

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2021.08.037

弯扭作用对连续梁桥顶升的影响

范晓君, 杨 扬, 赵耽崴

(浙江省交通规划设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 连续梁结构具有重量大、刚度高的特点,对顶升改造具有较高要求,顶升过程中易产生位移不同步引起的结构弯扭,进而产生内力重分布,严重时将导致梁体开裂。以浙北地区某连续梁桥顶升作为案例,对该桥整体顶升过程中产生的裂缝进行成因、位置等具体分析,指出连续梁桥顶升应着重关注位移不同步引起的扭转变形,建议采用位移结合支反力双指标监控措施,防止顶升期间支点位移不同步引起的弯扭作用导致梁体开裂。

关键词: 梁桥顶升;连续梁桥;弯曲;扭转;位移不同步;支反力

中图分类号: U448.21+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)08-0142-06

1 概 况

内河航道提升改建过程中,对三跨预应力连续梁桥常采用顶升改建方案,该桥型重量大、刚度高,属超静定结构,施工过程中易产生位移不同步引起结构弯扭,进而产生内力重分布,严重时将导致梁体开裂,对顶升施工具有较高要求。本文以浙北地区某连续梁桥顶升作为案例,该桥整体顶升过程中,产生纵向、斜向裂缝,经过对裂缝的成因、分布等具体分析,认为连续梁桥顶升应着重关注扭转变形,建议采用位移结合支反力双指标监控措施,防止顶升期间因支点位移不同步引起梁体扭转开裂。

1.1 原桥情况

原桥为二级公路桥,设计荷载汽-20,挂-100,桥梁面宽 9.5 m,全长 470 m,主跨为 45 m+80 m+45 m 连续梁桥,上跨太湖申线西延航道(规划Ⅲ级航道通航孔 60.0 m×7.0 m),目前通航净高不足 7 m,是本次航道改建过程中的制约因素。

本桥为单箱单室变截面连续箱梁,跨中梁高 2.0 m,支点处梁高 4.6 m,箱梁自根部至跨中梁高和底板厚按二次抛物线变化。双向预应力布索,配置纵向及竖向预应力。主桥下部结构为柱式墩,基础为群桩接承台式基础。

本桥技术状况评定为 2 类,主要存在箱梁裂缝、桥面破损、混凝土剥落、表层钢筋锈胀等问题。

改建照片见图 1。

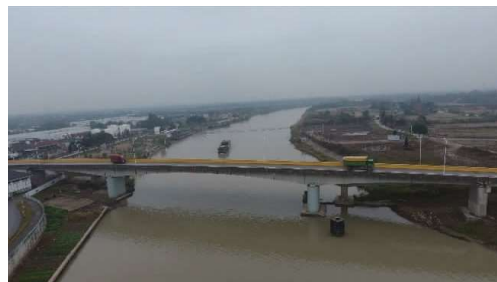


图 1 改建照片

1.2 桥梁顶升

本桥改建采用全桥整体顶升方案,抬升高度 3.0 m,改建后桥梁纵坡、竖曲线半径维持不变,主跨可满足 60 m×7 m 限制性Ⅲ级航道通航净空。

(1)千斤顶选择

本工程采用液压千斤顶与机械跟随千斤顶组合的顶升方法。顶升各墩位置均设置一组液压千斤顶,一组机械跟随千斤顶,每组安全系数均不小于 2.0,见表 1。

表 1 主桥千斤顶布置表

位置	编号	总恒载 /kN	千斤顶		最小安全系数
			顶升组 /t	跟随组 /t	
边墩	5	2 153	4×200	4×200	3.7
	6	20 875.5	16×500	20×500	3.8
主墩	7	20 875.5	16×500	20×500	3.8
	8	2 153	4×200	4×200	3.7

