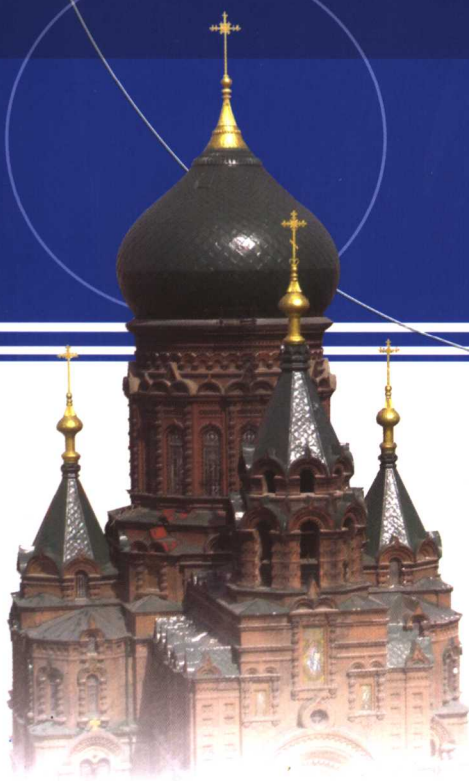


下册

唐岱新 主编  
王凤来

# 土木工程结构 检测鉴定与加固改造 新进展及工程实例



TUMU GONGCHENG JIEGOU  
JIANCE JIANDING YU JIAGU  
GAIZAO XINJINZHAN  
JI GONGCHENG SHILI

中国建材工业出版社

# 土木工程结构检测鉴定与 加固改造新进展及工程实例

(下册)

——第八届全国建筑物鉴定与加固改造学术会议论文集

唐岱新 王凤来 主编



中国建材工业出版社

# 目 录

## (上册)

### 第一篇 学科发展及标准化

发扬成绩、反思不足、力争创新·····	孙前元	梁 爽	(3)				
在役建筑物安全性鉴定制度的研究 ·····	卢 谦	遇平静	路新瀛	徐善华	陈肇元	(12)	
钻芯法检测混凝土强度技术规程修订情况介绍 ·····	邱小坛	徐 骋	周 燕	(20)			
工业建筑结构鉴定的分级标准问题 ·····	张家启	惠云玲	弓俊青	林志伸	幸坤涛	郑 云	(30)
建筑结构胶粘剂与应用近年来的发展动向 ·····	李力平	贺曼罗	(35)				
结构设计的不确定性的储备及利用 ·····	邱小坛	(40)					
工业建筑管理等级评定探讨 ·····	罗国权	(45)					
从被动加固到主动加固的思考——桥梁加固设计思想之我见 ·····	张树仁	(51)					
浅谈工业厂房结构改造设计的几个问题 ·····	付桂宏	邹剑强	徐克利	(57)			
牡丹江市原国有老工业企业厂房的现状及其改造的建议 ·····	孙铁东	孙 毅	赵炳化	(62)			
工业建筑使用维护技术指南初探 ·····	姚继涛	董振平	王 飞	王 发	庄继勇	(67)	
不同目标使用期结构的鉴定与加固问题探讨 ·····	徐克利	金来建	付桂宏	(73)			
混凝土结构设计规范系数的变更与比较 ·····	邱小坛	(80)					
嵌入式 FRP 筋加固砌体结构的研究现状及发展 ·····	张 鹏	江世永	飞 渭	李加贵	刘述林	(85)	

### 第二篇 试验研究及分析

后置墙梁承载力及刚度的试验研究 ·····	潘景龙	孙运昌	李 莉	(93)	
外贴纤维箍加固梁受剪承载力上下限的预测 ·····	曹双寅	朱海峰	(101)		
负载下 FRP 约束混凝土方柱的承载力研究 ·····	潘 毅	(107)			
FRP 片材加固混凝土偏压柱的试验研究 ·····	代云秀	孙 静	(112)		
高性能复合砂浆钢筋网加固混凝土结构研究 ·····	尚守平	曾令宏	蒋隆敏	颜 军	(117)
钢绞线网-聚合砂浆加固混凝土梁的粘结锚固性能试验研究 ·····	曹 俊	王志浩	(122)		
小直径圆钢化学植筋锚固性能试验研究 ·····	赵国兴	王红心	胡继勇	杨贵勇	(128)

钢丝绳缠绕混凝土轴压短柱的试验研究·····	王用锁	潘景龙	张淑红(134)
钢筋混凝土结构承载力寿命预测方法 ·····	徐勇	李永芳	李乃学
·····	王秀华	徐善华(141)	
高强钢绞线加固钢筋混凝土梁受弯疲劳性能的试验研究 ·····	聂建国	胡新舒	张天申(146)
水泥复合砂浆钢筋网加固混凝土悬臂梁抗剪性能试验研究 ·····	尚守平	罗利波	张雪宁(153)
预应力高强 CFRP 板加固混凝土梁试验与理论研究 ·····	薛伟辰	曾磊	赵谦
·····	戴方毕	黄建洧(159)	
钢管自密实混凝土轴心受压短柱试验研究·····	郑建岚	王国杰(164)	
钢筋混凝土外框架和碳纤维组合加固砖混结构计算方法·····	茹以群	李杰(171)	
高寒地区公路设置伸缩缝提高沥青混凝土耐久性的试验研究·····	黄选明(177)		
既有工程中托梁抽柱的试验研究·····	崔士起	成勃	岳占福
·····	王振业(182)		
芳纶纤维加固混凝土构件的计算模型与分析·····	张新华	崔士起	成勃(187)
芳纶纤维塑料筋混凝土粘结应力的试验研究 ·····	江世永	熊晔	飞渭
·····	张鹏(193)		
FISV360S 植筋胶搭接钢筋混凝土梁受弯试验研究 ·····	张建荣	黎群	吴进
·····	宋磊	刘兵(200)	
带过渡区的混凝土及预应力混凝土梁设计方法研究 ·····	郑文忠	谭军	解恒燕
·····	王英(205)		
平面外偏心受压配筋砌块砌体粘钢补强试验研究·····	潘景龙	贾洪波	王晓晖(210)
多层砌体房屋温度裂缝机理分析模型及防治对策的计算机模拟分析 ·····	肖承波	罗苓隆	吴体(216)
低强度混凝土梁碳纤维布抗剪加固试验研究 ·····	张越芳	李翔	顾祥林
·····	张伟平	欧阳煜(224)	
FRP 约束加固钢筋混凝土柱后的承载力计算方法·····	潘景龙	金熙男	徐田(230)
FRP 包裹加固混凝土柱的相关参数分析·····	敬登虎	曹双寅(241)	
外包钢加固砖柱的轴压性能研究·····	欧阳煜	刘能科	潘建立(248)
扭转振动对剪力墙结构受力的影响·····	贾春营	齐晓海(253)	
新型转换结构在建筑物外套框架增层改造中的试验研究和应用 ·····	张鑫	吕西林	李安起(261)

