



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21世纪交通版高等学校教材

预应力混凝土结构设计原理

Design Principles of Prestressed Concrete Structures

(第二版)

李国平 主 编
黄鼎业 黄 侨 主 审



人民交通出版社
China Communications Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21 世纪交通版高等学校教材

Design Principles of Prestressed Concrete Structures

预应力混凝土结构设计原理

(第二版)

(土木工程专业用)

李国平	主编
黄鼎业 黄 侨	主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书根据土木工程专业平台课程的教学要求,以预应力混凝土结构设计原理为主要内容,综合阐述了土木工程专业相关领域中预应力混凝土结构的特点,详尽介绍了先张与后张、有粘结与无粘结、体内及体外预应力体系及工艺、结构构造与受力性能,以及结构计算理论和方法,并用大量计算示例详细解释。

本书可作为土木工程专业本科学生的教材,也可作为土木工程各相关领域中工程技术人员、大专院校学生和教师的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

预应力混凝土结构设计原理/李国平主编.—2版.—北京:人民交通出版社,2009.11

ISBN 978-7-114-08003-6

I. 预… II. 李… III. 预应力混凝土结构—结构设计—高等学校—教材 IV. TU378.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 191948 号

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21 世纪交通版高等学校教材

书 名: 预应力混凝土结构设计原理(第二版)

著 者: 李国平

责任编辑: 曲 乐 王文华

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 15.25

字 数: 363千

版 次: 2000年11月 第1版

2009年11月 第2版

印 次: 2009年11月 第2版 第1次印刷 总第4次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08003-6

印 数: 7901~10900册

定 价: 30.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

21 世纪交通版
高等学校教材(公路与交通工程)编审委员会

顾问:王秉纲 (长安大学)

主任委员:沙爱民 (长安大学)

副主任委员:(按姓氏笔画排序)

王 炜 (东南大学)

陈艾荣 (同济大学)

徐 岳 (长安大学)

梁乃兴 (重庆交通大学)

韩 敏 (人民交通出版社)

委员:(按姓氏笔画排序)

马松林 (哈尔滨工业大学)

王殿海 (吉林大学)

叶见曙 (东南大学)

石 京 (清华大学)

向中富 (重庆交通大学)

关宏志 (北京工业大学)

何东坡 (东北林业大学)

陈 红 (长安大学)

邵旭东 (湖南大学)

陈宝春 (福州大学)

杨晓光 (同济大学)

吴瑞麟 (华中科技大学)

陈静云 (大连理工大学)

赵明华 (湖南大学)

项贻强 (浙江大学)

郭忠印 (同济大学)

袁剑波 (长沙理工大学)

黄晓明 (东南大学)

符锌砂 (华南理工大学)

裴玉龙 (哈尔滨工业大学)

颜东煌 (长沙理工大学)

秘书长:沈鸿雁 (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,会议决定着手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。

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培养的需要。(2)注重学生基本素质、基本能力的

培养,为学生知识、能力、素质的综合协调发展创造条件。基于这样的考虑,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。

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

第二版前言

《预应力混凝土结构设计原理》是根据原国家教委 1998 年新编专业目录有关土木工程专业教学大纲的要求而编写的,从 2000 年 10 月第一版出版使用至今已有 9 年时间。在这期间,我国预应力混凝土技术已有很大发展,土木工程相关领域内人才需求量逐年增加,各种新的国家标准、规范也相继颁布,原教材已不能适应这种快速发展的需要。2006 年在本教材被评选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材之际,我们开始了本教材的修订工作。

作为土木工程专业的平台课程,本教材第一版在如何将原交通土建工程、建筑工程等土建类专业中有关预应力混凝土结构部分的内容综合起来方面做了不少尝试,在近十年的使用过程中许多师生也给本教材的修订提供了许多宝贵建议。

基于上述需求和建议,本教材在如下方面进行了修改:

(1)注重基本原理,更好地适应土木工程专业相关领域的教学要求。教材力求从基本原理出发提示预应力混凝土结构的各种机理,尽量避免形成对规范条款解释的编写方式。

(2)兼顾相关专业方向的技术特点,反映工程设计的方法。教材单独增加一章基于国家标准和行业标准设计的两种预应力混凝土结构的完整计算示例,以反映基本原理和设计规定的相互关系,初步了解工程结构设计的方法。