(2)顶升布置

连续梁主墩、边墩为柱式墩,基础为群桩接承台式基础,采用托梁整体顶升,承台作为反力基础,钢分配梁作为托换体系。传力路径为:原桥基础承台→千斤顶临时支撑→钢分配梁→上部箱梁。主墩布置 16

收稿日期: 2021-01-28

作者简介: 范晓君(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

台 500 t 顶升千斤顶,20 台 500 t 机械跟随千斤顶,墩身两侧双排布置,边墩布置 4 台 200 t 顶升千斤顶,4 台 200 t 机械跟随千斤顶,墩身主桥侧单排布置,见图 2。

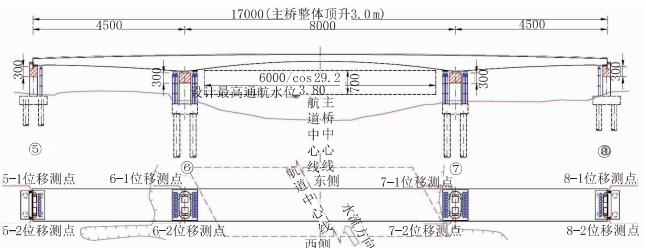


图 2 主桥顶升布置图(单位:cm)

1.3 顶升监控

顶升期间对主桥各墩进行位移监控,主墩、边墩两侧安装拉线式位移传感器,监控施工期各墩之间顺桥向位移差和同一截面处横向位移差,见图 3~图 6。根据监控报告,主墩最大横桥向不同步出现在 7 号墩,最大位移差 2.4 mm;边墩最大横桥向不同步出现在 5 号墩,最大位移差 2.0 mm,全桥各监测点间最大高差 2.5 mm。



图 3 主墩顶升施工

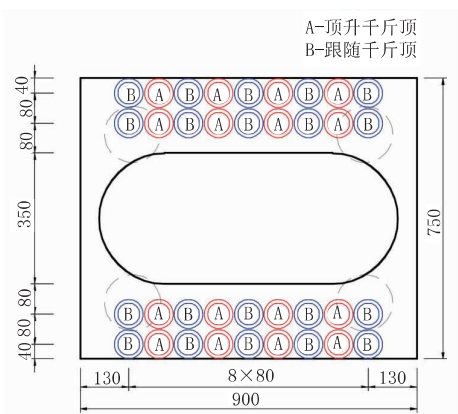


图 4 主墩千斤顶布置(单位:cm)

1.4 裂缝开展

桥梁顶升完成后,对箱梁内部进行二次检查,箱梁内部裂缝出现不同程度开展,并新增纵向、斜向裂缝,裂缝位置和分布分别详见图 7~图 9。

新增顶板下缘纵向裂缝出现位置主要集中在边墩墩部、中墩人孔和梁体 1/4 跨附近。在边墩位置,



图 5 边墩顶升施工

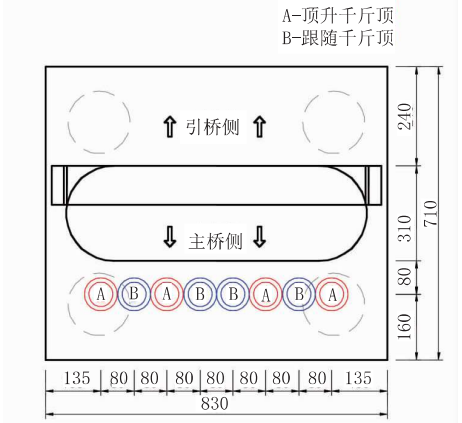


图 6 边墩千斤顶布置(单位:cm)



图 7 边跨顶板纵向裂缝(5号墩)

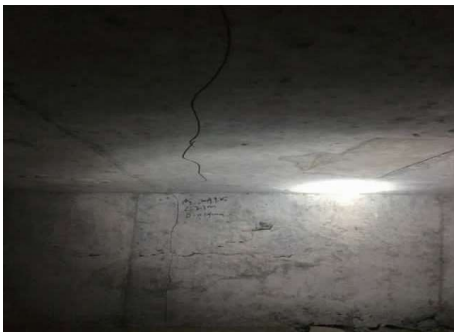


图 8 边跨顶板纵向裂缝(8号墩)

