

# 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及 数值模拟竞赛Ⅲ：模拟结果分析\*

中国建筑学会建筑结构防倒塌专业委员会

[摘要] 为研究汶川地震中钢筋混凝土框架结构震害机理,清华大学开展了钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌的系列试验研究,包括 1 个 3 层 4 跨 RC 框架、2 个关键梁柱节点和 4 个关键框架柱。结合试验举行了相应的数值模拟分析竞赛,并将试验和数值模拟结果全部在互联网上公布,供有关科研和工程人员参考。本文介绍了钢筋混凝土框架柱、节点和整体框架的数值模拟竞赛结果,以及相应的结论和建议。

[关键词] 汶川地震; 框架; 倒塌; 钢筋混凝土; 数值模拟

中图分类号: TU375 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2012)11-0027-04

## Pseudo-static collapse experiments and numerical prediction competition of RC frame structure Ⅲ: simulation results analysis

Collapse Prevention Committee of Architectural Society of China

**Abstract:** In order to investigate the seismic damage mechanism of reinforced concrete (RC) frame structures during the Wenchuan Earthquake, a series of pseudo-static collapse experiments of RC frame structure were carried out by Tsinghua University, including one 3-story-4-span RC frame, two key beam-column joints and four key columns. Numerical prediction competition is also conducted together with the tests. The results of the experiments and numerical simulations are published on the internet, which can be freely downloaded by researchers and engineers. The results of numerical simulation competition for the RC columns, joints and frames are introduced, and corresponding conclusions and suggestions are proposed.

**Keywords:** Wenchuan Earthquake; frame; collapse; reinforced concrete; numerical simulation

### 1 竞赛规则及过程

在完成文 [1] 和文 [2] 介绍的试验后,中国建筑学会建筑结构防倒塌专业委员会在其网站(www.collapse-prevention.net)上公开了:1)全部试验尺寸、构件配筋信息及加载装置信息;2)全部材性试验结果(混凝土立方体强度、钢筋的弹性模量和强度等);3)全部试验的竖向轴力及加载点的位移记录。

邀请有关科研人员参与预测加载点的作用力,根据预测得到的作用力与试验实测作用力的对比,确定竞赛的优胜者。之所以采用公布加载点位移、预测作用力的竞赛规则,主要是为了便于在数值分析中采用位移加载,使不同参赛者的计算结果具有更好的可比性。

整个竞赛的流程如表 1 所示。竞赛组织方在试验设计阶段就发现,底层框架柱的滞回行为对整体框架结构受力行为的影响很大。因此,在竞赛流程上首先完成钢筋混凝土框架柱的竞赛,这样便于参赛者根据钢筋混凝土框架柱的分析结果与试验结果的对比修正模型,更好地预测整体框架试验结果。由于清华大学实验室试验安排等原因,梁柱节点试验晚于整体框架倒塌试验,故大部分整体框架试验模拟结果未对节点区进行专门考虑。三轮竞赛共收

到 72 组参赛结果,参赛选手来自国内外 17 所高校及 5 所设计/科研机构。

竞赛流程

表 1

进程	框架柱滞回分析竞赛	节点滞回分析竞赛	整体框架倒塌分析竞赛
试验结果发布	2011. 6. 28	2011. 10. 22	2011. 7. 20
提交分析结果	2011. 8. 1 前	2011. 12. 15 前	2011. 11. 1 前
公布全部试验数据	2011. 8. 1	2011. 12. 15	2011. 11. 1
公布获奖名单	2011. 9. 1 前	2012. 1. 1 前	2011. 12. 1 前

### 2 钢筋混凝土框架柱试验预测竞赛结果及分析

到 2011 年 8 月 1 日止,共收到框架柱试验预测 23 个。部分统计数据列于表 2、表 3。

根据中国建筑学会建筑结构防倒塌专业委员会委员投票评选,共选出 10 名优秀奖。得分前 5 名的情况如表 4 所示。从表中可以得到以下结论:

(1) 对于本次试验中以压弯破坏为主的钢筋混凝土框架柱而言,最适合的计算模型为纤维模型,其他模型计算结果都不太好。

(2) 力法纤维梁单元和位移法纤维梁单元分析结果未发现明显差别。

\* 国家自然科学基金项目(90815025,51178249,51178250),国家科技支撑计划课题(2009BAJ28B01),工程院重大咨询项目(2010-ZD-4),教育部新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-10-0528)。

钢筋混凝土框架柱试验预测按模型分类 表 2

序号	模型名称	个数
1	纤维模型	20
2	集中塑性铰模型	1
3	实体模型	2

钢筋混凝土框架柱试验预测按程序分类 表 3

序号	程序名称	个数
1	OpenSEES	11
2	ABAQUS + PQFIBER	1
3	MARC + THUFIBER	2
4	CANNY	2
5	LS-DYNA + XTRACT	1
6	SeismoStruct	2
7	自编纤维模型	1
8	ANSYS + 实体单元	1
9	SARCF	1
10	ABAQUS + 实体单元	1

(3) 对比纤维模型不同参数计算结果可知: 1, 3 象限内滞回曲线强度退化主要受混凝土本构模型及程序大变形  $P-\Delta$  算法影响; 1, 3 象限内再加载曲线主要受钢筋本构模型的影响; 2, 4 象限试验后期负刚度现象主要受程序大变形  $P-\Delta$  算法影响。

各参赛者的详细预测结果及部分计算模型见建筑抗倒塌专业委员会的网站。图 1 为钢筋混凝土框架柱竞赛获第一名的预测结果。

钢筋混凝土框架柱试验预测竞赛获奖作品 表 4

名次	组号	计算模型	计算程序
1	6	纤维模型	MARC + THUFIBER
2	19	纤维模型	OpenSEES
3	16	纤维模型	SeismoStruct
4	14	纤维模型	OpenSEES
5	15	纤维模型	OpenSEES

### 3 整体框架倒塌试验预测竞赛结果及分析

到 2011 年 11 月 1 日止, 共收到整体框架倒塌试验预测结果 30 个。部分统计数据列于表 5, 6。

根据中国建筑学会建筑结构防倒塌专业委员会委员投票评选, 共选出 10 组优秀奖, 5 组鼓励奖。

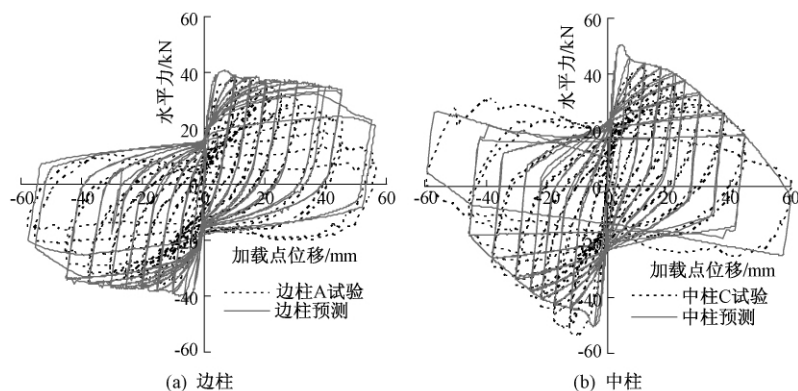


图 1 钢筋混凝土框架柱试验预测竞赛获第一名的结果

整体框架倒塌试验预测按模型分类 表 5

序号	模型名称	个数
1	纤维模型	28
2	集中塑性铰模型	1
3	实体模型	1

整体框架倒塌试验预测按程序分类 表 6

序号	程序名称	个数
1	OpenSEES	18
2	SeismoStruct	3
3	MARC + THUFIBER	2
4	ABAQUS + PQFIBER	1
5	ABAQUS + 实体单元	1
6	ABAQUS + 显式纤维单元	1
7	IDARC	1
8	未知	3

整体框架倒塌试验预测竞赛获奖作品 表 7

名次	组号	计算模型	计算程序
1	20	纤维模型	SeismoStruct
2	2	纤维模型	OpenSEES
3	10	纤维模型	OpenSEES
4	9	纤维模型	MARC + THUFIBER
5	1	纤维模型	SeismoStruct

