

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2017.08.028

施工期钢绞线锚下有效预应力测试技术

张峰¹, 高磊¹, 徐向锋², 曹原³

(1. 山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061; 2. 山东交通大学土木工程学院, 山东 济南 250023;
3. 山东省路桥集团, 山东 济南 250021)

摘要: 为准确检测锚下预应力大小, 研发了预应力钢绞线锚下有效预应力测试系统, 基于等效刚度理论揭示了系统的工作机理, 针对两类情况分别提出了张拉力的判别准则, 解释了张拉力与延伸量关系的特征曲线. 研究表明: 张拉力与延伸量的关系曲线分为消除非弹性变形阶段、反拉段弹性变形阶段及反拉段和锚固段协同受力阶段; 根据张拉力-延伸量曲线出现“拐点”和未出现“拐点”两种情况分别提出判别准则, “拐点识别法”可用于锚下有效预应力测试, 实际工作张拉力与测试张拉力误差不超过3%; 锚下有效预应力测试评定标准需考虑预应力损失.

关键词: 锚下有效预应力; 施工期; 等效刚度; 测试系统; 判别准则

中图分类号: TU 378.8 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)08-1201-05

Testing Technology of Under-Anchorage Effective Prestress of Steel Strand in Construction Period

ZHANG Feng¹, GAO Lei¹, XU Xiang-feng², CAO Yuan³

(1. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Department of Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250023, China; 3. Shandong Luqiao Group, Jinan 250021, China. Corresponding author: GAO Lei, E-mail: gaolei1989stone@gmail.com)

Abstract: To accurately detect under-anchorage effective prestress, a test system for prestressed steel strand was developed and its working mechanism was revealed based on the equivalent stiffness theory. A specific criterion of tension for two kinds of situations was given and the tension-elongation characteristic curve was explained. Results show that tension-elongation curve can be divided into inelastic deformation eliminating section, elastic deformation of the reverse stretching section and co-work of both reverse stretching section and anchorage section. Specific tension criterion can be given according to whether there exists an inflection point in the tension-elongation curve, which can be used for detecting under-anchorage effective prestress. The error between actual working tension and the tested tension is less than 3%. It is suggested that the prestress loss should be considered in the evaluation standard of under-anchorage effective prestress.

Key words: under-anchorage effective prestress; construction period; equivalent stiffness; test system; criterion

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. 预应力锚固技术的关键在于锚下工作应力的变化, 预应力损失是导致锚下工作应力变化的重要因素^[1]. 预应力施工工艺、管道摩阻、预应力筋应

力松弛、锚具变形等多种因素会影响锚下永存预应力的储备. 对于岩土加固领域, 预应力损失会造成地层抗剪强度不足, 锚固结构可能会被拔出, 导致锚固失效; 预应力混凝土结构预应力不足是导致结构正常使用阶段出现裂缝的主要原因. 预应

收稿日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108249); 山东省高等学校科技计划项目(J15LG02).

作者简介: 张峰(1978-), 男, 江苏泰兴人, 山东大学副教授, 博士.

力的锚固效率直接影响结构的安全,因此有必要了解施工期钢绞线预应力损失情况,提出一种准确评判锚下预应力的检测技术。

研究人员对锚下有效预应力检测技术进行了大量有益探索.检测技术主要分为两种:无损检测和有损检测.无损检测是将超声波和振动技术引入到力学研究领域,通过超声波传递^[2-3]、振动频率^[4]反推张拉力的大小,但其受外部因素干扰较大,存在一定误差.相比较而言,有损检测技术能准确评判锚下预应力的大小:文献[5-6]提出将预应力束外部的混凝土结构局部破除,切断部分钢绞线,以检测预应力大小,但该方法操作复杂,损伤不可逆,在检测出预应力不足的情况时无法采取有效措施.此外,光纤传感器可以用于监测结构内部预应力时间松弛效应^[7],但是其安装精度高,极易发生物理损坏,监测成本较高^[8].

