

第23届
全国结构工程学术会议
论文集

第Ⅲ册

PROCEEDINGS OF THE TWENTY-THIRD NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. III

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 苏先槌
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



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Ⅲ册目录

7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

钢纤维聚合物混凝土板抗侵彻试验研究	曹 海 张新乐 郭晓辉 冯进技 李砚召 (001)
清华校园建筑震害预测程序及在土木工程教学中的应用	曾 翔 杨哲飏 许 镇 陆新征 (005)
基于图像的剩余速度测量方法研究	曾 勇 陈 斌 郑国志 (011)
地震动记录调整中反应谱控制周期的初步分析	陈 波 温增平 (015)
基于新型消能减震装置的框架结构振动控制研究	陈 云 陈奕柏 吕西林 蒋欢军 (021)
混凝土类材料 SHPB 试验数值模拟分析综述	陈亨利 刘 锋 (027)
基于 IDA 的钢框架-中心支撑体系参数研究	董志骞 李 钢 李宏男 (033)
基于 MFBFE 单元的汶川地震典型高层建筑震害模拟	杜 轲 丁宝荣 孙景江 (038)
非平稳随机地震作用下铅芯橡胶隔震结构支座优化设计	樊 剑 周 金 刘志雄 龙晓鸿 (044)
核筒-四个悬挂体结构地震动力反应分析	葛 楠 王 芳 李凤鑫 (050)
带黏弹性阻尼器结构振动台试验数值模拟	龚顺明 周 颖 吕西林 (055)
地震动强度指标对隔震结构动力响应影响的规律性研究	顾镇媛 刘伟庆 王曙光 杜东升 (062)
钢筋混凝土结构连续倒塌机制研究	胡 凯 蒋 臻 瞿 革 吕西林 王 鹏 杨 梓 (069)
含减振子结构的巨型框架结构减震分析	蒋 庆 陆新征 种 迅 叶献国 黄俊旗 (077)
基于场地特性的地震动功率谱模型及其参数的确定	孔 辰 王曙光 杜东升 李威威 (083)
超高层建筑塔冠结构地震放大系数研究	李姗姗 范 重 李 丽 (089)
铜陵大桥钢绞线拉索的阻尼测试	李小龙 孙利民 程 纬 谢正元 黄永玖 (098)
大型煤气柜风致响应的现场实测研究	李正农 胡扬斌 李 星 程 杰 吴 涛 (107)
ECC/RC 组合框架结构静力弹塑性抗震分析	刘籍蔚 潘钻峰 孟少平 汪 卫 (111)
隔震连续梁桥地震易损性及 LRB 设计参数优化	龙晓鸿 陈蓓蕾 李 俊 樊 剑 杨斌斌 (117)
高层建筑环境振动 TLD 控制研究	楼梦麟 韩博宇 (124)

基于改进 Bouc-Wen 模型的 RC 梁-柱节点抗震性能模拟.....吕大刚 于晓辉 杜文晨 (131)

锚杆抗爆性能理论分析.....马海春 崔可锐 储诚富 (138)

单层网壳结构在不同加载点冲击荷载作用下的动力响应分析与试验研究.....
.....马肖彤 王秀丽 吴 长 (143)

某航站楼风压分布研究.....彭留留 黄国庆 罗 颖 李明水 (149)

基于 ABAQUS 的核设施冲击荷载数值模拟.....钱宏亮 汤胜文 范 峰 (154)

一种贫民百姓用得起的优效隔震层.....尚守平 易春荣 (160)

季风作用下主梁涡激共振对斜拉索疲劳损伤分析.....舒 翔 朱乐东 (168)

基于能力谱法的地震易损性分析.....宋鹏彦 吕大刚 于晓辉 (176)

基于神经网络的砖混结构房屋监测及灾害预警.....苏胜昔 耿朋飞 刘 静 龚雅平 (181)

混凝土侵彻数值模拟中穿甲弹简化模型.....万 帆 刘 飞 甄 明 蒋志刚 (186)

多维地震波作用下大跨结构行波效应分析.....王浩力 李鹏飞 陈清军 (190)

侧向非接触爆炸钢管混凝土构件损伤演化数值分析.....王新征 牛冠毅 郑金明 崔云霄 李 萍 (197)

荷载非对称分布下单层球壳的动力倒塌振动台试验研究.....王秀丽 吴 长 马肖彤 梁亚雄 (204)

RC 框架的弹塑性模拟与 BRB 等价线性化加固设计的 SIMULINK 仿真.....王玉梅 黄 蔚 (213)

S 形曲线桥梁振动台试验研究.....闫 磊 李青宁 尹俊红 远广要 程麦理 廖 鑫 (219)

K8 单层球面网壳基于 AUTODYN 的外爆响应分析.....杨 帆 支旭东 范 峰 (224)

多维激励下结构碰撞振动台试验研究.....尹俊红 李青宁 闫 磊 程麦理 张瑞杰 廖 鑫 (230)

基于 Park-Ang 损伤指数的改进概率地震需求模型.....于晓辉 吕大刚 贾明明 (234)

降雨冲击力试验研究.....禹见达 卿定增 朱兆杰 王修勇 (239)

节点区域刚度对预制装配式高层住宅混凝土结构抗震性能影响分析.....张纪刚 陈加军 江志伟 (243)

对称双塔高层建筑模型的风洞实验研究.....张建国 林树枝 (248)

