



中国工程科技论坛·工程前沿技术  
第九届全国防震减灾工程学术研讨会



# 工程防震减灾

## 新技术、新进展和新应用(下)

New Technology, Development & Application in Engineering for  
Seismic Prevention and Disaster Mitigation

王静峰 任伟新 周 云 黄慎江◎主编

合肥工业大学出版社  
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

# 工程防震减灾新技术、 新进展和新应用(下)

New Technology, Development & Application  
in Engineering for Seismic Prevention  
and Disaster Mitigation

主 编 王静峰 任伟新 周 云 黄慎江  
副主编 王 辉 赵春风 丁兆东

合肥工业大学出版社

## 目 录

## 第一部分:震害调查与分析、震害预测预警和工程地震

|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| 尼泊尔 8.1 级地震自建钢筋混凝土框架结构震害 ..... | 闫培雷 孙柏涛(1)             |
| 农村房屋抗震性能调查                     |                        |
| ——以三河市为例 .....                 | 程宇豪 徐国栋 孙银涛 许立红(7)     |
| RC 框架结构在振动台试验中原型—模型相似性研究       |                        |
| .....                          | 李爽 刘向阳 单思楠 谢礼立(13)     |
| 某钢结构构筑物抗震设防参数研究 .....          | 洪海春 杨伟林 刘琨 彭小波 鄢兆伦(24) |
| 超高层建筑结构最不利地震动的选取方法 .....       | 李奕慧 何政(31)             |
| 结构工程中巨震峰值加速度的探讨 .....          | 姚攀峰 吕大刚(41)            |
| 基于 Pareto 多目标优化的最不利地震动选择 ..... | 叶昆 骆江成(52)             |
| 竖向地震反应谱特征参数的拟合分析 .....         | 齐娟 边晓艳 罗开海(61)         |
| 基于鲁甸主震及余震的地震预警参数与快速震级估算研究      |                        |
| .....                          | 张建经 李鸿杰 唐雅蕾 余宽原(68)    |
| 基于聚类分析的主震最大余震序列的统计特征 .....     | 郑庆涛 赵亚敏 张永庆(77)        |
| 近年大地震中具有双平稳段的强震动:识别及空间分布规律     |                        |
| .....                          | 董银峰 胡莹 林松(87)          |
| 地震预警中基于 HHT 的 P 波震相识别方法研究      |                        |
| .....                          | 唐雅蕾 李鸿杰 陈逸民 张建经(95)    |
| 一族无条件稳定和精度可控的时程积分显式算法 .....    | 李石 杨迪雄(106)            |
| 近断层脉冲型激励下单自由度体系地震响应的量纲分析 ..... | 郭贵强 杨迪雄(115)           |
| 随机地震作用下单自由度线性体系的能量法分析          |                        |
| .....                          | 黄斌 郝良玉 郭文豪 操子晨(124)    |
| 基于 GIS 建立江苏省地震安全性评价数据库 .....   | 王金艳 史燕 侯莹(135)         |
| 地震保险相关的地震灾害数据库指标体系研究 .....     | 景冰冰 李小军 刘辰(143)        |
| 人员密集风险监测及预警机制研究                |                        |
| ——以 2016 年北京地坛庙会为例 .....       | 周京京 刘栋栋(150)           |

## 第二部分:地震地面运动与场地影响、地质灾害防治和地下工程抗震

## 自由场地液化的数值分析及离心机振动台试验验证

- ..... 程前 董瑞 张雷 刘廷峻 景立平 单振东(159)
- 基于 H/V 谱比法的场地分类研究..... 赵万松 耿淑伟(169)
- 场地液化震害定量研究及其应用..... 洪海春 彭小波 毕雪梅(179)
- 土体阻尼形式对地表加速度反应谱的影响 ... 孙强强 薄景山 郭晓云 景立平(189)
- 桩间临空面土体动力破坏的振动台模拟试验..... 王桂林 李念 王明珉(197)
- 重力坝岩基的整体损伤评价方法..... 徐强 陈健云 李静 赵春风(208)
- 不同盾构施工条件下产生地表沉降分析..... 李兵 嵇凤颖(217)
- Winkler 弹性地基上矩形薄板随机振动响应的精确解..... 陈国海 杨迪雄(223)
- 沈阳地铁某换乘站深基坑监测与数值分析..... 李兵 于景春(234)
- 基于静力有限元的地下结构拟静力抗震计算方法研究

- ..... 宾佳 景立平 崔杰 邹炎 张雷(241)
- 软弱夹层对地铁车站结构的地震响应..... 谢继安 靳晓光 李亚勇 吕志涛(250)
- 地铁车站三种拟静力横向抗震设计方法对比分析..... 李新星 陈鸿(258)
- 多维地震波作用下软土场地隧道结构的动力响应分析..... 姜文磊 陈清军(267)
- 考虑上覆水效应的沉管隧道大型振动台模型试验研究

- ..... 程新俊 景立平 崔杰 董瑞 程前(276)
- 强震区管道隧道减震技术研究..... 王帅帅 高波 侯旭丰 张涛(284)

