

钢筋混凝土拱桥不对称 T 梁架设方案比选研究

程 博, 侯茂盛, 赵世景

(湖南大学设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410017)

摘 要: 随着山区拱桥建设规模地不断发展, 限于场地条件等因素限制, 不对称施工方法的应用场景增多, 需进一步开展不对称施工技术的研究。通过建立 MIDAS 有限元模型, 结合实际钢筋混凝土拱桥项目, 提出多种不同施加配重下的拱上 T 梁架设方案, 并从强度、刚度及稳定性等方面, 开展不同方案下的计算结果对比, 并结合施工工效得出最优的施工方案。结果表明, 不少于 1 跨的配重布置, 可以有效降低钢筋混凝土拱桥 T 梁不对称架设时拱圈开裂的风险。综合施工工效及拱圈应力结果, 以 2 跨配重布置为主, 应力可降至 1.4 MPa 左右。配重的施加可以有效减小不对称施工下拱圈变形。

关键词: 钢筋混凝土拱桥; T 梁架设; 不对称施工; 配重

中图分类号: U448.22; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)11-0114-04

Comparative Study on Asymmetric T-beam Erection Schemes for Reinforced Concrete Arch Bridges

CHENG Bo, HOU Maosheng, ZHAO Shijing

(Hunan University Design and Research Institute Co., Ltd., Changsha 410017, China)

Abstract: With the continuous development of mountain arch bridge construction scale, limited to site conditions and other factors, the application of asymmetric construction methods increases, and further research on asymmetric construction technology is needed. Through the establishment of MIDAS finite element model, combined with an actual reinforced concrete arch bridge project, a variety of T-beam erection schemes on the arch with different applied counterweights are proposed. The calculation results of different schemes are compared in terms of strength, stiffness and stability, and the optimal construction scheme is derived from the combination of construction efficiency. The results show that the counterweight layout of not less than 1 span can effectively reduce the risk of cracking of the arch ring in the asymmetric T-beam erection of reinforced concrete arch bridges. Based on the comprehensive construction efficiency and the stress results of the arch ring, with a two-span counterweight layout as the main approach, the stress can be reduced to approximately 1.4 MPa. The application of counterweight can effectively reduce the arch ring deformation under asymmetric construction.

Keywords: reinforced concrete arch bridge; T-beam erection; asymmetric construction; counterweight

0 引 言

钢筋混凝土拱桥因其取材方便, 施工成本较小, 跨越能力大, 全寿命周期维护费用低等优点, 在山区桥梁建设中得到了大力发展^[1]。而山区因崎岖地形无法满足最优的施工条件, 因此不对称施工方法的应用在施工过程中愈加常见。

目前关于不对称施工方式的研究, 主要仍体现

在梁桥与刚构桥方面。喻文杰^[2]通过有限元仿真计算方法, 分析预应力混凝土连续梁桥不对称施工力学特点, 并针对不同因素影响下的桥梁立及挠度结果进行研究。杨勇等^[3]针对珠海洪鹤大桥现场施工环境限制, 提出了塔周身段梁的不堆成施工, 介绍其施工工艺及受力计算结果, 评估方案的可实施性与结构安全性。吴健等^[4]以中开高速银洲湖大桥斜拉桥为研究背景, 以是否对成与同步两个方面进行方法组合, 分析 4 种方案的可行性, 并从经济与安全方面进行计算评估, 得到最合适的方案。王昌喜等^[5]详细介绍了不对称斜拉桥的合龙施工控制办法, 并从温度、临时荷载以及施工索力方面, 研究了合龙控制影响结果, 现场实测数据表明合龙精度高,

收稿日期: 2025-04-09

基金项目: 宁乡市金洲新城-华强路(规划三路-金林西路)建设项目(2308-430182-04-01-276681)

