

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202203122024061980

文章编号:1674-599X(2024)03-0048-08

引用格式:王达,刘玉雄,谭本坤,等.叠合梁斜拉桥合龙段湿接缝应力优化分析[J].交通科学与工程,2024,40(3):48-55.

Citation: WANG Da, LIU Yuxiong, TAN Benkun, et al. Stress optimization analysis of wet joint in closure section of composite beam cable-stayed bridge[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 48-55.

叠合梁斜拉桥合龙段湿接缝应力优化分析

王达^{1,2}, 刘玉雄¹, 谭本坤¹, 王谐¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中南林业科技大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410004)

摘 要:大跨径混合式叠合梁斜拉桥在中跨合龙段钢梁合龙后,为保证其在桥面板湿接缝浇筑过程中各构件的受力能满足规范要求,且能达到理想成桥状态,以盐坪坝长江大桥为研究对象进行研究。考虑到该桥的结构受力与施工特点,对桥梁合龙过程中桥面板湿接缝浇筑进行了有限元分析。针对该桥的最后一个标准段与合龙段,对比了4种不同施工方案的优劣性,这些方案主要围绕湿接缝浇筑等强、桥面吊机的拆除及预应力穿束这3个关键施工工序展开。同时探究了桥面吊机站位对中跨合龙段及其邻近节段桥面板应力的影响。研究结果表明:桥面吊机影响区域湿接缝与合龙段湿接缝一同浇筑的施工方案所产生的桥面板拉应力最小;在合龙段湿接缝单独浇筑完成后,按照先张拉预应力后拆除吊机的施工顺序可降低桥面板开裂的风险;通过合理布置桥面吊机的站位,可使原本超限的桥面板湿接缝拉应力降低至规范要求的范围内。

关键词:叠合梁斜拉桥;有限元分析;合龙段施工;湿接缝浇筑;桥面吊机

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

Stress optimization analysis of wet joint in closure section of composite beam cable-stayed bridge

WANG Da^{1,2}, LIU Yuxiong¹, TAN Benkun¹, WANG Xie¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to ensure that the stress of each component could meet the requirements of the specification during the wet joint pouring process of the bridge deck after the steel girder's closure in the mid-span closed section of the long-span hybrid composite beam cable-stayed bridge, and it could reach the ideal bridge state after the reasonable finished state of the bridge, the Yanpingba Yangtze River Bridge was selected as the research object, and its finite element analysis of wet joint pouring of bridge deck in the closure process of the bridge was carried out by considering the structural forces and construction characteristics of the bridge. As for the last standard section and closure section of the bridge, the effects of four schemes with different construction sequences for the three processes (e.g. wet joint pouring and waiting for strength grade, bridge deck crane removal, and prestressed beam piercing) and the position of the bridge deck crane on the deck stress of the mid-span closed section

收稿日期:2022-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878072);湖南省科技创新计划资助(2020RC4049);中南林业科技大学引进人才科研启动基金项目(ZK2021YJ036)

通信作者:王达(1980—),男,教授,主要从事大跨度桥梁结构理论、钢-混组合结构、桥梁检测与评定、大跨度桥梁施工控制方面的研究工作。E-mail: yxwang2006@yeah.net

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

and its adjacent sections were studied in this paper, respectively. The results show that the construction scheme in which the wet joints in the affected area of the bridge deck crane are poured together with wet joints in the closure section produce the smallest tensile stress on the deck. The risk of cracking of the bridge deck could be reduced by following the sequence of tensioning the prestressing first and then removing the crane, if the wet joints in the closure section have been poured separately. Among the four schemes, the tensile stress of the wet joint of the bridge deck which exceeds the limit could be reduced to the specification requirements when the station of the bridge deck crane is reasonable.

Key words: composite girder cable-stayed bridge; finite element analysis; closure section construction; wet joint casting; bridge deck crane

以往研究表明:钢-混叠合梁斜拉桥借助剪力钉可充分发挥混凝土受压、钢材受拉的材料特性。除湿接缝外,钢主梁与混凝土桥面板均是预制结构,梁段可分段散拼,施工速度快,但相比于其他桥梁工程而言,其施工工艺较为复杂,且湿接缝浇筑等强前,桥面板与湿接缝均作为外荷载加载在钢梁上^[1]。叠合梁斜拉桥的施工顺序对其整体性能具有显著影响,特别是湿接缝的浇筑时机在施工质量控制中尤为重要。若湿接缝的浇筑时机与方式选择不当,很容易导致叠合梁斜拉桥的桥面板受力不均匀,甚至可能导致内部混凝土结构产生裂缝等^[2]。这些潜在的质量问题不仅会影响桥梁的耐久性,还会影响其结构安全性。因此,精确掌握并优化湿接缝的浇筑时机与方法,对于确保叠合梁斜拉桥的整体性能至关重要。