### 第三篇 结构测试技术

化学植筋性能试验及现场检验方法·····	韩继云	黄选明	费毕刚(269)
钢管混凝土柱超声波检测·····	王永焕	吴利权(274)	
红外热像检测技术检测碳纤维施工质量·····	段向胜	郭宁(279)	
混凝土雷达检测新技术及应用·····	王正成(285)		
混凝土无损检测数据处理技术·····	史承明	王晓明	张陵(291)
混凝土结构钢筋探测的 GPR 方法·····	谢慧才	徐茂辉	詹润涛(295)

可视量变计算机采集方法在工程结构检测中的应用..... 张 扬(300)  
红外热成像检测技术在建筑领域中的应用近况

..... 陈聚文 黄国扬 谭 广 李为杜(304)

某钢管拱人行天桥的动力特性理论分析与测试..... 葛树奎 刘长平(309)

混沌信号噪声分离后的数学特性比较..... 王德佳 孙 刚 王培荣(314)

#### 第四篇 工程检测及鉴定

平遥古城墙结构的损伤与原因分析..... 张文革 李永录 席向东 朱丽华(323)  
圣·索菲亚教堂的结构安全性检测与鉴定

..... 陈建华 王有军 王公山 崔晓伟 张大治(329)

既有挡墙司法鉴定的有关问题探讨..... 雷 用 王 平(337)

某工业厂房安全性鉴定..... 刘兴远 林文修 张兴伟 何世兵 池海(343)

当前砌体结构房屋常见的质量问题探讨..... 金国芳 李思明(349)

某综合办公楼装修改造可靠性鉴定..... 郝海萍 王国民(354)

某厂房质量事故原因分析..... 袁海军(361)

提高建筑工程质量司法鉴定的科学性..... 邱洪兴 曹双寅 丁国良(367)

某门式刚架厂房可靠性鉴定..... 于长江 王 艳(373)

重力式方块码头工程检测实例及分析..... 张琦彬 王立军 王立强 黄长虹(378)

某高炉重力除尘器壳体结构鉴定分析..... 吴玉峰 王 晖 姜迎秋(383)

建筑结构检测、鉴定中应注意的问题..... 由世岐 赵佩红(389)

某厂房坍塌事故鉴定..... 陈 颖(393)

关于砌体工程现场检测技术问题的浅述..... 朱玉鹏 张书禹(401)

既有房屋的损坏类型和原因浅析..... 何小菱(405)

某铝厂电解一、二系列厂房检测..... 郑建军 吕永平 杜 雷(409)

柱面网壳结构的可靠性鉴定分析..... 黄建文 姚政治 吴明生 赵启明 王广仁(414)

某底框结构火灾检测鉴定与处理..... 杨 琼 陈昌松 何 林(423)

某综合楼天井院格构层模板支撑系统施工监测..... 王 英 完海鹰(428)

建筑幕墙失效模式及影响分析..... 刘正权(434)

结构鉴定软件的研究与开发..... 马云飞 邱洪兴(439)

某钢结构车间安全性检测与鉴定..... 殷 杰 王孔藩(444)

天津市某轻钢厂房火灾后主体结构鉴定与加固..... 陈天愚 李 军 江 春(448)

成都市宽窄巷子历史文化保护区部分房屋及门头的技术鉴定..... 凌程建 张 翼(451)

冶金建筑沉降规律研究..... 罗国权(459)

哈尔滨某大厦的检测、鉴定与加固..... 王有军 王公山 陈建华 刘 磊 石开明(465)

某矿井钢架的检测及可靠性分析..... 王建国(471)

某边坡工程垮塌原因分析..... 刘兴远 林文修 段成禄 陈 伟(475)

复杂大体积基础混凝土温度计算分析与监测..... 弓俊青 侯 健 牟宏远(483)

工业建筑混凝土结构鉴定评级可靠度分析

..... 郑 云 张家启 岳清瑞 惠云玲 弓俊青(487)

某“危”旧厂房的结构鉴定 .....	万茂强	常好诵(492)
某钢厂球团主厂房可靠性鉴定 .....	幸坤涛 弓俊青 惠云玲 张宏伟	于无私(501)
已有结构混凝土强度评定 .....	郭小华 张家启	惠云玲(506)
某木屋盖原料库厂房的结构鉴定 .....	常好诵 惠云玲 弓俊青	牟宏远(511)
遂昌荷花滩大桥裂缝检测分析 .....	陈海斌	朱春明(517)
沥青加铺层失效问题分析 .....	韩海红	张岩(520)
逐层深入法在混凝土受火损伤检测中的运用 .....	陆洲导 余江滔	袁廷朋(525)
存在施工偏差的超高层钢结构安全鉴定 .....	费毕刚 易方民 袁海军 王翠坤 储德文 王巍	韩继云(531)
某在建库房坍塌事故原因鉴定 .....	吴体	罗苓隆(538)
先张法预应力空心梁底板纵向裂纹分析 .....	吴辉琴 谢肖礼 王波	臧华(543)
回弹法检测混凝土强度数据的 Excel 处理方法 .....		刘金伟(549)