得分前 5 名的情况如表 7 所示。从表中可以得到以下结论:

(1) 对于本次试验钢筋混凝土框架, 纤维模型仍然是最适合的计算模型。

(2) 力法纤维梁单元和位移法纤维梁单元分析结果未发现明显差别。

(3) 大部分参赛选手都未考虑节点区的破坏, 进而导致预测的峰值位移普遍小于试验峰值位移。但由于框架后期非线性受力行为主要由底层框架柱控制, 故虽然各计算模型中均未考虑节点区破坏, 但整体预测结果仍与试验结果吻合较好(图 2)。

各参赛选手的详细预测结果及部分计算模型见建筑抗倒塌专业委员会的网站。

### 4 钢筋混凝土框架节点试验预测竞赛结果及分析

到 2011 年 12 月 15 日止, 共收到钢筋混凝土框架

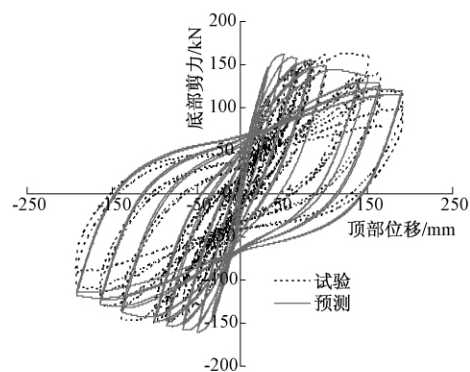


图 2 整体框架倒塌试验预测竞赛第一名的结果

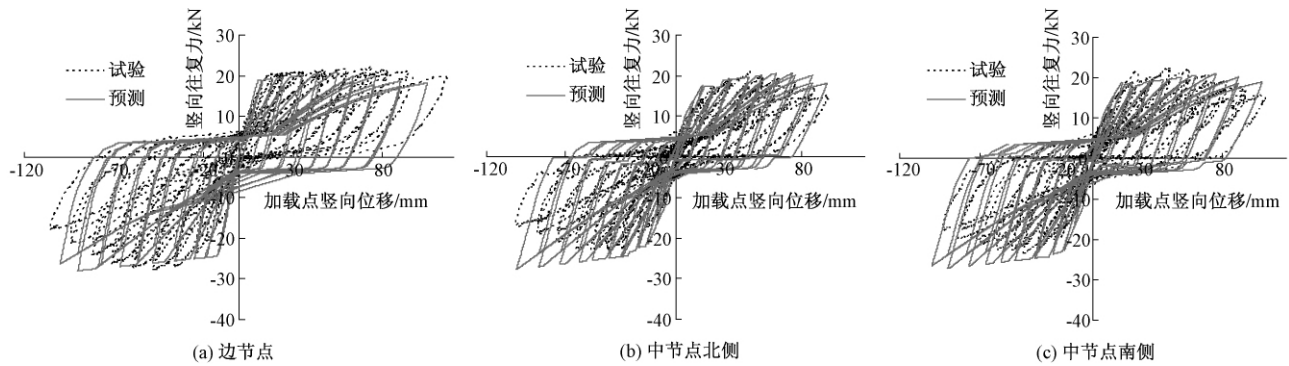


图 3 钢筋混凝土框架节点试验预测竞赛第一名结果

节点试验预测结果 19 个, 部分统计数据列于表 8 9。

钢筋混凝土框架节点试验预测竞赛按模型分类 表 8

序号	模型名称	个数
1	纤维模型	9
2	纤维模型 + 节点区模型	8
3	实体模型	2

钢筋混凝土框架节点试验预测按程序分类 表 9

序号	程序名称	个数
1	OpenSEES	12
2	MARC + THUFIBER	1
3	ABAQUS + PQFIBER	2
4	ABAQUS + 实体单元	2
5	ABAQUS + 自编的显式算法纤维梁模型	1
6	NosaCAD	1

