



高等学校新体系土木工程系列教材

# 混凝土结构加固 设计原理

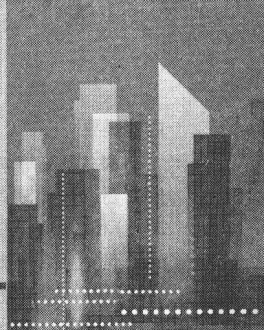
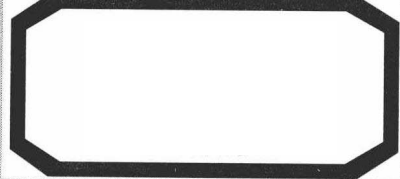
卢亦焱 编 著

3

高等教育出版社



高等学校新体系土木工程系列教材



# 混凝土结构加固 设计原理

Hunniingtu Jiegou Jiagu Sheji Yuanli

卢亦焱 编 著

高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书是高等学校新体系土木工程系列教材之一,根据土木工程专业发展需要,按照现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)编写而成。本书详细介绍了混凝土结构加固方法的适用范围、特点、设计方法和构造规定,并附有大量的算例和思考题。内容包括:绪论、混凝土结构加固原理、增大截面加固法、置换混凝土加固法、改变受力特征加固法、外加预应力加固法、外包型钢加固法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维复合材料加固法、钢丝绳-水泥砂浆面层加固法、其他加固法。本书在满足土木工程专业教学基本要求的基础上,尽量反映最新的科技成果和进展。全书语言简练、深入浅出、图文并茂。

本书可作为高等学校土木工程专业本科生和研究生的专业课教材,也可作为从事工程结构加固设计、施工和科研工作人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构加固设计原理 / 卢亦焱编著. -- 北京: 高等教育出版社, 2016. 6  
高等学校新体系土木工程系列教材  
ISBN 978 - 7 - 04 - 045255 - 6

I. ①混… II. ①卢… III. ①混凝土结构 - 加固 - 结构设计 - 高等学校 - 教材 IV. ①TU370.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 083390 号

策划编辑 单 蕾      责任编辑 单 蕾      封面设计 李小璐      版式设计 王艳红  
插图绘制 杜晓丹      责任校对 殷 然      责任印制 耿 轩

---

出版发行	高等教育出版社	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
邮政编码	100120	网上订购	<a href="http://www.hepmall.com.cn">http://www.hepmall.com.cn</a>
印 刷	北京宏信印刷厂		<a href="http://www.hepmall.com">http://www.hepmall.com</a>
开 本	787 mm × 1092 mm 1/16		<a href="http://www.hepmall.cn">http://www.hepmall.cn</a>
印 张	17.25	版 次	2016 年 6 月第 1 版
字 数	420 千字	印 次	2016 年 6 月第 1 次印刷
购书热线	010 - 58581118	定 价	29.80 元
咨询电话	400 - 810 - 0598		

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 45255 - 00

# 前 言

现代土木工程的发展大致可分为三个时期：第一时期为大规模建筑物新建期，这个时期土木工程的特点是建筑规模大、设计标准相对较低；第二时期为建筑物新建与既有建筑物维修加固并重期，这个时期土木工程的特点是，一方面仍需要继续一定规模的建筑物建设，另一方面为了保证既有建筑物的安全性和使用性，必须对其按需要进行维修、加固和现代化改造；第三时期为既有建筑物现代化改造和维修加固期，这个时期的土木工程特点是受到建设成本、环境等影响，不适宜继续大规模新建建筑物，既有建筑物维修加固占主导。目前，我国正处于建筑物新建与既有建筑物维修加固的重要时期，既有建筑物的维修加固已经成为土木工程领域的一个重要组成部分。

混凝土结构作为我国土木工程的主要结构形式之一，其安全性与国家经济持续增长紧密相关。然而，由于物理老化、化学侵蚀等环境影响，或由于水灾、火灾和地震等灾害，或由于技术改造、结构使用功能改变，或由于原设计、施工错误和材料问题等，导致大量在役混凝土结构性能劣化，或不满足现行规范，或构件局部出现损伤等，已严重影响到结构的安全性和使用性。因此，通过合理有效的维修加固改造技术提高既有混凝土结构构件的承载力、延性和刚度等，已是我国土木工程迫切需要解决的问题。