斜风向下 D 形截面气动力研究.....张晓斌 马文勇 卢金玉 刘庆宽 (252)

基于 Euler 算法的 TNT 炸药空中爆炸数值模拟研究.....张秀华 张 达 (258)

抑制斜拉桥斜拉索风雨激振的气动措施研究.....郑云飞 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (263)

震后地下拱结构抗冲击波动载能力有限元动力分析.....周健南 金丰年 潘大荣 孔新立 (267)

基于地震动模拟的一致危险谱和条件均值谱生成及应用.....朱瑞广 于晓辉 吕大刚 (274)

具有自复位功能装配式框架节点抗震性能的影响因素分析.....邹 昀 林 晖 马卫强 (279)

8. 设计、施工、加固、优化、可靠度及事故分析

螺旋线参数对斜拉索风雨振抑制效果的影响	白雨润 赵善博 刘庆宽 刘小兵 马文勇 (285)
天津海昌滨海大厦超限高层变更设计研究	边 凯 (290)
核电站超大型冷却塔内表面风压的数值模拟研究	董国朝 张建仁 蔡春声 韩 艳 (298)
超长混凝土次梁和板的温度作用计算	范么清 (304)
结构鲁棒性再思考及系统效应初探	方召欣 (311)
基于岭估计的损伤识别技术研究	郭惠勇 盛 懋 (315)
新型铝合金脚手架探索研究	胡其高 雷灿波 申柳雷 谭清华 张凡榛 (319)
孔洞对核电安全壳施工温度应力的影响分析	李 政 汤胜文 金晓飞 钱宏亮 范 峰 (324)
基于典型相关原理的失效模式间相关系数计算	李建操 陈卫东 戴仕宝 刘广英 杨灿灿 (330)
单腔体结构局部开口风致内压研究	李晓娜 马文勇 邢克勇 赵春晓 (335)
屋面覆盖物风致损失的概率评估	刘小波 黄国庆 何 华 郑海涛 (339)
丽江纳西建筑结构抗震设计分析	汪程明 高建岭 白玉星 (345)
基于蒙特卡洛模拟的建筑工程成本风险分析	王增忠 (349)
一座大跨径人行天桥的吊点优化设计	吴兴祥 潘亦苏 江伟辉 (354)
CFRP 加固青白石梁受弯性能试验研究	武晓敏 谢 剑 徐福泉 齐 文 (358)
试验台泵壳动力学特性研究	徐有刚 杜 强 王玉军 魏晓贞 吕 明 (364)
某超长结构的季节性温差取值研究	叶潇潇 高建岭 张宏涛 (368)
基于改进约束满足问题的结构损伤评估方法	张 宝 方圣恩 (372)
我国不同时期混凝土结构设计规范安全度设置水平的比较	张狄龙 邸小坛 (377)
建筑模板的应用现状分析及新型模板研发前瞻	张召勇 薛 刚 营 瑞 (381)
窄基输电塔气弹模型设计与制作	赵 龙 马文勇 赵贞欣 (385)
电动大口径反射镜组件动力学特性研究	赵宝忠 徐有刚 杜 强 陈晓娟 (390)
结构健康监测无线传感网络的优化布置方法及其应用	周晋宇 董 聪 陈向前 (394)

9. 新材料、新能源、交叉学科及其他

单掺钢纤维和聚丙烯纤维 RPC 基本力学性能试验研究	曹 霞 宋亚运 李 蔚 唐爱华 彭金成 (400)
----------------------------------	---------------------------

化学键合胶凝材料的力学性能研究董 琪 李仲欣 韦灼彬 (411)

受约束再生混凝土本构关系的研究现状方主明 刘 锋 (417)

不同 RPC 掺合料对混凝土抗压强度的影响付 强 孙天烁 金凌志 吕冰峰 (421)

化学键合胶凝材料混凝土配合比的优化设计董 琪 韦灼彬 李仲欣 (428)

饱和岩土介质传热特性研究黄胜兰 赵石烧 张正威 (435)

复合材料胶栓混合连接机理的试验研究黄盛楠 冯 鹏 李曙光 (445)

HRB500 级钢筋 RPC 梁抗裂性能试验研究.....金凌志 何 培 吴欣珂 (453)

纳米陶瓷涂层带肋钢筋使用性能的研究李尚龙 邱家俊 柳 莹 李 迴 赵 鸣 (460)

原材料对珊瑚砂混凝土抗压强度影响的试验研究.....潘柏州 韦灼彬 (464)

风致雪漂移的风洞试验方法和观测研究石 超 李宗益 刘庆宽 (470)

潮间带五桩基础风电塔安全监测唐冬玥 赵 鸣 (477)

高强钢筋 RPC 简支梁抗剪承载力及延性研究.....金凌志 李月霞 祁凯能 何 培 (481)

高温后方钢管再生混凝土短柱轴压受力性能分析.....王 兵 刘 晓 赵 磊 (490)

结构工程学科热点文献调查杨 坚 孙雅琼 王海深 曾 翔 陆新征 (497)

钢纤维聚合物混凝土板抗侵彻试验研究

*曹 海, 张新乐, 郭晓辉, 冯进技, 李砚召

(总参工程兵科研三所, 河南, 洛阳 471023)

