

箱体梁垂向预应力损耗现场测量分析

王会文

(三亚市道路运输管理处, 海南 三亚 572000)

摘 要: 计算了混凝土收缩徐变损耗、混凝土弹塑性压缩损耗、钢束松弛损耗、垂向预应力筋的摩擦损耗以及锚固损耗值,完成了箱体梁垂向预应力筋损耗的现场测量分析。计算和检测成果比较显示,计算方法对箱体梁垂向预应力筋的损耗计算有效、适用和安全,对同类工程计算应用有技术参考价值。

关键词: 路桥施工;箱体梁;垂向预应力损耗;现场测量;分析探究

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)03-0081-04

0 引言

目前针对纵向预应力损耗的研究较多,而针对竖向预应力损耗的研究却相对较少。实际上,竖向预应力钢筋的失效风险更大,所以提高对竖向预应力损耗研究的重视程度十分必要^[1-2]。本文以某盐津河二桥主桥箱梁为研究对象,针对案例桥竖向预应力损耗开展研究。案例桥梁垂向预应力筋选用直径 32 mm 的 40Si2MnMnV 精轧螺纹粗钢筋,其抗拉强度标准值为 930 MPa,设计弹塑性模量 E 为 2.0×10^5 MPa;选用梁顶一端拉张方式,对应锚具型号为 YGM32;垂向预应力管道选用 SBG 塑料制波纹圆管;垂向预应力钢筋的放置间隔为 0.5 m,梁顶单端拉张。

1 试验配置与测试方法

1.1 试验配置

试验对象为与主墩中心线距离 18.80 m 断面中的垂向预应力钢筋 N23、N23'、N23"。箱体梁中间腹板侧 N23' 长度 12 493 m；下游侧腹板位置 N23" 长度 12 450 m；上游侧腹板位置 N23 长度 12 535 m。箱体梁腹板垂向预应力筋配置见图 1。

依据所选钢筋拉张控制应力 837 MPa, 对应千斤顶拉张控制力为 637 kN, 所以采用量程为 800 kN 的穿心式压力感受器。其内径为 38 mm, 外径为 92 mm, 高度为 80 mm, 详细规格见图 2。

将穿心式压力感受器装配在垂向预应力筋锚固端,见图3;现场感受器装配和垂向预应力测试见图4。

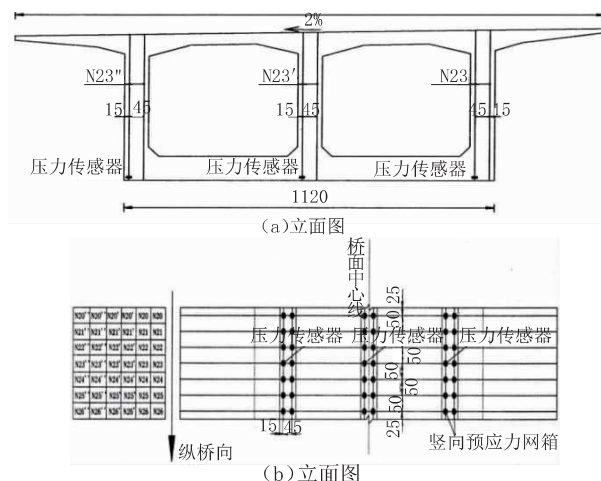


图 1 箱体梁腹板垂向预应力筋配置图(单位:cm)

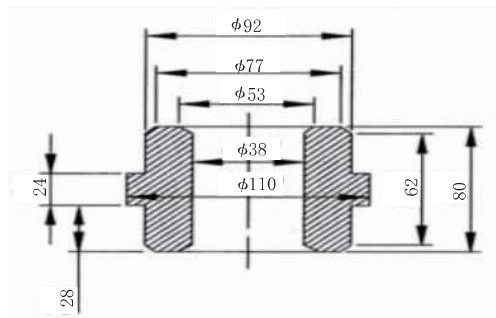


图 2 垂向预应力筋压力感受器示意图(单位:mm)

