

第十五届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会论文集



低碳经济建设中的 混凝土结构

薛伟辰 冯大斌 主编



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

第十五届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会论文集



低碳经济建设中的 混凝土结构

薛伟辰 冯大斌 主编



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

低碳经济建设中的混凝土结构:第十五届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会论文集/薛伟辰,冯大斌主编. —上海:同济大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-5608-4464-0

I. ①低… II. ①薛… ②冯… III. ①混凝土结构—学术会议—文集 IV. ①TU37-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第234705号

第十五届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会论文集

低碳经济建设中的混凝土结构

薛伟辰 冯大斌 主编

责任编辑 高晓辉 马继兰 季 慧

责任校对 杨江淮

封面设计 陈益平

出版发行 同济大学出版社

(www.tongjipress.com.cn 地址:上海市四平路1239号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 889 mm × 1194 mm 1/16

印 张 16.75

字 数 536 000

版 次 2010年12月第1版 2010年12月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-4464-0

定 价 68.00 元

本书若有印装质量问题, 请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

在我国社会总能耗中,土木工程建设能耗和建筑物使用能耗所占比重约 30%。当前,混凝土仍是我国乃至世界范围内使用最为广泛的工程结构材料。据推算,世界年生产混凝土 60 亿 m^3 以上,我国 2009 年生产混凝土达 30 亿 m^3 以上,人均约合 2 m^3 混凝土。在混凝土的生产过程中,每生产 1 t 水泥熟料约向大气排放 1 t CO_2 ,全世界水泥工业生产的 CO_2 排放量约占全球温室气体排放量的 7%。

2010 年 10 月 18 日,十七届五中全会通过了《关于制定国民经济和社会发展第十二个五年规划的建议》,其中明确提出,“面对日趋强化的资源环境约束,必须增强危机意识,树立绿色、低碳发展理念,以节能减排为重点,加快构建资源节约、环境友好的生产方式和消费模式,增强可持续发展能力”。低碳经济,是指在可持续发展理念指导下,通过技术创新、制度创新、产业转型、新能源开发等多种手段,尽可能地减少煤炭石油等高碳能源消耗,减少温室气体排放,达到经济社会发展与生态环境保护双赢的一种经济发展形态。

土木工程建设可持续发展是人类社会可持续发展的重要组成部分。在全球低碳经济的新形势下,推进以低能耗、低污染排放为主要特征的土木工程建设是学科未来发展的主要方向之一。在此背景下,由中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会主办,同济大学土木工程学院建筑工程系和上海建科结构新技术工程有限公司承办,中国建筑第八工程局有限公司和江苏金砼预制装配建筑发展有限公司协办的“第十五届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会”于 2010 年 12 月 12—15 日在上海召开。

本届会议以“低碳经济建设中的混凝土结构”为主题,旨在促进我国钢筋混凝土及预应力混凝土结构工程领域的研究与应用,为学术界、工程界之间的沟通与合作提供平台。会议邀请了著名学者及专家做综述报告和专题报告,内容涵盖绿色混凝土与可持续性发展、钢筋混凝土及预应力混凝土结构基础理论、钢筋混凝土及预应力混凝土结构设计与分析方法、钢筋混凝土及预应力混凝土结构施工技术、新材料开发与应用和重大工程设计与施工等方面。

本次会议论文征集得到了全国各地设计、施工、科研、高等院校及生产企业的积极响应,经审查,最终正式选用了具有代表性的 50 余篇投稿文章编入本论文集。这些论文在很大程度上反映了近年来我国钢筋混凝土及预应力混凝土结构工程领域的研究与应用的最新进展,具有较高的学术价值。

本次会议论文集在编辑、出版过程中,得到了同济大学出版社的大力支持与帮助,在此表示诚挚的谢意。

最后,由衷感谢全体论文作者和与会代表的积极参与和贡献,感谢所有为本次会议付出辛勤劳动的工作人员。

中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会
2010 年 12 月

目次

低碳混凝土及预应力混凝土技术发展展望	冯大斌 陶学康(1)
预加力与抗力的关系	白生翔(5)
混凝土抗压强度尺寸效应研究述评	杜修力 李 倩(12)
混凝土结构的环境设计通用原则——fib 47 号技术报告介绍	李 刚 冯大斌(20)
预应力混凝土框架结构抗震能力评估——对既有规范设计方法的讨论	孟少平 于 琦 王 鑫(27)
混凝土桥梁基于性能设计研究的设想	李国平(33)
预制混凝土框架结构研究进展	薛伟辰 杨新磊 杨云俊 等(39)
低碳生态水泥混凝土的研究进展	姚 武(43)
超高性能混凝土(UHPC)预应力桥面板受弯性能试验研究与分析	李晨光 刘子键 安明喆(47)
混凝土材料弹模非均匀特性及特征单元尺度研究	杜修力 金 浏(52)
并排式预制预应力混凝土多箱梁桥的横向连接方法分析	庄一舟 季 韬 陈宝春(61)
混凝土受弯构件受拉钢筋最小配筋率的讨论	屈文俊 方 瑾 周国全(66)
行业标准《建筑工程用索》研究与编制	朱 莹 冯大斌 张清杰(72)
《预应力用液压千斤顶》、《预应力用电动油泵》、《预应力筋用液压锚头器》、《预应力筋用挤压机》、 《预应力钢绞线用轧花机》修订及制订简介	陈 茜 李东彬(75)
预制装配式住宅工艺的实践与探讨	史公勋 顾海勇 唐 潮 等(80)
几种常用的混凝土徐变预测模型的对比分析	刘 婷 薛伟辰(85)
某 3 层 2 跨预应力混凝土框架的预应力传递问题研究	张 志 孟少平 刁志伟 等(89)
罕遇地震作用下基于规范设计的预应力框架抗震性能分析	简 斌 刁林青 王东超(94)
预应力双曲鱼腹梁性能试验研究	周建康 徐启明 王 凯(100)
一种后张预应力筋腐蚀防护和监测的新方法	刘平伟 朱万旭 周红梅 等(104)
Experimental Study of Cast-in-situ Reinforced Concrete Hollow Slab	HE Jian SUN Shu-xin TANG Ai-peng(108)
大跨预应力梁施工阶段的监测	周建康 王 凯 徐启明 等(113)
体外预应力钢-混凝土组合梁有限元分析	姜颜宁 薛伟辰(116)