培养工程结构加固相关专业人才是解决上述问题的一个重要保障。为了更好地反映混凝土结构加固科研和教学的新成果、新进展，适应设计规范变更的新情况，使培养的学生能直接从事工程结构维修加固设计、施工和管理工作的编写者总结多年的工程结构加固研究成果和工程经验，吸收国内外同行的相关理论和方法，根据土木工程专业的发展和教学基本要求，按照现行国家标准《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)和《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)编写本书。本书详细介绍了混凝土结构加固方法的适用范围、特点、设计方法和构造规定，并附有大量的算例和思考题。全书共11章，内容包括：绪论、混凝土结构加固原理、增大截面加固法、置换混凝土加固法、改变受力特征加固法、外加预应力加固法、外包型钢加固法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维复合材料加固法、钢丝绳-水泥砂浆面层加固法、其他加固法。全书在满足土木工程专业教学基本要求的基础上，尽量反映最新的科技成果和进展。

编写本书时，在基本概念和基础理论方面力求讲得透彻，通俗易懂；力求文字简练，深入浅出；并注意掌握以教学为主，少而精的原则；为了方便学习，各章附有大量的例题；为便于巩固所学的知识，各章列出小结并附有思考题和计算题。

本书由卢亦焱主编，参加编写的有卢亦焱、李杉、何英明、王文炜、周长东、任慧韬、廖绍怀、李娜。具体的编写分工：前言，第1、9章由卢亦焱编写；第2章由周长东编写；第3章由卢亦焱、李杉编写；第4章由李娜编写；第5章由廖绍怀编写；第6章由何英明编写；第7、8章由李杉编写；第10章由王文炜编写；第11章由任慧韬编写；全书由卢亦焱修改和统

稿。参与本书编写的单位有武汉大学、大连理工大学、东南大学、北京交通大学、华中科技大学和武汉理工大学。

本书在编写过程中得到了高等教育出版社的大力支持，参考并引用了一些同行的研究成果，武汉大学李传才教授、兰州理工大学杜永峰教授审阅了全书，并提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。

由于教材涉及的内容广泛，书中难免存在疏漏或不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2015年12月

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

# 目 录

<b>1 绪论</b> .....	1	5.1 改变受力特征加固法的特点及 适用范围 .....	74
1.1 混凝土结构加固问题 .....	1	5.2 增设刚性支点加固设计 .....	77
1.2 混凝土结构加固的发展及现状 .....	3	5.3 增设弹性支点加固设计 .....	80
1.3 本课程的主要内容和学习要求 .....	6	5.4 增设支点法构造设计 .....	89
思考题 .....	7	5.5 托梁拔柱法加固设计 .....	91
<b>2 混凝土结构加固原理</b> .....	8	5.6 本章小结 .....	95
2.1 混凝土结构加固的基本概念 .....	8	思考题与计算题 .....	96
2.2 混凝土结构加固设计原则 .....	10	<b>6 外加预应力加固法</b> .....	98
2.3 混凝土结构加固方法及选择 .....	12	6.1 外加预应力加固法的特点及 适用范围 .....	98
2.4 混凝土结构加固材料 .....	16	6.2 预应力施加方式 .....	100
2.5 混凝土结构加固植筋与锚固 .....	24	6.3 普通钢筋拉杆加固受弯 构件加固设计 .....	109
2.6 本章小结 .....	29	6.4 无黏结钢绞线拉杆加固受弯构件 加固设计 .....	127
思考题 .....	29	6.5 受压构件加固设计 .....	134
<b>3 增大截面加固法</b> .....	30	6.6 本章小结 .....	140
3.1 增大截面加固法的特点 点及适用范围 .....	30	思考题与计算题 .....	141
3.2 受弯构件正截面加固设计 .....	31	<b>7 外包型钢加固法</b> .....	143
3.3 受弯构件斜截面加固设计 .....	41	7.1 外粘型钢加固法的特点及适用范围 .....	143
3.4 受压构件加固设计 .....	50	7.2 受弯构件正截面加固设计 .....	144
3.5 本章小结 .....	59	7.3 受弯构件斜截面加固设计 .....	150
思考题与计算题 .....	60	7.4 受压构件加固设计 .....	151
<b>4 置换混凝土加固法</b> .....	62	7.5 本章小结 .....	163
4.1 置换混凝土加固法的特点 及适用范围 .....	62	思考题与计算题 .....	163
4.2 受弯构件正截面加固设计 .....	63	<b>8 粘贴钢板加固法</b> .....	165
4.3 受压构件加固设计 .....	65	8.1 粘贴钢板加固法的特点及适用范围 .....	165
4.4 构造规定 .....	71	8.2 受弯构件正截面加固设计 .....	166
4.5 本章小结 .....	72	8.3 受弯构件斜截面加固设计 .....	179
思考题与计算题 .....	72	8.4 大偏心受压构件加固设计 .....	184
<b>5 改变受力特征加固法</b> .....	74		