(3)调整算例和习题的编排方式,改善教学与阅读理解。将原第一版教材附录中的计算示例与习题分散到相关章节中,使其与章节的教学内容更好地结合在一起。

(4)修改文字和表述方面的错误。根据有关学校师生的意见,统一和规范了教材中的专业术语,纠正了各种错误。

同第一版教材编写时的情况一样,由于目前我国土木工程专业相关领域的技术标准、规范尚不统一,且涉及的基本理论、方法也不尽相同,对本教材的编写带来了困难。为此,本教材在一些差异较大的基本理论、方法介绍中,仍采取了先进性、广泛性相结合的选择原则。

本教材由同济大学李国平主编,各章节均由同济大学教师编写。其中,第二章由李国平、张国泉修编,第八章和第十章由薛伟辰修编,第十一章的第一、二节分别由柳惠芬和薛伟辰编写,其他章节均由李国平修编。

本教材由同济大学黄鼎业教授和东南大学黄侨教授共同主审。

本教材不可避免存在错误和缺点,恳请使用者批评、指正。有关意见可径寄同济大学桥梁工程系(上海市四平路 1239 号,邮编 200092)。

编 者
2009 年 8 月

第一版前言

《预应力混凝土结构设计原理》是根据国家教委1998年新编专业目录有关土木工程专业教学大纲的要求而编写的教材,它包含了原交通土建工程、建筑工程等土建类专业中有关预应力混凝土结构部分的教学内容。本教材为土木工程专业的专业课。

本教材的内容以预应力混凝土结构设计理论、原理及设计方法为主。根据新专业目录土木工程专业涉及工程领域广、适应性强的特点,本教材在内容方面作了较大改变:

首先,教材内容的覆盖面扩大,收入了一些预应力混凝土结构发展的最新成果,添加了原土建类有关教材中未包含的内容,如体外预应力混凝土结构、预应力混凝土结构的抗震性能,细化了如无粘结预应力混凝土结构等内容。这些内容的扩展,使本教材能够适应土木工程专业宽口径的教学要求,而在具体教学过程中部分这些内容也可根据要求作为学生自学、扩展知识的内容。

其次,重点突出原理、方法,构筑土木工程宽口径专业共同的知识平台;基本解决了原土建类各专业领域规范及教材中计算公式、符号等的多式样问题,并统一在以国标(GBJ 10—89)为基础、适当考虑目前使用习惯的范围内。本教材在这方面的特点,增强了土木工程专业毕业生对土建类各工程领域的适应性,也为我国在这些工程领域逐步建立统一的技术标准、规范,并与国际惯例接轨创造了基本条件。

值得注意的是,由于目前我国土木工程专业各工程领域的技术标准、规范不统一,且所涉及的基本理论、方法也不尽相同,这对本教材的编写带来了困难。为此,本教材在一些差异较大的基本理论、方法叙述中,采取了先进性、广泛性相结合的选择原则。为了保证学生的动手能力,熟悉有关技术标准、规范,加深对实际工程设计的认识,以及巩固教材阐述的基础理论、原理及方法,本教材应配以与土木工程专业各工程领域技术标准、规范相结合的课程设计或大型习题。与本教材配套的《预应力混凝土结构设计》是本教材的后续教材。

本教材共有十章和一个附录,主要内容如下:

第一章主要阐述了预应力混凝土结构的基本概念、历史与发展,并对本课程的学习要求提出了要求。

第二章介绍了预应力混凝土结构对材料性能的要求,列出了国内外常用的预

应力混凝土材料;同时介绍了预应力混凝土结构预应力的工艺及相应的设备,包括国内外常用的预应力锚具类型等。

第三章叙述了预应力筋的张拉控制应力、预应力损失计算及有效预应力的计算原理和方法,并介绍了减少预应力损失的措施。

第四章至第六章以预应力混凝土构件为基础,从基本原理出发分别阐述了下列计算内容:受弯构件正截面、斜截面承载能力的计算方法,偏心拉、压构件截面承载能力的计算方法;构件截面正应力、剪应力、主应力及考虑截面开裂的应力的计算方法,构件各阶段变形的计算方法;构件的裂缝、疲劳强度的计算方法,预应力筋锚固区计算方法。

