

桥梁单锥孔夹片式预应力锚具握裹力分析

董昊¹, 吴建芳², 顾俊钢², 张守龙², 林颀栋²

(1.重庆交通大学土木工程学院, 重庆市 400074; 2.宁波市交通建设工程试验检测中心有限公司, 浙江 宁波 315124)

摘要: 反拉法以测试曲线的拐点来判断锚下有效预应力,是当前最为广泛的锚下有效预应力检测手段。近年,众多学者发现测试曲线拐点处存在荷载骤降的情况。因此,针对反拉法测试曲线的突变段成因进行了探讨,提出了反拉荷载在夹片拉脱过程中需克服锚具握裹力从而导致突变段产生的观点。其中,锚具握裹力主要由锚圈与夹片的摩阻力和锚圈与夹片的机械咬合力构成。同时,为了得到握裹力的影响因素,建立了单锥孔夹片式锚具握裹力分析的有限元模型,设计并阐述了有限元模型的握裹力提取方法。通过有限元模型得到了影响锚具握裹力的3项影响因素——控制张拉力、摩擦系数、锥孔数量,并拟合了控制张拉力、摩擦系数与握裹力的关系曲线,得出了控制张拉力、摩擦系数与握裹力正相关的结论。

关键词: 反拉法检测; 锚下有效预应力; 夹片式锚具; 握裹力; 有限元分析

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)06-0230-04

0 引言

随着预应力技术在桥梁工程中的大量应用,许多因预应力导致的桥梁病害问题逐渐凸显出来。预应力张拉质量控制不到位所产生的不良影响尤为显著,预应力张拉不足可导致梁体下挠,预应力张拉不均匀可造成梁体开裂。因此,预应力张拉质量检测技术是保障桥梁整体运营安全的关键之一^[1]。

目前,预应力检测技术分为无损检测与有损检测。无损检测技术包括超声波检测技术和电磁效应检测技术等,外界环境条件、检测成本、检测精度等因素均在一定程度上限制了其广泛应用^[2-4]。有损检测技术包括应力释放法和横张法等,常造成梁体不可逆的损伤,一般不用于新建桥梁或新预制梁体的检测^[5]。当前工程实际中,无黏结状态通常采用反拉法检测预应力张拉状况。反拉法对构件的影响相对微小,为微损检测技术,具有经济可靠、操作便捷的特点^[6]。

反拉法检测技术原理为:对孔道未灌浆构件的预应力钢绞线进行二次反向张拉,在反向张拉过程中夹片与锚圈脱离,脱离前后的钢绞线工作段改变,刚度随之发生变化,对应的反拉荷载-位移曲线大致呈双折线,一般以拐点作为检测值^[7]。对反拉法深

入研究发现,张拉力测试曲线并非理想的双折线形态,反拉荷载-位移曲线在夹片脱开的瞬时阶段会产生突变,反拉荷载快速下降后又逐步上升趋于稳定^[8-9]。因此,在反拉过程中,夹片脱离前需克服锚圈对夹片的作用力,按照传统的拐点取值方法得到的预应力检测值存在一定的误差,检测值对比实际锚下有效预应力偏大。

本文分析了反拉法的实际预应力张拉测试曲线,通过数值模拟研究了反拉法的锚圈作用力,并分析了锚圈作用力的变化规律。

1 反拉法测试曲线

反拉法检测技术主要用于无黏结状态锚固结构的锚下有效预应力检测。通过反拉法检测过程中的荷载-位移测试曲线规律判断锚下有效预应力。

1.1 测试曲线特征分析

反拉法检测技术的测试曲线理论上为双折线,如图1所示。双折线斜率变化处即拐点位置B的力值为夹片脱离瞬间的反拉荷载。此反拉荷载即锚下有效预应力的检测值^[10-11]。

在反拉法检测技术的应用过程中发现,实际的测试曲线并非完全符合经典测试曲线,而是在B点存在突变段。偏向实际的测试曲线如图2所示。曲线可大致分为OA、AB、BB'、BC四段。OA段表征检测设备的预紧阶段。在反拉法检测前,各种设备间存在间隙。因此,千斤顶施力前期,位移变化较为敏感。AB段表征

