大跨度PK宽箱混合梁斜拉桥设计与施工关键技术

赵　健　周冠南　樊立龙　主　编
李春江　张广涛　刘海国　副主编

清华大学出版社

清華大學出版社
北京

内 容 简 介

本书结合世界第七大跨度混合梁斜拉桥——石首长江公路大桥的建设实践，基于大跨度PK宽箱混合梁斜拉桥开展的科研攻关与技术创新成果，系统深入地阐述混合梁斜拉桥设计与质量控制关键技术。本书内容包括绪论、空间结构数值模拟计算方法、PK断面混凝土箱梁施工阶段结构力学性能及破坏机制分析、PK箱梁混凝土配合比设计与质量控制研究、PK箱梁混凝土温度控制研究、大跨度混合梁斜拉桥边跨主梁节段预制拼装关键技术、大跨度混合梁斜拉桥非对称施工阶段结构受力行为分析、大跨度混合梁斜拉桥主梁总体施工方案优化设计、索塔锚固结合部技术研究。

本书可供从事桥梁设计、施工、监理、建设管理人员学习借鉴，特别针对大跨度混合梁斜拉桥建造的工程技术人员具有指导和启发作用，同时也可为桥梁工程相关技术领域科研院所研究人员参考使用。

版权所有，侵权必究。举报：010-62782989，beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

大跨度PK宽箱混合梁斜拉桥设计与施工关键技术/赵健，周冠南，樊立龙主编. —北京：清华大学出版社，2023.5

ISBN 978-7-302-62838-5

Ⅰ. ①大… Ⅱ. ①赵… ②周… ③樊… Ⅲ. ①长跨桥—箱梁桥—斜拉桥—桥梁设计 ②长跨桥—箱梁桥—斜拉桥—桥梁施工 Ⅳ. ①U448.43

中国国家版本馆CIP数据核字(2023)第035282号

责任编辑：王向珍　王　华
封面设计：陈国熙
责任校对：赵丽敏
责任印制：丛怀宇

出版发行：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦A座　　**邮　　编**：100084
社 总 机：010-83470000　　**邮　　购**：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
印 装 者：三河市龙大印装有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：185mm×260mm　　**印　　张**：12　　**字　　数**：288千字
版　　次：2023年6月第1版　　**印　　次**：2023年6月第1次印刷
定　　价：88.00元

产品编号：095450-01

清华大学出版社

编 委 会

名誉主编：王元清

主　　编：赵　健　周冠南　樊立龙

副 主 编：李春江　张广涛　刘海国

编　　委：（按姓氏拼音排序）

安路明　蔡维栋　陈　港　高　伟　霍艳雷　李福友

连延金　林凤国　刘　涛　刘长辉　刘春成　刘明虎

刘银涛　马　驰　孟令凯　彭志川　任延龙　沙权贤

石金刚　孙长志　孙宏伟　田　亮　拓明阳　王　雷

王　伟　王　正　王保良　王方旭　王伟亮　王文强

吴小雨　杨梦纯　于浩业　张　庆　张海顺　张家元

张培炎　张鹏志　张壮壮　赵　远　赵多苍　朱林达

朱永盛

清华大学出版社

清华大学出版社

序言

自2014年中铁十三局改制为中国铁建大桥工程局集团有限公司(简称中铁建大桥局)后,先后承接了多项技术难度大、科技含量高的桥梁工程项目。多年来,中铁建大桥局开创了10多项世界之“最”和20多项中国之“最”,实现了“十七跨黄河”“十一跨长江”“十三跨海湾”“四跨乌江”“四跨松花江”,树立了一座座桥梁丰碑。

中铁建大桥局承建的桥梁有:我国首座公铁两用跨海大桥——平潭海峡公铁两用大桥,世界最大跨度自锚式悬索桥——重庆鹅公岩轨道大桥(2019年),世界顶推距离最长、顶推重量最重的连续钢桁梁桥——三门峡黄河公铁两用大桥(2018年),世界最大跨度的三主桁钢桁拱桥——广州明珠湾大桥,棋盘洲、石首、武穴等长江公路大桥(跨度均在我国位居前列)。

截至2021年,中铁建大桥局已建成的最大跨度斜拉桥为主跨820m石首长江公路大桥,该桥是目前世界第七大跨度混合梁斜拉桥,同时是国内首座实现主梁全部采用装配式建造的混合梁斜拉桥,除钢箱梁采用工厂预制拼装外,PK混凝土箱梁采用桥位短线法节段预制拼装施工工艺,将大桥宽38.5m主梁线形±10mm的控制标准提高到了±2mm,高于国内外同类桥梁标准,实现了大跨度混合梁斜拉桥现代化、标准化的装配式建造。该项技术是赵健在从事博士后研究工作期间联合集团设计研究院与第一工程有限公司技术人员共同研发的,该工艺的成功应用对混合梁斜拉桥PK混凝土箱梁防裂控制及线形质量控制效果显著。

赵健于2018年在其发表的《石首长江公路大桥北边跨施工关键技术》中,对“桥位短线法”与“节段预制胶拼”施工技术以及空间预应力数值模拟等研究工作进行了详细描述,在此期间该技术已成功应用到石首长江公路大桥等项目中,取得了良好的效果。据此,后经深入研究、试验分析及理论知识完善,最终将此技术设计与施工关键技术整理成书出版。

目前,中国是世界基建规模最大、建设速度最快的国家。中国铁建是国家基础建设队伍的“铁军”,我们不仅要继承铁道兵精神,“逢山开路,遇水架桥”,还要在土木工程技术快速发展的年代提出更高要求。近些年,我国的长大桥梁发展迅速,如世界跨度最大的斜拉-悬索协作体系桥梁——西堠门公铁两用跨海大桥,世界跨度最大的公铁两用混合梁斜拉桥——桃夭门公铁两用跨海大桥,世界上最大跨度高低塔公铁两用同层斜拉桥——富翅门公铁两用跨海大桥等相继建成。这些新型桥梁结构的出现将奠定中国在世界桥梁大国的地位,我们作为中国铁建的专业建桥队伍,将不负使命,勇于创新,为我国桥梁的建设与技术发展继续贡献力量。

中国铁建股份有限公司

首席专家、总工程师:

2021年12月1日　北京

清华大学出版社

清华大学出版社

前言

尽管近 20 年 PK 箱梁在我国混合梁公路斜拉桥的建设中被广泛运用，但是关于 PK 箱梁的研究相对滞后，许多工程师和技术人员依然对该梁型结构的力学性能及施工方法理解不够深入，由现有施工技术的局限性造成混合梁斜拉桥的边跨主梁结构质量及线形无法保障达到设计标准，在修建完成后又因运输量大，重型荷载长期作用在边跨主梁上，以及温度变化、混凝土自身引起的收缩、徐变等，最终导致边跨混凝土主梁在桥梁建成服役后比主跨钢梁提前进入“损伤状态”，并引起一系列负面影响。“损伤状态”会直接通过拉索系统传递到主塔，再由拉索和钢混结合段直接传递到钢主梁，致使整个结构运营状态发生变化，严重影响斜拉桥的服役年限。有分析表明：由施工技术引起的质量问题导致后续的结构耐久性下降的案例屡见不鲜，所以桥塔锚固区与 PK 断面混凝土箱梁防裂控制是保障混合梁斜拉桥服役年限的关键，同时也是目前迫切需要解决的技术问题。

本书共分九章，详细讨论了大跨度混合梁斜拉桥设计与施工的关键技术，并通过实际工程进行验证。第 1 章简述大跨度混合梁斜拉桥研究内容与迫切需要解决的问题；第 2 章利用 MIDAS FEA 软件建立混凝土箱梁节段的精细化有限元模型，提出一种“基于空间预应力结构的数值模拟计算方法”，以提高 PK 箱梁节段预制、胶拼施工过程的数值模拟计算精度。第 3 章通过建立 PK 箱梁节段精细化有限元模型，研究箱梁结构的力学性能及破坏机制，分析箱梁节段在施工过程中“剪力滞效应”。第 4 章对 C55 高性能混凝土进行基本性能试验、早期抗裂性试验、收缩徐变试验、耐久性试验，并采用扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）对混凝土微观结构进行分析。第 5 章研究混凝土温控措施，制定了 PK 箱梁大体积混凝土温控防裂评价标准，根据计算结果确定了夏季温控措施。第 6 章总结大跨度混合梁斜拉桥 PK 箱梁施工关键技术，并对关键技术成果应用进行了评价。第 7 章采用精细化数值模拟技术，建立一种混合梁斜拉桥非对称施工阶段的四维多尺度有限元模型，从而提高了混合梁非对称施工过程模拟计算的精度。第 8 章对大跨度混合梁斜拉桥边跨主梁进行总体施工方案设计和优化，设计一套完整的“桥位短线法”节段预制、拼装的施工方案。第 9 章通过对锚固区抗裂性能展开研究，提出了可用于结合部连接件剪力计算的连续弹性介质层法，形成了钢锚梁式组合索塔锚固结构的设计方法。

本书通过系统研究大跨度混合梁斜拉桥设计与施工关键技术，并应用到石首长江公路大桥等工程，解决了 PK 箱梁与索塔锚固区结构防裂的技术难题，通过科研攻关与工程实践验证了此技术应用效果良好。

