

波形钢腹板梁桥体外索张拉顺序研究

彭梦鸽

(张花高速公路连接线项目部, 湖南 永顺 416700)

摘要: 波形钢腹板梁桥是采用波形钢腹板代替传统砼腹板的一种组合桥梁, 其独特的体外预应力索体系直接影响成桥后受力状态及线形。文中以安徽芜湖市裕溪河大桥为工程背景, 通过 MIDAS/Civil 软件建立模型, 测试不同张拉顺序下体外索的索力变化, 分析预应力索张拉顺序对预应力的影响, 并通过现场张拉试验测试该桥体外索张拉过程中预应力损失情况。

关键词: 桥梁; 波形钢腹板梁桥; 体外索; 张拉顺序; 预应力损失

中图分类号: U445.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)01-0126-04

目前国内对波形钢腹板梁桥的研究还处于摸索阶段, 特别是对于体外预应力索, 还有很多问题亟待解决。该桥型采用波形钢腹板代替常用的砼腹板, 体内束布置在顶底板, 腹板束没有预应力束, 根据实际设计计算分析运用易更换的体外预应力束代替腹板束。且波形钢腹板的纵向刚度极低, 可忽略不计, 腹板对纵向顶底板收缩徐变基本不起约束作用, 使体外预应力束张拉中预应力有效提高。其体外预应力束主要用来抵抗二期恒载及活载, 故体外预应力的研究对波形钢腹板类桥型结构至关重要。体外索大多为分跨分批张拉, 后期张拉的体外索对前期张拉预应力索有卸载作用, 故荷载施加与张拉施工顺序有关。该文以安徽芜湖市裕溪河大桥为背景, 通过在体外束上设置传感器测量各张拉工况下预应力束的应力变化, 对体外索张拉顺序对预应力的影响进行分析, 为实际施工提供理论依据及技术指导。

1 工程概况

芜湖市通江大道北延线工程主桥跨越裕溪河航道, 主桥为跨径 $55\text{ m}+93\text{ m}+83\text{ m}+55\text{ m}=286\text{ m}$ 波形钢腹板连续梁桥, 平面位于直线上, 立面位于竖曲线 $R=3\ 000\text{ m}$ 的凸曲线上, 前坡、后坡分别为 2.45% 和 -3.0% 。主桥主梁采用双幅单箱三室波形钢腹板箱梁, 单幅设置单向 2.0% 横坡, 梁高采用二次抛物线变化。波形钢腹板采用国内常用的 1600 型, 波板水平幅宽 430 mm 、斜幅宽 430 mm , 斜幅水平方向长 370 mm , 波高 220 mm , 弯折半径为 $15t$ (t 为波形钢腹板厚度), 厚度分别为 12 、 16 和 20 mm 。主梁纵向体外束采用 $27\phi 15.2$ 低松弛环氧涂层钢绞线, 主梁每跨设置 8 束体外束, 两跨之间体

外束分别在中横梁处锚固。

2 体外索张拉过程分析

2.1 张拉过程有限元模型

采用通用软件 MIDAS/Civil 2015 对桥梁结构进行离散化分析, 建立主桥体外预应力分批张拉模型(见图 1), 全桥主梁划分为 587 个节点、647 个单元, 其中梁单元 487 个, 索单元 160 个。

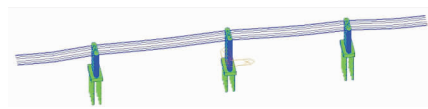


图 1 全桥体外束分批张拉有限元模型

2.2 材料特性

该桥主梁及体外索材料主要为砼、钢板、钢绞线等, 箱梁节段材料特性见表 1。

表 1 箱梁节段材料特性

材料名称	弹性模量/GPa	密度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	热膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$
Q345 钢板	205.0	76.8	0.2	1.2×10^{-5}
钢绞线	197.0	76.8	0.2	1.2×10^{-5}
C40 砼	32.5	25.0	0.2	1.0×10^{-5}
C50 砼	34.5	25.0	0.2	1.0×10^{-5}

