

SIMPLIFIED SERIES OF
CIVIL ENGINEERING

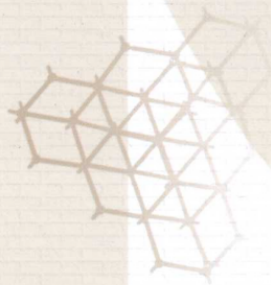
清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

谢征勋 谢敏 编著

简明土木工程系列专辑

工程事故与安全 · 结构加固技术



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

知识产权出版社

www.cnipr.com



Simplified Series of Civil Engineering

清华大学土木工程系组编

丛书主编 崔京浩

谢征勋 谢敏 编著

简明土木工程系列专辑

工程事故与安全 • 结构加固技术

中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

知识产权出版社

www.cnipr.com



内容提要

本书是清华大学土木工程系编的“简明土木工程系列专辑”中的一本，围绕“工程事故与安全”这一专题，侧重探讨了工程的“结构加固技术”这一个环节。

工程的结构加固技术包括在建或新建工程中的意外事故处理和既有建筑物的裂损加固处理两个方面的一些特种技术。本书从现在流行的和经典的加固技术中存在的某些不足着眼，介绍了一些新思路和一些新技术。它们包括了结构构件加固、结构整体加固、地基基础加固和建筑物纠倾加固等几个方面，也涉及在当前颇具争议的既有城市的扩改与发展这一话题。从预防着眼，本书还专门论述了地基预处理技术及大体积混凝土结构、大面积混凝土结构和特种混凝土结构的抗裂技术问题。

本书除了可作为由大学本科土木建筑专业（含工民建、路桥、港口工程、水利、矿井等分支专业）开设的“工程事故分析与工程安全”课程的辅助教材外；也适合于从事“工程事故与安全”这一专题研究的研究生参考阅读；更适合于从事工程监理、质量监督、现场施工，尤其是专门从事工程维修与加固工作的技术人员作为工作手册使用。

选题策划：阳 森 张宝林 E-mail: yangsanshui@vip.sina.com; z.baolin@263.net

责任编辑：阳 森 张宝林

文字编辑：张 冰

图书在版编目 (CIP) 数据

工程事故与安全·结构加固技术/谢征勋，谢敏编著.

北京：中国水利水电出版社：知识产权出版社，2009

（简明土木工程系列专辑/崔京浩主编）

ISBN 978-7-5084-6324-7

I. 工… II. ①谢…②谢… III. ①建筑工程-工程事故-
事故分析②建筑结构-加固 IV. TU712 TU746.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 031525 号

简明土木工程系列专辑

工程事故与安全·结构加固技术

谢征勋 谢敏 编著

中国水利水电出版社

知识产权出版社

北京科水图书销售中心零售（电话：010-88383994、63202643）

全国各地新华书店和相关出版物销售网点经售

中国水利水电出版社微机排版中心排版

北京市兴怀印刷厂印刷

140mm×203mm 32 开本 7.875 印张 212 千字

2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷

印数：0001—4000 册

定价：20.00 元

版权所有·侵权必究

如有印装质量问题，可由中国水利水电出版社营销中心调换

（邮政编码 100038，电子邮件：sales@waterpub.com.cn）

清华大学土木工程系组编

简明土木工程系列专辑

编 委 会

名誉主编 陈肇元 袁 驷

主 编 崔京浩

副 主 编 石永久 宋二祥

编 委 (按汉语拼音排序)

陈永灿 胡和平 金 峰 李庆斌

刘洪玉 钱稼茹 王志浩 王忠静

武晓峰 辛克贵 阳 森 杨 强

余锡平 张建民 张建平

编 辑 办 公 室

主 任 阳 森

成 员 张宝林 彭天赦 张 冰 邹艳芳

总 序

国务院学位委员会在学科简介中为土木工程所下的定义是：“土木工程（Civil Engineering）是建造各类工程设施的科学技术的统称。它既指工程建设的对象，即建造在地上、地下、水中的各种工程设施，也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等专业技术”。土木工程是一个专业覆盖面极广的一级学科。

