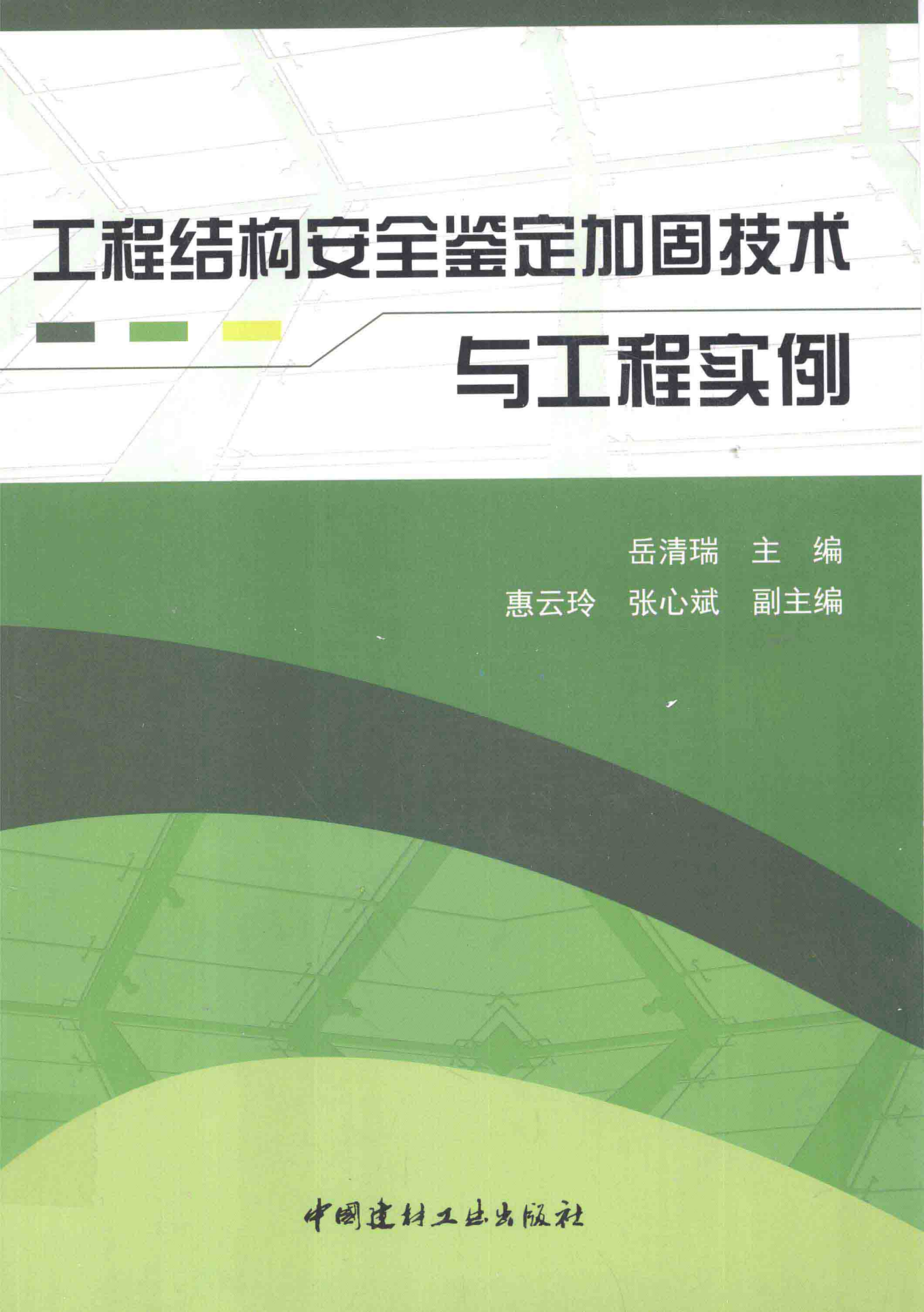




工程结构安全鉴定加固技术 与工程实例

岳清瑞 主 编

惠云玲 张心斌 副主编

中国建材工业出版社

工程结构安全 鉴定加固技术与工程实例

岳清瑞 主 编
惠云玲 张心斌 副主编

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程结构安全鉴定加固技术与工程实例 / 岳清瑞主编. —北京: 中国建材工业出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-5160-0623-8

I. ①工… II. ①岳… III. ①工程结构—安全技术—鉴定②工程结构—加固 IV. ①TU3②TU746.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 259342 号

工程结构安全鉴定加固技术与工程实例

岳清瑞 主 编

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 34.5

字 数: 860 千字

版 次: 2013 年 11 月第 1 版

印 次: 2013 年 11 月第 1 次

定 价: 165.00 元

本社网址: www.jccbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社市场营销部负责调换。联系电话: (010) 88386906