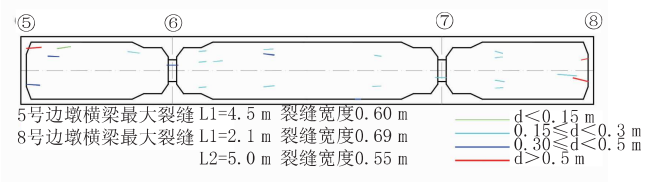


图 9 新增顶板底面纵向裂缝示意图

裂缝呈现出数量少、缝宽大、延伸长,开展深的特点,缝宽 0.30 ~ 0.60 mm,延伸长度 2.1 ~ 5.0 m;在 1/4

中跨和 1/4 边跨位置,裂缝分布均匀,裂缝宽度、延伸长度、开展深度有所下降,缝宽 0.2 ~ 0.25 mm,延伸长度 2.0 ~ 3.6 m。

新增腹板内侧斜向裂缝出现于中跨,数量较少,缝宽小,长度短。最大裂缝宽度 0.08 mm,延伸长度 0.5 m,见图 10。

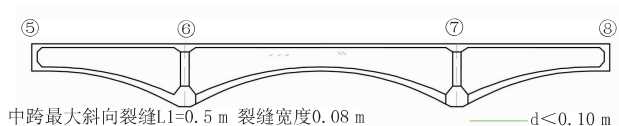


图 10 新增腹板内侧斜向裂缝示意图

2 弯扭影响分析

桥梁顶升过程中全桥处于拟静力状态,除千斤顶作用外无其他外力,由于各支点无法做到完全同步,会存在各点顶升位移偏差对结构产生弯曲、扭转。分别考虑顺桥向顶升不同步产生的弯曲效应和横桥向顶升不同步产生的扭转效应。利用空间网格模型,对结构在顶升期间各支点位移不同步情况进行分析。

2.1 空间网格模型

桥梁结构的实用精细化分析宜采用空间网格模型、折面梁格模型和 7 自由度单梁模型,其中空间网格模型是最为全面的实用精细化模型,能够全面反映箱梁腹板受力分配、薄壁效应、剪力滞效应。

(1) 模型建立

空间网格模型将箱梁离散成多块板元,每一个板元离散为十字交叉的正交梁格,以十字交叉纵横梁的刚度等效板元的刚度,箱梁由多张等效板元的网格表达。本桥对全桥进行离散,全桥共计 1 134 个纵梁单元,1 100 个横梁单元,见图 11。

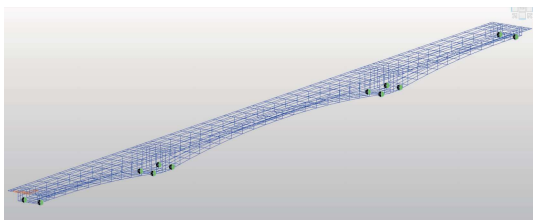


图 11 主桥建模图形

(2) 截面的划分

截面的划分,考虑结构形式,受力特性进行划分。本次设计重点对比弯曲和扭转对于箱梁各板件受力影响,因此对箱梁的顶板、底板、腹板均进行划分,箱梁顶板划分为 7 个横梁单元,腹板划分为 2 个横梁单元,底板划分为 4 个横梁单元,见图 12。

