

上承式钢管混凝土拱桥拱肋混凝土非对称灌注结构安全性研究

王雄¹, 郜小群², 李友明², 蔡钦好¹, 陈亮¹, 张育智³

(1. 中铁二局第五工程有限公司, 四川 成都 610000; 2. 中铁二局集团有限公司, 四川 成都 610000; 3. 西南交通大学, 四川 成都 610031)

摘要: 为掌握拱肋钢管内混凝土不对称灌注对结构安全性的影响规律, 利用有限元方法对南浦溪特大桥拱肋钢管内混凝土左右幅非对称顶升灌注过程中结构的变形、应力及稳定性进行了分析。计算结果表明: 非对称灌注过程中, 先灌注侧拱肋下挠量大, 两侧拱肋挠度差值随完成灌注的拱肋数量增多而逐渐减小, 灌注完成后, 横截面对称位置处拱肋竖向挠度对称; 整个施工阶段拱肋应力大于横撑应力, 尤其是首灌混凝土过程中拱肋应力较大, 应重点关注; 首灌混凝土完成时结构的稳定安全系数最低, 随着混凝土逐步完成灌注, 结构的稳定安全系数逐渐增大; 结构初始几何缺陷对结构的稳定性不利, 应以考虑结构初始几何缺陷的稳定系数来评价结构的安全性。

关键词: 桥梁工程; 钢管混凝土拱桥; 拱肋混凝土; 非对称灌注; 安全性

中图分类号: U445.57

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)06-0094-07

0 引言

在钢管混凝土拱桥拱肋混凝土灌注阶段, 混凝土在凝固前不具备支撑能力, 其湿重荷载需钢管拱肋承担。为保证拱肋受力及变形对称, 防止拱肋在混凝土灌注阶段因受力不对称而造成结构偏载, 发生扭转失稳, 一般要求拱肋混凝土在横桥向及纵桥向应同步、对称进行灌注^[1-2]。针对此种施工条件下钢管混凝土拱桥施工阶段的受力及稳定性研究已经较为深入, 并在许多大桥建设中得到了实践验证, 结构安全能够得到有效保障。陈卫华等^[3]以唐家河大桥为工程背景, 研究了钢管内混凝土采用24种顺序浇筑条件下结构的稳定性, 发现采取先下后上、先内后外的对称浇筑方案时, 结构的应力状态及稳定性最为理想。王超等^[4]以某大跨径钢管混凝土拱桥为工程背景, 对比了钢管内混凝土采取不同浇筑顺序时结构的稳定性, 认为对于规模较小的钢管混凝土拱桥, 由于每次浇筑的混凝土数量不多, 不同浇筑顺序对其结构稳定性和受力影响不大, 而对于大跨径钢

管混凝土拱桥, 采取先内后外、先下后上的顺序浇筑混凝土时结构的稳定性最好。但随着我国桥梁建造技术的发展, 以及受施工场地限制和节约设备投入等方面的考虑, 也出现了拱肋混凝土横桥向不对称、不同步灌注的情况。目前, 对拱肋混凝土横桥向不同步灌注条件下结构的受力及稳定性的研究还不完善, 实际工程中拱肋内混凝土浇筑顺序呈现出多样化的特点, 并不完全遵循先内后外、先下后上的顺序^[5-8]。为进一步研究混凝土非对称浇筑施工对钢管混凝土拱桥的影响规律, 本文以南浦溪特大桥为依托工程, 研究了该桥拱肋混凝土横桥向不同步灌注方案对结构应力、变形及稳定性的影响规律, 希望能为类似工程提供有益参考。

1 工程概况

南浦溪特大桥全长444.96 m, 主跨为258 m上承式钢管混凝土拱桥, 拱轴按悬链线布置, 计算矢高56.087 m, 计算矢跨比1/4.6。单片拱肋由4根 $\phi 1\ 200\ \text{mm} \times 22\ \text{mm}$ 主钢管组成, 主钢管横向间通过厚度为12 mm的缀板连接, 竖向间通过 $\phi 600\ \text{mm} \times 16\ \text{mm}$ 腹杆连接, 形成外轮廓为5.5 m $\times$ 3 m的等截面桁架结构, 主钢管及缀板腔内均填充C50自密实微膨胀混凝土。拱肋间通过13道K形横撑连接, 横撑由 $\phi 600\ \text{mm} \times 16\ \text{mm}$ 和 $\phi 402\ \text{mm} \times 12\ \text{mm}$ 钢管组

收稿日期: 2023-05-24

基金项目: 中国中铁股份有限公司项目(2020-引导-14)

