

**第23届
全国结构工程学术会议
论文集**

第Ⅱ册

**PROCEEDINGS OF THE TWENTY-THIRD NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING**

No. II

主编：陆新征

**《工程力学》杂志社
2014.10**

CSTAM2014-P47

第 23 届

全国结构工程学术会议

中国 甘肃
GANSU CHINA
10.10 ~ 10.12, 2014

主办单位 中国力学学会结构工程专业委员会
兰州理工大学
中国力学学会《工程力学》编委会
清华大学土木工程系
西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心（兰州理工大学）
甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室（兰州理工大学）
水沙科学与水利水电工程国家重点实验室（清华大学）
土木工程安全与耐久教育部重点实验室（清华大学）

学术委员会

主 席 : 袁 驷

委 员 : (按姓氏拼音为序)

陈以一 陈永灿 崔京浩 杜永峰 龚耀清 桂国庆 韩建平 韩林海 金 峰 李宏男
李 慧 李爱群 刘德富 刘宏民 楼梦麟 聂建国 茹继平 石永久 宋二祥 苏先榘
隋允康 孙建恒 王光谦 王怀忠 王全凤 王文达 王晓纯 王秀丽 魏德敏 周新刚
朱彦鹏

组织委员会

主 席 : 芮执元

常务副主席: 韩林海

副 主 席 : 朱彦鹏 韩建平

委 员 : (按姓氏拼音为序)

陈建军 陈瑞三 陈政清 程选生 范 峰 高 波 郝际平 金学松 李建中 李 萍
李英民 李正良 李忠献 陆新征 米海珍 宋 彧 孙柏涛 孙玉萍 汤 伟 武 哲
徐礼华 许占利 杨 华 杨亚政 阎 石 叶康生 曾 攀 张 鑫 张正威 周茗如
周 勇 朱宏平 庄 茁

秘 书 处

秘书长 : 韩建平

副秘书长 : 王文达 周 勇

学术秘书 : 黄丽艳(负责组织论文宣读、排序、分组、评定等学术工作)

秘书组 : (按姓氏拼音为序)

丑亚玲 崔 凯 党 育 董建华 何晴光 李万润 李晓东 梁亚雄 刘云帅 罗维刚
乔宏霞 史艳莉 唐先习 王耀武 项长生 叶帅华 殷占忠 周凤玺 朱前坤等教师
研究生若干

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门随时查阅、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乌鲁木齐渡过了它 22 岁生日后，今年在甘肃兰州召开了第 23 届全国结构工程学术会议。

甘肃因甘州与肃州而得名，是古丝绸之路的锁匙之地和黄金路段，孕育了辉煌悠久的历史 and 灿烂多元的文化。

兰州是甘肃省省会，依黄河而建，自西汉建县以来，一直是我国西部的重要名城。康熙年间成为甘肃省会，乾隆年间又作为陕甘总督衙门驻地，成为我国西北政治、军事重镇。如今的兰州，拥有我国西北地区第一个国家级新区，是西部大开发战略的重要城市。

今年会议的东道主兰州理工大学始于 1919 年创建的甘肃省立工艺学校，1953 年命名为“甘肃工业大学”，2003 年更名为兰州理工大学。学校是国家“中西部高等教育振兴计划”重点建设高校，是“国家大学生创新型实验计划”和教育部“卓越工程师计划”入选高校。学校建有“省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室”、国家级技术转移示范机构、国家级大学科技园等一批重要科学研究平台，承担了多项国家重大科技项目。学校大力弘扬以“艰苦奋斗，自强不息，求真务实，开拓创新”为主要内涵的“红柳精神”，已成为一所工科实力比较雄厚、理科水平不断提高、文科具有一定特色的多学科协调发展的教学研究型理工科大学。

在中国力学学会结构工程专业委员会、兰州理工大学、《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 252 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

陆新征

2014 年 10 月

第 23 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 252 篇，共计 1496 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、第 III 册只载本册目录。

第 I 册论文 75 篇（共 482 页），包括特邀报告和两个学科类别：特邀报告；1. 力学分析与计算；2. 公路、铁路、桥梁、水工与港工

第 II 册论文 91 篇（共 510 页），包括四个学科类别：3. 钢筋混凝土结构、材料与构件；4. 钢结构、材料与构件；5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构；6. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构

第 III 册论文 86 篇（共 504 页），包括三个学科类别：7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；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 23 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 II 册目录

3. 钢筋混凝土结构、材料与构件

钢筋混凝土结构非线性行为的优化计算方法及应用.....	毕继红 关 健 王 剑 逯 鹏 (001)
大跨半钢板混凝土结构的施工模拟与分析	刁梦竹 李 易 闫维明 程小卫 李德月 (008)
波形钢腹板 PC 组合箱梁弯扭复合作用下抗扭强度试验研究.....	
.....	丁 勇 江克斌 林铸明 孙永岗 况 祺 (017)
混凝土桩钻芯法检测有关问题分析	董承全 颜胜才 张佰战 (022)
FRP 加固 RC 圆柱抗剪承载力试验研究	冯远鹏 郭馨艳 黄培彦 邹友林 (025)
高墩大跨混凝土桥梁抗震性能拟动力试验研究	何 福 黄思凝 郭 迅 李保宽 (029)
不同模量纤维活性粉末混凝土的抗弯韧性	贾方方 贺 奎 安明喆 (035)
砌体填充墙 RC 框架基于 FEAP 的微观有限元分析	贾明明 吕大刚 于晓辉 何晓云 (041)
约束混凝土内摩擦角的特性研究	江佳斐 吴宇飞 李奔奔 (047)
采用消能连梁的高层结构地震响应分析	孔子昂 施 唯 王 涛 (052)
类混凝土材料气体渗透率测量方法研究	李 萍 王新征 牛冠毅 杨 伟 (056)
节能复合墙板的有限元分析	李晶晶 刘海宁 侯和涛 周 健 (067)
温度冲击作用下钢管混凝土界面应力响应	李培鹏 任志刚 熊 锐 (074)
钢筋混凝土梁时变变形的概率密度演化	刘蕾蕾 白雪濛 徐腾飞 (080)
高强箍筋约束混凝土柱峰值参数计算方法研究	刘麟玮 谢 剑 (087)
恒载-腐蚀耦合作用下梁劣化性能试验研究	刘伟杰 何世钦 焦安甲 费彩会 (093)
锈蚀钢筋混凝土柱变形性能研究	刘小娟 蒋欢军 (097)
锈蚀钢筋混凝土梁抗剪承载力预测经验模型	卢朝辉 李 海 赵衍刚 柳世涛 Chun-qing li (102)
基于分层壳单元的现浇混凝土空心楼板数值模拟.....	
.....	吕伟荣 罗 雯 蒋 庆 徐昌慧 黄海林 陆新征 (108)
钢筋混凝土框架结构中防屈曲支撑连接节点的损伤控制.....	曲 哲 吉敷祥一 (114)
FRP 加固钢筋混凝土框架结构抗连续倒塌性能有限元分析	申柳雷 胡其高 张凡榛 (118)
不同胶凝材料的精细混凝土的高温后力学性能	沈玲华 王激扬 徐世烺 付 晔 (123)
斜拉桥软件混凝土桥梁模块的研发与分析	帅明芷 罗晓群 张其林 (129)

