

# 基于锚下有效预应力检测的预应力后 张法施工质量控制

姚志安<sup>1</sup>, 范立朋<sup>2</sup>, 陆学村<sup>2</sup>, 姚响宇<sup>2</sup>

(1. 深中通道管理中心, 广东 中山 528400; 2. 广东盛翔交通工程检测有限公司)

**摘要:**为了提高预应力后张法施工的精细化与标准化程度,以深中通道40 m 预应力小箱梁为研究对象,基于“反拉法”的锚下有效预应力检测结果,分析试验梁预应力张拉中存在的问题并评价张拉质量。由摩阻试验结果可知:设计参数与梁场实际情况相差较大,张拉参数调整后,试验梁预应力张拉质量有明显提高。

**关键词:**桥梁工程; 后张法; 预应力检测; 摩阻试验; 施工控制

预应力施工技术是现代桥梁工程的关键技术之一,是预应力混凝土桥梁质量控制的核心和长久生命线,在施工过程中具有技术难度大、质量风险高等特点。通过对大量在役预应力混凝土桥梁调查及检测可知,预应力张拉阶段的施工质量控制不佳会导致服役期桥梁存在质量隐患。因此在预应力张拉施工阶段进行锚下预应力检测,合理评价预应力施工质量,并利用检测结果指导张拉施工显得尤为重要。锚下有效预应力与预应力瞬时损失密切相关,在后张法施工工艺中,瞬时损失主要包括摩阻损失、锚具变形及夹片回缩损失、弹性压缩损失,该部分损失可通过理论计算各项损失值,但存在误差。为补偿预应力张拉时锚口的摩擦损失,设计图纸中均提供了参考超张拉系数,但该系数为经验值,对不同的梁场并不适用,根据笔者近年在广东省内的检测调研情况,目前大部分预制梁场对超张拉系数并未足够重视。

该文以打造精细化、标准化梁场为建设理念的深中通道为背景,以40 m 预应力混凝土小箱梁为研究对象,分析预应力后张法施工中存在的问题,并进行预应力管道摩阻试验及锚口摩阻试验,根据检测及试验结果对张拉参数进行调整,依据锚下有效预应力检测结果评价张拉质量控制效果。

## 1 工程概况

深中通道连接广东省深圳和中山两市,位于虎门

大桥与港珠澳大桥之间,项目采用东隧西桥方案,桥梁总长约17.034 km,全线采用双向八车道高速公路标准建设,设计速度为100 km/h,桥梁宽度为40.5 m。深中通道智慧梁场建设的“五化”目标,分别是生产过程可视化、施工流程标准化、业务管理数字化、机械设备智能化、管理决策智慧化。

深中通道陆域引桥预制40 m 小箱梁梁高2.2 m,中梁顶板宽2.4 m,边梁顶板宽2.85 m,箱梁底板宽1.0 m,混凝土强度等级为C50,钢绞线采用低松弛高强度预应力钢绞线,单根钢绞线直径为15.2 mm,钢绞线面积为140 mm<sup>2</sup>,钢绞线标准强度 $f_{pk}=1860$  MPa,弹性模量 $E_p=1.95\times10^5$  MPa,纵向预应力管道采用塑料波纹管,试验梁钢束布置横断面如图1所示。

## 2 反拉法检测预应力基本原理

锚下有效预应力检测采用反拉法,检测时千斤顶带动钢绞线与夹片沿轴线产生微小位移,此时夹片与锚具脱离,钢绞线自身拉力与千斤顶作用力达到受力平衡,据此可得到锚下有效预应力值。检测张拉时夹片随钢绞线轴线移动距离小,未改变夹片与钢绞线的原有咬合关系与位置,且钢绞线是弹性体,千斤顶回油后钢绞线可以恢复原状,不会改变原有的锚下有效预应力,检测过程无损且结果准确。

