

全体外预应力桥无黏结钢绞线体外索关键技术试验研究

赵靖钊, 谢正元, 莫钊, 邓昱, 罗春林, 王强, 陆劲红, 石昌昌

(柳州欧维姆机械股份有限公司, 广西 柳州 545006)

摘要:针对芜湖长江二桥对体外索越来越高的安全性及耐久性要求,开展了多项创新性关键技术试验研究:带转向器 80 MPa 应力幅双向疲劳性能试验、带转向器静载性能试验、转向段护套抗磨损性能试验,开发出一套满足全体外预应力桥梁要求的高性能无黏结钢绞线体外索体系,该体系各项性能优于国内外同类产品,可确保全体外预应力桥梁结构的安全性及耐久性。

关键词:全体外预应力;无黏结钢绞线体外索;关键技术性能;带转向器 80 MPa 应力幅双向疲劳性能

1 引言

芜湖长江二桥是全体外预应力混凝土桥梁,由于该结构具备经济、建造速度快、易于把握施工质量、后期监测和维护方便等特点,发展潜力巨大,市场应用前景广阔。

全体外预应力桥梁结构自重和动荷载全部由体外索承担,它的结构特点决定了对体外索的疲劳性和耐久性要求远远高于传统预应力桥梁。传统体外索技术如静载及疲劳性能只能在一个轴向直线维度进行,无法真实反映桥梁实际工况。特别是体外索带转向器 80 MPa 应力幅双向疲劳性能等关键性能研究几近空白,未取得突破性进展,无法满足现代全体外预应力桥梁结构的要求。

该文针对芜湖长江二桥对体外索越来越高的安全性及耐久性要求,开展了多项创新性关键技术试验研究:带转向器 80 MPa 应力幅双向疲劳性能研究、带转向器静载性能研究、转向段护套抗磨损性能研究,开发出一套满足全体外预应力桥梁要求的高性能无黏结钢绞线体外索体系。

2 关键技术试验研究

体外索体系包括锚具、无黏结钢绞线、转向器、减振装置等组件(图 1),在国外一些规范中对体外预应

力体系的关键性能做了一些规定,如在欧洲规范 ET-AG 013 中,对锚具的静载和疲劳性能的要求做了规定,对转向部位仅提出了转向器的静载强度性能和预应力材料静载下的转向磨损性能要求。而体外预应力体系包含了预应力筋的弯曲、锚具和转向器双向组合疲劳、疲劳磨损等特性,是一个整体的性能要求,在 ETAG 013 规范中其关键技术性能指标都是对单个特性要求而言,未体现出整体性的要求,不能真正体现桥梁的实际工况。在中国,由于早期没有体外预应力技术方面的技术标准,体外索的设计大多参考国外的规范和建议,以及体内预应力国家标准 GB/T 14370《预应力筋用锚具、夹具和连接器》,该标准仅规定了锚具的静载强度和疲劳性能要求,而且只针对预应力筋都是轴向直线的情况,锚固单元仅承受一个方向的静动荷载,未考虑实际工况中索体、锚具、转向器是作为一个整体来承受静动荷载的复杂因素。而体外索桥梁实际工况是转向器、弯曲的预应力筋、锚具作为一个整体来承受桥梁的动静荷载,体系整体的静载、疲劳、磨损等性能才是保证桥梁结构安全及寿命的关键技术。

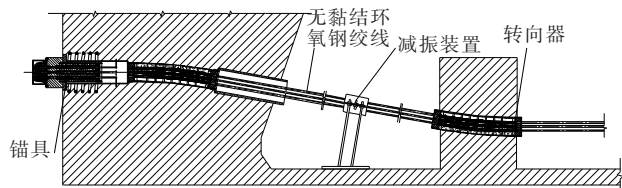


图 1 体外索体系结构组成图

因此,在当时国内外规范中,对体外索体系的性能要求不全面,也无法满足全体外预应力桥梁结构对体外索体系提出的越来越高的安全性及耐久性要求。

综上所述,为了使体外索满足全体外预应力桥梁设计要求,保证桥梁结构的安全及寿命,必需按体外索在桥梁中的实际使用工况进行各项性能研究,相当于把转向器、索体和锚具整个体系安装在一起进行疲劳、静载、磨损等研究,由于此类性能研究当时无任何技术规范遵循且试验方法复杂、试验装置设计难度大、对锚具锚固单元要求高,研发难度非常大。通过深入分析,大胆尝试,充分利用现有技术,自主研发试验装置,完成了大量高难度的体系性能试验研究。

2.1 带转向器 80 MPa 应力幅双向疲劳性能试验

自主开发的体外索带转向器 80 MPa 应力幅双向抗疲劳技术(图 2),解决了体外索抗疲劳性能只能一个维度进行而无法真实反映桥梁实际工况的重大技术难题,进一步提高了全体外预应力桥梁结构的安全性。该项技术是体外索体系最为关键的技术,其可靠性将直接关系到桥梁工程结构的安危。

