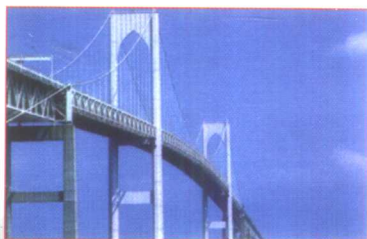




高等学校教材

大跨度桥梁结构 计算理论

李传习 夏桂云 编著
刘光栋 主审



人民交通出版社
China Communications Press

高等学校教材

Dakuadu Qiaoliang Jiegou Jisuan Lilun

大跨度桥梁结构计算理论

李传习 夏桂云 编著
刘光栋 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书论述大跨度桥梁结构分析理论及其编程原理。全书共分四章。

近二十年,我国大跨度桥梁建设进入了蓬勃发展的新时期,大跨度桥梁结构分析理论亦在不断地发展和完善。本书是作者在他人研究成果及论文、著作的基础上,结合自己在大跨度桥梁结构分析方面的教学和科研体会写作而成,融入了自己的部分研究成果。本书的理论、方法和程序已在多座桥梁中得到运用和检验。本书既有较高的理论性,又有较强的实用性,有些研究成果是首次发表。

本书可供桥梁专业设计、施工与研究人员参考,亦可作为桥隧工程专业、结构工程专业研究生和高年级本科生学习的教学参考书或教材。

图书在版编目(CIP)数据

大跨度桥梁结构计算理论 / 李传习, 夏桂云编著.

北京: 人民交通出版社, 2002.6

ISBN 7-114-04348-1

I. 大... II. ①李...②夏... III. 长跨桥—桥梁结构—结构计算 IV. U448.433

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 043243 号

高等学校教材

大跨度桥梁结构计算理论

李传习 夏桂云 编著

刘光栋 主审

正文设计: 彭小秋 责任校对: 张莹 责任印制: 杨柏力

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号 010-64216602)

各地新华书店经销

北京凯通印刷厂印刷

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 9.25 字数: 213 千

2002 年 6 月 第 1 版

2002 年 6 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—4000 册 定价: 18.00 元

ISBN 7-114-04348-1

U·03199

面向 21 世纪交通版

高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会

主任委员:王秉纲(长安大学)

副主任委员:胡长顺(长安大学)

陈艾荣(同济大学)

王 炜(东南大学)

杜 颖(人民交通出版社)

委 员:周 伟(交通部交通科学研究院)

郑健龙(长沙交通学院)

张建仁(长沙交通学院)

刘小明(北京工业大学)

梁乃兴(重庆交通学院)

周志祥(重庆交通学院)

裴玉龙(哈尔滨工业大学)

黄 侨(哈尔滨工业大学)

钟 阳(哈尔滨工业大学)

黄晓明(东南大学)

叶见曙(东南大学)

赵明华(湖南大学)

郭忠印(同济大学)

杨晓光(同济大学)

王殿海(吉林大学)

徐 岳(长安大学)

符铨砂(华南理工大学)

秘 书 长:韩 敏(人民交通出版社)

总 序

当今世界,科学技术突飞猛进,全球经济一体化趋势进一步加强,科技对于经济增长的作用日益显著,教育在国家经济与社会发展中所处的地位日益重要。进入新世纪,面对国际国内经济与社会发展所出现的新特点,我国的高等教育迎来了良好的发展机遇,同时也面临着巨大的挑战,高等教育的发展处在一个前所未有的重要时期。其一,加入 WTO,中国经济已融入到世界经济的发展进程之中,国家间的竞争更趋激烈,竞争的焦点已更多地体现在高素质人才的竞争上,因此,高等教育所面临的是全球化条件下的综合竞争。其二,我国正处在由计划经济向社会主义市场经济过渡的重要历史时期,这一时期,我国经济结构调整将进一步深化,对外开放将进一步扩大,改革与实践必将提出许多过去不曾遇到的新问题,高等教育面临加速改革以适应国民经济进一步发展的需要。面对这样的形势与要求,党中央国务院提出扩大高等教育规模,着力提高高等教育的水平与质量。这是为中华民族自立于世界民族之林而采取的极其重大的战略步骤,同时,也是为国家未来的发展提供基础性的保证。

为适应高等教育改革与发展的需要,早在 1998 年 7 月,教育部就对高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订。在新的专业目录中,土木工程专业扩大了涵盖面,原先的公路与城市道路工程、桥梁工程、隧道与地下工程等专业均纳入土木工程专业。本科专业目录的调整是为满足培养“宽口径”复合型人才的要求,对原有相关专业本科教学产生了积极的影响。这一调整是着眼于培养 21 世纪社会主义现代化建设人才的需要而进行的,面对新的变化,要求我们对人才的培养规格、培养模式、课程体系和内容都应作出适时调整,以适应要求。

根据形势的变化与高等教育所提出的新的要求,同时,也考虑到近些年来公路交通大发展所引发的需求,人民交通出版社通过对“八五”、“九五”期间的路桥及交通工程专业高校教材体系的分析,提出了组织编写一套面向 21 世纪的具有鲜明交通特色的高等学校教材的设想。这一设想,得到了原路桥教学指导委员会几乎所有成员学校的广泛响应与支持。2000 年 6 月,由人民交通出版社发起组织全国面向交通办学的 12 所高校的专家学者组成面向 21 世纪交通版高等学校教材(公路类)编审委员会,并召开第一次会议,会议决定着组织编写土木工程专业具有交通特色的道路专业方向、桥梁专业方向以及交通工程专业教材。会议经过充分研讨,确定了包括基本知识技能培养层次、知识技能拓宽与提高层次以及教学辅助层次在内的约 130 种教材,范围涵盖本科与研究生用教材。会后,人民交通出版社开始了细致的教材编写组织工作,经过自由申报及专家推荐的方式,近 20 所高校的百余名教授承担约 130 种教材的主编工作。2001 年 6 月,教材编委会召开第二次会议,全面审定了各门教材主编院校提交的教学大纲,之后,编写工作全面展开。