同样是有损检测,“反拉法”或“拉脱法”能够以微损代价准确检测锚下预应力大小^[9],且可对检测出的预应力不足的情况及时采取补张拉措施,是一种具有广阔推广前景的检测技术.但研究仅限于理论层面,对于实际检测可能出现的问题缺乏全面的概括,其工作机理和特征曲线需要进一步进行阐述和分析,需要形成基于“反拉法”的锚下有效预应力判别准则和评定标准.

为此,本文提出了预应力钢绞线锚下有效预应力测试系统,全面阐述了其工作机理.此外,根据张拉力-延伸量特征曲线提出锚下有效预应力判别准则,并对特性曲线可能出现的几种情况作了详细分析,最后提出了锚下有效预应力测试的评定标准.

1 测试系统及工作机理

1.1 测试系统

预应力钢绞线锚下有效预应力测试系统由加载测试装置和采集分析装置组成,如图 1 所示.测试系统技术指标如表 1 所示.

表 1 测试系统技术指标
Table 1 Specifications of test system

名称	技术指标
无线集成系统	采样频率 10 Hz,实现对张拉力和延伸量的高频采集
应变式压力传感器	灵敏度 1 N,量程 250 kN
高精度位移传感器	灵敏度 0.01 mm,量程 100 mm
振弦信号处理器	振弦频率 600 ~ 3 000 Hz
振弦式压力传感器	灵敏度 0.1 kN,量程 300 kN

测试锚具为 OVM15-6 锚具(锚固 6 根直径为 15.2 mm 的钢绞线),钢绞线依次穿过退锚器、垫块、振弦式压力传感器、垫块、应变式压力传感器、前卡式千斤顶.在千斤顶侧面固定高精度位移计.

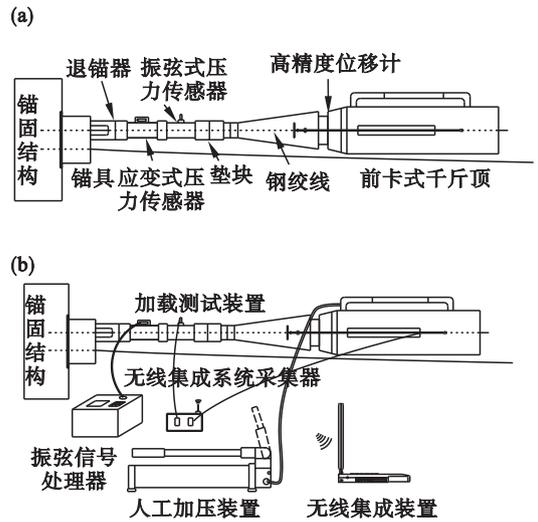


图 1 测试系统
Fig. 1 Test system

(a) — 加载测试装置; (b) — 采集分析装置.

千斤顶内工具锚夹片夹紧钢绞线,随油缸伸出实现对钢绞线的张拉;人工加压装置可实现均匀加载,可在张拉力接近设计控制应力时放慢加载速度,以提高测试精度同时保证张拉安全.

测试过程中,应变式压力传感器测量钢绞线张拉力,高精度位移计测量千斤顶油缸的伸出量(即钢绞线的伸长量).无线集成系统采集器将张拉力和伸长量信号集成并进行处理分析.振弦式压力测试装置作为保险保护系统,用于避免张拉力突然过大而造成钢绞线拉断.

1.2 工作机理

通过图 2 所示简化模型分析钢绞线张拉力变化.根据千斤顶工具锚夹片和工作锚夹片的位置将钢绞线划分为三个区段:自由段、反拉段、锚固段,区段长度分别为 l_0, l_1, l_2 .预应力钢绞线可看作是具有刚度的弹簧,反拉段和锚固段等效刚度分别为 k_1, k_2 ,其表达式为

$$k_i = F_i / \Delta l_i, (i = 1, 2). \quad (1)$$

式中: F_1, F_2 为对应反拉段和锚固段的张拉力; $\Delta l_1, \Delta l_2$ 为对应反拉段和锚固段的钢绞线伸长量.