2.3 边界条件的处理

用杆系单元模拟桥梁的上、下部结构, 模型边界条件根据结构支撑情况选择铰接、滑动支撑或固结。在考虑体外索作用时, 体外索作为桁架单元, 在与梁单元接触时, 拉索两端直接固结在支点横隔梁(端横梁)上, 但在跨中横隔板位置, 由于体外索的张拉, 只对横隔板有竖直向上的反作用力, 在体外索索单元与

主梁横隔板梁单元之间设置特殊的杆单元,并释放拉索端的杆端约束,让拉索节点可在顺桥向自由滑动。同时考虑到横梁单元采用一定截面尺寸的矩形截面模型,横梁的刚度有限,将横梁两侧端点与主梁形心用刚臂连接。体外束跨中转向块边界条件见图 2。

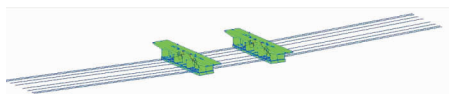


图 2 体外束跨中转向块边界条件示意图

2.4 荷载的施加

体外预应力束采用 27 ϕ 15.2 低松弛环氧涂层钢绞线,两端张拉,张拉应力为 $0.65f_{pk}$,张拉控制应力为 1 209 MPa,单束钢绞线面积为 3 780 mm²,单束张拉力为 4 570 kN。根据设计要求,体外索相对于桥梁中心线对称张拉,单跨共计 8 束,根据对称原则,一次性对称张拉 2 束,张拉顺序为由外侧向中心逐对张拉(见图 3~6)。



图 3 两端对称张拉 1#、8# 体外束(单位:kN)

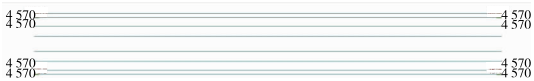


图 4 两端对称张拉 2#、7# 体外束(单位:kN)



图 5 两端对称张拉 3#、6# 体外束(单位:kN)

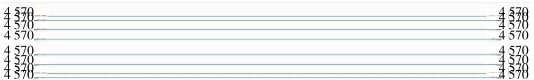


图 6 两端对称张拉 4#、5# 体外束(单位:kN)

2.5 施工工况划分

考虑到体外索为分跨分批张拉,后期张拉的体外索对前期张拉的拉索有卸载作用,荷载施加与张拉施工顺序有关。根据设计要求,体外索张拉时,先张拉边跨,再张拉中跨。张拉工况划分见表 2。

2.6 分批张拉结果分析

对体外索分别采用 4 种张拉顺序:第 4 跨→第 1 跨→第 3 跨→第 2 跨(41→32);第 1 跨→第 4 跨→第 2 跨→第 3 跨(14→23);第 2 跨→第 3 跨→第 1 跨→第 4 跨(23→14);第 3 跨→第 2 跨→第 4 跨→第 1 跨(32→41)。限于篇幅,仅对张拉顺序为 41→32 时 P24~P25 跨体外索的索力变化(见表 3)进行分析。由表 3 可知:8 束体外索分 4 批对称张拉,同跨的体外索影响较大,第 4 批张拉完成时,第 1 批的索力损失量最大为 1.2%,出现在第 4 跨(P24~P25 跨),说明体外索分批张拉,索力的损失量与张拉顺序有关。