8.5 受拉构件加固设计 .....	185	10.1 钢丝绳-水泥砂浆面层加固法的 特点及适用范围 .....	224
8.6 本章小结 .....	185	10.2 受弯构件正截面加固设计 .....	228
思考题与计算题 .....	186	10.3 受弯构件斜截面加固设计 .....	242
<b>9 粘贴纤维复合材料加固法 .....</b>	<b>187</b>	10.4 本章小结 .....	245
9.1 FRP 加固法的特点及适用范围 .....	187	思考题与计算题 .....	245
9.2 受弯构件正截面加固设计 .....	188	<b>11 其他加固法 .....</b>	<b>247</b>
9.3 受弯构件斜截面加固设计 .....	205	11.1 裂缝修补 .....	247
9.4 受压构件加固设计 .....	210	11.2 减震加固技术 .....	252
9.5 受拉构件加固设计 .....	217	11.3 喷射混凝土加固技术 .....	260
9.6 柱的抗震加固设计 .....	219	11.4 本章小结 .....	265
9.7 本章小结 .....	221	思考题 .....	266
思考题与计算题 .....	221	<b>参考文献 .....</b>	<b>267</b>
<b>10 钢丝绳-水泥砂浆面层加固法 .....</b>	<b>223</b>		



# 1 绪 论

## 1.1 混凝土结构加固问题

### 1.1.1 混凝土结构加固的意义

现代土木工程的发展大致可划分为三个时期：第一发展时期为大规模新建时期。第一次世界大战后，经过一段时间的休养生息，到 20 世纪 20 年代后期美国出现了兴建高层建筑和高等公路等基础设施的高潮，使经济大萧条得到了恢复。第二次世界大战结束后，为了恢复经济和满足人们的生活需求，世界各国进行了大规模的基础设施建设，我国则在 20 世纪 50 年代也步入了大规模建设时期。这一时期土木工程的特点是规模大但标准相对较低。随后，为了进一步满足社会发展的需求，新的土木工程不断建设，同时，过去建造的土木工程结构由于结构性能劣化和标准低，已经不能满足结构功能需求，需进行维修、加固和现代化改造；这使土木工程从第一发展时期过渡到了新建与维修改造并重的第二发展时期。此后，随着社会的进一步发展，人民生活水平的进一步提高，人们对土木工程功能的要求越来越高，已有土木工程的规模和功能不能满足新的使用要求，而且原有土木工程的低标准、老龄化和长期使用后土木工程材料劣化等引起的结构安全问题已经开始引起人们的关注。但是由于建造新的土木工程需要大量的材料，消耗大量的资源，耗费巨大的人力与财力，不可能继续大规模新建土木工程。于是，人们纷纷把目标投向了既有土木工程结构的加固和改造。这种在原有土木工程的基础上，对其进行加固和现代化改造，在提高结构安全性的同时实现其内部设施功能现代化。这种现代化的加固改造措施，投资少、影响小、见效快，不仅具有客观的经济效益，同时也具有巨大的社会效益，这就促使土木工程跨入以现代化改造和维修加固为重点的第三个发展时期。

目前，美国、日本及欧洲等发达国家已经从第二个发展时期逐步进入到第三个发展时期，土木工程加固改造行业的发展越来越快，已成为土木工程的重要组成部分。土木工程行业是美国国民经济的三大支柱产业之一，虽然新建土木工程已经开始萧条，但是加固改造行业却日益兴旺和发展；根据美国劳工部对 21 世纪热门行业的发展预测，维修改造行业是最受欢迎的九大行业之一。英国的加固改造工程，已占其土木工程总量的三分之一；丹麦用于加固改造工程与新建工程的投资比例已达 6 : 1，并有逐渐扩大的趋势。

我国已经从第一个发展时期进入新建与维修改造并重的第二个发展时期，混凝土结构作为我国土木工程的主要结构形式之一，其安全性与国家经济持续增长紧密相关。然而，由于各种因素，导致大量在役混凝土结构性能劣化，或不满足现行规范，或构件局部出现损伤等，已严重影响结构的安全性和使用功能。因此，为确保人民生命财产安全，保障社会经济持续发

展，全面消除安全隐患，通过加固改造技术提高混凝土结构构件承载力、延性和刚度等已是我国社会和经济发 展迫切需要解决的问题。

## 1.1.2 混凝土结构加固的原因

导致混凝土结构需要进行加固的原因，归纳起来主要有以下因素。

### 1.1.2.1 自然环境因素

经过长期的风吹雨打、雪冻和环境介质侵蚀等的作用，混凝土结构的材料和结构构件会逐渐劣化。按照劣化作用的性质来分，外部环境因素对混凝土结构的侵蚀作用一般分为以下三类。