后张预应力混凝土梁板正截面受弯承载力计算相关问题的商榷	康仲录(120)
大跨度城市高架箱梁预应力施工常见病害与防治	李庆飞(124)
超高性能纤维改性混凝土工型预应力梁承载力分析	吴香国 杨光泽 曲 嘉(129)
预应力基础底板的设计与施工	卢世霞 王 凯 徐启明 等(135)
带托板预应力混凝土无梁板支座截面抗弯承载能力的验算	康仲录(139)
预应力混凝土结构深化设计与施工辅助计算软件 PDDCS 2010 介绍	张德锋 朱景岳(144)
楼梯构件对结构抗震性能的影响分析	张吉柱 潘从建 孟履祥(148)
地下超长大体量混凝土结构温度应力分析及裂缝控制	高晓亭 孟少平 周志高 等(152)
箱梁结构的梁格计算和网格计算	陈宝春 徐 栋(157)
超长结构考虑开裂的结构内力的研究	刁志伟 孟少平 高晓亭 等(161)
某改建轻轨车站的抗震性能研究	朱见励 陈旭杭(165)
7.5 m 厚底板混凝土水化热实测与有限元分析	危 鼎 李义全 陈 华 等(169)
凹槽式伸缩缝对超长地下结构温度应力控制分析	周志高 孟少平 刁志伟 等(174)
UHPC 叠合轴压构件承载力理论分析	杨光泽 吴香国 赵新宇(179)
框架结构中楼梯间的抗震构造措施建议	潘抒冰 金来建(183)
振弦式应变计在测量混凝土温度约束应变中存在的问题探讨	危 鼎 王桂玲 苗冬梅 等(186)
碳纤维配筋混凝土梁的试验研究	康景亮 谭明媚 王 晨 等(191)
施工期混凝土墙体温度收缩约束应变实测与分析	危 鼎 王桂玲 戴耀军 等(196)
配 FRP 箍筋混凝土梁抗剪性能研究进展	陈 晨 薛伟辰(200)
多层 FRP 片材抗弯加固构造形式选择研究	李 昂 屈文俊(205)
二次受力下预应力 CFRP 布加固 R. C 梁承载力的理论分析	刘 瑛 曹 璐 赵 亮(210)
FRP-混凝土组合桥面板有限元分析	王永生 薛伟辰(216)
预应力碳纤维复合材料(CFRP)加固混凝土受弯构件研究	张利利 李晨光(220)
CFRP 加固 RC 双向板二次受力的研究	刘 瑛 宁 宁 曹 璐(226)
体外预应力 FRP-混凝土组合梁有限元分析	范伟静 薛伟辰(230)
清水型钢混凝土在南京南站站房工程中的应用	史公勋 顾海勇 沈兴东 等(234)
大型钢结构整体同步卸载及自动控制技术	张 强 朱 莹 陈 茜(239)
钢纤维混凝土用于隧道衬砌预制管片	Benoit de Rivaz 孙 斌 董 帅(244)
东方文化艺术中心钢结构工程弧形桁架施工	赵 磊 王瑞娜(252)
北京某多塔楼商务区结构造价控制的若干措施	杨超杰 金来建 王琳榕 等(256)

低碳混凝土及预应力混凝土技术发展展望

冯大斌 陶学康

(中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会, 北京 100013)

摘 要 本文从钢材和混凝土、施工工艺及重要结构的应用出发,介绍了结构混凝土技术在我国的发展现状,并提出存在的主要问题。在展望未来发展趋势的基础上,在材料、施工工艺、性能化设计、耐久性、抗震防灾设计、检测评估、翻新改造、维修管理以及预制和产业化等多方面提出对策和进一步研究开发内容,以达到减少温室气体排放和可持续发展的目的。

关键词 低碳混凝土, 高强钢材, 发展现状, 对策, 研究开发

Abstract The paper introduces the current status of development for structural concrete in China based on various aspects such as steel products, concrete, construction technology and practical application in important projects, and presents the existing main problems as well. In the light of the developing trend in the future, the countermeasures and research subjects, including materials, construction technology, performance-based design, durability, aseismic and disaster prevention design, testing and assessment, retrofit, repair and management, fabrication and industrialization, and so on, are expounded to achieve the exhaust reduction of greenhouse gas and the sustainable development.

Keywords low carbon concrete, high strength steel, current condition of development, countermeasure, research and development

1 前 言

近年来,在巨大工程建设任务,特别是重点建设项目和大型工程的带动下,我国的混凝土工程技术水平有了较大的提高。目前,我国混凝土的年用量约为 30 亿立方米,用于房屋建筑和土木工程的水利、交通、市政等所有行业,从结构材料类型方面来讲,混凝土结构占全部工程结构的 90% 以上,混凝土是现阶段乃至未来几十年我国主导的工程结构材料。

围绕结构混凝土技术,我国的材料、设计、施工、理论、教学和标准等部门的工程技术人员,组成了许多学术机构、工作组和研发团队,研究和交流混凝土工程技术的相关问题,可以说我国有世界上最大、最全面、较高水平的混凝土工程技术研究和应用队伍,积聚了极其宝贵的人才。

我国混凝土材料技术的总体应用水平是趋向高强度、高性能、多品种,混凝土平均强度有所提高,混凝土外加剂技术得到发展,品种增多,混凝土材性得到改善,各种不同功能的混凝土不断推出。钢材强度逐渐提高,目前混凝土结构中钢筋

以 400 MPa 和 335 MPa 为主,500 MPa 级高强钢筋开始推广应用。此外,我国高强度预应力钢材年生产能力已达到约 600 万吨,2009 年使用量约 380 万吨,成为世界第一生产大国和使用大国,高强度低松弛预应力钢丝、钢绞线已成为我国预应力筋的主导品种。

混凝土工程施工技术取得较大进展,预拌混凝土成为东部发达地区的主要配送方式,模板技术水平进一步提高,混凝土搅拌、运输、布料等环节的机械化水平显著提高。特殊构件、特殊部位、特殊技术的混凝土施工形成多种成套技术或工法,如大体积混凝土施工技术、超长混凝土结构设计施工技术、超高强混凝土泵送施工技术、钢管混凝土施工技术、型钢混凝土施工技术等。

混凝土及预应力混凝土结构应用,已建成超高层、超大跨、超大体积、超大面积、超重荷载等各行业、不同功能的结构物。如建筑工程中的上海世茂国际广场(混凝土结构 60 层,屋面高度 246 m)、重庆世贸中心(混凝土结构 60 层,结构屋面高度达 234 m)、上海明天广场(混凝土结构 58 层,结构屋面高度 230 m)、唐山会展中心(预应力结构柱网为 42 m×36 m)、深圳大中华证券交易大

厅(柱网为 $42.5\text{ m} \times 34\text{ m}$);桥梁工程中的苏通大桥副航道预应力混凝土连续刚构桥跨度达到 270 m ,东海大桥、杭州湾大桥预制简支梁跨度达 70 m ,桥长三十多千米;特种工程结构如秦山二期、三期、田湾核电站等工程结构体量大、技术复杂。工程实践表明,我国混凝土工程技术应用具有较好实力,达到或接近国际先进水平。

2 结构混凝土存在的主要问题

2.1 资源消耗高,污染排放大

近年,我国水泥产量已连续20多年居世界第一,年产约14亿吨,占全球总量的50%左右,土木工程每年消耗的混凝土约30亿立方米,混凝土结构用钢筋已逾1亿吨,约占全球的三分之一。建筑业持续高速发展,结构材料消耗巨大,导致矿石和砂石资源紧缺、能源耗费过大、二氧化碳等污染排放增多、环境破坏严重,为保持持续发展需进一步开展工作。

2.2 材料强度偏低及性能还需提高

我国混凝土强度等级平均为C30级,预应力混凝土为C40级;混凝土结构采用335 MPa和400 MPa级钢筋,强度仍偏低,导致我国结构构件尺寸偏大,材料和结构效率偏低。欧美国家混凝土平均强度比我国高5~10 MPa;强度为400~600 MPa级钢筋用量已达到95%以上。

2.3 混凝土材料新品种应用较少

自密实混凝土,轻质混凝土,纤维混凝土,特种混凝土等应用量较少;需研究开发各种外加剂、掺合料技术,大力发展应用绿色混凝土。

2.4 需要进一步开展应用基础研究

耐久性技术与使用年限,可靠性设计方法和安全性,结构整体牢固性和防止连续倒塌,基于材料和结构性能的全寿命设计,以及结构抗震防灾等需要开展进一步研究,使可持续发展的理念在实践中得到充分体现。

3 结构混凝土的发展趋势

未来我们需要什么样的混凝土?

