



高等学校土建类专业“十二五”规划教材

土木工程检测与加固技术

周乐 主编 梁振宇 孙威 孙洪军 副主编

TUMU

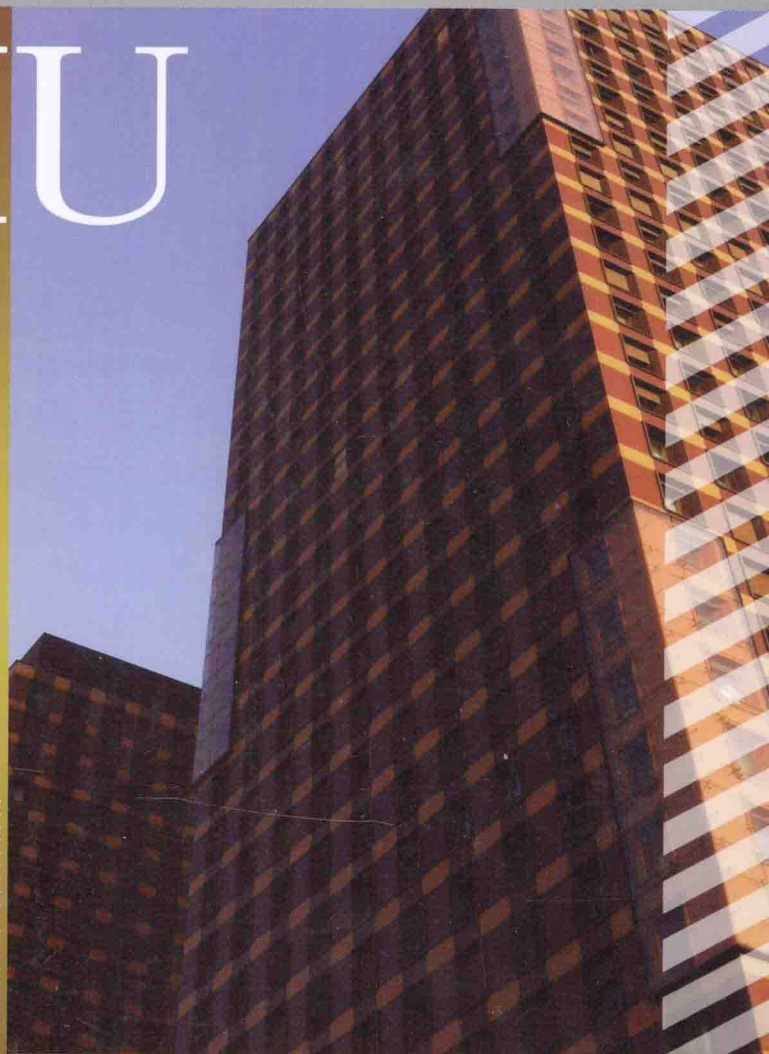
GONGCHENG

JIANCE

YU

JIAGU

JISHU



化学工业出版社

高等学校土建类专业“十二五”规划教材

土木工程检测与加固技术

周 乐 主 编
梁振宇 孙 威 孙洪军 副主编



化学工业出版社

本书为高等学校土建类专业“十二五”规划教材，根据全国高等学校土木工程专业本科的培养目标和“检测与加固”课程教学大纲编写。本书共分5章，分别讨论了工程结构产生损伤的机理及其危害；混凝土结构、砌体结构、钢结构以及木结构的损伤检测及分析；工业与民用建筑的可靠性鉴定和耐久性评估；工程结构的补强与加固技术及措施。书中重点介绍了结构损伤检测和加固措施，注重理论与实践相结合，内容精练、重点突出、适用性强，并配有典型例题、小结，思考题和习题，便于学生巩固所学内容。

本书可以作为高等本科、高职高专土木工程专业本科教学用书，也可供土建工程相关技术人员阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程检测与加固技术/周乐主编. —北京:
化学工业出版社, 2014.7
高等学校土建类专业“十二五”规划教材
ISBN 978-7-122-20818-7

I. ①土… II. ①周… III. ①土木工程-工程结构-
检测-高等学校-教材②土木工程-加固-高等学校-教
材 IV. ①TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 111779 号

责任编辑：陶艳玲
责任校对：王素芹

装帧设计：杨 北

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）
印 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张12½ 字数306千字 2014年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

目前我国正处在经济的平稳发展时期，随着经济的发展，大量的资金投入于基础建设之中，大规模的民用、市政、工业和交通等方面的项目开展建设。各类工程结构必须保证安全性、适用性和耐久性的要求。但是在设计阶段的计算失误，或建造阶段的施工错误以及使用阶段存在的自然灾害都可以对结构造成损伤，降低建筑的承载能力和使用寿命。同时既有建筑物因受使用功能的改变、自然灾害、老化等因素的影响也会产生各种风险。因此对新建建筑的质量控制及老旧建筑的检测鉴定可以发现建筑物的潜在危险，避免工程事故的发生，延长使用寿命。检测与加固技术也逐渐受到业主及各级政府的重视，在建筑行业中也已广泛推广。

本书共分5章，分别讨论了工程结构产生损伤的机理及其危害；混凝土结构、砌体结构、钢结构以及木结构的损伤检测及分析；工业与民用建筑的可靠性鉴定和耐久性评估；工程结构的补强与加固技术及措施。本书作者根据自身多年从事检测与加固方面的教学经验及工程实践经验，对设计、施工和使用等方面存在的工程事故进行了深入的分析，并结合我国现行的标准及规范提出了相应的检测方法和结构加固措施。