反拉段张拉力为 0 时(图 2a), $\Delta l_1 = 0$, 则 $F_1 = 0$, 锚固段因已施加工作应力, $F_2 \neq 0$.

对反拉段钢绞线张拉后(图 2b),反拉段张拉力 F_1 和延伸量 Δl_1 成比例增加, F_2 不变.

当反拉段张力与锚固段相同时(图 2c),即 $F_1 = F_2$,反拉段与锚固段之间的工作锚夹片脱开,即相当于两区段的约束解除.两区段在工作应力作用下的刚度为

$$k_z = (k_1 k_2) / (k_1 + k_2) \quad (2)$$

式中, k_z 为解除两区段约束后的组合刚度.

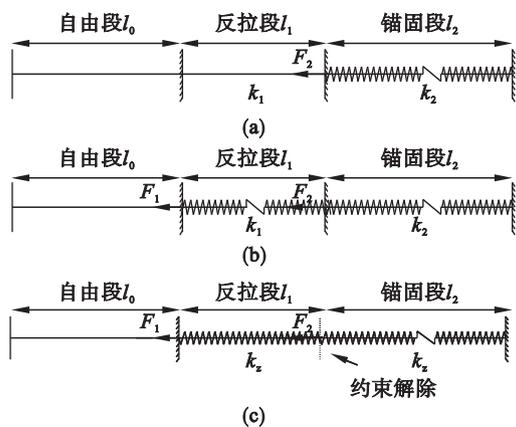


图 2 钢绞线张拉简化模型

Fig. 2 Simplified tension model of steel strand

- (a) — 反拉段张力为 0 时简化模型;
- (b) — 反拉段张力增加时的简化模型;
- (c) — 反拉段和锚固段张力相同时简化模型.

因 $k_z < k_1$,故约束解除后组合刚度减小.理想情况下,整个加载过程张力 - 延伸量关系曲线可表示成图 3,曲线呈现两折线特征.曲线斜率变化点所对应的的张力 F_2 即为锚下工作应力.

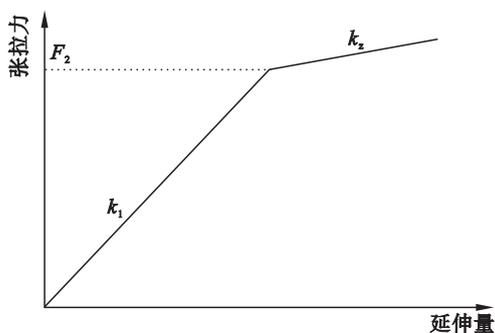


图 3 理想情况下张力 - 延伸量关系

Fig. 3 Relationship between tension and elongation under ideal situation

2 测试结果及锚下张力判别准则

2.1 测试结果及分析

对预应力混凝土梁(图 4),随机选取 6 束预应力钢绞线开展锚下工作应力测试,得到 1 号和 2 号钢绞线张力 - 延伸量关系曲线如图 5 所示.

从 1 号钢绞线张拉力和延伸量关系曲线可以

看出,曲线呈现典型的三折线特征,用字母 O, A, B, C 标示特征点.曲线的三个阶段如下.

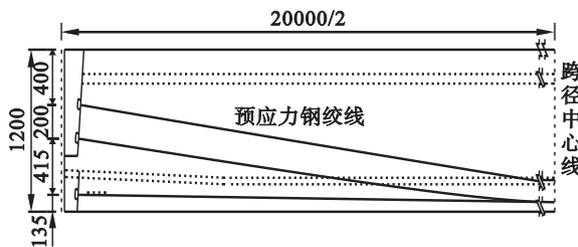


图 4 预应力混凝土梁(单位:mm)

Fig. 4 Prestressed concrete beam (units, mm)