面向 21 世纪交通版高等学校教材编写工作是在本科专业目录调整及交通大发展的背景下展开的。教材编写的基本思路是:(1)顺应高等教育改革的形势,专业基础课教学内容实现与土木工程专业打通,同时保留原专业的主干课程,既顺应向土木工程专业过渡的需要,又保持服务公路交通的特色,适应宽口径复合型人才的需要。(2)注重学生基本素质、基本能

力的培养,将教材区分为二个主层次与一个辅助层次,即基本知识技能培养层次与知识技能拓宽与提高层次,辅助层次为教学参考用书。工作的着力点放在基本知识技能培养层次教材的编写上。(3)目前,中国的经济发展存在地区间的不平衡,各高校之间的发展也不平衡,因此,教材的编写要充分考虑各校人才培养规格及教学需求多样性的要求,尽可能为各校教学的开展提供一个多层次、系统而全面的教材供给平台。(4)教材的编写在总结“八五”、“九五”工作经验的基础上,注意体现原创性内容,把握好技术发展与教学需要的关系,努力体现教育面向现代化、面向世界、面向未来的要求,着力提高学生的创新思维能力,使所编教材达到先进性与实用性兼备。(5)配合现代化教学手段的发展,积极配套相应的教学辅件,便利教学。

教材建设是教学改革的重要环节之一,全面做好教材建设工作,是提高教学质量的重要保证。本套教材是由人民交通出版社组织,由原全国高等学校路桥与交通工程教学指导委员会成员学校相互协作编写的一套具有交通出版社品牌的教材,教材力求反映交通科技发展的先进水平,力求符合高等教育的基本规律。各门教材的主编均通过自由申报与专家推荐相结合的方式确定,他们都是各校相关学科的骨干,在长期的教学与科研实践中积累了丰富的经验。由他们担纲主编,能够充分体现教材的先进性与实用性。本套教材预计在二年内完全出齐,随后,将根据情况的变化而适时更新。相信这批教材的出版,对于土木工程框架下道路工程、桥梁工程专业方向与交通工程专业教材的建设将起到有力的促进作用,同时,也使各校在教材选用方面具有更大的空间。需要指出的是,该批教材中研究生教材占有较大比例,研究生教材多具有较高的理论水平,因此,该套教材不仅对在校学生,同时对于在职学习人员及工程技术人员也具有很好的参考价值。

21世纪初叶,是我国社会经济发展的重要时期,同时也是我国公路交通从紧张和制约状况实现全面改善的关键时期,公路基础设施的建设仍是今后一项重要而艰巨的任务,希望通过各相关院校及所有参编人员的共同努力,尽快使全套面向21世纪交通版高等学校教材(公路类)尽早面世,为我国交通事业的发展做出贡献。

面向21世纪交通版
高等学校教材(公路类)编审委员会
人民交通出版社
2001年12月

前 言

改革开放以来,随着我国经济的发展,预应力混凝土桥梁修建的跨度愈来愈大,数量愈来愈多。在这个过程中,长沙交通学院从20世纪80年代中期就开始研究大跨度预应力混凝土桥梁计算所涉及的主要问题,并取得了可喜的成果。其中,“大跨度预应力混凝土桥梁施工控制的仿真计算与质量监控研究”获2001年湖南省科技进步一等奖,“部分预应力混凝土截面设计原理研究”获1995年交通部科技进步二等奖,“佛开高速公路九江大桥大跨度预应力混凝土连续梁桥工程技术研究”获2000年广东省科技进步二等奖。这些成果都是集体智慧的结晶,倾注了合作单位和长沙交通学院桥梁与隧道工程学科全体教师的辛勤劳动与心血。

在上述应用和研究的基础上,本书作者收集了大量的资料,编写了长沙交通学院内部研究生教材《高等桥梁结构理论》。经过两年的试用,在多方面的鞭策和支持下,作者对该内部教材进行充实、完善和去粗存精,完成了本书的写作。

全书共分四章。第一章“超静定混凝土桥梁非直接荷载的效应分析”,介绍预加应力、混凝土收缩徐变、基础沉降、温度变化等非直接荷载的特点及其对大跨度桥梁结构力学性能的影响和分析方法。

第二章“桥梁节段施工全过程分析通用程序的编制原理”,介绍桥梁节段施工全过程分析通用程序的编制原理和方法,主要涉及《公路桥梁设计规范》徐变系数递推计算、组合截面收缩和徐变分析、预应力等效节点荷载计算、桥梁节段施工分析通用程序编制原理等特殊问题。