本书由沈阳大学周乐任主编，沈阳大学梁振宇、沈阳建筑大学孙威、辽宁工业大学孙洪军任副主编。本教材编写分工如下：第1、4章由周乐编写；第2章由梁振宇编写；第3章由孙洪军编写；第5章由孙威编写；另外，沈阳大学王柳燕、张莉莉、李欣等参与了部分章节的编写工作。全书由周乐统稿。

由于编者水平有限，书中有不足之处，恳请广大读者批评指正，以便改进。

编 者
2014年5月

目 录

第 1 章 绪论	1	4.1.1 鉴定方法及程序	51
1.1 工程结构损伤的原因	1	4.1.2 鉴定的类型	53
1.1.1 建筑结构检测与加固的重要性	1	4.1.3 鉴定评级的层次与等级划分	54
1.1.2 建筑结构的耐久性	2	4.1.4 建筑结构构件安全性鉴定评级	58
1.2 建筑结构检测分类	3	4.1.5 建筑结构构件正常使用性鉴定 评级	66
1.3 建筑结构加固程序	3	4.1.6 子单元安全性鉴定评级	71
1.4 国内外发展动态	4	4.1.7 子单元使用性鉴定评级	76
1.4.1 我国结构检测与加固的发展	4	4.1.8 鉴定单元安全性及使用性评级	79
1.4.2 国外结构检测与加固技术的发展	6	4.1.9 可靠性评级	80
第 2 章 工程结构损伤机理及危害	8	4.1.10 适修性评估	80
2.1 混凝土结构损伤机理及其危害	8	4.1.11 鉴定报告编写的内容和要求	80
2.1.1 混凝土中的钢筋锈蚀	8	4.2 工业建筑可靠性鉴定	81
2.1.2 混凝土的中性化	10	4.2.1 鉴定评级程序及工作内容	81
2.1.3 混凝土碱集料反应	13	4.2.2 鉴定评级的层次和等级划分	82
2.1.4 混凝土的冻融破坏	15	4.2.3 调查与检测	84
2.1.5 混凝土结构的裂缝	17	4.2.4 构件的鉴定评级	86
2.1.6 混凝土强度不足的常见原因	23	4.2.5 结构系统的鉴定评级	92
2.2 砌体结构损伤机理及其危害	24	4.2.6 工业建筑物的综合鉴定评级	97
2.2.1 砌体结构的裂缝	24	4.2.7 工业构筑物的鉴定评级	97
2.2.2 砌体结构的变形	26	4.2.8 鉴定报告编写的内容和要求	102
第 3 章 工程结构检测技术	28	4.3 建筑结构耐久性评估	102
3.1 混凝土结构检测	28	4.3.1 钢筋混凝土结构耐久性评估	102
3.1.1 混凝土强度检测	28	4.3.2 砌体结构耐久性评估	104
3.1.2 混凝土裂缝及内部缺陷检测	33	4.3.3 钢结构耐久性评估	104
3.1.3 混凝土碳化深度及保护层厚度 检测	36	复习思考题	105
3.1.4 钢筋锈蚀程度检测	36	第 5 章 工程结构的补强与加固	106
3.2 砌体结构的检测	37	5.1 混凝土结构的补强与加固	106
3.2.1 砌体强度检测	38	5.1.1 混凝土结构的加固原理	106
3.2.2 砌体缺陷检测	42	5.1.2 增大截面加固法	109
3.3 钢结构检测	43	5.1.3 外粘型钢加固法	113
3.3.1 钢材强度检测	43	5.1.4 预应力加固法	117
3.3.2 钢结构探伤	43	5.1.5 改变传力途径加固法	126
3.4 木结构检测	45	5.1.6 粘贴钢板加固法	130
3.4.1 木材外观检测	45	5.1.7 粘贴纤维复合材料加固法	136
3.4.2 木材性能检测	46	5.1.8 裂缝修补	150
第 4 章 建筑物可靠性鉴定	51	5.2 砌体结构补强与加固	152
4.1 民用建筑可靠性鉴定	51	5.2.1 砌体结构裂缝处理	152

5.2.2 砖墙的加固方法	155	5.3.5 改变结构计算图形的加固	167
5.2.3 砖柱的加固方法	160	5.3.6 增大构件截面的加固	169
5.3 钢结构补强与加固	161	5.3.7 连接和节点加固	172
5.3.1 构件裂缝处理	161	5.4 地基加固与纠偏	174
5.3.2 链接缺陷以及损伤处理	162	5.4.1 地基与基础加固技术	175
5.3.3 构件锈蚀处理	163	5.4.2 纠偏托换	183
5.3.4 钢结构加固的基本原则以及一般 规定	166	复习思考题	190
		参考文献	191

第 1 章 绪 论

1.1 工程结构损伤的原因

1.1.1 建筑结构检测与加固的重要性

建筑结构是指在建筑物中,由建筑材料做成来承受各种荷载,起骨架作用的空间受力体系。工程结构的检测是工程建设一个重要组成部分,是对建筑物的整体结构和构造的某一部分或者全部进行检测,从而对建筑物的结构有一个整体的认识,以保证工程实体的结构强度、刚度、稳定性满足实际需求。加固技术就是在对建筑物进行科学、严谨的检测并鉴定之后,对存在缺陷的建筑物进行加固,使用现有的加固方法恢复建筑物的功能性,减少潜在的风险因素。

当前国内发展生产,提高生产力的重心,已从新建工业企业转移到对已有企业的技术改造,以取得更大的投资效益。按一些资料统计,改建比新建可节约投资约 40%,缩短工期约 50%,收回投资的速度比新建厂房快 3~4 倍,同样,对民用建筑进行改造的要求,在我国也日益迫切。随着我国城市人口的不断增长,尽管兴建了大量的住宅和相应的配套措施,但无房、缺房和不方便户仍达 20%以上。而且随着城市房价的上涨,越来越多的人买不起新房。为缓解这一矛盾,抓好旧房的增层改造,向现有房屋要面积,可有效降低工程造价。我国城市现有的房屋中,有 20%~30%具备增层改造的条件。增层改造不仅可节省投资,同时,可不再征用土地,对缓解日趋紧张的城市用地矛盾,也有重要的现实意义。因此,为保证建筑结构增层改造的安全可靠性,对其进行检测与加固是非常必要的。