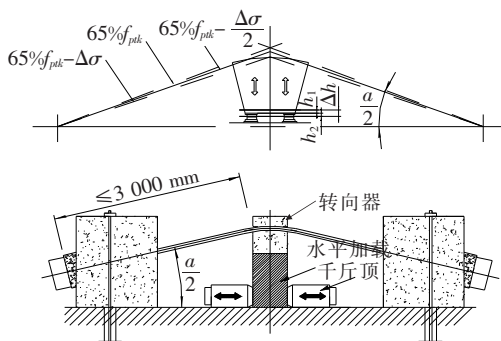


图2 带转向器 80 MPa 应力幅双向抗疲劳技术原理图

2.1.1 带转向器 80 MPa 竖向疲劳性能试验

该项性能试验是模拟体外索桥梁实际工况,在转向角度最大 10° 时,转向器上下振动使锚固单元受到 $0.65\sigma_b$ 应力上限, 80 MPa 应力幅的疲劳荷载作用下,经 200 万次循环后索、转向器及锚具组装件的综合疲劳性能。

按图 3 将传感器、千斤顶、转向器、钢绞线等试件安装在试验台上,以约 100 MPa/min 的加载速度,使钢绞线束的张拉应力达到 $65\% f_{pst} - \Delta\sigma/2$ 后,记录转向器的初始位置;将转向器从初始位置降低高度 h_1 ,使钢绞线的张拉应力达到试验上限值 $65\% f_{pst}$,记录转向器的上限位置;将转向器从初始位置抬起高度 h_2 ,使钢绞线的张拉应力降到试验下限值 $65\% f_{pst} - \Delta\sigma$,记录转向器的下限位置(图 4);转向器在上下限位

置 Δh 之间进行循环移动 200 万次,频率不超过 3 Hz。

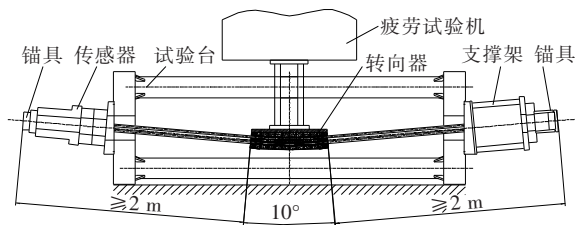


图3 试件安装示意图

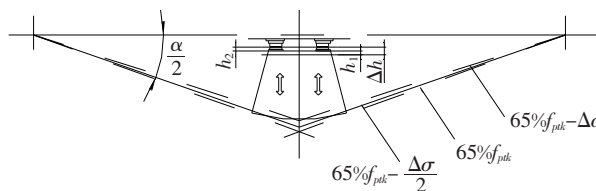


图4 试件加载示意图

试验结果:① 钢绞线经 200 万次疲劳后未断丝;② 转向段处钢绞线护套的最小残余厚度为初始厚度的 93%;③ 试验后,锚板未发生变形、开裂现象,夹片未发生开裂,牙型完好;④ 转向器试验后切开未发现破坏,塑料分丝管无磨损现象。

试验表明无黏结钢绞线体外索体系满足交通部标准 JT/T 853—2013 要求,即上限 $0.65\sigma_b$,应力幅值为 80 MPa,经 200 万次后:① 钢绞线疲劳破坏的截面面积不大于试件总面积的 5%;② 转向段处钢绞线护套的最小残余厚度不小于初始厚度的 50%;③ 转向器、锚具组件没有疲劳破坏。

此项性能是模拟车辆经过桥梁时,转向器会上下位移,索力通过转向器的上下振动传递给锚固单元,锚固单元不仅要承受沿索方向的纵向拉力,还要承受横向力,其受力复杂,对锚固单元的要求相当高。无黏结钢绞线(单丝涂覆环氧和镀锌)体外索体系此项性能达到 80 MPa,而填充型环氧体外索体系仅达到 50 MPa,此项性能是体外索体系最为关键的技术,其可靠性将直接关系到桥梁工程结构的安危,无黏结钢绞线体系优于填充型环氧钢绞线体系。

2.1.2 带转向器水平向疲劳性能试验

该项性能主要是研究索体在转向器水平位移时,索、转向器及锚具组装件的抗疲劳性能及索体保护层的抗磨损性能。

按图 5 组装图将转向器、钢绞线、锚具等试件安装在试验台上;将钢束张拉至极限拉力标准值的 65%;利用千斤顶循环水平位移加载,加载频率不超过 10 Hz,水平位移不小于 2 mm,循环次数不小于 200 万次。