(1) 物理作用：如高温、高湿、温湿交替变化、冻融及辐射等因素导致的混凝土结构材料劣化。

(2) 化学作用：如含有酸、碱或盐等化学介质的气体或液体、一些有害的有机材料、烟气等侵入混凝土结构材料内部，产生化学作用而引起材料组成成分的不利变化，如对钢材、混凝土的腐蚀。

(3) 生物作用：如一些微生物、真菌、水藻、蠕虫和多细胞生物等对材料的破坏。

在上述自然环境因素的长期作用下，混凝土结构的功能将逐渐降低，当达到一定期限后，就有必要对混凝土结构进行加固。

### 1.1.2.2 人为因素

人为因素是导致混凝土结构“先天不足、后天失调”或“先天缺陷、后天损坏”的主要原因。混凝土结构的“先天不足”主要源于设计和施工，“后天失调”则是使用和管理问题。

(1) 设计方面。

设计方面既有政策导向、认识偏差(包括技术水平所限)，又有设计人员经验不足所犯过失错误，致使结构留下隐患。常见的设计错误有设计概念错误和设计计算错误两类。在我国某一历史时期，由于原材料缺乏，为了节约成本而降低一次性建设投资，致使结构可靠度偏低，使用寿命缩减；或是某些混凝土结构设计时，虽然设计人员最大可能地考虑了影响安全使用的诸多因素，在结构上采取了多种处理措施，但由于当时技术水平有限，实际结构与预先设计目标仍有一定差异；或是少数设计人员因缺乏经验而犯过失错误，导致漏算少算荷载、选用计算方法有误、构造措施不合理等，都有可能在混凝土结构中留下隐患，使其存在“先天不足”。

除此之外，混凝土结构的原设计标准偏低，也或多或少存在安全隐患。由于历史原因，我国的结构可靠度设置水准经历过多次变动，总体上仍处于一个较低水平。但随着规范标准的不断完善，尤其是我国抗震设防等级的提高，致使相当多的已有混凝土结构不能满足现行抗震规范的要求，面临抗震加固的任务。

(2) 施工方面。

在上世纪，由于我国土木工程的施工质量控制和质量保证制度不够健全，导致混凝土结构存在不同程度的安全隐患。另外，极少数施工企业为牟取暴利，采用劣质或低等级材料，偷工减料等，导致施工质量低劣，达不到设计要求，留下安全隐患；再者，有些施工企业，由于任务繁重，工期紧张，而其技术设备、施工管理、质量控制、施工人员素质和技术水平跟不上发展所需，也会出现施工质量不达标的情况，同样会造成混凝土结构存在缺陷。

(3) 使用和管理方面。

使用不当和管理不善，是混凝土结构“后天失调”，即后天破坏造成损失的根本原因。

使用不当或不合理造成混凝土结构损坏是多方面的，例如长期超载使用，随意改变使用功能，为了装饰效果而随意改变甚至拆除承重墙体，或者在承重墙体（包括剪力墙）开设大的洞口，不经有关部门鉴定私自对原有混凝土结构增层、改造等，均可能留下巨大的安全隐患。

管理不善将会使混凝土结构存在的安全隐患进一步恶化，主要表现在混凝土结构使用年久失修。在混凝土结构正常使用期间内，本应按照一定要求对其进行检查维修，但维修不好或没有维修，则可能在尚未达到设计使用年限就已丧失某项或数项功能要求，留下安全隐患。

#### 1.1.2.3 市场因素

建筑物已经成为产权者可自主更迭的商品，新业主往往根据市场的发展要求和自己产业发展的需要，改变原建筑物的使用功能和标准。如原办公楼可能改造成宾馆，大型仓库改造成综合商场和大型超市，工业厂房由于技术升级、设备更新等要求而对原有厂房进行相应的改造。这些使用功能的改变，往往使楼面活荷载增大或者设备增重，都将导致原混凝土结构的可靠度降低，都必须经过结构的鉴定与加固才能保证安全使用。

#### 1.1.2.4 偶然因素

偶然作用的特点是在设计基准期内不一定出现，而一旦出现其量值很大且持续时间很短。例如地震、爆炸、撞击以及自然灾害当中的风灾、水灾、滑坡、泥石流和突发事件中的火灾。我国是一个多自然灾害的国家，2/3的大城市处于地震区，经常发生地震，而风灾、水灾更是年年不断，这些偶然事件的发生均导致混凝土结构不同程度的损坏甚至破坏。

