

桥梁设计算法新解

童森林 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 9 8 年 · 北 京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书为作者总结近三十年来从事桥梁设计的实践经验,在配筋计算、铁路桥梁曲线布置、城市互通式立交桥线型计算、杆系结构有限元、优化理论及图算法等方面提出了较为新颖的计算方法。可作为规范和手册中的方法补充,供桥梁设计工作者、大专院校桥梁专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

桥梁设计算法新解/童森林编著-北京:中国铁道出版社,1998.5

ISBN 7-113-02938-8

. 桥... . 童... . 桥涵工程-设计 桥涵工程-计算 .U442

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 06173 号

书 名:桥梁设计算法新解

著作责任者:童森林 编著

出版·发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:刘启山

封面设计:陈东山

印 刷:北京彩桥印刷厂

开 本:850×1168 1/32 印张:7.625 字数:197 千

版 本:1998年8月第1版 第1次印刷

印 数:1—1000 册

书 号:ISBN7-113-02938-8/TU·575

定 价:28.00 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

序

自改革开放以来,我国桥梁建设事业突飞猛进,蓬勃发展。对此,计算机的应用与推广发挥了极为重要的作用。它已深入到科研、设计、施工、管理等各个领域。实践证明,计算机不仅能极大地提高工作效率,解决许多复杂的技术难题,还能促进设计人员开拓新的结构形式,发展新的施工技术。因此,它的普及,实质上是在工程技术领域实现了一场深刻的科技革命。

目前,计算机发展迅速,日新月异,但电算应用技术的掌握,最根本的还是要通过工程实践。20多年来,铁路桥梁设计领域和其它领域一样,广泛开展了电算技术的应用,并积累了丰富的经验。及时而系统地总结这方面的宝贵经验,对进一步在铁路桥梁工程领域推广应用电算技术,提高应用水平,促进桥梁技术发展,是十分必要的。童森林高级工程师所著《桥梁设计算法新解》一书正是适应这一迫切需要而出版的。

作者1970年毕业于西南交通大学桥梁与隧道专业,现任铁道部第一设计院桥隧处副总工程师、中国铁道学会桥梁专业委员会委员、铁路高等工科院校土建类专业教学指导委员会委员。他长期工作在桥梁建设第一线,曾主持过多座大中型铁路及公路桥梁的设计工作。其中,包括宝中线的100座大中桥的CAD设计、兰新复线1622km段桥梁设计、南疆线975km桥梁设计,上海龙阳路立交及金桥立交工程设计等,因而具有非常丰富的设计工作经验。

由于作者长期以来坚持将计算机应用于桥梁设计工作中,日积月累,探索了一系列富有成效的计算方法,编写了大量的电算程序。这些算法与程序都具有极好的实用价值,也具有相当高的理论价值。内容涉及钢筋混凝土构件设计计算,铁路及公路桥梁线型布置与计算,杆系结构静、动力有限元分析,桥梁结构设计优化及

图算法等方面。现作者将它编纂成册,奉献给广大桥梁工作者,相信会受到大家的欢迎。全书理论联系实际,叙述深入浅出,是桥梁结构设计及教学人员有价值的参考书。

我与作者同在铁路系统服务,也曾长期从事桥梁电算方面的工作,深知其中的甘苦,对作者在铁路桥梁电算方面所取得的卓越成绩和锲而不舍的敬业精神很是钦佩,因此为序。

铁道部科学研究院研究员

博士生导师 潘家英

1997年11月

前 言

桥,伴随着人类历史的步伐,正在向无垠的时空延伸。桥,纵越海湾,横跨江河,普渡众生之余,额外还装点着我们共有的地球村。古代桥梁雄风犹在,现代桥梁婀娜多姿。大桥巍峨,雄姿英发;小桥秀丽,仪态万般。难怪乎世人用“流动的诗,立体的画”来勾勒桥梁的风采,民间则用“修桥铺路积功德也”来赞誉桥梁事业。有多少神话与传说在桥上演绎,有多少美丽动人的故事在桥下流淌。