国外结构工程的发展过程表明,当工程建设进行到一定阶段后,工程结构的维修改造将成为主要的建设方式。我国的工程结构,特别是建筑物。则因为特殊的历史和发展方式,在许多方面更需要对既有建筑物进行加固与维修改造。而建筑物加固与维修改造的前提是对其进行检测,然后根据检测结果采取相应的加固处理措施。

到 2009 年,我国既有建筑面积达到 436.5 亿平方米由于城市化进程加快,设计、施工和管理使用存在先天不足,同时由于地震、火灾等灾害的影响,建筑结构检测与加固改造已成为我国基本建设急需解决的重大问题。工程结构检测加固技术在消除设计、施工质量缺陷及安全隐患,大规模基建高潮后的维修,建筑物商品化以后使用功能变化的要求等方面具有极其重要的意义,同时也为危房改造和古建筑保护等提供了重要的科学依据。

一般来说,在下列情况下需要对建筑结构进行检测和加固。

- ① 由于环境恶化或使用不当,年久失修,建筑结构损伤破坏,安全性不能满足使用要求或安全性降低不能满足使用要求,要进行检测与加固。
- ② 由于设计或施工中发生差错而引起工程质量事故,需要对原有结构进行检测和加固。

③ 由于灾害性事件的影响建筑结构发生了开裂和破坏时,需要对原始结构加以检测和加固例如台风,地震,火灾后受损建筑结构的检测。

④ 对一些重要的历史性纪念古建筑进行保护时,要对建筑结构加以检测和加固。

⑤ 对一些既有建筑物进行改建,扩建和加层时,就要对原始建筑物的结构加以检测和加固。

⑥ 对结构构件的布置进行改变,而影响原来的结构受力体系时,应对建筑结构进行检测和加固。

⑦ 当在已有建筑物附近有深大的基坑开挖,并且这种行为会引起土体位移进而对周围建筑物有严重影响的时候,就应对这些建筑物进行检测,确保新建工程和原有建筑物的安全性。

1.1.2 建筑结构的耐久性

建筑物的使用寿命是旧建筑物评价,鉴定检测的重要指标,是建筑结构修复,加固和改造中不可缺少的参数。我国《建筑结构设计统一标准》(GBJ 68—84)对设计基准使用期定为50年,对于重要的或具有历史性代表意义的建筑物的耐久年限定为100年以上,对于简易建筑或临时建筑,耐久年限在20年以下。建筑物的剩余寿命,主要是指在确保建筑物可靠性前提下的继续使用期限。预测建筑物的剩余寿命,对其使用寿命的延长和防止重大事故的发生有重大意义,有助于建筑物结构的检测加固的研究。

建筑结构经长期使用会发生老化,随着时间的增长,建筑结构会受到诸如气候条件,环境侵蚀物理作用或其他外界因素的影响,结构的性能会受到损伤甚至遭到破坏,对于不同的建筑结构其具体表现如下。

① 混凝土结构 由于外部温度的变化,将会引起混凝土表面的开裂和剥落;随着时间的推移,混凝土碳化将会使钢筋失去保护而产生腐蚀;钢筋的锈蚀膨胀又会引起混凝土的开裂和疏松;化学介质的侵蚀也会造成混凝土结构的开裂,强度降低。

② 砌体结构 由于风力和雨水冲刷及砌体表面冻融破坏,会造成砌体风化,承载力下降。

③ 钢结构 由于自然环境因素的影响和外界有害介质侵蚀,钢材会产生腐蚀,锈蚀引起构件有效断面减小而导致承载力下降,在反复荷载作用下,因裂缝扩展损伤积累会引起疲劳破坏。

上述结构失效的内因可能是由于设计粗糙、施工水平低下、建筑物不按照设计施工或在设计时遗落了一些重要参考数值,这些内因可能单独作用,也可能同时组合作用而导致建筑结构的失效。

建筑结构的耐久性损伤,有时会酿成重大工程事故。例如前苏联柏林议会厅建成于1957年,屋盖为马鞍形壳顶。跨度约30m,从一对支座上伸出两条斜拱,形成受压环。斜拱之间使用悬索支撑的薄壳屋面。在建成后23年,由于屋面拱与壳交界处出现裂缝,不断渗水,致使钢筋产生了锈蚀导致屋盖倒塌。

因此结构的耐久性对建筑的安全性会产生重大影响,不论是勘察设计施工还是使用等方面存在缺陷和错误,或是外界因素引起的结构老化均会对建筑结构工程造成隐患。那么为了确定结构的安全性和耐久性是否满足要求,就需要对工程结构进行检测和鉴定,对其可靠性做出科学的评价,然后进行加固以提高建筑结构的稳定性。

1.2 建筑结构检测分类

目前根据结构承载的荷载,可将结构检测分为静载检测和动载检测。其中静载检测的作用主要是通过观察各种变形,如转角、应变、支座位移、局部破坏现象等,来判断结构在静载荷作用下的工作状态。而动载检测则是通过探查振动作用力或振源的特性、结构及其部件的动力特性来研究结构动载作用下的工作性。