“第三届全国工程结构安全检测鉴定与加固修复”
暨“第一届中国钢结构协会钢结构质量安全检测鉴定技术”
研讨会·厦门

主 办 单 位：国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心
国家工业建构筑物质量安全监督检验中心

承 办 单 位：中冶建筑研究总院
中冶建筑物及工业设施安全诊治工程技术中心
中国钢结构协会钢结构质量安全检测鉴定专业委员会
中国钢铁工业协会冶金设备委员会工业建筑专业委员会

协 办 单 位：中国冶金建设协会抗震防灾专业委员会

会议学术委员会：（按姓氏笔画排列）

马 红	马永欣	王 霓	王永维	王庆霖	王秀丽
王铁梦	牛荻涛	包琦玮	叶继红	石建光	刘 柯
刘中华	刘西拉	孙 伟	牟宏远	邢 峰	闫培渝
严爱军	何 真	冷发光	吴照军	完海鹰	张 春
张 鑫	张元勃	张天申	张心斌	张立华	张家启
李久林	李书本	李永录	李成江	李国胜	李宗津
李忠诚	杨仁树	杨建平	贡金鑫	邸小坛	邹江华
陆贻杰	陈 凡	陈 洋	陈小兵	陈志华	陈改新
陈肇元	周绪红	孟祥武	尚建丽	岳清瑞	林 冰
林 强	林文修	林志伸	林松涛	罗永峰	郑 伟
金伟良	侯兆新	姚继涛	姜忻良	姜迎秋	姚继涛
姜忻良	娄 宇	段 斌	洪伯潜	美其德	胡邦喜
赵铁军	郝挺宇	钟冬波	唐曹明	徐 建	徐克利
徐善华	耿树江	聂建国	贾 洁	郭永重	顾祥林
顾渭建	高小旺	尉广辉	崔丕江	崔江余	曹双寅
黄 新	黄世敏	黄新豪	龚景海	惠云玲	谢永江
韩继云	缪昌文	潘 蓉	濮存婷		

会议组织委员会：主 任：岳清瑞

常务副主任：惠云玲

副 主 任：王永焕 张文革

委 员：常好诵 弓俊青 程大业 杨勇新 吴双九 张秀华

会 议 秘 书 处：秘 书 长：殷淑娜

秘 书：杨倩倩 朱 耘

前 言

中国经济以 10% 左右的高增长率已持续 20 多年，工业建筑、民用建筑、公路、铁路、水工、港工等基础设施规模不断增大，已形成支撑经济发展的物质基础，同时工程结构的安全问题也日益突出，给安全生产、日常生活带来威胁，所以，针对工程结构的检测鉴定和加固修复技术的发展方兴未艾。为了总结近年来工程结构行业的检测鉴定、加固修复的研究和实践经验，进一步提高和规范各类工程结构诊治和安全控制水平，国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心及国家工业建构筑物质量安全监督检验中心于 2013 年 11 月在福建省厦门市举办“第三届全国工程结构安全检测鉴定与加固修复”暨“第一届中国钢结构协会钢结构质量安全检测鉴定技术”研讨会。

本次会议汇集了全国各地从事工程结构设计、施工、科研、教学、生产、试验、检测、质量监督和管理工作的代表参加，并邀请多名业内知名专家学者作专题学术报告。为扩大交流、巩固成果，将收集到的百余篇论文精心编选成论文集出版发行，主要包括：建筑物检测技术与方法、工程结构检测鉴定与安全控制技术、工程结构试验、监测技术及应用、混凝土结构裂缝及耐久性、钢结构检测评估修复技术、工程结构加固改造及修复技术。近年来，我国在土木工程安全检测、修复技术方面，无论是理论研究还是工程实践都取得了可喜的进展，本论文集集中反映了我国土木工程科研机构、高等院校、设计及施工单位、检测鉴定咨询评估单位等的工作成果，其内容之丰富也从侧面说明我国土木工程检测、修复技术在我国需求巨大。

由于时间仓促及编者水平所限，书中难免有失误及不妥之处，敬请读者批评指正！

编者

2013 年 11 月

目 录

第一篇 综 述

核电站安全壳结构检测评估技术综述	林松涛 张际斌 (3)
《工业建筑可靠性鉴定标准》制订修订及其应用 ...	惠云玲 武慧芬 常好诵 张家启 (9)
工业建筑遗产改造中的结构安全问题研究	黄柏兴 李永录 (15)
房屋渗漏水司法鉴定若干问题探讨	冯文亚 徐 明 吴忆文 (20)
构件重要性判定方法综述	罗永峰 罗立胜 郭小农 (26)
《危险房屋鉴定标准》JGJ 125—99 (2004 年版) 综合评定方法改进模型浅析	陈 洋 蔡乐刚 史先进 许天添 (30)
国家标准《烟囱可靠性鉴定标准》简介	张文革 (36)

