金项目: 国家自然科学基金 (51508212)

第一作者简介: 陈竣 (1976—), 男, 湖北武汉人, 副教授, 研究方向: 结构工程。E-mail: cjjinji@126.com。

通信作者: 罗凡 (1975—), 男, 湖北武汉人, 博士, 讲师, 研究方向: 土木工程。

that the simulation results are reasonable.

Keywords: earthquake; reinforced concrete; frame structure; resilience; simulation; skeleton curve; stiffness degradation

0 引言

强烈地震冲击下,钢筋混凝土框架结构反应在一定程度时处于弹塑性阶段,此时自振特性消失^[1]。地震作用后对钢筋混凝土框架结构的恢复力进行研究对结构的抗震性具有十分重要的意义。恢复力的定义为钢筋混凝土框架结构受循环荷载作用发生变形时,意欲恢复未变形状态的抗力。恢复力同变形间的关联性曲线称作恢复性曲线^[2]。结构构件承受的荷载同结构构件变形之间的数学关系被称为恢复力模型^[3],通过恢复力模型能够全面分析结构构件的力学特性,为分析钢筋混凝土框架结构弹塑性提供基础^[4]。

研究地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复性时,通常通过变换截面尺寸来研究低周反复荷载作用下混凝土梁的滞回曲线和骨架曲线,得到混凝土梁的恢复力模型;或通过试验拟合法得到了无量纲化的骨架曲线,结合卸载刚度退化规律以及滞回规则建立新型节点的恢复力模型。然而一般的恢复力模型没有考虑刚度退化规律和方向问题^[5],因此,对于此研究模拟得到的结果准确性较差。

针对存在的问题,本文设计相关方法,准确模拟地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复过程,更多考虑刚度退化规律和方向问题,这样更能准确研究钢筋混凝土框架结构恢复性能,以期能提高建筑结构抗震性能。

1 地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复力模型的研究

1.1 钢筋混凝土框架结构曲线模拟

地震对钢筋混凝土框架结构冲击后,可结合有限元方法提取滞回曲线不同的特征点,形成恢复力骨架曲线。柱顶正向极限荷载和负向极限荷载分别用 $+M_u$ 和 $-M_u$ 描述,两者对应的位移分别描述为 $+L_u$ 和 $-L_u$ 。 M_y 和 L_y 代表标准化后的负载和位移, M_m 和 L_m 表示带约束条件的负载和位移。对骨架曲线特征点的部分情况分析可得,当钢筋混凝土框架结构分别处于未屈服、屈服与极限荷载之间和达到极限荷载的条件下,特征点分布的情况分别为:离散性较高、密集度较高、离散性较高。根据特征点分布的规律,骨架曲线选取屈服点与极限荷载点作为控制点的三折线。

表 1 恢复力模型特征点模拟值

Table 1 Simulated values of characteristic points in restoring force model

加载方向		正向	反向
屈服阶段	极限荷载/kN	540.481	-563.284
	位移/mm	10.837	-12.948
强化阶段	极限荷载/kN	781.736	-816.408
	位移/mm	124.429	-128.907
破坏阶段	极限荷载/kN	743.701	-772.836
	位移/mm	160.047	-181.853

表 1 中描述的是恢复力模型特征点的模拟值,在此基础上,进行回归分析时选取的控制点分别为无量纲点 $\left(\frac{-M_m}{-M_u}, \frac{-L_m}{-L_u}\right)$ 、 $\left(\frac{-M_u}{|-M_u|}, \frac{-L_u}{|-L_u|}\right)$ 、 $\left(\frac{-M_y}{|-M_u|}, \frac{-L_y}{|-L_u|}\right)$ 、 $(0,0)$ 、 $\left(\frac{+M_y}{+M_u}, \frac{+L_y}{+L_u}\right)$ 、 $\left(\frac{+M_u}{+M_u}, \frac{+L_u}{+L_u}\right)$ 和 $\left(\frac{+M_m}{+M_u}, \frac{+L_m}{+L_u}\right)$,分析邻近点时采用线性回归分析^[6],得到骨架曲线不同线段 $OA \sim OC$,以及其对应的 $OA' \sim OC'$ 的回归方程表达式如下:

$$OA: \frac{M}{+M_u} = 7.859 \frac{L}{+L_u} \tag{1}$$

$$OB: \frac{M}{+M_u} = 0.304 \frac{L}{+L_u} + 0.741 \tag{2}$$

$$OC: \frac{M}{+M_u} = -0.183 \frac{L}{+L_u} + 1.180 \tag{3}$$

$$OA': \frac{M}{|-M_u|} = 6.853 \frac{L}{|-L_u|} \tag{4}$$

$$OB': \frac{M}{|-M_u|} = 0.339 \frac{L}{|-L_u|} - 0.712 \tag{5}$$

$$OC': \frac{M}{|-M_u|} = -0.132 \frac{L}{|-L_u|} - 1.136 \tag{6}$$

其中: M 为均衡约束系数; L 为负荷约束系数;其他数值依据经验数值设定^[7]。根据上述公式,最终获取相应的恢复力模型骨架曲线,如图 1 所示,其中 μ 为位移加载,纵坐标为刚度加载 M_u 。

1.2 基于方向性的恢复力模型中刚度退化规律的研究

受地震冲击作用,随着位移加载的提升,钢筋混凝土框架结构中组件正向加、卸载与负向加、卸载的刚度都存在显著的刚度退化情况,求解结构组件不同级的刚度,能够模拟钢筋混凝土结构体系刚度退

化规律。

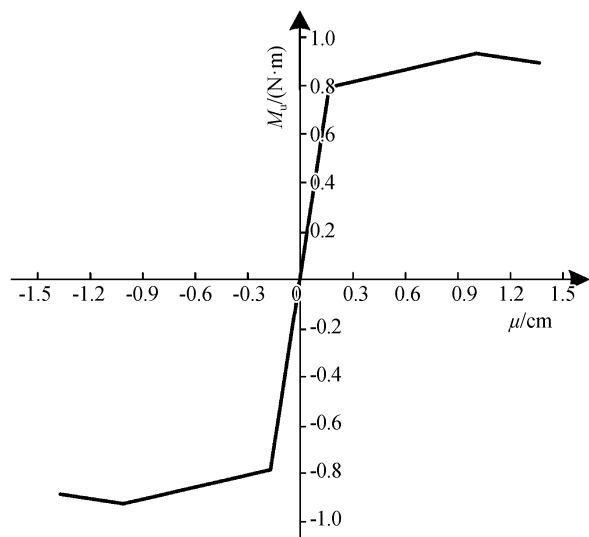


图1 模型骨架曲线

Fig.1 Skeleton curve of model

1.2.1 正向卸载刚度退化模拟

通过正向卸载点同卸载零点间连线的斜率,能够运算出地震作用后钢筋混凝土框架结构正向卸载刚度。用 L/L_u^+ 、 F_1 和 F_0^+ 分别表示正向卸载点规格化坐标、正向卸载刚度和正向曲线初始刚度,采用回归分析方法确定 F_1/F_0^+ 同 L/L_u^+ 间的相关性。计算钢筋混凝土框架结构组件不同级的正向卸载刚度,得到钢筋混凝土框架结构刚度退化模拟曲线。根据该曲线能够得到钢筋混凝土框架结构组件正向卸载刚度同正向初始刚度的比值与规格化坐标间的波动规律存在显著的相关性,通过对数关系表现出递减走向,其模拟相关系数较高,说明其模拟圆满,能够用式(7)模拟正向地震作用后钢筋混凝土框架结构卸载刚度退化情况,其中 R^2 为拟合系数。

$$F_1/F_0^+ = -0.1426 \ln(L/L_u^+) + 0.6791, \quad (7)$$

$$R^2 = 0.9341$$

1.2.2 负向加载刚度退化模拟

通过正向卸载零点同负向加载目的点间连线的斜率运算能够确定负向加载刚度。用 L/L_u^+ 、 F_2 和 F_0^- 分别表示正向卸载零点规格化坐标、负向加载刚度和负向初始刚度,采用回归分析方法能够确定 F_2/F_0^- 同 L/L_u^+ 之间的相关性。通过计算钢筋混凝土框架结构构件不同级的负向加载刚度模拟得到负向加载刚度退化曲线。根据该曲线能够得到钢筋混凝土框架结构构件负向加载刚度同负向初始刚度的比值与规格化坐标间的波动规律存在显著的相关性,通过对数关系表现出递减走向,其模拟相关系数

