
200 米级 PC 连续刚构桥长期挠度控制理论研究

主 编： 陈卓异 冉 明 郭勇军

副主编： 毕建民 余黎明 侯毓山

图书在版编目—建议数据

200 米级 PC 连续刚构桥长期挠度控制理论研究/陈卓异 等主编. —澳门:

澳门科学出版社, 2025.08

ISBN 978-99996-42-00-2

I. ①2... II. ①陈... III. ①长跨桥-连续刚构桥

IV. ①U448.23

依据《中国图书馆分类法》提供分类参考数据。

200 米级 PC 连续刚构桥长期挠度控制理论研究

陈卓异 等主编

ISBN 978-99996-42-00-2

责任编辑: 何文锐

责任校对: 谢嘉深

装帧设计: 陈斯若

出版发行: 澳门科学出版社

地 址: 澳门南湾大马路恒昌大厦 11 楼 F 座 邮 编: 999078

网 址: <https://www.mospbs.com>, <https://moaj.mospbs.com>

总 机: +853-62961666 反 馈: book@mospbs.com

印装公司: 澳门翰林出版集团有限公司

开 本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印 张: 7.75

字 数: 161 千字 印 数: 1 ~ 3000

版 次: 2025 年 8 月第 1 版

印 次: 2025 年 8 月第 1 次印刷

如有缺损质量问题, 请联系本社销售中心。

版权所有 违者必究

内容提要

本书紧密围绕 200 米级 PC 连续刚构桥长期挠度控制理论开展基础理论研究。基于全过程仿真分析与试验研究方法,综合考虑收缩徐变、预应力损失、剪切损伤等多因素的影响,探索桥梁结构在服役期间的变形演化规律,建立合理的预测模型与控制方法。通过结合有限元仿真与损伤识别技术,提出具有实践指导意义的工程优化建议,力求为大跨度连续刚构桥的设计、养护及加固提供系统理论依据。

本书可供大跨径连续梁桥、连续刚构桥的设计、施工和研究的工程技术人员参考,也可作为高等院校桥梁专业研究生和高年级本科生的教学参考用书。

前 言

随着我国交通基础设施的不断发展，大跨径预应力混凝土连续刚构桥因其优良的结构性能和广泛的适应性，已在复杂地形和山区广泛应用，成为桥梁建设中的重要桥型之一。然而，随着运营年限的增加，该类桥梁普遍面临跨中持续下挠、腹板开裂等病害问题，严重影响了桥梁的耐久性和安全性。尤其是跨径达 200 米及以上的连续刚构桥，其结构尺寸以及自重大，长期挠度发展更为复杂，急需系统深入的理论研究与工程验证。

本书紧密围绕“200m 级预应力混凝土连续刚构桥”的长期挠度控制问题，基于全过程仿真分析与试验研究方法，综合考虑收缩徐变、预应力损失、剪切损伤等多因素的影响，探索桥梁结构在服役期间的变形演化规律，建立合理的预测模型与控制方法。通过结合有限元仿真与损伤识别技术，提出具有实践指导意义的工程优化建议，力求为大跨度连续刚构桥的设计、养护及加固提供系统理论依据。

全书共分八章。

第一章介绍了研究背景与工程现状，系统梳理预应力混凝土连续刚构桥下挠问题的成因与研究进展，明确本书研究的目的、意义与主要内容。

第二章通过 Z 形试件直剪试验，结合声发射技术和混凝土损伤模型，分析混凝土腹板的剪切损伤机理及其对长期挠度的影响。

第三章建立了基于 ABAQUS 平台的全过程三维实体有限元模型，开发收缩徐变子程序，并通过实桥监测数据进行模型验证。

第四章分析了桥梁结构在收缩徐变和恒载作用下的空间应力分布规律，研究不同构件（顶板、底板、腹板）应力变化特性及结构优化建议。

第五章引入了损伤演化模型与振铃计数参数，预测损伤发展下的挠度变化趋势，提出考虑结构损伤的长期挠度计算方法。

第六章构建了简化杆系模型并与实体模型对比，探讨主跨长度、收缩徐变、预应力损失等因素对长期挠度的独立与耦合影响。

第七章开展了低徐变混凝土试验，分析其材料性能与徐变发展规律，提出跨径、龄期等因素对挠度的影响机制，并提出合理的挠度控制策略。

第八章通过全桥 FEA 模型，系统分析了结构应力与预应力损失的时程演变特征，揭示不同时期结构响应变化规律。

全书由陈卓异统稿。第一章由陈卓异撰写，第二章、第三章、第四章和第五章由郭勇军和毕建民撰写，第六章由冉明和余黎明撰写，第七章和第八章由侯毓山撰写，研究生朱书麟、易宏健等对本文的录入、绘图和英文校对等进行了细致工作。

