



Theory and
Calculation Method of

Bridge Structures

桥梁结构理论 与计算方法 (第二版)

贺拴海 编著
宋一凡 主审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

桥梁结构理论与计算方法

Theory and Calculation Method of Bridge Structures

(第二版)

贺拴海 编 著
宋一凡 主 审



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

内 容 提 要

本书系统介绍了桥梁结构的现代静力计算原理、理论及方法。内容包括:桥梁结构的线性、非线性整体分析,桥跨结构计算理论,薄壁箱梁理论,混凝土桥梁计算理论,斜弯桥及异形桥梁计算理论,拱桥计算理论,索支承桥计算理论,桥梁结构的特殊计算问题等。本书着重于理论、原理及方法的叙述、推导、相关应用示例及其评述,与其相关的基础知识较少涉及。

本书可作为桥梁工程方向的研究生学习用书,亦可作为高等院校教师教学及研究参考书,也可供从事桥梁及结构工程专业的高级技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁结构理论与计算方法 / 贺拴海编著. — 2 版.

— 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017. 11

ISBN 978-7-114-14058-7

I. ①桥… II. ①贺… III. ①桥梁结构—理论②桥梁结构—结构计算—计算方法 IV. ①U443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 185216 号

书 名: 桥梁结构理论与计算方法(第二版)

著 作 者: 贺拴海

责任编辑: 李 喆

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 54.25

字 数: 1284 千

版 次: 2003 年 7 月 第 1 版 2017 年 11 月 第 2 版

印 次: 2017 年 11 月 第 2 版 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14058-7

定 价: 140.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书由本公司负责调换)

第二版前言

进入 21 世纪以来,我国交通与桥梁事业迅猛发展,桥梁建设成就举世瞩目,桥梁工程学科的整体水平已进入国际先进行列。随着建设及维护的需要,桥梁结构及其研究工作亦具有与时俱进的特点,呈现出向长(跨径长)、大(规模大)、新(结构新)、柔(刚度柔)、精(分析精)发展的趋势。研究难点不断被突破,新的问题又不断涌现,解决问题的理论、方法和技术不断向纵深发展。

本书作为长安大学桥梁工程方向研究生专业学位课的主要教学参考书,自 2004 年第一版面世以来,已经过了十余个年头,十多年中,桥梁工程学科及桥梁建设发生了巨大变化,特别是计算机的应用及数值分析的普及,使桥梁工程这门古老的学科焕发出时代的风采,从简单的同性杆、梁、板、拱、索等的弹性分析、弹塑性分析,进入到杆系、梁群、异性板、组合结构、异形结构、索支承桥的弹性简化计算、弹塑性分析、局部精细分析、极端问题分析、复杂组合结构及大型结构的各种计算,使得大多数常规桥梁结构的分析问题已经得到解决。在此过程中,产生了大量新的研究成果。鉴于此,改版时补充桥梁结构分析的新方法、新理论、新思路和研究的新成果就成为首选,而是否保留第一版中传统的桥梁分析理论和方法,成为一个艰难的抉择。保留无新意,去掉无法满足教学要求。考虑再三决定保留但改造传统理论,更换部分过时内容,增加新的研究成果,既作为研究生教学参考用书,总结近年来桥梁结构计算理论、数值分析与结构设计方面的研究成果,又展示桥梁工程领域近年来的发展与创新。全书共 8 篇 28 章,保留了第一版的基本格局,但进行了必要的调整、修订与补充,修订及补充的具体内容如下:混凝土桥梁的墩顶块、劲性骨架合龙段、新旧结构相互作用、大体积混凝土水化热效应、牛腿结构、预应力结构开裂、永存预应力预测等的数值模拟及结构 D 区分析,波形钢腹板箱梁、异形桥的空间分析,结构火灾的热力耦合效应、部分斜拉桥计算、斜拉—悬索组合体系、不同徐变收缩模式的对比、加固后结构的刚度及裂缝等分析及计算示例等。目的在于为桥梁工程方向的研究生打下一个坚实而宽广的从事科学研究的理论基础,掌握现代结构分析的基本理论、方法和技术,供不同研究方向的读者可有选择地进行研究。

本书内容仅涉及桥梁结构静力计算问题,包括:桥梁结构整体数值分析的有限元法、有限条法、能量原理、变形协调法、子结构法,材料、几何非线性分析;桥跨结构的正交异性理论、有

