

第28届
全国结构工程学术会议
论文集

第Ⅲ册

**PROCEEDINGS OF THE 28TH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING**

No. III

主编：陆新征

**《工程力学》杂志社
2019.9**

CSTAM2019-P49

第28届

全国结构工程学术会议

论文集

第Ⅲ册

PROCEEDINGS OF THE 28TH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. III

主编：陆新征



《工程力学》杂志社

2019.9

CSTAM2019-P49

郑重声明

全国结构工程学术会议每年召开一届，并出版论文集，属内部学术交流资料。为了扩大影响，确保作者论文能够得到广泛交流和宣传，便于同行学者及有关部門随时查阅、检索和引用，论文组织委员会每届均作如下的承诺和声明：

1. 会议论文集向全国 70 多个省市（包括港澳台地区）200 多所高等学校图书馆和情报部门免费赠送，总数有 300 多套
2. 为了扩大学术交流，会议论文集被中国有关信息部门及学术期刊光盘版收录。
3. 会议严格执行文责自负的原则。关于涉及保密问题及有关抄袭等学术不端行为，均由作者本人负责。

序

一年一度的全国结构工程学术会议去年在西安度过了它 27 岁生日后，今年在江西南昌召开了第 28 届全国结构工程学术会议。

“江西”得名于唐代设立的“江南西道”，地处“吴头楚尾、粤户闽庭”，怀抱我国第一大淡水湖鄱阳湖，赣江穿省而过，是我国中部的重要省份。从宋代的“中国四大书院之一”白鹿洞书院，到近代的“红色摇篮”，再到近期国际瞩目的“稀土王国”，江西一直在我国的文化、政治、经济上发挥着至关重要的作用。

南昌古称“豫章”、“洪都”，赣江、抚河穿城而过，水系纵横、交通发达，在《滕王阁序》中，获得“物华天宝、人杰地灵”之美誉。在中国近代史上，“八一南昌起义”将“英雄城”的名号永远镌刻在中国历史上。而后，南昌成为我国的重要工业基地和交通枢纽，制造了新中国的第一架飞机，第一辆摩托车、拖拉机，是我国中部重要的政治、经济、文化中心城市。

今年会议的东道主华东交通大学是一所以交通为特色、轨道为核心、多学科协调发展的教学研究型大学，中国铁路总公司与江西省人民政府、国家铁路局与江西省人民政府“双共建”高校。1971 年，国务院、中央军委决定将上海交通大学机车车辆系以及同济大学铁道工程专业并入上海铁道学院，更名为华东交通大学，迁往江西。1978 年，华东交通大学与上海铁道学院各自继续办学。学校原隶属铁道部，2000 年，转制为“中央与地方共建，以地方管理为主”。学校现有 18 个学院，涵盖工、经、管、文、理、法、教育、艺术等 8 个学科门类。拥有 3 个一级学科博士点、21 个一级学科硕士点、4 个国家特色专业、3 个国家级卓越工程师试点专业、2 个国家级科研平台。华东交大持续秉承“日新其德、止于至善”的校训，践行“团结、严谨、求实、勤奋”的校风，近年来在科学研究、人才培养、社会服务等方面都做出了很多重要成果。

在中国力学学会结构工程专业委员会、华东交通大学、《工程力学》编辑部等单位的共同努力下，本次会议得到了广大与会代表的大力支持。论文集共征集到论文 216 篇，涵盖了包括土木工程、水利工程、机械工程、航空航天工程等诸多领域。相信各位与会代表一定可以在本次会议上得到丰富的收获。

论文集主编 陆新征



2019 年 9 月

第 28 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 216 篇，共计 1484 页，分装成 3 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II 册和第 III 册只载本册目录。

第 I 册论文 65 篇（共 486 页），包括特邀报告和三个学科类别：特邀报告；**1. 力学分析与计算；2. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构**

第 II 册论文 74 篇（共 494 页），包括三个学科类别：**3. 公路、铁路、桥梁、水工与港工；4. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构；5. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定**

第 III 册论文 77 篇（共 504 页），包括三个学科类别：**6. 钢筋混凝土结构、材料与构件；7. 钢结构、材料与构件；8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析；9. 新材料、新能源、交叉学科及其他。**

第 28 届全国结构工程学术会议论文集目录

第Ⅲ册目录

6. 钢筋混凝土结构、材料与构件

- 基于边柱和角柱失效的钢筋混凝土板柱结构连续倒塌性能分析研究.....
..... 卜 杰 胡其高 张凡榛 苏智博 (001)
- 氯盐侵蚀后钢筋与钢纤维混凝土间的静动态粘结性能试验..... 陈 辉 张劲帆 汪一帆 周真恒 (008)
- GRC 网格布与聚丙烯砵复合加固短圆柱试验研究 陈思程 黄海林 言 兴 张明亮 (014)
- 楼板模型对内廊式对称普通 RC 框架及改进结构 Pushover 分析结果的影响.....
..... 陈治茂 蒋友宝 吴林华 周 浩 付 涛 (021)
- 高韧性纤维混凝土框架柱抗震性能分析 郭 锋 苏 骏 刘健平 (027)
- 荷载上限与疲劳加载次数对疲劳损伤 RC 梁氯扩散性能的影响 华 晴 刁 波 吴洁琼 (034)
- 基于双剪试验的铝合金板-混凝土界面粘结滑移性能研究 黄海林 姜德文 刘光伟 张明亮 (040)
- 合肥离子医学中心主体建筑设计 焦运庆 (049)
- 不同疲劳荷载上限损伤 RC 梁经历氯环境作用后的疲劳性能试验研究
..... 李思琪 刁 波 吴洁琼 (053)
- 不同加载次数疲劳损伤 RC 梁经历氯环境作用后的疲劳性能试验研究
..... 李勇鑫 叶英华 吴洁琼 (060)
- 预埋吊件在陶粒混凝土中拉拔力学性能试验研究..... 孟宪宏 胡智铭 高 迪 郭 凯 (065)
- 超高烟囱的风荷载试验研究 孙一飞 刘庆宽 马文勇 刘小兵 贾娅娅 (072)
- 徐变影响下预制混凝土梁与板组合梁界面滑移与轴向力.....
..... 夏志忠 李 雪 赵 莹 王连广 马语彤 (077)
- 基于正交试验的泡沫混凝土配合比研究
..... 杨范轩 史明辉 牛洋洋 王 垚 姜钧译 张佳璇 尹冠生 (082)