第二篇 建筑物检测技术与方法

红外成像技术在烟囱防腐渗漏检测中的应用	杨建国 周 浩 赵 峰 周双平 (43)
既有房屋安全鉴定中的结构概念分析方法	姜迎秋 金立赞 (48)
某核电站安全壳寿命评估方法研究	杨 林 李吉娃 彭斗光 王永滨 (52)
ICP-OES 法测定钢渣中的全铁	贾德华 杨 竞 刘 军 (57)
隐框既有建筑玻璃幕墙检测鉴定方法	谭志催 杨建国 张会东 张劲松 (61)
硬化混凝土中氯离子、碱含量的测定	杨 竞 刘 军 徐晓云 (67)
采用动态法相对评价石材幕墙安全性 ...	周 浩 谭志催 张劲松 吴利权 赵 锋 (72)
三维激光扫描建模技术在质量安全检测领域的应用领域现状及展望 ...	韩达光 马晓鑫 (77)
基于数字散斑相关方法的膜结构检测技术研究	殷惠君 (83)

第三篇 工程结构检测鉴定与安全控制技术

基于 REASES 软件的钢筋混凝土框架结构安全性评定	周恒宇 顾祥林 张伟平 彭 斌 孙 凯 (91)
邻近北京地铁的建筑物安全控制指标研究	王凯旋 王 雨 崔江余 王 林 丁前进 (99)
某砌体结构住宅楼裂缝原因分析及处理	韩腾飞 朱丽华 吕俊江 辛天然 王硕男 (106)
某框架结构屋面平改坡荷载复核检测鉴定	黄俊杰 (111)
基于隔震层刚度优化的分段隔震结构参数设计	郑久建 王 帅 唐曹明 (115)
某屋顶后增蓄水罐砌体结构抗震检测鉴定	李晓渊 (122)
某既有输变电构架结构安全检测评定	商登峰 (127)
某厂房吊车增加吨位检测与鉴定分析	薛 昇 刘 晓 (133)

某电厂既有锅炉送风机支架结构检测、鉴定及加固

.....	幸坤涛	宋东升	冷秋宇	郭小华	(137)
某框架结构厂房火灾后危险性鉴定	李宝霞	易桂香	韩腾飞	(142)	
深基坑开挖对临近砖混建筑的影响及处理	袁 瀚	(146)			
内框架结构房屋在发生不均匀沉降时的抗变形性能分析和结构安全控制					
.....	许天添	陈 洋	李占鸿	(151)	
风机基础常见问题诊断与处理	席向东	易桂香	(156)		
某热电厂干煤棚倾斜原因分析及安全控制	王朝波	赵英杰	(159)		
某大跨砖木结构检测鉴定与加固	陈 煊	郑 云	张家启	杨建平	(164)
某剪力墙高层住宅施工过程中剪力墙偏移变形检测鉴定.....	齐常军	杨 珏	金立赞	(171)	
软土地基上大面积堆载超载引发厂房地坪变形开裂工程事故的检测鉴定实例分析					
.....	刘群星	代红超	黄 涛	(178)	
既有框支承玻璃幕墙的检测鉴定分析	李晶晶	肖 辉	辛 雷	陈佳宇	(185)
某烟囱筒壁外侧混凝土剥落原因分析及处理建议	陈 浩	李晓东	(189)		
基于 REASES 软件的钢筋混凝土框架结构抗震鉴定					
.....	杨东冶	张伟平	顾祥林	孙 凯	彭 斌
某粮食钢板筒仓结构的检测鉴定分析	辛 雷	杨建平	常好诵	(200)	
某阳台加固改造后的安全检测及其有限元分析 ...	李占鸿	陈 洋	陈志强	许利军	(203)
某网架结构施工过程中垮塌原因分析 ...	罗永峰	相 阳	王 磊	罗立胜	沈祖炎
隧道施工对相邻建筑物安全的鉴定影响分析	喻云龙	宋攀峰	(213)		

第四篇 工程结构试验、监测技术及应用

薄弱层增设粘滞阻尼器模型试验研究	李忠煜	郑 云	惠云玲	(225)
砌体结构平移托换结构受力性能的试验研究		张 鑫	颜丙冬	(232)
某多跨 T 形简支梁桥荷载试验成果分析	董月亮	王永焕	杨建国	刘 凯 (236)
某部队营房深基坑开挖工程施工监测数据分析		刘 凯	王永焕	杨建国 (239)
某厂玻璃窑蓄热室用后镁砖的损毁原因分析				
.....	张秀华	梅鸣华	田志宏	田晶晶 孙立军 刘 响 (243)
核电站蒸发器管道热位移测试	宋正峰	徐伟组	朱晓勇	张会东 (247)
《深圳地区回弹法检测混凝土抗压强度技术规程》的试验研究			朱跃武	邱 平 (252)
铝合金桁架天桥静载及动载试验分析			吴利权	孙鸿敏 (258)
洞桩法施工对地表沉降的影响			林 黎	崔江余 (265)
某核电厂安全壳结构混凝土应变长期监测分析 ...	张会东	欧阳钦	朱金雄	宋正峰 (270)
某网架修复工程施工安全监测		王硕男	朱丽华	吕俊江 (274)
原位单剪试验过程中的扭矩影响分析 ...	朱跃武	邱 平	施新荣	李焕林 楼拥军 (279)
某铁路桥梁的荷载试验及安全性评估			张 伟	李晓东 (286)
锚固砖常温抗拉强度试验研究	梅鸣华	张秀华	杨晓鹏	田志宏 孙立军 (290)
传感器在桥梁结构健康监测中的应用				赵进阶 (294)
非烧结类砖砌体抗压强度的原位轴压法试验与有限元分析				
.....	张 琪	王庆霖	董振平	林文修 (298)