根据不同检测目的,可将结构检测分为鉴定性检测和研究性检测。
鉴定性检测主要解决以下工程问题。

① 检测建筑材料的力学性能,检测结构的实际工作状况和承载能力,为改建、扩建、超载使用或加固补强提供依据。在缺乏材料性能数据的情况下,在对已有建筑物进行改建或扩建,及由于施工质量事故引起的建筑结构过度变形或裂缝,或由于腐蚀、火灾、爆炸、地震等造成结构物损伤,需要加固补强等情况,都必须通过结构检测来确定现有的实际承重能力,测量数据以备建筑结构的改造。

② 检测一些比较重要的结构或批量生产的预制构件的施工质量。针对比较重要的结构,建成后必须通过检测验收来确定实际的工作性能。而对于成批生产的预制构件要进行抽样检测,来鉴定批量生产的构件质量是否达到有关标准所要求的各项技术指标。

研究性检测主要用于确定新的机构计算理论,为编制结构设计规范提供理论上的根据。例如一种新材料出现以后,要了解其综合性能;施工工艺的改变对建筑结构产生的影响;要确定新的结构计算理论,需要有多方面的检测数据参数等。上述几个方面就是要通过研究性检测才能对建筑结构的可靠性安全性做出结论。

1.3 建筑结构加固程序

根据国家建筑标准设计图集 06SG311—1 混凝土结构加固构造(总则及构件加固),建筑结构的加固程序如下。

(1) 结构材料力学性能检测
主要收集竣工和验收资料,当对结构材料的强度有怀疑时,应进行结构材料力学性能的检测,以获得结构材料最终强度。

(2) 结构可靠性鉴定
可靠性鉴定是已有建筑物加固或改造工作的基础。必须全面了解建筑的结构性能及安全隐患(如材料强度、构造措施、裂缝、变形及使用条件等),并对结构的可靠性做出全面的评定。建筑物可靠性鉴定的步骤如下:对建筑物进行宏观调查;根据现状及用户的要求,确定鉴定的项目和内容;实地检测。实地检测的内容包括:结构形式,截面尺寸,受力状况、计算简图、材料强度、变形(挠度)、裂缝、钢筋的配置和构造、钢筋锈蚀、混凝土碳化、地基沉降等。根据实测强度进行理论分析计算,确定结构的实际承载能力和耐久性等级;根据各分项指标及评定标准,得出建筑物的可靠性鉴定结论。

(3) 加固方案的制订与选择

已有建筑物加固方案的选择十分重要,应综合考虑建筑物的使用要求和实际施工条件。加固方案的优劣,不仅影响资金的投入,更重要的是影响加固质量。如,对于承载力不足而

实际配筋已达超筋的结构构件，继续在受拉区增配钢筋是起不到加固作用的。合理的加固方案应达到下列要求：加固效果好，对使用功能影响小，技术可靠，施工简便，经济合理，外观整齐。

(4) 结构加固设计

建筑物加固（改造）设计，包括被加固构件的承载力验算、构造处理和绘制施工图三部分。在上述三部分中，对承载力计算，应特别注意新加部分与原结构构件的协同工作。一般来说，新加部分的应力滞后于原结构。加固（改造）结构的构造处理不仅应满足新加构件自身的构造要求，还应考虑其与原结构构件的联接。

(5) 施工过程控制

加固工程的施工组织设计应充分考虑下列情况：施工现场狭窄、场地拥挤；受生产设备、管道和原有结构、构件的制约；须在不影响或尽量少影响使用的条件下进行加固施工；施工时，拆除和清理的工作量较大，施工需分段、分期进行。由于加固工程的施工大多是在负荷或部分负荷的情况下进行，因此施工时的安全非常重要。其措施之一是：施工前，尽可能卸除一部分外载，并施加预应力顶撑，以减小原构件中的应力。

加固施工前，拆除或清理原有构件时，应特别注意观察是否有与原检测情况不符的地方。工程技术人员应亲临现场，随时观察有无意外情况发生。如有意外，应立即停止施工，并采取妥善的处理措施。施工时，应注意新旧构件结合部位的联接质量。建筑物的加固施工应速战速决，尽可能少地影响使用和避免发生意外。

(6) 施工后的验收 加固工程竣工后，应由使用单位或其主管部门组织专业技术人员，严格按照有关加固工程施工或验收规范（规程）进行验收。必要时加固施工完成后对现场进行实际检测，这对重要工程和有影响的工程及其重要。

1.4 国内外发展动态

1.4.1 我国结构检测与加固的发展

20世纪70年代中期，原国家建委把混凝土非破损检测技术列入了建筑科学研究发展计划，并组织力量进行攻关。到20世纪80年代中期，第一本全国性检测规程《回弹法评定混凝土抗压强度技术规程》（JGJ23—85）问世。此后，关于混凝土强度及缺陷的检测技术得到了广泛应用。到目前为止，关于混凝土强度的检测方法已有回弹法、超声法、钻芯法、拔出法和灌入法以及由上述基本方法组合而成的超声回弹综合法、钻芯回弹综合法等。混凝土强度的检测技术已基本成熟。成熟的标志在于测试理论的完善和测试仪器的良好性能。如“回弹值—碳化深度—强度”关系，反映了回弹值与混凝土强度之间的基本规律。回弹、超声、钻芯和拔出等方法虽然都是舶来之法，但都具有了中国特色，且各种检测仪器和设备已完全国产化；一些仪器的性能已达到了国际先进水平，如北京市政工程研究所研制生产的NM-3B型非金属超声波检测仪等。