## 第三部分:构件抗震性能与设计方法、震后评估与加固改造

## 圆 CFRP—钢管混凝土压弯构件滞回性能的受力全过程分析

- ..... 王庆利 凌张娜 赵展(291)
- 低速横向冲击下钢管混凝土构件的破坏模式分析
- ..... 吕传伟 刘亮亮 刘菲菲 张纪刚(303)
- 基于纤维模型的强约束 RC 柱抗震性能数值模拟..... 张微敬 赵立苑(311)
- 冷弯薄壁方钢管混凝土柱滞回性能的实验研究..... 张万安 王志滨(321)
- 型钢混凝土巨型柱的受力特点和性能分析研究..... 颜家胜 石建光 王卫锋(329)
- 钢筋混凝土网格式非线性有限元分析..... 张微敬 李瑞平(340)

|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| 保温模块单排配筋再生混凝土剪力墙抗震性能分析        | 周中一 张勇波 曹万林(350)       |
| T 型肋加劲低屈服点薄钢板剪力墙受力行为研究        | 王萌 孙新阳 杨维国(360)        |
| 节点干式连接装配式剪力墙结构的研究             | 徐咏 熊峰(372)             |
| 装配式钢框架预制铸钢节点及其应用研究综述          | 刘铭劼 芦燕 韩庆华(384)        |
| 往复荷载下双层法兰有限元分析及滞回模型           | 薛滨 陈聪 陈勇 郭勇(399)       |
| 钢管混凝土叠合柱—混凝土梁节点滞回性能的有限元分析     | 廖飞宇 赵剑 尧国皇 李永进 韩浩(411) |
| 现浇空心楼盖板柱增强节点抗震性能数值模拟分析        | 庞瑞 刘瑞 倪红梅 党隆基 王玉兰(419) |
| 钢化玻璃板抗火能力的有限元分析               | 梁孟羽 李国华 刘栋栋 李磊(427)    |
| CFRP 加固受火后预应力混凝土空心板的计算方法和参数分析 | 胡克旭 董思卫 王玉珏(435)       |
| 火灾与爆炸荷载作用下轻钢柱的破坏过程及破坏模式数值模拟分析 | 齐宝欣 阎石 钱辉 武行 毕加亮(444)  |
| 光纤布拉格光栅钢筋腐蚀传感器                | 宋世德 张作才 王晓娜(455)       |
| 不同腐蚀环境下锈蚀产物微观形貌的对比分析          | 徐沛 张小刚 陈柳丰(464)        |
| 基于混凝土疲劳本构的疲劳全过程加速算法研究         | 丁兆东(472)               |
| 不锈钢结构抗震性能研究现状与工程应用            | 冯然 沈成栋(482)            |
| 保护层厚度对材料劣化的 RC 桥墩抗震性能影响       | 赵建锋 李洪一 孙伟帅(491)       |
| 加固带裂缝混凝土梁的受力性能试验研究            | 李伟平 穆富江 王激扬 徐世焱(500)   |
| 安徽省游泳馆屋面网架加固分析与处理             | 朱华 沈康(509)             |
| 地下结构工程渗漏及其原因分析                | 李守继 丁敬华 过勇(515)        |
| 既有建筑倒塌原因分析及对策                 | 夏仁宝 马旭新 夏经纬(523)       |

#### 第四部分:结构体系抗震试验、动力分析和设计理论

|                               |                          |
|-------------------------------|--------------------------|
| 预震损程度对加固后框架结构抗震性能的影响分析        | 胡克旭 薛林林 赵志鹏(533)         |
| 位移评价指标在掉层框架结构抗震性能评价中的适用性分析    | 刘立平 刘益舟 李安亮 吴存雄 李英氏(543) |
| 基于 OpenSees 的 PC 框架结构数值分析研究   | 张诚诚 胡梅 张耀庭(552)          |
| 基于 IDA 方法的预压装配式 PC 框架结构抗震性能研究 | 黄慎江 袁忠伟(564)             |

|                                          |                              |
|------------------------------------------|------------------------------|
| 预压装配式 PC 框架不同节点刚度抗连续倒塌 pushover 分析 ..... | 黄慎江 曹蓉(574)                  |
| 不同预制楼梯支座设置下装配式框架结构的动力弹塑性分析 .....         | 王娅蓉 吴韬 金文 刘洋 蔡文兵 程源 晏豫皖(583) |
| 耗能节点钢框架动力特性分析 .....                      | 王燕 陈晓 厉见芬(591)               |
| 某高层工业建筑钢结构气化框架的设计与分析 .....               | 张晓阳 阚雪峰 池祥(602)              |
| 工业建筑抗震关键技术研究 .....                       | 徐建 岳清瑞(615)                  |
| 振动筛一钢框架振动仿真分析 .....                      | 刘成 丁北斗 李贤 胡波(621)            |
| 地下车库结构竖向地震动效应分析 .....                    | 陈清军 渠艳龄(627)                 |
| 低含钢率恢复力模型在超高层结构中的运用 .....                | 古泉 曾志弘 刘轲奇(637)              |
| 不同侧向加载形式下组合结构高层建筑的静力弹塑性分析 .....          | 王占飞 姜丹 刘可 张军涛(648)           |
| 分散筒结构与剪力墙结构动力弹塑性性能对比分析 .....             | 蒋济同 孙斌 杜德润(658)              |
| 罕遇地震下某高层框支剪力墙结构的损伤分析 .....               | 尧国皇 廖飞宇 刘庆林 李永进(666)         |
| 汶川县映秀镇工商所综合楼地震倒塌仿真分析 .....               | 侯杰 冯远 冯中伟 吴小宾 伍庶 吴勇(673)     |
| 大跨空间结构抗连续倒塌性能研究进展 .....                  | 徐颖 韩庆华 张学哲 傅本钊 刘一鸣(681)      |
| 多重四边环索—张弦支屋盖结构静力及地震响应分析 .....            | 余立 张超 刘涛(693)                |
| 考虑土—结构相互作用的风电高塔地震动力响应分析 .....            | 张玉林 戴靠山 毛振西 姚坤良 谢凯旋 李似敬(701) |
| 储液罐抗震问题的研究综述 .....                       | 周俊文 赵 鸣(710)                 |
| 非锚固储罐 .....                              |                              |
| ——液体体系水平地震响应分析 .....                     | 张如林(719)                     |
| 美国核燃料循环设施抗震设计要求研究 .....                  | 赵雷(727)                      |
| 大跨度公铁两用斜拉桥抗震结构体系的选择 .....                | 李龙安 屈爱平 苗润池(734)             |
| 强震下高速铁路多跨简支梁桥破坏分析 .....                  | 国巍 栗云松 胡瑶 Tony Yang(744)     |
| 基于耐震时程法的简支梁桥地震响应分析 .....                 | 沈禹 郭安薪(750)                  |
| 基于碰撞痕迹的混凝土梁桥倒塌过程的还原 .....                | 王兵见 苏伟康 彭卫兵(759)             |
| 重庆某轻轨车站门形墩抗震性能分析 .....                   | 张亮亮 陈果 肖靖航(768)              |