## 第五篇 结构耐久性研究

建筑结构胶的耐老化性能及其改善的研究 .....	贺曼罗 蒋伟	蒋伟(557)
已有钢筋混凝土结构钢筋锈蚀的危害和阻锈技术 .....	卓昌志	卓尚木(562)
结构加固胶的老化与耐久性能研究 .....	蒋松岩 莫群速 王秉权 李晓东 丁琰	赵文涛(569)
混凝土结构中的钢筋锈蚀探讨 .....	李斌	李斌(575)
受尿素严重腐蚀混凝土结构的检测及加固设计 .....		完海鹰(580)
工业环境与钢筋混凝土结构厂房的耐久性 .....	郝挺宇 武慧芬	惠云玲(586)
锈蚀钢筋混凝土结构斜截面动态可靠度分析 .....	吴广新 李乃学 李永芳 徐勇	徐善华(593)
锈蚀钢筋混凝土构件非线性有限元分析方法 .....	李丽艳 孙学军 李乃学 吴广新	徐善华(598)

(下册)

## 第六篇 加固材料性能及结构加固技术

首都体育馆屋盖结构减震分析 .....	范峰 于晓野 严开涛	支旭东(605)
高强不锈钢绞线网-高强渗透性砂浆加固技术发展现状及工程应用 .....	张天申	聂建国(613)
结构抗震与减震加固原理和方法 .....	叶列平	马千里(627)
现代高效预应力加固技术的工程应用 .....		项剑锋(633)
预张拉碳纤维布加固混凝土梁施工工艺 .....	高鹏 顾祥林	张伟平(638)
用阻尼器支撑加固的框架结构的弹塑性时程分析 .....	吕西林 韩厚正	翁大根(643)
预应力放张技术在预应力结构改造中的应用 .....	孙鸿剑 葛呈强	范井全(651)
后锚固植筋搭接及锚固时的劈裂破坏和粘结破坏 .....	Kunz Jakob Muenger Fritz	陈家晖(656)
砂桩加固护岸稳定性有限元分析 .....	曹奇 冯淑芳 崔凯	李杰(664)

薄钢板组合剪力墙结构抗震加固应用的探讨				栗献增(669)
FRP 或钢丝网砂浆加固混凝土的几个问题	熊光晶	杨奇飞		严 洲(676)
改进式体外预应力筋加固混凝土梁	焦章保	陆嘉平		翟瑞兴(681)
粘结锚栓(植筋)受拉承载力影响因素分析		谢 群		陆洲导(687)
建筑物震后鉴定与加固方法		孙瑞峰		李 科(692)
常用锚固粘合剂之比较	曹 阳	赵文涛		王秉权(696)
高性能复合砂浆钢筋网加固技术应用研究	谢红艳	陈大川		高 伟(700)
碳纤维技术在结构加固工程中的研究		孙醒远		李 科(705)
化学植筋(栓)在加固改造工程中的应用	贾长娣	杨滨康		刘金松(709)
高强灌浆料在结构加固工程中的应用	戎希杰	庄春雨		刘金座(714)
预埋锚板与植筋锚板的设计比较				廖文彬(719)
型钢-混凝土组合梁在结构加固中的应用	孙鸿剑	范井全		葛呈强(723)
CFRP 在某木结构古民居加固中的应用				
.....	张天宇	鄢仁辉	李梁峰	林秋峰
预应力卸载技术在加固工程中应用				吴志雄(728)
预应力支顶型钢加固技术在实际工程中的应用				张 瀑
土木工程结构加固用高性能玻璃纤维片材的研制				鲁兆红(733)
双液注浆在软弱地基加固中的应用	尹淑琴	王梅花	周国民	唐榕滨
				赵东滨(737)
				陈 杰
				包兆鼎(740)
				王占林(744)

## 第七篇 结构加固设计与施工技术

某工程施工质量的检测评估及处理				田瑞华(751)
丹东监狱教学楼屋面 SP 预应力空心板加固技术研究				梁学明(757)
福建省某中学教学楼加固设计				陈义侃(763)
某近代文物建筑的加固修缮设计			付 洁	王志浩(768)
某砖混结构改造扩建中的难点分析				罗国权(774)
建筑物大规模改造加固的研究	杨绍祺	陆瑞明		张建华(778)
某新建清水池工程事故分析及处理		刘宏生		刘名开(784)
HPG 浇注料修补缺陷混凝土的应用实例		王宏明		李中锋(788)
浅述多种加固方法在某工程中的综合应用				李 凯(792)
用无粘结预应力技术改造加固吊车梁	周玉洁	高 亮		张 黎(797)
内框架房屋改造设计实例	欧阳煜	潘建立		刘能科(801)
某教学楼墙体竖向裂缝原因分析与治理对策	郝 明	聂中博		张 洵(806)
停缓建工程中的建筑物鉴定与改造加固		刘 刚		陆贻杰(811)
某框架结构安全性鉴定与加固处理				江道锴(816)
钢筋混凝土柱下独立基础的加固方法		瞿红梅		孙伟民(822)
蒸压加气混凝土砌块在改扩建及加固工程中的应用				陈义侃(826)
受弯构件粘贴钢板加固计算及程序				严承璋(831)
CFRP 材料在工程实际中的应用	吕 鹏	蒋松岩	王 刚	曹 阳(836)
某大厦转换层大梁裂缝分析及处理			郭杰标	陈大川(841)