隧道平行下穿引起管线沉降的影响分析

..... 王 雨 崔江余 王凯旋 徐锦斌 王锦华 (304)

第五篇 混凝土结构裂缝及耐久性

结露环境下锈损钢筋混凝土构件耐久性修复试验研究 王 玲 惠云玲 郭小华 (313)

关于钢筋混凝土结构构件裂缝宽度可靠指标的研究 程凯凯 姚继涛 (319)

高温气冷堆核电站大体积混凝土温度及应力裂缝控制研究

..... 张海明 刘庆红 衡福利 杨 林 赵文博 (326)

锈损钢筋混凝土构件耐久性检测评估 王 玲 惠云玲 郭小华 徽正翔 (333)

海洋性气候对动力管道腐蚀速度、检测方法、延长使用寿命研究报告

..... 王建文 苏博强 王金波 苏 响 (338)

现浇楼板裂缝原因分析、预防措施及处理方法 梁玉国 宋丽娟 (345)

混凝土钢筋保护层厚度检测试验分析 范飞 李占军 张 欢 田 亮 (349)

某混凝土污水池开裂原因分析 易桂香 席向东 段咸阳 (355)

钢管混凝土密实度检测中常见的问题与研究 张 新 吴双九 张 熹 (358)

CANDU 堆安全壳非金属内衬老化性能研究 彭斗光 王永滨 李吉娃 (364)

混凝土涂层材料的冲击磨蚀性能与评价 何 真 蔡新华 熊 清 (367)

第六篇 钢结构检测评估修复技术

工业建筑钢结构疲劳损伤检测评估及加固修复研究

..... 惠云玲 幸坤涛 岳清瑞 常好诵 郑 云 郭小华 (377)

钢结构的检测鉴定现状与发展 耿树江 李永录 (382)

某通廊钢桁架可靠性鉴定 谢克利 张玉奎 黄新豪 (388)

钢吊车梁的开裂及其加固方法 马永欣 黄 皖 徐 秦 (391)

大型钢结构屋架卸载期间监测与计算分析研究 郭永泉 弓俊青 张 泾 (396)

钢结构厂房抗震鉴定的两阶段三层次模糊综合评判 邱冬瑞 凡 俊 (401)

钢网架结构安全性与耐久性检测鉴定分析 幸坤涛 杨建平 常好诵 (409)

钢结构灾损破坏特征及评定方法 韩继云 石磊 刘立渠 孙斌 (412)

某单面敞开式屋盖钢网架检测及安全性评估

..... 廖冰 罗永峰 相阳 郭小农 罗立胜 (417)

炼钢厂钢吊车梁的开裂原因分析与处理 李晓东 袁 瀚 陈 浩 (424)

某钢烟囱风激振动分析及治理对策 姜迎秋 金立赞 张天助 蒋晓葵 (427)

混合梁连续刚构桥钢箱梁局部应力分析研究 高鹏飞 弓俊青 冯绍攀 郭春红 (431)

某网架杆件断裂分析及事故处理 朱丽华 王硕男 韩腾飞 (437)

高强螺栓承载力折减系数在钢结构鉴定中的应用 王 永 冯照平 朱正康 (442)

大跨钢结构应力监测系统的研究及应用 李贺贺 弓俊青 (445)

钢结构网架检测与安全性评估 陈小杰 (451)

某钢结构搪瓷反应釜搪瓷层爆瓷事故鉴定 段咸阳 席向东 易桂香 (456)

某钢结构支架现状检测 侯 健 冷秩宇 (461)

锈蚀钢结构受力性能退化规律试验研究与安全评定方法 徐善华 (464)

