

土木工程结构 检测鉴定与加固改造 (下册)

第九届全国建筑物鉴定与加固改造
学术会议论文集

郑建岚 主编



中国建材工业出版社

土木工程结构检测鉴定 与加固改造

——第九届全国建筑物鉴定与加固改造学术会议论文集

(下册)

郑建岚 主编

中国建材工业出版社

目 录

(上册)

第一篇 理论与试验研究

建筑结构安全性评定的理念	邱小坛	吴学利	(3)
结构胶粘剂工艺性能标准的研究与制定	梁爽		(8)
细菌修复加固历史建筑应用研究进展	屈文俊	李沛豪	(18)
古建筑保护现状及其研究热点	张天宇	李梁峰	(26)
中国建筑结构胶 30 年的发展历程	贺曼罗	张首文	王文军 (31)
关于近现代建筑结构评定的理论与方法研究	黄选明	邱小坛	杨旭东 彭立新 (39)
纤维混凝土断裂力学研究现状	黄诗旺	罗素蓉	(44)
CFRP 粘结钢板复合构件的粘结剪切有效粘结长度试验研究	完海鹰	马登堂	(51)
钢纤维水泥砂浆配合比试验研究	罗兴华	卜良桃	(55)
自密实混凝土与老混凝土的粘结抗剪性能研究	陈峰	郑建岚	(60)
考虑空间作用与节点刚性影响的钢桁架结构系统荷载试验与分析研究	郭春红	弓俊青	张家启 武慧芬 杨建平 张志超 (68)
制定辽宁地区泵送混凝土回弹测强曲线的试验研究	由世岐	张大利	刘宏生 王元 (74)
纵向开裂木柱轴压性能试验研究	汤红永	张伟平	顾祥林 欧阳煜 (80)
氯离子扩散系数现场检测方法的应用研究	张京街	林文修	(87)
非胶封装光纤光栅应变传感器性能的实验研究	马先宏	弓俊青	曹春耕 (91)
复合浆体中粉煤灰和水泥水化反应程度的测定	许利惟	郑建岚	(96)
温度对植筋拉拔力影响试验研究	刘长青	李占鸿	陆洲导 萧雯 (101)
井字粘贴 GFRP 布加固砖砌体墙受剪试验研究	刘新强	由世岐	曹智强 (107)
CFRP (碳纤维) 筋加固混凝土梁的二次受力试验研究	陈尚建	刘海波	陈洲 侯发亮 (115)
不同固化体系下环氧结构胶耐湿热老化性能研究	谢业明	潘荣	彭勃 (120)
植筋加固中新旧混凝土界面剪切性能影响因素的研究	梁咏宁	鄢飞	季韬 (126)
芳纶纤维筋梁受弯性能试验研究	飞渭	江世永	李加贵 (132)
高性能混凝土抗渗性与护筋性的试验研究	汤清平	刘金伟	(138)
大跨高比预应力钢梁试验研究	张际斌		(143)
混凝土梁超载破坏后的加固试验研究	成勃	裴兆贞	李丛 (149)
弓背式表面嵌固法加固混凝土梁试验研究	崔士起	成勃	陈莉 齐俊林 (155)

振动台模型试验设计方法研究	王磊	陈华	(162)		
考虑二次受力的 CFRPs 约束混凝土圆柱轴压性能的试验研究	潘从建	杨建中	(167)		
CFRP 加固木梁的试验研究	朱雷	许清风	李向民	贡春成	(173)
基于动力测试的混合结构加固试验研究	施卫星	单伽铨	刘绍峰	(179)	
混凝土结构植筋胶加固抗震性能试验	陈家晖	徐海翔	(184)		
自密实混凝土收缩徐变计算模型研究	晁鹏飞	郑建岚	(191)		
收缩对高性能混凝土板结构非荷载应力的影响	王雪芳	郑建岚	(196)		
堤坝结构模型抗震试验研究	王磊	(201)			
CFRP 加固砖砌体柱可靠性分析	初正恒	刘新强	(207)		
用拉普拉斯变换方法求解轻钢加层结构的折算阻尼比	吕凤伟	曹双寅	(213)		
自密实混凝土加固 RC 柱的有限元模型	沈美霞	郑建岚	(219)		
二次受力加固 RC 偏压柱的承载力分析	范炜	郑建岚	(227)		
经验遗传 - 单纯形算法在桥梁结构损伤识别中的应用	姜丽萍	崔士起	谷风明	(233)	