HRB600 级钢筋高强混凝土无腹筋梁受剪试验研究	张建伟 张德利 冯曹杰 曹万林 (088)
基于 Pushover 的无粘结预应力装配式 RC 框架结构抗震性能分析	张娇磊 李 进 李书锋 范香艳 邓 乐 (096)
不同养护条件和龄期下珊瑚混凝土双 K 断裂参数对比试验研究	张贤舜 杨树桐 姚 杰 (102)
型钢套筒浆锚连接受力性能试验研究	赵 鹏 林 峰 (112)
现浇板对 PC 框架梁端抗弯能力影响的研究	郑福聪 肖云峰 卢杰志 张耀庭 刘 勇 (116)
钢-聚乙烯醇混杂纤维混凝土单轴受力应力-应变曲线研究	钟光淳 周 颖 肖 意 (126)
配不锈钢钢筋混凝土梁振动疲劳剩余承载力试验研究	孟宪宏 倪明阳 谷 立 (136)
27SiMn 高强钢板拉伸应力-应变全曲线和破坏形态试验研究	祝小龙 陈 力 郑宇宙 方 秦 (142)

7. 钢结构、材料与构件

蜂窝梁门式刚架抗震性能研究	蔡世勋 毕 然 佟 蕾 贾连光 (153)
不同轴压比下局部加厚 T 型管节点抗冲击有限元研究	丛静岚 曲 慧 叶 卉 (160)
钢框架-嵌挂结合型密肋复合墙板整体性能研究	龚 超 贾明明 刘 信 吕大刚 (165)
混合联肢 PEC 墙滞回性能研究	关凌宇 蒋 路 苏明周 石 韵 周巧玲 徐国军 (172)
预应力 CFRP 板加固钢梁的耐久性研究和展望	郭冬梅 王元清 伊永成 (177)
高强钢焊接箱形截面轴压局部-整体屈曲分析	洪伟健 徐雅琴 袁伟斌 (183)
基于裂纹扩展的 Lamb 波相对非线性参数研究	胡暮平 孙晓丹 何 建 占洋洋 (191)
中空钢管混凝土轴压短柱有限元模拟	计 静 宋占峰 姜 丽 于殿友 杨毛毛 宋化宇 (197)
大跨度人行悬索桥抗风性能研究	姜会民 孙亚松 刘小兵 (201)
高温后 Q355 钢材往复加载试验研究	李 威 陈 昊 王炜涛 (205)
某两层大跨钢连廊隔震设计分析研究	李江宁 (208)
海水锈蚀钢管抗冲击性能数值模拟研究	李鹏飞 曲 慧 寇超楠 (214)
蜂窝梁腹板纯弯作用下屈曲研究	李松伟 贾连光 (219)
自适应葵花型索穹顶结构内力控制试验研究	刘 琦 陆金钰 鲁 梦 (228)
局部腐蚀冷弯薄壁型钢短柱数值分析	聂 彪 徐善华 (232)
腋撑式金属耗能阻尼器试验研究	宋 薇 王 涛 周中一 (236)

波形腹板梁整体稳定性的参数分析	汤 意 裴 升 张 哲 (242)
圆钢管混凝土柱-钢筋桁架组合梁节点抗连续倒塌机理分析	王景玄 李秋颖 杨 永 (247)
建筑结构钢材及其焊缝循环微观损伤模型的韧性参数校正分析	
.....	王元清 关 阳 刘 明 卜宜都 刘希月 顾浩洋 (254)
不同应力状态下 Q235B 钢的韧性断裂性能研究	钟炜辉 李 超 冯孝宾 (269)
大跨度球面网壳结构风压分布规律试验研究	肖 彬 刘庆宽 (278)
带有表面锈坑的钢板断裂机理数值研究	张海江 徐善华 (285)
基于腐蚀钢板表面形貌的三维逆向重建技术研究	张宗星 徐善华 李 柔 (290)
铝合金网壳结构箱型-工字型盘式节点单肢受力性能有限元分析	
.....	王元清 张 颖 张俊光 欧阳元文 (294)
装配式桁架檩条整体受力性能及影响因素分析	钟炜辉 王丽敏 李 慧 潘晓军 (304)

8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

桥梁施工盘扣式脚手架监测系统	陈 睿 陈俊融 覃 浩 孙传孟 赵 鸣 (311)
基于弯曲变形修正的砌体墙抗侧刚度计算模型	郭 猛 李薇薇 贾英杰 (315)
某地下室上浮及顶板局部堆载致使结构破坏的事故分析	黄选明 张新江 黄广华 杨金友 (322)
地震作用下矮塔斜拉桥的动力优化设计	姜亚丽 杨 刚 宋红红 (328)
钢筋混凝土圆柱形状对氯离子扩散及耐久性设计影响研究	
.....	李 攀 谷 音 Giuseppe Carlo Marano (335)
北京某车辆段上盖项目盖上结构方案选型	刘 翔 赵 楠 范 波 (345)
减震格构式刚架的地震易损性分析	刘伟伟 宋孟燕 相 更 丁 敏 (351)
上海游族大厦 1#塔楼结构设计	刘扬明 朱宝麟 (358)
北京新机场温度场实测及结构后浇带施工控制	
.....	潘旦光 付相球 谭晋鹏 鲍占博 段先军 雷素素 (363)
某海外项目中大跨度重力体系的选型与分析	钱方明 扶长生 (370)
准流线型桥梁断面气动力特性的雷诺数效应研究	任若松 梁新华 刘小兵 马文勇 刘庆宽 (374)
UHPC 加固混凝土柱轴压性能研究	舒田宇 谢 剑 杨 丽 (379)

大直径预应力混凝土煤筒仓优化设计	田 磊 曲军彪 (385)
注浆加固预应力混凝土空心板梁抗剪性能试验研究.....	张劲泉 李鹏飞 韦 韩 王 仙 (392)
观光风塔结构设计与研究	张朕磊 杨 军 李 伟 (403)
复杂山区桥位处风场特性试验分析	赵煜程 路起凡 刘小兵 (408)
球形影院建筑抗侧力设计方案对比与研究	庄晓岐 (412)