感谢长沙理工大学和新疆北新路桥集团股份有限公司的经费和项目支持。由于时间和作者水平有限，书中一定存在缺点和不足，恳请专家和读者批评指正。

作者

2025.4.31

目录

第 1 章 绪 论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.1.1 预应力混凝土连续刚构桥现状.....	1
1.1.2 预应力混凝土连续刚构桥下挠现状.....	2
1.2 预应力混凝土连续刚构桥下挠成因研究现状.....	4
1.3 基于三维实体模型的预应力混凝土连续刚构桥研究分析现状.....	7
1.4 基于声发射的混凝土损伤研究现状.....	7
1.5 参考文献.....	8
第 2 章 基于剪切损伤的 200m 级 PC 连续刚构桥长期挠度预测研究.....	13
2.1 试验方案.....	13
2.1.1 试件制备.....	13
2.1.2 加载与测试.....	15
2.1.3 试验主要过程.....	15
2.2 剪切试件塑性损伤模型.....	16
2.2.1 本构关系.....	16
2.2.2 FEA 模型.....	17
2.3 试验结果分析.....	18
2.3.1 剪切加载破坏过程分析.....	18
2.3.2 荷载-应变曲线分析.....	20
2.3.3 剪切应力-应变分析.....	21
2.3.4 剪切加载声发射特性分析.....	22
2.3.5 剪切损伤振铃模型.....	24
2.4 基于混凝土 CDB 本构的损伤预测.....	26
2.5 基于剪切损伤的长期挠度预测.....	28
2.5.1 损伤截面换算分析.....	28
2.5.2 损伤挠度计算.....	29
2.6 本章小结.....	29
2.7 参考文献.....	30
第 3 章 近 200 米级预应力混凝土连续梁全桥实体建模技术及模型验证.....	32
3.1 ABAQUS 收缩徐变程序开发.....	32
3.1.1 收缩徐变有限元理论建立.....	32
3.1.2 ABAQUS 子程序的调用.....	35
3.1.3 收缩徐变子程序模型验证.....	36
3.2 ABAQUS 实体全桥模型.....	38
3.3 实体模型模型验证.....	40
3.3.1 施工挠度对比分析.....	40
3.3.2 徐变挠度验证.....	41

3.3.3 施工阶段应力分析	42
3.4 本章小结	45
第 4 章 近 200 米级混凝土连续梁空间应力分布规律与结构优化	46
4.1 考虑收缩徐变恒载作用下变形规律	46
4.2 考虑收缩徐变恒载作用下空间应力规律	48
4.2.1 顶板应力分析	48
4.2.2 底板应力分析	51
4.2.3 腹板及横隔板应力分析	53
4.3 预应力损失的空间规律	55
4.3.1 空间效应下预应力损失规律	55
4.3.2 三向预应力损失的敏感性分析	58
4.4 车辆荷载作用下的空间分析	61
4.5 本章小结	63
第 5 章 基于损伤模型的近 200 米级连续梁长期挠度预测方法研究	65
5.1 试验方案	65
5.2 试验结果分析	66
5.2.1 振铃计数信号分析	66
5.2.2 损伤演化模型的建立	68
5.3 基于损伤预测模型的长期挠度预测	71
5.3.1 损伤截面换算分析	71
5.3.2 损伤挠度计算	75
5.4 本章小结	76
5.5 参考文献	76
第 6 章 基于全过程仿真的两百米级 PC 连续刚构桥长期挠度影响规律	77
6.1 引言	77
6.2 杆系模型建立及验证	77
6.2.1 有限元模型	77
6.2.2 模型对比验证	78
6.3 主跨跨径对长期挠度影响	79
6.4 混凝土收缩徐变对长期挠度影响	80
6.4.1 收缩徐变预测模型	80
6.4.2 环境湿度	80
6.4.3 加载龄期	82
6.5 预应力损失对长期挠度影响	83
6.6 结语	84
6.7 参考文献	84
第 7 章 200m 级连续梁低徐变试验及挠度控制方法研究	86
7.1 试验	86
7.1.1 试验材料	86
7.1.2 试验配合比	86
7.1.3 实验方法	87
7.1.4 实验结果	88