有效预应力施工质量评定的指标包括:有效预应力偏差(单根、单束、断面)、同束不均匀度、同断面不均

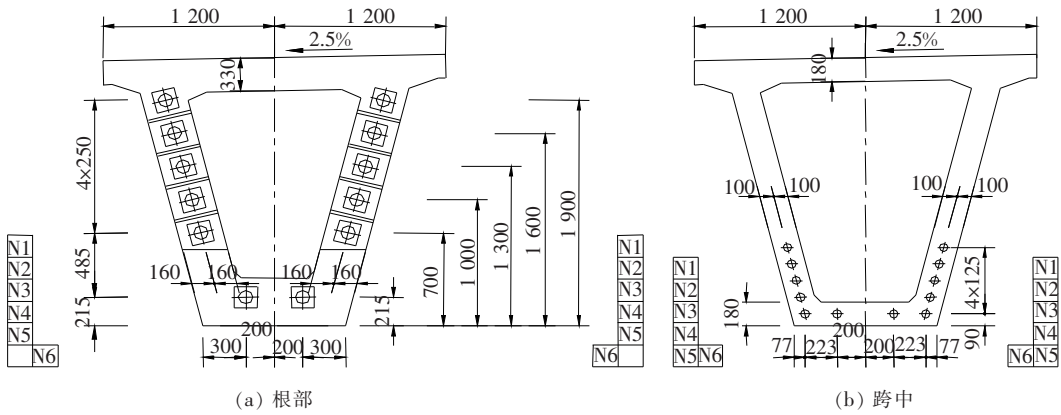


图 1 预制箱梁钢束布置横断面图(单位:mm)

匀度。有效预应力偏差用于评价张拉力值的控制质量,计算公式如下:

$$\delta_{单根}^i = \frac{f_i - \bar{f}}{f_{标准}} \tag{1}$$

$$\delta_{整束}^j = \frac{\bar{f}_j - \bar{f}}{f_{标准}} \tag{2}$$

$$\delta_{断面} = \frac{\bar{f} - f_{标准}}{f_{标准}} \tag{3}$$

式中: $\delta_{单根}^i$ 为第*i*根钢绞线的单根锚下有效预应力偏差; $\delta_{整束}^j$ 为第*j*束钢束的整束锚下有效预应力偏差; $\delta_{断面}$ 为该断面锚下有效预应力偏差; $f_{标准}$ 为锚下有效预应力标准值; $f_i$ 为第*i*根钢绞线的实测锚下有效预应力; $\bar{f}_j$ 为第*j*束钢束的实测锚下有效预应力平均值; $\bar{f}$ 为该断面实测锚下有效预应力平均值。

有效预应力不均匀度系数用于评价张拉均匀性的控制质量,计算公式如下:

$$\beta_{max/min}^e = \frac{f_{j_{max/min}} - \bar{f}_j}{\bar{f}_j} \tag{4}$$

$$\beta_{max/min}^s = \frac{\bar{f}_{max/min} - \bar{f}}{\bar{f}} \tag{5}$$

式中: $\beta_{max/min}^e$ 为该断面的同束不均匀度,包含正负两个值; $f_{j_{max/min}}$ 为断面第*j*束钢束中的实测有效预应力最大值和最小值; $\beta_{max/min}^s$ 为同断面不均匀度,包含正负两个值; $\bar{f}_{max/min}$ 为实测整束锚下有效预应力平均值的最大值和最小值。

3 试验梁第一次张拉质量

施工单位根据设计图提供的孔道偏差系数*k*和

摩阻系数μ及超张拉系数3%对试验梁进行第一次张拉施工,张拉完成2 h内采用“反拉法”进行锚下有效预应力检测,并依据粤交监督〔2014〕126号“广东省交通质监站关于进一步加强桥梁预应力张拉施工质量管理的通知”进行评定,单根锚下预应力实测值与标准值(178 kN)的偏差如图2所示。

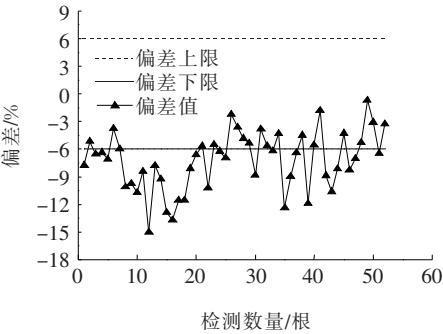


图 2 试验梁第一次张拉单根预应力检测值偏差

由图2可知:实测值偏下限,且大部分实测值已超出下限。锚下有效预应力检测结果如表1所示。

表 1 试验梁第一次张拉锚下有效预应力检测结果

控制指标		允许范围	检测结果
预应力偏差	单根	±6%	合格率 38%
	整束	±5%	−11.8%~−3.4%
	断面	±4%	−7.2%
不均匀度	同束	±6%	合格率 100%
	同断面	±4%	−4.9%~4.1%

由表1可得:

(1) 单根预应力实测值合格率为38%,断面预应力平均力值偏差为−7.2%,试验梁第一次张拉锚下有效预应力检测数据结果不满足粤交监督2014〔126〕号文件相关要求。

