

# 砼箱梁桥腹板竖向预应力损失结构动力学分析与试验研究

周露<sup>1,2</sup>, 高磊<sup>3</sup>, 薛翠芳<sup>2</sup>

(1.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114; 2.湖南华置规划设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410076;  
3.山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 提出通过控制材料标准、减小施工定位误差、保证张拉质量、孔道密实压浆等措施减小精轧螺纹钢的预应力损失; 对隔离钢筋外露段进行结构动力学分析, 得到精轧螺纹钢外露段长度  $L$ 、一阶振型频率  $f$  与锚固段刚度增大系数  $k$  三参数模型, 钢筋外露段频率特性可反映张拉力大小, 室内箱梁模型试验可量化钢筋张拉力  $F$  与锚固段刚度增大系数  $k$  的对应关系; 大量现场检测数据证明该竖向预应力钢筋无损检测手段有效。

**关键词:** 桥梁; 砼箱梁桥; 腹板; 精轧螺纹钢; 预应力损失; 竖向预应力无损检测

中图分类号: U448.21

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)06-0122-03

精轧螺纹钢常作为桥梁结构的竖向预应力构件用于砼箱梁腹板中, 这种结构形式锚固、施工方便, 连接不受焊接约束, 对于箱梁腹板的开裂具有减缓作用。但大量调查结果表明, 箱梁桥腹板在施加竖向预应力后, 施工和运营期还是会出现不同程度的斜裂缝, 裂缝的存在使钢筋易锈蚀而形成体积膨胀, 削弱结构的强度和刚度, 对结构的耐久性和安全性造成不利影响。研究预应力损失的影响因素并采取措施保证结构的预加应力对于防止斜裂缝的发生与发展具有极为重要的工程实际意义。

## 1 竖向预应力损失的影响因素

实际工程调查发现, 通过控制材料标准、减小施工定位误差、保证张拉质量、孔道密实压浆等措施可减小竖向预应力损失。

### 1.1 控制材料标准

桥梁施工中不同批次材料的制作误差易导致钢筋和锚具不匹配, 影响两者的咬合而削弱受力。有的竖向预应力钢筋未达到设计规范标准而在张拉过程中出现拉断现象(见图 1)。因此, 竖向张拉材料如钢筋、锚具、垫板要严格按规范采购, 材料进场后要及时进行质量检测, 同时加强对施工现场材料的管理如修建防护棚防止预应力筋生锈等, 分批次采购的材料应对每批进行抽检。

### 1.2 保证张拉质量

为消除张拉时的预应力损失, 在施工前应将预



图 1 竖向预应力钢筋拉断失效

留槽中的砼碎屑清理干净, 保证垫板表面平滑, 以减小钢筋回缩和接缝压缩量的不利影响; 油表和油泵应经常进行标定校准, 确保张拉到目标预应力; 砼强度达到设计值后再进行竖向预应力筋张拉, 并保持张拉速度稳定, 给预应力筋足够的时间消除其他变形; 张拉到目标预应力值后稳压并用标准扭力扳手锚固螺母; 对张拉完的预应力钢筋及时做好标记, 防止出现漏拉情况。

### 1.3 减小施工定位误差

管道摩阻损失、瞬时锚固损失、弹性压缩损失及长期损失是竖向预应力损失的主要方面, 锚固后钢筋回缩导致的预应力损失占很大比重, 减小锚固后钢筋回缩是减小预应力损失的重要措施。现场施工中钢筋和锚垫板经常会存在定位误差(见图 2), 这种误差形成的垫板顶面和螺母底面的夹角将导致锚固后钢筋过量回缩。实际检测表明, 二次张拉法不能弥补由于施工定位误差造成的竖向预应力损失。

因此,施工时应注意管道平直、螺旋钢筋正确布置、锚垫板水平放置。

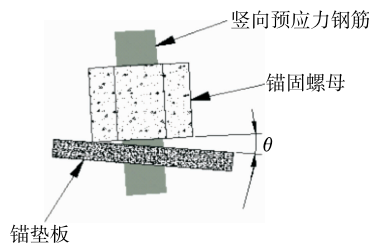


图 2 锚垫板安装误差

螺母反装亦可能导致钢筋回缩量过大(见图 3),下锚未装好形成的下锚部位局部应力过大会将附近砼压碎,严重时还会发生脱锚情况,威胁施工人员的安全。因此,施工现场应严格按照图纸配置钢筋,钢筋应预留一段外露长度保证张拉的实施。