7.1.5 徐变预测模型修正	90
7.2 短期及长期变形分析	91
7.2.1 依托工程	91
7.2.2 有限元模型	92
7.2.3 加载龄期对徐变挠度的影响	92
7.2.4 加载龄期对结构应力的影响	93
7.2.5 基于规范经验及试验的挠度控制方法	94
7.2.6 跨径对徐变挠度的影响	94
7.3 结论	95
7.4 参考文献	95
第 8 章 基于收缩徐变子程序 200 米级预应力混凝土连续刚构桥时程演变规律分析	97
8.1 FEA 全桥模型	98
8.1.1 混凝土收缩徐变计算方法与原理	98
8.2 全桥模型	100
8.2.1 变形时程演变规律	101
8.3 应力时程演变规律	103
8.3.1 顶板应力分析	103
8.3.2 腹板应力分析	105
8.3.3 0 号块应力分析	105
8.4 预应力损失时程演变规律	106
8.4.1 顶板预应力钢束	106
8.4.2 腹板预应力钢束	108
8.4.3 底板预应力钢束	109
8.4.4 双向预应力损失的敏感性分析	110
8.5 结论	112
8.6 参考文献	112

第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 预应力混凝土连续刚构桥现状

随着习近平总书记在党的十九大报告中提出建设交通强国，我国大力发展民生基础设施建设，交通事业蓬勃发展，高速公路里程和桥梁数量都在日益增加，在我国交通建设中，桥梁扮演着至关重要的角色。近七年公路桥梁发展情况如下图 1.1 所示，据交通部统计至 2022 年末，我国公路桥梁共 103.32 万座，一共 8576.49 万米，其中特大桥 8816 座，大桥 15.96 万座，对比 2021 年末，新增桥梁 7.20 万座、新增里程 1196.27 万米[1]，说明我国桥梁工程市场广阔且发展迅速。与此同时，随着材料与施工技术的发展，作为 T 形刚构与连续梁相结合的一种新型体系，PC 连续刚构桥具有连续梁桥与 T 形刚构桥的多种优势，在我国中西部山区建设中得到了广泛应用。

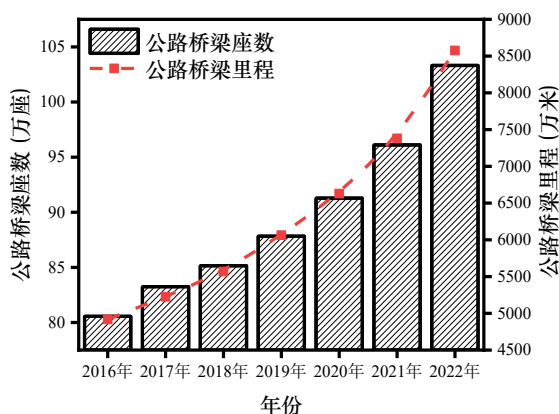


图 1.1 近七年公路桥梁发展情况

PC 连续刚构桥常用跨径为 100~300 米，是大型桥梁建设中经常采用的一种结构体系，这种桥型的特点在于主梁的连续性和墩梁的固结性，它不仅综合了连续梁桥无需伸缩缝、行车平稳的优势，同时融合了 T 形刚构桥无需支座和无需体系转换的优点。此外，连续刚构桥在顺桥向和横桥向的抗弯刚度和抗扭刚度方面都表现出色，能够有效满足大跨度桥梁结构的受力需求。与拱桥、悬索桥、斜拉桥相比施工方便且经济指标更高，在方案比选中，往往能优于其他桥型，因此尽管连续刚构桥起步较晚，但发展迅速，在主跨在 200~300 米范围内的桥梁几乎完全由连续刚构桥所主导，它已成为大跨度预应力混凝土桥梁的首选设计方案，受到了广大桥梁设计者的青睐。

由于大跨径预应力混凝土连续刚构桥梁体开裂和跨中长期下挠不收敛等病害，2008 年以后 200m 级别建设较少，到 2023 年，全球仅有大约 20 座全预应力混凝土连续刚构桥的跨径达到了或超过 240 米。以虎门大桥辅航道桥、黄石长江公路大桥、Koror-

2019

历史机遇 · 打造交流合作基地

Historic Opportunity · Build Communication And Cooperation Bases

· 粤港澳大湾区 · 发展规划纲要

解读2019年新发布《粤港澳大湾区发展规划纲要》

★★★★

大湾区规划 · Introduction

《粤港澳大湾区发展规划纲要》明确了澳门“一个中心、一个平台、一个基地”的三个定位，即：建设世界旅游休闲中心、中国与葡语国家商贸合作服务平台，**打造以中华文化为主流、多元文化共存的交流合作基地。**

It further clarified the three orientations of "one center, one platform and one base" of Macao, namely, to build a world tourism and leisure center, a business and trade cooperation service platform between China and Portuguese-speaking countries, and to build an exchange and cooperation base with Chinese culture as the mainstream and multicultural coexistence.