摘 要: 在钢纤维混凝土中掺入聚合物, 可增进钢纤维与基体之间的界面粘结强度, 并改善基体自身的性能, 使混凝土的抗拉及抗弯强度, 变形能力及韧性得到进一步提高。本文采用射弹侵彻混凝土靶板试验方法, 研究了钢纤维混凝土(SFRC)、聚合物混凝土(PC)和钢纤维聚合物混凝土(SFRPC)的抗侵彻性能, 获得并分析了侵彻破坏的特征及参数。试验结果表明, 在钢纤维混凝土中添加聚合物后, 抗侵彻性能明显提高。
关键词: 钢纤维混凝土; 聚合物混凝土; 钢纤维聚合物混凝土; 侵彻

EXPERIMENTAL STUDY ON ANTI-PENETRATION PERFORMANCE OF STEEL FIBER REINFORCED POLYMER CONCRETE

*CAO Hai, ZHANG Xin-le, GUO Xiao-hui, FENG Jin-ji, LI Yan-zhao

(The Third Engineer Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Luoyang Henan 471023, China)

Abstract: By adding polymer to increase the bonding strength at the interface between steel fiber and matrix of steel fiber concrete, the properties of matrix, the tensile strength and bending strength of the concrete and the properties of deformation and toughness is to be further improved. Anti-penetration performance of steel fiber reinforced concrete (SFRC), polymer concrete (PC), steel fiber reinforced polymer concrete (SFRPC) are studied in this paper. Experiment was conducted by launching steel projectiles into concrete targets. Damage distribution of concrete after penetration is obtained. The results showed anti-penetration performance of SFRPC can be increased obviously.
Key words: steel fiber reinforced concrete; polymer concrete; steel fiber reinforced polymer concrete; penetration

钢纤维混凝土已经得到广泛的应用, 添加钢纤维可以明显提高混凝土的延性和抗疲劳强度, 但从钢纤维混凝土的机理应看, 阻裂性能及高韧性很大程度上是在混凝土基体开裂后靠钢纤维拉结作用所表现出的一种“假韧性”, 即开裂前的强度和变形增加很小, 其本质上的脆性性质尚未有很大的改善, 基体性能仍然较差。同时钢纤维混凝土与旧混凝土之间的层间粘结强度一般较低, 这对于采用钢纤维混凝土修补道路、结构是不利的。聚合物混凝土早期强度高和粘结性能好, 具有较好的抗冻融性能, 可减少了裂缝的发展, 提高了韧性和抗冲击性能^[1,2], 主要用于混凝土结构的加固、快速修补。掺加聚合物的钢纤维混凝土不仅其基体力学性能明显得到改善, 而且其与旧混凝土之间的层间粘结强度也得以显著提高。国内外学者通过开展聚合物改性钢纤维增强混凝土材料试验, 研究了此类复合材料的力学行为和增强机理。研究表明, 掺入聚合物能够改善纤维表面与水泥基体性能, 增加纤维与基体之间的界面粘结强度, 从而可以显著提高混

作者简介: *曹 海(1968—), 男, 辽宁人, 硕士, 高级工程师, 主要从事结构试验研究(E-mail: caohai0303@sina.com);

张新乐(1964—), 男, 河南人, 本科, 高级工程师, 主要从事结构工程;

郭晓辉(1977—), 男, 山西人, 硕士, 副研究员, 主要从事防护结构研究;

冯进技(1965—), 男, 江苏人, 博士, 研究员, 主要从事防护结构和防震技术研究;

李砚召(1962—), 男, 河南人, 博士, 研究员, 主要从事结构工程。

土的抗折、劈裂抗拉强度和抗冲击侵彻等性能。

多年来，混凝土的侵彻性能研究在土木和军事领域受到了高度的重视，开展了大量的试验、理论分析和数值模拟研究，直至今日仍然是一个重要的研究领域^[3]。相关研究人员采用改进的 SHPB 装置，对普通混凝土、钢纤维混凝土(SFRC)和钢纤维聚合物混凝土(SFRPC)，进行了冲击试验^[4]。试验结果也表明:3 种材料的抗冲击性能依次为普通混凝土差,钢纤维混凝土中，钢纤维聚合物混凝土良。本文采用射弹侵彻混凝土靶板试验方法，研究了钢纤维混凝土、聚合物混凝土和钢纤维聚合物混凝土的抗侵彻性能。

1 试验概况

试验在实验室进行，包括静力和冲击试验。制作了聚合物混凝土(PC)、不同掺量的钢纤维混凝土(SFRC1、SFRC2)、聚合物钢纤维混凝土(SFRPC)有限厚度的试验靶板。

1.1 材料选择

钢纤维采用江西赣州大业金属纤维有限公司生产的高强钢丝切断型弓形钢纤维，具体型号及尺寸为：GSF0625，长度为 25mm，直径 0.6mm，长径比 42。

聚合物为专门针对水泥混凝土道路和桥梁的结构与非结构缺损的快速修补，开发研制的 NC 聚合物，以硅酸盐水泥为主，掺入多种有机和无机材料复合而成的一种粉粒状混合料。

粗骨料采用连续级配的石灰岩碎石，最大粒径 25mm，细骨料采用伊河中粗砂，水泥采用 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥。钢纤维混凝土中钢纤维体积掺量为 3.0%、4.0%，钢纤维聚合物混凝土中钢纤维体积掺量为 1.25%。聚合物混凝土、钢纤维聚合物混凝土中聚合物掺量分别为 16.0%、15.5%。详细的配合比见表 1。