英语中“Civil”一词的意义是民间的和民用的。“Civil Engineering”一词最初是对应于军事工程（Military Engineering）而诞生的，它是指除了服务于战争设施以外的一切为了生活和生产所需要的民用工程设施的总称，后来这个界定就不那么明确了。按照学科划分，地下防护工程、航天发射塔架等设施也都属于土木工程的范畴。

土木工程是国家的基础产业和支柱产业，是开发和吸纳我国劳动力资源的一个重要平台，由于它投入大、带动的行业多，对国民经济的消长具有举足轻重的作用。改革开放后，我国国民经济持续高涨，土建行业的贡献率达到 1/3；近年来，我国固定资产的投入接近甚至超过 GDP 总量的 50%，其中绝大多数都与土建行业有关。随着城市化的发展，这一趋势还将继续呈现增长的势头。

相对于机械工程等传统学科而言，土木工程诞生得更早，其发展及演变历史更为古老。同时，它又是一个生命力极强的学科，它强大的生命力源于人类生活乃至生存对它的依赖，甚至可以毫不夸张地说，只要有人类存在，土木工程就有着强大的社会需求和广阔的发展空间。

随着技术的进步和时代的发展，土木工程不断注入新鲜血液，呈现出勃勃生机。其中工程材料的变革和力学理论的发展起

着最为重要的推动作用。现代土木工程早已不是传统意义上的砖瓦灰砂石，而是由新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法武装起来的为众多领域和行业不可或缺的大型综合性学科，一个古老而又年轻的学科。

综上所述，土木工程是一个历史悠久、生命力强、投入巨大、对国民经济具有拉动作用、专业覆盖面和行业涉及面极广的一级学科和大型综合性产业，为它编写一套集新颖性、实用性和科学性为一体的“简明系列专辑”，既是社会的召唤和需求，也是我们的责任和义务。

清华大学土木工程系是清华大学建校后成立最早的科系之一，历史悠久，实力也比较雄厚，有较强的社会影响和较广泛的社会联系，组编一套“简明土木工程系列专辑”，既是应尽的责任也是一份贡献，但面对土木工程这样一个覆盖面极广的一级学科，我们组编实际起两个作用：其一是组织工作，组织广大兄弟院校及设计施工部门的专家和学者们编写；其二是保证质量的作用，我们有一个较为完善的专家库，必要时请专家审阅、定稿。

简明土木工程系列专辑包括以下几层含义：简明，就是避免不必要的理论证明和繁琐的公式推导，采用简洁明快的表述方法，图文并茂，深入浅出，浅显易懂；系列，指不是一本书而是一套书，这套书力争囊括土木工程涵盖的各个次级学科和专业；专辑，就是以某个特定内容编辑成册的图书，每本书的内容可以是某种结构的分析与计算，某个设计施工方法，一种安装工艺流程，某种监测判定手段，一个特定的行业标准，等等，均可独立成册。

这套丛书不称其为“手册”而命名为“系列专辑”，原因之一是一些特定专题不易用手册的方法编写；原因之二是传统的手册往往“大而全”，书厚且涉及的技术领域多，而任何一个工程技术人员在某一个阶段所从事的具体工作又是针对性很强的，将几个专业甚至一个项目的某个阶段集中在一本“大而全”的手册势必造成携带、查阅上的不方便，加之图书的成本过高，编写机构臃肿，组织协调困难，出书及再版周期过长，以致很难反映现

代技术飞速发展、标准规范规程更新速度太快的现实。考虑到这些弊端，这套系列专辑采用小开本，在选题上尽量划分得细一些，视专业、行业、工种甚至流程的不同，能独立成册的绝不合二为一，每本书原则上只讨论一个专题，根据专题的性质和特点有的书名仍冠以“手册”两字。