表 2 张拉工况划分

施工阶段	阶段工期/d	累计工期/d	施工内容
一次成桥	270	270	上、下部结构一次成型
张拉第 4 跨 1#、8# 钢束	2	272	张拉 P24~P25 跨 1#、8# 钢束
张拉第 4 跨 2#、7# 钢束	2	274	张拉 P24~P25 跨 2#、7# 钢束
张拉第 4 跨 3#、6# 钢束	2	276	张拉 P24~P25 跨 3#、6# 钢束
张拉第 4 跨 4#、5# 钢束	2	278	张拉 P24~P25 跨 4#、5# 钢束
张拉第 1 跨 1#、8# 钢束	2	280	张拉 P21~P22 跨 1#、8# 钢束
张拉第 1 跨 2#、7# 钢束	2	282	张拉 P21~P22 跨 2#、7# 钢束
张拉第 1 跨 3#、6# 钢束	2	284	张拉 P21~P22 跨 3#、6# 钢束
张拉第 1 跨 4#、5# 钢束	2	286	张拉 P21~P22 跨 4#、5# 钢束
张拉第 3 跨 1#、8# 钢束	2	288	张拉 P23~P24 跨 1#、8# 钢束
张拉第 3 跨 2#、7# 钢束	2	290	张拉 P23~P24 跨 2#、7# 钢束
张拉第 3 跨 3#、6# 钢束	2	292	张拉 P23~P24 跨 3#、6# 钢束
张拉第 3 跨 4#、5# 钢束	2	294	张拉 P23~P24 跨 4#、5# 钢束
张拉第 2 跨 1#、8# 钢束	2	296	张拉 P22~P23 跨 1#、8# 钢束
张拉第 2 跨 2#、7# 钢束	2	298	张拉 P22~P23 跨 2#、7# 钢束
张拉第 2 跨 3#、6# 钢束	2	300	张拉 P22~P23 跨 3#、6# 钢束
张拉第 2 跨 4#、5# 钢束	2	302	张拉 P22~P23 跨 4#、5# 钢束

表 3 P24~P25 跨体外索的索力

施工阶段	体外索索力/kN							
	1 [#] 束	2 [#] 束	3 [#] 束	4 [#] 束	5 [#] 束	6 [#] 束	7 [#] 束	8 [#] 束
张拉第 4 跨 1 [#] 、8 [#] 钢束	4 570							4 570
张拉第 4 跨 2 [#] 、7 [#] 钢束	4 552	4 570					4 570	4 552
张拉第 4 跨 3 [#] 、6 [#] 钢束	4 535	4 551	4 570			4 570	4 551	4 535
张拉第 4 跨 4 [#] 、5 [#] 钢束	4 517	4 532	4 546	4 570	4 570	4 546	4 532	4 517
张拉第 1 跨 1 [#] 、8 [#] 钢束	4 517	4 532	4 546	4 570	4 570	4 546	4 532	4 517
张拉第 1 跨 2 [#] 、7 [#] 钢束	4 517	4 532	4 546	4 570	4 570	4 546	4 532	4 517
张拉第 1 跨 3 [#] 、6 [#] 钢束	4 517	4 532	4 546	4 570	4 570	4 546	4 532	4 517
张拉第 1 跨 4 [#] 、5 [#] 钢束	4 517	4 532	4 546	4 570	4 570	4 546	4 532	4 517
张拉第 3 跨 1 [#] 、8 [#] 钢束	4 517	4 532	4 546	4 570	4 570	4 546	4 532	4 517
张拉第 3 跨 2 [#] 、7 [#] 钢束	4 517	4 533	4 547	4 570	4 570	4 547	4 533	4 517
张拉第 3 跨 3 [#] 、6 [#] 钢束	4 517	4 534	4 550	4 572	4 572	4 550	4 534	4 517
张拉第 3 跨 4 [#] 、5 [#] 钢束	4 517	4 534	4 552	4 575	4 575	4 552	4 534	4 517
张拉第 2 跨 1 [#] 、8 [#] 钢束	4 517	4 534	4 552	4 575	4 575	4 552	4 534	4 517
张拉第 2 跨 2 [#] 、7 [#] 钢束	4 517	4 534	4 552	4 575	4 575	4 552	4 534	4 517
张拉第 2 跨 3 [#] 、6 [#] 钢束	4 517	4 534	4 552	4 575	4 575	4 552	4 534	4 517
张拉第 2 跨 4 [#] 、5 [#] 钢束	4 517	4 534	4 552	4 575	4 575	4 552	4 534	4 517
索力差/kN	-53	-38	-24	-5	-5	-24	-38	-53
索力损失量/%	-1.2	-0.8	-0.5	-0.1	-0.1	-0.5	-0.8	-1.2