第三章“斜拉桥计算”,介绍斜拉索修正弹性模量计算公式、斜拉桥合理成桥内力确定、施工张拉力计算、前支点挂篮索力确定及斜拉索力学状态和特征参数的计算。

第四章“大跨度桥梁的几何非线性分析”,介绍大跨度桥梁的几何非线性分析、描述几何非线性刚度矩阵和几何非线性平衡方程的求解方法。

全书前三章由李传习编写,第四章由李传习、夏桂云共同编写。

本书各章内容相对独立,读者可根据需要分章阅读。

作者有幸主持了岳阳洞庭湖三塔斜拉桥的施工控制、广东佛陈大桥钢管混凝土系杆刚架拱桥系杆换索工程控制等实桥科研课题工作,并参与建设;有幸参加了广东佛开高速公路九江大桥和虎门大桥工程太平大桥等工程的建设与科研工作。正是因为这些工作和教学的需要,才使作者在他人研究的基础上,不断地进行消化和探索,才有了本书写作的基础。作者感谢为本书提供写作基础的前辈、专家和同行,感谢书中所列参考文献的作者。

郑丙华、童林等同学为本书的录入、绘图付出了辛勤劳动。张建仁教授、卢毅副研究员等始终关注本书的编写工作。恩师刘光栋教授在百忙之中审阅了全书,并提出了宝贵意见。人民交通出版社韩敏等同志为本书的出版付出了辛勤劳动。本书还得到了湖南省教育厅学位与研究生教育教研项目的资助。在此,一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促,加上作者水平有限,书中一定存在着缺点和错误,恳请专家和读者批评指正。

作者

2002年4月7日于长沙

目 录

第一章 超静定混凝土桥梁非直接荷载的效应分析	1
1.1 预加力效应分析	1
1.1.1 用力法求解预加力次力矩	2
1.1.2 用等效荷载法求解预加力的总预矩	3
1.2 徐变、收缩效应分析	5
1.2.1 混凝土徐变和收缩的概念	5
1.2.2 徐变系数的计算理论和公式	8
1.2.3 徐变效应分析	12
1.2.4 收缩引起的次内力计算	19
1.3 预应力混凝土连续梁因基础沉降引起的次内力计算	19
1.4 混凝土桥梁的温度效应理论	20
1.4.1 混凝土结构的温度场	20
1.4.2 温度荷载	26
1.4.3 温度应力的计算	30
本章参考文献	31
第二章 桥梁节段施工全过程分析程序的编制原理	32
2.1 概述	32
2.2 徐变系数和徐变变形计算递推公式	32
2.3 组合截面收缩徐变内力的计算原理	34
2.3.1 概述	34
2.3.2 二次组合截面的受力分配	35
2.3.3 组合截面收缩应力重分布计算	36
2.3.4 组合截面因徐变导致的应力重分布计算	36
2.4 预应力等效节点荷载	48
2.4.1 弹性变形及徐变变形等引起的预应力损失	48
2.4.2 预应力等效结点荷载的计算	49
2.5 节段施工桥梁通用程序设计的方法	51
本章参考文献	54
第三章 斜拉桥计算	55
3.1 斜拉索的修正弹性模量	55
3.2 斜拉桥合理成桥受力状态确定	59
3.2.1 概述	59
3.2.2 最小弯曲能量原理法	60
3.2.3 分步算法	61

3.2.4 影响矩阵法	65
3.3 施工张拉力和预拱度的计算	67
3.3.1 概述	67
3.3.2 倒拆法	69
3.3.3 正装迭代法	70
3.3.4 主梁立模标高或制作线形的确定	71
3.4 前支点挂篮索力范围的确定	72
3.5 斜拉索特征参数的计算	75
本章参考文献	86
第四章 大跨度桥梁的几何非线性分析	88
4.1 概述	88
4.2 几何非线性分析的有限元方法	89
4.2.1 带有动坐标的迭代法	89
4.2.2 几何非线性分析问题的一般性讨论	91
4.2.3 总体拉格朗日列式法(T.L列式法)	93
4.2.4 修正的拉格朗日列式法(U.L列式法)	93
4.2.5 T.L列式和 U.L列式的异同及适用范围	94
4.3 桥梁结构分析常用单元的切线刚度矩阵	95
4.3.1 平面梁单元的切线刚度矩阵	95
4.3.2 平面柔索单元的切线刚度矩阵	98
4.4 非线性方程的求解	102
4.5 稳定函数法	105
4.6 活载几何非线性分析	113
本章参考文献	113
附录 BR-CAL(V1.0)原始数据文件的格式(即用户手册)	115

第一章 超静定混凝土桥梁非直接荷载的效应分析

在本章,将对结构必然产生支座反力的荷载称为直接荷载,如混凝土桥梁承受的自重、停放在结构上的设备或附属物的重量、车辆、人群、风、雪、地震等;将对静定结构不产生支座反力的荷载称为非直接荷载,如承受的预加力、基础变位、温度变化、混凝土收缩与徐变等。混凝土桥梁结构的直接荷载效应问题属于普通结构力学问题,有许多文献^[1~2]加以讨论,本章不再赘述。

超静定混凝土桥梁的非直接荷载效应问题在其各截面内力已知后,即变为静定混凝土桥梁的非直接荷载效应问题。由于静定混凝土桥梁的非直接荷载效应问题相对简单,本章将着重讨论预加力、基础变位、温度变化、混凝土收缩与徐变等四种非直接荷载作用下,超静定结构内力的求解问题。

预加力、基础变位、温度变化、混凝土徐变与收缩等非直接荷载引起结构强迫变形,从而在多余约束处产生多余约束力,引起结构的附加内力,这部分内力称为结构的次内力(或二次力)。超静定混凝土桥梁的荷载效应求解问题主要是结构次内力的求解问题。在本章求次内力主要采用“力法+叠加”原理,一般步骤如下:

- (1) 选取基本结构, 标出多余力;
- (2) 由变形协调条件, 写出力法典型方程;