根据中国建筑学会建筑结构防倒塌专业委员会委员投票评选, 共选出 3 组一等奖, 9 组二等奖。得分前 5 名的选手全部采用 OpenSEES 软件, 纤维模型 + 节点区单元 (BeamColumnJoint 单元), 其中获得第一名的预测结果参见图 3。由此可知, 仅采用纤维单元, 无法对节点区的变形进行很好的模拟, 计算结果与节点试验结果差距较大。而整体框架试验却有很多仅采用纤维模型的算例与试验吻合良好, 这一方面说明, 对结构非线性行为的预测需要把握结构的关键受力特征, 对于整体框架而言, 节点区的变形和损伤不是主导因素, 只要把握好了底部框架柱的非线性受力特征, 就能较好的预测其整体受力行为; 另一方面也说明, 本次试验同时开展整体框架的试验和关键节点区的试验有很大的必要性, 否则就无法体现出不同模型在节点区非线性受力行为计算效果上的差异。

各参赛选手的详细预测结果及部分计算模型见建筑抗倒塌专业委员会的网站。

大连理工大学张沛洲等的参赛团队三轮试验预测结果均在前 5 名。

### 5 有关问题讨论

通过上述三轮竞赛结果, 可以总结以下规律:

(1) 对于特定的问题, 有特定适合的计算模型。例如对于钢筋混凝土框架柱, 最合适的计算模型是纤维模型。对于框架节点, 最合适的模型是纤维模型 + 节点区模型。在模型选取适当的情况下, 参数取值合理与否会对计算结果产生一定的影响。但是如果计算模型选取不当, 则无论如何修改参数, 都很难获得满意的计算结果。

(2) 虽然从理论上来说, 实体单元模型是通用性最高、精细程度最好的计算模型, 但实际计算结果却普遍表现不佳, 图 4 所示为采用实体单元预测的整体框架及关键节点的滞回行为, 可见与试验结果

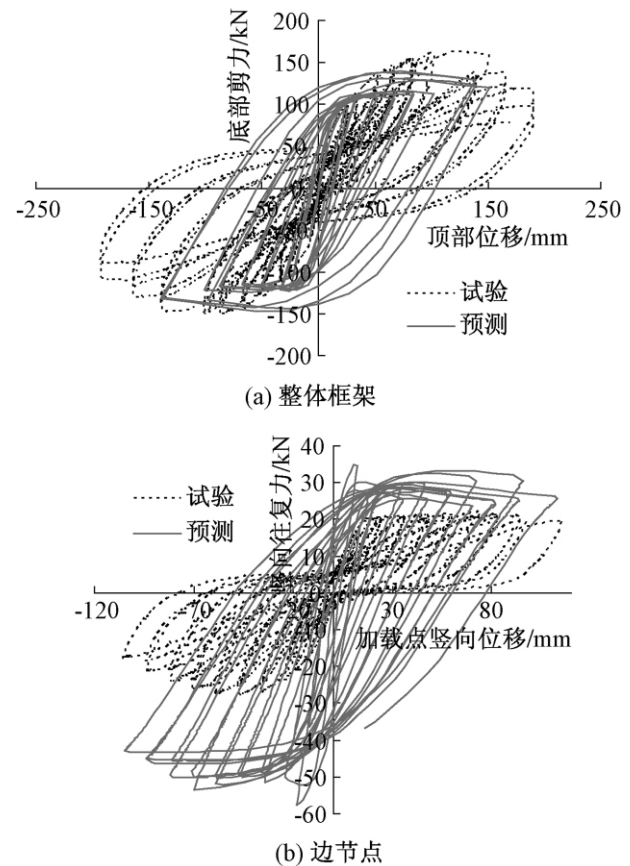


图 4 采用 ABAQUS 实体单元模型预测的结果 (混凝土采用 ABAQUS 损伤本构)

有较大差距。

(3) 同样采用纤维模型,专用于土木工程的计算程序,如 OpenSEES, SeismoStruct, THUFIBER 等,其计算结果相对较好。而部分通用有限元程序虽然也自带了纤维模型,但因其混凝土或钢筋的本构模型不尽合理,其计算效果不能令人满意。