清华大学出版社

本书中关于大跨度混合梁斜拉桥设计与施工关键技术研究内容是我在清华大学与中国铁建大桥工程局集团从事博士后科研工作的主要内容，该研究中始终得到了王元清教授、周冠南总工程师的悉心指导，本书在撰写过程中也得到了行业专家与同事们的大力帮助，在此一并感谢。

赵　健

2021 年 11 月 21 日　天津

清华大学出版社

目录

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　项目背景 …… 1

1.2　石首长江公路大桥工程概述 …… 2

1.3　项目主要研究内容 …… 5

1.4　项目研究过程概述 …… 6

1.5　项目总体技术性能指标 …… 6

1.6　项目创新点和取得的突破 …… 8

1.7　项目研究成果的推广应用条件和应用前景 …… 9

1.8　存在问题及工作设想 …… 10

第 2 章　空间结构数值模拟计算方法 …… 11

2.1　概述 …… 11

2.2　PK 断面混凝土箱梁结构 …… 11

2.2.1　PK 断面混凝土箱梁的结构特点 …… 11

2.2.2　预应力钢束类型 …… 12

2.3　PK 断面混凝土箱梁空间结构建模方法 …… 13

2.3.1　有限元模型单元选择 …… 13

2.3.2　非线性材料本构模型 …… 14

2.3.3　混凝土裂缝模型 …… 15

2.4　空间预应力建模方法 …… 16

2.5　计算实例 …… 17

2.5.1　主桥总体布置 …… 17

2.5.2　主梁断面形式 …… 17

2.5.3　预应力钢束 …… 17

2.6　有限元模型 …… 18

2.6.1　PK 断面混凝土箱梁结构模型 …… 18

2.6.2　预应力钢束模型 …… 19

2.6.3　材料参数 …… 20

2.6.4　计算假定 …… 20

2.6.5　边界条件 …… 21

2.7　计算结果分析 …… 21

清华大学出版社

2.8 空间预应力影响效果分析…… 25
2.8.1 对比区域选择…… 25
2.8.2 结构应力状态分析…… 27
2.8.3 结构变形状态分析…… 30
2.9 实测结果对比…… 31
2.10 结论 …… 32

第 3 章 PK 断面混凝土箱梁施工阶段结构力学性能及破坏机制分析 …… 33

3.1 概述…… 33
3.2 剪力滞效应的简化计算方法…… 34
3.3 PK 断面混凝土箱梁剪力滞效应机制 …… 35
3.4 研究主体概况…… 35
3.5 数值模拟分析…… 35
3.5.1 有限元模型…… 35
3.5.2 参数选取…… 35
3.5.3 计算工况…… 36
3.6 现场实测与模型精度验证…… 36
3.7 剪力滞计算结果分析…… 37
3.8 PK 断面混凝土箱梁早期收缩、徐变效应分析 …… 39
3.8.1 结构开裂现场调研…… 39
3.8.2 收缩、徐变计算的参数取值 …… 40
3.8.3 梁段预制期间的收缩、徐变计算结果 …… 41
3.8.4 收缩、徐变对箱梁预应力损耗的影响 …… 43
3.9 结论…… 43

第 4 章 PK 箱梁混凝土配合比设计与质量控制研究 …… 45

4.1 混凝土箱梁节段预制施工技术重难点…… 45
4.2 高性能混凝土配合比设计目标、流程与思路 …… 46
4.2.1 配合比设计指标…… 46
4.2.2 配合比设计流程…… 47
4.2.3 配合比设计思路…… 47
4.3 PK 箱梁 C55 高性能混凝土配合比优化设计 …… 48
4.3.1 试验材料…… 48
4.3.2 试验方法…… 50
4.4 混凝土配合比设计与基本性能试验…… 52
4.4.1 P·O 42.5 水泥试配的混凝土…… 52
4.4.2 采用 P·O 52.5 水泥试配的混凝土 …… 53
4.4.3 初步优选的混凝土配合比复盘验证…… 54
4.4.4 初步优选的混凝土配合比蒸汽养护强度试验…… 55

清华大学出版社

4.5 混凝土绝热温升测定与早期抗裂性试验…… 56
4.5.1 绝热温升…… 56
4.5.2 早期抗裂性…… 56
4.6 混凝土收缩与徐变试验…… 57
4.6.1 干燥收缩…… 57
4.6.2 徐变…… 58
4.7 混凝土耐久性试验…… 60
4.7.1 抗氯离子渗透性(电通量法)和抗碳化法…… 60
4.7.2 抗硫酸盐侵蚀性能…… 60
4.7.3 抗冻性…… 61
4.8 混凝土微观结构分析…… 62
4.8.1 水泥-粉煤灰-矿粉复合胶凝浆体的化学结合水 …… 62
4.8.2 水泥-粉煤灰-矿粉复合胶凝浆体水化产物物相 XRD 分析 …… 63
4.8.3 水泥-粉煤灰-矿粉复合胶凝浆体微观结构 SEM 分析 …… 64
4.9 北边跨箱梁混凝土施工质量控制技术要点…… 66
4.9.1 混凝土原材料主控指标…… 66
4.9.2 混凝土拌和生产与运输…… 67
4.9.3 混凝土浇筑质量控制…… 68
4.10 混凝土养护及拆模 …… 69
4.10.1 混凝土自然养护 …… 69
4.10.2 混凝土蒸汽养护 …… 70
4.10.3 混凝土拆模 …… 70
4.11 混凝土温控防裂措施 …… 70
4.12 预应力张拉工序分析 …… 71
4.13 结束语 …… 71

第 5 章 PK 箱梁混凝土温度控制研究 …… 73

5.1 概述…… 73
5.1.1 工程概况…… 73
5.1.2 抗裂重点及难点…… 73
5.1.3 抗裂安全性评价标准…… 73
5.1.4 应力评价标准…… 75
5.2 A 型梁仿真计算 …… 75
5.2.1 仿真计算资料…… 75
5.2.2 仿真计算结果…… 77
5.3 E 型梁仿真计算…… 79
5.3.1 仿真计算资料…… 79
5.3.2 仿真计算结果…… 80
5.4 温控标准…… 82

清华大学出版社

5.5 箱梁夏季施工混凝土温控措施…… 82
5.5.1 混凝土浇筑温度控制…… 82
5.5.2 混凝土原材料降温措施…… 82
5.5.3 冷却水使用及控制…… 85
5.5.4 养护控制…… 85
5.6 箱梁冬季施工混凝土保温控制措施…… 86
5.6.1 混凝土原材料质量控制…… 86
5.6.2 混凝土配制和搅拌质量控制…… 86
5.6.3 混凝土运输和浇筑质量控制…… 87
5.6.4 保温保湿养护…… 87
5.7 现场温度监测方案…… 87
5.8 箱梁混凝土现场温度监测结果及分析…… 88
5.8.1 箱梁混凝土浇筑基本情况…… 88
5.8.2 混凝土入模温度控制情况…… 88
5.8.3 混凝土冷却水管通水情况…… 89
5.8.4 混凝土养护情况…… 89
5.9 E型梁混凝土内部温度发展情况…… 90
5.9.1 测温元件布置…… 90
5.9.2 测温结果…… 92
5.9.3 测温数据分析…… 92
5.9.4 A型梁混凝土内部温度发展情况 …… 94
5.9.5 M型梁混凝土内部温度发展情况 …… 96
5.10 结束语 …… 98

第6章 大跨度混合梁斜拉桥边跨主梁节段预制拼装关键技术…… 100

6.1 概述 …… 100
6.2 PK断面箱梁组合式移动模板 …… 100
6.2.1 技术背景 …… 100
6.2.2 技术方案 …… 100
6.2.3 组合式移动模板构造特点 …… 101
6.2.4 技术优势 …… 102
6.3 箱梁节段预制工艺 …… 102
6.3.1 技术背景 …… 102
6.3.2 PK断面箱梁预制施工方案 …… 102
6.3.3 技术优势 …… 104
6.4 混凝土箱梁节段预应力张拉工序设计 …… 104
6.4.1 PK断面箱梁预应力设置 …… 104
6.4.2 预应力张拉工序分析意义 …… 106
6.4.3 箱梁预应力张拉工序模拟 …… 106

清华大学出版社

6.4.4 计算结果讨论 …… 106
6.4.5 预应力张拉工序设计 …… 108
6.4.6 预应力张拉工序应用效果 …… 108
6.5 箱梁节段提升与落梁施工技术 …… 108
6.5.1 技术原理 …… 108
6.5.2 箱梁节段吊点与吊具设计 …… 109
6.5.3 吊杆检测与安装 …… 111
6.5.4 箱梁提升 …… 111
6.5.5 落梁技术 …… 112
6.6 箱梁节段胶拼控制技术 …… 113
6.6.1 技术背景 …… 113
6.6.2 箱梁空间姿态测控技术 …… 113
6.6.3 千吨级混凝土预制梁段防裂滑移系统 …… 113
6.6.4 箱梁节段胶拼施工工艺 …… 115
6.7 结束语 …… 117

第 7 章 大跨度混合梁斜拉桥非对称施工阶段结构受力行为分析 …… 118

7.1 概述 …… 118
7.2 混合梁斜拉桥施工控制原则 …… 118
7.3 混合梁斜拉桥施工控制影响因素 …… 119
7.4 有限元分析方法 …… 119
7.5 有限元建模 …… 120
7.5.1 结构模型 …… 120
7.5.2 斜拉索模拟 …… 120
7.5.3 边界条件 …… 121
7.6 计算工况 …… 122
7.6.1 箱梁收缩徐变 …… 122
7.6.2 边跨混凝土预应力模拟 …… 123
7.6.3 桥面起重机荷载 …… 123
7.7 斜拉索初张力设定 …… 123
7.8 施工阶段受力分析 …… 125
7.8.1 最大双悬臂状态受力分析 …… 125
7.8.2 最大单悬臂状态受力分析 …… 127
7.8.3 合龙状态 …… 129
7.9 计算结果对比 …… 131
7.9.1 位移对比分析 …… 131
7.9.2 应力对比分析 …… 132
7.9.3 主梁横向变形分析 …… 133
7.10 结论 …… 134