这套系列专辑的编写严格贯彻“新颖性、实用性、科学性”三大原则。

新颖性，就是充分反映有关新标准、新规程、新规范、新理论、新技术、新材料、新工艺、新方法，老的、过时的、已退出市场的一律不要。体现强劲的时代风貌。

实用性，就是避免不必要的说理和冗长的论述，尽可能从实用的角度用简洁的语言以及数据、表格、曲线图形来表述；深入浅出，让人一看就懂，一懂能用；不是手册，胜似手册。

科学性，就是编写内容均有出处，参考文献除国家标准、行业标准、地方标准必须列出以外，尚包括引用的论文、专著、手册及教科书。

这套系列专辑的读者对象是比较宽泛的，它包括大专院校师生，土木工程领域的管理、设计、施工人员，以及具有一定阅读能力的建筑工人。它既可作为土建技术人员随身携带及时查阅的手册，又可选作大专院校、高职高专的教材及专题性教辅材料。

崔京浩

2005 年 10 月于清华园

崔京浩，男，山东淄博人。1960 年清华大学土建系毕业，1964 年清华大学结构力学研究生毕业，1986~1988 年赴挪威皇家科学技术委员会做博士后，从事围岩应力分析的研究。先后发表论文 150 多篇，编著专业书 4 本，参加并组织编写巨著《中国土木工程指南》，任编辑办公室主任，并为该书撰写绪论；主持编写由清华大学土木工程系组编的“土木工程新技术丛书”和“简明土木工程系列专辑”，并任主编。曾任清华大学土木系副主任，现为中国力学学会理事，《工程力学》学报主编，享受国务院特殊津贴。

前 言

本书初稿成于 2007 年底，未及付印，却发生了 2008 年 5 月 12 日的汶川大地震。面对那 8 万多条被埋葬于建筑废墟中原本鲜活的生命，近 30 万张自废墟中抢救出来的劫后余生的面孔和 13 亿双震惊的眼睛，作为一名从事“工程事故与安全”课题研究的土木建筑工程师，能不反思吗？于是对原稿内容进行了重新审视与订正，并藉此作了多方调查与认真思考，从而形成了以下思想脉络，愿与广大读者共同商榷。

1. 关于规范的设计烈度和安全水准问题

汶川大地震遭受如此惨重的损失，有相当一部分人认为：“主要是震级太高了，损失是无法避免的。”震级太高，就意味着《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）的设防烈度和安全水准偏低，因而国家住房和城乡建设部及时地于 2008 年 7 月 30 日即以 71 号文件发布了关于《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）局部修订的公告，对其中 14 个主要条款进行了相应的修订。遗憾的是，本次修订对于“预制构件”的“限制使用”或“禁止使用”的条款，仍未痛下决心；主要是对川、陕、甘地区的 70 个城镇的设防烈度作了大幅度的提高，预计建筑物的结构成本和钢筋用量将提高 20%~30%。按未修订的《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）规定：汶川一带的抗震设防烈度为 7 度，抗震设计基本地震加速度值取 $0.10g$ ，即使汶川、都江堰一带的震中区真正出现过较高的地震烈度，破坏力较大，但是由于地震波（指横波）在传递过程中的阻尼、折射、反射、过滤、衰减作用影响，高烈度区的扩展范围应不会很大。退一

步说，我国规范采取“小震不坏，中震可修，大震不倒”的设防三水准，而且着眼于坚决守住“大震不倒”这道最后防线。宁可让设防烈度偏低一点，在遇到设防烈度的地震时，让结构能抢先出现些许变形和局部屈服，形成塑性铰。而在高于设防烈度的情况下，则由于塑性铰在强柱弱梁、强剪弱弯等设计理念和构造措施的保护下，能产生很大的结构延性，拥有极强的消能效果，能充分发挥其以柔克刚的优势，保护建筑物不至于倒塌。从这一点着眼来考察，我国的抗震规范甚至比美国规范、欧洲规范或日本规范具有更好的经济合理性和更高的安全可靠度。因此，即使汶川地震时的原 7 度设防偏低，也不应出现大面积建筑物倒塌、数以万计的人被埋在废墟下的惨痛局面。因此，作者认为，在我国现有的经济条件下，应严格执行有关规范中对设防烈度和安全水准的要求。