第二篇 结构测试、工程检测及鉴定

五棵松体育馆钢结构安全监测系统研发及数据分析	弓俊青	郭春红	侯健	肖专文	(241)	
大型古建筑木结构大楼检测鉴定	张坦贤	吕西林	李培振	(248)		
建筑结构适用性评定的理念与原则	陶里	邱小坛	唐钜	(255)		
基于神经网络的钢筋位置探测方法	叶爱文	谢慧才	(260)			
既有结构的混凝土冻融损伤程度检测方法	孙彬	周燕	王景贤	邱小坛	(265)	
混凝土连续板受火损伤的“刚度损失”评估法	余江滔	陆洲导	项凯	(272)		
某悬索步行桥垮塌的撞击影响鉴定	左勇志	马德云	(277)			
REASES 软件中锈蚀钢筋混凝土构件的性能评估	胡广鸿	顾祥林	彭斌	孙凯	王徽	(282)
水泥筒仓内减压锥立柱破坏的事故分析	曹桂敏	李延和	周贤葆	(290)		
某钢铁公司工业厂房可靠性鉴定	彭超	卜良桃	(296)			
钢筋混凝土结构缺陷的天线阵雷达检测方法应用研究	陆伟东	秦益明	刘金龙	杨放	(301)	
浅析钢筋混凝土板裂缝的原因与补强加固处理方法	叶强	(306)				
未经质监部门监督的建筑物补充检测及鉴定方法的探讨	查玉庆	陈栋	周佳	(311)		
有缺陷钢屋架的可靠性评定	杨建平	(315)				
基于隐患分析的房屋安全模糊综合评判	陈小杰	赵为民	(317)			
轻型钢结构雪灾倒塌事故分析及反思	黄凤霞	陈雪峰	郑捷	庄承	(323)	
灰色聚类法结合模糊综合评判法用于单层工业厂房可靠性鉴定	高剑平	尹洪妍	(328)			
上海外滩通道沿线保护建筑损坏趋势检测方法探究	李占鸿	陈洋	张骏华	(336)		
天津某蓄电池厂受硫酸腐蚀车间及地下水受酸污染情况检测鉴定	段向胜	周锡元	(342)			
转炉炼钢厂房可靠性鉴定初探	席向东	张文革	(350)			

某砌体结构办公楼检测鉴定	李煜嵩 李艳萍 (354)
某小学教学楼裂缝检测鉴定	于长江 刘宏生 由世岐 (359)
建筑工程结构检测的基本原则	高小旺 高 炜 李清洋 杨 晨 申克常 (362)
某钢结构天沟倒塌事故分析	姜长顺 李艳萍 (367)
某厂房建筑结构可靠性鉴定	任满刚 王铁锋 (371)
某热电厂 6.3kV 母线室可靠性鉴定	郝 明 张 询 高 亮 (375)
某发电厂钢筋混凝土烟囱温度裂缝问题的鉴定	雷 勇 蒋 锋 敬志国 (380)
上海某老建筑的检测与评估	毕大勇 卢 军 周德源 (384)
既有支挡结构司法鉴定的有关问题探讨	雷 用 谢富林 (389)
关于栏杆荷载检测技术的讨论	刘兴远 余 周 (395)
某中板厂排架厂房可靠性鉴定	梁学明 (403)
钢结构房屋倒塌事故综述	刘振清 姜长顺 张书禹 梁学明 (413)
做好结构加固施工中的安全生产工作	赵 雁 钟志远 (419)
常用加固修复技术评述	王国民 宁迎福 (423)
浅议结构改造加固中的几个问题	戎希杰 吴庭翔 陈 志 (429)

第三篇 加固材料性能及其新技术

高性能复合砂浆薄层加固钢筋混凝土结构	尚守平 (437)
建筑结构胶耐湿热老化性能测试方法研究	王文军 岳彩艳 李红旭 张首文 贺曼罗 (448)
FRP 材料嵌入式加固技术	陆洲导 皮 锐 周 激 (454)
预应力 FRP 布加固混凝土梁的承载力研究	张建文 曹双寅 (459)
聚合物改性高强修补水泥砂浆的研究	谢业明 葛序尧 单远铭 (463)
玄武岩纤维筋混凝土梁挠度计算方法	江世永 飞 渭 胡显奇 孙鹏永 (469)
FRP 加固混凝土梁界面粘结剪应力分析	蔺新艳 龚 健 (475)
建筑物加固改造自主创新技术介绍	项剑锋 (481)
关于增强纤维加固钢筋混凝土结构粘结性能的探讨	李文渊 宫 宁 林 昭 (488)
FRP 加固混凝土梁的物理力学性能研究简述	陈凯亮 赵卫锋 周 靖 (493)
结构用改性环氧新旧混凝土界面结合胶的技术发展和应用	张成英 (499)
论“建筑加固”在社会建筑中的发展及应用	蔡飞昌 (504)
FRP 片材加固混凝土框架结构	郑连盛 (510)
KEVLAR®纤维特性及其在混凝土结构加固中的应用	王 步 王 溥 王 勇 (514)
水泥基加固材料的耐久性及其检验指标	王国杰 郑建岚 (520)

(下册)

第四篇 结构加固设计与施工新技术

高效预应力加固设计方法研究	李延和 吴 元 (529)
钢筋钢丝网砂浆加固混凝土梁的抗弯性能	熊光晶 朱湛贤 李丰丰 (536)

