

Maintenance Engineering for Concrete Structures

混凝土结构 维护管理工程学

吴智深 戴建国 万春风 编著

安全·耐久·健康



科学出版社

混凝土结构维护管理工程学

吴智深 戴建国 万春风 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

当前世界上混凝土基础设施保有量巨大,建造和维护费用高昂,对混凝土结构进行合理的维护管理是当代土建交通领域所面临的一个最为紧迫而重要的任务之一。相对于比较成熟的结构设计和建造,工程结构维护管理的理论、方法和技术体系尚处于发展阶段,迫切需要建立比较规范和完善的维护管理工程科学技术体系,以指导我国大规模基础设施的维护管理实践。本书根据国内外的动态,对大量前沿的研究和实践工作以及维护管理的新理念、新方法进行总结提炼,探索建立混凝土结构维护管理工程学体系,对其理论构架、技术体系与方法以及工程维护管理系统的构建示范等方面作了比较全面的介绍。本书对混凝土结构的维护管理研究、教育与实践具有重要的指导意义,对推动我国工程结构的维护管理学科的发展亦具有积极的作用。

本书可作为大专院校土建、交通、工程防灾减灾等专业本科生和研究生教育的教材或参考用书,亦可作为混凝土结构工程领域的研究、技术、管理人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土结构维护管理工程学 / 吴智深, 戴建国, 万春风编著. —北京: 科学出版社, 2016.10

ISBN 978-7-03-046061-5

I. ①混… II. ①吴… ②戴… ③万… III. ①混凝土结构—修缮加固—高等学校—教学参考资料 IV. ①TU370.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 249629 号

责任编辑: 胡 凯 李涪汁 丁丽丽/责任校对: 张怡君

责任印制: 张 倩/封面设计: 许 瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年10月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016年10月第一次印刷 印张: 24

字数: 569 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



序 言

对于土木工程结构,目前人们更多关注的是其规划、设计与建造,而对于工程结构建成后的维护管理却重视不足。随着社会及经济的发展,这种重建设、轻管养的意识已逐渐给土木工程结构乃至社会、经济、环境的可持续发展带来了很大的问题和严重的限制。目前,我国混凝土基础设施及房屋等土木工程结构的保有量巨大,且结构的早期劣化与短命、安全保障不足、维护管理费用膨胀等问题已经初步呈现。欧、美、日等发达国家和地区的经验教训已经表明:在经济高速发展时期的大规模土木工程建设之后,必将面临工程结构维护管理费用需求急速膨胀但社会资金短缺的现象,从而制约社会经济的良性可持续发展。混凝土结构作为支撑土木工程建设最重要的结构形式,对其进行科学合理的维护管理、追求其生命周期成本最小化,已成为当代土建交通领域所面临的一个最紧迫的任务,也是当今社会和土木工程可持续发展的重要挑战。可以预见,在不久的将来,我国土木工程界最重要的任务不再是新结构的建设,而是既有结构的维护与管理。和发达国家一样,我国也将面临土木工程基础设施老龄化、建设资金匮乏等问题,因此有必要未雨绸缪,提前致力于建立工程结构维护管理工程科学体系,培养具有完备的工程结构维护管理知识的专业人才。目前在世界发达国家,工程结构的维护管理工程已成为一个重要学科方向并得到不断发展。

混凝土结构的维护管理从工程学角度涉及结构、材料、物理、化学、光电工程及信息通信工程等交叉学科,同时又涉及经济学、管理学等软科学。近年来,我国虽然在维护管理工程学的技术方面取得很多重要创新和进展,但距离混凝土结构全寿命维护管理科学体系的建立还有很长一段路要走。而且,由于我国还处于经济发展较为快速的阶段,广大工程技术及管理人员对导入“工程结构全寿命维护管理”的重要性和紧迫性的认识还未尽统一。但可以预见,我国大量混凝土结构将在不久的将来进入老龄化时代。而我国的土木工程建设规模巨大,建设资金的投入不可估量,对这些老龄化混凝土结构的大规模重建几乎不可能。作为支撑国民经济可持续发展的重要支柱,混凝土结构基础设施的长寿命化势在必行。如何针对这些混凝土结构建立科学、系统的全寿命维护管理,需要从体制、标准的精细化、专业人才培养、技术进步、基础设施信息化平台建设、工程维护管理产业化及资产化管理等多方面入手。