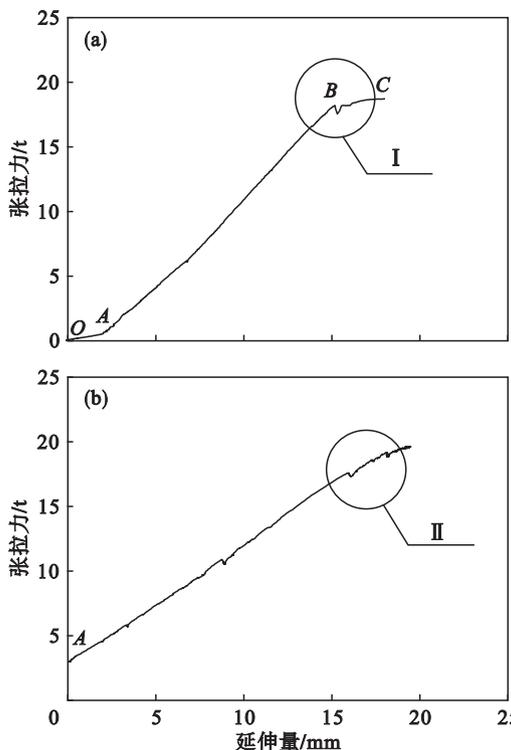


图 5 钢绞线张力 - 延伸量关系

Fig. 5 Relationship between tension and elongation of steel strand

- (a) — 1 号钢绞线张力 - 延伸量关系;
- (b) — 2 号钢绞线张力 - 延伸量关系.

1) 消除非弹性变形阶段.

OA 段张力小,曲线斜率较小,原因应当是千斤顶工具锚夹片加紧以及反拉段钢绞线、压力传感器和垫块、千斤顶的缝隙消除.

2) 反拉段弹性变形阶段.

AB 段曲线斜率基本不变,反拉段发生弹性变形,钢绞线张力与延伸量成比例增加.

3) 反拉段和锚固段协同受力阶段.

B 点斜率发生突变,夹片被拉出(如图 6 所示),表明钢绞线反拉段张力和锚固段相同,结构由仅反拉段延伸转变为反拉段和锚固段共同伸长; BC 段曲线斜率值比 AB 段小,该斜率可认为

是反拉段和锚固段钢绞线组合刚度。

2 号钢绞线张拉力-延伸量曲线中张拉力从 $3t$ 左右开始增加,初始张拉力对加载体系的“预压作用”使工具锚夹片加紧、缝隙消除,因此曲线并未出现 OA 平缓段情况;后期加载虽然出现斜率突变点,但斜率突变后很快调整为原斜率值,应是夹片滑移对张拉力-延伸量曲线产生扰动;张拉力-延伸量曲线并未出现与 1 号钢绞线类似的“拐点”。



图 6 工作锚夹片拉出

Fig. 6 Clip is pulled out of the working anchor

2.2 锚下张拉力判别准则

2.2.1 拐点识别法

根据理论分析,图 5a 中 B 点对应张拉力值即为锚下有效预应力值。

图 5a 曲线 I 位置张拉力在达到极值后突现一个小的下降段,与理想情况下张拉力-延伸量曲线不符,其原因如下。

1) 钢绞线横线变位。

反拉测试中,由于锚垫板面和锚固面存在夹角 β ,锚固段和反拉段钢绞线亦存在夹角,两段张拉力相同时,锚固约束解除,夹片拉出,钢绞线发生横线变位(图 7),应力进行重分布。应力重分布后的张拉力损失为