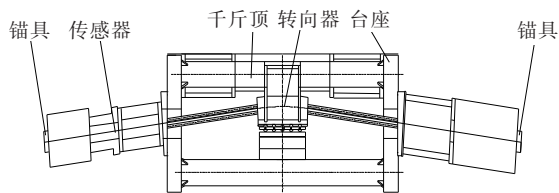


图 5 试件安装示意图

试验结果:① 钢绞线经 200 万次疲劳后未断丝;② 转向段处钢绞线护套的最小残余厚度为初始厚度的 71%;③ 试验后,锚板未发生变形、开裂现象;夹片未发生开裂现象,牙型完好。

试验表明无黏结钢绞线体外索体系满足国家标准 GB/T 30827—2014 要求,即持荷载 $0.65\sigma_b$,水平位移循环加载,水平位移幅度不小于 2 mm,经 200 万次后:① 钢绞线疲劳破坏的截面面积不大于试件总面积的 5%;② 转向段处钢绞线护套的最小残余厚度不小于初始厚度的 50%;③ 转向器、锚具组件没有疲劳破坏。

此项试验是模拟车辆经过桥梁时索在转向器部位产生水平位移,索力是通过转向器的水平位移传递给锚固单元,锚固单元不仅承受纵向拉力,还要承受横向力,同时索体外保护层还要能抵抗转向器水平位移产生的微动磨损。据资料显示,目前中国国内同类产品仅无黏结钢绞线体外索对此项性能有要求,填充型钢绞线体系对此项性能无要求。

2.2 带转向器静载性能试验

该项试验主要是研究转向角度为 10° 时,索、转向器及锚具组装件的静载性能。

按图 6 将传感器、千斤顶、转向器、钢绞线等试件安装在试验台上;按钢绞线抗拉强度标准值 f_{ptk} 的 20%、40%、60%、80% 逐级对钢绞线进行加载,每级加载使钢绞线相对转向器的位移不少于 200 mm,达到 $80\% f_{ptk}$ 时持荷 1 h;以最大应变不超过 0.002/min 的速率缓慢加载,直至破坏,实测总应变 ϵ_{apu} 、极限拉力 F_{apu} 及失效形式。

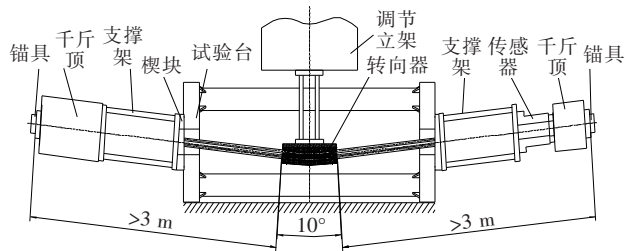


图 6 试验安装图

试验结果:① 试验实测总应变 $\epsilon_{apu} \geq 2\%$,极限拉

力 $F_{apu} \geq 95F_{pm}$;② 试验过程中每级钢绞线与转向器的相对位移均不小于 200 mm,夹片/钢绞线回缩量随力值同步变化,持荷后保持稳定;③ 加载至极限拉力时失效形式为钢绞线为颈缩破坏;④ 试验后,锚板未发生变形、开裂现象;夹片未发生开裂现象,牙型完好;⑤ 试验后切开转向器未发现破坏,塑料分丝管无磨损现象。

根据试验结果,无黏结钢绞线体外索体系带转向器静载性能满足 GB/T 30827—2014《体外预应力索技术条件》和 JT/T 853—2013《无黏结钢绞线体外预应力束》要求,即: $\eta_a \geq 0.95$, $\epsilon_{apu} \geq 2.0\%$;失效是由钢绞线的断裂导致,而不是转向器组件的破坏导致。

2.3 转向段护套抗磨损性能试验

该项试验主要是研究索与转向器存在 2° 的安装误差时,索体外保护层的抗磨损性能。

按图 7 所示张拉,使最大张拉应力为钢绞线抗拉强度标准值 f_{ptk} 的 70%;达到最大张拉应力时,将钢绞线相对转向器移动至少 800 mm;完成位移后继续持荷 21 d;卸去应力,剖开转向器附近的束体,剖开长度不少于束体的位移量。

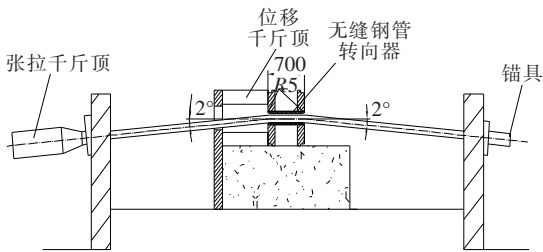


图 7 试件安装示意图(单位:mm)