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_{11}x_1 + \delta_{12}x_2 + \cdots + \delta_{1n}x_n + \Delta_{1p} = 0 \\ \delta_{21}x_1 + \delta_{22}x_2 + \cdots + \delta_{2n}x_n + \Delta_{2p} = 0 \\ \qquad \qquad \qquad \dots \\ \delta_{n1}x_1 + \delta_{n2}x_2 + \cdots + \delta_{nn}x_n + \Delta_{np} = 0 \end{array} \right.$$

(3) 求出主系数(δ_{ii})和副系数 $\delta_{ij}(i \neq j)$, 主系数和副系数统称为常变位系数, 可用虚功原理求出;

(4) 求出自由项(也称载变位) $\Delta_{ip}(i=1, \dots, n)$, 该自由项是由产生次内力的因素(预加力、基础变位、温度变化、混凝土收缩和徐变等)所引起。知道了产生自由项的原因不难由虚功原理求出自由项;

- (5)解力法典型方程,求出多余力;

(6)由平衡条件求出荷载和多余力作用下各截面内力,按平衡条件求出多余力下各截面内力即为次内力。

以上是一般步骤和原理,后面分析各种不同因素引起的次内力时,需进一步具体化。

显然,由次内力(由多余力引起)的概念知道结构次内力的共同特征为:次弯矩在梁内的分布是线性的。

1.1 预加力效应分析

预加力不仅引起结构的变形,而且使混凝土截面的轴力和弯矩发生变化,对于超静定桥梁

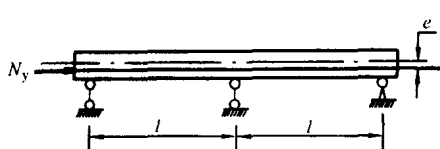


图 1-1-1 连续梁的预加力

结构还引起多余约束力。为了分析预加力的效应,需引入次力矩、初预矩、总预矩三个概念。

次力矩:由多余约束力或次反力引起的力矩称为次力矩。

初预矩:如图 1-1-1 所示,初预矩 M_0 为有效预应力与偏心距的乘积,即:

$$M_0 = -N_y e$$

式中: N_y ——梁截面的有效预应力值;

e ——预加力 N_y 的偏心距。在中性轴之上为负,之下为正。

总预矩:预加力引起的由截面的混凝土部分承担的弯矩称为总预矩。

显然,总预矩为初预矩与次力矩的叠加。在初预矩求得后,总预矩、次力矩只要求出其一,另一个也就能方便求得。有了上述的概念,预加力效应问题就转化为次力矩或总预矩的求解问题。可用后述的力法或等效荷载法求解。

1.1.1 用力法求解预加力次力矩

下面利用前述的原理与步骤分析如下两种情况下的次力矩。

(一)直线配筋

已知:两跨等截面连续梁,形成后,施加预应力。有效预应力值为 N_y ,且沿梁长不变,偏心距为 e (如图 1-1-2a),求总预矩 M_N 。

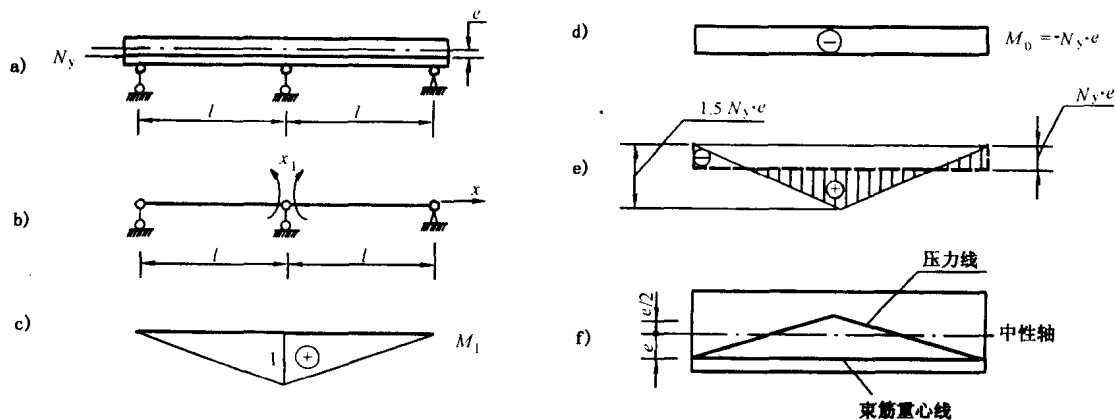


图 1-1-2 直线配筋连续梁预加力的总预矩

求解:

(1)取简支梁为基本结构(图 1-1-2b),多余力为 x_1 ;

(2)写出力法方程:

$$x_1 \delta_{11} + \Delta_{1N} = 0 \quad (1-1-1)$$

(3)求 δ_{11} 、 Δ_{1N} :

①求 δ_{11}

a. 先作 $\overline{M}_1$ 图(如图 1-1-2c);

b. 求 a_1 :

$$\delta_{11} = \int \frac{\overline{M}_1^2}{EI} dx = \frac{1}{EI} 2 \left[\frac{1}{2} l \frac{2}{3} \right] = \frac{2l}{3EI} \quad (1-1-2)$$

②求 Δ_{IN}

a. 先作预加力引起基本结构的内力图 M_0 (如图 1-1-2d);

b. 由虚功原理求 Δ_{IN} :

$$\Delta_{IN} = \int \frac{\bar{M}_1 M_0}{EI} dx = \frac{2}{EI} \left[\left(\frac{1}{2} l \right) (-N_y e) \right] = -\frac{N_y e l}{EI} \quad (1-1-3)$$

