

文章编号:1671-6833(2010)05-0074-04

# 折线先张预应力混凝土箱梁钢绞线锚固区应力研究

刘立新, 王新宇

(郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:**针对某高速公路淮河桥35 m跨度折线先张预应力混凝土箱梁端部锚固区开裂的问题,根据梁端腹板厚度的变化、钢绞线锚固失效段的设置分4种工况对锚固区的局部应力进行了分析.结果表明:采用工况4的方案可有效减小梁端混凝土的局部应力防止开裂,即将梁端部的腹板厚度由原设计300 mm增大为400 mm,同时部分钢绞线设置端部锚固失效段;提出了适当增加梁端腹板厚度、合理设置钢绞线锚固失效段等防止梁端混凝土开裂的措施,并通过实际工程梁端混凝土局部应力的量测进行了验证.

**关键词:**预应力混凝土;先张法;折线形预应力筋;锚固区;局部应力

**中图分类号:** TU378.8

**文献标识码:** A

## 0 引言

折线先张预应力梁是我国近年来开始在桥梁工程中应用的一种新型预应力混凝土梁,其工艺特点是预先在张拉台座上安放弯起器,将梁底部分钢绞线穿过弯起器后向上弯折形成折线形,张拉并在台座端部锚固钢绞线后浇注混凝土,待混凝土达到设计强度后放张钢绞线,并将弯起器下部与台座连接处松开(弯起器留在梁内),即形成采用先张法工艺制作的折线形钢绞线预应力混凝土梁.与目前在桥梁工程中应用的后张预应力混凝土梁相比,折线先张预应力混凝土梁避免了预留孔道和压力灌浆等工序,克服了后张预应力混凝土梁孔道灌浆不密实、容易引起钢绞线锈蚀的质量通病<sup>[1]</sup>,提高了预应力混凝土梁的安全性和耐久性;此外向上弯折的预应力钢绞线还可抵抗部分剪力,能有效地防止斜裂缝的产生.由于折线先张预应力梁具有一些明显的优点,在韩国、台湾的跨海大桥、高铁桥梁以及我国青藏铁路桥和部分高速公路桥中已开始应用.河南省交通部门和有关单位对折线先张预应力混凝土梁的受力性能、设计方法和施工技术等进行了系统研究,首次在某高速公路淮河桥中成功应用了跨度为35 m的折线先张预应力混凝土箱梁<sup>[2-5]</sup>.

折线先张预应力梁混凝土的预压应力是通过钢绞线和混凝土之间黏结力的传递逐渐建立的,梁端每侧腹板锚固区钢绞线根数较多,黏结应力传递集中,易引起锚固区混凝土开裂.在我国早期折线先张预应力混凝土梁试验以及淮河桥第一片箱梁的试制过程中,均发生过锚固区混凝土开裂的现象.因此对钢绞线锚固区局部应力进行分析,提出防止梁端混凝土开裂的有效措施,是折线先张预应力混凝土梁工程应用的关键技术之一.

## 1 工程概况

河南省某高速公路淮河桥35 m跨折线先张预应力混凝土箱梁的尺寸及钢绞线布置如图1所示,全桥长800 m,共88片箱梁.梁高1 824 mm,顶板宽2 400 mm、厚180 mm,底板宽1 000 mm、厚300 mm,斜腹板厚180 mm(端部300 mm)、斜率为1:4,混凝土强度为C50.预应力筋为1×7标准型低松弛钢绞线,公称直径为15.2 mm,抗拉强度标准值 $f_{pk}=1\ 860\text{ MPa}$ ,张拉控制应力 $\sigma_{con}=0.75f_{pk}=1\ 395\text{ MPa}$ .每片箱梁底板布置直线形钢绞线18根,每腹板布置折线形钢绞线14根,弯起角 $4.77^\circ$ ,每片梁安装4个拉板式钢制弯起器.

第一片箱梁试制过程中在放张钢绞线后,发现梁端部钢绞线锚固区出现放射状裂缝(图2).

收稿日期:2010-04-06;修订日期:2010-06-10

基金项目:河南省交通科研项目(2007P338)

作者简介:刘立新(1947-),男,湖北汉川人,郑州大学教授,博士生导师,主要从事混凝土、砌体结构基本理论及工程应用.