9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

相对厚度对翼型气动特性的影响研究	高 超 贾娅娅 刘庆宽 (416)
基于改进经验小波变换的非平稳风速多步预测	李 洲 李春祥 (421)
不同叠合面 UHPC 叠合板抗剪承载力研究.....	廉德铭 金凌志 万冬伟 (425)
机器学习支持下利用震后遥感影像的近实时震损预测提升方法研究.....
.....	陆新征 孙楚津 许 镇 曾 翔 (433)
基于电化学-力耦合模型的锂离子电池充电过程中石墨颗粒的应力模拟
.....	梅文昕 王青松 孙金华 (443)
激光辐照过程中材料吸收率的理论研究	钱秋冬 汪庆桃 钱浩勇 (450)
玄武岩纤维增强活性粉末混凝土静、动态性能研究综述.....	沙海洋 柳锦春 (456)
TLP 总体结构强度分析	王世圣 (462)
基于释放法蒸压加气混凝土板内钢筋自应力研究.....	徐春一 武沾青 闫 磊 (467)
汽车内外饰塑料件发展方向的研究	徐亚君 徐爱平 杨全凯 (477)
地震次生坠物情境人员疏散模拟	杨哲飏 谢昭波 陆新征 许 镇 (483)
UHPC 简支梁受弯抗裂试验与计算分析.....	杨振轩 王华阳 曹 霞 (493)
座头鲸胸鳍前缘仿生叶片空气动力学特性研究	张照煌 李魏魏 (500)

基于边柱和角柱失效的钢筋混凝土板柱结构连续倒塌性能分析研究

卜杰¹, 胡其高², *张凡榛¹, 苏智博¹

(1.国防科技大学空天科学学院, 湖南, 长沙 410072; 2.国防科技大学军事基础教育学院, 湖南, 长沙 410072)

摘要: 本文对单层两跨钢筋混凝土板柱结构边柱和角柱失效工况进行了数值模拟分析, 研究了板柱结构的防连续倒塌机制。根据结构发生倒塌破坏的板面均布极限荷载可知, 板柱结构防连续倒塌性能与失效柱位置有关, 中柱失效时结构防连续倒塌能力最强, 边柱次之, 角柱最弱。中柱失效时, 小变形阶段由压薄膜效应以及屈服线承载力提供连续倒塌抗力, 大变形阶段由拉薄膜效应提供连续倒塌抗力; 边柱失效时, 小变形阶段由单向板带拱效应以及屈服线承载力提供连续倒塌抗力, 大变形阶段由单向板内连续钢筋的悬索效应提供结构连续倒塌抗力; 角柱失效时, 小变形阶段由屈服线承载力提供连续倒塌抗力, 大变形阶段无连续倒塌抗力。

关键词: 板柱结构; 边柱和角柱失效; 防连续倒塌; 数值模拟; 压薄膜效应; 拉薄膜效应; 屈服线承载力

ANALYSIS AND RESEARCH ON THE PROGRESSIVE PERFORMANCE COLLAPSE OF PLATE STRUCTURE BASED ON THE FAILURE OF SIDE COLUMN AND CORNER COLUMN

Bu Jie¹, Hu Qigao², *Zhang Fanzhen¹, Su Zhibo¹

(1.College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410072,China;

2.College of Military Education and Training, National University of Defense Technology, Changsha 410072,China)

Abstract: In this paper, numerical simulation of the side and the corner column failure of a single-story two-span reinforced concrete plate structure is carried out. According to the ultimate load uniformly distributed on the slab, the progressive collapse resistance of slab-column structure is related to the position of the failure column. When the middle column fails, the structure has the strongest ability to prevent progressive collapse, followed by the side column and the corner column. When the middle column fails, the progressive collapse resistance is provided by the compressive membrane effect and yield line bearing capacity in small deformation stage, while it is provided by the tensile membrane effect in large deformation stage. When the side column fails, the progressive collapse resistance is provided by the arch effect of the one-way slab and yield line bearing capacity in small deformation stage, while it is provided by the cable effect of continuous reinforcement in the one-way slab in large deformation stage. When the corner column fails, the progressive collapse resistance is provided by yield line bearing capacity in small deformation stage, while there is no progressive collapse

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608525)

通讯作者: 张凡榛 (1982—), 男, 湖南人, 博士, 主要从事结构防连续倒塌研究(zhangfanzhen7@163.com).

作者简介: 卜杰 (1995—), 男, 江苏人, 硕士生, 主要从事防灾减灾与防护工程研究;

胡其高 (1974—), 男, 贵州人, 教授, 硕士生导师, 主要从事防灾减灾与防护工程研究;

苏智博 (1993—), 男, 黑龙江人, 硕士, 主要从事防灾减灾与防护工程研究.

resistance in large deformation stage.

Keywords: plate structure; failure of the side and the corner column; numerical simulation; progressive collapse resistance; the compressive membrane action; the tensile membrane action; yield line bearing capacity

结构的连续倒塌是指在偶然荷载作用下关键构件发生破坏,导致结构整体倒塌或产生与初始破坏不成比例的倒塌^[1]。1865年英国 Ronan Point 公寓倒塌、1995年美国俄亥俄州 Alfred P. Murrah 大楼倒塌、2001年美国世贸中心双塔倒塌^[2-4]等工程灾难的发生,使得结构防连续倒塌研究成为结构工程领域的热点话题。板柱结构因自身结构形式的优点而广泛应用于工程实际。但由于板柱节点易于发生冲切破坏,相较于梁柱结构,板柱结构发生连续倒塌的风险往往更大,因节点冲切破坏导致的连续倒塌事故并不少见^[5-6]。

