

文章编号:1671-8879(2012)02-0070-04

# 基于横张增量法的 PC 梁桥现存应力测试与评估

李世安<sup>1</sup>, 贺拴海<sup>1</sup>, 娄 诚<sup>2</sup>, 宋一凡<sup>1</sup>, 张 岗<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 辽宁省高速公路管理局, 辽宁 沈阳 110167)

**摘 要:**针对目前预应力混凝土桥梁由于多方面因素造成的预应力损失,基于静力平衡原理,通过横张增量法对实桥进行预张力测试,采用线性条件下二级间增量方式消除误差,得出实测桥梁的目标钢束现存应力,并与规范中理论设计值进行对比分析,确定在役桥梁预应力储备状况。研究结果表明:实测箱梁跨中 8 根正弯矩束中,有 3 根钢束有效预应力实测值小于设计值 13.36%~23.7%,墩顶 4 根负弯矩束实测值较设计值大 16.86%~24.59%,由此说明,PC 箱梁预应力损失较严重,主梁刚度有所下降。

**关键词:**桥梁工程;PC 梁桥;有效预应力测试;横张增量法;张力测试仪

**中图分类号:**U446.3 **文献标志码:**A

## Detection and assessment on existing stress of PC girder bridge based on horizontal tension-increment method

LI Shi-an<sup>1</sup>, HE Shuan-hai<sup>1</sup>, LOU Cheng<sup>2</sup>, SONG Yi-fan<sup>1</sup>, ZHANG Gang<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Liaoning Province Administration of Freeway, Shenyang 110167, Liaoning, China)

**Abstract:** Aimed at the prestress loss on present prestressed concrete bridges, based on the principle of static equilibrium, a real bridge pre-tension was detected by horizontal tension-increment method, the intersecondary incremental way on linear condition was used to eliminate the errors. The existing stress value of target steel beam of service bridge was worked out and compared with the standard theoretical value. The results show that the effective prestress values of 3 beams among 8 positive moment beams in the measured box girder are less than the theoretical values from 13.36% to 23.7%, the measured values of 4 negative moment beams at pier top are bigger than the theoretical values from 16.86% to 24.59%, that indicates the prestress loss of PC girder bridge is more serious, the girder stiffness is declined. 6 tabs, 2 figs, 9 refs.

**Key words:** bridge engineering; PC girder bridge; effective prestress test; horizontal tension-increment method; stretching force tester

## 0 引 言

PC 梁桥中的预应力钢束是关键受力构件,其应

力状态决定着结构的整体性能,预应力损失是影响预应力混凝土桥梁安全的最主要因素之一,了解已有预应力构件的现存应力大小是评价预应力构件工

收稿日期:2011-05-10

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2011 318 812 970);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZY003, CHD2012JC001, CHD2011TD010)

作者简介:李世安(1983-),男,陕西咸阳人,工学博士研究生, E-mail:lishian2005@yahoo.com.cn.

作性能的关键,有效预应力的测试及预测显得尤为重要<sup>[1-2]</sup>。由此各种预应力检测技术应运而生,国内外普遍采用的有效预应力检测方法主要分为两类:无损检测和局部破损检测<sup>[3]</sup>。无损检测法主要有:声发射技术、电磁效应检测法、超声波检测法、动力检测法以及锚端预应力测试技术;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。郭琦等分别对动力法检测有效预应力以及应力释放法检测预应力进行了较为深入的研究及应用<sup>[4-7]</sup>。受索支撑结构、体外预应力体系桥梁的索力测试技术的启发,本文基于静力平衡原理,通过横向张拉钢束建立钢束纵向张力的计算方法,用于单根钢束初始应力的检测,准确掌握了受力构件的目标钢束应力状态;通过钢束有效预应力实测值与设计值的对比分析,判断当前钢束预应力损失情况及结构安全性,以便快捷、有效地检测评估 PC 梁桥的有效预应力。