砖混结构平改坡工程的思考与建议	孙树斌	王凤来	(541)
高层建筑底部框架柱轴压比超限问题加固设计实例	李 林	高宗祺	陆建勇 (544)
适用于砖混房屋大空间改造的钢板-砖砌体组合结构	敬登虎	曹双寅	郭华忠 (550)
碳纤维布加固古建筑木梁受弯承载力计算	徐明刚	邱洪兴	(556)
钢筋混凝土转换桁架斜腹杆偏位质量缺陷分析及处理	谢红艳	陈大川	(562)
某化工厂栈桥的加固设计	龚荣华	邱洪兴	(568)
体内外同索预应力技术在建筑物加固与改造工程中的应用	袁爱民	李延和	(573)
某车间厂房排架上柱加固设计		于长江	(578)
某小区三幢住宅楼纠偏加固技术研究	王玉珏	李延和	任亚平 (581)
土建加固工艺操作中的某些常见病及防治	陈 宙	林功丁	(585)
钢筋混凝土墙柱置换混凝土加固施工方法	陈 宙	陈 垦	曾国灿 (592)
故道桥预应力 CFRP 筋加固提载设计	阮永怀	韩 彬	杨金华 侯发亮 (596)
青草坪拱桥 FRP 筋与网格加固设计	阮永怀	杨金华	韩 彬 侯发亮 (604)
既有建筑物增设电梯改造加固方法探讨	刘 炎	林 靖	(611)
钢筋混凝土结构无振动切割可控拆除技术的发展与展望	李梁峰	鄢仁辉	张天宇 阮敏杰 (614)
增大截面法加固构件的正截面承载力计算分析	欧阳煜	胡 莹	胡 亮 (620)
某多层综合楼楼板加固改造设计	张 静	朱 虹	(625)
偏心受压构件正截面承载力加固设计快速算法初步研究	李常虹	毕 琼	(630)
锚贴钢板加固钢筋混凝土梁抗弯性能研究概况	高剑平	邓燕华	(637)
某工程结构加固方案均匀性评价	高 炜	刘智星	高小旺 李清洋 杨 晨 申克常 刘 昱 (644)
CFG 桩复合地基变形计算方法探讨	罗东远	张 强	(648)
砖混房屋整体式外套结构加层计算模型述评	高剑平	邓燕华	(652)
RC 梁贴层加固二次受力前后位移测算的一个简化方案	常连芳		(656)
增设支撑在某仓库改造加固中的应用	朱立猛	王建峰	周德源 (662)
某传统木构建筑的修缮设计	淳 庆	李今保	(666)
输电线塔倾斜铁塔原位加固纠偏关键技术研究	刘毓胤	刘祖德	(673)
某商场新增自动扶梯结构加固改造设计	潘从建	孟履祥	(680)
某建筑物多次改扩建后的结构选型及沉降控制方法	唐榕滨	宋 尧	王桂起 (686)
新旧建筑相邻基础影响及其防治措施	唐榕滨	曹升铤	姚可忆 (689)
某住宅楼结构整体改造设计		严华峰	(692)
某工程框架梁裂缝原因分析与加固设计	陈义侃		(697)
多层砌体房屋抗震鉴定及加固设计		张小俐	(702)
预应力卸载法在实际加固工程中的应用	陶继勇	罗 琳	陈 江 (708)
实际加固工程中卸载技术方案分析对比	陶继勇	鲁兆红	罗 琳 (711)
某框架结构厂房加固设计		李 瑾	(715)
某框架结构抽柱加固设计与施工		黄 仪	(718)

福州基督教青年会修复加固设计	黄 仪 李 瑾 王小幸 (722)
应用混凝土结构加固设计规范对框架柱进行加固设计的探讨	严景明 严 林 (727)
排架结构老厂房安全适应性改造	李慎霞 王晔霞 李爱国 孙学军 (733)
某厂房混凝土梁加固设计	宁迎福 (738)
钢-混凝土组合梁计算程序及在加固中应用	严承璋 黄 挺 (742)
在建隧道破损后的型钢混凝土补强加固	袁文阳 李 敏 杨金华 李 艳 (746)
钢结构厂房吊车梁加固时制动板分析	李爱国 孙学军 谢韵平 (752)
某体育馆悬索屋盖承载能力评估	赖 伟 田学刚 雷 勇 (757)
某工程剪力墙局部凿除重浇时的支顶脚手架搭设方案	魏明宇 田学刚 (762)
外包型钢及加大截面加固法的应用	何永智 (766)
从实例中探索桩承台加固、纠偏施工	阮 毅 魏言榕 (771)
某大厦续建前的改造加固设计	刘 静 刘成斌 (775)
加层改造的抗震设计	廖文彬 (781)
某框架结构不均匀沉降有限元分析及加固设计	李梁峰 (787)
某高层框剪结构柱头缺陷混凝土置换加固设计与施工	吴志雄 (795)
旧住房成套改造工程中的纠偏与加固	倪诗阁 段建强 (799)
莱芜高新管委会 15 层综合楼平移设计	夏风敏 贾留东 张 鑫 (806)
某县中学教职工住宅楼地基加固及纠偏实例	孙 康 陈 筠 叶 波 孙家福 (813)
建筑物整体移位中错位托换梁的水平推力传递	鄢仁辉 (820)

第五篇 结构耐久性研究

用于混凝土结构的埋入式传感器的耐久性研究	程书剑 刘西拉 方从启 (827)
REASES 软件中钢筋混凝土框架结构的可靠性评定方法	王 徽 顾祥林 孙 凯 彭 斌 胡广鸿 (836)
混凝土结构耐久性病害的诊断与修复	熊 焱 屈文俊 (844)
砌体结构耐久性的检测方法	林文修 杨旷达 张兴伟 (855)
结构耐久性的评定理念与原则	周 燕 邱小坛 唐 钜 (860)
不同环境下碳纤维布耐久性试验研究	冯展磊 顾祥林 (866)
某大型地下车库屋面结构变形和裂缝原因分析	简 斌 李少巍 赵 国 田毅勋 (871)
现浇楼板早期裂缝成因分析及修补加固	龚卫东 李 强 范 力 (877)
插板式吊车梁端疲劳寿命分析	董振平 庄继勇 王庆霖 王 发 龚卫东 (882)
长年高温高湿环境对钢筋锈蚀影响的初步研究	刁学优 鲍自均 (888)

第六篇 结构抗震及灾后处理

地震后成都某剪力墙高层损伤计算分析	徐微平 陆洲导 余江滔 (899)
某公司厂房火灾后结构受损检测鉴定分析	李延和 李书祥 肖进如 任亚平 (905)
液体粘滞阻尼器在抗震加固中的应用研究	郑 云 惠云玲 弓俊青 张家启 (912)