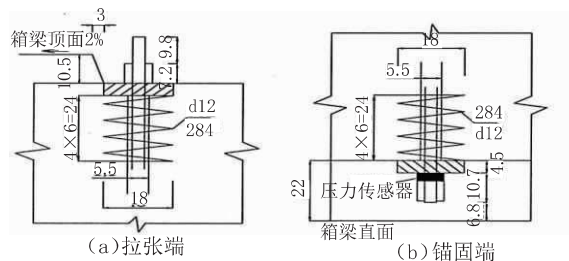


图 3 垂向预应力筋锚固端及拉张端大样图(单位:cm)

1.2 测试方法

在实际施工中,拉张目标梁段全部垂向预应力筋

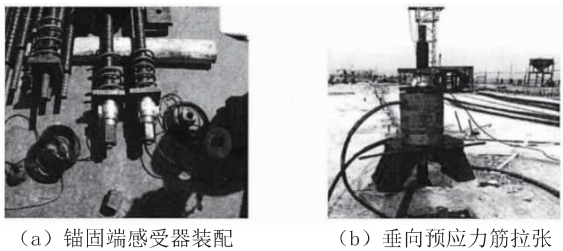


图4 感受器现场图

需4 h,拉张完毕后进行注灌浆。在垂向预应力筋拉张和注灌浆后,在第4、6、8、11、14、19个月时分别开展测试,具体方法如下:

- (1)拉张垂向预应力筋至拉张控制应力,并记录压力感受器示数、钢筋伸长量、光纤感受器示数和拉张端实际拉张应力。
- (2)待预应力放松后,完成数据记录。
- (3)注灌浆后开展连续检测。半个月里需每天测试2次,随时间推移,测试间隔可逐渐增大。

2 试验结果

2.1 拉张锚固时垂向有效预应力对应测试结果

拉张垂向预应力筋时和锚固后对应有效预应力测试结果见表1。

表1 拉张垂向预应力筋与锚固后对应

有效预应力测试结果						
单位:MPa						
N23(拉张时)	N23(锚固后)	N24(拉张后)	N25(拉张后)	N26(拉张后)	N27(拉张后)	N28(拉张后)
828.3	798.4	795.3	794.1	792.5	792.4	792.2
N23'(拉张时)	N23'(锚固后)	N24'(拉张后)	N25'(拉张后)	N26'(拉张后)	N27'(拉张后)	N28'(拉张后)
830.8	790.9	787.8	786.1	784.1	783.9	783.8
N23"(拉张时)	N23"(锚固后)	N24"(拉张后)	N25"(拉张后)	N26"(拉张后)	N27"(拉张后)	N28"(拉张后)
834.3	789.1	787.3	785.3	785.3	785.1	785.0

由表1可知,针对垂向预应力筋N23、N23'、N23",拉张锚固时各项损耗总和依次是29.9 MPa、39.9 MPa、45.2 MPa,分别占起始拉张应力的3.6%、4.8%和5.4%;垂向预应力筋锚固损耗值比弹塑性压缩损耗值更大。

2.2 传力锚固后垂向预应力损耗测试结果

拉张垂向预应力筋传力锚固对应有效预应力测试结果见表2。

由表2可知:传力锚固后205 d的总损耗依次是42.8 MPa、30.9 MPa、30.5 MPa,依次占起始拉张应力的5.2%、3.7%、3.7%。锚固后180 d内,垂向预应力损耗基本实现,各钢绞线有效预应力几乎维持恒定。