研究人员针对叠合梁斜拉桥桥面板湿接缝浇筑时间的合理性、单双节段循环施工可行性等方面展开了诸多研究。例如,詹元林等^[3]采用双节段循环、湿接缝同步浇筑的施工工艺进行主梁施工,并对双节段循环施工工序的主梁受力状态进行了分析;胡俊等^[4]对桥面板滞后浇筑湿接缝的工序进行了研究,发现在滞后一次或滞后两次的工序下,桥面板几乎不出现拉应力,桥面板滞后一次的施工工序,能使结构在施工过程中及成桥运营阶段的受力最佳;洪丽娟等^[5]对组合梁斜拉桥的主梁双节段循环安装施工技术进行了研究,提出了双节段循环安装时施工梁段分次吊装、两道湿接缝一次施工的优化方案;余毅等^[6]以平塘特大桥为背景,对两道湿接缝一次施工的结构受力进行分析,结果表明:工期可缩减至原来的一半,且结构强度满足规范要求;易云焜等^[7]通过研究确定了斜拉索分两次张拉、同步浇筑但滞后斜拉索处局部湿接缝的工序为合理施工工序;肖军等^[8]分析了单节段循环浇筑湿接缝

与滞后一个节段进行湿接缝浇筑对施工监控的影响;刘发梁等^[9]采用有限元软件开展桥面板滞后浇筑湿接缝与双节段循环施工对主桥结构受力影响的研究,发现采用双节段循环施工后,每个标准节段的施工时间至少可以节省3.5 d,并且无论湿接缝滞后一次或两次,主梁内力相对于单节段施工都处于最优状态,该施工方法既可以满足现场施工需要,也能让结构内力得到保障。以上研究均为组合梁斜拉桥的施工方法提供了参考。

石强等^[10]研究了滞后两个节段浇筑湿接缝的施工方案,但是该研究未考虑到合龙段施工步骤的细化,也未探究浇筑合龙段及合龙段附近节段湿接缝施工顺序的影响。本文针对拆除吊机后桥面板局部应力过大的现象,以优化中跨合龙段及减小其附近桥面板在施工过程中的拉应力为目标,通过考虑最后一个标准节段和合龙段湿接缝浇筑之间的关系,提出了4种施工方案,开展合龙段及其附近湿接缝的应力研究,对比分析了湿接缝浇筑并等强、桥面吊机的拆除及预应力穿束3个关键施工步骤执行的先后顺序对湿接缝应力的影响,得出应力在规范要求内的可行方案以及应力超限后的待优化方案。同时,基于可行方案与待优化方案,对桥面吊机站位进行分析,并通过桥面吊机站位优化将待优化方案的应力降至规范要求范围内。

1 工程实例

1.1 项目概况

四川宜宾盐坪坝长江大桥是一座双塔空间双索面混合式叠合梁斜拉桥,采用半漂浮体系,桥跨布置为(45+51+97+480+97+51+45)m。中跨主梁采用双边箱形组合梁断面,全宽为40 m,由箱形主纵梁、工字形横梁、小纵梁组成平面网格,并在其上叠

合混凝土预制桥面板。桥面板采用先预制吊装,再浇筑湿接缝的方式进行施工。预制桥面板分为中板、边板和悬臂板三大类,预制桥面板纵向接缝设置抗剪齿口,钢主梁、挑梁和横梁顶面均设置圆柱头焊钉,并浇筑于桥面板湿接缝内,形成钢-混组合结构,中跨主梁标准断面如图1所示。

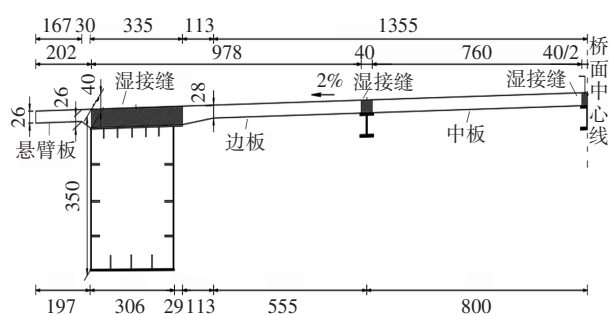


图1 中跨主梁标准断面(单位:cm)

Fig. 1 Section of mid-span main girder (unit:cm)

边跨主梁采用变宽双边箱形混凝土梁断面,除双边箱形主纵梁外,中间还设置了三根混凝土小纵梁,并与横梁一并形成了平面网格,同时与桥面板组合形成“ π ”形,边跨主梁断面如图2所示。

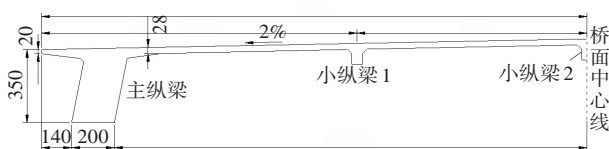


图2 边跨主梁断面(单位:cm)

Fig. 2 Section of side span girder (unit:cm)

1.2 有限元模型

利用MIDAS/Civil建立全桥有限元模型进行分析,全桥模型中共有6 312个单元、4 629个节点,其中梁单元4 524个,受拉桁架单元168个,板单元1 620个。主塔、主梁、桥墩、承台及桩基等采用梁单元模拟,斜拉索采用受拉桁架单元模拟,各材料特性如表1所示,计算模型如图3所示。

根据此斜拉桥的工程实际情况在模型中添加边界条件。主塔底桩基采用土弹簧约束,墩底采用固结约束;主梁梁端及辅助墩处设置竖向约束,纵向及横向不约束;主梁与主塔之间设置竖向、横向约束,纵向不约束;拉索与索塔、主梁之间均采用容重为0的刚臂进行连接;钢-混结合段与中跨主纵梁及小纵梁采用刚性连接。

