**文章编号:**1000-8608(2019)06-0617-07

# 预应力混凝土桥梁弯曲孔道接触应力研究

张开银\*1, 曹 萱1, 胡国海2

(1.武汉理工大学交通学院,湖北武汉 430070;2.吉林省交通规划设计院,吉林长春 130021)

摘要:大跨度预应力混凝土桥梁运营过程中,箱梁跨中下挠与腹板开裂现象十分普遍.从结构受力分析,混凝土箱梁徐变效应所带来的跨中下挠,客观上表明梁体处于拉应力状态,与结构设计意图大相径庭,意味着预应力混凝土结构设计理论尚存在某些弊端.为探究预应力钢束与弯曲孔道间接触应力的分布规律以及孔道相关参数的影响,基于赫兹接触理论,通过一组预应力弯曲孔道模型挤压试验,借助 CT 扫描技术获取试验模型的形变数据,并结合有限元分析软件 ANSYS进行数值模拟.结果表明其接触应力分布呈钟形,接触应力大小与张拉力正相关,与曲率半径负相关,接触应力梯度与接触角度负相关.研究结论对预应力混凝土构件设计理论的修正具有参考意义.

关键词:大跨度预应力混凝土桥梁;预应力损失;赫兹接触理论;弯曲孔道;接触 应力

中图分类号:TU378

文献标识码:A

doi:10.7511/dllgxb201906010

## 0 引 言

预应力混凝土桥梁因其抗弯刚度大、抗震性 能好、建造工艺成熟、运营维护便利等特点,在我 国桥梁建设中得到了越来越广泛的应用,然而,运 营中的预应力混凝土桥梁结构,箱梁下挠,腹板开 裂等病害日益突出,导致这一现象发生的客观因 素较多,国内外桥梁工程界对此曾进行过较系统 的研究,其主流观点认为:桥梁设计时结构构造主 拉应力考虑不周;施工中预应力张拉控制不严,箱 梁纵向、横向及竖向预应力损失过大:运营中车辆 超载:混凝土材料徐变与温度效应等[1-7].尽管如 此,仍然不能合理地诠释预应力混凝土箱梁下挠 与开裂这一共性问题的发生机理,其真正原因尚 需从理论上深入探究,从结构受力上分析,由于预 应力混凝土箱梁全截面受压,梁体结构所发生的 徐变效应也只可能为压缩变形(结构徐变变形与 受力状态相一致). 而混凝土箱梁跨中下挠(梁体 伸长),客观上表现为混凝土梁体处于拉应力状 态,其表明结构实际受力状态与设计意图相背离,

预示着混凝土桥梁结构预应力设计理论尚存在着 未被认识的弊端,在混凝土结构预应力损失主要 6 项因素中[8],摩阻损失占预应力总损失的40%~ 77%[9]. 基于现有弯曲孔道摩阻损失公式,有学者 针对孔道摩擦因数 μ 与孔道偏差系数 k 对预应力 混凝土连续刚构挠度进行过敏感性分析,结果表 明μ变化对预应力摩阻损失更加敏感<sup>[10-11]</sup>.也有 学者进行过实桥预应力孔道摩阻测试试验,并运 用最小二乘法识别出 µ 与 k,实测值比规范取值 普遍偏大[12-13]. 但对于弯曲孔道摩阻损失公式的 合理性鲜少有学者进行讨论.非连续弯曲孔道夹 角的不可加性,意味着弯曲孔道摩阳预应力损失 公式存在着某些弊端,事实上,预应力摩阻损失依 赖于预应力束与弯曲孔道沿程接触面正应力分布 (径向应力),本文基于赫兹(Hertz)接触理论,通 过一组预应力弯曲孔道模型挤压试验,借助 CT 扫描技术获取试验模型的形变数据,并结合结构 有限元计算,分析试验模型的接触应力:同时,探 讨孔道接触角、曲率半径、张拉力、摩擦因数等因

作者简介:张开银\*(1960-),男,教授,E-mail:zhangky1960@126.com;曹 萱(1995-),女,硕士生,E-mail:511942141@qq.com.

收稿日期: 2019-05-20; 修回日期: 2019-09-28.

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51609192).

素对预应力混凝土弯曲孔道接触应力的影响.

## 1 弯曲孔道摩阻预应力损失

弯曲孔道摩阻引起的预应力损失公式为[8]

$$\sigma = \sigma_{\rm con} \left[ 1 - e^{-(\mu \theta + kx)} \right] \tag{1}$$

式中:σ<sub>con</sub>为张拉端张拉应力(MPa);μ为预应力 钢束与管道壁间的摩擦因数;k为孔道单位长度 孔道偏差系数;θ为张拉端至计算截面弯曲孔道 部分切线的夹角绝对值之和(rad);x为张拉端至 计算截面的孔道长度(m).

