

# 大跨度连续刚构桥边中跨同时合龙精细化 分析与应变控制<sup>\*</sup>

薛君<sup>1</sup>, 薛飞<sup>1</sup>, 马宏宇<sup>1</sup>, 胡康<sup>1</sup>, 彭涛<sup>2</sup>

(1.中交一公局 第一工程有限公司, 北京 昌平 102205; 2.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 针对大跨度连续刚构桥边中跨同时合龙时合龙段砼开裂风险较大的问题,以贵州剑榕(剑河—榕江)高速公路白坪 1 号大桥为背景,采用 ANSYS 建立多尺度精细有限元模型,对大跨度连续刚构桥边中跨同时合龙施工中合龙段和劲性骨架的受力进行分析,并研究合龙段在养护待强阶段的应变控制方法。

**关键词:** 桥梁;连续刚构;边中跨同时合龙;合龙段;精细化分析;应变控制

中图分类号:U448.21

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)02-0110-04

主梁合龙是刚构桥施工的重要工序,是由施工阶段的静定结构向成桥阶段的超静定结构转换的关键环节。大跨度连续刚构桥常规合龙施工一般按照先边跨合龙再中跨合龙的顺序逐跨进行,对于多跨刚构桥,该方法需进行多次合龙施工才能完成体系转换。而采用边中跨同时合龙工艺,只需一次合龙施工即可完成体系转换,可大大缩短合龙工期,减少施工成本。合龙方式的变化不但影响成桥状态的内力和线形,而且影响合龙施工期的安全。相比逐跨合龙施工,采用边中跨同时合龙时在合龙段砼养护待强过程中极易开裂,需对其进行精细化分析并采取有效的应变控制措施。针对连续刚构桥边中跨同时合龙施工,田仲初等基于力法基本原理推导了刚构桥合龙顶推力与桥墩偏位之间的关系表达式;曹霖等通过有限元分析,验证了刚构桥在高温条件下采用边中跨同时合龙施工的可行性;赵东海通过有限元模拟计算,论证了连续刚构桥边中跨同时合龙施工的可行性;马玉荣等研究了采用一次性合龙方式的多跨连续刚构桥合龙顶推力;徐鹏等分析了同步合龙对刚构桥成桥线形及应力的影响;陈词基于线形和应力计算结果,论证了连续刚构桥边中跨同时合龙施工的可行性;施建振、和兆建、尚晋等论述了劲性骨架在合龙施工中的作用,并对其受力进行了分析;张建斌以南港特大桥为背景,分析了基础刚度、箱梁钢筋骨架等对结构内力和线形的影响;黄文洁等通过有限元分析,揭示了边中跨同时合龙连续刚构桥成桥状态的结构性能变化。现有研究主要针

对刚构桥边中跨同时合龙施工的可行性、劲性骨架的简化受力等方面,尚未对刚构桥边中跨同时合龙进行精细化分析与应变控制研究。该文以贵州剑榕(剑河—榕江)高速公路白坪 1 号大桥为工程背景,对大跨度连续刚构桥边中跨同时合龙施工中合龙段和劲性骨架的受力进行精细化分析,研究合龙段在养护待强阶段的应变控制方法。

## 1 工程背景

剑榕高速公路白坪 1 号大桥主桥为分幅四跨预应力砼连续刚构桥,跨径组合为(80+2×150+80)m。主梁采用单箱单室预应力砼箱形梁,梁高由跨中的 3.5 m 按 1.8 次抛物线变化为根部的 9.0 m,箱梁顶、底板宽度分别为 12.125、6.5 m。主梁采用挂篮悬臂浇筑施工,主梁 0<sup>#</sup>块总长 14.0 m,4 个合龙段长度均为 2.0 m,边跨现浇段长 3.76 m。为适应起伏较大的地形,主墩采用高 93~115 m 带系梁双肢墩,纵向总宽 12 m,双肢间净距 5 m。肢墩采用单箱截面空心薄壁墩,横桥向宽 6.5 m,壁厚 85 cm;顺桥向宽 3.5 m,壁厚 60 cm。桥型布置见图 1。

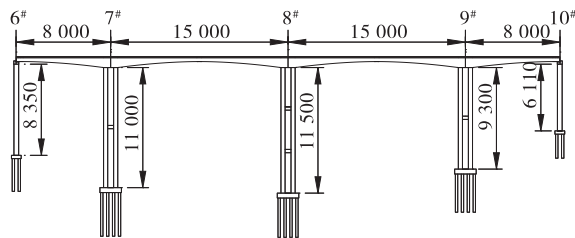


图 1 白坪 1 号大桥桥型布置(单位:cm)