|                                |                     |
|--------------------------------|---------------------|
| 繁华城区地铁车站微振控制爆破安全控制措施研究 .....   | 胡德华 段景川(776)        |
| 多自由度子结构试验的边界解耦控制方法研究 .....     | 李梦宁 周惠蒙 王涛(783)     |
| 时变结构振动响应的时频分析与广义解调分解 .....     | 胡志祥 王飞宇(792)        |
| 基于小波多尺度近似识别框架结构 .....          | 相敏 施袁锋 熊峰(802)      |
| 高层建筑迎风面风驱雨分布预测模型适用性的数值研究 ..... | 胡正生 王辉 孙建平 邓羊晨(811) |
| 高层建筑原型实测测点优化布置方法研究 .....       | 李正农 朱爱民 高鹏(819)     |

## 第五部分:结构减震、隔震和减振技术,可恢复结构

|                                                  |                             |
|--------------------------------------------------|-----------------------------|
| 自复位抗震斜撑系统发展:由 DC-SCB 与 SC-SBRB 至全尺寸二层楼构架实验 ..... | 周中哲 钟秉庭 蔡文璟 陈泽邦 萧佳宏(830)    |
| 纤维包裹约束装配式防屈曲支撑性能分析 ... 贾明明 鲜晓东 吕大刚 陆斌斌(840)      |                             |
| 新型全钢双芯板屈曲约束支撑数值模拟及参数分析 .....                     | 胡宝琳 石文龙 满海 夏文祥(849)         |
| 镁合金减震支撑在 RC 框架中的应用 .....                         | 董银峰 林 松 徐 鹏 胡 莹(858)        |
| 设置屈曲约束支撑的超限高层剪力墙结构的分析与应用探讨 .....                 | 钱礼平 李贝贝 王静峰(866)            |
| 世博博物馆主体结构弹塑性减震研究 .....                           | 赵雪莲 黄永强 包联进 姜文伟 施维(876)     |
| 屈曲约束支撑在高层建筑结构中的应用 .....                          | 岳焱超 尚世力 卢晓明 王雁 邹小亮 王新娣(889) |
| 消能减震弹塑性分析模型建模与模型转换应用 .....                       | 吴晓涵(896)                    |
| 一种新型屈曲约束剪切型金属消能器性能研究 .....                       | 尹文汉 陈亮 王静峰(907)             |
| 新型可更换开缝软钢阻尼器力学性能数值评估 .....                       | 谭焜 郑逸轩 任普 蔡均 王春林(916)       |
| 减震立式 LNG 球罐柱脚用带孔剪切钢板阻尼器性能分析 .....                | 高云鹏 赵鸣(927)                 |
| 可更换耗能梁段偏心支撑框架抗震性能对比分析 .....                      | 何志明 周云(937)                 |
| 双阶屈服耗能钢连梁在框筒结构中的应用研究 .....                       | 陈亮 庞梦德 黄永强(947)             |
| 基于磁流变弹性体的大变形可调频率调谐质量阻尼器 .....                    | 涂建维 朱晨飞 汪伯潮(959)            |



- 摆式电涡流 TMD 合理构造研究..... 汪志昊 郜辉 陈银 张闯(969)
- 基于 TRC 黏弹性阻尼器的高层减震控制研究  
..... 资道铭 陶 旭 袁 涌 梁莹莹 朱元华(980)
- 伸缩缝间隙对大跨斜拉桥与引桥碰撞影响分析 ..... 寇培培 闫聚考 王军文(989)
- 考虑阻尼器作用的大跨桥梁伸缩缝监测及分析 ..... 孙震 张宇峰(1000)
- 底部带屈曲约束支撑和自定心支撑铰支墙抗震性能对比分析  
..... 冯玉龙 吴京 孟少平(1006)
- 基于形状记忆合金的新型自复位耗能装置性能研究 ..... 李然 舒贇平 刘震(1016)
- 一种基于摩擦力处理单出杆 MRD 补偿恢复力的设计方法  
..... 王成 徐赵东 徐业守(1025)
- 隔震体系的特征参数对 AP1000 地震响应影响的研究 ..... 周志光 魏晓冬(1034)
- 高承载力隔震支座力学性能初步研究 ..... 邵帅 王思启 袁涌(1044)
- 一种新型黏弹性材料的性能试验研究及应用实例  
..... 朱元华 陶旭 魏威 袁涌(1055)
- 大跨网架结构基于隔震的地震反应分析 ..... 颜学渊 王秀珠(1062)
- 连续梁桥减隔震方案对比分析 ..... 何敏 陈成 胡锐光 尚静 郑宗平(1076)
- 基于时滞反馈的非线性隔震桥梁的动力响应研究  
..... 彭剑 李禄欣 禹见达 王修勇(1083)
- 乌鲁木齐人民电影院基础隔震加固设计与施工 ..... 李广洲 包霞(1091)
- 浅谈建筑结构的抗震、隔震和消能减震的对比 ..... 肖华宁 盛明勇(1099)
- 屈曲约束支撑在工业建筑中应用 ..... 张 骏(1106)



## 第四部分:结构体系抗震试验、动力分析和设计理论

# 预震损程度对加固后框架结构抗震性能的影响分析

胡克旭<sup>1</sup> 薛林林<sup>1</sup> 赵志鹏<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学结构工程与防灾研究所,上海 200092;