#### 1.1.2.5 其他因素

其他因素是指除了上述诸因素以外，为了满足特定使用条件，对原混凝土结构进行加固的种种特殊原因。例如，由于2008年北京奥运会、2010年上海世博会的特殊需要，对某些混凝土结构（这些混凝土结构不一定已经存在安全隐患）进行加固改造；也有可能由于对原混凝土结构的加固改造不当，引起新的缺陷和损坏，这时必须重新采取安全措施。

综上所述，不论是混凝土结构的“先天不足”，还是后天管理不善、使用不当；不论是为抵御灾害所需进行的加固，还是灾后所需进行的修复；不论是为适应新的使用要求而对混凝土结构实施的改造，还是为混凝土结构进入中老年期而进行的正常诊断、处理，都需要对混凝土结构进行检测和鉴定，以对其可靠性做出科学的评估，从而对混凝土结构实施正确的管理维护和改造加固，以延长其使用寿命。由此可见，混凝土结构的鉴定与加固改造，在我国不仅量大面广，而且任重道远，影响极大。

## 1.2 混凝土结构加固的发展及现状

### 1.2.1 混凝土结构加固的发展

混凝土结构使用阶段的加固改造，是伴随着混凝土结构的出现而诞生的传统行业。但在过去，人们习惯于把加固和维修完全等同，把加固视为修修补补，缺少系统的分析和理论支持，

因而技术水平提高不快，并没有形成一门科学。近年来，混凝土结构的加固才在我国得到迅速发展并初具规模，作为一门新的学科正在逐渐形成。

纵观我国混凝土结构加固改造的发展历程，大致经历了三个发展阶段，即起步阶段、初具规模阶段和较为成熟发展阶段。

### 1.2.1.1 起步阶段

这一阶段大致是从 20 世纪 80 年代中期开始，直至 1990 年前后。当时一些高等院校和科研院所从事结构工程的教师和科技人员受到国外研究资料和先进经验的启示，以及应对国内的社会需求，先后组织了专业技术队伍，从事已有建筑物的检测与加固改造的理论研究和工程实践。原冶金工业部建筑研究总院编译了多本外文文集加以研究和传播，并于 1989 年出版了《工业建筑可靠度及加固改造技术》；原武汉水利电力大学针对土木工程加固改造的需要，于 1988 年成立了“建筑物检测鉴定与加固工程研究中心”，在国内较早地从事建筑物加固改造的产学研工作。此外，同济大学、中国建筑科学研究院、四川省建筑科学研究院等相继成立了工程检测、鉴定与加固技术科室，开展这方面的工作并取得较好的成果。

建设部于 1989 年 11 月颁布了《城市危险房屋管理规定》，要求各市、县房屋管理部门成立房屋安全鉴定机构，负责旧房的安全鉴定与加固管理。此后各市县相继成立了房屋安全鉴定专职机构，抽调技术力量加强这方面的工作。这对促进混凝土结构的鉴定与加固改造的发展起到巨大的推动作用。

根据当时大量建筑物亟待鉴定与加固的需要及缺乏相应的标准、规范的情况，经我国有关主管部门和中国工程建设标准化协会批准，于 1990 年成立了“全国建筑物鉴定与加固标准技术委员会”，与此同时，相继成立了“国家工业建筑诊断与改造工程技术研究中心”和“中国老教授协会房屋增层改造专业委员会”等学术团体。这些学术团体积极开展和组织本领域的研究和学术交流活动，与国外进行学术交流活动，引进国外先进经验，对建筑物可靠性鉴定与加固这门新兴学科的建立和发展具有重要影响作用。

在这一阶段后期，中国建筑科学研究院等有关单位分析总结了国内现有的研究成果和工程经验，并借鉴国外先进经验，编制了《混凝土结构加固技术规范》(CECS25—1990)，推荐给各工程建设设计、施工单位使用。这是我国首本结构加固技术规范，对本领域的发展具有深远的意义。

### 1.2.1.2 初具规模发展阶段

这一阶段可称为快速发展阶段，大致是从 20 世纪 90 年代至 20 世纪末，其切入点是 1991 年 11 月在上海召开的第一届全国建筑物鉴定与加固学术交流会，此后每两年召开一次。