水泥基模板与混凝土叠合板的正截面受弯开裂荷载计算.....	宋小软 王勇萌 朱 潇 王国勇 徐宋兵 闫 朝 (135)
混凝土碳化本构关系与碳化深度数学模型的研究.....	孙元生 付章建 赵 斌 (142)
基于芦山 7.0 级地震吊顶系统震害调查与分析	王多智 戴君武 (148)
32 层装配式剪力墙整体结构的动力时程分析	吴东岳 翁和娟 梁书亭 朱筱俊 郭正兴 冯明霞 (154)
RPC 损伤塑性本构模型建构及应用	杨克家 李 桅 陈联盟 (161)
自密实废弃塑料改性轻质混凝土工作性能研究	杨树桐 岳小强 全 尧 (168)
荷载与腐蚀环境作用下混凝土结构试验方法的研究现状.....	殷晓强 何世钦 刘冰冰 曾 帅 (173)
TRC 加固 RC 梁的弯曲疲劳破坏过程和应变发展的试验研究.....	尹世平 盛 杰 贾 申 叶 桃 (177)
钢筋网片不同位置的局压承载力研究	尹新生 李 浩 (184)
多尺度模型界面连接方法研究	张 莹 孙广俊 李鸿晶 (188)
少钢支撑 RC 框架结构的概念	赵作周 杨 馨 贺小岗 钱稼茹 (194)
变轴力下高桥墩抗震性能分析	左 烨 孙广俊 李鸿晶 (201)

4. 钢结构、材料与构件

凯威特-联方单层网壳静力稳定分析	蔡 健 刘齐齐 贺 盛 姜正荣 (205)
对接焊缝连接高温后力学性能试验研究	程 亮 朱美春 李国强 (211)
内配型钢方钢管混凝土偏压构件受火全过程数值模拟.....	韩 伟 王景玄 王文达 (217)
高强螺栓抗火性能的研究概述	胡 鹰 赵鹏飞 杨 波 戴国欣 (223)
氯离子腐蚀环境下钢管混凝土轴拉构件受力性能研究.....	花幼星 侯 超 韩林海 (228)
T 型钢连接的方钢管柱-H 型钢梁节点的塞焊改造.....	李帼昌 张 皓 隋伟宁 (233)
圆形截面烟囱风致干扰效应试验研究	李晓娜 陆 煜 刘庆宽 马文勇 刘小兵 (237)
脉动风荷载作用下填充墙钢框架舒适度分析	刘艳丽 贾连光 张曰果 钟 全 (241)
冷弯薄壁型钢双肢拼合箱形截面梁腹板两侧加载时的受弯承载力研究.....	石 宇 蔡晓亮 管 宇 聂少锋 (248)
内配工字型钢的矩形钢管混凝土双向偏压构件参数分析.....	史艳莉 车向龙 王景玄 (253)
轮扣式钢管支架受力性能试验	司 汉 贾连光 崔永秀 许丕元 唐伟明 (259)
新型 LED 显示支撑结构材料的技术应用	王 杰 (263)
适于钢框架 H 形柱梁连接的模块化耗能节点设计与构造优化.....	王 伟 黄焕鑫 (266)
弦支穹顶结构稳定性影响因素研究	王金金 范 重 赵长军 (270)
蜂窝构件开孔截面焊接残余应力分布研究	杨建华 贾连光 秦晨光 (277)
盲孔法测试 Q690 带端头钢管的纵向残余应力分布.....	杨俊芬 李 渊 彭奕亮 (284)
钢吊车梁腹板的局部稳定问题浅析	杨商飞 郭小农 沈祖炎 (289)

腹板开孔轻钢龙骨墙体抗冲击性能试验研究 杨晓杰 耿 悦 孙建运 王玉银 (293)

单向荷载下 PEC 柱受力性能分析 殷占忠 陈 伟 陈生林 (298)

体育场馆建筑群风荷载相互干扰效应数值模拟研究..... 殷志祥 李 军 张 爽 (302)

温度对钢管混凝土界面粘结性能影响的试验研究..... 张春亮 何世钦 白玉星 (308)

部分外包混凝土型钢柱的承载能力分析 殷占忠 陈生林 陈 伟 (311)

5. 岩土、地基与基础、隧道及地下结构

侧向预压增量法解析土压力 白福波 (318)

基于有限元分析的振动台试验土箱边界效应研究..... 蔡隆文 谷 音 卓卫东 庄舒曼 (328)

CFG 芯水泥土环组合桩复合地基动力特性试验研究..... 丁继辉 冯俊辉 张攀星 全小娟 (336)

基于 SFIA 分析的沉降后浇带封闭时间的确定..... 葛 虹 于 玮 沈 滨 (342)

新管幕结构肋梁抗弯承载能力试验研究与分析 金春福 钮 鹏 赵永生 张 宁 (346)

对已施工复合地基的变更设计实例 来 潇 葛 虹 于 玮 沈 滨 唐建华 (350)