$$F_x = \frac{l_1 + l_2 - l_z}{l_z} E_p A_x \quad (3)$$

式中: l_z 为应力重分布后的工作段长度; E_p 为预应力钢筋的弹性模量; A_x 为单束预应力钢筋截面积。

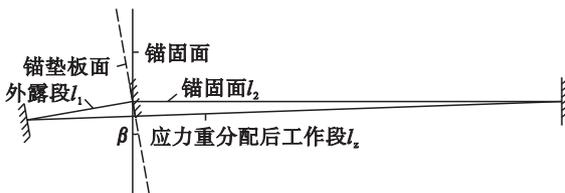


图 7 钢绞线横线变位

Fig. 7 Transverse deflection of steel strand

2) 工作锚夹片被拉出时,锚固段和反拉段共同伸长,延伸量突变导致千斤顶油缸内腔突然增大,油压泵供油不足引起张拉力突降。

3) 锚具和夹片之间的摩擦力 f_a 。

预应力钢绞线夹片式锚具工作时通过夹片和锚具之间挤压作用和摩擦力实现对钢绞线的夹持。锚固时摩擦力 f_a 与锚下预应力反向,“反拉”作用时,摩擦力 f_b 与锚下预应力同向($f_a \neq f_b$),在外部张拉荷载达到张拉力-延伸量关系曲线峰值时,摩擦力 f_b 突然消失,导致了曲线的突降。

上述三种情况均有可能导致张拉力-延伸量关系曲线在峰值点突降,但钢绞线横向变位造成的预应力损失较小,智能张拉设备均具备较好的保压功能,故锚具和夹片之间的摩擦力消失更易引起“拐点”处张拉力突降。

2.2.2 未出现“拐点”的判别

图 5b 曲线 II 位置并未出现斜率变化的“拐点”,且高拉力状态下的夹片滑移导致张拉力-延伸量曲线出现多个折线点,但其斜率在折线点后恢复,故外部张拉力仍仅作用于反拉段钢绞线,系统不会识别折线点为“拐点”,锚下有效预应力更高。

3~6 号钢绞线张拉力-延伸量关系曲线如图 8 所示。3 号和 5 号钢绞线出现明显的“拐点”,可据此直接判断张拉力大小;4 号和 6 号钢绞线则需继续加载使其张拉力-延伸量拐点出现,但若此时张拉力已超过锚下张拉力评定标准,为保证安全,应停止加载并得出锚下有效预应力超标的结论。

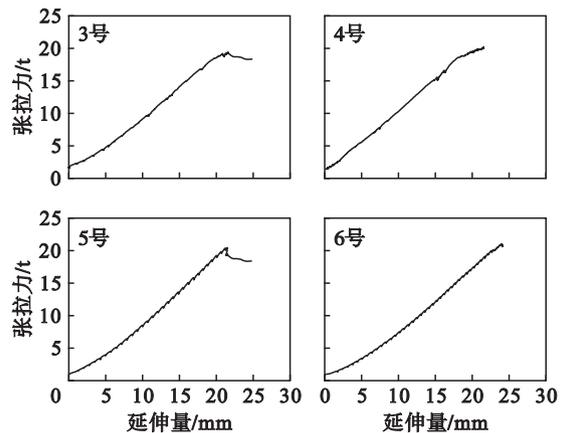


图 8 钢绞线张拉力-延伸量关系

Fig. 8 Relationship between tension and elongation of steel strand

为验证检测结果的准确性,张拉前在一侧锚固位置安装测力计测量钢绞线工作张拉力大小,实际工作张拉力与测试张拉力对比如表 2 所示;对比结果表明实际工作张拉力与测试张拉力最大误差不超过 3%，“拐点识别法”满足测试精度要求。

表2 工作张拉力和测试张拉力对比

Table 2 Comparison of working tension and testing tension

钢绞线 编号	工作张拉力	测试张拉力	相对偏差
	t	t	%
1	18.50	18.21	-1.57
3	19.01	19.44	2.26
5	20.05	20.40	1.75

3 锚下有效预应力测试评定标准

预应力钢筋与锚圈口之间的摩擦, 锚具变形、钢筋回缩和接缝压缩等引起的预应力损失是影响锚下有效应力的主要因素^[10], 评定标准主要考虑上述因素引起的预应力损失, 各部分预应力损失通过试验确定。