首先,它必须符合可持续发展的原则,即尽可

能提高混凝土材料的循环利用,尽量减小资源和能源的消耗,减少温室气体的排放,尽可能多地消纳工业废渣并减小水泥在混凝土中的用量,减小混凝土的使用量并保证混凝土结构的良好耐久性。

此外,混凝土的性能能够最大程度地满足不同工程的需要,包括在一些特殊环境和特殊结构中使用的特种混凝土。混凝土的性能应在以下方面得到改进和提高:应提高混凝土强度的拉压比,改善脆性和耐火性,提高体积稳定性和抗裂性等。必须开发有效的混凝土质量控制方法与技术,以确保混凝土施工质量的良好。

钢筋及预应力筋材料将如何发展?

钢筋材料技术的发展趋势是,热轧钢筋强度逐步发展至HRB400~HRB500,更高等级的热轧钢筋将有待开发;预应力筋材料除了目前普遍使用的高强度钢材($1\ 770 \sim 1\ 860\text{ MPa}$)外,中等强度($600 \sim 1\ 200\text{ MPa}$)的预应力筋和大直径(21.8 mm 和 28.6 mm)预应力钢绞线也应得到开发应用,新型碳纤维、玻璃纤维和聚酯纤维类非金属预应力筋等产品将得到应用。

中高强度钢筋和中高强度混凝土的组合应用,将可进一步减小结构构件尺寸,建造出更多楼层、更大跨度的建筑,充分发挥材料效率。此外,钢筋工程施工技术将大量实现工厂化、机械化,预制混凝土技术、预制构件、装配整体式结构将得到大量推广应用。

4 结构混凝土的发展对策及研究内容^[13]

为提高混凝土工程技术水平,降低单位建筑面积混凝土和钢筋用量,降低单位体积混凝土中水泥含量,延长建筑物的使用寿命,减少混凝土废弃物排放,减少温室气体排放,降低资源消耗量,以实现混凝土技术的可持续发展。以下提出若干技术及对策研究。

4.1 钢筋材料及工程应用基础研究

(1) 500~800 MPa级高强钢筋材料及适用性(挠度、裂缝)试验研究;

(2) 钢筋防护技术研究。

4.2 预应力材料、技术及标准研究

(1) 中强及高强钢棒、钢丝、钢绞线产品的质

量保证及配套预应力工艺、设备开发研究;

(2) 高强钢材约束配箍作用的研究开发;

(3) 强度高、自重轻、弹性模量大的复合纤维类非金属预应力筋开发研究;

(4) 新型有粘结预应力筋耐久技术开发和应用,无粘结预应力防腐蚀体系的完善;

(5) 预应力拉索及体外索成套技术研究;

(6) 改进修订相关标准规范,提高使用效率,节约材料。

4.3 混凝土材料技术、性能改进及工程应用基础研究

(1) 混凝土骨料体系研究;

(2) 改进混凝土综合性能的试验研究;

(3) 混凝土材料与混凝土结构的综合性能研究;

(4) 轻骨料混凝土基本性能(包括热工、隔音性能等)的研究及工程应用;

(5) 高性能矿物掺合料及高效外加剂的研究及应用;

(6) 机制砂的试验研究及开发利用;

(7) 纤维混凝土和高性能掺合料综合应用技术的研究;

(8) 超高强混凝土的研究;

(9) 促进绿色技术和绿色产品使用的标准规范和技术政策研究。

4.4 混凝土结构耐久性相关技术研究

(1) 钢筋混凝土结构氯盐腐蚀机理及对策的研究;

(2) 干湿交替、冻融循环条件下混凝土结构耐久性的研究;

(3) 既有结构耐久性检测评估及延长服役期的研究;

(4) 混凝土结构耐久性规范的改进完善。

4.5 建筑产业化及预制-叠合混凝土结构体系研究

(1) 装配整体式结构连接构造的研究、标准图设计及工程应用;

(2) 预制构件综合功能的开发利用(观感、装饰、保温、隔音、管线、设备……);

(3) 大跨-重载高效预应力构件的开发及工程应用(空心板、双T板……);

(4) 预制-装配式结构体系的研究、开发及工程应用。

4.6 混凝土结构整体稳固性能及抗灾设计技术研究

(1) 偶然灾害(自然、人为)作用下结构性能调查及分析设计方法研究;

(2) 整体稳固性设计原则的研究(规避、释放、抗御、维护);

(3) 部分构件失效或部分结构区域倒塌工况下,残余结构承载的分析及设计。

4.7 既有混凝土结构的检测评估及再设计技术研究

(1) 对既有混凝土结构检测手段及评估方法的研究;

(2) 既有混凝土结构扩建、改造再设计的研究;

(3) 对缺陷混凝土结构检测加固设计的研究。

4.8 废旧混凝土等材料的高效循环利用的研究

(1) 再生混凝土骨料和再生混凝土构件的开发研究及应用;

(2) 混凝土再生利用过程中的能耗分析和资源循环效率分析研究;

(3) 工业废料及再生水的利用研究;

(4) 再生建筑材料的环境评价研究。

4.9 服役期混凝土结构管理维护检修的研究

(1) 不同历史时期混凝土结构服役情况的调查、分析;

(2) 服役期混凝土结构管理制度的调查、分析、研究;

(3) 混凝土结构定期检测、维护、修理方法的研究。

4.10 混凝土结构施工质量管理及质量控制的研究

(1) 结构混凝土实体强度的检测及验收;

(2) 混凝土结构尺寸偏差及外观质量现状的调查、统计、分析;

(3) 混凝土结构施工质量风险控制的调查、分析;

(4) 混凝土结构施工质量验收方法定量化、科学化的研究。

参考文献

- [1] 中国土木工程学会. 2020 年中国土木工程科学和技术发展研究[R]. 北京: 中国土木工程学会, 2004.
- [2] 冯大斌. 混凝土及预应力技术发展研究[J]. 施工技术, 2007, 36(3): 12-14.
- [3] 陶学康, 王俊. 发展绿色混凝土促进可持续发展[J]. 施工技术, 2008, 37(3): 5-7.