近年来,学者们对板柱结构防连续倒塌性能及板柱节点冲切破坏特性开展了大量的研究。1979年, Hawkins 和 Mitchell 研究了板柱结构连续倒塌过程中的拉力薄膜效应^[7]。1984年, Mitchell 和 Cook 对板柱结构冲切破坏后的受力状态和变形进行了理论分析,并强调良好的钢筋锚固和拉力膜作用在防止板柱结构连续性倒塌的重要作用^[8]。2001年,马云昌、吕西林等采用塑性极限方法和虚功原理推导出板柱节点抗冲切和抗弯强度相关方程^[9];2012年,张凡榛、易伟建对单层钢筋混凝土板柱结构进行了拟静力倒塌试验,得到了柱失效情况下的结构剩余承载力^[10]。2013年,易伟建等进行了大量板柱节点试验,分析了多种因素对节点抗冲切性能的影响,并研究了冲切破坏后的传力机制——悬挂作用^[11-14]。

目前对于板柱结构连续倒塌性能的研究大多为静力试验研究,而结构的连续倒塌是非线性动力过程,除了材料非线性、大应变、大变形等非线性性应加以考虑,动力效应也应是结构连续倒塌研究的重点内容。本文运用 LS-DYNA 有限元软件,在文献[15]对中柱失效分析的基础上,研究柱失效位置对板柱结构防连续倒塌性能的影响,同时分析结构在不同变形阶段的连续倒塌抗力机制,为板柱结构防连续倒塌设计提供参考。

1 有限元模型建立

1.1 试验介绍

蒋曲翀采用自制脱钩装置模拟支撑柱的突然失效^[16],研究了平面框架在柱突然失效情况下的动力响应过程,试验装置如图 1 所示。试验框架选取中柱作为失效柱,相关参数见表 1。模型框架通过地梁与地脚螺栓固定在实验室地槽上。试验中通过调整滑块高度控制柱失效时间,通过增减砝码调整柱头承受的集中荷载,完成了不同失效时间、不同集中荷载下框架在动载作用下倒塌性能试验。

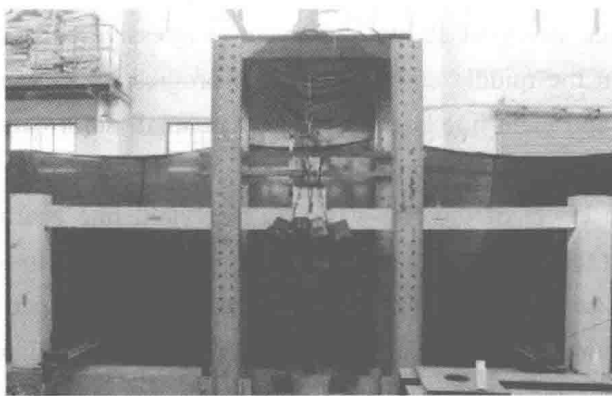


图 1 试验装置

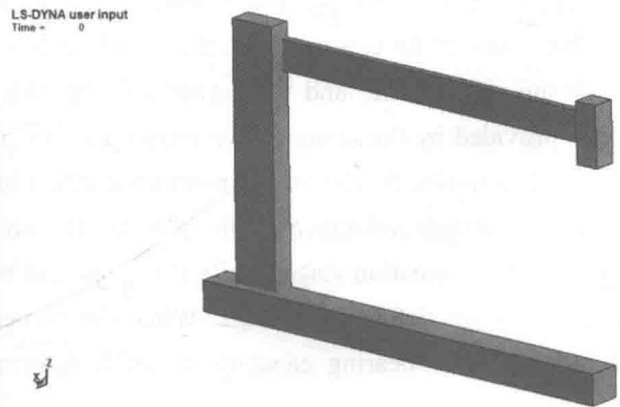


图 2 有限元模型

表 1 试验框架参数

材料	混凝土		纵向钢筋			箍筋		
	强度/MPa	密度/kg·m ⁻³	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	直径/mm
大小	37.2	2500	563	635	8 12	300	420	6

1.2 有限元模型验证

为验证有限元模型，本文运用显示动力分析软件 LS-DYNA，建立钢筋混凝土结构分离式模型，混凝土采用 SOLID164 实体单元，材料选用 MAT_CSCM_CONCRETE 模型，钢筋采用 BEAM161 单元，材料选用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型，通过所选模型自带参数考虑材料应变率效应，建立文献^[16]中一榀框架。为节约计算资源，建立 1/2 模型，如图 2 所示。材料参数根据实验选取，模拟框架在动载作用下的响应过程，并与试验结果进行对比。选取中柱竖向位移、框架水平位移对比数值模拟与实验，结果如图 3 所示。

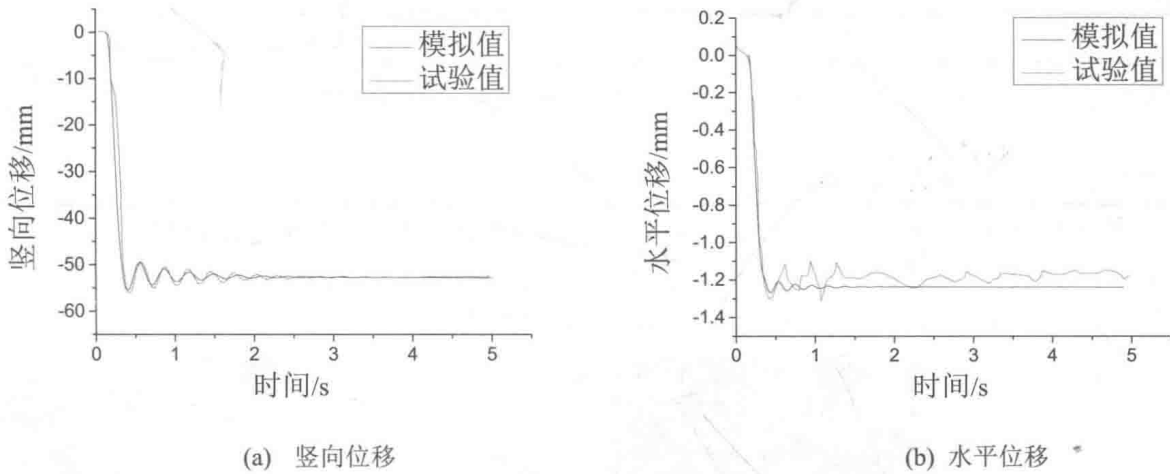


图 3 数值模拟结果与试验结果

由图可知，数值模拟结果与试验结果吻合较好。因此，本文提出的数值模拟方法可以较为准确的模拟钢筋混凝土结构在承重柱突然失效情况下的动力响应。

2 边柱和角柱失效模拟

文献[10]进行了板柱结构中柱、边柱、角柱失效的拟静力倒塌试验。文献[15]采用数值模拟方法，研究了该结构在中柱失效情况下的动力响应。为此本文进一步探究边、角柱突然失效下结构的防连续倒塌性能。对于板柱结构而言，失效柱的瞬间破坏相当于在板上施加相应的冲击荷载 $F(t)$ (式(1)，图 4)，其中 t_1 表示柱的失效时间。在数值模拟中按如图 4 所示荷载曲线对板施加均布荷载，以模拟结构在柱失效过程中的受力，其中荷载大小按试验选取。根据实验建立如图 5 所示边、角柱失效模型。