表 1 混凝土配合比 (kg/m³)

试件	聚合物	水泥	砂	石	水	硅粉	粉煤灰	减水剂	钢纤维
SFRC1	-	479	574	936	164	34.2	171	13.7	234
SFRC2	-	489	557	908	168	35.0	175	14.0	312
PC	444	444	444	1185	242	-	-	-	-
SFRPC	444	444	444	1185	251	-	-	-	98

1.2 试件制作和试验方法

制作了 4 组靶板，即聚合物混凝土(PC)、不同掺量的钢纤维混凝土(SFRC1、SFRC2)、钢纤维聚合物混凝土(SFRPC)的有限厚度试验靶板。

试验采用缩尺的混凝土靶板，尺寸为 400mm×400mm×200mm。

侵彻试验采用 Φ30mm 口径射弹垂直侵彻，弹径 30mm，弹重 0.5kg，试验中射弹的着靶速度控制在 320m/s 左右。记录了侵彻、弹坑深度、直径数据，详见表 2。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

钢纤维混凝土(SFRC1、SFRC2)、聚合物混凝土(PC)和钢纤维聚合物混凝土(SFRPC)试验板的平均侵彻深度、弹坑深度、弹坑直径见表 2。

表 2 靶板侵彻数据

试件	侵彻深度	弹坑深度	弹坑直径	抗压强度
	cm	cm	cm	MPa
SFRC1	12.4	5.6	17.3	119.8
SFRC2	11.7	4.1	16.4	127.0
PC	13.0	7.4	21.0	63.3
SFRPC	5.0	4.3	16.5	66.7

试验中靶板典型破坏见图 1、图 2，可以清楚地看到破坏特征。

聚合物混凝土靶板，弹速 321~331m/s，实验后靶板正面形成弹坑并破坏分成多块，靶板背面形成几条大裂纹，个别试件中间有 150mm×200mm 大小的混凝土块体崩落现象。钢纤维聚合物混凝土靶板，弹速 276~320m/s，实验后靶板正面形成弹坑，裂缝呈放射状，靶板背面未发现肉眼明显可见的裂纹。钢纤维混凝土靶板在相同弹速条件下，靶板正面形成弹坑，并有放射状裂缝，且明显多于钢纤维聚合物混凝土板正面，靶板背面也有多条肉眼可见的裂缝。

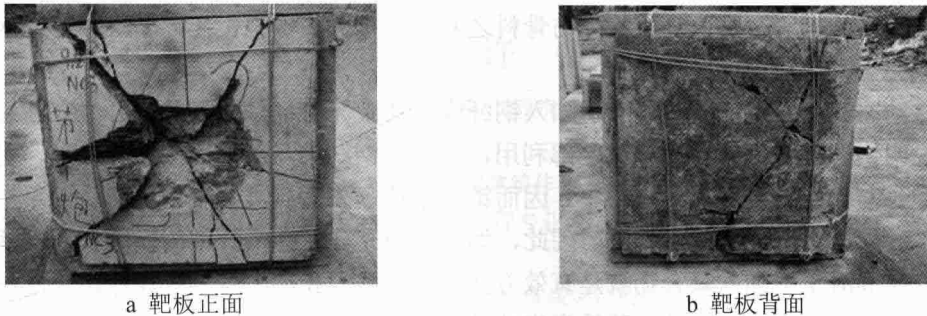


图 1 聚合物混凝土靶板破坏

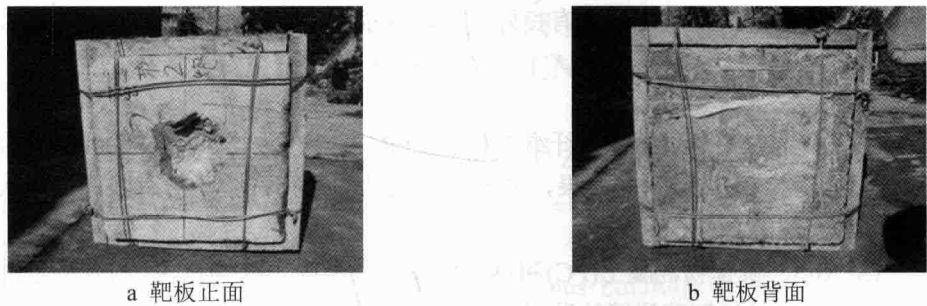


图 2 钢纤维聚合物混凝土靶板破坏

2.2 试验结果分析

射弹对目标的冲击局部作用取决于射弹特性、目标特性、撞击条件。混凝土板承受冲击时，正面形成冲击漏斗坑，背面形成震塌漏斗坑是其典型的破坏特征。

试验中，SFRPC 靶板与 PC、SFRC1、SFRC2 靶板相比，侵彻深度分别减小了 61.5%、59.6%、和 57.2%。与 PC、SFRC1 靶板比较，SFRPC 靶板的弹坑深度减小了 41.9%、23.0%，弹坑直径减小了 21.4%、4.6%。在冲击作用下，PC、SFRC1、SFRC2 靶板背面都产生了几条明显的放射状裂缝(见图 1)。相反地，SFRPC 靶板正面产生的放射状微裂缝较小，背面也未有明显的裂纹(见图 2)。