(2) 同束不均匀度合格率为 100%, 张拉力值较均匀, 张拉设备较稳定。

(3) 锚下有效预应力检测值偏小的原因可能为, 在该施工条件下锚口摩阻偏大, 管道反摩阻偏小, 导致放张时夹片回缩量较大, 而超张拉系数偏小。

(4) 为准确测得上述预应力损失值, 可进行管道摩阻试验和锚口摩阻试验, 确定超张拉系数, 补偿预应力损失。

## 4 摩阻试验

### 4.1 管道摩阻试验

预应力混凝土梁采用后张法施工时, 预应力筋与管道壁接触并沿管道滑动而产生摩擦阻力, 摩阻损失分为弯道影响和管道走动影响两部分。预应力管道在施工时因震动等原因走动而变成波形, 当力筋与管道有相对滑动时就会产生摩阻力, 此项称为管道走动影响(或偏差影响、长度影响), 如图 3 曲线  $ab$ 、 $cd$  段。除了管道走动影响之外, 还有预应力筋对管道内壁的径向压力所产生的摩阻力, 该部分称为弯道影响, 随力筋弯曲角度的增加而增加, 如图 3 曲线  $bc$  段。曲线管道的摩擦损失为管道偏差效应与曲率效应之和, 可按下式计算:

$$\sigma_l = \sigma_0 [1 - e^{-(\mu\theta + kx)}] \quad (6)$$

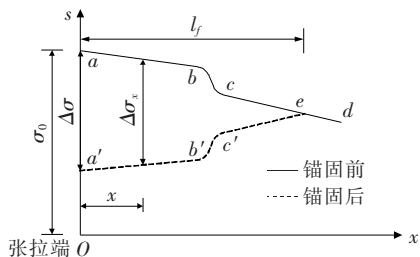
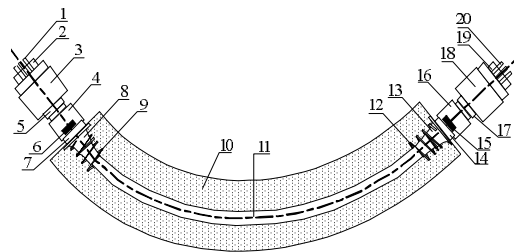


图3 锚固前后预应力筋应力变化示意图

由于锚下有效预应力检测的是锚口处的预应力, 因此该位置不存在摩擦损失, 但锚口处锚具变形和夹片回缩损失却与管道的反摩阻相关。如图 3 所示, 曲线  $abcd$  为张拉持荷时钢束的应力, 曲线  $a'b'c'd$  为锚固后钢束的应力, 两曲线之间的差值为锚固回缩产生的损失, 或称反摩阻损失。

孔道摩阻损失试验在混凝土梁体上进行, 主动端和被动端不安装夹片、锚具和限位板, 通过两端的压力传感器测出锚具处压力传感器的差值, 试验示意图见图 4。



1、18—钢绞线；2、19—工具锚；3—主动端千斤顶；4—主动端传感器；9、12—螺旋筋；6、15—约束环；10—试件；5、7、14、17—对中垫圈；8、13—锚下垫板；11—预埋孔道；16—固定端传感器；20—固定端千斤顶。

图4 预应力管道摩阻试验示意图

若此时主动端压力传感器示值为  $P_1$ , 被动端示值为  $P_2$ , 管道长度为  $l$ , 管道曲线包角为  $\theta$ , 则有:

$$P_1 - P_2 = P_1 [1 - e^{-(kl + \mu\theta)}] \quad (7)$$

即:

$$P_2 = P_1 e^{-(kl + \mu\theta)} \quad (8)$$

两边取对数可得:

$$\mu\theta + kl = -\ln(P_2/P_1) \quad (9)$$

令  $y = -\ln(P_2/P_1)$ , 则:

$$\mu\theta + kl = y \quad (10)$$

由此, 对不同管道的测量可得一系列方程式:

$$\mu\theta_1 + kl_1 = y_1 \quad \text{即} \quad \mu\theta_1 + kl_1 - y_1 = 0$$

$$\mu\theta_2 + kl_2 = y_2 \quad \text{即} \quad \mu\theta_2 + kl_2 - y_2 = 0 \quad (11)$$

$$\mu\theta_n + kl_n = y_n \quad \text{即} \quad \mu\theta_n + kl_n - y_n = 0$$

由于测试存在误差, 则有:

$$\mu\theta_1 + kl_1 - y_1 = \Delta F_1$$

$$\mu\theta_2 + kl_2 - y_2 = \Delta F_2 \quad (12)$$

$$\mu\theta_n + kl_n - y_n = \Delta F_n$$

则利用最小二乘法原理, 同时令  $q = \sum_{i=1}^n (\Delta F_i)^2$ ,

有:

$$q = \sum_{i=1}^n (\Delta F_i)^2 = \sum_{i=1}^n (\mu\theta_i + kl_i - y_i)^2 \quad (13)$$