表2 拉张垂向预应力筋传力锚固对应有效

计算时刻/d	预应力测试结果			单位:MPa		
	实测值/初始拉张应力/%			有效预应力实测值/MPa		
	N23	N23'	N23"	N23	N23'	N23"
7	93.4	92.1	92.4	773.7	765.3	771.2
30	91.6	91.2	91.2	759.0	758.0	760.5
60	90.9	91.2	91.0	753.2	757.3	759.5
87	90.8	90.9	90.7	752.0	755.1	756.7
130	90.7	90.8	90.6	750.9	754.3	755.9
150	90.6	90.7	90.5	750.5	753.6	755.2
180	90.5	90.7	90.5	749.8	753.2	754.9
205	90.5	90.6	90.4	749.4	752.9	754.5

3 讨论与分析

3.1 第1批预应力损耗

第1批预应力损耗亦是瞬时损耗,定义为施加预应力后在较短时间内已经基本实现的损耗,其组成总体包括钢筋回缩、锚具形变、摩擦损耗及混凝土弹塑性压缩损耗和对接缝压缩损耗。

3.1.1 摩擦损耗

由于存在摩擦损耗,致使选用单端拉张方式开展拉张的垂向预应力筋对应有效预应力从拉张端向锚固端逐渐递减,将感受器装配至拉张端会致使摩擦损耗无法测得。所以,现场测试垂向预应力时,均在锚固端装配感受器^[3]。此时,能够依据拉张端及锚固端预应力测试值直接计算出摩擦损耗,而其理论值可参考《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)(以下简称《桥规》)的相应计算方法求得3根测试用垂向预应力筋的摩擦损耗,计算值及实际测量值见表3。

表3 垂向预应力筋摩擦损耗计算值及

编号	锚固端预应力	拉张端预应力	实际测量值		单位:MPa	
			摩擦损耗实测值	摩擦损耗计算值	损耗率/%	偏差
N23	828.3	833.4	5.1	5.2	0.61	-0.1
N23'	830.8	836.1	5.3	5.2	0.64	0.1
N23"	834.3	839.4	5.1	5.2	0.61	-0.1

由表3可知:因为垂向预应力筋相对较短,其摩擦损耗所占总损耗比例(0.62%)比纵向预应力筋摩擦损耗所占总损耗比例(5.7%)小很多;垂向预应力筋的摩擦损耗计算值与实际测量值比较符合。

3.1.2 对接缝压缩、钢筋回缩及锚具形变损耗

针对后张法混凝土构件,垂向预应力筋放张时

会产生接缝压缩、钢筋回缩及锚具形变损耗,可选用超拉张工艺降低此项损耗值。在现场测试垂向预应力时,由对接缝压缩、钢筋回缩及锚具形变引发的预应力损耗能够通过锚固端有效预应力开展实际测试。3根测试用垂向预应力筋的对接缝压缩、钢筋回缩及锚具形变损耗计算值及实际测量值见表4。

表4 垂向预应力筋锚具形变等损耗实际

测量值及计算值				单位:MPa
编号	锚固后 预应力	锚固前 预应力	计算损耗值	实测损耗值
N23	798.6	828.3	91.4	29.7
N23'	791.2	830.8	92.8	39.6
N23"	789.4	834.3	93.8	44.9

由表4可知:3根测试用垂向预应力筋的对接缝压缩、钢筋回缩、锚具形变损耗的实际测量值都小于计算值。表明施工现场的垂向预应力钢垫板相对平整,钢垫板与螺母间缝隙很小,而且锚固时选用的大扳手需为长手柄,所以螺母十分牢固,相当程度上消除了钢板与螺母间的缝隙,大大降低了锚固回缩损耗。

3.1.3 混凝土弹塑性压缩损耗

采用后张法施工的箱体梁垂向预应力筋,其数量通常较多并且互相间距离较近。当垂向预应力筋采取分批拉张并且多于1根时,垂向预应力是逐根加施于箱体梁腹板上,伴随拉张顺序的不同,垂向预应力筋混凝土弹塑性压缩量亦会不同,产生的混凝土弹塑性压缩损耗亦各不相同^[4]。因为拉张后续垂向预应力筋时会引发先前拉张的预应力,所以一般情况下首根拉张的垂向预应力筋混凝土弹塑性压缩损耗最大,而最后拉张的垂向预应力筋没有混凝土弹塑性压缩损耗。