收稿日期: 2022-08-11

基金项目: 宁波市交通运输科技项目(202014)

作者简介: 董昊(1998—),男,在校硕士研究生,研究方向为土木水利。

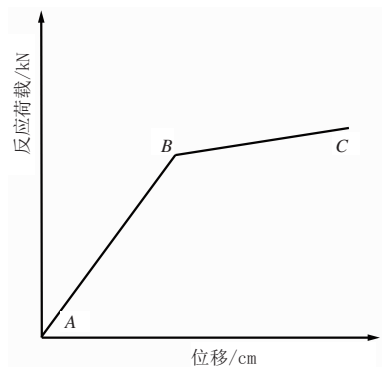


图1 反拉法经典测试曲线

预应力钢绞线外露段的拉伸阶段。此阶段预应力钢绞线外露段随着反拉荷载的施加被逐步拉伸。 $B'C$ 段表征夹片脱离锚圈后工作段预应力钢绞线与外露段预应力钢绞线共同拉伸阶段，工作段与外露段的协同受力整体抗拉刚度发生了改变。因此，曲线斜率大于 AB 段。 BB' 段为突变段。由于反拉法检测过程中夹片脱离前需要克服锚圈与夹片的作用力，因此 B 点的反拉荷载值高于锚下有效预应力。在夹片脱离后，此作用力消失，内力重分布导致测试曲线发生突变。

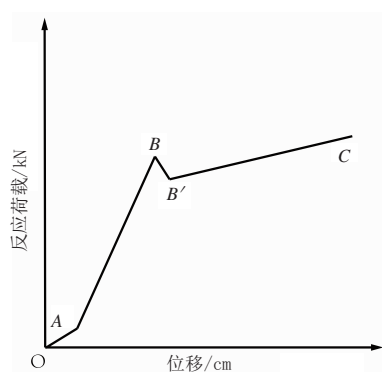


图2 反拉法实际测试曲线

1.2 夹片脱离前后受力状态

夹片脱离前后受力状态如图3所示。夹片脱离前，在反拉荷载作用下，夹片与锚圈存在相对位移趋势。此时锚圈对夹片产生作用力 F_w 来抑制夹片的脱离，锚圈对夹片的作用力 F_w 包含摩阻力与机械咬合力。摩阻力产生于锚圈对夹片的环向挤压，机械咬合力主要来自夹片与锚具表面的不规则契合。本文将锚圈对夹片的作用力 F_w 定义为握裹力，表达夹片受力的宏观状态。假定锚下有效预应力为 F_0 ，随着反拉荷载 F_A 逐步增加，当 $F_A=F_0+F_w$ 时，构件受力状态到达临界点，夹片随即脱离锚圈，构件受力状态进入第二阶段。在第二阶段，反拉荷载 F_A 突降为 F_B ，此时 $F_B=F_0'$ 。值得注意的是，此时的锚下有效预应力由于内力重分布，导致 $F_0'>F_0$ 。当检测完成后，锚下有效

预应力又将回到 $F_0^{[12]}$ 。

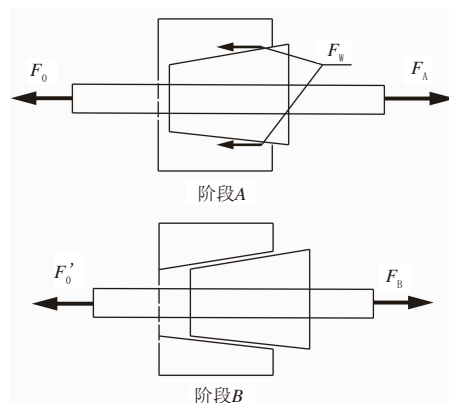


图3 夹片脱离前后受力简图

1.3 预应力检测值的握裹力修正

由于夹片脱离前后造成的内力重分布，反拉法测试曲线并非呈现理想的双折线，检测值采用突变段的上端点与下端点均存在一定误差，真实的有效预应力检测值应考虑握裹力的影响，其检测值修正公式为