$$F(t) = \begin{cases} F \cdot \frac{t}{t_1} & (t \leq t_1) \\ F & (t > t_1) \end{cases} \quad (1)$$

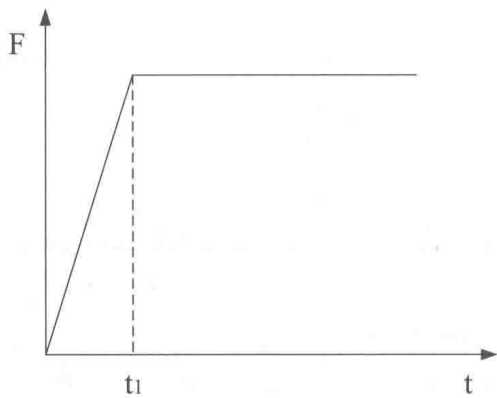


图4 荷载曲线

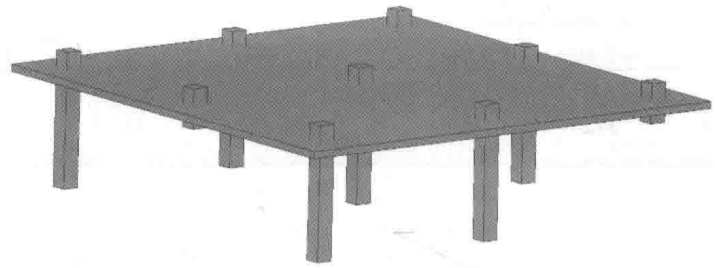


图5 边柱和角柱失效板柱结构有限元模型

文献[16]认为失效时间为剩余结构自振周期的 1/10-1/5 时可以较准确反映剩余结构的最大动力效应，根据无阻尼数值模拟结果发现结构的自振周期约为 100ms，因此边柱和角柱失效时间取 15ms。材料参数如表 2。

表 2 边柱和角柱失效板柱结构材料参数

构件	混凝土		纵向钢筋		箍筋			
	强度/MPa	密度/kg·m ⁻³	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	直径/mm
板柱	35.1	2500	452	589	6.5	300	420	6
					14			

图 6、7 所示为失效时间 15ms 时 10.25kN 对应工况板面与板底塑性应变与文献[10]裂纹对比图。可以看出，动载作用下结构裂纹与静载作用下基本一致。图 8 为失效时间 15ms 时不同荷载对应的边柱位移-时间曲线。图 9 为失效时间 15ms 时不同荷载对应的角柱位移-时间曲线