椭圆颗粒对 PFC^{3D} 模拟三轴压缩试验的影响研究 李 幸 姜乐华 (354)

车站浅埋暗挖法施工对地表位移影响研究 刘德华 董 军 宋文杰 (358)

考虑隧道坍方区影响的横通道开挖效应研究 沈孔健 万 水 张晓春 (362)

某尾矿坝渗流稳定性分析 王英浩 李若飞 李建杰 刘国臣 (368)

参数形式下的材料全状态函数研究 卫振海 王梦恕 张顶立 (371)

地铁运行引起地面振动与噪声的实测分析 席兆凯 陈清军 (379)

光纤光栅水准仪在建筑物远程实时监测中的应用..... 杨昌民 田党信 刘春辉 孙 帅 郭卫东 (386)

基于材料结构概念的强度准则问题研究 卫振海 王梦恕 张顶立 (390)

舟曲春南路东侧高边坡加固设计的极限平衡法与有限元强度折减法稳定性对比分析.....

..... 朱彦鹏 张 强 李京榜 (398)

沉管隧道振动台台阵试验模型土箱及适用性分析..... 张学明 陈彦江 闫维明 陈红娟 陈适才 (405)

高外水压力城门洞形水工隧洞衬砌结构设计探讨..... 张志国 杜申伟 刘会波 (411)

福州地铁运行引起的环境振动加速度预测分析 郑国琛 祁 皓 (415)

基于锚索格构梁支护结构的高边坡健康监测研究与分析..... 朱彦鹏 李京榜 叶帅华 张 强 (422)

6. 舰船、车辆、机械制造、航空航天结构

船底板在搁浅场景中的撕裂受力分析 曾 佳 胡志强 陈 刚 阳 松 (429)

有限元法模拟铆钉在结构疲劳评定中的误差分析..... 常文魁 窦秋芳 (437)

典型机身组装壁板裂纹扩展寿命分析 陈 莉 张 侃 (443)

TC4/TC17 异质钛合金线性摩擦焊残余应力控制陈先民 李珊山 庞宝才 (448)

带附加气室气缸型空气弹簧的频率特性与仿真董万元 李 斌 (452)

冰块的局部形状对船冰碰撞场景影响研究高 岩 胡志强 王 晋 (459)

侧向撞击下导管架平台圆管杆件变形机理研究李若轩 胡志强 (466)

机翼盒段梁腹板剪切稳定性试验与分析李珊山 魏玉龙 陈先民 (474)

机身壁板压、剪复合加载试验方案技术研究廖江海 魏玉龙 董登科 (478)

一种缝翼滚轮滑轨机构的可靠性分析方法庞宝才 吕媛波 刘 刚 董登科 (483)

机身壁板强度试验技术研究臧伟锋 张海英 董登科 (488)

基于修正的均方根法的民机载荷谱简化方法研究.....张 侃 廖江海 (493)

环向裂纹机身壁板结构损伤容限性能研究张海英 臧伟锋 闫文伟 董登科 (498)

裂纹扩展中载荷过载的影响研究张文东 董登科 卓 轶 (502)

局部控制点对随机振动试验多点控制的影响朱长春 (507)

钢筋混凝土结构非线性行为的 优化计算方法及应用

*毕继红^{1,2}, 关 健¹, 王 剑^{3,4}, 逯 鹏¹

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072
3. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 4. 天津软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384)

摘 要: 传统的钢筋混凝土结构的整体式模型往往难以模拟钢筋的作用效果, 导致计算结果不理想。在定义材料本构关系时, 充分考虑钢筋在混凝土开裂之后的作用, 可在保证计算精度的同时显著提高计算效率。首先分别以建立钢筋单元和输入配筋率的两种方式建立了分离式模型和整体式模型; 其次考虑混凝土强度、集配情况定义了混凝土材料的非线性应力应变关系, 特别是采用与裂缝开展有关的裂缝处剪应力与剪应变的本构关系; 然后分别对两组模型进行数值计算, 并从开裂强度, 裂缝开展过程, 监测点的位移, 极限强度等多个方面分别将两组计算结果与相应试验结果进行对比, 结果表明优化计算方法单元数目少, 计算速度快, 计算精度高; 最后将该方法应用到实际工程, 准确分析了钢筋混凝土柱在地震作用下的裂缝开展以及破坏过程。

关键词: 钢筋混凝土; 非线性行为; 整体式模型; 配筋率; 裂缝; 优化计算; 试验模拟

AN OPTIMIZATION METHOD OF ANALYZING NONLINEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES AND ITS APPLICATION

BI Ji-hong^{1,2}, GUAN Jian¹, Wang Jian^{3,4}, LU Peng¹

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China ;
4. Key Laboratory of Soft Soil Characteristic and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin 300384)

Abstract: It is difficult for the traditional integral model for reinforced concrete structures to simulate the effects of steel, which leads to the calculation results untrustworthy. When defining constitutive relationship, considering the effect of steel bars to limit the crack development can ensure accuracy of the integral model. Both separate model and integral model are established. Concerning about concrete strength and particle size, the nonlinear constitutive relation was accurately defined, especially the power transmission capacity of the concrete crack. Experimental results are used to verify the effectiveness of the optimized method. The results are also compared with the calculation of the separate model. Many aspects, such as cracking strength, crack development process, displacement, ultimate strength etc., are concerned. Both of the two numerical methods can simulate the experiment well, and the optimized one is much faster. Finally, the optimized method is used to analysis the process of crack developing of a reinforced concrete column under earthquake.