1.4.1.1 我国建筑结构的检验测试技术现状

目前，在我国已形成三种不同的结构检验测试技术。

(1) 混凝土结构的检验测试技术

我国的检测技术是从20世纪60年代中期研究混凝土强度的非破损检测方法开始的。时至今日，有关混凝土强度和缺陷检测技术已日渐成熟，有关检测仪器和检测设备由当初的进

口引进已经转变为全部的自己生产,全国性的检测技术规程也已经形成。尤其是混凝土强度的检测仪器,在技术和性能方面已达到了国际先进水平,有些甚至赶超了经济发达国家的研制水平。70年代,我国开始研发混凝土构件钢筋配置情况的检测技术,尤其是有关混凝土结构的耐久性技术受到了重视,与其相关的检测技术也有了比较明显的突破。80年代后,我国又开始着手有关钢筋锈蚀速度和锈蚀量测定的研究,并很快研发出可以定性判别钢筋是否锈蚀的技术。

(2) 砌筑结构的检验测试技术

我国对于砌筑结构检测方法的研究略晚于对混凝土结构的检测技术。七十年代时,砌筑结构抗震鉴定和加固的评定指标主要是砌筑砂浆的强度。为了改变这种传统判定方法,国内建筑业开始致力于研究回弹法检测强度。经过十几年的努力,就研发出了砂浆强度检测技术和砌筑用砖强度等级检测方法。近年来,又有一些新的检测方法问世,如超声回弹综合法、贯入法等。虽然砌筑结构检验测试技术研究的起步比较晚,检测技术还没有完全成熟,但是该项技术的发展势头在国内异军突起,目前已形成了强大的竞争优势。

(3) 钢结构的检验测试技术

与前两种检测技术相比,在工程建设中有关钢结构的检测技术的研发较为滞后。因为工业部门对钢材物理力学性能、内部缺陷、焊缝探伤等检验方法要求比较严格,而国内相关技术缺乏,因此对钢结构的检验测试只有参考学习国内其他行业的技术方法。在这种借鉴学习的基础上,经过发展目前钢结构的检验测试技术已经取得了一定的发展,基本可以解决一些建筑结构中的实际问题。但是该技术的发展还不成熟,仍还有很大的发展空间等待开拓,需要继续研究。

现代的结构检测有以下发展特点:①结构检测试验室大型化;②检测设备自动化;③检测仪器高精度、小型和电气化;④数据采集和处理电脑化。我国在新中国成立前结构检测是一个空白,建筑业处于极端落后状态。新中国成立后结构检测受到应有的重视,发展很快,但是就目前的水平来看,还必须继续改进检测荷载系统,提高量测精度和测试自动化程度,深入研究、开发结构检测技术和理论,才能满足现代建筑的需要,赶超世界先进水平结构检测。

1.4.1.2 我国建筑结构加固技术现状

20世纪90年代初,中国建材院研制出一种新型材料——高流动性修补砂浆,这一新发明不仅改进了混凝土构件的局部修补技术,而且使混凝土柱的制约加固技术得到发展。90年代中后期,研究的重点又转向了如何运用纤维类材料进行加固这一课题,国内很快开发出了丙纶纤维混凝土加固技术、玻璃纤维水泥砂浆面层组合砌体加固技术等。总的来说,经过50年的不懈努力,我国对建筑结构的加固技术的研发取得了令人满意的结果。随着这一技术的不断改进,结构改造技术也有了一定的发展,因为结构的加固技术和结构的改造工作是密不可分的。我国目前已有的建筑结构加固技术如下。

(1) 混凝土结构加固

一是加大截面加固法。该法施工工艺简单、适应性强,并具有成熟的设计和施工经验;适用于梁、板、柱、墙和一般构造物的混凝土的加固;但现场施工的湿作业时间长,对生产和生活有一定的影响,且加固后的建筑物净空有一定的减小。二是置换混凝土加固法。该法的优点与加大截面法相近,且加固后不影响建筑物的净空,但同样存在施工的湿作业时间长的缺点。适用于受压区混凝土强度偏低或有严重缺陷的梁、柱等混凝土承重构件的加固。三是预应力加固法。该法能降低被加固构件的应力水平,不仅使加固效果好,而且还能较大幅

度地提高结构整体承载力,但加固后对原结构外观有一定影响。适用于大跨度或重型结构的加固以及处于高应力、高应变状态下的混凝土构件的加固,但在无防护的情况下,不宜用于混凝土收缩与变大的结构。

(2) 砌体结构加固

一是钢筋网水泥砂浆加固法。采用在砌体两侧表面设置钢筋网片抹压聚合物砂浆的一种裂缝修补方法。即铲除墙面的旧抹灰层,剔凿灰缝砂浆,清除墙面浮灰洒水润湿,采用专门工艺固定钢筋网片,抹聚合物砂浆。这种方法施工工艺简单,适应性强,但提高承载力的效果不是太突出,适用于一般墙体的裂缝修补。二是钢筋混凝土销键加固法。采用在墙体裂缝处骑缝开凿竖向条带,条带内配置钢筋,用高强无收缩浆料将条带灌实,从而与墙体形成整体,使墙体截面承受剪力的能力得以修复。该方法一般与钢筋网水泥砂浆加固法同时使用,通过条带内伸出墙面的拉接筋形成整体效果。

(3) 钢结构加固

一是改变钢结构计算图形的加固法。是指采用改变荷载分布状况、传力途径、节点性质和边界条件,增设附加杆件和支撑、施加预应力、考虑空间协同工作等措施对结构进行加固的方法。改变结构计算图形的一般方法为:增加支撑形成空间结构并按空间结构验算;加设支撑增加结构刚度,或者调整结构的自振频率等,以提高结构承载力和改善结构动力特性;增设支撑或辅助杆件,使结构的长细比减小以提高其稳定性;在排架结构中重点加强某一列柱的刚度,使之承受大部分水平力,以减轻其他柱列负荷。二是增设支点加固法。增设支点加固法是通过增设支承点来减小结构计算跨度,改变结构内力分布并提高其承载能力的加固方法。梁、板在跨中增设支点后,减小了跨度,从而能较大幅度地提高承载能力,并能减小和限制梁、板的挠曲变形。适用于房屋净空不受限制的大跨度结构中梁、板、桁架、网架等水平结构的加固。增设支点加固法优点是简单可靠,缺点是使用空间会受到一定影响。