第七章以预应力混凝土构件的设计为主,叙述了构件设计的基本思路,构件内力计算中预应力效应计算的几个基本概念,以及构件的设计基本方法和步骤。

第八章主要介绍了无粘结预应力混凝土结构的基本概况,受弯构件的受力性能、计算和设计方法。

第九章的主要内容为体外预应力混凝土结构的基本概况、结构的组成,包括构造特点,以及结构的力学性能等。

第十章以预应力混凝土结构的抗震问题为基本内容,介绍了地震对预应力混凝土结构的影响、抗震性能研究的成果、抗震设计方法以及抗震构造措施。

附录中给出了本教材有关章节的计算示例和习题,以帮助读者加深对教材内容的理解,巩固所学知识。

本教材第四章至第七章内容主要以体内有粘结预应力混凝土结构为主。

本教材由同济大学李国平主编,各章节均由同济大学教师编写。其中,第一章由李国平编写;第二章由郑步全、张国泉编写;第三章由张国泉编写;第四章由薛二乐编写;第五章由柳惠芬编写;第六章由柳惠芬、李国平编写;第七章由周宗泽、熊学玉、张国泉编写;第八章由薛伟辰编写;第九章由徐栋编写;第十章由薛伟辰编写;附录由李国平编写。全书最后由李国平统一修改定稿,由周玉生主审。

本书为土木工程专业预应力混凝土结构设计原理统一化教材的首次编写实践,由于作者水平有限,加之编写时间紧张,故不可避免地存在一些缺点和错误,敬请使用者给予批评、指正。有关意见可径寄上海四平路同济大学桥梁工程系,以便修正。

编者
2000年8月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 预应力混凝土结构的基本概念	1
第二节 预应力混凝土结构的历史与发展	10
第三节 本教材的任务与学习要求	13
复习思考与习题	14
第二章 预应力混凝土材料和预应力工艺及设备	15
第一节 预应力混凝土材料	15
第二节 预应力工艺及设备	27
复习思考与习题	33
第三章 预应力及预应力损失计算	34
第一节 预应力钢筋张拉控制应力	34
第二节 预应力损失计算	35
第三节 有效预应力计算	46
第四节 减少预应力损失的措施	51
复习思考与习题	52
第四章 预应力混凝土构件截面承载力计算	53
第一节 预应力混凝土受弯构件正截面承载力计算	53
第二节 预应力混凝土受弯构件斜截面承载力计算	65
第三节 预应力混凝土偏心受压构件截面承载力计算	71
第四节 预应力混凝土偏心受拉构件截面承载力计算	79
复习思考与习题	82
第五章 预应力混凝土构件截面应力及变形计算	83
第一节 预应力混凝土构件截面正应力计算	83
第二节 预应力混凝土构件截面剪应力与主应力计算	86
第三节 预应力混凝土构件考虑截面开裂的应力计算	89
第四节 预应力混凝土构件变形计算	95
复习思考与习题	99
第六章 预应力混凝土构件的裂缝、疲劳及锚固区计算	101
第一节 部分预应力混凝土构件裂缝宽度计算	101
第二节 部分预应力混凝土构件疲劳验算	104
第三节 预应力钢筋锚固区计算	105

复习思考与习题.....	110
第七章 预应力混凝土结构设计方法.....	111
第一节 预应力混凝土结构设计的基本思路.....	111
第二节 预应力混凝土结构计算的几个基本概念.....	112
第三节 预应力混凝土构件的设计方法.....	120
复习思考与习题.....	130
第八章 无粘结预应力混凝土结构设计.....	131
第一节 概述.....	131
第二节 无粘结预应力混凝土受弯构件的受力性能.....	135
第三节 无粘结预应力混凝土受弯构件计算.....	138
第四节 无粘结预应力混凝土受弯构件设计.....	144
复习思考与习题.....	149
第九章 体外预应力混凝土结构设计.....	150
第一节 引言.....	150
第二节 体外预应力混凝土系统的组成及构件类型.....	152
第三节 体外预应力混凝土受弯构件的力学性能.....	155
第四节 体外预应力混凝土受弯构件计算.....	158
复习思考与习题.....	161
第十章 预应力混凝土结构抗震设计方法.....	162
第一节 概述.....	162
第二节 预应力混凝土结构抗震性能.....	163
第三节 预应力混凝土结构抗震设计方法.....	165
第四节 预应力混凝土结构抗震构造措施.....	170
第十一章 预应力混凝土梁计算示例.....	172
第一节 预应力混凝土简支 T 形梁计算示例	172
第二节 无粘结预应力混凝土连续梁计算示例.....	213
参考文献.....	226