作者简介: 王雄(1985—), 男, 学士, 高级工程师, 从事桥梁施工技术, 桥梁施工大临结构设计, 桥梁建设管理工作。

通信作者: 张育智(1978—), 男, 博士, 讲师, 从事大跨径桥梁施工控制及组合结构桥梁力学性能研究工作。电子邮箱: zyzswjtu@126.com

拼成桁架结构。大桥钢材材质为 Q345D。

南浦溪特大桥主桥布置图见图 1。

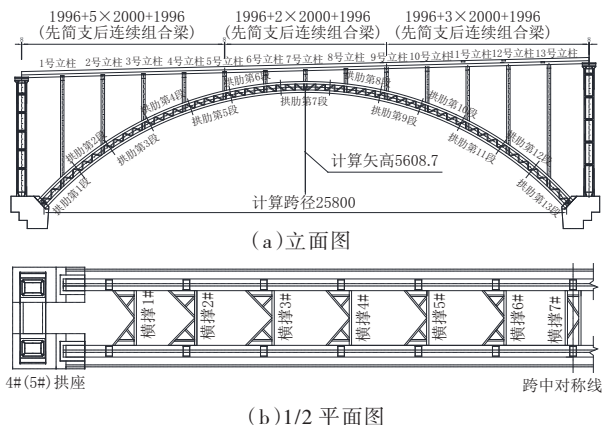


图 1 南浦溪特大桥主桥布置图(单位:cm)

南浦溪特大桥拱肋钢管混凝土采用泵送顶升工艺进行灌注,分别在大小里程拱脚设置进料管,拱顶隔仓板两侧设置排浆管,每根钢管中混凝土一次性从拱脚连续顶升到顶。2 片拱肋的 8 根钢管分 4 次灌注,每次先后灌注左右幅各 1 根钢管。当灌注混凝土强度不低于设计强度的 90%,且混凝土龄期不小于 5 d 时,开始进行下批次混凝土灌注。

南浦溪特大桥拱肋混凝土灌注流程图见图 2。

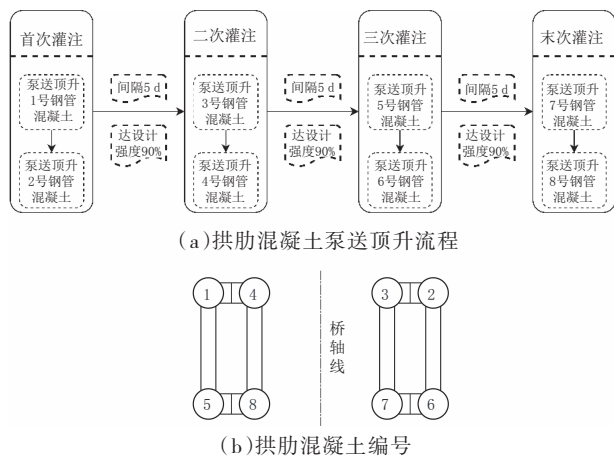


图 2 南浦溪特大桥拱肋混凝土灌注流程图

2 研究内容

结构安全问题是桥梁施工过程中最受关注的问题,主要包括施工过程中结构的强度问题和稳定问题。由于该桥拱肋混凝土采取横桥向非同步、非对称的方式进行浇筑,由此引起结构受偏载作用,拱肋除受轴向压力、弯矩及剪力作用外,还要受到扭矩作用,这将导致拱肋应力增大;同时,在偏载作用下,拱肋结构的变形在横桥向不对称,这将引起拱肋间横撑受到较大的弯矩和剪力,导致横撑应力增大。此外,拱肋的不均匀变形会成为拱上立柱及梁体等后

续施工结构的几何缺陷,影响结构的线形,若不均匀变形过大,甚至可能对结构稳定性造成不利影响。因此,应将混凝土灌注过程中拱肋的变形问题纳入结构安全问题进行研究。

由上述分析可知,横桥向左右幅拱肋混凝土不同步灌注,理论上会导致的不利情况主要包括:(1)浇筑过程中左右幅拱肋竖向变形不一致,加大拱肋横撑弯剪应力;(2)拱肋钢管在进行混凝土灌注过程中,拱顶会出现冒顶(先下沉再上翘)现象,先灌注拱肋顶部受横撑约束影响,会加剧冒顶现象,加大拱肋顶部应力;(3)在偏载作用下,左右幅拱肋不对称变形会使拱肋出现一定的扭转,降低结构稳定性;(4)左右幅拱肋先后灌注,可能会使两拱肋最终变形不一致,导致拱肋永久性扭转,降低结构整体稳定性。

本文将针对拱肋内混凝土非对称浇筑引起的上述问题展开研究。

3 有限元模型

3.1 模型概况

采用桥梁通用空间有限元软件 Midas /Civil 建立大桥模型,因拱肋混凝土灌注施工阶段拱上立柱、梁体等未进行施工,模型中仅建立拱肋及横撑结构(见图 3)。模型各单元均采用梁单元模拟,灌注阶段的混凝土按均布荷载分步加载。未灌注混凝土拱肋按空钢管截面考虑;已灌注混凝土拱肋按钢管混凝土组合截面考虑,考虑间隔最近一次灌注混凝土强度为设计强度的 90%,其他已灌注混凝土强度为设计强度的 100%,分别形成 A、B 两类组合材料截面(见表 1)。