$$F_C = F_B - F_w$$

式中： F_C 为修正后的锚下有效预应力检测值； F_B 为测试曲线突变段的峰值反拉荷载； F_w 为握裹力修正值。

2 数值模拟算例

2.1 锚具构造及工作状态

锚具主要由锚圈、夹片与锚垫板构成。锚圈的锥孔与夹片的锥度不同，起到紧固钢绞线作用。锚具成对使用，张拉端千斤顶对钢绞线施加预拉力，张拉一定长度后，千斤顶回油，钢绞线回缩并带动夹片，通过锚圈锥孔时夹片受到挤压随即将钢绞线固定。在使用反拉法对预应力进行检测时，检测千斤顶对已紧固的钢绞线进行二次张拉。在检测千斤顶带动下，外露段钢绞线逐步拉伸，直至钢绞线带动夹片脱离锚圈。

2.2 模型简介

单锥孔锚具几何模型如图4所示。基于单锥孔锚具构造建模时，需满足如下假定条件：(1)夹片内壁有摩阻齿，钢绞线完成锚固时，夹片受到锥孔挤压，摩阻齿与钢绞线紧密咬合，在反拉法检测过程中，夹片与钢绞线几乎不产生相对位移。因此，假定夹片与钢绞线不产生滑移，在建模中将夹片与钢绞线的模型作为同一个构件。(2)钢绞线由钢丝绞合，假定为圆柱体。钢绞线、夹片与锚圈的材料性能参数见表1。

2.3 单元、边界条件与接触对设置

(1)单元。不同类型单元的选取对有限元模型的计算时间与精度影响极大，本文模型采用六面体单



图4 单锥孔锚具几何模型

表1 材料性能参数

部件	弹性模量 /GPa	屈服强度 /MPa	泊松比
钢绞线	197	1 779	0.3
锚圈 40Cr	211	890	0.28
夹片 20CrMnTi	207	935	0.25

元,较之三面体、四面体、棱柱体单元精度更高,较高阶四面体单元与高阶六面体单元计算规模较小,动力学分析多使用六面体单元。

(2)边界条件。在实际工程中,锚圈一端与锚垫板接触,受到锚垫板的法向约束,在模型中设置锚圈一端面Z向自由度为0。在距离反向张拉端面3 cm处建立刚体限位板,将限位板各向自由度设置为0,防止在张拉时钢绞线脱出导致的计算不收敛。

(3)接触对设置。共设置两个接触对,分别为夹片外表面与锚圈锥孔内表面的接触、夹片外表面与限位板的接触。接触类型设置为Frictional。此类接触允许部件的法向分离与切向滑移较为贴合工程实际情况。

2.4 模型的握裹力提取方法

锚固-反拉过程荷载施加如图5所示。先对小孔径方向的预应力束施加荷载至 F_1 并维持到反拉结束,模拟锚固过程。随后在大孔径方向施加反拉荷载 F_2 ,使 F_2 的数值不断增加,直至夹片脱离锚圈,模拟反拉法检测过程。