Key words: reinforced concrete; nonlinear behavior; integral model; reinforcement ratio; crack; optimization calculation; test simulation

作者简介: *毕继红(1965—), 女, 天津人, 教授, 博士, 博导, 主要从事复杂结构分析及大跨度柔性结构动力响应分析研究(E-mail: jihongbi@163.com);

关 健(1987—), 男, 河北人, 博士生, 主要从事大跨度柔性结构动力响应分析研究;

王 剑(1981—), 男, 河北人, 讲师, 博士, 主要从事斜拉索风雨激振研究;

逯 鹏(1985—), 男, 河北人, 博士生, 主要从事大跨度柔性结构动力响应分析研究。

钢筋混凝土结构分析分为整体式、组合式、分离式三种有限元模型。分离式模型计算精度高,但是该模型需要将钢筋布置在混凝土单元边界,网格要求高,计算时间较长。该模型多用于混凝土构件的力学分析。如田力^[1]等利用分离式模型分析了钢筋混凝土柱在冲击荷载作用下的破坏模式。组合式模型钢筋布置相对灵活,但是难以模拟钢筋滑移对裂缝形态的影响。对于配筋较多、结构较大的模型,学者也做了大量研究。如吕西林^[2]等用实体单元模拟剪力墙结构,将钢筋弥散于四节点等参单元中,分析了顶层加速度反应时程和位移时程。左晓明^[3]等应用整体式有限元模型分析桥墩试验,建议将剪力传递系数 η 按照函数模型取值,以保证计算结果的准确性。周锡元^[4]等在分析钢筋混凝土框架剪力墙结构时,提出改进的多垂直杆单元模型,并与试验相对比,验证了方法的有效性;夏桂云^[5]等对于框架剪力墙结构建立了连续化模型,并给出了理论解。Ean Tat Ooi^[6]等在比例边界有限元方法中采用局部网格重构来模拟混凝土开裂,并考虑钢筋和混凝土之间的相互滑移。龙渝川^[7]等结合分离式和组合式提出新的嵌入式滑移模型,利用粘结单元表面位移差模拟钢筋滑移。

本文使用整体式模型,定义了混凝土开裂后,裂缝处剪应力和剪应变的本构关系。本构关系中考虑到钢筋和混凝土两种材料的共同作用。与传统意义上整体式模型相比,本文考虑了钢筋对混凝土开裂的影响。通过与钢筋混凝土简支梁的剪切破坏试验相比较,验证了该方法的有效性。根据试验体的实际尺寸和配筋情况,分别建立输入配筋率的分离式模型和优化整体式计算模型,并将两组计算结果分别与试验结果对比。结果表明:优化整体式模型能很好的模拟试验,所采用的本构方程定义准确,同时比分离式模型计算速度快。最后,应用优化方法进行实际工程的计算,结果满足精度要求且计算速度快,具有非常好的应用价值。

1 试验概述

计算模型为某简支梁试验体,总长 4300mm,高 300mm,宽 160mm。试验共设计 10 个加载装置,并在相应位置设置加载板和支承板,试件及加载位置见图 1。沿轴线方向将试件分为四个区域,其中区域 B 为试验段,该区域箍筋直径为 6mm,其余区域为 10mm。梁截面上下各三根直径为 25mm 的主筋,保护层厚 40mm。钢筋材料参数见表 1,其中 SD295 是日本带肋钢筋型号,表示带肋钢筋设计抗拉强度为 295MPa。混凝土抗压强度为 32.7MPa,抗拉强度为 2.79MPa,粗骨料直径为 13mm。

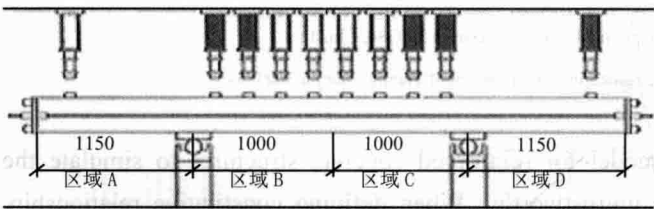


表 1 钢筋材料参数

直径/mm	面积/mm ²	型号	实测强度/(N/mm ²)
6	32	SD295	332
10	71	SD345	388
25	507	SD490	511

图 1 试件及加载位置示意图

2 有限元模型及计算

2.1 几何模型及网格划分

分离式模型采用八节点六面体单元模拟混凝土,二节点杆单元模拟钢筋。杆单元和六面体单元共用节点。加载板和支撑板采用四节点壳单元来模拟。壳单元与六面体单元共用节点。根据主筋和箍筋的配筋位置,将单元网格沿 Y 轴方向划分 4 层,沿 Z 轴方向划分 8 层。混凝土网格和内部钢筋如图 2a 所示。

整体式模型也采用六面体单元模拟混凝土。与分离式模型不同的是,划分网格时无需考虑钢筋位置,只需按照体积配筋率将钢筋输入到六面体单元中,从而减少单元数目。单元网格沿 Y 轴方向仅划分 1 层,沿 Z 轴方向划分 8 层,同时减少了沿 X 轴方向的网格数目,如图 2b。

在对六面体单元输入配筋率时,按照 3 个方向分别输入,每个方向的配筋率是由该方向配置的钢筋体积除以区域的总体积得到。主筋配筋沿 X 方向,箍筋配筋沿 Y 方向和 Z 方向。考虑配筋位置,由于梁腹部的 4 层单元没有主筋和 Y 方向箍筋穿过,所以将每个区域分为腹部和边缘两部分。腹部单元是指沿 Z 轴方向中间 4 层单元,边缘单元是指其余的 4 层单元。六面体单元 3 个方向的体积配筋率的大小见表 2。