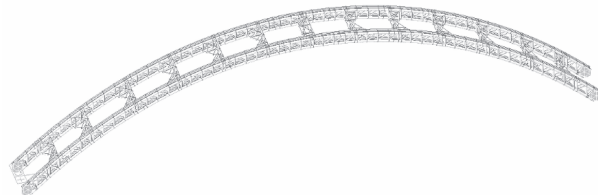


图 3 南浦溪特大桥混凝土灌注阶段有限元模型

根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)弹性模量与混凝土抗压强度间的关系式,90%设计强度的 C50 混凝土按 C45 混凝土参数进行弹模设置。每处拱脚在拱轴线建立一个边界特征节点,节点设置一般支撑来限制所有位移及转动,埋入拱座混凝土内部分通过刚性连接方法与边界特征节点固结连接。

3.2 计算荷载

在拱肋混凝土灌注阶段,结构承受的荷载主要包括:钢结构自重荷载、混凝土湿重荷载和风荷载。

表 1 各灌注阶段拱肋截面形式

灌注批次	钢管编号							
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
首灌	空钢管	空钢管	空钢管	空钢管	空钢管	空钢管	空钢管	空钢管
二灌	A类组合截面	A类组合截面	空钢管	空钢管	空钢管	空钢管	空钢管	空钢管
三灌	B类组合截面	B类组合截面	A类组合截面	A类组合截面	空钢管	空钢管	空钢管	空钢管
末灌	B类组合截面	B类组合截面	B类组合截面	B类组合截面	A类组合截面	A类组合截面	空钢管	空钢管

(1)钢结构自重荷载:钢结构自重通过设置自重系数进行设置。提取自重系数设置为1时的模型支反力合力 F ,根据设计图材料消耗量计算结构自重 G ,则钢结构自重系数 w 即为 G 与 F 的比值。本桥钢结构自重系数为1.008 5。

(2)混凝土湿重荷载:C50 自密实微膨胀混凝土湿重通过试验室称重获得,本桥按 25 kN/m^3 取值。混凝土灌注阶段通过梁单元均布荷载模拟,根据拱肋钢管混凝土尺寸,计算均布荷载为 36.74 kN/m 。

(3)风荷载:根据设计要求,施工阶段基准风速按 23.9 m/s 取值。风荷载按梁单元均布荷载横桥向施加在拱肋主钢管上,根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)计算本桥拱肋主钢管风荷载为 0.64 kN/m ;进行强度问题研究时,考虑1.4的荷载分项系数,按 0.90 kN/m 取值。

3.3 施工阶段划分

为提取到拱肋混凝土灌注过程中结构应力、变形和稳定性的变化规律,将单根钢管混凝土的湿重荷载加载过程细化,纵桥向对称加载,按从拱脚向拱顶分为7个步骤进行加载。而每批次沿横桥向先后灌注2根钢管,因此共划分为14个步骤进行混凝土湿重加载。以首灌为例,步骤1~7为1#钢管由拱脚浇筑至拱顶,步骤8~14为2#钢管由拱脚浇筑至拱

顶。每步加载范围以拱肋吊装节段划分长度为标准(见图4)。

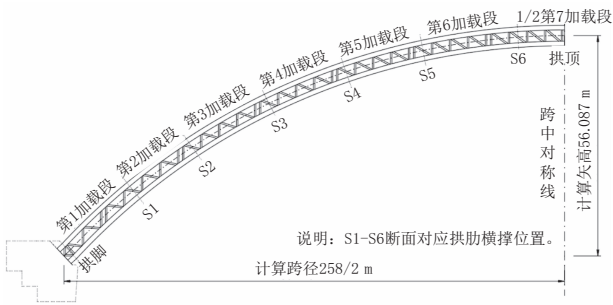


图 4 混凝土湿重加载分步及断面位置示意图

4 变形计算结果

以S3截面(见图4)和拱顶截面位置的上弦钢管节点作为监测点,提取步骤1~14各加载步的监测点竖向位移,绘制其竖向位移变化曲线,见图5。

由图5可知:(1)对于同一批次灌注的2根钢管,拱顶截面与S3截面的位移量均在步骤4和步骤11加载完成后出现拐点,拱顶竖向变形由上升变为下降,S3截面竖向变形由下降变为上升,体现了拱肋在混凝土灌注过程中的冒顶现象;(2)先灌注侧钢管先变形,左右幅拱肋变形存在不同步现象;(3)每批次灌注完成后,两侧拱肋竖向位移偏差量分别为5.4%、4.1%、3.7%、2.7%,出现降低趋势,这主要是因