2. 关于工程的设计质量与施工质量问题

如果严格执行了抗震规范的设防烈度和安全水准，出现问题就有可能是在工程的设计与施工质量方面。从大量电视屏幕、报刊版面上看到，也经一些亲临地震现场考察的专家证实：建筑物的损毁机理多是粉碎性的脆性破坏，也就是建筑结构延性不足。以分布在震中区周围的 26 所中小学校近 7000 间教室，约 40 万 m^2 建筑面积的校舍坍塌机理为例，几乎都属于一塌到底的粉碎性脆性破坏。显然，坍塌现象都是发生在地震之初的弱震阶段，没有能给人们提供充足的逃生时间，说明了建筑结构可能存在严重的设计与施工质量问题，违背了抗震规范。这些建筑物大都是在《建筑抗震设计规范》(GBJ 11—89) 甚至是在《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2001) 颁布实施后建成的，不能不引人深思。

3. 教训深刻，责任分明

不可忘记，汶川地震是发生在唐山地震 32 年后，是在付出

了伤亡 46 万人（其中死亡 24.6 万人）的巨大代价之后发生的。回想唐山地震时的日日夜夜，人们也曾表示，要汲取教训，要为抗震减灾工作作出努力，要唤醒全国人民树立战胜地震灾害的信心。可以说，《建筑抗震设计规范》（GBJ 11—89）和《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2001）的产生就是具体体现。遗憾的是，抗震规范的精神并没有形成社会共识，没有为群众所完全理解，甚至并没有为各级政府官员所完全领会。设想这次汶川地震如果不是发生在地处四川西部的山区，而是出现在紧邻环太平洋地震带的东南沿海，所付出的代价可能要比 30 多年前唐山地震所付出的代价还要高出若干倍！应该说，教训是极其深刻的，问题究竟出在哪里？应是非清楚，责任分明。每个人都应该勇于承担责任，面向未来，决不能让悲剧重演！

4. 抗震减灾，任重道远

不可忘记，我们所处的环境是在全球两个最大的地震带（环太平洋地震带和沿喜马拉雅山地震带）的包围圈里，以占全球陆地面积 1/14 的国土面积承担了全球 1/3 的地震灾害。而我们的建筑物却偏偏是如此脆弱：不仅是广大农村、乡镇的建筑物在地震面前不堪一击，更可怕的是地处沿海、沿江、沿湖等繁华地域的、完全按新抗震规范建造起来的面积以百亿平方米计的现代化工用、民用建筑，也多因软土地基在震力作用下存在粉沙土液化和污泥土流变、地基失效的严重威胁，必须进行加固。既有的 30 余万座公路桥和 4 万余座铁路桥则由于原建造标准偏低，不堪当前运输任务的重负而急需进行加固，险情最大、加固难度最大的还是那些完全依靠群众运动建造起来的中小型水库堤坝工程，以及那些位居世界领先地位、却可能存在险情或者疑似已受到汶川地震损伤的大型水利枢纽工程。总之，结构加固、抗震减灾任务确实任重道远。当前面临的重大问题，不仅仅是在世界经济危机袭击下影响 GDP 增长速度放缓的问题，也应将抗震减灾