清华大学出版社

7.11 结束语…… 135

第 8 章 大跨度混合梁斜拉桥主梁总体施工方案优化设计…… 136

8.1 大桥总体施工方案 …… 136
8.2 施工方案对比分析 …… 138
8.2.1 支架现浇施工方案 …… 138
8.2.2 支架节段预制拼装施工方案 …… 139
8.2.3 桥位短线法节段预制拼装施工方案 …… 139
8.3 大桥北边跨主梁总体施工方案 …… 139
8.4 装备选型 …… 140
8.5 存梁支架布置 …… 141
8.6 结论 …… 143

第 9 章 索塔锚固结合部技术研究…… 144

9.1 概述 …… 144
9.2 钢锚梁索塔锚固结合部发展 …… 144
9.3 索塔组合锚固结合部承载能力模型试验设计 …… 148
9.3.1 概述 …… 148
9.3.2 模型试件设计与制作 …… 150
9.3.3 试验加载方案 …… 152
9.3.4 试验测试方案 …… 154
9.4 模型试验结果分析 …… 156
9.4.1 开孔板式试件测试结果分析 …… 156
9.4.2 箱格式试件测试结果分析 …… 163
9.4.3 两试件测试结果比较 …… 169
9.5 结论 …… 173
9.5.1 开孔板式结合部 …… 173
9.5.2 箱格式结合部 …… 173

参考文献…… 174

清华大学出版社

第1章

绪 论

1.1 项目背景

近年来，我国经济发展速度持续增长，运输量日益增多，为提高通行能力，公路斜拉桥常常扩大桥面宽度以满足必要的交通运输要求，分离式双边箱梁（PK 断面箱梁）性价比较高，常用来替代传统的“单箱单室”与“单箱多室”等梁型，其构造方案及演变如图 1-1 所示。

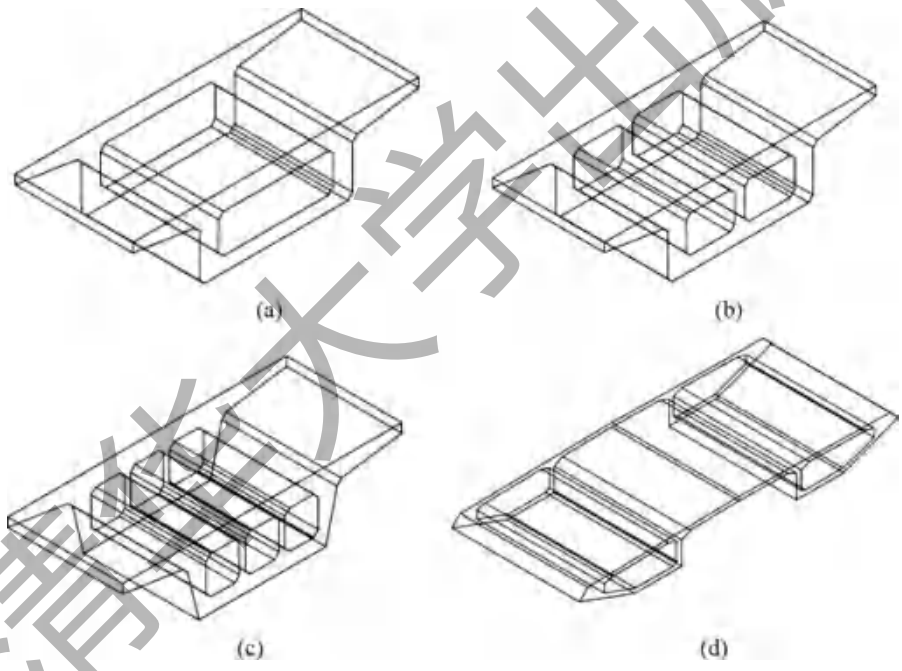

图 1-1 箱梁结构构造方案

（a）单箱单室箱梁；（b）单箱双室箱梁；（c）单箱多室箱梁；（d）分离式双边箱梁（PK 断面箱梁）

混合梁斜拉桥是指斜拉桥的主梁沿梁的长度方向由两种不同材料组成，主跨的梁体为钢梁，边跨（或伸入主跨一部分）的梁体为混凝土梁。混合梁斜拉桥由于主跨采用钢梁，所以具有跨越能力大的优点，而边跨采用混凝土梁起到了很好的锚固作用且可降低建桥成本。目前世界上主跨跨径排名前 10 位的斜拉桥中，有 8 座为混合梁斜拉桥。综合来看，无论是跨越能力还是经济技术层面，混合梁斜拉桥都具有较强的竞争力。目前世界超大跨度混合梁斜拉桥的主要结构形式如表 1-1 所示。

清华大学出版社

表 1-1 国内外典型混合梁斜拉桥的结构实例

序号	桥名	跨径/m	主梁	主塔	索塔锚固	国别	建成时间
1	俄罗斯岛大桥	1104	混合梁	A 形混凝土塔	组合锚固	俄罗斯	2012
2	昂船洲大桥	1018	混合梁	圆形组合塔	组合锚固	中国	2009
3	鄂东长江大桥	926	混合梁	混凝土塔	组合锚固	中国	2010
4	多多罗大桥	890	混合梁	倒 Y 形钢塔	钢锚固	日本	1999
5	诺曼底大桥	856	混合梁	倒 Y 形混凝土塔	组合锚固	法国	1995
6	石首长江公路大桥	820	混合梁	倒 Y 形混凝土塔	组合锚固	中国	2019
7	九江长江公路大桥	818	混合梁	H 形混凝土塔	组合锚固	中国	2013
8	荆岳长江大桥	816	混合梁	H 形混凝土塔	组合锚固	中国	2010
9	闵浦大桥	708	混合梁	H 形混凝土塔	组合锚固	中国	2009
10	望东长江大桥	638	组合梁	混凝土塔	组合锚固	中国	2016
11	白沙洲长江大桥	618	混合梁	A 形混凝土塔	非交错锚固	中国	2000
12	二七长江大桥	616	组合梁	混凝土塔	组合锚固	中国	2011

混合梁斜拉桥在我国虽起步较晚，但随着基础设施建设的快速推进，国内混合梁斜拉桥发展迎来了黄金时期。2009 年建成的香港昂船洲大桥，主跨 1018m；2010 年建成的湖北鄂东长江大桥，主跨 926m；2010 年建成的湖北荆岳长江大桥主跨为 816m。一系列享誉世界的混合梁斜拉桥的建成使我国在混合梁斜拉桥的设计理论及施工技术方面迈上了一个新台阶。

大跨度混合梁斜拉桥大多采用支架上整体现浇形式进行边跨混凝土梁施工，该施工方法成本相对较低，但混凝土梁质量控制难度较大。采用支架现浇工艺的大跨度混凝土梁会因支架不均匀沉降、水化效应、收缩徐变等影响产生多种形式的裂缝，极大地影响结构外观和质量。从结构受力角度来说，混合梁斜拉桥边跨混凝土梁起到配重的作用，当边跨混凝土梁受到破坏时，这种“损伤状态”引起的一系列负面影响会直接通过索系统传递到主塔，再由拉索及钢混结合段间接传递到钢主梁，导致整个结构受力状态发生变化，难以满足设计要求。从目前来看，采用该施工方法已修建完成的类似桥梁结构均在 PK 宽箱混凝土梁结构与主塔锚固区发现结构裂缝。

本书通过石首长江公路大桥工程实践，提出大跨度 PK 宽箱混合梁斜拉桥的桥位短线法节段预制胶拼施工方案，空间预应力结构数值模拟方法，PK 断面混凝土箱梁施工阶段结构力学性能及破坏机制，PK 断面箱梁混凝土配合比设计与质量控制、PK 断面箱梁混凝土温度控制、大跨度混合梁斜拉桥边跨主梁节段预制拼装关键技术，大跨度混合梁斜拉桥四维多尺度有限元分析方法，新型索塔锚固结合部技术。所取得的研究成果对大跨度 PK 宽箱混合梁斜拉桥的建造提供了技术保障，且具有重要的理论与推广应用价值。

1.2 石首长江公路大桥工程概述

1. 大桥地理位置

石首长江公路大桥位于素有“九曲回肠”之称的下荆江之首，是国道“G234 兴隆—阳江”跨越长江的控制性工程，也是湖北“953”高速公路网纵五线“枣阳—石首”的过江通道。大桥上游距荆州长江公路大桥 66km，下游距荆岳长江公路大桥 75km。大桥地理位置如图 1-2 所示。