由弹性理论可知,式(1)在推导过程中有如下 两点值得商榷:

(1) 混凝土材料假定是刚性的(弹性模量  $E_{c} = \infty$ ),在预应力钢束张拉过程中不发生形变;

(2)通过弯曲孔道与预应力钢束间的静力平 衡关系得到的接触应力 p,其仅仅依赖于张拉力 T与接触面曲率半径 R(与材料物性参数无关), 从而可导出接触应力 p=T/R.

式(1)中,预应力束沿程有效预应力 $\sigma(x,\theta)$ 与截面位置x及孔道接触面夹角 $\theta$ 呈指数关系, 从而导出了非连续弯曲孔道夹角 $\theta$ 之可加性.对 于图1所示的夹角 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 和 $\theta_3$ 对应的非连续弯曲 孔道与夹角 $\theta$ 所对应的连续弯曲孔道( $\theta = \theta_1 + \theta_2$ + $\theta_3$ ),A 点为张拉端,若仅考虑孔道弯曲引起的 预应力损失,由式(1)有

$$\sigma_A = \sigma_{con}$$
 (2a)

$$\sigma_B = \sigma_A e^{-\mu \theta_1} = \sigma_{con} e^{-\mu \theta_1}$$
(2b)

$$\sigma_C = \sigma_B e^{-\mu \theta_2} = \sigma_A e^{-\mu \theta_1} e^{-\mu \theta_2} = \sigma_{con} e^{-\mu (\theta_1 + \theta_2)}$$
(2c)

$$\sigma_D = \sigma_{\rm con} e^{-\mu(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)} = \sigma_{\rm con} e^{-\mu\theta}$$
(2d)

式(2)表明,非连续弯曲孔道与同等角度的连续弯曲孔道,D点处有效预应力相同,是由式(1)表达形式所决定的.据此,文献[14]曾进行了不同张拉力与不同夹角下,连续弯曲孔道与夹角之和相等



的非连续弯曲孔道摩阻损失的试验研究,结果表明后者预应力损失较小.试验验证非连续弯曲孔 道夹角的不可加性,预示着弯曲孔道摩阻预应力损 失公式的合理性值得质疑.同时,大量工程实践也 表明,非连续弯曲孔道的有效预应力与同等角度连 续弯曲孔道的有效预应力有着非常大的差异<sup>[15-16]</sup>.

#### 2 弯曲孔道接触应力模型试验

预应力摩阻损失正比于接触面正压力,因此, 预应力混凝土弯曲孔道接触应力分布形式决定了 结构有效预应力.事实上,实际混凝土构件并不是 理想刚体,在预应力钢筋的张拉过程中,预应力钢 筋对弯曲孔道孔壁将产生较大的径向压力,使得 混凝土结构局部挤压变形,从而改变了物体接触 面处的曲率半径,基于赫兹接触理论,考虑到预应 力钢束与混凝土弯曲孔道间相对刚度的差异,其 径向应力的分布应介于均匀分布与椭球状分布之 间<sup>[17-18]</sup>.

## 2.1 加载装置

模型试验设计了一组预应力混凝土弯曲孔道 挤压试件,采用 CT 扫描技术,获取试件加载前后 的结构形变数据,并结合结构有限元分析,以探究 混凝土弯曲孔道接触应力的分布形式.依据试验目 的,预制了两件聚氨基甲酸酯(简称聚氨酯,弹性模 量*E*=1 000 kPa,泊松比v=0.41)试件,如图 2 所



Fig. 2 Plane of polyurethane specimens

示.为获取加载/卸载状态试件的形变数据,鉴于 CT 扫描的特点,在试件内预埋了若干标志点.试 验扫描设备选用西门子 SOMATOM Sensation 螺旋 CT 仪.

加载装置如图 3 所示,其上对称设有 3 对加载孔,通过选取不同加载孔和调节试件下的垫板 高度,可实现至少 6 个角度状态的加载.以聚氨酯 橡胶试件厚度方向正中断面作为加载面,张紧绕 过试件圆弧面的绳索(直径 *d*=5 mm),即可实现 对模型接触区域施压.对于同一角度加载,通过控 制扭矩的大小,可调整接触应力.



(a) 平面图



(b)加载照片图 3 试验模型与加载装置Fig. 3 Test model and loading device

#### 2.2 试验工况

弯曲孔道接触应力模型试验共设计有 10 个 工况,以分别探讨孔道接触角、曲率半径、张拉力、 孔道摩擦对接触应力的影响,试验工况见表 1.