较高,说明模拟完成,能够用式(8)模拟负向加载刚度退化情况:

$$F_2/F_0^- = -0.1588 \ln(L/L_u^+) + 0.1009, \quad (8)$$

$$R^2 = 0.9404$$

1.2.3 负向卸载刚度退化模拟

通过负向卸载点同卸载零点间连线的斜率运算能够确定负向卸载刚度。用 L/L_u^- 、 F_3 和 F_0^- 分别表示负向卸载点规格化坐标、负向卸载刚度和负向初始刚度,采用回归分析方法能够确定 F_3/F_0^- 同 L/L_u^- 之间的相关性。通过计算钢筋混凝土框架结构构件不同级的负向卸载刚度,模拟得到的负向卸载刚度退化曲线。通过计算钢筋混凝土框架结构构件不同级的负向加载刚度,模拟得到的负向加载刚度退化曲线。根据该曲线能够得到钢筋混凝土框架结构构件负向卸载刚度,进而可以得出负向初始刚度的比值与规格化坐标间的波动规律存在显著的相关性,通过关系表现进行分析得出递减走向,其模拟相关系数较高,说明模拟完成,用式(9)模拟负向卸载刚度退化情况:

$$F_3/F_0^- = -0.1763 \ln(-L/L_u^-) + 0.869, \quad (9)$$

$$R^2 = 0.9207$$

1.2.4 正向加载刚度退化模拟

通过负向卸载零点同正向加载目标点间连线的斜率运算,能够确定正向加载刚度。用 L/L_u^- 、 F_4 和 F_0^+ 分别表示负向卸载零点规格化坐标、正向加载刚度和正向初始刚度,采用回归分析方法能够确定 F_4/F_0^+ 同 L/L_u^- 之间的相关性。通过计算钢筋混凝土框架结构构件不同级的正向加载刚度,模拟得到正向加载刚度退化曲线。根据该曲线能够得到钢筋混凝土框架结构构件正向加载刚度同正向初始刚度的比值与规格化坐标间的波动规律存在显著的相关性,通过对数关系表现出递减走向,模拟相关系数较高,说明模拟圆满,能够用式(10)模拟地震作用后钢筋混凝土框架结构正向加载刚度退化情况:

$$F_4/F_0^+ = -0.1624 \ln(-L/L_u^-) + 0.1238, \quad (10)$$

$$R^2 = 0.9658$$

1.3 恢复力模型的构建

将上两小节中得到的地震作用下恢复力模型骨架曲线和刚度退化规律模拟结果相结合,模拟获取的滞回曲线构建地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复力模型(图2)。由图2能够得到,地震作用下,通过有限元分析模拟的恢复力模型能够体现钢筋混凝土框架结构的荷载位移波动规律。该模型的详细滞回规则如下:

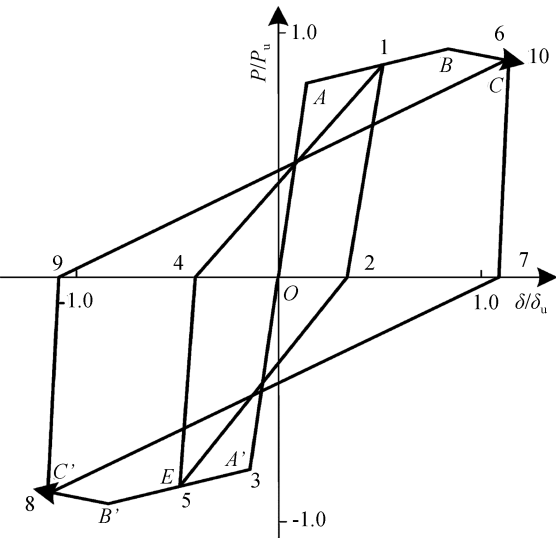


图 2 恢复力模型
Fig.2 Restoring force model

模型选取无量纲坐标,模型的 $OA(OA')$ 表示正(负)向弹性段, $AB(A'BA')$ 表示正(负)向强化段, $BC(BA'CA')$ 表示正(负)向极限荷载后的损毁段。在弹性段卸载时,卸载以 AO 为路径回归原点。在加载达到屈服强度上限 $+M_y$ 后,曲线向强化阶段 AB 转移,若将卸载点设置在此阶段内随意点上,卸载将以线路 1-2 为路径,卸载刚度与初始刚度 F_0 基本一致;卸载达到零点时,以线路 2-3 为路径实施负向加载,加载刚度通过式(8)运算得到;当卸载点为 3 的条件下,以线路 3-4 为路径实施卸载,卸载刚度与初始刚度 F_0 基本一致;卸载达到零点时,以 4 点和线路 4-5 为初始点的正向加载路径,正向加载刚度如式(10)。根据该规律循环加载,在损毁段内,正向卸载、负向加载、负向卸载、正向加载的路径为恢复力模型内的 6、7、8、9、10。

2 模拟测试分析

实验在地震反复荷载作用下,分别从时程对比研究和曲线对比研究两方面验证本文方法模拟的地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复性情况,结果如下。

2.1 结构恢复性时程对比研究

实验用 EL Centro^[8]地震波的 NS 方向的分量,其加速度峰值为 0.349g,在这个地震影响作用下从层间位移时程对比、层间绝对加速度时程对比和柱底抬升时程对比三个方向^[9-10]分别模拟结构恢复性情况,结果如图 3~图 5 所示。图中的实线和虚线分别表示实际结构中的情况和本文方法模拟得到的情况。

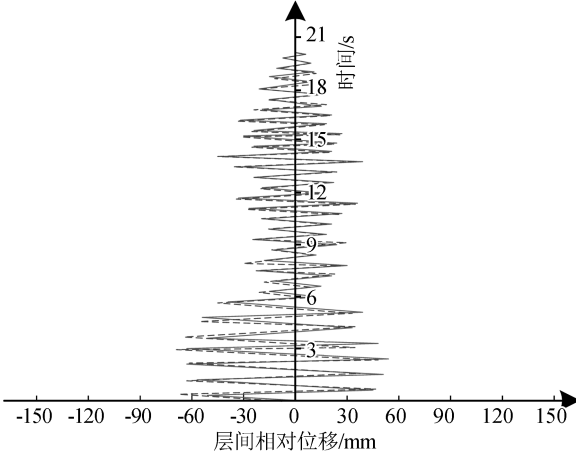


图 3 层间位移时程对比结果
Fig.3 Time-history comparison results of interlayer displacement

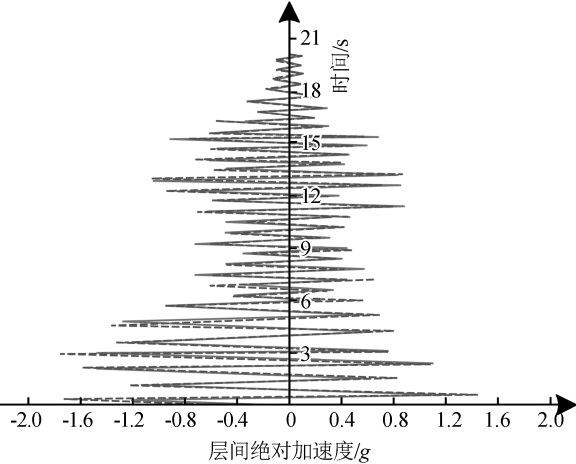


图 4 层间绝对加速度时程对比结果
Fig.4 Time-history comparison of absolute acceleration between layers