效分布宽度、悬臂桥面板计算、钢结构及组合结构桥梁分析;薄壁箱梁分析的剪力滞理论、约束扭转及畸变理论和空间数值模拟方法;混凝土结构的收缩徐变、本构、强度、弹塑性、刚度及裂缝计算理论,桥梁有效预应力的沿程分布分析及混凝土桥梁结构的几个常见问题的精细分析;斜弯桥、异形桥、拱桥、斜拉桥、悬索桥计算理论;桥梁结构的温度效应、稳定问题、承载力、加固计算、控制计算及热力耦合效应理论及方法等。

全书由贺拴海教授主编,宋一凡教授主审。长安大学赵煜教授、王钧利教授、王凌波副教授、任伟副教授、张岗副教授,西安建筑科技大学郭琦副教授、王晓明副教授分别改编或编写了第26章、第24.5节、第15章和第24章、第27章、第28章和第15.6节、第14章、第20.6节。长安大学的李源博士、刘鹏博士、骆佐龙博士、赵晓晋博士、彭晶蓉博士为本书编写收集了大量资料。书中插图由周先功博士整理绘制并进行了文字校核。人民交通出版社股份有限公司的领导及编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动,谨在此表示诚挚的感谢。书中相关新增内容亦有长期合作研究单位东南大学的叶见曙教授、黄侨教授,交通运输部公路科学研究院的张劲泉研究员、杨昀研究员,长沙理工大学的李传习教授,中交第一公路勘察设计研究院的刘世林教授级高级工程师、许宏元教授级高级工程师,港珠澳大桥管理局的苏权科教授级高级工程师、景强教授级高级工程师,招商局重庆交通科学研究院的唐光武研究员,重庆交通大学的周志祥教授、向中富教授等的研究贡献,并参考了众多文献,无论是否列出,在此一并表示衷心感谢和敬意。

由于作者水平有限,书中错误之处难免,敬请读者批评指正。来函(电、电子信件)请寄:西安市南二环路中段长安大学公路学院(邮编:710064,电话:029-82334871, E-mail: heshai@chd.edu.cn)。

作者

2017年5月于西安

第一版前言

改革开放以来,我国交通与桥梁事业获得迅速发展,桥梁建设成就斐然,桥梁工程学科整体水平已进入国际先进行列。随着建设需要,桥梁结构的研究工作亦具有与时俱进的特点,新的研究课题不断涌现,新的理论、方法、技术层出不穷。

长安大学(原西安公路交通大学、西安公路学院)从20世纪80年代初开始招收桥梁工程方向研究生。桥梁结构理论作为一门专业学位课历经变迁,从桥面板分析、桥梁上部结构分析与程序设计到桥梁结构分析,经过几代人的教学实践,修订补充,形成了桥梁结构理论课程体系。随着博士生教学和研究需要,其内容的深度不断加大,广度不断拓宽。进入20世纪90年代,随着新的科研成果大量出现,计算机的普及应用,编者着手对本课程体系又进行了大幅度调整,着重于进行科学研究的高等理论、原理、方法及复杂结构问题解决途径的阐述,并结合桥梁工程学科的发展,补充了一些新的内容,如索支承桥的计算、稳定分析、承载力分析、桥梁加固计算、桥梁控制计算及健康监测等,目的在于使桥梁工程方向的研究生打下一个坚实而宽广的从事科学研究的理论基础,供不同研究方向的读者可有选择地进行精读和研究。

本书是在长安大学研究生课程“桥梁结构理论”讲义(1997年开始试用)的基础上,经过多次调整、修订、补充,于2001年底形成初稿,并取现名。全书共8篇29章,内容仅涉及桥梁结构静力问题,包括:桥梁结构整体分析的有限元法,有限条法,能量原理及变形协调法,子结构法,材料、几何非线性分析;构造正交异性桥面板、悬臂桥面板、钢桥面板的计算;薄壁箱梁的剪力滞、约束扭转及畸变理论;混凝土结构的收缩徐变、强度、刚度、裂缝及组合结构分析理论;拱桥、斜桥、弯桥、斜拉桥、吊桥计算理论;桥梁结构的温度效应,稳定问题,承载力,加固,控制计算理论及方法等。全书由贺拴海教授主编、宋一凡教授、邬晓光教授分别编写了第29、28章。完稿后邀请了下列教授对各篇(章)进行了审核校正:浙江大学徐兴教授:第1篇的第1、2、5章;同济大学陈艾荣教授:第3、4章;长安大学宋一凡教授:第2篇的第6、7章;郝宪武教授:第8章;胡兆同教授:第9章;何福照教授:第3篇;徐岳教授:第4篇的第13、14、15章;长沙交通学院李传习教授:第16、17章;长安大学李子青教授:第5篇;黄平明教授:第6篇;北方

