

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.019

# 基于不同控制标准的锚下有效预应力评估

陈旭<sup>1</sup>,王晗<sup>2</sup>

(1. 山东省路桥集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心)

**摘要:**目前拉脱法仅在重庆和云南有地方标准,不同的标准控制得到预应力锚下有效预应力会不一致。通过对高速公路施工期锚下有效预应力的大量检测结果进行评估,对比分析在3种不同控制标准下锚下有效预应力的合格率。控制标准1:仅考虑夹片回缩情况下的预应力控制标准值;控制标准2:考虑夹片回缩及锚圈口的反摩擦情况下的预应力控制标准值;控制标准3:参考《重庆市市政基础设施工程预应力施工质量验收规范》中规定的控制标准值。根据3种控制标准对锚下有效预应力进行评估。结果显示:在控制标准1未考虑锚圈口的反摩擦力时合格率较小,平均值为85.8%;控制标准2考虑钢筋回缩及锚圈口摩擦阻时,锚下有效预应力合格率最高,平均值为92.35%;控制标准3合格率介于控制标准1与控制标准2之间,平均值为90.89%。控制标准3仅考虑预应力回缩量导致预应力损失后进行合格判断,其标准本身在考虑损失后的基础上进行了0.95倍的折减,导致了预应力张拉合格率稍高,该标准本身考虑因素不够全面。

**关键词:**预应力钢绞线; 预应力检测; 拉脱法; 摩擦阻; 咬合力

预应力锚固是一种主动锚固技术,该技术已广泛应用于岩土加固和预应力混凝土结构中。预应力锚固能够有效增加岩土体或支挡结构的稳定性,通过预加荷载抵消或减小外部荷载对结构产生的拉应力、减缓裂缝发生,保证结构安全。随着中国桥梁建设的发展,预应力桥梁在中国所占的比重越来越高,因此对施工期预应力钢绞线有效预应力的评估,对预应力桥梁施工具有十分重要的意义。现今预应力钢绞线的预应力检测技术主要有两类:局部有损检测和无损检测。局部破损检测法主要有预应力筋直接检测技术和应力释放法。该类方法需要在现场进行取样,试验工作比较繁琐,并且会对梁体产生伤害。无损检测方法主要有超声波检测法及拉脱法,该方法根据超声波通过预应力钢绞线频率变化来推断其应力大小,但是已有研究表明张拉力与超声波波速并不敏感,在土木工程中应用时其精度有待提高。拉脱法检测技术在检测预应力钢绞线有效预应力时简便易行,且精度较高。Bruce M首次使用拉脱法测试了大坝的锚索有效张拉力;MARY等使用拉脱法对加固挡土墙的预应力钢绞线的工作应力进行检测;张峰等提出锚具锥孔的塑性变形会导致夹片和锚具之间存在咬合力,并提出了咬合力的概率统计模型。

拉脱法仅在重庆和云南有地方标准,对于锚下有

效预应力控制标准,重庆地方标准对预应力测试的取值和判别标准做了详细规定,但是云南地方标准延续了规范的预应力损失的描述,计算公式较为复杂,在检测工程中的应用性不强。

不同的标准控制得到预应力锚下有效预应力会不一致,各种不同标准的合理性尚未有一个明确判别。该文依托某高速公路施工期预制梁的检测数据,对比3种不同控制标准下的合格率,为后续拉脱法检测对锚下有效预应力的评定提供参考。

## 1 锚下有效预应力检测

### 1.1 检测原理

拉脱法是通过反拉钢绞线使得夹片锚具的夹片脱开,并以此刻测试得到的张拉力作为锚下有效预应力值。Bruce M首次使用拉脱法测试大坝的锚索有效张拉力。

检测方法:在锚具与油泵中间放置一个电阻式压力传感器,采样频率为20 Hz,然后启动千斤顶对钢绞线进行反拉,在夹片脱开时,观察并记录锚下与锚外压力传感器压力突变数值(图1)。