锚下控制张拉力为

$$F = \alpha f_{pk} A_x \quad (4)$$

式中: α 为控制应力系数, $\alpha \leq 0.75$; f_{pk} 为预应力钢绞线抗拉强度标准值。则考虑预应力损失 ΔF 的锚下有效预应力评定标准为

$$(1 - \kappa)(F - \Delta F) \leq F_{cs} \leq (1 + \kappa)F \quad (5)$$

式中: F_{cs} 为测试预应力; κ 为测试预应力与评定控制值的相对允许误差, 取值 6%。

根据评定标准, 测试锚下有效预应力在图 9 所示阴影区域为达标, 过高或过低的锚下有效预应力值都不利于锚固结构的长期服役性能。

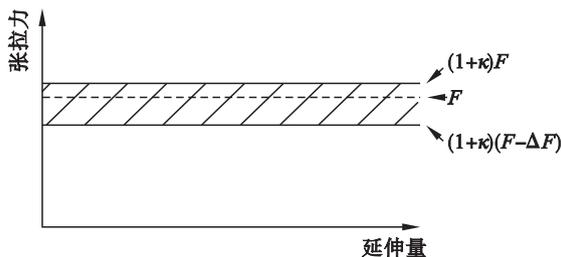


图9 评定标准示意图

Fig. 9 Schematic diagram of evaluation standard

4 结 语

1) 预应力钢绞线锚下有效预应力测试系统能够基于等效刚度理论对锚下预应力进行有效量测。

2) 实测张拉力 - 延伸量关系曲线呈现典型三段线特征, 包括消除非弹性变形阶段、反拉段弹性变形阶段及反拉段和锚固段协同受力阶段。

3) 根据张拉力 - 延伸量曲线出现“拐点”和

未出现“拐点”两种情况分别提出判别准则, “拐点识别法”可用于锚下有效预应力测试, 实际工作应力与测试应力误差不超过 3%。

4) 锚下有效预应力测试评定标准需考虑预应力损失。

5) 检测技术可应用于岩土工程、桥梁工程等预应力锚固结构锚下有效应力的测试。

参考文献:

- [1] 付丹. 预应力锚索工作应力的检测方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
(Fu Dan. Working stress tests of prestressed tendons in ground anchorage[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.)
- [2] Chen R H L, Wissawapaisal K. An ultrasonic method for measuring tensile forces in a seven-wire prestressing strand [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2002, 615: 1295 - 1302.
- [3] Bartoli I, Salamone S, Phillips R, et al. Use of interwire ultrasonic leakage to quantify loss of prestress in multiwire tendons [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2011, 137 (5): 324 - 333.
- [4] Chen C C, Wu W H, Leu M R, et al. Tension determination of stay cable or external tendon with complicated constraints using multiple vibration measurements [J]. *Measurement*, 2016, 86: 182 - 195.
- [5] Abdullah A B M, Rice J A, Hamilton H R, et al. Experimental and numerical evaluation of unbonded posttensioning tendons subjected to wire breaks [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21 (10): 04016066.
- [6] Vimalanandam V, Babu S S, Sreenath H G, et al. Estimation of residual prestress in uninstrumented prestressed concrete structure using SSRHT in wires [J]. *Indian Concrete Journal*, 2000, 74 (11): 631 - 636.
- [7] Xuan F Z, Tang H, Tu S T. In situ monitoring on prestress losses in the reinforced structure with fiber-optic sensors [J]. *Measurement*, 2009, 42 (1): 107 - 111.
- [8] Perry M, Yan Z, Sun Z, et al. High stress monitoring of prestressing tendons in nuclear concrete vessels using fibre-optic sensors [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 268 (3): 35 - 40.
- [9] 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 (11): 2247 - 2252.
(Fu Dan, Guo Hong-xian, Cheng Xiao-hui, et al. Working stress measurement of prestressed anchor cables: detection mechanism and experimental study of lift-off test [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 8 (11): 2247 - 2252.)
- [10] 中华人民共和国交通部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
(Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG D62—2004 [S]. Beijing: China Communication Press, 2004.)