预加力与抗力的关系

白生翔

(中国建筑科学研究院, 北京 100013)

摘 要 介绍了中、美、欧规范对预加力与抗力关系的规定, 当预加力作为作用效应或抗力时, 阐述了在静定结构中的正截面受弯承载力计算的等效性; 指出了预应力筋产生的塑性残余应变会导致预应力的消退并转化为抗力, 提出了超静定结构中的直接荷载弯矩调幅系数和次弯矩消退系数或综合弯矩折减系数的计算方案及其取值建议; 对结构重要性系数与预加力分项系数提出了取用规则。

关键词 预加力, 预应力, 次内力, 抗力, 消退系数, 调幅系数

Abstract The specifications on the relationship between resistance and prestressing force in Chinese code, Eurocode and american code are discussed in this paper. It was approved that the calculation results of the bending resistance capacity of cross sections in the statically determinate structures are same to regard the prestressing force as action or resistance force. The prestressing force would reduce and transfer to resistance force for the plastic residual strain of prestressing steel. The calculation method on the moment modified factor, the secondary internal force reduction factor and the resultant moment reduction factor of statically indeterminate structure are recommended, while the regulations to determine the important factor of structure and the partial load factor of prestressing force are proposed.

Keywords prestressing force, prestress, secondary internal force, resistance, reduction coefficient, moment modified factor

1 问题的起因

《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)(下文简称《统一标准》)第 8.2.2 条规定结构或结构构件的破坏或过度变形的承载能力极限状态设计, 应符合下式要求:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1)$$

式中 γ_0 ——结构重要性系数;

S_d ——作用基本组合的效应设计值;

R_d ——结构或结构构件的抗力设计值。

《统一标准》第 8.2.4 条进一步规定: 当作用与作用效应按线性关系考虑时, 作用基本组合的效应设计值可按式计算:

$$S_d = \sum_{i \geq 1} \gamma_{Gi} S_{Gi} + \gamma_P S_P + \gamma_{Q1} \gamma_{L1} S_{Q1k} + \sum_{j \geq 1} \gamma_{Qj} \psi_{cj} \gamma_{Lj} S_{Qjk} \quad (2)$$

上述符号解释均可见《统一标准》。《统一标准》首次以显式将预加力效应设计值 $\gamma_P S_P$ 纳入基本组合的效应设计值中。此前, 国内学者曾对预加力作为作用并参与组合的问题展开过讨论^[1~4]。

在《统一标准》附表 A.1.7 中, 提供了房屋建筑的结构重要性系数 γ_0 , 这是我国标准特有的规定, 对持久设计状况和短暂设计状况的一级、二级、三级安全等级, 应分别取不小于 1.1, 1.0, 0.9; 在该标准附表 A.1.8 中, 还提供了房屋建筑结构作用的分项系数 $\gamma_G, \gamma_Q, \gamma_P$ 的取值, 其中对预应力(按 N/mm^2 计)或预加力(按 kN 计)作用的分项系数 γ_P , 当作用效应对承载力不利时, 取 1.2; 当作用效应对承载力有利时, 取 1.0。

显然, 《统一标准》将预应力或预加力视为作用, 对我国原有的各行业《混凝土结构设计规范》是一个冲击, 因为我国的传统习惯是: 在正常使用极限状态验算时, 将预应力视为作用或作用效应; 在承载能力极限状态计算中, 由于预应力混凝土主要用于受弯构件或大偏心受压构件, 在要求配置适筋的情况下, 正截面承载力计算中的预应力纵向受拉钢筋均可达到受拉屈服, 按极限平衡的计算原理, 预应力纵向受拉钢筋可直接用其抗拉强度设计值 f_{py} 计算, 此时与预应力纵向受拉钢筋处于消压状态下的应力值 σ_{p0} 无直接关系。因此, 如何理顺预应力或预加力与抗力的关系, 是一

个需要将逻辑性与机理性作统筹处理的问题。

2 各国规范规定

1. 在规范中最早明确提出将预应力或预加力视作“作用”的,可能是20世纪70年代由CEB-FIP编制的《混凝土结构模式规范》MC78,在该版规范中就已给出了类同于式(1.1.2)的表达式,并给出了涉及预加力作为“作用”的有关规定。

2. CEB-FIP的《混凝土结构模式规范》MC90进一步阐述了在正截面承载力计算中对有粘结预应力受拉钢筋设计值给出了下列两种方案:

(1) 假如将预应力作为外荷载来处理,此时预应力钢筋的净抗拉强度设计值取为

$$f_{pyd,net} = 0.9f_{ptk}/\gamma_s - \sigma_{p0} \leq 600 \text{ MPa} \quad (3)$$

(2) 假如不把预应力作为外荷载来处理,此时的预应力钢筋的抗拉强度设计值取为

$$f_{pyd} = 0.9f_{ptk}/\gamma_s \leq \sigma_{p0} + 600 \text{ MPa} \quad (4)$$

式中 f_{ptk} ——预应力钢筋抗拉强度特征值(标准值), $0.9f_{ptk}$ 等同于 f_{pyk} , f_{pyk} 为预应力钢筋屈服强度特征值(标准值);

γ_s ——预应力钢筋分项系数,取1.15。

3. 欧洲规范EN1992—2004第5.10节中给出了下列的一般规定:预应力作为荷载工况的一部分按EN1990定义的作用组合引入(即相当于式(2)),其产生的效应应包含在施加的内弯矩和内轴力中;预应力筋对截面抗力的贡献应限于超过预应力的额外强度(即相当于式(3)),这种贡献可通过预应力筋应力—应变关系的起点移至预应力效应(相当于 σ_{p0})处来计算。

4. 美国规范ACI318—2005对预应力混凝土受弯构件正截面承载力计算作了下列的规定:受弯构件的设计受弯强度(此处,“强度”相当于我国的“承载力”)应按本规范的强度设计方法计算(按该规范第10章的设计假定和一般原理及要求计算),在强度计算中,对预应力筋取用 f_{ps} (为名义抗弯强度下预应力筋中的应力,该规范提供了以预应力筋的规定抗拉强度 f_{pu} 为基础且与 σ_{p0} 无关的经验公式。

5. 我国从规范TJ10—74至GB 50010—2002的各版本中,对预应力混凝土受弯构件正截面承载力和局部受压区域承载力计算,与美国ACI318

规定类同。在正截面承载力计算中满足 $x \leq x_b$ 条件下的有粘结预应力筋可直接取其屈服强度设计值 f_{py} ,即将预应力筋全部抗拉力视作抗力;我国规范的上述做法主要依据原苏联规范CH10—57的思路和方法,采用时间可能早于美国规范ACI318。

6. 由上可知,规范MC90提出的两种方案,正是反映了当时各国规范已存在的实际状况。在上世纪九十年代后,国内学者也提出采取分解预应力筋抗拉力的方案^[1,2],并在中国工程建设标准化协会标准《整体预应力装配式板柱建筑技术规程》(CECS52:93)中正式采用。由此可见,对这一问题作深化探讨十分必要。

3 两种计算方法的等效性

按照规范MC90的两种计算方法,采纳式(2)的预应力设计值的取值,并用我国规范GB 50010的符号表示。

(1) 第一种计算方法:预应力筋中的预加力作为效应设计值,其值可取为

$$N_{p0,d} = \sigma_{p0,d} A_p = \gamma_0 \gamma_p \sigma_{p0} A_p \quad (5)$$

式中 $\sigma_{p0,d}$ ——预应力筋的消压预应力设计值;