第一章 绪 论

第一节 预应力混凝土结构的基本概念

现代混凝土结构工程发展的总趋势,是通过不断提高设计、施工技术水平和采用高强、高性能的轻质材料建造更为经济合理的结构。采用高强、高性能的轻质材料技术,对钢筋混凝土结构尤为重要。然而,混凝土是一种抗压强度高、抗拉强度低的结构材料,它的抗拉强度不仅很低,只有抗压强度的 $1/10\sim 1/15$,而且还很不可靠;它的抗拉变形能力也很小,脆性破坏没有明显预兆。钢筋混凝土结构利用钢筋来承受混凝土的拉应力,如果假设不允许混凝土开裂,则钢筋的拉应力只能达到约 $20\sim 30\text{MPa}$;而将裂缝宽度限制在容许的 $0.2\sim 0.25\text{mm}$ 以内,钢筋的拉应力也只能达到约 $150\sim 250\text{MPa}$ 。

钢筋混凝土虽然弥补了混凝土抗拉强度低的缺陷,但仍存在两个不能解决的问题:一是在带裂缝工作状态下,受拉区混凝土材料不能充分利用、结构刚度下降和自重荷载比例较大,限制了其使用范围;二是为了保证结构耐久性必须限制混凝土裂缝的宽度,这就使高强度钢筋在钢筋混凝土结构中无法充分发挥作用,同样也不可能发挥高强混凝土的作用。因此,当荷载或跨度增加时,钢筋混凝土结构只有靠增大构件的截面尺寸或增加钢筋用量的方法来控制裂缝和变形。显然,这种做法既不经济又必然增加结构自重,因而使钢筋混凝土结构的适用范围受到很大限制。因此,为了使钢筋混凝土结构得到进一步发展,就必须解决混凝土抗拉性能差的问题。

一、预应力的概念

如果能预先对混凝土施加一定的压应力,使其在拉应力作用后不开裂,那么混凝土抗拉强度低的缺陷就能被弥补。上述混凝土预先受到的(压)应力称为预加应力,简称预应力。预加应力的混凝土即预应力混凝土,它是一种能克服钢筋混凝土缺点、性能优良及具有广泛发展潜力的结构材料。

预应力这一术语出现的历史虽不很长,但预应力的思想是古老的,其基本原理在几个世纪以前就已被聪明的祖先所运用。

木桶是预加压应力抵抗拉应力的一个典型例子。采用藤、竹或铁箍的木桶,当其被箍紧时便受到了一个环向压应力,如这个环向压应力超过了水压力引起的环向拉应力,木桶就不会开裂和漏水。现代预应力混凝土圆形水池的工作原理与上述带箍木桶是一样的,所以带箍木桶实质上是一种预应力木结构。

木锯是利用预拉应力抵抗压应力的一个典型例子。采用线绳绞拧而紧的木锯给锯条施加了一个拉应力,使其挺直而能承受锯木来回运动产生的拉、压力,避免了抗弯能力很低的锯条受压失稳或弯折破坏。

现实生活和工作中利用预应力原理的例子很多,如拧紧的螺钉,辐条收紧的车轮钢圈,以

及为稳定烟囱、电线杆、桅杆的拉索等。

上述例子和许多实践都表明,既可以用预压应力来抵抗结构承受的拉应力,又可用预拉应力来抵抗结构承受的压应力。因此,只要善于运用预应力原理和技术,就可能获得改善结构性能和提高结构承载能力的效果。

在预应力运用最广泛的混凝土结构中,利用预拉的高强度钢筋的弹性回缩作用对混凝土构件施加一个力(称为预加力),并在混凝土中形成预压应力,使构件在荷载作用下处于有利的受力状态,从而克服了混凝土抗拉强度低的弱点,发挥了混凝土的抗压强度,达到了结构轻型、大跨、高强、耐久的目的。

1. 预应力混凝土的定义

由于预应力技术的不断发展,国际上对预应力混凝土迄今还没有一个统一的定义。一个概括性较强、由美国混凝土协会(ACI)做出的广义的定义是:“预应力混凝土是根据需要人为地引入某一分布与数值的内应力,用以全部或部分抵消外荷载应力的一种配筋混凝土”。

