



T/CECSxxxx-20xx

中国工程建设标准化协会标准

预应力数控张拉技术规程

Technical specification for prestressing construction by numerical control

（征求意见稿）

（提交反馈意见时，请将有关专利连同支持性文件一并附上）

中国计划出版社

中国工程建设标准化协会标准

预应力数控张拉技术规程

Technical specification for prestressing construction by numerical control

(征求意见稿)

T/CECSxxxx-20xx

主编单位：上海同吉建筑工程设计有限公司
同济大学

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：20×× 年 × 月 × 日

中国计划出版社

20xx 年 北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发<2019年第一批协会标准制订、修订计划>的通知》（建标协字〔2019〕12号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验；参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分10章和8个附录，主要内容包括：总则、术语和符号、数控张拉设备、预应力筋制作与安装、张拉与锚固、体外预应力施工、钢结构预应力施工、桥梁施工、施工管理、施工验收。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会施工安全专业委员会归口管理，由上海同吉建筑工程设计有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给上海同吉建筑工程设计有限公司（地址：上海市杨浦区中山北二路1121号9楼东，邮编：200092，电话：021-65980376，邮箱：tjcad@vip.163.com）。

主编单位：上海同吉建筑工程设计有限公司

同济大学

参编单位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1	总则.....	1
2	术语和符号.....	2
2.1	术语.....	2
2.2	符号.....	3
3	数控张拉设备.....	5
3.1	一般规定.....	5
3.2	设备功能要求.....	7
3.3	数控张拉设备的标定与维护.....	8
4	预应力筋制作与安装.....	10
4.1	一般规定.....	10
4.2	预应力筋制作.....	11
4.3	预应力孔道成型.....	11
4.4	预应力筋穿束.....	15
4.5	无粘结预应力筋铺设.....	16
4.6	缓粘结预应力筋安装.....	18
4.7	质量要求.....	20
5	张拉与锚固.....	22
5.1	一般规定.....	22
5.2	张拉工艺.....	24
5.3	数控张拉操作.....	25
5.4	预应力筋张拉伸长值计算.....	26
5.5	张拉质量要求.....	27
5.6	封锚保护.....	28
6	体外预应力施工.....	30
6.1	一般规定.....	30
6.2	体外预应力束的布置.....	31
6.3	体外预应力束的构造.....	32
6.4	施工和防护.....	33
7	钢结构预应力施工.....	36
7.1	一般规定.....	36
7.2	施工仿真计算.....	37
7.3	制作与安装.....	39
7.4	施加预应力.....	41
7.5	施工监测.....	43
7.6	防护和维修.....	44
8	桥梁施工.....	46
8.1	先张法简支梁.....	46
8.2	后张法简支梁.....	48
8.3	连续梁桥（连续刚构桥）.....	50
8.4	系杆拱桥.....	53
8.5	斜拉桥.....	55

9	施工管理.....	58
9.1	一般规定.....	58
9.2	施工配合.....	60
9.3	施工安全.....	62
10	施工验收.....	64
10.1	一般规定.....	64
10.2	验收记录.....	65
附录 A	张拉力精度检验.....	66
附录 B	伸长值精度检验.....	68
附录 C	张拉力值偏差检验.....	70
附录 D	功能性检验方法.....	71
附录 E	数控千斤顶标定记录.....	72
附录 F	锚口摩阻损失测试.....	73
附录 G	摩阻损失试验.....	76
附录 H	锚固回缩量测试.....	81
	用词说明.....	83
	引用标准名录.....	84

Contents

1	General provisions	1
2	Terms and symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols.....	3
3	Numerical control equipment	5
3.1	General.....	5
3.2	Equipment composition	7
3.3	Calibration and maintenance of numerical control equipment	8
4	Production and installation	10
4.1	General.....	10
4.2	Prestressed tendon production	11
4.3	Prestressed channel forming	11
4.4	Prestressed tendons	15
4.5	Laying of unbonded prestressed tendons.....	16
4.6	Installation of retard-bonded prestressed tendons.....	18
4.7	Quality requirements.....	20
5	Tension and anchorage.....	22
5.1	General.....	22
5.2	Tension process	24
5.3	Numerical control tensioning operation.....	25
5.4	Calculation of tensile length of prestressed tendons.....	26
5.5	Quality requirements.....	27
5.6	Anchor protection	28
6	External prestress construction	30
6.1	General.....	30
6.2	Arrangement of extracorporeal bundle	31
6.3	External prestressed structure	32
6.4	Construction and protection.....	33
7	Steel structure prestress construction.....	36
7.1	General.....	36
7.2	Construction simulation calculation	37
7.3	Production and installation	39
7.4	Prestress	41
7.5	Construction monitoring	43
7.6	Protection and maintenance	44
8	Bridge Construction.....	46
8.1	Pretensioned simply supported beam.....	46
8.2	Post-tensioned simply supported beam.....	48
8.3	Continuous beam bridge (continuous rigid frame bridge).....	50
8.4	Tied arch bridge	53
8.5	Cable stayed bridge.....	55

9	Construction management	58
9.1	General.....	58
9.2	Construction cooperation	60
9.3	Construction safety	62
10	Construction acceptance	64
10.1	General.....	64
10.2	Construction acceptance	65
Appendix A	Tension accuracy test.....	66
Appendix B	Precision test of elongation value.....	68
Appendix C	Inspection of deviation of tension value.....	70
Appendix D	Functional test method	71
Appendix E	Calibration record of numerical control jack.....	72
Appendix F	Anchor mouth friction loss test.....	73
Appendix G	Friction loss test	76
Appendix H	Anchorage retraction test	81
	Explanation of wording	83
	List of quoted standards	84

1 总则

1.0.1 为在预应力工程施工中，贯彻执行国家的技术经济政策，做到技术先进、安全适用、经济合理、确保质量，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于建筑工程、市政工程新建、改建及加固工程中预应力数控张拉的施工与验收。

1.0.3 应用数控张拉技术的预应力工程施工与验收，除应符合本规程的规定外，尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。。

【条文说明】根据住建部《房屋建筑和市政基础设施工程危及生产安全施工工艺、设备和材料淘汰目录（第一批）》（2022年发布）及相关行业规范，关于后张法预应力构件施工中设备使用的强制性规定如下：在二类以上市政工程项目预制场内进行后张法预应力构件施工时，不得使用非数控预应力张拉设备。该规定是推动施工安全与质量升级的关键措施，通过强制使用数控设备，从源头控制预应力施工的精度风险和数据真实性。施工单位需严格按工程类别匹配设备，并强化人员培训与数据监管，以符合国家安全生产及工程质量验收要求。

对于现场现浇结构、临时预制场或三类以下市政工程仍允许使用传统设备（需满足校准要求）。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 数控张拉 numerical control pretension

通过数字化手段实现预应力张拉过程自动控制的一种新型技术手段。

2.1.2 数控张拉设备 numerical control tensioning equipment

数控张拉设备，是采用了逻辑数字化电控部件、控制面板、遥控器、实时通讯组件等组成的张拉设备系统。具有自动控制预应力张拉，自动测量张拉力值、伸长值、自动存储，实时输出力-位移、力-时间、位移-时间数据，实现数控张拉的预应力施工张拉机具。

2.1.3 有粘结预应力筋 bonded prestressed tendon

和混凝土直接粘结的或是在张拉后通过灌浆使之与混凝土粘结的预应力筋。

2.1.4 无粘结预应力筋 unbonded prestressed tendon

表面涂防腐油脂并包护套后，与周围混凝土不粘结，靠锚具传递压力给构件或结构的一种预应力筋。

2.1.5 缓粘结预应力筋 retard-bonded prestressed tendon

在密度聚乙烯护套中穿入预应力筋，并在二者之间填充缓粘结材料后制成的新型预应力筋，靠张拉后缓粘结材料的凝固传递预应力，无需灌浆。

2.1.6 体外预应力筋 external prestressed tendon

布置在结构构件截面之外的预应力筋。通过与结构构件相连的锚固端块和转向块将预应力传递到结构上。

2.1.7 拉索 tension cable

由索体和锚具组成的受拉构件。索体可为钢丝束、钢绞线束或钢拉杆等。

2.1.8 预应力损失 prestress loss

预应力筋张拉过程中和张拉后，由于材料特性、结构状态和张拉工艺等因素引起的预应力筋应力降低的现象。预应力损失包括：摩擦损失、锚固损失、弹性压缩损失、预应力筋应力松弛损失和混凝土收缩徐变损失等。

2.1.9 锚口摩擦损失 prestress loss due to friction at anchorage device

预应力筋在锚具及张拉端锚垫板喇叭口转角处由于摩擦引起的预应力损失。

当夹片式锚具采用限位自锚工艺张拉时，夹片逆向刻划预应力筋引起的损失也属锚口摩擦损失。

2.1.10 变角张拉摩擦损失 prestress loss due to friction at deviated device

预应力筋在变角装置内转角处由于摩擦引起的预应力损失。

2.1.11 有效预应力 effective prestress

指扣除预应力损失后，在预应力筋中保持的应力。

2.1.12 伸长值 extension value

指预应力筋张拉中由于受拉变长的值。

2.1.13 零状态 zero state

预应力结构构件拼装后的零应力状态。

2.1.14 初始状态 initial state

结构预应力施加完毕后，在预应力和自重作用下的自平衡状态。

2.1.15 工作状态 loading state

在初始状态后，结构受到附加恒载和活载及其它荷载作用下的状态。

2.1.16 检验批 inspection lot

由同一施工条件并有一定数量的材料或作业项目组成的基本检验单元。

2.2 符号

A_p	——预应力筋的截面面积；
σ_{con}	——预应力筋锚下的张拉控制应力；
E_p	——预应力筋的弹性模量；
$\delta_{l,n}$	——加载级的位移值偏差；
$\delta_{f,n}$	——各加载级的力值偏差；
L_p	——预应力筋的实际长度；
L_1	——同一加载级，位移测量仪示值，单位为毫米；
L_2	——同一加载级，张拉系统伸长量示值，单位为毫米；
Δl	——预应力筋理论张拉伸长值；
Δl_0	——预应力筋实际张拉伸长值；

ΔL_{\max}	——张拉系统的各级工况下的伸长值测点与拟合直线间的最大偏差；
Δl_s	——锚固回缩值；
Δl_1	——从初应力至最大张拉力应力间的实测伸长值；
Δl_2	——初应力以下的推算伸长值，可根据张拉力与伸长值成正比关系确定；
Δl_3	——张拉过程中构件的弹性压缩值；
Δl_4	——千斤顶内的预应力筋张拉伸长值；
Δl_5	——张拉过程中工具锚和固定端工作锚楔紧引起的预应力筋内缩值；
P_m	——从张拉端至计算截面预应力筋的平均拉力；
P_1	——标准试验机示值；
P_2	——张拉系统示值；
ΔP_{\max}	——张拉系统的各级工况下的力值测点与拟合直线间的最大偏差；
μ	——摩擦系数；
κ	——考虑孔道每米长度局部偏差的摩擦系数；
θ	——从张拉端至计算截面曲线管道部分切线的夹角之和；
x	——从张拉端至计算截面的孔道长度；
Y_l	——伸长值测量装置满量程输出；
Y_f	——测力装置满量程力值。

3 数控张拉设备

3.1 一般规定

3.1.1 数控张拉设备制造应具有规定批准的技术资质，并具有资质的检测机构检测合格的产品证书、配套软件评测报告。

【条文说明】数控张拉设备可由以下单元组成：

数控设备的张拉数据采集单元，由远程或现场电脑及有线或无线互联网数据传输线路组成。该单元由数据传输网络将张拉开始前的设置参数和张拉过程中的系统监测数据（张拉力、伸长值、持荷时间等）等数据资料上传至现场或远程电脑平台进行保存。

设备的遥控单元，由手持无线网络机和手持机遥控器组成。该单元是现场操作命令的输入系统，通过手持机向数据处理单元和千斤顶驱动单元发出数据处理指令或张拉指令。

设备用千斤顶工作参数检测与传输单元，该单元由千斤顶完成拉伸钢绞线的同时，由加装的位移传感器完成油缸伸出值的采集，由油压传感器完成油压值的测量，并通过模拟量输入/输出单元提供给数据处理单元。

设备数据处理单元，由交换机、张拉控制软件、电气控制总成集成在主控张拉系统主机中。该单元是实现数控张拉的主体核心。可实现一种或多种数控张拉模式的选择和转换，驱动千斤顶完成不同作业方式、作业目的要求。具备数字化的压力监控和数字化伸长量的记录能力，并应具备在张拉全过程对工况的监控、判断、报警等功能。

设备存储单元由人机操控装置和存储系统组成。

设备辅助系统由油温加热冷却装置、安全防护装置等组成。

3.1.2 数控张拉设备的主要参数见表 3.1.2。

表 3.1.2 数控张拉设备主要参数

项目	单位	数值
额定压力	MPa	25、31.5、40、50、63、70
公称输出力	kN	250、650、1000、1500、2000、2500、3000、3500、4000、5000、6500、9000、12000
公称流量	L/min	0.4、0.63、0.8、1、1.5、2、2.5、3.2、4、5、6.3、8、10、12.5、16
测力传感器精度	级	0.3
位移传感器精度	级	0.25

项目	单位	数值
张拉力控制精度	%	≤1
同步误差	%	≤2
回缩量测量精度	mm	≤1
综合精度	%FS	0.15
数据采集频率	Hz	≥5
油压测量装置量程	倍额定压力	1.2
油压测量装置精度等级	级	0.5
校核油压表精度	级	1.0
工作环境温度	°C	-10~55
工作输入电压		380V AC, +7%/+15%
无线通讯网络		3G/ 4G/ 5G/ WIFI

3.1.3 数控张拉设备的计量性能检验应符合以下要求：

- 1 力值测量精度≤0.5%，线性度≤0.2%。
- 2 位移测量精度≤0.5%，线性度≤0.2%。
- 3 张拉加载速率不应大于 $0.1\sigma_{con}/\text{min}$ ，实际伸长值与理论伸长值之差应控制在 6%以内。

3.1.4 数控张拉设备在下列条件下应能正常工作：

- 1 海拔不超过 2000m；
- 2 环境温度：10°C~50°C；
- 3 相对湿度：10%~90%；
- 4 电源电压为 380V，频率为 50Hz，电压波动范围不超过±15%。

【条文说明】为保证数控张拉设备工作性能，温度<10°C时宜预热 15~30 分钟，相对湿度最佳为 35%~70%以避免电子元件受潮或静电，同时需远离强电磁干扰源（如大型电机、焊接设备），设备应可靠接地，防止静电积累和电磁干扰。

3.1.5 数控张拉设备应具有自动控制和手动控制操作功能、程序编辑功能、自动诊断以及超限值报警提示功能。控制系统的防护等级不应低于现行国家标准《外壳防护等级（IP 代码）》GB/T 4208 规定的 IP55；电气元件应排列整齐，操作和维护检修应安全方便；控制系统接收和发送信号应及时、准确；数据传输应有接口，数据采集系统工作的各项数据以及图表应能及时保存；控制软件应能满足自

动张拉的全部功能，并应有供标定（或校准）使用的功能；人机操作界面应符合现行国家标准《人机界面标志标识的基本和安全规则》GB/T 4205 的规定；操作界面应能及时显示各种功能和数据，操作按钮应灵敏。

3.1.6 数控张拉设备应能按要求完成数据的自动采集储存；遇到通信中断或突然断电等故障时，数据采集系统应具有保护所采集的过程数据不受破坏的功能；数据采集系统应具有时钟功能；数据采集系统应具有自动上传数据功能，不应设置手工录入和修改数据的功能。

3.1.7 数控张拉设备应实时显示力-伸长值、力-时间、伸长值-时间三个张拉曲线，具备预警分析报告功能。数控张拉过程中，张拉力值误差如超出 $\pm 1\%$ ，伸长值误差超出 $\pm 6\%$ ，数控张拉系统应自动提示报警并停止张拉。

3.1.8 当标准测力仪的示值在液压千斤顶公称输出力的 30%~105%范围内时，数控系统的力值测量示值误差不应超过公称输出力的 $\pm 1\%$ ，重复性不应超过 $\pm 1\%$ ；当基准长度测量仪的示值在预应力用液压千斤顶公称行程的 10%~100%范围内时，数控系统位移测量示值误差和重复性均不应超过 $\pm 1\%$ 。

3.1.9 张拉千斤顶应符合现行行业标准《预应力用液压千斤顶》JG/T 321 的规定。数控设备整机在空载、满载、超载状态下的性能应符合现行行业标准《预应力用液压千斤顶》JG/T 321 和《预应力用电动油泵》JG/T 319 的相应规定。预应力用液压千斤顶应与数控电动液压泵及控制系统进行整体配套标定，标定周期不应超过 6 个月。位移传感器应与预应力用液压千斤顶集成为一体，设备运行时，位移传感器应能实时检测预应力用液压千斤顶活塞杆移动量。

3.1.10 压力变送器的量程不应低于额定压力的 1.25 倍；测力传感器的量程不应低于预应用液压千斤顶公称输出力的 1.2 倍；位移传感器的行程应大于活塞杆的行程。

3.1.11 数控张拉设备的力测量装置、位移测量装置应有安全防护并可方便拆卸。

3.1.12 数控设备的质量试验方法可参照现行行业标准《建筑施工机械与设备预应力用智能张拉机》JB/T 13462。

3.2 设备功能要求

3.2.1 数控张拉设备应具备参数预设、数据导入导出、数据采集、数据传输、数

据存储、数据计算等功能。

3.2.2 数控张拉设备应具备在预应力筋的张拉、持荷、锚固的全过程中实时采集张拉力、伸长值以及测定锚固回缩值的功能。

3.2.3 数控张拉设备应能精确控制单主机、一主机一副机、一主机多副机同步张拉力及伸长值的能力。

3.2.4 数控张拉设备应能实时显示力-伸长值、力-时间、伸长值-时间 3 个张拉曲线，具备预警分析报告功能。

3.2.5 数控张拉设备宜具备张拉数据报表自动生成的功能，保证数据真实有效、安全传递。数控张拉设备所采集的数据应能够远程传输至工程项目管理平台。

3.2.6 数控张拉设备应具备断电恢复、张拉力复核、回顶保护、油温监控、油压监控、故障自诊断等功能。

3.2.7 数控张拉设备应具有基本的防水和防尘功能，现场应备有配套的防雨、防尘设施。

3.2.8 数控张拉设备应能满足功能检验的要求，检验方法见附录 D。

3.2.9 数控张拉设备在无障碍环境的 500m 范围内应能实现正常通信。当遇到通信中断或突然断电等故障时，系统应具有及时保存采集数据和过程状态不受破坏的功能。故障排除后，数控张拉设备应能恢复通信中断或断电前的数据和过程状态，并可以通信中断或断电时刻的状态参数为起点继续完成后续张拉的功能。

3.2.10 数控张拉设备应能按设计要求进行分级、同步、自动或智能地完成全预应力张拉过程。数控张拉设备启动时应具备自检功能，确认系统能够安全可靠运行，检查电路、阀门、油路，同步数据信号，排除信号干扰接地等。

3.3 数控张拉设备的标定与维护

3.3.1 预应力用液压千斤顶应与数控电动液压泵、数控控制系统进行整体配套标定，标定周期不应超过 6 个月或连续使用超过 200 次。压力传感器、位移传感器等传感器标定期限不应超过 6 个月或连续使用超过 3000 次。计量装置可进行张拉系统的成套标定和拆卸后的独立标定。

3.3.2 各种仪表、传感器及千斤顶应由具有资质的单位进行标定。

3.3.3 数控张拉设备标定过程中，宜由系统自身带有的标定校核程式模式同步对

应计数计算，进行比照核准，并至少完成一个高压位的定值压力验证。

3.3.4 当千斤顶、量测仪表、压力及液压传感器、位移传感器等出现异常情况、检修或更换配件后均应重新标定核准。

3.3.5 压力传感器和位移传感器每月应进行自校核，压力传感器及位移传感器可分别采用同精度的测力仪及百分表进行校核。

3.3.6 数控张拉设备使用前应进行外观检查、状态检查、参数检查，并进行试运行。外观检查主要包括设备的破损、锈蚀及漏油等；状态检查主要包括通讯状态和待机时程序状态；参数检查主要包括张拉力、伸长值、混凝土弹性模量、管道摩阻系数、限位板规格等。

3.3.7 数控张拉设备使用前应对工作人员进行专门培训，合格后方可进行操作，平时应设专人保管并负责日常维护工作。

4 预应力筋制作与安装

4.1 一般规定

4.1.1 预应力材料的性能和质量应符合现行行业标准《预应力混凝土设计规范》JGJ 369 的相关规定。

4.1.2 预应力筋制作前，应完成预应力材料的抽检和进场验收。制作预应力筋的设备应处于良好工作状态。预应力筋进场存放期不应大于 6 个月

【条文说明】预应力钢筋进场时，应检查其产品合格证、出厂检验报告，预应力钢筋的数量和规格是否符合设计要求等。预应力钢筋使用前应按进场的批次和产品的抽样检验方案抽取试样作力学性能检查，其质量应符合现行国家标准的规定。

4.1.3 混凝土结构中预应力筋的制作宜在现场完成，当现场不具备制作条件或预应力筋用量较少时，可在工厂加工制作并编号，然后送至现场安装。钢结构中拉索的制作应符合本规程第 7.3 节的有关规定。

4.1.4 预应力筋制作或安装时，不得采用加热、焊接、或电弧切割。在预应力筋近旁对其他部件进行气割或焊接时，应防止预应力筋受焊接火花或接地电流的影响。

【条文说明】高强预应力钢材属于高碳钢，局部高温后会使其材料性能发生变化，因此切割时应使用砂轮切割机，不得使用电弧切割。制作时应避免焊接电火花损伤预应力筋表面，也不允许周边气割钢材时，高温铁水流淌在预应力筋表面。严禁将预应力筋作为电焊接地线。

4.1.5 当预应力筋需要代换时，应进行专门计算，并应经原设计单位出具设计变更后方可实施。

4.1.6 数控张拉预应力工程中的预应力筋、锚具、夹具、连接器等的制作与安装除应符合本规程要求外，尚应符合现行国家标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器》GB/T 14370、《混凝土结构工程施工规范》GB 50666、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、行业标准《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85、《公路桥梁预应力钢绞线用锚具、夹具和连接器》JT/T 329、《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424、《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415、《缓粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 387、《索结构技术规程》JG/J 257、《建筑结构体外预应力加固技术规程》JGJ/T 279、《无粘结预应力混凝土

土结构技术规程》JGJ 92、等的相关规定和要求。

4.2 预应力筋制作

4.2.1 预应力筋应采用砂轮锯或切断机下料，下料长度应经计算确定。计算时应考虑预应力筋在结构中的实际长度、锚固长度、张拉伸长量以及施工余量。下料场地应平整、洁净。

4.2.2 采用钢丝束锚头锚具时，应确认预应力钢丝的可锚性。钢丝锚头的头型直径应为钢丝直径的 1.4~1.5 倍，高度应为钢丝直径的 0.95~1.05 倍。钢丝锚头的强度应不低于钢丝母材强度标准值的 98%。钢丝束两端采用锚头锚具时，应采用等长下料法。

【条文说明】钢丝锚头时端面应平整，钢丝应插到锚头器穴模底部，并注意钢丝不能偏入夹片缝隙中，以免夹扁钢丝。为保证钢丝等长下料，可采用穿入钢管内或放入角钢槽内的限位法下料。也可采用第一次逐根下料，第二次捆扎成束后用砂轮切割机精确等长下料。

4.2.3 钢丝编束、张拉端锚头锚具安装和钢丝锚头宜同时进行。钢丝的一端可先穿入锚具并锚头，另一端按张拉端的顺序分别编扎内外圈钢丝。

4.2.4 无粘结预应力筋固定端制作时，应除去锚固部分的塑料护套层和油脂。护套端部应用水密性胶带或热收缩塑料密封。

4.2.5 缓粘结预应力筋张拉端和固定端制作时，应除去张拉和锚固部分的护套层和缓粘结材料。端部应用水密性胶带或热收缩塑料密封，防止缓粘结材料溢出。

4.2.6 制作好的钢绞线束，应按规格、型号、长度编号挂牌，分别堆放在垫木上，或放在室内，表面盖上油布。需装车运输的可卷成内径不小于 2.0m 的圆盘。制作好的钢绞线束应及时穿入孔道内或绑扎。

【条文说明】钢绞线成盘运输时盘径过小会使外圈钢绞线产生过大的初拉应力，不便成盘及放盘，但盘径过大又不便运输。

4.3 预应力孔道成型

4.3.1 预留孔道间距和预应力筋保护层厚度应符合设计要求；当设计无具体要求时，应符合下列规定：

- 1 预制构件中预留孔道之间的水平净间距不宜小于 50mm，且不宜小于粗

骨料最大粒径的 1.25 倍；孔道壁至构件边缘的净间距不宜小于 30mm，且不宜小于孔道外径的一半。

2 现浇混凝土结构中预留孔道在垂直方向的净间距不应小于孔道外径，水平方向的净间距不宜小于孔道外径的 1.5 倍，且不应小于粗骨料最大粒径的 1.25 倍；从孔壁算起的混凝土保护层厚度，梁底不宜小于 50mm，梁侧不宜小于 40mm。建筑工程中裂缝控制等级为三级的预应力混凝土梁，从孔壁算起的混凝土保护层厚度，梁底不宜小于 60mm，梁侧不宜小于 50mm。

3 预留孔道的内径宜比预应力束外径及需穿过孔道的连接器外径大 6mm~15mm，且孔道的截面积宜为穿入预应力束截面积的 3 倍~4 倍。

4 梁中集束布置的无粘结预应力筋或缓粘结预应力筋，束的水平净间距不宜小于 50mm，束至构件边缘的净间距不宜小于 40mm。

5 当有可靠经验并能保证混凝土浇筑质量时，预留孔道可水平并列贴紧布置，但并排的数量不应超过 2 束。

【条文说明】预留预应力孔道是制作后张构件的关键工序，预留孔道质量的好坏对预应力筋的穿束和张拉是否顺利有很大关系。孔道形状有直线、曲线和折线三种。孔道成型的基本要求是：孔道的尺寸与位置应正确，孔道应平顺，接头不漏浆，以防孔道堵塞。孔径尺寸确定的原则是应便于灌浆，一般预应力筋的截面积不宜超过孔道截面面积的 50%，孔道间距应便于浇筑混凝土。

塑料波纹管的刚度在高温下降低很多，因此在高温环境下或水化热很高的大体积混凝土中采用塑料波纹管成孔时，应采取可靠措施防止孔道变形或堵塞。

4.3.2 预埋管道的定位应符合下列规定：

1 预埋管道应按设计规定的坐标位置进行定位，并应与定位钢筋绑扎牢固，且在混凝土浇筑期间不产生移位；

2 当预埋管道与普通钢筋位置冲突时，应移动普通钢筋，不得改变管道的设计坐标位置；

3 定位钢筋直径不宜小于 10mm，间距不宜大于 1.0m。对扁形波纹管、塑料波纹管或线形曲率较大处的管道，定位钢筋间距宜适当减小；

4 定位后的预埋管道应平顺，其端部的中心线应与锚垫板相垂直；

5 凡施工时需要预先起拱的构件，预埋管道应随构件同时起拱。

【条文说明】预埋管道采用支架钢筋定位，波纹管支架钢筋的间距，与预应力筋数量和波纹

管自身刚度有关,对先穿束且钢绞线根数较多的波纹管支架间距取较小值。一般曲线预应力筋的关键点如最高点、最低点和反弯点等应直接点焊钢筋支架,其余点可按等距离布置支架。波纹管安装后应采用钢丝与支架钢筋绑扎牢靠,必要时点焊压筋,形成井字形钢筋支架,防止波纹管上浮。波纹管使用时应尽量避免反复弯曲,以防管壁开裂,同时应防止电焊火花烧伤管壁。波纹管安装后检查管壁有无破损,接头是否密封等,并及时用管片和胶带修补。

4.3.3 预埋管道的连接应密封,并应符合下列规定:

1 圆形金属波纹管接长时,可采用大一规格的同波型波纹管作为接头管,接头管的长度宜取其直径的4~5倍,且不宜小于300mm,两端旋入长度宜相等,且两端应采用防水胶带密封;

2 塑料波纹管接长时,可采用塑料焊接机热熔焊接或采用专用连接管;

3 钢管连接可采用焊接连接、承插连接或套筒连接。

【条文说明】波纹管宜采用同一厂家生产的产品,以便与接头管波纹匹配。波高应满足规定要求,以免接头管处波纹扁平而拉脱。波纹管的连接处应用多道胶带包缠封闭,以免漏浆。塑料波纹管在现场应少用接头甚至不用接头,直接整根预埋。必要时可采用塑料热熔焊接或采用专用连接管连接。

4.3.4 预应力孔道应根据工程特点设置排气孔、泌水孔及灌浆孔,排气孔可兼作泌水孔或灌浆孔,并应符合下列规定:

1 孔道端部的锚垫板上宜设置灌浆孔,灌浆孔直径不宜小于20mm;

2 当曲线孔道波峰和波谷的高差大于300mm时,应在孔道波峰处设置排气孔,排气孔间距不宜大于30m;

3 对竖向孔道,灌浆孔应设置在孔道下端,对超高的竖向孔道,宜分段设置灌浆孔;

4 排气管或泌水管与波纹管连接时,可在波纹管上开洞,覆盖海绵垫和塑料弧形压板并与波纹管扎牢,再用增强塑料管插在弧形压板的接口上,且伸出构件顶面不宜小于300mm(图4.3.4)。

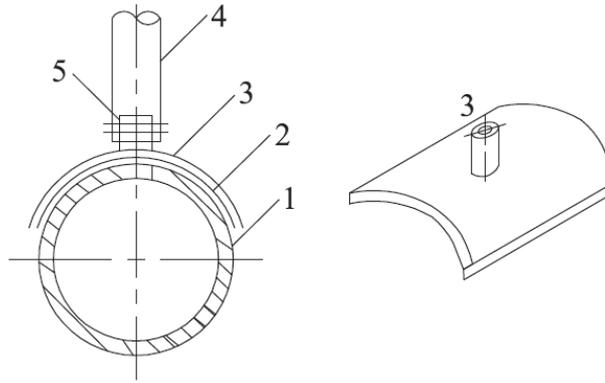


图 4.3.4 泌水管留设

1-波纹管；2-海绵垫片；3-塑料弧形压板；4-塑料管；5-铁丝绑扎

【条文说明】对后张法预应力混凝土结构中预留孔道的灌浆孔及泌水管等的间距和位置要求，是为了保证灌浆质量。灌浆孔、排气及泌水孔间距与孔道成型材料、曲线形状及灌浆孔构造有关。波纹管上安装塑料弧形压板时，可先在波纹管上开孔，也可先安装塑料弧形压板，待混凝土浇筑后再凿孔进行灌浆。塑料波纹管可采用专用的防渗漏灌浆嘴。

4.3.5 采用胶管抽芯成孔时，胶管内应插入芯棒或充入压力水增加刚度；采用钢管抽芯成孔时，钢管表面应光滑、焊接接头应平顺，且浇筑混凝土后，应陆续转动钢管。抽芯时间应通过试验确定，以混凝土抗压强度达到 0.4MPa~0.8MPa 为宜，且抽拔时不得损伤结构混凝土。抽芯后，应采用通孔器或压力、压水等方法对孔道进行检查，如发现孔道堵塞或有残留物或与邻孔有串通，应及时处理。

【条文说明】胶管抽芯一般采用有 5~7 层帆布夹层，壁厚 6mm~7mm 的普通橡胶管；钢管抽芯用于直线孔道，钢管应光滑平直、无锈蚀、无局部凹陷和焊疤等突出物。采用胶管或钢管抽芯法制孔时，抽管时间应根据水泥品种、水灰比、气温和养护方法等条件，通过试验确定。一般抽管原则是能顺利抽出来的孔道不坍塌，故抽管时间在混凝土初凝后至终凝前进行为合适。

4.3.6 竖向预应力混凝土结构采用钢管成孔时应采用定位支架固定，每段钢管的长度应根据施工分层浇筑高度确定。钢管接头处宜高于混凝土浇筑面 500mm~800mm，钢管开口处应采用堵头临时封口。

【条文说明】竖向预应力孔道底部必须安装灌浆和止回浆用的单向阀，钢管接长宜采用丝扣连接。

4.3.7 钢管桁架中预应力筋用钢套管保护时，每隔 2m~3m 应采用定位支架或隔板居中固定。钢桁架在工厂分段制作时，应预先将钢套管安装在钢管弦杆内，再

在现场的拼装台上用大一号同型钢套管连接或采用焊接接头。钢套管的灌浆孔可采用带内螺纹的接头管焊在套管上。

【条文说明】本条根据钢管桁架中预应力孔道采用钢套管成型的工程实践经验编写。

4.3.8 预应力筋、预留孔道、锚垫板及螺旋筋等安装定位后，应采取可靠措施临时封闭锚垫板喇叭口、灌浆孔、排气管及泌水管，防止混凝土浇筑时漏浆、堵塞孔道。

【条文说明】混凝土浇筑前，应临时封闭锚垫板喇叭口、灌浆孔、排气管及泌水管，防止混凝土浇筑时漏浆，造成孔道堵塞。

4.4 预应力筋穿束

4.4.1 预应力筋可在浇筑混凝土前或浇筑混凝土后穿入孔道，应根据结构特点、施工条件和工期要求等综合确定。

【条文说明】先穿束法是预应力筋在混凝土浇筑前穿入孔道，优点是穿束方便、且不宜造成孔道堵塞；缺点是自穿入孔道至张拉和灌浆时间较长，预应力筋容易锈蚀。后穿束法是预应力筋在混凝土浇筑后穿入孔道，优点是预应力筋不易锈蚀；缺点是穿束难度大，且易造成孔道堵塞。因此，应根据工程具体条件综合确定。

4.4.2 穿束的方法可采用人力、卷扬机或穿束机单根穿或整束穿。对超长束、特重束、多波曲线束等宜采用卷扬机整束穿，束的前端应装有穿束网套或特制的牵引头，并保持预应力筋顺直，仅前后拖动，不得扭转。采用穿束机逐根将钢绞线穿入孔道时，应保证其在孔道内不发生相互缠绕。

【条文说明】对长度不大于 60m、且不多于 3 跨的多波曲线束，可采用人力单根穿。对于长度大于 60m 的超长束、多波束、特重束宜采用卷扬机前拉后送分组穿或整束穿。当超长束需要人力穿束时，可在梁的跨度中间段受力钢筋相对较少的部位设置助力段，利用大一号波纹管移出 1.5m 的空隙段，便于人工助力穿束；穿束完成后，将移出的波纹管复位。以上穿束方法，应根据孔道波形、长度与孔径，以及预应力筋表面状态、具体施工条件等灵活应用。对穿束困难的孔道，应适当增大预留孔道直径。

4.4.3 预应力筋宜从内埋式固定端穿入。当固定端采用挤压锚具时，从孔道末端至锚垫板的距离应满足成组挤压锚具的安装要求；当固定端采用压花锚具时，从孔道末端至梨形头的直线锚固段不应小于设计值。预应力筋从张拉端穿出的长度

应满足张拉设备的操作要求。

4.4.4 当采用先穿束工艺时，严禁电火花烧伤管道内的预应力筋，严禁利用钢筋骨架作电焊回路，避免预应力筋被退火而降低强度。发现被电焊灼伤，有焊疤或受热褪色的预应力筋应予更换。

4.4.5 竖向孔道的穿束，宜采用单根由上向下控制放盘速度穿入孔道，也可采用整束由下向上牵引工艺，牵引夹持必须坚固可靠。

【条文说明】在竖向孔道中，采用整束由下向上牵引方法进行穿束是比较安全的，应优先采用。

4.4.6 混凝土浇筑前穿入孔道的预应力筋，应采取防锈保护措施。当无防锈保护措施时，预应力筋穿入孔道至灌浆的时间间隔应符合下列规定：

- 1 环境相对湿度大于 60%或处于近海环境地区，不宜超过 14d；
- 2 环境相对湿度不大于 60%时，不宜超过 28d。

【条文说明】混凝土浇筑前穿入孔道的预应力筋，经历混凝土浇筑、养护等过程，预应力筋在孔道内时间较长，容易引起预应力筋锈蚀，进而影响孔道摩擦力，严重的甚至会影响预应力筋的力学性能；由于以往相关规范中没有相应的限制规定，加上对孔道成孔质量的担心，工程中普遍采用先穿束工艺，预应力筋锈蚀情况比较严重，有必要进行适当的限制。本条时间间隔规定考虑了建筑工程和市政工程的特点，适当延长了时间间隔，同时也是对采用后穿束工艺的一种鼓励。防锈措施有：封闭管道的各个开口，包括端部锚垫板喇叭口、灌浆口、排气口或泌水管口等，此外对外露预应力筋采用防水胶布进行封裹。

4.4.7 采用后穿束工艺时，混凝土终凝前应用通孔器清孔；采用先穿束工艺时，混凝土初凝后且终凝前应逐孔抽动已穿入孔道的预应力束，防止漏浆堵塞孔道。

对采用蒸汽养护的预制构件，预应力筋应在蒸汽养护结束后穿入孔道。

【条文说明】当采取后穿束留孔时，为防止混凝土浇筑过程中波纹管漏浆堵孔，宜采用通孔器通孔；当采取先穿束留孔时，宜在混凝土浇筑过程中拉动预应力筋疏通孔道。若对留孔质量把关严格，浇筑混凝土时又得到有效保护，可免除通孔工序。

4.5 无粘结预应力筋铺设

4.5.1 无粘结预应力筋在现场搬运和铺放过程中，不得损伤其塑料护套。当出现轻微破损时，应采用防水聚乙烯胶带进行缠绕封闭。每圈胶带搭接宽度不应小于

胶带宽度的 1/2，缠绕层数不应少于 2 层，缠绕长度超过破损长度 30mm。严重破损的无粘结预应力筋应予以更换。

4.5.2 平板中无粘结预应力筋的定位，应符合下列规定：

1 应按设计规定的坐标位置进行定位，并与定位钢筋绑扎牢固，且在混凝土浇筑期间不产生移位和变形；

2 当与楼板中普通钢筋或其它管线位置冲突时，不得将预应力筋的位置抬高或降低；

3 定位钢筋直径不宜小于 10mm，间距不宜大于 2.0m。无粘结预应力筋的平面位置，宜在楼板底模上涂刷油漆予以标示；

4 定位后无粘结预应力筋的线形应保持顺直，其端部中心线应与锚垫板相垂直。

4.5.3 平板中无粘结预应力筋带状布置时，应采取可靠的固定措施，保证同束中各根无粘结预应力筋具有相同的矢高。

4.5.2~4.5.3 【条文说明】板内控制无粘结筋曲线坐标的定位钢筋，通常可用 $\phi 12$ 钢筋制作，避免施工时踩踏变位。

4.5.4 双向预应力平板中，宜先铺设竖向坐标较低方向的无粘结预应力筋；在双向预应力筋交叉点处，当后铺方向无粘结预应力筋的竖向坐标低于先铺方向无粘结预应力筋时，应从其下方穿过。双向无粘结预应力筋的底层筋，在跨中处宜与板底双向钢筋的上层筋处在同一高度。

【条文说明】在双向平板中，无粘结预应力筋有两种铺设方法。一种是按编排顺序由下而上铺设，即首先计算交叉点处双向预应力筋的竖向坐标，确定最下方的预应力筋先铺设，依次编排出所有预应力筋的铺设顺序，这种铺设方法不需要交叉穿束，但铺设顺序没有规律，会影响施工进度。另一种是先铺设某一方向预应力筋（跨中最低点在下方），后铺方向的预应力筋在交叉点处的竖向坐标低于先铺方向预应力筋时，从先铺方向预应力筋下方穿过，这种铺设方法在交叉点处存在穿束，但条理清晰，易于掌握，且铺设速度快。为保证双向板内曲线无粘结预应力筋的矢高，又兼顾防火要求，应对无粘结预应力筋与板底和板面双向钢筋的交叉重叠关系确认后定出合理铺设方式。

4.5.5 无粘结预应力筋张拉端的锚垫板可固定在端部模板上，或利用短钢筋与四周钢筋焊牢。当张拉端采用凹入式做法时，可采用塑料穴模或其他穴模成型。

【条文说明】在无粘结预应力筋张拉端，如预应力筋与锚垫板不垂直，易发生断丝。张拉端

凹入混凝土端面时，采用塑料穴模的效果优于泡沫块或木盒等方法。

4.5.6 无粘结预应力筋固定端的锚垫板应事先组装好，按设计要求的位置可靠固定。

【条文说明】无粘结预应力筋埋入混凝土内的固定端通常采用挤压锚。当混凝土截面较小或钢筋较密时，多个挤压锚位置宜错开，避免重叠放置，影响混凝土浇筑密实。

4.5.7 梁中集束布置无粘结预应力筋的定位，应符合下列规定：

1 应采用钢筋支架控制其坐标位置，支架间距宜为 1.0m~1.5m。同一束中各根预应力筋宜保持平行走向，防止相互扭绞；

2 无粘结预应力束的水平净间距不宜小于 50mm，集束至构件边缘的净间距不宜小于 40mm。

【条文说明】铺设多根成束无粘结预应力筋时，出现各根之间相互扭绞现象，影响预应力筋的张拉效果。工程实践表明，可采用逐根铺设，最后合并成束方法。

4.5.8 对竖向、环向或螺旋形布置的无粘结预应力筋，应有定位支架或其他构造措施控制其坐标位置。

4.5.9 当板上开洞时，板内被孔洞阻断的无粘结预应力筋可分两侧绕过洞口铺设。无粘结预应力筋至洞口的距离不宜小于 150mm，水平偏移的曲率半径不宜小于 6.5m 洞口四周应配置构造加强钢筋。

【条文说明】本条是根据国内外工程经验作出的规定。当板上开洞对结构受力性能有较大影响时，应通过计算采取必要的加强措施。

4.6 缓粘结预应力筋安装

4.6.1 缓粘结预应力钢绞线安装之前，应检查标示的缓粘结预应力筋的固化时间和张拉适用期，确认能满足工程施工要求。

4.6.2 缓粘结预应力钢绞线安装之前，应及时检查其规格尺寸和数量，逐根检查并确认其端部组配件可靠无误后，方可在工程中使用。

4.6.3 缓粘结预应力钢绞线外包护套轻微破损处，可采用外包防水聚乙烯胶带或热熔胶棒进行修补后使用。外包防水聚乙烯胶带修复时每圈胶带搭接长度不应小于胶带宽度的 1/2，缠绕层数不应小于 2 层，缠绕长度应超过破损长度的 30mm，严重破损的应予以报废。

4.6.4 张拉端部模板宜采用木模板，预留孔洞应按施工图中规定的缓粘结预应力筋的位置编号和钻孔。

4.6.5 张拉端的承压板应采用可靠的措施固定在端部模板上，且应保持张拉作用线与承压板面相垂直。

4.6.6 缓粘结预应力筋应按设计图纸的规定进行铺放。铺放应符合下列要求：

1 缓粘结预应力筋可采用与普通钢筋相同的绑扎方法，铺放前应通过计算确定缓粘结预应力筋的位置，其竖向高度宜采用支撑钢筋控制，也可用其他钢筋绑扎，支撑钢筋间距不宜大于 1m；

2 缓粘结预应力筋的位置应保持顺直；

3 安装双向配置的缓粘结预应力筋时，应对每个纵横筋交叉点相应的两个标高进行比较，对各交叉点标高较低的缓粘结预应力筋应先进行铺放，标高较高的次之，宜避免两个方向的缓粘结预应力筋相互穿插铺放；

4 铺设的各种管线不应将缓粘结预应力筋的竖向位置抬高或压低；

5 当采取多根缓粘结预应力钢绞线成束布置时，每束钢绞线根数不宜多于 5 根，各根钢绞线应保持平行走向，防止相互扭绞；束之间的水平净间距及束至构件边缘的净间距应满足本规程第 4.3.2 条规定；

6 当采用多根缓粘结预应力筋平行带状布束时，应采取可靠的支撑固定措施，保证同束中各根缓粘结预应力筋具有相同的矢高；成束布置的钢绞线在端部宜分散开并单根锚固，水平和竖向最小分散距离不宜小于 80mm，缓粘结预应力筋水平偏移满足本规程第 4.7.2 条第 5、6 款规定；

7 缓粘结预应力筋采取竖向、环向或螺旋形铺放时，应有定位支架或其他构造措施控制位置。

4.6.7 在板内缓粘结预应力筋绕过开洞处的铺放位置应符合本规程第 4.5.9 条的规定。

4.6.1~4.6.7【条文说明】缓粘结预应力钢绞线的安装与无粘结预应力钢绞线的安装基本相同，安装过程中应防止缓粘结预应力钢绞线外包护套破损后缓粘结剂滴漏，缓粘结剂流出后会在护套内形成空隙，影响粘结性能。实践证明，缓粘结剂的流淌性比无粘结预应力钢绞线所用防腐油脂的流淌性好得多，如采取措施不当，缓粘结剂很容易从下端口流出。根据工程经验，一般的胶带缠绕不能彻底阻止粘合剂的滴露，采用热熔胶棒修补效果较好。

4.7 质量要求

4.7.1 预应力筋的制作质量应符合下列要求：

1 当钢丝束两端采用镦头锚具时，同一束中钢丝长度的最大偏差不应大于钢丝长度的 1/5000，且不得大于 5mm；当成组张拉长度不大于 10m 的钢丝时，同组钢丝长度的最大偏差不得大于 2mm；

2 钢丝镦头尺寸不应小于规定值，头型应圆整端正，镦头不得出现横向裂纹；

3 钢绞线挤压锚具成型后，钢绞线外端应露出挤压头 1mm~5mm。

4.7.2 预应力筋的安装质量应符合下列要求：

1 预应力筋安装时，其品种、级别、规格与数量必须符合设计要求；

2 施工过程中应避免电火花损伤预应力筋，受损伤的预应力筋应予以更换或切除；

3 预应力孔道的规格、数量、位置和形状以及灌浆孔、排气兼泌水管的设置等应符合设计和施工要求；

4 锚固区埋件和加强筋应符合施工详图的要求；

5 建筑工程预应力筋束形（孔道）控制点的竖向位置偏差应符合表 4.7.2-1 的规定，并做出检查记录；

表 4.7.2-1 建筑工程预应力筋束形（孔道）安装允许偏差（mm）

构件截面高度或厚度 (mm)	$h \leq 300$	$300 < h \leq 1500$	$h > 1500$
允许偏差	± 5	± 10	± 15

6 桥梁工程预应力管道安装的允许偏差应符合表 4.7.2-2 的规定，并做出检查记录；

表 4.7.2-2 桥梁工程预应力管道安装的允许偏差（mm）

项 目		允许偏差（mm）
管道坐标	梁长方向	± 30
	梁高方向	± 10
管道间距	同排	± 10
	上下层	± 10

7 预应力孔道或无（缓）粘结预应力筋应铺设平顺，端部锚垫板应垂直于

孔道中心线或无（缓）粘结预应力筋；

8 预应力孔道或无（缓）粘结预应力筋及端部锚垫板和螺旋筋的定位应牢固，浇筑混凝土时不应出现移位和变形，孔道接头应密封良好且不得漏浆；

9 内埋式固定端的锚垫板不应重叠，锚具与锚垫板应贴紧；

10 预埋管道或无（缓）粘结预应力筋护套应完好，局部破损处应采用防水胶带修补。

【条文说明】关于预应力筋制作及安装的质量要求，主要包括以下几点：

预应力筋的品种、级别、规格和数量对保证预应力结构构件的抗裂性能及承载力至关重要，故必须符合设计要求。

预应力筋的端部挤压锚、压花锚、镦头锚的制作质量应可靠。

预应力筋若遇电火花损伤，容易在张拉阶段脆断，故应避免。施工时应避免将预应力筋作为电焊的一极，受电火花损伤的预应力筋应予以更换。

预应力束形（孔道）直接影响建立预应力的效果，并影响结构构件的承载力和抗裂性能，故对束形（孔道）控制点的竖向位置允许偏差要求较高，应符合设计要求，并事先通过节点翻样图确认。在施工过程中如遇实际情况不能满足坐标要求，经设计单位复核认可后方可变更。

浇筑混凝土时，预留孔道定位不牢固会发生移位，影响建立预应力的效果。

预应力筋（孔道）位置应固定牢靠，管壁应完好无损，接头应密封良好。

张拉端和固定端构造应符合施工详图的要求；锚垫板应与预应力筋（孔道）垂直，且不得重叠。

无粘结预应力筋铺设应满足线形顺直、定位牢固和护套完好的要求。

5 张拉与锚固

5.1 一般规定

5.1.1 张拉用的设备和仪表应满足预应力筋张拉的要求，应经过配套标定，并在有效使用期内。

【条文说明】预应力张拉设备和仪表应根据预应力筋种类、锚具类型和张拉力合理选用。选用千斤顶的额定张拉力宜为所需张拉力的 1.5 倍，且不得小于 1.2 倍；与千斤顶配套使用的压力表应选用防振型产品，其最大读数应为张拉力的 1.5~2.0 倍。张拉设备行程一般不受限制，如锚具对重复张拉有限制时，应选用合适行程的张拉设备。

5.1.2 预应力筋张拉时，混凝土强度和弹性模量应符合设计要求；当设计无具体要求时，应符合下列规定：

1 混凝土的强度不应低于设计强度等级的 75%，且不应低于所用锚具产品技术手册要求的混凝土强度最低值；

2 在未测定混凝土弹性模量情况下，现浇混凝土结构施加预应力时的龄期：对后张预应力混凝土板不宜少于 5d，对后张预应力混凝土梁不宜少于 7d。

3 为防止混凝土出现早期裂缝而施加预应力时，可不受上述限制，但必须满足局部受压承载力的要求。

【条文说明】预应力张拉力是由锚固区传递给结构，因此张拉时实体结构混凝土应达到设计要求的强度等级，满足锚固区局部受压承载力的要求。

早龄期施加预应力的构件由于弹性模量较低，会产生较大的压缩变形和徐变，因此本规程规定预应力张拉条件为混凝土强度和弹性模量两项指标双控。鉴于混凝土弹性模量的测试比较复杂，而研究表明：强度等级 C40 及以上的混凝土 5d 弹性模量均能达到其 28d 弹性模量的 85%以上，因此可以通过对混凝土龄期的控制替代对弹性模量的控制。本规程规定：张拉时预应力混凝土楼板龄期不宜少于 5d，预应力混凝土梁龄期不宜少于 7d。

5.1.3 张拉控制力，应符合设计要求；施工中如需超张拉或计入锚口损失，可比设计规定提高 5%。当设计无具体要求时，其最大张拉控制应力不应超过表 5.1.3 的规定：

表 5.1.3 最大张拉控制应力允许值

钢种	先张法	后张法
----	-----	-----

中强度预应力钢丝	$0.70f_{ptk}$	$0.70f_{ptk}$
预应力螺纹钢筋	$0.85f_{ptk}$	$0.85f_{ptk}$
消除应力钢丝、钢绞线	$0.75f_{ptk}$	$0.75f_{ptk}$

5.1.4 预应力筋张拉前应计算所需张拉力、理论伸长值，明确张拉顺序和方法，并填写张拉申请单报监理审批。应根据张拉力的大小，选择合适的张拉机具，并设计合理的张拉工装。预应力张拉过程中，质量监督人员应进行监督，确保张拉数据的真实、可靠。

【条文说明】张拉申请单包括以下内容：工程名称、构件名称/编号、张拉应具备条件的检验结果、总包单位和监理单位的审批意见等。

5.1.5 预应力张拉过程中，质量监督人员应进行监督，确保张拉数据的真实、可靠。

【条文说明】张拉过程是确保预应力工程施工质量的关键环节。目前预应力张拉过程中还存在一些质量隐患，如现场作业人员责任意识不强，出现张拉操作不规范、甚至张拉不到位等现象。因此，质量监督人员应加强监督，确保张拉数据的真实可靠和工程的安全。

5.1.6 数控张拉设备张拉预应力筋时，除数控张拉系统的传感器外，宜在预应力筋或结构上布置传感器来采集张拉过程中预应力筋或结构的相关性能或状态变化。所采集的性能或状态数据可供推断锚固后有效预应力以及供预应力调整参考用。

5.1.7 数控张拉锚固后建立的有效预应力值未能达到设计要求时，应根据张拉过程记录的数据进行分析、调整张拉方案。若还未能达到设计要求，应与设计单位沟通，查明原因、调整张拉方案后再进行张拉，直至满足设计和规范要求。

5.1.8 数控张拉预应力工程中的张拉工艺、质量要求、封锚保护除应符合本规程要求外，尚应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、行业标准《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424、《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415、《缓粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 387、《建筑结构体外预应力加固技术规程》JGJ/T 279、《无粘结预应力混凝土结构技术规程》JGJ 92、《索结构技术规程》JG/J 257、《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415、《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2、《预应力混凝土桥梁预制节段逐跨拼装施工技术规程》CJJ/T 111、

《预应力混凝土用金属波纹管》JG 225、《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》JT/T 529 等的相关规定和要求。

5.2 张拉工艺

5.2.1 预应力筋的张拉方式应符合设计要求；当设计无具体要求时，应符合下列规定：

1 直线预应力筋和预应力螺纹钢筋可采取一端张拉方式，长度不宜超过 35m；直线无粘结预应力筋一端张拉时长度不宜超过 40m；直线缓粘结预应力筋一端张拉时长度不宜超过 35m；

2 对曲线预应力筋，应根据施工计算结果采取两端张拉或一端张拉方式。当锚固损失的影响长度小于或等于 $L/2$ （ L 为预应力构件的跨度）时，应采用两端张拉方式；当锚固损失的影响长度大于 $L/2$ 时，可采取一端张拉方式；

3 当同一构件中有多束一端张拉的预应力筋时，张拉端宜分别交错设置在结构或构件的两端；

4 预应力筋两端张拉时，宜两端同步张拉。在采用两台及以上千斤顶实施对称和两端同步张拉时，各千斤顶之间同步张拉力的允许误差宜为 $\pm 2\%$ 。

【条文说明】直线预应力筋可采取一端张拉方式。曲线预应力筋锚固时由于孔道反向摩擦的影响，张拉端锚固损失最大，沿构件长度逐步减至零。当锚固损失的影响长度 $l_f > L/2$ （ L 为构件跨度）时，张拉端锚固后预应力筋的应力等于或小于固定端的应力，应采取一端张拉；当 $l_f > L/2$ 时，应采取两端张拉，但对简支构件或采取超张拉措施满足固定端拉力后，也可改用一端张拉。

5.2.2 特殊预应力构件或预应力筋，应根据设计和施工要求采取专门的张拉工艺，如分阶段张拉、分批张拉、分级张拉、分段张拉、变角张拉等。

【条文说明】分阶段张拉是指在后张预应力结构中，为了平衡各阶段的荷载，采取分阶段施加预应力的方法。分批张拉是指不同束号预应力筋先后错开张拉的方法。分级张拉是指同一束号预应力筋按不同程度张拉的方法。分段张拉是指多跨连续梁分段施工时，通长的预应力筋需要逐段张拉的方法。变角张拉工艺是指张拉作业受到空间限制，需要在张拉端锚具前安装变角块，使预应力筋改变一定的角度后进行张拉的工艺。经实际测试，变角 $10^\circ \sim 25^\circ$ 时，应超张拉 $2\% \sim 3\%$ ；变角 $25^\circ \sim 40^\circ$ 时，应超张拉 5% ，弥补预应力损失。

5.2.3有粘结预应力筋应整束张拉锚固。对直线形或扁平管道中平行排放的有粘结预应力钢绞线束，在各根钢绞线不受叠压影响时，也可采用小型千斤顶逐根张拉锚固，但应考虑逐根张拉预应力损失对控制应力的影响。

【条文说明】在一般情况下，对同一束预应力筋，应采取整束张拉方式，使各根预应力筋建立的应力比较均匀。对扁锚预应力束、直线束或弯曲角度不大的单波曲线束，允许采取单根张拉方式，但单根张拉引起的预应力损失应在张拉时予以考虑。

5.2.4 预应力筋的张拉顺序，应符合设计要求，并应避免出现对结构不利的应力状态；当设计无具体要求时应符合下列规定：

- 1 预应力筋的张拉顺序应根据结构受力特点、施工方便及操作安全等因素确定；
- 2 预应力筋的张拉顺序，应遵循对称张拉原则；
- 3 对现浇预应力混凝土楼盖，宜先张拉楼板、次梁的预应力筋，后张拉主梁的预应力筋；
- 4 对预制屋架等平卧叠浇构件，应从上而下逐榀张拉。

【条文说明】预应力筋的张拉顺序应使混凝土不产生超应力、构件不扭转与侧弯、结构不变位等，因此，对称张拉是一个重要原则。同时，还应考虑到尽量减少张拉设备的移动次数。当构件截面平行配置的两束预应力筋不同时张拉时，其张拉力相差不应大于设计值的 50%，即先将第 1 束从 0 张拉至 50%设计拉力，再将第 2 束从 0 张拉至 100%设计拉力，最后将第 1 束从 50%张拉至 100%设计拉力。

5.3 数控张拉操作

5.3.1 数控张拉设备对预应力筋的张拉，过程中应按设计要求进行分级、同步、自动或智能地完成全过程：

- 1 数控张拉设备启动，首先应系统自动自检，确认完好性、安全可靠运行。包括电路、阀门、油路、同步数据信号及排除信号干扰接地等；
- 2 数控张拉设备张拉前，应对系统运行模式选用、系统内数据与现场梁索的对应、设计伸长量等相关要素逐项核对。

5.3.2 同步张拉模式选择中，应分辨不同组合方式。

【条文说明】例如，单索双端同步式、多索方式等，应杜绝误选误操作。

5.3.3 对同步张拉，注意各作业点之间的协调。倒顶换位或倒缸等工况，须现场统一指令同步进行。

5.4 预应力筋张拉伸长值计算

5.4.1 预应力筋的理论张拉伸长值，可按下列公式计算：

$$\Delta l = \frac{P \cdot l}{E_p \cdot A_p} \quad (5.4.1-1)$$

$$P = p_j \left(\frac{1 + e^{-(kx + \mu\theta)}}{2} \right) \quad (5.4.1-2)$$

式中： p ——	从张拉端至计算截面预应力筋的平均拉力 (N)；
l ——	预应力筋的实际长度 (mm)；
A_p ——	预应力筋的截面面积 (mm ²)；
E_p ——	预应力筋的弹性模量 (N/mm ²)。

5.4.2 对多曲线段或直线段与曲线段组成的曲线预应力筋，理论张拉伸长值应分段计算后叠加：

$$\Delta l = \sum \frac{(\sigma_{i1} + \sigma_{i2}) \cdot l_i}{2E_s} \quad (5.4.2)$$

式中： l_i ——	第 <i>i</i> 段预应力筋长度；
σ_{i1} 、 σ_{i2} ——	分别为第 <i>i</i> 段两端预应力筋的应力。

5.4.1~5.4.2【条文说明】预应力筋张拉伸长值的计算公式系根据预应力筋在弹性阶段的应力与应变成正比确定。为了简化张拉伸长值的计算，预应力筋的平均张拉力取张拉端拉力与计算截面扣除孔道摩擦损失后的拉力平均值，计算误差对一般工程是许可的。

对多曲线段或直线段与曲线段组成的应力筋，张拉伸长值分段计算后叠加较为准确。

5.4.3 预应力筋的实测伸长值，应在建立初拉力后开始测量。实测伸长值可按下列公式计算：

$$\Delta l_0 = \Delta l_1 + \Delta l_2 - \Delta l_3 - \Delta l_4 - \Delta l_5 \quad (5.4.3)$$

式中： Δl_1 ——	从初应力 σ_0 至最大张拉力应力间的实测伸长值；
Δl_2 ——	初应力以下的推算伸长值，可根据张拉力与伸长值成正比关系确定；
Δl_3 ——	张拉过程中构件的弹性压缩值；

Δl_4	千斤顶内的预应力筋张拉伸长值；
Δl_5	张拉过程中工具锚和固定端工作锚楔紧引起的预应力筋内缩 值。

【条文说明】预应力筋张拉实际伸长值是以测量数据为基数，增加初拉力以下的推算伸长值，并扣除有关附加伸长值而得出。为了获得准确的实际伸长值，应注意以下几点：

1 初拉力取值，应以预应力筋绷紧为准。根据国内工程经验，对直线预应力筋宜取为张拉力的 5%~10%，对一般曲线预应力筋宜取为张拉力的 16%~20%；对多波曲线或超长预应力筋，由于预应力筋转角较大，已有工程研究成果表明，初值应力过低时，由于摩擦及其他情况造成此时张拉力和伸长值仍处于波动阶段，由此推定初拉力前预应力筋伸长值会造成较大误差。

2 初拉力以下的推算伸长值，系根据弹性范围内张拉力与伸长值成正比确定。对无粘结预应力筋，由于其在孔道内可活动，张拉力与摩擦力成正比，上述推算方法是适用的。但是，对于有粘结预应力筋，张拉时首先要克服较大的摩擦力才能伸长，如应采用上述方法推算初拉力下的伸长值，必然偏大，尤其对超长筋更为明显。因此，有粘结预应力筋初拉力应取低值，以减少推算伸长值误差。

3 扣除有关附加伸长值，包括千斤顶体内的预应力筋伸长值、张拉端工具锚和固定端工作锚楔紧引起的预应力筋内缩值、构件弹性压缩值等。

5.5 张拉质量要求

5.5.1 预应力筋的张拉质量应符合下列要求：

- 1 预应力筋实测张拉伸长值与理论计算伸长值相对偏差不应超过 6%。
- 2 预应力筋张拉锚固后实际建立的预应力值与设计规定检验值的相对偏差不应超过 5%。
- 3 预应力筋应在张拉控制应力处于稳定状态后进行锚固，锚固阶段张拉端锚具变形和预应力筋的内缩值应符合设计要求。
- 4 预应力筋锚固后，夹片顶面应平齐，其相互间的错位不宜大于 2mm，且露出锚具外的长度不应大于 4mm。
- 5 后张法预应力筋张拉后，不应出现对结构有害的裂缝。
- 6 张拉完成后，应观察锚圈口是否滑丝，复查合格后方可切割。

5.5.2 缓粘结预应力筋在张拉施工前应根据实测的弹性模量和摩擦系数计算张拉伸长值,并应对缓粘结预应力筋的张拉适用期、构件端部预埋件、混凝土强度、缓粘结预应力筋力学性能进行核对和全面检查。

5.5.3 预应力张拉后,预应力构件的反拱、侧向弯曲及轴向压缩等限值应符合设计要求及其它相关规定。

【条文说明】关于预应力筋张拉质量要求,本节归纳为下列几点:

- 1 预应力筋张拉时,混凝土强度应符合设计要求,并对混凝土弹性模量或龄期也有一定要求;
- 2 预应力筋的张拉力、张拉顺序及张拉工艺应符合设计和施工方案的要求;
- 3 预应力筋张拉以应力控制为主,伸长值校核为辅,张拉伸长值允许偏差为 $\pm 6\%$;
- 4 预应力筋张拉至控制应力时,应有足够的持荷时间。张拉锚固后,锚下建立的有效预应力与设计值的偏差不应超过 $\pm 5\%$;
- 5 预应力筋张拉过程中,应采取措施,防止出现断丝或滑丝现象。

5.6 封锚保护

5.6.1 后张法预应力筋锚固后的外露部分宜采用机械方法切割。预应力筋的外露长度不宜小于其直径的 1.5 倍,且不宜小于 30mm。

【条文说明】锚具外多余预应力筋常采用机械方法切割。实际工程中,也可采用氧炔焰切割方法切割多余的预应力筋,但为了确保锚具正常工作及考虑切断时热影响可能波及锚具部位,应对锚具采取降温等措施。考虑到锚具正常工作及可能的热影响,本条对预应力筋外露部分长度做出了规定。切割不宜距锚具太近,同时也不应影响构件安装。

5.6.2 锚具封闭保护应符合设计要求;当设计无具体要求时,应符合下列规定:

- 1 凸出或内凹穴模内的锚具应采用与预应力结构构件相同强度等级的细石混凝土或无收缩防水砂浆封闭保护;
- 2 凸出式锚具的保护层厚度不应小于 50mm,外露预应力筋的混凝土保护层厚度:处于一类环境时,不应小于 20mm;处于二、三类易受腐蚀环境时,不应小于 50mm;
- 3 锚具封闭前应将周围混凝土界面凿毛并冲洗干净,凸出式锚具封锚应配置钢筋网片;

4 后张无粘结预应力筋锚具封闭前，锚具和夹片应涂防腐油脂，并设置封端塑料盖帽封闭。对处于二类、三类环境条件下的无粘结预应力筋及其锚固系统应达到全封闭保护状态。

【条文说明】锚具的封闭保护是一项重要的工作，主要是保证预应力结构的耐久性、抗火及防止机械损伤。后张预应力筋的锚具布置在构件端部，处于室外环境影响较大的部位，且锚具又处于高应力状态，封锚保护十分重要。封锚包括两部分内容：其一是锚具防腐处理，其二是锚具封闭处理。

5.6.3 对处于二类、三类环境条件下的缓粘结预应力锚固系统，应采用连续封闭的防腐体系，并应符合下列规定：

- 1 锚固端应为预应力钢材提供全封闭防水设计；
- 2 缓粘结预应力筋与锚具部件的连接及其他部件的连接，应采用密封装置或采取封闭措施，使缓粘结预应力锚固系统处于全封闭保护状态；
- 3 连接部位在 10kPa 静水压力下应保持不透水；
- 4 如设计对缓粘结预应力筋与锚具系统有电绝缘防腐要求，可采用塑料等绝缘材料对锚具系统进行表面处理，以形成整体电绝缘。

【条文说明】为了保证预应力混凝土结构的耐久性，需要对构件端部锚具进行封堵。国内外应用经验表明，对处于三类环境条件下的无粘结预应力锚固系统，应采用全封闭体系，而缓粘结预应力筋在缓粘结剂固化后相对要比无粘结好些，在没有经过耐久性试验的前提下，先按无粘结预应力封堵要求进行封堵。参考美国 ACI 和 PTI 的有关规定，对全封闭系统应进行不透水试验，要求安装后的张拉端、固定端及中间连接器部位在不小于 10kPa 静水压力下，保持 24h 不透水，具体漏水位置可采用水中加颜色等方法检查。

5.6.4 其它封锚保护应符合现行国家标准《混凝土结构工程施工规范》GB 50666、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、行业标准《铁路混凝土工程施工质量验收标准》TB 10424、《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415 的相关要求。

6 体外预应力施工

6.1 一般规定

6.1.1 体外束的预应力筋应满足下列要求：

- 1 预应力筋的性能和质量应符合本规程第 4.1.1 节的要求；
- 2 折线预应力筋尚应按偏斜拉伸试验方法确定其力学性能。体外束预应力筋可选用钢绞线、无粘结钢绞线、镀锌钢绞线或环氧涂层钢绞线等。

6.1.2 体外束的外套管应采用高密度聚乙烯管（HDPE）或镀锌钢管，并符合下列规定：

- 1 外套管及连接接头应完全密闭防水，在使用期内有可靠的耐久性；
- 2 外套管应与预应力筋和防腐材料具有兼容性，且能抵抗运输、安装和使用过程中所受的各种作用力而不被损坏；
- 3 镀锌钢管的壁厚不宜小于管径的 1/40，且不应小于 2mm；高密度聚乙烯管的壁厚宜为 2mm~5mm；
- 4 当应用于有防火要求的环境时，外套管还应具有耐火性。

6.1.3 体外束的防腐材料应满足下列要求：

- 1 水泥基灌浆料在施工过程中应按本规程第 6.3 节的要求灌满外套管，连续包裹预应力筋全长，并使气泡含量最小；
- 2 工厂制作的成品体外束，其防腐材料在体外束加工制作、运输、安装和张拉等过程中，应能保持稳定性、柔性和无裂纹，并在所要求的温度范围内不流淌；
- 3 防腐材料的耐久性能应与体外束所处的环境类别和相应设计使用年限的要求相一致。

6.1.2~6.1.3【条文说明】这 2 条是对体外束预应力筋、外套管以及防腐材料的一般要求，不同体系的体外束均应满足各条相应的规定。

6.1.4 体外束的锚固体系必须与束体的形式和组成相匹配，可采用常规后张锚固体系或体外束专用锚固体系，其性能和质量应符合本规程第 4.1 节的要求。对于有整体调束要求的钢绞线夹片式锚固体系，可采用锚具外螺母支撑力方式。对低应力状态下的体外束，其锚具夹片应装有防松装置。

【条文说明】体外束锚固体系的重要性体现在预应力完全由锚固体系来传递，如果锚固作用失效，则预应力效应完全丧失。因此，体外束锚固体系还应注意防腐蚀保护、防松装置等要求。

6.1.5 体外预应力锚具应满足分级张拉及调索补张拉预应力筋的要求，对于有换束要求的体外预应力体系，体外束、锚固装置及转向器均应考虑便于更换束体的可行性要求。

6.1.6 体外预应力束的张拉控制应力值 σ_{con} 不宜超过 $0.6f_{ptk}$ ，且不应小于 $0.4f_{ptk}$ ；当要求部分抵消由于应力松弛、摩擦、分批张拉等因素产生的预应力损失时，张拉控制应力限值可提高 $0.05f_{ptk}$ 。当有可靠依据时，可适当调整张拉控制应力值。

【条文说明】体外预应力结构张拉控制应力不宜定得太高，主要原因有：（1）体外预应力结构由于结构变形会引起体外束应力的增加；（2）较低应力工作状态下的体外束，对结构的可靠性有利。特别是在体外预应力加固工程中，既有结构的力学性能指标离散性较大；（3）较低的应力有利于减小应力腐蚀。此外，在转向块与体外束的接触区域，由于横向挤压力的作用和体外束弯曲后产生的内应力，预应力筋的强度将有所降低。

6.2 体外预应力束的布置

6.2.1 体外预应力束布置应使结构对称受力，并符合下列规定：

1 对矩形、T型或I字形截面梁，体外束应布置在梁腹板的两侧；对箱形截面梁，体外束应对称布置在梁腹板的内侧；

2 体外预应力束的束形宜与荷载标准组合工况下的弯矩图相匹配，可选用直线、双折线或多折线等布置方式。

【条文说明】预应力束形布置与荷载标准组合工况的弯矩相一致，可以最大程度发挥预应力的作用效应，但对多种线型的体外束组合应用时或设计有特殊要求时，可不受此限制。

6.2.2 体外束锚固区和转向块的设置应根据体外束的设计线型确定，并应符合下列规定：

1 多折线体外束，转向块宜布置在距梁端 $1/4\sim 1/3$ 跨度的范围内，必要时可增设中间定位转向块；

2 体外束锚固点与转向块之间或两个转向块之间的自由段长度不宜大于8m，超过该长度时宜设置减振装置，减振装置应与结构主体可靠连接；

3 体外预应力束的锚固点宜位于梁端截面的形心轴以上。对多跨连续梁采用多折线体外束时，可在中间支座或其它部位增设锚固点。锚固区应进行可靠的计算分析及细部构造设计。

【条文说明】体外束的锚固点与转向块之间或两个转向块之间的自由段长度不宜过长，目的在于避免振动效应与振动磨损。美国和英国等有关规范对此有类似规定。在建筑工程中如振动不明显，可适当放宽。

为了使体外预应力束获得较大矢高和预应力效应，在梁的负弯矩区域，体外束应设在中和轴之上，并有合理的偏心距。锚固点应保证传力可靠且张拉施工方便，因此设在梁端或中间支座较为合理。

6.2.3 体外束在每个转向块处的弯折转角不应大于 15°，转向块鞍座处最小曲率半径宜按表 6.2.3 采用，体外束与鞍座的接触长度由设计计算确定。用于制作体外束的钢绞线，应按偏斜拉伸试验方法确定其力学性能。

表 6.2.3 转向块鞍座处最小曲率半径

钢绞线	最小曲率半径 (m)
12 ϕ 12.7mm 或 7 ϕ 15.2mm	2.0
19 ϕ 12.7mm 或 12 ϕ 15.2mm	2.5
31 ϕ 12.7mm 或 19 ϕ 15.2mm	3.0
55 ϕ 12.7mm 或 37 ϕ 15.2mm	5.0

注：钢绞线根数为表列数值的中间值时，可按线性内插法确定。

【条文说明】体外束的强度降低与弯折角成正比，与弯折曲率半径成反比，同时受转向块处接触长度的影响。为了避免预应力筋的强度降低而影响结构的可靠性，本条对弯折角和弯折曲率半径给出了限制。

6.3 体外预应力束的构造

6.3.1 体外束的锚固端宜设置在梁端隔板或腹板外凸块处，应保证传力可靠，且变形符合设计要求。体外束的端部应垂直于承压板，曲线段的起点至张拉锚固点的直线长度不宜小于 600mm。

6.3.2 体外束的转向块应能保证预应力可靠地传递给结构主体。在矩形、工字形或箱形截面混凝土梁中，可采用通过隔梁、肋梁或独立的转向块等型式实现转向。转向块处的钢套管鞍座应预先弯曲成型，埋入混凝土中。

6.3.1~6.3.2【条文说明】锚固端和转向块的构造设计应符合传力可靠和变形较小的原则，取体外束的破断荷载作为标准荷载进行相应节点承载力的验算。

6.3.3 对不可更换的体外束，在锚固端和转向块处与结构相连的固定套管可与束体外套管合并为同一套管。对可整体更换的体外束，在锚固端和转向块处，体外束套管应与结构相连的鞍座套管分离且相对独立；对单根更换的体外束，预应力筋与外套管应能分离。

6.3.4 混凝土梁加固用体外束的锚固端构造可采用下列做法：

- 1 可采用钢板箍或钢构件直接将预应力传至框架柱上；
- 2 可采用钢垫板先将预应力传至端横梁，再传至框架柱上；必要时可在端横梁内侧粘贴钢板并在其上焊圆钢，使体外束由斜向转为水平向。

6.3.5 混凝土梁加固用体外束的转向块构造可采用下列做法：

- 1 可在梁底部横向设置双悬臂的短钢梁，并在钢梁底焊有圆钢或带有圆弧曲面的转向垫块；
- 2 可在梁两侧的次梁底部设置半圆形 U 形钢卡。

6.3.4~6.3.5【条文说明】这两条是关于体外束用于混凝土结构加固构造设计的几种常用做法，可根据具体结构形式和被加固构件的情况，合理采用或另行设计。

6.3.6 钢结构中的体外束锚固端构造可采用锚固盒、锚垫板和管壁加劲肋、半球形钢壳体等形式。体外束弯折处宜设置鞍座，在鞍座出口处应形成圆滑过渡。

【条文说明】体外束用于钢结构中，节点设计和构造较为复杂，而且不同的工程有其各自特殊性，本条在总结国内工程经验的基础上，仅提供了一般性做法。

6.3.7 桥梁加固的锚固端及转向块设置可利用原结构横隔梁或新增横隔梁，新增横隔梁应与原结构有可靠的连接构造，应保证体外预应力作用有效地传递至原结构主体。

6.3.8 有灌浆要求的体外预应力体系，体外预应力锚具或其附件上宜设置灌浆孔或排气孔。灌浆孔的孔位及孔径应符合灌浆工艺的要求。

6.4 施工和防护

6.4.1 新建工程体外束的锚固区和转向块应与主体结构同时施工。预埋锚固件与转向管道及转向器的位置和方向应严格符合设计要求，节点区域混凝土必须振捣

密实。

【条文说明】体外束的线型是否准确，取决于锚固区和转向块管道的定位是否准确，因此要求采取可靠的定位措施，保证预埋件位置准确。

6.4.2 体外束外套管的安装应保证连接平滑和完全密闭防水，束体线形和安装误差应符合设计要求，在穿束过程中应防止束体护套受到机械损伤。

【条文说明】体外束外套管的安装应连接平滑，符合设计线型和误差要求，目的是保证摩擦力影响最小，且建立准确的预应力值。完全密闭性是进行体外束外套管灌浆施工的要求。

6.4.3 混凝土加固工程中，体外束锚固端的孔道可采用静态开孔机成孔。

【条文说明】采用体外束加固混凝土结构时，应采取静态开孔设备，避免使用振动较大的冲击钻等设备，必要时可在端块中设置与预应力方向垂直的短筋，以增强抗剪能力。在箱梁底板、顶板或腹板等加固工程中，体外束锚固块的做法为局部凿开底板或顶板并植入锚筋，绑焊钢筋和锚固件，再浇筑端块混凝土。

6.4.4 钢结构中，张拉端锚垫板应垂直于预应力束中心线，与锚垫板接触的钢管与加劲肋端切口的角度应准确，表面应平整。锚固区的所有焊缝应符合现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 的规定。桥梁钢箱梁端部锚固区段可采用灌注混凝土的做法，以提高局部抗压承载力。体外束在穿过非转向节点钢板横隔梁时，应设置过度钢套管，过度钢套管应定位准确。

【条文说明】钢结构体外束的锚固端施工时，节点板的尺寸与角度应准确，焊缝应牢靠，以满足体外索张拉要求。

6.4.5 体外束的张拉顺序应符合设计规定，张拉时应保证结构或构件对称均匀受力，避免发生侧向弯曲或失稳，必要时可采取分级循环张拉方式。在加固工程中，若体外束的张拉力较小，也可采取横向张拉或机械调节方式。

【条文说明】体外束的张拉，应严格遵守对称受力原则，以避免构件侧向弯曲或失稳。

6.4.6 体外束张拉应采取以张拉力控制为主、伸长值校核的方法。实测伸长值与计算伸长值的偏差不应超过 $\pm 6\%$ ；锚固后实际建立的预应力值与设计规定检验值的偏差不应超 $\pm 5\%$ 。

6.4.7 使用过程中完全暴露于空气中的体外预应力束，其防腐措施应符合下列规定：

- 1 刚性外套管应具有可靠的防腐性能，使用一定时期后应重新涂刷防腐

蚀涂层；

2 高密度聚乙烯等塑料外套管应保证长期使用的耐老化性能，必要时进行更换。

6.4.8 体外束的锚具应设置全密封防护罩，对不要求更换的体外束，可在防护罩内灌注水泥浆或其它防腐蚀材料；对可更换的体外束应保留必要的预应力筋长度，在防护罩内灌注油脂或其它可清洗的防腐蚀材料。

6.4.9 当体外束有防火要求时，应按设计要求采取可靠的防火措施。体外预应力束防护完成后，应按设计要求安装固定减振装置。

【条文说明】体外束的耐久性必须有可靠保证。在结构的设计使用年限内，可以进行必要的维修、重新防护或更换。锚固体系的防护应从构造设计本身给与可靠保证。

体外束的可监测与可换束等特点在设计与使用中应予考虑，但必须对其可行性和结构正常使用的影响有充分考虑，且不应降低体外预应力体系的整体耐久性能。

体外束有防火要求时，应采取切实可行、有效的防火措施。

7 钢结构预应力施工

7.1 一般规定

7.1.1 钢结构预应力施工前，施工单位应根据结构特点、现场施工条件和钢构总装方案等编制预应力拉索安装和张拉方案。

【条文说明】预应力施工是钢结构总体施工中的重要工序，拉索安装与张拉穿插在钢构总装过程中，需相互密切配合。因此预应力施工方案应根据钢构总体安装方案、并结合现场施工条件合理确定。

7.1.2 数控张拉施工前对运至现场的成品拉索，应按合同要求和相关标准对其品种、规格、外观、数量进行验收，包括检查索体包装外观、核对出厂合格证、铭牌以及产品质量保证书、检测报告等。

7.1.3 数控张拉施工前应对支撑结构或边缘构件上用于拉索锚固的索端节点安装质量、位置坐标、几何尺寸等进行检查验收，验收合格后方可进行拉索安装施工。

【条文说明】钢构的安装精度直接关系到拉索安装质量及工程进度。若钢构安装误差较大，可能导致拉索无法安装到位，或者即使能够安装，安装后结构受力性能与设计偏差较大，影响结构使用期间的安全。因此拉索安装前，需对固定拉索的钢构预埋件位置进行测量验收，满足要求后方能进行拉索的安装。

7.1.4 预应力钢结构的安装精度和张拉完成后结构初始状态应符合设计要求，应对复杂和空间预应力结构体系张拉过程中结构的变形和索力进行监测。

【条文说明】对预应力钢结构工程，不仅要重视结构的最终状态，而且也要关注结构的成型和张拉过程。施工过程中对结构的状态（“力”和“形”）进行监测，可以判断结构实际状态与阶段控制目标是否一致，以便及时调整，确保施工完成后结构的状态满足设计要求。

7.1.5 拉索数控张拉应遵循对称、同步、缓慢匀速的加载原则，且边张拉边旋紧调节装置，保证张拉过程中拉索与端节点始终有效连接，避免由于张拉工装和机具的失常或操作失误引发安全事故。

7.1.6 拉索数控张拉前，应确定以索力控制为主或结构变形控制为主的原则。对结构重要部位宜进行索力和变形双控。拉索数控张拉时可直接用数控千斤顶及控制主机监控拉索的张拉力，也可用安装在索头处的测力传感器或其他测力装置同

步监控拉索的张拉力。

7.1.7 数控张拉可采取超张拉措施弥补拉索调节装置中螺牙间隙引起的预应力损失。超张拉值应根据调节装置的旋紧方式和拉索长度等综合确定。

7.1.8 张弦梁、张弦拱、张弦桁架的拉索数控张拉应满足下列要求：

1 钢结构拼装完成且拉索安装到位后，应进行拉索预紧，预紧力宜取初始态索力的 10%~20%；

2 数控张拉过程中应采取保证结构的平面外稳定的措施；

3 张弦结构拉索张拉时宜使用滑动支座，以释放对下部支撑结构的推力；

4 对索力有对称要求的单元，可采用数控多机同步张拉。

7.1.9 索力、结构位移调整完成后，钢绞线拉索夹片式锚具应采取防松措施，使夹片在低应力动载下不松动。钢丝拉索索端的铸锚连接螺纹、钢拉杆拉索索端的锚固螺纹，应检查螺纹咬合丝扣数量和螺母外侧丝扣长度是否满足设计要求，并应在螺纹上加装防松装置。

7.1.10 索力宜采用压力传感器或频率式索力仪进行测量，压力传感器用于拉索张拉阶段索力的测定，频率式索力仪用于已完成张拉的拉索索力测定。拉索索力实测值与理论计算值误差应不超过 10%，且符合设计要求。

7.1.11 张拉完成后，应对监测结果进行分析，并与仿真计算值和设计要求进行比较，超过允许偏差时应查明原因并加以修正。

【条文说明】对于大型复杂预应力钢结构，当部分监测结果超过设计规定时，应由设计单位对实测索力、结构变形、钢结构应力等控制参数进行综合评价，判断是否满足设计要求。

7.1.12 应定期对预应力钢结构拉索体系及其防护涂层进行检查，对出现损伤的索体和防护层应及时修复；应定期对索力进行监测，量测索力与设计值相差大于 10%时，应采取合理措施及时予以调整或补偿。

7.2 施工仿真计算

7.2.1 预应力张拉完成后，索力和结构形状参数应符合设计初始态的要求。

【条文说明】预应力钢结构状态要素是指索力和结构几何形状。预应力钢结构施工过程中三种不同状态：零状态、初始状态和工作状态。

1 零状态：是指加工放样后的构件集合体。零状态时不存在预应力，不存在外部荷载和自重作用。

2 初始状态：是指结构安装后仅在预应力和自重作用下自平衡状态，不存在外部荷载作用。

3 工作状态：是指结构投入使用后在预应力、恒荷载及活荷载作用下达到的平衡状态。钢结构预应力施工的目标是实现设计规定的初始状态，即结构初始状态的位形和内力。

7.2.2 设计单位未提供结构工作状态的技术参数和技术要求，施工单位应通过计算确定结构的设计初始状态，包括索力和结构几何形状参数等。张拉时结构荷载工况与设计初始态不一致，应通过计算确定结构的施工初始状态。

【条文说明】由于大跨空间预应力钢结构是最近 10 年才在我国得到迅速发展和应用，加之预应力钢结构设计与施工联系紧密，目前尚未有明确统一规定设计单位需提供结构的何种状态。

若设计单位提供结构工作状态的技术参数和技术要求，施工单位应通过计算确定结构的初始状态。考虑到设备、人力及经济等因素，施工过程是逐步实施的，不可能一步到位，因此施工时的状态一般与设计提供的状态是不一致的，需进行状态转换，以期在拉索安装和预应力张拉完成后结构状态达到设计初始状态的要求。

7.2.3 预应力钢结构初始状态可采用以下 3 种计算分析方法：顺序循环法、倒装法和无应力法。分析时应根据预应力钢结构的类型和自身特点合理选用。

【条文说明】预应力钢结构施工过程仿真分析方法有顺序循环法、倒装法和无应力法三种。

1 顺序循环法：分析步骤与实际预应力张拉顺序完全相同，根据循环张拉的拉力增量可将顺序循环法分为足量循环张拉法、等量递增循环张拉法和变量递增循环张拉法；

2 倒装法：是逆向计算以初始状态为出发点，逐一安装索并张拉，以张拉力（控制点位移）为控置量，当索全部安装并张拉完成后即达到设计状态。

3 无应力法：依据索工作状态可以计算得到索无应力长度。把按无应力长度制作的索全部安装后，它的索力和位移在使用阶段荷载下就是使用阶段荷载的控制力和控制位移，在施工阶段荷载下就是施工阶段荷载的控制力和控制位移。因结构是弹性的，求解结果唯一，和索张拉次序无关。实际工程中，应根据预应力钢结构的类型和自身特点选用合理的分析方法。

7.2.4 复杂和空间预应力钢结构体系应采用模拟张拉的虚拟张拉技术，进行各施工阶段和施工条件下的组合工况分析，确定优化的张拉顺序和方案。张拉方案确定后，应对预应力张拉过程进行仿真计算分析，以确定各施工阶段的张拉索力和

结构形状参数，作为预应力张拉、施工监测和质量控制的依据。

7.2.5 施工过程仿真计算分析应符合下列要求：

1 应建立预应力拉索与钢结构共同作用的整体有限元分析模型，并考虑支撑构件刚度及结构变形对索力的影响；

2 应选用合理的预应力模拟方法，并考虑拉索几何非线性的影响；

3 拉索采用分批、分级张拉时，应考虑各索间的相互影响。

7.2.4~7.2.5【条文说明】对预应力钢结构来说，在预应力施加过程中，结构的形状和内力分布不断发生变化，为了对整个施工过程中结构的性能有一个全面的了解，需要进行全过程施工仿真分析，掌握关键施工阶段结构的状态，制定和优化施工方案、提供拉索的张拉力等施工参数和监控依据，确保施工安全。由于预应力钢结构受力后变形大、与相连构件相关性大，为了使仿真计算结果更接近实际情况，应建立预应力拉索与钢结构共同作用的整体有限元分析模型，并考虑拉索几何非线性的影响以及拉索分批、分级张拉相互间的影响。

7.3 制作与安装

7.3.1 拉索制作方式可选择工厂预制或现场制作。钢丝束拉索和钢拉杆拉索应采用工厂预制，其制作和质量应符合现行相关规范和产品标准的要求。钢绞线拉索可工厂预制也可现场制作组装，其索体材料和配套锚具应符合现行相关标准的规定。

【条文说明】拉索是钢结构施加预应力的主要材料，拉索材料有组装索和成品索两种。组装索制作方便，可在工厂或现场制作，且制作精度要求低、制作费用经济，早期预应力钢结构中多采用钢绞线组装索；但组装索端部构造复杂，美观性、整体性和防腐性能差。成品索制作质量、整体力学性能、防腐性能及美观性大大提高，近年来钢丝束和钢拉杆成品索在预应力钢结构中广泛应用；但成品索需在工厂预制，长度制作精度要求高，且制作工艺复杂。

7.3.2 拉索制作长度应根据结构设计初始态下的索长、索力和索端节点板长度等确定；拉索调节量宜根据拉索制作误差、结构安装误差、计算分析误差及环境温度误差等综合确定。

【条文说明】由于张拉后预应力状态下的索长与安装零状态下的索长存在较大差别，若拉索根据零状态下的索长进行制作，索长调节装置就要适应结构变形、拉索弹性伸长、索长制作误差以及结构安装误差等对索长的影响，可能导致调节范围不够，以至于拉索施工张拉力不足或者可调螺杆锚固长度不够，甚至难以挂索。因此应根据设计初始态下的索长和索力以及

索端节点板长度等确定拉索制作长度，根据拉索制作误差、结构安装误差、计算分析误差及环境温度误差等综合确定调节装置的调节量。

7.3.3 钢丝束索体宜优先采用应力状态下标记、下料，也可经弹性伸长换算进行无应力状态下料。钢丝束、钢绞线下料时，应考虑环境温度对索长的影响，并采取相应的补偿措施。

7.3.4 钢丝束和钢绞线拉索进行无应力状态下料时，应考虑拉索自重挠度等因素的影响，可取 200MPa~300MPa 的张拉应力。

【条文说明】拉索制作时，为精确测量其制作长度，一般采用在一定应力下测量。因此，拉索施工单位提供给制作单位的拉索制作长度是基于一定索力的制作长度。由于拉索自重会产生一定的挠度和内力，拉索制作时还应考虑拉索自重、环境温度、锚固效率等的影响。

7.3.5 成品拉索制作长度允许偏差应符合表 7.3.5 的规定：

表 7.3.5 成品拉索制作长度允许偏差

钢丝束、钢绞线		钢拉杆	
拉索长度 L (m)	允许偏差 (mm)	杆体长度 L (m)	允许偏差 (mm)
≤50	±15	≤5	±5
300<L≤100	±20	5<L≤10	±10
>100	±L/5000	>10	±15

7.3.6 较长的钢丝束、钢绞线等成品拉索应成盘运输，成盘弯曲半径应大于 20 倍索体直径。当拉索两端索头不同时，应将先安装的索头盘卷在外，后安装的索头盘卷在内。

7.3.7 现场制索和组装拉索时，应采取相应措施，保证拉索内各股预应力筋平行分布。

【条文说明】拉索在工厂制作后，一般卷盘出厂，卷盘的盘径与运输方式有关。现场组装拉索，特别注意对各索股防护涂层的保护，并采取必要的措施，保证各索股受力均匀。

7.3.8 拉索在制作和安装过程中，应预防腐蚀、受热、磨损及雨水进入索体和锚具内部，且不得损伤索体保护层和索端锚头及螺纹，不得堆压弯折和扭转索体。

【条文说明】为保证拉索安装时不使索头螺纹及 PE 护套受到损伤，可随运输车附带纤维软带。在雨季进行拉索安装时，应注意不损伤索头的密封，以免索头进水。

7.3.9 拉索安装方法应根据布索方式、索长、索重、索的刚柔程度、起重设备和现场施工条件等综合确定，并符合安装方案和整体工程对拉索安装工艺的要求。

拉索牵引安装到位后，必须有效锚固。

7.3.10 当采用起重机进行拉索的吊装和安装时，拉索宜成盘或成捆整体吊装，且应绑扎牢固；当拉索展开吊装时，应采取措施避免索体和锚具直接在地面或支架平台上拖动及空中无控制摆动。

7.3.11 拉索安装完成后，应采取防护措施防止对拉索产生损坏。在索体周边严禁进行焊接、切割作业。

7.4 施加预应力

7.4.1 预应力数控张拉方法、张拉顺序、张拉程序以及张拉力应符合张拉方案 and 设计要求；张拉时，结构的形态、荷载工况、支撑条件及支座约束条件应与张拉方案和施工模拟计算相一致。

【条文说明】近年来拉索在公共建筑，特别在大跨度空间预应力钢结构中得到了广泛应用。经过近十几年的实践，也积累了一些拉索施工经验。对拉索张拉，不同于一般预应力混凝土梁板结构张拉，由于拉索所拉的结构相对较柔，应注意除了满足拉索的基本张拉力外，还要控制结构或构件的变形。另外，由于钢结构的分单元、分阶段安装，导致拉索的分阶段张拉。又由于拉索张拉使结构杆件间产生相互影响，更需要在整体结构建模计算分析的基础上结合拉索的构造及张拉特点，采取虚拟与现实张拉技术，科学指导空间预应力钢结构中的拉索张拉，并加强张拉过程的监控，必要时调整张拉力。因此应严格按照施工方案进行张拉，且张拉时荷载工况、支撑及支座约束条件应与施工模拟计算相一致，以便与计算分析结果进行对比，确保张拉完成后结构的状态达到设计要求。

7.4.2 与拉索相连的钢构节点构造、拉索锚具形式及其构造应满足张拉工艺的要求；当不满足时，施工单位应提出合理的构造措施，并报设计单位确认后方可实施。

7.4.3 应根据张拉力的大小，选择合适的张拉机具，并设计合理的张拉工装。张拉设备与仪表、测力传感器等应进行计量标定，并在有效使用期内。

【条文说明】张拉工装和千斤顶须与索端节点相适应，保证张拉时可轻松旋动索头调节装置，从而使张拉力有效地传递至结构上。制定张拉方案时，施工单位应对索端节点构造是否满足张拉工艺要求进行核实，若不能满足，应提出合理的构造措施或改进张拉工装使其与索端节点相匹配，满足张拉工艺要求。

7.4.4 张拉前应搭设预应力张拉作业平台，作业平台应不影响结构张拉变形；对影响结构张拉变形的支撑、平台等，应在张拉前予以脱离。

【条文说明】张拉前，对阻碍结构张拉变形的支撑、平台应主动脱空，脱空距离应保持在张拉变形影响之外；对结构上较重的堆置物或吊挂物，张拉前也应清除，确保预应力张拉效果。

7.4.5 拉索张拉时可直接用数控千斤顶及控制主机监控拉索的张拉力，也可用安装在索头处的测力传感器或其它测力装置同步监控拉索的张拉力。

7.4.6 拉索张拉应遵循分阶段、分级、对称、同步、缓慢匀速的加载原则，可边张拉边旋紧调节装置，应保证张拉过程中拉索与端节点始终有效连接，应避免由于张拉工装和机具的失常或操作失误引发安全事故。

7.4.7 拉索张拉前，应确定以索力控制为主或结构变形控制为主的原则。对结构重要部位宜进行索力和变形双控，并应规定索力和结构变形的允许偏差。

7.4.8 可采取超张拉措施弥补拉索调节装置中螺牙间隙引起的预应力损失。超张拉值应根据调节装置的旋紧方式和拉索长度等综合确定。

【条文说明】超张拉值可参考下述规定执行：

1 长度大于 60m 的拉索，可不超张拉；

2 长度小于 60m 时，应根据调节装置的旋紧方式确定超张拉比例，索长取低值，索短取高值；

3 对于旋紧套筒的调节装置，宜超张拉 3%~5%；对于旋紧螺杆的调节装置，宜超张拉 1%~3%；对于旋紧螺母的调节装置，可不超张拉。

7.4.9 张拉时张拉千斤顶和油泵位置不应存在较大高差，应调整油泵上的压力表值弥补高差引起的千斤顶和油泵之间的油压差异，也可在千斤顶的进油口增设压力监控表。

7.4.10 张弦梁、张弦拱、张弦桁架的拉索张拉还应满足下列要求：

1 钢结构拼装完成且拉索安装到位后应进行拉索预紧，预紧力宜取初始态索力的 10%~20%。

2 张拉过程中应保证结构的平面外稳定，宜在平面张弦结构两榀间安装联系杆件，应形成具有一定空间稳定体系后将拉索张拉至设计索力。倒三角形截面形式的张弦结构可单榀张拉至设计索力。

3 张弦结构拉索张拉时宜使支座滑动，以释放对下部支撑结构的推力。

4 对索力有对称要求的单元，可采用数控多机同步张拉。

【条文说明】张弦梁、张弦拱及张弦桁架平面外的刚度很小，张拉时应确保结构平面外稳定。通常是先将拉索预紧，然后在两榀平面张弦结构间安装联系杆件，形成具有一定空间稳定体系后，再将拉索张拉至设计索力。

7.4.11 当风力大于四级或雨雪天气、或环境温度高于 50℃ 或低于-5℃ 时，宜做好相关施工措施方可进行施工作业。

7.4.12 拉索张拉时应做好详细记录。记录应包括：测量记录、日期、时间和环境温度、索力、拉索伸长和结构变形的测量值。

7.4.13 在索力、结构位移调整完成后，对钢绞线拉索夹片式锚具应采取防松措施，使夹片在低应力动载下不松动。对钢丝拉索索端的铸锚连接螺纹、钢拉杆拉索索端的锚固螺纹，应检查螺纹咬合丝扣数量和螺母外侧丝扣长度是否满足设计要求，并应在螺纹上加装防松装置。

【条文说明】拉索张拉锚固后，夹片锚外侧应安装防松压板并压牢。在螺杆的螺母外侧，应有 2~3 牙外露，必要时在螺母上设止动螺栓。

7.5 施工监测

7.5.1 监测单位应根据结构特点、钢构安装方案、拉索张拉顺序和施工仿真计算结果，制定详细的监测方案，报设计和监理单位审批。监测内容应包括：张拉过程中和张拉完成后的索力、结构控制点的变形以及支座水平位移等参数。

【条文说明】预应力钢结构的变形与拉索的拉力是相辅相成的，可以通过结构的变形计算出拉索的拉力。在预应力张拉过程中，结合仿真计算结果，对结构变形监测可以保证预应力施工安全。

7.5.2 索力可采用压力传感器或频率式索力仪进行测量，压力传感器可用于拉索张拉阶段索力的测定，频率式索力仪可用于已完成张拉的拉索索力测定。拉索索力实测值与理论计算值误差应不超过 10%，且符合设计要求。

7.5.3 监测结构变形的测点应布置在结构有代表性的控制点处，测点设置应牢固可靠并便于施工过程中的监测。

7.5.4 应采用可靠的应变计和数据采集仪测量监测钢结构的应力，测点应布置在有代表性构件的控制截面处。

【条文说明】施工监测内容除结构控制点的变形和索力外，还应根据设计要求和工程具体情

况，确定是否监测钢结构控制截面应力和结构支座水平位移等参数，监控点设置应可靠并便于监测。

7.5.5 张拉完成后，应对监测结果进行分析，并与仿真计算值和设计要求进行比较，超过时应查明原因并加以修正。对于大型复杂预应力钢结构，当部分监测结果超过设计规定时，应对实测索力、结构变形、钢结构应力等控制参数进行综合评价，判断是否满足设计要求。

【条文说明】监测结果与仿真分析结果会有一些的偏差，偏差可能会超过允许值。产生偏差的原因主要有：设计参数误差、施工误差、测量误差、结构分析模型近似等。因此，应查明原因并加以修正。对于复杂空间结构，应对实测索力、结构变形、钢结构应力等控制参数进行综合评价，判断张拉效果是否达到设计和规范要求。

7.6 防护和维修

7.6.1 预应力钢结构拉索体系应根据所处的环境与结构特点等条件采取相应的防腐蚀和耐老化措施，防腐蚀措施应包括索体防腐蚀、锚固区自防腐蚀和传力节点防腐蚀。

7.6.2 索体的普通防腐蚀可对高强钢丝或钢绞线进行镀锌、镀铝、环氧喷涂处理或对裸索体包裹护套，索体的多层防护可对经防腐蚀处理后的高强钢丝或钢绞线索体外再包裹护套。对特殊的腐蚀环境，宜根据具体情况采取相应防腐蚀措施。

【条文说明】室外拉索的防护要求较严，尤其是索头部位。当有消防要求时，室内拉索必须考虑满足防火的基本要求。室外拉索的防腐主要考虑防止雨水侵蚀，以及密封材料的老化。拉索索体防腐蚀方式有：

- 1 钢丝镀层加整索挤塑护套；
- 2 单根钢绞线镀（涂）层；
- 3 单根钢绞线镀（涂）层加挤塑护套；
- 4 单根钢绞线镀（涂）层加整索高密度聚乙烯护套。

拉索防腐方式可根据使用条件和结构主要性能等因素组合选用。必要时可考虑换索要求。

7.6.3 锚固区锚头按机械零件标准可采用镀层防腐蚀或喷涂防腐涂料，对可换索头应灌注专用防腐蚀油脂进行防护，锚固区与索体应全长封闭。室外拉索的下锚固区应采取设置排水孔或承压螺母上开设排水槽等排水措施。

7.6.4 传力节点按机械零件标准可采用镀层防腐蚀或定期涂刷防腐蚀涂料。

【条文说明】锚固区锚头和传力节点等部件的防腐蚀可参照钢结构的防腐蚀要求处理，室外索头不宜采用冷镀锌处理。

7.6.5 当拉索体系中外露的塑料护套有耐老化要求时，应在制作时采用双层塑料，内层添加抗老化剂和抗紫外线成分，外层满足建筑色彩要求。

【条文说明】塑料中常掺碳粉以增强抗老化性能。

7.6.6 索体防火宜采用钢管内布索、钢管外涂敷防火涂料保护的办。当拉索体系中外露的塑料护套有防火要求时，应在塑料护套中添加阻燃材料或外涂满足塑料防火要求的特殊涂料。外露的索体、锚头和传力节点应涂刷防火涂料。

【条文说明】当室内拉索采用塑料护套时，其防火可参照电线电缆的防火涂料做法，并得到消防管理部门的认可。

7.6.7 应定期对预应力钢结构拉索体系及其防护涂层进行检查，对出现损伤的索体和防护层应及时修复；应定期对索力进行监测，当量测索力与设计值相差大于10%时，应采取合理措施及时予以调整或补偿。

8 桥梁施工

8.1 先张法简支梁

8.1.1 先张法预应力混凝土简支梁数控张拉施工应采用单束初调、整体张拉、整体放张的工艺体系，一般具体工艺流程可按图 8.1.1。

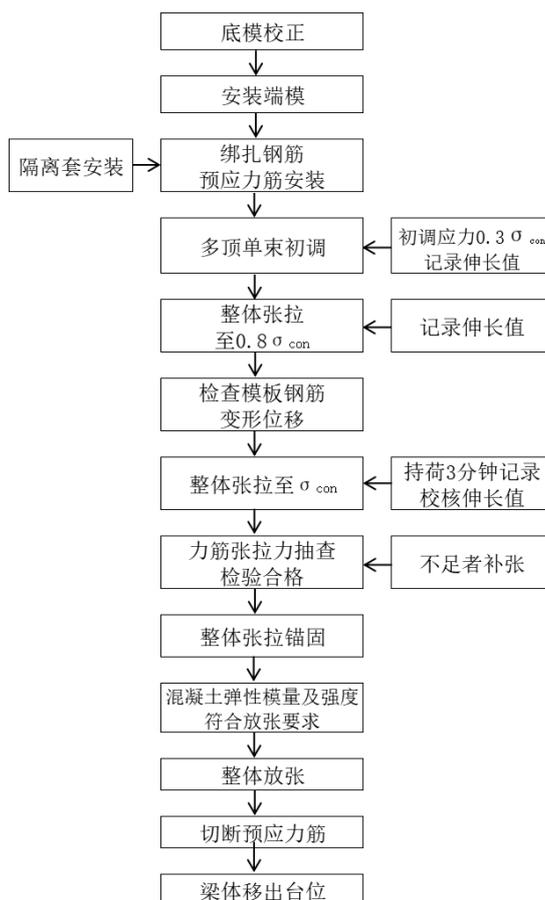


图 8.1.1 先张法预应力混凝土简支梁预制施工流程图

【条文说明】对于引入了数控张拉设备的预制梁厂，可采用以下方法提升对数控张拉设备的利用水平：

1、依据梁场所生产的预制梁类型编制对应的数控张拉程序，数控张拉程序应控制完整的张拉流程，且具有该张拉流程中相关参数的预设功能，在张拉过程中实时生产张拉力——伸长值曲线并存储。

2、提升数控张拉设备的物联网水平，通过数控张拉设备的数据远程传输功能，建立预制梁厂数控张拉网络平台。

3、通过数控张拉网络平台实时远程监控张拉过程，并存储每一次张拉的预设参数和张

拉力-伸长值曲线，建立数据库。

4、通过数据库统计、分析数控张拉过程中常见的质量问题并加以改进，提高预制梁生产质量。

8.1.2 先张法制梁台座宜按长线法生产进行施工设计，一条线可生产 2~3 片梁，并可进行两条线或多线的并行设计进行制梁。

8.1.3 先张梁张拉台座应按不同的梁型进行专门的施工工装设计，当台座生产多种梁型时，台座及其工装应按张拉吨位最大的梁型设计。

8.1.2~8.1.3【条文说明】制梁台座的强度和刚度，可按采用的结构形式，按照相应的设计规范规定进行设计计算，计算结果必须满足相关规范要求。

对于台座的地基处理，要注意不但要满足制梁工艺荷载对地基强度的要求，而且要满足地基沉降要求，特别要避免产生不均沉降。

先张梁张拉台座的稳定性是台座设计的关键问题。主要应考虑抗滑移和抗倾覆性能两个方面。设计计算时，抗滑移安全系数不得低于 1.3；抗倾覆安全系数不得低于 1.5。

8.1.4 张拉横梁承受张拉荷载下最大挠度不得大于 2mm，其合力的重心应与预应力筋合力的中心一致。

8.1.5 预应力筋的下料长度应根据工艺、工装及锚具的具体参数及长度进行计算确定，其下料长度宜按 1~1.5T 的张拉力进行下料，下料长度误差不得大于±5mm。

8.1.6 施加预应力前，应测定台座弹性压缩、张拉横梁的挠曲值及锚具锚定的变形值等参数。

【条文说明】测定台座弹性压缩、张拉横梁的挠曲值及锚具锚定的变形值等参数是为了在张拉前将这些参数输入至数控张拉设备中，系统自动将这些参数从预应力筋伸长值的测量中除去，从而得到预应力筋的真实伸长值。

8.1.7 张拉前应将梁体信息、工装设计、小吨位千斤顶单束初调的张拉力值及伸长值、大吨位千斤顶整体张拉力值及伸长值、小吨位千斤顶单束抽查检验力值等参数输入数控张拉系统内。

8.1.8 整体张拉，数控设备应输入大吨位千斤顶整体张拉、整体放张两阶段技术参数，并应做到同步、均匀、对称张拉。

8.1.9 整体张拉结束后，可采用小顶抽检校核力筋值，有效预应力误差不得大于控制应力的±2%。检查根数应不少于 8 根，检查力筋的位置偏移不应大于±5mm。

8.1.10 梁体预应力筋放张宜采用大吨位千斤顶整体同步放张。只有放张千斤顶发生故障时，才允许单束放张，须采用对称多次循环，每次放张应力不得超过张拉控制应力的 1/5，并进行数控系统千斤顶的行程计算。

8.1.11 同步放张宜分三个阶段进行，分别降至张拉控制应力的 80%、60%、0 进行，间隔时间宜 3~5 分钟，并加强观测，做到两项行程同步。放张后，力筋的切断顺序由放张端开始，依次向另一端进行。力筋切断后，按设计要求及时进行封端。

8.2 后张法筒支梁

8.2.1 后张法预制梁预应力施工，预应力数控张拉应按设计要求进行。常用的张拉方式宜按以下两种：

- 1 按初应力至张拉控制应力施工流程进行数控张拉；
- 2 按预张、初张及终张的施工流程进行数控张拉。

【条文说明】市政及公路后张筒支梁按初应力至张拉控制应力施工流程进行数控张拉，铁路梁按预张、初张及终张的施工流程进行数控张拉。

8.2.2 预应力管道线形及管道定位网间距应符合设计要求，其管道及定位网应进行计算放样定位。固定管道的定位网应设置牢靠，宜与梁体钢筋焊接，其定位网极限偏差为 $\pm 4\text{mm}$ ，以确保管道定位正确和在浇筑混凝土时不沉浮、不偏移。

8.2.3 锚垫板应固定可靠、位置正确，锚垫板承压面应垂直管道中心线，以使锚具、预应力管道、千斤顶三者同心。

8.2.4 钢绞线其下料长度误差绝对值不得大于张拉时弹性伸长值的 2%，组成束时要有固定装置，防止钢绞线扭结，穿束时其两端的外露伸长量应等长一致。

8.2.5 预应力筋可在混凝土浇筑之前或之后穿入管道内，采用蒸汽养护时，养护完成前不应安装力筋。对于后穿力筋施工，穿束前应对锚垫板位置、孔道的畅通进行检查，以使钢绞线(束)顺利穿入管道中。对于浇筑混凝土之前穿束的管道，穿束完成后应封闭锚垫板喇叭口及排气口，并应采取措施防止管道漏浆。

8.2.6 施加应力前应对管道锚口、喇叭口摩阻损失进行测定，并由设计单位根据测定结果进行张拉控制应力调整，不同梁型、不同管道应分别测定。

8.2.7 安装工作锚及夹片，其装锚质量及限位板深度与钢绞线的匹配应符合有关

规范要求。宜对数控设备进行梁体基本资料、张拉阶段设计、系统控制参数进行预设存储，预设存储完毕后宜进行检验及试运行。

8.2.8 检查和确定数控张拉量测元件，其元件应检验合格且在规定期限内。

8.2.9 T 梁应按照一主机一辅机、箱梁按照一主机三辅机布设在梁两端进行数控张拉作业。

8.2.10 对于 $0 \rightarrow 0.2\sigma_{con} \rightarrow \sigma_{con}$ 持荷锚固的张拉工艺流程，应分别在 $0.2\sigma_{con}$ 、控制应力 σ_{con} 、持荷、锚固、卸载阶段记录应力值、伸长值、夹片外露量、锚具回缩量，并进行校核与存储。数控张拉过程中应保证两端以相同的加载速率同步张拉，且两端的伸长量相差不得大于 5%。

8.2.11 张拉锚固阶段，应控制升压速度、均匀升压、平衡同一束两端张拉力值及伸长值。当张拉力接近控制应力时，应缓升升压速度，达到数控精确控制应力后锚固。

8.2.12 持荷锚固应在张拉力达到控制应力时持荷保压，保持控制应力在 $\pm 1\%$ 范围内，持荷 2~5min 后进行锚固卸载。

8.2.13 每阶段张拉结束后，系统应自动生成张拉记录表，并上传控制平台及 BIM 系统。

8.2.14 锚固结束后，卸除千斤顶，应在距夹片端头 2~3cm 处划线标记，于 24 小时后观测测量，以确定是否有滑丝及断丝。

8.2.15 采用预张、初张、终张锚固的工艺体系时，应分别对预张及初张的张拉束号、张拉顺序、张拉力值、伸长值、张拉千斤顶的编号、混凝土强度及龄期等工艺参数存储数控张拉设备；待终张数控施工时，应使终张的机具与预初张拉的机具一致，以保证终张的张拉力与伸长值准确、合理，以便进行校核控制。

8.2.16 预应力束在预张、初张、终张如不能采用同一设备同一个千斤顶时，应调整设备的系统控制参数，以使应力补张到终张控制值，设备应显示调整后的力值及伸长值，做到实际合理。

8.2.17 预张、初张、终张应符合下列规定：

1 预张时，混凝土强度应达到设计强度的 50% 以上，内外模均应松脱不移开，按数控设备的工艺参数显示及束号顺序进行数控张拉，对其张拉力值及伸长值进行存储及打印。

2 初张应在梁体混凝土强度达到设计强度 80%以上，拆除模板后按其设计的束号及顺序进行初张，结束后移梁至存梁台座，应存储及打印各束的张拉力值及伸长值。

3 终张拉应在梁体混凝土强度及弹性模量达到设计值且龄期不少于 10 天后进行；对预初张拉束，通过数控设备导出已张拉力值及伸长值后，补张到控制应力，应对所有束的终张力值及伸长值进行校核。

8.2.18 张拉过程中，对于一主机三辅机的张拉系统，预应力简支梁同一束两端及左右两束同步张拉应符合 8.2.10 要求，且应防止梁受扭。

8.2.19 预、初、终张拉力、伸长值，终张锚固后的力值、伸长值、夹片外露量、锚具回缩值进行对比分析，发现问题时，应及时处理。

8.2.20 当梁体混凝土强度达到设计强度的 80%以上时，可采用预初张拉一次进行的施工工艺，此时对于箱梁应拆除内模和端模，对于 T 形梁应拆除侧模和端模，应采用初张拉的张拉参数进行张拉，结束后移梁至存梁台座，并对其张拉力值及伸长值进行存储及打印。其后进行终张拉，终张拉应符合 8.2.17 第 3 条的要求。

8.2.21 终张拉结束后应测量梁体反拱度值，以检验是否符合设计及有关规范要求。

8.2.22 张拉记录表应符合相应的规范要求。

8.3 连续梁桥（连续刚构桥）

8.3.1 本节适用于连续梁桥和连续刚构桥的预应力施工，其除应满足本节要求外，尚应满足本规程第 4、5 章的相关规定。

8.3.2 连续梁桥 0 号段预应力施工除应满足设计规定外，尚应满足下列规定：

1 预应力筋在使用前施工单位必须做张拉、锚固实验，并进行管道摩阻、喇叭口摩阻等预应力损失测试，测试数据应提交设计单位进行设计校核确认，以保证预应力准确。

2 预应力筋应按先纵向、再竖向、后横向的顺序进行张拉。

3 预应力筋张拉应在梁段混凝土强度达到设计值的 95%、弹性模量达到设计值的 100%后进行，且必须保证张拉时混凝土的龄期不小于 5d；纵向预应力筋

应两端同步且左右对称张拉。张拉顺序应为先腹板再顶板后底板，从外向内左右对称进行。

4 竖向预应力筋应左右对称单端张拉，宜从已施工端顺序进行。竖向预应力筋应采用两次张拉方式，即在第一次张拉完成 1d 后再次补拉。

5 横向预应力筋应从梁体两侧交替单端张拉，宜从已施工端顺序进行。每一梁段伸臂端的最后 1 根横向预应力筋，应在下一梁段横向预应力筋张拉时进行，防止由于接缝梁段两侧横向压缩不同引起开裂。

6 横向和竖向预应力筋张拉滞后不宜大于 3 个悬臂浇筑梁段。预应力施加完毕后，应及时压浆。

7 采用夹片锚具时预应力筋的张拉方法：0→初始应力（终张拉控制应力的 10%~20%）→张拉控制应力（测预应力筋伸长值）→静停 2~5min，校核到张拉控制应力→主油缸回油锚固→副油缸供油卸千斤顶。

8.3.3 悬臂浇筑连续梁桥与刚构桥预应力施工除应满足设计规定外，尚应满足下列规定：

1 墩顶及梁段预留预应力孔道的位置、规格、数量必须符合设计要求。采用波纹管时管节接头搭接长度应不小于 10cm，接头应牢固、圆顺、密封不漏浆，孔道锚固端钢垫板应垂直孔道中心线预埋准确。

2 预应力筋张拉前，应检验随梁体养护的混凝土试件强度，符合设计要求方可进行预应力筋张拉；设计无要求时应达到设计强度的 85% 时进行张拉。

3 预应力筋张拉顺序必须符合设计要求。当设计无要求时，应按先纵向、次横向、后竖向顺序进行梁体预应力筋张拉，并应一次张拉到控制吨位，持荷 2~5min、测量伸长值作校核，符合设计要求即行锚固。纵向预应力尚应按先腹板后顶板、先上后下、先中后边、左右对称进行同步张拉。

4 孔道压浆应在预应力筋终拉后 24h 内完成，特殊情况时必须在 48h 内完成，并按先纵向、次竖向、后横向顺序进行施作，竖向预应力孔道应从最低点开始压浆。

5 合拢梁段混凝土强度达到设计要求时应及时进行纵向预应力筋张拉，张拉顺序必须符合设计要求。当设计无要求时，应按先短束后长束、先顶板后底板和顶底板交错顺序进行张拉。

8.3.4 悬臂节段拼装连续梁桥与刚构桥预应力施工应满足下列规定：

1 胶接缝涂胶前应先试拼定位，检查梁段纵横位置及四角高程，符合工艺设计要求后将待拼梁段移开约 50cm，穿入临时预应力筋后自上而下快速均匀涂刷 1~1.5mm 厚胶浆；清除预应力孔道口浮浆后将梁段正式定位，按设计要求张拉顺序及压力（设计无要求时可按 0.2~0.3MPa）对称张拉临时预应力筋施行挤压，并及时清理接缝面周围和预应力孔道中挤出的胶浆。

2 胶接缝梁段拼装完毕，应按设计要求间隔时间或胶浆强度进行预应力筋张拉，当设计无要求时需在挤胶张拉 30h 后进行张拉。

3 湿接缝接缝钢筋连接方法应符合设计要求，预应力孔道连接铁皮管伸入梁段长度应不小于 10cm，并应进行密封处理，保证不漏浆。

4 湿接缝梁段必须在接缝现浇混凝土强度达到设计要求强度后才能进行预应力施工，当设计对混凝土强度无要求时应达到设计强度等级的 75%方可进行张拉。

5 预应力筋张拉顺序应符合设计要求，设计无要求时应按先长后短、先边后中、先上后下交错进行施作；当设计有要求，应按设计要求执行。

6 预应力筋张拉应注意气温和气象变化，当气温在 0℃ 以下、风力在 5 级以上时，不宜进行预应力筋张拉。

7 预制梁段的端面尺寸、垂直度和底面平整度必须严格控制，梁段接缝面的预应力孔（管）道相错量不应大于 2mm。相邻梁段应密接浇筑，后浇梁段成孔胶管伸入已成梁段内长度不应小于 30cm，铁皮管成孔时搭接长度不应小于 10cm，并应采用密封措施防止漏浆堵塞孔（管）道。

8 顶推梁段的竖向及横向预应力筋和顶推阶段的预应力筋，应按设计要求在顶推施工前完成张拉、压浆，但需要拆除的临时预应力筋张拉后不应压浆和不必切除锚具外的多余长度。

8.3.5 梁体封锚应满足以下要求：

1 封锚处混凝土表面应凿毛和清理，并应按设计要求对锚具进行防锈处理。

2 锚穴内应按设计要求设计钢筋网。

3 封锚（端）混凝土应符合设计要求，当无设计要求时，应采用预梁体同等级及以上的混凝土进行封锚，并应采用保湿、保温工作。

8.4 系杆拱桥

8.4.1 本节适用于系杆拱桥的预应力数控张拉施工，其除应满足本节要求外，尚应满足本规程第5章的相关规定。

8.4.2 采用数控张拉技术张拉吊索和系杆索时，应另采用传感器（非数控张拉系统内置传感器）标定吊索和系杆索的索力值与传感器之间的关系。在张拉锚固后，根据张拉过程中的索力标定数据计算有效预应力值。当锚固后建立的有效预应力值未能达到设计要求时，应根据张拉数据分析，并在规范允许的条件下调整张拉方案。若还未能达到设计要求，应与设计单位沟通，查明原因并调整设计要求、张拉方案后再进行张拉，直至满足设计要求。

8.4.3 吊索和系杆索的安装施工应符合下列规定：

1 吊索和系杆索应采用符合设计规定的产品。安装应顺直，无扭转；防护层应完整，无破损。

2 纵横梁安装完成后，吊索应按高程和内力双控制的原则进行调整，并应在完善上下锚头处细部构造的防腐处理后，方可进行桥面系的施工。

3 系杆索的张拉值应符合设计要求，并应与加载工况相对应，上、下游应对称张拉。施工时除应对系杆索进行内力和伸长量的双控外，还应监测结构关键部位的变形，并将其控制在设计允许范围以内。

4 吊索和系杆索的上下锚头，应按设计要求采取防排水、防腐蚀及防老化的措施。

5 吊索和系杆索应进行防护，在制造工艺和各施工环节上应对索的意外损伤进行控制，保证索处于无腐蚀或低腐蚀的工作环境，防止其产生应力腐蚀。

6 可更换的吊索和系杆索，其护套管内不应采用环氧砂浆等固化材料填充。

7 吊索的拉索宜采用数控张拉，设计有对称张拉要求应采用多机对称同步张拉。

8.4.4 系杆的数控张拉应匀速施加张拉力，每次张拉应精确量测伸长量并生产张拉记录。张拉过程中，由于钢丝束较多，相互影响较大，特别是前期张拉的索力损失很大，因此需反复张拉调整索力至索力一致。

8.4.5 系杆张拉时，应严格兼顾拱脚回零的原则，专人负责测量并依拱脚的偏差值施加张拉吨位，防止端横梁或横向风撑变形开裂。

8.4.6 吊杆可选用预制平行钢丝吊杆、钢绞线吊杆等。吊杆锚具宜优先选用冷铸锚、镦头锚，也可选用夹片锚。吊杆锚具采用夹片锚时，应采用防止退锚装置。吊杆及其锚具应委托专业单位制作，严格执行有关产品标准，并应进行检测和验收。

8.4.7 吊杆的张拉以横梁或系梁的标高控制为原则，考虑全部荷载作用下吊杆伸长值，吊杆安装时，全部一次预留到位。必要时在横梁、纵梁安装完毕后作一次性调整，避免桥面铺装及铺油后张拉。

8.4.8 吊杆的张拉宜在拱顶安装千斤顶，拱顶张拉。当张拉达到设计要求后，拧紧墩头锚的大螺栓，即可完成一根吊杆的张拉。

8.4.9 实测伸长值与计算伸长值的偏差应符合设计要求，无设计要求时为 $\pm 6\%$ ；锚固后实际建立的预应力值与设计规定检验值的偏差应符合设计要求。超过时，应查明原因并采取措施予以调整。应对张拉力、张拉伸长值及异常现象等做出详细记录，必要时对张拉过程进行测试。

8.4.10 吊杆张拉必须对称、分次分步骤多次张拉调索，以逐步达到设计索力。吊杆张拉应严格控制其内力和伸长量，还应监测结构关键部位的变形，并将其控制在设计允许范围以内。。

8.4.11 吊杆及吊杆锚头防护应符合下列要求：

- 1 吊杆上下端的预留孔道应用注油泵灌注环氧油脂等防腐材料；
- 2 上下锚头应安装保护罩，保护罩内应注入油脂或水泥浆（进行封锚处理）；
- 3 吊杆外防护 PE 层如有损坏，则应用 PE 热焊枪进行焊补；
- 4 桥面以上 2.5m 以内的吊杆，应用不锈钢护套或其他方法包裹起来。

【条文说明】采用数控张拉的系杆拱桥的预应力施工应配合索力频率测量法进行，二者配合可有效提高调索效率和索力控制精度。

每次张拉前，在即将张拉的吊杆和系杆上放置频率测量传感器，并输入、调试频率测量参数。张拉时，应至少采用 4 顶对 4 根吊杆和系杆进行同步张拉，数控张拉设备技术条件允许时，可采用 8 顶对 8 根吊杆和系杆进行同步张拉。张拉进行中，应实时测量索力及该索力下对应的吊杆弦振频率，将二者回归为索力—频率曲线。由于吊杆长度短，边界条件影响占比大，放张锚固后应立即测量索力并进行一次补拉。

调索时，可依据张拉时得到的索力—频率曲线为依据，通过测量吊杆的频率得到实际索力。将实际索力与设计值进行比较，并依据索力差百分比从大到小的顺序进行调索作业。

8.5 斜拉桥

8.5.1 斜拉索安装可按图 8.5.1 所示施工流程。采用数控张拉技术张拉斜拉索时，应另采用传感器（非数控张拉系统内置传感器）标定斜拉索的索力值与传感器之间的关系。在张拉锚固后，应根据张拉过程中的索力标定数据计算有效预应力值。当锚固后建立的有效预应力值未能达到设计要求时，应根据张拉数据分析，并在规范允许的条件下调整张拉方案。若还未能达到设计要求，应与设计单位沟通，查明原因并调整设计要求、张拉方案后再进行张拉，直至满足设计要求。

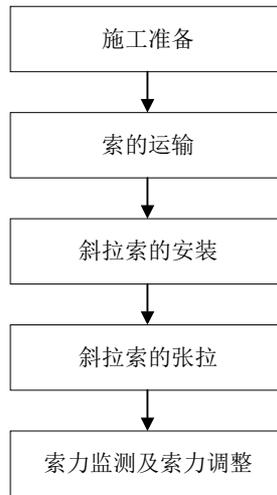


图 8.5.1 斜拉桥预应力斜拉索施工流程图

8.5.2 斜拉索长度计算及制索应符合下列规定：

1 计算斜拉索下料长度时，除应根据索塔与相应梁段锚具底端直线长度计算外，尚应考虑缆索安装时下垂需要增长量、张拉机具所需长度及富余量、下料时温度与设计安装温度之差引起的伸缩量、缆索跨越塔顶索鞍几何形状影响量、两端挂索施工时的必需长度等影响因素，保证斜拉索施工顺利进行。

2 斜拉索工地组索时，应按设计要求张拉迫使钢丝和钢绞线达到平行顺直松紧一致，并按设计要求绑扎成束，设计无要求时应间隔 2m 用镀锌铁丝绑紧，两端挂牌标明索长、索号。

3 斜拉索工地组索的防护套设置，必须符合设计要求和相关技术标准规定，采用环氧树脂玻璃丝布粘结防护时，在涂脂粘连前，应按设计要求对钢丝和钢绞线进行张拉，并使其在放张后回缩量一致，以确保防护套不开裂。

4 委托工厂制作的成品斜拉索，进场时应提供产品质量合格证和出厂检验报告及有关数据，进场后应逐根检查每根拉索长度及端头锚固情况是否符合设计

要求。

8.5.3 斜拉索及锚具应符合下列规定：

- 1 斜拉索应委托具有资质的厂家生产制造，规格、质量必须符合设计要求，出厂时应附有质量合格证、生产日期及批号、规格及重量等资料。
- 2 斜拉索使用的原材料必须符合国家有关标准的规定和设计要求，出厂时应附有产品质量合格证和检验报告及有关数据。
- 3 锚具规格、品种、硬度、螺纹丝口及制作精度和防腐等级等，应符合国家有关规定和设计要求，出厂时应附有质量合格证和检验报告及有关数据。
- 4 斜拉索搬运及堆放时，不得弯折、交叉堆压损坏索的防护层，未作外防护的斜拉索应存放在干燥阴凉处，架空放置严防生锈，支点距不应大于 4m。

8.5.4 斜拉索安装和张拉应符合下列规定：

- 1 斜拉索搬运和安装时必须保证索的弯曲半径符合设计要求。施工中应采取保护措施防止锚头损伤，锚头移位不得直接用铁锤敲击或强击复位。斜拉索防护层如有破损应及时修补，并做好记录。
- 2 斜拉索吊装，应根据塔高、布索方式、索长、索重、索的刚柔程度和现场状况及起重设备情况等，选用单吊点法、多吊点法、桁架床法、导索法、脚手架法、吊机安装法、钢管法进行吊装。较硬或较脆外防护层的斜拉索，不得采用单吊点法吊装。
- 3 斜拉索安装前，应预先测定锚头安装位置，并在索道管上下两端进口的锚下垫板上标明 3 斜拉索挂设，一般宜按先穿进塔上管道后再穿进梁体管道的顺序施工，并应严格按照施工工艺施作，塔上及梁上索道管的出入口处应用橡胶板防护，索的锚头应用薄铁皮防护，防止在挂索过程中损坏防护层。安装后，斜拉索应在索道管中心，不与索道管壁接触。斜拉索下料后应对端头做好防护和保护，防止浸水生锈和散头。斜拉索端头锚固应符合设计要求，采用冷铸锚头时，锚环内应无锈、无油污，钢球去锈除污，环氧树脂和钢球必须灌满、密实和挤紧，并应采取措施保证锚头不受损伤。
- 4 拉索张拉应以振动频率计或数控千斤顶压力显示的索力值为准，延伸量作为校核。张拉前后必须对桥梁和索塔的变位进行观测，当变位超过设计要求时，应联系设计单位解决。

5 拉索张拉可于塔端或梁端单端进行，也可顶升索鞍支座进行。平行钢丝拉索宜采用整体张拉，平行钢绞线拉索可用整体或分索张拉，分索张拉应按“分级”、“等力”的原则进行，每根同级的索力允许偏差为 $\pm 1\%$ 。

6 拉索张拉的顺序、级次数和量值必须符合设计要求。索塔顺桥向两侧对称的拉索和桥梁横向对称的拉索必须对称同步张拉，索塔两侧不对称的或设计拉力不同的拉索，应按设计要求的索力分级同步张拉，同步张拉的误差值不得超出设计要求，设计无具体要求时，各千斤顶同步之差不得大于 $\pm 2\%$ ，索力终值偏差应不大于 $\pm 2\%$ 。

7 拉索锚固时必须与锚垫板密贴居中，锚环和锚垫板间不宜加垫，需要加垫时其垫圈材料和强度应满足承压要求，并应设成两个密贴带扣的半圆。

8 桥梁施工到下述阶段时，全桥应测核索力，发现与设计要求不符时应进行索力调整：桥梁悬臂施工到跨中合龙前；跨中合龙后，梁体内预应力筋全部张拉完成时；梁上铺砟、铺轨和安装附属设备完成时；斜拉索的索力调整值和调整程序应符合设计要求。索力调整时以张拉拉索锚头增减锚下垫块厚度或拧转锚头螺帽进行调整，且宜从超过设计要求最大或最小的拉索开始。

9 斜拉索安装后，在抗振和减振装置安装前，两端锚具和索道管应有临时防护措施，防止雨水侵人和撞击锚头。

10 安装减振器时，应使其内周夹紧斜拉索，外周与索道管密贴。

11 斜拉索永久防护应符合设计要求。

12 在全部施工过程中，均应注意对斜拉索的保护，拖索、牵引、锚固、张拉及调整的各道工序中，均要避免扭、碰、压折、刮伤斜拉索。

【条文说明】采用数控张拉设备进行斜拉桥的张拉，应依据现场实际情况制定合理的张拉方案。合理的张拉方案应使张拉过程中桥塔的偏斜降至最低。

对于双塔双面斜拉桥，在一次张中，应至少采用4顶对4根同一桥塔上位置对称的斜拉索进行张拉。也可采用有线或无线网络将两台数控张拉设备并联后，采用8顶对8根两桥塔上位置对称的斜拉索进行同步张拉。若桥塔对应位置两侧的斜拉索的设计索力不同，宜将同步张拉改为同比例张拉。同比例张拉即为数控设备在张拉过程中以相等的百分比对所控制的千斤顶进行加载。

9 施工管理

9.1 一般规定

9.1.1 承担预应力工程施工的单位应具备具有一定技术实力和管理能力，并应具有健全的质量管理体系、施工质量控制和检验制度。

【条文说明】承担预应力工程施工的单位除应具备相应的资质等级外，还应具备健全的质量管理体系、施工质量控制和检验制度，这对防止违法分包、违法挂靠以及保证预应力工程的施工质量至关重要。

9.1.2 施工项目部的机构设置和人员组成，应满足预应力工程施工管理的需要。数控张拉设备使用前应对操作人员进行专门培训，合格后方可进行操作，平时应设专人保管并负责日常维护工作。特殊工种的作业人员必须持证上岗。

【条文说明】预应力分项工程施工应实行培训和上岗证制度。对预应力施工操作人员（如预应力筋制作、安装、张拉、灌浆等人员）的技术要求比较高，其技术素质直接影响到施工的质量和安​​全，因此上岗前应进行培训，使其达到各自岗位所需的技术水平。

9.1.3 预应力工程施工前，应由建设单位组织设计、施工和监理等单位对预应力图纸进行交底和会审。由施工单位完成的预应力深化设计文件应经原设计单位确认。

【条文说明】预应力设计和施工专业性较强。通过图纸会审，使施工单位和监理单位在领会设计意图的同时，对施工配合、质量检查和工程验收等方面达成共识。深化设计图是原设计图纸的翻样图和构造详图，其预应力筋的数量和线性参数应符合原设计要求，节点构造应满足建筑外形要求以及局部承压验算要求，因此深化设计应经原设计单位审核确认。

9.1.4 预应力施工单位应根据设计文件、工程总体进度计划和施工顺序的要求，结合结构特点和现场施工条件，制定具体的预应力专项施工方案，并经总承包和监理单位审核批准后组织实施。对施工难度和危险性大的预应力工程项目，宜制定专项安全施工方案，并采取相应的安全技术措施。

【条文说明】专项施工方案的具体内容应针对施工对象和施工条件确定。对常规工程应力求简明；对大型工程应重点突出施工组织；对采用新技术的工程应重点突出施工方法。专项施工方案应包括以下内容：

- 1 编制依据；

- 2 工程概况、施工顺序、工艺流程；
- 3 施工方法，包括预应力筋制作、孔道留设、预应力筋安装、预应力筋张拉、孔道灌浆和封锚等；
- 4 材料采购与检验、设备配备与标定；
- 5 施工进度与劳动力安排、材料供应计划；
- 6 有关工序的配合要求；
- 7 施工质量要求与质量保证措施；
- 8 施工安全要求与安全保证措施；
- 9 文明施工的具体措施；
- 10 施工现场管理组织机构；
- 11 施工资料编制的具体要求。

9.1.5 施工单位应认真执行安全生产责任制，对预应力施工过程中可能发生的危害、灾害与突发事件制定应急预案，应急预案应进行交底和培训，必要时应进行演练。

9.1.6 施工过程中，预应力施工单位应根据工程总体进度计划，进行以下施工组织工作：

- 1 合理安排好材料的订购、进场、检验计划，且进场前应完成材料的抽检和复试工作；
- 2 合理安排好设备进场计划，且进场前应完成设备的配套标定工作，并确保设备处于完好的工作状态；
- 3 合理安排好劳动力的配置，确保工程的进度和质量；
- 4 加强与建设单位、监理单位和总承包单位的协调和配合，确保工程的顺利进行。

【条文说明】预应力工程施工组织主要是成立专项施工项目经理部，明确组织机构、部门和人员的职能，根据工程总体进度计划安排以及质量和安全要求，合理组织人力、材料、设备、技术等生产要素，完成施工组织设计中制定的质量、进度、安全等目标。施工过程中，还应加强与建设单位、监理单位和总承包单位的协调和配合，确保工程的顺利进行。

9.1.7 数控张拉预应力工程应严格按照设计图纸、施工方案和本规程的规定进行施工。数控张拉预应力工程各工序的施工，应在前一道工序质量检查合格后才可

进行；未经检验或已经检验定为不合格的，严禁进行下道工序的施工。

9.1.8 数控张拉预应力工程施工质量应由施工班组自检、施工单位项目质量检查员复检及监理工程师监控三级把关。对检查中发现的质量问题，应及时采取纠正措施。

9.1.9 数控张拉预应力工程施工过程中，应对隐蔽工程应进行验收；对后张预应力筋的张拉过程、灌浆过程等重要工序应加强质量检查，并作出见证记录。

9.2 施工配合

9.2.1 预应力分项工程施工应与主体结构施工密切配合，做到工序合理，施工方便，节省工期、降低成本。

【条文说明】 预应力分项工程施工包括制作与安装、张拉与锚固、灌浆与封锚三个主要工序，施工穿插在结构主体施工过程中。预应力结构的底部支撑必须待张拉和灌浆后方能拆除，而且张拉时混凝土强度需达到设计值，因此预应力施工应与主体结构施工密切配合，使工序合理、节省工期、降低成本。

9.2.2 在多层和高层建筑工程中，现浇预应力混凝土楼面结构与预应力张拉的施工顺序，应根据结构平面尺寸、施工进度和气候条件等，选用逐层浇筑与逐层张拉、数层浇筑与顺向张拉或数层浇筑与逆向张拉施工方案。采用数层浇筑与顺向张拉方案时，下层张拉时上层结构的混凝土强度应达到 C20 及以上。

【条文说明】 编制多层和高层现浇预应力混凝土施工方案时，首先应考虑结构混凝土施工和预应力筋张拉两道工序的顺序关系。本条三种施工顺序是在大量工程实践中总结出来的，实用性强。其中多层现浇结构由于平面尺寸较大，大多选用“逐层浇筑、逐层张拉”的施工顺序；高层现浇结构由于平面尺寸较小、施工速度快，宜选用“数层浇筑、顺向张拉”的施工顺序。

9.2.3 大面积单层和多层现浇预应力混凝土结构的施工段划分，应根据结构平面布置特点和约束情况、超长预应力筋施工和预应力损失、大面积混凝土施工和收缩变形以及模板支撑系统投入量等情况综合确定。施工顺序宜从中间施工段开始向两侧拓展，以减少预应力筋张拉时受周围结构约束的影响。

【条文说明】 大面积现浇预应力混凝土结构的施工段划分，应根据结构平面形状，并综合考虑模板、混凝土、预应力等施工要求确定。分段施工可减少结构间的约束力。施工顺序宜从中间施工段向四周推进，有利于减小预应力张拉受侧向约束的影响。

9.2.4 模板安装和拆除的配合应符合下列要求：

1 对现浇预应力混凝土结构的支架体系，应制定合理的搭设方案，并对支架承载力进行验算；

2 现浇预应力混凝土梁、板底模的起拱高度应符合设计要求。当设计未规定时，宜为梁、板跨度的 $1/1000\sim 3/1000$ ；

3 现浇预应力混凝土梁的侧模应在波纹管铺设后安装，梁的端模应在端埋件安装后封闭；

4 预应力混凝土结构的侧模宜在张拉前拆除，且拆除时的混凝土强度应能保证其表面及棱角不受损坏。预应力混凝土结构的底模及其支撑应在预应力筋张拉完成、且孔道灌浆强度达到设计要求后方可拆除。当设计未规定时，应在预应力张拉完成且灌浆强度达到 15MPa 后拆除。

【条文说明】预应力混凝土梁的跨度大，尤其是对于高支模的预应力混凝土转换梁由于其自重大，若模板支架设计或搭设不合理，会引起倒塌事故和人身伤亡，应特别引起重视，必要时编制专项施工方案。

预应力混凝土梁的侧模宜在张拉前拆除，以利于预压应力的建立，同时可观察张拉前梁面有无裂缝现象。预应力混凝土梁的底模与支架，应在预应力筋张拉和灌浆后拆除。

9.2.5 钢筋安装的配合应符合下列要求：

1 柱的竖向钢筋和梁的负弯矩钢筋应按照预应力梁柱节点构造详图中的位置安装，并留出锚垫板的安装空间；

2 普通钢筋安装时应避让预应力筋或预应力管道；当无法避让必须切割受力钢筋时，应征得设计单位同意；梁腰筋间的拉筋应在预埋管道安装后绑扎；

3 普通钢筋、暗埋管线不得改变无粘结预应力筋和缓粘结预应力筋的标高；

4 预埋管道或无粘结、缓粘结预应力筋铺设后，在无防护措施情况下，其周围不得进行电焊等作业。

【条文说明】普通钢筋、预应力筋或预应力孔道的施工配合，一是要解决两者位置冲突问题，二是要解决合理安装次序问题。基本原则是：普通钢筋应避让预应力筋，必要时预应力筋也可适当调整。为此，事先应根据设计图纸绘制节点部位普通钢筋与预应力筋排列详图，并在施工中严格执行。

9.2.6 混凝土浇筑阶段的配合应符合下列要求：

1 混凝土浇筑前应对预埋管道的定位以及管道连接处、预埋管与锚垫板连接处、锚垫板上喇叭口和灌浆孔、排气管和泌水管等部位的密封性进行检查，并进行隐蔽工程验收，当确认合格后方可浇筑混凝土。

2 混凝土浇筑时，宜多留置 1~2 组同条件养护试块，用于判定预应力张拉时混凝土的实际强度等级。同条件养护试块应置于施工现场，与结构或构件同环境、同条件养护。

3 混凝土浇筑时严禁堵塞灌浆孔、排气孔和泌水管，并避免振动器直接接触预埋波纹管、无粘结预应力筋、缓粘结预应力筋和锚具预埋件等；

4 箱梁腹板与底板及顶板连接处的承托、张拉端和固定端以及其它配筋密集部位，应采取有效措施加强振捣，保证混凝土浇筑密实；

5 预应力混凝土板浇筑过程中不得踩踏预应力筋或波纹扁管、定位支架钢筋以及锚固端预埋件等。

6 混凝土浇筑过程中，应随时检查预应力结构模板、支撑、预留孔道、固定端垫板和张拉端锚垫板的稳固性，发现有松动、变形、移位和孔道漏浆时应及时处理。

9.3 施工安全

9.3.1 预应力工程施工应实行逐级安全技术交底制度。施工前，项目技术人员应将有关安全施工的技术要求向施工作业班组、作业人员作出详细说明，并由双方签字确认；班组长应向班组作业人员进行安全技术措施交底。项目安全员负责对施工现场安全生产进行监督检查。

9.3.2 施工人员进入施工现场，应戴安全帽，高空作业应系安全带，且不得乱放工具和物件。作业工人及旁站人员应带护目镜。

9.3.3 现场放线和断料的预应力钢绞线或钢丝，应设置专用场地和放线架，避免放线时钢丝、钢绞线跳弹伤人。

9.3.4 预应力施工作业处严禁上下交叉同时作业，必要时应设置安全护栏和安全警示标志。

9.3.5 预应力施工时应搭设可靠的操作平台和安全挡笆，利用已有脚手架进行作业时，应检查脚手架是否安全，铺板是否可靠。在悬挑部位进行作业的人员应佩

带安全带。雨天张拉时，应架设防雨棚。

9.3.6 张拉作业区应设置明显的警戒标志，非作业人员不得随意进入作业区。

9.3.7 张拉时应严格执行在张拉千斤顶两侧操作的规定，千斤顶后面严禁站人，且不得用脚踩踏预应力筋等。

9.3.8 液压千斤顶支撑必须与构件端部接触密合，位置准确对称。如需增加垫块，应保证其支脚稳定和受力均匀，并应有防止倾覆的技术措施。

9.3.9 钢结构拉索安装时，应在相应工作面上设置安全网，作业人员必须系安全带。户外作业时，宜在风力不大的情况下进行。在安装过程中应注意风速和风向，采取安全防护措施避免拉索发生过大摆动。有雷电时，必须停止作业。

9.3.10 数控张拉预应力施工过程中，对施工设备和机具维修、运行、存储过程中的漏油，应及时采取有效的隔离措施。现场制浆时应采取扬尘控制措施。灌浆用的水泥及其它灌浆材料应采取防水、防潮措施，并密闭存放管理。施工单位不得在油污环境下进行数控张拉施工操作。施工过程中产生的漏油、污水、废浆等废料应进行回收处理，不得直接排放。

10 施工验收

10.1 一般规定

10.1.1 预应力混凝土结构分项工程施工质量验收应按现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、行业标准《公路桥涵施工技术规范》JFGT F50、《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2、《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415、《高速铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB10752 和本规程的规定执行；预应力钢结构分项工程施工质量验收尚应符合现行行业标准《索结构技术规程》JG/J 257 等相关规定的规定。

10.1.2 根据施工工艺，预应力分项工程可划分为制作与安装、张拉与锚固、灌浆与封锚等三个检验批。

10.1.3 预应力分项工程检验批的质量验收，应由监理工程师组织施工单位（含分包单位）项目质量检查员进行，并按检验批质量验收统一用表做出记录。

10.1.4 检验批质量合格应符合下列规定：

- 1 主控项目和一般项目的质量经抽样合格；
- 2 具有完整的施工操作依据和质量检查记录。

10.1.5 预应力分项工程的质量验收，应由监理工程师组织施工单位（含分包单位）项目技术负责人进行，并按预应力分项工程质量验收统一用表做出记录。

10.1.6 预应力分项工程质量验收合格应符合下列规定：

- 1 分项工程所含的检验批均符合合格质量的规定；
- 2 分项工程验收资料完整并符合验收要求。

【条文说明】本章是根据现行国家标准《建筑工程施工质量验收统一标准》（GB50300）和《混凝土结构工程施工质量验收规范》（GB50204）编写的。预应力张拉前，预应力施工单位应填写张拉申请单并附混凝土强度试压报告和千斤顶标定记录，经监理工程师批准后实施。预应力施工单位完成每项检验批工作后，应填写检验申请单并附有关检查资料等，经监理工程师组织有关人员验收后，填写统一的检验批质量验收记录表，签字盖章。

预应力分项工程质量验收，除所含的检验批全部合格外，应重点强调验收资料完整和准确，以便顺利通过验收。预应力分项工程宜单独验收，也可与主体结构同时验收。

预应力钢结构分项工程施工质量验收除参照本规程外，尚应符合现行行业标准《索结构

技术规程》(JG/J257)等相关标准的规定。

10.2 验收记录

10.2.1 预应力分项工程质量验收时, 应提供下列文件和记录:

1 验收文件

- 1) 预应力分项工程设计文件、竣工图、图纸会审记录、设计变更文件;
- 2) 预应力分项工程施工组织设计、技术交底记录;
- 3) 预应力筋质量保证书和进场复验报告;
- 4) 无粘结预应力筋质量保证书和进场复验报告;
- 5) 缓粘结预应力筋质量保证书和进场复验报告;
- 6) 预应力筋用锚具质量保证书和进场复验报告;
- 7) 成孔材料质量保证书和进场复验报告;
- 8) 张拉设备配套标定报告;
- 9) 灌浆材料配合比试验报告、浆体试块强度试验报告。

2 验收记录

- 1) 预应力筋及预留孔道安装隐蔽工程验收记录;
- 2) 无粘结预应力筋安装隐蔽工程验收记录;
- 3) 缓粘结预应力筋安装隐蔽工程验收记录;
- 4) 预应力张拉记录;
- 5) 孔道灌浆记录;
- 6) 检验批质量验收记录。

10.2.2 预应力分项工程施工验收, 除检查相关文件、记录外, 尚应进行外观抽查。

10.2.3 当提供的文件、记录以及外观抽查结果均符合现行国家标准《混凝土结构工程施工质量验收规程》GB 50204、行业标准《公路桥涵施工技术规范》JFGT F50、《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2、《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415、《高速铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB10752 和本规程的要求时, 可进行验收。

附录 A 张拉力精度检验

A.0.1 试验用的预应力自动张拉系统组装件应按图 A.0.1 的装置进行静载加载试验，加载设备为标准试验机。测力装置应置于千斤顶上方，测力装置与试验机加载轴应同心对中。

A.0.2 加载前，开启张拉系统，应将千斤顶出缸量调至 80mm~120mm，锁紧千斤顶。试验机按测力装置满量程的 20%、40%、60%、80%、100%逐级进行静载加载 3 循环。每级加载到位静停 30s 后，同时刻分别读取试验机和张拉系统的力值示值。

1 张拉系统力值测量精度为各级工况下试验机与张拉系统力值偏差的最大值，表示为 δ_f 。

$$\delta_f = [\delta_{f,n}]_{\max} \quad (\text{A.0.2-1})$$

式中：

δ_f —各加载级的力值偏差， $\delta_{f,n} = (P_2 - P_1) / P_1 \times 100\%$ ， $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ；

P_1 —同一加载级，标准试验机示值，单位为千牛（kN）；

P_2 —同一加载级，张拉系统示值，单位为千牛（kN）。

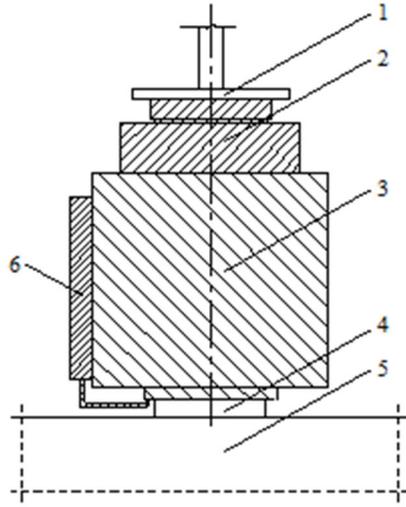
2 力值测量线性度

$$\delta_f = \Delta P_{\max} / Y_f \times 100\% \quad (\text{A.0.2-2})$$

式中：

ΔP_{\max} —张拉系统的各级工况下的力值测点与拟合直线间的最大偏差，单位为千牛（kN）；

Y_f —测力装置满量程力值，单位为千牛（kN）。测力装置为应变式力传感器及配套仪表组成的直接测量张拉力的装置。



- 1.试验机； 2.测力传感器； 3.千斤顶； 4.工具锚具；
5.试验机； 6.位移传感器。

图 A.0.1 张拉力精度检验工装示意

附录 B 伸长值精度检验

B.0.1 试验用的预应力自动张拉系统组装件应按图 B.0.1 的装置进行千斤顶的空载走行试验，以张拉系统控制千斤顶的伸长和回缩，千斤顶无外荷载。位移测量仪安装在液压缸的侧面，位移测量仪应平行千斤顶轴向。

B.0.2 试验前，千斤顶应处于零位，张拉系统和位移测量仪示值归零。张拉系统按千斤顶最大行程的 20%、40%、60%、80%、100%逐级进行千斤顶伸长操作，每级到位静停 30s 后，同时刻分别读取位移测量仪和张拉系统的伸长量示值；随后按千斤顶最大行程的 100%、80%、60%、40%、20%逐级进行千斤顶回缩操作，每级到位静停 30s 后，同时刻分别读取位移测量仪和张拉系统的伸长量示值。

1 张拉系统位移测量精度为各级工况下标准位移测量仪与张拉系统伸长值偏差的最大值，表示为 δ_1 。

$$\delta_1 = [\delta_{1,n}]_{\max} \quad (\text{B.0.2-1})$$

式中：

$\delta_{1,n}$ —加载级的位移值偏差， $\delta_{1,n} = (L_2 - L_1) / L_1 \times 100\%$ ， $n = 1, 2, 3, 4, 5$ ；

L_1 —同一加载级，位移测量仪示值，单位为毫米（mm）；

L_2 —同一加载级，张拉系统伸长量示值，单位为毫米（mm）。

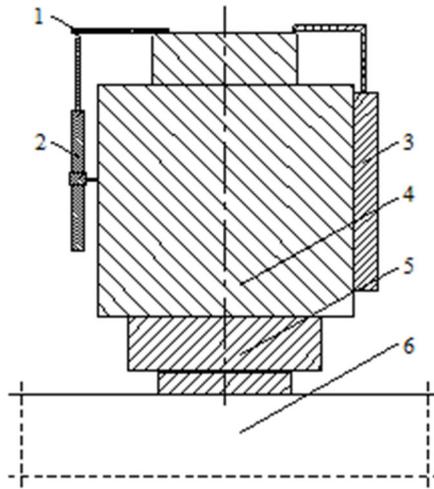
2 位移测量线性

$$\delta_L = \Delta L_{\max} / Y_1 \times 100\% \quad (\text{B.0.2-2})$$

式中：

ΔL_{\max} —张拉系统的各级工况下的伸长值测点与拟合直线间的最大偏差，单位为毫米（mm）；

Y_1 —伸长值测量装置满量程输出，单位为毫米（mm）。伸长值测量装置为位移传感器及配套滑动工装组成的直接测量预应力钢筋伸长值的装置。



- 1.平面玻璃片； 2.位移测量仪； 3.位移传感器； 4.千斤顶；
5.测力传感器； 6.试验机。

图 B.0.1 伸长值精度检验工装示意

附录 C 张拉力值偏差检验

C.0.1 数控张拉系统的控制性能试验主要考察设备的软硬件控制能力。

C.0.2 张拉系统控制性能试验应在钢制模拟梁上进行，试验系统组装件按图 C.0.2 的装置进行安装，钢绞线数量应根据张拉力的预设目标值选定，钢绞线应平行顺直，工具夹片应均匀预紧。采用自动张拉系统进行自动加载和持荷。千斤顶应预伸长适当长度，以便卸顶。

C.0.3 试验中，预设目标值为不低于传感器额定荷载 0.75 倍按控制力的预设目标值的 20%、40%、60%、80%分 4 级逐级加载，其中，前 3 级加载到位后持荷 30s，第 4 级加载到位后持荷 3min。自动加载至目标值并稳压持荷 3min，张拉系统自动记录张拉力的全过程数据。重复试验 3 次。

张拉力控制精度表示张拉系统对输出张拉力的控制准确程度。张拉力控制精度为持荷过程中张拉力示值与目标值的偏差最大值，表示为 δ_c 。

$$\delta_c = [P - P_c]_{\max} / P_c \times 100\% \quad (\text{C.0.3})$$

式中：

P —持荷过程，张拉系统输出张拉力的示值，单位为千牛（kN）；

P_c —试验前，参数预设控制力的目标值，单位为千牛（kN）。参数预设为通过张拉系统的人机交互功能对设计参数、条件参数、信息参数等进行软件输入。

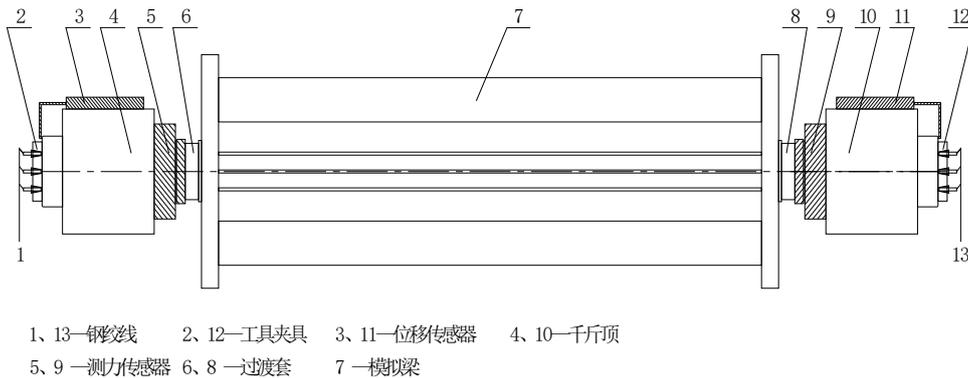


图 C.0.2 张拉力值偏差检验工装示意

附录 D 功能性检验方法

D.0.1 自动控制检验

本项检验可在张拉力值偏差检验完毕后进行，检验设备与工装同图 C.0.2。

按张拉系统默认的张拉控制程序进行自动张拉，张拉控制力为最大预设目标值。检查张拉系统是否具备张拉、持荷、锚固全过程自动控制操作的能力。

D.0.2 断电恢复试验

自动张拉过程中，张拉力到达控制力目标值的 50%时，断开工作电源，间隔 2min 后恢复工作电源。检验张拉系统是否以断电时刻的张拉力为起点继续自动张拉至控制力目标值。

D.0.3 荷载复核试验

自动张拉过程中，液压传感器测量出间接张拉力、压力传感器测量出直接张拉力，检验自主张拉系统是否实时分析间接张拉力与直接张拉力的关系。

D.0.4 故障自诊断检验

自动张拉系统的故障自诊断检验包括以下两项内容：

1 自动张拉过程中，断开、连通数据通讯线，检验张拉系统是否自动诊断故障并提示。

2 参数预设时，将预应力筋的规格设置为试验用实际规格的 50%~80%后进行自动张拉，检验张拉系统是否自动诊断故障并提示。

D.0.5 无线传输试验

本项试验可在自动控制试验完毕后进行。

张拉数据按铁路工程建设管理平台规定的数据格式进行上传。

在铁路工程管理平台中查看张拉数据的完整、一致情况。

附录 E 数控千斤顶标定记录

送检单位：_____ 标定方式：_____

标定日期：_____ 标定依据：_____

温度_____°C 相对湿度：_____%

类别	名称	型号规格	出厂编号	制造厂						
千斤顶										
其它信息	活塞面积		额定油压							
指示器			油泵							
标定点 (MPa /kN)	指示器示值 (MPa / kN)				重 复 性 R (%)	示 值 误差 δ (%)	内插误差		负载效率	
	1	2	3	平均 值			计 算 值	I(%)	理论值	η (%)
平均值	/	/	/	/			/		/	
相对分辨力 R_{cs} (%FS):		内泄露 L_k (%FS):			校准方程:					

标定结论：经检定认为_____，允许作_____级使用。

有效期：_____，发给_____号证书。

标 定：_____ 核 验：_____。

附录 F 锚口摩阻损失测试

F.0.1 试验步骤和方法:

(1) 根据装置布置图 F.0.1 在已浇好的梁段上安装数控千斤顶、锚具（注：不安装工作夹片）。固定端数控千斤顶的缸体应预先进油伸长 50~100mm，确保可测试出固定端压力，并在测试完成后，方便张拉和锚固系统的拆除。张拉台座长度（混凝土试件长度）不应大于 3m，锚具、数控千斤顶、预应力筋应同轴。

(2) 张拉设备开机，输入张拉力目标值，并设定分级，分两级，20%和 100%并设定持荷时间 t (2~5min)。

(3) 两端同时进油张拉至 20%级数，固定端数控千斤顶关闭进出口油管，张拉端数控千斤顶继续进油张拉至张拉力目标值，并持荷到设定时间，采集张拉端数控千斤顶持荷结束时力值读数，同时采集固定端数控千斤顶力值读数；持荷结束后，张拉端数控千斤顶和固定端数控千斤顶同时回油至零。

(4) 重复步骤 (1) ~ (3)，共进行三次张拉测试，取三次张拉试验的平均值为该锚具的锚口摩阻损失率。

(5) 更换锚具，重复步骤 (1) ~ (4)，得出第二个锚具的锚口摩阻损失率；取两个锚具的平均值为试验结果。

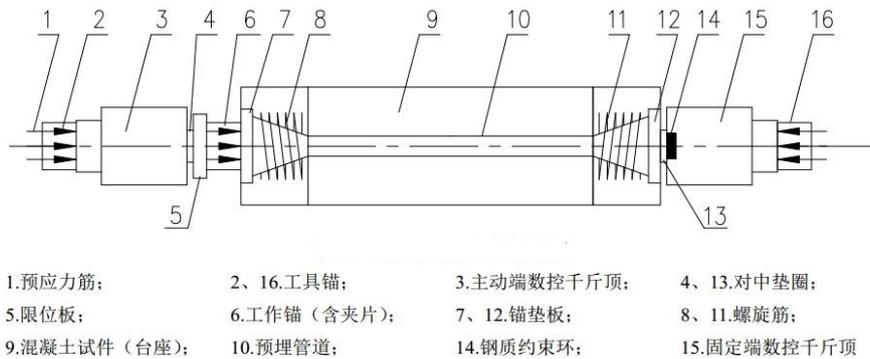


图 F.0.1 锚口摩阻损失测试装置图

F.0.2 数据处理方法

(1) 第一个锚具三次试验主动端数控千斤顶力值数据分别为 P_{11} , P_{12} , P_{13} ；固定端数控千斤顶的力值数据分别为 P_{21} , P_{22} , P_{23} ，各力级偏差及平均值应按下列公式计算：

$$\begin{aligned}\delta_{11} &= \frac{P_{11} - P_{21}}{P_{11}} \times 100\%, \quad \delta_{12} = \frac{P_{12} - P_{22}}{P_{12}} \times 100\% \\ \delta_{13} &= \frac{P_{13} - P_{23}}{P_{13}} \times 100\%, \quad \bar{\delta}_1 = \frac{\delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{13}}{3}\end{aligned}\quad (\text{F.0.2-1})$$

式中：

δ_{1n} —各加载级的力值偏差，其中 $n=1、2、3$ ；

$\bar{\delta}_1$ —各加载级的力值偏差平均值。

(2) 第二个锚具三次试验主动端数控千斤顶力值 10s 数据平均值分别为 P'_{11} , P'_{12} , P'_{13} 。固定端数控千斤顶的力值 10s 数据平均值分别为 P'_{21} , P'_{22} , P'_{23} 。

$$\begin{aligned}\delta'_{11} &= \frac{P'_{11} - P'_{21}}{P'_{11}} \times 100\%, \quad \delta'_{12} = \frac{P'_{12} - P'_{22}}{P'_{12}} \times 100\% \\ \delta'_{13} &= \frac{P'_{13} - P'_{23}}{P'_{13}} \times 100\%, \quad \bar{\delta}'_1 = \frac{\delta'_{11} + \delta'_{12} + \delta'_{13}}{3}\end{aligned}\quad (\text{F.0.2-2})$$

式中：

δ'_{1n} —各加载级的力值 10s 偏差，其中 $n=1、2、3$ ；

$\bar{\delta}'_1$ —各加载级的力值 10s 偏差平均值。

则锚口摩阻损失可按下式计算：

$$\delta_1 = \frac{\bar{\delta}'_1 + \bar{\delta}_1}{2}\quad (\text{F.0.2-3})$$

F.0.3 参数设定

1 输入参数：

- (1) 梁编号，预应力筋编号；
- (2) 张拉目标值，张拉分级及持荷时间 t (2~5min)；

2 采集参数：

(1) 第一个锚具三次试验主动端数控千斤顶力值数据分别为 P_{11} , P_{12} , P_{13} ，固定端数控千斤顶的力值数据分别为 P_{21} , P_{22} , P_{23} 。

(2) 第二个锚具三次试验主动端数控千斤顶力值数据分别为 P'_{11} , P'_{12} , P'_{13} ，固定端数控千斤顶的力值数据分别为 P'_{21} , P'_{22} , P'_{23} 。

3 输出参数:

锚口摩阻损失 δ_1 。

附录 G 摩阻损失试验

G.1 摩擦系数测试方法

G.1.1 试验步骤和方法

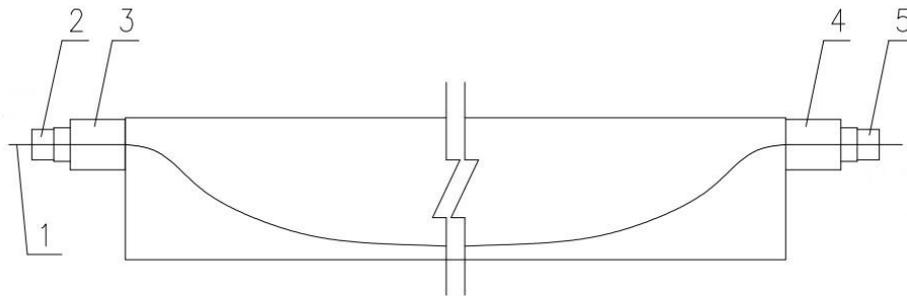
(1) 根据装置布置图 G.1.1 在已浇好的梁段上安装数控千斤顶、锚具（注：不安装工作夹片）。固定端千斤顶的缸体应预先进油伸长 50~100mm，确保可测试出固定端压力，并在测试完成后，方便张拉和锚固系统的拆除。

(2) 张拉设备开机，输入张拉力目标值，并设定分级，分两级，20%和 100% 并设定持荷时间 t (2~5min)。

(3) 两端同时进油张拉至 20%级数，固定端数控千斤顶关闭进出口油管，张拉端数控千斤顶继续进油张拉至张拉力目标值，并持荷到设定时间，采集张拉端数控千斤顶持荷结束时力值读数，同时采集固定端数控千斤顶力值读数；持荷结束后，张拉端数控千斤顶和固定端数控千斤顶同时回油至零。

(4) 重复步骤 (1) ~ (3)，共进行 n (1 或 3) 次测试；

(5) 更换不同线形的孔道重复以上步骤 1~4，至少保证测试两个不同的线性孔道。



1.预应力筋； 2、5.工具锚； 3.张拉端数控千斤顶； 4.固定端数控千斤顶；

图 G.1.1 孔道摩阻损失测试装置图

G.1.2 数据处理方法

1 计算原理

由预应力筋管道摩阻造成的应力损失，可按下式进行计算：

$$\sigma_{l1} = \sigma_{con} [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}] \quad (G.1.2-1)$$

式中：

σ_{con} ——预应力筋锚下的张拉控制应力 (MPa);

θ ——从张拉端至计算截面曲线管道部分切线的夹角之和 (rad);

x ——从张拉端至计算截面的孔道长度, 可近似取该孔道在构件纵轴上的投影长度 (m);

μ ——预应力钢束与管道壁的摩擦系数;

k ——管道每米局部偏差对摩擦的影响系数。

根据图 G.1.1 的测试原理, 设张拉端力值读数为 P_1 , 锚固端力值读数为 P_2 , 此时为管道长度 l , θ 为管道全长的总曲线包角, 则式 (G.1.1) 可改为:

$$P_2 = P_1[1 - e^{-(\mu\theta + kl)}] \quad (\text{G.1.2-2})$$

对上式两边取对数得:

$$\mu\theta + kl = \ln(P_1 / P_2) = c \quad (\text{G.1.2-3})$$

一般情况下, 预应力施工采用一种制孔方法, 这时管道质量比较均匀, 可以不考虑摩阻系数 μ 和 k 变异。由于设计和实际施工存在差异, 故不可避免的产生误差, 假设误差为 Δ , 即:

$$\mu\theta + kl - c = \Delta \quad (\text{G.1.2-4})$$

若有 n 束预应力钢束, 则:

$$\mu\theta_i + kl_i - c_i = \Delta_i \quad (\text{G.1.2-5})$$

利用最小二乘法原理, 全部预应力钢束误差的平方和为:

$$F = \sum \Delta_i^2 = \sum (\mu\theta_i + kl_i - c_i)^2 \quad (\text{G.1.2-6})$$

欲使试验误差最小, 应使

$$\frac{\partial F}{\partial \mu} = 0, \frac{\partial F}{\partial k} = 0 \quad (\text{G.1.2-7})$$

由式 (G.1.2-7) 对式 (G.1.2-6) 求导, 并整理得:

$$\begin{cases} \mu \sum \theta_i^2 + k \sum l_i \theta_i = \sum c_i \theta_i \\ \mu \sum l_i \theta_i + k \sum l_i^2 = \sum c_i l_i \end{cases} \quad (\text{G.1.2-8})$$

根据式 (G.1.2-8) 可求得参数 μ 和 k

$$\begin{cases} \mu = \frac{(\sum c_i \theta_i)(\sum l_i^2) - (\sum l_i \theta_i)(\sum c_i l_i)}{(\sum \theta_i^2)(\sum l_i^2) - (\sum l_i \theta_i)^2} \\ k = \frac{(\sum c_i l_i)(\sum \theta_i^2) - (\sum l_i \theta_i)(\sum c_i \theta_i)}{(\sum \theta_i^2)(\sum l_i^2) - (\sum l_i \theta_i)^2} \end{cases} \quad (\text{G.1.2-8})$$

2 数据处理

对某一孔道而言，该孔道的长为 l_i ，张拉端至固定端管道部分切线的夹角之和为 θ_i ， n 次试验 100% 级数时张拉端数控千斤顶持荷结束时力值读数分别为 N_{1j} ($1 \leq j \leq n$)，100% 级数时固定端数控千斤顶持荷结束时力值读数分别为 N_{2j} ($1 \leq j \leq n$) 则：

$$c_{ij} = \ln(N_{1j} / N_{2j}) (1 \leq j \leq n) \quad (\text{G.1.2-9})$$

则该线形孔道 $c_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}$ 。

统计试验数据，得出摩擦系数 k 和局部偏差系数 μ ：

$$\begin{cases} \mu = \frac{(\sum c_i \theta_i)(\sum l_i^2) - (\sum l_i \theta_i)(\sum c_i l_i)}{(\sum \theta_i^2)(\sum l_i^2) - (\sum l_i \theta_i)^2} \\ k = \frac{(\sum c_i l_i)(\sum \theta_i^2) - (\sum l_i \theta_i)(\sum c_i \theta_i)}{(\sum \theta_i^2)(\sum l_i^2) - (\sum l_i \theta_i)^2} \end{cases} \quad (\text{G.1.2-10})$$

3 参数设定

输入参数：

- (1) 梁编号，预应力筋编号，测试次数 n ，测试孔道数 m ；
- (2) 测试孔道的工作长度 l_i ($1 \leq i \leq m$)，张拉端至固定端管道部分切线的夹角之和为 θ_i ($1 \leq i \leq m$)；
- (3) 张拉目标值，张拉分级及持荷时间 t (2~5min)；

采集参数：

m 个测试孔道，100% 级数时张拉端数控千斤顶持荷结束时力值读数分别为 N_{1j} ($1 \leq j \leq n$)，100% 级数时固定端数控千斤顶持荷结束时力值读数分别为 N_{2j} ($1 \leq j \leq n$)

输出参数：

参数 μ 和 k ：

$$\begin{cases} \mu = \frac{(\sum c_i \theta_i)(\sum l_i^2) - (\sum l_i \theta_i)(\sum c_i l_i)}{(\sum \theta_i^2)(\sum l_i^2) - (\sum l_i \theta_i)^2} \\ k = \frac{(\sum c_i l_i)(\sum \theta_i^2) - (\sum l_i \theta_i)(\sum c_i \theta_i)}{(\sum \theta_i^2)(\sum l_i^2) - (\sum l_i \theta_i)^2} \end{cases} \quad (G.1.2-11)$$

其中： $c_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n c_{ij}$ ， $c_{ij} = \ln(N_{1j} / N_{2j})(1 \leq j \leq n)$ 。

G.2 变角张拉摩擦损失测试方法

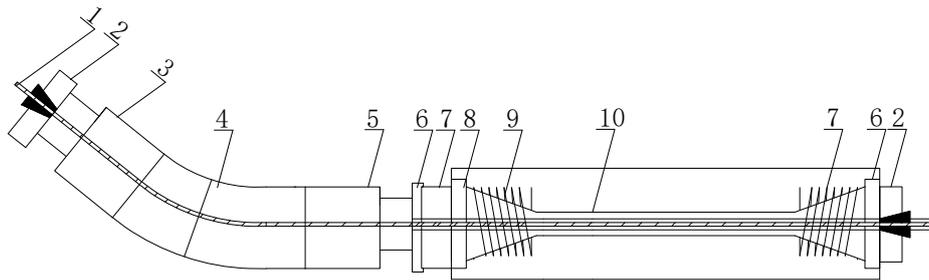
G.2.1 试验步骤和方法

(1) 根据装置布置图 3 在已浇好的梁段上安装数控千斤顶、锚具（注：不安装工作夹片）。固定端千斤顶的缸体应预先进油伸长 50~100mm，确保可测试出固定端压力，并在测试完成后，方便张拉和锚固系统的拆除。

(2) 张拉设备开机，输入张拉力目标值，并设定分级，分两级，20%和 100%并设定持荷时间 t (2~5min)。

(3) 两端同时进油张拉至 20%级数，固定端数控千斤顶关闭进出口油管，张拉端数控千斤顶继续进油张拉至张拉力目标值，并持荷到设定时间，采集张拉端数控千斤顶持荷结束时力值读数，同时采集固定端数控千斤顶力值读数；持荷结束后，张拉端数控千斤顶和固定端数控千斤顶同时回油至零。

(4) 重复步骤 (1) ~ (3)，共进行三次张拉测试，取三次张拉试验的平均值为该锚具的变角张拉摩擦损失率。



1. 预应力筋 2. 工具锚(含夹片) 3. 主动端数控千斤顶 4. 变角装置
5. 固定端数控千斤顶 6. 限位板 7. 工作锚 8. 锚垫板 9. 螺旋筋 10. 孔道

图 G.2.1 变角张拉摩擦损失测试装置图

G.2.2 数据处理方法

三级张拉主动端数控千斤顶的力值数据分别为 P_{11} ， P_{12} ， P_{13} ，固定端数控千

千斤顶的力值数据分别为 P_{21} , P_{22} , P_{23} 。

$$\delta_{21} = \frac{P_{11} - P_{21}}{P_{11}} \times 100\%, \quad \delta_{22} = \frac{P_{12} - P_{22}}{P_{12}} \times 100\%, \quad \delta_{23} = \frac{P_{13} - P_{23}}{P_{13}} \times 100\% \quad (\text{G.2.2-1})$$

则变角张拉摩擦损失: $\bar{\delta}_1 = \frac{\delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{13}}{3}$ 。

G.2.3 参数设定

输入参数:

- (1) 梁编号, 预应力筋编号;
- (2) 张拉目标值, 张拉分级及持荷时间 t (2~5min)。

采集参数:

三级张拉主动端数控千斤顶的力值数据分别为 P_{11} , P_{12} , P_{13} , 固定端数控千斤顶的力值数据分别为 P_{21} , P_{22} , P_{23} 。

输出参数:

变角张拉摩擦损失 $\bar{\delta}_2$ 可按下式计算:

$$\bar{\delta}_2 = \frac{\delta_{21} + \delta_{22} + \delta_{23}}{3} \quad (\text{G.2.2-2})$$

其中: $\delta_{21} = \frac{P_{11} - P_{21}}{P_{11}} \times 100\%$, $\delta_{22} = \frac{P_{12} - P_{22}}{P_{12}} \times 100\%$, $\delta_{23} = \frac{P_{13} - P_{23}}{P_{13}} \times 100\%$ 。

附录 H 锚固回缩量测试

H.0.1 测量锚具回缩量可采用直接测量法或间接测量法。试验时采用的锚具、张拉机具及附件应配套。张拉控制力 N_{con} 宜取 $0.7F_{ptk} \sim 0.8F_{ptk}$ ，测力系统的不确定度不应大于 2%。

H.0.2 直接量测法测量锚固回缩量，可根据张拉力-缸体位移曲线计算，步骤如下：

- 1 达到张拉控制力并持荷片刻，伸长稳定后记录张拉控制力 N_{con} 、张拉前测量数控千斤顶的初始长度 l_1 ；
- 2 按既定步骤进行张拉，记录张拉全过程的张拉力-缸体位移曲线，如图 H.0.2；
- 3 可按下式计算张拉端的锚固回缩量：

$$\Delta l = l_B - l_C - \frac{N_{con}(l_1 + l_A)}{E_p A_p} \quad (\text{H.0.2})$$

式中： l_A	—	安装空隙，等于图8-1中A点的对应的横坐标值；
l_B	—	图H.0.2中B点的对应的横坐标值；
l_C	—	图H.0.2中C点的对应的横坐标值。

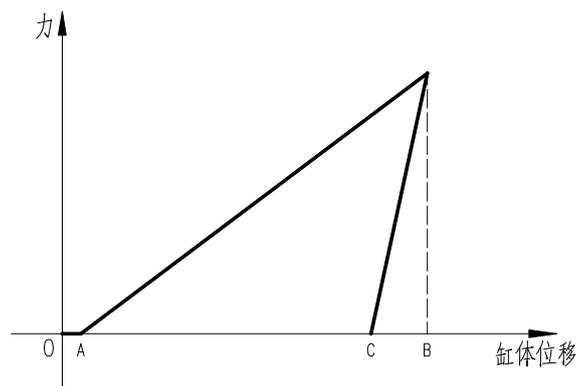


图 H.0.2 张拉力-缸体位移曲线

4 多孔锚具应至少测量 3 根钢绞线，取其平均值；同一规格的锚具应测量 3 个，取其平均值作为该规格锚具的回缩量。

H.0.3 间接测量法应符合下列规定：

1 台座或构件的长度不应小于 3m，锚具、数控千斤顶、预应力筋应同轴平行（图 H.0.3）；

2 张拉力达到控制力并持荷片刻后，记录张拉端数控千斤顶读数 P_1 ；张拉端数控千斤顶完全回油后记录读数 P_2 ；

3 锚具回缩值按下式计算：

$$a = \frac{(P_1 - P_2)(L + 30)}{E_p A_p} \quad (\text{H.0.3})$$

式中： L ——预应力筋在张拉端锚具和固定端锚具之间的长度（mm）。

4 测力系统的不确定度不应大于 2%；测量长度的量具，其标距的不确定度不应大于标距的 0.2%；

5 同一规格的锚具应测量 3 个，取其平均值作为该规格锚具的回缩值。

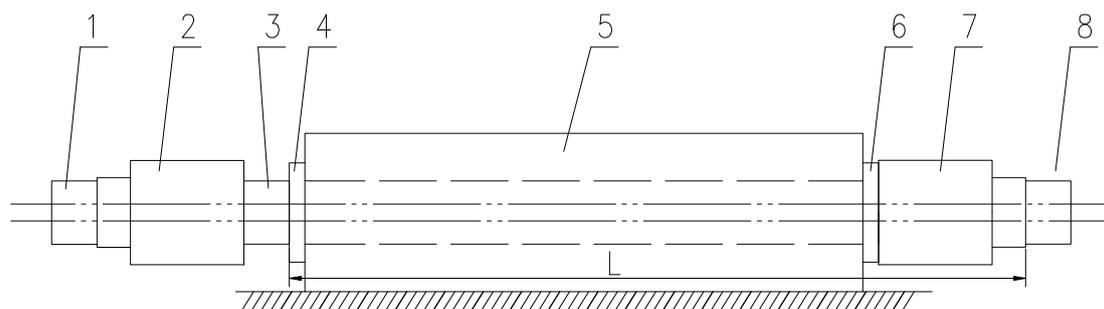


图 H.0.3 间接测量法试验装置

- 1.工具锚； 2、7.数控千斤顶； 3.张拉端锚具； 4、6.钢垫板；
5.试验台座； 8.固定端锚具。

用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用的“严禁”；

2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；

3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”；

4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

为规程则引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

《液压系统通用技术条件》 GB/T 3766

《人机界面标志标识的基本和安全规则》 GB/T 4205

《外壳防护等级（IP 代码）》 GB/T 4208

《混凝土结构设计标准》 GB/T 50010

《钢结构设计标准》 GB 50017

《电气装置安装工程盘、柜及二次回路接线施工及验收规范》 GB 50171

《混凝土结构工程施工质量验收规范》 GB 50204

《混凝土结构工程施工规范》 GB 50666

《液压元件通用技术条件》 GB/T 7935

《预应力筋用锚具、夹具和连接器》 GB/T 14370

《预应力混凝土用螺纹钢筋》 GB/T 20065

《钢拉杆》 GB/T 20934

《环氧涂层七丝预应力钢绞线》 GB/T 21073

《预应力混凝土用钢丝》 GB/T 5223

《预应力混凝土用钢绞线》 GB/T 5224

《低压成套开关设备和控制设备》 GB 7251.1

《电磁兼容试验和测量技术交流电源端口谐波、谐间波及电网信号的的低频抗扰度试验》 GB/T 17626.13

《电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验》 GB/T 17626.4

《索结构技术规程》 JG/J 257

《预应力混凝土设计规范》 JGJ 369

《铁路桥涵工程施工质量验收标准》 TB 10415

《城市桥梁工程施工与质量验收规范》 CJJ 2

《公路桥涵施工技术规范》 JTG/T F50

《预应力混凝土桥梁用塑料波纹管》 JT/T 529

《高速铁路隧道工程施工技术规程》 Q/CR 9604

《建筑施工机械与设备 预应力用智能张拉机》JB/T 13462
《无粘结预应力钢绞线》JG 161
《预应力混凝土用金属波纹管》JG 225
《预应力用电动油泵》JG/T 319
《预应力筋用液压镦头器》JG/T 320
《预应力用液压千斤顶》JG/T 321
《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》JGJ 85
《建筑工程预应力施工规程》CECS 180
《预应力钢结构技术规程》CECS 21