### 1.2 取值标准

通过大量试验发现真实的锚下有效预应力并不是

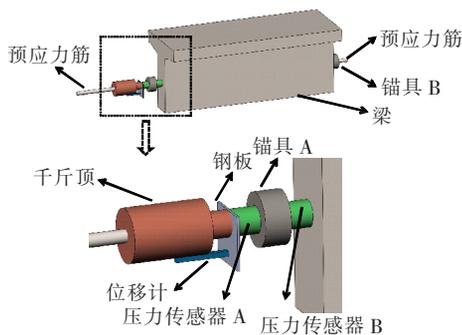


图1 检测方案示意图

下限点,而应该是图2的C点或者E点。图2为锚下有效预应力及锚外张拉力测试曲线,开始测试时,锚外张拉力不断增大,达到峰值A点时,由于夹片与锚具之间存在咬合力,因此锚外钢绞线发生应力重分布现象,张拉力下降到B点;而锚下有效预应力在初始张拉时保持不变,在C点时夹片脱开,此瞬间,锚下钢绞线发生应力重分布,预应力突增到D点,在千斤顶回油后,锚下有效预应力下降到E点。数据表明:E点的值与C点的值基本一致,可认为拉脱法前后,锚下有效预应力值保持不变。

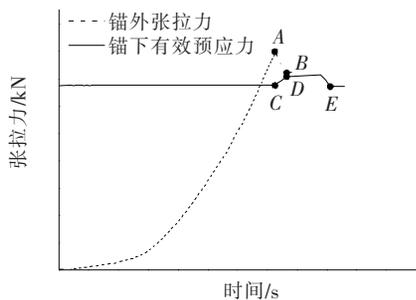


图2 特征曲线

咬合力模型95%上限值、均值和95%下限值公式  $f(x)$ :

$$f(x) = \begin{cases} 0.1729x + 4.0514 \\ 0.1729x - 3.8278 \\ 0.1729x - 12.0654 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x$ 为张拉力(kN)。

利用咬合力模型计算得出咬合力95%下限值,锚下有效预应力检测结果取B点数值与  $A - f(x)_{95\% \text{ 下限}}$  两者的较小值,即  $\min\{B, A - f(x)_{95\% \text{ 下限}}\}$ 。若测试曲线为非典型曲线,则锚下有效预应力值为  $A - f(x)_{95\% \text{ 下限}}$ 。

### 1.3 现场测试

测试梁体为30m预制混凝土箱梁(图3),共计检测40片预制箱梁。

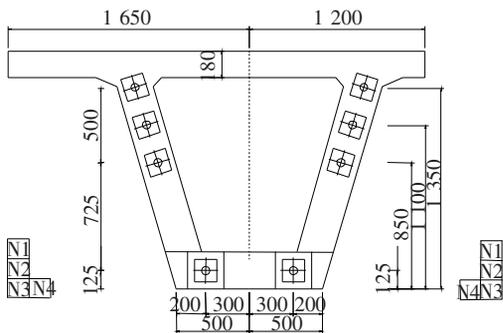


图3 箱梁截面及预应力钢束位置(单位:mm)

由于测试样本较多,仅展示部分检测曲线(图4)。

### 1.4 检测结果时间温度修正

由于张拉时刻与测试时刻之间温度存在差异,为消除温度效应对预应力的影响得到准确的锚下预应力值。记录张拉时刻的环境温度与检测时的环境温度差值,考虑温度效应得到锚下预应力随温度的变化值,在温度效应下对锚下预应力值进行修正。考虑温度效应的锚下有效预应力修正模型:

$$\Delta F = 0.0806 \Delta T + 0.015 \quad (2)$$

式中: $\Delta F$ 为受温度影响的预应力值变化量(kN); $\Delta T$ 为环境温度变化量( $^{\circ}\text{C}$ )。

由于施工技术规范规定预应力钢绞线张拉后48h内必须实施压浆,而预应力钢绞线早期损失率较大,为消除预应力随时间变化的影响,对检测结果进行时间修正。48h内钢绞线预应力残余率95%上、下限数学回归模型,表达式如下:

$$y = \begin{cases} t^{-4.464e-3} e^{(t-1) \times (-1.130e-5)} & 95\% \text{ 上限值} \\ t^{-2.102e-2} e^{(t-1) \times (-4.220e-4)} & 95\% \text{ 下限值} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $t \geq 1$  h。