(4) 由式(1-1-1)求 x_1 , 将 δ_{11} 、 Δ_{IN} 的表达式(1-1-2)、式(1-1-3)代入式(1-1-1), 求得:

$$x_1 = -\frac{\Delta_{IN}}{\delta_{11}} = \frac{3}{2} N_y e \quad (1-1-4)$$

(5) 根据叠加原理(也可根据平衡条件)求各截面内力(如图 1-1-2e):

$$M_N = M_0 + x_1 \bar{M}_1 = -N_y e + \frac{3}{2} N_y e \bar{M}_1 \quad (1-1-5)$$

混凝土压力线与梁轴线之间的偏离值为 y (在梁轴之上为正) (如图 1-1-2f):

$$y = \frac{M_N}{N_y} = -e + \frac{3}{2} e \bar{M}_1 \quad (1-1-6)$$

(二)曲线配筋

情况 1: 已知, 如图 1-1-3 的两跨等截面连续梁, 形成后, 施加预应力。其束筋两端通过截面重心, 在中支点预应力束筋偏心距为 e ; 在两跨中间, 束筋矢高为 f_1 、 f_2 。沿梁轴分量预应力值 N_y 沿梁长设为常数。求预应力引起的次内力。

该种情况的求解过程和方法与直线配筋相同, 只是 Δ_{IN} 的表达式有所不同, 结果也就不同。

情况 2: 与情况 1 基本相同, 只是束筋重心线在两端偏心距不为零, 而分别为 e_1 、 e_2 。该种情况的求解过程和方法与直线配筋的求解过程和方法也相同。

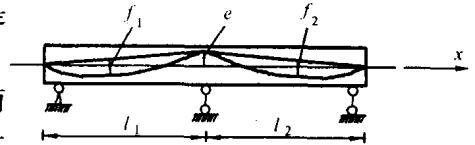


图 1-1-3 曲线配筋连续梁

对于变截面连续梁、多跨连续梁、其他超静定结构等情况的次内力的求解, 也均可采用力法原理求解, 其计算步骤与直线配筋的求解过程相同。

1.1.2 用等效荷载法求解预加力的总预矩

(一)基本思想

用等效荷载法求解预加力的总预矩的基本思想为: 把预加力对混凝土的作用用等效荷载的形式来替代, 然后求这个等效荷载作用下结构的弯矩, 即是预加力的总预矩。

等效替代原则为: 预加力引起基本结构的(混凝土承担的)弯矩(图)与等效荷载引起基本结构的弯矩(图)相同。基本结构可取为静定结构, 预加力引起静定结构的弯矩即为初预矩 $M_0 = -N_y e$ 。之所以可以采取弯矩(图)相同的等效替代原则, 是因为不计轴向、剪切变形对变位的影响, 且不考虑扭转(是直梁桥)。显然, 轴力、剪力则不能用此法计算。

(二)求等效荷载的方法:

$$q = Q_0' = M_0'' \quad (1-1-7)$$

式中: q 为等效荷载, 它垂直梁轴方向且为分布载荷; M_x 为初预矩。

(三)用等效荷载法求解预加力总预矩的步骤:

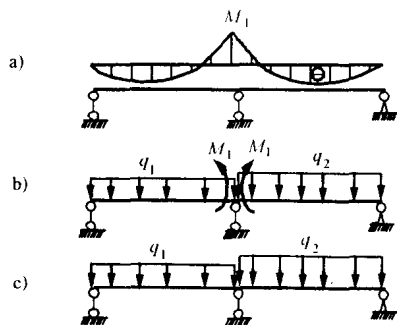
(1) 作出预加力引起的基本静定结构(混凝土部分)的弯矩图(即初预矩图);

(2)求等效荷载,使同样基本结构在等效荷载作用下的弯矩图与初预矩图相同。为此应画出等效荷载图;

(3)求出等效荷载作用所引起的原结构弯矩,即总预矩。求解方法有力法、位移法、力矩分配法、影响线法等结构力学一般方法。

(四)几种初预矩图的等效荷载

根据等效荷载引起基本静定结构的弯矩图与初预矩图相同的原则,可确定如下情况下的等效荷载。



(1)初预矩图为二次抛物线或圆弧线,等效荷载为均布竖向荷载(见图 1-1-4)。

a. 初预矩图为二次曲线;

b. 求等效荷载图(可取双跨简支梁为基本结构求得等效荷载);

c. 等效荷载作用于原结构。

显然,图 1-1-4b 中的一对力偶 M_1-M_1 (作用于同一点)对连续梁(图 1-1-4c 所示)的作用相互抵消。故有图 1-1-4c 的等效荷载。即图 1-1-4c 所示等效荷载下的弯矩图与具有图 1-1-4a 所示的初预矩图的预应力作用下的混凝土梁承担的弯矩(总预矩)一致。同样,分析可以证明如下结论:

图 1-1-4 二次抛物线初预矩图的等效荷载

的弯矩(总预矩)一致。同样,分析可以证明如下结论:

结论 1:等效荷载值只与初预矩在跨中的形状和初预矩在梁端的大小有关,而与初预矩在中间支承位置的大小无关。分析如下:

a. 设初预矩图 M_0 如图 1-1-5a;

b. 求等效荷载图(基本结构)(如图 1-1-5b);

$q = M_0''$ ——与 M_0 形状有关(二次导数);

$\left. \begin{matrix} M_1 \\ M_3 \end{matrix} \right\}$ ——与梁端初预矩值相同;

