DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.06.018

大跨度组合梁斜拉桥中跨合龙口相对转角误差分析

涂光亚,周城勇
(长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:根据无应力状态法理论,为保证斜拉桥施工完成后的成桥内力和线形达到目标状态,中跨合龙时的主梁弹性曲线应保持连续,即合龙口两侧主梁的相对转角应为零,但在实际工程中很难满足相对转角绝对为零的条件。该文以赤壁长江公路大桥为工程背景,针对大跨度组合梁斜拉桥中跨合龙时的相对转角误差对最终成桥目标状态的影响进行研究,进而确定相对转角误差的容许范围。分析结果表明:中跨合龙时合龙口两侧主梁相对转角误差主要对成桥目标状态下主梁的应力有较大影响,对塔偏、索力、主梁线形基本没有影响;对于赤壁长江公路大桥,中跨合龙时合龙口两侧主梁的容许相对转角误差可定为$\pm 1\times 10^{-3}$ rad,在此范围内可认为合龙口两侧主梁弹性曲线是连续的。

关键词:组合梁斜拉桥;无应力状态法;中跨合龙;相对转角误差;主梁应力
中图分类号:U448.27 **文献标志码:**A

0 引言

随着斜拉桥理论的发展以及建桥工艺的成熟,越来越多的斜拉桥主梁采用了钢-混凝土组合结构,与混凝土斜拉桥和钢结构斜拉桥相比,这种结构形式兼顾了混凝土和钢结构的部分优势[1-5]。对于大跨度组合梁斜拉桥,结构体系复杂,一般采用分阶段施工的建造方法,需经历多次体系转换才能达到最终的成桥状态[6-9]。为了避免施工过程中工序改变、临时外荷载出现和温度变化导致成桥状态改变的问题[10-13],大跨度斜拉桥一般采用无应力状态法确定桥梁施工阶段理想状态。

根据无应力状态法理论,在外荷载、结构体系、支撑边界条件、单元无应力状态下的几何长度和曲率已确定的情况下,最终状态的内力和位移是唯一的[6,11,14]。为了确保实际恒载状态与成桥目标状态一致,关键和难点就是控制主梁和斜拉索的无应力状态量,对保证中跨合龙段无应力安装至关重要。为了满足合龙段无应力安装的条件,有时通过强制位移、施加临时压重或调索手段使合龙段在无应力条件下安装,使合龙段与已安装梁段位移和转角连续和一致[15-17](即主梁中跨合龙口两侧相对转角为零),对于大跨度组合梁斜拉桥一般可以通过调索手段达

影响分析[J].中外公路,2015,35(3):77-79.
[10] 李宏江,叶见曙,万水,等.波形钢腹板箱梁横隔板间距的研究[J].公路交通科技,2004,21(10):51-54,61.
[11] 滕乐,郑凯锋,吴涤,等.单箱双室波形钢腹板连续刚构桥横隔板间距研究[J].铁道建筑,2017,57(10):1-5.
[12] 胡清和,邓江明,周水兴,等.多跨连续刚构桥顶推合龙方案研究[J].中外公路,2009,29(3):109-114.
[13] 王东炜,张奇伟,王用中.基于模态分析的鄄城黄河公路大桥优化设计[J].郑州大学学报(工学版),2010,31(6):1-5.
[14] 王健.波形钢腹板PC箱梁桥的设计与工程实例分析[J].桥梁建设,2010,40(4):61-64.
[15] 胡建华,刘海波,狄瑾.波形钢腹板PC组合箱梁扭转性能分析[J].中外公路,2017,37(3):118-123.
[16] 张海君.钢波纹板-混凝土组合拱涵影响参数分析[J].中外公路,2023,43(1):139-143.
[17] 田波,宋路兵.混合梁斜拉桥钢-混结合段设计关键技术[J].中外公路,2023,43(2):117-120.
[18] 冯文章,刘保东,牟开,等.波纹钢腹板连续刚构桥抗震性能研究[J].工程抗震与加固改造,2015,37(5):70-74.