清华大学出版社

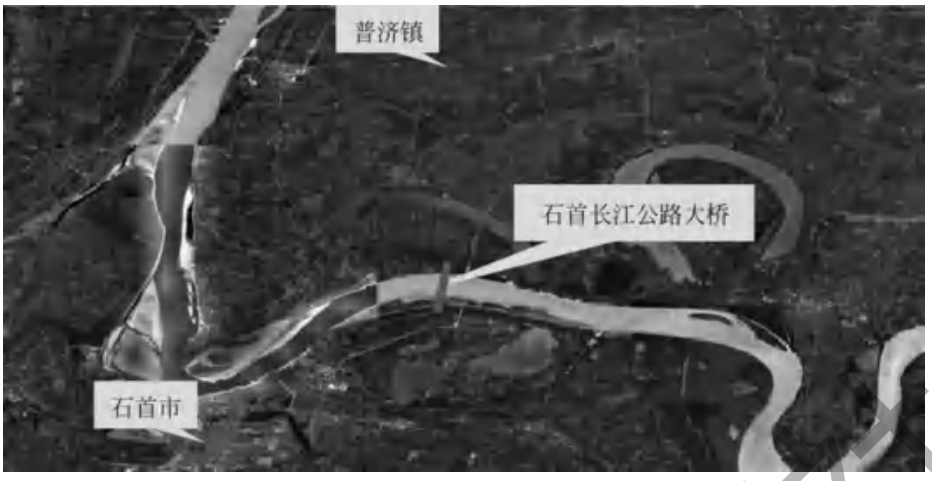

图 1-2 石首长江公路大桥地理位置

2. 主要技术标准

(1) 公路等级：高速公路；

(2) 设计速度：100km/h；

(3) 行车道数：双向六车道；

(4) 设计使用寿命：100 年；

(5) 桥梁宽度：33.5m(不含布索区)；

(6) 最大纵坡≤2.5%；

(7) 抗震设计参数：50 年内超越概率为 10%的地震动峰值加速度为 0.0566g，大桥抗震裂度按Ⅶ级设防；

(8) 通航标准：单孔单向通航净宽≥225m，单孔双向通航净宽≥420m，净高≥18m；

(9) 通航水位：设计最高通航水位 37.64m，设计最低通航水位 24.14m(1985 黄海高程系统)；

(10) 设计洪水频率：1/300 设防。

3. 桥梁结构概况

石首长江公路大桥主桥长 1445m，主跨采用 820m 的双塔非对称混合梁斜拉桥方案，桥跨布置为(75＋75＋75)m＋820m ＋(300＋100)m(图 1-3)。大桥中跨和南边跨采用正交异性板 PK 钢箱梁结构(图 1-4)，全长 1193.5m。北边跨采用 PK 混凝土箱梁结构，长 251.5m。索塔采用倒 Y 形空心单箱室混凝土结构，塔柱在高程 60.525m 处设置横梁，总高 232m。

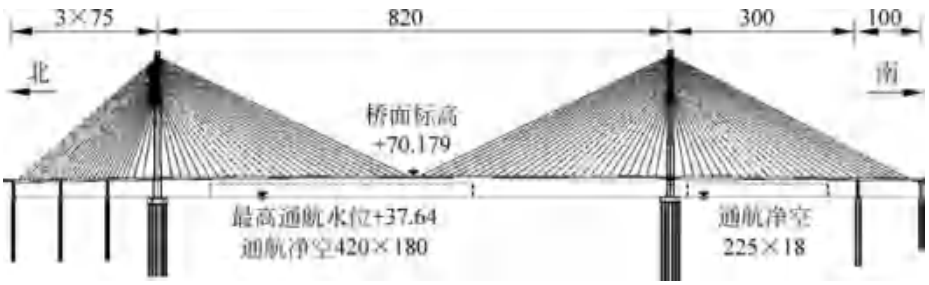

图 1-3 石首长江公路大桥桥跨布置(单位：m)

清华大学出版社

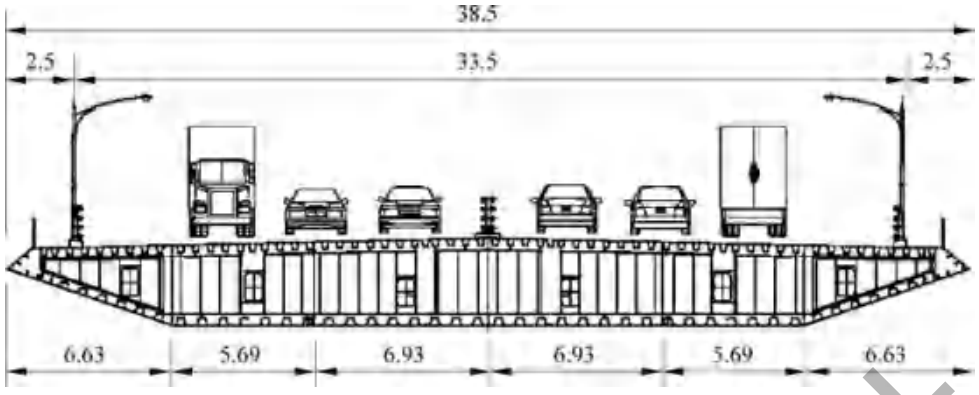

图 1-4 中跨与南边跨正交异性板 PK 钢箱梁横断面(单位：m)

北边跨 PK 混凝土箱梁结构(图 1-5)采用 C55 混凝土材料，箱梁顶板厚 35cm，底板厚 40cm，内腹板厚 55cm，箱梁单幅含风嘴宽 38.5m，高 3.822m，隔板厚 0.32m，箱梁根据结构参数共划分为 13 个截面，共 36 个节段，节段长 5.0～7.5m，最小吊装质量 736.1t，最大吊装质量 1047.9t。箱梁除布置纵向预应力束外，在顶板、底板和隔板内设有横向预应力，腹板设有竖向预应力，其中纵向预应力又分为体内预应力和体外预应力，共同组成了“空间预应力结构”。

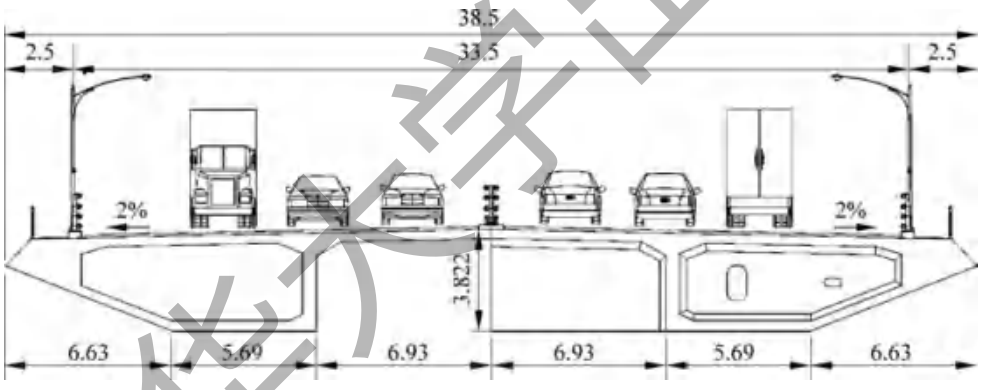

图 1-5 北边跨 PK 混凝土箱梁横断面(单位：m)

4. 桥位场地情况

根据地质勘测报告，桥址位于软基地层，主要以粉细砂为主，含少量粉质黏土、粉土、淤泥质黏土、卵石、中沙等，导致边跨混凝土箱梁施工难度提高，施工质量控制是该桥重点研究问题之一。桥址区位于石首市长江下游南北碾子湾段长江及其两岸，场地地貌单元属于长江河床及漫滩桥位地质条件，如图 1-6 所示。

5. 需要解决的技术问题

(1) PK 断面混凝土箱梁在我国混合梁公路斜拉桥的建设中被广泛运用，但是对 PK 断面混凝土箱梁的研究相对滞后，许多工程师和技术人员依然对该梁型结构的力学性能以及施工方法的理解不够深入，又由于现有施工技术的局限性，混合梁斜拉桥的边跨主梁(PK 断面混凝土箱梁)结构质量及线形无法保证一定达到设计标准，在修建完成后又因运输量大，重型荷载长期作用在边跨主梁上，以及温度变化、混凝土自身引起的收缩、徐变等因素，最终导致边跨混凝土主梁在桥梁建成服役后比主跨钢梁提前进入“损伤状态”，并引起一系

清华大学出版社

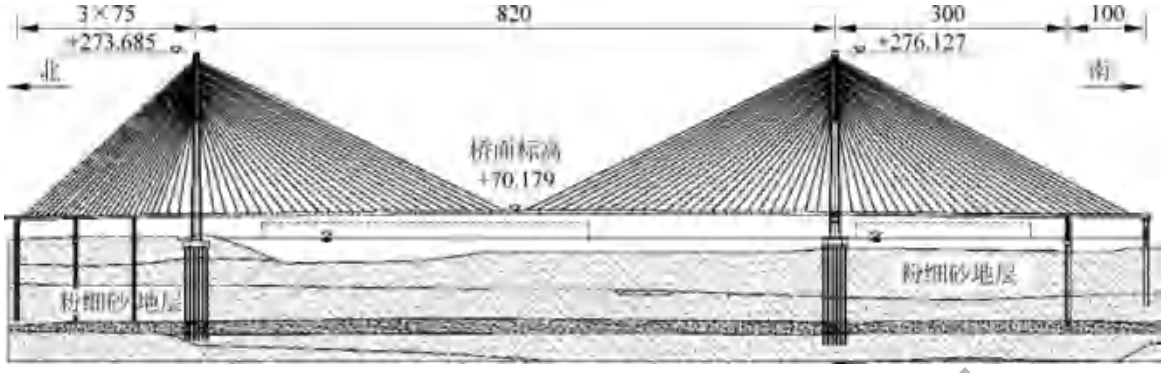

图 1-6 桥位地质条件示意(单位：m)