σ_{p0} ——预应力筋的消压预应力名义值。

预应力筋中的剩余部分作为抗力材料,其净抗力设计值可取为

$$N_{py,net} = f_{py,net} A_p = (f_{py} - \sigma_{p0,d}) A_p = N_{py} - N_{p0,d} \quad (6)$$

(2) 第二种计算方法:预应力筋全部作为抗力材料,其抗力设计值即为

$$N_{py} = (f_{py,net} + \sigma_{p0,d}) A_p = f_{py} A_p \quad (7)$$

为简单表述,按上述第一种计算方法并取 $A'_p = 0$ 的条件下,在静定的矩形截面预应力混凝土受弯构件的控制截面上,对混凝土受压区合力点取矩可建立正截面受弯承载力的两个平衡方程式(图1(a)):

$$M_{dir} - N_{p0,d} \left[e_{p0} + \frac{1}{2}(h - x) \right] \leq M_{u,net} \quad (8)$$

$$M_{u,net} = (f_{py} - \sigma_{p0,d}) A_p (h_{0p} - \frac{x}{2}) + f_y A_s (h_{0s} - \frac{x}{2}) - f_y' A_s' \left(a_s' - \frac{x}{2} \right) \quad (9)$$

$$N_{p0,d} = \alpha_1 f_c b x + f_y' A' - f_y A_s' - (f_{py} - \sigma_{p0,d}) A_p \quad (10)$$

式(8)、式(10)左端项视作效应设计值,此时的正截面受弯承载力计算按偏心受压构件考虑,其相应的弯矩设计值 M 和轴心压力设计值 N 分别取为:

$$M = M_{dir} - M_{p0,d} \quad (11)$$

$$N = N_{p0,d} \quad (12)$$

$$M_{p0,d} = N_{p0,d} e_{p0} \quad (13)$$

式中 M_{dir} ——直接荷载(恒载和可变荷载)产生的弯矩设计值;

e_{p0} ——预应力纵向受拉钢筋合力点至截面重心的距离,对矩形截面, $e_{p0} =$

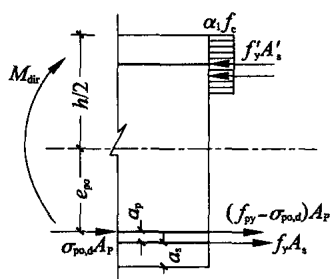
$$h_{0p} - \frac{1}{2} h_0$$

显然,式(12)、式(13)即为预加力设计值产生的预加力效应设计值。

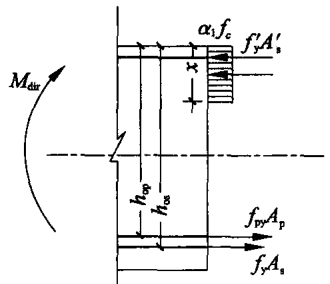
按上述第二种计算方法,如果将式(5)和 e_{p0} 按矩形截面上的取值代入式(8)、式(9)和式(10)后,即得我国规范 GB 50010 给出的预应力混凝土受弯构件计算正截面承载力的设计表达式(图 1(b)):

$$M_{dir} \leq M_u \quad (14)$$

式中, M_u 为预应力筋全部作为抗力材料考虑的正截面受弯承载力设计值。



(a) 按偏心受压构件考虑



(b) 按受弯构件考虑

图 1 矩形截面预应力混凝土受弯构件正截面受弯承载力计算图式

比较图 1(a) 和图 1(b), 两者仅是表现在对预加力效应作简单分解或不作分解的形式差别; 因此对静定的预应力混凝土受弯构件, 按两种计算方法求得的正截面承载力的效果是一致的。

对连续梁、框架梁等后张法超静定有粘结预应力混凝土受弯构件, 按上述的第一种计算方法计算时, 为简化可取 $N_{p0,d} \approx N_{pe,d}$ 、 $M_{p0,d} \approx M_{pe,d}$ (此时, $\sigma_{p0,d} = \sigma_{pe,d} + \alpha_E \sigma_{pc} \approx \sigma_{pe,d}$, $\sigma_{pe,d}$ 为预应力筋中的有效预应力设计值, σ_{pc} 为预应力筋处的混凝土预压应力值) 并视作为作用, 根据预应力筋在构件中布置的不同形状, 可将上述作用转化成预应力荷载形式, 按弹性分析方法算出该超静定结构构件中由预加力产生的效应设计值, 即习称的预加力产生的综合内力或总内力。

第一种和第二种计算方法所采用的预加力效应设计值可广义地写为:

$$S_{p,tot} = S_{p1} + S_{p2} \quad (15)$$

$$S_{p2} = S_{p,tot} - S_{p1} \quad (16)$$

式中 $S_{p,tot}$ ——预加力产生的总内力(或称综合内力), 可以是 $M_{p,tot}$, $V_{p,tot}$, $N_{p,tot}$, $T_{p,tot}$ 等;

S_{p1} ——预加力产生的主内力, 通常为 $N_{p1} = N_{pe,d}$, $M_{p1} = M_{pe,d}$ 等;

S_{p2} ——预加力产生的次内力, 可以是 M_{p2} , V_{p2} , N_{p2} , T_{p2} 等。

式(15)、式(16)中的 S_{p2} 与 S_{p1} 方向相反时, 应取负值。

4 预应力消退

对预应力筋的受拉本构关系以及预应力混凝土轴心受拉构件中的预应力变化过程阐述如下:

(1) 为简明分析, 假定预应力筋受拉的应力(σ_p)—应变(ε_p)关系, 在 $\sigma_p \leq f_{py}$ 条件下符合虎克定律, 当 $\varepsilon_p > \varepsilon_{py}$ ($\varepsilon_{py} = f_{py}/E_p$) 时, 取 $\sigma_p = f_{py}$; 在 $\varepsilon_p > \varepsilon_{py}$ 条件下卸载时, 卸载应力—应变的斜率取与预应力筋的初始弹性模量 E_p 相同; 当混凝土中拉应力 $\sigma_c \leq f_t$ 时, 假定其应力—应变关系也近似认为符合虎克定律。在后面图 2、图 3 中的描述, 将遵循上述的假定。

(2) 后张法有粘结预应力混凝土轴心受拉构件的预应力建立, 对不配置非预应力筋且预应力

损失也已完成的条件下,在未承受施加的外荷载之前,构件截面内力处于自平衡状态,此时截面混凝土预压应力值为 σ_{pc} ,预应力筋中的有效预应力值为 σ_{pe} ,由内力自平衡条件可得:

$$\sigma_{pc} = \rho_p \sigma_{pe} \quad (17)$$

当承受外加的轴心拉力值并使截面混凝土预压应力值达到消压时,处于消压状态的预应力筋中的消压预应力值 $\sigma_{p0,d}$ 可由下式确定:

$$\sigma_{p0,d} = \sigma_{pe} + \alpha_E \sigma_{pc} \quad (18)$$

将式(17)代入式(18)可得下列关系式:

$$\sigma_{pe} = \frac{\sigma_{p0,d}}{1 + \alpha_E \rho_p} \quad (19)$$

式中 ρ_p ——截面中预应力筋的配筋率, $\rho_p = A_p/A_c$, 此处, A_p 为配置的轴心预应力筋截面面积, A_c 为混凝土截面面积;