鉴于上述背景,我们着手编著了这本《混凝土结构维护管理工程学》,以工程学的高度在我国提倡建立工程结构维护管理科学体系及学科建设,以混凝土结构为例,系统介绍当今先进的工程全寿命维护管理理念和实践模式、结构检查/调查与病害诊断技术、结构劣化机理、结构性能评估以及相应的维修加固对策措施等内容。希望本书作为我国混凝土结构维护管理工程学方面的第一本书,能起到抛砖引玉的作用,并对推动我国工程结构维护管理工程学的发展、为我国土木基础设施的可持续发展贡献绵薄之力。

本书共分为9章,第1章主要介绍我国混凝土结构维护管理工程的现状及所面临的

挑战,第2章介绍混凝土结构维护管理工程学的基本原理,第3章到第7章分别介绍混凝土结构维护管理活动中的结构检查/调查、劣化机理及分析预测、性能评估与健康诊断、结构的维修与加固措施以及混凝土结构的解体与拆除等技术手段,第8章则针对桥隧结构介绍了维护管理的工程指南,最后在第9章对工程结构维护管理的发展提出展望并指出其发展方向。

本书在编写过程中,东南大学黄璜博士,温博、贺卫东等研究生在文献整理、图片制作、书稿校对等方面做了大量细致的工作,在此对他们的辛勤劳动表示感谢。

限于编者水平有限,书中难免存在很多缺陷,恳请各位读者批评指正。

编 者

2016年10月

目 录

序言

1 混凝土结构维护管理工程面临的挑战	1
1.1 土木工程建设对社会、经济和环境可持续发展的重要性	1
1.2 发达国家的历史经验和教训	4
1.3 我国土木工程面临的挑战	12
1.4 国内外混凝土结构维护管理技术和实践	17
1.4.1 混凝土结构的安全、耐久与健康	17
1.4.2 混凝土材料的高性能化	19
1.4.3 混凝土结构的检测、监测以及健康监测	25
1.4.4 混凝土结构的维修与加固	27
1.4.5 混凝土材料与结构的再生	28
1.4.6 混凝土结构的全寿命设计与维护管理	29
1.5 工程结构维护管理工程学的必要性	31
2 混凝土结构维护管理工程学的基本原理	33
2.1 引言	33
2.2 全寿命周期混凝土结构设计理念与维护管理	33
2.3 混凝土结构全寿命维护管理的目标	37
2.4 混凝土结构维护管理原则、流程及其要素	43
2.5 工程结构维护管理策略	46
2.6 混凝土结构的维护管理的信息化	49
2.6.1 信息化维护管理的特点	49
2.6.2 工程结构的信息化维护管理系统 (BMS、TMS)	51
2.6.3 路面管理系统 (PMS)	55
2.6.4 建筑信息模型 (BIM)	58
2.7 风险管理	60
2.7.1 工程风险	60
2.7.2 风险管理	62
2.7.3 风险识别	63
2.7.4 风险管理的基本流程	64
2.8 基础设施维护管理中的资产管理系统	65
2.9 智能结构与智慧基础设施	67
3 混凝土结构的检查/调查	71

3.1	引言	71
3.2	检查/调查类型	71
3.2.1	初期检查	74
3.2.2	周期性检查	74
3.2.3	详细检查	76
3.2.4	特殊检查	76
3.2.5	各类检查的作用	76
3.3	检查/调查方法	77
3.3.1	书面材料调查与存档	78
3.3.2	目测及手工调查	78
3.3.3	结构检测	80
3.3.4	结构实物加载和振动试验调查	114
3.3.5	基于机器人的检测技术	119
3.3.6	基于传感技术的结构健康监测	121
3.3.7	荷载与环境的作用	137
4	混凝土结构的劣化机理及分析预测	139
4.1	引言	139
4.2	钢筋混凝土结构的典型劣化症状及主要原因	140
4.2.1	初期缺陷	140
4.2.2	服役期间的损伤及劣化	142
4.3	钢筋混凝土结构的劣化机理判断和性能退化预测	143
4.3.1	概述	143
4.3.2	劣化机理的推定	145
4.3.3	混凝土碳化引起的劣化	146
4.3.4	盐害	149
4.3.5	冻融对混凝土结构的劣化破坏	152
4.3.6	化学腐蚀	154
4.3.7	碱骨料反应	156
4.3.8	表面磨耗破坏	159
4.3.9	钢筋混凝土桥面板的疲劳损伤	161
5	混凝土结构的性能评估与健康诊断	164
5.1	引言	164
5.2	结构性能评估的类型	164
5.3	结构的性能要求	166
5.4	混凝土结构的性能评估	168
5.4.1	结构性能评估的目的与需求	168
5.4.2	结构性能评估的内容与指标	169
5.4.3	结构性能评估层次	172