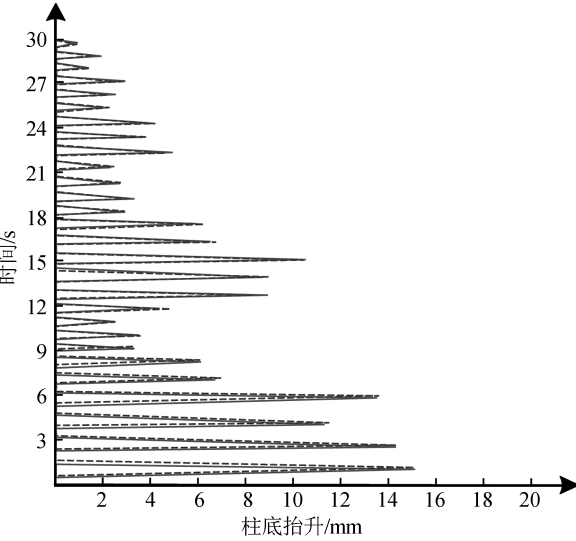


图 5 柱底抬升时程对比结果
Fig.5 Comparison of uplift time histories at the column bottom

分析图 3~图 5 能够得到,在层间位移时程对比中,实际层间位移波动范围为 $-62.8 \sim 57.2$ mm,本文方法模拟得到的层间位移波动范围为 $-66.9 \sim 53.3$ mm;在层间绝对加速度时程对比中,实际层间绝对加速度波动范围为 $-1.74 \sim 1.43g$,本文方法模拟得到的层间绝对加速度波动范围为 $-1.74 \sim 1.42$ mm;在柱底抬升时程对比中,实际柱底抬升波动范围为 $1.17 \sim 15.23$ mm,本文方法模拟得到的柱底抬升波动范围为 $1.18 \sim 15.25$ mm。经实验得到,本文方法模拟得到的层间位移结果、层间绝对加速度结果和柱底抬升结果与实际情况的误差分别低于 5 mm,0.1 mm 和 0.1 mm,说明本文方法模拟地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复性情况于实际情况误差较小,是一种有效的钢筋混凝土框架结构恢复性模拟研究方法。

2.2 结构恢复性曲线对比研究

实验在 El Centro 三向地震波作用下,从弯矩转角曲线、弯矩缝隙宽度曲线和弯矩钢筋混凝土框架应力曲线三个方向^[11-12]分别验证本文方法模拟的结构恢复性情况,结果如图 6~图 8 所示。

分析图 6 可知,在地震作用后钢筋混凝土框架结构最大弹性层间位移角为 $1/250$ 的条件下,本文方法模拟得到的残余层间位移角只有 0.65×10^{-4} rad,在实际应用过程中可忽略。由图 7 可知,当各循环卸载后,本文方法模拟得到的弯矩缝隙都能够实现闭合,表示在卸载过程中钢筋混凝土框架实现了较好的恢复性作用。分析图 8 能够得到,在地震循环加载作用下,本文方法模拟得到的钢筋混凝土结构未出现屈服现象,表示受地震作用后,钢筋混凝土框架不存在断裂威胁,架构安全性较好。本文方