(3) 空间效应的表达

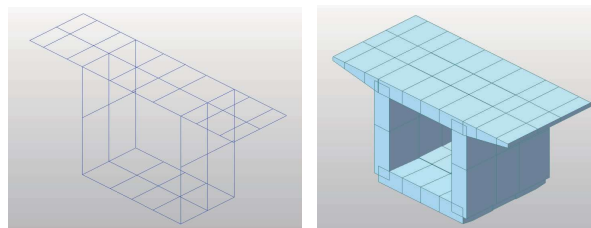


图 12 箱梁 0 号块梁格划分模型

空间网格模型将结构的轴弯剪扭复合效应,转换为划分单元的受力,分别由顶板、底板、腹板的划分单元受力叠加得到关注部位的正应力、剪应力、主应力。本次重点关注结构在弯扭作用下的影响,分别通过提取关键位置的纵、横梁单元应力,等效为顺桥向正应力、横截面剪应力,进而对结构影响进行分析。

2.2 弯曲效应

当箱梁自身截面保持水平,无结构扭转,仅考虑各墩位置顺桥向顶升不同步产生的弯曲,分别按 6 号中墩和 5 号边墩位移差 1 mm、1.5 mm、2.5 mm 计算。

(1) 纵向正应力

纵梁单元由于弯曲产生应力变化,6 号中墩位置顶升位移差 2.5 mm 时,最大应力 0.29 MPa;5 号边墩位置顶升位移差 2.5 mm 时,最大应力 0.27 MPa。具体见图 13、图 14 和表 2。

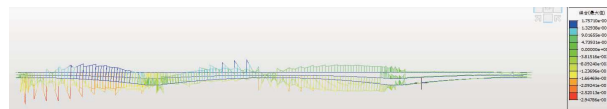


图 13 6 号中墩顺桥向位移差 2.5mm 正应力图



图 14 5 号边墩顺桥向位移差 2.5 mm 正应力图

表 2 弯曲最大正应力

正应力	位移差/mm	顶板/MPa	底板/MPa	腹板/MPa
中墩	1 mm	0.07	0.07	0.12
	1.5 mm	0.10	0.11	0.17
	2.5 mm	0.17	0.19	0.29
边墩	1 mm	0.07	0.06	0.11
	1.5 mm	0.11	0.09	0.16
	2.5 mm	0.18	0.15	0.27

(2) 横向剪应力

横梁单元由于弯曲产生应力变化,6 号中墩位置顶升纵向位移差 2.5mm 时,中横梁顶板最大剪应力 0.11 MPa,底板最大剪应力 0.35 MPa,端横梁顶板最大剪应力 0.07 MPa,底板最大剪应力 0.16 MPa。具体见图 15、图 16 和表 3。

5 号边墩位置顶升纵向位移差 2.5 mm 时,中横

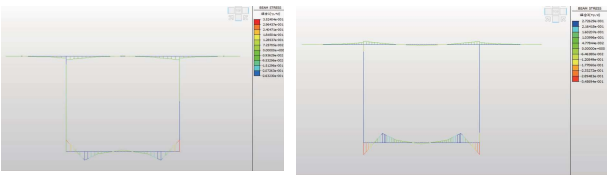


图 15 6号中墩顺桥向位移差 2.5 mm 中横梁顶底板上、下层应力图(单位:MPa)

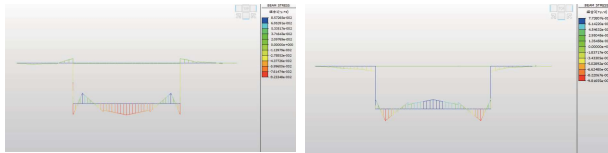


图 16 6号中墩顺桥向位移差 2.5 mm 端横梁顶底板上、下层应力图(单位:MPa)

表 3 6号中墩顺桥向弯曲最大剪应力

剪应力	位移差/mm	顶板上缘/MPa	顶板下缘/MPa	底板上缘/MPa	底板下缘/MPa	腹板外缘/MPa
中横梁	1	0.04	0.04	0.14	0.14	0.12
	1.5	0.06	0.06	0.21	0.21	0.18
	2.5	0.11	0.09	0.35	0.35	0.30
端横梁	1	0.02	0.03	0.06	0.07	0.04
	1.5	0.04	0.04	0.09	0.10	0.07
	2.5	0.06	0.07	0.15	0.16	0.11