## 1 横张增量法

### 1.1 静力平衡原理

钢束有效预应力检测工作原理是基于钢束的横向位移、钢束的预拉力、横向作用力和目标钢束测试长度 4 者之间的函数关系,其力学原理如图 1 所示。

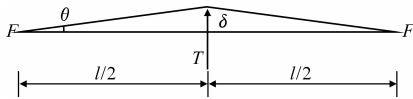


图 1 平衡原理

目标钢束受到横向作用力  $T$  的作用,当系统保持平衡时,横向作用为  $T$  为

$$T = 2F\sin(\theta) \tag{1}$$

因为在实际横向张拉过程中横向变位  $\delta$  甚小,则  $\theta$  角可以表示为

$$\sin(\theta) = \tan(\theta) = 2\delta/l \tag{2}$$

把式(2)代入式(1)得

$$F = \frac{Tl}{4\delta} \tag{3}$$

式中: $T$ 为横向作用力; $F$ 为预应力钢筋(钢绞线)有效张拉力; $\delta$ 为横向位移; $l$ 为目标钢束的有效工作长度; $\theta$ 为钢绞线横向位移后与初始位置的夹角。

### 1.2 增量分析

在测试理论公式的建立过程中,通过在同级张力水平下,将同一测点获取的多级横向位移及横向张力数据,采用线性条件下二级间增量处理,由级差法分析消除测试误差的影响。对于同一根钢绞线抓

拔试验,已知发生横向位移  $\delta_i$  时,对应的横向作用力为  $T_i$ ,则二级之差  $\Delta T$  可表示为

$$\Delta T = T_{i+1} - T_i = \frac{4F}{l}(\delta_{i+1} - \delta_i) = \frac{4F}{l}\Delta\delta \tag{4}$$

$$T_i = \frac{4F}{l}\delta_i \tag{5}$$

从而得到有效张拉力实用计算式为

$$F = \frac{l\Delta T}{4\Delta\delta} \tag{6}$$

经过反复试验、多级差值实测得出  $\Delta\delta = \delta_{i+1} - \delta_i$  及其相应的  $\Delta T$  后,可求得钢束平均有效张拉力  $F'$ ,由式(7) 计算出各测点处钢束应力值。

$$\sigma_{pc} = \frac{F'}{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i/A \tag{7}$$

式中: $\sigma_{pc}$ 为测点处钢束有效预应力(MPa); $F_i$ 为测点处钢束有效张拉力(kN); $F'$ 为钢束平均有效张拉力计算值(kN); $A$ 为单根测试钢束公称面积, $A = 139 \text{ mm}^2$ ;  $n$ 为独立重复试验的次数。

## 2 测试与分析方法

### 2.1 测试关键工序

桥梁在预应力测试过程中的关键工序为:① 检测槽口定位,首先根据实际情况量测检测槽口的位置及尺寸参数;② 测试前准备工作,在检测槽口定位后,进行测试前的准备工作,主要包括切割槽口处普通钢筋、剥离波纹管,使钢绞线裸露、支撑起目标测试钢束,并稳固夹持;③ 预应力钢束测试,采用横张位移增量法检测技术,使用预应力钢束张力测试仪,对关键钢束的有效预应力进行测试。

### 2.2 数据分析方法

根据规范要求,将钢束满张拉控制力扣除理论计算的相关 5 项损失后的有效预应力,定义为设计值<sup>[8-9]</sup>。将目标钢束测点处的钢束应力值定义为实测值,基于钢束有效预应力实测值与设计值相关关系对比,建立起有效预应力衰变的评估模型,并依此得到实用算法,以实现快速评估。预应力筋有效预应力元素评价指标、评估等级及评估值区间见表 1。表 1 中  $\sigma_M$ 、 $\sigma_N$  分别为预应力混凝土结构中有效预应力的设计值和实测值。

表 1 预应力筋有效预应力等级评估标准

评估元素	评价指标 (衰减度)	评估等级及评估值区间				
		I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
有效预应力	$ \sigma_M - \sigma_N $	(0,	[0.05,	[0.1,	[0.05,	$\geq 0.2$
	$\sigma_M$	0.05)	0.1)	0.15)	0.1)	

3 工程实例

3.1 工程概况

某桥梁全长 480 m。该桥纵向桥跨布置为:6×25 m+7×25 m+6×25 m,横向布置为:2×(0.75 m+11 m+0.75 m)。桥梁设计荷载:汽-超20,挂-120。上部结构为 3 联共 19 跨先简支后连续组合箱梁,每跨共计 2×4 片预应力箱梁。预应力钢束采用高强度低松弛预应力钢绞线,抗拉强度标准值  $f_{pk}=1\ 860\ \text{MPa}$ ,单根钢绞线直径为 15.2 mm,公称面积  $A=139\ \text{mm}^2$ ,弹性模量  $E_p=1.95\times 10^5\ \text{MPa}$ ,主要设计参数见表 2。