1.4.2 国外结构检测与加固技术的发展

国外对于建筑结构检测最早研究可追溯到17世纪初期。随着封建社会的解体,社会生产力得到迅速发展,需要建造一些新的建筑物,过去凭经验的建筑方法已经解决不了新的工程问题。这一时期的意大利科学家伽利略为了解决工程上的力学问题,在1638年提出了计算梁的强度所用的公式。他利用了刚体力学的方法,未考虑梁受力后的变形这一重要因素,认为受弯梁的横截面应力分布是均匀受拉。1684年,法国物理学家马里奥脱和德国数学家莱布尼兹提出受弯梁的横截面应力是按三角形分布的,而不是均匀受拉。

1713年,法国学者巴朗提出了中和层假设,他认为受弯梁截面上既有拉应力,又有压应力,拉、压应力的分布以中和层为界,中和层是拉、压应力的过渡层。当时,由于缺乏检测验证,巴朗的正确观点未被人们接受。1767年,法国科学家容格密里在没有量测仪器的条件下,为了验证巴朗的正确观点,他在一根简支木梁的跨中沿上缘开若干个方向与梁纵轴线垂直的槽,将硬木垫块嵌入槽内,然后对梁进行加载。结果,这根梁的承载能力并不低于未开槽的同材料、同尺寸的整体木梁。证明受弯梁的上缘是受压的,只有上缘受压,才能有这样的结果。容格密里的检测方法既简单又巧妙,它总结了一百多年来先驱者的探索和研究,像十字路口的路标,给人们指出了进一步发展结构计算理论的正确方向。

1772年,俄国工程师库利宾为了验证一座跨长298.76m的木拱桥的设计可靠性,制作了一座大小为原尺寸1/10的模型木拱桥,然后在模型结构上试加荷载,达到并超过预定的

临界值后，模型结构没有破坏，由此证明设计正确，可以建造。19 世纪中叶，俄国工程师茹拉夫斯基为了探求斜杆桁架中内力的分布情况，他在桁架的各个拉杆上绷上弦线，试加荷载后，发现越近支座的弦线音调越高，即被张拉得越紧。证明越近支座的拉杆受力越大。

19 世纪中叶以前的结构检测都很粗略，只能解决某些范围的定性问题。结构检测这门独立科学的真正形成约在 19 世纪末。在 19 世纪末，世界上已经开始使用贝塞麦转炉钢建造高层建筑，在一般建筑物中，已经开始使用钢筋混凝土制作各种构件。随着铁路建设的加强和运输量的扩大，需要建造一些大跨度的桥梁和一些其他型式的大型建筑物。因此这时已不是仅仅简单地要求确定建筑结构在某一已知荷载下是否可靠，而更进一步地要求知道其恰恰破坏时的承载能力以及在长期使用下充分可靠的安全荷载。此外，还要编制结构设计规范，把某一结构经检测后获得的结论，推广运用到其他未经检测的类似结构上去。因此，需要使用精密仪器和设备来进行严密的测试，测取各种数据，并且对这些数据进行深入的研究，这样就开始了利用结构检测研究建筑结构的时期。到了 20 世纪初叶，随着新型结构的不断出现，高层及超高层建筑的增多以及大型建设工程项目的增多，世界上一些国家不断地采用新的检测方法和改进原来的检测技术，深入系统地检测及研究了很多钢结构和钢筋混凝土结构的模型和原型的实际工作状态，为迄今为止的结构设计规范提供了编制资料，为保证按设计质量要求建造建筑工程结构提供了技术依据。

第 2 章 工程结构损伤机理及危害

2.1 混凝土结构损伤机理及其危害

2.1.1 混凝土中的钢筋锈蚀

由于混凝土中钢筋锈蚀所引起建筑物的破坏已成为目全世界较为突出的灾害。1991年，在第二届混凝土耐久性国际会议上，梅塔教授指出混凝土破坏原因按重要性递降顺序排列是：钢筋锈蚀、混凝土的冻融破坏、侵蚀环境的物理化学作用。混凝土中的钢筋锈蚀可使得钢筋的受力截面减小，同时锈蚀层的膨胀使混凝土保护层沿钢筋方向“顺筋”开裂，进而脱落，以致不得不花费大量的经费对混凝土结构进行修补和加固。根据美国标准局 1975 年的调查，全美当年的各种腐蚀损失为 700 亿美元，而混凝土中钢筋锈蚀损失约占 40%（约 280 亿美元）。20 世纪 50 年代，我国北方地区为了在冬季施工，通过掺加氯盐使混凝土早强，但这使得大量工业厂房因钢筋严重锈蚀而过早破坏，为这些工业厂房的报废或重修付出了昂贵代价。并且在冬季为了防止钢筋混凝土立交桥上结冰而撒盐融雪对钢筋也有腐蚀作用。而在我国南方滨海地区及海洋工程的钢筋混凝土结构物中，钢筋腐蚀同样突出。1985 年，我国的一些中小型钢筋混凝土水闸在 1985 年进行了统一的结构耐久性调查（耐久性是指结构在正常使用、正常维护情况下，材料性能虽随时间推移发生变化，但仍然满足预定功能的要求），其中 47.5% 闸墩、胸墙、大梁破坏是由于混凝土炭化引起钢筋锈蚀所造成的。