表1 预应力弯曲孔道接触应力模型试验工况

Tab. 1 Cases of contact stress model test on prestressed curved duct

| 工况 | 接触角/(°) | 模型   | 摩擦条件 | 张拉力/N |
|----|---------|------|------|-------|
| 1  | 25      | D200 | 无摩擦  | 98    |
| 2  | 25      | D300 | 无摩擦  | 196   |
| 3  | 34      | D300 | 无摩擦  | 98    |
| 4  | 34      | D300 | 无摩擦  | 65    |
| 5  | 50      | D300 | 无摩擦  | 98    |
| 6  | 58      | D200 | 无摩擦  | 98    |
| 7  | 58      | D300 | 无摩擦  | 98    |
| 8  | 69      | D300 | 无摩擦  | 98    |
| 9  | 69      | D300 | 有摩擦  | 98    |
| 10 | 86      | D300 | 无摩擦  | 98    |

在每个工况加载与卸载状态下,分别沿试件 厚度方向按指定步距(0.6 mm)进行 CT 扫描,形 成系列层析影像.在加载状态系列层析影像中辨 识绳索所在断面,设为加载断面,如图 4(a)所示; 并在卸载状态层析影像中辨识对应编号的断面, 设为卸载断面,如图 4(b)所示.



(a) 加载状态(b) 卸载状态图 4工况 1 加载/卸载状态断面层析影像Fig. 4Sectional tomography of loading-unloading

state in Case 1

将加载、卸载断面 CT 扫描数据导入 CAD, 可得到试件轮廓坐标(因试件制作预设标志点误 差,有部分偏离扫描断面),取对应有限元模型在 圆弧段的节点为控制点,通过比较加载与卸载状 态的坐标,可得到控制点的位移变化量{Δx,Δy}.

## 3 数据处理

利用结构分析软件 ANSYS 建立聚氨酯试件 的有限元计算模型.对于 D200 试件,选用 SOLID185单元,共划分9424个节点、8280个单 元;对于 D300 试件,共划分12519个节点、 11768个单元.在模型底部约束所有自由度. D200 试件结构有限元计算模型如图5所示.



图 5 D200 试件有限元模型 Fig. 5 Finite element model of D200 specimens

将试件加载断面所对应的控制点逐一施加节 点位移.工况1下D200试件的变形云图如图 6(a)所示,D200试件Y方向的应力云图如图 6(b)所示.



工况1下D200试件最大压应力为68.477 kPa, 位于模型加载中点,沿脱离接触方向压应力逐渐 减小.

# 4 接触应力影响因素分析

#### 4.1 接触角

利用 Results Viewer 输出节点的法向(径向) 应力. 对于不同孔道接触角下接触应力分布, D200 模型试验设有 2 种角度,D300 模型试验设 有 6 种角度. 两模型试验各工况下接触应力数据 如图 7 所示(由于试件尺寸与荷载分布均对称,设 对称中心为 0 控制点,仅示出右半区数据).

由图 7 可知,当张拉力大小与模型曲率半径 不变时,接触角越大,接触应力梯度越小,应力曲 线越平缓.对各工况试件接触应力作归一化处理 (略去非接触区的应力值),接触应力曲线如图 8 所示. 结合图 7、8 可知,试件接触应力由接触中点向脱离接触方向逐渐减小,直至脱离接触降为零. 并将接触应力数据作高斯曲线拟合(拟合优度 R<sup>2</sup> 均大于 0.95),接触应力曲线呈钟形.



图 7 各工况下试件接触应力





图 8 D200 和 D300 试件接触应力趋势

Fig. 8 Contact stress trend of D200 and D300 specimens

#### 4.2 张拉力

工况 3 与工况 4 保持试件接触角与曲率半径 不变,试件接触应力于不同张拉力下分布如图 9 所示.

在图 9 中,加载前接触左边界在 5 号点附近, 但加载后接触应力均在 6 号点附近降为零(试件 受压变形,接触边界向两侧扩大,向外移动大约 1 个控制点才真正完全脱离接触).当试件接触角与 曲率半径不变时,张拉力越大,最大接触应力越 大,接触区域内各点应力与张拉力大小基本呈正 比例关系.



图 9 不同张拉力下接触应力对比



#### 4.3 曲率半径

对于工况 6 与工况 7,接触角均为 58°,张拉 力相同,仅控制曲率半径不同,试件接触应力分布 如图 10 所示(因两有限元模型在接触区的节点划 分间隔角度不同:D200 为 5.625°、D300 为 3.75°, 导致图中控制点未一一对应,故图中 D200 试件 控制点编号用 3 的倍数表示,D300 试件控制点编 号用 2 的倍数表示).