某砌体房屋墙体裂缝分析与处理	李登科	卜良桃(846)
砌体结构房屋底层敞开式大空间改造方法	杨勇	肖开喜(850)
某不规则地下结构开裂原因分析及加固处理	林驹	谢永健(854)
哈尔滨松花江公路大桥拓宽改造方案研究	郑文忠	孙绪杰
.....	解恒燕	张昊宇
.....	张昊宇	张文元(861)
某办公楼结构体系整体转换改造设计及方案探讨	唐榕滨	宋尧
.....	宋尧	姚可忆(868)
某大戏院的加固改造设计	张明	张伟斌
.....	禹永哲	葛洪波(873)
轻钢结构柱间支撑加固实例	.....	贾传果(878)
预应力结构在抽柱扩跨中的应用	官安	刘振清(883)
老建筑在改造中的加固原则及工程应用	邹超	陈洋
.....	王洪波	谢永健(888)
现代加固技术在古文物石刻保护上的应用	张勇	张卫喜
.....	李涛	李涛(893)
古桥原地保护加固施工方案的研究	张勇	张卫喜
.....	李丽	李丽(897)
上海某高层剪力墙粘钢工程的质量控制	张洪	孙建华
.....	田奎	田奎(902)
某炼铁高炉框架结构的可靠性鉴定与加固改造	徐善华	王伟
.....	田庆元	王永臻
.....	苏兴民	孙学军(907)
预应力钢结构的工程质量控制	雷波	王耀南
.....	曾凡生	曹恒亮(912)
南通电视台电视节目制作播出大楼柱的综合加固设计	袁爱民	李延和
.....	毛荣生	毛荣生(920)
建筑物鉴定加固改造中若干结构抗震问题初探	武慧芬	惠云玲(926)
砌体房屋墙体裂缝修补技术简述	.....	陈宙(932)
某改造工程中加固方法的综合应用	徐澄	姚立新
.....	李延和	袁爱民(936)
基于混凝土现实强度的加筋判断准则	.....	蒋凯辉(941)
无振动直线平面切割技术在建筑物改造拆除中的应用	李蔚萍	王聪慧
.....	张宇	张宇(945)
某砌体房屋墙体裂缝的检测评估及修补	.....	夏春红(952)
软弱地基土浅基础既有建筑加层技术探讨	.....	胡雷鸣(955)
扬州某综合楼抽柱改造设计	葛洪波	张伟斌
.....	禹永哲	张明(958)
绥芬河青云市场套(扩)建工程结构设计方法与施工措施研究	郑文忠	刘铁
.....	谭军	解恒燕
.....	李忠民	李忠民(963)
浅谈旧建筑物改造中基础方案的确定	宋尧	陈艳娇(974)
旧有单层内框架厂房接层结构方案选型	唐榕滨	赵春燕(980)
老厂房结构改造的若干技术问题	李京一	葛家琪
.....	徐克利	徐克利(984)
建筑结构加固工程施工验收中存在问题的探讨	雷波	王耀南
.....	张昊	张昊(993)
异形混凝土结构的质量检测与加固补强	张治泰	李乃平(998)
整体井式屋盖坍塌工程鉴定与加固	.....	刘兴家(1006)

## 第八篇 建筑物纠偏、移位及灾后处理

混合结构火灾后的检测与加固	陈大川	胡海波(1013)
福建某商住楼火灾后加固补强方法	.....	刘成斌(1021)
某建筑物火灾后结构鉴定及加固处理	李一平	陈龙华
.....	李庆伟	林志伸(1026)



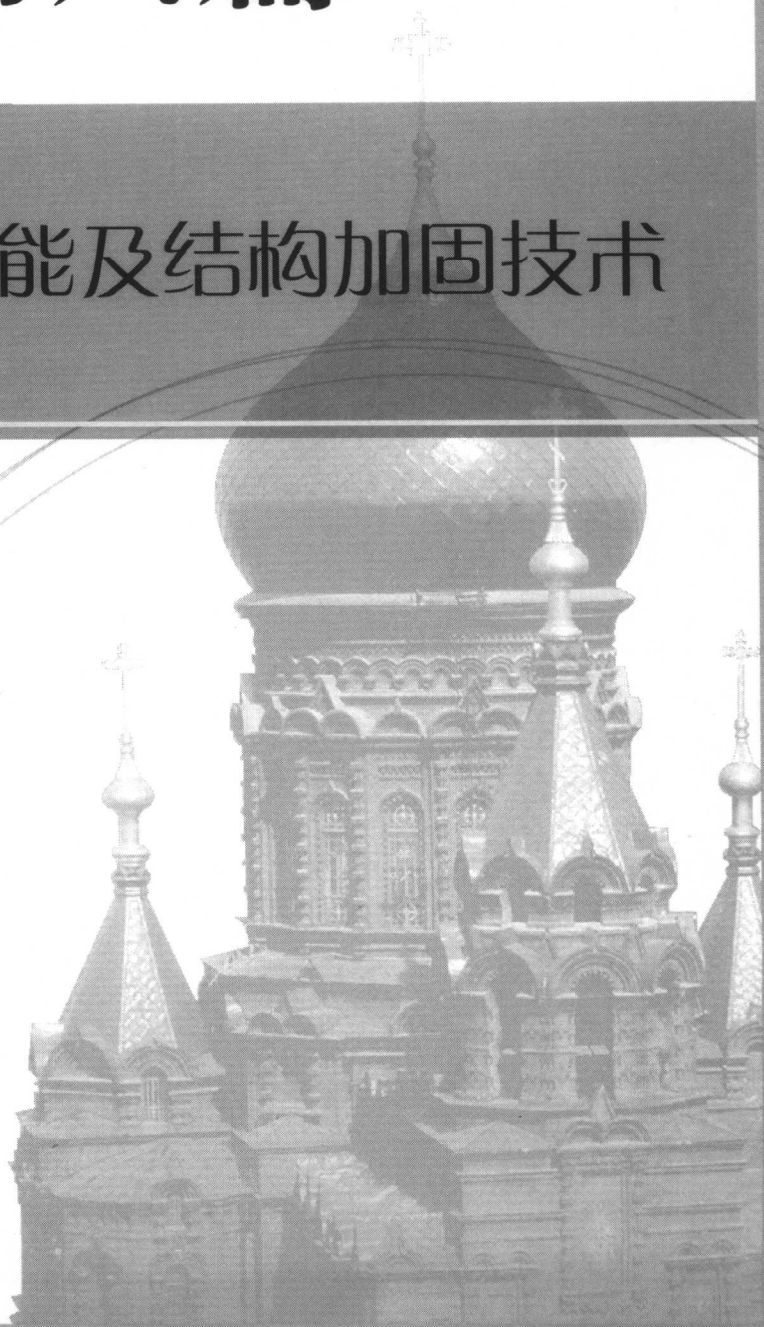
抗滑短桩在重庆市某土质滑坡中的加固应用 .....	许 健	雷 用	(1033)
砖混住宅楼爆炸损伤的加固处理 .....	孙元生	高吉中	商冬凡(1039)
某住宅楼受损后的加固设计及施工 .....	王占林	周国民	尹淑琴(1044)
松动砂垫层解除应力法迫降纠倾实践 .....	王公山	朱 磊	贾彦武 姚 顺(1048)
某住宅楼的纠倾加固设计与施工 .....	淳 庆	李明丁	李今保(1053)
某房屋的纠倾加固设计与施工 .....	倪爱琳	李延和	丁海云(1058)
我国文物古建筑整体迁移保护技术及应用 .....		吴二军	(1062)

## 第九篇 加固工程实录

水泥安定性问题房屋的检测鉴定与处理 .....	李思明	金国芳	周 颖(1069)
采用齿槽法设置后置托梁的工程实例 .....	孙铁东	张成君	孙 毅(1072)
高强钢绞线网-聚合物砂浆在郑成功纪念馆加固工程中的应用 .....		陈友明	巩正光(1076)
灌浆技术在布达拉宫地垄墙加固施工中的应用 .....	李 旭	温 勇	栗献增(1081)
碳纤维片材加固在某工程中的应用实例 .....		夏昭萍	欧阳政(1086)
某综合楼的安全性鉴定分析与处理 .....	李运兴	马二琴	王兴飞(1091)
某保护建筑木结构屋顶可靠性鉴定与加固 .....		唐榕滨	(1097)
上海浦东民生银行增层加固改造实例 .....		张 勇	周文彪(1102)
既有建筑外墙新增空调室外机搁板改造 .....	冯 卓	陈 洋	姜振凯 罗菊平(1107)
延边会展中心部分预应力混凝土梁结构承载力鉴定与加固 .....		李明柱	刘兴家(1112)
梁柱节点夹渣层缺陷综合处理技术 .....	成 勃	王金山	魏光军 崔士起(1116)
某 220kV 变电站主控制楼工程水泥地面起砂现象分析及处理 .....		苏靖宇	蒋 菱 纪 明(1120)

# 第六篇

加固材料性能及结构加固技术





# 首都体育馆屋盖结构减震分析

范峰 于晓野 严开涛 支旭东

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨, 150090)

**【摘要】** 首都体育馆是2008年北京奥运会的改扩建项目之一,存在着较严重的抗震安全问题,须进行减震加固改造。以此为背景哈尔滨工业大学提出了以减震为主,加固为辅的改建方案。文中集中介绍了屋盖结构的减震设计及相关的分析计算。在充分考虑了结构使用功能的前提下作者提出了在网架与下部框架间增设减震支座的减震方案,并结合对减震前后结构自振特性的分析阐述了方案的减震原理,论述了减震方案在理论上的可行性。最后文中选取了三条具有代表性的地震波进行了结构在频遇地震作用下的内力及变形验算,得出了结构响应被大幅降低的结论,证明了所提方案的优良减震效果。

**【关键词】** 首都体育馆;减震设计;加固;减震球型钢支座

## Vibration Reducing Analysis on Roof of the Capital Gymnasium

Fan Feng Yu Xiaoye Yan Kaitao Zhi Xudong

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150090)

**【Abstract】** The Capital Gymnasium is one of the rebuilding and expanding projects for the 2008 Olympic Games in Beijing, which, having potential problems in resisting earthquakes, needs to be strengthened or redesigned to reduce earthquake responses. Under this background, the authors advanced a design idea, to reduce seismic responses mainly, with some measures to strengthen the structure in addition. Meanwhile, the vibration reducing design of the roof and its relevant analysis were carefully introduced in this paper. Considering the requirement of building functions, the authors presented a suitable method to reduce the earthquake responses, by adding vibration reducing supporters. Then the vibration reducing principle was illustrated, with the analysis of natural behaviors of structures, and the feasibility of this project was validated. Finally a time history analysis was carried out by choosing three typical earthquake inputs, in order to test the internal forces and deformation of the structure under frequent earthquakes. As a result, it was found that the structural responses decreased greatly, and the vibration reducing project advanced was effective.

**【Key words】** the Capital Gymnasium, vibration reducing design, strengthen, vibration reducing spherical supporter

# 1 前言

首都体育馆设计建造于上世纪 60 年代,主馆建筑面积 40000m<sup>2</sup>,长 122.2m,宽 107m,高 28.5m,是当时国内著名的场馆类工程。2003 年 5 月首体被确定为北京 2008 年奥运会的排球比赛场馆,并被列为须针对 2008 年奥运会进行改扩建建设的项目之一。首都体育馆的主体分为屋盖结构和下部结构两部分。屋盖结构为正交斜放钢结构网架,下部为钢筋混凝土框架,其中屋盖结构为本文分析的重点。

由于首体已经使用了近四十年,且受限当时的技术水平及设计经验,设计时并未充分考虑抗震设防要求,结构可能存在较严重的抗震安全隐患。国家建筑工程质量监督检验中心在针对混凝土结构和上部钢网架的安全性鉴定中指出,在未考虑地震效应组合的情况下首体混凝土结构的部分梁柱及钢网架中的部分杆件已存在承载力不足的现象<sup>1</sup>。为了使首都体育馆能够满足 2008 年奥运会的使用要求,需要对该馆结构进行减震及加固处理。

## 2 减震支座分析模型及结构减震原理

### 2.1 减震分析模型

国内多家机构针对首体的抗震加固问题提出了若干方案,其中哈尔滨工业大学提出了以对结构进行减震处理为主,辅助以结构加固的改建方案,降低了改造成本并避免了对结构使用功能的不利影响。具体措施即通过给上部网架安装弹性减震支座,减小地震能量的向上输入;同时在下部框架结构局部位位置施加刚性支撑,对混凝土结构进行加固。其中网架的减震设计由哈尔滨工业大学空间结构研究中心负责<sup>2</sup>。