表1 主桥材料特性表

Table 1 Material characteristics table of main bridge

| 名称 | 材料 | 弹性模量/ MPa | 泊松比 | 容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$) |
|-------|--------------------------------|--------------|-----|--|
| 桩基础 | C35 | 31 500 | 0.2 | 24.01 |
| 桥墩 | C40 | 32 500 | 0.2 | 25.98 |
| 索塔 | C55 | 38 600 | 0.2 | 25.98 |
| 斜拉索 | 环氧涂层预应力钢绞线 | 197 000 | 0.3 | 93.45 |
| 边跨主梁 | C60 | 46 600 | 0.2 | 25.98 |
| 叠合梁-钢 | Q370qD | 206 000 | 0.3 | 76.93 |
| 叠合梁-混 | C60 | 46 600 | 0.2 | 25.98 |
| 预应力钢束 | $\varnothing 15.2$ mm 高强低松弛钢绞线 | 195 000 | 0.3 | 78.45 |

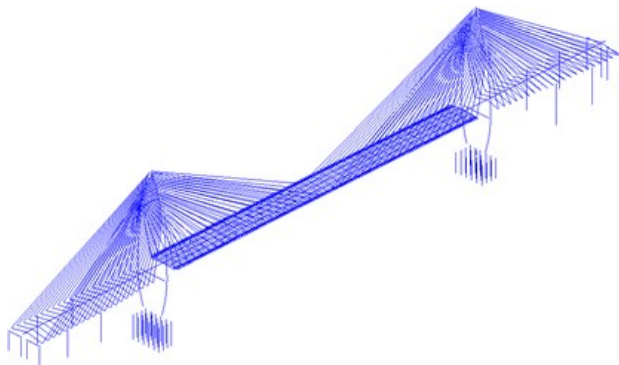


图3 盐坪坝长江大桥有限元模型

Fig. 3 The finite element model of Yanpingba Yangtze River Bridge

中跨钢-混叠合梁采用梁单元模拟主纵梁、小纵梁与横梁,用厚板单元模拟混凝土桥面板及湿接缝,合龙段附近细部构造如图4所示。

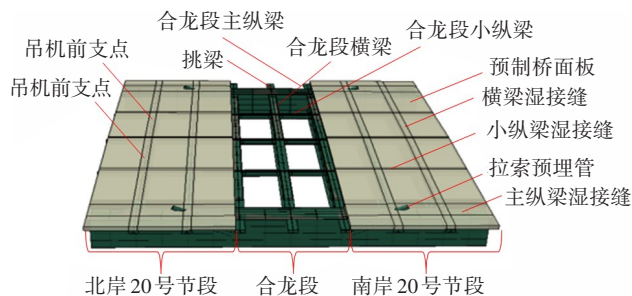


图4 合龙段附近局部构造图

Fig. 4 Local structure near the closure section

2 浇筑方案优化分析

2.1 施工工序

此桥实际施工中采用滞后两个节段浇筑湿接缝的方案,但在合龙阶段对临时固结体系的解除、

边跨现浇段支架的拆除、桥面吊机拆除、预应力钢束的张拉做相关模拟时,均未对施工步骤进行细化。在实际施工过程中,最后一个标准梁段的湿接缝在合龙段合龙前已完成浇筑,桥面吊机拆除后会导致主桥抬升。因此,在桥面吊机前支点处的桥面板湿接缝可能会出现拉应力超限。具体而言,位于横梁处的湿接缝及其邻近桥面板,在桥面吊机拆除后由于主桥的抬升,产生了较大的拉应力^[11]。整桥的计算结果中,截取了合龙段附近拉应力较大的位置,如图5所示,图中数值表示的是桥面板湿接缝沿纵桥向的正应力。

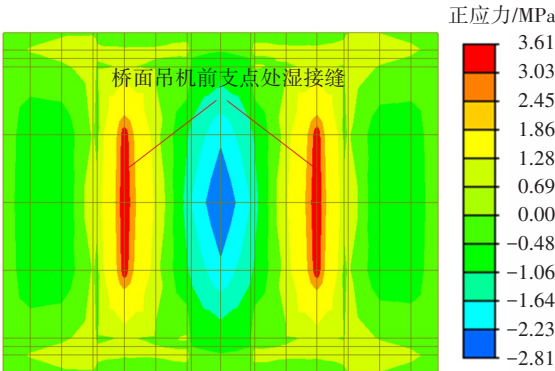


图5 吊机支点处湿接缝拉应力示意图

Fig. 5 Schematic diagram of tensile stress of wet joint at crane fulcrum

但由于模型中桥面吊机的拆除与张拉预应力钢束的施工是在同一阶段进行模拟的,因此,在张拉预应力钢束时产生的压应力,会在一定程度上抵消湿接缝处超限的拉应力^[12],故在施工节段模拟时与成桥状态下桥面板的拉应力均显示正常。