因现行 JTG D62—2004《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》<sup>[6]</sup>中尚未规定先张法预应力梁端部钢绞线锚固区混凝土的防裂措施<sup>[4]</sup>,笔者以该座桥梁的折线先张预应力混凝土箱梁为背景,分4种工况对梁端钢绞线锚固区的局部应力进行分析,根据分析结果提出防止梁端混凝土开裂的措施,并通过对改进后箱梁锚固区混凝土局部应力的量测,验证了防裂措施的可靠性,为折线先张预应力混凝土箱梁工程应用提供依据。

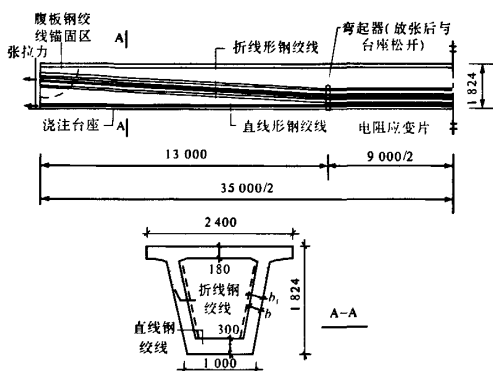


图1 折线先张预应力混凝土箱梁示意图

Fig.1 Sketch of prestressed concrete box beam with pretensioned bent-up tendons

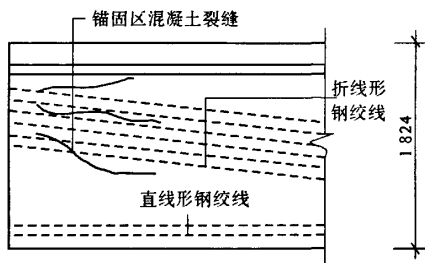


图2 锚固区混凝土裂缝

Fig.2 Cracking of concrete in strand anchorage zone

## 2 锚固区混凝土应力状态分析

### 2.1 分析方法及计算工况

由于折线先张预应力混凝土箱梁端部钢绞线锚固区应力状态复杂,可采用大型有限元软件进行分析.混凝土用带筋的 SOLID65 单元,钢绞线用 LINK8 单元进行模拟,网格尺寸变量取 50 mm.材料性能参数取值为:混凝土弹性模量  $E_c = 3.45 \times 10^4$  MPa (C50),泊松比  $\nu_c = 0.2$ ,密度  $\rho_c = 2\,400$  kg/m<sup>3</sup>;钢筋弹性模量  $E_s = 2.0 \times 10^5$  MPa;钢绞线弹性模量  $E_p = 1.95 \times 10^5$  MPa,线膨胀系数  $\delta = 1.0 \times 10^{-5}$  /℃;钢筋和钢绞线泊松比  $\nu = 0.3$ .

为分析钢绞线锚固区混凝土的应力状态,考虑了4种工况进行计算分析.工况1按原设计取箱梁端部腹板厚度为  $b'_f = 300$  mm,锚固区钢绞线未设置锚固失效段;工况2箱梁端部腹板厚度仍取为  $b'_f = 300$  mm,但锚固区部分钢绞线设置锚固失效段;工况3箱梁端部腹板厚度增大为  $b'_f = 400$  mm,锚固区的钢绞线未设置锚固失效段;工况4箱梁端部腹板厚度为  $b'_f = 400$  mm,同时锚固区部分钢绞线设置锚固失效段.锚固区钢绞线锚固失效段的做法是:箱梁每侧腹板共布置14根  $\Phi^{15}$  折线张拉的钢绞线,分为7排,每排2根,锚固失效段分别设置在第3,5,7排,失效段自上而下的长度分别为300,500,700 mm,用塑料套管将钢绞线和混凝土隔离,使该段长度范围内的钢绞线和混凝土之间失去黏结作用。

### 2.2 锚固区混凝土的应力状态及分析

图3为有限元方法计算的4种工况箱梁端部腹板钢绞线锚固区混凝土应力分布图.图4为根据有限元计算结果绘制的各工况箱梁端部腹板锚固区混凝土拉应力分布图.从图3(a)和图4(a)可看出,在工况1(梁端部腹板厚度为300 mm,锚固区钢绞线未设置锚固失效段)下,由于黏结应力的传递较集中,钢绞线锚固区混凝土内产生了很大的局部应力,最大拉应力出现在距梁端200~500 mm范围.计算的最大拉应力达5.28 MPa,远大于混凝土抗拉强度标准值(2.64 MPa),从而导致锚固区混凝土开裂,这与图2所示淮河桥第一片箱梁试制过程中梁端的开裂状况是一致的。