2.1.1.1 混凝土中钢筋锈蚀的机理

混凝土凝固时，由于水泥的水化作用，氧化钙生成氢氧化钙，使得混凝土的孔隙中含有大量的 OH^- 离子，其 pH 值升高，一般可达到 12.5~13.5（碱性）。钢筋在高碱性环境中表面能形成厚度约 $(20\sim60)\times 10^{-10}\text{m}$ 的钝化膜 $(n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O})$ ，其能阻止钢筋发生锈蚀，但当这层钝化膜遭到破坏，钢筋便开始发生腐蚀。

通常情况下，在混凝土中同时出现以下三个条件时，其中的钢筋就会产生锈蚀。

- ① 在钢筋表面存在电位差，不同电位的区段之间形成阳极-阴极；
- ② 阳极区段的钢筋表面处于活化状态，在阳极发生以下阳极反应



- ③ 存在水分和溶解氧，在阴极发生以下阴极反应



钢筋的氧化顺序为：a. 铁被溶解，生成氢氧化亚铁 $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$ ；b. 氢氧化亚铁与水中氧作用生成氢氧化铁；c. 一部分氢氧化铁进一步氧化生成 $n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$ （红锈），另一部分氧化不完全的变成 Fe_3O_4 （黑锈）。红锈体积可增大到原来体积的四倍，黑锈体积可增大到原来的二倍，铁锈体积膨胀，对周边混凝土产生压力，从而使混凝土沿钢筋方向（顺筋）开裂，进而使得保护层成片脱落，而裂缝及保护层的脱落又会导致钢筋进一步发生锈蚀。

2.1.1.2 影响混凝土中钢筋锈蚀的主要因素

(1) 混凝土中的 pH 值

混凝土中的 pH 值与钢筋的锈蚀速度关系紧密。pH 值越大，钢筋越不容易腐蚀。通常情况下，当 $\text{pH} > 10$ 时，钢筋的锈蚀速度很小，而当 $\text{pH} < 4$ 时，钢筋的锈蚀速度急剧增加。

(2) 混凝土中 Cl^- 离子含量

混凝土中 Cl^- 离子含量对钢筋锈蚀的影响极大，当混凝土中含有氯离子 (Cl^-) 时，即使混凝土的碱度还较高，钢筋周围的混凝土尚未碳化，钢筋也会出现锈蚀现象。进入混凝土中的氯离子主要有两个来源：①混凝土施工过程中掺加的防冻剂；②混凝土使用环境中 Cl^- 离子的渗透。

(3) 氧的含量

混凝土中钢筋锈蚀的先决条件是与水含有的溶解态氧接触。在钢筋锈蚀的过程中，氧可以促进阴极反应的作用。混凝土中氧的含量越大，则钢筋越容易锈蚀。

(4) 混凝土的密实性

混凝土的密实性越好，其内部的微细孔隙和毛细管通道越小，可以有效地阻止外界腐蚀介质、氧气及水分等的渗入，从而加强了钢筋的防腐蚀能力。降低水灰比可提高混凝土的密实性，从而提高钢筋的抗腐蚀能力。在同样水灰比下，增大骨料粒径会大大降低混凝土的抗渗性，从而降低混凝土中钢筋的防腐蚀能力。此外，混凝土浇筑过程中做好养护，也可以提高混凝土的密实性。

(5) 混凝土保护层厚度

混凝土保护层厚度的增加可以延缓腐蚀介质渗透到钢筋表面的时间，同时也可提高对钢筋锈蚀后膨胀的抵抗力。通常情况下，采用保护层厚度与钢筋直径的比值作为抵抗锈蚀胀力的重要参数，当保护层厚度大于 3 倍直径时，保护层一般不会胀裂。加大保护层厚度对耐久性有好处，但会导致混凝土表面的横向裂缝宽度增大。

(6) 其他影响因素

① 混凝土内部或外部环境不均匀。当混凝土中的氧浓度、氯离子浓度或碱化物浓度不一致时，便会在混凝土中形成浓差电池，进而促进处在阳极部分的钢筋锈蚀。混凝土中氧浓差电池对钢筋的锈蚀影响最为明显。

② 潮湿环境。在潮湿环境中使用的钢筋混凝土结构，裂缝宽度达 0.2mm 时，即可引起钢筋腐蚀。

③ 矿物掺合料。粉煤灰等矿物掺合料会降低混凝土的碱性，从而对钢筋腐蚀有不利影响。

④ 预应力混凝土中钢筋腐蚀主要有三种情况：锈坑腐蚀、应力腐蚀和氢脆腐蚀。锈坑腐蚀是由于电化学作用造成的腐蚀；应力腐蚀是腐蚀介质和拉应力共同作用下钢筋产生晶间或穿晶断裂现象；氢脆腐蚀是由硫化氢与钢筋的化学反应引起的。

2.1.1.3 钢筋防锈蚀的措施

钢筋防锈蚀方法通常由以下两种：一是常规防锈蚀法，一是特殊防锈蚀法。

(1) 常规防锈蚀法

① 优选混凝土配合比，严格控制水灰比，选用合适的水泥用量和外加剂。

② 工程设计中采用适宜的保护层厚度，可以有效地阻止有害物质的渗入和抵抗钢筋锈蚀胀力。

③ 保证混凝土浇筑过程的施工质量,提高混凝土的密实性、抗冻性和抗渗性,加强养护,防止混凝土中出现有害裂缝。

④ 采用合理的材料,防止混凝土内部发生碱集料反应。

⑤ 严格限制混凝土内部和周围的氯离子含量。

⑥ 必要时可以在混凝土表面进行涂层防护。

⑦ 定期检查,发现混凝土有裂缝或疏松掉皮时,要立即进行鉴定处理。

(2) 特殊防锈蚀法

① 在混凝土中进行阴极保护;

② 采用环氧树脂涂层钢筋;

③ 用纤维增强塑料 fiber-reinforced plastics (FRP) 替代钢筋;