分别统计 4 种张拉顺序下的成桥索力,结果见表 4。由表 4 可知:采用先张拉边跨、再张拉中跨的工序时,41→32 与 14→23 两种张拉顺序的成桥索力差异很小,最大偏差 4 kN,可忽略;采用先张拉中跨、再张拉边跨的工序时,23→14 与 32→41 两种张

拉顺序的成桥索力差异很小,最大偏差 5 kN,可忽略。先边跨后中跨、先中跨后边跨张拉顺序的成桥索力差异也较小,其中 P21~P22、P22~P23、P23~P24 跨的索力基本一致,最大偏差 6 kN,P24~P25 跨的最大偏差为 13 kN,影响都在 0.3%以内。

表 4 不同张拉顺序下的成桥索力

桥跨编号	张拉顺序	成桥索力/kN							
		1 [#] 束	2 [#] 束	3 [#] 束	4 [#] 束	5 [#] 束	6 [#] 束	7 [#] 束	8 [#] 束
P21~P22	41→32	4 519	4 537	4 557	4 575	4 575	4 557	4 537	4 519
	14→23	4 519	4 537	4 557	4 575	4 575	4 557	4 537	4 519
	23→14	4 519	4 535	4 551	4 571	4 571	4 551	4 535	4 519
	32→41	4 524	4 540	4 556	4 576	4 576	4 556	4 540	4 524
P22~P23	41→32	4 523	4 537	4 552	4 570	4 570	4 552	4 537	4 523
	14→23	4 524	4 540	4 557	4 573	4 573	4 557	4 540	4 524
	23→14	4 524	4 541	4 560	4 576	4 576	4 560	4 541	4 524
	32→41	4 523	4 539	4 556	4 573	4 573	4 556	4 539	4 523
P23~P24	41→32	4 522	4 539	4 556	4 574	4 574	4 556	4 539	4 522
	14→23	4 522	4 536	4 552	4 570	4 570	4 552	4 536	4 522
	23→14	4 522	4 538	4 555	4 573	4 573	4 555	4 538	4 522
	32→41	4 522	4 540	4 560	4 577	4 577	4 560	4 540	4 522
P24~P25	41→32	4 517	4 534	4 552	4 575	4 575	4 552	4 534	4 517
	14→23	4 517	4 534	4 552	4 575	4 575	4 552	4 534	4 517
	23→14	4 530	4 545	4 559	4 583	4 583	4 559	4 545	4 530
	32→41	4 530	4 544	4 556	4 580	4 580	4 556	4 544	4 530

根据各种工序下的索力偏差率,各跨张拉顺序的影响均在 0.3%以内,可忽略;先中跨后边跨的张拉顺序优于先边跨后中跨的张拉顺序。但同跨之间的分批张拉,第 1 批张拉的预应力损失达 1.2%,不能忽略。可采取第 1 批张拉超张拉 1.2%、第 2 批张拉超张拉 0.8%、第 3 批张拉超张拉 0.4%的方式进行调整,使各束成桥索力保持一致。

3 预应力损失试验分析

3.1 试验方案

在已张拉完成的体外预应力钢束上布置应力传感器,测试张拉过程中钢束的应力损失,得出体外束张拉与钢束应力损失的关系,再根据既定张拉顺序调整体外束张拉力,使成桥状态的体外束预应力满足设计要求。

