

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2024.05.057

# 装配式桥梁预埋钢绞线吊环受力性能试验研究

刘佳<sup>1</sup>,李承志<sup>1</sup>,白植鹏<sup>1</sup>,杨陈伟<sup>1</sup>,赵俊亮<sup>2</sup>

(1.浙江瓯越交建科技股份有限公司,浙江温州 325000; 2.温州大学,浙江温州 325035)

**摘要:**针对装配式桥梁预制件的预埋钢绞线吊环受力性能展开试验研究。考虑吊环形状、埋置深度、是否设置P锚等参数,共设计制作了6个不同的钢绞线吊环,通过拔出试验对钢绞线吊环的力学性能进行了测试。试验结果表明,钢绞线与混凝土黏结强度较低,很难充分发挥其抗拉强度;在钢绞线埋置端设置P锚和锚固钢板,可大幅提高其承载力并减小埋置深度。此外,对某高速公路130t预制桥墩在原位竖直起吊、放倒和扶直等过程中钢绞线吊环的应变进行测试,验证了预埋钢绞线吊环的安全性,指出了钢绞线吊环受力的不均性特性,并对实际工程吊环设计提出优化建议。

**关键词:**钢绞线吊环;吊点;拉拔;桥梁预制件;吊装

**中图分类号:**U445.47+1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-7716(2024)05-0244-04

## 0 引言

快速桥梁建设是当前世界桥梁建设的重要发展方向之一<sup>[1]</sup>,其核心思想是采用装配式建造技术加快桥梁现场施工速度。在我国,绝大多数中小跨径桥梁的上部结构已经实现标准化设计和装配式建造,如常规的预制预应力混凝土T梁、空心板、小箱梁、π型梁等。除上部结构外,装配式桥墩、盖梁和承台也逐步得到发展和应用。不同于装配式建筑结构,装配式桥梁预制件的尺寸和自重通常更大,对现场吊装设备和吊具的要求也更高。

吊装设备与桥梁预制件的连接可采用钢丝绳兜底和预埋吊环连接等方法。兜底吊装在钢丝绳和预制件边角接触的地方容易发生混凝土掉角现象,影响预制件的外观,且钢丝绳长期弯折也容易引发脱落和断裂等风险。预埋吊环吊装具有吊点位置确定、受力明确、不易脱落等优点。预埋吊环通常可采用HPB300钢筋或者预应力钢绞线制作。对大吨位桥梁预制件,通常首选预埋钢绞线吊。

国内外学者对钢绞线与混凝土之间的黏结、锚固、搭接等进行了众多试验研究和理论分析<sup>[2-6]</sup>。我国《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)<sup>[7]</sup>和

《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)<sup>[8]</sup>给出了钢绞线与混凝土之间的黏结强度和锚固长度的计算方法。程佳佳等<sup>[9]</sup>对设置八字型铝扣和U型玛钢卡扣的钢绞线的锚固性能进行了研究。工程实践中,通常在钢绞线吊环埋置端设置P锚和锚固钢板,以减小其锚固长度。我国最新颁布的《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365—2022)<sup>[10]</sup>附录A对预埋钢绞线吊环的设计和构造给出了明确规定。在此之前,钢绞线吊环的设计则更多依据经验进行。

本文以实际工程为背景,通过拔出试验对预埋钢绞线吊环的受力性能进行研究,并对某高速公路130t重真实桥墩预制件进行原位起吊、放倒、扶直等模拟操作,验证了钢绞线吊环的安全性。

## 1 钢绞线吊环拔出试验

### 1.1 试验方案

设计制作一个截面尺寸2m×2m、高1.5m的混凝土桥墩节段,在节段顶部埋置6个钢绞线吊环,如图1所示。所有吊环均采用强度等级1860MPa的φ15.2钢绞线加工制作。6个吊环具体参数见表1,研究参数包括吊环形状(直线形、U形)、埋置深度(400mm、800mm)、埋置端是否设置P锚等。对3#、4#、6#吊环,埋置端设置了P锚,并在P锚上安装平面尺寸80mm×80mm、厚10mm的锚固钢板。浇筑前U形吊环如图2所示。不同吊环中心距离为550mm,确保不发生相互影响。