图 10 不同曲率半径下接触应力

Fig. 10 Contact stress with different curvature radius

由图 10 可知,当接触角与张拉力均相等时, 曲率半径越小,最大接触应力值越大,各节点接触 应力也相应越大.

#### 4.4 摩擦因数

工况 8 和工况 9 试验均采用 D300 试件,接 触角同为 69°,且张拉力相同,以探究摩擦因数对 接触应力的影响.工况 8 对绳索与试件圆弧面采 取了润滑处理,摩擦力相对很小(视为无摩擦状态);而对于工况 9,未对模型作润滑处理,加载后 通过平移底座,使绳索对试件接触区产生摩擦.工 况 8 与工况 9 下试件接触应力分布如图 11 所示.



图 11 工况 8 与工况 9 接触应力对比

Fig. 11 Comparison of contact stress in Case 8 and Case 9

在图 11 中,摩擦方向表现为向右,摩擦所产 生的效果为增大了右半接触区的应力值并减小了 左半接触区的应力值,而最大值未出现明显的变 化.这表明摩擦力对试件接触应力的影响相对较 小.

# 5 结 论

(1)弯曲孔道模型接触应力由接触中点向脱 离接触方向逐渐减小,接触应力分布呈钟形;

(2)当孔道接触角与曲率半径不变时,张拉力 越大,最大接触应力越大,接触区各点应力与张拉 力大小基本呈正比例关系;

(3)当张拉力大小与孔道曲率半径不变时,预 应力束与弯曲孔道接触角越大,接触应力梯度越 小,接触应力曲线越平缓;

(4)当孔道接触角与张拉力不变时,孔道曲率 半径越小,最大接触应力值越大,接触区各点应力 也相应越大;

(5)有摩擦时,弯曲孔道接触应力曲线沿摩擦 力方向偏移,但最大应力处几乎不发生变化,摩擦 对接触应力的影响较小.

# 参考文献:

[1] 程海潜. PC 弯曲孔道内接触应力、预应力摩阻损失 及张拉伸长量研究 [D]. 武汉:武汉理工大学, 2011.

CHENG Haiqian. Research on contact stress, pre-stressed frictional loss and elongation in PC bending duct [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. (in Chinese)

[2] 许 梁.大跨度预应力混凝土连续刚构桥的长期挠

度分析 [D]. 广州:华南理工大学, 2016. XU Liang. Long term deflection analysis on the long span prestressed concrete continuous rigid frame bridge [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016. (in Chinese)

- [3] 吴 枫.大跨径预应力混凝土桥梁灾害分析及治理[J].科技通报,2017,33(6):214-217.
  WU Feng. Long-span prestressed concrete bridge disaster analysis and treatment [J]. Bulletin of Science and Technology, 2017,33(6):214-217. (in Chinese)
- [4] 杨晋文. 连续刚构桥跨中下挠的影响因素分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2015, 28(2):17-20.

YANG Jinwen. Influence factors analysis of midspan sag of continuous rigid frame bridge [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural Science), 2015, 28(2): 17-20. (in Chinese)

[5] 吕 攀. 预应力损失有限元分析及试验研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2014.

> LV Pan. The prestress loss's finite element analysis and experimental study [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese)

- [6] 陈 闯,王宗林,高庆飞,等.基于刚度降低的大跨径预应力混凝土(PC)连续箱梁桥跨中挠度分析[J].科学技术与工程,2015,15(35):245-253.
  CHEN Chuang, WANG Zonglin, GAO Qingfei, et al. Mid-span deflection analysis of the long-span prestressed concrete continuous box-girder bridge based on the stiffness decreasing [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(35): 245-253. (in Chinese)
- [7] 谭 晋. 预应力混凝土连续刚构桥病害分析及加固研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
   TAN Jin. Prestressed concrete continuous rigid frame bridge disease analysis and reinforcement research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [8] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵施工技术规范: JTG/T F50-2011 [S].北京:人民交通出版社,2011.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Specification for Construction of Highway Bridge and Culvert: JTG/T F50-2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese)

[9] 李准华,刘 钊. 大跨度预应力混凝土梁桥预应力

损失及敏感性分析 [J]. 世界桥梁, 2009(1): 36-39, 42.