图 3 锚具反装和钢筋外露长度过短

1.4 孔道密实压浆

文献[7]随机抽取一座桥 35 个竖向预应力钢筋孔道检测压浆密实度,结果表明无浆占 71.42%,不饱满占 11.42%,开孔流水占 40%。竖向预应力孔道压浆的不密实会削弱结构的整体受力性能、增大砼的收缩徐变,威胁桥梁的长期运营。压浆料应具有足够的强度等级和充分的流动性;压满浆后应持压一段时间以防水泥浆在重力作用下回流;压浆完成后及时封堵出浆口;压浆时间不应过长,以免影响水泥浆的流动性。

2 外露段频率特性

精轧螺纹钢筋的张拉力大小对应钢筋和螺母之间不同的咬合程度,咬合程度决定锚固段钢筋的抗弯刚度,不同抗弯刚度对应外露段钢筋的固有频率。将钢筋外露段看作变刚度的悬臂梁,取该段进行隔离分析。竖向预应力钢筋张拉力增大表现为外露段刚度增加,设刚度增大系数为  $k$ ,则外露段抗弯刚度为  $kEI$ 。随张拉力的增加, $k$  值增加,外露段一阶固有频率增大。根据文献[8],利用 ANSYS 软件进行

模态分析并建立精轧螺纹钢筋外露段长度  $L$ 、一阶振型频率  $f$  与锚固段  $k$  值的三参数模型。由模型分析得  $k$ 、 $L$ 、 $f$  在空间形成一张光滑的薄膜,有很好的规律性; $L$  相同时, $f$  随  $k$  值的增加呈非线性递增; $k$  值相同时, $f$  随  $L$  的增加呈非线性递减; $L$  较小( $<0.4$  m)时, $f$  随  $k$  值的变化较明显; $L$  较大( $>0.4$  m)时, $f$  与  $k$  值基本不变(见图 4)。

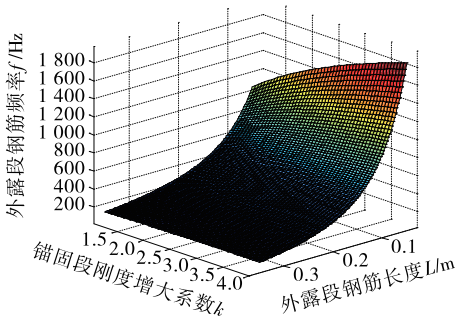


图 4 三参数模型关系

3 室内模型试验

砼箱梁腹板模型砼强度等级为 C40,配有适量构造钢筋和箍筋,模型材料参数见表 1。直径为 32 mm 的精轧螺纹钢筋沿试件长边方向以间距 500 mm 布置(见图 5),在外露段的顶端安装高频加速度传感器(频率测量范围 5~1 000 Hz)。对端部施加人工激振,通过加速度传感器和数据采集分析仪得到预应力筋外露段的固有频率。

表 1 模型材料参数

模型构件	几何参数/mm	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
砼	200×30×150	32 500	26.8	2.4
精轧螺纹钢筋	$d=32$	200 000	—	930
普通钢筋	$d=16$	200 000	—	335

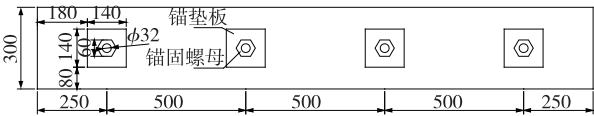


图 5 预应力构件布置示意图(单位:mm)

模型(模型试件见图 6)试验的控制变量为  $\phi 32$  钢筋的张拉力,通过腹板模型一端的液压千斤顶分级施加张拉力,另一端穿心式压力传感器获得实际张拉力,同时记录每一级张拉力对应的钢筋外露段长度与一阶频率。



图 6 砼箱梁模型试件

通过钢筋不同张拉力对应的外露段长度  $L$ 、一阶振型频率  $f$ , 在前文三参数模型的基础上拟合得到张拉力  $P$  与锚固段  $k$  值的经验公式(见图 7)。

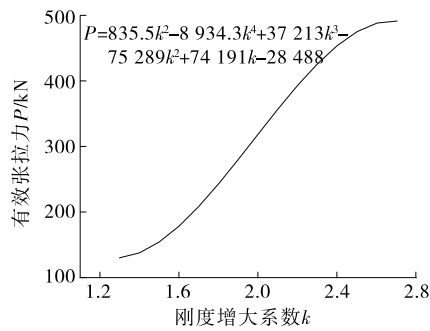


图 7 刚度增大系数  $k$  与张拉力  $P$  拟合曲线

#### 4 实际工程应用

背景桥梁为宁夏自治区某黄河大桥改扩建项目, 其为跨径布置  $(40+8\times 80+40)\text{m}$  预应力砼连续 T 梁桥, 箱梁为单箱单室截面, 腹板变高度设计。