某单层钢结构工业厂房检测鉴定	郭光宇 (471)
----------------------	-----------

第七篇 工程结构加固改造及修复技术

钢筋混凝土结构加固改造工程的耐久性设计	邓立军 黄银莹 王 诚 (477)
某水泥钢板仓的环向拉力补强设计	周双平 谭志催 王永焕 (480)
上海市某优秀历史建筑结构加固设计实例	史先进 段小洁 (484)
某选煤厂主厂房工程结构加固设计改造	陈佳宇 高鹏飞 (491)
应用计算机软件进行结构加固设计	李建武 (496)
某教学楼的鉴定、加固与思考	廉 杰 (502)
钢箍节点后锚固加固技术的应用研究	周仕仁 罗永峰 (506)
灌浆套管加固钢构件性能研究	蒋首超 文 见 (510)
补强加固用聚合物改性自密实混凝土的开发研究	孔祥芝 纪国晋 张思佳 计 涛 刘艳霞 (517)
工业遗产保护的加固技术	陈存夫 (523)
炼钢钢渣处理间屋面防腐技术改造与实践	郭 冬 王建文 张孟彤 (530)
溶胶结合刚玉莫来石浇注料在烧结机点火炉上的应用	任 强 黄新豪 吴定新 汪连环 (535)
某底框结构钢筋混凝土板的碳纤维加固研究	江绍武 田 砾 张洪源 陈静茹 (539)

第一篇

综 述

核电站安全壳结构检测评估技术综述

林松涛 张际斌

(国家工业建构筑物质量安全监督检验中心, 北京, 100088)

【摘 要】 本文介绍了核电站安全壳结构的功能和基本形式, 以及为保证其完整性而在工程中所面临的一些问题, 阐述了安全壳结构检测评估的工作内容主要包括: 大体积混凝土底板施工温控防裂、预应力损失监测、结构监测系统设计与安装、整体性试验与在役检查安全评估、耐久性评估和老化管理等, 并对各项工作内容目前所采用的最新技术手段进行了描述, 最后指出了该领域内目前的一些热点问题。

【关键词】 核电站; 安全壳; 完整性; 检测; 评估

1 概述

核电站安全壳结构是核反应堆的保护结构, 是继核燃料包壳、一回路压力边界之后的最后一道安全屏障, 其功能是当发生失水事故 (LOCA) 时, 将核裂变产物限制和消除在其内部, 防止放射性物质不受控制地扩散到周边环境给周围民众生命安全带来巨大伤害。

安全壳从材质上可分为混凝土安全壳和钢安全壳, 形式上有球状、块状、圆柱形筒身带曲面穹顶状和各种异型安全壳, 从层数上有单层壳和双层壳, 其中混凝土安全壳又可分为预应力和非预应力安全壳。我国目前已经发电的核电站都采用了预应力混凝土安全壳, 大多数为单层壳。在建核电站部分采用了钢制安全内壳带非预应力混凝土外壳的双壳形式。

由于我国核电工业发展的特殊性, 历史上从多国引进了核电技术, 加上自主研发堆型, 使得我国安全壳结构形式各异, 其检测方法种类繁多, 要求不统一, 与其他拥有核电技术国家相比技术更复杂, 技术指标要求更高, 安全风险也更高。

经过深入考察各国核电技术, 对于安全壳而言, 其核心要求是——保证完整性, 围绕这个关键点, 针对常用的预应力混凝土安全壳, 实际工作中面临以下几个问题:

(1) 安全壳核岛底板 (厚度 2m 以上) 是核反应堆芯的基座, 美国三哩岛核电站正是因为堆芯融化将底板烧穿而发生严重事故, 目前都采用非预应力设计, 其大体积混凝土特性使得施工期间极有可能因温度应力产生有害裂缝, 从而产生与生俱来的完整性缺陷。

(2) 安全壳筒体和穹顶结构为保证不会开裂都采用了预应力技术, 预应力水平的高低直接决定了安全壳事故下的安全裕度。如何了解安全壳结构中预应力体系的实际状况, 其预应力水平在长达 40 年甚至 60 年的服役期间会降低到何种程度, 现有技术都只能间接测量和侧面反映。

(3) 虽然设计时都经过充分的理论计算和分析,但由于材料使用、施工工艺、施工质量和维修养护等因素,安全壳结构的实际承载能力都可能低于设计预期,如何确认安全壳结构在投产前和服役期间完整性能满足设计要求。

(4) 理论上在服役晚期,由于预应力水平的持续降低、安全壳结构的老化、使用维护不当等原因,是安全壳结构安全性能最低的时期,如何保证此时安全壳仍能满足完整性要求,甚至在延长使用寿命的情况下满足完整性要求。

2 安全壳检测评估技术内容

2.1 核岛底板大体积混凝土施工温控防裂技术

安全壳结构核岛底板混凝土浇筑通常为大体积混凝土施工,容易因材料和施工措施不当出现开裂情况,但由于其位置重要性,绝不允许出现有害裂缝,所以在其施工准备、浇筑和养护过程中调控升降温过程,平衡内部应力是该项技术的核心内容。