表 2 预应力钢绞线主要参数

抗拉强度标准值/MPa	锚下张拉控制应力/MPa	管道偏差系数	管道摩擦因数	锚具回缩量/mm
1 860	1 395	0.001 5	0.25	6

3.2 试验方案及测点布置

本文依据大桥的构造特点及预制箱梁的工作状况,选择损伤及病害严重的桥跨共 8 片箱梁作为检测对象。其中 YYL-1~YYL-6 测点为第 3 与第 4 跨 1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>梁跨中腹板正弯矩束,6 个测点共 8 根钢束,每个测点钢绞线均为 5Φ<sup>7</sup>15.2。YYL-7~YYL-8 测点为第 3 与第 4 跨 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>墩顶负弯矩束,2 个测点共 4 根钢束,每个测点钢绞线均为 4Φ<sup>7</sup>15.2。各测点位置处的梁体表面采用砂轮机沿纵桥向开槽,槽口尺寸长 100 cm,宽 20 cm,深度以目标钢束波纹管裸露为宜,以方便抓拔器锁定钢束。钢束测点横断面分布如图 2 所示。其中,N1、N2 为腹板束,N3 为底板束,T3 为顶板束。

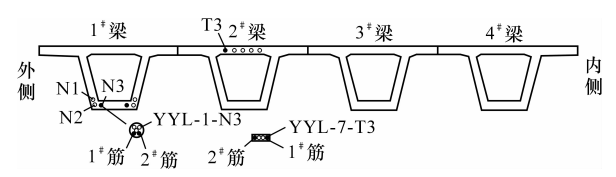


图 2 钢束测点横断面分布

4 有效预应力评估

4.1 理论衰减模拟值

本桥混凝土箱梁由于受施工因素、材料性能和环境条件等的影响,钢筋中的拉应力随着张拉、锚固过程和时间推移而降低。设计中所需的钢筋预应力值,应是扣除相应阶段的应力损失后,钢筋中实际存余的预应力。对于在建和在役预应力混凝土预制箱

梁,绝大部分施工方法是后张法,因此在其正常使用状态中,应考虑 5 项损失<sup>[8]</sup>。

桥梁结构功能与材质状况的退化与其所处的环境是密切相关的,在评价桥梁的病害及现状对预应力损失的影响时,必须考虑其所处环境的不同。根据环境作用对桥梁结构或构件的侵蚀程度以及对相关病害的加速作用的不同,应对桥梁结构截面予以折减<sup>[9]</sup>。

根据各检测指标的评定标度,按下式计算确定结构或构件的截面损伤综合评定值  $R$ 。

$$R = \sum_{j=1}^N R_j \alpha_j \tag{8}$$

式中: $R_j$  为结构材料风化及物理化学损伤评定标度值; $\alpha_j$  为某项检测指标权重值,  $\sum_{j=1}^N \alpha_j = 1$ ,对砖、石结构, $N=2$ ,对混凝土及配筋混凝土结构, $N=3$ 。

然后,依据截面损伤的综合评定值,按表 3 取截面折减系数  $\xi_c$ 。

表 3 混凝土结构与配筋混凝土结构的截面折减系数值

截面损伤综合评定值 $R$	截面折减系数 $\xi_c$
$1 \leq R < 2$	0.98 ~ 1.00
$2 \leq R < 3$	0.93 ~ 0.98
$3 \leq R < 4$	0.85 ~ 0.93
$4 \leq R < 5$	< 0.85

结合本桥外观检测结果及损伤状况,各个测试箱梁根据式(8)进行截面刚度折减后,对修正模型计算,可得到目标钢束的理论衰减模拟值  $\sigma_p$ ,结果见表 4。

表 4 预张力理论衰减模拟值

测点序号	模拟值 $\sigma_p/\text{kN}$	测点序号	模拟值 $\sigma_p/\text{kN}$
YYL-1-N3	139.48	YYL-5-N3	174.35
YYL-2-N2	175.19	YYL-6-N3	139.48
YYL-3-N2	175.19	YYL-7-T3	168.72
YYL-4-N3	174.35	YYL-8-T3	173.26

4.2 钢束张力测试值

采用张力仪在各测点对目标钢束均进行 3 次独立测量,分 6 级加载,每次试验完毕卸载后,将仪器重新调 0,实测数据进行二级间差值增量分析,其分析结果见下页表 5。