收稿日期:2023-10-10(修改稿)
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878073)
作者简介:涂光亚,男,博士,副教授.E-mail:runner_mail@126.com

到目的。

但在实际工程现场,受施工条件和施工环境影响,很难保证主梁中跨合龙口两侧相对转角绝对为零,另外还有学者认为受合龙后主梁刚度的影响,借助外力使弹性曲线连续,可能导致结构内力出现较大误差[18-19]。那么中跨合龙时合龙口两侧的相对转角误差对成桥目标状态的影响究竟有多大,以及该相对转角误差在多大范围内时就认为满足了合龙段两侧弹性曲线是连续的条件等均是值得研究的问题。本文以结构体系相对较柔的大跨径组合梁斜拉桥——赤壁长江公路大桥为研究对象,采用两种合龙方案,一种为中跨合龙时采用调索方法使合龙口两侧相对转角基本为零;另一种为中跨合龙时不调索,使合龙口两侧在具有一定的相对转角误差下合龙,通过对比这两种方案成桥恒载状态下的钢主梁应力、混凝土桥面板应力、成桥索力、主梁线形、塔偏等关键参数,分析相对转角误差对成桥状态受力性能的影响,进而确定相对转角误差的容许范围。为了易于区分,后文将这两种方案分别称为放索合龙方案与不放索合龙方案。

1 工程背景

赤壁长江公路大桥地处湖北省东南部,北岸位于洪湖市廖家墩村,跨越长江主航道,南岸位于赤壁市黄盖湖镇新洲垸滩地。主桥斜拉桥长度1 380 m,采用五跨对称布置,主跨跨越河槽,两岸各设置了一个辅助墩和一个边墩,即(90+240) m+720 m+(90+240) m=1 380 m。该桥为H形桥塔,支撑体系为半漂浮结构体系,桥面全宽36.5 m,设计荷载为公路-Ⅰ级。斜拉索采用空间双索面结构,全桥共有4×29对斜拉索,采用直径7 mm的高强度锌铝合金镀层平行钢丝拉索,标准抗拉强度为1 860 MPa,具体桥型布置如图1所示。

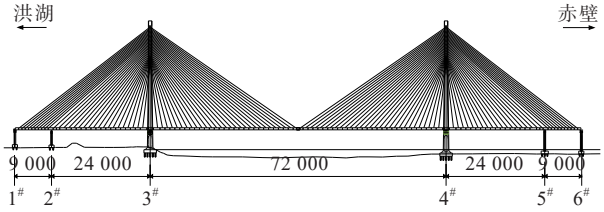

图1 赤壁长江公路大桥立面布置(单位:cm)

全桥共设置116根斜拉索,洪湖侧斜拉索编号为:3#墩至1#墩方向依次为HB01~HB29,3#墩至跨中方向依次为HZ01~HZ29。赤壁侧斜拉索编号为:4#墩至6#墩方向依次为CB01~CB29,4#墩至跨中方向依次为CZ01~CZ29。

顺桥向共121个梁段,以中跨合龙段(ZL61)为对称中心,洪湖侧自边跨起依次为ZL1H~ZL60H,赤壁侧自边跨起依次为ZL1C~ZL60C。

赤壁长江公路大桥主梁采用双边箱组合梁截面形式,由钢主梁、钢横梁、小纵梁和混凝土桥面板4部分组成,标准梁段钢主梁高3 181 mm,下翼缘板宽2 450~3 200 mm,厚32~70 mm。标准混凝土桥面板根据受力需要采用C60和C50两种类型,标准段混凝土桥面板厚26 cm,边跨压重段厚59 cm,混凝土桥面板与钢主梁通过布置于边主梁、小纵梁和横梁顶面的圆柱头剪力钉结合后共同受力。组合梁标准断面如图2所示。

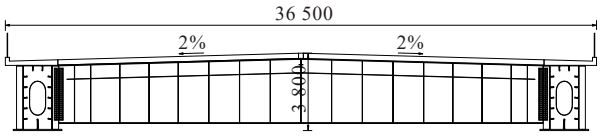

图2 组合梁标准横断面(单位:mm)