2. 预应力混凝土的三种概念

对于采用高强度钢筋的预应力混凝土,可以用三种概念或三个角度来理解和分析其性能。设计者同时理解这三种概念及相应的计算方法是十分重要的,只有这样才能更灵活有效地去选择和设计预应力混凝土结构。

(1) 第一种概念——预应力能使混凝土在使用状态下成为弹性材料

预应力使混凝土从原先抗拉弱、抗压强的脆性材料变为一种在正常使用阶段既能受压又能抗拉的弹性材料。在此,混凝土被看做承受着两个力系,即内部预应力和外部荷载。若预应力所产生的压应力将外荷载产生的拉应力全部抵消,则在正常使用阶段混凝土没有裂缝甚至不出现拉应力。

在上述两个力系共同作用下,混凝土构件的应力、应变及变形均可按材料力学公式计算,并在需要时采用叠加原理。如图 1-1,在一根混凝土梁轴线以下偏心距 e 处预留孔道,穿以高强度钢筋后将其拉伸(称为张拉)并锚固在梁端,钢筋的回缩作用对梁施加的预加力为 N_p 。在预加力 N_p 的作用下,混凝土截面的正应力(应力以压为正)为

$$\sigma_c = \frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p e y}{I_c} \quad (1-1)$$

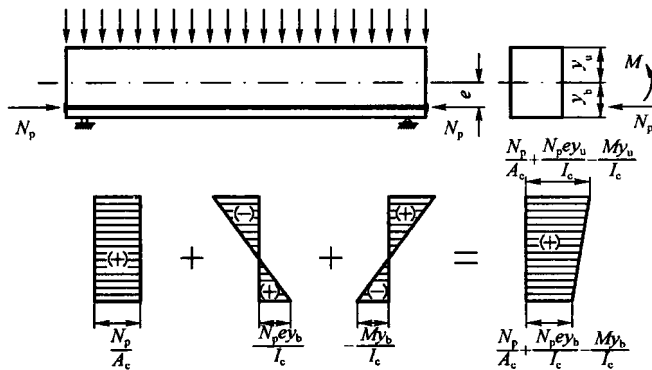


图 1-1 偏心预加力和外荷载作用下的应力分布

外荷载弯矩 M (包括梁的自重)产生的混凝土截面正应力为

$$\sigma_c = -\frac{My}{I_c} \quad (1-2)$$

混凝土截面的最终正应力为

$$\sigma_c = \frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p e y}{I_c} - \frac{M y}{I_c} \quad (1-3)$$

式中： A_c 、 I_c ——混凝土截面面积和抗弯惯性矩；

y ——应力计算点至截面形心轴的距离，在截面形心轴以下取正。

(2) 第二种概念——预应力能使高强度钢材和混凝土共同工作并发挥两者的潜力

预应力混凝土是高强度钢材和混凝土两种材料的一种最佳组合。在采用高强度钢筋的混凝土构件中，必须使钢筋发生很大的伸长变形才能充分发挥其强度。如果高强钢筋只是简单地埋在混凝土体内，那么在使用荷载作用下混凝土势必严重开裂，构件将出现不能允许的宽裂缝和大挠度。在预应力混凝土构件中，高强度钢筋只有在与混凝土结合之前被预先张拉并锚固，才能让使用荷载作用下受拉的混凝土预压、储备抗拉能力，受拉的高强度钢筋的强度充分发挥。因此，预应力是一种充分利用高强度钢材的能力、改变混凝土工作状态的有效手段，预应力混凝土可看作钢筋混凝土应用的扩展。但也应明确，预应力混凝土不能超越材料本身的强度极限。

(3) 第三种概念——预加力实现荷载平衡

预加力可认为是对混凝土构件预先施加一种与使用荷载(外力)方向相反的荷载，用以部分和全部抵消使用荷载效应的一种作用。在预应力混凝土构件中，改变预应力钢筋的线形可以对混凝土构件产生不同的横向分布力。以采用抛物线形的预应力钢筋为例(图 1-2)，其对混凝土梁的作用可近似等效为梁端集中力 N_p 和方向向上、沿水平方向分布集度为 q 的均布荷载：