LI Zhunhua, LIU Zhao. Analysis of prestressing loss and sensitivity of long span prestressed concrete beam bridge [J]. World Bridges, 2009(1): 36-39, 42. (in Chinese)

- [10] 左 迪,王起才,张戎令,等. 摩阻损失对连续梁桥 线形控制的影响研究 [J]. 铁道建筑, 2014, 54(4):13-16.
  ZUO Di, WANG Qicai, ZHANG Rongling, *et al.* Research on influence of friction loss on construction linear control of continuous beam bridge [J]. Railway Engineering, 2014, 54(4): 13-16. (in Chinese)
- [11] 杨欧峰. 超长束预应力混凝土连续梁桥受力性能研究[D]. 南京:南京林业大学,2016.
  YANG Oufeng. Research on the prestressed concrete continuous girder bridges with very long prestressing strands [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2016. (in Chinese)
- [12] 韩品甲.大跨度连续刚构桥预应力体系摩阻参数试验研究 [J]. 公路工程,2011,36(1):25-27,58.
  HAN Pinjia. Experimental study on attrition parameters of prestress tightwire for long-span continuous rigid frame bridge [J]. Highway Engineering, 2011, 36(1):25-27,58. (in Chinese)
- [13] 张 琪,刘世忠,徐国光,等. 摩阻损失在预应力连续梁桥中的分析与研究 [J]. 兰州工业学院学报, 2014, 21(5): 22-26.
  ZHANG Qi, LIU Shizhong, XU Guoguang, et al. Analysis and research of the friction loss on the

prestressed continuous beam [J]. Journal of Lanzhou Higher Polytechnical College, 2014, 21(5): 22-26. (in Chinese)

[14] 张开银,张 闪,谢冰阳,等. PC 梁桥弯曲孔道预应 力损失机理研究 [J]. 武汉理工大学学报(交通科 学与工程版), 2013, 37(4): 720-724.

ZHANG Kaiyin, ZHANG Shan, XIE Bingyang, et al. Research on the mechanism of prestressed loss in curving hole of prestressed concrete structure caused by frictional resistance [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2013, 37(4): 720-724. (in Chinese)

[15]何 俊,唐婷婷.桥梁施工过程中有效预应力测量 与统计分析 [J]. 兰州工业学院学报,2017, 24(4):35-39. HE Jun, TANG Tingting. Effective prestress measurement and statistical analysis of bridge construction [J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2017, 24(4): 35-39. (in Chinese)

[16] 黄 颖,房贞政,高 杰.后张法预应力混凝土简支 梁预应力摩擦损失的理论研究[J].福州大学学报 (自然科学版),2015,43(5):666-670.

HUANG Ying, FANG Zhenzheng, GAO Jie. Theoretic research on friction loss in post-tensioned prestressed concrete simply supported beam [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2015, 43(5); 666-670. (in Chinese)

[17] 肖 财,张开银,黎 晨. PC 弯曲孔道摩阻损失中

接触应力分布试验 [J]. 武汉理工大学学报(交通 科学与工程版), 2015, **39**(2): 367-370, 374. XIAO Cai, ZHANG Kaiyin, LI Chen. Test of contact stress distribution in curving hole friction loss [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015, **39**(2): 367-370, 374. (in Chinese)

[18] KIM Y J, GREEN M F, WIGHT R G. Bond and short-term prestress losses of prestressed composites for strengthening PC beams with integrated anchorage [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, 29(9): 1277-1294.

## Research on curved duct contact stress of prestressed concrete bridge

ZHANG Kaiyin<sup>\*1</sup>, CAO Xuan<sup>1</sup>, HU Guohai<sup>2</sup>

( 1. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Jilin Traffic Planning and Design Institute, Changchun 130021, China  $\)$ 

**Abstract:** The phenomenon of mid-span deflection and web cracking of box girder of long span prestressed concrete bridges in operation is very common. According to the analysis of structural stress, the mid-span deflection, caused by creep effect of concrete box girder, indicates that the beam presents a tensile stress, which is quite different from the structural design intention, meaning that several drawbacks are needed to be considered in the design theory of prestressed concrete structures. In order to explore the distribution of contact stress between prestressed reinforcement and curved duct as well as the influence of relevant parameters of curved duct, based on the Hertz contact theory, a set of extrusion tests are conducted on the prestressed curved duct model, in which the deformation data of model are recorded using CT scanning technology. Meanwhile, finite element software ANSYS is also adopted to further explore the contact stress in curved duct. The results suggest that the distribution of contact stress is bell-shaped, and the contact stress is positively correlated with the tensile force, negatively correlated with the radius of curvature, and the gradient of contact stress is negatively correlated with the contact angle. The conclusions are of significant reference for revising the design theory of prestressed concrete structures.

Key words: long span prestressed concrete bridges; prestress loss; Hertz contact theory; curved duct; contact stress