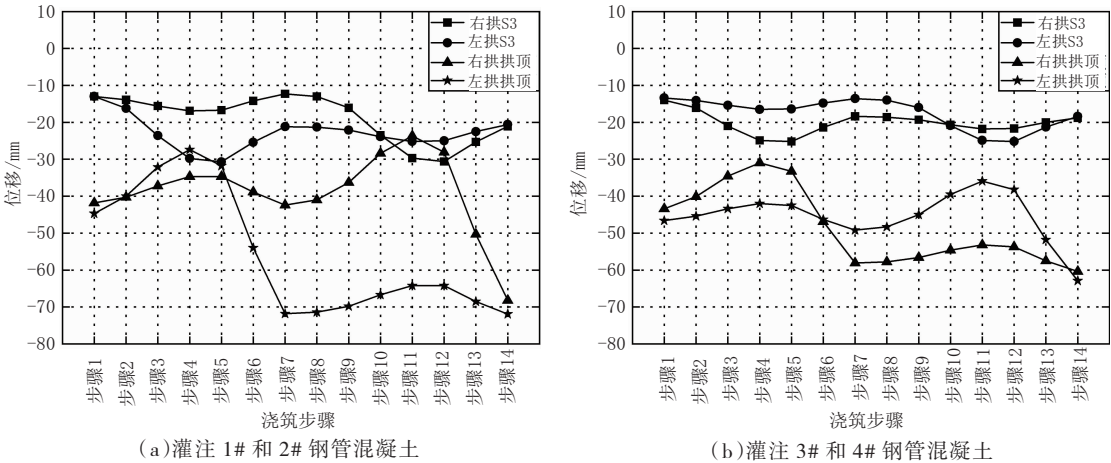


图 5 拱肋混凝土灌注过程中的拱顶竖向位移变化曲线

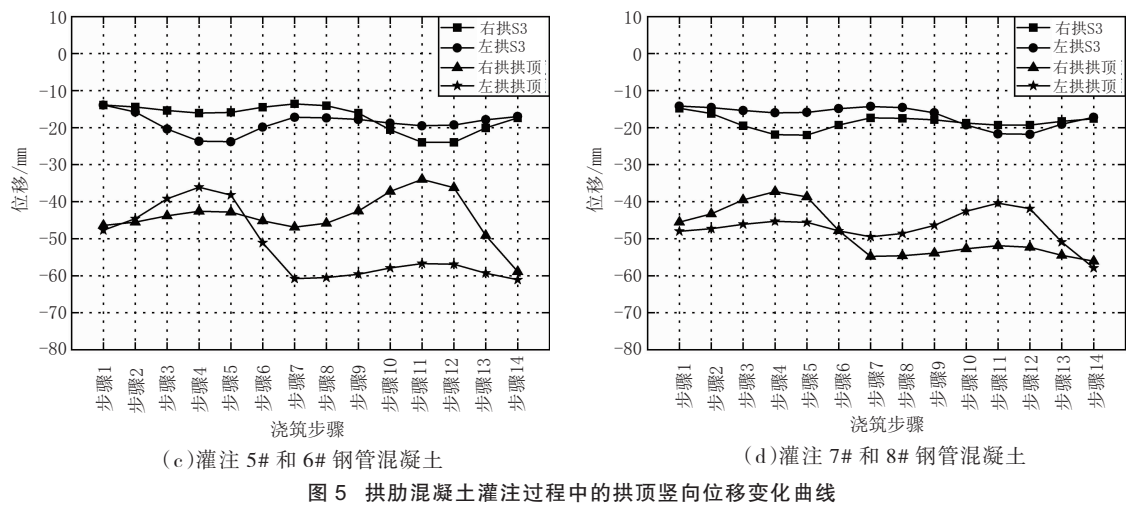


图5 拱肋混凝土灌注过程中的拱顶竖向位移变化曲线

为随着钢管内混凝土的浇筑并逐渐参与结构受力,结构的刚度越来越大,由于浇筑偏载引起的结构不均匀变形越来越小;(4)混凝土灌注完成后,拱顶竖向位移最大差值为 1.8 mm,在去除施加在结构上的风荷载后发现这种变形差异消失,说明混凝土浇筑完成后结构竖向位移的差异主要是因为横向风荷载引起的。