某混凝土框架结构振动测试及计算分析

.....	常好诵	弓俊青	肖辉	侯健	邓明	雷明进	黄新豪	(917)
钢筋混凝土框架结构震害调查与讨论	王耀伟	林文修	杨旷达	杨记峰				(922)
成都市温江区的震害调查与思考	王耀伟	廖新雪	林文修	池海				(928)
重庆地区房屋震损调查及重点	廖新雪	林文修	张兴伟	徐志武	何世兵			(933)
火灾后混凝土结构的损伤检测与鉴定	贺学军	朱凡颖	徐玲	杨晓华				(940)
地震后某桥梁桥台安全性鉴定	刘兴远	何祥全	颜丙山	曹淑上				(947)
建筑结构抗震加固的地震力计算			彭立生	袁文阳				(954)
建筑可靠性鉴定及抗震性能评估				张小云				(960)
钢构架的阻尼器减震分析			李晓东	李永录				(972)
泸州某商厦火灾受损结构加固补强施工	赵雁	钟志远	陈德辉					(977)
某综合车间火灾后结构检测鉴定与处理		李凯	李艳萍					(983)
隧道爆破施工法对临近建筑物的震害分析	张旻	雷波	来朝辉					(987)

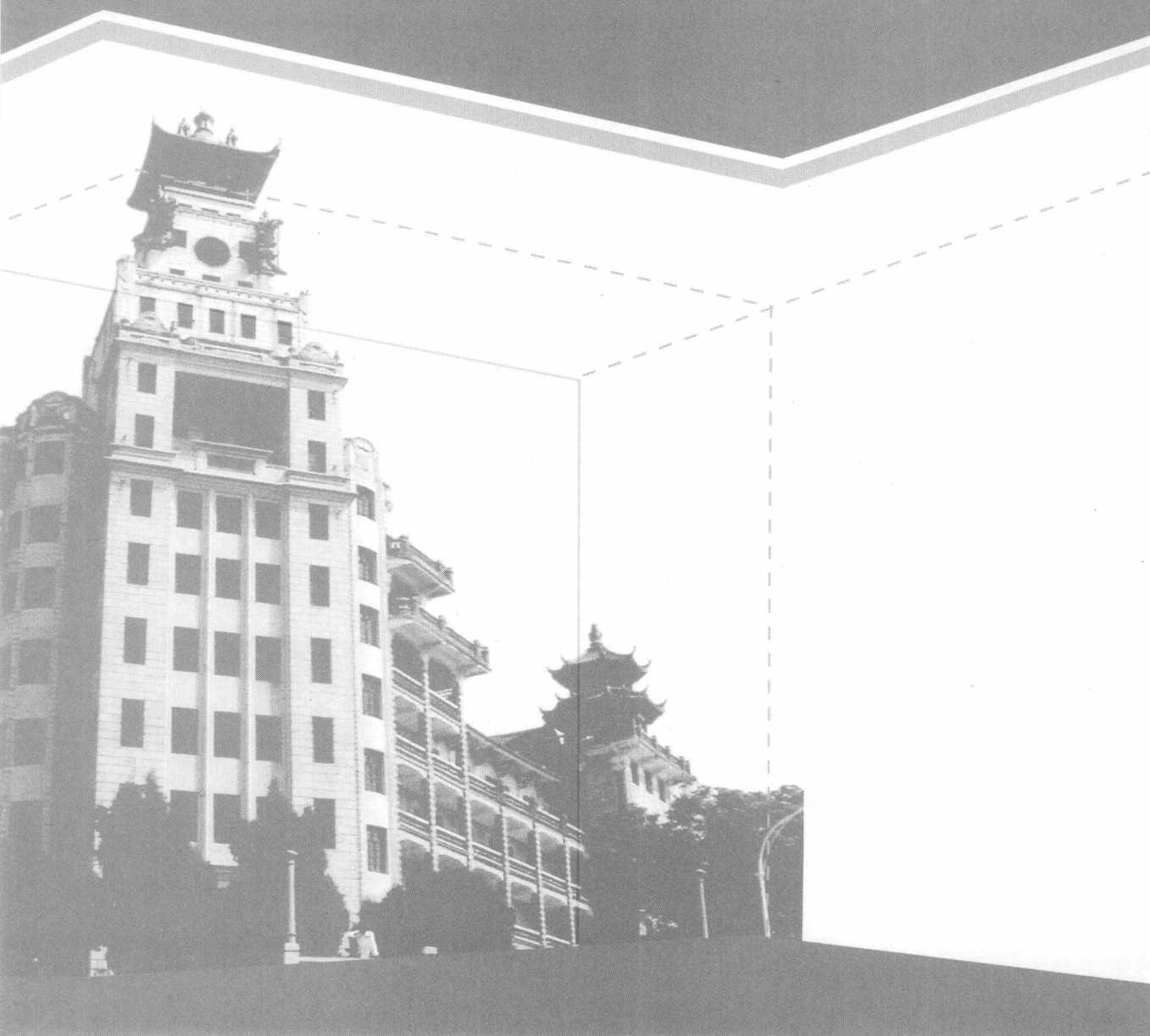
第七篇 加固工程应用案例

历史砖石拱桥病害及修复加固实例	曹双寅	敬登虎						(997)
某桥梁结构碱-骨料反应及加固处理	亓涛	吴善能						(1002)
某住宅小区煤矸石砖石灰爆裂的分析及处理实例	黎红兵	卜良桃						(1007)
同济大学文远楼的检测、鉴定与加固改造	张克纯	陆洲导	徐微平					(1011)
某地下车库加固改造实践	张卉	完海鹰	吴彦					(1017)
某高层建筑转换层梁裂缝检测评定及加固处理	李静媛	卜良桃						(1024)
某厂房焦炉抵抗墙加固技术研究	万长胜	卜良桃						(1029)
地下顶管施工对房屋主体结构影响的检测与加固研究	陈军	卜良桃						(1037)
某桁架结构鉴定加固实例	武慧芬	张家启	杨建平	弓俊青	郭春红			(1042)
加层改造房屋基础加固实例及关键技术处理	徐玲	贺学军	朱凡颖					(1048)
某轻轨桥墩的置换混凝土加固	李今保	赵启明	淳庆					(1054)
公路桥主体结构的检测与加固	李良毅	卢亦焱	陈道凡					(1062)
某多层砌体房屋墙体裂缝原因检测与分析	蔡乐刚	徐明	王晓华					(1067)
某污水处理厂柱纵向开裂的原因分析	袁海军	任胜谦	王东方					(1074)
现浇地下室顶板早期裂缝的工程实例分析	谭晋	李强	董振平	张成中				(1077)
某工程地下室上浮原因分析及处理		刘治	裴兆贞					(1082)
某框架结构房屋振动原因分析与加固处理		王建强	郑钧					(1086)
用植筋与粘钢相结合的方法对受弯构件负弯矩区进行正截面承载力加固			黄和平					(1093)
静压 PHC 管桩加固工程实例			李晖					(1097)
加固技术在省老体协综合楼中的应用			林世明					(1101)
综合加固法在某厂房加固工程中的应用			钟钢生					(1109)
天津滨海某 220kV 变电站工程混凝土裂缝的分析和处理		苏靖宇	宋奎山					(1113)
花岗岩孤石引起的桩基事故的分析处理		刘洪波	吕文龙					(1118)

某 220kV 变电站架构不均匀沉降的纠偏加固	纪 明	宋奎山	(1122)
某住宅空心板裂缝分析及处理		杨燕艳	(1128)
某预制阳台板裂缝鉴定及处理	全 理	鲁兆红	(1132)
软土地区某宿舍楼的质量问题及加固处理	吕文龙	刘洪波	(1136)
某拱形屋面板建筑物鉴定及加固	安国旗 李春占	赵 磊	王明立 (1141)
某办公楼托梁拔柱设计与施工	陈洪亮	孙晓哲	高 亮 (1146)
某三孔双曲拱桥的加固	鄢仁辉 王峻高	苏志明	林剑峰 (1151)

第四篇