收稿日期:2023-07-06

基金项目:温州市科技局基础性工业科技项目(G20210026);浙江省自然科学基金探索项目(LY21E080003)

作者简介:刘佳(1989—),男,本科,工程师,从事桥梁预制构件生产与研发工作。

通信作者:赵俊亮(1986—),男,博士,副教授,主要从事土木工程新材料新结构研究工作。电子信箱:zhaojunliang@wzu.edu.cn

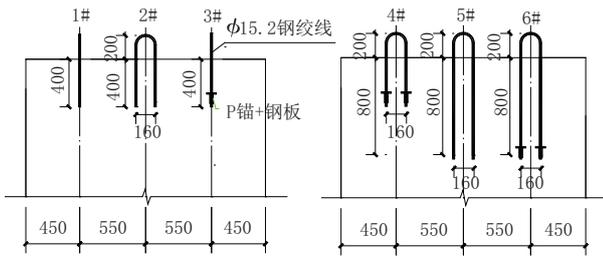


图1 试验试件吊环布置(单位:mm)

表1 预埋吊环参数

编号	钢绞线形状	埋置深度/mm	有无P锚
1#	直线形	400	无
2#	U形	400	无
3#	直线形	400	有
4#	U形	400	有
5#	U形	800	无
6#	U形	800	有

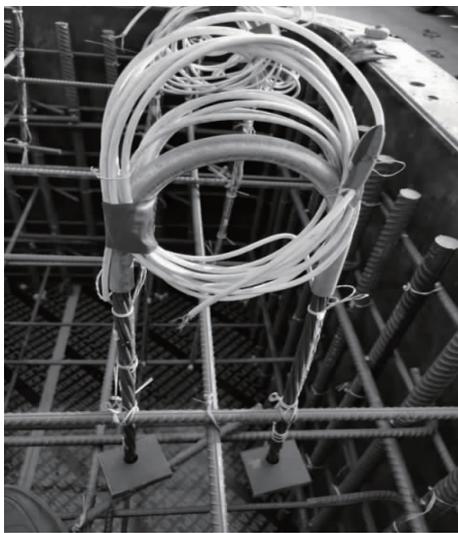


图2 U型钢绞线吊环

吊环拔出试验采用300 t穿心千斤顶和专门设计的反力架进行,加载装置如图3所示,反力架两支点远离钢绞线根部,防止反力架局部压力影响吊环承载力。对直线型钢绞线,采用工作锚具固定后直接进行拔出试验。对U型钢绞线吊环,则通过另外两根U型钢绞线套扣后与千斤顶进行连接。加载时,采用电子百分表测量钢绞线根部与混凝土顶面之间的相对滑移。试验时,混凝土立方体抗压强度平均值为54.8 MPa。

### 1.2 试验结果

根据拉拔试验结果,没有P锚的1#、2#、5#吊环荷载-滑移曲线如图4所示。其中,1#吊环在拉拔初期,荷载增长速度较快,产生明显滑移后承载力增长渐趋缓慢。当钢绞线根部滑移达到28.5 mm时,试验停止,最大拉力为127 kN。2#吊环的初始刚度和滑



图3 拉拔试验装置

移后的二次刚度均远大于1#吊环。当滑移达到11.74 mm时,吊环承载力为312 kN左右,试验停止。5#吊环加载过程中,由于U型吊环局部变形引起钢绞线根部百分表转动,根部滑移数据异常。当最大荷载达到306 kN时,吊环顶部由于过大的局部弯曲变形,出现断丝,并听到断裂声,随后试验停止。