2. 国网山东省电力公司经济技术研究院,山东济南 250021)

**摘 要:**为研究预震损程度对加固结构抗震性能的影响,对不同程度震损后采用自密实混凝土增大截面法加固的二层双向单跨框架结构进行了有限元分析。首先采用 Park-Ang 双指标损伤模型计算震损后钢筋混凝土(RC)框架的损伤,并采用损伤分区的方法以考虑构件不同区域的损伤程度,再在此基础上将材料属性同比折减,利用 OpenSees 有限元软件模拟了震损加固 RC 框架的抗震性能。结果表明,在本文研究的加固条件下,不同损伤程度对加固后框架的抗震性能有一定程度的影响:在同级峰值地震波作用下,损伤程度越大的框架加固后频率越小,而最大加速度响应和最大位移响应越大,累积耗能越快;从整体来看,不同损伤程度框架的各项抗震性能指标随地震烈度的增大发展趋势基本一致,但随着地震烈度增大各指标间的差值也越来越小。

**关键词:**震损;框架;加固;抗震性能;OpenSees;

**中图分类号:**TU375.4 **文献标识码:**A

## 引 言

对震损结构的抗震加固与普通结构的抗震加固有明显区别,普通结构抗震加固是对未损伤结构的性能增强,而震损结构中带有损伤,损伤会影响加固后结构的工作性能,损伤的程度决定震损结构的加固方式和加固效果。同样,对震损加固结构的模拟与普通结构的模拟也很不相同,应在准确把握结构的损伤情况下反映损伤程度对结构性能的影响。所以通过数值模拟研究不同损伤程度对震损加固结构抗震性能的影响对于震损结

基金项目:国家科技支撑计划课题(2009BAJ28B02)

作者简介:胡克旭(1954—),博士,教授,长期从事工程结构抗火性能和抗震加固方法研究;薛林林(1990—),男,硕士,从事工程结构抗震加固方法研究;赵志鹏(1989—),男,硕士,从事工程结构抗震加固方法研究。

构加固就十分的必要。

本文在前期已有试验<sup>[1]</sup>基础上,利用 OpenSees 对不同损伤程度的框架加固后抗震性能进行数值模拟研究,包括频率退化、最大加速度响应、最大位移响应、耗能情况等,为预震损程度如何影响震后加固框架的抗震性能提供参考。

## 1 损伤程度确定方法

加固后的震损 RC 结构工作性能与前期震损破坏程度密切相关。对震损结构的损伤程度却较难直接判断,因此对结构地震损伤进行探讨分析,寻求一种准确且方便可行的量化评定震后结构损伤程度的方法十分重要。目前,国内外普遍做法是对震后结构损伤程度的大小通过损伤指数表达,而损伤指数由损伤模型计算得到,因此合理的损伤模型决定对震损结构或构件损伤计算的准确性。为了符合对地震损伤产生及构件破坏机理的认识,地震损伤模型应同时反映首次超越损伤和累积耗能损伤两种不同的损伤形式。鉴于此,国内外学者提出过许多种同时考虑首次超越损伤和累积耗能损伤的双指标损伤模型<sup>[2,11,12,13]</sup>。

### 1.1 损伤计算

目前,被工程界广泛采用的双指标损伤模型是 Park—Ang 双指标损伤模型<sup>[2]</sup>,也是本文所采用的模型。其中,RC 框架柱、梁损伤指数分别用公式(1)、(2)计算:

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta \frac{E_h}{Q_y \delta_u} \quad (1)$$

$$D = \frac{\varphi_m}{\varphi_u} + \beta \frac{E_h}{M_y \varphi_u} \quad (2)$$

式中:  $\delta_m$  为验期间内柱顶最大位移;  $\varphi_m$  为试验期间内框架梁梁端最大曲率;  $\delta_u$  为框架柱单调推覆情况下极限位移,据 FIB 的研究报告<sup>[3]</sup> 所给经验回归公式计算;  $\varphi_u$  为框架梁纯弯情况下的极限曲率;  $Q_y$  为框架柱的屈服剪力,通过 OpenSees 得到框架柱单调推覆曲线确定出最大承载力  $Q_u$  然后利用 Park 公式法得到  $Q_y$ ;  $\beta$  为耗能因子,根据文献<sup>[4]</sup> 建议,其值取 0.15;  $M_y$  为框架柱的屈服弯矩;  $E_h$  为整个过程中的累积滞回耗能,依据文献<sup>[5]</sup> 按公式(3)求得;

$$E_h = \sum_{i=1}^m \frac{1}{2} [Q(T_i) + Q(T_{i-1})] [X(T_i) - X(T_{i-1})] \quad (3)$$

在得到柱、梁构件的损伤指数后,可通过公式(4)加权计算得到各层和整体结构的损伤指数。

$$D = \sum_{i=1}^n \lambda_i D_i \quad (4)$$

层损伤指数计算时,  $D_i$  是第  $i$  个构件的损伤指数;  $\lambda_i$  是第  $i$  个构件的加权组合系数,通过文献<sup>[6]</sup> 所述采用公式(5) 计算。

$$\lambda_i = \frac{D_i}{\sum D_i} \quad (5)$$

整体结构损伤计算时,  $D_i$  是第  $i$  层的损伤指数;  $\lambda_i$  是第  $i$  层的加权组合系数,通过文

献<sup>[7]</sup>所述采用公式(6)计算。

$$\lambda_i=\frac{N+1-i}{\sum_{j=1}^N(N+1-j)} \tag{6}$$

式中  $N$  为结构总层数。

### 1.2 损伤程度界定

根据文献<sup>[8]</sup>的研究成果, Park—Ang 损伤模型计算的损伤指数对应不同的损伤程度,划分情况见表 1,通过上文计算出 Park—Ang 损伤指数,从而可确定出相应的损伤等级。