α_E ——弹性模量的比值, $\alpha_E = E_p/E_c$, 此处, E_c 为混凝土弹性模量。

通过直接施加轴心拉力并按图 2 所示的加载和卸载方式来阐述预应力混凝土轴心受拉构件中预应力的消退现象。

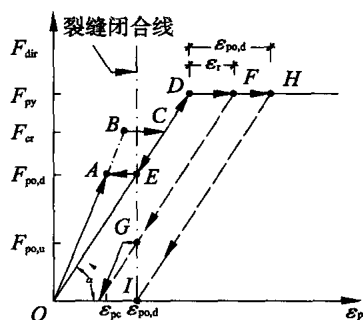


图 2 预应力混凝土轴心受拉构件在加载和卸载下裂缝截面上 $F_{dir} - \varepsilon_p$ 的变化规律

(1) 对构件施加直接的轴心拉力用 F_{dir} 表示, 当 $F_{dir} = F_{p0,d}$ 时, 刚好使混凝土预压应力 σ_{pc} 消失, 即 $F_{p0,d} = F_{pc}$, 显然, 借助式(17)、式(18)可给出:

$$F_{p0,d} = \sigma_{pc} A_c + \alpha_E \sigma_{pc} A_p = \sigma_{p0,d} A_p \quad (20)$$

此时, 图 2 中 A 点处的力值为 $F_{p0,d}$, 其对应的应变值为 ε_{pc} ; 如果立即卸载至零, 此时卸载的荷载—应变曲线由 A 点弹性地退回至原点 O。

(2) 仍从原点 O 开始施加轴心拉力值 F_{cr} 到达 B 点处, 使截面刚达到裂缝形成状态, 在 F_{cr} 值保持不变的条件下, 截面由混凝土与预应力筋共

同受力突变到在开裂截面上仅由预应力筋承受 F_{cr} 值, 其对应的点即为 C 点; 如果继续加载, 荷载—应变曲线将沿直线向上至 D 点, 即达到预应力筋屈服强度设计值 f_{py} , 此阶段的加载将导致裂缝宽度不断扩大; 如果从刚达到 D 点就立即卸载, 卸载路线将会沿 D-C-E-A 返回至原点 O, 预应力的存在是卸载恢复到原始状态的重要保证, 当然, 上面所述仅是理想状态。

(3) 沿 D-E-A-O 的卸载路线表明了下述的受力特征: 由于裂缝的截面已失去混凝土抗拉强度, 在 D-E 卸载过程中, 不再会途径 C-B-A 的路线; 此外在卸载中, 开裂截面上的裂缝会逐渐减小, 当卸载到 E 点时, 就假定认为裂缝即瞬间闭合, 此时对应于 E 点的拉力值仍为 $F_{p0,d}$ 、应变为 $\varepsilon_{p0,d}$; 沿 E-A 的卸载平台表示裂缝闭合的过程, 对应于 A 点的拉力值为 F_{pc} 、应变则为 ε_{pc} , 因为 A 点的拉力值可取为:

$$F_{pc} = \sigma_{pc} A_c (1 + \alpha_E \rho) \quad (21)$$

显然, 式(21)与式(20)是等价的。

(4) 基于 E 点是裂缝瞬间闭合点, 因此可将图 2 中通过 E 点与对应应变 $\varepsilon_{p0,d}$ 的垂直线称为“裂缝闭合线”, 其实, 由式(20)可知, 它也就是预应力钢筋中消压预应力值 $\sigma_{p0,d}$ 所对应的控制点。

(5) 如果按前述的加载到 D 点后, 在保持荷载值 F_{py} 不变的条件下, 构件裂缝将继续扩大, 此时预应力筋就产生塑性残余应变 ε_r , 并到达其相应的位置为 F 点后随即卸载, 如图 2 所示的卸载曲线与上述的“裂缝闭合线”相交于 G 点, 表明在达到 G 点时构件裂缝即为瞬间闭合开始点, 此时所对应的拉力值取为 $F_{p0,u}$; 如果当加载至 D 点后, 保持荷载值 F_{py} 不变条件下, 当塑性残余应变到达 $\varepsilon_r = \sigma_{p0,d}/E_p = \varepsilon_{p0,d}$ 时, 也即到 H 点后即行卸载, 如图 2 所示的卸载曲线直降至 I 点, 也即在该点达到闭合条件, 此时其拉力值 $F_{p0,u}$ 为零。

(6) 通过图 2 在 D、F、H 三点的卸载经历告诉我们, 由于产生了不同量级的塑性残余应变值, 导致达到裂缝闭合时所对应的拉力值各不相同。于是, 可引伸出一个概念, 即预应力筋考虑塑性残余应变 ε_r 的有效消压预应力设计值 $\sigma_{p0,u}$ 可按 G 点由下式确定:

$$F_{p0,u} = \sigma_{p0,u} A_p \quad (22)$$

由图 2 所示可知, 从 F 点降至 G 点, 两点之间

塑性残余应变值 ε_r 所对应的拉力值应为 $\varepsilon_r \tan \alpha$, 其中 $\tan \alpha = E_p A_p$, 于是可将式(22)改写为:

$$F_{p0,u} = F_{p0,d} - E_p \varepsilon_r A_p \quad (23)$$

将式(20)、式(22)代入上式后,可得考虑塑性残余应变 ε_r 的有效消压预应力设计值的计算式应为:

$$\sigma_{p0,u} = \sigma_{p0,d} - E_p \varepsilon_r \quad (24)$$

式中, ε_r 为总的塑性残余应变, 当 $\varepsilon_r > \sigma_{p0,d}/E_p$ 时, 应取 $\varepsilon_r = \sigma_{p0,d}/E_p$ 。

有效消压预应力设计值在正截面承载力计算中的应用:

(1) 预应力混凝土受弯或大偏心受力构件在达到正截面承载能力极限状态时, 在有粘结预应力筋中的有效消压预应力设计值 $\sigma_{p0,u}$, 应采用预应力筋达到屈服强度 f_{py} 及以后所产生的塑性残余应变 ε_r 相关的式(24)。在这里, 对式(24)作进一步诠释(图3), 因为塑性残余应变 ε_r 的产生, 从本质上讲就相当于预应力筋产生了松弛, 从而在该极限状态下产生应力松弛损失值 $\sigma_1 = E_p \varepsilon_r$, 预应力就此开始消退, 而此应力松弛损失值就转化为承载能力极限状态下有粘结预应力筋中有效抗力的增量。