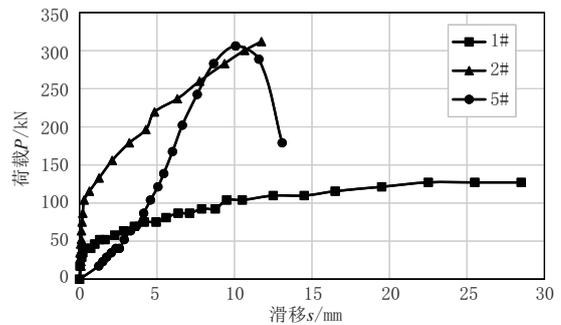


图4 无P锚吊环荷载-滑移曲线

有P锚的3#、4#、6#吊环试验结果如图5所示。其中,3#吊环荷载-位移曲线表现为双线性,当荷载达到254 kN左右时,承载力基本不再提高,而滑移持续增大。当最大滑移达到10 mm时,试验停止。此时的承载力约为277 kN,为钢绞线抗拉强度( $P_k=258.5$  kN)的1.074倍。试验终止时,钢绞线周围混凝土表面无明显开裂现象。4#吊环在试验荷载达到288.9 kN时,吊环顶部由U型逐渐变为V型[见图6(a)],吊环根部混凝土发生局部破碎,而后试验终止。对6#吊环,当荷载达到364 kN时,吊环根部混凝土发生局部破坏[见图6(b)],承载力出现短暂下降。之后又继续上升,混凝土破碎继续增大,而后试验终止。

### 1.3 试验结果分析

对端部未设置P锚和钢板的吊环,其承载力主

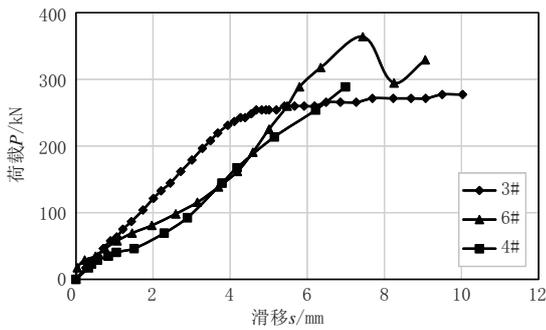
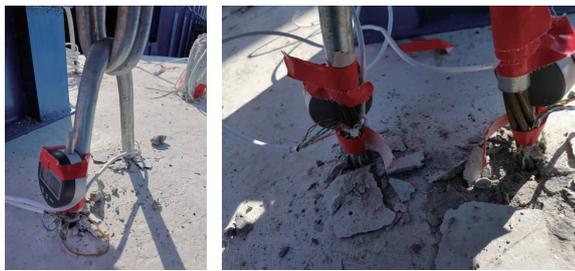


图5 有P锚吊环荷载-滑移曲线



(a)顶部局部变形 (b)根部混凝土破碎  
图6 吊环破坏形态

要来源于钢绞线与混凝土之间的黏结。钢绞线发生明显滑移之前,承载力上升较快;当钢绞线发生明显滑移后,承载力上升缓慢,荷载-滑移曲线近似为双线性曲线。在结构设计中,该类荷载-滑移曲线通常以刚度明显改变的点作为设计采用的极限状态。以1#、2#钢绞线为例,其荷载-滑移曲线局部放大图如图7所示,刚度转折点如图中圆圈所示,对应的承载力分别为34.7 kN和104 kN。此时,钢绞线与混凝土之间的平均黏结强度可按下式计算:

$$\tau_u = \frac{F}{\pi dl}$$

式中: $F$ 为拉力; $d$ 为钢绞线直径; $l$ 为钢绞线埋置长度。根据上式计算可得,1#、2#钢绞线与混凝土之间的平均黏结强度分别为1.82 MPa和2.72 MPa。若采用此黏结强度进行计算,钢绞线埋置长度需分别达到2.98 m和1.99 m,才能保证钢绞线拉断前不被拔出。显然,在实际工程中,钢绞线埋置长度很难满足上述要求。