梁顶板最大应力 0.15 MPa,底板最大应力 0.54 MPa,端横梁顶板最大应力 0.06 MPa,底板最大应力 0.15 MPa。具体见图 17、图 18 和表 4。

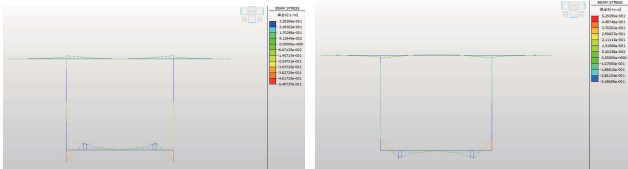


图 17 5号边墩顺桥向位移差 2.5 mm 中横梁顶底板上、下层应力图(单位:MPa)

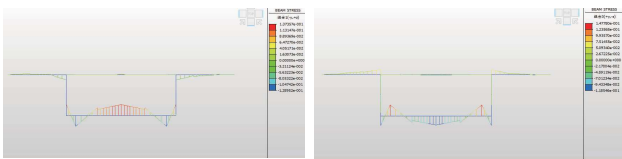


图 18 5号边墩顺桥向位移差 2.5 mm 端横梁顶底板上、下层应力图(单位:MPa)

表 4 5号边墩顺桥向弯曲最大剪应力

剪应力	位移差/mm	顶板上缘/MPa	顶板下缘/MPa	底板上缘/MPa	底板下缘/MPa	腹板外缘/MPa
中横梁	1	0.06	0.05	0.22	0.21	0.13
	1.5	0.09	0.08	0.32	0.32	0.20
	2.5	0.15	0.13	0.54	0.53	0.34
端横梁	1	0.02	0.02	0.05	0.06	0.04
	1.5	0.04	0.04	0.08	0.09	0.06
	2.5	0.06	0.06	0.14	0.15	0.10

(3)支点反力

在顺桥向弯曲作用下,随着曲率的增加,各墩支点反力变化较小,各墩位置左右支反力理论上一致,见表 5、表 6。

表 5 6号中墩顺桥向位移差作用下结构支反力

中墩变位反力	1 mm/kN		1.5 mm/kN		2.5 mm/kN	
	左	右	左	右	左	右
5号墩	1085.4	1085.4	1089.9	1089.9	1098.7	1098.7
6号墩	10423.4	10423.4	10416.3	10416.3	10401.9	10401.9
7号墩	10443.7	10443.7	10446.7	10446.7	10452.6	10452.6
8号墩	1076.2	1076.2	1076.1	1076.1	1075.7	1075.7

表 6 5号边墩顺桥向位移差作用下结构支反力

边墩变位反力	1 mm/kN		1.5 mm/kN		2.5 mm/kN	
	左	右	左	右	左	右
5	1068.2	1068.2	1063.9	1063.9	1055.5	1055.5
6	10446.6	10446.6	10451.1	10451.1	10459.9	10459.9
7	10437.4	10437.4	10437.2	10437.2	10436.7	10436.7
8	1076.6	1076.6	1076.6	1076.6	1076.5	1076.5

2.3 扭转效应

当箱梁各墩中心位置顺桥向保持同步,无整体弯曲,仅考虑各墩横桥向顶升不同步产生的扭转,根据监控数据,分别按 6 号中墩 1 mm、1.5 mm、2.5 mm,5 号边墩 1 mm、1.5 mm、2.0 mm 位移差计算。

(1)纵向正应力

纵梁单元由于扭转产生应力变化,6 号中墩位置顶升横向位移差 2.5 mm 时,最大应力 1.9 MPa;5 号边墩位置顶升横向位移差 2.0 mm 时,最大应力 0.96 MPa。具体见图 19、图 20 和表 7。