采用弹性减震支座有诸多优势,如施工方便,工程应用及技术成熟,国内已有成功应用于大跨空间结构减震方案的先例,而且经证明其减震效果很好<sup>3</sup>。实际方案中采用的是北方交通大学开发的减震弹簧支座。

在计算模型方面本文考虑了上部网架结构和下部框架结构的共同作用,进行了结构的整体精确建模(三维计算模型见图 1)。按照对称性原则,文中仅给出了结构对称部分的响应结果(网壳支座编号见图 2)。

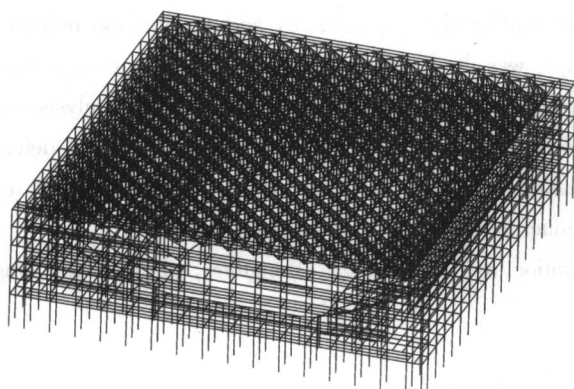


图 1 结构三维模型图(包含下部框架)

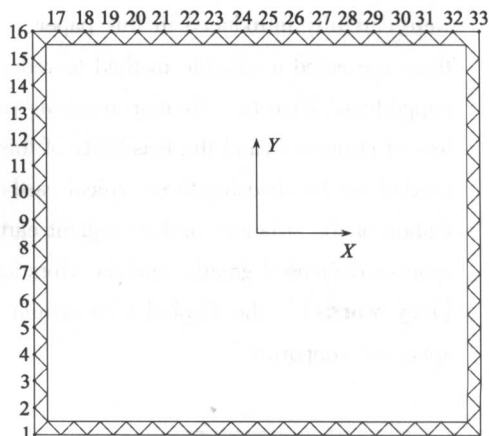


图 2 网壳支座编号

为对比减震方案的效果,文中构建了两种有限元模型,分别为初始模型与减震模型。

(1)初始模型(未减震):上部网架铰支于下部框架柱端,三个方向均为刚性约束(图3)。

(2)减震模型:网架支座与柱端之间设置减震球型钢支座,该减震支座在水平方向( $x$ 方向和 $y$ 方向)为弹性约束,在竖直方向( $z$ 方向)为固定约束。在有限元分析中,减震支座的水平向约束被两个单向弹簧所代替,弹簧刚度取 $1.0 \times 10^5 \text{N/m}$ (图4)。

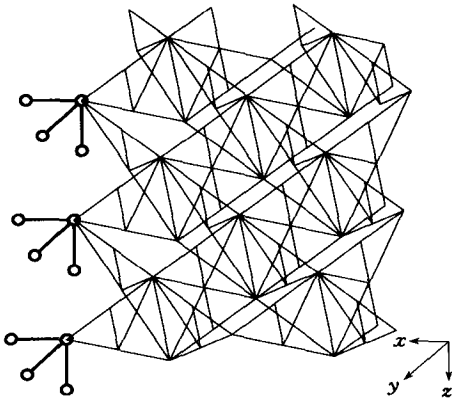


图3 初始模型

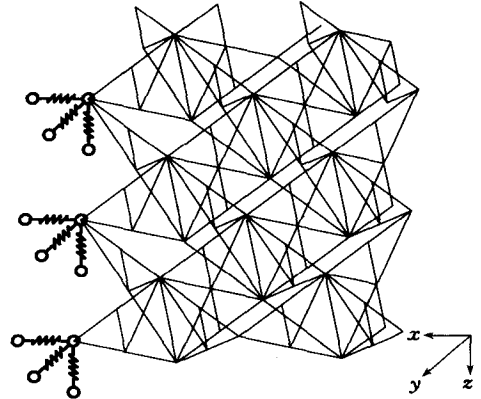


图4 减震模型

## 2.2 减震原理

结构在地震作用下的响应是一个复杂的动力学问题,但在众多纷乱复杂的影响因素中结构的自振特性是关系其振动强弱的重要因素,许多减震方案都是通过改变结构的这一特性实现的。本文即是通过调整结构的刚度,降低结构的周期,使得对结构振动起控制作用的低阶振型的周期在地震反映谱上的位置向响应较小的长周期方向移动,从而达到结构减震的目的(图5)。下文分析减震措施,对结构自振特性影响的部分还会就这一原理做进一步论述。

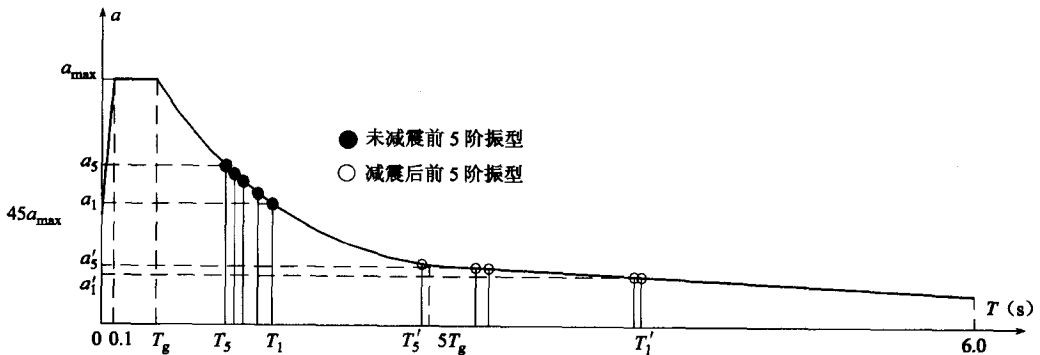


图5 减震方案引起的结构响应加速度的变化

### 3 采取减震措施后对结构自振特性的影响

#### 3.1 对结构自振周期的影响

在网架结构中,结构前若干阶低阶振型往往对结构振动起控制作用,因而它们在结构调整后经历的影响尤其受到关注。采取减震措施后结构低阶振型的周期普遍增长,其中结构前十阶振型的周期大致为减震前的3倍左右(图6)。减震前结构的第1阶和第5阶周期分别为1.17s和0.86s,减震后结构这两阶振型的周期分别变为3.66s和2.17s;考虑到首体所在场地为3类场地土,设计地震分组为第一组,场地特征周期为0.45s,这样减震后结构前几周期在结构响应加速度谱上均大致处于平台区的位置,明显避开了结构响应较为剧烈的区域(图5),从理论上可以达到良好的减震效果。