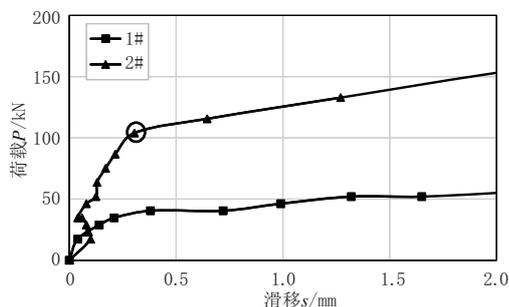


图7 1#、2#钢绞线荷载-滑移曲线极限状态

图8对比了1#和3#吊环的荷载-滑移曲线。两者均为单根直线型钢绞线,埋置长度均为400 mm,区别在于3#吊环端部设置了P锚和锚固钢板。由此可见,设置P锚后,吊环承载力提高了118%,且3#钢绞线的应力达到了1 993 MPa,甚至略高于其抗拉强度标准值(1 860 MPa)。由此可见,设置端部P锚和锚固钢板后,钢绞线吊环的锚固长度可以降至0.4 m,远小于《公路装配式混凝土桥梁设计规范》规定的1 m。

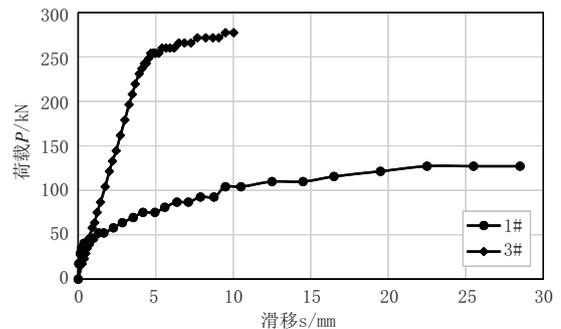


图8 P锚和锚固钢板对钢绞线承载力的影响

## 2 模拟吊装

为进一步验证钢绞线吊环的安全性,对某高速公路项目一个高13 m、截面尺寸2.0 m×2.0 m的预制桥墩进行了竖向原位起吊、放倒、扶直3个工况的模拟操作,并测试了钢绞线吊环的应变。该桥墩重量约为130 t,顶部设置2个吊环,每个吊环由5根(10肢)公称直径15.2 mm的U型钢绞线组成,钢绞线强度标准值为1 860 MPa。吊环埋置深度1 m,端部均设置P锚和锚固钢板。钢绞线吊环的设计拉应力约为468 MPa。由于本工程实施时,《公路装配式混凝土桥梁设计规范》尚未颁布,因此,钢绞线吊环的应力超出了该规范规定的350 MPa上限。

### 2.1 竖向原位起吊

原位起吊前,在每个吊环随机选择3股钢绞线的根部安装应变片,起吊采用280 t的龙门吊进行,采用2根承载力各90 t的高强度尼龙吊带与钢绞线吊环进行套扣,现场作业如图9所示。将桥墩缓缓调离地面约30 cm高度并保持静止,然后采用应变仪对应变片读数进行测量。共进行2次竖向原位起吊。第一次起吊中,测得左侧吊环最大钢绞线应变为4 346  $\mu\epsilon$ ,右侧吊环最大钢绞线应变为2 212  $\mu\epsilon$ 。取钢绞线弹性模量为195 GPa,则左、右吊环的最大应力分别为847 MPa和431 MPa。第二次起吊中,左侧吊环最大钢绞线应变为3 871  $\mu\epsilon$ ,右侧吊环最大钢绞线应变为2 288  $\mu\epsilon$ ,对应的钢绞线应力分别为