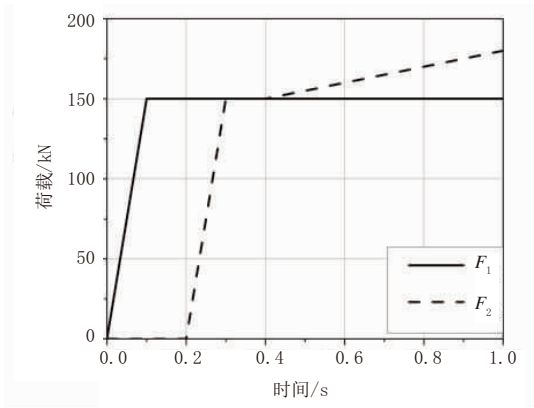


图5 荷载施加时程曲线

通过锚圈与夹片的接触应力来判断夹片是否脱离。当接触应力为0时,表明夹片脱离。从图6中可

看出,0.67 s时,夹片脱离。此时的 F_2 为拉脱瞬间的反拉荷载。握裹力可通过 $F_w=F_2-F_1$ 得出。

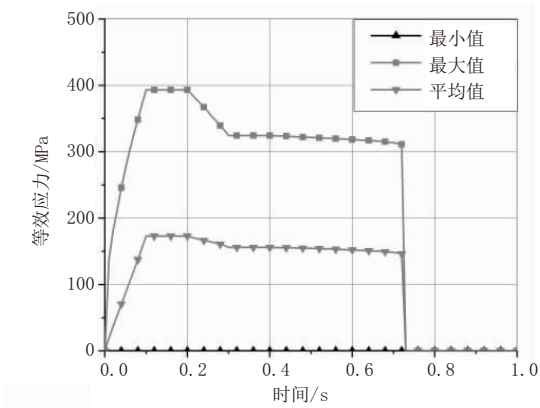


图6 接触应力变化曲线

3 数值模拟结果分析

3.1 锚圈应力状态

由前文所述,握裹力本质上属于锚圈对夹片的作用力。因此,在进行握裹力分析前,首先对锚圈的应力分布进行分析。在锚固完成后,锚圈内表面的应力云图如图7所示,并沿着锚圈轴向进行了路径设置,提取路径应力分布曲线如图8所示。

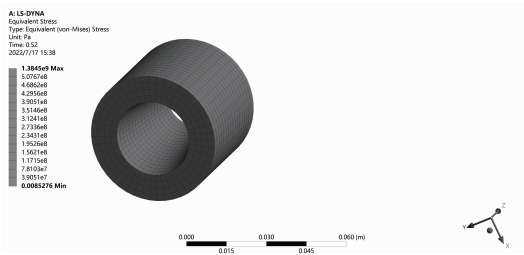


图7 锚圈应力云图(单位:Pa)

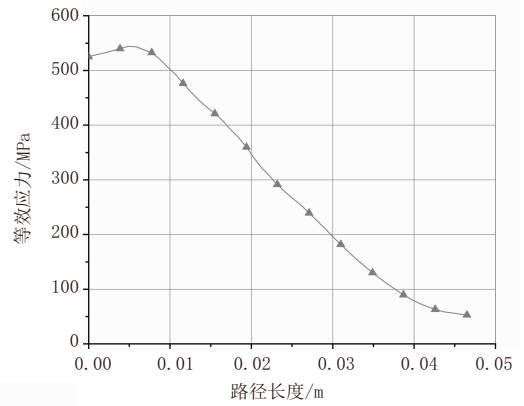


图8 内壁轴向路径应力变化曲线

由图7可知,由于锚圈与夹片的锥度不同,在锚固过程中,锚圈的大孔径端率先与夹片发生接触产生变形。随着控制张拉力的增加,夹片外表面与锚圈内壁逐步紧密贴合。因此,在锚圈大孔径处应力值较大。

同时,从锚圈内壁轴向路径应力的变化趋势可以看出,沿着大孔径至小孔径的方向,锥孔孔壁逐渐

变厚,应力也相应减小。因此推断出,由于壁厚不同,锥孔数量对握裹力会造成影响。

3.2 握裹力变量设定

为探究锚具握裹力大小的影响因素,单锥孔锚具握裹力模型设定的参数变量设置为控制张拉力与摩擦系数。金属之间的摩擦系数一般为 0.15~0.20,以 0.16、0.18、0.20 三种情况的摩擦系数进行模拟计算。控制张拉力最小为 30 kN,最大为 190 kN,以 20 kN 为插值进行设定。

3.3 握裹力变化规律

不同参数变量的有限元模型握裹力值见表 2。

控制张拉力	摩擦系数 μ		
	0.16	0.18	0.20
30	2.83	4.33	5.25
50	4.50	7.34	9.00
70	6.30	9.67	12.00
90	8.00	12.00	16.25
110	10.00	14.67	18.67
130	11.67	17.33	22.50
150	13.75	20.50	25.50
170	15.50	23.00	29.33
190	17.50	26.00	32.80

从握裹力计算结果可以看出,随着摩擦系数与控制张拉力的增大,握裹力也随之增加。为了得到更为准确的握裹力变化趋势,对所有握裹力数值进行线性拟合,拟合结果如图 9 所示。