(2) 预应力筋抗拉强度设计值的取值。

第一种计算方法:

$$f_{py,net} = f_{py} - \sigma_{p0,u} \quad (25)$$

第二种计算方法:

$$f_{py} = f_{py,net} + \sigma_{p0,u} \quad (26)$$

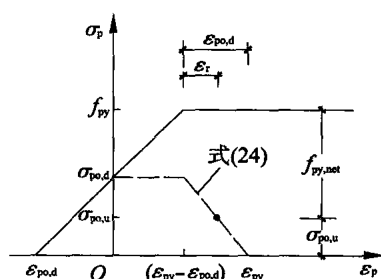


图3 $\sigma_{p0,u} - \varepsilon_r$ 变化关系示意

塑性残余应变 ε_r 与截面相对受压区高度密切相关。在假定有粘结预应力钢筋中应力不大于 f_{py} 时具有弹性性能, 当超过时就产生塑性残余应变 ε_r , 按规范 GB 50010 规定的平截面假定计算并采用相同的符号时, 受拉的预应力纵向钢筋应变

可用 $[(f_{py} - \sigma_{p0,d})/E_p + \varepsilon_r]$ 表示, 于是, 可写出按有粘结预应力纵向受拉钢筋合力点确定的截面有效高度 h_{0p} 为基准的相对受压区高度公式:

$$\xi_p = \frac{x}{h_{0p}} = \frac{\beta_1}{1 + \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{cu}} + \frac{f_{py} - \sigma_{p0,d}}{E_p \varepsilon_{cu}}} \quad (27)$$

事实上, 预应力钢丝和钢绞线刚达到 f_{py} 时已有残余应变值 $\varepsilon_{r,py} = 0.002$, 此时 $\sigma_{p0,u} = \sigma_{p0} - 0.002 E_p \approx \sigma_{p0} - 400 \text{ N/mm}^2$, 因此符合式(24)理念并已由规范 GB 50010 提供的相对界限受压区高度 ξ_{bp} 公式。

由式(24)取 $\sigma_{p0,u} = 0$, 即得 $\varepsilon_r = \sigma_{p0,d}/E_p$, 表示预应力 $\sigma_{p0,d}$ 全部消失时的相对受压区高度为

$$\xi_{dp} = \frac{x_{dp}}{h_{0p}} = \frac{\beta_1}{1 + \frac{f_{py}}{E_p \varepsilon_{cu}}} \quad (28)$$

式中, x_{dp} 为预应力刚达到全部消失时的截面受压区高度。

由式(27)和式(28)可知: 当 $\xi_{dp} \leq \xi_p \leq \xi_{bp}$ 时, 预应力 $\sigma_{p0,d}$ 逐步在消退, 预应力筋作为抗力的成分逐步增大, 这可算作正截面内力重分布的一种形式。对 $f_{ptk} = 1860 \text{ N/mm}^2$ 的钢绞线, 按式(28)取 $\beta_1 = 0.8$, $E_p \varepsilon_{cu} = 644 \text{ N/mm}^2$, $f_{py} = 1320 \text{ N/mm}^2$, 可算得 $\xi_{dp} = 0.262$ 。当 $\xi \leq \xi_{dp}$ 时, σ_{p0} 全部消失, 由式(12)、式(13)得 $N_{p0,d} = 0$, $M_{p0,d} = 0$, 因此由式(11)得 $M = M_{dir}$, 预应力筋全部转化为抗力的成分, 在此状态下静定的预应力混凝土受弯构件就等效于钢筋混凝土受弯构件。

5 后张有粘结预应力混凝土超静定结构的内力重分布

5.1 有关规范的规定

20 世纪 70 年代美国规范 ACI318 认为, 由于控制(临界)截面形成塑性铰而使结构成为机构, 预应力次弯矩会自然消失; 我国土木工程学会于 1985 年提出的《部分预应力混凝土结构设计建议》接受了此观点。在 20 世纪 80 年代版本中又作出规定, 对预应力混凝土超静定结构允许考虑弯矩重分布, 并强调了应配置非预应力钢筋并考虑塑性铰的转动能力的大小。该规范 1992 版中指出了一个重要的概念: 由于预加力引起的反力

所产生的次弯矩在弹性、非弹性阶段均很重要,当产生塑性铰和充分的弯矩重分布时,次弯矩就消失;同时,也指出:对弯矩重分布的严格设计方法十分复杂,通常用实用的简单方法来完成,即对荷载产生的直接弯矩 M_{dir} 与预应力次弯矩 M_{p2} 之和进行适当地调整,且调整的幅度应在安全限度之内。

综上所述,在 ACI318 美国规范 20 世纪 80 年代版本中,规定调整后的弯矩设计值可取为

$$M = (1 - \beta)M_{dir} + M_{p2} \quad (29)$$

当 M_{p2} 与 M_{dir} 方向相反时,应取负值。

在 ACI318 美国规范 20 世纪 80 年代及以后版本中,规定调整后的弯矩设计值可取为:

$$M = (1 - \beta)(M_{dir} + M_{p2}) \quad (30)$$

式中, β 为直接荷载弯矩的调幅系数。

美国规范从最初不考虑次弯矩到按式(29)对次弯矩不作调整再到式(30)要与直接弯矩作同样调整,反映了该规范对内力重分布的认识也在不断改变。美国规范 ACI318 还规定:对钢筋混凝土和预应力混凝土(包括含配置足够多有粘结非预应力钢筋的无粘结预应力混凝土)连续受弯构件,其支座负弯矩的调幅系数均取 $\beta \leq 0.2$ 。

欧洲规范 EN1992—2004 似乎对预应力混凝土结构的内力重分布没有作具体的规定,但对钢筋混凝土结构的,荷载弯矩调幅系数 β 作了规定,他取决于控制截面(支座处和跨中截面)的塑性转动能力,与控制截面的纵向和横向配筋特征值以及钢筋的延性和粘结性能等有关。为限制 β 值取得过大,该规范对 B 类和 C 类钢筋(我国的热轧带肋钢筋性能与其相当甚至更好),应取 $\beta \leq 0.3$; 对 A 类钢筋(大致相当于我国某些冷加工钢筋),应取 $\beta \leq 0.2$;《模式规范》MC90 指出,在缺乏更精确资料的情况下,后张预应力筋可视为 A 类钢筋。

5.2 有关试验研究及计算式

在 20 世纪 90 年代,我国数个高等院校开展了有粘结和无粘结后张预应力混凝土连续梁的试验研究,研究对比了无次弯矩与有次弯矩连续梁在达到承载能力极限状态时,次弯矩的消退状况及弯矩重分布现象,在文献[5]中摘要介绍了上述高等院校的主要试验结果。

借助上述试验结果并综合上述国内文献中的分析观点和建议,对存在次弯矩的后张预应力混

土超静定结构,文献[5]按第二种计算方法提出了经弯矩重分布后的弯矩设计值可用下式描述:

$$M = (1 - \beta)M_{dir} + \alpha M_{p2} \leq M_u \quad (31)$$

式中 β ——直接荷载产生的弹性弯矩的调幅系数,其变化幅度为 $0 \leq \beta \leq \beta_{max}$, β_{max} 为最大的调幅系数;