任务放在重要位置。当前，那些侵占农田、破坏环境、干扰气候，甚至可能诱发地震等的工程项目，是值得商榷的。只有面对现实，解民之困，才是当务之急！

本书能在汶川地震周年祭这个重要时刻及时付印出版，适逢其时，多承中国水利水电出版社的支持，在此表示衷心的感谢。

全书内容共分 10 章，前 4 章着重对当前结构加固现状和传统结构加固技术进行了分析，后 6 章着重介绍了近年来作者在具体的结构加固工作中遇到的一些新问题和萌发的一些新思路。其中有些成果，如“三结法”消除地基液化技术于 2002 年在香港国际工程技术会议（ABT 2002—HongKong）发表后，得到了国内外同行专家的认同与支持；有些项目，如多元吸附净化浅层垃圾土和多维挤密加固浅层杂填土地基技术，已获国家专利局初审通过。此外，内外并举加固钢筋混凝土结构构件断面技术、软硬兼施加固框架节点技术、约束法消减深厚软土地基沉降量技术等项目已有较广泛和较成熟的施工实践经验。还有一些项目，如大面积薄板混凝土冷养温控抗裂技术和深部植筋、喷沙、注浆预处理松软地基技术等则只是正在研究与开发中的新课题，在此一并推出，希望起到抛砖引玉的作用，更希望得到广大读者和专家教授们的帮助，愿与大家携起手来，为国家当前所面临的繁重的抗震减灾、结构加固工作作出贡献，谨此致意。

作者谨识于南京市

时值汶川地震周年祭

目 录

总序

前言

第 1 章 绪论	1
第 1 节 结构加固技术的市场需求/ 1	
第 2 节 用仿生学观念来研究结构加固技术/ 6	
第 3 节 用中医治病理念来进行结构改造加固工作/ 7	
第 4 节 经典方法和改进技术/ 7	
第 2 章 构件加固技术	8
第 1 节 放大断面法/ 8	
第 2 节 外包钢铁法/ 14	
第 3 节 粘钢加固法/ 18	
第 4 节 粘贴碳纤维布加固法/ 26	
第 3 章 整体加固技术	36
第 1 节 预应力加固技术/ 36	
第 2 节 改变受力体系加固技术/ 45	
第 4 章 地基基础加固技术	52
第 1 节 上部结构与地基基础/ 52	
第 2 节 地基基础加固技术/ 53	
第 3 节 天然地基事前强化预处理加固技术/ 54	
第 4 节 地基基础事故后处理加固技术/ 63	
第 5 章 建筑物纠倾技术	69
第 1 节 建筑物纠倾技术的市场需求/ 69	
第 2 节 纠倾技术的发展现状/ 70	
第 3 节 迫降法纠倾/ 71	
第 4 节 顶升法纠倾/ 78	

第 5 节	综合纠倾法 / 81	
第 6 节	纠倾工程实例 / 81	
第 6 章	钢筋混凝土结构加固技术的新思路	95
第 1 节	结构设计可靠度理论的两个层次 / 95	
第 2 节	整浇钢筋混凝土结构加固技术的两个环节 / 96	
第 3 节	内外并举加固钢筋混凝土结构构件断面技术 / 97	
第 4 节	软硬兼施加固框架节点技术 / 106	
第 7 章	地基基础加固技术的发展新方向	113
第 1 节	预防为主的治疗方针与天然地基预先强化处理的必要性 / 113	
第 2 节	地基基础工程事故的后处理任务及其艰巨性 / 114	
第 3 节	几种新的天然地基预处理技术 / 116	
第 4 节	封闭疗法治病和约束注浆法处理建筑物地基基础事故 / 170	
第 5 节	工程实例 / 172	
第 8 章	建筑物纠倾技术的发展方向	180
第 1 节	“六字法”综合纠倾技术 / 180	
第 2 节	悬挑压重法纠倾技术 / 186	
第 3 节	升降法纠倾技术 / 190	
第 9 章	城市发展和既有建筑物的扩改加固技术	194
第 1 节	问题出在哪里 / 194	
第 2 节	城市发展策略中的两大争论 / 196	
第 3 节	紧缩城市与既有建筑物的保护 / 198	
第 4 节	既有建筑物扩改加固技术工程实例 / 199	
第 10 章	大体积、大面积混凝土温控抗裂技术	209
第 1 节	大体积混凝土热养温控抗裂技术 / 209	
第 2 节	大面积薄板混凝土冷养温控抗裂技术 / 218	
第 3 节	大体积防渗耐火特种混凝土温控养护抗裂技术 / 224	
参考文献		233
出版者的话		235

第 1 章 绪论

本书要讨论的“结构加固技术”包括在建或新建工程中的意外事故处理和既有建筑物的裂损加固处理两个方面的一些特种技术。

世界工程建设发展到今天，一方面，以我国为代表的发展中国家，建设规模和建设速度都是空前的，从而必然会出现大量的在建或新建工程中的意外事故；另一方面，建设事业已经趋向饱和的发达国家，正面临着空前的工程结构老化裂损，存在亟待进行大范围加固的压力。因此，关注工程结构加固技术还是很有必要的。