5.5	性能评价方法	178
5.5.1	根据结构表观进行性能评价	178
5.5.2	基于结构检算的性能评价	179
5.5.3	利用非线性有限元分析进行性能评价	181
5.5.4	结构性能的层次分析与分级方法	182
5.5.5	结构性能的可靠度分析方法	183
5.5.6	利用专家系统对结构进行性能评价	185
5.6	基于结构健康监测的性能评价	186
5.7	结构的健康诊断与预警	187
5.7.1	健康诊断及安全预警的方法与流程	187
5.7.2	基于监测数据的异常分析	187
5.7.3	基于监测数据推演的结构参数与损伤识别及性能评价	189
5.8	混凝土结构性能退化及剩余寿命预测	190
5.8.1	混凝土结构的性能退化	190
5.8.2	混凝土结构的剩余寿命预测	191
5.8.3	基于结构健康监测的寿命预测	191
5.9	结构的抗震性能及其评估	196
5.9.1	混凝土结构的抗震设计理念	196
5.9.2	混凝土结构抗震性能的退化	198
5.9.3	混凝土结构抗震性能评价方法	198
5.9.4	混凝土结构的震后性能快速评价	200
5.10	房屋建筑的安全及抗震鉴定	201
5.10.1	房屋建筑的鉴定必要性	201
5.10.2	房屋建筑的安全性鉴定	204
5.10.3	房屋建筑的抗震性能鉴定	209
5.10.4	房屋结构的震后性能水平评定	211
6	混凝土结构的修补加固措施	214
6.1	引言	214
6.2	混凝土结构修补技术	217
6.2.1	混凝土裂缝的修补方法	217
6.2.2	混凝土表面保护方法	218
6.2.3	电化学防腐技术	221
6.2.4	修补材料	224
6.2.5	修补效果的确认	226
6.3	混凝土结构加固技术	226
6.3.1	混凝土结构抗弯加固	227
6.3.2	混凝土结构抗剪加固	250
6.3.3	混凝土结构抗震加固	252

6.3.4	混凝土结构抗疲劳加固	261
6.3.5	混凝土结构抗脱落加固	262
6.3.6	混凝土结构更换与更新技术	265
6.3.7	其他混凝土结构加固	267
6.3.8	混凝土加固效果的评价	267
6.4	针对混凝土结构不同退化机理的修补加固对策	268
6.4.1	混凝土碳化的修补加固对策	268
6.4.2	混凝土盐害修补加固对策	269
6.4.3	混凝土碱骨料反应损伤修补加固对策	271
6.4.4	混凝土冻害修补加固对策	272
6.4.5	混凝土化学腐蚀修补加固对策	273
6.4.6	RC桥面板疲劳损伤的修补加固对策	274
6.4.7	混凝土表面磨耗修补加固对策	274
7	混凝土结构的解体与拆除	277
7.1	概述	277
7.2	拆解技术	279
7.2.1	沿革	279
7.2.2	机械冲击式拆除	281
7.2.3	膨胀破碎拆除法	282
7.2.4	切割式拆除	282
7.2.5	控制爆破拆除法	286
7.2.6	电子类加热拆除法	286
7.3	结构重建与构件更换	288
7.3.1	结构拆除	288
7.3.2	构件拆除更换	291
7.4	环境友好与资源再利用	292
7.4.1	废弃物分类	292
7.4.2	再利用技术	294
7.4.3	大气污染物处理	296
8	混凝土结构的维护管理工程指南	300
8.1	桥梁	300
8.1.1	桥梁的病害特点	300
8.1.2	桥梁维护管理系统	303
8.1.3	桥梁维护管理的技术要素	306
8.1.4	桥梁资产管理	322
8.2	隧道	330
8.2.1	隧道的病害	330
8.2.2	隧道管理系统	331

8.2.3 隧道的检查	331
8.2.4 隧道的性能评估	339
8.2.5 隧道的维护对策	345
8.2.6 隧道结构的健康监测实例	345
9 展望	359
9.1 引言	359
9.2 工程结构维护管理体制建立	359
9.3 维护管理标准的精细化及维护管理人才培养	360
9.4 基于大数据的高度信息化平台	361
9.5 资产管理知识的建立	362
9.6 混凝土结构维护管理产业的建立	363
9.7 智慧基础设施与智慧城市	364
参考文献	367