作者有幸挂靠桥梁设计行业,几近30年。得益于师长的指点,在桥梁设计领域的配筋计算、铁路桥梁曲线布置、城市互通式立交桥线型计算、杆系结构有限元、优化理论及图算法这六个方面偶有心得,串之以章节,冠之以书名,草草成书,充数于市。一者算是了却作者为桥梁事业略尽绵薄之力的夙愿,二来也为桥梁界同仁提供一些“疑义相与析”的话题,亦即常言所说的抛砖引玉。

桥梁算法何止万千。由于水平所限,即使在上述六个方面,作者之管见也难免挂一漏万。可能不同的读者在不同的场合已经有了更好的解决方案,但聊以自慰的是,本书问题都是作者在桥梁设计中碰到的。本书方法都在桥梁设计中得到过应用,可以说是来之于桥,归之于桥。考虑到计算机的应用已经十分普及,有了方法(公式),编程问题不过是举手之劳,所以尽管本书方法均有计算机程序作依附,出于节省作者与读者的光阴,本书一律未附程序,从而省却连篇累牍的程序设计段落。

作为本书基础材料的有关背景论文分别得到过桥梁界前辈师长的热情指导,他们是:上海铁路局张厚衡高级工程师、北方交通大学朱国栋博士生导师,第三铁路勘测设计院已故刘锡略先生,西南交通大学强士中博士生导师、李乔博士生导师,兰州铁道学院孙遇

祺教授、王步云教授、崔文鉴教授、白迪谋副教授、长沙铁道学院陈政清博士生导师、詹振言博士生导师、裘伯永教授，第四铁路勘测设计院沈文进教授级高级工程师。本书付梓之日，作者非常感谢这些素昧平生的师长古道热肠、有求必应、甘当人梯、诲人不倦的学者风范。

特别应指出的是，著名桥梁专家、中国科学院程庆国院士偕夫人潘家英博士生导师，学贯中西，虚怀若谷，于百忙之中，联袂为本书的问世竭尽全力。既有程院士引荐于前，又有潘教授作序于后。此等殊荣，对作者、对读者均为不胜幸甚之至。

还要感谢本书所引参考文献的所有作(译)者，如蒙不弃，均被视为本书的幕后策划与场外指导。

如果本书对桥梁界同行有所帮助，当归功于前辈师长的点拨；本书难为一免的错讹之处完全归咎于作者的驽钝，并热忱欢迎及时指正。

最后，衷心感谢赞助本书出版的所有单位和个人，这种倾心科技的善举，似春风化雨，润物无声，永志不忘。

童森林

1997年11月 兰州

目 录

第一章 钢筋混凝土截面强度检算.....	1
第一节 圆形及环形截面配筋计算.....	1
(一) 问题概述.....	1
(二) 方程组的建立与讨论.....	3
(三) 计算公式的整理及计算步骤小结.....	7
(四) 若干公式推导.....	9
(五) 算 例	12
(六) 实用算法	16
第二节 矩形截面双向偏心受压配筋计算	23
(一) 问题简介	23
(二) 计算方法和步骤	24
(三) 算 例	28
(四) 问题讨论	34
第三节 圆端形截面配筋计算	36
(一) 问题概述	36
(二) 计算步骤及原理	37
(三) 计算框图	44
(四) 算 例	44
(五) 圆端形截面应力重分布系数	48
(六) 空心圆端形截面	49
(七) 基本图形的几何性质	58
参考文献	61
第二章 铁路桥梁曲线布置	63
第一节 单线铁路桥梁曲线布置	63
(一) 梁缝计算	65

(二)	偏角计算	66
(三)	总偏角	68
(四)	程序设计的若干考虑	68
第二节	双线铁路桥梁曲线布置	69
(一)	一般概念	69
(二)	拟扇形法	70
第三节	坐标法在铁路桥梁曲线布置中的应用	78
(一)	问题的提法	78
(二)	一般曲线构造简介	78
(三)	参考坐标系中有关参数方程	80
(四)	参考坐标系与局部坐标系	83
(五)	整体坐标系的引入	84
(六)	线间距 H 计算	84
(七)	线间距算例	85
(八)	偏角计算	90
参考文献	91
第三章	大型城市立交桥线型计算	92
第一节	参考坐标系下的曲线方程及其他	93
(一)	圆心坐标(O_x, O_y)	93
(二)	中线点坐标的参数(S)方程及切线角	93
(三)	偏角计算	94
(四)	法截面点参考坐标	95
(五)	边线点坐标的参数方程	96
第二节	坐标转换	96
(一)	参考坐标向局部坐标的转换	96
(二)	局部坐标与整体坐标之间的转换	97
第三节	曲线交点经纬距	97
第四节	一般直线与曲线的交点坐标	100
(一)	局部坐标系下的控制方程	100
(二)	解的存在判别	101