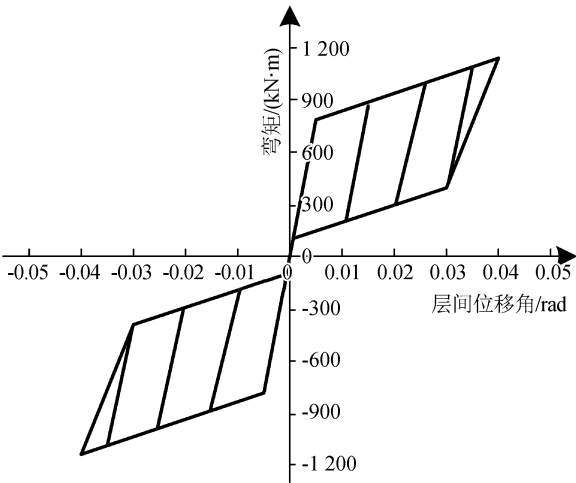


图 6 弯矩转角曲线研究结果

Fig.6 Research results of moment-rotation curves

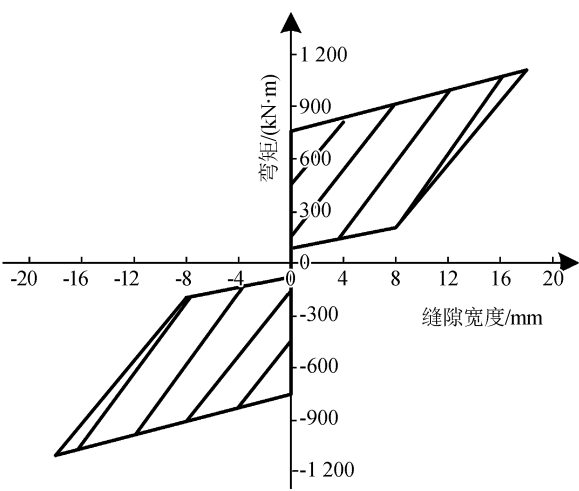


图 7 弯矩缝隙宽度曲线研究结果

Fig.7 The research results of crack width curve of bending moment

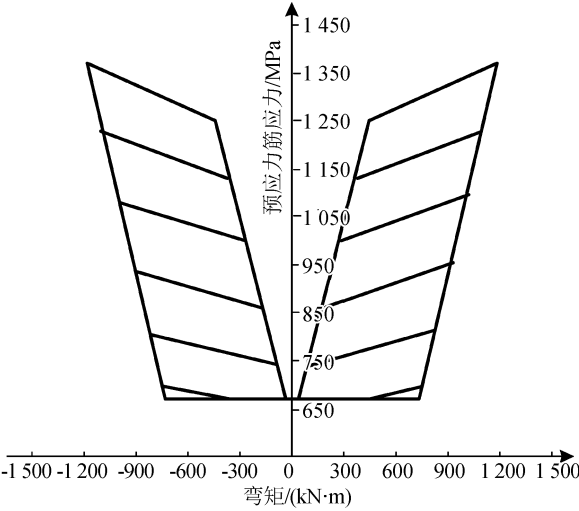


图 8 弯矩钢筋混凝土框架应力曲线研究结果

Fig.8 Research results of stress curve of moment reinforced concrete frame

法模拟地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复性得到的结果显示结构恢复性处于弹性状态,具有较高的抗震性能。

3 结论

采用钢筋混凝土构建的框架结构被称之为钢筋混凝土框架结构,此类型结构是建筑结构中使用的最为广泛的一种。而我国地处地震多发区域,因此研究钢筋混凝土框架结构受地震作用后的恢复性具有重要的意义。本文方法提取地震作用下,钢筋混凝土框架结构用有限元分析的内滞回曲线中不同的特征点,形成恢复力模型的骨架曲线,结合结构中组

件正向加载、卸载与负向加载、卸载的刚度退化情况,得到地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复力模型。实验结果表明:

(1) 本文方法进行地震作用后钢筋混凝土框架结构恢复性时程对比模拟研究得到的层间位移结果、层间绝对加速度结果和柱底抬升结果与实际情况的误差分别低于5 mm,0.1 mm和0.1 mm,误差较小;

(2) 进行结构恢复性曲线对比研究得出,在地震作用后本文方法模拟得到的弯矩缝隙都能够实现闭合,钢筋混凝土结构未出现屈服现象,表示在卸载过程中钢筋混凝土框架实现了较好的恢复性作用,并且钢筋混凝土框架未出现断裂威胁,该钢筋混凝土框架结构恢复性结果显示该结构处于弹性状态,抗震性能高。

(3) 由于受到文章篇幅限制,相关研究没有办法展开说明,另外,没有对其他建筑结构进行测试,该问题为下一步需要重点研究的问题。

鉴于论文篇幅所限,完成时间有限,有关详细的技术环节在此恕不能做更多详述,文中遗漏之处很多,有兴趣的读者可与作者联系讨论,另外作者水平有限,错误肯定难免,望读者给予批评指正。

参考文献(References)