因此,在不考虑横向风荷载影响时,横向非对称、非同步浇筑并不会引起混凝土浇筑完成阶段拱肋结构竖向变形的差异,这与已有研究结论一致^[4]。

5 强度计算结果

提取步骤 1~14 各加载步的拱肋和横撑应力,应力测点位于拱脚处拱肋截面下缘和横撑跨中截面下缘。绘制的应力变化曲线见图 6。

由图 6 可知:(1)在灌注过程中,横撑虽然由于左右侧拱肋竖向变形不一致而产生应力,但因为左

右幅拱肋间竖向位移差最大值仅为 40.5 mm,而拱肋间横撑长达 14 m,因此横撑的抗弯、抗剪刚度较小,由拱肋间竖向位移差引起的横梁应力也较小,应力极值均出现在拱肋上;(2)拱脚处拱肋下缘压应力随着混凝土浇筑而出现先增大后减小的波动性变化,这是因为刚开始浇筑混凝土时,拱脚处拱肋受负弯矩作用,因而拱肋下缘压应力逐渐增大;随着浇筑的混凝土增多,拱脚的水平推力逐渐增大,导致拱脚所受负弯矩逐渐减小,因而拱肋下缘压应力逐渐减小;拱脚处拱肋下缘应力在步骤 4 和步骤 11 加载完成后出现峰值,这是因为此时混凝土分别灌注到了 4#横撑和 10#横撑,即 1/2 矢高附近,此时拱脚处拱肋承受负弯矩最大,施工至此阶段要加强现场监控。

提取各批次灌注时拱肋应力的最小值绘制应力变化曲线,见图 7。

由图 7 可知,拱肋应力绝对值均较前批次灌注时小,这是拱肋内部前批次灌注的混凝土开始参与

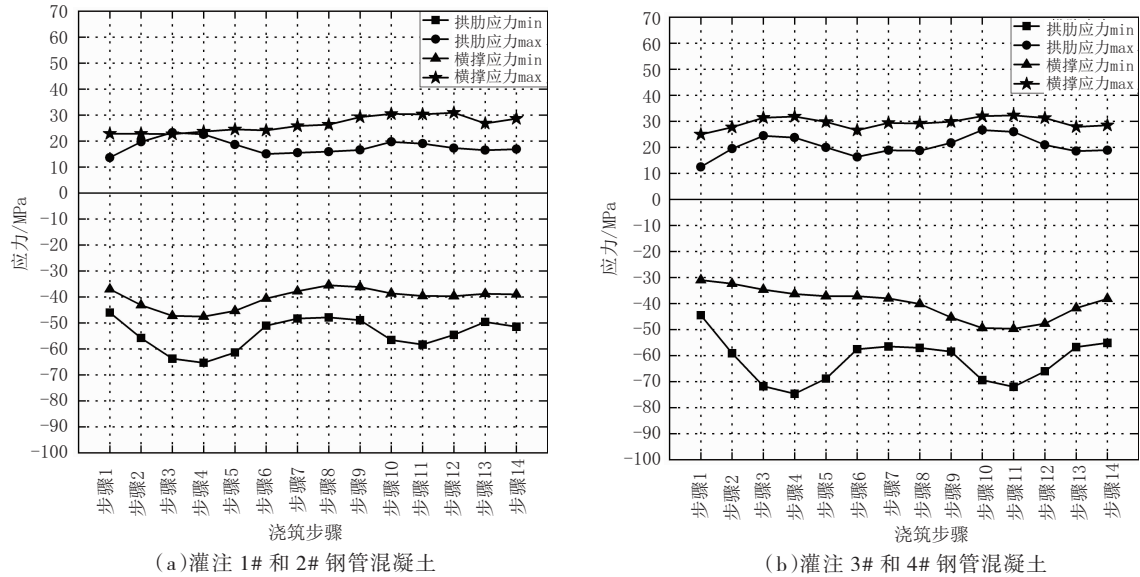
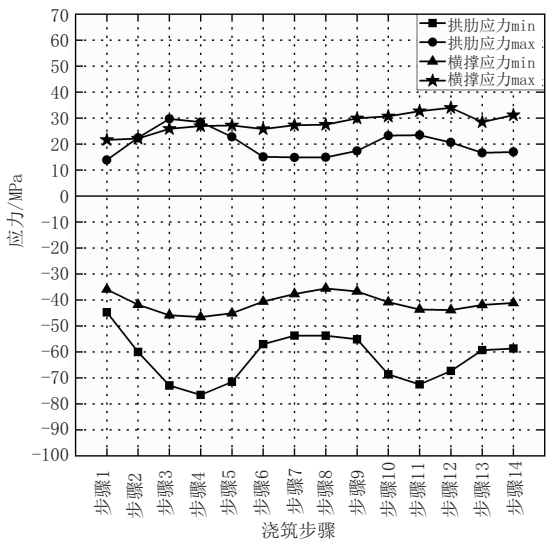
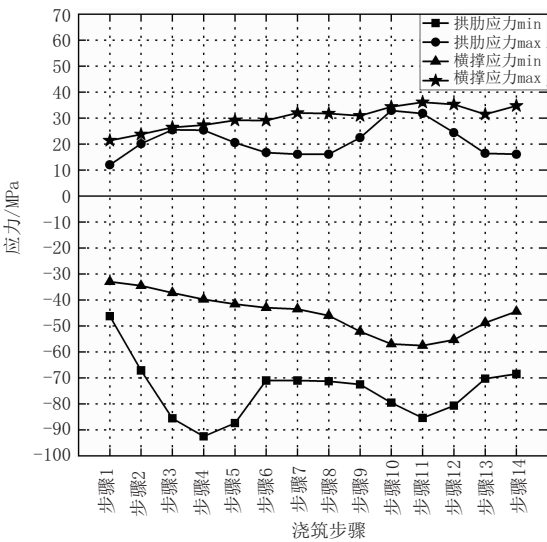