2 计算分析

采用BDCMS桥梁设计与施工控制计算软件对赤壁长江公路大桥的施工过程进行模拟分析。斜拉索以两端带刚臂的悬链线索单元进行模拟,混凝土桥面板单元与钢主梁单元为共节点梁单元,其余构件均以普通梁单元进行模拟。边界条件为交界墩、辅助墩、索塔承台底固结,索塔与钢主梁之间在施工过程中设置了临时纵向约束和临时竖向支撑,成桥时为活动铰支座。整个模型共有1 712个单元,901个节点,其中索单元116个,梁单元1 596个。

计算时采用两种方案,第一种为放索合龙,即在中跨合龙前降低拉索HZ27~HZ29、CZ27~CZ29的索力,使主梁在合龙口两侧的弹性曲线基本连续的情况下进行合龙;第二种为不放索合龙,使主梁在合龙口两侧具有一定的相对转角误差下进行合龙。两种方案均在桥面铺装前对所有斜拉索用成桥无应力索长再张拉一次。分别计算这两种方案对成桥状态的影

响。两种方案在合龙时HZ27～HZ29、CZ27～CZ29的索力数据如表1所示。经计算放索前、后主梁ZL60H前端转角变化为5.7×10^{-3} rad，放索前、后主梁ZL60C前端转角变化为-5.6×10^{-3} rad，放索前、后合龙口两侧相对转角变化为11.3×10^{-3} rad。放索前、后主梁ZL60H前、后端标高变化量为－46 mm，主梁ZL60C段前、后端标高变化量为－45 mm。放索前、后合龙口绝对标高的变化量为－442 mm。

表1　最大悬臂状态斜拉索放索前、后索力对比

索号	洪湖侧		索号	赤壁侧	
	变化量/kN	放索延伸量/mm		变化量/kN	放索延伸量/mm
HZ27	840	－296	CZ27	847	－296
HZ28	738	－303	CZ28	744	－302
HZ29	－80	－177	CZ29	－103	－170

由表1可知：即使合龙口两侧相对转角只发生了11.3×10^{-3} rad的微小变化，但索力的调整量较大，斜拉索CZ27索力值变化最大为847 kN，拉索HZ28的放索延伸量最大为－303 mm。由于拉索HZ27、HZ28、CZ27、CZ28下放较多，放索前由这4根索承受的部分索力转移到了斜拉索HZ29、CZ29，导致此两根斜拉索虽然下放，但索力不降反升，索力分别升高了80 kN、103 kN。