如果最后合龙段的湿接缝是单独浇筑的,那么在拆除桥面吊机时,钢梁的上拱将会显著增大吊机前支点处桥面板的拉应力。若处理不当,很容易导致桥面板出现开裂现象。为了减小施工过程中主梁跨中位置附近桥面板的拉应力,将施工方案分成两个大类进行考虑,提出了如表2所示的4种施工方案。第一类为方案1,即将最后一个标准节段和合龙段的湿接缝一同浇筑;第二类为方案2~4,即合龙段的湿接缝单独浇筑(本文中所有湿接缝浇筑并等强均按设计要求的5d养护龄期来考虑)。通过对比表中4种不同方案,探究桥面吊机前支点处湿接缝及邻近桥面板的拉应力对最后一个标准梁段产生的影响。实际施工中还伴随着边跨现浇段支架的拆除,以及在合龙前后解除临时固结。由于这两项施工工序主要与合龙段吊装主纵梁的前后

施工工序相关,本文就不再深入探讨。

表2 合龙段桥面板湿接缝浇筑步骤细化方案

Table 2 Detailed scheme of wet joint pouring procedure for bridge deck in closure section

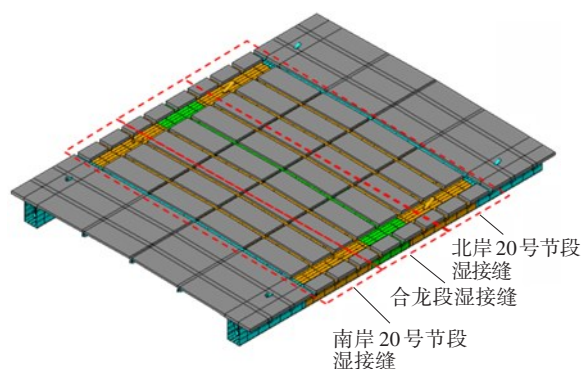
| 步骤 | 方案1 | 方案2 | 方案3 | 方案4 |
|----|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 施工合龙段主纵梁 | 施工合龙段主纵梁 | 施工合龙段主纵梁 | 施工合龙段主纵梁 |
| 2 | 施工合龙段横梁与小纵梁 | 施工合龙段横梁与小纵梁 | 施工合龙段横梁与小纵梁 | 施工合龙段横梁与小纵梁 |
| 3 | 20号节段与合龙段湿接缝浇筑并等强 | 浇筑合龙段湿接缝并等强 | 吊装合龙段桥面板 | 浇筑合龙段湿接缝并等强 |
| 4 | 拆除桥面吊机 | 拆除桥面吊机 | 拆除桥面吊机 | 张拉预应力钢束 |
| 5 | 张拉预应力钢束 | 张拉预应力钢束 | 浇筑合龙段湿接缝并等强 | 拆除桥面吊机 |
| 6 | 成桥阶段 | 成桥阶段 | 张拉预应力钢束 | 成桥阶段 |
| 7 | | | 成桥阶段 | |

表2所示的方案1中,步骤3提到在合龙前保留最后一个标准节段的湿接缝不进行浇筑,等到合龙后再与合龙段的湿接缝一起进行浇筑。基于本项目的实际情况,即只剩下合龙段桥面板的湿接缝还未浇筑,为了实现这一方案,可以在桥面吊机前支点处,将已浇筑好的湿接缝混凝土部分凿开。之后,在浇筑合龙段湿接缝时,将这个凿开的部位也一并浇筑并妥善养护,如图6(a)所示。这种做法与最后一个标准节段和合龙段桥面板湿接缝一同浇筑的原理是相同的。而方案2~4中合龙之前所有标准梁段的湿接缝均已浇筑并等强完毕,后续只需在拆除桥面吊机与张拉预应力前后浇筑合龙段湿接缝,如图6(b)所示。在表2中,如果在拆除桥面吊机的步骤中没有将吊装桥面板与浇筑湿接缝这两个施工步骤分隔开,那么表中就未单独列出吊装桥面板这一工序。也即吊装桥面板与桥面板湿接缝的浇筑及等强步骤将在同一个施工阶段中进行。在表2中,仅方案3中单列了吊装桥面板这一步骤。

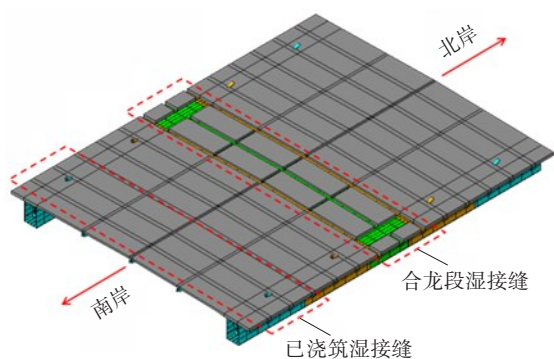
2.2 计算结果分析

在进行合龙施工时,需要进行解除临时固结、拆除边跨现浇段支架、拆除桥面吊机等施工步骤。实际施工时选择了滞后两个节段浇筑湿接缝的方案。但在这一过程中,没有充分考虑合龙时的详细施工步骤,此时桥面吊机有两个前支点位置:纵向位于20号节段靠近合龙段第三根横梁处,横向位于

中板横梁距中轴线四分之三处,两个后锚点:纵向位于18号梁段靠近合龙段的第一根横梁处,横向同前,如图7所示。



(a) 方案1湿接缝浇筑示意图



(b) 方案2~4湿接缝浇筑示意图

图6 各方案湿接缝浇筑示意图

Fig. 6 Schematic diagram of wet joint casting for each scheme

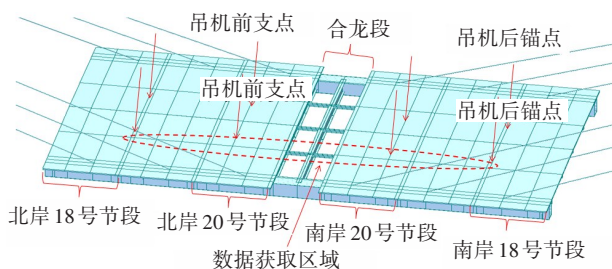


图7 桥面吊机站位示意图

Fig. 7 Schematic diagram of bridge deck crane station

在施工过程中,桥面板拉应力有轻微超限的情况。这是因为,在吊装合龙段主纵梁之前,模型中的最后一个标准梁段的湿接缝已经完成了浇筑。当拆除桥面吊机时,主桥会出现抬升,这会使得20号节段的桥面吊机前支点处(即横梁的湿接缝及其相邻的桥面板)产生较大的拉应力。然而,湿接缝位置产生的拉应力可以被张拉预应力钢束所形成的压应力有效抵消。也就是说,张拉预应力钢束的

操作与拆除桥面吊机是在同一施工阶段进行的。因此,在未对施工工序进行详细模拟的模型中,无论是施工过程中还是成桥时,桥面板的拉应力都相对较小。各工序未细化时各施工节段应力如图8所示,其中的最大值为0.82 MPa。基于此,对施工方案进行步骤细化分析,得到细化后4种方案各步骤中桥面板拉应力对比,如图9~12所示,其中各步骤分别代表表2对应方案中的施工步骤。成桥后4种方案合龙段及其附近桥面板应力如图13所示。图9~13中数据均取自各方案模型中南北岸桥面吊机后锚点之间的桥面板上端节点数据,数据获取区域如图5所示,数值均为桥面板沿纵桥向正应力。

由图8~12可知,方案1中桥面吊机支点处的桥面板,在20号节段与合龙段湿接缝浇筑并等强、与张拉预应力这两个阶段均未出现拉应力,在拆除吊机时这个节段出现了2.40 MPa的拉应力,但此值小于规范规定的混凝土抗拉设计强度2.85 MPa,即应力均满足要求;而方案4桥面吊机处的桥面板湿接缝处在以上三个施工阶段均未出现拉应力。因此,在完成浇筑合龙段湿接缝并等强的工序后,下

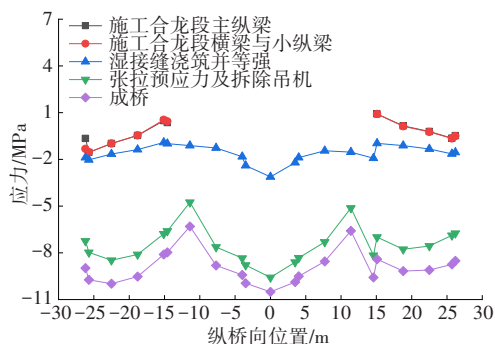


图8 工序未细化时各施工阶段桥面板应力

Fig. 8 Stress of bridge deck at each construction stage when the process is not refined

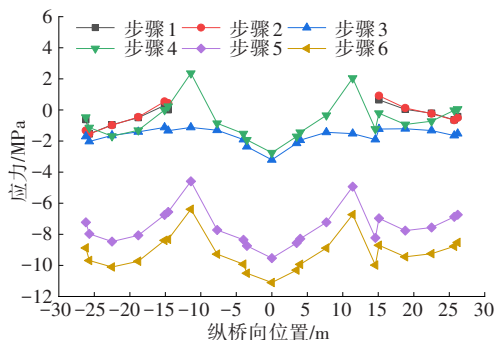


图9 合龙至成桥各施工阶段桥面板应力(方案1)

Fig. 9 Stress of bridge deck in each construction stage from closure to completion of bridge (scheme 1)

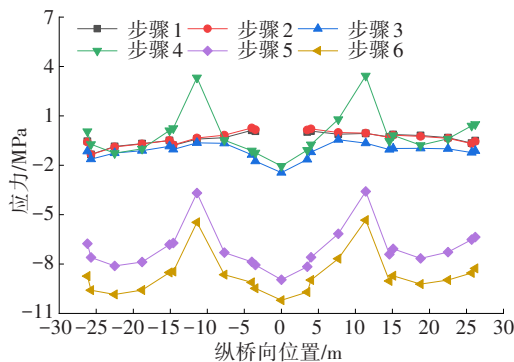


图10 合龙至成桥各施工阶段桥面板应力(方案2)

Fig. 10 Stress of bridge deck in each construction stage from closure to completion of bridge (scheme 2)

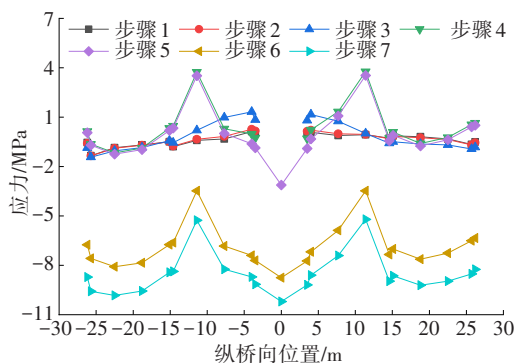


图11 合龙至成桥各施工阶段桥面板应力(方案3)

Fig. 11 Stress of bridge deck in each construction stage from closure to completion of bridge (scheme 3)

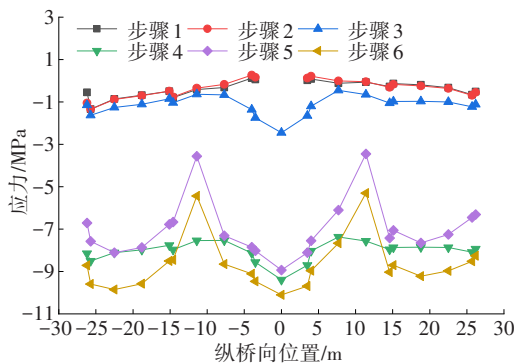


图12 合龙至成桥各施工阶段桥面板应力(方案4)

Fig. 12 Stress of bridge deck in each construction stage from closure to completion of bridge (scheme 4)

一工序张拉预应力钢束,可明显地降低混凝土拉应力^[13],并能消减后续拆除桥面吊机所导致的拉应力增加;方案2与方案3中,桥面板的吊机支点处在拆除吊机阶段出现了拉应力,最大分别为3.44、3.77 MPa,超出允许拉应力;方案3中桥面板的吊机支点处在浇筑合龙段湿接缝并等强阶段(步骤5)也出现了拉应力,最大为3.53 MPa。

由图13可知,各方案在成桥后桥面板均无拉应

力,即建模过程中无论各施工步骤是否细化,最终成桥状态的桥面板应力都是符合要求的。这也进一步证明,如未对产生相反应力的施工步骤进行细化,很可能会掩盖部分应力超限的情况。且对于在合龙段附近桥面板的压应力,类型一的均大于类型二的,即最后一个标准段与合龙段湿接缝一同浇筑的施工方式产生的压应力会稍大于合龙段单独浇筑湿接缝产生的压应力。

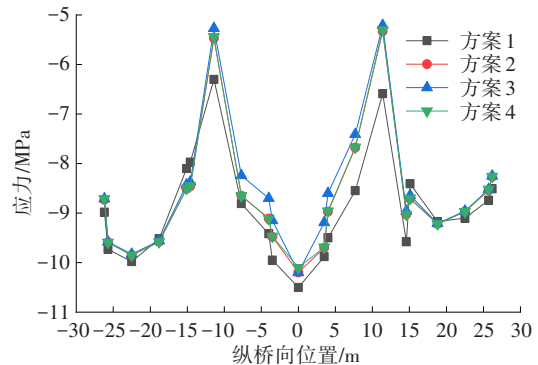


图13 4种成桥方案桥面板应力

Fig. 13 Bridge deck stress of 4 completed bridge schemes

综上,在桥面吊机前支点处于20号节段靠近合龙段第3根横梁处时,可按方案1或方案4进行施工。即实际施工中,如最后一个标准梁段(本桥为20号节段)湿接缝未浇筑,可采用方案1将其与合龙段湿接缝一同浇筑,如最后一个标准梁段湿接缝已经浇筑,可采用方案4只进行合龙段湿接缝的浇筑。

2.3 桥面吊机位置分析

2.3.1 可行方案吊机站位分析

通过以上分析已确定可行方案为方案1与方案4。以方案4为例,根据桥面吊机前支点所处位置的不同,进行桥面吊机前支点处桥面板湿接缝应力研究。如图14所示,初拟四种工况进行分析,由于南岸与北岸对称施工,为显示方便,吊机只显示在图中北岸一侧;以中轴线为界,一侧桥面板不显示;只显示了各工况桥面吊机前支点,后锚点未显示。

四种工况下的桥面吊机前支点,分别设置在中跨合龙段往边跨方向的四根横梁上,即工况一中前支点位于靠近合龙口最近的20号节段首根横梁上;工况二桥面吊机前支点位于20号节段的第二根横梁上;工况三桥面吊机前支点位于20号节段的第三根横梁上(同前文方案4原桥面吊机位置);工况四吊机前支点位于19号节段的第一根横梁上。

各工况在各施工工序下的计算结果如表3所

示,其中施工工序1为施工合龙段主纵梁;施工工序2为施工合龙段横梁与小纵梁;施工工序3为浇筑合龙段湿接缝并等强;施工工序4为张拉预应力钢束;施工工序5为拆除桥面吊机,施工工序6为成桥阶段。各工序与表2中方案4各施工步骤相对应。

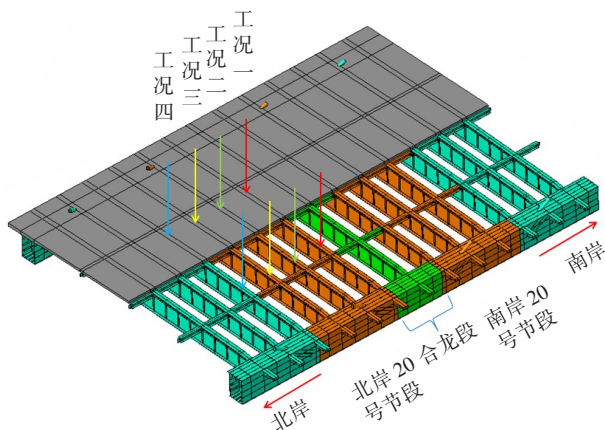


图14 各工况下吊机站位图

Fig. 14 Bitmap of crane station under various working conditions

表3 后锚点之间桥面板最大最小应力(方案4)

Table 3 Maximum and minimum stress of bridge deck between rear anchor points (scheme 4) MPa

| 步骤 | 工况一 | 工况二 | 工况三 | 工况四 |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 0.99/-0.57 | 0.93/-0.99 | 0.87/-1.07 | 0.81/-1.14 |
| 2 | 0.66/-0.58 | 0.60/-1.01 | 0.54/-1.09 | 0.48/-1.16 |
| 3 | -0.17/-3.20 | -0.27/-3.20 | -0.36/-3.20 | -0.44/-3.20 |
| 4 | -7.2/-10.20 | -7.31/-10.20 | -7.41/-10.20 | -7.46/-10.20 |
| 5 | -4.42/-8.57 | -3.31/-9.72 | -3.28/-9.74 | -3.88/-9.54 |
| 6 | -6.21/-10.20 | -5.27/-11.40 | -5.38/-11.30 | -6.06/-11.10 |

2.3.2 待优化方案吊机站位分析

待优化方案即为上文中的方案2与方案3。以待优化方案2为例,根据桥面吊机前支点所处位置的不同,进行桥面吊机前支点处桥面板湿接缝应力研究。各工况在各施工工序下的计算结果如表4所示,其中施工工序1为施工合龙段主纵梁;施工工序2为施工合龙段横梁与小纵梁;施工工序3为浇筑合龙段湿接缝并等强;施工工序4为拆除桥面吊机;施工工序5为张拉预应力钢束;施工工序6为成桥阶段。各工序与表2中方案2各施工步骤相对应。

从表3~4可以发现,以拆除吊机这个施工步骤为界限,在拆除吊机前,随着施工的进行,每个工况下桥面板拉应力逐渐减小(压应力逐渐加大);在不同工况下当施工步骤相同时,随着距合龙口距离的加大拉应力同样减小。

在拆除吊机的阶段,主梁发生抬升,桥面板拉应力相应增大,在前三个工况下,拉应力增大幅度随着合龙段距离的加大而减小。在工况四时增大幅度较工况三有所增加,但仍小于工况一、工况二的增大幅度。

从表4可以看出,待优化方案2处于工况一时,最大拉应力为2.37 MPa,小于规范要求的混凝土抗拉设计强度2.85 MPa,即应力满足要求。基于此,可进一步探究待优化方案3处于工况一时的应力情况,进而指导施工。

表4 后锚点之间桥面板最大最小应力(方案2)

Table 4 Maximum and minimum stress of bridge deck between rear anchor points (scheme 2) MPa

| 步骤 | 工况一 | 工况二 | 工况三 | 工况四 |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 0.99/-0.91 | 0.93/-0.99 | 0.87/-1.07 | 0.81/-1.14 |
| 2 | 0.66/-0.93 | 0.60/-1.01 | 0.54/-1.09 | 0.48/-1.16 |
| 3 | -0.17/-3.20 | -0.27/-3.20 | -0.36/-3.20 | -0.44/-3.20 |
| 4 | 2.37/-1.64 | 3.55/-2.79 | 3.61/-2.81 | 3.40/-2.61 |
| 5 | -4.54/-8.56 | -3.46/-9.74 | -3.42/-9.76 | -4.00/-9.56 |
| 6 | -6.24/-10.20 | -5.30/-11.40 | -5.41/-11.30 | -6.09/-11.40 |

3 结论

针对大跨径混合式钢-混叠合梁斜拉桥的受力特点与施工特点,详细分析了叠合梁合龙过程中湿接缝浇筑的影响因素,确定了几种适用于混合式叠合梁斜拉桥合龙段桥面吊机站位与湿接缝浇筑方案,得出以下结论:

1) 为保证在施工过程中的钢主梁和预制混凝土桥面板的应力不超限,在进行有限元模型计算时,建议对拆除吊机与张拉预应力的施工阶段进行细化并分步模拟,避免模型中拉应力及压应力相互抵消,从而造成实际应力超限。

2) 根据计算结果,建议采用桥面吊机影响区域的湿接缝与合龙段湿接缝一同浇筑的施工顺序(方案1),其产生的桥面板拉应力小,且施工方便、节省工期。

3) 如只剩下合龙段湿接缝未浇筑,则合龙段湿接缝浇筑完后,先张拉预应力,后拆除吊机的施工顺序可减小吊机处桥面板开裂的风险。

4) 桥面吊机的站位对前支点与后锚点处的湿接缝及其邻近的桥面板应力影响较为明显,随着吊机支点距合龙段距离的增加,桥面板压应力减小,但随着距离的加大,压应力减小的幅度逐渐降低。

参考文献(References):

- [1] 张丰, 颜东煌, 陈常松. 大跨度组合梁斜拉桥成桥状态参数敏感性分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 91-97. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.014.
ZHANG Feng, YAN Donghuang, CHEN Changsong. Parameter sensitivity analysis of the long-span composite girder cable-stayed bridge in the fini shed bridge state[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 91-97. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u. 2021. 02.014.
- [2] 蔡邦国, 邱国阳, 谈华顺. 组合梁斜拉桥桥面板纵向抗裂措施研究[J]. 世界桥梁, 2019, 47(3): 44-48. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2019.03.009.
CAI Bangguo, QIU Guoyang, TAN Huashun. Study of measures to treat longitudinal cracking in deck slabs of composite girder cable-stayed bridge[J]. World Bridges, 2019, 47(3): 44-48. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-7767. 2019.03.009.
- [3] 詹元林, 杨勇, 王荣辉, 等. 大跨径斜拉桥钢-混凝土叠合梁架设工序优化及受力分析[J]. 公路, 2021, 66(7): 160-164.
ZHAN Yuanlin, YANG Yong, WANG Ronghui, et al. Optimization of erection process and stress analysis of steel-concrete composite beam of long-span cable-stayed bridge[J]. Highway, 2021, 66(7): 160-164.
- [4] 胡俊, 曾一峰, 贾俊峰. 叠合梁斜拉桥混凝土桥面板滞后浇筑湿接缝的工序研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(4): 30-34. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2016.04.08.
HU Jun, ZENG Yifeng, JIA Junfeng. Research on working procedure of lag pouring of wet-joint in bridge deck concrete slab on composite girder of cable-stayed bridge[J]. Railway Engineering, 2016, 56(4): 30-34. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2016.04.08.
- [5] 洪丽娟, 周仙通, 郭杰鑫, 等. 组合梁斜拉桥主梁双节段循环安装施工技术[J]. 世界桥梁, 2013, 41(5): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2013.05.011.
HONG Lijuan, ZHOU Xiantong, GUO Jiexin, et al. Construction technique of two-section circulating assembly for cable-stayed bridge with composite girder [J]. World Bridges, 2013, 41(5): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2013.05.011.
- [6] 余毅, 彭旭民. 平塘特大桥上部结构施工方案优化措施分析[J]. 桥梁建设, 2019, 49(增刊1): 104-108.
YU Yi, PENG Xumin. Analysis of optimization measures to construction schemes for superstructure of Pingtang bridge[J]. Bridge Construction, 2019, 49(sup 1): 104-108.
- [7] 易云焜, 岳青, 严和仲. 叠合梁斜拉桥主梁施工工序方案比选[J]. 公路, 2012, 57(12): 36-38. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2012.12.009.
YI Yunkun, YUE Qing, YAN Hezhong. Comparison and selection of construction process schemes for main girder of composite beam cable-stayed bridge [J]. Highway, 2012, 57(12): 36-38. DOI: 10.3969/j. issn. 0451-0712.2012.12.009.
- [8] 肖军, 李松, 刘永健, 等. 叠合梁施工工艺调整对斜拉桥施工索力的影响[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 101-104. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.021.
XIAO Jun, LI Song, LIU Yongjian, et al. Influence of construction technology adjustment of composite girder on construction cable force of cable-stayed bridge [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 101-104. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.04.021.
- [9] 刘发梁, 王荣辉, 张卓杰. 叠合梁斜拉桥混凝土桥面板湿接缝浇筑工序研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 104-108, 119. DOI: 10.15958/j.cnki.gdxbzrb.2021.01.16.
LIU Faliang, WANG Ronghui, ZHANG Zhuojie. Study on the pouring procedure of the wet joints of the concrete deck of the composite beam cable-stayed bridge [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2021, 38(1): 104-108, 119. DOI: 10.15958/j. cnki. gdxzrb.2021.01.16.
- [10] 石强, 蔚永旺. 组合梁斜拉桥桥面板滞后施工可行性研究[J]. 施工技术, 2019, 48(13): 120-124. DOI: 10.7672/sjgs2019130120.
SHI Qiang, YU Yongwang. Feasibility study on hysteresis construction of bridge girder of composite beam cable-stayed bridge [J]. Construction Technology, 2019, 48(13): 120-124. DOI: 10.7672/sjgs2019130120.
- [11] 李宏江, 王岐峰, 卢达义. 在役PC斜拉桥主梁湿接缝的破坏机制分析[J]. 工程力学, 2012, 29(增刊2): 210-215, 232.
LI Hongjiang, WANG Qifeng, LU Dayi. Analysis on failure mechanism of wet joints in the boxgirder of an existing PC cable-stayed bridge [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(sup 2): 210-215, 232.
- [12] 杨正东, 郭大成, 张文学. 斜拉桥塔梁固结区预应力束张拉对横梁应力影响研究[J]. 公路, 2020, 65(4): 98-104.
YANG Zhengdong, GUO Dacheng, ZHANG Wenxue. Research on the influence of prestressed bundle tension to the crossbeam stress in tower and beam consolidation zone of cable-stayed bridge[J]. Highway, 2020, 65(4): 98-104.
- [13] 李浩, 裴炳志, 郭泽平, 等. 节段现浇预应力混凝土宽箱梁后浇湿接缝的早龄期受力分析及开裂控制[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 150-156. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.02.033.
LI Hao, PEI Bingzhi, GUO Zeping, et al. Stress analysis and cracking control of post-cased wet joint in early age of wide box girder with segmental cast-in-place prestressed concrete [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 150-156. DOI: 10.14048/j. issn. 1671-2579.2020.02.033.

(责任编辑:薛仪;英文编辑:周锐)