图9 竖向原位起吊



图10 桥墩放倒后钢绞线吊环变形

755 MPa 和 446 MPa。

## 2.2 桥墩放倒与扶直

本桥墩计划采用水平运输从预制厂搬运至安装现场,因此需要将其在预制场进行放倒作业。到达施工现场后,还需进行扶直作业。在放倒和扶直过程中,钢绞线吊环受力较垂直起吊更为不利,容易产生局部弯曲和应力集中。

桥墩放倒过程中,钢绞线吊环发生严重变形,与混凝土顶面不再垂直,如图10所示。左、右吊环钢绞线实测最大应变分别为  $7\ 670\ \mu\varepsilon$  和  $4\ 553\ \mu\varepsilon$ ,对应的弹性应力分别为  $1\ 496\ \text{MPa}$  和  $888\ \text{MPa}$ 。在扶直过程中,左、右吊环钢绞线最大应变分别为  $7\ 784\ \mu\varepsilon$  和  $4\ 621\ \mu\varepsilon$ ,对应的应力分别为  $1\ 518\ \text{MPa}$  和  $901\ \text{MPa}$ 。两者测量结果比较接近,钢绞线最大拉应力为  $1\ 500\ \text{MPa}$  左右。虽然小于钢绞线强度标准值  $1\ 860\ \text{MPa}$ ,但已超过钢绞线抗拉强度设计值  $1\ 260\ \text{MPa}$ 。可见,在

放倒和扶直过程中,钢绞线应力分布严重不均匀,最大应力远大于竖向起吊时的应力。在后续施工中,进一步增大了钢绞线吊环的数量,从而确保其安全性。

## 3 结语

以实际工程为背景,本文通过拔出试验,对预埋钢绞线吊环的受力性能进行了研究,并通过预制桥墩的模拟吊装,验证了预制吊环的安全性。根据本文研究,得到以下结论。

(1)钢绞线与混凝土之间的黏结强度很小,若不设置P锚和锚固钢板,埋置长度过大,实际工程中难以实现。

(2)设置P锚和锚固钢板可大幅提高钢绞线吊环承载力,减小其埋置长度。根据拔出试验,当埋置长度为  $400\ \text{mm}$  时,钢绞线应力达到  $1.07 f_{pk}$  而不被拔出。

(3)对U型钢绞线吊环,加载过程中,吊环顶部可能由U型变为V型,局部弯折严重,易发生断丝,吊环根部混凝土也容易发生局部挤压破碎。建议与钢绞线吊环连接的吊具应具有足够尺寸,减小钢绞线吊环的局部变形。

(4)根据对预制桥墩竖向原位起吊、放倒和扶直过程的应变监测,多根U型钢绞线吊环的受力并不均匀,尤其是放倒和扶直过程中。建议采取措施使各钢绞线长度尽可能保持一致。

### 参考文献:

- [1] 项贻强,竺盛,赵阳.快速施工桥梁的研究进展[J].中国公路学报,2018,31(12):1-27.
- [2] 徐有邻,宇秉训,朱龙,等.钢绞线基本性能与锚固长度的试验研究[J].建筑结构,1996(3):34-38.
- [3] DANG C N, MURRAY C D, FLOYD R W, et al. Analysis of bond stress distribution for prestressing strand by standard test for strand bond[J]. Engineering Structures, 2014(72):152-159.
- [4] 李立文,郭子雄,黄群贤,等.钢绞线搭接锚固性能试验[J].华侨大学学报(自然科学版),2014,35(5):592-596.
- [5] 李晓芬,刘立新,张慧鹏.先张法预应力钢绞线锚固长度试验研究[J].建筑结构,2015,45(15):102-105.
- [6] 谢新莹,周威,王宇扬.钢绞线混凝土黏结性能试验与锚固长度分析[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(12):81-88.
- [7] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
- [8] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [9] 程佳佳,何明胜,李玉成,等.不同锚具锚固高强度钢绞线性能的分析[J].石河子大学学报(自然科学版),2020,38(2):199-205.
- [10] JTG/T 3365—2022,公路装配式混凝土桥梁设计规范[S].