这一发展阶段积极开展学术活动，促进技术进步和发展，编制和颁发了相关标准、规程和规范，满足了实际工程所需。陆续颁布的《工业厂房可靠性鉴定标准》(GBJ 144—90)、《建筑抗震加固技术规程》(JGJ 116—1998)、《既有建筑地基基础加固技术规范》(JGJ 123—2000)等，是我国在土木工程结构加固领域技术进步的结晶，是新技术、新思想的集中体现，在一定程度上缓解了这个新兴领域缺乏标准化支持的燃眉之急。同时，在这一发展阶段非常重视本学科的人才培养和科学研究，不少高等院校、科研院所等专门展开相应的研究工作，并先后成立了一批专门从事混凝土结构检测鉴定和加固改造设计施工的专业技术公司。

### 1.2.1.3 较为成熟发展阶段

进入 21 世纪以来，我国建筑行业逐步进入了较为成熟发展阶段或者较为理性的正常发展

阶段。在这一阶段，我国已经具有了一支规模大、理论基础扎实、学术科研水平和技术水平较高且工程经验丰富的专业技术队伍。国内著名的相关高等院校、科研院所乃至大型企业均具有专门队伍，从事混凝土结构加固领域的研究开发、探索创新以及参与标准、规范的编制和重大工程的加固，并取得了大批新的研究成果。

例如，粘贴纤维复合材料加固理论与应用技术、置换混凝土加固技术、钢丝绳网片-聚合物砂浆面层加固技术、绕丝加固技术、植筋技术、预应力碳纤维板加固技术、喷射混凝土加固技术和复合加固等方面均取得了新的进展，有的已可付诸实用，尤其是碳纤维加固的理论研究和 技术获得了飞跃发展。

除此之外，在本领域使用的标准、规范的编制和修订亦取得了新的进展，如《碳纤维片材加固混凝土结构技术规程》(2007年版)(CECS 146—2003)、《喷射混凝土加固技术规程》(CECS 161—2004)、《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》(GB 50728—2011)等，并对原有《混凝土结构加固技术规范》做了全面修订后出版发行了《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)。

### 1.2.2 我国混凝土结构加固行业现状及不足

近年来混凝土结构加固改造行业高速发展，成绩显著，为我国经济建设做出了巨大贡献。但是，由于起步较晚，我国混凝土结构加固行业仍存在诸多不足。主要表现在以下几个方面：

(1) 主要技术力量集中在少数专业科研院所、高等院校以及大型设计院和生产 企业，并且发展不均衡，大多数企业的技术水平还不高。有的工程由于加固或者改造方案选择失误，对结构整体造成了不应有的损失。

(2) 从事混凝土结构加固行业的施工单位大多是从事一般基本建设的施工单位，或者是松散组织的临时工队伍。操作工人对混凝土结构加固改造施工并不熟悉，加之加固工程所涉及的项目内容零星复杂，施工组织和管理的难度比较大，在施工过程中管理措施跟不上，造成工程质量低，设计意图不能完全实现，甚至违背设计意图。

(3) 混凝土结构加固改造的第一步是对工程对象的现状进行鉴定。目前，由于混凝土结构诊断技术还不完善，有时解决工程问题时，还需以经验为主进行判断，这在一定程度上增加了技术风险。

(4) 缺少专用的工程机具、材料。近年来，虽然有些单位开发了一些专用的机具和器材，但总的来说，还没有完全满足工程应用的需要。

(5) 相应的施工操作规程、规范和质量验收标准还不够完善。特别是采用新材料、新技术时，由于没有标准的工艺做法，工程质量不宜控制。

(6) 因混凝土结构耐久性不足而造成的危害尚未被人们完全认识，混凝土结构也需要进行积极防护的观念还没有被人们所广泛接受。

由于以上种种不足和缺陷，我国对已有混凝土结构的加固改造行业尚未建立起完善的管理体系，对承担项目的单位缺少恰当的资质认证办法、标准和健全的监督约束机制，对操作人员缺少技能考核制度，对投入市场的一些新型修补材料、新技术、新方法缺少有效的工程经验或者质量认证办法和标准，导致行业市场的运行不规范。

### 1.2.3 提高我国混凝土结构加固水平的措施

目前我国混凝土结构加固行业总体水平不高、市场不规范、缺少统一行为规则，促使混凝土结构加固行业健康发展的有效措施如下：

(1) 加强管理，促使与混凝土结构加固改造相关的行为规范化。

1) 工作程序规范化。任何混凝土结构在进行加固改造之前都必须经过相应的技术鉴定，改造和加固设计应当以鉴定报告为主要技术依据。

2) 对所有从事鉴定、设计、施工及质量监督检验的单位进行资质认证。认证内容包括人员组成、技术水平、设备仪表装备、工程经验、组织建制、质量保证体系、民事行为能力等方面，根据认证结果核定其承担业务的规模和范围。