当:

$$\begin{cases} \frac{\partial q}{\partial \mu} = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial k} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

则,  $q = \sum_{i=1}^n (\Delta F_i)^2$  取得最小值。

由式(13)可得:

$$\begin{cases} \mu \sum_{i=1}^n \theta_i^2 + k \sum_{i=1}^n \theta_i l_i - \sum_{i=1}^n \theta_i y_i = 0 \\ \mu \sum_{i=1}^n \theta_i l_i + k \sum_{i=1}^n l_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i l_i = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中： $y_i$  为第  $i$  管道对应的  $-\ln(P_2/P_1)$  值， $l_i$  为第  $i$  个管道对应的预应力筋空间曲线长度(m)， $\theta_i$  为第  $i$  个管道对应的预应力筋空间曲线包角(rad)， $n$  为实测的管道数目，且不同线形的预应力筋数目不小于 2。

通过多组预应力管道摩阻试验，得到  $k$  及  $\mu$  实测值见表 2。可知该梁场生产的 40 m 预应力混凝土小箱梁管道的孔道偏差系数  $k$ 、波纹管孔道摩阻系数  $\mu$  与设计值相比偏小，管道反摩阻损失偏大，与第一次张拉后锚下预应力检测值偏低的原因吻合。

表 2 预应力管道摩阻测试结果

设计值		实测值	
$\mu$	$k$	$\mu$	$k$
0.250	0.001 5	0.225	0.000 8

4.2 锚口摩阻试验

后张法施工过程中预应力筋与喇叭口及锚圈口会发生相对滑动，从而产生摩擦阻力，当采用限位板进行自锚的工艺时，还存在夹片逆向刻划预应力筋，而这些摩擦阻力应包括在张拉控制应力中。该锚口摩阻与喇叭口及锚圈口的角度、锚具与夹片的锥角、钢绞线直径、锚夹具与钢绞线的硬度、限位板槽深、管道类型等多因素相关，在不同的梁场、不同施工条件下存在差异，需通过现场实测得到。

该部分摩擦损失，最大的损失由夹片逆向刻划引起，与各梁场使用的限位板槽深密切相关：① 限位板槽深大，夹片开口角度大，对钢绞线的逆向刻划小，预应力损失小；② 限位板槽深小，夹片开口角度小，对钢绞线的逆向刻划大，预应力损失大。

锚圈口摩阻检测试验在模拟锚固区的混凝土试验梁上进行，限位板、锚具、夹片和锚下垫板等均为工程现场配套构件，预埋管道应顺直且直径应符合工程现场情况，通过两端的压力传感器测出锚具处压力传感器的差值，试验示意图见图 5。

锚口摩阻计算公式如下：

$$u = \frac{\Delta F}{0.8 f_{pk} \cdot A_p} \times 100\% \quad (16)$$

通过多组锚口摩阻损失试验，可以得到在该施工条件下(限位板、锚垫板、钢绞线、喇叭口、波纹管等保

持不变)，YM15-4 型号锚口摩阻损失率为 6.1%，YM15-5 型号锚口摩阻损失率为 6.6%。

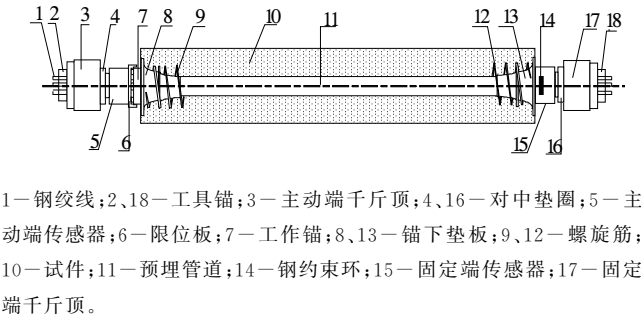


图 5 锚口摩阻试验示意图

5 试验梁参数调整后张拉质量

管道摩阻及锚口摩阻测试结果反馈给设计单位，调整张拉控制应力并计算理论伸长量，最终调整超张拉系数为 5% 后进行张拉。单根锚下预应力实测值与标准值(178 kN)的偏差如图 6 所示。