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金项目(51478049;52078058)

为加快施工进度,该桥采用边中跨同时合龙方式。合龙施工中采用外置式劲性骨架,它由2块“[”Q235钢合并而成,通过在箱梁顶、底板设置的预埋钢板实现与梁体的连接。劲性骨架布置见图2。

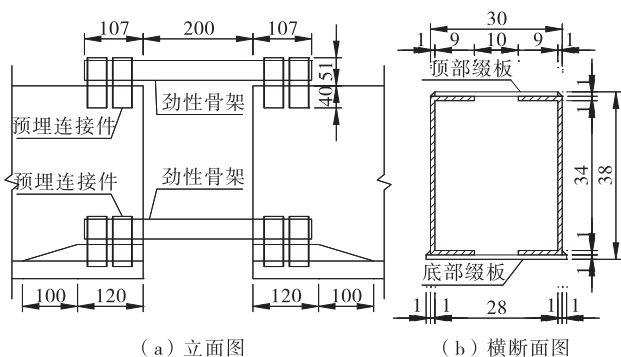


图2 劲性骨架布置示意图(单位:cm)

## 2 边中跨同时合龙施工工艺

连续刚构桥边中跨同时合龙施工的主要工艺流程:1)施工至最大悬臂阶段、完成边跨现浇后,连续进行72 h大气温度、梁体温度和主梁标高测试;2)依据合龙段梁体重量和标高差设置合龙段水箱配重;3)安装合龙段模板、钢筋及预应力管道;4)根据监控指定进行合龙口顶推、合龙段姿态调整,同步完成多个合龙段劲性骨架锁定;5)同时浇筑边中跨合龙段砼,并同步释放配重;6)砼养生,根据实际情况确定调控措施,确保砼养护待强过程中不开裂;7)预应力钢束张拉与管道压浆。

边中跨同时合龙施工时,劲性骨架锁定后,刚构桥已转换为超静定结构,由于边跨支座存在一定顺桥向摩阻力,在自重、收缩徐变及温度等作用下,主梁发生竖向及顺桥向变形,使合龙段两端发生错动变形。劲性骨架的作用就是保证合龙段砼在养护期间尽可能不受外界因素的干扰,在砼达到预定强度前帮助或代替其承受结构在合龙段处产生的内力和变形,防止合龙段砼因超过其极限应变而开裂,确保养护质量。相比逐次合龙,边中跨同时合龙是一次性完成结构最大连续长度的转换,温度变化等因素对合龙段的影响大大增加,合龙段砼养护待强过程中开裂风险更大,需对边中跨同时合龙进行精细化分析。分析内容主要包括:1)合龙施工前,考虑合龙过程中可能出现的最大升温与降温情况对合龙劲性骨架进行受力验算,预测合龙段砼的极限应变,用于指导施工方案制订;2)合龙施工过程中,根据实际温度变化对劲性骨架和合龙段砼的受力进行精确

分析,用于指导施工控制。

## 3 精细有限元模型的建立

大跨度桥梁结构有限元分析模型分为基于杆系单元的简化模型和基于板壳单元、实体单元等的精细化模型两类。前者建模和计算工作量较小,适用于结构的总体分析,但对于复杂或空间问题,其计算精度较低;后者计算精度高,但建模较复杂,且计算成本较高。近年来,为解决精度和成本之间的矛盾,多尺度建模和计算方法得到应用。该方法的核心思想是根据分析对象的复杂程度和力学行为,对结构的不同部位建立不同尺度的数值模型,并采用合适的方式连接,实现不同尺度模型之间的协同计算。

为精确分析该桥边中跨同时合龙时合龙段及劲性骨架的受力,采用ANSYS建立多尺度精细有限元模型。合龙段及前后2个节段箱梁采用实体单元Solid65模拟,劲性骨架采用壳单元Shell63模拟,主梁其余节段与桥墩采用空间梁单元Beam188模拟,预应力筋采用杆单元Link10模拟。模型的边界条件为:桥墩底固结,主墩和主梁之间采用共节点连接;过渡墩与主梁之间采用弹簧单元连接,弹簧的横向与竖向刚度按照支座刚度换算得到,弹簧的顺桥向刚度按照支座的摩阻力取值;主梁实体单元与梁单元之间通过定义约束方程实现连接。白坪1号大桥精细有限元模型见图3。