表 1 损伤等级与损伤指数对应关系

| 损伤等级 | 轻微损伤               | 中等损伤                     | 严重损伤                     | 倒塌         |
|------|--------------------|--------------------------|--------------------------|------------|
| $D$  | $D \leqslant 0.11$ | $0.11 < D \leqslant 0.4$ | $0.4 < D \leqslant 0.77$ | $D > 0.77$ |

## 2 震损 RC 框架损伤模拟

### 2.1 试验介绍

试验<sup>[1]</sup>以未某抗震设防的单跨二层钢筋混凝土框架结构为原型,设计并制作了一个缩尺比为 1/3 的细石混凝土整体结构模型,试验框架平面尺寸为 3.8m×3.8m,总高度 2.4m,柱距 2.4m。各构件尺寸如表 2 所示。首先进行了预震损模拟地震振动台试验,如图 1 所示。预震损试验选取 El—Centro 波 N—S 分量,加速度峰值从 0.05g 逐级加之 0.35g,每级加速度峰值增加 0.05g。预震损之后,对震损模型进行灌缝加固后,再用粘贴碳纤维布加固梁,用新型自密实混凝土加固材料(灌浆料)放大截面加固柱,加固后柱子截面尺寸为 190mm×190mm。对综合加固后的模型进行了第二次模拟地震振动台试验,如图 2 所示,研究加固后结构的抗震性能。

表 2 构件截面尺寸

|    | 柱(mm <sup>2</sup> ) | 主梁(mm <sup>2</sup> ) | 次梁(mm <sup>2</sup> ) | 板厚(mm) |
|----|---------------------|----------------------|----------------------|--------|
| 二层 | 150×150             | 85×200               | 70×170               | 35     |
| 屋面 | 150×150             | 85×220               | 70×185               | 50     |

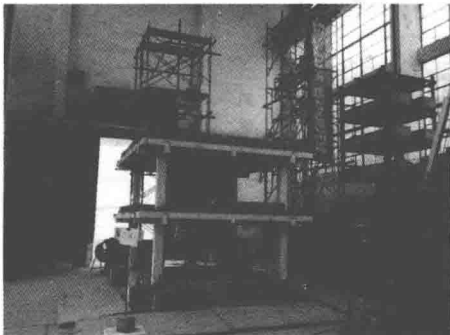


图 1 预震损试验

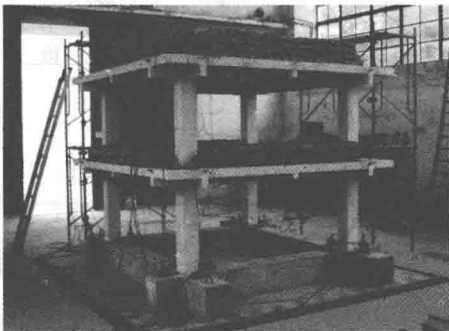


图 2 加固后振动台试验

## 2.2 损伤模拟

在震损加固后 RC 框架的模拟中,采用将材料强度和弹性模量按损伤程度同比折减的方法考虑结构损伤,并通过损伤分区来考虑构件损伤的不均匀性。

由于预震试验对钢筋造成的损伤相对较小,所以此阶段中不考虑钢筋的损伤情况;此外,相对于用自密实混凝土放大柱截面加固和粘贴碳纤维布加固,灌缝加固对模型结构贡献相对较小,在模拟中忽略灌缝加固的影响;实际震害和大量的试验研究都表明,框架梁、柱的破坏往往集中在梁端和柱端区域,根据文献<sup>[9]</sup>将受损后的梁柱构件简化为三段式变刚度杆件模型,如图 3 所示。根据文献<sup>[10]</sup>对于框架结构的梁柱构件端部损伤区长度取值为  $1.5h$ 。



图 3 三段变刚度损伤模型

运用 OpenSees 有限元软件,选取了 Concrete02 和 Steel02 材料模型以及基于力的非线性梁柱单元 (Force — Based Beam — Column Element),对 CFRP 材料亦采用 Concrete02 模型。原试验中混凝土实测强度 20.1MPa,直径为  $\phi 10$ 、 $\phi 8$ 、 $\phi 6$  的钢筋极限强度分别为 398MPa、338MPa、413MPa,新型混凝土加固材料强度 52.8MPa<sup>[1]</sup>。建立有限元模型进行模拟,计算中阻尼采用瑞利阻尼。