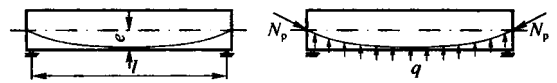


图 1-2 采用抛物线形预应力钢筋的混凝土梁

$$q = \frac{8N_p e}{l^2} \quad (1-4)$$

如果在梁上作用方向向下、集度为 q 的均布外荷载，那么，两种荷载对梁产生的弯曲效应将相互抵消，即梁将不发生下挠也不产生上拱，成为仅受轴力 N_p 的状态。如果均布外荷载超过预加力所产生的反向均布荷载，则可用这两种荷载的差值来计算梁截面增加的弯曲应力。这种把预加力看成实现荷载平衡的概念是由美籍华人林同炎先生提出的。

预应力混凝土三个不同的概念，是从不同的角度来解释预应力混凝土的原理。第一种概念是预应力混凝土弹性分析的依据，指出了预应力混凝土的主要工作状态；第二种概念反映了预应力对发挥高强度钢材和混凝土潜力的必要性，也指出了预应力混凝土的强度界限；第三种概念则在揭示预加力和外荷载效应相互关系的同时，也为预应力混凝土结构设计与分析提供了一个简洁的方法。

例 1-1 一根计算跨径 $l=20\text{m}$ 的预应力混凝土简支梁，截面尺寸见图 1-3，梁内配有抛物线形预应力钢筋，其跨中垂度即偏心距 $e=350\text{mm}$ ，预加力 $N_p=1\ 125\text{kN}$ ；简支梁的均布结构重力与活荷载集度分别为 $q_g=4.5\text{kN/m}$ 和 $q_u=6.75\text{kN/m}$ 。试按预应力混凝土原理的第一种概念计算跨中截面混凝土的应力。

解：(1) 截面几何特征计算

梁的毛截面面积：

$$A_c = bh = 200 \times 900 = 1.8 \times 10^5 (\text{mm}^2)$$

梁的毛截面抗弯惯性矩：

$$I_c = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12} \times 200 \times 900^3 = 1.215 \times 10^{10} (\text{mm}^4)$$

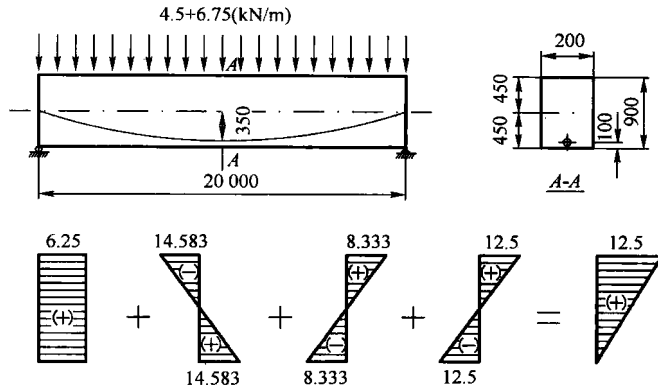


图 1-3 预应力混凝土简支梁及应力分布(尺寸单位: mm; 应力单位: MPa)

(2) 跨中截面荷载引起的弯矩计算

跨中截面结构重力弯矩：

$$M_g = \frac{1}{8}q_g l^2 = \frac{1}{8} \times 4.5 \times 20^2 = 225 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

跨中截面活荷载弯矩：

$$M_u = \frac{1}{8}q_u l^2 = \frac{1}{8} \times 6.75 \times 20^2 = 337.5 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

(3) 跨中截面应力计算

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{N_p}{A_c} \mp \frac{N_p e y}{I_c} \pm \frac{M_g y}{I_c} \pm \frac{M_u y}{I_c} \\ &= \frac{1125 \times 10^3}{1.8 \times 10^5} \mp \frac{1125 \times 10^3 \times 350 \times 450}{1.215 \times 10^{10}} \pm \\ &\quad \frac{225 \times 10^6 \times 450}{1.215 \times 10^{10}} \pm \frac{337.5 \times 10^6 \times 450}{1.215 \times 10^{10}} \\ &= 6.25 \mp 14.583 \pm 8.333 \pm 12.5 (\text{MPa}) \end{aligned}$$

混凝土截面上、下缘应力为

$$\sigma_{cu} = 6.25 - 14.583 + 8.333 + 12.5 = 12.5 (\text{MPa})$$

$$\sigma_{cb} = 6.25 + 14.583 - 8.333 - 12.5 = 0$$

例 1-2 试用预应力混凝土原理的第二种概念,分析预应力和非预应力混凝土梁在外荷载弯矩作用下截面抗弯内力偶性状的区别。根据分析结果,计算例 1-1 简支梁跨中截面混凝土的应力。