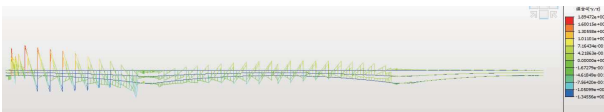


图 19 6号中墩横桥向位移差 2.5 mm 正应力图(单位:MPa)



图 20 5号边墩横桥向位移差 2.0 mm 正应力图(单位:MPa)

表 7 扭转最大正应力

正应力	位移差/mm	顶板/MPa	底板/MPa	腹板/MPa
中墩	1	0.64	0.53	0.76
	1.5	0.96	0.79	1.14
	2.5	1.60	1.32	1.90
边墩	1	0.35	0.53	0.49
	1.5	0.53	0.79	0.72
	2.0	0.71	1.06	0.96

(2)横向剪应力

横梁单元由于扭转产生应力变化,6号中墩位置顶升横向位移差 2.5 mm 时,中横梁顶板最大剪应力 1.26 MPa,底板最大剪应力 3.26 MPa,端横梁顶板最大剪应力 3.00 MPa,底板最大剪应力 4.64 MPa。具体见图 21、图 22 和表 8。

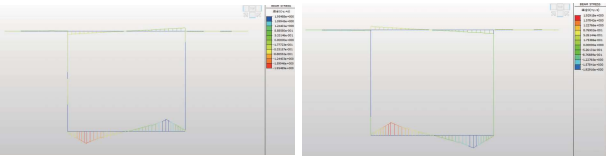


图 21 6号中墩横桥向位移差 2.5 mm 中横梁顶底板上、下层应力图(单位:MPa)

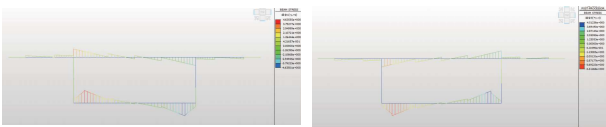


图 22 6号中墩横桥向位移差 2.5 mm 端横梁顶底板上、下层应力图(单位:MPa)

表 8 6号中墩横桥向扭转最大剪应力

剪应力	位移差 /mm	顶板	顶板	底板	底板	腹板	腹板
		上缘 /MPa	下缘 /MPa	上缘 /MPa	下缘 /MPa	外缘 /MPa	内缘 MPa
中横梁	1	0.49	0.50	1.30	1.29	0.36	0.47
	1.5	0.74	0.76	1.95	1.93	0.54	0.71
	2.5	1.24	1.26	3.26	3.22	0.9	1.19
端横梁	1	1.20	1.17	1.85	1.80	0.51	0.52
	1.5	1.80	1.75	2.78	2.71	0.77	0.78
	2.5	3.00	2.92	4.64	4.51	1.28	1.31

5号边墩位置顶升横向位移差 2.0 mm 时,中横梁顶板最大剪应力 0.48 MPa,底板最大剪应力 1.12 MPa,端横梁顶板最大剪应力 1.32 MPa,底板最大剪应力 1.22 MPa。具体见图 23、图 24 和表 9。

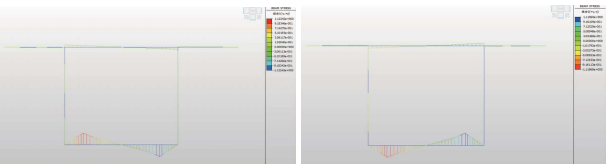


图 23 5号边墩横桥向位移差 2.0 mm 中横梁顶底板上、下层应力图(单位:MPa)

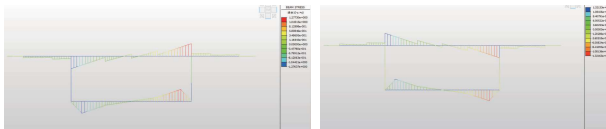


图 24 5号边墩横桥向位移差 2.0 mm 端横梁顶底板上、下层应力图(单位:MPa)