④ 采用镀锌钢筋;

⑤ 在混凝土内部或钢筋表面加防锈剂。

当前,发展较快的钢筋防腐措施是环氧树脂涂层钢筋、代替钢筋的 FRP 和钢筋防锈剂。环氧树脂涂层钢筋,有静电粉体涂敷法和流体浸渍法等。工程中主要采用静电粉体涂敷法。该法是将钢筋加热,而后向加热的钢筋上均匀喷射薄层树脂粉体,熔融、冷却,而后形成树脂涂层钢筋,经过“针孔试验”、“涂层厚度试验”、“耐腐蚀试验”、“耐碱性试验”以及有关力学性能试验,合格后投入使用,并要求在运送、吊装、帮扎等过程中,不被损伤。目前,用来代替钢筋的 FRP 主要有三种:① 玻璃纤维筋 glass fiber-reinforced plastics (GFRP);② 碳纤维筋 carbon fiber-reinforced plastics (CFRP);③ 阿拉米德纤维筋 Aramid fiber-reinforced plastics (AFRP)。这些 FRP 的抗拉强度很高,但抗碱化能力较差,故不能用于含碱量高的混凝土中。钢筋的防锈剂的主要功能是使钢筋在渗入大量氯离子的情况下,仍能保持钝化膜的存在,但不能降低氯离子的渗入。钢筋防锈剂的价格比较低廉。

常规的混凝土防锈蚀方法相对特殊的防锈蚀方法比较经济,因此在选择钢筋的防锈蚀方法时应首先采用常规防锈蚀方法,如果因为条件有限不能完全采用常规方法时,或者需要进一步提高防锈蚀性能时,则可以采用特殊防锈蚀方法,但依然要尽量满足防锈蚀方法的要求。

2.1.2 混凝土的中性化

混凝土工作的环境中或介质中的 CO_2 、 HCl 、 SO_2 、 Cl_2 等进入混凝土表面,与水泥中的碱性物质发生反应从而使 pH 值降低的过程称为混凝土的中性化。混凝土在空气中的炭化是中性化最常见的一种物理化学过程。这里我们主要介绍混凝土的炭化。混凝土炭化对钢筋混凝土的耐久性有很大影响,其特点主要如下。

① 可增加混凝土的密实性。

② 提高混凝土抗化学腐蚀的能力。

③ 炭化降低混凝土的碱度,破坏钢筋表面的钝化膜,对混凝土中钢筋腐蚀有不利影响。

④ 加剧混凝土的收缩,导致混凝土的裂缝和结构的破坏。

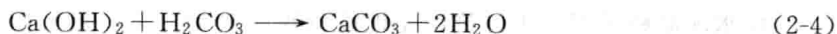
2.1.2.1 混凝土炭化的机理

混凝土的炭化机理为:混凝土是多孔体,内部有大小不同的毛细管、孔隙,甚至缺陷→空气中的二氧化碳渗透到混凝土内部的孔隙和毛细管中→溶解(混凝土的炭化作用一定要有水分存在)→与水泥水化工程中产生的氢氧化钙和硅酸三钙、硅酸二钙等水化产物作用,形

成碳酸钙。

混凝土的炭化主要包括三个过程。

(1) 化学反应过程



混凝土炭化的化学反应过程进行较快,反应的速度主要取决于 CO_2 的浓度和混凝土可炭化物质的含量。

(2) 二氧化碳的扩散

由于二氧化碳或其他酸性物质是通过混凝土孔隙向混凝土内部扩散,因此这一过程的速度取决于扩散物质的浓度和混凝土的孔隙结构。

(3) 氢氧化钙的扩散

氢氧化钙可在孔隙表面的薄膜内扩散,其速度取决于混凝土的含水率和氢氧化钙的浓度。

一般来说,上述三个过程中,二氧化碳在混凝土中的扩散速度最慢,因此二氧化碳的扩散速度决定了混凝土炭化过程的速度。

2.1.2.2 影响混凝土炭化的因素

(1) 周围环境因素

影响混凝土碳化的环境因素主要包括周围介质的相对湿度、在周围环境的温度及二氧化碳的浓度等。

① 环境介质的相对湿度直接影响混凝土的湿润状态和抗炭化性能。在周围的相对湿度大于 80% 或 100% 的情况下,混凝土的毛细管处于相对的平衡含水率或饱和状态,混凝土周围的气体渗透性能大大降低,从而使混凝土的炭化速度大大降低甚至停止。而在相对湿度为 0~45% 的条件下,混凝土处于干燥或含水率非常低的状态,混凝土周围的 CO_2 无法溶解于毛细管水或溶解量非常有限,这种情况也可使得混凝土的炭化无法进行。在相对湿度为 50%~75% 时,混凝土的炭化速度最快。

② 环境温度对混凝土的炭化速度影响也很大。随着温度的提高, CO_2 在空气中的扩散速度增加,炭化速度加快。

③ 混凝土的炭化深度 (D) 与二氧化碳的浓度 (c) 的平方根成正比。

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\sqrt{c_1 t_1}}{\sqrt{c_2 t_2}} \quad (2-7)$$

式中 t_1 、 t_2 ——炭化时间。

(2) 混凝土材料组成因素

① 混凝土中的水泥用量是影响混凝土炭化的最主要因素。水泥的用量与混凝土的抗炭化性能成正比,即水泥用量越大,混凝土的强度越高,其抗炭化性能也越高;如果水泥用量小,混凝土的强度则低,其抗炭化性能也低。

② 水灰比对混凝土的孔隙结构影响极大,因此其对混凝土的抗炭化性能也较大。在水泥用量不变的条件下,水灰比越小,混凝土内部的孔隙率则小,其密实性越大,渗透性越小,其混凝土的炭化速度也越慢。