

建筑施工工程师技术丛书

现代预应力 工程施工

(第二版)

杨宗放 李金根 编著

中国建筑工业出版社

TU75/4

2008

建筑施工工程师技术丛书

现代预应力工程施工

(第二版)

杨宗放 李金根 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

现代预应力工程施工/杨宗放, 李金根编著. —2 版.
北京: 中国建筑工业出版社, 2007
(建筑施工工程师技术丛书)
ISBN 978-7-112-09741-8

I. 现… II. ①杨…②李… III. 预应力结构-工
程施工 IV. TU75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 175245 号

建筑施工工程师技术丛书

现代预应力工程施工

(第二版)

杨宗放 李金根 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京市兴顺印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 8 $\frac{3}{4}$ 字数: 224 千字

2008 年 4 月第二版 2008 年 4 月第四次印刷

印数: 14601—17600 册 定价: 18.00 元

ISBN 978-7-112-09741-8

(16405)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

第二版出版说明

《现代预应力工程施工》自1993年初版发行以来，深受在工程施工生产第一线的建筑施工工程师的欢迎。这些工程技术人员常年担负着繁忙而复杂的工程任务，无暇博览群书。这套丛书帮助他们用有限的时间，学习建筑工程的新技术，更新自己的知识结构，更好地适应现代化建筑施工技术的要求。因此，这套丛书对于在职科技人员的继续教育，起了积极的作用。同时，这套丛书也成为大专院校土木工程专业学生的选修教材。

但是，本书第一版出版至今已经14年。这14年的时间，在改革开放大潮的推动下，我国的建筑事业蓬勃发展，兴建了许多高新建筑，促使新材料、新工艺、新技术不断涌现，并形成了许多新的成套技术。在此期间，国家颁发了新的设计、施工标准规范。这些新的变化，使本书第一版的内容已显得陈旧，不能满足建筑工程技术人员学习、更新知识的欲望。为此，我们组织了本书第二版的修订。

本书第二版，着重补充近几年我国建筑工程施工技术与管理方法的最新成果和成熟的施工经验，以及高新技术在建筑工程中的应用，适当介绍国外的最新技术，并按新颁国家标准、规范的要求进行修订。对第一版中存在的问题，本次修订时也尽可能一一作了订正。

我们希望本书第二版，继续对现场施工工程师们学习新技术有所裨益。同时，我们也欢迎广大读者对本套丛书的内容提出宝贵意见，以便我们改进。谢谢！

2007年12月

第一版出版说明

当前，新技术革命浪潮冲击着一切经济部门，建筑业也不例外。许多现代化的科学技术方法和管理手段正逐步地应用在建筑业中，取得了越来越大的经济效益。党的十一届三中全会以来，我国的建筑事业得到了蓬勃发展，各种现代化的建筑如雨后春笋，逐年增多。常年奔波在施工生产第一线的建筑施工工程师们，担负着繁重而复杂的施工任务。他们渴望学习新技术，提高业务水平；渴望更新自己的知识以适应现代化的要求。从科学技术的发展和四化建设的需要考虑，对在职科技人员进行继续教育的重要性和迫切性也日益突出。为此，我们组织出版了这套丛书，希望这套书能对他们有所裨益，并在工程实践中广泛应用新技术，建造出更多优良的工程，取得更佳的经济效益。

城乡建设环境保护部曾委托同济大学、重庆建筑工程学院、哈尔滨建筑工程学院从一九八一年开始举办建筑施工工程师进修班。这套丛书就是根据这些班的教学内容，结合当前施工技术的发展，将施工新技术、新材料、新结构的课题适当加多，以同济大学的老师为主组织编写的。可作为工程师进修班的教材，也可作为建筑施工工程师和有关人员自学丛书。计划列题十余种，三年左右出齐。成书时尽量做到内容完整系统，文字叙述深入浅出，以便于现场施工工程师和技术员自学。当然，书中的内容选材是否适当，能否满足读者的要求，还希望广大读者提出意见，以便我们改进。谢谢！