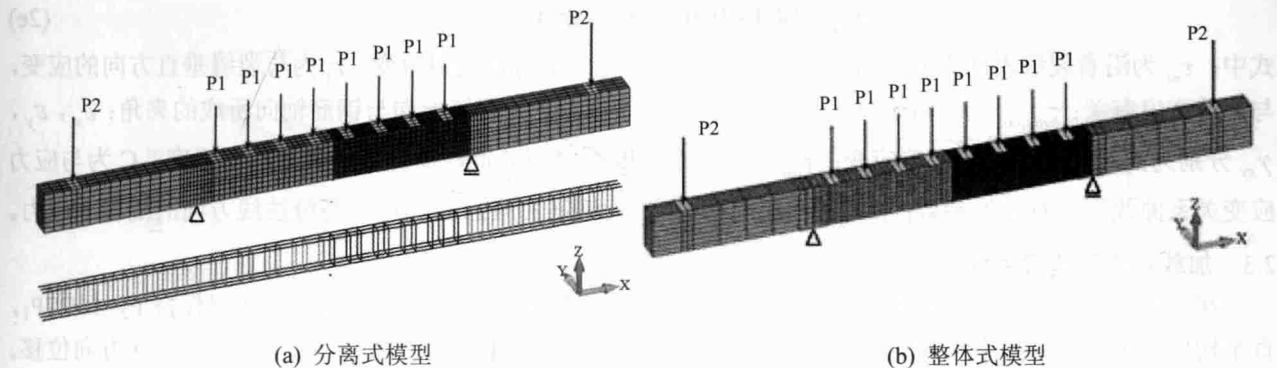


图2 模型网格划分

表2 钢筋配筋率

配筋率	A 腹部	A 边缘	B 腹部	B 边缘	C 腹部	C 边缘	D 腹部	D 边缘
X 方向	0	12.67%	0	12.67%	0	12.67%	0	12.67%
Y 方向	0	1.36%	0	0.40%	0	0.91%	0	1.36%
Z 方向	1.27%	1.27%	0.39%	0.39%	0.85%	0.85%	1.27%	1.27%

2.2 本构关系

混凝土应力应变关系如图 3。混凝土在受压状态下的应力应变关系曲线采用修正 Ahmad^[8]模型。混凝土受拉开裂之前是线性关系，开裂之后通过双线性本构关系模型^[9]来描述拉应力随着裂缝的增大而减小的关系，如图 4。断裂能计算公式为式(1)：

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad (1)$$

式中： G_F 为断裂能； $d_{\max}$ 为混凝土的最大骨料直径； f_{ck} 为混凝土单轴抗压强度标准值。

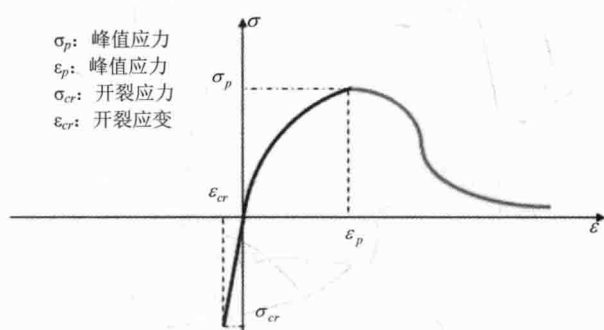


图3 混凝土单轴应力状态的应力应变关系

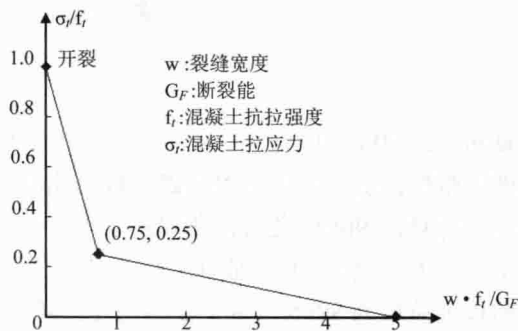


图4 混凝土双线性本构关系

反复荷载作用下混凝土的应力应变关系采用长沼·大久保模型^[10]。三轴应力状态下的混凝土破坏准则选用四参数的 Ottosen 强度准则模型^[11]。

钢筋的应力应变关系采用基于 von Mises 屈服准则的双线性随动强化模型，屈服后的刚度降为初始刚度的 1/100。

如何模拟裂缝面间的剪力传递方式一直是一个难点，学者做了大量研究^[12-13]。本文选用长沼一洋^[14]模型。考虑开裂方向、裂缝宽度、截面配筋率、钢筋屈服强度等多方面影响，定义剪切面内的剪应力 τ_{nt} 与剪应变 γ_{nt} 的关系。计算公式为式(2)：

$$\tau_{nt} = \frac{\tau_{nt \max} \cdot (2 - C)}{\varepsilon_t / \gamma_{nt} - d + \gamma_{nt} / \varepsilon_t} \quad (2a)$$

$$\tau_{nt \max} = \frac{\tau_{du}}{1 + 25700 \varepsilon_t^2} \quad (2b)$$

$$C = 2.03 / \varepsilon_t - 100 \quad (2c)$$

$$\gamma_{nt} = 2 \sin \phi \cdot \cos \phi (\varepsilon_x - \varepsilon_y) + (\cos^2 \phi - \sin^2 \phi) \gamma_{xy} \quad (2d)$$

$$\tau_{du} = 14.1 + 0.8(\rho \cdot \sigma_{sy} + \sigma_n) \quad (2e)$$

式中: τ_{nt} 为沿着裂缝表面方向的剪应力; γ_{nt} 为沿着裂缝表面方向的剪应变; ε_t 为与裂缝垂直方向的应变, 与裂缝宽度有关; $\tau_{nt\max}$ 为沿着裂缝表面方向的最大剪应力; ϕ 为裂缝方向与钢筋轴向所成的夹角; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ 分别为混凝土的正应变及剪应变; τ_{du} 为在存在横断裂缝面的钢筋情况下的直接剪切强度; C 为与应力应变关系曲线形状有关的参数; ρ 为截面配筋率; σ_{sy} 为钢筋屈服强度; σ_n 为裂缝法线方向的混凝土应力。

2.3 加载方式与边界条件

在有限元计算中, 分别在各个荷载板处施加竖向荷载 P_1 和 P_2 , 如图 2 所示, 并始终保持 $P_2=40/27P_1$, 直至构件发生破坏。约束左面支座处节点的 x, y, z 方向的位移, 约束右面支座处节点的 y, z 方向位移。

3 模拟结果分析

3.1 荷载位移曲线

计算过程中的位移监测点位于梁下表面对称位置。竖向荷载 P_1 和监测点竖向位移 Δ 关系曲线与试验极限荷载, 见图 5。可以看出, 两条曲线形状相似。监测点竖向位移达到 5.2mm 之前, 整体式模型曲线位于分离式模型曲线上方, 说明整体式模型比分离式模型的刚度稍大。