考虑拉张顺序的混凝土弹塑性压缩损耗计算比较复杂,通常需凭借有限元分析软件开展模拟拉张分析。在实际施工中,混凝土弹塑性压缩损耗的实际测量值可依据现场测试获得,混凝土弹塑性压缩损耗的理论值 σ_{l4} 则依照如下公式计算:

$$\sigma_{l4}=\alpha_{EP}\sum\Delta\sigma_{pc}\tag{1}$$

式中: α_{EP} 为预应力筋弹塑性模量与混凝土弹塑性模量的比值^[5]; $\Delta\sigma_{pc}$ 为后张拉导致的钢筋重心位置法向混凝土应力,MPa。

3根测试用垂向预应力筋混凝土弹塑性压缩损耗计算值和实际测量值见表5。

由表5可知:垂向预应力筋混凝土弹塑性压缩

表5 垂向预应力筋混凝土弹塑性压缩损耗

计算值和实际测量值			单位:MPa
编号	计算值	实测值	偏差
N23	6.1	6.5	0.4
N23'	6.1	7.3	1.2
N23"	6.1	4.5	-1.5

损耗值较低,且小于对接缝压缩、钢筋回缩及锚具形变损耗;3根测试用垂向预应力筋混凝土弹塑性压缩损耗计算值与实际测量值偏差较小,说明混凝土弹塑性压缩损耗计算式在实际施工中切实可行。

3.2 第1批预应力损耗汇总

依据表1锚固和拉张后垂向有效预应力对应测试结果,可获得3根垂向预应力筋对应第1批预应力损耗组成情况,见表6。

表6 垂向预应力筋对应第1批损耗实测汇总值

编号	第1批 总损耗		弹塑性压缩 损耗 σ_{l4}		锚固损耗		摩擦损耗	
	损耗值	百分率/%	损耗值	百分率/%	损耗值	百分率/%	损耗值	百分率/%
N23	41.3	5.0	6.5	15.7	29.7	72.0	5.1	2.3
N23'	52.0	6.3	7.3	14.1	39.6	76.0	5.3	9.9
N23"	54.4	6.5	4.5	8.0	44.9	82.5	5.1	9.5

由表6可知:试验用的3根垂向预应力筋N23、N23'、N23"的第1批损耗值依次是41.3 MPa、52.0 MPa、54.4 MPa,依次占其起始拉张应力的5.0%、6.3%、6.5%;在垂向预应力筋第1批损耗中,因为对接缝压缩、钢筋回缩及锚具形变所引发的损耗所占比例最大(依次占第1批总损耗的72.0%、76.0%、82.5%)。所以为了降低垂向预应力第1批损耗,应重点减小垂向预应力的对接缝压缩、钢筋回缩和锚具形变损耗。

3.3 第2批预应力损耗汇总

第2批预应力损耗的定义是加施预应力时短时间内实现的损耗,总体包括混凝土收缩徐变损耗和预应力筋松弛损耗两部分。依据混凝土收缩徐变、垂向预应力筋松弛相关理论,计算其损耗相对复杂,所以在实际施工中依照相关规定计算方法得出此2项损耗。垂向预应力筋松弛损耗 σ_{l5} 计算依据式(2);混凝土收缩徐变损耗 $\sigma_{l6}(t)$ 计算依据式(3)。

$$\sigma_{l5}=\psi\zeta\left(0.52\frac{\sigma_{pe}}{f_{pk}}-0.26\right)\sigma_{pe}\tag{2}$$

σ_{l6}(t)= $\frac{0.9[E_{ps}\varepsilon_{cs}(t,t_0)+\alpha_{EP}\sigma_{pe}\phi(t,t_0)]}{1+15\rho\rho_{ps}}$ (3)