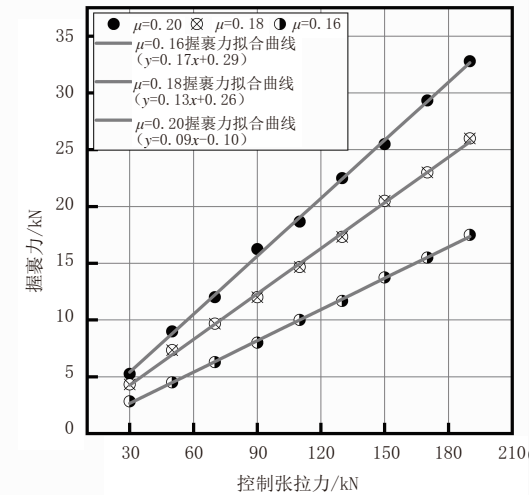


图 9 握裹力拟合曲线

从图 9 中可以看出,握裹力与控制张拉力线性正相关,并且握裹力的增幅受摩擦系数的影响,摩擦系数越大,握裹力受控制张拉力的影响越敏感。同时,也验证了在理想情况下,握裹力主要由锚具与夹

片产生的摩阻力提供。

4 结 论

反拉法是目前工程实际应用最为广泛的锚下有效预应力检测技术。本文对测试曲线的突变段产生原因进行了分析探讨,提出突变段主要是反拉荷载受锚具握裹力的影响,通过数值模拟对单锥孔夹片式锚具握裹力的影响因素进行了分析。获得的主要结论如下:

(1)反拉法检测技术的测试曲线并非理想双折线,在夹片脱离时刻存在突变段。其产生原因主要是反拉荷载在拉脱夹片过程中需要抵抗锚具握裹力。

(2)握裹力主要由锚具与夹片的摩阻力和锚圈与夹片不规则契合导致的机械咬合力构成。

(3)建立了单锥孔锚具握裹力分析的有限元模型,阐述了握裹力的提取方法。控制张拉力、摩擦系数、锚具锥孔数量是握裹力的主要影响因素。

(4)控制张拉力与握裹力线性正相关,相同控制张拉力下,摩擦系数越大,握裹力越大。锥孔数量对握裹力的影响还有待进一步研究。

参考文献:

[1] 孙金更. 预应力混凝土后张梁张拉施工质量问题及控制措施[J]. 铁道建筑, 2015(6):20-23.

[2] 陈卓敏. 基于 LC 电磁谐振的预应力钢绞线应力测量研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.

[3] Chen R H L, Wissawapaisal K. An Ultrasonic Method for Measuring Tensile Forces in a Seven-Wire Prestressing Stran[J]. AIP Conf Proc, 2002, 615: 1295-1302.

[4] Ghorbanpoor, A. Magnetic-based NDE of steel in prestressed and post-tensioned concrete bridges[C]// Structural Materials Technology III: An NDT Conference, 1998.

[5] 周家刚, 尹新刚. 在役预应力混凝土桥梁预应力检测技术——现状、技术难点与展望[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2011, 7(6):219-222.

[6] 许兵, 王阅章. 锚下有效预应力检测技术在预制梁中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(12):211-214.

[7] 罗斌, 唐树名, 程晓辉, 等. 锚下预应力反拉检测技术[J]. 公路交通技术, 2012(1):12-14, 22.

[8] 夏静, 袁建伟. 反拉法锚下有效预应力检测方法研究[J]. 公路与航运, 2016(6):210-212.

[9] 张峰, 高磊, 徐向锋, 等. 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, 38(8):1201-1205.

[10] 付丹, 郭红仙, 程晓辉, 等. 预应力锚索工作应力的检测方法——拉脱法的检测机制和试验研究[J]. 岩土力学, 2012(8):2247-2252.

[11] 廖辉红, 刘德坤. 锚下有效预应力检测取值的试验研究[J]. 公路工程, 2020, 45(2):218-223.

[12] 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, 19(3):27-35.