1 混凝土结构维护管理工程面临的挑战

1.1 土木工程建设对社会、经济和环境可持续发展的重要性

土木工程建设为人类提供了赖以生存的生活、生产以及社会活动的场所，是人类社会文明发展的基础。纵观人类发展的历史，土木工程既是人类生存和发展的结晶，又是人类生存与发展的不竭动力。土木工程是一个古老的学科，早在远古时代，由于居住和交往的需要，人类在不断的探索实践中进行所需的各种土木建设。从 17 世纪中叶开始，世界土木工程建设发生了质的飞跃，伽利略、牛顿以及欧拉等著名学者所阐述的力学理论与数学方法，开启了近代土木工程建设的先河。18 世纪下半叶，瓦特改进了蒸汽机，推进了工业革命，1824 年波特兰水泥的发明和 1856 年转炉炼钢的成功应用为近代土木工程提供了坚实的物质基础。1825 年英国采用盾构技术开凿了泰晤士河底隧道；1886 年美国芝加哥建成了被誉为现代高层建筑开端的 10 层保险公司大厦；1889 年法国巴黎建成了高 300 米的埃菲尔铁塔。欧美等发达国家和地区近代的土木工程建设的速度空前，而我国由于清朝实行闭关锁国政策，近代土木工程发展进程缓慢，直至清末洋务运动出现，才开始引进一些西方先进技术，到 1911 年辛亥革命结束，我国铁路总里程约为 9100 公里。第二次世界大战结束后，社会生产力出现了新的飞跃，现代科学技术突飞猛进，各国土木工程进入一个新的发展时代。1949 年新中国成立后，我国经历了国民经济恢复时期和规模空前的经济建设时期。1965 年全国公路通车里程达 80 万公里，是解放初期的 10 倍；铁路通车里程超过 5 万公里，是 20 世纪 50 年代初的 2 倍多。改革开放以后，我国工业化及城镇化进程不断加快，土木工程行业发展迅猛，1979~1982 年全国完成了 3.1 亿平方米的住宅建设，城市给水普及率达 80% 以上；各地高速公路开始兴建，铁路电气化开始实现，多层及高层建筑不断建成，各种新材料、新结构、新施工技术不断涌现，标志着我国土木工程开始了现代化进程^[1]。

土木工程建设领域就业容量大，截至 2014 年年底，我国全社会的就业人员总数约 7.7 亿，其中，土木行业从业人数达 5000 万，比 2013 年增加了约 430 万人，占全社会就业人数的 6.5%；同时，土木工程领域与其他产业关联度很高，当今社会固定资产投资总额的 50% 以上均需通过土木工程行业来转化成新的生产能力和使用价值^[2]。当前，我国基础设施建设规模空前，每年新增建筑面积超过 20 亿平方米，占世界的一半以上，在国民经济的五大物质生产部门中，土木建筑行业年产值仅低于工业和农业，位居第三位，超过了运输业和商业。可见，土木工程建设对我国当今社会经济发展起着重要支撑作用。

土木工程建设对国民经济贡献突出。2004~2014 年的十年间，我国国内生产总值（GDP）由 160 714 亿元增加到 636 462 亿元^[2]，其中，土木建筑业的贡献由 8 694 亿元增加到 44 724 亿元，占 GDP 的比重稳定在 5%~7%（如图 1.1），成为拉动国民经济发展的重要力量。近十年来，我国固定资产投资从 2004 年的 58 620 亿元增加到 2014 年的

512 760 亿元，年复合增长 21.8%。同期，土木建筑行业总产值由 2004 年的 27 745 亿元增加到 2014 年的 176 713 亿元，年复合增长 18.3%，其中房屋建筑工程对总产值的贡献率最为突出。以 2014 年为例，房屋建筑工程对土木建筑行业总产值的贡献率达到 69%^[3]（如图 1.2）。