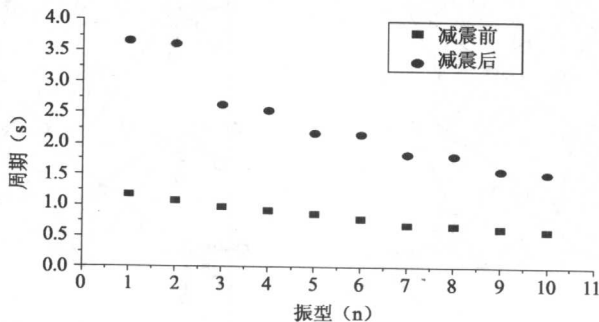


图6 结构周期分布图

#### 3.2 对结构振型的影响

结构的振型形状也是影响结构动力响应的重要因素,因此本文针对减震前后结构的振型情况进行了较深入细致的分析。减震前结构的低阶振型(1~10阶)主要以结构的整体振动为主,下部结构的振动带动了结构的整体运动(第四阶振型除外,这一阶振型为网架结构自身的上下振动),其中上部网架及下部框架共同参与振动(各阶振型及其振动形式见图7)。设置了减震支座以后,结构上下部连接处的水平刚度大大降低,这导致结构低阶振型的性质发生了很大的变化,结构在振动中表现为上、下两个相对独立的部分。由于上部网架可以有相对自由的位移,因此其对于下部框架的影响较小,结构以上部网架的整体振动为主(图8)。

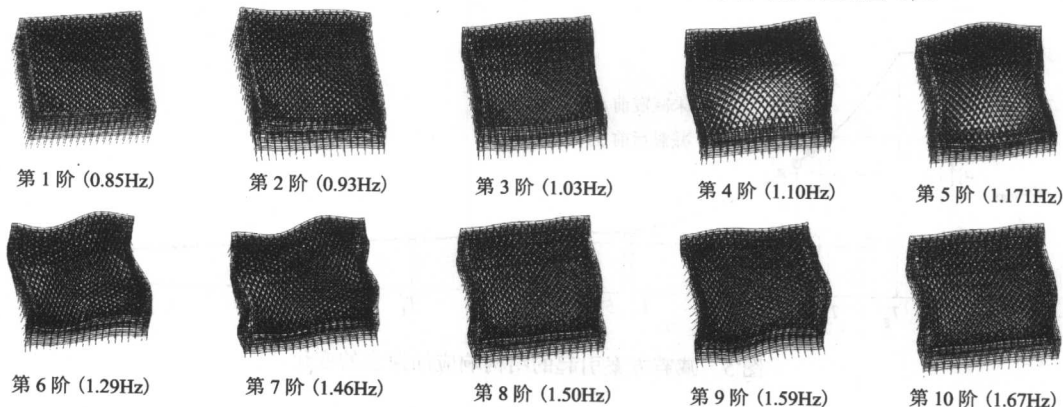


图7 减震前结构各阶振型图

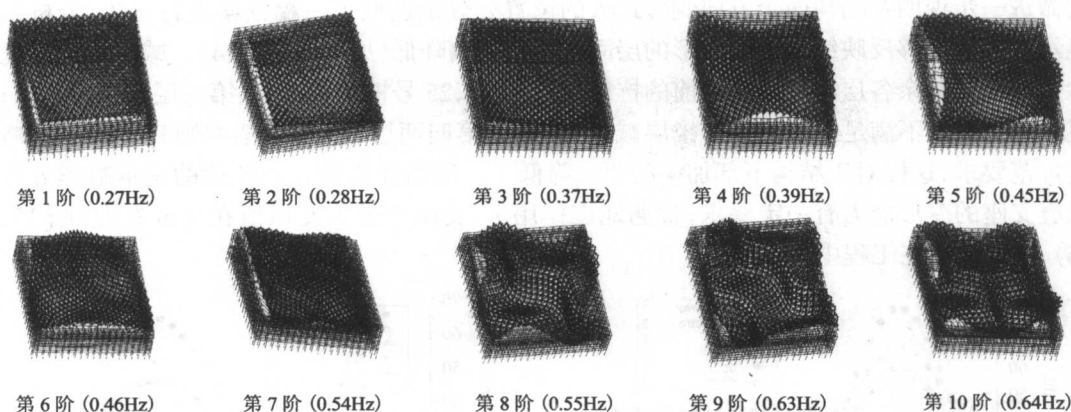


图8 减震后结构各阶振型图

### 4 减震效果分析

为详细考察本减震方案的实际效果,评估采取减震措施后首体场馆及设施的抗震水平,本文利用时程分析法分别针对减震前和减震后两种计算模型进行了结构在频遇地震作用下的内力及弹性变形验算。计算中选取了 El-Centro 波和 Taft 波两条天然地震波和一条人工合成波北京波,按照北京地区抗震设防烈度为 8 度考虑,频遇地震下地震加速度峰值为 70gal,三向输入。

由于在之前的评定中发现结构的下部框架较为薄弱,因此对减震后下部结构受到的影响要格外关注。通过对比发现,减震后上部网架对下部框架的作用被大大降低,如图 9 及图 10 中所示各框架柱柱顶支座反力降低幅度大致在 75% (17 号支座) ~ 95% (24 号支座) 左右 (图中 1 表示减震前,2 表示采取减震措施后),这极大地缓解了下部框架的不利受力状态,而且这一减震效果在结构受力不利的框架上表现得更加明显;减震前下部框架柱顶反力分布很不均匀,部分框架柱受到了上部网架结构很大的作用力,减震后各框架柱受力趋向均匀,各框架柱间受力变化不大,结构受力更加合理 (见图 9、图 10)。