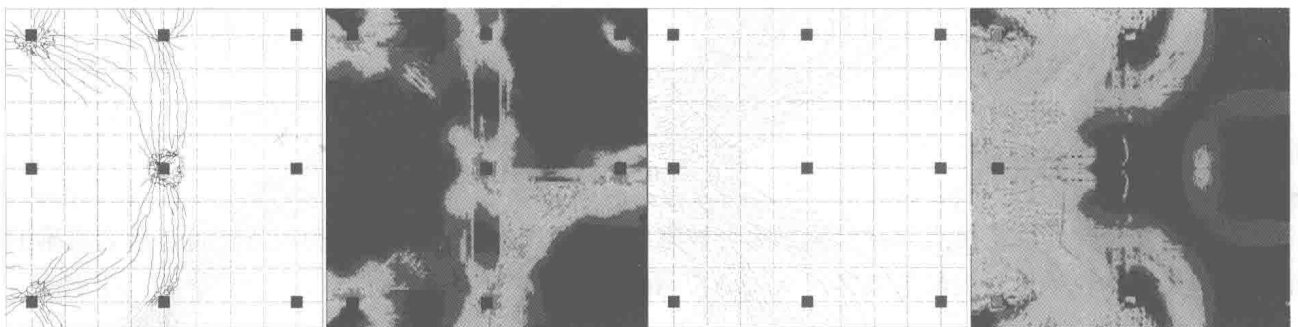


图 6 文献[10]板面裂纹与模拟板面塑性应变

图 7 文献[10]板底裂纹与模拟板底塑性应变

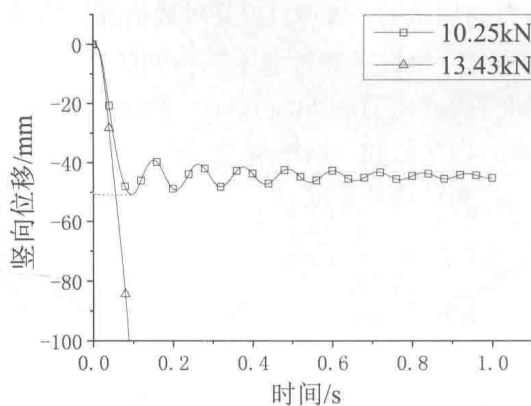


图 8 边柱失效位移-时间曲线

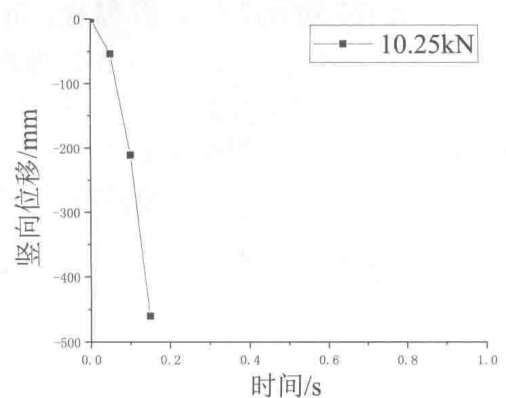


图 9 角柱失效位移-时间曲线

本文中结构倒塌破坏判定标准为失效柱位置的位移不可控制地连续增加。由图 7 可知，边柱失效模型在 1 倍设计荷载作用时并未发生连续倒塌，在 1.31 倍设计荷载作用时发生连续倒塌。由图 8 知，角柱失效模型在 1 倍设计荷载作用下已发生连续倒塌。由文献[15]中柱失效时间为 10ms 和 20ms 数值模拟结果可知，中柱失效时间为 15ms 时模型在 1.47 倍设计荷载作用下并不会发生连续倒塌，1.70 倍设计荷载作用下发生连续倒塌。由中柱、边柱和角柱失效时结构倒塌的极限荷载可以判断，板柱结构不同位置柱失效时其防连续倒塌能力不同，中柱失效时防连续倒塌能力最强，边柱次之，角柱最弱。

3 板柱结构防连续倒塌机制分析

3.1 小变形受力机制分析

对上节中失效时间 15ms 时 10.25kN 荷载对应边柱失效工况进行研究，分析板柱结构防连续倒塌的小变形(结点位移小于跨度的十分之一)受力机制，并比较横向和纵向的板带端部 A、B 点轴力(图 10(c))可以发现，横向板带支撑柱失效导致板两端水平约束不足，轴向力基本为零，而纵向板带两端支撑可提供一定的水平约束，产生压拱作用机制，导致板内产生了较大轴压力。比较 A、B 两点处板端弯矩(图 10(d))可以发现，由于横向板带的抗弯刚度较小，在相同结点位移下，B 点的弯矩小于 A 点，失效柱周边形成屈服绞线提供抗弯承载力(即屈服线承载力)。由此可见，在小变形阶段，由板带压拱效应及屈服线承载力提供连续倒塌抗力。

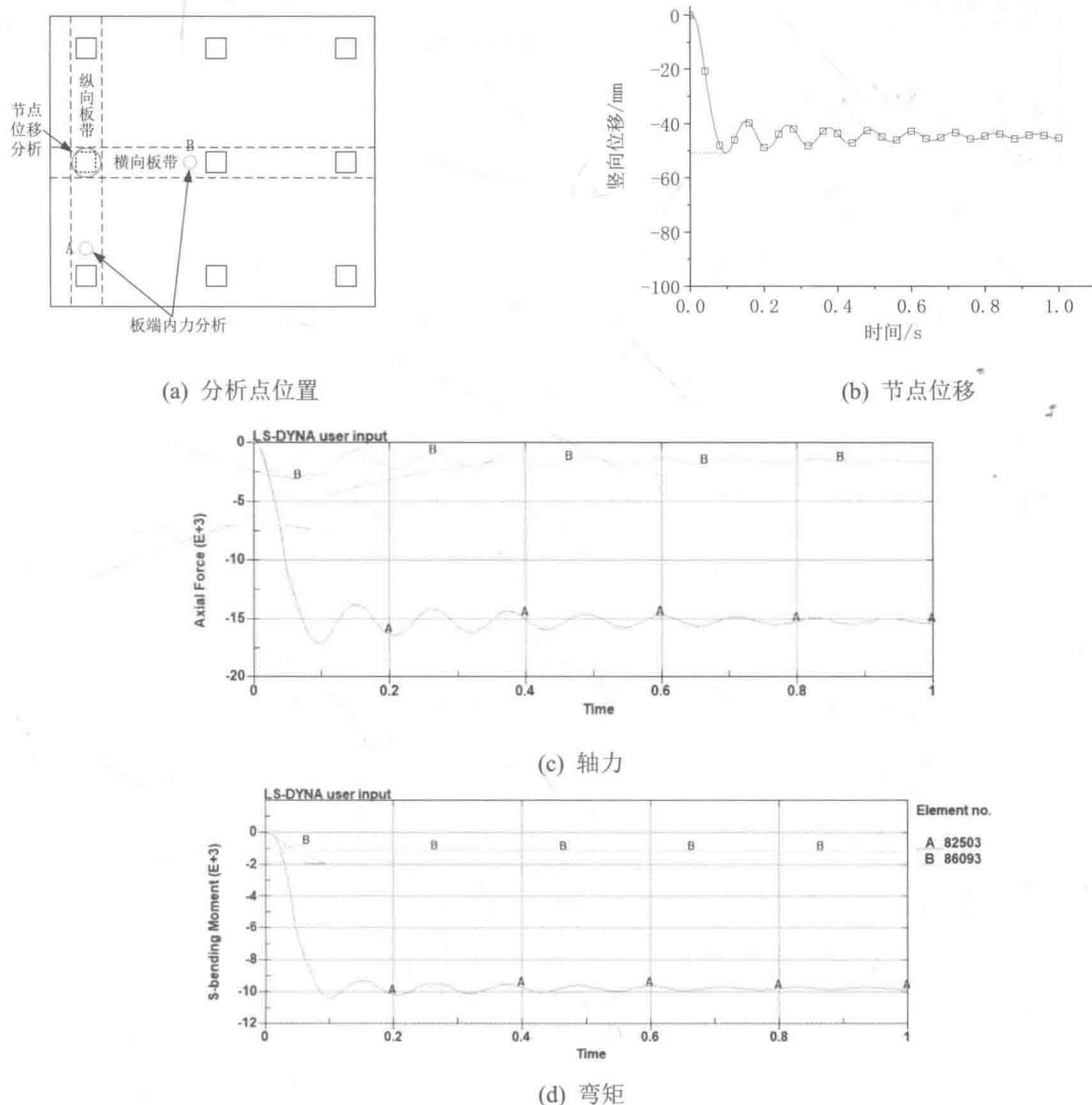
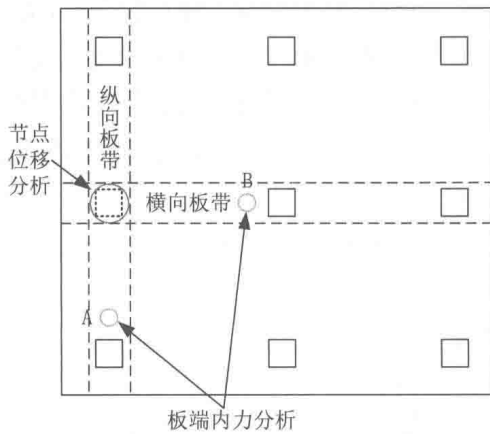