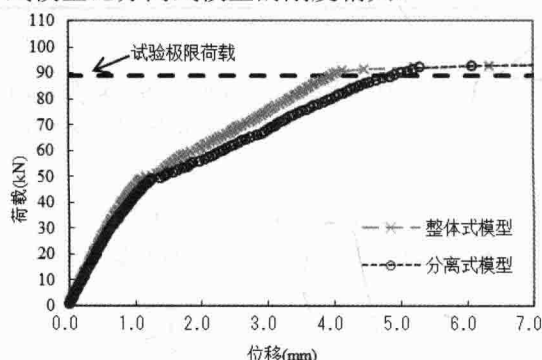


图 5 有限元计算荷载位移曲线

计算初期, 曲线近似为线性关系, 可认为模型处于弹性阶段。到 $P_1=48\text{kN}$ 时, 两条曲线都有明显的转折, 表现出塑性能。分析试验加载过程, 此时试验体上出现较为明显的斜裂缝, 计算结果与试验结果相符合。优化计算在 90kN 之后, 曲线趋于水平, 说明此时模型已经丧失承载力。分离式模型在 91kN 之后也表现出类似的情况, 并且在监测点位移达到 5.2mm 之后, 两条曲线基本重合, 说明两个模型强度值接近。试验中的极限荷载为 89kN, 两个模型的计算结果分别比试验结果大 1.1%和 2.2%, 都具有很好的精度。

3.2 各监测点位移

试验各监测点位移如图 6 所示, 两组有限元计算结果如图 7 所示。试验分别记录第一组明显裂缝, 以及两条较宽裂缝出现时刻的各个监测点的位移。由试验数据可以看出, 各点位移不对称, 由于试验区段的配筋较弱, 试验区段的位移稍大。在 $P_1=80\text{kN}$ 的时候试验体下表面对称位置的竖向位移为 5mm, 有限元模型计算结果中, 整体式模型刚度要大一些, 位移稍小。试验区段计算结果与试验拟合较好。

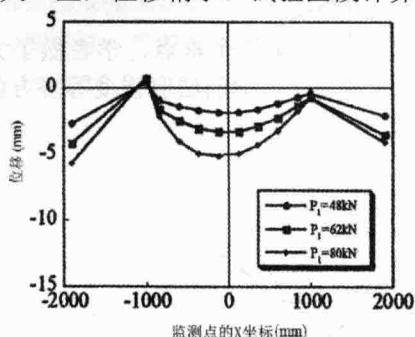
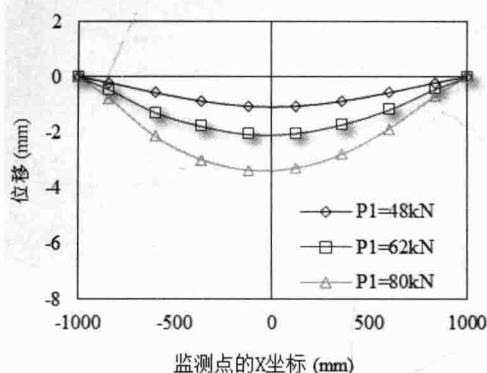
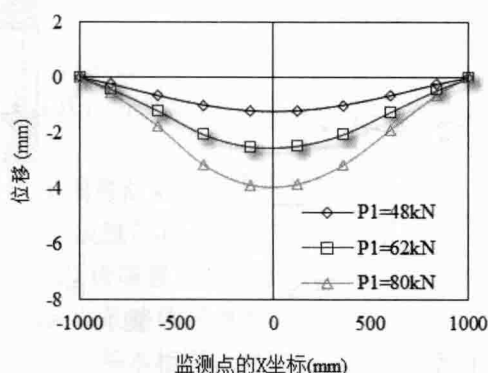


图 6 试验监测点位移



(a) 整体式模型

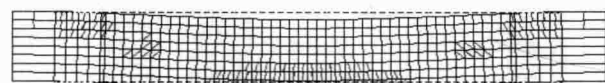


(b) 分离式模型

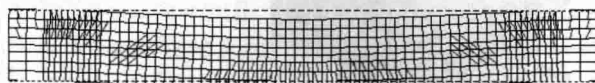
图7 有限元各监测点位移

3.3 裂缝开展过程

图8为有限元模型计算的裂缝图,图9为试验的裂缝图。由图8可以看出,加载至 $P_1=48\text{kN}$ 时,梁腹中位置出现一组斜裂缝,之后逐渐向外发展。加载至 $P_1=62\text{kN}$ 时,模型已出现大面积斜裂缝,其中腹中位置的一条斜裂缝宽度较大。随着荷载增加,模型上出现另外一条较宽裂缝,该裂缝首先水平向右开展,随后斜向上延伸。加载至 $P_1=80\text{kN}$ 时,已经明显能看出两条裂缝的走向。由图9可以看出计算结果与试验结果吻合非常好。



(a) 整体式模型 $P_1=48\text{kN}$



(b) 分离式模型 $P_1=48\text{kN}$



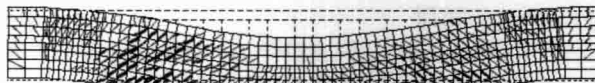
(c) 整体式模型 $P_1=62\text{kN}$



(d) 分离式模型 $P_1=62\text{kN}$



(e) 整体式模型 $P_1=80\text{kN}$



(f) 分离式模型 $P_1=80\text{kN}$

图8 有限元模型裂缝图

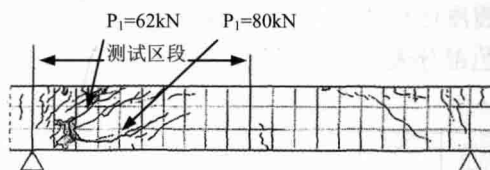


图9 试验裂缝图

3.4 计算效率对比

分离式模型单元数目为4625个,计算所需时间为1537秒;整体式模型单元数目为591个,计算时间为113秒。可以看出整体式模型大量减少单元数目和计算时间,显著提高效率。

4 算法应用

4.1 工程背景

应用所提出的优化方法对日本某堰工程中的某个堰柱进行非线性分析。堰柱底部是设备室,顶部是操作室,门柱位于设备室和操作室之间。2004年日本发生里氏6.8级地震。在地震作用下,门柱发生开裂现象,开裂位置如图10所示。