1993年6月

第二版前言

现代预应力技术是我国建筑业重点开发和推广的项目。近10年来,随着我国国民经济的快速发展,现代预应力技术的应用范围日益扩大,预应力工程项目在建筑工程中所占的比重上升。预应力技术进步与创新主要有:高强度低松弛钢绞线、环氧涂层钢绞线、缓粘结钢绞线、塑料波纹管、真空辅助灌浆、孔道灌浆专用外加剂、体外预应力技术、预应力拉索技术等。最近几年,随着我国大跨度大型公共建筑的建设,预应力技术与钢结构结合,创造出斜拉结构、索桁结构、张弦结构、弦支穹顶等结构新体系,轻盈活泼,时代感强。

2001年以来,国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300—2001和相关的《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204—2002等颁布,全面调整了建筑工程质量管理和验收方面的要求。由于预应力工程施工的专业性较强、技术含量较高、施工工艺复杂,工程建设标准化协会又组织东南大学华东预应力技术联合开发中心、中国建筑科学研究院结构所、北京市建筑工程研究院和上海市建筑科学研究院等单位编制了《建筑工程预应力施工规程》CECS 180: 2005,指导预应力施工作业,提高预应力施工质量、推动预应力技术的发展。

本书顺应形势的发展,将原书《现代预应力混凝土施工》修改为《现代预应力工程施工》,内容包括建筑工程中混凝土结构和钢结构预应力施工。本书删除了原书一些陈旧及实用性差的内容,补充了上述预应力新材料、新技术、新工艺及质量验收要求。高强混凝土一节调整至本丛书“新型混凝土及其施工工艺”册内。

全书共分9章。第1~4章预应力筋、锚固体系、张拉设备和施工计算；第7章特种混凝土结构预应力施工及第8章钢结构预应力施工等由杨宗放编写；第5章预应力施工工艺、第6章混凝土结构预应力施工及第9章预应力结构经济分析等由李金根编写。

本书在再版编写过程中，有关设计、施工和科研单位提供了宝贵的技术资料，表示衷心的感谢。本书限于编者的水平和时间，难免会有不妥之处，恳切希望广大读者给予批评指正。

2007年11月

第一版前言

现代预应力混凝土，又称高效预应力混凝土，主要是指采用高强预应力钢材、高强混凝土为特征的预应力混凝土。这种预应力混凝土的节材效果大、结构功能质量好。在我国国民经济和社会发展十年规划及“八五”计划纲要中列为重点开发和推广的项目。

80年代，由于现代工业、交通、能源、商业和公用事业等发展的需要，高效预应力混凝土的出现，我国预应力技术从单个预制构件发展到预应力结构新阶段。几年来，在北京、上海、江苏、浙江、广东、湖南、四川等地陆续建造了一批大柱网预应力混凝土房屋结构、大跨度预应力混凝土桥梁结构、大型预应力混凝土特种结构等，取得了显著的综合经济效益。

几年来，通过预应力技术开发和工程实践，我国现代预应力混凝土材料与施工水平有了很大的提高。主要的新技术项目有：低松弛钢丝与钢绞线、钢绞线束群锚体系、大吨位张拉设备、金属波纹管留孔技术、后张预应力成套技术、无粘结预应力成套技术等。此外，所提出的预应力筋与孔道壁之间的反摩擦理论，为张拉阶段预应力损失和工艺计算奠定基础。