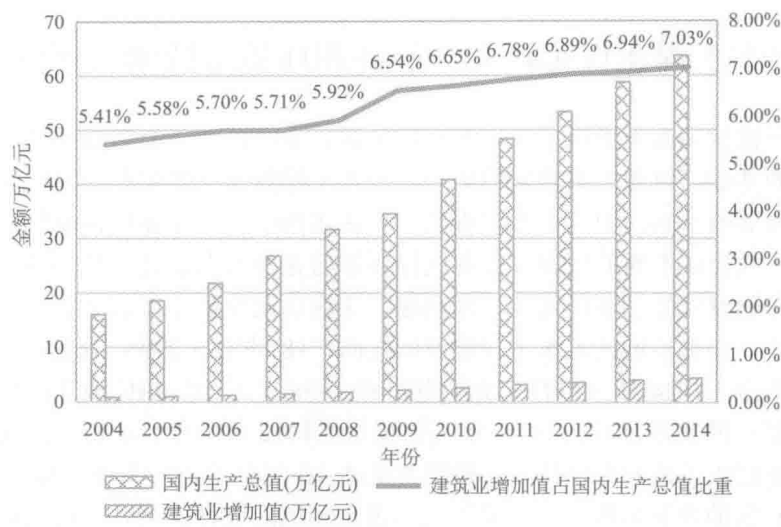


图 1.1 2004~2014 年土木建筑行业在国内生产总值中的比重（数据来自国家统计局）

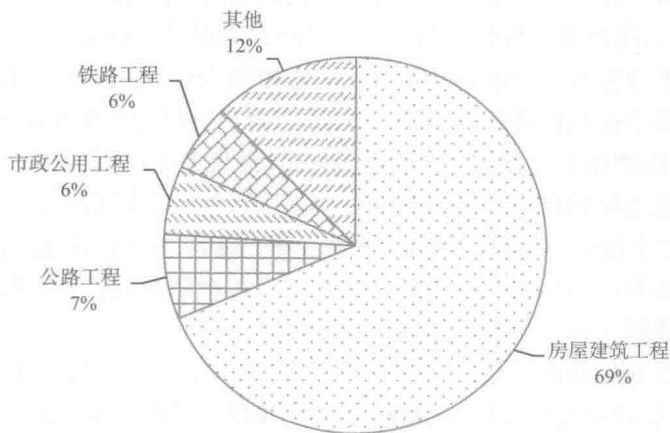


图 1.2 2014 年我国土木建筑行业总产值构成（数据来自《2014 年建筑业发展统计分析》）

混凝土结构作为土木建筑行业中最重要结构形式，占我国土木工程建设总量的 90%以上。继 1824 年波特兰水泥的发明后，法国 Lambot 于 1848 年制造了第一艘钢筋混凝土船；1861~1867 年，法国 Monier 获得了钢筋混凝土梁、板和管的多项专利；1872 年，世界第一座钢筋混凝土结构建筑在美国纽约落成，标志着混凝土结构时代的来临；1886 年德国 Koenen 发表了混凝土结构理论和设计的第一本书稿，从此混凝土结构得到迅速推广应用^[4]。混凝土结构包括素混凝土结构、钢筋混凝土结构以及预应力混凝土结

构。混凝土结构的大规模应用带动了钢铁、水泥等建筑材料产业的蓬勃发展。国家统计局数据显示,在土木工程行业蓬勃发展的近十年,我国建筑材料产量增速惊人。如图 1.3 所示,我国水泥产量从 2004 年的 9.67 亿吨增长到 2014 年的 24.76 亿吨,增长了 1.5 倍;而钢筋产量从 2004 年的 0.67 亿吨增长到 2014 年的 2.15 亿吨,增长了 2 倍多。

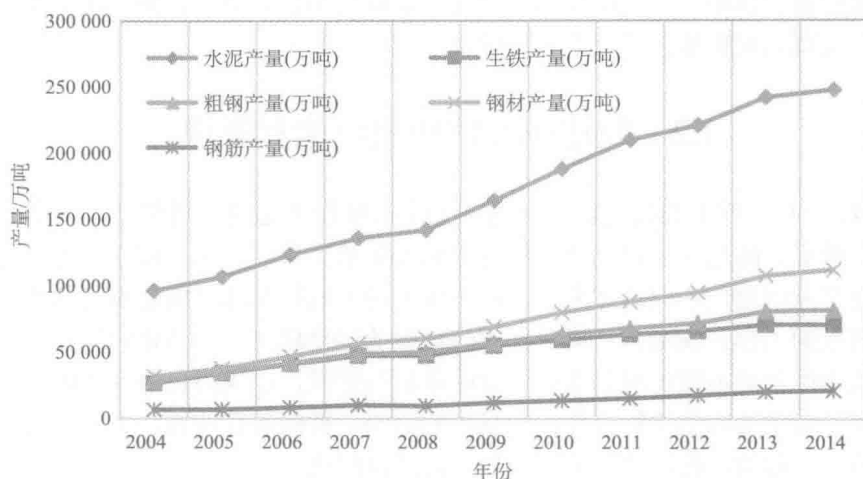


图 1.3 2004~2014 年我国水泥及钢铁建筑材料产量 (数据来自国家统计局)

社会经济的发展和国家城镇化、工业化的进程相辅相成、相互促进。为早日进入发达国家行列,我国制定了加快城镇化和城市发展的战略,大力发展基础设施建设即是其中一项重要内容。2012 年中国城市发展报告^[5]显示,1949 年我国只有 132 个城市,城镇化水平仅为 10.6%,截至 2012 年年末,全国共有设市城市 658 个,建制镇数量增加至 19 881 个,城镇化水平已达 52.57%,超过一半的人口居住在城镇,标志着我国社会形态由乡村型转变为城市型。预计到 2050 年,将有 75%以上的人口居住在城市。未来几十年,随着城镇化的进一步深化,西部大开发、中部崛起、海洋强国等计划的实施,以及京津冀协同发展、长江经济带国家区域发展战略和“一带一路”国际发展战略的强劲推进,我国对混凝土结构的需求仍将继续增长,同时这也将为我国土木工程建设领域提供诸多的机遇与挑战。