图6 拱肋混凝土灌注过程中的拱肋和横撑应力变化曲线



(c)灌注 5# 和 6# 钢管混凝土



(d)灌注 7# 和 8# 钢管混凝土

图 6 拱肋混凝土灌注过程中的拱肋和横撑应力变化曲线

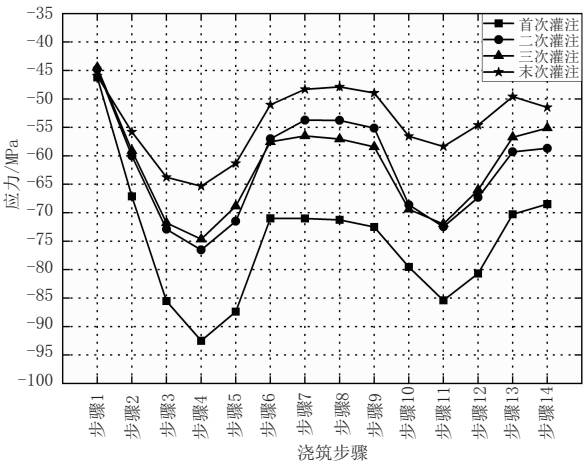


图 7 各批次灌注时拱肋应力最小值变化曲线

拱肋受力,结构刚度逐渐增大所致。在进行拱肋灌注施工中,因为首灌混凝土时只有钢管作为承重结构,结构的刚度最小,灌注过程中钢管应力增量最大,因此要重点关注首次混凝土灌注阶段的拱肋应力情况。

6 稳定计算结果

6.1 无初始缺陷弹性稳定分析

从变形和强度分析结果可见,混凝土灌注至 1/2 矢高和拱顶位置时这两者出现拐点或峰值。提取混凝土灌注至每根钢管的 1/2 矢高和拱顶位置的状态进行线形屈曲分析,统计各状态屈曲系数和失稳模态,结果见表 2。

表 2 混凝土灌注过程中的拱肋失稳模态及屈曲系数

灌注批次	灌注位置		1 阶失稳	2 阶失稳	3 阶失稳	4 阶失稳	5 阶失稳
首灌	1# 拱肋灌注 1/2	屈曲系数	423.8	437.0	504.8	562.0	583.3
		失稳模态	面外反对称	面外对称	面外反对称	面外对称	面外对称
	1# 拱肋灌注完成	屈曲系数	94.7	107.6	162.2	175.1	184.8
		失稳模态	面外反对称	面外对称	面外反对称	面外对称	面外反对称
	2# 拱肋灌注 1/2	屈曲系数	90.7	104.1	140.2	158.0	177.5
		失稳模态	面外反对称	面外对称	面外反对称	面外对称	面外反对称
	2# 拱肋灌注完成	屈曲系数	64.6	67.8	71.7	101.6	118.3
		失稳模态	面内 1 阶反对称	面外对称	面外反对称	面内 2 阶对称	面外对称
	3# 拱肋灌注 1/2	屈曲系数	710.6	720.1	721.3	739.6	742.9
		失稳模态	2# 横撑失稳	面外反对称	12# 横撑失稳	3# 横撑失稳	11# 横撑失稳
二灌	3# 拱肋灌注完成	屈曲系数	137.8	148.0	212.4	253.5	263.9
		失稳模态	面外反对称	面外对称	面外反对称	面外对称	面外反对称
	4# 拱肋灌注 1/2	屈曲系数	130.3	138.5	184.3	228.9	231.9
		失稳模态	面外反对称	面外对称	面外反对称	面外对称	面外反对称
	4# 拱肋灌注完成	屈曲系数	85.2	86.3	96.3	148.8	150.1
		失稳模态	面外对称	面外反对称	面内 1 阶反对称	面外反对称	面外对称