交通大学雷俊卿教授:第7篇;湖南大学邵旭东教授:第8篇的第25章;哈尔滨工业大学宋建华教授:第26章;长安大学胡大琳教授:第27章;贺拴海教授:第28章。哈尔滨工业大学黄侨教授:第29章。长安大学赵小星高级工程师、刘来君博士、周勇军博士、赵煜博士为本书编写提供了大量资料;书中插图由研究生张青、许世展、王海洋绘制;研究生任伟、王军、卫红蕊、吕颖钊、肖萍、陈群、周孜、许世展、牛俊武、王栋等对文字进行了校核;人民交通出版社的领导及编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动;谨在此表示诚挚的感谢。书中参考了众多文献,无论是否列出,在此一并表示衷心感谢和敬意。

由于作者水平有限,书中错误之处难免,敬请读者批评指正。来函(电、电子信件)请寄:

西安市南二环路中段长安大学公路学院(邮编:710064,电话:029-2334441, E-mail: GL05@Chd.edu.cn)

作 者

2002年8月于西安

绪论	1
本章参考文献	14

第 1 篇 桥梁结构数值分析方法

1 桥梁结构有限元分析方法	19
1.1 有限元方法及桥梁结构的数值模拟	19
1.1.1 结构的有限元分析	19
1.1.2 桥梁结构的模型化及建模方法	21
1.1.3 数值模拟方法	23
1.2 桥梁结构数值分析的单元应用	24
1.2.1 桁架结构及杆单元	24
1.2.2 梁式结构及其单元	25
1.3 复杂组合截面桥梁结构分析的虚拟层合单元	33
1.3.1 经典的三维实体等参元	33
1.3.2 退化的实体单元	36
1.3.3 三维梁单元	38
1.3.4 虚拟层合单元	39
1.3.5 桥梁结构的虚拟层合单元建模建议	42
1.3.6 箱梁结构的叠合单元法	43
1.4 单元尺寸、局部及孔道模拟	44
1.4.1 单元选择及模型尺寸	44
1.4.2 局部模拟	45
1.4.3 孔道的影响模拟	47

1.5 小结	48
本章参考文献	49
2 大跨径桥梁结构整体近似分析	50
2.1 子结构法、能量原理及变形协调法	50
2.2 桥梁结构分析的子结构法	51
2.2.1 变截面梁式结构分析	51
2.2.2 变截面连拱结构分析	57
2.2.3 分析实例	59
2.3 桥梁结构分析的最小势能原理	60
2.3.1 变截面连续梁桥分析	60
2.3.2 斜拉桥分析	63
2.4 桥梁结构分析的变形协调法	68
2.4.1 中(下)承式拱桥分析	68
2.4.2 斜拉桥分析	72
2.4.3 斜拉—自锚式悬索组合体系桥的能量原理—变形协调法分析	75
2.5 小结	81
本章参考文献	81
3 桥梁结构的非线性有限元方法	82
3.1 工程结构的非线性	82
3.1.1 结构非线性问题	82
3.1.2 桥梁结构的非线性	83
3.2 桥梁结构的材料非线性有限元方法	83
3.2.1 材料非线性问题的平衡方程	83
3.2.2 非线性问题的增量理论	84
3.2.3 材料非线性问题的迭代求解方法	88
3.3 桥梁结构几何非线性有限元方法	89
3.3.1 几何非线性问题的拉格朗日列式法	90
3.3.2 杆系结构的 U. L. 列式及其迭代求解法	92
3.3.3 平面杆、梁单元及索单元的切线刚度矩阵	93
3.3.4 轴力(弯矩)对弯曲(轴向)刚度的影响	98
3.4 活载非线性分析	100
3.5 非线性分析中的增量步长与收敛判断	101
3.5.1 增量步长	101
3.5.2 收敛判断	102