作者简介: 程博(1995—), 男, 本科, 工程师, 从事道路与桥梁设计工作。

方法控制效果好。肖洪波等^[6]分别建立了曲线刚构桥的 MIDAS Civil 与 FEA 模型,对对称与非对称设计下的桥梁横向位移及内外侧应力进行了研究。韦庆武^[7]依托上跨郑万高铁的不对称 T 构桥梁,开展了超宽桥面桥梁的转体施工控制研究,重点阐述不等宽、不等跨的不对称桥体的施工精度与结构平衡度的控制应对措施。翁方文等^[8]通过边跨分阶段施加永久配重,保证了大跨不对称连续梁的施工安全,提高了施工效率,为同类桥梁施工提供控制思路。

综上,当前对于不对称施工主要针对与梁桥或刚构桥较多,关于钢筋混凝土拱桥鲜有涉及,随着拱桥建设跨径的不断增加,数量不断增多,亟需开展对于拱上结构的不对称施工研究。本文以某钢筋混凝土桥梁为背景,综合现场施工条件及设施,提出了 7 种拱上 T 梁架设方案,通过建立有限元模型,针对拱圈应力、位移以及稳定性三方面内容,开展拱上 T 梁不对称施工比选研究。

1 工程概况

拱上腹孔为 11 跨 28 m 装配式预应力混凝土 T 梁,分为三联,每联均采用桥面,连续,联间设置 C160 型伸缩缝,即在 1、2 号交界墩及 4、7 号排架位置设置 C160 型伸缩缝续。T 梁梁高 2 m,横断面由 5 片梁组成,梁肋横向中心间距 2.535 m。图 1 为拱上分跨示意图。

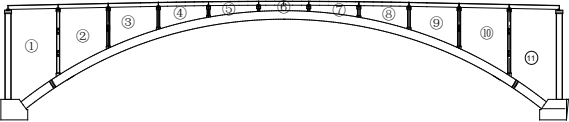


图 1 拱桥拱上分跨示意图

2 T 梁架设方案

桥面 T 梁按照顺桥向逐跨满架施工,经初步计算结果,拱圈产生的最大拉应力为 +3.68 MPa,高于控制应力值 +1.96 MPa。因此,为保证施工过程中的结构安全以及施工进度,需要在拱上施加配重。现场考虑到桥梁为跨江桥梁,取水方便,因此,设计在拱上搭建脚手架平台,平台上放置塑料空桶,采取抽取江水至塑料桶方式实现配重。卸载时,将塑料桶下部泄水孔打开,实施配重卸载,空桶则采用桥面吊机调离现场。

现考虑如下方案:

方案一:对称逐跨满铺;

方案二:逐跨满架施工,在第七跨拱圈上施加

250 t 配重荷载,施工步骤如下,第 1 跨架完—第 7 跨配重—第 2 跨架完—第 3 跨架完—第 4 跨架完—第 5 跨架完—第 6 跨架完—第 7 跨配重卸载—第 7 跨架完—第 8 跨架完—第 9 跨架完—第 10 跨架完—第 11 跨架完。

方案三:逐跨满架施工,在第 7 跨、第 8 跨拱圈上分别施加 250 t 配重荷载,施工步骤如下,第 1 跨架完—第 7 跨配重—第 2 跨架完—第 8 跨配重—第 3 跨架完—第 4 跨架完—第 5 跨架完—第 6 跨架完—第 7 跨配重卸载—第 7 跨架完—第 8 跨配重卸载—第 8 跨架完—第 9 跨架完—第 10 跨架完—第 11 跨架完。

方案四:逐跨满架施工,在第 7 跨、第 8 跨拱圈上分别施加 250 t 配重荷载,施工步骤如下,第 1 跨架完—第 7 跨配重—第 2 跨架完—第 8 跨配重—第 3 跨架完—第 4 跨架完—第 5 跨架完—第 6 跨架完—第 7 跨架完—第 7 跨配重卸载—第 8 跨架完—第 8 跨配重卸载—第 9 跨架完—第 10 跨架完—第 11 跨架完。

方案五:逐跨满架施工,在第 7 跨、第 8 跨、第 9 跨拱圈上分别施加 170 t 配重荷载,施工步骤如下,第 1 跨架完—第 7 跨配重—第 2 跨架完—第 8 跨配重—第 3 跨架完—第 9 跨配重—第 4 跨架完—第 5 跨架完—第 6 跨架完—第 7 跨配重卸载—第 7 跨架完—第 8 跨配重卸载—第 8 跨架完—第 9 跨配重卸载—第 9 跨架完—第 10 跨架完—第 11 跨架完。