## 6 结论与建议

(1) 目前建筑结构弹塑性地震反应分析以及建筑结构抗地震倒塌分析已经成为科研界和工程界共同关注的热点,但是在计算模型、计算方法、参数取值等方面还有着很多的不同意见和观点,因此迫切需要一个科学的公开平台来进行比较和检验。本次竞赛为检验已有弹塑性分析方法提供了初步探索。

(2) 在这次比赛中,全国科研及设计单位的专业人员通过共同研究,取得了很多共识,有效地促进了结构弹塑性分析理论和方法的发展完善。无论是预测结果较好的参赛作品,还是预测结果不是很好的参赛作品,都是非常有价值的成果,为其他相关研究者开展研究提供了重要参考。特别是赛后部分参赛选手将其分析模型贡献出来,放在防倒塌专业委员会网站上共享,更是为发展建筑弹塑性地震反应

分析提供了宝贵的资料。

(3) 钢筋混凝土结构、构件试验数据量庞大,试验数值模拟非常复杂,传统的纸质媒介已经很难满足科研信息交流的需要,本次竞赛充分发挥网络手段,将试验数据、预测结果、分析模型等在互联网上进行共享,极大方便了研究成果的重利用。期望国内以后有更多类似的结构分析竞赛,进一步利用先进技术工具促进土木工程学科的发展。

(4) 本次竞赛还有很多不足之处,例如:由于实验室条件限制,部分材性试验未能开展(如混凝土单轴抗拉强度试验等);试验采用单榀框架,楼板的贡献考虑得仍较为简单;只考虑了单向水平荷载作用,未考虑地震荷载的空间作用特征等。这些都有待今后进一步发展和改善。

## 参 考 文 献

(上接第 52 页)

## 6 分析结论和建议

通过对某竖向不规则超限高层建筑结构进行了罕遇地震作用下的动力弹塑性分析,可以得出以下结论:

(1) 在大震作用下结构的最大层间位移角小于规范限值,连接部位加强楼板和连体桁架均安全可靠,结构的抗震设计总体合理,满足“大震不倒”的要求。

(2) 钢管混凝土柱、连体结构及裙房屋面的大跨桁架在大震作用下表现为弹性,具有好的抗震性能。

(3) 连体层刚度大,其上下部位的楼层和自身刚度相差明显,成为进入塑性集中的区域,结构存在多个薄弱楼层,弹塑性层间位移大,应采取措施加强相应部位的刚度。

(4) 层 22 及以上主楼扭转反应明显,主要原因为刚度偏心,建议在层 22 及以上增加带状桁架,加强外围框架柱整体性能,减小扭转效应。

## 参 考 文 献

[1] 杨志勇,何若全. 高层钢结构弹塑性抗震分析静动力

[1] 陆新征,叶列平,潘鹏,等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 I: 框架试验[J]. 建筑结构, 2012, 42(11): 19-22, 26.

[2] 陆新征,叶列平,潘鹏,等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 II: 关键构件试验[J]. 建筑结构, 2012, 42(11): 23-26.

综合法[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(3): 25-32.

[2] 张胜,甘明,李华峰. 南京南站钢结构的弹塑性与点多维地震输入分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(12): 79-82.

[3] 邹响,吕西林,钱江. 上海环球金融中心大厦结构抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2006, 27(6): 74-80.

[4] 吕西林,龚治国. 某复杂高层建筑结构弹塑性时程分析及抗震性能评估[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38(5): 593-602.

[5] 焦柯,李松柏,陈润辉. 东莞海德广场双塔连体高层结构动力弹塑性分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(8): 17-19.

[6] 王新,温四清,金波,等. 某超高层建筑主楼结构选型与分析[J]. 建筑结构, 2009, 39(4): 36-39.

[7] JGJ 3—2002 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[8] GB 50010—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.

[9] 王玉琴. 如何在 ANSYS 中实现自定义梁截面[J]. 陕西工学院学报, 2003, 19(2): 68-70.

[10] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 2008 年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.