式中:ψ为拉张系数;ζ为预应力钢筋的松弛系数;σ_{pe}为传力锚固条件下的钢筋应力;σ_{pc}为由预应力导致的承拉区域各纵筋断面重心部位的法向混凝土压力;φ(t,t₀)为加载龄期t₀下,计算龄期t的徐变常数;ε_{cs}(t,t₀)为应力筋导力锚固龄期t₀下,计算龄期t的混凝土收缩应变;α_{EP}为预应力筋弹塑性模量与混凝土弹塑性模量的比值。

测试垂向预应力时,因为未在现场测试混凝土应变,所以只能得出其实际测量值。同时结合式(2)和式(3),计算得出混凝土收缩徐变损耗和预应力筋松弛损耗理论值,汇总结果见表7。

表7 垂向预应力筋第2批损耗实际测量

计算时刻/d	结果汇总值			单位:MPa		
	计算值			实测值		
	σ _{l4}	σ _{l5}	σ _{l6}	N23	N23'	N23''
7	0.40	19.20	19.50	18.50	18.50	13.80
30	5.50	29.30	30.00	33.20	25.80	24.50
60	7.20	33.70	40.80	39.00	26.50	25.50
87	8.30	33.70	42.00	40.20	28.70	28.30
130	9.40	33.70	43.10	41.30	29.50	29.10
150	9.90	33.70	43.50	41.70	30.20	29.80
180	10.50	33.70	44.20	42.40	30.60	30.10
205	11.00	33.70	41.00	42.80	30.90	30.50

根据表7能够得出:垂向预应力筋第2批损耗实测均值在第60d、130d、205d依次是30.3MPa、

33.3MPa和34.7MPa,与理论值相比,实际测量值均小于理论值;而且,垂向预应力筋对应有效预应力在150d后基本维持恒定。

4 结 语

针对案例桥箱体梁腹板垂向预应力筋,依据路桥设计规范中相关纵向预应力损耗计算规定,对混凝土收缩徐变损耗、混凝土弹塑性压缩损耗、钢束松弛损耗、垂向预应力筋的摩擦损耗以及锚固损耗进行了计算。根据计算结果发现:除去计算所获得的锚固损耗显著偏大,其他各项损耗的计算值都与实际测量值相符合。针对垂向预应力筋,锚固损耗所占比例最大,垂向预应力筋N23、N23'、N23''依次占总损耗的35.3%、47.5%和52.8%。实测锚固损耗偏小,一方面表明选用计算方法对垂向预应力筋的此项损耗开展计算相对安全,同时亦表明施工现场的垂向预应力筋拉张施工功效较佳。

参考文献:

[1] 许康曦. 预应力混凝土T梁桥预应力损失检测技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2016.
[2] 梁南平. 预应力混凝土连续弯梁桥的预应力损失试验研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2010.
[3] 祁义辉. 大跨径T形刚构桥长束预应力沿程损失及影响效应分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.
[4] 李明泽. 基于结构自振特性的预应力混凝土连续梁桥有效预应力识别研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2018.
[5] 赵静超. 折线先张及曲线后张预应力混凝土梁徐变性能研究[D]. 郑州:郑州大学,2010.

(上接第67页)

题;该塔型及锚固系统系统均已获得国家发明专利。



图8 陆港大桥

大桥于2019年12月底建成通车,运营良好。成桥荷载实验各项数据符合规范要求,成桥线形与设计数值吻合良好。该桥已经成为宝鸡市渭河上标志性建筑。大桥在设计过程中取得的创新成果,可为今后类似桥梁工程的建设提供借鉴与参考。

参考文献:

[1] 西安市政设计研究院有限公司. 宝鸡市陆港渭河大桥工程施工图[Z]. 西安:2017.
[2] 袁毅,易伦雄. 武汉古田桥—自锚式悬索桥设计及关键技术[J]. 桥梁建设,2019,49(2):82-83.