方案六:逐跨满架施工,在第 7 跨、第 8 跨、第 9 跨拱圈上分别施加 170 t 配重荷载,施工步骤如下,第 1 跨架完—第 7 跨配重—第 2 跨架完—第 8 跨配重—第 3 跨架完—第 9 跨配重—第 4 跨架完—第 5 跨架完—第 6 跨架完—第 7 跨架完—第 7 跨配重卸载—第 8 跨架完—第 8 跨配重卸载—第 9 跨架完—第 9 跨配重卸载—第 10 跨架完—第 11 跨架完。

方案七:逐跨满架施工,在第 7 跨、第 8 跨、第 9 跨拱圈上分别施加 200 t 配重荷载,施工步骤如下,第 1 跨架完—第 7 跨配重—第 2 跨架完—第 8 跨配重—第 3 跨架完—第 9 跨配重—第 4 跨架完—第 5 跨架完—第 6 跨架完—第 7 跨配重卸载—第 7 跨架完—第 8 跨配重卸载—第 8 跨架完—第 9 跨配重卸载—第 9 跨架完—第 10 跨架完—第 11 跨架完。

3 计算模型建立

采用 MIDAS Civil 有限元软件建立计算模型,为简化计算模型,桥面 T 梁结构以及架桥机重量等效为节点荷载施加在拱上立柱模型节点上。拱圈拱脚

以及交界墩采用固结约束。考虑到拱圈施工至合龙时,拱圈相对线形误差已通过预拱度调整消除,若是以施工阶段为基础进行分析,势必与实际状态不相符,因此,拱圈与立柱采用一次成桥方式建立,施工阶段时间按照实际施工天数来确定。单跨中梁每片重量: $28.86 \times 26 = 750.36$ kN,边梁每片 $28.82 \times 26 = 749.32$ kN,现浇横向联系混凝土另计。架桥机按照总重 100 t 计算,单支点为 50 t。有限元模型见图 2。

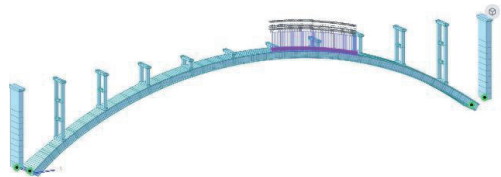


图2 有限元模型

4 结果分析

4.1 拱圈应力分析

T梁架设过程中,最重要的控制目标就是尽可能降低拱圈拉应力,且小于材料的抗拉强度设计值,尤其对于不对称架设来说,拱圈受力更为复杂。图3为不同方案架设过程中的拉、压应力最大值数据。由图中可以看出,方案2的最大拉应力计算结果达到了 2.52 MPa,超过了材料设计强度的 1.96 MPa,且接近材料强度标准值 2.85 MPa。考虑计算过程中的简化模拟误差,以及施工过程中的临荷载和风荷载等影响,按照方案2施工的拱圈会有开裂风险。方案3、方案4拉应力相同,除去方案1的对称施工外,拉应力最低的是方案7的 1.28 MPa。结合现场施工场地条件来说,T梁对称架设无法在现场实施,因此,方案1无法实施。结合配重实施措施,虽然方案3、4拉应力不是最小的,但是配重只需要2跨,而方案5、6、7配重需要3跨,从提高施工效率来说,布置2跨配重是最优的。综上所述,倾向于采用方案3、4开展T梁架设工作。

为了明确方案3、4施工过程中的拉应力最大值分布,提取拱圈应力结果见图4,由于上述方案在配重施加前的步骤一致,此处仅选取某一方案拉应力最大值结果。可以发现,拉应力最大位置出现在T梁架设一端的拱脚顶板位置,此时为架设第4跨T梁阶段,配重已全部施加完毕。此时,需要严密监测5片T梁架设过程中每叠加一片时的拱圈应力变化情况,若应力相差较大需及时分析原因。