结构加固设计与施工新技术



高效预应力加固设计方法研究

李延和¹ 吴元²

1 南京工业大学, 江苏南京, 210009

2 东南大学土木工程学院, 江苏南京, 210096

【摘要】 传统预应力横向收紧加固法由于预应力数值偏低、损失较大及钢筋锈蚀严重等原因已退出历史舞台。而现代高效预应力加固法因其克服了上述不足而被广泛应用。但是, 由于各种求解体外预应力筋极限应力增量的理论差别很大, 在加固设计时极限应力增量取值往往相当保守, 这就在一定程度上阻碍了高效预应力加固法的发展。本文通过分析极限状态下体外预应力加固梁的变形状态, 建立了梁体挠度与力筋伸长之间的变形制约关系, 得到了形式相对简单的极限应力增量公式。通过截面分析提出了加固梁抗弯设计方法。最后, 通过一个典型工程算例说明, 加固设计的详细过程。

【关键词】 高效体外预应力, 加固, 受力特征, 加固机理, 极限应力增量, 设计方法, 算例

A Study of Design Method for External Prestressing Strengthening

Li Yanhe¹ Wu Yuan²

1 Center of Strengthening and Appraisal, Nanjing University of Technology, Nanjing, 210009, China

2 College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China

【Abstract】 Traditional external prestressing strengthening method has many problems, such as lower prestressing, smaller strengthening, higher loss of prestressing and serious corrosion for tendons, therefore, it has very few applications in practice now. But, modern external prestressing strengthening method has not the above disadvantages; and it has become a popular strengthening method for concrete structures. Nevertheless, it is not yet a perfect one, because it is very difficult to calculate the ultimate stress increment of tendons. In order to deal with the problem, deformation state of beam under the ultimate state was analyzed and the relationship between the middle deflection and the elongation of tendons of beam were established. The formula for predicting the ultimate stress increment in tendons of beam was proposed. Finally, an engineering case was introduced to present a detailed process for the flexural design of the beam strengthened with external prestressing.