本书系统地介绍了现代预应力混凝土的新材料、新设备和新技术，并在这一基础上介绍了各类预应力混凝土结构的施工。此外，本书还增加了预应力混凝土结构构造与经济分析知识。

本书第二章第三节、第三章第一节和第五章第一节部分内容及第五章第三节由方先和同志编写，书中插图由刘群等同志绘制。

本书在编写过程中，有关设计、施工和科研单位提供了技术

资料，特此表示衷心的感谢！

本书限于作者的水平和时间，可能有错误或不妥之处，恳切希望读者批评与指正。

1993 年 6 月

目 录

1 预应力筋	1
1.1 预应力筋品种和规格	1
1.1.1 预应力钢丝	1
1.1.2 预应力钢绞线	4
1.1.3 高强螺纹钢筋	8
1.1.4 预应力钢棒	11
1.2 预应力筋性能	11
1.2.1 应力-应变曲线	11
1.2.2 应力松弛	12
1.2.3 应力腐蚀	13
1.2.4 温度影响	14
1.3 涂层预应力筋	15
1.3.1 镀锌钢丝和镀锌钢绞线	15
1.3.2 无粘结钢绞线	16
1.3.3 环氧涂层钢绞线	18
1.3.4 不锈钢绞线	19
1.4 质量检验	19
1.4.1 预应力钢丝验收	19
1.4.2 预应力钢绞线验收	20
1.4.3 高强螺纹钢筋验收	21
1.4.4 涂层预应力筋验收	21
1.5 装运和存放	22
2 预应力筋锚固体系	23
2.1 性能要求	23
2.1.1 锚具基本性能	23

2.1.2	夹具基本性能	25
2.1.3	连接器基本性能	25
2.2	钢绞线锚固体系	26
2.2.1	夹片锚固单元受力分析	26
2.2.2	单孔夹片锚固体系	27
2.2.3	多孔夹片锚固体系	28
2.2.4	扁形夹片锚固体系	31
2.2.5	固定端锚固体系	32
2.2.6	钢绞线连接器	34
2.2.7	环形锚具	35
2.3	钢丝束锚固体系	36
2.3.1	镦头锚固体系	36
2.3.2	单根钢丝夹具	39
2.4	高强螺纹钢筋锚固体系	40
2.4.1	高强螺纹钢筋锚具	40
2.4.2	高强螺纹钢筋连接器	41
2.5	拉索锚固体系	42
2.5.1	钢绞线压接锚具	42
2.5.2	冷(热)铸镦头锚具	43
2.5.3	钢绞线拉索锚具	44
2.5.4	钢棒拉杆锚具	45
2.6	质量检验	45
2.6.1	检验项目与要求	45
2.6.2	静载锚固性能试验	47
3	张拉设备	50
3.1	液压张拉千斤顶	50
3.1.1	穿心拉杆式千斤顶	50
3.1.2	大孔径穿心千斤顶	51
3.1.3	前置内卡式千斤顶	53
3.1.4	开口式双缸千斤顶	55
3.1.5	液压张拉装置	56
3.1.6	扁千斤顶	57

3.2	电动油泵	58
3.2.1	通用电动油泵	58
3.2.2	小型电动油泵	59
3.2.3	超高压变量油泵	61
3.2.4	外接油管与油嘴	62
3.3	张拉设备标定与选用	63
3.3.1	张拉设备标定	63
3.3.2	张拉设备选用与张拉空间	65
4	预应力施工计算	67
4.1	曲线预应力筋坐标方程	67
4.1.1	单抛物线形	67
4.1.2	正反抛物线形	68
4.1.3	直线与抛物线相切	68
4.2	预应力筋下料长度	69
4.2.1	钢绞线束夹片锚固体系	69
4.2.2	钢丝束墩头锚固体系	70
4.3	预应力筋张拉力	71
4.3.1	张拉力	71
4.3.2	有效预应力值	71
4.4	预应力损失	72
4.4.1	孔道摩擦损失	72
4.4.2	锚固损失	76
4.4.3	弹性压缩损失	79
4.4.4	预应力筋应力松弛损失	81
4.4.5	混凝土收缩和徐变损失	81
4.5	预应力筋张拉伸长值	81
4.5.1	计算公式	81
4.5.2	公式应用	83
4.6	锚固区局部受压承载力验算	84
4.6.1	局部受压区截面尺寸	84
4.6.2	局部受压区承载力	85
4.7	计算示例	86