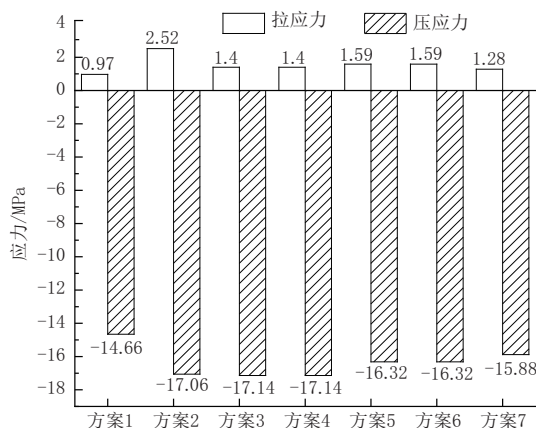


图3 不同架设方案拱圈应力最大值

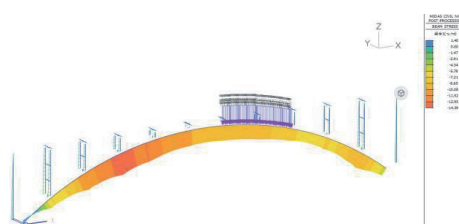


图4 拱圈拉应力最大值云图(单位:MPa)

4.2 拱圈位移分析

通过上述应力分析,得出了方案3、4为推荐的方案。此外,评价结构受力是否合理,还需要根据拱圈的位移结果来评判最优方案。因此,提取不同方案拱圈的水平、竖向位移见图5。由图中位移结果可知,除去方案1的结果外,方案4的水平 and 竖向位移最小,水平为 3.6 cm,竖向为 8.1 cm,小于规范中规定的 192 mm ($L/1500$) 以内,满足要求。因此,从结构变形结果上来看,方案4优于方案3。考虑到现场施工效率,方案3先卸载配重再架梁,使得时间消耗在卸载作业,无法进一步提高效率,而方案4可利用制梁与运梁间隙时间实施卸载,节约施工时间。

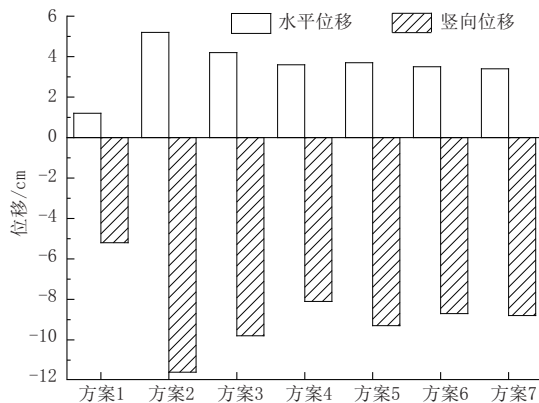


图5 不同架设方案拱圈位移最大值

图6为方案4施工全过程监测点位移计算值。由图中数据可知,拱圈水平位移在第7跨配重卸载前,位移曲线走势较为一致,第8跨架设后的拱圈水

平位移曲线较为平缓,说明拱圈的左右半跨荷载在此之后逐步趋于平衡,最大位移值出现在第6跨架设时的8#立柱位置。拱圈竖向位移在第8跨配重施加前,竖向位移波动较小,之后拱圈位移呈现明显变化,架梁起始一侧下挠,配重一侧抬升,在架设第10跨时逐步平缓,最大竖向位移值出现在第7跨配重时的5#立柱位置。