第 1 节 结构加固技术的市场需求

1.1 钢筋混凝土世界

自从 1824 年英国人阿斯波丁发明波特兰水泥、1854 年水泥混凝土首次用于建筑工程以来，世界水泥产量逐年攀升，但是水泥工业的加速发展，还是在第二次世界大战以后。由于大半个世界受到了战争的残酷摧毁，战后的恢复重建工作量极大。钢筋混凝土结构在整个建设领域——从铁路、公路、海港、码头和机场等交通运输工程，水利、堤坝工程，到工业、民用房屋建筑工程——覆盖面最大。除少量小规模民用房屋偶尔采用砖石或砖木结构，以及少量大面积、大空间的公共与工业建筑偶尔采用纯钢结构外，当今世界，几乎已成为钢筋混凝土的世界。据统计，1900 年世界水泥年消耗量还只有 0.1 亿 t，到 1930 年就增加到 1

亿 t, 到 1950 年初期已达到 1.5 亿 t, 1998 年的统计是年消耗量为 16 亿 t。在我国, 1976 年以后的水泥工业几乎已濒临破产, 到 1980 年年产量就达到了 0.8 亿 t, 1985 年则达到了 1.43 亿 t, 高于前苏联 (1.4 亿 t)、日本 (0.95 亿 t) 和美国 (0.8 亿 t)。短短几年之间, 我国的水泥的年产量与年消耗量跃居世界第一。进入 1990 年以后, 我国水泥工业的年产量增长速度就更快了, 1997 年年产量突破了 5 亿 t, 2000 年接近 6 亿 t, 2001 年为 6.4 亿 t, 2002 年达 7 亿 t, 2003 年的水泥年产量已占世界水泥总产量的 55%, 2005 年的水泥年产量为 10.64 亿 t, 至 2006 年底已达到年产水泥 12.4 亿 t。也许有人要因此自豪, 1000kg 水泥的消耗量意味着有 3m^3 多的钢筋混凝土建筑物的诞生, 意味着这个世界已经成为钢筋混凝土的世界, 意味着大建设所取得的辉煌成果。但是, 水泥用量的增长也像人口的增长一样, 既是优势, 也具有很大的副作用。水泥用量过大带来的副作用主要表现在两方面: 一方面, 严重的破坏环境, 直接消耗资源; 另一方面, 就像人生下来需要抚养、需要教育、需要消耗资源一样, 钢筋混凝土结构一诞生, 其平均寿命也就是 50 年左右, 一般说来, 比砖石结构, 甚至比木结构的服务寿命还要短, 在它的服务期间, 是需要不断地进行维修、保养、加固与改造的。因此, 只顾建设不顾维修、加固与改造工作, 以及前面建后面拆的做法, 是必须抵制的。

1.2 钢筋混凝土结构的耐久性

钢筋混凝土结构虽然具有很多优点, 例如比砖石结构具有更高的承载能力, 比钢结构具有更好的耐腐蚀性。但是, 钢筋混凝土结构的耐久性毕竟还是存在很大问题的, 这主要表现在以下两个方面。

1. 混凝土碳化

混凝土是由水泥和砂石料加水拌和胶凝而成的一种人造石。虽然约占混凝土总体积 50% (高性能混凝土) 或 70% (普通混

凝土)的砂石料,具有较好的化学稳定性和较高的耐久性,但是那些占50%或30%的水泥胶凝体即水泥石的耐久性就值得关注了。水泥石的主要成分为硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(C_2S)、铝酸三钙(C_3A)、铁铝酸四钙(C_4AF)和游离石灰($FCaO$),它是一种强碱性物质,一般 $pH>12$ 。这种强碱性物质长期暴露在大气中被二氧化碳(CO_2)侵蚀,会失去碱性,生成 $CaCO_3$ 。 $CaCO_3$ 虽然硬度(强度)不低,但其体积会收缩,引起收缩裂缝。由于碳化步调不一,收缩裂缝没有规律性,也没有方向性,长期作用,由表及里,由浅到深,就会使混凝土质地酥松,降低强度。对于捣固欠密实,或者由于其他原因使混凝土存在裂缝的结构,碳化作用的威胁力就更大。此外,碳化速度也是惊人的。据东南大学的最新试验报告:7个试件在不同应力状态和以下标准环境条件下,得到90d的实测碳化深度达29.19~40.5mm,值得关注。