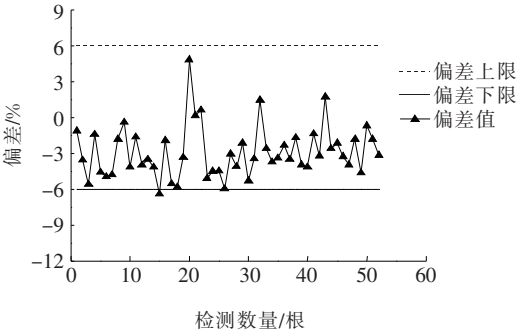


图 6 试验梁参数调整后单根预应力检测值偏差

由图 6 可知：实测值大部分在规范允许的  $\pm 6\%$  范围内，有效预应力值偏差及有效预应力不均匀度系数结果如表 3 所示。

表 3 试验梁参数调整后锚下有效预应力检测结果

控制指标		允许范围	检测结果
预应力偏差	单根	$\pm 6\%$	合格率 98%
	整束	$\pm 5\%$	$-5.0\% \sim 0.6\%$
	断面	$\pm 4\%$	$-2.9\%$
不均匀度	同束	$\pm 6\%$	合格率 100%
	同断面	$\pm 4\%$	$-2.1\% \sim 3.6\%$

由表 3 可得：

(1) 单根预应力实测值合格率为 98%，断面预应力平均值偏差为  $-2.9\%$ ，试验梁参数调整后锚下有



效预应力检查结果满足粤交监督 2014[126]号文件相关要求。

(2) 仅 5 根钢绞线的偏差值为正,多数钢绞线单根预应力实测值小于 178 kN,靠近下限。

(3) 同束不均匀度及同断面不均匀度均满足要求,张拉设备较稳定。

精确考虑管道及锚口摩阻对张拉时预应力的损失,超张拉系数调整为设计控制系数  $0.75f_{pk}$  的 105%进行张拉后,试验梁整梁平均力值(172.8 kN)比参数调整前(165.2 kN)质量显著提高,对比情况见表 4。

表 4 摩阻试验前后整梁平均力值对比

参数调整前		参数调整后	
平均力值/kN	力值偏差/%	平均力值/kN	力值偏差/%
165.2	-7.2	172.8	-2.9

由于现场已按设计控制系数  $0.75f_{pk}$  的 105%进行张拉,但检测力值仍偏下限,不建议再提高锚外张拉控制应力。经现场了解,张拉限位板为设备厂家提供,可能存在设备厂家提供的限位板槽深过小或锚具与夹片锥口角度不匹配,夹片逆向刻划钢绞线较严重,导致锚口摩阻偏大,损失率超过 6%。单位可联系锚具厂家提供匹配的限位板,以降低锚口摩阻损失。

6 结论

(1) 后张法预应力筋锚固后锚下有效预应力与预应力管道的反摩阻密切相关。

(2) 不同的施工条件下,管道与锚口的预应力损失不尽相同,按经验采用管道参数及超张拉系数的方法不可取。

(3) 正式张拉施工前应先进行管道摩阻及锚口摩

阻试验,试验结果能有效指导预应力张拉施工。

(4) 经试验确定的施工条件(包含喇叭口、锚具、夹具、限位板、钢绞线、管道等)不得随意更换,且要配套使用。

(5) 锚下有效预应力检测不仅是结果验证手段,更应该要发挥其施工指导作用。

参考文献:

[1] 吴枫. 大跨径预应力混凝土桥梁灾害分析及治理[J]. 科技通报,2017(6).

[2] 杨永清,郭凡,刘国军,等. 大跨预应力混凝土连续梁式桥长期下挠研究中的问题[J]. 铁道建筑,2010(9).

[3] 张海义,张杰,邹道勤,等. 后张法预应力梁瞬时损失设计与试验研究[J]. 工业建筑,2010(10).

[4] Bruce M,Gómez J,Traylor R. Repeated Lift—Off Testing of Single Bore Multiple Anchors for Dam Retaining Wall over a 5—Year Period[C]. International Foundation Congress and Equipment Expo, ASCE, Orlando, Florida, 2009.

[5] 成剑波,姚晨,张峰. 反拉法检测预应力钢绞线工作应力的模型试验研究[J]. 公路与汽运,2015(3).

[6] 陆学村,熊伟,林阳子. 基于锚下预应力检测的预应力张拉施工质量诊断方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2015(6).

[7] 王强,何惟煌,林志春,等. 后张预应力混凝土梁管道摩阻参数识别与分析[J]. 公路交通科技,2007(1).

[8] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[9] 易锦,贺国京. 客运专线现浇箱梁预应力孔道和锚口摩阻损失试验[J]. 中南林业科技大学学报,2009(2).

[10] 龚良勇,王俊召. 预应力钢筋回缩引起的预应力损失简化计算研究[J]. 中外公路,2019(4).

[11] 张春华,卢傲. 欧洲规范后张法预应力梁式构件锚固区局部验算探讨[J]. 中外公路,2014(1).