解: (1) 预应力和非预应力混凝土梁截面抗弯内力偶性状分析

非预应力的普通钢筋混凝土梁,在正常使用阶段处于带裂缝工作状态,由钢筋承担的拉力 F_s 与混凝土截面承担的压力 F_c 都随外荷载弯矩的增加成比例增长,而内力偶臂 a 则几乎保持不变[图 1-4b)]。

预应力混凝土梁如在正常使用阶段不开裂,当外荷载弯矩增加时,组成内力偶的拉力 F_p 与压力 F_c 变化的比例较小,而内力偶臂 a 则随外荷载弯矩的增加成比例增长[图 1-4a)]。

现取如图 1-5 的一根预应力混凝土简支梁,假定预加力 N_p 沿梁全长为常量,偏心距为 e 。

在预加力的单独作用下,简支梁混凝土截面所受压力 F_c 的位置即在 N_p 作用点,方向与 N_p 相反[图 1-5a)],此时内力偶臂 a 为零。当作用外荷载(包括梁自重)弯矩 M 时,因拉力 F_p 即 N_p 与压力 F_c 保持不变(变化的比例较小),故由内力偶与外荷载弯矩相平衡的条件[图 1-5b)],即

$$F_c a = N_p a = M$$

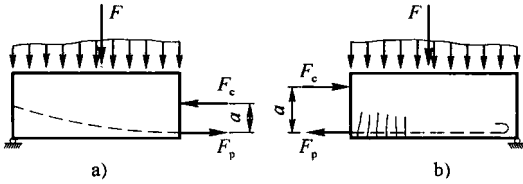


图 1-4 预应力和非预应力混凝土梁的内力偶
a) 预应力混凝土梁; b) 普通钢筋混凝土梁

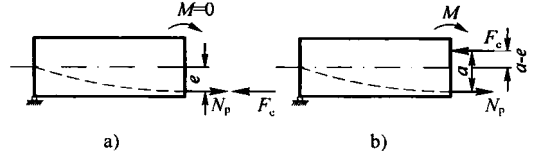


图 1-5 混凝土截面压力作用点和外荷载弯矩的关系
a) 外荷载弯矩为零; b) 外荷载弯矩为 M

可得内力偶臂:

$$a = \frac{M}{F_c} = \frac{M}{N_p}$$

由内力偶臂 a 即可得混凝土截面压力 F_c 作用点对于混凝土截面的偏心距为 $(a - e)$ [图 1-5b)],故截面应力可按下式计算:

$$\sigma_c = \frac{N_p}{A_c} \pm \frac{N_p(a - e)y}{I_c}$$

显然,在沿梁的每个混凝土截面均可求得压力 F_c 作用点,在梁内便能找到一条压力线。这种用内力偶即压力线进行截面内力分析的方法,称为压力线法。

(2) 用内力偶法计算跨中截面混凝土应力

在外荷载弯矩作用下,跨中截面的一对内力,即预加力 N_p 和混凝土截面压应力的合力 F_c 组成了一个内力偶并与外荷载弯矩平衡:

$$F_c a = N_p a = M$$

跨中截面外荷载弯矩为

$$M = \frac{1}{8}(q_k + q_u)l^2 = \frac{1}{8} \times (4.5 + 6.75) \times 20^2 = 562.5 (\text{kN} \cdot \text{m})$$

内力偶臂为

$$a = \frac{M}{F_c} = \frac{M}{N_p} = \frac{562.5 \times 10^3}{1125} = 500 (\text{mm})$$

计算混凝土截面上、下缘应力为

$$\begin{aligned} \sigma_{cu} &= \frac{N_p}{A_c} + \frac{N_p(a - e)y'}{I_c} \\ &= \frac{1125 \times 10^3}{1.8 \times 10^5} + \frac{1125 \times 10^3 \times (500 - 350) \times 450}{1.215 \times 10^{10}} \\ &= 6.25 + 6.25 = 12.5 (\text{MPa}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{cb} &= \frac{N_p}{A_c} - \frac{N_p(a - e)y}{I_c} \\ &= \frac{1125 \times 10^3}{1.8 \times 10^5} - \frac{1125 \times 10^3 \times (500 - 350) \times 450}{1.215 \times 10^{10}} \\ &= 6.25 - 6.25 = 0 \end{aligned}$$