表 5 为 YYL-1-N3 测点 1<sup>#</sup> 钢束实测数据二级间增量处理结果。由表 5 计算结果可知,YYL-1-N3 测点 1<sup>#</sup> 钢束张力平均值为 123.35 kN,理论衰减模拟值为 139.48 kN,二者相对偏差为-3%~21%,

表 5 YYL-1-N3 测点 1# 钢束张力值结果对比

测量 序号	梁跨 L/mm	横向力 差/kN	位移差/ mm	预应力测试 值/kN	平均值/ kN	理论衰减 值/kN
第 1 次	800	1.94	3	101.28	110.44	139.48
		2.26	3	120.20		
		2.78	4	109.85		
第 2 次	800	2.08	3	109.56	116.55	139.48
		2.31	3	123.15		
		2.94	4	116.95		
第 3 次	800	2.42	3	129.65	143.05	139.48
		2.88	3	156.84		
		3.52	4	142.66		

平均值偏差为 11.56%。限于篇幅,其他各测点实测值、理论衰减模拟值在表 6 中给出。

表 6 关键服役钢束有效应力对比

测点 序号	测试钢 束编号	实测 值 $\sigma_N$ / MPa	模拟 值 $\sigma_p$ / MPa	设计 值 $\sigma_M$ / MPa	比值 1 $\frac{\sigma_N}{\sigma_p}$	比值 2 $\frac{\sigma_N}{\sigma_M}$	比值 3 $\frac{\sigma_N}{0.65f_{pk}}$
YYL-1-N3	1#	887.41	1 003.45	1 163.02	0.88	0.76	0.73
	2#	923.74	1 003.45	1 163.02	0.92	0.79	0.76
YYL-2-N2	3#	1 278.35	1 260.36	1 169.06	1.01	1.09	1.06
YYL-3-N2	4#	1 293.60	1 260.36	1 169.06	1.03	1.11	1.07
YYL-4-N3	5#	1 287.55	1 254.32	1 163.02	1.03	1.11	1.06
	6#	1 191.96	1 254.32	1 163.02	0.95	1.02	0.99
YYL-5-N3	7#	1 193.58	1 254.32	1 163.02	0.95	1.03	0.99
YYL-6-N3	8#	1 007.70	1 003.45	1 163.02	1.00	0.87	0.83
YYL-7-T3	9#	1 351.51	1 246.47	1 138.85	1.08	1.19	1.12
	10#	1 330.86	1 246.47	1 138.85	1.07	1.17	1.10
YYL-8-T3	11#	1 382.81	1 246.47	1 138.85	1.11	1.21	1.14
	12#	1 418.92	1 246.47	1 138.85	1.14	1.25	1.17

4.3 钢束应力对比分析

按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)中参数取值,由桥梁结构数值模型分析得到各测点目标钢束预张力理论设计值,由横张位移增量法检测得出预张力实测值,得到关键服役钢束当前阶段的有效应力衰减程度对比分析,结果见表 6。

由表 6 中比值 1 的数据可知,钢束应力实测值  $\sigma_N$  与理论衰减模拟值  $\sigma_p$  的比值为 0.88~1.14,可知其误差范围在±14%以内,理论衰减模拟值得到了实测值的印证,二者可以准确地相互比拟。对于 PC 梁桥钢束现存应力状态,可采用横长增量法和理论衰减模拟进行评估。

由表 6 中比值 2 可知,在检测的第 3 跨与第 4 跨正弯矩束当中,5 根钢束有效预应力实测值较设

计值变化不大,2#~4# 主梁预应力损失较小,有效预应力衰减度在 11%以内,结构受力较为安全。测试钢束中 1#、2#、8# 束预应力损失较多,有效预应力衰减度为 13%~24%。这 3 根钢束分别位于第 3、第 4 跨的 1# 梁跨中。在检测的负弯矩束当中,4 根钢束有效预应力实测值较设计值大 17%~25%,测点位于第 3、第 4 跨对应 1# 梁的墩顶位置处。由 1# 梁正负弯矩处预应力实测值可看出,由于正弯矩区预应力储备不足及梁体开裂,致使主梁刚度下降;在恒载作用下,导致墩顶负弯矩增大,负弯矩束应力随之增大。随着运营时间的增长,主梁混凝土上缘压应力逐渐增大,下缘压应力逐渐减小,速度是先快后慢;钢束有效预应力逐渐减小,速度也是先快后慢。1# 梁墩顶负弯矩束应力实测值均大于理论计算值,与桥梁实际受力状态吻合。