迄今为止,我国的土木工程建设取得了世界瞩目的成绩,其在国民经济中的地位与作用凸显,对经济社会的快速发展起到了巨大作用,但同时也带来了一些环境与生态方面的问题,给社会的可持续发展带来挑战。实现社会的可持续发展是当前国际社会的共识,由于土木工程在社会经济发展中的特殊地位与作用,提倡在其全生命周期内贯穿可持续发展的理念具有十分重要的战略意义。可持续发展最有效的手段就是减少能源和资源的消耗。据统计,社会能源的 40%消耗在建筑物中,30%消耗在交通工程中。目前,我国每年新建建筑消耗的水泥和钢筋总量已占据全世界的 40%,但同时我国每年拆毁的旧建筑占建筑总量的 40%,由于我国建筑结构的短命,每年产生约 15.5~24 亿吨建筑垃圾,占城市垃圾总量的 30%~40%,社会资源的消耗和浪费问题非常严重,是不可持续的发展模式。随着社会的发展,这种粗放的发展模式呈现的缺点越来越明显并逐渐被人们

摒弃,建设“资源节约型”和“环境友好型”社会已成为当今社会的主流理念。因此,在土木工程的设计、建设、使用及维护管理中,应尽量寻求节约能源的方案,更多地利用风能、太阳能等再生能源,提倡应用可促进生态系统良性循环、减少环境污染、高效、节能、节水的建筑技术与材料以及建筑垃圾废料的再生利用,大力发展绿色建筑,并建立相应的维护管理体系,实现结构的高性能、高耐久和长寿命化,为实现土木工程的可持续发展,实现低碳化社会提供有力支撑。

1.2 发达国家的历史经验和教训

20 世纪中叶是欧美等发达国家和地区土木基础设施建设的繁荣期,各类房屋及公路、铁路、桥梁、隧道等土木交通设施建设如火如荼。目前土木工程在西方发达国家中仍处于关键产业的地位,但总体来说,西方国家的大规模基础设施建设已基本完成,而原先建成服役的大部分混凝土结构存在不同程度的劣化现象,老朽化问题日益突出,在有限的财政力度预算范围内对其进行合理的维护与管理,已成为目前发达国家土木工程建设的重点。对于结构的维护管理,在我国的道路、桥隧等行业内,也常称之为养护管理,本书为统一称谓,使用“维护管理”一词进行阐述。

1950 至 1960 年是美国基础设施建设的黄金时期,当时以发展汽车交通为标志的基础设施建设进入迅速发展时期。图 1.4 是美国桥梁每年的新建数量,可以看出,美国桥梁自 20 世纪 20 年代便开始了较大规模的建设,60 年代左右达到顶峰,随后建设速度略有下降,但仍保持着较大的建设规模^[6]。但同时可以看出,美国 20 世纪 20~30 年代间建造的桥梁,到 80 年代,其服役时间便超过了 50 年,进入了老化期。目前,美国桥梁整体上已进入老龄化时期,服役年龄超过 50 年的桥梁超过 60 万座,每年需投入超过 170 亿美元的巨额维护管理费用,而政府的年预算只有 150 亿美元左右,财政缺口很大。

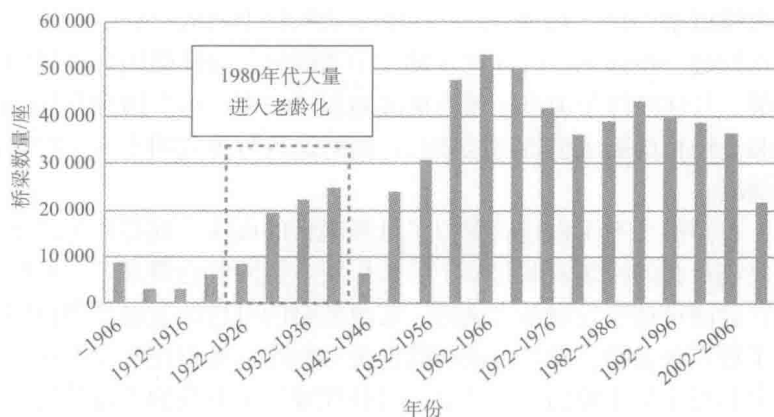


图 1.4 美国桥梁每年新建数量

美国桥梁的老龄化致使事故频发。1967 年 12 月 15 日西弗吉尼亚州的 Silver 桥发生了塌桥事故,造成 46 人死亡,付出了沉重的代价。美国联邦高速公路总署(Federal Highway Administration, FHWA)于 2011 年公布的桥梁检查统计报告显示^[7],