试验结果:① 试验后未发生护套折断现象;护套无穿透,无油脂渗出;② 试验后转向段处钢绞线护套的最小残余厚度为初始厚度的 87%。

试验表明转向段护套抗磨损性能满足 JT/T 853—2013《无黏结钢绞线体外预应力束》和 GB/T 30827—2014《体外预应力索技术条件》要求。

3 结语

芜湖长江二桥是中国国内首座全体外预应力结构桥梁,也是世界上全体外预应力桥梁中第一座采用无黏结钢绞线体外索体系的桥梁。其结构特征决定了对体外索的安全性及耐久性要求高于传统体外索桥梁,为此,开展了多项创新性关键技术试验研究:带转向器 80 MPa 应力幅双向疲劳性能试验、带转向器静载性

上飞燕式梁拱组合桥边中跨比的合理区间分析

——以颍河大桥为例

周伟明¹, 张宜柳¹, 梁长海^{2,3}, 卢元刚^{2,3}, 李龙^{2,3}

(1. 中铁二十四局集团安徽工程有限公司, 安徽 合肥 230011; 2. 安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司;
3. 公路交通节能环保技术交通运输行业研发中心)

摘要:以安徽省颍河大桥为背景,通过对不同边跨长度的上飞燕式梁拱组合桥进行有限元分析,分析边中跨比对上飞燕式梁拱组合桥受力特性的影响规律,探寻上飞燕式梁拱组合桥边中跨比的合理区间。结果表明:上飞燕式梁拱组合桥的典型受力特点是分叉区拱圈存在明显负弯矩;上飞燕式梁拱组合桥边中跨比的合理下限值受边跨支反力控制,其合理上限值受分叉区拱圈的负弯矩控制,背景桥例颍河大桥的边中跨比合理区间宜为0.267~0.395;当边中跨比取值较小时,对整体结构的内力及挠度控制较为有利;可通过对分叉区拱圈构造进行优化以提高上飞燕式梁拱组合桥边中跨比的合理上限值。

关键词:上飞燕式梁拱组合桥;边中跨比;合理区间;颍河大桥

颍河大桥为一种上飞燕式梁拱组合桥。上飞燕式梁拱组合桥又称卧龙拱,是近年来出现的一种曲线造型柔和优美、受力形式复杂的下承式异形拱桥。上飞燕式梁拱组合桥其拱圈在1/4拱附近分为两肢,主肢沿拱轴线延伸至主梁内,形成拱脚;副肢以反弯线形延伸至边跨主梁内,形成边拱。由于边拱对主拱的影响,拱圈在主副肢分叉区存在明显的负弯矩效应。上飞燕式梁拱组合桥属于梁拱组合体系结构,与中承式飞燕式拱及下承式系杆拱相比,其构造及受力特性有所不同。目前针对上飞燕式梁拱组合桥的相关研究尚不多见,任伟新、韩斐曾对该桥型的边拱线形以及边拱与主拱刚度比等结构参数做了相关研究。

而对连续梁、连续刚构桥以及常规梁拱组合桥的

相关研究表明:边中跨比的取值对结构内力及支座反力有较大影响。连续梁及连续刚构桥的边中跨比由荷载集度决定,其合理范围主要受支座设计控制,通常为0.50~0.80;上承式及中承式拱桥的边中跨比由荷载集度和边、中矢高比共同决定,其合理范围主要受拱肋线形设计控制;常规梁拱组合桥的边中跨比设计与连续梁相似,其合理范围通常为0.46~0.51。

因此,针对上飞燕式梁拱组合桥这种新颖的结构形式,其边中跨比对结构内力、挠度及支反力等方面的影响需作进一步的分析。该文以安徽省阜阳市向阳路颍河大桥为工程背景,分析边中跨比对该桥的结构关键截面内力、挠度、支反力以及结构自振频率等方面的影响。

能试验、转向段护套抗磨损性能试验,开发出一套满足全体外预应力桥梁要求的高性能无黏结钢绞线体外索体系,该体系各项性能优于国内外同类产品,满足中国相关标准要求,确保了全体外预应力桥梁结构的安全性及耐久性。

参考文献:

[1] GB/T 30827-2014 体外预应力索技术条件[S].

[2] JT/T 853-2013 无黏结钢绞线体外预应力束[S].

[3] 江焕宏. 填充型环氧涂层钢绞线体外索与转向器组合疲劳性能的试验研究[J]. 世界桥梁, 2013(2).

[4] JT/T 876-2013 填充型环氧涂层钢绞线体外预应力束[S].

[5] 王凯. 芜湖长江公路二桥引桥段上部结构设计与施工[J]. 公路交通技术, 2017(3).

[6] 殷新锋. 体外预应力桥梁转向块的受力性能分析[J]. 中外公路, 2017(5).

收稿日期: 2020-08-20(修改稿)

作者简介: 周伟明, 男, 大学本科, 高级工程师, E-mail: 378490005@qq.com