3.6 小结	103
本章参考文献	103
 第 2 篇 桥跨结构分析理论	
4 桥面板分析理论	107
4.1 桥跨结构	107
4.2 桥跨结构分析的比拟正交异性板理论	108
4.2.1 各向同性板理论	108
4.2.2 正交材料异性板理论	110
4.2.3 比拟正交异性板理论	110
4.2.4 多梁式简支梁桥比拟成正交异性板分析	115
4.3 桥面板有效宽度计算理论	120
4.3.1 板与梁的有效宽度	120
4.3.2 有效宽度的计算方法	121
4.3.3 有效宽度的规范规定及评述	126
4.4 悬臂桥面板计算理论	127
4.4.1 悬臂桥面板的有效宽度计算方法	127
4.4.2 悬臂桥面板内力计算的 Sanko-Bakht 法	129
4.4.3 悬臂桥面板计算的解析法	131
4.4.4 悬臂桥面板设计计算建议	132
4.5 小结	133
本章参考文献	133
5 钢结构桥跨计算理论	135
5.1 钢结构桥跨体系	135
5.2 钢主梁体系分析	137
5.2.1 钢梁翼缘有效宽度的小松定夫公式	138
5.2.2 钢箱梁翼缘有效宽度的简化计算	139
5.2.3 钢翼缘有效宽度的规范规定	140
5.3 钢桥面板分析的比拟正交异性板理论	141
5.4 钢桥面板分析的 Pleliken-Esslinger 法	143
5.4.1 基本原理	143
5.4.2 刚度计算	144
5.4.3 开口纵肋桥面板解析	147

5.4.4 闭口纵肋桥面板解析	152
5.5 几种特殊钢桥面板的简化分析	164
5.5.1 支承在抗弯刚度不等的横肋上的连续钢桥面板	164
5.5.2 横向非简支钢桥面板	165
5.5.3 悬臂钢桥面板	166
5.6 正交异性钢桥面板的疲劳细节分析	166
5.7 小结	169
本章参考文献	170
6 组合结构桥梁计算理论	171
6.1 桥梁组合结构	171
6.2 组合梁桥的力学特性	173
6.3 组合梁桥的荷载应力分析	175
6.3.1 换算截面特性	175
6.3.2 应力计算	176
6.4 组合梁桥的温度应力分析	177
6.4.1 不考虑钢筋影响时的温度应力	177
6.4.2 考虑钢筋影响时的温度应力	178
6.5 组合梁桥的混凝土徐变效应分析	180
6.5.1 徐变引起的内力重分配	180
6.5.2 徐变内力计算的换算截面法	186
6.5.3 上下缘不对称截面的组合梁徐变内力	188
6.6 组合梁桥的混凝土收缩内力计算	190
6.6.1 混凝土收缩引起的内力重分配	190
6.6.2 上下缘不对称截面组合梁的收缩内力	190
6.6.3 连续组合梁的混凝土收缩内力	192
6.7 连续组合梁桥特性分析	193
6.7.1 调整支座产生的预应力及其徐变内力	193
6.7.2 支点区预加应力及其徐变内力	195
6.8 组合梁桥的连接件分析	197
6.8.1 连接件的抗剪承载力	198
6.8.2 连接件的数值模拟	199
6.9 小结	200
本章参考文献	200

第3篇 薄壁箱梁分析理论

7 薄壁箱梁的弯曲理论	203
7.1 初等梁理论及箱形梁的弯曲剪应力	203
7.1.1 初等梁理论	203
7.1.2 箱形梁的弯曲剪应力	205
7.2 薄壁箱梁的剪力滞效应理论	205
7.2.1 剪力滞效应	205
7.2.2 剪力滞效应的影响	207
7.3 剪力滞效应的变分解法	208
7.3.1 一般箱梁剪力滞效应的变分解法	208
7.3.2 等厚度翼板箱梁剪力滞效应的简化变分解法	212
7.3.3 变分法求解示例	215
7.3.4 变分法数值算例	219
7.3.5 单跨梁剪力滞系数的变化	220
7.4 超静定结构的剪力滞效应解法	221
7.4.1 直接解法	221
7.4.2 肢解法	222
7.4.3 叠加原理法	223
7.5 剪力滞效应的比拟杆解法	224
7.5.1 比拟杆原理	224
7.5.2 比拟杆受力分析及平衡微分方程	225
7.5.3 三杆比拟法求解示例	228
7.6 剪力滞效应分析中几个问题的讨论	230
7.6.1 等截面直腹板箱梁的二次与四次抛物线位移函数	230
7.6.2 等截面斜腹板箱梁的剪力滞效应	230
7.6.3 变截面箱梁的三次与 m 次抛物线位移函数	231
7.6.4 负剪力滞效应	232
7.6.5 荷载横向作用位置对剪力滞效应的影响	233
7.7 小结	234
本章参考文献	234
8 薄壁箱梁的扭转理论	235
8.1 薄壁箱梁的自由扭转	235