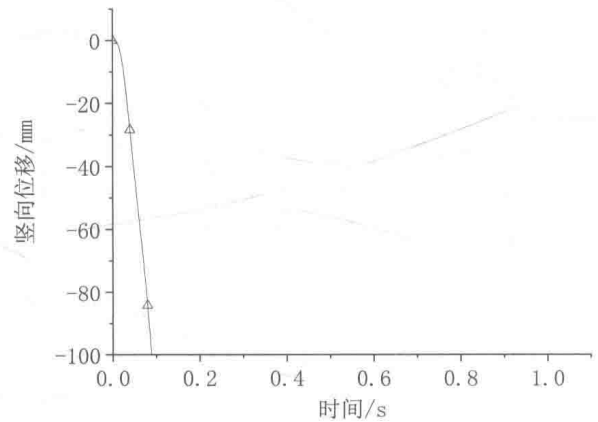
图 10 边柱失效小变形受力机制分析

3.2 大变形受力机制分析

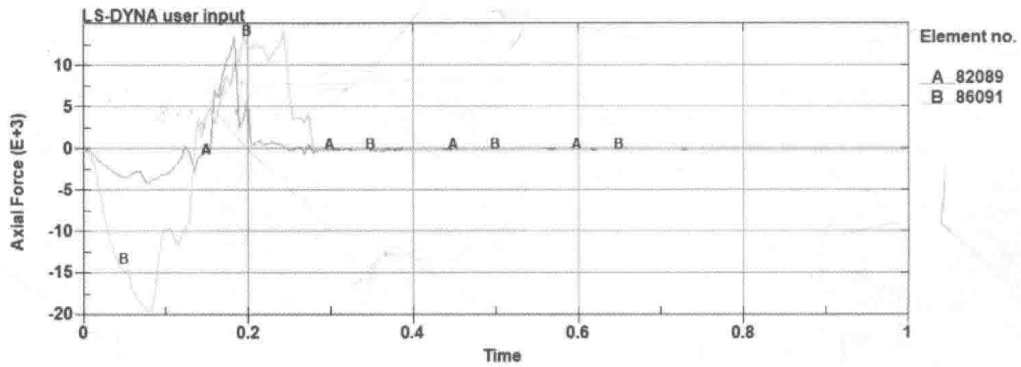
对上节中失效时间 15ms 时 13.43kN 对应边柱失效工况进行研究，分析板柱结构防连续倒塌的大变形受力机制。小变形阶段(0~0.2s)，以板带压拱效应及屈服线承载力提供连续倒塌抗力；当变形较大时(0~0.28s)，板内塑性铰线完全形成，抗弯承载力丧失，纵向板带在两端有良好的水平约束下，通过钢筋内产生的轴向拉力承受荷载，产生了钢筋悬索作用机制。由于结构很快发生倒塌破坏，因此悬索作用时间较短。横向板带虽然在小变形阶段能够提供稳定的抗弯承载力(图 11(d))，但是当变形较大时，横向板带并不能通过轴拉力形成“悬索效应”。这是因为在悬索作用下板带内纵筋产生较大的水平分力，因此需要两端支座提供足够的水平约束。纵向板带两端能够提供有效的支座水平约束，因此在大变形下可以发挥悬索效应；而横向板带只有一端能够提供支座水平约束，而位于结构边缘的支座由于支撑柱的失效，不能提供有效的水平约束作用，所以横向板带不能以悬索效应提供抗连续倒塌承载力。由此可见，在大变形阶段，以板带内连续钢筋形成的悬索效应提供结构连续倒塌抗力。



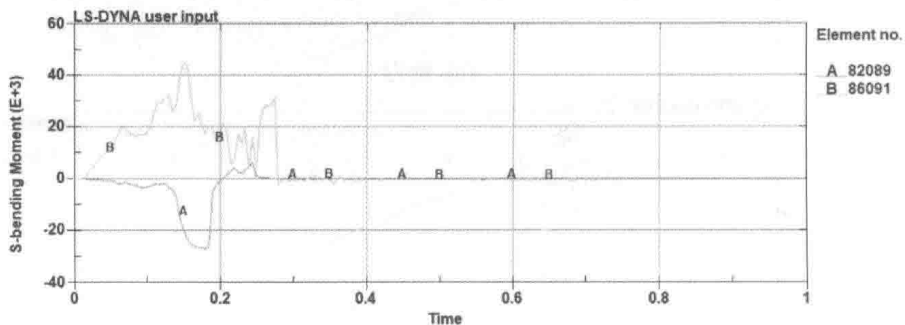
(a) 分析点位置



(b) 节点位移



(c) 轴力



(d) 弯矩

图 11 边柱失效大变形受力机制分析

3.3 对不同位置柱失效的结构倒塌抗力分析

对于中柱失效而言,在小变形阶段,可以通过双向板带的压拱效应(即压薄膜效应)以及屈服线承载力提供连续倒塌抗力;在大变形阶段,可以通过双向板内连续钢筋的悬索效应(即拉薄膜效应)提供连续倒塌抗力。对于边柱失效而言,在小变形阶段,可以通过单向板带的压拱效应以及屈服线承载力提供连续倒塌抗力;在大变形阶段,可以通过单向板内连续钢筋形成的悬索效应提供结构连续倒塌抗力。对于角柱失效而言,在小变形阶段,由屈服线承载力提供连续倒塌抗力;在大变形阶段,板内无法通过连续钢筋形成悬索效应提供连续倒塌抗力。

4 结论

本文对单层两跨钢筋混凝土板柱结构边、角柱失效工况进行了数值模拟研究,得出以下结论:

(1) 柱失效时间 15ms 时,中柱失效模型在 1.70 倍设计荷载作用下发生连续倒塌,边柱失效模型在 1.31 倍设计荷载作用时发生连续倒塌,角柱失效模型在 1 倍设计荷载作用下发生连续倒塌,由此可以判断,板柱结构不同位置柱失效时其防连续倒塌能力不同,中柱失效时结构防连续倒塌能力最强,边柱次之,角柱最弱。

(2) 中柱失效时,小变形阶段由压薄膜效应以及屈服线承载力提供连续倒塌抗力,大变形阶段由拉薄膜效应提供连续倒塌抗力;边柱失效时,小变形阶段由单向板带压拱效应以及屈服线承载力提供连续倒塌抗力,大变形阶段由单向板内连续钢筋悬索效应提供结构连续倒塌抗力;角柱失效时,小变形阶段由屈服线承载力提供连续倒塌抗力,大变形阶段无连续倒塌抗力。

参考文献:

- [1] Pearson, C. and Delatte, N. Ronan Point Apartment Tower Collapse and its Effect on Building Codes. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2005, 19(2):172-177.
- [2] Corley W G, Sr P F M, Sozen M A, et al. The Oklahoma City Bombing: Summary and Recommendations for Multihazard Mitigation[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 1998, 12(3):100-112.
- [3] NIST. The collapse of the World Trade Center towers. Final Rep. NIST, Gaithersburg, Md. 2005.
- [4] 肖岩, 赵禹斌, 李凤武, 等. 钢筋混凝土大比例模型框架角柱突然失效模拟试验研究[J]. *自然灾害学报*, 2013(4):75-81.
- [5] Suzanne King, and Norbert J. Delatte. Collapse of 2000 Commonwealth Avenue: Punching shear case study. *Journal of Performance of constructed facilities*, 2004, 18(1):154-161.
- [6] Yaser MIRZAEI, Post-Punching Behavior of Reinforced Concrete Slabs. Switzerland, 2010, 1-5.
- [7] Mitchell D, Cook W D. Preventing progressive collapse of slab structures. *Journal of Structural Engineering*, 1984, 110(7): 1513-1532.
- [8] Mirzaei Y. Post-punching behavior of reinforced concrete slabs. 2010.
- [9] 马云昌, 吕西林. 钢筋混凝土板柱节点的抗震性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2001, 22(4):49-54.
- [10] 张凡榛. 钢筋混凝土板柱结构抗倒塌性能研究[D]. 湖南大学, 2012.
- [11] 易伟建, 邹品增, 邓清. 柱截面形状对板柱节点受冲切性能影响的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2016(5):87-95.
- [12] 水淼. 板柱结构抗连续倒塌可靠度分析[D]. 湖南大学, 2014.
- [13] 洪枫. 钢筋混凝土板柱节点冲切破坏试验研究[D]. 湖南大学, 2015.
- [14] 洪小滔. 偏载下钢筋混凝土板柱节点冲切破坏试验研究[D]. 湖南大学, 2013.
- [15] Zhibo Su, Fanzhen Zhang and Qigao Hu. Analysis of Dynamic Response of RC Flat Plate Frame's Performance under Dynamic Loads.
- [16] 蒋曲翀. 钢筋混凝土框架结构倒塌过程中动力效应试验研究[D]. 湖南大学, 2014.

氯盐侵蚀后钢筋与钢纤维混凝土间的 静动态粘结性能试验

*陈 辉, 张劲帆, 汪一帆, 周真恒

(温州大学瓯江学院, 温州 325035)

摘 要: 采用外加电流加速氯盐侵蚀方法获得不同锈蚀程度的钢纤维混凝土拉拔试件, 研究了加载速率、氯盐侵蚀程度和钢纤维添加量等因素对锈蚀钢筋与钢纤维混凝土间的静动态粘结性能的影响。实验结果表明, 随着加载速率的增大, 混凝土裂缝开展较静载偏小, 由于材料应变率效应拉拔试件的粘结应力峰值较静载偏高; 随着氯盐侵蚀程度的增加, 钢筋和钢纤维锈损程度增大, 粘结力破坏进一步导致锈蚀钢筋与钢纤维混凝土间的粘结性能退化。随着钢纤维添加量的增加, 拉拔破坏时平均极限粘结强度提高, 破坏模式从劈裂向拔出转变。

关键词: 钢纤维混凝土; 加载速率; 锈蚀钢纤维; 粘结性能

EXPERIMENTAL STUDY ON BOND BEHAVIOR BETWEEN CORRODED STEEL BAR AND CONCRETE UNDER DIFFERENT LOADING RATES

CHEN Hui, ZHANG Jin-fan, WANG Yi-fan, ZHOU Zhen-heng

(Oujiang College, Wenzhou University, Wenzhou 200092, China)

Abstract: The steel fiber reinforced concrete (SFRC) drawing specimens with different corrosion degrees were obtained by accelerating chloride corrosion with applied current. The effects of loading rate, chloride corrosion degree and steel fiber content on the static and dynamic bonding properties between corroded steel bars and SFRC were studied. The experimental results show that with the increase of loading rate, the crack development of concrete is smaller than that of static load, and the peak value of bond stress of pull-out specimens is higher than that of static load because of material strain rate effect; with the increase of chloride salt corrosion, the corrosion degree of steel bar and steel fiber increases, and the bond failure further leads to the degradation of bond performance between corroded steel bar and steel fiber concrete. With the increase of steel fiber content, The average ultimate bond strength increases during pull-out failure, and the failure mode changes from splitting to pull-out.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, loading rate, corroded steel fiber, bond behavior

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51608393); 温州市科技计划项目(S20180003)

通讯作者: 陈 辉(1982—), 男, 山东人, 博士, 副院长, 主要从事混凝土结构耐久性和结构动力冲击研究. (E-mail: chenhui0306@wzu.edu.cn);

作者简介: 张劲帆(1995—), 男, 浙江人, 本科生, 主要从事混凝土结构耐久性研究;

汪一帆(1995—)女, 浙江人, 本科生, 主要从事混凝土结构耐久性研究;

周真恒(1998—)男, 浙江人, 本科生, 主要从事高性能混凝土结构研究。