(3)支点反力

在横桥向扭转作用下,随着扭转角的增加,各墩

表 9 5号边墩横桥向扭转最大剪应力

剪应力	位移差 /mm	顶板	顶板	底板	底板	腹板	腹板
		上缘 /MPa	下缘 /MPa	上缘 /MPa	下缘 /MPa	外缘 /MPa	内缘 MPa
中横梁	1	0.24	0.24	0.55	0.56	0.23	0.14
	1.5	0.36	0.36	0.84	0.84	0.35	0.22
	2.0	0.48	0.48	1.12	1.12	0.46	0.29
端横梁	1	0.64	0.66	0.61	0.59	0.24	0.25
	1.5	0.96	0.99	0.92	0.88	0.35	0.38
	2.0	1.28	1.32	1.22	1.18	0.47	0.50

支点反力变化显著,且各墩位置左右支反力相差较大,见表 10、表 11。

表 10 6号中墩横桥向位移差作用下结构支反力

中墩变 位反力	1 mm/kN		1.5 mm/kN		2.5 mm/kN	
	左	右	左	右	左	右
5号墩	1 213.1	940.1	1 281.3	871.9	1 417.8	735.4
6号墩	10 090.7	10 784.9	9 917.2	10 958.4	9 570.2	11 305.4
7号墩	10 546.1	10 329.5	10 600.2	10 275.3	10 708.5	10 167.0
8号墩	1 076.2	1 077.0	1 075.9	1 077.3	1 075.5	1 077.7

表 11 5号边墩横桥向位移差作用下结构支反力

中墩变 位反力	1 mm/kN		1.5 mm/kN		2.5 mm/kN	
	左	右	左	右	左	右
5号墩	980.4	1 172.8	932.3	1220.9	884.2	1 269.0
6号墩	10 574.3	10 301.3	10 642.5	10 233.1	10710.8	10 164.8
7号墩	10 437.4	10 438.2	10 437.1	10 438.5	10436.9	10 438.7
8号墩	1 076.6	1 076.6	1 076.6	1 076.6	1 076.6	1 076.6

2.4 弯扭影响

根据各墩顺桥向顶升不同步产生的弯曲、横桥向顶升不同步产生的扭转,可以明显看出,同等变位作用下,相比于弯曲作用,扭转作用对结构正应力、剪应力、支反力均有显著影响。这反映出连续梁结构扭转刚度大,对于扭转的强制位移更敏感。

3 结构分析

3.1 裂缝成因分析

由计算结果可知,对于连续梁结构,当箱梁保持水平,仅考虑顺桥向不同步顶升对结构产生的二次弯矩,该内力对于箱梁截面产生的正应力,剪应力影响均有限,从裂缝开展情况看,新开展裂缝无横向裂缝,一方面是是弯曲变形对结构应力影响较小,另一方面是原结构为双向预应力结构,纵向预应力留有储备。

相比纵向弯曲,结构的横桥向不同步顶升产生的扭转是裂缝开展的主因。箱梁内新增裂缝几乎均为顶板纵向裂缝,一方面因为横向扭转产生剪应力

较大,另一方面由于顶板较薄且无桥面横向预应力钢束限制,因此在扭转剪应力作用下,易引起顶板结构的纵向、斜向裂缝开展。

3.2 裂缝分布分析

根据监控报告,主墩最大横桥向不同步出现在7号墩,最大位移差2.4 mm;边墩最大横桥向不同步出现在5号墩,最大位移差2.0 mm,分别进行以上两种工况分析,提取横桥向箱梁顶板最大剪应力,见图25。