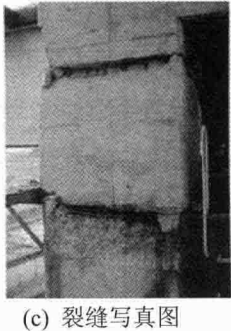
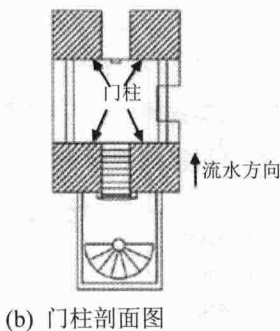
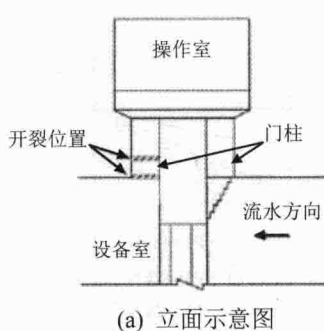


图 10 堰柱及开裂位置示意图

4.2 有限元模型

有限元模型可分为操作室板、门柱以及设备室三部分，如图 11a。本文重点分析门柱，将操作室部分简化处理，底板以上的永久荷载折合成质量附加到板上。门柱截面为正方形，边长 1750mm。柱子设有连梁，梁高 1670mm，如图 11c 所示。混凝土由六面体单元模拟，并根据实际配筋在相应单元中输入体积配筋率。本构关系采用本文提出的优化方法。模型边界条件为固定底层节点三个方向的平动自由度，固定设备室侧面节点的水平自由度。采用 pushover 静力拟动力法对结构进行单向推覆分析。

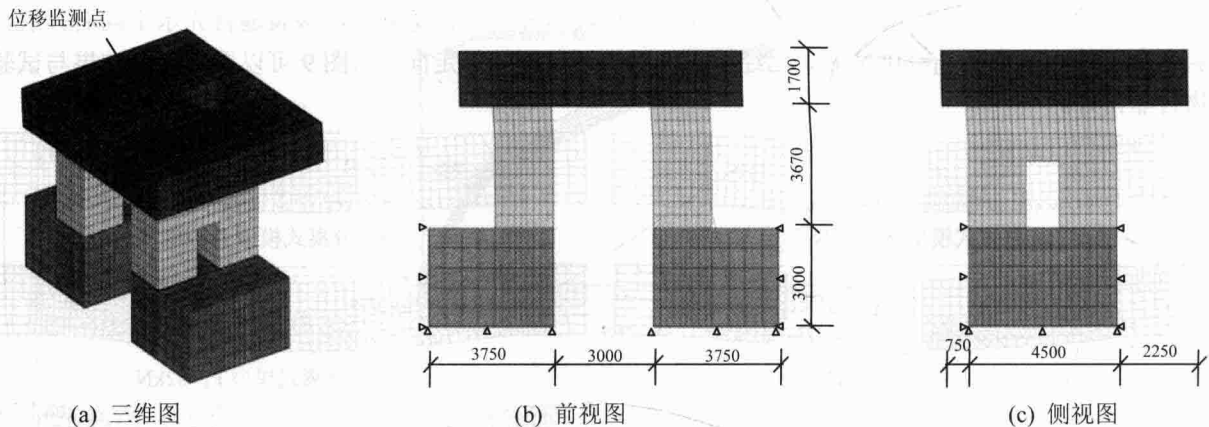


图 11 有限元模型图

4.3 结果分析

位移检测点位于操作室板上表面中心位置处，如图 11a 所示。该点水平位移与震度 K_h 的关系曲线如图 12 所示，红点位置表示混凝土开裂，钢筋屈服，以及混凝土软化时刻。可以看出，混凝土开裂以后，结构明显表现出非线性行为；在震度达到 2.1 左右，混凝土出现软化，结构发生破坏。图 13 描述了门柱裂缝情况，红线表示裂缝位置，绿色部分表示混凝土发生软化的单元。可以看出，门柱的计算开裂位置与实际开裂位置较为接近。

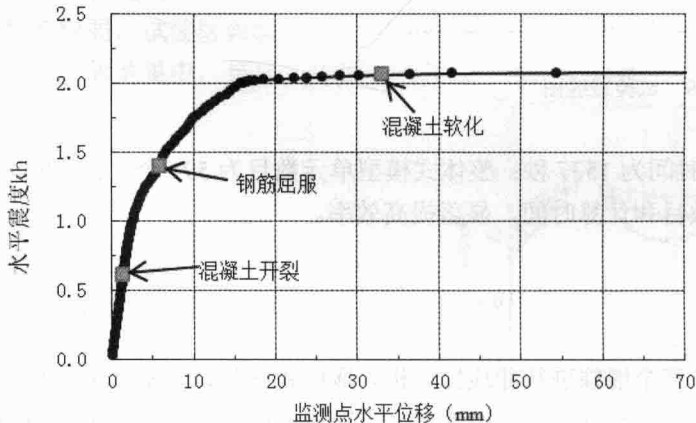


图 12 荷载位移曲线

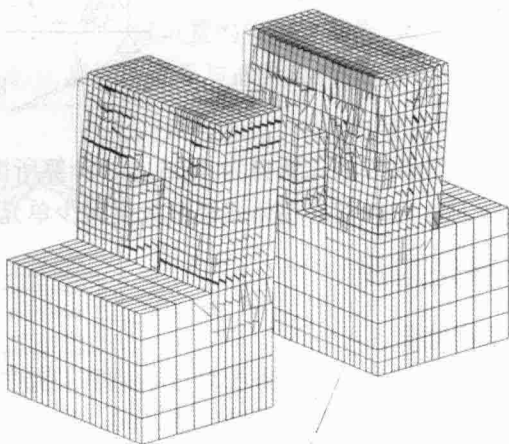


图 13 模型裂缝图

5 结论

通过对简支梁试验以及工程实例进行数值模拟分析,可以得到以下结论:

(1) 本文采用长沼一洋模型模拟裂缝间的剪力传递方式,并通过试验和数值计算证明了该方法的合理性。

(2) 有限元计算结果显示模型首先在下表面的剪弯区出现弯曲垂直裂缝,然后斜向延伸,在 $P_1=80\text{kN}$ 时形成两条较宽的主裂缝,是典型的斜截面受剪破坏形态,裂缝形状与开展过程均与试验相符合。