(1) 标准环境条件: CO_2 浓度(表面体积浓度)为(20±3)%; 空气湿度为(70±5)%; 气温为(20±5)℃。

(2) 混凝土试件的实测碳化深度如表1.1所示。

表 1.1 混凝土试件的实测碳化深度

试件编号	应力状态	实测碳化深度 (mm)			
		30d	45d	60d	90d
Kw-1	0	25.45		31.30	36.40
Kc-1	$\sigma_c=0.3f_c$	23.30		31.90	34.45
Kc-2	$\sigma_c=0.5f_c$	22.50		26.38	31.78
Kc-3	$\sigma_c=0.7f_c$	19.95		25.13	29.19
Kt-1	$\sigma_t=0.3f_t$		29.6		37.50
Kt-2	$\sigma_t=0.5f_t$		30.2		38.75
Kt-3	$\sigma_t=0.7f_t$		31.0		40.50

注 表中 σ_c 为混凝土压应力; σ_t 为混凝土拉应力; f_c 为混凝土设计抗压强度; f_t 为混凝土设计抗拉强度。

2. 钢筋锈蚀

钢筋锈蚀损毁是钢筋混凝土结构面临的重大灾害。钢筋混凝土结构的各种病害和致裂机理的最后阶段都将归结到钢筋锈蚀，直至结构损毁。

钢筋锈蚀分为以下三个阶段：

第一阶段是钝化锈蚀。在钢筋表面形成一层黄色氧化铁薄膜，这层薄膜像人身上的一层贴身内衣，对钢筋具有保护作用，对钢筋与混凝土之间的咬合力、黏着力和摩擦力等综合力（握裹力）具有强化作用。因此，认为钝化锈蚀有益而无害。

第二阶段是脱钝锈蚀。当侵蚀钢筋的水分、氧气、二氧化碳和氯离子等的强度进一步扩大后，会将钝化膜击破，直接侵蚀钢筋，进入脱钝锈蚀阶段，在钢筋表面形成一层厚实的氧化铁粉末。氧化铁粉末质地酥松，体积膨胀，构成一圈圈锈皮，具有很强的径向挤压力。

第三阶段是胀裂锈蚀。持续锈蚀膨胀的后果是将混凝土保护层顺筋挤胀崩落，不仅大大损失了钢筋的受力断面，而且还会导致钢筋材质脆化，受拉强度衰减。最严重的是要将混凝土保护层崩落，使钢筋和混凝土之间的黏着力全部丧失，从而丧失了钢筋与混凝土两者互相支持、共同工作的唯一支撑点，承载能力全部丧失，使结构彻底损毁。

钢筋锈蚀是与工程所处的环境条件密切相关的。所谓恶劣环境条件是指空气潮湿，空气中氯离子富集，二氧化碳浓度高，尤其是一些直接受氯离子侵蚀的环境。例如，直接受海水和潮汐威胁的海港码头、堤坝工程，生产或使用氯盐的车间、直接使用氯盐防冻的桥面和路面等结构，以及利用海沙代替河沙浇筑混凝土的工程，受到的威胁最大。更加严重的是盐渍土地区的钢筋混凝土结构，例如在格尔木化肥厂，工程还没有正式投入使用，就有钢筋严重锈蚀，需要加固，甚至要报废的情况发生。据报道，对于先行一步的发达国家来说，钢筋混凝土结构的钢筋锈蚀已成了国家和社会的重要问题之一，以美国为例，共有桥梁约 60 万座，