通过对测试结果的时间及温度修正得出准确的锚下有效预应力值。

## 2 锚下有效预应力合格率判定

### 2.1 控制标准

(1) 控制标准1:仅考虑回缩的控制标准计算公式:

$$\sigma_{I1} = \sigma_{con} - \sigma_{\Delta l} \quad (4)$$

式中:张拉控制应力  $\sigma_{con} = 1395$  MPa,由张拉端锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值之和  $\Delta l = 6$  mm。考虑 $\pm 6\%$ 的控制范围,则考虑回缩的控制标准范围为173.2~207.2 kN。

(2) 控制标准2:考虑到预应力筋内缩引起的预应

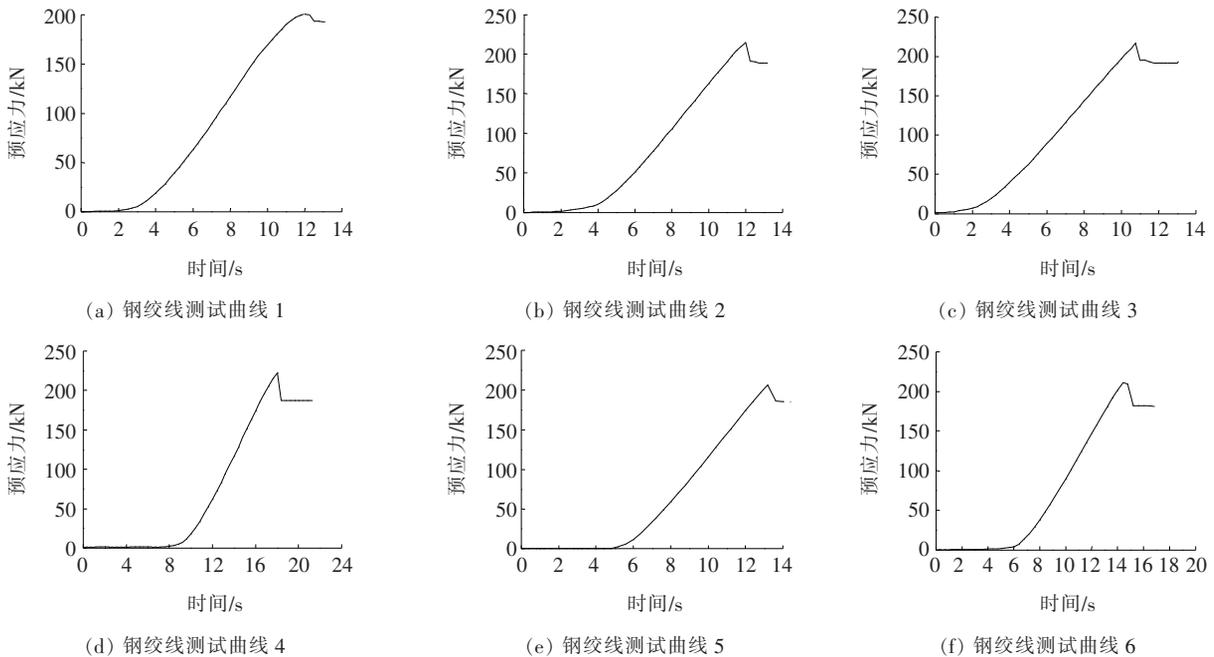


图 4 钢绞线测试曲线

力损失会对检测结果造成影响,在得出锚下有效预应力的检测结果后,需要减去预应力筋回缩造成的预应力损失才能得到更准确的实际张拉力控制标准(图 5)。

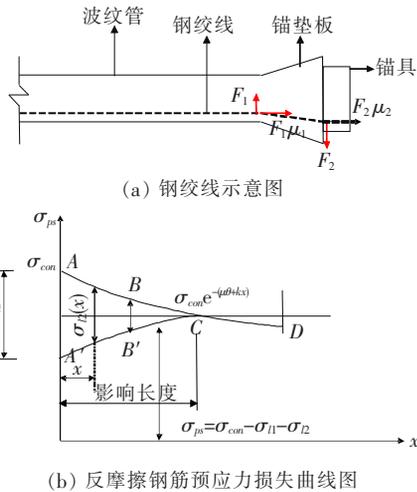


图 5 考虑反摩擦钢筋预应力损失示意图

如图 5 所示,张拉至设计应力后,锚垫板尾端张拉应力为 1 395 MPa,回油锚固时由于钢绞线回缩,钢绞线与锚垫板尾端和锚圈位置发生侧向挤压,产生反摩擦阻( $F_1\mu_1, F_2\mu_2$ ),因此工作锚与锚垫板界面处的锚下预应力与梁体内钢绞线预应力偏小。因而在进行拉脱法检测过程中,测得的锚下有效预应力值应充分考虑锚垫板尾部及锚圈处的摩擦力,实际的拉脱法检测评判标准应降低 3%。即此时控制标准为 168.12~200.81 kN。

《公路工程施工技术规范》中规定:预应力在张拉完全结束锚固后 24 h 进行有效预应力检测(螺纹钢筋的有效预应力应符合设计张拉控制应力的 90%~100%),对于  $f_{pk}=1\ 860$  MPa,公称直径为 15.2 mm 的钢绞线张拉锚固后锚下预应力所对应的单根锚固力的大小如表 1 所示。