经对比分析，可以看出钢纤维体积掺量为 1.25% 的 SFRPC 靶板的抗侵彻能力，明显高于 PC 靶板和钢纤维体积掺量为 3.0% 的 SFRC1 靶板，与钢纤维体积掺量为 4.0% 的 SFRC2 靶板不相上下。

同期进行的混凝土的单轴抗压荷载-变形曲线的试验研究，试件尺寸为 100mm×100mm×300mm，研究结果表明^[5]，同时添加钢纤维和聚合物，并不能明显改变混凝土的峰值荷载前的曲线形状，但是峰值后曲线形状得到改善，提高了对能量的吸收能力。极限变形和耗能能力随着钢纤维和聚合物掺量的增加明显提高。而没有添加聚合物时，峰值后荷载-变形曲线随着荷载的增加下降相比较快。说明聚合物添加后，混凝土具有更好的延性，使得 SFRPC 的破坏发展比 PC、SFRC 更缓慢。另外材料抗冲击韧性和抗侵彻性能的影响研究，也表明添加聚合物后，钢纤维混凝土的冲击韧性进一步得到提高，射弹侵彻破坏材料时所耗费的动能增大，射弹的侵彻深度随之减小，射弹侵彻深度缩减幅度的大小与材料的抗冲击韧性值大小直接相关。

水泥混凝土是一个多相多孔体系，加入聚合物后其微观结构，特别是孔结构及孔分布状态发生了变化。采用扫描电镜研究 SFRPC、PC、SFRC 混凝土的微观结构的结论是^[6]，钢纤维混凝土中的大孔径数量、分

布较明显,导致强度降低。聚合物加入后,混凝土中的孔径分布变化较明显,混凝土中大孔数量减小,而小孔数量有所增加,换句话说孔级配发生了变化。一般认为,混凝土的宏观行为不仅受孔隙率的影响,而且还受孔级配的影响。孔径较大的孔(毛细孔)对混凝土的强度、抗冻、抗渗等性质影响的权重大于小孔(凝胶孔)。因此,聚合物的掺入必然改善混凝土的宏观性质。另外普通混凝土在水泥基体与集料之间存在着过渡区,但过渡区结构松散,与集料的粘结较弱。钢纤维混凝土中没有聚合物膜的存在,钢纤维、水泥基体和骨料之间的粘结力较弱。聚合物加入可改变混凝土的微观结构形态,聚合物颗粒填充了水泥浆体的毛细孔,不仅使得过渡区结构紧密,而且使浆体与骨料之间的联接大大加强,在混凝土中形成水化产物与聚合物膜部分交织或完全交织成空间网状结构。

大量的静、动态试验发现,普通混凝土加入钢纤维,其破坏特征是大量的钢纤维在断裂面被拔出,而没有被拉断,说明钢纤维的强度还没有被全部利用,主要是钢纤维与基体间的粘接性差,另外,由于混凝土基体的极限伸长与钢纤维伸长相比小得多,因而钢纤维还远未达到其强度极限时,混凝土基体已出现裂纹造成钢纤维单独受力,降低了整体强度。因此,如果要想充分发挥钢纤维的增强作用,就必须对混凝土基体进行改性,在混凝土中加入聚合物就是有效方法之一。静力和动力试验都反应出了这种增强作用。混凝土中形成的连续的聚合物膜,对冲击荷载产生的冲击波起到衰减的作用,减小了混凝土的开裂、阻止了应力波的传播,因此钢纤维聚合物混凝土抗侵彻性能得到了较大的提高。同时由于钢纤维聚合物混凝土添加的钢纤维掺量低于一般钢纤维混凝土,具有良好的施工性能。

3 结论及展望

通过研究分析了以往的普通混凝土、钢纤维混凝土(SFRC)、聚合物混凝土(PC)和钢纤维聚合物混凝土(SFRPC)的静态力学性能和动态试验研究成果,并开展了成功的侵彻试验,对有限厚度靶板的抗侵彻性能进行了研究,得到了以下结论:

钢纤维混凝土(SFRC)、聚合物混凝土(PC)和钢纤维聚合物混凝土(SFRPC),与普通混凝土相比,都具有优良的抗侵彻性能,减小了侵彻和裂缝的发展。进一步对比分析后可以得出,在冲击作用下聚合物和钢纤维的联合作用比单一加入聚合物或钢纤维效果更好、作用更明显。钢纤维聚合物混凝土(SFRPC)具有更好的抗侵彻能力,综合性能最好。

试验研究表明:添加 15.5%聚合物和 1.25%体积率的钢纤维聚合物混凝土(SFRPC),与 4.0%钢纤维体积掺量的钢纤维混凝土(SFRC)具有相近的抗侵彻性能。在达到与钢纤维混凝土相近性能的前提下,采用钢纤维聚合物混凝土(SFRPC)时,可以减小钢纤维体积掺量,同时聚合物的添加使混凝土具有凝结时间短、早期强度高、粘结力强,耐久性和施工性能好,特别适合于结构的加固,快速修补结构、路面、机场跑道。

参考文献:

- [1] 买淑芳.混凝土聚合物复合材料及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1996
- [2] 钟世云,袁华.聚合物在混凝土中的应用[M].北京:化学工业出版社,2003
- [3] Almansa EM,Canovas MF. Behaviour of normal and steel fiber-reinforced concrete under impact of small projectiles [J], Cem Concr Res 1999,29:1807-1814
- [4] 罗立峰.钢纤维增强聚合物改性混凝土的冲击性能[J].中国公路学报,2006,19(5):71-75
- [5] 张新乐,曹海,郭晓辉.聚合物混凝土抗压全过程应力应变关系研究[J].防护工程,2011,33(4):1-5
- [6] Gengying Li,Xiaohua Zhao, Chuiqiang Rong,Zhan Wang.Properties of polymer modified steel fiber-reinforced cement concretes.Construction and Building Materials[J]. 2010, 24: 1201 - 1206

清华校园建筑震害预测程序及在 土木工程教学中的应用

曾 翔, 杨哲飏, 许 镇, *陆新征

(清华大学土木工程系, 北京市 100084)

摘 要:“清华校园建筑震害预测程序”提供学生所熟悉的校园建筑作为研究对象, 具有结构地震弹塑性时程分析和破坏情况可视化展示功能。将其用于结构抗震工程、防震减灾等土木工程专业课程教学过程中, 可以使学生直观地理解、巩固并综合运用所学知识, 激发学习和探索热情。

关键词: 建筑震害分析; 土木工程教学; 结构抗震; 地震工程; 防震减灾; 校园实验室

EARTHQUAKE DISASTER PREDICTING PROGRAM FOR CAMPUS BUILDINGS IN TSINGHUA UNIVERSITY AND ITS APPLICATION IN TEACHING OF CIVIL ENGINEERING

ZENG Xi-ang, YANG Zhe-biao, XU Zhen, LU Xin-zheng

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 10084, China)

Abstract: “Earthquake disaster predicting program for campus buildings in Tsinghua University” provides campus buildings to students as researching objects, which are familiar to them. The program can implement elasto-plastic time-history analyses as well as earthquake disaster visualization. When applied to the teaching of civil engineering, the program can help students easily understand knowledge and use it, moreover, inspiring their enthusiasm in study and exploration.

Key words: earthquake disaster analysis; teaching in civil engineering; structural seismic resistance; earthquake engineering; seismic prevention and disaster mitigation; campus as laboratory

1 引言

建筑结构抗震分析是土木工程专业教学的重点和难点。一方面, 它涵盖地震工程、抗震工程、结构动力学等多种专业知识, 内容丰富, 综合性强; 另一方面, 实际教学过程中, 这些知识通常是在几门独立的专业课程中分别教授的, 学生不易整体把握所学知识。在这种传统的教学方法下, 学生能较好地掌握各门课程的基础知识和理论方法, 但缺乏一个综合平台帮助学生融会理解、实际运用这些分散的知识。

其实, 大学校园本身便是一个合适的综合平台, 可以提供开展科学探究所需的各种基本教学资源, 从这个角度来说, 校园是一个鲜活的实验室。“校园实验室”(Campus As Laboratory, CAL)这个概念, 最初由普林斯顿大学于 2011 年提出^[1]。具体到建筑结构抗震分析, 特别是区域建筑抗震分析来说, 大学校园建筑

基金项目: 国家科技支撑计划课题(No. 2013BAJ08B02), 北京市自然科学基金(No. 8142024), 国家自然科学基金(No. 51178249 51378299)

作者简介: 曾 翔(1991—), 男, 湖南人, 博士, 主要从事土木工程计算机仿真研究;

杨哲飏(1993—), 男, 浙江人, 本科生, 主要从事土木工程计算机仿真研究;

许 镇(1986—), 男, 北京人, 博士后, 主要从事城市综合防灾、虚拟现实和高性能计算相关研究;

*陆新征(1978—), 男, 安徽人, 教授, 博导, 博士, 主要从事结构非线性计算和仿真研究(E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn).

不仅结构类型多样、跨越年代广泛,提供了丰富全面的研究对象,而且数据资料容易获取,甚至还能获得部分建筑的设计详图,有利于建立结构分析模型。

“清华校园建筑震害预测程序”就是清华大学“校园实验室”项目的成果之一。该程序以清华大学校园建筑为研究对象,以身边的科学问题为切入点,较之相对枯燥的书本知识,贴近生活的案例更易激发学生的探索热情。同时,学生可利用该程序直观地理解、巩固并综合运用所学知识,提高实践和创新能力,甚至以此为平台进行更深入的研究探索。此程序可以用于《土木工程概论》、《结构动力学》、《抗震工程概论》、《防灾减灾工程学》等课程的辅助教学。

2 清华校园建筑震害预测程序

“清华校园建筑震害预测程序”(以下简称“震害预测程序”),由清华大学土木工程系开发完成。通过网络搜索以及实地调研等方法,收集了清华大学绝大部分校园建筑的坐标、层数、层高、建造及加固年代、结构类型等基本宏观信息。利用这些信息,为各个建筑生成相应的剪切层模型,在用户选定的地震动下,对这些校园建筑进行弹塑性时程分析,并直观地展示整个清华校园建筑在地震作用下的响应和破坏状况。程序主界面如图 1 所示。