M_2 ——与支点处的预矩值相等;

c. 将等效荷载作用于原结构上, $M_2 - M_2$ 相互抵消,故有结论 1。

如果预应力值 N_y 沿跨长不变(或者计算的总预矩值可以认为不变),则由 $M_0 = -N_y e$ 和结论 1 可得结论 2:

结论 2:当 N_y 沿跨长不变,等效荷载值只与束筋在跨中的形状和在梁端的偏心矩有关,而与束筋在中间支承点上的偏心矩无关。

(2)初预矩图为折线形,端支承处为零,等效荷载为集中力,作用在折线的转折点(顶点处)。

(3)初预矩图为矩形(如图 1-1-6a),等效荷载为一对力偶,作用在矩形的两端点。

a. 初预矩图(如图 1-1-6a);

b. 求等效荷载图(取静定基本结构)(如图 1-1-6b);

c. 等效荷载作用于原结构(如图 1-1-6c)。

由结论 2“当 N_y 沿梁长方向不变(或者可以认为不变时),等效荷载仅与束筋在梁端的偏心矩和束筋在跨内的形状有关,而与束筋在中间支承上的偏心矩无关”可知:当束筋在梁端偏心矩和在跨内形状不变,而只改变束筋在中间支点上的偏心矩,则梁(混凝土部分)内总预矩不

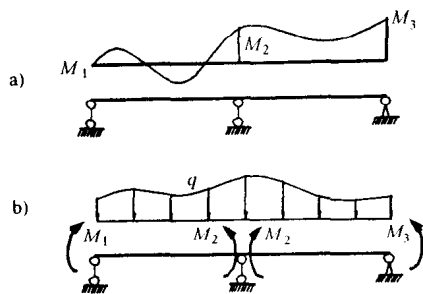


图 1-1-5 一般曲线初预矩图的等效荷载

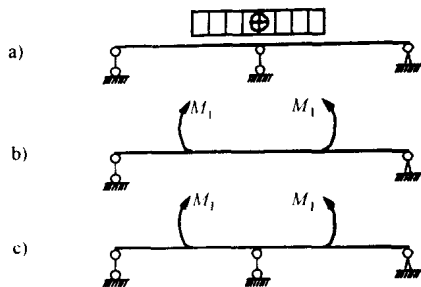


图 1-1-6 矩形初预矩图的等效荷载

变,梁内的混凝土压力线也不变(因为等效荷载不变,等效荷载引起的弯矩也不变)。这个结论称为线性转换原则。这个原则为预应力混凝土超静定结构设计中预应力束筋的布置提供了方便,它允许在不改变结构内混凝土压力线位置的条件下调整力筋合力线的位置,以适应结构构造上的要求(见图 1-1-7)。

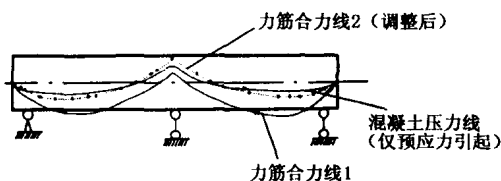


图 1-1-7 预应力束筋合力线调整

1.2 徐变、收缩效应分析

混凝土徐变与收缩效应分析,是混凝土桥梁结构设计计算中的一项重要内容。徐变、收缩对混凝土桥梁的影响,时间跨度大且与结构形式、构件截面组成方式,以及施工内容等因素有关。混凝土的徐变与收缩对大跨度桥梁的变形和内力影响较大,尤其是采用悬臂施工方法时,混凝土龄期短,徐变、收缩效应更加明显。在钢筋混凝土和预应力混凝土中,随时间而增加的混凝土徐变和收缩变形受到内部钢筋的约束将导致应力重分布。悬臂施工的预应力混凝土结构在施工过程中发生体系转换时,前期结构继承下来的应力状态所产生的徐变变形增量受到后期结构的约束,导致内力重分布。由于结构不对称或悬臂施工的进度不同,从而使徐变、收缩发展的过程不同,使左右两半跨产生的挠度和转角不同,如果不能预先准确地计入徐变、收缩效应,并采取相应措施,将导致合龙困难。因此,选择逼近实际的徐变和收缩分析模式,合理地进行徐变、收缩效应分析,从而正确地考虑徐变与收缩的影响非常必要。

人们对混凝土收缩与徐变现象的认识始于 20 世纪初,对这种现象的系统研究始于 20 世纪 30 年代,混凝土徐变、收缩理论应用于实际结构则更晚。直到 20 世纪 40 年代后期,多数设计人员还认为混凝土收缩、徐变是一个单纯的属于材料科学的学术问题。经过几十年的研究,人们对徐变和收缩的认识在不断提高,徐变、收缩理论在不断发展,其效应的分析方法在不断地改进。目前,国内外对预计混凝土徐变形成了多种理论,提出了各种不同的计算模式,常用的模式有 ACI、CEB-FIP、BP 和 BP2 等。结构的徐变效应分析方法大体上可以归结为 4 种:狄辛格方法、扩展狄辛格方法、换算弹性模量法和初应变法。

1.2.1 混凝土徐变和收缩的概念

(一)轴心受压混凝土柱体的变形性质

徐变和收缩是混凝土粘弹性体的两种与时间有关的变形性质。下面用图 1-2-1 来说明混凝土柱体

在加载—卸载整个过程的变形情况。如图 1-2-1a 所示,一混凝土柱体,在龄期 τ_0 施加荷载 P ,该荷载持续作用于柱体上至时间 τ_1 ,然后卸去荷载。经量测,该柱体的变形过程如图 1-2-1b 所示。