3　计算结果

3.1　钢主梁应力

两种不同合龙方案成桥状态下钢主梁的应力对比如图3、4所示。

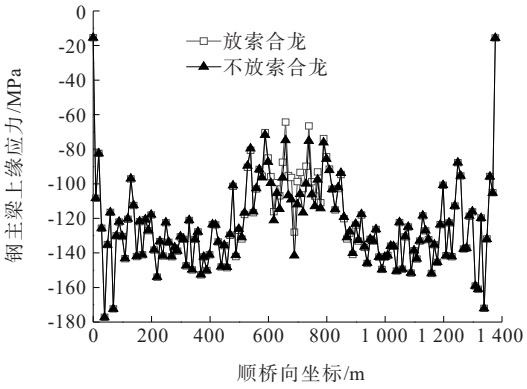

图3　钢主梁上缘应力对比

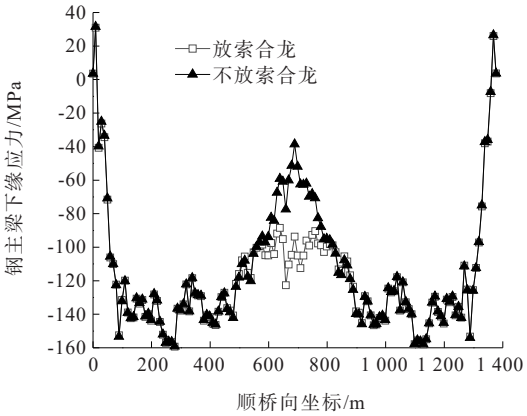

图4　钢主梁下缘应力对比

由图3、4可知：成桥恒载状态下，放索合龙与不放索合龙相比，虽然相对转角只发生了11.3×10^{-3} rad的变化，但钢主梁上、下缘应力产生了较大的差异，主要体现在合龙段附近120 m范围内，中跨跨中最为明显。其中下缘应力影响较大，最大变化量为55 MPa，上缘应力影响稍小，最大变化量也有14 MPa。这说明中跨合龙口相对转角较小的变化都会对成桥目标状态钢主梁的上、下缘应力产生较大的影响，这也是无应力状态控制理论中对跨中合龙时合龙口两侧弹性曲线的连续性进行严格要求的主要原因。

3.2　混凝土桥面板应力

两种不同合龙方案成桥状态下混凝土桥面板的应力对比如图5所示。

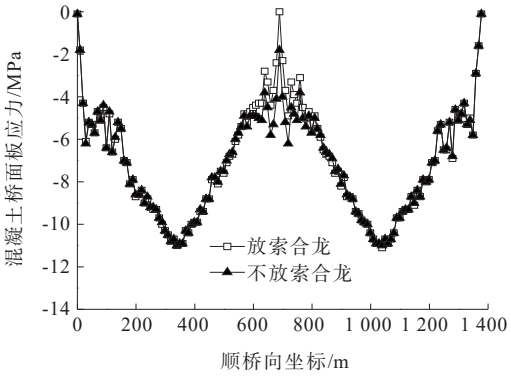

图5　混凝土桥面板应力对比

由图5可知：成桥恒载状态下，放索合龙与不放索合龙相比，混凝土桥面板应力也有一定的变化，主要集中在中跨跨中附近，最大应力变化量为2 MPa，放索合龙，跨中混凝土桥面板压应力更小一些，两种方案混凝土桥面板都没有出现拉应力。以上计算结果说明中跨合龙时合龙口两侧的相对转角误差对成

桥目标状态混凝土桥面板的应力也有一定的影响。

3.3 主梁累积竖向位移

计算采用切线初始位移法计算恒载状态下的累积竖向位移，不同合龙方案对主梁的累积竖向位移影响如图6所示。

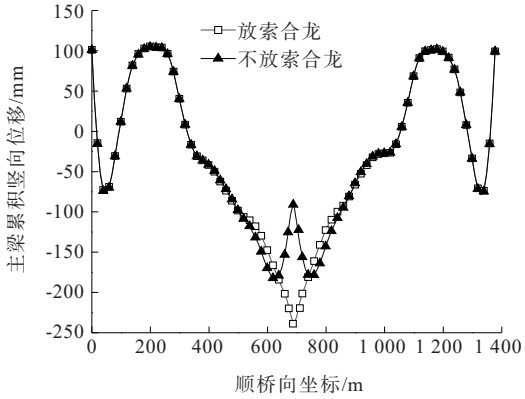

图6 主梁累计竖向位移对比

由图6可知：不放索合龙方案主梁累积竖向位移在合龙段附近有逐渐降低的趋势，而放索合龙方案主梁累积竖向位移在中跨一直升高。两种方案在中跨跨中出现最大变化量，放索方案比不放索方案累积竖向位移小150 mm，此时不放索合龙方案的累积竖向位移为－90 mm，放索合龙方案的累积竖向位移为－240 mm。产生差异的原因是合龙前放索直接减小了中跨主梁的累积竖向位移，即使合龙后斜拉索都按最终的无应力索长再张拉一次，受合龙后主梁刚度的影响，两种方案的最终累积位移还是产生了差异。总的来说，中跨合龙时合龙口相对转角的变化对跨中附近梁段的累积竖向位移有一定的影响，但在预先充分考虑的情况下，相应改变主梁的制造线形可完全满足最终成桥线形的要求[20]。

3.4 对斜拉索索力的影响

赤壁长江公路大桥为对称结构，洪湖侧、赤壁侧索力基本相同，为了节省篇幅，以下仅对洪湖侧索力进行数据分析。计算时先分别计算出放索合龙和不放索合龙两种方案成桥恒载状态下的索力与设计目标索力的差值，再计算其与设计索力的差值百分比，计算结果如图7所示。