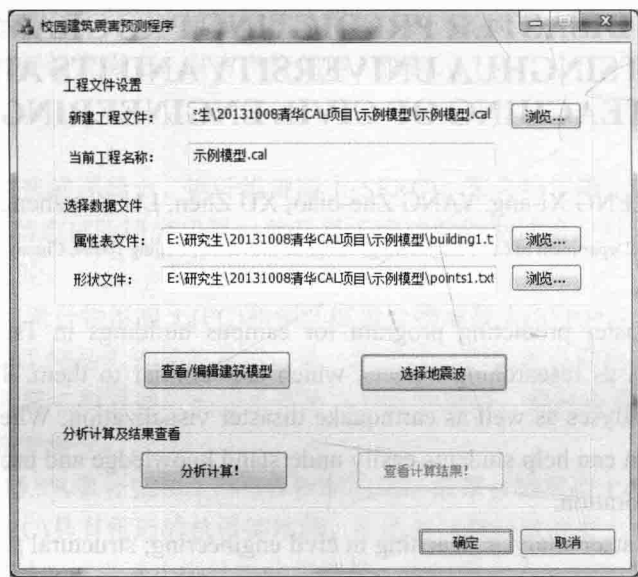


图 1 “清华校园建筑震害预测程序”主界面

该程序的震害分析原理如图 2 所示。依据输入文件中提供的结构层数等宏观信息,基于美国 Hazus 软件的调查统计和该程序开发者的研究工作^[2],计算得到结构的各阶周期、各层层间骨架线和滞回参数以及各个破坏状态对应的层间位移角限值等,建立剪切层模型,从而在指定的地震动作用下,进行弹塑性时程分析,得到结构的时程响应。

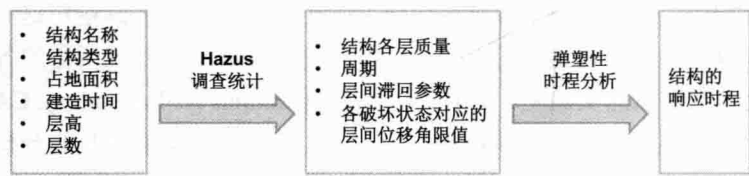


图 2 “清华校园建筑震害预测程序”的震害分析原理图

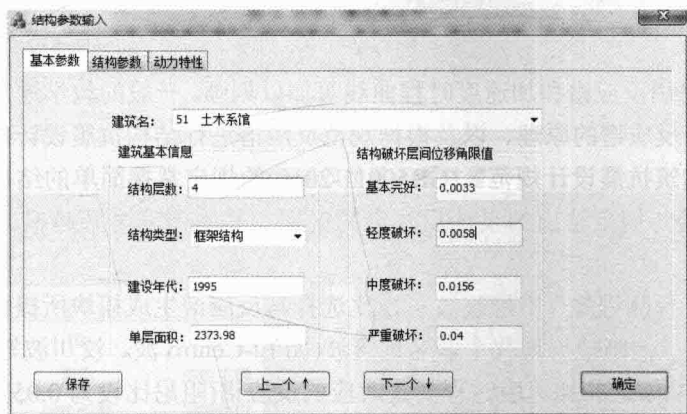
该程序包含以下功能模块:建筑结构信息的读取与编辑、地震波的可视化选择与反应谱的生成、清华校园建筑在地震作用下的响应分析计算、以及结构的响应时程和破坏情况的直观展示等。由于各个模块都具有丰富的表格、曲线甚至是动画功能,能直观、生动地呈现从模型建立到结果显示等整个震害分析过程,加之所选择的分析对象是学生所熟悉的校园建筑,因此该程序可为结构动力学、地震工程等多个土木工程

专业学科的教学提供帮助：不仅能使相关专业知识更形象、易于学生接受和理解，同时还能对感兴趣的学生进行诸如地震损失评估等更深入的研究提供一个基础平台。

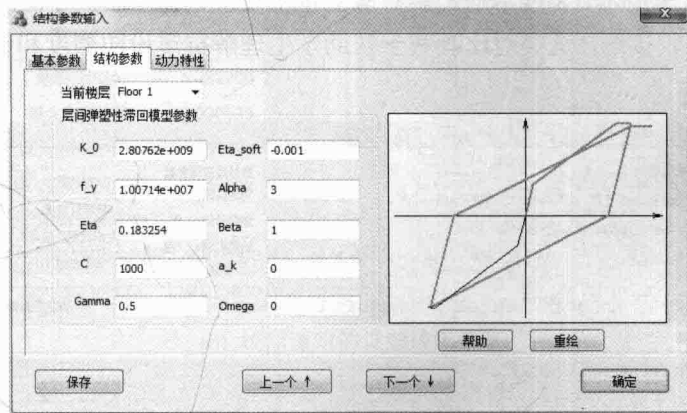
3 清华校园建筑震害预测程序在土木工程专业学科教学中的应用

3.1 结构抗震工程

“震害预测程序”的建筑结构信息读取与编辑模块，包含剪切层模型、结构层间滞回关系、结构破坏状态及对应的层间位移角限值等结构抗震工程专业知识，可用于辅助其教学工作。如图 3 所示，输入或修改结构的层数、结构类型、建设年代等信息，该程序会自动计算层间滞回参数等的取值^[3]。其中，对于钢筋混凝土框架结构，采用修正的 Clough 层间滞回模型^[4]进行模拟；对于钢结构，采用理想弹塑性模型模拟；而其它以剪切变形为主的结构，则使用捏拢模型作为滞回规则。同时，也可以手动修改这些取值，程序会实时更新对应的滞回曲线的形状。