8.1.1	单箱单室箱梁	235
8.1.2	单箱多室箱梁	236
8.1.3	分离式多室箱	236
8.1.4	纵向位移	237
8.2	薄壁箱梁的约束扭转	237
8.2.1	基本假定	237
8.2.2	约束扭转翘曲应力	238
8.2.3	约束扭转剪应力	239
8.2.4	$\beta(z)$ 函数的确定	241
8.2.5	箱梁约束扭转微分方程	243
8.3	等截面连续箱梁扭转的三翘曲双力矩方程	243
8.4	变截面箱梁约束扭转的差分法	244
8.5	小结	246
	本章参考文献	246
9	薄壁箱梁的畸变理论	247
9.1	畸变荷载	247
9.1.1	直腹板箱梁	247
9.1.2	斜腹板箱梁	248
9.2	直腹板箱梁畸变分析的静力平衡法	249
9.2.1	基本假定	249
9.2.2	各板元平面内力系分析	250
9.2.3	各板元平面外力系分析	253
9.2.4	畸变平衡微分方程	256
9.3	斜腹板箱梁畸变分析的能量变分法	257
9.3.1	畸变应变能	257
9.3.2	畸变微分方程	264
9.4	畸变微分方程的边界条件及其求解方法	265
9.4.1	边界条件	265
9.4.2	求解方法	266
9.4.3	用弹性地基梁比拟法(B. E. F)求解常截面箱梁的畸变应力	267
9.5	小结	268
	本章参考文献	268
10	薄壁箱形梁桥结构的数值分析	269
10.1	箱形梁桥结构的数值分析方法	269

10.1.1 箱形截面空间受力特性	269
10.1.2 箱形梁桥的数值分析方法	270
10.1.3 剪力滞系数与偏载系数	273
10.2 薄壁箱形梁桥的 10 自由度空间梁单元分析	274
10.2.1 位移模型及平衡方程	274
10.2.2 弯曲变形刚度	275
10.2.3 扭转变形刚度	277
10.2.4 畸变变形刚度	278
10.2.5 波形钢腹板箱梁的应用	278
10.3 宽幅薄壁箱梁桥的空间效应	287
10.3.1 单箱单室斜腹板连续箱梁桥	287
10.3.2 单箱多室斜腹板连续箱梁桥	288
10.4 大跨径变截面薄壁箱梁桥的空间效应	290
10.4.1 直线连续刚构桥	290
10.4.2 曲线连续刚构桥	294
10.5 小结	298
本章参考文献	298

第 4 篇 混凝土桥梁分析理论

11 混凝土桥梁的徐变与收缩效应分析	301
11.1 徐变与收缩机理及其影响	301
11.1.1 徐变与收缩的特性	301
11.1.2 徐变与收缩的机理及其影响因素	303
11.1.3 徐变与收缩对桥梁结构的影响	304
11.2 混凝土徐变、收缩及弹性模量的数学模型及其关系	304
11.2.1 徐变、收缩及弹性模量的数学模型	304
11.2.2 徐变、收缩的应力应变关系	311
11.3 混凝土徐变效应分析	313
11.3.1 狄辛格 (Dischinger) 法	313
11.3.2 T-B 分析法	316
11.4 混凝土徐变与收缩效应综合分析	317
11.4.1 微分方程法	317
11.4.2 代数方程法	319