3) 为了保证工程质量，新型修补材料或者专用修补材料的供应商必须向施工单位提供与施工操作有关的全套资料；施工操作人员的技能水平应得到材料供应厂家的认可；材料供应厂家应以一定数额的材料费作为质量保证金；施工单位应无条件提供一定期限的施工质量保证。

(2) 开发成套的混凝土结构加固改造技术。

要投入研究力量，收集、整理以往的工程资料，积极编制、完善有关的规程、规范、标准等；同时组织力量编写有关的实用技术手册或者资料集；开发先进的混凝土结构诊断、检测方法及相关标准、规范；借助计算机建立实用技术库及修复材料库，开发混凝土结构诊断、加固改造计算机辅助系统，使得加固改造的全过程更加详细、规范化。

(3) 广泛开展技术交流和培训。

恰当地利用目前有关的新技术、新方法，可以促使我国混凝土结构加固改造技术水平的快速发展。各种专业学会开展的学术交流、专题讲座等都会加速混凝土结构加固新技术、新方法的传播；在高等院校开设混凝土结构加固的专业课程也是推广和促进混凝土结构加固技术快速发展的有效手段。

(4) 对于新建混凝土结构应尽早采取防护措施。

我国近年修建的许多大型混凝土结构，虽然使用年限不长，但已暴露出一些老化损坏现象。应该对这类新建混凝土结构尽早采取防护措施，避免造成后期更严重的损失。

## 1.3 本课程的主要内容和学习要求

本课程是土木工程专业本科生和研究生的一门专业课，它的前续课程有“土木工程材料”、“材料力学”、“结构力学”、“混凝土结构设计原理”、“钢结构设计原理”、“混凝土建筑结构”、“砌体结构”、“工程结构抗震设计”和“工程结构试验与检验技术”等，只有学习了相关的前续课程才能够更好地学习和理解本课程。

本课程的主要内容包括混凝土结构加固原理、增大截面加固法、置换混凝土加固法、改变受力特征加固法、外加预应力加固法、外包型钢加固法、粘贴钢板加固法、粘贴纤维复合材料加固法、钢丝绳-水泥砂浆面层加固法以及其他加固方法与技术。

混凝土结构加固由于结构形式较为复杂，对结构的各种作用较难确定，因此给结构分析带

来了一定困难；另外，其构造设计也较为复杂，因此在学习本课程时应注意以下问题：

(1) 要结合相关规范掌握荷载及其他作用的计算方法和组合方法。要使荷载及各种作用计算结果准确，为进行正确的结构分析打下良好基础。

(2) 要正确选用结构计算模型。计算模型的选取要考虑最主要因素，忽略次要因素；既要使计算结果能正确反映结构的主要受力特点，又要使计算方法简单易掌握。

(3) 要采用简单可行的结构分析方法。要使得分析方法简单、省时、省力，又能使结构分析准确可靠。

(4) 要结合相关规范掌握各种特种结构设计的基本方法。设计中既要把结构分析的结果作为承载力、刚度和稳定性设计的基本要求得到满足，又要使计算模型和计算方法中未考虑到的因素和不足能够通过构造措施得到满足。

学习本课程要有较扎实的数学、力学、材料和结构设计等方面的知识，并能理解各种相关规范的规定和要求。学习时要注重方法的掌握和知识面的扩大，应将课堂讲授和自学相结合，特别注重和强调自学的重要性。

## 思 考 题

- 1-1 为什么混凝土结构的加固在土木工程中起到越来越重要的作用？
- 1-2 混凝土结构需要加固的原因有哪些？
- 1-3 我国混凝土结构加固行业的问题有哪些？应如何解决这些问题？
- 1-4 本课程有何特点？学习本课程应注意哪些方面？

## 2 混凝土结构加固原理

### 2.1 混凝土结构加固的基本概念

#### 2.1.1 加固结构受力特征

加固结构的受力性能与一般未经加固的普通结构的受力性能有较大差异，这决定了加固设计不能完全按照普通结构概念进行设计。加固结构的受力特征主要体现在二次受力问题和共同工作问题。

首先，加固结构属于二次受力，加固前原结构已经承受了荷载（即第一次受力），尤其是当结构因承载能力不足而进行加固时，截面应力、应变水平一般都比较低。然而，新加部分在加固后并不立即承受荷载，而是在新增荷载，即第二次加载时，才开始受力。这样，整个加固结构在其后的第二次加载受力过程中，新加部分的应力、应变始终滞后于原结构的累计应力、应变，原结构的累计应力、应变值始终高于新加部分的应力、应变值，原结构达到极限状态时，新加部分的应力应变可能还比较低，破坏时，新加部分可能达不到自身的极限状态，其潜力得不到充分发挥。