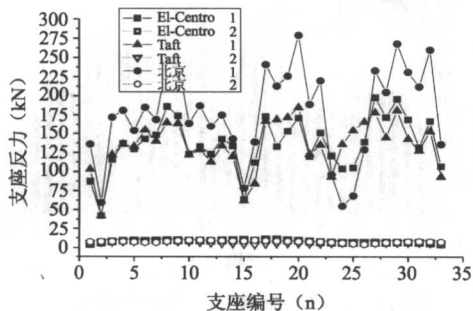


图9 1-33 支座 X 向反力

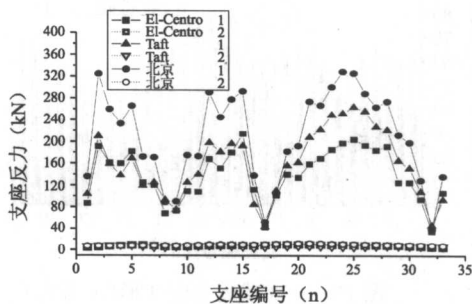


图10 1-33 支座 Y 向反力

采取减震措施后下部结构的响应大大降低,下部框架柱顶最大位移降低 20% ~ 65% (图 11、图 12)。以柱顶位移最大的 8 号框架柱为例,在北京波作用下其达到柱顶位移最大值为 80mm,减震后这一数值为 28mm,降幅达到 65%。与此同时下部框架的侧移也明显减小,为对



此做进一步说明在结构两个方向侧移最大的位置处分别选取了一榀框架进行分析,分析结果显示减震后能够反映结构侧向变形的层间位移角大幅降低(见图 13、图 14)。减震前 9 号框架除第二层外其余各层均不满足目前的抗震规范要求<sup>4</sup>,25 号框架中第一、第三层不满足要求;减震后 9 号框架不满足规范要求的楼层减少为第一、第四两层,25 号框架中则只有第一层略超过规范要求,这样对于结构下部加固的要求降低了。但需要提请人们注意的是本减震方案对减震支座的变形能力有一定要求,常遇地震作用下,支座的最大变形值在 9cm 左右(图 15、图 16),这一数值在工程中可以实现。

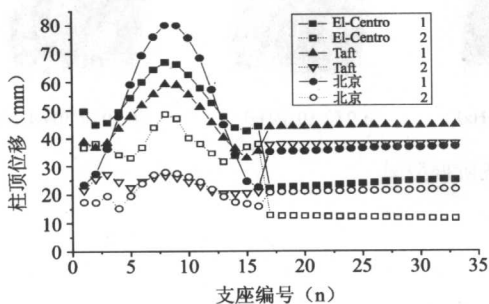


图 11 1-33 支座 X 方向柱顶位移

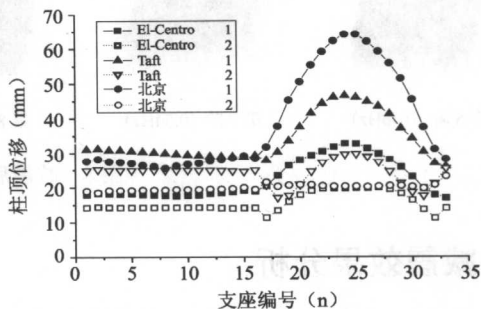


图 12 1-33 支座 Y 方向柱顶位移

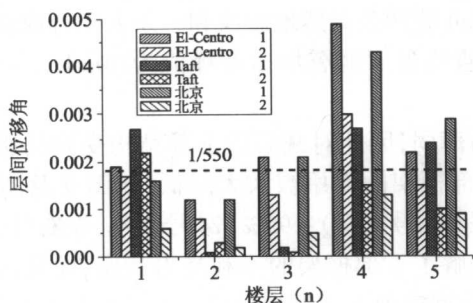


图 13 9 号框架各层层间位移角

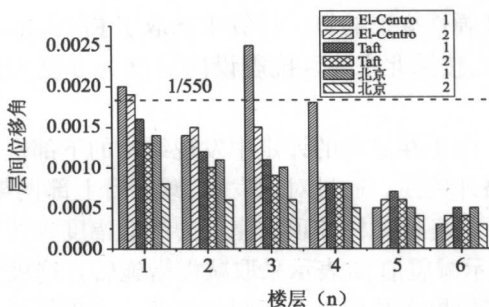


图 14 25 号框架各层层间位移角

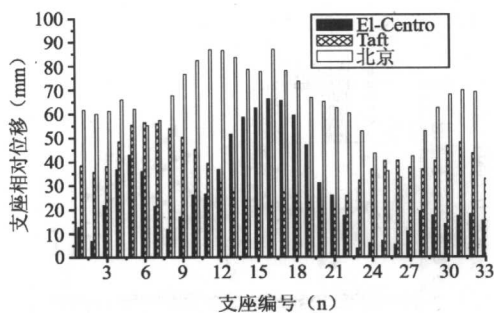


图 15 1-33 减震支座变形(X 方向)

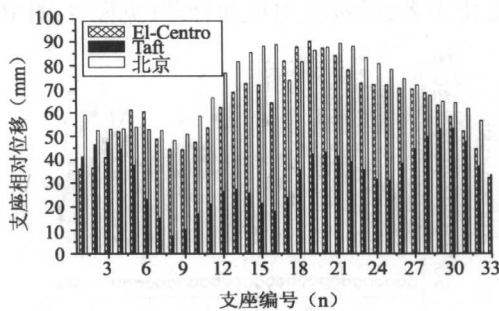


图 16 1-33 减震支座变形(Y 方向)

在工程设计中,处于中、高应力水平的杆件对于网架的安全评估具有重要意义,因此文中详细研究了减震方案对于应力大于 100MP 的所有杆件应力的影响,评估了网架的减震效果。在对这些杆件的减震系数(即减震后杆件应力相对于减震前的降低率)的统计中发现,虽然存在少数杆件应力有所增加的现象,但在采取减震措施后大部分杆件的应力得到降低。图 17、