11.4.3 拟弹性逐步分析法	320
11.5 混凝土徐变模式对比及其对结构的影响	321
11.5.1 预应力混凝土变截面连续箱梁桥	321
11.5.2 预应力混凝土自锚式悬索桥	325
11.6 小结	328
本章参考文献	328
12 混凝土桥梁的裂缝与刚度分析	330
12.1 混凝土的裂缝与刚度	330
12.1.1 裂缝	330
12.1.2 刚度	331
12.2 裂缝计算理论	332
12.2.1 黏结滑移理论	332
12.2.2 无滑移理论	337
12.2.3 基于试验的统计公式	338
12.2.4 有滑移—无滑移统一理论	338
12.2.5 王铁梦模型	338
12.2.6 裂缝宽度计算的规范公式及其比较	343
12.2.7 部分预应力混凝土裂缝计算方法简介	347
12.2.8 裂缝计算理论小结	350
12.3 刚度及挠度计算	351
12.3.1 刚度理论	351
12.3.2 荷载挠度计算	355
12.4 长期及反复荷载作用对裂缝及挠度的影响	355
12.4.1 长期及反复荷载作用对裂缝的影响	355
12.4.2 长期荷载作用下的刚度与挠度计算	356
12.4.3 反复荷载作用下结构的刚度与挠度计算	358
12.5 受弯钢筋混凝土构件裂缝与刚度的关系及其应用	360
12.5.1 裂缝统计参数	360
12.5.2 裂缝统计参数与截面特征参数的关系分析	361
12.5.3 刚度预测分析	361
12.5.4 承载力预测分析	363
12.6 小结	365
本章参考文献	365
13 混凝土桥梁的弹塑性数值分析	367

13.1	混凝土结构的弹塑性问题	367
13.2	混凝土的本构模型	368
13.2.1	本构模型类型	368
13.2.2	线弹性本构模型	370
13.2.3	非线性弹性本构模型	370
13.2.4	弹塑性本构模型	377
13.2.5	约束混凝土的本构模型	378
13.3	混凝土破坏准则	382
13.3.1	应力不变量与主应力	382
13.3.2	混凝土破坏形态及其描述	385
13.3.3	混凝土的屈服准则	386
13.4	混凝土桥梁结构有限元模拟方法	390
13.4.1	混凝土中的钢筋模拟	391
13.4.2	混凝土的徐变、收缩及结构温差效应的模拟	392
13.4.3	预应力的模拟	395
13.4.4	混凝土的裂缝模拟	396
13.5	钢筋混凝土桥梁弹塑性有限元分析的折减刚度法	396
13.6	小结	398
	本章参考文献	399
14	混凝土桥梁有效预应力预测理论	400
14.1	预应力损失特征与钢束分类	400
14.1.1	预应力损失计算的差异性	400
14.1.2	预应力损失的简化分析	401
14.1.3	测试钢束分类	402
14.2	考虑开裂挠曲的预应力增量的简化分析方法	405
14.2.1	等效 B 类构件比拟	405
14.2.2	消压分析法	406
14.2.3	开裂截面评估简化算法	407
14.2.4	考虑开裂挠曲的预应力增量算法	409
14.2.5	实例分析	409
14.3	钢束有效预应力预测模型	410
14.4	截面内有效预应力预测方法	412
14.4.1	变量约定	412
14.4.2	钢束间有效预应力关系	413

14.4.3	反摩阻损失简化分析	414
14.4.4	对称束预测模型	415
14.4.5	非对称束预测模型	417
14.5	波动束有效预应力沿程分布预测方法	418
14.5.1	管道综合影响系数	418
14.5.2	拟摩阻损失函数算法	420
14.5.3	波动束预测方法	422
14.6	平缓束有效预应力沿程分布预测方法	424
14.6.1	分布模式判别	424
14.6.2	平缓束预测方法	426
14.6.3	有效预应力预测分析实例	426
14.7	小结	429
	本章参考文献	430
15	混凝土桥梁结构几个复杂问题的分析方法	431
15.1	混凝土桥梁结构的复杂问题	431
15.2	变截面混凝土桥梁墩顶块空间数值模拟方法	431
15.2.1	单元选择及尺寸	431
15.2.2	模型简化与边界约束	432
15.2.3	实桥分析	433
15.3	桥梁的劲性骨架合龙段影响分析方法	438
15.3.1	桥梁的劲性骨架合龙	438
15.3.2	实例分析	439
15.4	桥梁悬臂牛腿数值分析方法	443
15.4.1	牛腿数值分析方法	443
15.4.2	实例分析	445
15.5	拓宽后新老桥梁结构相互作用分析方法	448
15.5.1	桥梁拓宽方法	448
15.5.2	收缩徐变影响的差异效应分析	449
15.5.3	下部结构沉降差异效应分析	451
15.6	混凝土水化热温度场及应力场分析方法	453
15.6.1	混凝土水化热分析的非稳定对流热传导模式	454
15.6.2	不同风速下的混凝土水化热温度变化趋势分析	454
15.6.3	混凝土浇筑过程水化热温度变化分析	456
15.6.4	采取降温措施的混凝土浇筑过程水化热温度变化分析	459