列负面影响。“损伤状态”会直接通过拉索系统传递到主塔，再由拉索和钢混结合段直接传递到钢主梁，致使整个结构运营状态发生变化，严重影响斜拉桥的服役年限，从而增大养护和维修费用。有分析表明，由施工技术引起的边跨主梁的质量问题导致后续的结构耐久性下降的案例屡见不鲜，所以边跨主梁施工的控制技术是保障混合梁斜拉桥服役年限的关键。

(2) PK 断面混凝土箱梁由几何特性引起的力学问题十分显著，它具有横向宽度大的特点，从设计角度来看，其结构的刚度及线形控制需要通过“空间预应力钢筋”的设置来实现。但是，PK 断面混凝土箱梁成桥受力行为与未成桥状态存在巨大差异，桥梁设计人员通常以成桥状态考虑其结构的优越性，对 PK 断面混凝土箱梁的“节段预制、拼装施工工艺”的难度并未熟知，导致施工总体设计方案复杂，前期工程量预算难度增大。

(3) 由于 PK 断面混凝土箱梁结构在施工及使用过程中的剪力滞效应的存在，传统的结构设计与计算方法(理论计算公式)以及数值模拟方法(经典的杆系模型)很难考虑“空间预应力的耦合效应”对结构的影响，计算精度已经无法满足结构的设计需要，所以，需要采用一种精细化有限元模拟方法，既可以直观地反映结构的力学性能，又可以根据材料强度判断其薄弱位置(裂缝数据采集)，力争对 PK 断面混凝土箱梁的施工过程进行完整的模拟分析，从而保障结构的质量及耐久性。

(4) 桥塔钢锚梁与 PK 断面混凝土箱梁防裂控制是保障混合梁斜拉桥服役年限的关键，同时也是目前大跨径公路混合梁斜拉桥迫切需要解决的关键技术问题。

1.3 项目主要研究内容

(1) 大跨度混合梁斜拉桥主梁总体施工方案优化设计研究；

(2) 空间预应力混凝土结构数值模拟技术研究；

(3) PK 箱梁施工阶段结构破坏机制和剪力滞效应研究；

(4) 超宽 PK 断面混凝土箱梁施工阶段防裂控制技术；

(5) 大跨度混合梁斜拉桥施工阶段空间力学行为分析；

(6) 大跨度混合梁斜拉桥索塔新型钢锚梁结构设计。

清华大学出版社

1.4 项目研究过程概述

项目研究工作从2015年12月开始，从方案论证、比选、制定入手，开展了研究工作，项目组根据桥梁结构特点及场地情况，确定了大桥结构设计与总体施工方案，并进行了大跨度PK宽箱混合梁斜拉桥建造关键技术的专题研究。结合工程需要，开展了短线法节段预制胶拼施工方法、PK断面混凝土箱梁空间结构数值模拟计算方法、PK断面混凝土箱梁施工阶段结构力学性能及破坏机制、PK断面箱梁混凝土配合比设计与质量控制、PK断面箱梁混凝土温度控制、大跨度混合梁斜拉桥边跨主梁节段预制拼装关键技术、大跨度混合梁斜拉桥四维多尺度有限元分析方法、索塔锚固结合部技术的研究工作，确保了大桥顺利建成。对大跨度PK宽箱混合梁斜拉桥空间力学进行分析，对今后类似桥梁结构设计、施工打下良好的理论基础。

该桥于2019年5月成功合龙。项目组于2019年6月，经过系统整理得出本研究成果。该项目PK断面混凝土箱梁空间结构数值模拟计算方法、大跨度混合梁斜拉桥边跨主梁节段预制拼装关键技术、新型索塔锚固结合部技术研究成果分别在石首长江公路大桥、武穴长江公路大桥、青山长江大桥与望江长江大桥得到综合应用，社会效益与经济效益良好。

1.5 项目总体技术性能指标

桥位短线法节段预制、胶拼施工技术将大跨度混合梁斜拉桥边跨主梁施工线形控制在±2mm，且未出现明显的有害裂缝，与国内外同类型桥梁施工方案相比，该方案具有一定的先进性，可为后续类似工程施工提供借鉴。

采用大跨度混合梁斜拉桥PK混凝土梁的空间有限元模型可以得到更加直观的计算结果，避免了杆系模型中无法精确模拟结构各部位受力的影响，有效提高了PK箱梁空间预应力结构的计算精度。

PK混凝土梁受空间预应力影响效果明显，结构各部位受力不均，且呈非线性走势，应力状态变化与多种预应力钢束张拉耦合作用有关，该计算结果有助于PK箱梁结构设计。

PK箱梁在自重状态下结构应力较小，但剪力滞效应最大，在提升与滑移阶段的剪力滞效应相对较小，且沿箱梁截面呈非线性走势。在预应力作用相同的情况下，吊点与滑靴位置的改变是影响剪力滞效应的主要因素。

横向预应力越大，剪力滞系数曲线沿横桥向越趋于平缓，当预应力达到一定张拉量时，可以改变结构的正、负剪力滞效应区范围，说明顶板与横隔板预应力钢束提供的压应力对剪力滞效应的影响效果明显。

推荐用于宽箱梁预制施工的配合比组成为(kg/m^3)：P·O 52.5水泥：Ⅰ级粉煤灰：S95级矿粉：中粗河砂：5～20mm碎石：水：缓凝型聚羧酸高性能减水剂＝348：74：74：731：1120：147：6.2。混凝土拌和物达到的技术指标为：初始坍落度/扩展度为220mm/540mm，60min保留值为210mm/510mm，含气量1.7%，初凝时间约18h；达到的

清华大学出版社

力学性能指标：3d、7d、28d 抗压强度分别为 55.6MPa、65.7MPa、72.5MPa；3d、7d、28d 劈裂抗拉强度分别为 3.52MPa、4.49MPa、5.49MPa。另外，45℃蒸汽养护条件下混凝土强度性能发展良好。

抗裂与变形性能指标：7d 绝热温升值为 50.5℃，56d 干缩率＜250×10^{-6}，56d 徐变度为 14.2×10^{-6}/MPa，抗塑性干燥收缩开裂等级达到 L-Ⅵ。

混凝土 28d 快速碳化试验碳化深度＜5.0mm(T-Ⅳ等级)；56d 电通量＜500C(Q-Ⅴ等级)，氯离子渗透性很低；经历 300 次冻融循环后相对动弹性模量＞60%，质量损失＜5%，抗冻等级超过 F300；抗硫酸盐侵蚀等级＞KS150。

根据不同施工期配制相应的 C55 混凝土配合比，较大限度地降低了水泥用量，从而降低了混凝土水化热的总量。冬季施工胶材总量为 496kg/m^3，矿物掺合料总掺量为 30%(粉煤灰 15%＋矿粉 15%)，夏季施工胶材总量为 473kg/m^3，矿物掺合料总掺量为 35%(粉煤灰 20%＋矿粉 15%)，后期强度发展快、富余强度高。

在斜拉桥最大双悬臂、最大单悬臂以及合龙阶段，北桥塔最大偏移量为 450mm，最小偏移量为 375mm，位移变化率为 16.7%；南桥塔最大偏移量为 130mm，最小偏移量为 85mm，位移变化率为 34.6%；桥塔最大应力－12MPa，说明三种施工阶段对桥塔位移影响较大，对桥塔受力状态影响较小，可以保障结构施工安全。

施工过程中钢箱梁应力变化范围较小，上翼缘应力变化范围在－65～－90MPa，下翼缘应力变化范围在－63～90MPa，远小于 Q345 允许应力值，说明在三种施工阶段中斜拉索张拉力合理，钢箱梁结构整体受力均匀。

混凝土主梁在自重、斜拉索张力、收缩徐变等影响下，竖向变形根据梁体横向刚度分配而产生，受横向预应力影响，风嘴产生下挠－0.4mm，梁体竖向最大变形为＋1.2mm，变形较小，施工阶段可以保障结构安全。钢箱梁横向变形较为平缓，最大位移为－6.86mm，跨中下挠，结构在施工阶段安全可靠。

四维多尺度有限元模型在计算全桥整体受力及变形的同时还可以分析结构局部变形状态，相比传统杆系模型计算方便，精度较高。

技术性指标见表 1-2。

表 1-2 技术性指标

项目	技术	缺点	优点
新型施工方法	桥位短线法施工工法	均采用现浇工法或支架上节段预制，不利于结构质量和耐久性	将大桥主梁线形质量控制标准提高到±2mm，高于国际同类桥梁建造标准。工厂法制造显著提高了结构质量和耐久性
数值模拟技术	空间预应力结构四维多尺度模拟	桁架模型计算精度不足	解决了桁架模型无法模拟空间预应力结构的问题，并提高了计算精度。精确分析了主梁挂索施工不利工况下的塔、梁、索空间力学行为，为施工过程控制提供理论支撑
施工控制技术	PK 断面箱梁施工阶段防裂控制技术	裂缝 控制等级二(±0.2mm) 控制等级一(±0.1mm)	研发了防裂滑移系统与支点同步控制装置，保障了结构安全施工质量，裂缝控制等级达到一级水平标准，无可见裂缝