2.2 安全壳结构预应力系统摩擦试验与长期监控技术

现有压水堆安全壳结构一般为预应力混凝土安全壳,预应力体系是保证安全壳在发生内部失水事故(LOCA)时结构完整性的重要技术手段。由于摩擦损失原因,安全壳结构上各部位预应力水平容易分布不均,可以通过现场钢束摩擦试验来了解实际摩擦损失情况,并反馈到设计部门进行调整。

同时运营后期预应力水平会因为长期损失因素(混凝土收缩、徐变和钢绞线松弛)而降低,从而影响安全壳结构的安全裕度,需要监测其长期损失规律,而灌浆钢束沿钢绞线的预应力损失监测具有较大难度。

2.3 安全壳结构监测系统(EAU)设计与安装技术

为监测安全壳结构在服役期间和强度试验时的结构变位、应变、温度场和预应力的变化,需在安全壳结构上安装监测系统,该系统必须能够准确捕捉到最有代表性的结构响应以供分析判断。同时该系统的施工周期长(3年以上),安装涉及专业领域多(土建、仪控、机械、材料等),最终搭建一个完整的监测系统具有相当的难度。

2.4 安全壳结构整体性试验(SIT)与安全评估技术

安全壳结构施工完毕后,在投产前将进行一次大型的强度验证试验,主要验证其整体性能是否达到设计要求,是否具有预计的安全裕度,其试验压力是设计值的1.15倍。由于安全壳结构体量较大(直径40m,高度60m,壁厚1m左右),而测试量非常小,并且还会受到日照角度和气温等环境影响,故而要得到准确的试验数据具有一定难度。

基于试验数据的安全评估是评价安全壳结构是否满足投产验收条件的重要工作,试验前需根据设计条件进行有限元建模计算,得出计算值,试验后综合试验情况和测试情况,对数据进行分析甄别,比对施工期间的预应力张拉数据,最终做出评估。

2.5 安全壳结构在役检查试验(ISI)与安全评估技术

随着核电站投入运营发电,安全壳结构进入服役阶段,为确保其安全性能,必须定期进行在役检查试验,其监测内容与SIT试验一致,试验压力为设计值,其试验结果与SIT试验和计算值比较,判断安全壳结构性能是否降低,尤其在服役后期,该试验和评估结果对安全壳结构是否能够继续服役,核电站能否按照设计寿命或超龄期服役提供判断依据。

2.6 安全壳结构耐久性评估及老化管理技术

为持续保持核电站的总体系统安全性,安全壳结构可作为系统中的一个关键设备展开老化管理工作。老化管理工作首先调查其耐久性现状,然后分析老化机理,判断各老化因素可

能性和影响程度,进而制定切实可行的老化管理措施来对安全壳结构正常状态下长期状况进行维护。

3 安全壳检测评估技术目前发展状况

3.1 以“动态设计养护”的方法对核岛底板进行大体积混凝土施工养护

现有大体积混凝土温控防裂技术通常是基于温度监控数据(包括:最高温升、里表温差、降温速率等温度参数)进行养护指导,而温度对于大体积混凝土是否开裂并非直接原因,其开裂的根本原因是混凝土内实际温度应力超过了其相应龄期的抗拉强度。通常采用的养护做法基本是静态的,而动态设计养护是根据实际的实时监测结果,充分考虑混凝土收缩效应和外界约束影响,实时通过养护措施的调整来调节大体积混凝土温度场和应力场,从而控制混凝土内部总体拉应力水平,防止混凝土出现裂缝。

在本研究成果应用前,为了控制混凝土裂缝,提高混凝土质量,我国已建和在建的核电站,安全壳核岛底板混凝土施工均采用的小体块施工方法,施工时间长,组织工序复杂,而且即使采用了小体块施工,混凝土仍然出现严重裂缝,经过多次改进仍无法克服混凝土裂缝问题。同样的问题在国外同类电站中也频繁出现,在法国和芬兰核电站基础施工中混凝土都出现严重裂缝,处理裂缝花费大量时间和人力、机械费用。

混凝土施工中为了控制裂缝往往采用小体量的混凝土施工方法,目前国内核电站核岛底板施工采用了与这一思路完全相反的方法,认为采用大体积施工也同样可以实现安全可靠,而且特定条件下会更加安全,质量更加有保证。并针对高强混凝土裂缝产生的基本原因提出了具体技术措施和方法,形成了一套既有理论内核又有工程应用推广工法的系统科技成果。本成果推广应用后,解决了核电站高强混凝土裂缝问题,同时大大缩短了施工时间,产生了非常显著的经济效益。

3.2 运用光纤光栅(FRP-OFBG)传感技术实现有粘结预应力钢绞线实际应力水平的实时监测

利用纤维增强复合材料包裹的光纤光栅传感(FRP-OFBG)技术成功实现有粘结预应力体系的预应力损失监测。成功解决了钢绞线在施工过程中高应力状态下相互摩擦挤压等恶劣工作条件下测试信号的传输问题;成功解决了在实际工程中测试信号从测点到锚夹具和预应力筋端头锚固条件下的保护问题。实现了直接沿钢绞线全长,对有粘结预应力钢绞线实际应力状态进行测试的工程应用。