竖向预应力钢筋采用抗拉强度标准值  $f_{pk}=785\text{MPa}$ 、直径 32 mm 的精轧螺纹钢筋, 控制应力为  $0.9f_{pk}=706.5\text{MPa}$ , 单根预应力筋张拉力为 568 kN。JTG D62—2004 要求竖向预应力实际张拉力考虑预应力损失乘以 0.6 倍折减系数, 则留存的张拉力应不低于 396 kN。

对该桥竖向预应力钢筋外露段长度和频率特性进行现场测试, 测试张拉力分布见图 8, 5#墩 0#块

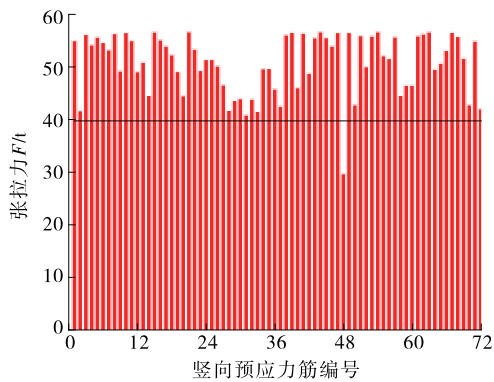


图 8 现场测试张拉力分布

共 72 根竖向预应力钢筋的测试结果见表 2。

表 2 某桥竖向预应力钢筋张拉力检测结果

竖向预 应力编 号	外露 长度/ cm	频率/ Hz	张拉 力/t	竖向预 应力编 号	外露 长度/ cm	频率/ Hz	张拉 力/t
1	13.2	731	55.09	37	13.2	642	42.57
2	10.5	852	41.72	38	13.0	720	56.16
3	9.6	1 070	56.25	39	11.0	915	56.65
4	11.7	815	54.27	40	10.6	877	46.09
5	14.2	625	55.75	41	10.8	933	56.49
6	11.5	837	54.72	42	12.1	752	48.86
7	11.7	810	53.31	43	15.6	560	55.62
8	8.6	1 225	56.44	44	11.0	927	56.75
9	8.4	1 190	49.28	45	12.0	807	55.63
10	17.6	455	56.62	46	15.6	539	54.04
11	11.8	965	55.07	47	11.1	889	56.62
12	12.3	736	49.15	48	8.2	1 025	29.70
13	14.7	620	50.97	49	15.1	578	56.64
14	8.3	1 160	44.63	50	10.7	823	42.82
15	14.2	628	56.71	51	13.0	725	56.04
16	11.3	906	55.23	52	15.0	560	50.11
17	12.6	765	54.05	53	12.8	739	55.95
18	11.0	875	52.35	54	14.0	653	56.77
19	11.0	856	49.19	55	17.0	469	52.19
20	8.3	1 106	44.57	56	10.9	962	51.68
21	10.7	952	56.75	57	12.3	777	55.76
22	13.0	700	53.43	58	15.6	513	44.64
23	14.5	587	49.39	59	12.4	717	46.55
24	13.0	692	51.47	60	10.5	860	41.90
25	12.1	758	51.47	61	13.1	715	55.96
26	15.0	551	50.22	62	14.9	590	56.34
27	11.1	801	46.64	63	17.6	457	56.71
28	9.8	950	41.78	64	14.9	564	49.61
29	9.9	941	43.67	65	18.5	409	50.76
30	13.2	631	44.02	66	12.5	739	53.23
31	12.4	703	40.88	67	16.0	525	56.65
32	15.0	536	43.92	68	12.7	734	55.87
33	13.5	650	41.57	69	13.2	679	51.72
34	16.2	499	49.70	70	11.3	790	42.82
35	12.1	736	49.79	71	16.2	527	54.98
36	8.9	1 077	45.84	72	9.8	937	42.09

差为8.87%。说明折减铰缝弹性模量可模拟该桥的荷载横向分布。

理论上讲,如果铰缝砼与梁板砼间粘结良好,挠度实测值应与理论值接近。且从该桥各铰缝第一主应力来看,各铰缝出现了砼开裂的情况。因此,推测其他铰缝可能也存在不同程度的病害,通过折减铰缝材料的弹性模量是否可模拟铰缝不同程度的破坏还有待进一步研究。