从图3(b)和图4(b)看出,在工况2(梁端部腹板厚度仍为300 mm,但锚固区钢绞线设置锚固失效段)情况下,黏结应力传递集中的程度有一定缓和,局部应力有所减小.但计算的最大拉应力仍达4.77 MPa,大于混凝土抗拉强度标准值,锚固区混凝土仍会开裂.从图3(c)和图4(c)看出,在工况3(梁端部腹板厚度增加为400 mm,锚固区钢绞线未设置锚固失效段)情况下,局部应力明显减小,绝大部分拉应力小于混凝土抗拉强度,但腹板内壁个别区域的最大拉应力仍大于混凝土的抗拉强度,锚固区混凝土还存在开裂的可能.工况4为梁端部腹板的厚度增加为400 mm,同时锚固区钢绞线设置锚固失效段.从图3(d)和图4(d)可看出,混凝土局部应力和最大拉应力比工况3进一步减小,所有拉应力均小于混凝土抗拉强度,此种工况下锚固区混凝土已不会开裂,可作为采取防止梁端开裂措施的依据。

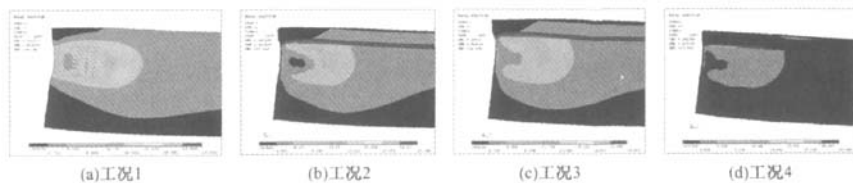


图3 4种工况下箱梁腹板锚固区应力分布

Fig.3 Stress distribution in strand anchorage zone of web at four working states

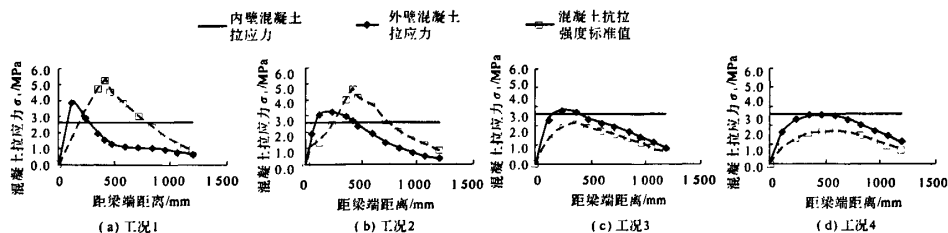


图4 4种工况下箱梁腹板钢绞线锚固区混凝土拉应力

Fig.4 Tensile stress of concrete in strand anchorage zone at four working states

### 3 防止钢绞线锚固区混凝土开裂的措施

由前面对钢绞线锚固区混凝土应力状态的分析可以看出,适当增大端部腹板厚度,设置钢绞线锚固失效段,即采用工况4的方案是防止箱梁腹板钢绞线锚固区混凝土因局部应力过大而开裂的有效措施之一.在此基础上对原设计35 m箱梁端部进行了局部修改,将梁端2 m范围内腹板厚度由原设计300 mm增大为400 mm,在腹板第3,5,7排钢绞线端部设置锚固失效段,并适当增加钢筋网片,以防止锚固区的混凝土开裂.

为验证局部修改后的35 m折线先张预应力混凝土箱梁钢绞线锚固区混凝土的抗裂性能,在改进后的箱梁钢绞线放张以前,在梁端腹板内外壁沿钢绞线方向距梁端100,600,1100 mm处粘贴3组电阻应变片(图5),测量钢绞线放张后锚固区混凝土的最大拉应变,计算混凝土相应的最大拉应力,并与计算结果进行比较.

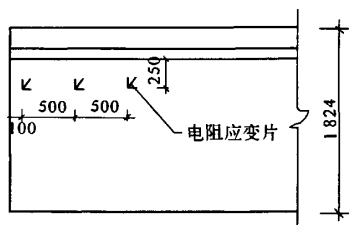


图5 梁端部电阻应变片

Fig.5 Electrical strain gages at strand anchorage zone

图6和图7分别为根据实测混凝土最大拉应变计算得到的钢绞线锚固区腹板外壁、内壁混凝土

土最大拉应力与有限元分析结果的对比.图中混凝土的拉应力 $\sigma_t$ 是根据实测混凝土的最大拉应变,按照GB 50010—2002《混凝土结构设计规范》附录C的规定按下式计算得到的<sup>[7]</sup>:

$$\frac{\sigma_t}{f_{tk}} = 1.2 \left( \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}} \right) - 0.2 \left( \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t0}} \right)^6 \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_t$ 为实测混凝土最大拉应变; $\varepsilon_{t0}$ 为混凝土达到抗拉强度时的峰值应变; $f_{tk}$ 为混凝土抗拉强度标准值.