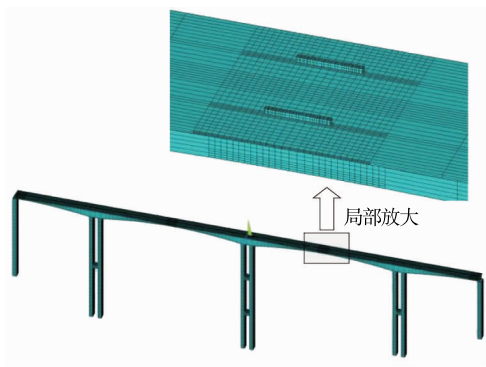


图3 白坪1号大桥精细有限元模型

## 4 精细有限元模型分析结果

### 4.1 合龙施工前分析结果

该桥位于榕江县境内,预计合龙时间为10—12月。根据历史气温记录及设计要求,计算升温取15℃,降温取10℃。梁体升温时,结构发生热胀伸长,合龙段处结构产生压应变,由于劲性骨架在顶推锁

定后处于受压状态,升温时劲性骨架压应力最大,受力最不利。结构升温  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时纵桥向位移见图 4,结构总伸长量为  $38.94+29.33=68.27\text{ mm}$ ,略小于升温  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时结构自由状态伸长量  $69.24\text{ mm}$ ,表明桥墩对结构升温时纵向伸长有一定约束作用,但由于墩较高,约束作用较弱。考虑合龙顶推力及升温  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,劲性骨架的纵向正应力见图 5,最大压应力为  $55.4\text{ MPa}$ ,小于其许用应力  $140\text{ MPa}$ ,满足要求,且有较大富余。

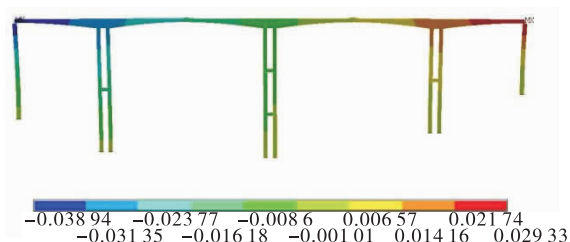


图 4 结构升温  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时纵桥向位移云图(单位:m)

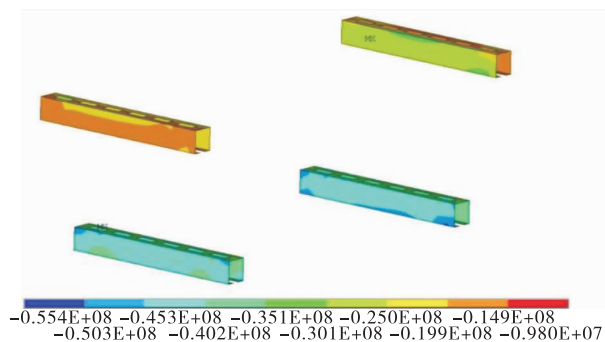


图 5 升温  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  时劲性骨架纵桥向正应力云图(单位:Pa)

梁体降温时,结构发生冷缩变形,合龙段处结构产生拉应变,砼受力较不利。合龙段砼浇筑后,起初砼只有重量没有强度,随着时间的推移,砼强度不断增加,与劲性骨架一起承受外荷载产生的内力。计算降温工况时,根据工程经验,取砼弹性模量为其设计值的  $10\%$ 。计算得降温  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时最大拉应力出现在  $9\#$  和  $10\#$  墩间合龙段,纵桥向正应力见图 6,最大拉应力为  $0.655\text{ MPa}$ ,对应的最大拉应变为  $184\text{ }\mu\epsilon$ 。砼的极限压应变为  $3\text{ }300\text{ }\mu\epsilon$ ,极限拉应变为  $200\sim 600\text{ }\mu\epsilon$ ,远小于其压应变,为避免砼开裂,取其极限拉应变下限的  $80\%$  即  $160\text{ }\mu\epsilon$  为控制值。而降温  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时最拉应力为  $184\text{ }\mu\epsilon$ ,大于控制值  $160\text{ }\mu\epsilon$ ,为避免砼开裂,合龙段养护过程中应做好应变控制措施。