5 结 语

(1)对于 PC 梁桥钢束现存应力状态可采用横张增量法和理论衰减模拟法进行评估,其准确性满足工程要求。

(2)在 PC 梁桥钢束张力测试过程中,正弯矩束中 1#、2#、8# 钢束应力实测值与设计值比值小于 1,说明预应力钢束张力不足,应力损失明显,应对预应力钢束进行补张或设置体外预应力束进行补强;3#~7# 钢束应力实测值与设计值比值接近于 1,说明预应力钢束张力值合适,结构受力安全。负弯矩束中 9#~12# 钢束应力实测值大于设计值,且实测值大于  $0.65f_{pk}$ ,不符合规范中预应力钢束最大拉应力限制,预应力钢束应力状态不安全,应降低截面预应力钢束应力或增大截面预应力钢束面积,通过设置体外束以提高受损主梁受力性能。

(3)基于横张增量法的有效预应力测试及结构性能评估,可真实反映简支连续预应力梁桥的健康状况,对桥梁现存应力储备状态能准确掌握,为养护管理部门提供了重要的技术支持,对桥梁的预应力检测评定及加固处置提供依据;作为一种有效快捷的检测方法,可在桥梁预应力检测中推广应用。

参考文献:

References:

[1] 张元海,刘世忠.后张法预应力混凝土梁钢束预应力损失研究[J].中国公路学报,2002,15(2):76-78.

- (5):43-47.
  - GENG Gang-qiang, LIN Jie, LIU Lai-jun, et al. Life prediction system for protective coating of steel bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(5): 43-47.
  - [3] 侯福金, 罗德龙, 董彩常, 等. 环境腐蚀作用下滨海大桥钢结构的可靠性评估方法研究[J]. 公路, 2009(9): 191-193.
  - HOU Fu-jin, LUO De-long, DONG Cai-chang, et al. Research on structural reliability assessment of bay steel bridge considering environmental corrosion[J]. Highway, 2009(9): 191-193.
  - [4] 裴建中. 桥面防水系统设计方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 26-29.
  - PEI Jian-zhong. Design method of waterproofing system for concrete bridge decks[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(3): 26-29.
  - [5] Kim H B, Lee K H. An innovative rehabilitation approach for the bridge deck pavement[C]//ASCE. The 2009 Geohunan Internatisonal Conference, Portland Cement Concrete Pavement and Bridge Deck Pavement. Reston: American Society of Civil Engineers, 2009: 60-65.
  - 陈仕周, 倪小军. 桥面铺装与路面温度差异研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2): 56-60.
  - CHEN Shi-zhou, NI Xiao-jun. Study of temperature difference between bridge deck pavement and road pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2): 56-60.
  - [7] 孙跃, 胡津. 金属腐蚀与控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
  - [8] 杜荣归, 刘玉, 林昌健. 氯离子对钢筋腐蚀机理的影响及其研究进展[J]. 材料保护, 2006, 39(6): 45-50.
  - DU Rong-gui, LIU Yu, LIN Chang-jian. Effect of chlorine ions on the corrosion behavior of reinforcing steel in concrete[J]. Material Protection, 2006, 39(6): 45-50.
  - [9] 王民, 伍朝晖, 张峰, 等. Eliminator 防水体系在钢桥面铺装中的应用[J]. 中国建筑防水, 2008(11): 31-33.
  - WANG Min, WU Zhao-hui, ZHANG Feng, et al. Application of Eliminator waterproof system in steel bridge deck pavement[J]. China Building Waterproofing, 2008(11): 31-33.
  - [10] ZTV-BEL-ST, TL-BEL-ST, TP-BEL-ST-2001, 德国钢桥面铺装施工规范[S].
  - (6): 37-40.
  - LIU Ling-jia, HE Shuan-hai, ZHAO Xiao-xing. Effective prestress forecast of PC beam based on dynamic performance[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(6): 37-40.
  - [6] 郑丹, 郭启华. 无粘结预应力粗钢筋在斜拉梁桥中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(1): 70-72.
  - ZHENG Dan, GUO Qi-hua. Application of unbound prestressed crude steel in cable-stayed bridges[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(1): 70-72.
  - [7] 王标才. 基于应力释放法的预应力空心板桥现存应力检测的模型试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
  - [8] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
  - [9] JTG/T J21—2011, 公路桥梁承载能力检测评定规程[S].