5 预应力施工工艺	93
5.1 后张法预应力施工	93
5.1.1 预应力筋孔道留设	94
5.1.2 预应力筋制作	104
5.1.3 预应力筋穿入孔道	108
5.1.4 预应力筋张拉	109
5.1.5 孔道灌浆	118
5.1.6 无粘结预应力施工	126
5.1.7 缓粘结预应力施工	129
5.1.8 端部切割与封固	133
5.2 先张法预应力施工	133
5.2.1 预应力构造要求	134
5.2.2 先张法台座	135
5.2.3 预应力筋铺设	142
5.2.4 预应力筋张拉	143
5.2.5 预应力筋放张	147
5.2.6 先张法预制构件	148
5.3 体外预应力施工	150
5.3.1 体外预应力束布置	150
5.3.2 体外预应力体系	152
5.3.3 体外预应力构造要求	152
5.3.4 体外预应力施工	154
6 混凝土结构预应力施工	155
6.1 预应力混凝土结构体系	155
6.1.1 部分预应力混凝土框架结构体系	155
6.1.2 无粘结预应力混凝土楼板结构体系	156
6.2 预应力筋布置	157
6.2.1 预应力筋布置原则	157
6.2.2 框架梁预应力筋布置	157
6.2.3 框架柱预应力筋布置	160
6.2.4 楼板预应力筋布置	161
6.3 锚固区构造	164

6.3.1	框架梁锚固区构造	164
6.3.2	框架柱锚固区构造	166
6.3.3	楼板锚固区构造	167
6.3.4	特殊部位构造	167
6.3.5	减少约束影响的措施	169
6.4	现浇预应力混凝土结构施工	171
6.4.1	施工顺序	171
6.4.2	施工段划分	174
6.4.3	框架梁预应力施工	178
6.4.4	框架柱预应力施工	180
6.4.5	有关工序的配合要求	182
6.5	预制预应力混凝土结构施工	184
6.5.1	预制板柱结构整体预应力施工	184
6.5.2	预制预应力装配整体式框架施工	188
7	特种混凝土结构预应力施工	196
7.1	环向预应力施工	196
7.1.1	环向预应力筋布置与构造	196
7.1.2	环向有粘结预应力施工	199
7.1.3	环向无粘结预应力施工	200
7.1.4	环锚张拉法	201
7.2	竖向预应力施工	203
7.2.1	竖向预应力筋布置	203
7.2.2	竖向孔道留设	205
7.2.3	预应力筋穿入孔道	206
7.2.4	竖向预应力筋张拉	207
7.2.5	竖向孔道灌浆	207
7.3	双向预应力施工	208
7.3.1	蛋形消化池双向预应力施工	208
7.3.2	核电站安全壳双向预应力施工	211
8	钢结构预应力施工	217
8.1	钢桁架预应力施工	217
8.1.1	预应力筋布置与构造	217

8.1.2 预应力筋张拉	220
8.2 吊挂结构斜拉索施工	221
8.2.1 斜拉索布置与端部构造	221
8.2.2 斜拉索安装	223
8.2.3 斜拉索张拉	224
8.3 张弦结构拉索施工	225
8.3.1 大跨度预应力张弦桁架拉索施工	226
8.3.2 大型预应力弦支穹顶拉索施工	228
8.4 钢拱架结构张拉成型法	231
9 预应力结构经济分析	234
9.1 现代预应力结构的综合经济效益	235
9.1.1 多层框架结构	235
9.1.2 高层楼面结构	236
9.1.3 单层屋面结构	237
9.2 部分预应力混凝土框架结构经济分析	237
9.2.1 设计资料	238
9.2.2 预算价格	238
9.2.3 经济分析	238
9.3 经济分析示例	244
9.3.1 预应力混凝土框架梁经济比较	244
9.3.2 预应力梁式钢屋盖结构技术经济比较	246
主要参考文献	249

1 预应力筋

预应力筋是施加预应力用的单根或成束钢丝、钢绞线、高强钢筋和钢棒的总称，简称力筋。预应力筋按粘结状态不同，又可分为有粘结预应力筋、无粘结预应力筋、缓粘结预应力筋等。有粘结预应力筋是张拉后直接与混凝土粘结或通过灌浆使之与混凝土粘结的一种预应力筋。无粘结预应力筋是表面涂防腐润滑脂并外包塑料护套后，与周围混凝土不粘结的一种预应力筋。

1.1 预应力筋品种和规格

预应力筋按材料类型可分为：钢丝、钢绞线、钢筋和钢棒、非金属预应力筋等。其中，钢绞线用途最广。非金属预应力筋主要有碳纤维增强塑料筋（CFRP）、玻璃纤维增强塑料筋（GFRP）等，目前还处于开发研究阶段。

预应力筋的发展趋势为超高强、大直径、低松弛、高延性和耐腐蚀。

1.1.1 预应力钢丝

预应力钢丝是用优质高碳钢盘条经索氏体化处理、酸洗、镀铜或磷化后冷拔而成的钢丝总称。预应力钢丝用高碳钢盘条的含碳量为0.7%~0.9%。为了使高碳钢盘条能顺利拉拔，并使成品钢丝具有较高的强度和良好的韧性，盘条的金相组织应从珠光体变为索氏体。由于轧钢技术的进步，可采用轧后控制冷却的方法，直接得到索氏体化盘条。

预应力钢丝根据深加工要求不同，可分为冷拉钢丝和消除应

力钢丝两类。消除应力钢丝按应力松弛性能不同，又可分为普通松弛钢丝和低松弛钢丝。

预应力钢丝按表面形状不同，可分为光圆钢丝、刻痕钢丝和螺旋肋钢丝。

1. 冷拉钢丝

冷拉钢丝是经冷拔后直接用于预应力混凝土的光圆钢丝。其盘径基本等于拔丝机卷筒的直径，开盘后钢丝呈螺旋状，没有良好的伸长值。这种钢丝存在残余应力，屈强比低，伸长率小，仅用于铁路轨枕、压力水管、电杆等。

2. 消除应力钢丝（普通松弛型）

消除应力钢丝（普通松弛型）是冷拔后经高速旋转的矫直辊筒矫直，并经回火（ $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ ）处理的光圆钢丝。其盘径不小于 1.5m 。钢丝经矫直回火后，可消除钢丝冷拔中产生的残余应力，提高钢丝的比例极限、屈强比和弹性模量，并改善塑性；同时获得良好的伸直性，施工方便。这种钢丝以往广泛应用，由于技术进步，已逐步向低松弛钢丝发展。

3. 消除应力钢丝（低松弛型）

消除应力钢丝（低松弛型）是冷拔后在张力状态下经回火处理的光圆钢丝。钢丝的张力为抗拉强度的 $30\%\sim 50\%$ ，张力装置有以下两种：一是利用二组张力轮的速度差使钢丝得到张力 [图 1-1 (a)]；二是利用拉拔力作为钢丝的张力，即放线架上的半成品钢丝的直径要比成品钢丝的直径大；该钢丝通过冷拔机组中的拔丝模拉成最终产品 [图 1-1 (b)]。钢丝在热张力的状态下产生微小应变（约 $0.9\%\sim 1.3\%$ ），从而使钢丝在恒应力下抵抗位错转移的能力明显提高，达到稳定化目的。

经稳定化处理的钢丝，弹性极限和屈服强度提高，应力松弛率大大降低。这种钢丝已在房屋、桥梁、市政、水利等大型工程中广泛应用。

4. 刻痕钢丝

刻痕钢丝是用冷轧或冷拔方法使钢丝表面产生周期变化的凹