#### 4.2 合龙施工分析结果

该桥施工过程中,在箱梁关键截面及合龙段顶、底板布置应变及温度传感器,实时感知砼内应变及

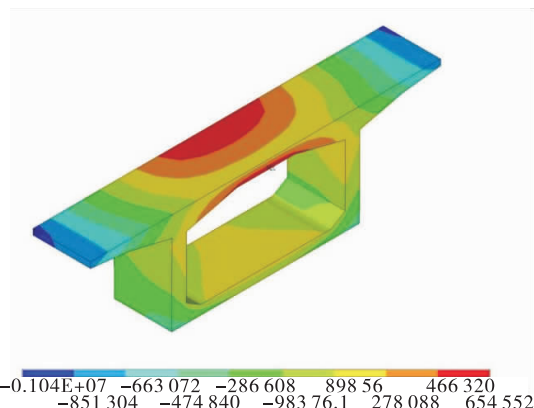


图 6 降温  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  时合龙段纵桥向正应力云图(单位:Pa)

温度,同时根据砼试块的试验值确定砼的实际强度与弹性模量。将温度实测值施加于精细有限元模型,计算得砼养护过程中顶板的纵向最大拉应变出现在  $9\#$  和  $10\#$  墩间合龙段(见图 7),底板的纵向最大拉应变出现在  $8\#$  和  $9\#$  墩间合龙段(见图 8)。各合龙段顶、底板计算与实测最大纵向拉应变见表 1。从表 1 可看出:各合龙段顶、底板的纵向最大拉应变均小于应变控制值  $160\text{ }\mu\epsilon$ ;顶板纵向最大拉应变计算值为  $81.8\text{ }\mu\epsilon$ 、实测值为  $78.7\text{ }\mu\epsilon$ ,底板纵向最大拉应变计算值为  $37.1\text{ }\mu\epsilon$ 、实测值为  $35.4\text{ }\mu\epsilon$ ,计算值与实测值吻合较好。

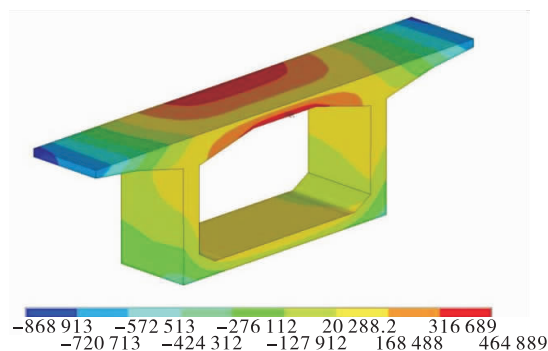


图 7  $9\#$  和  $10\#$  墩间合龙段纵桥向正应力云图(单位:Pa)

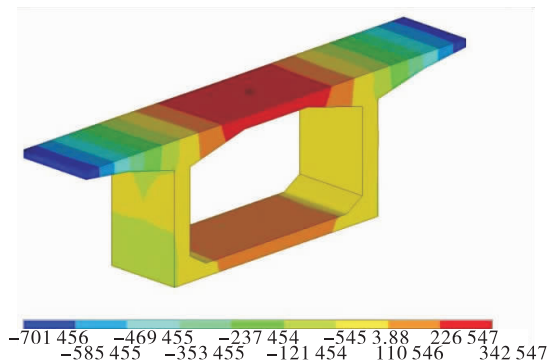


图 8  $8\#$  和  $9\#$  墩间合龙段纵桥向正应力云图(单位:Pa)

表 1 合龙段顶、底板最大拉应变计算值与实测值  $\mu\epsilon$

截面位置		应变		差值
		计算	实测	
6# 和 7# 墩间合龙段	顶板	80.2	72.6	7.6
	底板	23.9	19.8	4.1
7# 和 8# 墩间合龙段	顶板	60.5	59.7	0.8
	底板	34.5	35.6	-1.1
8# 和 9# 墩间合龙段	顶板	60.3	56.5	3.8
	底板	37.1	35.4	1.7
9# 和 10# 墩间合龙段	顶板	81.8	78.7	3.1
	底板	24.7	20.3	4.4