(三)	直线方程局部化.....	102
第五节	边缘线长度计算.....	103
第六节	算 例.....	105
参考文献	106
第四章	杆系结构有限元算法.....	108
第一节	多功能平面杆元.....	108
(一)	单元模式及基本假定.....	109
(二)	以结点位移表示的位移模式.....	109
(三)	以结点位移表示的应变、应力	112
(四)	单元刚度矩阵.....	112
(五)	等效结点力.....	114
(六)	考虑文克尔地基系数时单元刚度矩阵的修正.....	118
(七)	应用实例.....	121
第二节	Stodola 算法在平面杆系结构动力分析中的应用 ...	130
(一)	问题概述.....	130
(二)	算法原理.....	130
(三)	算法的应用.....	133
(四)	算 例.....	137
第三节	空间杆系有限元重点内容及子空间迭代法.....	144
(一)	地基反力的考虑.....	144
(二)	空间坐标旋转.....	146
(三)	单元偏转角	148
(四)	空间杆系结构静力分析参考框图.....	153
(五)	子空间迭代法.....	153
参考文献	155
第五章	优化算法.....	157
第一节	基本概念.....	158
第二节	一般描述.....	159
(一)	基本要求.....	159

(二)	选题漫谈.....	160
(三)	技巧初探.....	160
第三节	非线性约束优化常用算法.....	162
(一)	约束优化向无约束优化的转化.....	163
(二)	无约束优化常用算法.....	163
第四节	优化方法在埋台基础设计中的应用.....	173
第五节	城市地道桥挡土墙优化设计.....	179
参考文献.....		188
第六章	图 算 法	189
第一节	体积、面积算图	190
(一)	圆形基础挖基体积系数网络图.....	190
(二)	矩形基础挖基体积算图.....	191
(三)	圆形、矩形基础挖基体积网络图	192
(四)	梯形面积计算.....	196
(五)	梯形槽铺砌面积组合诺模图.....	198
(六)	锥体及路堤坡面铺砌挖基断面面积组合网络图	198
第二节	实心圆桩正截面强度曲线——极限状态法.....	199
(一)	d= 0.8m, 级钢筋, 20 号混凝土	201
(二)	d= 0.8m, 级钢筋, 20 号混凝土	201
(三)	d= 1.0m, 级钢筋, 20 号混凝土	201
(四)	d= 1.0m, 级钢筋, 20 号混凝土	201
(五)	d= 1.2m, 级钢筋, 20 号混凝土	201
(六)	d= 1.2m, 级钢筋, 20 号混凝土	201
第三节	实心圆桩正截面强度曲线——容许应力法.....	208
(一)	d= 100cm, 主+ 附, 级钢筋, 200 号混凝土	210
(二)	d= 100cm, 主+ 附, 级钢筋, 200 号混凝土	210
(三)	d= 125cm, 主+ 附, 级钢筋, 200 号混凝土	210
(四)	d= 125cm, 主+ 附, 级钢筋, 200 号混凝土	210
(五)	d= 150cm, 主+ 附, 级钢筋, 200 号混凝土	210

(六) $d = 150\text{cm}$, 主+ 附, 级钢筋, 200 号混凝土	210
参考文献.....	217
附录一 割线齿行法在求实函数零点中的应用.....	218
附录二 多功能平面杆元单元刚度矩阵显化过程.....	219
附录三 多功能平面杆元温度荷载等效结点力.....	224
附录四 自编计算程序目录(部分)	229