现有预应力钢绞线应力水平监测实现方法多为通过无粘结预应力钢绞线两端安装力传感器实施,也有将应变传感器卡在钢绞线上使用,另外还有通过磁通量传感器测试实例。将应变传感器卡在钢绞线上的测试方案无法解决传感器与钢绞线共同工作以及传感器和引出线的保护问题,成功率极低。磁通量传感器无法解决体积较大需调整设计方案、测试容易受到周围环境干扰且精度较低的问题。

“纤维增强复合材料-光纤布拉格光栅植入钢绞线技术”(FRP-OFBG 植入钢绞线技术)利用光纤光栅兼具传感与通讯功能的特点,解决了传感器的数据导出问题,并充分利用光纤光栅的大量程实施钢绞线预应力从零到张拉控制应力的全程监测,同时传感筋也具有一定的抗拉强度,使得监测钢绞线强度没有明显的降低,可以在不明显改变原有设计方案和工艺流程的前提下,对钢绞线全长任何位置的预应力水平变化进行有精度保证的全程监测。

3.3 采用优化的安全壳结构测试方案

安全壳结构整体性测试具有检测、分析的参数种类多,连续测试时间长,影响因素

多,技术复杂,精度要求高,被测参数数值小等特点。其测试内容主要包括:整体变形、混凝土应变、钢束力等,相较国外测试方法,目前我国所采用的全新一体化测试方案有如下特点:

(1) 整体变形测量。允许采用张线法在壳内布置整体变形测点,其径向变化整体变形测点,比美国 ACI 359—2004 标准规定的数量减少了很多。省掉了穹顶变曲率处、环梁标高处、接近基础底板处变形量小的 3 个标高的测点;省掉了测量设备闸门孔直径变化的测点。对于设备闸门孔周围的径向变化整体变形测点,也可以予以大幅度减少。

(2) 混凝土应变测量。规定了 4 个必须布置测点的部位,数量明显少于美国 ACI 359—2004 和法国 RCC-G 两标准的要求。方案中列出了 4 个供选择的部位,可依据其受力状态,灵活安排处理。

(3) 灌油钢束力测量。考虑预应力张拉过程中,孔道摩擦力影响,对于竖向钢束,选取 4 根进行监测,其中 2 根在张拉主动端和被动端均安装测力传感器。

与美国管理导则 RG1.90 相同,对于环向钢束和穹顶钢束,各选取 2 根,并在两端安装测力传感器。

(4) 灌浆钢束力测量。其测点部位和数量与美国 RG1.90 规定一致。在测量方法上,考虑到现场操作的可行性和测量系统的长期稳定性,建议采用先进的经过实践检验的技术。

(5) 整体变形测量的铅垂线法工作原理简单明确,性能可靠,易于操作,其测量精度主要取决读数装置的形式。法国 RCC-G 标准规定的极坐标读数装置,存在着分辨率低,测量误差偏大的不足,日本的文献认为精度是 $\pm 1\text{mm}$,已显著超出 ACI 359—2004 关于相对误差 $\pm 5\%$,绝对误差 0.25mm 规定。本方案采用光电、光学测量方法,克服了极坐标游标卡尺的缺欠,精度达到 $\pm 0.1\text{mm}$ 。因此本方案在整体变形的精度规定方面,采用了美国 ACI 359—2004 标准规定的指标。

(6) 关于混凝土应变测量精度,美国 ACI 359—2004 标准有规定,其相对误差 $\pm 5\%$ 是适宜的,本方案作了同样规定。ACI 359—2004 的绝对误差要求是 10×10^{-6} ,其指标太高,在现场测量混凝土应变极难达到;另外,ACI 359—2004 关于应变计基距规定为不小于 100mm ,也低于应有长度。本方案把绝对误差放宽到 20×10^{-6} ,把应变计基距规定为大于或等于 5 倍的最大粗骨料径。

(7) 灌油钢束力测量,本方案规定的相对误差不低于 $\pm 1\%$,比 ACI 359—89 规定的 $\pm 3\%$ 提高了很多(ACI 359—92 和以后的版本没有列出钢束力测量这个项目),主要是考虑在试验压力作用下,钢束力值变化很小,与钢束力测量误差处于同一量级,为此,应尽量提高力值测量精度。

(8) 壳内试验压力为结构整体性试验的载荷,是其他被测参数的自变量,在试验数据采集、修正、处理、绘制曲线图表过程中有着重要意义,它的测量准确程度直接影响其他测量项目精度。本方案把壳内试验压力测量误差规定为 $\pm 1\%$,尽量降低试验载荷误差对其他测量项目的影