由图7可知：两种方案成桥恒载状态下的索力与设计目标索力均有一定的差值，但误差范围较小，绝大部分在±5%以内，最大为9.8%（拉索HB19）。由于两种方案在桥面铺装前都按无应力索长进行了最

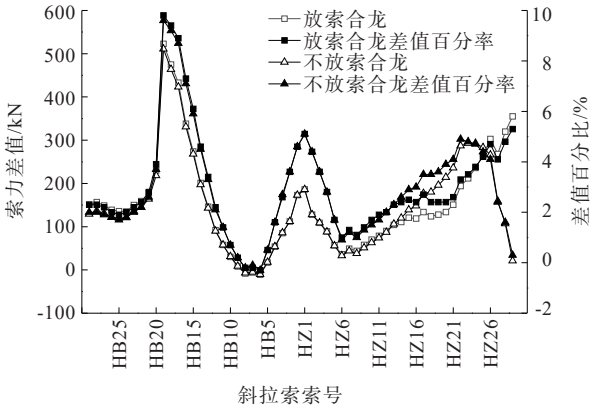

图7 索力对比

后一次张拉，因此，两种方案之间的成桥索力变化量较小，基本在±1%以内，差值较大的为斜拉索HZ27～HZ29、CZ27～CZ29，说明合龙时合龙口两侧的相对转角误差对斜拉索索力基本没有影响。

3.5 塔顶偏位

两种合龙方案成桥恒载状态下的塔顶偏位如表2所示。

表2 塔偏对比

索塔	塔偏/mm		
	放索	不放索	变化量
北塔	－283	－288	－5
南塔	287	291	4

注：正号为向大里程方向偏，负号为向小里程方向偏。

由表2可知：两种合龙方案成桥恒载状态下的塔顶偏位值变化很小，最大变化量仅为5 mm，主要原因为两种合龙方案成桥索力基本相同，说明只要保证最终的成桥索力满足设计要求，中跨合龙时合龙口两侧的相对转角误差对成桥塔顶偏位基本无影响。

综合以上分析，对于赤壁长江公路大桥，中跨合龙时合龙口两侧相对转角有误差，即合龙口两侧主梁弹性曲线不连续主要影响钢主梁和混凝土桥面板的应力，对成桥线形、索力和塔偏的影响均较小。根据以上计算可得，合龙口两侧11.3×10^{-3} rad的相对转角差对钢主梁应力的影响最大为55 MPa，对混凝土桥面板应力的影响最大为2 MPa。根据近似线性关系，当合龙口两侧的相对转角差为1×10^{-3} rad时，对钢主梁的应力影响最大为4.87 MPa，对混凝土桥面板应力的影响最大为0.18 MPa，此时可以认为对主梁应力基本无影响。因此对于赤壁长江公路大桥，当合龙口两侧的相对转角误差为1×10^{-3} rad时，

可以认为合龙口两侧的弹性曲线是连续的,在实际施工过程中可以将$\pm1\times10^{-3}$ rad作为赤壁长江公路大桥合龙口两侧相对转角的容许误差。在实际施工控制时相对转角不便于直接测量,这时可以通过测量主梁ZL60C、ZL60H前后端的标高差来控制合龙口两侧的相对转角,进而控制合龙口两侧主梁弹性曲线的连续性。根据之前的分析,当相对转角差为11.3×10^{-3} rad时,29#梁段前后端标高差为46 mm,根据近似线性关系,那么当相对转角差为1×10^{-3} rad时,主梁ZL60H前后端标高差为4.07 mm。因此,对于赤壁长江公路大桥,只要将主梁ZL60C、ZL60H前后端标高差控制在±4 mm以内,就可以认为合龙口两侧的主梁弹性曲线是连续的,这样既确定了合龙口相对转角的容许误差,又方便了现场操作。