清华大学出版社

续表

项目技术		缺点	优点
结构设计新方法和新结构	索塔锚固结合部连续弹性介质层计算方法；开孔板式钢混结合新结构技术	索塔锚固区局部位置抗裂性差，钢筋用量多	提出了可用于索塔锚固区结合部连接件剪力计算的连续弹性介质层法，形成了钢锚梁式组合索塔锚固结构的设计方法；研发了开孔板式和箱格式壁板两种新型的索塔锚固钢混结合部结构，提高了索塔的抗裂性能
新型施工方法	桥位短线法施工工法	均采用现浇工法或支架上节段预制，不利于结构质量和耐久性	将大桥主梁线形质量控制标准提高到±2mm，高于国际同类桥梁建造标准。工厂法制造显著提高了结构质量和耐久性

1.6 项目创新点和取得的突破

通过对大跨度混合梁斜拉桥的施工关键技术研究以及在石首长江公路大桥建设中的应用总结了以下几方面的创新技术。

1）大跨度混合梁斜拉桥主梁总体施工方案优化设计

首次提出了大跨度混合梁斜拉桥“桥位短线法”节段预制、拼装的成套施工方法，成功应用到石首长江公路大桥，将大桥边跨宽38.5m主梁线形±10mm的控制标准提高到±2mm，高于国内外同类桥梁标准。

2）PK断面混凝土箱梁空间结构数值模拟计算方法

自主研发了一种“基于空间预应力结构的数值模拟计算方法”，提高PK断面混凝土箱梁节段预制、胶拼施工过程的数值模拟计算精度。分析PK断面混凝土箱梁的结构特性，建立混凝土箱梁节段的精细化有限元模型，在考虑结构空间预应力钢筋的配筋形式的基础上，对模型中混凝土与钢筋的本构关系进行相应的研究。

研究箱梁结构的力学性能及破坏机制，分析箱梁节段在施工过程中“剪力滞效应”，并采用“弥散化裂缝模型”确定可能出现的损伤（裂缝）位置，研究PK断面混凝土箱梁施工质量的保障措施，从而达到控制“损伤应力”与“剪力滞效应”的目的，为PK断面混凝土箱梁施工技术方案研究奠定基础。

3）PK断面箱梁混凝土配合比设计与质量控制研究

对C55高性能混凝土进行早期开裂试验、基本性能试验、收缩徐变试验、耐久性试验，并采用SEM对混凝土微观结构进行分析。根据研究结果提出石首长江公路大桥PK断面混凝土箱梁施工防裂控制措施，并将成果直接应用到实际工程中。

研究了混凝土预制温控措施，制定了PK断面混凝土箱梁大体积混凝土温控防裂评价标准，采用数值模拟方法计算分析了混凝土箱梁材料不同龄期的温度应力大小及发展趋势，根据计算结果研究了夏季温控措施，并对现场PK断面混凝土箱梁的温控措施的使用效果进行总结和评价。

4）大跨度混合梁斜拉桥边跨主梁节段预制拼装关键技术

首次研制了PK断面混凝土箱梁组合式移动模板的构造，采用高强度钢模与木模，以及液压、滑移系统配合的方法，解决了PK断面混凝土梁线形微调及预制精度问题，同时提高了模板的组拼及拆模效率，具有较高的应用价值和社会经济效益。

清华大学出版社

自主研发了1100t特种门式液压提升机，以满足大吨位箱梁节段的提升运输能力，且具有监测传感器系统，对各吊点反力进行实时监控和偏载预警，将吊点反力控制在±50t极限范围内，以保障梁体受力均衡，同时降低梁体在提升运输过程中开裂概率。

5）大跨度混合梁斜拉桥四维多尺度有限元分析方法

采用精细化数值模拟技术，针对钢与混凝土两种材料特点建立一种混合梁斜拉桥非对称施工阶段的四维多尺度有限元模型，考虑混合梁斜拉桥结构及子结构、构件、材料尺度，同时考虑施工阶段的时间维度，弥补传统有限元模拟方法的不足，从而提高混合梁非对称施工过程模拟计算的精度。

通过四维多尺度模型，对非对称混合梁斜拉桥单侧大悬臂阶段的受力状态进行计算，对索力、应力、位移等力学指标进行分析，研究了主梁、索、塔以及钢混结合段的受力特征，从而得到非对称施工阶段中的未成桥状态下的力学行为及结构应力状态的变化趋势，为混合梁斜拉桥中跨、边跨主梁非对称施工控制技术方案提供设计依据。

6）索塔锚固结合部技术研究

首次提出了可用于结合部连接件剪力计算的连续弹性介质层法，形成了钢锚梁式组合索塔锚固结构的设计方法。针对桥塔锚固区抗裂性能研究，建立了可用于混凝土塔壁抗裂验算和配筋设计的拉压杆理论模型。通过索塔锚固结构形式的比较分析和模型试验，提出开孔板式和箱格式壁板两种新型的索塔锚固区钢混结合部构造形式，揭示了其受力机制和承载性能。

根据目前已形成的科研成果来看，该项目发展和提高的主要方向：超大双边混凝土箱梁节段预制标准化方案优化、塔梁同步施工关键技术研究等方面。

1.7 项目研究成果的推广应用条件和应用前景

混合梁斜拉桥是指斜拉桥的主梁沿梁的长度方向由两种不同材料组成，主跨的梁体为钢梁，边跨（或伸入主跨一部分）的梁体为混凝土梁。混合梁斜拉桥由于主跨采用钢梁，所以具有跨越能力大的优点，而边跨采用混凝土梁从而起到了很好的锚固作用且可降低建桥成本。

大跨度混合梁斜拉桥大多采用支架上整体现浇形式进行边跨混凝土梁施工，该施工方法成本相对较低，但混凝土梁质量控制难度较大。采用支架现浇工艺的大跨度混凝土梁会因支架不均匀沉降、水化效应、收缩徐变等影响产生多种形式的裂缝，极大地影响结构外观和质量。

石首长江公路大桥主桥为双塔单侧混合梁斜拉桥，主桥桥跨布置为(75＋75＋75)m＋820m＋(300＋100)m；其边跨采用混凝土箱梁结构，最大节段质量达1117t。为保证边跨PK混凝土箱梁的施工质量，该桥首次采用大吨位预应力混凝土PK箱梁“桥位短线法标准化预制胶拼”施工工艺及大断面PK箱梁吊装与滑移自动控制技术，该技术成功地解决了大体积混凝土箱梁局部大面积开裂、运输易损坏等问题，从而达到了提高结构安全性及可靠性、降低维修及养护成本的目的，整体桥梁的使用性能得到提升。

因此，本项目研究成果符合我国经济发展和现代化交通需求，符合国家安全、节能减排的方针政策，具有良好的市场前景和显著的社会、经济效益。

清华大学出版社

1.8 存在问题及工作设想

石首长江公路大桥具有风大、地质条件差、受长江汛期影响等施工特点。其主塔基础及边跨混凝土箱梁施工难度和技术要求极高。通过一系列研究，虽然已经取得可喜的成果，但是仍然有优化改进空间。

（1）PK 箱梁结构改造及优化。目前的 PK 混凝土箱梁结构在施工过程中需要特殊措施保障其结构质量，提高抗裂性能。然而，合理的构造可以在施工中避免大量的成本投入，因此研究 PK 箱梁并对结构形式进行优化改进是今后的研究方向。

（2）钢板混凝土 PK 箱梁结构形式。为提高结构的耐久性、结构强度、刚度和施工速度，钢模板与混凝土组合的永久结构在未来可能会更具发展空间，这种组合结构形式需要系统的研究和验证。

清华大学出版社

第2章

空间结构数值模拟计算方法

2.1 概述

在研究 PK 断面混凝土箱梁结构的过程中，大多数学者认为该结构是一种普通的箱梁结构，通过简化的理论分析可以得到相对准确的应力计算结果。但是，由于 PK 断面混凝土箱梁具有断面大、体积大、质量大等特点，通常会采用“空间预应力结构”设计，用以提高结构的抗弯、抗剪与抗扭的预应力储备。PK 断面混凝土箱梁结构预应力设计较为复杂，采用传统的杆系有限元模型无法准确地分析结构在施工和运营中的受力行为。由于 PK 断面混凝土箱梁结构在施工及使用过程中存在剪力滞效应，传统的结构设计计算方法（理论计算公式）与数值模拟方法（经典的杆系模型）很难考虑“空间预应力的耦合效应”对结果的影响，计算精度已经无法满足结构的设计需要。所以，需要一种精细化有限元模拟方法，既可以直观地反映结构的力学性能，又可以根据材料强度判断其薄弱位置（裂缝数据采集），力争对 PK 断面混凝土箱梁的施工过程进行完整的模拟分析，从而保障结构的质量及耐久性。

本研究以大跨度混合梁斜拉桥边跨主梁为研究对象，对 PK 断面混凝土箱梁空间预应力结构数值模拟方法进行研究，采用数值模拟计算和现场实测的方法对结果进行验证，从而得到施工过程中 PK 箱梁的结构受力状态，直观地反映其力学性能，为 PK 断面混凝土箱梁结构在施工过程中防裂控制技术的研究奠定理论基础。