其次，加固结构属于二次组合结构，新、旧两部分结构存在整体工作和共同受力问题。整体工作的关键，主要取决于结合面的构造处理及施工方法。由于结合面混凝土的黏结强度一般远远低于混凝土本身强度，因此，在总体承载力上二次组合结构一般比一次整浇结构要低。

加固结构受力特征的上述差异，决定了各类结构的加固设计计算分析和构造处理，不能完全沿用普通结构的概念进行设计和计算。

#### 2.1.2 加固结构共同工作问题

加固结构的受力，尤其当结构临近破坏时，结合面会出现拉、压、弯、剪等复杂应力，特别是受弯或偏压构件的剪应力，有时相当大。加固结构新、旧两部分整体工作的关键，主要在于结合面能否有效地传递和承受这些应力，同时变形不能过大。结合面产生问题的主要原因是剪力和拉力，由于黏结强度低，且离散性大，结合面混凝土所具有的黏结抗剪和抗拉能力有时远不能满足受剪和受拉承载能力要求，如梁、柱采用增加截面加固时，需配置一定数量贯通结合面的剪切-摩擦筋，利用钢筋产生的被动剪切-摩擦力来抵抗结合面所出现的剪力和拉力；而粘贴钢板或者纤维复合材料加固时，胶黏剂应具有优良的物理化学特性，才能保证结合面能有效传递和承受应力。



### 2.1.3 加固结构基本计算假定

加固结构的承载力与新、旧两部分的应力或应变差值直接相关，与原结构的极限变形值和两部分材料的应力-应变关系有关。从理论上讲，只要这些关系确定，加固结构的承载能力就可求解。例如，采用增大截面加固结构构件的正截面承载力计算时，做以下基本假定：

- (1) 截面应变保持平面。
- (2) 不考虑混凝土的抗拉强度。
- (3) 混凝土受压的应力  $\sigma_c$  与应变关系  $\varepsilon_c$  按下列规定取用：

$$\sigma_c = \begin{cases} f_c \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^n \right] & \varepsilon_c \leq \varepsilon_0 \\ f_c & \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中： $f_c$ ——混凝土轴心抗压强度设计值。

$\varepsilon_c$ ——混凝土压应力达到  $f_c$  时的压应变，最小取值为 0.002。

$\varepsilon_{cu}$ ——正截面混凝土的极限压应变，非均匀受压时最小取值为 0.003 3，当处于轴心受压时取值为  $\varepsilon_0$ 。

$n$ ——计算系数，最大取值为 2.0。

$\varepsilon_0$ 、 $\varepsilon_{cu}$  和  $n$  均按照混凝土立方体抗压强度标准值  $f_{cu,k}$  进行计算或修正：

$$\varepsilon_0 = 0.002 + 0.5(f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (2-2a)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0033 - (f_{cu,k} - 50) \times 10^{-5} \quad (2-2b)$$

$$n = 2 - \frac{1}{60}(f_{cu,k} - 50) \quad (2-2c)$$

(4) 纵向钢筋应力取钢筋应变与弹性模量的乘积，且满足  $-f'_y \leq \sigma_{si} \leq f_y$ 。钢筋的极限拉伸应变  $\varepsilon_{su}$  取为 0.01。

(5) 加固结构承载能力极限状态的判定标准是截面变形达到下列情况之一：当原混凝土或新加混凝土压应变达到混凝土极限应变  $\varepsilon_{cu}$ ；当原钢筋或后加钢筋达到极限拉伸应变；当混凝土和钢筋同时达到极限应变。

### 2.1.4 加固结构承载力极限状态设计表达式

混凝土加固结构的承载力设计应采用下列极限状态设计表达式：

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (2-3)$$

$$R_d = R_d(f_{c1}, f_{c2}, f_{s1}, f_{s2}, \beta, \alpha_k \dots) \quad (2-4)$$

式中： $\gamma_0$ ——加固结构的重要性系数，对安全等级为一级、二级、三级的构件，可分别取为 1.1、1.0、0.9。

$S_d$ ——内力组合设计值，按我国现行标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009)的规定进行计算。

$R_d$ ——混凝土加固结构构件的承载力设计值。

$f_{c1}$ 、 $f_{s1}$ ——原结构的混凝土、钢筋的强度设计值。