(a) 查看并编辑各个建筑的基本信息和结构破坏层间位移角限值



(b) 查看并编辑结构各个楼层的层间骨架线和滞回参数，并实时显示滞回曲线

图 3 “清华校园建筑震害预测程序”的建筑结构信息读取与编辑模块

以上功能有助于学生理解层间滞回参数的概念和意义，探讨不同结构类型的层间滞回特点。结合“震害预测程序”的分析计算和结构破坏状态展示，可以进一步探究不同结构类型、滞回性能等因素对结构抗震性能的影响。

3.2 结构动力学

“震害预测程序”提供对剪切层模型的周期和振型计算功能。例如，图 4 所示的是一个四层结构的频率和一阶振型。调整阻尼比等参数，并重新计算，可以分析各个参数对结构频率和振型的影响，加深认识多自由度体系的自振规律；选择不同的校园建筑，可以对比不同类型建筑的结构动力学性质差异。学生还可利用程序所提供的结果与自己手算的结果进行对比，进一步巩固课程中所学的知识。

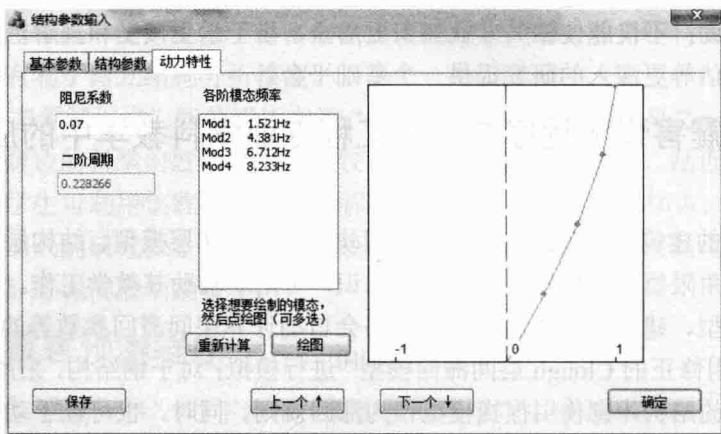


图 4 计算并显示各个校园建筑的频率和振型

3.3 地震工程概论

地震动的主要特性可由反应谱和加速度时程曲线等加以刻画。一般的教学通常侧重于讲解反应谱的概念、利用加速度时程计算反应谱的原理、以及根据规范反应谱进行结构抗震设计的方法步骤等。学生可以根据相关公式和中国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2010)的规定掌握简单的结构地震作用的计算,但不易直观地认识普通反应谱与规范给出的设计反映谱的区别、基本烈度与超越概率对规范反应谱形状的影响等。

图 5 所示的是“震害预测程序”中地震波可视化选择与反应谱生成模块所提供的功能。将其用于地震工程概论的课程教学,可以清晰地展现几个著名地震波(如 El-Centro 波、汶川波等)的时程曲线,并方便地生成指定峰值加速度(PGA)下这些加速度时程曲线对应的反应谱(阻尼比设为 0.05)。将反应谱与规范反应谱绘制在同一区域,可以对比二者的区别与联系,体现规范反应谱的特点:它是为方便工程计算而进行的简化处理方法。此外,如图 5 所示,8 度罕遇地震对应的规范反应谱与 PGA 为 0.4g 的加速度时程对应的反应谱相比,其最大反应比较接近,这类对比有利于帮助学生理解抗震设防烈度和设计基本地震加速度的对应关系。

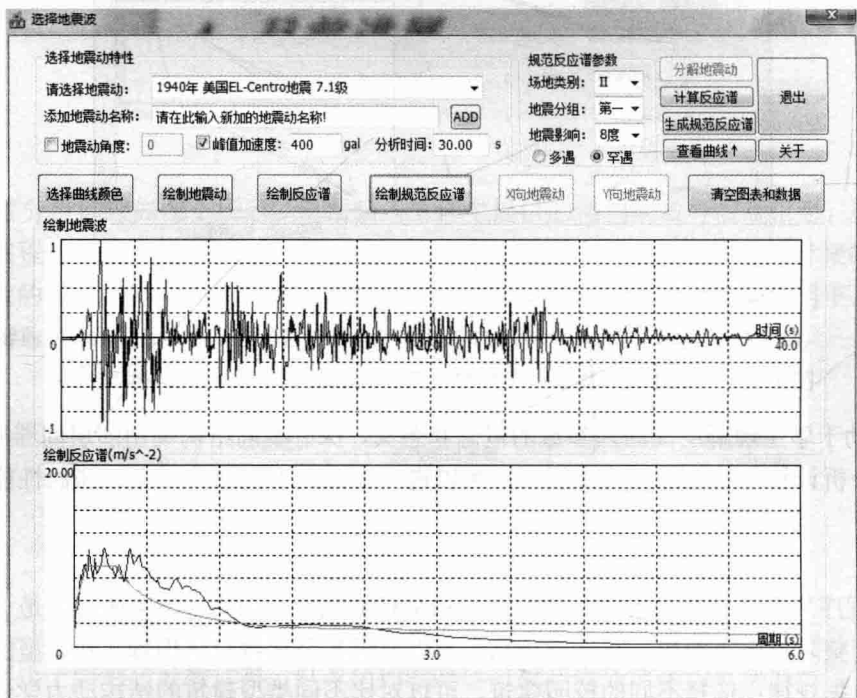


图 5 “清华校园建筑震害预测程序”的地震波可视化选择与反应谱生成功能