3.4 开展安全壳结构耐久性评估和老化管理工作

核能发电还属于新能源领域,出于核安全考虑,广泛采用安全壳结构也不过近 30 年时间,对核电站重要设备的老化管理理念也是在近 10 年才开始出现,而把安全壳结构作为一个重要设备来实施老化管理则是近几年提出的新要求。我院利用自身成熟的工业厂房耐久性评估经验,根据老化管理理论,提出了专门针对安全壳结构的的老化管理方法,共实现了 8 个

堆次的应用实施。

至今国内外对混凝土结构的耐久性问题研究已开展了 20 余年, 主要对象为工业和民用建筑领域的普通钢筋混凝土结构, 研究内容主要集中在混凝土碳化问题和钢筋锈蚀问题。预应力混凝土结构是近 20 年来才在国内广泛使用, 其耐久性问题尚未引起业内人士的足够重视。而作为核电站安全壳结构, 目前国内外普遍采用预应力混凝土结构, 其预应力筋分布在安全壳结构的各个部位, 有直筋、环向 (360°) 筋、球面筋以及局部弯曲筋等多种形式。目前国内已建成的核电站安全壳多采用有粘接的预应力结构, 即在预应力钢束孔道内灌注水泥砂浆。作为预应力混凝土结构, 除混凝土碳化 and 普通钢筋锈蚀这两大因素外, 预应力钢束松弛和应力腐蚀问题是导致预应力水平降低、安全壳丧失承载力的主要原因, 但是目前对混凝土结构中应力腐蚀问题尚无系统研究, 更无工程实践, 目前针对安全壳这一特种结构开展耐久性工作, 特别是进行应力腐蚀的评估在本领域中是超前的, 技术上具有领先性。

3.5 安全壳结构检测系统的实时在线数据采集硬件系统

现有多数核电站安全壳结构检测系统的工作方式多为人工采集、读数记录, 这种采集方式效率低下, 并且在读数、记录和录入计算机过程中容易出错, 对人员素质要求较高。利用先进的数据采集管理技术, 对原有传感器进行改进, 安装了全新的实时在线的数据采集系统, 大大提高了数据采集的效率和准确性。

目前国外核电站在一些新建的第 3 代或第 4 代核电技术机组上已实现了部分测试内容的实时在线采集, 我国不仅对新建的核电项目已经按照全系统所有测试内容实现在线采集, 同时还可对原有人工手动采集系统进行升级改造。

3.6 采用安全壳结构强度试验实时在线数据采集与评估软件

在安全壳结构检测系统硬件上已具备实时在线数据采集的可能性后, 对原有功能单一的采集软件进行二次开发, 使之实现了一键初始化、远程监控、实时报警、曲线绘制等重要功能, 同时还编制了数据评估软件, 可将计算值、历史数据、近似堆型数据进行对比分析, 评估安全壳结构的安全性能。

国外现阶段通行的安全壳结构强度试验做法是将人工记录的数据录入到计算机中, 利用已经计算好的数据编制成理论值上下限曲线, 观察录入数据与上下限曲线的位置关系来判断数据的有效性和安全壳状态。

实时在线数据采集软件可将数据一键存储到计算机中, 并且可以按照指定的时间间隔自动采集和存储数据。上述数据可与评估软件中的限值数据直接进行比较, 根据自动比较的结果给出不同的状态信号并形成报表, 可将数百个测点中的超限测点自动显示, 将原需至少 2 小时的工作量缩减为 10 分钟, 大大提高了工作效率, 同时还可以调阅该堆型或相似堆型历史数据库进行比较。

4 目前正在开展的研究工作

美国“911”恐怖袭击发生后, 世界各核电国家纷纷开展了安全壳结构抵抗大型商用飞机撞击能力分析和设计工作。在核安全局的主持下, 我国也对该项目进行了立项, 联合多家机构进行科研攻关。

API000 (第三代核电技术) 钢制安全壳将在我国得到越来越广泛的使用, 针对其安全性能的检测评估方案方法尚不成熟, 目前正展开相关调查和研究工作。

参考文献

- [1] 压水堆核电站安全壳结构整体性试验. Structural Integrity Test of Containments for Pressurized Water Reactor Power Plants NB/T 20017-2010.
- [2] Zhang-Jibin, Lin-Songtao, Whole-span and Whole length Pre-stress Loss Monitoring Technique Study in Bonded Pre-stressed System, Applied Mechanics and Materials, 2012, 188: 144-149.
- [3] 杨林, 王永焕, 林松涛. 核电站安全壳老化管理 [J]. 工业建筑, 2009, 39.
- [4] 张忠, 李晓将, 张兴斌, 程大业. 大体积混凝土施工养护方式及技术指标的有限单元法分析和研究 [J]. 工业建筑, 2010, 40 (1).