美国已有超过 20 万座桥梁存在病害或者承载力不足的问题, 约占桥梁总数的 34% (如图 1.5)。且随着桥梁的不断建设, 病害桥梁的数量不断积累增长 (如图 1.6)。美国土木工程师协会 (ASCE) 指出, 在未来 20 年, 美国对有缺陷的桥梁进行维修加固的费用将超 1800 亿美元。为了应对这种情况, 美国 FHWA 于 2005 年提出和启动了桥梁长期性能项目 (long-term bridge performance program, LTBP), LTBP 项目是一个持续至少 20 年的长期项目, 旨在通过收集全美高速公路桥梁的高质量桥梁数据, 促进人们对桥梁劣化与长期性能状况的认识和理解, 实现桥梁的合理优化及长寿命化管理。

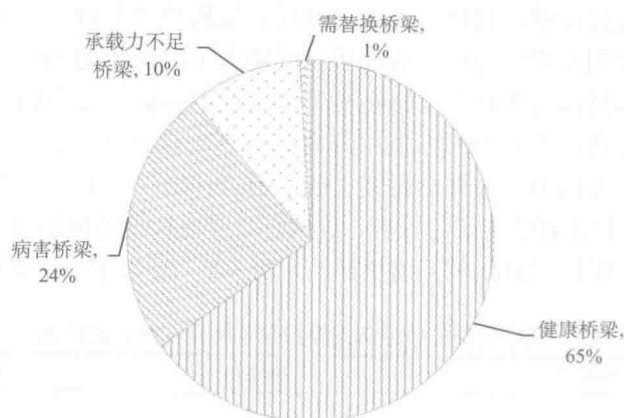


图 1.5 美国 2011 年桥梁检查统计数据

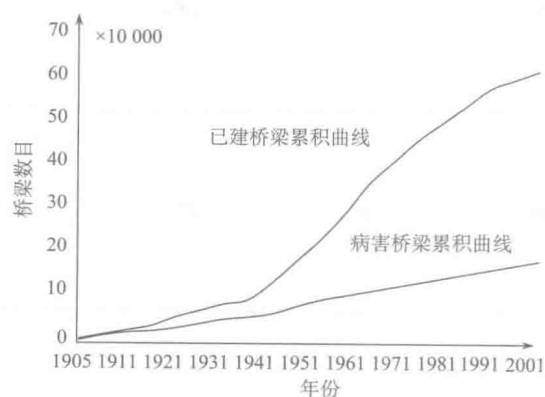


图 1.6 美国病害桥梁的累积情况

欧洲桥梁管理 (BRIME) 项目的统计表明, 目前欧洲也有接近 8.4 万座混凝土桥梁需要维修与加固。表 1.1 是欧洲几个国家的桥梁和国道的情况, 可见大多数国家的桥梁与国道的缺陷率超过 30%。欧洲各国每年用于桥梁维护的费用占所有桥梁重建费用的 0.5%~1.0%。在德国, 由政府委任的委员会经调查研究后指出, 德国在今后的 15 年里, 每年需斥资 72 亿欧元来逐步翻新基础设施, 比现有的预算要多出 70%。2014 年 2 月, 德国《图片报》与《明镜》周刊则报道了德国经济研究所 (IW) 关于德国基础设施的最新调查研究。结果显示: 德国的社会基础设施整体上存在着比较严重的结构劣化、老化和年久失修的问题, 而其中土木基础设施占了很大的比重。据推测, 德国如想保持地区

优势和竞争力，政府则需要在未来 10 年间投入 1200 亿欧元（约合人民币 9975 亿元）的资金用于基础设施的维护管理。英国苏格兰地区 2014 年对其主干道上的结构物（主要是桥梁）的检查和监测结果表明，其结构的主要承载构件的状态只有 61%是比较完好的，状态为差和很差的则占 18%，每年在结构维护和加固上的投资需达 2500 万英镑（如图 1.7）。