α ——次弯矩消退系数,其变化幅度为 $0 \leq \alpha \leq 1.0$ 。

式(31)及其相关取值幅度已为规范 GB 50010—2002 的条文说明采纳作为内力重分布解释之用。

基于实用的观点,在文献[5]中提出了 α, β 两个系数可用相对受压区高度 ξ 表示并呈线性关系的经验公式。

基于前述的预应力消退概念,在结构达到承载能力极限状态时,静定的有粘结预应力混凝土受弯构件控制截面上对应于 $\sigma_{p0,d}$ 计算的预应力主弯矩 M_{p1} ,也应随式(24)中 $\sigma_{p0,u}$ 的消退而转化为截面受弯承载力的增量;同理,对超静定的预应力混凝土结构控制截面上对应于 $\sigma_{p0,d}$ 逐步消退为 $\sigma_{p0,u}$ 时,按弹性分析计算的预应力主弯矩 M_{p1} 也将逐步转化为截面受弯承载力增量;同时其相应的预应力次弯矩 M_{p2} 也只能随 $\sigma_{p0,u}$ 同步消退;当截面中存在预应力次轴力 N_{p2} 或其他次内力时,在正截面承载力计算中也应考虑其随 $\sigma_{p0,u}$ 同步消退。

于是,预应力次弯矩的消退系数实为预应力筋中预应力的消退系数 α ,由式(24)可写出:

$$\alpha = \frac{\sigma_{p0,u}}{\sigma_{p0,d}} = 1 - \frac{E_p \varepsilon_r}{\sigma_{p0,d}} \quad (32)$$

由式(27)可给出下式:

$$\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_{cu}} = \frac{\beta_1}{\xi_p} - \left(1 + \frac{f_{py} - \sigma_{p0,d}}{E_p \varepsilon_{cu}}\right) \quad (33)$$

将式(33)代入式(32)后,可得 α 与 ξ 的下列关系式:

$$\alpha = 1 + \frac{E_p \varepsilon_{cu}}{\sigma_{p0,d}} \left(1 + \frac{f_{py} - \sigma_{p0,d}}{E_p \varepsilon_{cu}}\right) - \frac{\beta_1 E_p \varepsilon_{cu}}{\sigma_{p0,d} \xi_p} \quad (34)$$

式(34)表明, α 值与 ξ_p 之间呈非线性的退化关系。

对后张法有粘结预应力混凝土超静定结构考虑内力重分布的正截面承载力设计表达式,如果将式(31)改成前述的第一种计算方法表示,可在式(31)基础上改写为

$$(1 - \beta)M_{\text{dir}} + \gamma M_{\text{p,tot}} \leq M_{\text{u,net}} \quad (35)$$

$$\gamma = \alpha + \frac{(1 - \alpha)M_{\text{p1}} + M_{\text{p3}}}{M_{\text{p,tot}}} \quad (36)$$

$$M_{\text{p,tot}} = M_{\text{p1}} + M_{\text{p2}} \quad (37)$$

$$M_{\text{p3}} = N_{\text{pe,d}} \left(y'_c - \frac{x}{2} \right) \quad (38)$$

式中, y'_c 为截面重心至截面受压边的距离。

式(35)中的 γ 可称为预应力综合弯矩(总弯矩) $M_{\text{p,tot}}$ 的折减系数: 在式(35)至式(37)中, 当 $M_{\text{p,tot}}$ 及 M_{p1} 、 M_{p3} 与 M_{dir} 的作用方向相反时, 应取负值。显然, 按式(35)、式(36)计算似乎并不比式(31)简单。

5.3 调幅系数 β 和预应力消退系数 α 的实用取值

在理论分析和试验结果为依据的条件下, 作为规范的规定, 通常会采用较稳妥的取值。例如, 有关规范对直接荷载弯矩的调幅系数取 $\beta = 1.0$ 时, 所对应的相对受压区高度常取 0.35 或 0.30; 当取用 $\beta_{\text{max}} = 0.2$ 或 0.3 时, 所对应的相对受压区高度常取值为 0.15 ~ 0.10。当确定预应力消退系数 α 时, 取 $\alpha = 1.0$ 的相对受压区高度可与调幅系数取 $\beta = 1.0$ 时相一致; 当 $\alpha = 0$ 时的相对受压区高度可近似地取 0.25 或 0.20。

基于上述的思路, 就可提出下列两个实用方案:

第一方案

$$\alpha = 3.5 - \frac{0.875}{\xi_p} \quad (39)$$

$$\beta = 3.2\xi_p - 0.12 \quad (40)$$

第二方案

$$\alpha = 3.0 - \frac{0.60}{\xi_p} \quad (41)$$

$$\beta = 4\xi_p - 0.20 \quad (42)$$

显然, 上面公式的取值范围应符合下列条件: $0 \leq \alpha \leq 1.0$, $0 \leq \beta \leq 0.20$ 。当仍需采用式(36)的表达形式时, 其预应力综合弯矩折减系数 γ 中的 α 值可由式(39)或式(41)确定。

6 预应力效应设计值的取用

预应力效应设计值 $\sigma_{\text{p0,d}}$ 可由式(5)给出如下:

$$\sigma_{\text{p0,d}} = \gamma_0 \gamma_p \sigma_{\text{p0}} \quad (43)$$

不管何种作用组合情况, 式(43)中取两个系数相乘($\gamma_0 \times \gamma_p$)是否合理需作进一步探讨。当对承载力处于不利情况且 γ_0 和 γ_p 均取大于 1.0 时, 从提高可靠度讲两个系数相乘是合乎逻辑的; 反之, 当对承载力处于有利情况并仍取 γ_0 大于 1.0 时, 可能会导致可靠度降低。

预加力效应不论置于作用效应项 S_d 内或纳入抗力项 R_d 内, 一定要判别清楚对承载力计算属于不利或有利情况。为实际预应力的计算需要, 在按式(1)和式(2)中的预加力项具体计算时, 执行标准 GB 50153 的规定似乎不尽合理, 但可参照该标准对刚体失去静力平衡的承载能力极限状态设计理念。为此, 这里建议采用下列的明确规定:

预加力作用效应对承载力不利时, 应取用

$$S_{\text{pd}} = 1.2\gamma_0 S_p \quad (44)$$

式中, γ_0 为与安全等级有关的结构重要性系数: 一级取不小于 1.1, 二级取不小于 1.0; 对预应力施工阶段的验算, 可取不小于 1.0。

预加力施加在结构上, 预应力筋的合理布置必定期望对各控制截面的受弯、受剪承载力起有利的作用。因此, 预加力作用效应对承载力有利时, 应取用:

$$S_{\text{pd}} = S_p \quad (45)$$

式(45)也适用于正常使用极限状态的验算。

参考文献

- [1] 杨华雄. 整体预应力装配式板柱建筑的设计与施工[M]. 北京: 中国计划出版社, 1996.
- [2] 郑文忠, 计学闰, 廉晓飞, 等. 预应力混凝土结构承载力极限状态设计统一公式[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1998(5).
- [3] 熊学玉, 黄鼎业, 颜德. 预应力混凝土结构荷载效应组合及正截面承载力设计计算的建议[J]. 工业建筑, 1998(2).
- [4] 薛伟辰. 预应力次弯矩的设计研究[J]. 同济大学学报, 2001(6).
- [5] 白生翔. 后张法预应力混凝土结构构件设计方法中的几个问题[C]//第十届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会议论文集, 1998.