2.2 PK 断面混凝土箱梁结构

2.2.1 PK 断面混凝土箱梁的结构特点

现代桥梁的服役中，PK 断面混凝土箱梁在大跨度混合梁斜拉桥的建造中得到广泛应用。PK 断面混凝土箱梁具有横向断面大、吨位大的特点，主要由顶板、底板、腹板、横隔板、风嘴及剪力键等结构组成。该结构设置两个箱室，中间设置横隔板将两箱室连接形成扁平箱梁结构，且具有抗风性能好、桥面宽度大的优点。PK 断面混凝土箱梁结构通长设置空间预应力，主要由顶板束、底板束、腹板束、横隔板通长束及纵向预应力束为箱梁结构提供预应力储备，以提高梁体的抗裂性能。PK 断面混凝土箱梁结构如图 2-1 所示。

清华大学出版社

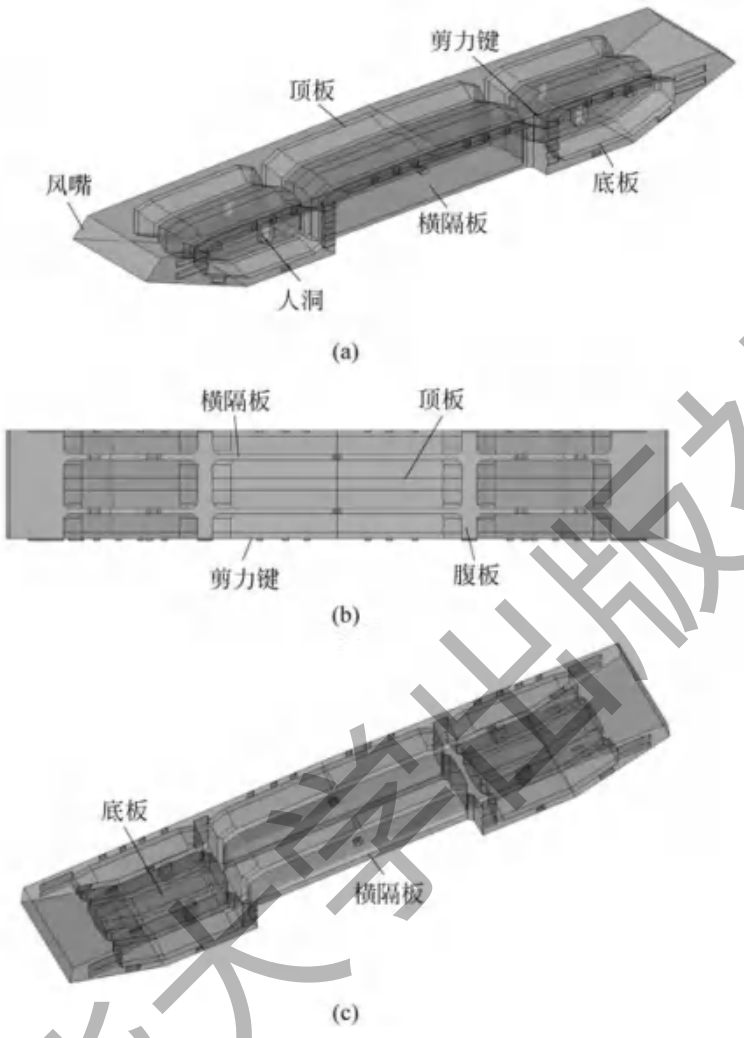

图 2-1 PK 断面混凝土箱梁结构

(a) 箱梁结构三维透视；(b) 箱梁结构顶面；(c) 箱梁结构底面

2.2.2 预应力钢束类型

传统的梁式预应力结构主要由通长的弯曲预应力钢束提供抗拉强度储备，而单箱单室箱梁结构一般设置双层预应力，如顶板与底板各设置若干预应力钢束，用来抵抗荷载作用所产生的拉应力。但是，PK 断面混凝土箱梁的出现将“空间预应力”的定义更加明确，其特点在于预应力钢束的布置位置与常规“箱梁”存在差异，即顶板、底板沿 y 轴布置横向水平预应力钢束，腹板沿 z 轴布置垂直于 y 轴水平钢束的竖向预应力钢束，在横隔板内布置若干个沿(y，z)轴的平直＋竖曲预应力钢束。这使得 PK 断面混凝土箱梁成为具有平弯曲线、竖弯曲线、圆弧以及抛物线等多种预应力形式的复杂结构，如图 2-2 所示。

清华大学出版社

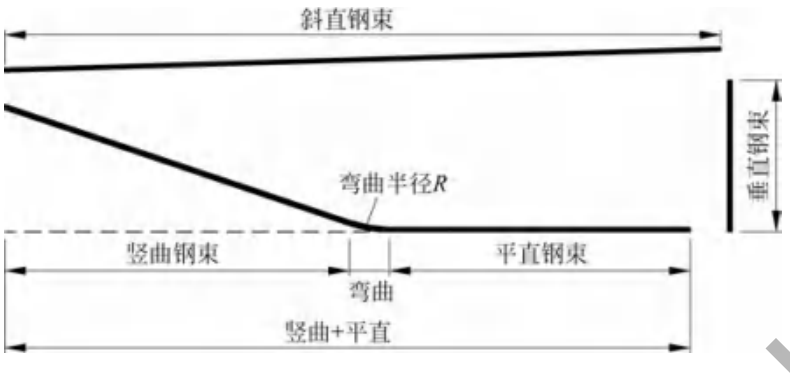

图 2-2　空间预应力钢束分类

2.3　PK 断面混凝土箱梁空间结构建模方法

2.3.1　有限元模型单元选择

PK 箱梁模型采用 MIDAS FEA 精细化有限元软件建立，模型规则截面结构部位主要采用一次函数单元，由八节点六面体、六节点五面体以及四节点四面体平面应力单元组成。几何不规则的异形结构位置采用二十节点六面体、十五节点五面体以及十节点四面体二次函数单元，以提高 PK 断面混凝土箱梁模型的计算精度。3D 有限元微模型如图 2-3 所示。