同样，欧洲为应对其基础设施劣化的困境及维护活动所带来的社会经济压力，早在 2003 年 12 月份，便针对铁路桥启动了“可持续桥梁——为将来交通需求及结构长寿命的评估”（sustainable bridges-assessment for future traffic demands and longer lives）项目，项目为期 4 年，旨在提高欧洲铁路运输能力及延长结构使用寿命。具体目标包括：（1）提高现有结构在货运列车常速运行下的轴重承受能力（最高到 33 吨），以及提高轻量客运列车的运行速度（最高为 350 公里每小时），实现运输能力提升的目的；（2）提高既有结构的剩余使用寿命，增加 25%的使用寿命；（3）增强管理、加固及维修等系统的能力。随后，欧盟进一步提出了长寿命桥梁（long life bridge）项目，旨在运用先进的结构分析技术，对结构进行必要的维护与管理，达到延长既有桥梁的使用寿命。此项目在欧盟第七框架研究计划资助下于 2011 年开始执行，为期 3 年，研发重点主要包括桥梁荷载与动

表 1.1 欧盟各国的桥梁与国道数量及其存在病害的比例^[8]

国家	估计桥梁数	国家公路数	缺损所占百分比	退化的主要原因
法国	233 500	21 500	39%	混凝土侵蚀 约束不充分 预应力钢丝锈蚀 防水不充分 保温不充分 碱骨料反应
德国	80 000	34 800	37%	混凝土侵蚀 设计/建造失误 节点、约束错误 荷载过大 车辆荷载 火灾、洪水
挪威	21 500	9 173	26%	混凝土侵蚀 冻融破坏 碱骨料反应 涂料劣化 钢筋锈蚀 使用海水拌合 海水冲刷地基
斯洛文尼亚	—	1 762	—	混凝土侵蚀 预应力钢丝锈蚀 钢筋锈蚀 防水不充分 桥墩锈蚀 冻融破坏 节点缺陷

续表

国家	估计桥梁数	国家公路数	缺损所占百分比	退化的主要原因
西班牙	—	12 380	—	混凝土侵蚀 钢筋锈蚀 防水不充分 节点缺陷 车流量较大一侧的冲击
英国	155 000	10 987	30%	混凝土侵蚀 预应力钢丝锈蚀 冲击破坏 收缩裂缝 冻融破坏 碱骨料反应 混凝土碳化

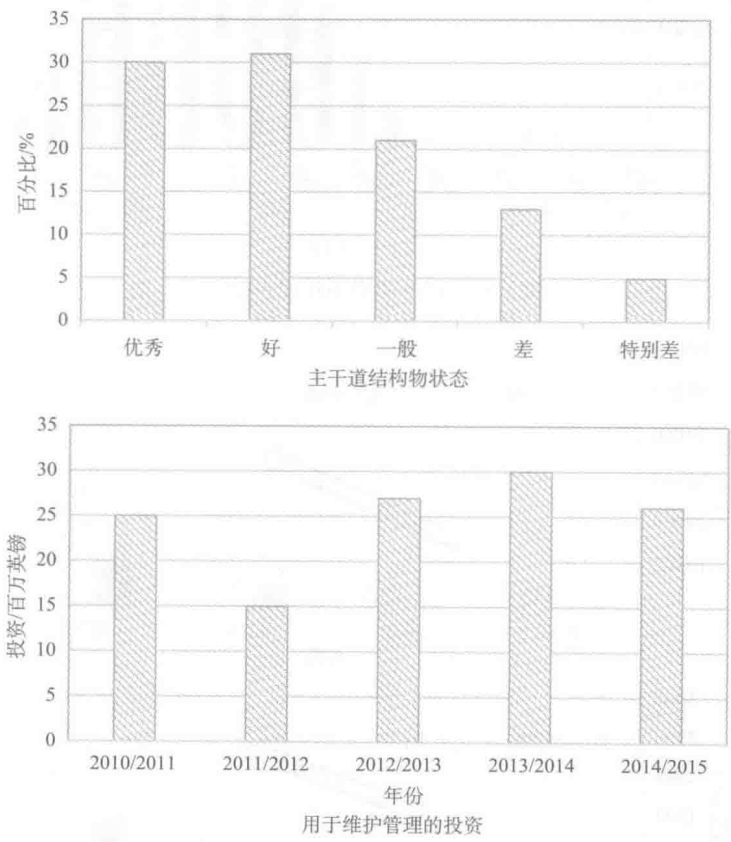


图 1.7 英国苏格兰地区桥梁状态与维护投资情况^[9]

力特性、桥梁全寿命评估与疲劳评估 3 个方面。其研发目标是：（1）对更多公路与铁路桥梁进行检查分析，确认其处于安全状态；（2）提高非高速铁路的运行速度；（3）减少对非再生资源或高碳排放资源的需求；（4）降低成本。针对未来，欧盟也提出了“欧洲