图 4、图 5 对比显示震损加固后频率和最大位移响应的模拟结果与试验结果相近,验证了采用的损伤计算方法和提出的损伤考虑方法的准确性和可行性。

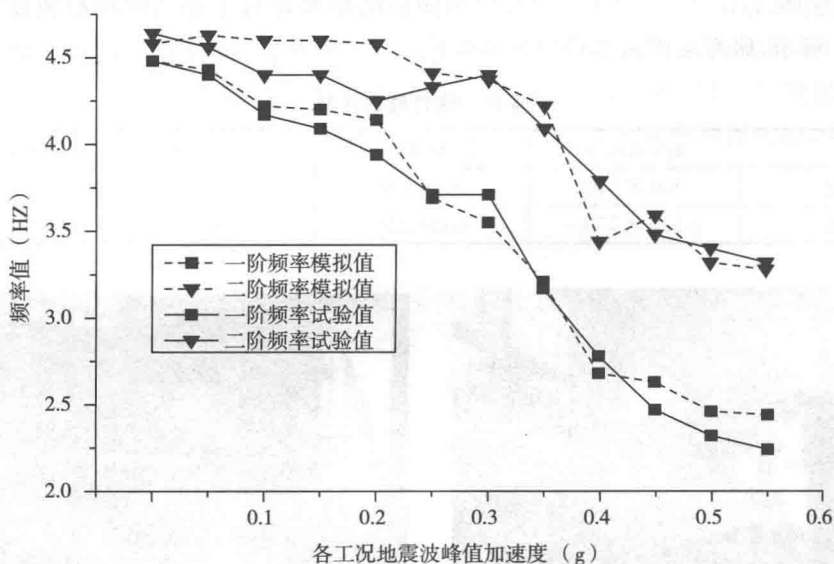


图 4 加固后频率响应对比结果

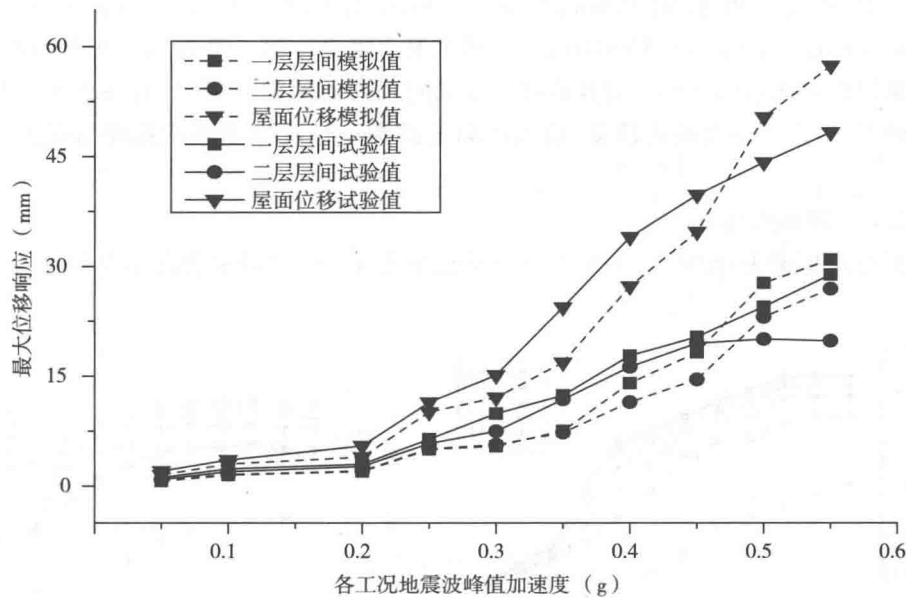


图5 震损加固后最大位移响应对比结果

3 预震损程度对加固框架的抗震性能影响

探究震损程度对加固框架的抗震性能的影响,首先要准确计算不同情况下框架的损伤,在此基础上利用前述数值模拟的方法计算加固后框架的抗震性能,以研究震损程度的影响。

3.1 框架损伤计算

为了便于对比分析,在不同震损程度的加固框架抗震性能分析中,仍采用前文所述试验框架模型<sup>[1]</sup>。为形成不同的震损程度,分别让其经受加速度峰值为0、0.1g、0.2g、0.3g、0.4g与0.5g的El—Centro波,对应各工况的框架模型分别编号为KJ0~KJ5。根据前述损伤程度计算方法,其损伤计算结果如表3所示。根据损伤计算,震损后框架KJ4和框架KJ5已属严重损伤,因框架KJ5损伤值过大,本文中不予加固模拟。

表3 层损伤与整体损伤计算结果

| 项目   | KJ0 | KJ1  | KJ2  | KJ3  | KJ4  | KJ5  |
|------|-----|------|------|------|------|------|
| 一层损伤 | 0   | 0.05 | 0.16 | 0.32 | 0.61 | 0.90 |
| 二层损伤 | 0   | 0.04 | 0.12 | 0.22 | 0.33 | 0.48 |
| 整体损伤 | 0   | 0.04 | 0.15 | 0.28 | 0.52 | 0.76 |
| 损伤程度 | 无损伤 | 轻微损伤 | 中等损伤 | 中等损伤 | 严重损伤 | 严重损伤 |

3.2 震损程度对加固框架抗震性能影响分析

将震损后的框架采用文献<sup>[1]</sup>的加固方法进行加固,加固后框架编号相应为JGKJ0~

JGKJ5。让其经受峰值为 0.05g、0.1g、0.15g、0.2g、0.25g、0.3g、0.35g、0.4g、0.45g、0.50g、0.55g 的一系列 El—Centro 波,不同工况下阻尼比均采用 0.05。另外,设置未受损也未加固的对比框架 KJ\*,对其直接经受相同系列的地震波,然后对各框架模型的频率退化情况、最大加速度响应情况、最大层间位移响应情况以及累积耗能情况进行分析研究。

### 3.2.1 频率退化

震损加固框架 JGKJ0 ~ JGKJ4 以及对比框架 KJ\* 的频率变化情况如图 6 和图 7 所示。

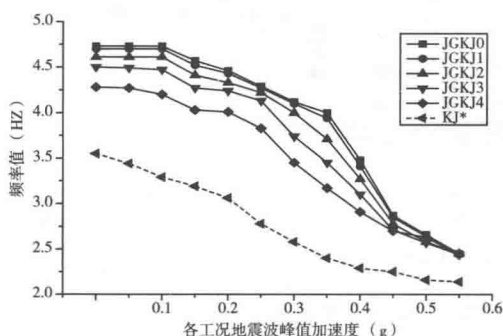


图 6 一阶频率退化情况

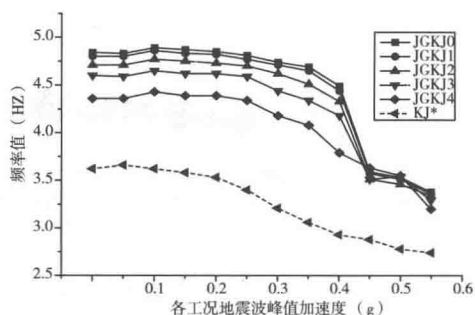


图 7 二阶频率退化情况图

由图 6 和图 7 可以发现:

(1) 不同震损程度框架加固后频率均随地震波峰值增大不断减小;所有框架在经受峰值为 0.4g 地震波时频率衰减加速,出现跳跃。

(2) 不同震损程度加固后的框架的初始频率有很明显的差别,但随着地震峰值的不断增大,各框架的频率差逐渐减小,当地震波峰值达到 0.45g 以后,各框架频率值基本趋于相同;

(3) 不同震损程度加固后的框架的一、二阶频率均较对比框架大,在本文研究的加固条件下震损加固后结构的刚度较对比框架大,从这方面看用自密实砼加固能有效修复框架的抗震性能,并有所提高。

### 3.2.2 最大加速度响应

震损加固框架 JGKJ0 ~ JGKJ4 以及对比框架 KJ\* 的加速度响应变化情况如图 8、9 所示。

由图 8 和图 9 可以看出:

(1) 前期震损程度对加固后框架加速度响应的发展影响不大,总体而言各框架加速度响应均随地震波峰值的增大而增大;相比之下损伤大的框架加速度响应发展在 0.3g 以后减缓,而损伤小的框架在此之后加速度响应发展相对增快,这种现象在屋面加速度响应中表现更为明显。

(2) 不同震损程度框架加固后的加速度响应与对比框架比,在峰值为 0.35g 的地震波之前要小,在此之后相比稍大。从加速度响应方面看在本文的加固条件下,自密实砼

能对震损框架起到有效的加固修复作用,且震损加固后框架在经受峰值为 0.35g 以下的地震波时的抗震性能相较于完好结构有所提高。

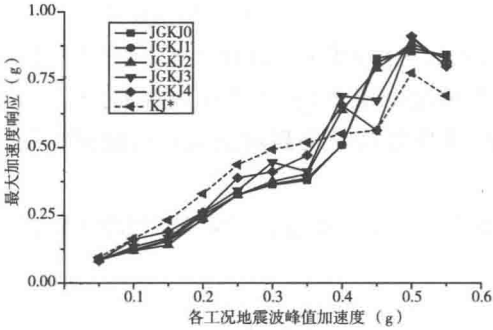


图 8 楼面最大加速度响应情况图

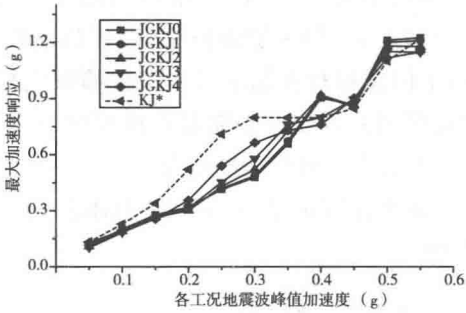


图 9 屋面最大加速度响应情况图

### 3.2.3 最大位移响应情况

震损加固框架 JGKJ0 ~ JGKJ4 以及对比框架 KJ\* 的位移响应变化情况如图 10 ~ 图 12 所示。

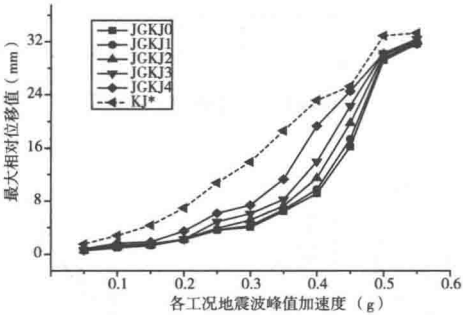


图 10 一层层间位移发展

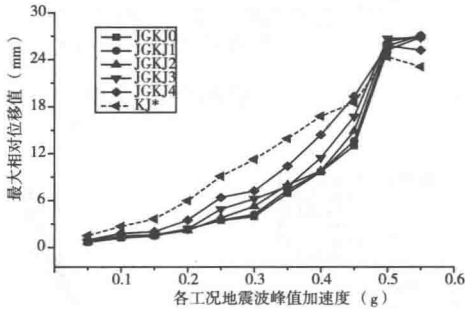


图 11 二层层间位移发展

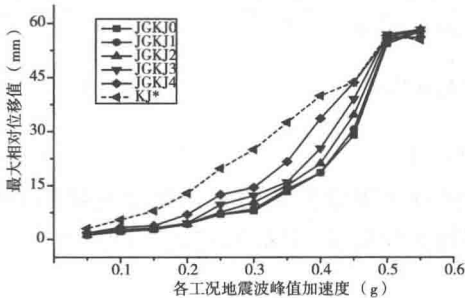


图 12 屋面最大相对位移发展

由图 10 ~ 图 12 可以看出：

(1) 前期震损程度不同对加固后框架位移响应的发展在趋势上影响不大,各震损加固框架位移响应发展均随地震波峰值的不断加大而加快；



(2) 对同级地震波而言,加固后框架的前期震损程度越大位移响应越大;

(3) 前期震损程度不同的框架加固后位移响应差随地震波加速度峰值增大先逐渐变大,而后不断变小,至  $0.5g$  以后趋于相同;

(4) 与未损未加固框架  $KJ^*$  的位移响应相比,在峰值  $0.4g$  (相当于 8 度罕遇地震) 以前,不同震损程度加固后框架位移响应均小于对比框架  $KJ^*$ 。从这方面看,自密实砼放大截面加固震损框架能取得很好的加固效果,能恢复甚至提高震损结构的抗震性能。