其中: ϵ_s ——收缩应变,不因是否作用荷载,也不因荷载大小,小而变化。对于一定的混凝土结构而言,它只与时间 t (距硬化起始时刻) 有关。它是相对于硬化开始时的结构所发生的应变;

ϵ_e ——瞬时弹性应变 ($t = \tau_0$ 和 $t = \tau_1$ 时相同), $\epsilon_e = \frac{\sigma}{E}$;

ϵ_v, ϵ_f ——滞后弹性应变和屈服应变。荷载在 $t = \tau_1$ 时卸去,混凝土柱体除了恢复瞬时弹性应变外,还随时间恢复了一部分附加应变。这部分附加应变即是滞后弹性应变。残留的不可恢复的应变即屈服应变 ϵ_f (见图 1-2-1b);

ϵ_b ——总应变, $\epsilon_b = \epsilon_s + \epsilon_e + (\epsilon_v + \epsilon_f)$;

ϵ_c ——徐变应变, $\epsilon_c = \epsilon_v + \epsilon_f = \epsilon_b - \epsilon_s - \epsilon_e$,它与应力的大小有关,随应力的增大而增大,随应力持续时间的增加而增加。

试验表明,在长期荷载作用下,加载初期徐变应变增长较快,后期增长较慢,几年以后就基本停止增长。结构的累计徐变变形可以是同样应力下弹性变形的 1.5~3 倍或更大。

(二) 徐变 (ϵ_c) 曲线与收缩 (ϵ_s) 曲线的影响因素

徐变、收缩的机理在于混凝土水化水泥浆的物理结构,而不在于水泥的化学性质。化学性质截然不同的水泥制造的混凝土,其徐变、收缩的机理在本质上是—样的。

混凝土的收缩机理可以归纳为:

(1) 自发收缩。这是一种在—水分没有转移的情况下,水泥和水起化学反应生成水泥水化物时体积的缩小。这种收缩的量值较小;

(2) 干燥收缩。这是混凝土内部吸附水由于蒸发等原因而消失所造成的体积缩小。这是混凝土收缩应变的主要部分;

(3) 碳化收缩。由水泥水化物与空气中的二氧化碳发生化学反应而产生。碳化收缩是在不久前才发现的现象。

混凝土的徐变机理迄今还没有—种能被广泛接受的认识。美国 ACI-209 委员会在 1972 年的报告中将徐变机理分为:

(1) 在应力和吸附水层润滑的共同作用下,水泥胶凝体的滑动或剪切所产生的粘稠变形;

(2) 在应力作用下,由于吸附水的渗流或层间水转动而导致的紧缩;

(3) 水泥胶凝体对骨架弹性变形的约束作用所引起的滞后弹性应变;

(4) 局部发生微裂及结晶破坏以及重新结晶与新的连接所产生的永久变形。

根据混凝土徐变、收缩机理,可以分析出它们的主要影响因素。徐变曲线的影响因素可以归纳为以下 5 种,即:

- | | |
|------------------------|----------------|
| (1) 混凝土的组成材料、配合比; | } 构件本身和环境条件及龄期 |
| (2) 构件周围环境的温度、湿度、养护条件; | |
| (3) 构件的截面面积; | |
| (4) 混凝土的龄期; | |

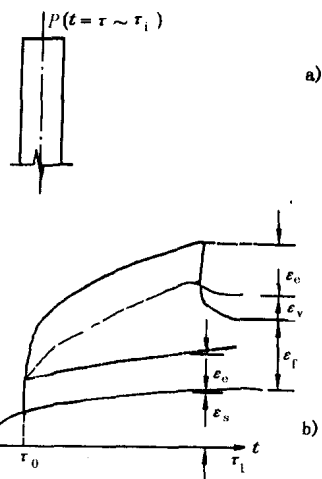


图 1-2-1 混凝土柱体的变形

(5)应力的大小和性质—— $\left\{ \begin{array}{l} \text{徐变线性理论} \\ \text{徐变非线性理论} \end{array} \right\}$ 外荷载等。

收缩曲线的影响因素主要有3种,即上述的(1)、(2)、(3)。各种影响因素的影响分述如下:

(1)水泥品种

一般情况下,水泥的化学成分对混凝土收缩无影响。但水泥的石膏不足会导致较大的收缩。个别品种水泥制作的混凝土徐变较大,如火山灰水泥。

(2)水灰比、水泥用量、含水量

在单位体积混凝土的水泥用量相同时,水灰比愈大则收缩愈大。当含水量不变时,单位体积混凝土的水泥用量愈大则收缩愈大。在其它条件相同时,混凝土的徐变随水灰比的增大而增大。

(3)骨料

在混凝土内部,骨料对水泥石的收缩和徐变起制约作用。制约作用的大小与骨料所占的份量及其弹性模量有关。普通的骨料一般不发生收缩及徐变,但轻质骨料和吸水性较大的骨料,由于含水量较大、空隙率较高、弹性模量较低等将增加混凝土的收缩和徐变量。

(4)周围介质的温度、湿度和加载龄期

周围介质的相对湿度对混凝土的收缩和徐变均有显著影响。湿度愈大,吸附水的蒸发量愈小,水泥的水化程度愈高,水泥胶凝体的密度也愈高,收缩和徐变均将减小。相对湿度对加载早期的徐变影响更大。介质的温度对混凝土收缩影响不大,对混凝土徐变有显著影响。大多数学者认为,随介质温度升高,徐变率将加大,温度在 $20^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 之间以 71°C 徐变率最大,随后又开始下降。加载龄期对混凝土徐变有显著影响,加载龄期愈早,水化愈不充分,强度愈低,混凝土的徐变也就愈大。