表 1 钢绞线单根锚固力控制标准值的控制要求

设计张拉控制应力/MPa	单根锚固力/kN	允许偏差/%
$0.7f_{pk}$	168	±5
$0.75f_{pk}$	178	±5

## 2.2 测试样本简介

将所有样本的检测结果绘制成直方图(图 6),统计不同标准下锚下有效预应力的合格数量。

当锚下有效应力值小于 168.12 kN 时,在 3 种控制标准下均不合格;当锚下有效应力值为 168.12~169.1 kN,此时锚下有效预应力值在控制标准 2 下合格,而利用控制标准 1 与 3 进行控制则不合格;若锚下有效应力值为 169.1~173.2 kN,此时锚下有效预应力值在控制标准 2 与控制标准 3 下合格,而在控制标准 1 下则不合格;若锚下有效应力值为 173.2~186.9 kN,此时锚下有效预应力值在 3 种控制标准下均合格,且无超张现象;若锚下有效应力值为 186.9~200.8 kN,此时锚下有效预应力值在控制标准 1 下有超张现象;若锚下有效应力值为 200.8~207.2 kN,此时锚下有效预应力值在控制标准 2 下有超张现象;若

(3) 控制标准 3:根据 JTG/T F50—2011《公路桥

锚下有效应力值大于 207.2 kN 时,此时锚下有效预应力值在 3 种控制标准下均有超张现象。根据以上不同范围对锚下有效预应力进行统计,结果见表 2。

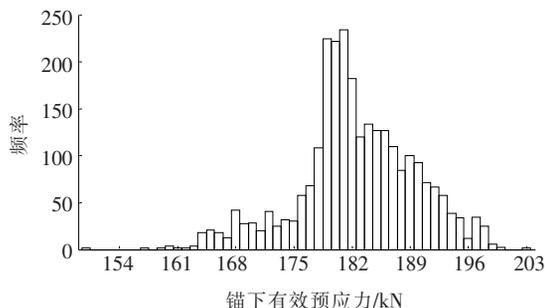


图 6 锚下有效预应力合格率直方图

表 2 钢绞线单根锚固力统计

预应力区间/kN	钢绞线/根	预应力区间/kN	钢绞线/根
<168.12	117	186.9 ~ 200.8	80
168.12 ~ 169.1	24	200.8 ~ 207.2	0
169.1 ~ 173.2	93	>207.2	0
173.2 ~ 186.9	1342		