- [1] 鲁亮,江乐,李鸿,等.柱端铰型受控摇摆式钢筋混凝土框架抗震性能的振动台试验研究[J].振动与冲击,2016,35(4):193-198.
LU Liang,JIANG Le,LI Hong,et al.Shaking Table Tests for Aseismic Performance of A Controllable Rocking Reinforced Concrete Frame with Column-End-Hinge Joints[J].Journal of Vibration and Shock,2016,35(4):193-198.
- [2] 骆欢,杜轲,孙景江,等.地震作用下钢筋混凝土框架结构倒塌全过程振动台试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(12):49-56.
LUO Huan,DU Ke,SUN Jingjiang,et al.Shaking Table Test on Complete Collapse Process of RC Frame Structure Subjected to Earthquake[J].Journal of Building Structures,2017,38(12):49-56.
- [3] 徐龙河,樊晓伟,代长顺,等.预压弹簧自恢复耗能支撑受力性能分析与试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(9):142-148.
XU Longhe,FAN Xiaowei,DAI Changshun,et al.Mechanical Behavior Analysis and Experimental Study on Pre-pressed Spring Self-centering Energy Dissipation Brace[J].Journal of Building Structures,2016,37(9):142-148.
- [4] 张鹏,曹瑞丹,邓宇,等.低周反复荷载下CFRP-PCPs复合筋混

- 凝土梁的恢复力模型[J].建筑科学,2016,32(9):19-24.
ZHANG Peng,CAO Ruidan,DENG Yu,et al.Restoring Force Model of CFRP-PCPs Composite Reinforced Concrete Beam under Low Reversed Cyclic Loading[J].Building Science,2016,32(9):19-24.
- [5] 郭健,黄频,冷巧娟,等.方钢管钢骨混凝土柱与钢梁端板螺栓连接节点恢复力模型研究[J].工业建筑,2016,46(7):173-177.
GUO Jian,HUANG Pin,LENG Qiaojuan,et al.Research on Restoring Force Model of Steel-Reinforced Concrete Square Column and Steel Beam Joint with Bolted End-Plate[J].Industrial Construction,2016,46(7):173-177.
 - [6] 刘文洋,李国强.屈曲约束钢板墙-钢筋混凝土框架结构滞回性能试验研究[J].建筑结构学报,2018,39(5):27-35.
LIU Wenyang,LI Guoqiang.Experimental Study on Hysteretic Performance of Reinforced Concrete Frame with Buckling Restrained Steel Plate Shear Wall[J].Journal of Building Structures,2018,39(5):27-35.
 - [7] 王艳云,叶献国,蒋庆,等.基于性能的钢筋混凝土框架结构震后损失评估[J].工程抗震与加固改造,2016,38(5):16-20.
WANG Yanyun,YE Xianguo,JIANG Qing,et al.Performance-based Seismic Loss Assessment in RC Structure[J].Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2016,38(5):16-20.
 - [8] BERTOLINI L,CARSANA M,GASTALDI M,et al.Corrosion Assessment and Restoration Strategies of Reinforced Concrete Buildings of the Cultural Heritage[J].Materials & Corrosion,2015,62(2):146-154.
 - [9] 刘科元,李海滨.地震引起建筑结构损伤可靠性预测仿真[J].计算机仿真,2017,34(1):423-426.
LIU Keyuan,LI Haibin.Prediction and Simulation of Damage Reliability of Building Structure Caused by Earthquake[J].Computer Simulation,2017,34(1):423-426.
 - [10] 张艳霞,张贺昕,刘安然,等.可恢复功能的装配式预应力钢框架性能化设计研究[J].建筑钢结构进展,2017,19(4):1-9.
ZHANG Yanxia,ZHANG Hexin,LIU Anran,et al.Performance-Based Design Research of Resilient Prefabricated Prestressed Steel Frames[J].Progress in Steel Building Structures,2017,19(4):1-9.
 - [11] 徐再楼.混凝土组合剪力墙结构建筑倒塌过程的模拟与防倒塌设计[J].建筑技术,2017,48(1):74-76.
XU Zailou.Simulation and Anti Collapse Design of Concrete Composite Shear Wall Structure[J].Architecture Technology,2017,48(1):74-76.
 - [12] 王朋,史庆轩,王峰,等.罕遇地震作用下型钢混凝土框架-钢筋混凝土核心筒结构耗能及损伤模式研究[J].工业建筑,2015,45(8):91-98.
WANG Peng,SHI Qingxuan,WANG Feng,et al.Study of Mode of Energy Dissipation and Damage of Sre Frame-Rc Core Wall Structures under Strong Earthquake Actions[J].Industrial Construction,2015,45(8):91-98.