4　结论

(1)根据无应力状态法理论,斜拉桥在中跨合龙时保证合龙口两侧主梁弹性曲线连续是必要的,即要保证合龙口两侧主梁相对转角为零,但如果要通过调索的方法来调整合龙口两侧主梁的相对转角,则较小的相对转角调整量需要较大的索力调整量。对于赤壁长江公路大桥合龙口两侧主梁11.3×10^{-3} rad的相对转角调整量,需要拉索HZ27～HZ29、CZ27～CZ29索分别放索296 mm、303 mm、177 mm、296 mm、302 mm和170 mm,索力最大变化量为847 kN,合龙口绝对标高变化量为－442 mm。

(2)中跨合龙时合龙口两侧主梁相对转角误差对成桥目标状态主梁的应力(包括钢主梁与混凝土桥面板的应力)影响较大,对塔偏、索力、主梁线形基本没有影响。

(3)对于赤壁长江公路大桥,中跨合龙时合龙口两侧主梁的容许相对转角误差可定为$\pm1\times10^{-3}$ rad,即主梁ZL60C、ZL60H前、后端的相对标高误差为±4 mm,在此范围内可认为合龙口两侧主梁弹性曲线是连续的,该数据可用于赤壁长江公路大桥中跨合龙时的施工控制。

参考文献:

[1] 张德平,周健鸿,王东晖.赤壁长江公路大桥主桥主梁设计[J].桥梁建设,2019,49(4):81-85.

[2] 邵长宇,陈亮,汤虎.大跨径组合梁斜拉桥试设计及力学性能研究[J].桥梁建设,2017,47(4):101-106.

[3] 王岭军.钢-混凝土组合梁斜拉桥梁结构的稳定性分析[J].公路工程,2019,44(2):201-204.

[4] 龚臻,李翠平,雷洛.复杂艰险条件下钢混组合桥梁设计应用[J].中外公路,2022,42(2):131-137.

[5] 田波,宋路兵.混合梁斜拉桥钢-混结合段设计关键技术[J].中外公路,2023,43(2):117-120.

[6] 秦顺全.分阶段成形结构过程控制的无应力状态控制法[J].中国工程科学,2009,11(10):72-78.

[7] 涂光亚,石洋,邹磊.大跨度钢混组合梁斜拉桥钢主梁截面参数对成桥状态主梁受力敏感性分析[J].中外公路,2022,42(1):108-115.

[8] 张玉平,徐先鹏,李香梅,等.混合式组合梁斜拉桥参数分析与施工控制[J].中外公路,2022,42(3):85-92.

[9] 徐先鹏.不对称双悬臂施工混合梁斜拉桥施工控制与风险评估方法研究[D].长沙:长沙理工大学,2023.

[10] 陈璐,陈小佳.多段索异形塔斜拉桥施工阶段索力计算[J].中外公路,2021,41(1):143-148.

[11] 秦顺全.分阶段施工桥梁的无应力状态控制法[J].桥梁建设,2008,38(1):8-14.

[12] 傅亚军,刘浩,陈常松,等.钢梁线形误差在组合梁斜拉桥中的传递研究[J].中外公路,2022,42(6):72-76.

[13] 熊先勇,傅亚军,黄莨.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.

[14] 秦顺全.无应力状态控制法:斜拉桥安装计算的应用[J].桥梁建设,2008,38(2):13-17.

[15] 余昆,李景成.基于无应力状态法的悬臂拼装斜拉桥的线形控制[J].桥梁建设,2012,42(3):44-49.

[16] 魏友良.叠合梁斜拉桥准无应力状态控制方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2019.

[17] 任雷,卢亮,董正良.深切峡谷叠合梁斜拉桥上构安装施工技术[J].中外公路,2023,43(1):135-138.

[18] 刘小刚.无应力状态法在钢桁梁斜拉桥施工控制中的应用[D].广州:华南理工大学,2012.

[19] 郝超.大跨度钢斜拉桥施工误差调整方法研究[J].浙江大学学报(工学版),2003,37(3):310-313.

[20] 涂光亚,袁航.大跨度钢管混凝土拱桥成桥状态钢管应力优化研究[J].中外公路,2020,40(2):140-143.