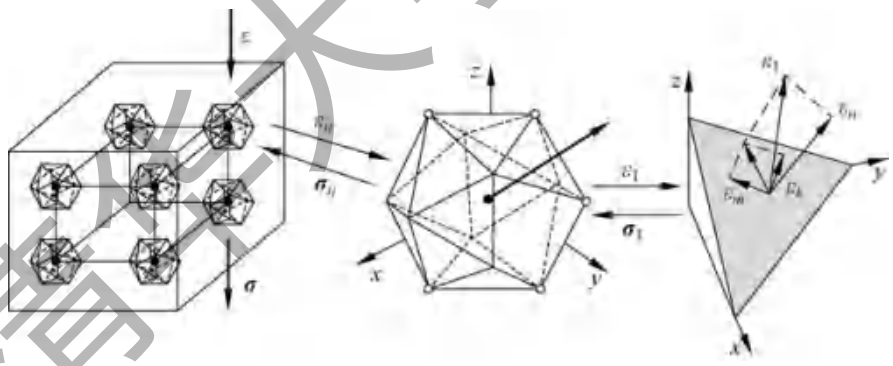

图 2-3　3D 有限元微模型

模型单元形状划分主要根据 PK 断面混凝土箱梁结构几何特性的情况而定，为更好地捕捉混凝土的应力、应变及裂缝位置，模型单元划分选择的具体原则如下：

(1) 几何规则结构位置选用四节点四面体、六节点五面体以及八节点六面体平面应力单元(图 2-4(a)、(c)、(e))，如顶板、底板等结构位置。

(2) 几何不规则异形结构位置选用十节点四面体、十五节点五面体以及二十节点六面体单元二次函数单元(图 2-4(b)、(d)、(f))，如横隔板、风嘴等结构位置。

清华大学出版社

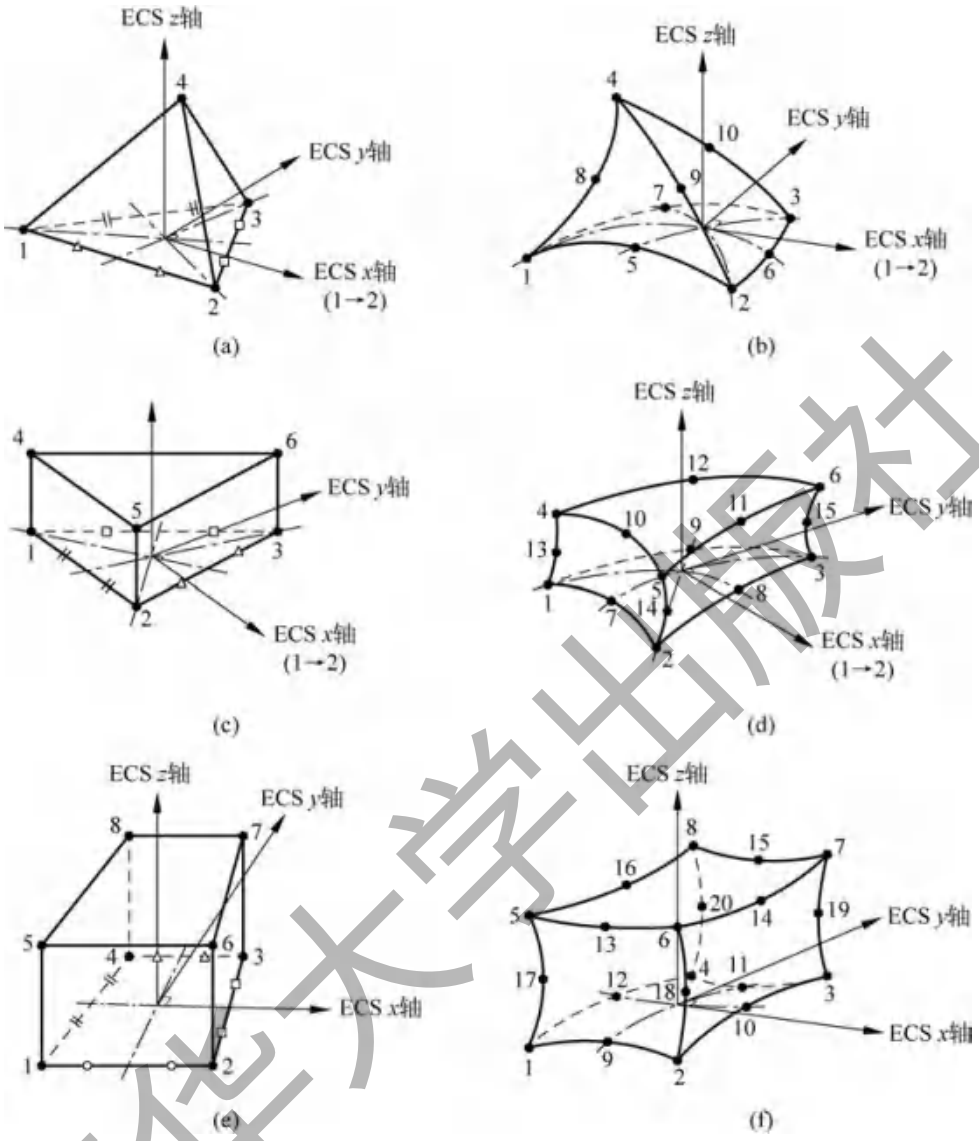

图 2-4　模型单元类型

(a) 四节点四面体单元；(b) 十节点四面体单元；(c) 六节点五面体单元；(d) 十五节点五面体单元；(e) 八节点六面体单元；(f) 二十节点六面体单元

注：图中数字为单元节点编号。

2.3.2　非线性材料本构模型

在分析 PK 断面混凝土箱梁时，考虑其在多种荷载耦合作用下产生开裂的可能性，故混凝土结构的非线性本构模型采用“总应变裂缝模型”，其中受压模型采用 Thorenfeldt 硬化模型(图 2-5)，受拉状态则采用 Hordijk 软化模型(图 2-6)。

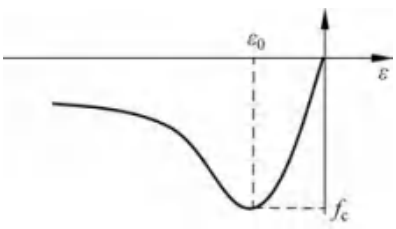

图 2-5　混凝土受压应力-应变 Thorenfeldt 曲线

清华大学出版社

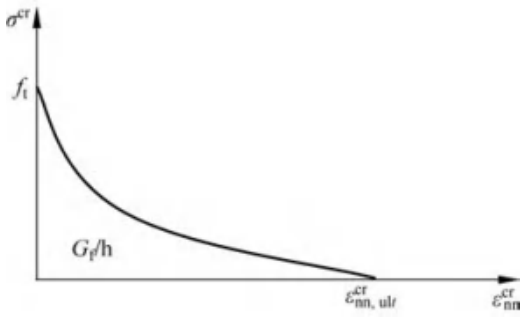

图 2-6　混凝土受拉应力-应变 Hordijk 曲线

（1）混凝土受压应力-应变采用的 Thorenfeldt 曲线方程可表示为：

$$\sigma = -f_c \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\left[\frac{n}{n-1+\left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right]^{nk}}\right] \tag{2-1}$$

$$n = 0.8 + \frac{f_c}{17} \tag{2-2}$$

$$k = \begin{cases} 1 & (\varepsilon_0 < \varepsilon < 0) \\ 0.67 + \dfrac{f_{cu}}{62} & (\varepsilon \leqslant \varepsilon_0) \end{cases} \tag{2-3}$$

式中：σ——混凝土受压应力，N/mm^2；

f_c——混凝土抗压设计强度，MPa；

ε——应变量；

ε_0——混凝土受压产生的应变；

f_{cu}——混凝土标准试块 28d 抗压强度，MPa。

（2）混凝土受拉应力-应变采用的 Hordijk 曲线方程可表示为：

$$\frac{\sigma^{cr}_{nn}(\varepsilon^{cr}_{nn})}{f_t} = \begin{cases} \left[1+\left(c_1\dfrac{\varepsilon^{cr}_{nn}}{\varepsilon^{cr}_{nn,ult}}\right)^3\right]\exp\left(-c_2\dfrac{\varepsilon^{cr}_{nn}}{\varepsilon^{cr}_{nn,ult}}\right) & \\ -\dfrac{\varepsilon^{cr}_{nn}}{\varepsilon^{cr}_{nn,ult}}(1+c_1^3)\exp(-c_2) & (0 < \varepsilon^{cr}_{nn} < \varepsilon_{nn,ult}) \\ 0 & (\varepsilon^{cr}_{nn,ult} < \varepsilon^{cr}_{nn} < 0) \end{cases} \tag{2-4}$$

式中：σ^{cr}_{nn}——混凝土开裂应力，N/mm^2；

ε^{cr}_{nn}——混凝土开裂应变；

c_1，c_2——影响混凝土开裂的相关系数。

2.3.3　混凝土裂缝模型

MIDAS FEA 精细化有限元软件计算分析裂缝主要有两种：一种为固定裂缝模型（fixed crack model），该模型裂缝方向保持不变，始终朝一个方向发展；另一种为转动裂缝模型（rotating crack model），该裂缝方向始终与主拉应变方向保持垂直，裂缝随主拉应变的变化而变化，表示的裂缝发展方向更为精确。裂缝模型如图 2-7 所示。

清华大学出版社

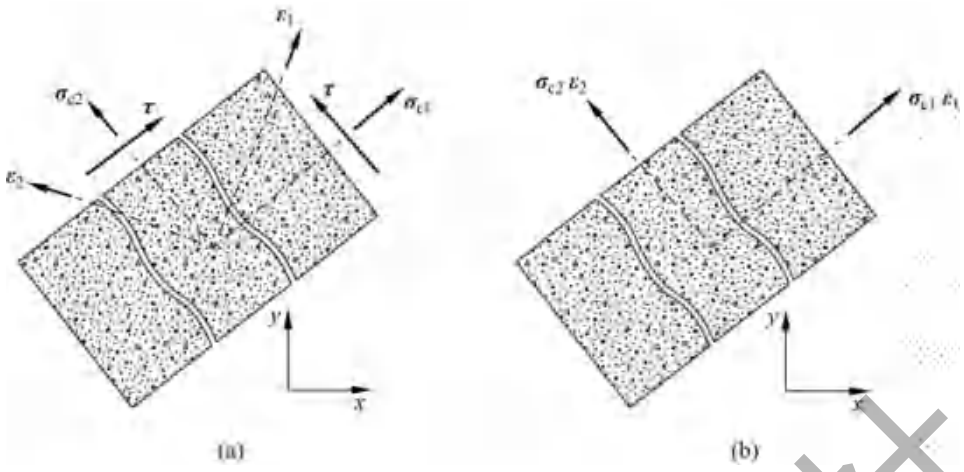

图 2-7　裂缝模型

(a) 固定裂缝模型；(b) 转动裂缝模型

2.4　空间预应力建模方法

经结构几何分析，空间预应力结构实际上可视为由多个形状结构组合而成，主要包括矩形、三角形及不规则形状的综合体。通过对 PK 断面混凝土箱梁结构进行模块划分，分别建立结构几何模块后进行布尔运算，最终形成结构几何模型。预应力钢束可视为一条柱面贯穿线，分别以斜直、垂直与竖弯曲线为主，通过建立多点确定预应力孔道位置，利用点对点确定进行路径拉伸可形成斜直和垂直钢束。竖弯曲线采用平直、弯曲与竖曲合并而成。预应力钢束单元穿过法平面与切平面平行形成空曲线，空间预应力钢束位置关系如图 2-8 所示。

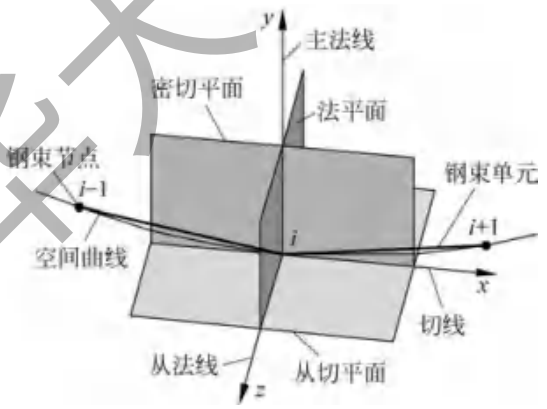

图 2-8　空间预应力钢束位置关系

在精细化有限元分析中，预应力钢束一般采用只有 3 个平动自由度的杆单元划分，混凝土主梁采用实体单元模拟。为实现两者之间的节点一一对应，建立钢束模型后进行节点自动划分，同时赋予预应力钢束截面和材料属性以及回缩量参数等。预应力钢束划分节点后与混凝土模型节点相耦合，并形成虚拟孔道。通过定义孔道摩擦系数模拟预应力钢束在混凝土结构中的损耗，曲线预应力损耗计算方法可用以下公式表示：

$$\sigma_s = \sigma_{con}[1 - e^{-(\mu\theta + kl)}] \tag{2-5}$$

式中：σ_{con}——锚点张拉控制应力，N/mm^2；

清华大学出版社