## 5 结论

(1) 在社会车辆考虑冲击系数的前提下,社会车辆作用下1#铰缝各项剪应力都大于液压轴线车,判断铰缝破坏由社会超载车辆所引起,通过控制超载车辆可避免或延缓铰缝损坏。铰缝损坏源于铰缝砼开裂后导致的铰缝与板梁间砼粘结面失效。

(2) 假设砼材料表现为线性进行有限元模拟,挠度结果显示桥梁的横向刚度较大,荷载作用于结构上,各片空心板受力过于均匀,荷载的横向分布并不理想,需进行优化。

(3) 对铰缝弹性模量进行折减能更合理地模拟空心板桥的荷载横向分布。但鉴于桥梁实例有限,没有进行广泛的对比与讨论,弹性模量取 $E/1\ 000$

仅对该桥来说较合理。由于并不清楚该桥其他铰缝是否也存在不同程度的损坏,对于能否广泛地采用折减铰缝弹性模量的方法来模拟简支空心板桥的横向分布及不同程度的铰缝损坏还有待进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 乔学礼.空心板桥铰缝破坏机理及防治措施[D].西安:长安大学,2008.
- [2] 项贻强,邢骋,邵林海,等.铰接预应力混凝土空心板梁桥的空间受力行为及加固分析[J].东南大学学报:自然科学版,2012,42(4).
- [3] 苏高裕.大铰缝空心板梁铰缝受力特点分析和配筋优化[J].公路,2012(8).
- [4] 陈少峰,刘骁,彭周.局部铰缝开裂的装配式空心板梁有限元分析[J].公路,2013(10).
- [5] 张喜刚.公路桥梁汽车荷载标准研究[M].北京:人民交通出版社,2014.
- [6] 尹江南.装配式钢筋混凝土空心板桥支座与铰缝损伤的数值仿真分析[D].天津:天津大学,2009.
- [7] Eurocode 2, Design of concrete structures[S].
- [8] 宋尧,李国平.铰缝破坏对装配式空心板桥荷载横向分布影响的分析[J].上海公路,2012(3).

收稿日期:2018-04-17

(上接第124页)

从表2、图8来看,经一次张拉和二次补张拉,该梁段98.6%竖向预应力钢筋的张拉力达到规范要求,张拉效果良好。

## 5 结论

(1) 控制材料标准、减小施工定位误差、保证张拉质量、孔道密实压浆等是减小竖向精轧螺纹钢预应力损失的重要手段。

(2) 对精轧螺纹钢外露段进行结构动力学分析,得到外露段长度 $L$ 、一阶振型频率 $f$ 与锚固段刚度增大系数 $k$ 三参数模型;通过室内模型试验,得到预应力钢筋张拉力 $P$ 与锚固段刚度增大系数 $k$ 的经验公式。

(3) 竖向预应力在人为因素及施工因素影响下存在张拉力不足的现象,文中提出的检测方法可为工程实际问题提供快速解决方案。

## 参考文献:

- [1] 沈明艳,钟新谷,舒小娟.PC箱梁腹板竖向预应力施工

控制初步研究[J].建筑结构,2008,38(12).

- [2] 李坚.我国预应力混凝土连续梁桥的发展与工程实践[J].城市道路与防洪,2001(1).
- [3] 彭卫,邢鸿燕,柯善刚.PC连续箱梁裂缝控制研究[J].浙江工业大学学报,2003,31(3).
- [4] 彭宝华.对公路混凝土桥梁裂缝的认识[A].2004年全国桥梁学术会议论文集[C].2004.
- [5] 邓志恒,罗志佳,林俊.竖向预应力损失对箱梁腹板斜裂缝影响分析[J].公路工程,2007,32(6).
- [6] 李守凯,张峰,李术才,等.施工定位误差对竖向预应力损失的影响研究[J].山东大学学报:工学版,2011,41(3).
- [7] 钟新谷,沈明燕,尹旭文,等.预应力混凝土箱梁桥竖向预应力孔道漏灌浆对腹板截面开裂影响的研究[J].土木工程学报,2008,41(10).
- [8] 钟新谷,杨滔,沈明燕.混凝土箱梁桥腹板竖向预应力筋张拉力检测方法[J].中国公路学报,2010,23(4).
- [9] JTG D62-2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [10] JTG D60-2015,公路桥涵设计通用规范[S].

收稿日期:2018-06-01