第一章 钢筋混凝土截面强度检算

钢筋混凝土截面配筋计算是桥梁设计人员经常碰到的检算项目之一。常见截面形状(如圆形、矩形)、常规受力状态(如外力作用在主形心轴上)的截面应力分析办法在有关规范、手册、教科书中均有详尽描述。当外力不是作用在形心轴上时(俗称斜偏心问题),截面应力分析则较为复杂。本章针对矩形截面、圆端形截面承受非对称荷载,给出的一套计算办法;对圆形截面,将大偏心受压、大偏心受拉及受弯三种受力状态用一套统一公式来描述,推导过程考虑空心截面的影响,在容许应力法范畴内进行。由于所考虑的情况较为复杂,故仅针对主要检算项目即材料正应力指标进行分析。

第一节 圆形及环形截面配筋计算

圆形及环形截面按容许应力法进行配筋计算时,公式比较复杂,计算工作量较大。流行的资料一般是将偏心受压与受弯两种受力状态分开讨论,得出两套计算公式,这就更增加了问题的复杂性:手算时要熟悉两套计算公式及图表,电算时要按两套公式编排程序。可以考虑将偏心受压、受弯乃至偏心受拉三种受力状态统一地用一套公式来描述,以期降低问题的复杂程度。

(一) 问题概述

按容许应力法进行配筋计算的原理与应力重分布的计算原理是一致的,基本出发点乃是静力平衡法则。

如图 1—1 所示,若圆(环)形截面上,轴压力为 N , 中心弯矩为 M , 则按平衡原理有:

$$dF = N \quad (1-1)$$

$$dF = M$$

式中 σ ——应力函数;
 dF ——面积元素;
 r —— dF 到形心 O 点的距离;
 \int ——积分号, 其作用范围, 对混凝土仅计受压区, 对钢筋计全部。

图 1—1 受力状态示意

关于图 1—1 的若干说明:

1. 当 $R_3 = 0$, 则为实心圆形截面的情况。

2. N 、 M 均以图示方向为正。当 $N = 0$ 时即为纯弯的情况; 当 $N > 0$ 时为偏心受压的情况; 当 $N < 0$ 时为偏心受拉的情况。

若 $M = 0$, 则为轴心受力的情况, 这种情形计算十分简单, 本文不予讨论。以下约定: $M > 0$, 当 $M < 0$ 时用它的绝对值。

3. 当 $R_3 > 0$, 即为环形截面时, $\alpha_0 = \arccos(R_3/R_1)$: 若 $\alpha_1 \leq \alpha_0$ 则中性轴在 I 区, $\alpha_3 = 0$; 若 $\alpha_1 > \alpha_0$ 则中性轴在 II 区, $\alpha_3 = \alpha_1 - \alpha_0$; 否则, $\alpha_0 < \alpha_1 < \pi - \alpha_0$, 中性轴在 III 区, $\alpha_3 = \arccos[(R_1/R_3) \cos \alpha_1]$

4. $\alpha_2 = \arccos[(R_1/R_2) \cos \alpha_1]$

5. σ_h ——受压区混凝土最大压应力;

n ——钢筋与混凝土的弹性模量之比;

σ_g ——受压区钢筋最大压应力(一般不控制), 由下式给出:

$$\sigma_g = \frac{R_2 - X}{f} n \sigma_h = \frac{R_2/R_1 - \cos \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1} n \sigma_h$$

σ_g ——受拉区钢筋最大拉应力, 由下式给出:

$$\sigma_g = \frac{R_2 + x}{f} n_h = \frac{R_2/R_1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha} n_h$$

f ——受压区高度, $f = R_1(1 - \cos \alpha)$;

x ——中性轴到形心轴的距离, 中性轴在形心轴之上时为正, 反之为负, x 由下式给出:

$$x = R_1 \cos \alpha。$$

6. σ_c ——当受压区高度 f 大于环形壁厚时, 上部交界点处混凝土压应力, 由下式给出:

$$\sigma_c = \frac{R_3 - x}{f} n_h = \frac{R_3/R_1 - \cos \alpha}{1 - \cos \alpha} n_h$$

7. 钢筋环的厚度 $t = \frac{\mu(R_1^2 - R_3^2)}{2R_2}$

其中 μ 为含钢率: $\mu = \frac{A_g}{(R_1^2 - R_3^2)}$;