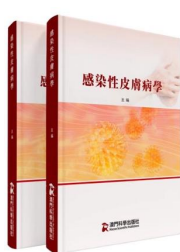


全球发行 · Publishing worldwide



由于国内自费书没有实际销售，出版社不会实际发行，属于非正式出版物，因此国内自费书绝大部分是属于非正式出版物。国际出版即便在没有销售市场的情况下也可以在海外发行上架。世界上其他地方（包括中国）的读者可以通过海外电商平台进行订购和销售。

Since there is no market for self-funded books in mainland China, mainland publishing houses will not actually issue them, so most of self-funded books in the Mainland are informal publications.



- 呼吸系統基本基礎與臨床 Fundamentals and clinic of respiratory diseases
- 臨床腫瘤護理學 Clinical oncology nursing
- 感染性皮膚病學 Infectious dermatology
- 內分泌系統疾病 Endocrine system disease



- 實用小兒內科學 Practical pediatric internal medicine
- 消化系統疾病診療學 Diagnosis and treatment of digestive system diseases
- 現代中醫診斷學 Modern diagnostics of traditional chinese medicine
- 皮膚修復與再生 Skin repair and regeneration

出版流程 · Publishing Process

出版流程快速简便，在填写基本信息、签订合同并支付费用后，IBPC将原始内容进行校对、排版及封面设计；在经过多次校对后，提交申请国际书号；可根据实际需求进行印刷和馆藏存档，最后上架发行。全程专人沟通指导，以极高性价比的方式出版属于自己的作品。

The publishing process is simple and convenient, after filling in the basic information, signing the contract and paying the fee, IBPC will conduct proofreading, typesetting and cover design. After multiple proofreading, submit the ISBN application. According to the actual needs, we will arrange printing and collection archiving, and finally put on the shelves and issued.

检索服务 · Retrieval Service

IBPC的检索服务可提供出版物国际注册文件及出版物所在地的图书馆检索证明，为作者提供证明文件支撑。同时，优秀图书将推荐至国际数据库中收录，提升出版物的认可度。

IBPC can provide retrieval service including the registration documents and the library search certificate. Meanwhile, excellent books will be recommended for inclusion in authoritative databases to enhance the recognition of publications.

销售协议 · Sales Agreement

作者签订销售合作协议后，IBPC可提供多种上架渠道，包括官网、京东、天猫、亚马逊、当当网等平台，可销售纸质印本与电子图书等形式，并按照合作协议进行利润分成。

After the author signs the sales agreement, IBPC can provide a variety of sales channels, such as the official website, JD & T-mall overseas Purchase, Amazon and other platforms, printed paper and electronic books are available, and the authors share the profits according to the sales agreement.



填写信息
Information Filling



签订合同
Contract Signing



支付费用
Payment



提交书稿
Submitting



内容校对
Proofreading
内容排版
Content Layout
封面设计
Cover Design



申请书号
ISBN Apply



印刷出版
Printing



馆藏存档
Archives



上架发行
Publication

澳门科学出版社 MOSP

“以服务青少年及青年科学才俊为己任，
打造国际性的科学技术交流平台”

正规国际出版，首选澳科出版

- 学术著作/个人作品 - 优质
- 中华“强国文化”输出战略 - 翻译后国际出版
- 数字教材 - 教材出书 & 数字化媒体上线

所有优质内容，均可申请出版减免资助。

所有澳门本土内容，均可申请出版减免资助；

澳门总部

电话：0853-62961666（澳门）

邮件：book@mospbs.com

地址：中国澳门南湾大马路恒昌大厦F座11楼

网址：www.mospbs.com（英文）| moaj.mospbs.com（中文）

特别提醒：MOSP所有业务均有出版社的正规盖章合同，
若有任何疑问，可联系出版社编辑确认。