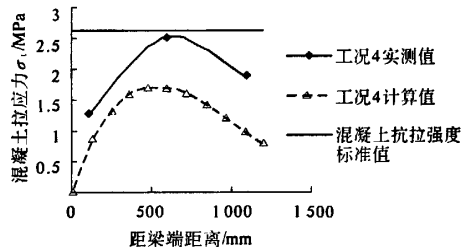


图6 外壁混凝土拉应力的实测结果与计算结果的对比

Fig.6 Comparison of test tensile stress at outside of web with calculated results

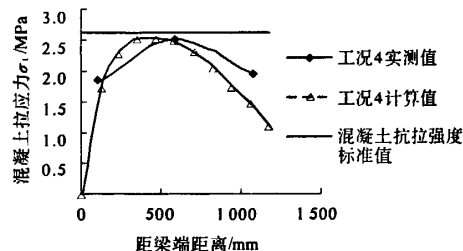


图7 内壁混凝土拉应力的实测结果与计算结果的对比

Fig.7 Comparison of test tensile stress at inside of web with calculated results

从图中可看出,改进后箱梁端部内壁和外壁混凝土拉应力实测值均在距梁端 500 ~ 600 mm 处达到最大,最大拉应力值均小于混凝土抗拉强度标准值,与有限元分析结果基本一致。

改进后的 35 m 折线先张预应力混凝土箱梁钢绞线放张后,对端部锚固区内外壁的混凝土进行观察,均未再发现裂缝(图 8),说明增大端部腹板的厚度,并设置钢绞线锚固失效段的防裂措施是有效的。在上述分析和试验的基础上,对该高速公路淮河桥全部 88 片 35 m 折线先张预应力混凝土箱梁的设计全部按照工况 4 的方案进行了修改,通车 2 年来使用情况良好。



图 8 改进后的箱梁钢绞线锚固区

Fig.8 The strand anchorage zone of modified box beam

#### 4 结论

(1) 折线先张预应力混凝土箱梁腹板锚固区钢绞线的根数较多,黏结应力的传递集中,容易引起锚固区混凝土开裂。

(2) 增大折线先张预应力混凝土箱梁端部腹

板的厚度,设置钢绞线锚固失效段是防止锚固区混凝土因局部应力过大而开裂的有效措施之一。

(3) 有限元方法对梁端局部应力的分析结果与实测结果符合较好,可作为折线先张预应力混凝土箱梁钢绞线锚固区局部应力分析方法之一。

#### 参考文献:

- [1] 冯大斌,董建伟,孟履祥. 后张预应力孔道灌浆现状[J]. 施工技术,1989,35(4):49-51.
- [2] WANG X Y, LIU L X. Experimental study on bending behavior of prestressed concrete box beam with pretensioned bent-up Tendons[C]// Proceedings of International symposium on Innovation & Sustainability of Structures in Civil Engineering. Guangzhou:South China University of Technology Press, China, 2009:436-441.
- [3] 谢丽丽. 先张法预应力混凝土钢绞线预应力传递长度的试验研究[J]. 建筑科学,2007(5):34-36.
- [4] 于秋波,刘立新,等. HRB500 级钢筋用于先张预应力梁的非预应筋的试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2009,35(1):6-10.
- [5] 刘立新,刘中琦. 螺旋肋钢丝(PC棒)预应力传递长度的试验研究[J]. 郑州大学学报:工学版,2009,30(4):11-14.
- [6] 中华人民共和国交通部. JTG D62—2004 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [7] 中华人民共和国建设部. GB 500102—2002 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

### Study on Local Stress of Strand Anchorage Zone for Prestressed Concrete Box Beams with Pre-tensioned Bent-up Tendons

LIU Li-xin, WANG Xin-yu

(School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to prevent concrete cracking at strands anchorage zone of prestressed concrete box beams of 35 m span with bent-up tendons in the bridge across Huaihe River, the analysis results on local stress at strand anchorage zone for 4 working states with different web thickness and different strand anchorage loss length for the box beams are given. The results show that local stress of concrete at strand anchorage zone may decrease obviously applying the measures of working state 4 that the thickness of web at the end is increased from 300 mm to 400 mm and the anchorage loss length of partial stands should be set. The measures increasing the web thickness and setting the anchorage loss length of strands at the end of beam to prevent concrete cracking are suggested and verified by the measurement results in practical engineering.

**Key words:** prestressed concrete; pre-tension method; bent-up tendons; anchorage zone; local stress