试验步骤:1) 选择边跨和中箱梁中室两束体外束进行钢束应力测试,共计 4 个测试断面。2) 中间

体外束穿好后,在跨中两个转向块横隔板中间附近的合适位置选择最上层中间钢束作为测试对象。3) 安装振弦式应力计,应力计轴线与钢束轴线平行,不能有夹角。4) 单根预紧前测试各应力计的初始应变。5) 单根预紧后测试应力计的应变读数,直至该钢束预紧完成。6) 后续钢束应力测试在其他钢束张拉完成(设计的 70%)后进行。7) 全跨共计 8 束体外束,外侧两束应单独张拉,每束钢束张拉为 1 个测试工况,剩下的 6 束横向对称张拉,分为 3 个工况,全跨体外束张拉为 5 个工况。8) 选择同幅的中间跨(中跨和次中跨),重复步骤 2~7。9) 每跨体外束张拉完后测试其他各跨的应力值。

3.2 试验结果分析

选择右幅的 P21~P22、P22~P23、P23~P24 跨进行试验,分别选择中间箱室的 2 根体外索进行拉索应力测试,体外索的张拉顺序为由中间向两侧分批对称张拉,测试结果见表 5。

表 5 体外索张拉各跨应力实测结果

施工阶段	应力/ $\mu\epsilon$					
	1-1# 束	1-2# 束	2-1# 束	2-2# 束	3-1# 束	3-2# 束
应力计初始读数	398	316	306	318	337	359
张拉第 1 跨 4#、5# 钢束	5 902	5 811				
张拉第 1 跨 3#、6# 钢束	5 881	5 789				
张拉第 1 跨 2#、7# 钢束	5 859	5 767				
张拉第 1 跨 1#、8# 钢束	5 835	5 744				
张拉第 2 跨 4#、5# 钢束	5 835	5 744	5 784	5 839		
张拉第 2 跨 3#、6# 钢束	5 835	5 744	5 768	5 823		
张拉第 2 跨 2#、7# 钢束	5 835	5 744	5 752	5 808		
张拉第 2 跨 1#、8# 钢束	5 835	5 744	5 735	5 790		
张拉第 3 跨 4#、5# 钢束	5 835	5 744	5 735	5 790	5 796	5 826
张拉第 3 跨 3#、6# 钢束	5 836	5 744	5 735	5 790	5 775	5 804
张拉第 3 跨 2#、7# 钢束	5 835	5 743	5 735	5 790	5 754	5 783
张拉第 3 跨 1#、8# 钢束	5 835	5 744	5 735	5 790	5 733	5 762
应力损失/%	-1.21	-1.23	-0.89	-0.89	-1.16	-1.17

注:1-1# 和 1-2#、2-1# 和 2-2#、3-1# 和 3-2# 束分别为 P21~P22、P22~P23、P23~P24 跨的应力测点。

由表 5 可知:1) 体外索分批张拉过程中,同跨分批张拉的应力损失为 0.89%~1.23%,与理论计算结果基本一致,最大损失略大于理论计算值 1.2%。考虑到实际结构的砼弹性模量及其他因素的影响,测试结果能反映真实的分批张拉体外索索力卸载规律。在分批张拉时,可对前 3 批体外索进行超张拉,建议第 1 批体外索超张拉 1.2%、第 2 批

超张拉 0.8%、第 3 批超张拉 0.4%、第 4 批无需超张拉。2) 相邻两跨体外索张拉的影响可忽略不计。

参考文献:

[1] 王卫,张建东,段鸿杰,等.国外波形钢腹板组合梁桥的发展与现状[J].现代交通技术,2011,8(6).

状连在一起,使桥梁的人工美和互通中的自然美结合在一起,达到整体和谐、相互融合的境界。

4.2 互通桥梁的视觉设计

互通桥梁中的桥梁景物分为静态和动态,要对交通参与者产生积极的影响,需进行这两个视觉方面的设计。桥梁作为承载结构的传力途径形式,首先是作为静止景物呈现给观察者,其结构尺寸比例应和谐。如等截面连续梁的上部结构由上下平行的2条线组成,给人以轻巧简洁的感受;桥梁栏杆的线条也应采用简洁的形式;尽量减少桥墩数量,多采用独柱形式,以免桥墩的力线过于分散,让观察者找不到规律而产生零乱感。另外,观察者是从各个角度、各种视线来审视桥梁,相对于观察者,桥梁的景物又具有动态性,如果在某个角度的视觉设计不精细,都会给桥型设计带来缺憾。若桥梁比例在动态上效果不理想,应调整路线或匝道的平、纵、横设计,使结构的动静景观达到最佳效果。