表 2 续

灌注批次	灌注位置		1 阶失稳	2 阶失稳	3 阶失稳	4 阶失稳	5 阶失稳
三灌	5# 拱肋灌注 1/2	屈曲系数	563.6	564.5	597.2	597.6	725.7
		失稳模态	2# 横撑失稳	12# 横撑失稳	2# 横撑失稳	12# 横撑失稳	1# 横撑失稳
	5# 拱肋灌注完成	屈曲系数	153.2	167.6	250.3	277.7	285.3
		失稳模态	面外反对称	面外对称	面外反对称	面外对称	面外反对称
	6# 拱肋灌注 1/2	屈曲系数	146.5	159.7	214.9	253.7	271.5
		失稳模态	面外反对称	面外对称	面外反对称	面外对称	面外反对称
	6# 拱肋灌注完成	屈曲系数	101.5	104.7	109.3	170.3	182.2
		失稳模态	面外对称	面外反对称	面内 1 阶反对称	面内 2 阶对称	面外对称
	7# 拱肋灌注 1/2	屈曲系数	673.0	681.3	682.7	693.7	695.6
		失稳模态	2# 横撑失稳	12# 横撑失稳	2# 横撑失稳	12# 横撑失稳	1# 横撑失稳
末灌	7# 拱肋灌注完成	屈曲系数	223.4	228.4	317.7	372.2	420.3
		失稳模态	面外反对称	面外对称	面内 1 阶反对称	面外对称	面外反对称
	8# 拱肋灌注 1/2	屈曲系数	208.3	210.8	274.7	339.6	380.2
		失稳模态	面外反对称	面外对称	面内 1 阶反对称	面外对称	面外反对称
	8# 拱肋灌注完成	屈曲系数	127.0	133.0	157.9	226.2	235.2
		失稳模态	面外对称	面外反对称	面内 1 阶反对称	面外对称	面内 2 阶对称

由表 2 可知:二灌至末灌时,灌注第一根钢管至 1/2 矢高时出现横撑失稳,其他阶段均表现为拱肋失稳;首灌结束时,1 阶失稳模态表现为面内 1 阶反对称失稳,二灌至末灌结束时 1 阶失稳模态均表现为面外失稳。失稳模态示意图见图 8。

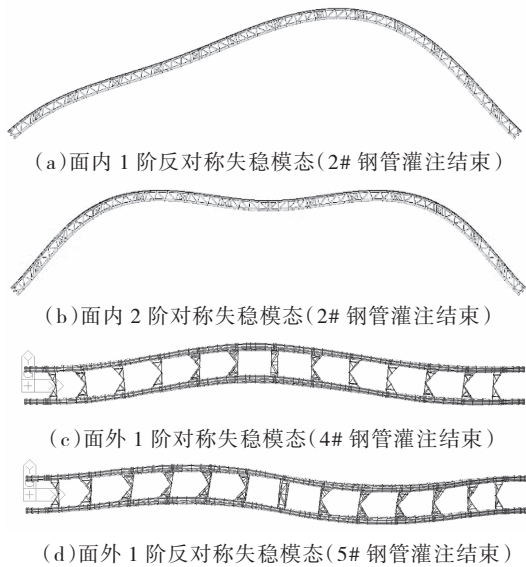


图 8 失稳模态示意图

绘制各钢管灌注至拱顶状态的屈曲系数变化曲线,见图 9。

由图 9 可知:灌注期间,屈曲系数呈波浪形变化;每批次灌注第一根钢管时较上批次灌注时屈曲系数提升较多,这是由于每批次灌注第一根钢管时,前批次灌注的混凝土强度已达到 90%或 100%,拱肋

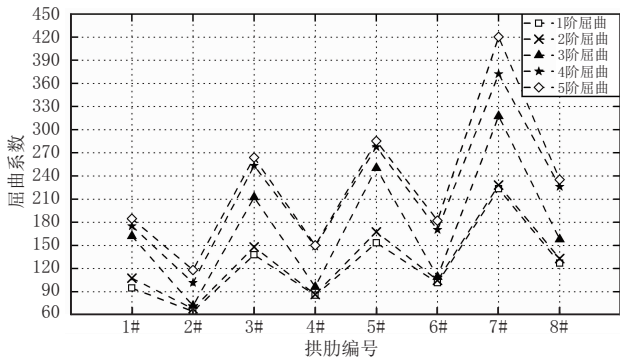


图 9 灌注期间屈曲系数变化曲线

刚度得到整体提升;每批次灌注第一根钢管时的稳定性高于灌注第二根钢管时,这是由于每批次灌注的混凝土湿重以荷载形式不断施加,但本批次灌注的混凝土未凝固,不能提升拱肋刚度的同时加大了结构受到的荷载;灌注期间,屈曲系数变化的总体趋势是增加,这是由于每次灌注混凝土方量基本一致,但随着灌注次数增多,更多的拱肋混凝土参与工作,使得结构刚度不断增大,故拱肋稳定性总体提升。

6.2 考虑初始几何缺陷的稳定分析

当不考虑结构初始几何缺陷时,结构处于“完美”状态,但由于实际结构存在加工制造偏差、残余应力等初始缺陷,导致实际结构的稳定系数比计算值偏低,造成计算的屈曲系数偏不保守。在稳定分析中考虑实际结构的初始缺陷,其计算结果更加贴近现场实际情况,但残余应力等初始缺陷的获取较困难,通常采用较易获得的初始几何缺陷进行分析。本