A_g 为钢筋总面积。

(二) 方程组的建立与讨论

小偏心受压及小偏心受拉的受力分析比较简单, 不是我们讨论的重点内容, 以下按大偏心受压、大偏心受拉或纯弯等受力状态来讨论。

1. 初始条件

计算要求的初始条件是下述物理量为已知: R_1 、 R_2 、 R_3 、 N 、 M 、 $[\sigma_h]$ 、 $[\sigma_g]$ 、 n 、 μ_{\min} 。

其中 $[\sigma_h]$ ——混凝土的容许压应力;

$[\sigma_g]$ ——钢筋的容许应力;

μ_{\min} ——开始计算时所给的含钢率。

其他符号意义如前述, 对于弯矩 M , 若为偏心受压, 尚应考虑“增大系数”的影响。

2. 计算要求

计算结束时, 要求给出实际需要的配筋率 μ 使得下述方程组成立:

$$h \quad [\quad h \quad]$$

$$g \quad [\quad g \quad]$$

(g 一般不控制)

3. 方程组的建立

对大偏心受压、大偏心受拉或纯弯等受力状态,断面上应力分布有一个共同的特点,即中性轴在截面以内,并有部分混凝土由于“不能”承受拉应力而退出工作。

对于方程组(1—1),假定基本未知数是 h 及 i ,先按环形截面且中性轴在 i 区的模式,给出它的具体形式,再讨论对中性轴在 i 区或 i 区的应用,并讨论对实心截面的处理办法。

对于图 1—1 的空心部分以负面积进行拓补,即可得出方程组(1—1)的具体形式如下:

$$\frac{1}{3} h R_1^2 i - \frac{\cos \alpha_2}{1 - \cos \alpha_2} \cdot 2 t R_2 g - \frac{1}{3} c_r R_3^2 i = N \quad (1-2)$$

$$\frac{1}{12} h R_1^3 i + \frac{1}{1 - \cos \alpha_2} t R_2^3 g - \frac{1}{12} c_r R_3^3 i = M$$

方程组(1—2)中的每一个方程左端第一项为包括空心部分在内的受压区混凝土的影响,第二项为钢筋环的影响,第三项为空心部分负面积的影响。方程组(1—2)推导过程见第一节之(四)。这里 i 、 g 是关于 i 的函数, $i = 1$ 或 3 :

$$i = \frac{3 \sin i - 3 i \cos i - \sin^3 i}{1 - \cos i}$$

$$g = \frac{3 i - 3 \sin i \cos i - 2 \sin^3 i \cos i}{1 - \cos i}$$

i 、 g 数值见表 1—1。

将前述 c_r 、 g 的表达式代入方程组(1—2),并注意到 $\cos \alpha_2 = (R_1/R_2) \cos \alpha_1$,同时令 $k = 1 - \cos \alpha_1$,经整理得:

$$h i - \frac{6n R_2}{R_1^2} i \alpha \frac{t}{k} \cos i - \frac{R_3}{R_1} i \alpha \frac{R_3/R_1 - \cos i}{k} i^3 = \frac{3N}{R_1^2}$$

$$h i + \frac{12n R_2^3}{R_1^4} i \alpha \frac{t}{k} - \frac{R_3}{R_1} i^3 i \alpha \frac{R_3/R_1 - \cos i}{k} i^3 = \frac{12M}{R_1^3}$$

(1—3)

记常数因子:

$$R_c = \frac{R_3}{R_1} \quad P_1 = \frac{6n R_2}{R_1^2} \quad P_2 = \frac{12n R_2^3}{R_1^4}$$

$$Q_1 = \frac{R_3}{R_1}^2 \quad Q_2 = \frac{R_3}{R_1}^3$$

记变数因子:

$$T_k = \frac{t}{k} \quad R_k = \frac{R_3/R_1 - \cos \alpha}{k}$$

又记 $u_1 = 1$ $u_2 = -P_1 T_k \cos \alpha$

$u_3 = -Q_1 R_k^3$ $v_1 = 1$ $v_2 = P_2 T_k$

$v_3 = -Q_2 R_k^3$ $u = u_1 + u_2 + u_3$

$v = v_1 + v_2 + v_3$

从而方程组(1—3)可简记为:

$$\begin{aligned} {}_h u &= 3N/R_1^2 \\ {}_h v &= 12M/R_1^3 \end{aligned} \quad (1-4)$$