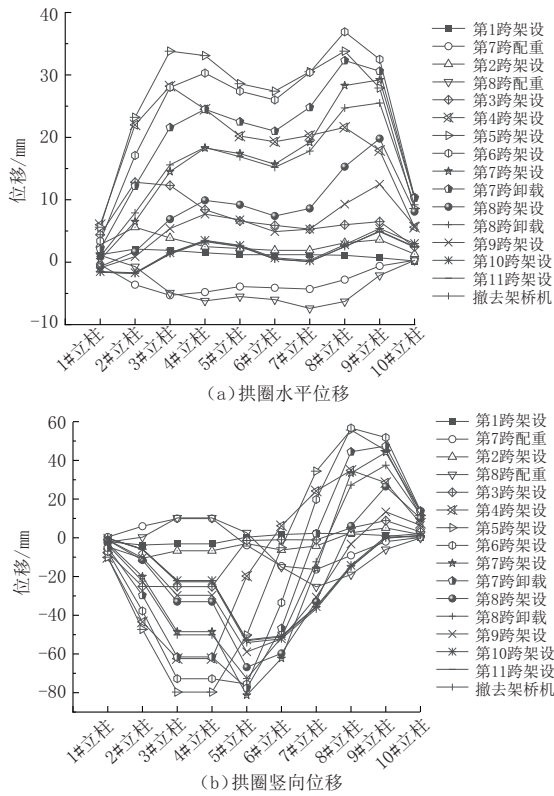


图6 方案4拱圈位移结果

4.3 拱圈稳定性

经过应力及位移结果评定,并结合实际施工工效方面,得出方案4为最佳的T梁架设实施方案。在实际施工时,由于拱上荷载复杂,同时拱圈所受的不对称荷载对于结构稳定性也是有一定影响,因此还需要针对方案4的稳定性加以分析,用于现场实施指导。表1为方案4的T梁架设期间结构屈曲稳定系数。

根据表1中数据可知,整个架设过程中,结构稳定系数均大于安全系数4的要求。此外,在架设第2跨T梁时,结构安全系数从40.7突降至22.7,出现明显降幅。在架设第2跨之后,结构稳定系数趋于稳定,波动范围在22.7至25.5之间。图7为稳定系数最小工况下的前3阶模态图。

5 结 语

该文通过建立钢筋混凝土拱桥有限元模型,通

表1 T梁架设结构稳定屈曲分析

施工工况	屈曲稳定系数
第1跨架设	40.8
第7跨配重	40.7
第2跨架设	22.7
第8跨配重	22.6
第3跨架设	25.4
第4跨架设	25.5
第5跨架设	25.5
第6跨架设	25.4
第7跨架设	25.3
第7跨卸载	25.3
第8跨架设	25.2
第8跨卸载	25.3
第9跨架设	25.2
第10跨架设	25.0
第11跨架设	24.9
撤去架桥机	24.9

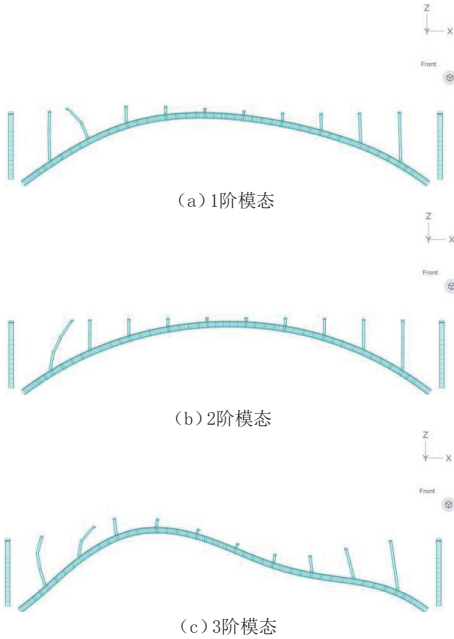


图7 屈曲模态图

过节点荷载等效等手段,模拟不同的T梁不对称架设过程,从拱圈应力、位移以及稳定性方面,评估了不同方案下的模型计算结果,并最终给出了最优的施工方案,得出以下结论:

- (1)配重荷载的施加,可以有效降低钢筋混凝土拱桥T不对称架设时拱圈开裂的风险,且配重布置应不少于1跨的布置数量。
- (2)在拉应力均保持基本相同控制效果的前提下,综合施工工效及成本,以2跨配重布置为主,较好的控制拱圈应力为1.4 MPa。
- (3)配重的施加可以降低拱圈在不对称施工下的结构变形,同时注意在施工至第2跨时结构稳定

(下转第126页)