### 3.2.4 累积耗能情况

震损加固框架 JGKJ0 ~ JGKJ5 以及对比框架  $KJ^*$  的累计耗能统计结如图 13 ~ 图 16 所示。

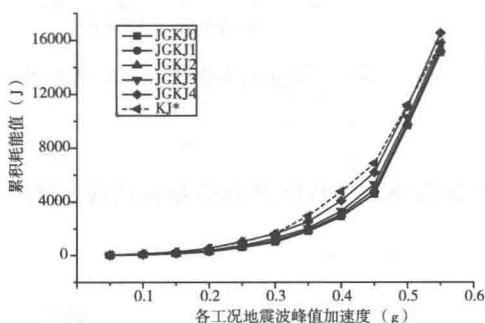


图 13 一层柱耗能发展图

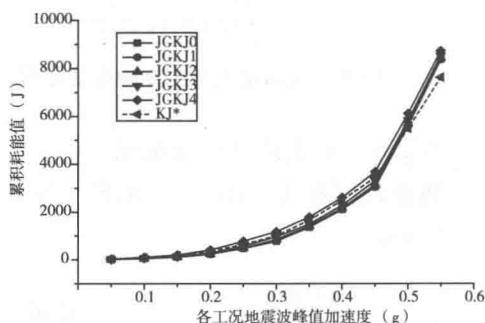


图 14 二层柱耗能发展图

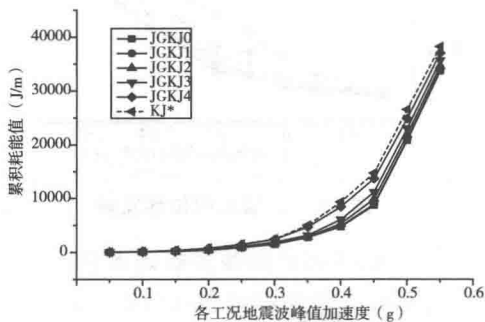


图 15 楼面梁耗能发展图

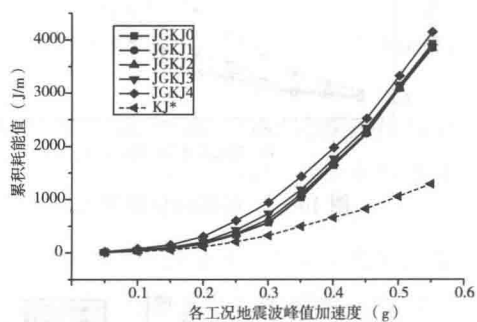


图 16 楼面梁耗能发展图

由图 13 ~ 图 16 可以看出:

(1) 前期震损程度不同对加固后框架的累积耗能发展趋势影响不大,各框架累积耗能增速均随地震烈度不断加大而加快,但前期损伤大的框架加固后其受地震作用时累积耗能相对也大;

(2) 在同级峰值地震波时,与对比框架相比,震损加固框架一层梁柱构件的耗能要小,而二层梁柱构件的耗能要大,使得结构耗能更趋向均匀。

## 4 结 论

通过对不同震损程度的 RC 框架加固后的抗震性能数值模拟,可以得到以下结论。

(1) 不同震损程度对加固后框架的抗震性能有一定程度的影响,在同级峰值地震波作用下震损程度越大的框架频率越小,最大加速度响应越大,最大位移响应越大,累积耗能也越快,但各加固框架的耗能情况差别并不大。

(2) 从整体来看不同震损程度框架的各抗震性能指标随着地震烈度的增大发展趋势基本一致,但随着地震烈度的增大,各指标之间的差值愈来愈小。

(3) 与未损未加固的对比框架相比,震损加固框架频率较大,最大加速度响应较小,最大位移响应较小,耗能结果更合理,说明采用自密实混凝土增大截面加固的框架能够有效加固并提高原结构的抗震性能。

## 参考文献

- [1] 王志明. 新型材料加固震损 RC 框架的振动台试验研究及理论分析[D]. 上海: 同济大学, 2012(Wang Zhiming, Shaking table test study and theoretical analysis of pre-damaged RC frame strengthened with new concrete material[D]. Shanghai: Tongji University, 2012. (in Chinese)).
- [2] Park Y, Ang A H S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering. 1985(No. 4): 722—739.
- [3] Calvi G M, Concrete T G D B. Displacement—based seismic design of reinforced concrete buildings: state-of-the-art report[M]. Internat. Federation for Structural Concrete, 2003.
- [4] 邹挺. 基于 OpenSees 的钢筋混凝土框架结构二维与三维地震损伤分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2010(Zou Ting, 2D and 3D Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Structures Based on OpenSees[D]. Harbin Institute of Technology, 2012(in Chinese)).
- [5] 贲庆国. 钢框架结构地震作用下累积损伤分析及试验研究[D]. 南京工业大学, 2003(Ben Qing Guo, The Analysis Of The Cumulated Damage of Steel Frame Structures Under Earthquakes And The Experiment Study[D]. Nanjing University of Technology, 2003, (in Chinese)).
- [6] 杜修力, 欧进萍. 建筑结构地震破坏评估模型[J]. 世界地震工程. 1991(03): 52—58.
- [7] Chung Y S, Meyer C, Shinozuka M. Modeling of concrete damage. [J]. ACI Structural Journal. 1989: 259—271.
- [8] Williams M S, Sexsmith R G. Seismic Damage Indices for Concrete Structures: A State-of-the-Art Review[J]. Earthquake Spectra. 1995(No. 2): 319—349.
- [9] 李维涛, 鞠杨, 应惠清. RC 框架结构损伤指标研究[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2009(04): 204—207(Li Wei Tao, Ju Yang, Ying Hui Qing. Damage index of RC frame structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology [J]. 2009(04): 204—207(in Chinese)).
- [10] 尹帅锋. 震损加固的 RC 柱和节点拟静力试验数值模拟方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2015(Yin Shuai Feng, Studies on the Approaches of Numerical Simulation for Pseudo—static Test of Strengthened RC Columns and Joints with Earthquake Damage[D]. Shanghai: Tongji University, 2015(in Chinese)).
- [11] 欧进萍, 牛荻涛, 王光远. 多层非线性抗震钢结构的模糊动力可靠性分析与设计[J]. 地震工程与工程振动. 1990(04): 27—37.
- [12] Chai Y H, Romstad K M, Bird S M. Energy—Based Linear Damage Model for High—Intensity Seismic Loading[J]. Journal of Structural Engineering. 1995(No. 5): 857—864.