5 合龙段养护阶段的应变控制

为保证多跨连续刚构桥边中跨同时合龙的顺利实施,提出一种合龙段养护阶段应变控制方法,控制装置见图 9。该方法的原理如下:在合龙段砣内布置一定数量带温度测试的应变计和临时预应力钢束,应变计分别绑扎在合龙段顶、底板的纵向钢筋上,通过传感器实时感知砣养护待强过程中的应变和温度,应变采集器通过导线收集应变和温度数据并将其传入主控电脑;利用精细有限元模型进行数值分析,根据计算结果决定是否张拉临时预应力钢束,如需张拉,则进一步计算需对预应力筋施加的张拉力;预应力筋通过张拉端锚具、锚固端锚具的作用反过来对合龙段砣施加压应变以抵消拉应变,确保合龙段砣不开裂。该方法操作简单,施工方便,可控养护阶段合龙段砣的应变状态,防止裂缝的产生。在贵州剑榕高速公路 2 座大跨度连续刚构桥施工中进行应用,取得了良好的效果,桥梁合龙后各合龙段砣均未出现裂缝。

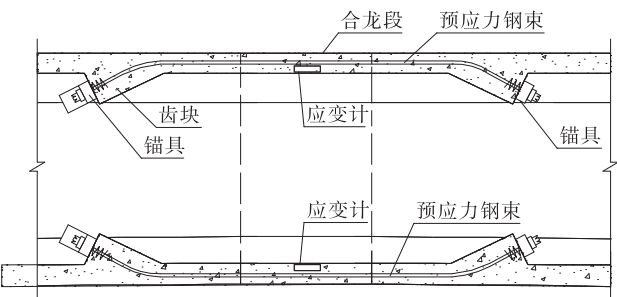


图 9 合龙段养护阶段应变控制装置立面图

6 结语

以贵州剑榕高速公路白坪 1 号大桥为工程背景,基于 ANSYS 软件,采用实体单元 Solid65、壳单

元 Shell63、空间梁单元 Beam188、杆单元 Link10 建立大跨度连续刚构桥多尺度精细有限元模型,对大跨度连续刚构桥边中跨同时合龙施工中合龙段和劲性骨架的受力进行精细化分析。结果表明劲性骨架的受力满足要求,合龙段顶、底板最大拉应变的计算值与实测值较吻合。

针对采用边中跨同时合龙方法时合龙段砣养护待强过程中开裂风险大的问题,提出一种简单易行的合龙段砣养护阶段应变控制方法,并应用于贵州剑榕高速公路 2 座多跨连续刚构桥施工中,取得了良好的效果。

参考文献:

[1] 田仲初,莫冬华.高墩大跨连续刚构桥合龙施工预顶力及预顶效应研究[J].公路与汽运,2011(5):160—162.

[2] 曹霖,李湘,廖圆圆.刚构桥高温条件下边跨和中跨同时合龙可行性研究[J].公路工程,2012,37(2):11—13.

[3] 赵东海.连续刚构桥边跨和中跨同时合龙施工技术[J].施工技术,2014,43(16):89—91.

[4] 马玉荣,陈海波,吕改锋,等.基于一次性合龙方式的多跨连续刚构桥梁顶推力[J].沈阳大学学报(自然科学版),2018,30(4):319—325.

[5] 徐鹏,王达,程东亚.同步合龙方案下刚构桥线形及应力的影响[J].交通科学与工程,2019,35(2):69—74.

[6] 陈词.连续刚构桥边跨和中跨同时合龙施工技术探讨[J].四川建材,2019(6):125—126.

[7] 施建振,虞建成,施为民,等.连续箱梁桥中跨合龙段劲性骨架优化设计[J].施工技术,2004,33(9):3—5.

[8] 和兆建,申春丽,陈寅春,等.PC 刚构桥合龙段劲性骨架的施工分析[J].中外公路,2011,31(1):126—129.

[9] 尚晋,李冬,李博强.悬浇梁合龙段劲性骨架结构分析[J].沈阳大学学报(自然科学版),2013,25(4):326—331.

[10] 张建斌.PC 连续刚构桥施工控制计算的精细化分析[J].公路,2019(10):137—140.

[11] 黄文洁,田仲初,薛飞,等.边中跨同时合龙对高墩大跨连续刚构桥性能影响分析[J].公路与汽运,2020(2):111—114.

[12] 伍彦斌,黄方林.多尺度有限元建模与分析的部分混合单元法[J].华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(5):110—114.

[13] 方美平,陈欣韵,王旭燚,等.不对称小半径曲线连续刚构桥合龙顶推效应分析[J].公路与汽运,2021(3):114—118.

[14] 吴雄波.曲线连续梁桥静力性能研究[D].长沙:长沙理工大学,2019.