5 常见问题及预防措施

匝道桥极大多数位于圆曲线或缓和曲线上,由于曲线梁在使用中会发生扭转,径向产生明显的水平位移,会导致弯桥内侧支座脱空、外侧支座损坏、伸缩缝断裂及盖梁开裂等病害。在构造上可采取下列预防措施:

(1) 调整单支座的径向预偏量。

(2) 每联曲线梁的切向对称中心点处设置固定支座,其在曲线梁中心的切线方向可以滑移,径向位移小。

(3) 调整双支座径向间距,减小扭转跨径。

(4) 合理设置径向限位措施和选用支座,曲线梁两端头支座采用纵向滑动支座、径向限位措施,对伸缩缝布置有利。

(5) 在温度等作用下外侧支座反力增加、内侧支反力减小,梁向外侧转的趋势变大,桥两端内外支座受力不均匀,常造成支座破坏,设双支座的抗扭支座可在计算的基础上适当加大吨位。

6 结语

互通立交桥设计首先要有一个清晰的设计思路和明确的设计原则,排除设计中的干扰因素,减少设计中反复推敲的时间,提高设计效率。从简单的思路考虑,先设计好路线,搭建一座结构尺寸、比例匀称的桥梁,将其放到互通中使其和自然景物协调;从繁杂的角度检查设计效果,设计的桥型怎样满足功能目标,互通的跨径、结构尺寸比例能否适应地形地物的无规律,各座桥梁的墩台布置是否有规律、与环境协调,达到美观目标;最后适当小范围修改路线设计。这样循环反复调整,直到达到预期设计目标。

互通桥梁设计时,在找到一个既经济适用,又安全美观的设计方案之前,要进行单座桥梁的功能(布孔)设计和多座桥梁的整体系统(美观造型)设计。当功能和美观出现矛盾时,保证桥型设计满足美观目标,小范围调整路线平、纵、横设计,即使路线在桥跨中穿线,使桥型设计满足功能目标。另外,应针对因桥型问题导致的病害采取适当的预防措施。

参考文献:

- [1] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].
- [2] JTG D62—2004,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [3] 杜炎德.高速公路拓宽设计方法初探[J].公路,2004(3).
- [4] 杜炎德,徐立新.沪杭甬高速公路拓宽设计方法[J].华东公路,2001(7).

收稿日期:2018-07-17

(上接第129页)

- [2] 李淑琴,陈建兵,万水,等.我国几座波形钢腹板PC组合箱梁桥的设计与建造[J].工程力学,2009,26(增刊).
- [3] 陈宜言,王用中.波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2010.
- [4] 阿帕尔,阿布都内苏里.体外预应力束施工工艺研究[J].黑龙江交通科技,2011(9).
- [5] 向中富.桥梁施工控制技术[M].北京:人民交通出版社,2007.
- [6] Yi Qiang Wang, Bing Bing Fan, Liang Li. Analysis on seismic performance of corrugated steel web continu-

ous rigid frame bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 501.

- [7] 魏俊龙.波形钢腹板体外预应力箱梁在新密溱水路大桥中的应用[J].铁道建筑技术,2014(增刊).
- [8] 王健.波纹钢腹板预应力混凝土组合箱梁桥静力性能研究[D].西安:长安大学,2014.
- [9] 杨林杰.浅谈波形钢腹板预应力混凝土箱梁的施工[J].中国水运,2010,10(11).
- [10] 张伟华,邹启勇.波形钢腹板箱梁桥的设计[J].贵州工业大学学报:自然科学版,2008,37(2).

收稿日期:2018-06-22