【Key words】 high efficiency external prestressing, strengthening, mechanical characteristics, reinforcement mechanism, ultimate stress increment, design method, engineering case

预应力加固法分为高效预应力加固法和预应力拉杆横向收紧加固法两种^{[1],[2]}。前者通过千斤顶张拉布置于构件体外的无粘结钢绞线达到加固目的；后者通过人工横向收紧布置于构件体外的Ⅰ、Ⅱ级钢筋达到加固目的。由于横向收紧法预应力数值偏低，加固量不大；在长期荷载下，钢筋应力松弛损失较大，且锈蚀严重等原因，近年来其在加固中的应用越来越少。鉴于此，本文主要介绍高效预应力加固法。

1 受力特征及加固机理

(1) 受力特征

按照预应力筋布置于混凝土内部还是外部将预应力分为体内和体外预应力。本文的高效预应力加固可归类为体外预应力，但其受力特征与普通体外预应力混凝土结构还有一些区别：

①普通体外预应力混凝土结构在施工期间施加预应力，此时结构尚未使用，仅承受施工荷载（包括结构自重）。而高效预应力加固法加固的则是已经使用、存在变形、裂缝的结构，这在设计中应有所考虑；

②高效预应力加固的构件一般为使用多年的结构，加固时混凝土的收缩徐变已基本完成，常常可以不考虑预应力的收缩徐变损失；

③高效预应力加固法预应力筋线形主要采用折线形，在弯折点和锚固端采用钢板传力，弯折点、锚固点的选择随被加固构件的实际情况确定；

④普通体外预应力混凝土结构的混凝土强度等级宜大于 C40，不应低于 C30，这是从新设计构件时要求经济合理的角度确定的。而高效预应力加固法加固的构件混凝土强度等级往往低于 C30，有时甚至低于 C15，不满足上述要求。但由于加固工程是以结构满足安全使用要求为前提，经济合理为次要因素，因此低强度混凝土构件可以采用预应力加固法加固。此时，应对转向及锚固区采取加强措施提高局部承压能力；

⑤普通体外预应力结构一般应用于桥梁等大跨度结构，由于体外预应力仅通过转向块及锚固端与混凝土结构相连，因此在有限传力点间混凝土与预应力筋变形不一致，存在二次效应，这就影响了体外预应力作用的发挥。但对于房屋结构，被加固构件跨度一般不是很大，其二次效应可以忽略。

(2) 加固机理

通过对加固构件的等效荷载分析，不难得到体外预应力的加固机理，总结归纳为以下三点：

①通过张拉体外预应力钢筋，对加固结构产生一组不平衡力偶，该不平衡力偶可以抵抗结构上的部分外荷载，达到加固的目的；

②通过施加预应力，预应力筋与被加固构件形成一组合结构，将原结构外荷载转移到后加预应力筋上，由于预应力筋具有很高的强度，因此可较大幅度地提高原结构的承载能力；

③由于预应力作用可使被加固构件产生反拱，减小了被加固构件的挠度和变形，当施加

的预应力值达到一定程度后, 构件原有裂缝宽度减小, 提高了结构耐久性。

2 极限状态下预应力筋应力增量

在极限状态下, 有粘结预应力筋的极限应力增量可以通过截面应变分析得到, 而体外预应力筋的应力增量并非取决于截面上的应变, 而是取决于整个结构变形, 故应力增量相比有粘结预应力要小, 且求解也比较复杂。目前, 国内外对体外预应力筋极限应力增量的理论研究很多^{[3]、[4]}, 但各种计算方法得到的结果差别很大, 都有各自的适用范围。为此, 在借鉴已有研究成果基础上, 给出以下适用于高效预应力加固的极限应力增量推导。

(1) 基本假定及计算模式^[5]

①假定预应力加固组合梁的极限破坏是塑性的, 当原混凝土梁的钢筋屈服后变形集中在梁的最大弯矩截面并形成塑性铰。塑性铰将梁体分成两个刚性梁段, 梁段绕中性轴发生刚性转动。

②假定体外预应力钢绞线可以随梁体一道发生刚性转动 (不考虑二次效应影响), 则预应力加固组合梁的整体变形计算模式如图 1 所示。

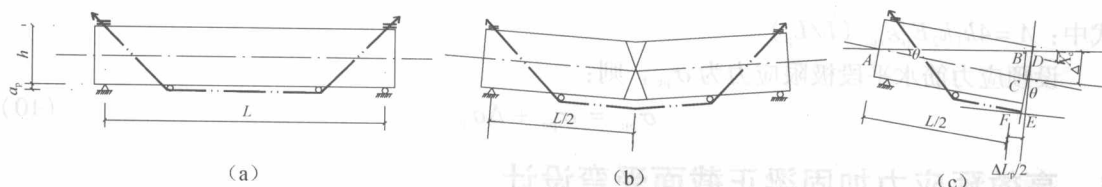


图 1 梁的计算图式及破坏简图

(2) 应力增量和极限应力计算公式

根据图 1 (c) 所示, $\triangle ABC$ 与 $\triangle DEF$ 的相似关系可得式 (1):

$$\Delta L_p = 4(\Delta/L)(h + a_p - c) \quad (1)$$

式中 Δ ——预应力张拉结束后继续受荷至极限状态时的梁跨中挠度;

L ——梁计算跨度;

ΔL_p ——钢绞线在张拉结束后继续受力至极限状态时的总伸长值;

c ——按截面应变保持平面的假定确定的中性轴高度。

设: L_p 为预应力钢绞线原长度, $\Delta \varepsilon_p$ 为钢绞线应变增量, $\Delta \sigma_p$ 为钢绞线应力增量, E_p 为钢绞线弹性模量。则有如下关系:

$$\Delta \varepsilon_p = \Delta L_p / L_p \quad (2)$$

$$\Delta \sigma_p = E_p \Delta \varepsilon_p \quad (3)$$

$$\Delta \sigma_p = 4E_p(\Delta/LL_p)(h + a_p - c) \quad (4)$$

设: x 为原梁的混凝土受压区高度, 据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 规定, x 与 c 存在如下关系:

$$c = x/\beta_1 \quad (5)$$

式中 β_1 ——系数, 当混凝土强度等级不超过 C50 时, 取 $\beta_1 = 0.8$; 混凝土强度为 C80 时, $\beta_1 = 0.74$; 其间接线性内插法确定。