对于方程组(1—4), 通过消去 ${}_h$ 可得到关于 ${}_i$ 的一元非线性方程:

$$F({}_i) = \frac{u}{v} - \frac{N}{4M} R_1 = 0 \quad (1-5)$$

求解方程(1—5)可得 ${}_i$, ${}_h$ 及 ${}_g$ 由下式给出:

$$\begin{aligned} {}_h &= \frac{12M}{R_1^3 v} \quad [{}_h] \\ {}_g &= \frac{R_2/R_1 + \cos \alpha}{k} n {}_h \quad [{}_z] \end{aligned} \quad (1-6)$$

若 ${}_h$ 、 ${}_g$ 不满足要求, 则加大混凝土截面或加大 μ 值重新计算, 直至满足要求为止。若需要考虑所谓最佳配筋问题, 则需要运用优化算法, 这一问题超出了本章的讨论范围, 从略。

4. 问题讨论

(1) 当 $N = 0$, 即纯弯时, 关于 ${}_i$ 的一元非线性方程可简化为:

$$F({}_i) = u = 0 \quad (1-5)$$

(2) 当 $R_3 = 0$, 即实心截面时, $u_3 = v_3 = 0$

及 数值表

表 1—1

(rad)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	/2
	(0)	0.0064	0.0498	0.1620	0.3654	0.6693	1.0695	1.5487	2
	(0)	0.0252	0.1923	0.5999	1.2736	2.1584	3.1366	4.0627	3 / 2
(rad)	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	
	2.0794	2.6278	3.1585	3.6393	4.0448	4.3585	4.5731	4.6887	3 / 2
	4.8056	5.2831	5.4803	5.4450	5.2658	5.0407	4.8489	4.7360	3 / 2

注:当 $\alpha = 0$ 时, 及 β 函数均为“ $\frac{0}{0}$ ”型, 函数理论值由罗彼塔法则给出。

(3) 当 $R_3 > 0$, 即环形截面时: 若 $\alpha_1 > 0$ 则中性轴在 I 区, 此时 $\beta_3 = 0$, 因而 $\gamma_3 = \delta_3 = 0$, $u_3 = v_3 = 0$; 若 $\alpha_1 < 0$ 则中性轴在 II 区, 此时 $\beta_3 = \alpha_1$, 因而 $\gamma_3 = \delta_3 = \frac{\alpha_1}{2}$; 否则, $0 < \alpha_1 < \alpha_0$, 中性轴在 III 区, $\beta_3 = \arccos((R_1/R_3)\cos \alpha_1)$, γ_3 、 δ_3 由函数式计算出。

(4) 关于方程(1—5)的求解:

方程(1—5)是关于 α_1 的一元非线性方程, 手算时利用 β_3 、 γ_3 、 δ_3 数值表进行, 利用计算器(例如袖珍计算器即可)求解则比较方便。无论利用什么工具,“拟牛顿”算法是可取的, 其迭代公式为:

$$x^{(j)} = x^{(j-1)} - \frac{F(x^{(j-1)})}{F'(x^{(j-1)})} \quad (1-7)$$

$$F'(x^{(j-1)}) = \frac{F(x^{(j-1)} + \Delta x) - F(x^{(j-1)})}{\Delta x}$$

“拟牛顿”算法的计算框图可在一般计算数学教科书中找到, 此处不拟多述, 值得一提的是: 作为第一次试算用的 $\alpha_1^{(0)}$ 必须选择适当, 否则计算过程发散。通过一系列的试算, $\alpha_1^{(0)}$ 按下列算式选取是较好的:

对纯弯: $\alpha_1^{(0)} = 0.9\text{rad}$

对大偏心受压: $\alpha_1^{(0)} = (4.33 - 1.33J)$ 但不小于 0.9rad

对大偏心受拉: $\alpha_1^{(0)} = (0.457 + 0.043J)$ 但不大于 0.9rad

其中 J 为偏心率, $J = e/e_p$

$e = M/N$, 为计算偏心, 大偏心受拉时取负值;