(3) 有限元计算得到的两条荷载位移曲线形状相似。试验极限强度值为 89kN ,整体式模型计算的极限强度值为 90kN ,分离式模型为 91kN 。两种方法精度相近,但是整体式模型计算速度更快。

(4) 门柱 pushover 计算分析结果中的开裂位置与实际工程基本相同。优化计算方法克服了以往对含有复杂配筋的钢筋混凝土结构进行整体分析时,难以精确计算细部破坏的困难。拓宽了有限元软件的适用范围,为数值模拟方法的更加普及提供了帮助。

参考文献:

- [1] 田力,朱聪,王浩等.碰撞冲击荷载作用下钢筋混凝土柱的动态响应及破坏模式[J].工程力学,2013,30(2):150-155.
- [2] 吕西林,吴晓涵.抗震耗能剪力墙非线性有限元时程分析[J].同济大学学报:自然科学版,1996,24(5):481-486.
- [3] 汪梦甫,周锡元.钢筋混凝土框架—剪力墙结构非线性地震反应实用分析方法的研究[J].土木工程学报,2002,35(6):32-38.
- [4] 左晓明,叶献国,杨启龙.钢筋混凝土非线性有限元中剪力传递系数及其数值试验[J].建筑结构,2009(3):14-16.
- [5] 夏桂云,欧见仁,李传习,等.考虑剪力墙剪切变形影响的框架-剪力墙结构分析[J].工程力学,2013,30(6):217-222.
- [6] Ooi E T, Yang Z J. Modelling crack propagation in reinforced concrete using a hybrid finite element-scaled boundary finiteelement method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(2): 252-273.
- [7] 龙渝川,张楚汉,周元德.钢筋混凝土嵌入式滑移模型[J].工程力学,2008(z1):41-45.
- [8] 长沼一洋.三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係[C]//日本建築学会構造系論文集,1995:163-170.
- [9] Naganuma K., Yonezawa K., et al. Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004, 586.
- [10] 长沼一洋,大久保雅章.繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル,日本建築学会構造系論文集,2000,536:135-142.
- [11] Ottosen N.S.. A failure criterion for concrete. [J]. Journal of Transportation Engineering (ASCE), 1977, 103(4): 527-535.
- [12] Slowik M, Nowicki T. The analysis of diagonal crack propagation in concrete beams[J]. Computational Materials Science, 2012, 52(1): 261-267.
- [13] Iskhakov I, Ribakov Y. Exact Solution of Shear Problem for Inclined Cracked Bending Reinforced Concrete Elements[J]. Materials & Design, 2014.
- [14] 长沼一洋.平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル:鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その1)[J].日本建築学会構造系論文報告集,1991(421):39-48.

大跨半钢板混凝土结构的施工模拟与分析

刁梦竹,*李 易, 闫维明, 程小卫, 李德月

(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京, 100124)

摘 要: 半钢板混凝土(HSC)结构在施工时, 先以钢板为混凝土浇筑的模板和支撑, 此时混凝土和钢筋的重量及施工荷载均由钢板承担, 待混凝土硬化与钢筋和钢板成为一体后, 三者共同承受外力作用。本文采用生死单元和追踪单元技术模拟了这个施工过程。首先, 建立了大跨半钢板混凝土组合梁的数值模型, 对典型构件的试验进行了模拟, 检验了结构建模的有效性和粘结滑移的影响。在此基础上应用生死单元和追踪单元技术对直接成型梁试件和分阶段叠合成型梁试件的力学性能进行了对比研究。结果表明, 考虑施工过程的大跨半钢板混凝土梁在后期承载力略有减小, 施工过程增加了最终的构件变形。最后, 对屋盖体系进行了模拟, 研究了该屋盖体系在正常使用状态下的受力和变形, 为该类屋盖结构提供设计依据。

关键词: 半钢板混凝土; 数值模拟; 施工过程; 生死单元; 追踪单元

NUMERICAL ANALYSIS OF CONSTRUCTION PROCESS OF LARGE-SPAN HALF STEEL PLATE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

DIAO Meng-zhu, LI Yi, Yan Wei-ming, CHENG Xiao-wei, LI De-yue

(Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

Abstract: During the construction process of the half steel plate reinforced concrete (HSC) structures, the structural gravity and construction loads are bore by the steel plates in the roof which are temporarily used as templates and braces. After concrete harden, the concrete, steel plates and reinforcing steel will perform the combined action to collaboratively resist the external load. In this paper, the deactivation element and trace element techniques are applied to simulate the construction process of the HSC structures. Firstly, a numerical model of large-span HSC beam is developed to simulate experiment on a typical beam specimen. The effectiveness of the numerical model is confirmed and the bond slip between concrete and steel plates is investigated via the simulation. Then, the deactivation element and trace element techniques are used based on the numerical model to study the mechanical properties of the one-time forming and the multi-step forming HSC beam specimens. The results show that the final bearing capacity and deformation of the specimen considering the construction process reduces lightly and increases respectively. Finally, the roof system is simulated to study its stress state and deformation after construction process, providing a reference for the design of such roof structures.

Key words: half steel plate reinforced concrete; numerical simulation; construction process; deactivation element technique; trace element technique

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208011); 北京市教委科研计划项目(KM201310005025); 国家博士后科学基金(2012M510301); 北京市博士后科研资助项目(2012ZZ-13)

作者简介: 刁梦竹(1993—), 女, 安徽人, 硕士生, 从事工程结构防灾减灾研究(E-mail: dmz1992@126.com);

*李 易(1981—), 男, 湖北人, 讲师, 博士, 从事工程结构防灾减灾研究(E-mail: yili@bjut.edu.cn);

闫维明(1960—), 男, 黑龙江人, 研究员, 博士, 副院长, 主要从事工程结构减震控制研究;

程小卫(1991—), 男, 甘肃人, 硕士生, 从事工程结构防灾减灾研究;

李德月(1988—), 男, 山东人, 硕士生, 从事工程结构防灾减灾研究。