参照简支梁跨中挠度的弹性变形计算公式, 加固梁的跨中极限挠度 Δ 与 M_u 跨中弯矩的关系见式 (6):

$$\Delta = k_1 k_2 M_u L^2 / B_u \quad (6)$$

式中 k_1 ——荷载形式及支座约束条件系数；

k_2 ——破坏截面的刚度与极限状态下梁的各截面平均刚度的比值，取 0.76；

B_u ——破坏截面的刚度。

与上类似，按梁体不开裂计算极限曲率即有：

$$M_u / B_u = \varphi_u = \varepsilon_{cu} / c \quad (7)$$

式中 φ_u ——梁的临界（破坏）截面的极限曲率；

ε_{cu} ——混凝土的极限压应变，一般取 $\varepsilon_{cu} = 0.0033$ 。

将式（7）代入式（6）得：

$$\Delta = k_1 k_2 \cdot (\varepsilon_{cu} / c) L^2 = k_1 k_2 \beta_1 (\varepsilon_{cu} / x) L^2 \quad (8)$$

代入（4）式得：

$$\Delta \sigma_p = A \cdot \left[\frac{\beta_1 (h + a_p)}{x} - 1 \right] \quad (9)$$

式中： $A = 4k_1 k_2 E_p \varepsilon_{cu} (L/L_p)$

设预应力筋水平段极限应力为 σ_{pu} ，则：

$$\sigma_{pu} = \sigma_{pe} + \Delta \sigma_p \quad (10)$$

3 高效预应力加固梁正截面受弯设计

由于预应力筋的拉力 N_1 对构件的作用，钢筋混凝土受弯构件采用预应力加固法加固后，具备了偏心受压构件的受力特性，应考虑梁的纵向弯曲的作用。但是，预应力提供的纵向压力 N_1 的数值是有限的，梁还是受弯为主，不可能像长细比过大的偏心受压柱那样出现“失稳破坏”。由此，建议取偏心距增大系数 $\eta = 1.05$ ，附加偏心距 $e_a = 0$ 。

设：被加固梁在极限破坏时混凝土的极限压应变 $\varepsilon_{cu} = 0.0033$ 。梁的变形符合平截面假定，则极限状态下截面计算简图如图 2 所示。

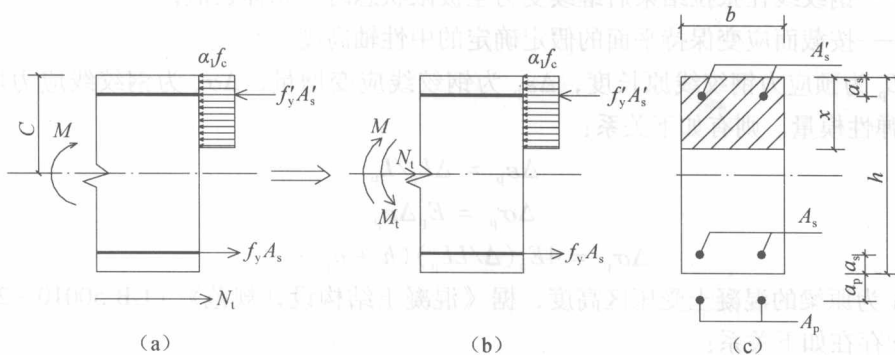


图 2 正截面受弯承载力计算

由 $\sum x = 0$ 得：

$$N_1 = \alpha_1 f_c b x + f_y' A_s' - f_y A_s \quad (11)$$

解得：

$$x = (N_t + f_y A_s - f_y' A_s') / (\alpha_1 f_c b) \quad (12)$$

对截面中性轴取矩 $\sum M = 0$ 得:

$$\eta(M - M_t) = \alpha_1 f_c b x (C - x/2) + f_y' A_s' (C - a_s') + f_y A_s (h_0 - C) \quad (13)$$

式中 N_t ——预应力筋水平段的极限拉力;

M_t ——预应力筋水平段拉力引起的截面等效弯矩, $M_t = N_t (h + a_p - C)$;

M ——加固梁弯矩设计值;

η ——偏心矩增大系数, $\eta = 1.05$ 。

将式(12)代入式(13)整理得:

$$\eta M = [\eta(h + a_p - C) + C] N_t + f_y A_s \cdot h_0 - f_y' A_s' a_s' - \frac{N_t^2}{2\alpha_1 f_c b} - \frac{(f_y A_s - f_y' A_s')^2}{2\alpha_1 f_c b} - \frac{N_t}{\alpha_1 f_c b} (f_y A_s - f_y' A_s') \quad (14)$$

求原梁受压区高度 x_0 :

$$x_0 = (f_y A_s - f_y' A_s') / (\alpha_1 f_c b) \quad (15)$$

对截面中性轴取弯矩求原梁受弯承载力 M_0 :

$$M_0 = f_y A_s \cdot (h_0 - C) + f_y' A_s' (C - a_s') + \alpha_1 f_c b x_0 \cdot (C - x_0/2) \quad (16)$$

将式(15)代入式(16)得:

$$M_0 = f_y A_s h_0 - f_y' A_s' a_s' - (f_y A_s - f_y' A_s')^2 / 2\alpha_1 f_c b \quad (17)$$

将(17)式代入(14)式得:

$$\eta M - M_0 = [C + \eta(h + a_p - C) - (f_y A_s - f_y' A_s') / \alpha_1 f_c b] N_t - N_t^2 / 2\alpha_1 f_c b \quad (18)$$