桥基于未考虑初始几何缺陷时弹性稳定分析屈曲系数最小的工况(2#钢管混凝土灌注结束)来考虑进行初始几何缺陷的稳定分析,以此工况下的1阶模态屈曲向量为基准,经过按一定比例换算后作为结构的初始几何缺陷建立模型,其中的初始几何缺陷最大值按《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)取 ± 43 mm。

跟踪拱顶竖向位移,绘制稳定系数-位移量的变化曲线,见图10。图10中,曲线拐点位置稳定系数为0.889 8,即在满足《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)要求的初始几何缺陷最大值情况下,结构的稳定系数为不考虑初始几何缺陷时弹性稳定系数的88.98%。也就是说,考虑拱肋初始几何缺陷时的结构稳定系数为57.5,结构的稳定安全系数较大。

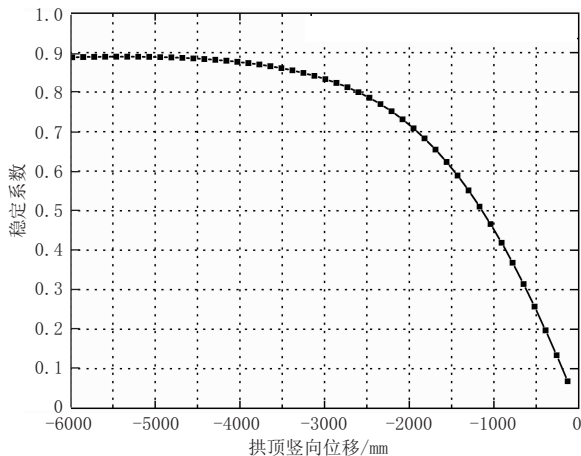


图10 拱顶竖向位移-稳定系数变化曲线

7 结 语

(1)在施加单向风荷载条件下,非同步灌注过程中左右幅拱肋竖向变形有不对称的现象;去掉单向风荷载,在混凝土灌注结束后,拱肋变形恢复对称,非同步灌注对拱肋竖向变形影响可忽略不计。

(2)各根钢管灌注过程中,拱肋顶部竖向位移量曲线呈抛物线变化,体现了拱肋混凝土灌注过程中的冒顶现象;左右幅非同步灌注对冒顶现象有增强效果,会进一步增大拱顶应力,施工过程中应对此现

象加强监控,必要时需及时采取压顶措施。

(3)拱肋应力在各根钢管灌注混凝土至1/2矢高时出现极值;伴随灌注进程,拱肋应力增量逐渐降低。施工中需加强首灌阶段的拱肋应力监控。

(4)左右幅拱肋非同步灌注会造成横撑承受弯剪应力,但应力值较小。南浦溪特大桥控制应力均出现在拱肋钢管上,但其他桥梁仍需关注横撑应力情况,不排除控制应力发生在横撑结构上的可能。

(5)每批次灌注第一根钢管阶段的稳定性高于灌注第二根钢管阶段;灌注期间,屈曲系数呈波浪形变化,总体呈增大趋势。

(6)按《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)允许最大结构偏差情况考虑模型初始几何缺陷进行弹性稳定分析时,所得到的稳定系数是不考虑初始几何缺陷模型稳定(屈曲)系数的88.98%,应以此稳定系数对结构的稳定性进行评价。

(7)南浦溪特大桥是上承式拱桥,拱肋结构设计承载能力强,能够抵抗非同步灌注产生的不利因素影响。但对于下承式拱桥,尤其是强梁弱拱类拱桥,采用左右幅拱肋非同步灌注方案的安全性尚需要开展专门研究。

参考文献:

- [1] 邱麟,孙吉彪.钢管混凝土劲性骨架拱桥施工阶段稳定分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(3):366-369.
- [2] 黄云,张清华,叶华文,等.钢管混凝土系杆拱桥空间稳定性分析[J].桥梁建设,2014,44(4):50-56.
- [3] 陈卫华.大跨度钢管混凝土拱桥施工优化分析[J].中外公路,2017,37(5):145-151.
- [4] 王超,张涛.钢管混凝土拱桥混凝土浇筑对劲性骨架受力影响分析[J].工程与建设,2020,34(3):525-526,528.
- [5] 沈培文,周水兴,罗飞.大跨度钢管混凝土拱桥施工阶段稳定性分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2010,29(3):340-343.
- [6] 王红伟,谢开仲,郭晓,等.大跨度钢管混凝土拱桥拱肋混凝土灌注过程稳定性研究[J].世界桥梁,2019,47(5):49-53.
- [7] 孙军利,曹峰.钢管混凝土拱桥拱肋浇注顺序优化研究[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(7):83-86.
- [8] 桂晓华,刘伟,张立龙.混凝土灌注顺序对大跨度钢管混凝土拱桥主拱圈施工稳定性影响研究[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(6):195-200.