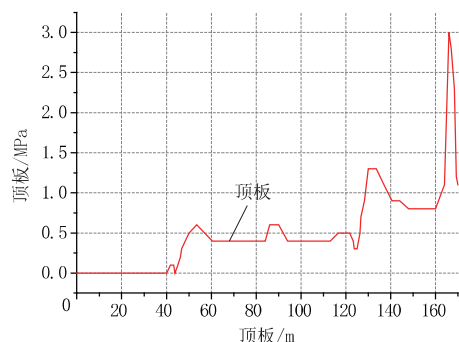


图 25 7号中墩横桥向位移差 2.4 mm 顶板最大剪应力图

7号中墩位置顶升横向位移差2.4 mm时,7、8号墩位置顶板扭转剪应力出现峰值,分别为1.3 MPa和2.9 MPa,后沿跨中方向逐渐降低,见图26。

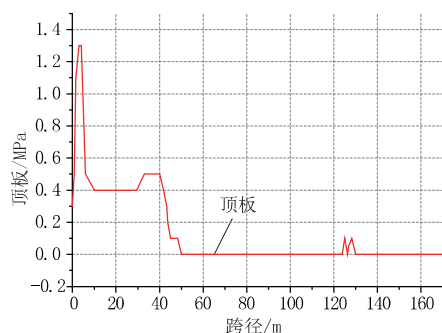


图 26 5号边墩横桥向位移差 2.0 mm 顶板最大剪应力分布图

5号边墩位置顶升横向位移差2.0 mm时,5、6号墩位置扭转剪应力出现峰值,分别为1.3 MPa和0.5 MPa后沿跨中方向逐渐降低。

可以看到,在扭转作用下,中墩和边墩位置箱梁截面出现应力峰值,但同时由于边墩箱梁截面扭转刚度远小于中墩箱梁截面,因此箱梁最大剪应力均出现在端横梁位置。这点与裂缝开展情况形成了对应,体现在结构裂缝特点为,端横梁及中横梁根部处出现的裂缝宽度大、开展深、数量少,呈明显的扭转受拉破坏,其中又以端横梁裂缝开展最为严重。

3.3 扭转引起的支反力偏差

结构顺桥向不同步弯曲对各墩支反力影响较小,而同等位变作用下横桥向不同步扭转,对各墩左右支反力将产生明显变化。

当7号中墩最大扭转变形2.5 mm时,8号边墩左右两侧支反力分别为1 417.8 kN、735.4 kN,左右不平衡力682.4 kN,相差48%,7号中墩左右两侧支反力分别为9 570.2 kN、11 305.4 kN,左右不平衡力1 735.2 kN,相差18%。由于中墩截面刚度大,在扭转作用下中墩的支反力差绝对值更大,但由于中墩所分配自重大,所引起的支反力变化比例小于边墩。

由此可见相比于位移变化,支反力对于扭转的影响更为显著,也易于监控,建议在连续梁顶升过程中对各墩左右支反力差值进行限制以控制结构扭转变形。

4 总结与建议

连续梁结构由于其自身结构刚度大,顶升过程中不同步扭转变形引起的内力重分布对结构影响显著,甚至引起结构开裂,应予以重视。

常规结构顶升作业期间通常以位移监控作为主要控制手段,控制系统一般可保证各点位移差不大于5 mm,然而对于连续梁结构,该位移精度控制下的扭转影响显著,已无法满足要求,需采用更高精度的位移控制措施,但也造成了实际操作的困难。

与位移变化相比,支反力对连续梁结构扭转效应更为敏感,通过各墩左右支反力的偏差来限制扭转效应更易实施。建议在以位移控制为主的前提下,结合各墩之间左右支反力偏差限制进行双指标监控,防止顶升期间因支点位移不同步引起梁体扭转开裂。

参考文献:

- [1] 金跃群,杨扬.内河航道桥梁顶升技术应用探讨[J].结构工程师,2016,32(S4):183-189
- [2] DB 33/T 936—2014,内河桥梁整体顶升技术规程[S].
- [3] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [4] 中交公路规划设计院有限公司.《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》应用指南[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.