令: $\Delta M = \eta M - M_0$, $H_{op} = C + \eta(h + a_p - C) - (f_y A_s - f_y' A_s') / \alpha_1 f_c b$ 代入式(18)得:

$$N_t^2 - 2\alpha_1 f_c b H_{op} N_t + 2\alpha_1 f_c b \Delta M = 0 \quad (19)$$

解得:

$$N_t = \alpha_1 f_c b \left(H_{op} - \sqrt{H_{op}^2 - 2\Delta M / (\alpha_1 f_c b)} \right) \quad (20)$$

式中 H_{op} ——为经过偏心增大影响修正后的梁截面等效高度;

ΔM ——为考虑偏心增大系数影响后梁的弯矩加固量。

令:

$$X_p = H_{op} - \sqrt{H_{op}^2 - 2\Delta M / (\alpha_1 f_c b)} \quad (21)$$

式(20)变换为:

$$N_t = \alpha_1 f_c b X_p \quad (22)$$

式中: X_p ($X_p \leq H_{op}$) 可看作截面上与预应力筋水平段拉力对应的混凝土等效受压区高度。

式(22)即是求预应力筋水平段极限拉力的公式。

将式(21)、式(15)代入式(12)得:

$$x = X_p + x_0 \quad (23)$$

将(23)式代入(9)式得:

$$\Delta \sigma_p = A \left[\frac{\beta_1 \cdot (h + a_p)}{X_p + x_0} - 1 \right] \quad (24)$$

式(24)即为计算预应力筋水平段应力增量的公式。

由预应力筋水平段拉力 N_1 与其极限应力的关系得:

$$A_p = N_1 / \sigma_{pu} \quad (25)$$

将式 (22)、式 (10) 代入得:

$$A_p = \alpha_1 f_c b X_p / (\sigma_{pe} + \Delta \sigma_p) \quad (26)$$

式 (26) 即是求预应力筋水平段截面积的公式。

4 高效预应力加固梁正截面受弯设计算例

某仓库大梁梁跨 $l = 16\text{m}$, 梁截面 $b \times h = 400\text{mm} \times 1500\text{mm}$, 承受弯矩设计值 $M = 1998\text{kN} \cdot \text{m}$, 混凝土强度等级为 C25 ($f_c = 11.9\text{MPa}$), 用 HRB335 级钢筋配筋, 配筋 $A_s = 4909\text{mm}^2$, $A'_s = 1964\text{mm}^2$, 环境类别为二 (a) 类。现使用功能发生改变, 弯矩设计值增大至 $M = 3686\text{kN} \cdot \text{m}$ 。拟采用高效预应力加固法加固, 试进行加固设计计算。

解: ①基本参数确定

采用高效预应力加固法加固 (两点张拉上张模式), $a' = 0$, $a = l/5 = 3.2\text{m}$, $a_p = 50\text{mm}$ 。选用 1860 级 $\Phi^{15.24}$ 钢绞线, $f_{ptk} = 1860\text{MPa}$, $f_{pk} = 0.8f_{ptk} = 1488\text{MPa}$, 单根钢绞线面积 $A_{po} = 140\text{mm}^2$ 。

混凝土强度等级为 C25, $\alpha_1 = 1.0$, $\beta_1 = 0.8$; 实测钢筋保护层厚度: $a_s = 65\text{mm}$, $a'_s = 40\text{mm}$, 则 $h_0 = 1500 - 65 = 1435\text{mm}$, $\xi_b = 0.550$, 取 $\eta = 1.05$

②加固量 ΔM 计算

$$x_0 = \frac{f_y A_s - f'_y A'_s}{\alpha_1 f_c b} = 185.6\text{mm}$$

$$2a'_s = 2 \times 40 = 80\text{mm} < x_0, \quad \xi_b h_0 = 0.550 \times 1435 = 789.3\text{mm} > x_0$$

$$M_0 = \alpha_1 f_c b x_0 (h_0 - x_0/2) + f'_y A'_s (h_0 - a'_s) = 2007.7\text{kN} \cdot \text{m}$$

$$\Delta M = \eta M - M_0 = 1862.6\text{kN} \cdot \text{m}$$

③计算 X_p

$$H_{op} = C + \eta(h + a_p - C) - x_0 = 1404.4\text{mm}$$

$$X_p = H_{op} - \sqrt{H_{op}^2 - 2\Delta M / (\alpha_1 f_c b)} = 313.7\text{mm}$$

④计算有效预应力 σ_{pe}

$$\sigma_{con} = 0.65f_{pk} = 0.65 \times 1488 = 976.2\text{MPa}$$

$$L_p = \left(16000 - 2 \times 3200 + 2 \times \sqrt{3200^2 + 1550^2} \right) = 16711.3\text{mm}$$

$$l = L_p / 2 = 8355.6\text{mm}$$

$$\sigma_{l1} = aE_p / l = 116.7\text{MPa}$$

采用涂抹油脂的钢绞线, 取 $\mu = 0.16$

$$\theta = \arctg(1550/3200) = 0.4511$$

$$\sigma_{l2} = \sigma_{con} (1 - e^{-\mu\theta}) = 976.2 \times (1 - e^{-0.16 \times 0.4511}) = 67.3\text{MPa}$$

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - (\sigma_{l1} + \sigma_{l2}) = 976.2 - (116.7 + 67.3) = 783.2\text{MPa}$$