### 2.3 测试结果分析

根据以上 3 种控制标准的高速公路预应力合格率如图 7 所示。

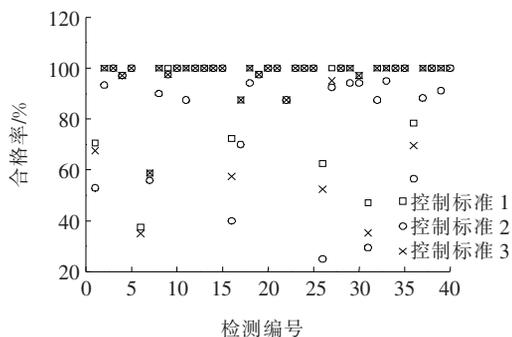


图 7 检测合格率对比图

由图 7 可以得出:

(1) 控制标准 1 未考虑锚圈口的反摩擦力,合格率较小,平均值为 85.8%。

(2) 控制标准 2 考虑钢筋回缩及锚圈口摩擦阻,锚下有效预应力合格率最高,平均值为 92.35%。

(3) 控制标准 3 合格率介于控制标准 1 与控制标准 2 之间,平均值为 90.89%。

(4) 值得注意的是:控制标准 3 仅考虑预应力回缩量导致预应力损失后进行合格判断,其标准本身在考虑损失后的基础上进行了 0.95 倍的折减,导致了预应力张拉合格率稍高,该标准本身考虑因素不够全面。

## 3 结论

(1) 为得出准确的锚下有效预应力值,在进行锚下有效预应力测试时应记录张拉及测试的时间与温度,根据张拉及检测时的时差及温差进行温度及时间修正,得到准确的锚下有效预应力值。

(2) 对比 3 种控制标准得出:若仅考虑锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩值对预应力的损失,得出锚下有效应力的合格率较低。且实际工程中钢绞线回缩,钢绞线与锚垫板尾端和锚圈位置发生侧向挤压,会产生反摩擦阻。因此为得到准确的锚下有效预应力控制标准,应将该部分损失考虑在内。

(3) 控制标准 3 仅考虑预应力回缩量导致的预应力损失后进行合格判断,当然由于其标准本身在考虑损失后的基础上进行了 0.95 倍的折减,导致了预应力张拉合格率稍高,该标准本身考虑因素不够全面。

### 参考文献:

- [1] 张峰,高磊,徐向锋. 施工期钢绞线锚下有效预应力测试技术[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017(8).
- [2] 董雁,刘佳琪,张峰. 锚下有效预应力检测仪器研发及工程应用[J]. 中外公路,2017(5).
- [3] 郭琦. 复杂预应力体系梁式结构有效预应力预测理论与方法研究[D]. 长安大学博士学位论文,2008.
- [4] Bruce M, Gómez J, Traylor R P. 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, ASCM, Orlando, 2009:33-40.
- [5] MARY ELLEN C BRUCE, Gómez J, Traylor R P. Repeated Lift - Off Testing of Single Bore Multiple Anchors for Dam Retaining Wall over a 5 - Year Period. In: Mohamad H, Hussein, Magued G, Iskander, et al, eds. Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo - Support (GSP 187). New York: American Society of Civil Engineers, 2009:33-40.
- [6] 张峰,高磊,韩福洲. 预应力钢绞线夹片式锚具咬合力试验[J]. 应用基础与工程科学学报,2017(6).
- [7] 张峰,刘佳琪,高磊,等. 夹片咬合力测试方法[J]. 交通运输工程学报,2019(3).
- [8] JTG/T F50—2011 公路桥涵施工技术规范[S].
- [9] DBJ50/T 134—2017 重庆市市政基础设施工程预应力施工质量验收规范[S].
- [10] DB53/T 828—2017 桥梁预应力施工质量控制与验收规程[S].