(5)养护条件

采用蒸汽养护或高压蒸汽养护,有利于保证水泥水化的湿度和温度,有利于混凝土强度的形成和水泥胶凝体密度的提高。因而,能大幅度减少收缩,并有利于徐变的减少。

(6)构件尺寸

构件尺寸决定了介质温度和湿度影响混凝土体内温度和水分逸出的程度,但当混凝土与环境达到湿度平衡时,尺寸效应将消失。试验表明,当构件尺寸超过 0.9m 时,尺寸因素可以忽略不计。

(7)混凝土的应力

试验表明,当压应力小于混凝土强度的50%时,徐变应变可以被认为与所施加的应力具有线性关系。超过这一应力,将导致非线性关系。

由此可见,影响徐变和收缩的因素十分复杂,而且,这些因素,连同它们产生的结果本身都是随机变量,其变异系数常达到 $15\% \sim 20\%$ 。因而,要精确地计及徐变和收缩对结构的影响是十分困难的。计及徐变和收缩对结构影响的误差总是存在的,问题是如何降低这些误差。对于一些特别重要的工程,应通过模型试验或实桥测量的方法来调整计算中采用的参数,降低这些误差,以提高计算结果与实际的接近程度。

(三)混凝土徐变和收缩对桥梁结构的影响

(1)结构在受压区的徐变和收缩会引起变形的改变(增加);

(2)偏压柱由于徐变使弯曲增加,增大了初始偏心,降低柱的承载能力;

- (3) 预应力混凝土构件中, 收缩和徐变导致预应力损失;
- (4) 结构构件截面, 如为组合截面, 收缩徐变会使截面应力重分布;
- (5) 对于超静定结构, 收缩徐变将导致内力重分布;
- (6) 收缩使较厚构件的表面开裂。

(四) 徐变线性理论与徐变非线性理论

(1) 徐变线性理论的基本假定: 徐变应变 ϵ_c 与初始弹性应变 ϵ_e 之比即徐变系数 φ , $\varphi = \epsilon_c / \epsilon_e$ 。徐变系数与持续应力的大小无关, 即徐变应变与初始弹性应变成线性关系。采用这种徐变假定的理论称为徐变线性理论。否则, 称为徐变非线性理论。即对于一混凝土构件(环境一定):

$$\varphi = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_e} = \varphi(t, \tau_0, \sigma) = \begin{cases} \varphi(t, \tau_0) & \text{徐变线性理论} \\ \varphi(t, \tau_0, \sigma) & \text{徐变非线性理论} \end{cases}$$

(2) 徐变线性理论的适用性: 在桥梁结构中, 混凝土的使用应力一般不超过其极限强度的 40% ~ 50%, 从试验中观察到, 当混凝土棱柱体应力不大于 $0.5R_a$ 时, 徐变变形与初始弹性变形之比与应力大小无关的假定是成立的。故以后所述均以徐变线性理论的基本假定为基础。

(3) 徐变非线性理论: 徐变应变 ϵ_c 与初始弹性应变 ϵ_e 之比即徐变系数 φ 与持续应力的有关, 即徐变应变与初始弹性应变不成线性关系。这样一种理论称为徐变非线性理论。

(五) 基本假定

因客观因素的复杂性, 混凝土徐变引起结构徐变变形及次内力计算的精确分析十分困难, 实际工程常采用如下假定:

- (1) 采用徐变线性理论;
- (2) 不考虑结构配筋的影响, 把结构当作素混凝土, 这对预应力混凝土结构(因含筋率较小)是适应的, 但对不同材料或相同材料(弹性模量相差较大)组成的复合结构是不适用的;
- (3) 混凝土的弹性模量假定为常值。试验证明, 混凝土弹性模量随时间变化而变化, 一般可增加 10% ~ 15%。但考虑到徐变系数的计算值中已部分包含了这一因素, 可取常值计算。

1.2.2 徐变系数的计算理论和公式

在徐变线性理论中通过徐变系数和弹性应变(应力)即可求出总的应变。在应力不变条件下, 总应变 $\epsilon_b(t)$:

$$\epsilon_b(t) = \epsilon_c(t) + \epsilon_e = \varphi(t, \tau)\epsilon_e + \epsilon_e = \epsilon_e[1 + \varphi(t, \tau)] = \frac{\sigma}{E}[1 + \varphi(t, \tau)]$$

在应力不断变化条件下(如图 1-2-2), $\epsilon_b(t)$:

$$\epsilon_b(t) = \frac{\sigma(\tau_0)}{E}[1 + \varphi(t, \tau_0)] + \int_{\tau_0}^t \frac{\partial \sigma(\tau)}{\partial \tau} \frac{1}{E}[1 + \varphi(t, \tau)] d\tau$$

上式也可写为:

$$\epsilon_b(t) = \frac{\sigma(\tau_0)}{E}[1 + \varphi(t, \tau_0)] + \lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \Delta \sigma(\tau_i) \frac{1}{E}[1 + \varphi(t, \tau_i)],$$

由此可见, 徐变系数 $\varphi(t, \tau)$ 是指加载时刻为 τ 的 t 时刻的徐变系数。同时可见, 只要已知弹性应变(应力)和徐变系数即不难求出总应变。故确定徐变系数则是关键问题之一。徐变系数的研究方法有: