

大跨度钢-混混合变截面连续箱梁桥 悬臂施工与控制

吕海军,唐亮,周野,齐乐

(中交第一航务工程局有限公司,天津市 300461)

摘要:为解决特殊环境下钢-混混合变截面连续箱梁桥中跨钢箱梁难以整体提升施工的难题,指导钢-混混合变截面连续箱梁桥的设计和施工控制,该文通过类比分析不同施工方法的外部措施和对结构成桥状态的影响,对小节段悬臂拼装法的施工影响关键因素和控制要点进行了理论研究和实桥计算。结果表明:施工临时荷载和临时体外预应力的作用效应在体系转换后无法抵消,会影响结构成桥状态;通过施工措施,小节段悬臂拼装法可以达到整体提升法所对应的成桥状态,采用下部体外预应力调整合龙口状态的作用效率为上部体外预应力的2.4倍,且能显著降低钢梁轴力;小节段悬臂拼装法中,吊机重量对结构内力影响较整体提升法更大。基于此,针对此类桥型,研究形成了一套考虑施工过程的流程化设计方法,并提出在合龙口设计临时铰接装置的关键技术,可消除桥面吊机对钢梁根部弯矩的不利影响。

关键词:桥梁工程;混合梁;中跨钢梁;小节段悬臂拼装;合龙

中图分类号:U445.4

文献标志码:A

Cantilever Construction and Control of Long-Span Steel-Concrete Hybrid Continuous Box Girder Bridges with Variable Sections

LYU Haijun, TANG Liang, ZHOU Ye, QI Le

(CCCC First Harbor Engineering Company Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: This study aims to solve the overall lifting difficulty of mid-span steel box girders in steel-concrete hybrid continuous box girder bridges with variable sections under special environments, providing guidance for the design and construction control of such bridges. By analyzing the external measures adopted by different construction methods and their influence on the bridge-building state of the structure, theoretical research and real bridge calculations were conducted on the key influencing factors and control points of the sub-segment cantilever assembly method. The results indicate that the effect of temporary load and temporary external prestressing cannot be offset after the system transformation, and will affect the bridge-building state of the structure. Additionally, it is found that by conducting construction measures, the sub-segment cantilever assembly method can achieve the bridge-building state corresponding to the overall lifting method, and the efficiency of adjusting closure state by adopting upper external prestressing is 2.4 times that of adopting the lower external prestressing and can substantially reduce axial force on steel girders. Furthermore, in the sub-segment cantilever assembly method, crane weight has a greater influence on internal forces than the overall lifting method. Based on this, a process-oriented design method considering construction processes was developed for this type of bridge, and a key technology of designing temporary hinged devices at the closure was proposed, which can eliminate the adverse influence of bridge deck cranes on the bending moment at the steel girder root.

Keywords: bridge engineering; hybrid girder; mid-span steel girder; sub-segment cantilever assembly; closure

收稿日期:2024-05-14 修回日期:2024-08-30

基金项目:交通运输行业重点科技清单项目(编号:2021-MS1-047);陕西省交通运输厅2022年度交通科研项目(编号:22-30K)

作者简介:吕海军,男,高级工程师.E-mail:1044628254@qq.com

0 引言

大跨径钢-混混合变截面连续箱梁桥/连续刚构桥(以下统称“钢-混混合变截面连续箱梁桥”)是指桥梁主梁纵向通过钢混结合段实现混凝土梁与钢梁的组合(图1)。该结构能利用混凝土和钢材各自的优点,在一定范围内具有跨度优势,填补了斜拉桥与一般连续梁适用跨度的空缺,且节约造价。对于具备大节段运输条件的跨江、跨海、跨路线桥梁,其中跨钢梁主要采用整体提升法施工,通过在钢混结合部位设置提升装置,将中跨钢梁整体提升到位并与钢混结合段焊接成一个整体,实现结构体系转换^[1-9]。然而,当桥梁工程环境复杂时,中跨钢梁整体提升法无法实施,需要考虑采用小节段逐节施工的方案。但是目前中国尚无采用小节段悬臂拼装施工的钢-混混合变截面连续箱梁桥的先例,这导致在设计方案比选时,便先入为主地将钢-混混合变截面连续箱梁桥与整体提升法绑定在一起。这种观念限制了该桥型在运输条件受限地区的应用,使其缺乏竞争优势,难以推广。

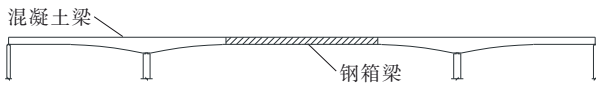


图1 钢-混混合变截面连续箱梁桥结构示意图

Figure 1 Structure of steel-concrete hybrid continuous box girder bridge with variable sections

虽然整体提升法应用成熟,但在特殊环境下,若中跨钢梁无整体提升条件,则需比选其他施工方法。必须研究不同的施工方法对结构受力的影响,通过临时施工措施配合过程控制手段,达到目标成桥状态。当采用的施工措施和控制手段改变了桥梁受力状态,甚至导致结构安全系数不足时,则应从设计角度考虑不同施工方法带来的影响,进而调整截面、材料、配筋、预应力等设计参数,确保现场实施时结构受力安全,避免在方案设计时考虑不充分而导致施工困难或施工措施复杂。本文通过对钢-混混合变截面连续箱梁桥中跨钢梁的各种施工方法进行对比分析,明确不同施工方法与结构成桥状态的关系,并确定施工控制的关键参数,以达到设计、施工、控制一体化闭环服务的目标。

1 施工方法对比分析

中跨钢梁的施工方法直接决定了桥梁的体系转

换过程,该结构体系转换表现为结构边界条件的改变,如边界条件的增减、边界受力的转换。对钢-混混合变截面连续箱梁桥主梁施工而言,混凝土部分可完全参考混凝土连续梁桥的体系转换与控制,但对于钢结构部分,应区别于普通混凝土连续梁桥的体系转换控制。根据常规施工方法,钢-混混合变截面连续箱梁桥的体系转换存在两种情况:①合龙口位于钢混结合段;②合龙口位于钢梁跨中。尽管合龙口位置不同,但二者本质上都属于大悬臂合龙,即结构由大悬臂状态转换为连续状态,使钢结构与混凝土结构形成整体,转换的方式是增加边界约束条件。

对一般无平弯梁式桥的悬臂合龙增加边界约束条件,可以看成二维梁单元增加纵向位移约束 D_x 、竖向约束 D_y 、转角约束 M_z (图2)。纵向约束在连续梁释放墩顶支座约束时可释放,在不考虑预应力情况下,其对成桥受力影响可以忽略。竖向约束 D_y 和转角约束 M_z 将结构原来的悬臂状态改变为连续梁受力状态,合龙前施工荷载和恒载由结构各自承担,合龙后恒载、预应力产生的荷载将由组合结构共同承担。钢-混混合变截面连续箱梁桥为纵向组合梁,与一般的上下组合梁以传递纵向剪力不同,纵向组合梁在组合部位以传递竖向剪力和弯矩为主。参考一般上下组合梁的计算方法,即采用两阶段受力分析并叠加,两阶段划分的时间节点为钢梁合龙焊接前后,由两阶段划分计算确定成桥状态(表1)。

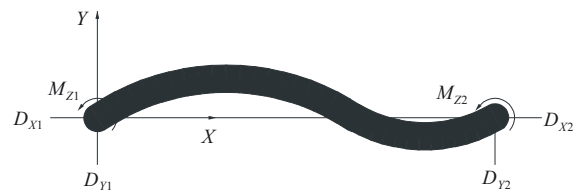


图2 梁单元约束示意图

Figure 2 Girder element constraint

由表1可以看出:成桥状态的效应叠加应包含第一阶段和第二阶段所有荷载产生的效应,即:

$$M = M_{1G} + M_{1Q} + M_{1P0} + M_{1P1} + M_{2G} + (-M_{1Q}) + M_{2P0} + (-M_{1P1}) \quad (1)$$

$$V = V_{1G} + V_{1Q} + V_{1P0} + V_{1P1} + V_{2G} + (-V_{1Q}) + V_{2P0} + (-V_{1P1}) \quad (2)$$

上述公式包含了两类特殊参数,即由临时措施产生的弯矩 M_{1Q} 、 M_{1P1} 及剪力 V_{1Q} 、 V_{1P1} 。这些参数由同种荷载产生,

表 1 钢-混混合变截面连续箱梁桥两阶段受力划分
Table 1 Two-stage force of steel-concrete hybrid continuous box girder bridge with variable sections

阶段	荷载	产生的弯矩	产生的剪力
第一阶段	结构自重	M_{1G}	V_{1G}
	施工临时荷载重量	M_{1Q}	V_{1Q}
	结构永久体外预应力	M_{1P0}	V_{1P0}
	结构临时体外预应力或索力	M_{1P1}	V_{1P1}
	结构铺装和附属重量	M_{2G}	V_{2G}
第二阶段	施工临时荷载重量(拆除)	$-M_{1Q}$	$-V_{1Q}$
	结构合龙预应力	M_{2P0}	V_{2P0}
	结构临时体外预应力或索力(拆除)	$-M_{1P1}$	$-V_{1P1}$

但因施工阶段不同,结构边界条件已发生变化,其效应值不能抵消。这部分附加内力可以看作是体系转换产生的附加效应值,此值是梁式桥架设过程中唯一影响成桥状态的荷载效应。该结论与无应力状态施工过程的推导理论是一致的。该结论指出,不论是采用力的方式还是增加约束的方式来调整合龙口状态,所采取的措施必须在合龙后拆除,才能达到预定的效果。通过这种先安装后拆除的操作,可实现桥梁曲率连续性(即合龙口转角为0)拼装,从而使得形成的内力和位移状态与具体的施工过程无关^[10]。此时无关成立有两个前提条件:①合龙时曲率连续;②所采用的附加措施能拆除或恢复原位。然而,对于大多数桥梁结构而言,完全遵循无应力状态控制要么难以实现,要么成本过高。因此,在设计中必须考虑施工过程的实际影响。针对本课题的钢-混混合变截面连续箱梁桥,只需确定两类可拆除荷载参数:①可拆除临时荷载(吊机、挂篮、其他提升和安装设备)重量;②可拆除体外预应力或索力。再结合合龙口位置的选择,确定施工过程对结构成桥状态的影响。

钢-混混合变截面连续箱梁桥的主梁施工方法包括整体提升法、连续顶推法、小节段悬臂拼装法、高空轨道滑移法、斜拉扣挂法等^[11-12]。根据体系转换过程临时荷载的作用部位和安装、拆除时机,分析得到不同施工方法所采取的外部措施对结构成桥状态的影响如表2所示。

合龙位置的选择至关重要。对于钢-混结合部位合龙的施工方法,合龙吊机影响结构成桥状态;对于主跨跨中合龙的施工方法,合龙吊机、预应力、拉索力影响结构成桥状态。连续顶推法相较于整体提

表 2 不同施工方法外部措施对结构成桥状态影响
Table 2 Influence of external measures of different construction methods on bridge-building state of structures

合龙口位置	施工方法	外部措施荷载	成桥状态影响
钢混结合部位	整体提升法	合龙吊机	√
	连续顶推法	导梁、平衡压重	×
		合龙吊机	√
	小节段悬臂拼装法	合龙吊机	√
临时体外预应力		√	
主跨跨中	高空轨道滑移法	缆塔系统	×
		合龙辅助拉索	√
	斜拉扣挂法	扣塔系统	×
		合龙吊机	√
		斜拉索	√

注:“√”表示有影响,“×”表示无影响。

升法,增加了一些受力工况,通常仅适用于一些特殊施工环境下的桥梁。小节段悬臂拼装法和高空轨道滑移法,均能实现不具备大节段运输条件下中跨钢梁施工。其中,小节段悬臂拼装法的临时体外预应力会增加主梁施工阶段的轴向压力,高空轨道滑移法需为中跨钢梁施工额外搭设缆塔系统。高空轨道滑移法已广泛应用于悬索桥主梁的架设^[13-14],在部分山区全钢结构梁桥的施工中也开始应用。斜拉扣挂法从结构受力上看,可视为悬臂拼装与滑移法的结合,主要应用于拱桥的施工^[15]。本文重点研究小节段悬臂拼装法,并将其与整体提升法进行对比分析。

2 施工过程分析及控制

以某(40+80+180+80+40)m钢-混混合变截面连续箱梁桥为例,该桥的桥跨布置及截面尺寸如图3所示,中跨88m为等截面钢箱梁,其高度为4.1m、顶板宽为13.4m、底板宽为7.5m,钢箱梁与混凝土梁结合处设置有2.5m的钢混结合段,钢材采用Q345qD。对混凝土梁部分,其中跨中及边跨梁高为4.1m,中支点处梁高为9.1m,梁底按照1.8次抛物线变化,混凝土采用C55。

通过Midas Civil建立计算模型(图4),分析两种施工方法下合龙口位置、体外预应力和施工临时荷载对结构内力、线形的影响,并提出相应的施工控制措施或结构设计要求。

整体提升法施工建模步骤为:①激活混凝土及钢混结合部位,边跨预应力及中跨悬臂预应力张拉;②提升装置荷载和钢箱梁重量作用于钢混结合部

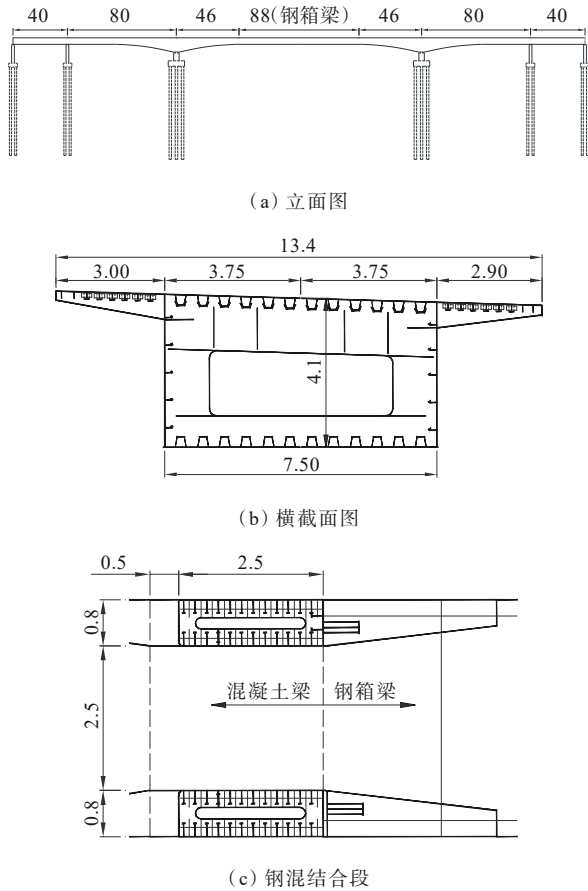


图3 桥跨布置及截面构造图(单位:m)

Figure 3 Bridge span layout and section structure (unit: m)



图4 计算模型图

Figure 4 Calculation model

位;③ 激活钢梁结构,拆除临时荷载。

小节段悬臂拼装法的施工建模步骤为:① 激活混凝土及钢混结合部位,边跨预应力及中跨悬臂预应力张拉;② 吊机荷载和节段箱梁重量作用于吊装前端;③ 激活钢梁节段结构,吊机前移;④ 循环②③步骤直到合龙。

2.1 合龙口位置影响计算及控制

在现有的对钢梁的施工和控制相关研究基础上^[16-20],本文分别对整体提升法和小节段悬臂拼装法的合龙过程进行计算分析,整体提升法的合龙口位置在钢混结合段前端位置(方式1),小节段悬臂拼装法的合龙口在跨中位置(方式2),在考虑相同合龙预应力和临时吊装设备重量的情况下,计算两种不同合龙方式在合龙状态及成桥状态下的中跨钢梁弯矩,结果如图5、表3所示。

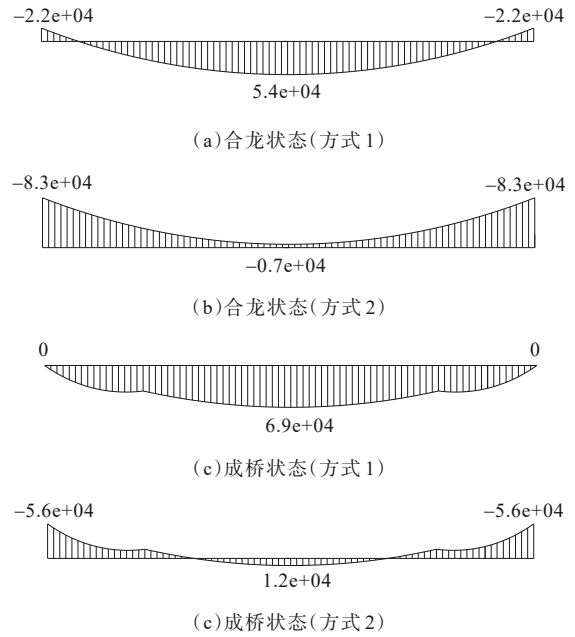


图5 不同合龙方式的钢梁弯矩(单位:kN·m)

Figure 5 Bending moments of steel girders with different closure modes (unit: kN·m)

表3 不同合龙方式的钢梁弯矩

Table 3 Bending moments of steel girders with different closure modes

合龙方式	结构状态	弯矩部位	弯矩/ (10 ⁴ kN·m)
合龙状态	方式1	端部	-2.2
		中部	5.4
		差值	7.6
合龙状态	方式2	端部	-8.3
		中部	-0.7
		差值	7.6
成桥状态	方式1	端部	0.0
		中部	6.9
		差值	6.9
成桥状态	方式2	端部	-5.6
		中部	1.2
		差值	6.8

从图5、表3可以看出:① 在合龙状态下,方式1等效为简支梁受弯模式,跨中受正弯矩大;方式2等效为悬臂梁受弯模式,结合部位受负弯矩大。两种方式弯矩差值基本一致,即中跨钢梁所需要承担的总弯矩基本不变,但在中跨钢梁弯矩分配上存在较大差异;② 在成桥状态下,方式2在钢-混结合段处需承担更多的弯矩。合龙方式的选择以结构成桥状态的弯矩分配为终极目标。当确定采用方式1时,应当加强钢结构跨中部位;当确定采用方式2时,应当加强钢混结合部位。对钢-混混合变截面箱梁

桥而言,钢-混结合部位受力复杂,设计需充分验算,并尽量减少其受力。因此,方式1优于方式2,这也是当前主流的合龙方案。但当现场条件受限,需采用方式2进行施工时,为了达到方式1的成桥状态,需配合相应的施工措施,如使用体外预应力张拉、采用斜拉扣挂体系施工、在合龙体系转换时减少临时荷载作用等。其目标是在采用小节段悬臂拼装法施工时,在合龙阶段实现钢梁曲率连续性拼装并焊接。这样,在焊接合龙完成并拆除所有临时荷载后,钢梁根部弯矩可以保持和整体提升施工一致。因此,需要从设计角度权衡:是以施工措施的方式还是以加强截面的方式进行结构设计,以达到结构合理、经济节约的目的。

2.2 体外预应力影响计算及控制

对于钢-混混合变截面连续箱梁桥中跨钢梁采用小节段悬臂拼装法施工时,中跨钢梁部分设置的体外预应力包括:①截面上部悬臂施工临时预应力,用于调节悬臂施工过程中钢梁受力,同时用于结构体系转换时合龙口状态调整;②截面下部合龙后永久体外预应力,用于调整合龙后钢结构在二期荷载作用下弯矩分配。本文首先分析截面上部体外预应力在钢梁小节段悬臂施工中的作用和实施时应注意的问题,随后研究一种采取截面下部合龙体外预应力来调整体系转换时合龙口状态的新施工方法。

在悬臂施工过程中,体外预应力张拉作用可看作是斜拉索张拉。二者的主要区别在于,体外预应力与主梁纵向夹角小,因此产生的轴力较大(图6)。即随着斜拉索向矮塔斜拉索再向体外预应力的转变,斜拉索提供的竖向力减少,提供的轴向力增加,这对结构受力调整不利。但由于预应力的所有锚固点均设置在混凝土梁上,不用设置塔架及背索,因而对节约成本、简化结构设计和方便现场施工有利。

采用体外预应力的方式时,需考虑施工措施的局限性。该措施在改善结构受弯状态的同时,也会增加较大的轴向力。对于全混凝土连续梁桥,混凝土受压承载力远大于受拉承载力,在一定范围内,预应力造成的压力对混凝土结构有利。但对于钢-混变截面连续箱梁桥,中跨钢梁部分不宜受压。虽然钢结构受拉和受压承载力相同,但受压时还存在失稳的可能。因此,当采用体外预应力的施工措施来调整合龙口状态时,应适当控制预应力所增加轴力的不利作用。关键在于如何合理地布置体外预应力,在充分发挥其作用的同时减少其不利影响。

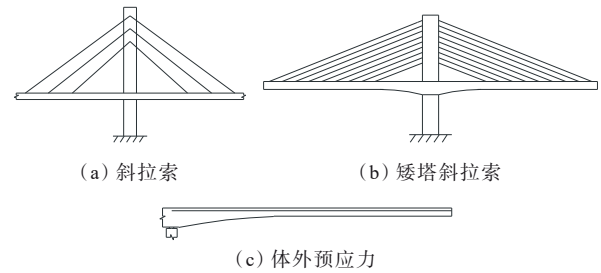


图6 斜拉索角度演变

Figure 6 Angle evolution of stay cables

由于上部体外预应力调整钢梁悬臂端转角的效率并不高,本文考虑利用下部体外预应力对合龙口转角进行调整,研究其对结构合龙口转角的影响及作用效率。下部体外预应力布置示意图如图7所示。



图7 下部体外预应力布置示意图

Figure 7 Lower external prestressing layout

在钢梁自重 $q=105\text{ kN/m}$ 、体外索张拉力取值相同(1 000 kN)的情况下,梁端位移增量计算结果如图8、9所示。

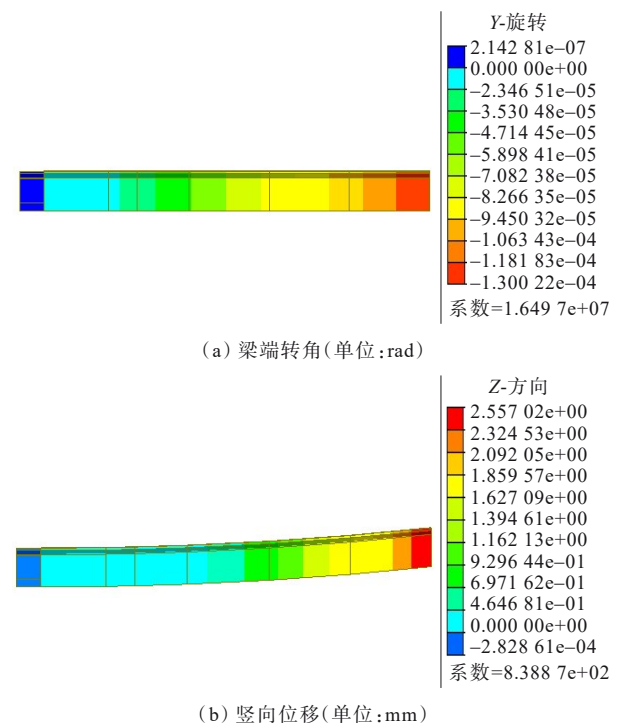


图8 上部体外预应力作用效果计算结果

Figure 8 Calculation results of effect of upper external prestressing

由图8、9可知:上部预应力产生的梁端转角为 $1.3\times 10^{-4}\text{ rad}$,竖向位移2.6 mm;下部预应力产生的梁端转角为 $3.1\times 10^{-4}\text{ rad}$,竖向位移6.8 mm,效率约

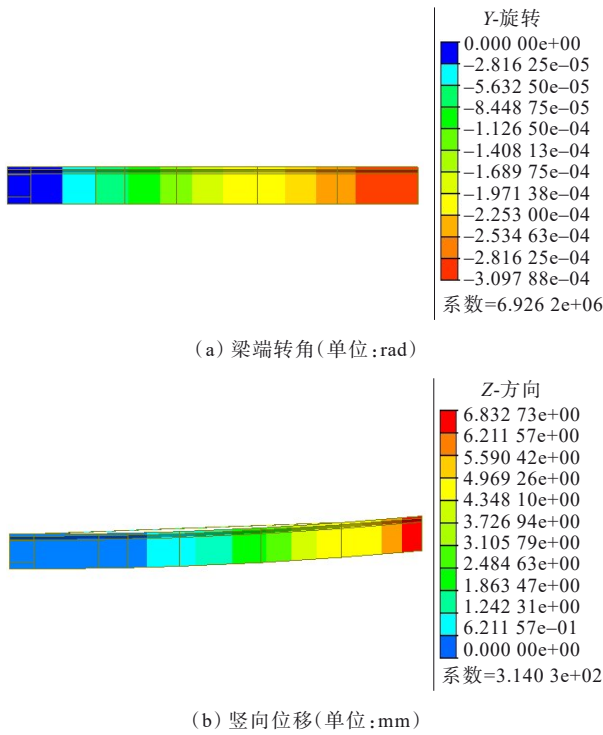


图9 下部体外预应力作用效果计算结果

Figure 9 Calculation results of effect of lower external prestressing

为上部预应力的2.4倍。由此可见:采用下部体外预应力的张拉来调整合龙口状态时,预应力张拉值更小,同时钢梁在施工过程中因轴力产生的附加应力也大幅降低。

2.3 施工临时荷载影响计算及控制

不论是整体提升法还是小节段悬臂拼装法,都需要使用桥面吊机来吊装钢箱梁。即便采用其他架桥机、顶推等施工方法,也同样存在较大的临时荷载。这些临时荷载对钢梁成桥弯矩的影响是永久性的,不会因其在体系转换后拆除而消失。因此,在进行结构设计时,应事先估计临时荷载的作用及其对结构内力的影响,以便进行相应的结构加强和预应力设计。

针对本案例,本研究分析了整体提升法和小节段悬臂拼装法下,成桥钢梁根部弯矩与合龙口处桥面吊机重量的关系。在两种施工方法中,合龙口处即为相应临时设备吊机站位处。对于整体提升,吊机荷载作用点位于钢混结合段前端;对于小节段悬臂拼装,吊机荷载作用点位于最大悬臂段。按照50 t依次增加吊机重量,计算成桥钢梁根部弯矩值,结果如图10所示。

由图10可知:小节段悬臂拼装法的吊机重量对

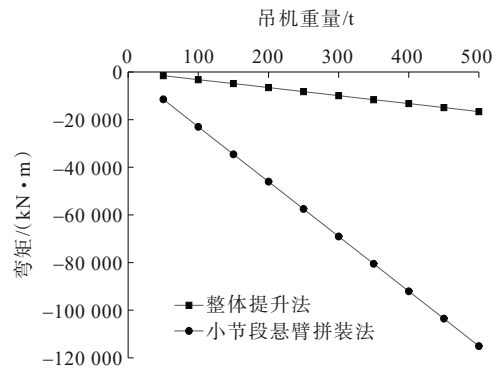


图10 钢梁根部弯矩与吊机重量关系

Figure 10 Relation between bending moment at steel girder root and crane weight

结构内力的影响比整体提升法更大。对于小节段悬臂拼装法,吊机重量与钢梁根部弯矩、体外预应力与钢梁根部弯矩均成正比例关系,且作用相反,可知吊机重量和体外预应力存在一一对应的关系。由此可形成一套适用于此类桥型,并考虑施工过程的流程化设计指导,如图11所示。

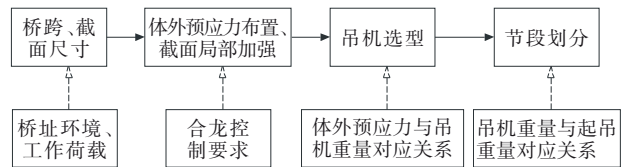


图11 小节段悬臂拼装钢-混混合变截面连续箱梁桥设计指导流程

Figure 11 Design guidance of steel-concrete hybrid continuous box girder bridges with variable sections using sub-segment cantilever assembly

同时,为减少小节段悬臂拼装法吊机重量对结构内力的影响,可从施工工艺上进行优化调整:缩短合龙节段长度,在钢梁跨中合龙口设计临时铰接装置。待合龙口铰接装置安装完成后,拆除悬臂端部临时吊机,张拉下部体外预应力以调整合龙口状态,焊接合龙口钢梁焊缝实现刚接(图12)。通过这一优化调整,实现了在体系转换前拆除吊机重量,基本消除了其在合龙口状态调整时和成桥状态对钢梁根部弯矩的不利影响,从而进一步优化了体外预应力和截面设计。

3 结论

(1) 本文以钢-混混合变截面连续箱梁桥为研究对象,通过对比不同施工方法的体系转换方式,指出施工临时荷载和临时体外预应力或索力的作用效应

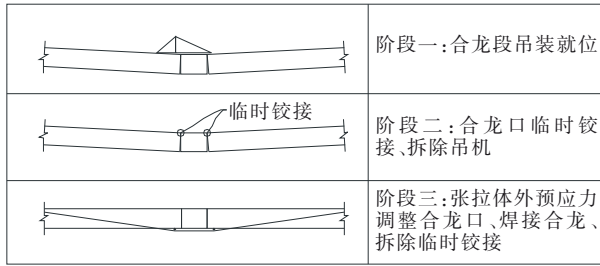


图 12 小节段悬臂拼装优化后合龙流程图

Figure 12 Flow chart of closure after optimization of sub-segment cantilever assembly

不会因体系转换后的拆除而抵消,它们是影响成桥状态的施工过程荷载因素。

(2) 整体提升法和小节段悬臂拼装法,在合龙及成桥状态下,其中跨钢梁弯矩分配存在较大差异。以降低钢-混结合段的弯矩为目标,整体提升法对应的合龙方式要优于小节段悬臂拼装法。当地形条件受限而需要采用小节段悬臂拼装法施工时,也可以通过施加体外预应力、采用斜拉扣挂体系等措施,使其达到与整体提升法相近的成桥状态。

(3) 为实现钢梁的零曲率合龙,若采用上部体外预应力的施工措施,会额外增加钢梁施工过程中的轴力,故此法只适用于一定跨度范围内的钢梁悬臂拼装施工。本案例计算结果表明,仅设置下部体外预应力来调整合龙口状态,其作用效率约为上部体外预应力的2.4倍,且能降低钢梁轴力。

(4) 小节段悬臂拼装法的吊机重量对结构内力影响远大于整体提升法。根据吊机重量和体外预应力的——对应关系,可形成一套针对此类桥型、并考虑施工过程的流程化设计指导。同时,可采用在合龙口设计临时铰接装置的方法来消除桥面吊机对钢梁根部弯矩的不利影响。

参考文献:

References:

- [1] 邓文中,代彤.重庆石板坡长江大桥复线桥总体设计[J].桥梁建设,2006,36(6):28-32.
DENG Wenzhong, DAI Tong. Overall design of double-line bridge of shibanpo Changjiang River bridge in Chongqing[J]. Bridge Construction, 2006, 36(6): 28-32.
- [2] 张少勇,杨聪.钢-混混合梁连续刚构桥设计关键技术[J].公路,2018,63(7):11-15.
ZHANG Shaoyong, YANG Cong. Key technology for designing of steel-concrete hybrid girder continuous rigid

- frame bridge[J]. Highway, 2018, 63(7): 11-15.
- [3] 陈群,王灿东,梅刚.中山小榄水道混合梁刚构桥关键技术[J].公路,2015,60(7):132-137.
CHEN Qun, WANG Candong, MEI Gang. Key technology of hybrid beam rigid frame bridge in Xiaolan waterway, Zhongshan[J]. Highway, 2015, 60(7): 132-137.
- [4] 武电坤,杨兴,朱玉.马尾大桥跨江段主桥结构选型与设计[J].中外公路,2016,36(5):162-165.
WU Diankun, YANG Xing, ZHU Yu. Structural selection and design of main bridge of Mawei bridge across the river[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(5): 162-165.
- [5] 刘德清,王文洋.大跨径钢-混混合梁连续刚构桥施工控制关键技术[J].桥梁建设,2021,51(1):121-129.
LIU Deqing, WANG Wenyang. Key construction control techniques for long-span continuous rigid-frame bridge with steel-concrete hybrid girders[J]. Bridge Construction, 2021, 51(1): 121-129.
- [6] 田雨金,周胜国,李亮.上坝夹江大桥钢箱梁施工方案比选及关键技术[J].公路交通科技,2022,39(12):115-124.
TIAN Yujin, ZHOU Shengguo, LI Liang. Construction scheme selection and key technology for steel box girder of shangba Jiajiang bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(12): 115-124.
- [7] 杨朝龙.杭温铁路主跨216m钢混刚构连续梁桥总体设计及技术创新[J].铁道标准设计,2023,67(2):77-83.
YANG Chaolong. Technological innovation and overall design of the hybrid girder continuous frame bridge with main span of 216 m on Hangzhou-Wenzhou railway[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(2): 77-83.
- [8] 杨欣然,王淑敏,马辰龙.高速铁路大跨度混合梁连续刚构设计关键技术研究[J].铁道标准设计,2023,67(3):104-108,114.
YANG Xinran, WANG Shumin, MA Chenlong. Research on key technology of continuous rigid frame design of large-span hybrid beam for high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2023, 67(3): 104-108, 114.
- [9] 陈志鹏,曹明明.钢箱梁大节段整孔吊装线形控制技术[J].世界桥梁,2024,52(3):55-60.
CHEN Zhipeng, CAO Mingming. Alignment control techniques during span-by-span installation of large steel box girder segments[J]. World Bridges, 2024, 52(3): 55-60.
- [10] 秦顺全.桥梁施工控制:无应力状态法理论与实践[M].北京:人民交通出版社,2007.
QIN Shunquan. Bridge construction control: Theory and practice of stress-free state method[M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [11] 李宁,林树奎,秦明强.强涌浪海域混合梁刚构桥钢箱梁顶推合龙技术[J].桥梁建设,2020,50(4):118-123.
LI Ning, LIN Shukui, QIN Mingqiang. Incremental launching closure technique for steel box girder of a hybrid girder rigid-frame bridge in strong tidal area[J]. Bridge Construction, 2020, 50(4): 118-123.

- [12] 苏庆田,李伟,文晔.温州瓯江大桥钢箱梁整体提升安装施工技术[J].桥梁建设,2013,43(4):110-115.
SU Qingtian, LI Wei, WEN Ye. Construction techniques for integral lifting and installation of steel box girder of Wenzhou oujian river bridge[J]. Bridge Construction, 2013, 43(4): 110-115.
- [13] 孙琦,李辉,林飞杨.宜昌伍家岗长江大桥钢箱梁架设技术[J].桥梁建设,2022,52(5):142-148.
SUN Qi, LI Hui, LIN Feiyang. Erection techniques for steel box girders of Wujiagang Changjiang River bridge in Yichang[J]. Bridge Construction, 2022, 52(5): 142-148.
- [14] 张勇.重庆长寿长江二桥钢箱梁吊装关键技术[J].世界桥梁,2023,51(2):34-38.
ZHANG Yong. Key steel box girder hoisting techniques for second Changshou Changjiang River bridge in Chongqing[J]. World Bridges, 2023, 51(2): 34-38.
- [15] 夏豪,徐晖,余勇继.德余高速乌江特大桥主桥设计[J].世界桥梁,2023,51(5):14-21.
XIA Hao, XU Hui, YU Yongji. Main bridge design of Wujiang River bridge of Dejiang-Yuqing expressway[J]. World Bridges, 2023, 51(5): 14-21.
- [16] 丁以伟,周文.江顺大桥主桥钢箱梁边跨合龙技术[J].中外公路,2015,35(6):95-99.
DING Yiwei, ZHOU Wen. Closure technology of steel box girder side span of Jiangshun bridge main bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(6): 95-99.
- [17] 梅晓亮,张志强.港珠澳大桥深水区非通航孔桥钢箱梁架设线形分析[J].桥梁建设,2016,46(1):106-110.
MEI Xiaoliang, ZHANG Zhiqiang. Analysis of installation geometric shapes of steel box girder of non-navigable span bridge of Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge over deep water area[J]. Bridge Construction, 2016, 46(1): 106-110.
- [18] 涂光亚,李辉,李亮辉.超大跨度混合梁斜拉桥中跨合龙温度影响及对策[J].中外公路,2020,40(1):61-64.
TU Guangya, LI Hui, LI Lianghui. Temperature influence and countermeasure of mid-span closure of super long-span hybrid girder cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(1): 61-64.
- [19] 熊先勇,傅亚军,黄蓂.钢-混组合梁斜拉桥钢主梁安装方法分析与误差控制[J].中外公路,2023,43(3):126-133.
XIONG Xianyong, FU Yajun, HUANG Gen. Analysis of installation method and error control of steel girder of steel-concrete composite girder cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(3): 126-133.
- [20] 杨如刚,陈博,韩冰.大跨叠合梁斜拉桥主梁施工控制误差传播分析[J].中外公路,2023,43(5):148-155.
YANG Rugang, CHEN Bo, HAN Bing. Analysis of error propagation in construction control of main beams of large-span composite beam cable-stayed bridges[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 148-155.