

温度对大跨度斜拉桥主梁合龙口长度的作用机理分析

付春雨^{1,2}, 沈卢明³, 严鹏²

(1.河海大学 土木与交通工程学院,江苏 南京 210098;2.四川西南交大铁路发展股份有限公司,四川 成都 610073;
3.四川公路桥梁建设集团有限公司,四川 成都 610071)

摘要:为了准确预测温度作用下大跨度斜拉桥主梁合龙口长度,该文利用弹性地基梁模型,建立主梁轴向变形的微分平衡方程;结合结构温度变形和支承边界条件,求解获取主梁合龙口长度的预测方法,揭示合龙口在温度作用下的变化规律。通过盐坪坝长江大桥的有限元数值分析结果和连续观测数据,对所提出方法进行验证。结果表明:主梁合龙口长度随温度作用线性变化,相对索梁温差作用,主梁整体温度作用产生的合龙口长度变化较大;同时该变化量受拉索支承刚度的影响较小,但会随着主梁截面面积的增加而增加。

关键词:斜拉桥;温度效应;合龙口长度;弹性地基梁;微分平衡条件

中图分类号:U442

文献标志码:A

0 引言

中跨合龙是大跨度斜拉桥施工中的关键环节,合龙工艺对于保证桥梁成桥后内力合理和线形平顺十分重要^[1-3]。斜拉桥中跨合龙工艺主要有2种:顶推合龙和配切合龙。顶推合龙是指合龙段按照设计长度制造,合龙时根据实际温度,通过在合龙口或桥塔横梁处施加外力顶推或牵拉,调整合龙口长度,以喂入合龙段,如武汉二七长江大桥^[1]、青州闽江大桥^[4]、嘉绍大桥^[5]和石首长江公路大桥^[6]等均采用顶推合龙;配切合龙在施工现场对合龙口进行连续观测以确定合龙段长度,即时在现场进行配切,以适应合龙口长度,如盐城灌河大桥^[7]、重庆观音岩大桥^[8]和厦漳跨海大桥^[9]。

无论采用哪种合龙工艺,首先均应确定合龙口长度随温度的变化规律。在顶推合龙中,需根据合龙口随温度的变化确定顶推力大小;在配切合龙中需基于合龙口的变化确定合龙段长度。因此合龙口长度的温度效应分析对斜拉桥合龙过程具有至关重要的影响。由于大跨度斜拉桥属于高次超静定结构,现有温度效应分析多采用有限元数值模拟^[5,9],虽

然模拟结果较为精确,但计算量大,结果不直观,温度对斜拉桥主梁合龙口长度的作用机理并未得到清晰的阐述。

为了探究温度的作用机理,需对斜拉桥结构响应的解析解进行分析。在斜拉桥的解析计算中,常用的方法是将其简化为弹性地基梁,即将梁视为置于弹性地基上,拉索起着类似弹性地基的作用,地基的弹性系数即为拉索的支承系数。李国豪等^[10-12]采用该方法对斜拉桥的竖向支承刚度进行了深入研究,但斜拉桥合龙口的长度与主梁水平轴向变形相关,目前对斜拉桥主梁的水平支承刚度研究较少,采用弹性地基梁模型分析温度作用下主梁轴向变形的研究更少。为此本文基于弹性地基梁模型,建立温度作用下主梁轴向变形的微分平衡方程;结合结构温度变形和支承边界条件,获取主梁合龙口长度变化的解析表达式。研究成果可为现场合龙口长度估算和参数分析提供依据,也有助于揭示斜拉桥合龙口变形机理。

1 计算模型

大跨度斜拉桥往往是密索体系,斜拉索对主梁

收稿日期:2022-10-13

基金项目:中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(编号:N2019G059)

作者简介:付春雨,男,博士,副教授.E-mail:fuyupiece@163.com

起着弹性支承作用。若将每根拉索的弹性支承刚度平均分配到与其相邻的主梁上,则主梁可视为一根连续弹性支承的地基梁(图1)。假设坐标原点位于墩梁结合截面的形心处, x 轴沿水平方向, y 轴以竖直向下为正。影响主梁悬臂段水平位移(即 x 方向位移)的温度作用主要分为两种:主梁整体温度变化和拉索与主梁的温差,下面基于弹性地基梁模型,分别对这两种温度效应进行分析。

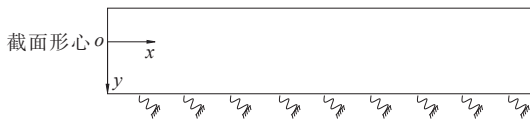


图1 弹性地基梁模型

1.1 主梁整体温度变化

首先分析主梁整体温度效应,假设主梁整体升温 T_0 ,主梁材料热膨胀系数为 α_c 。若主梁不受任何约束,该升温作用产生的应变值 ϵ_{s0} 为:

$$\epsilon_{s0} = \frac{du_{s0}}{dx} = \alpha_c T_0 \quad (1)$$

式中: u_{s0} 为无约束情况下产生的 x 方向位移。而实际主梁的变形受到拉索对其的弹性支承约束,从弹性地基梁模型中取一微元进行受力分析,如图2所示。

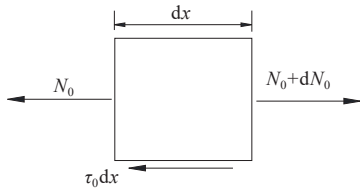


图2 微元受力分析

由 x 方向力的平衡条件可知:

$$\frac{dN_0}{dx} = \tau_0 \quad (2)$$

式中: N_0 为微元所承受的轴力; τ_0 为拉索支承对主梁的水平反力,其值可表示为:

$$\tau_0 = k_x u_0 \quad (3)$$

式中: u_0 为主梁的总水平位移,其值可看作由无约束情况下水平位移 u_{s0} 和支承约束水平位移 u_{c0} 叠加而产生,即 $u_0 = u_{s0} + u_{c0}$; k_x 为拉索对水平弹性支承刚度,其值可按照式(4)确定^[11]:

$$k_x = \frac{E_s A_{si} \cos^2 \alpha_{si}}{l_{si} \lambda_i} \quad (4)$$

式中: E_s 、 A_{si} 、 α_{si} 、 l_{si} 、 λ_i 分别为所取拉索的弹性模量、面

积、夹角、索长和索距。

由混凝土应力-应变关系可知:

$$N_0 = E_c A_c \frac{du_{c0}}{dx} \quad (5)$$

将式(2)和式(3)代入式(5),可得:

$$E_c A_c \frac{d^2(u - u_s)}{dx^2} = k_x u \quad (6)$$

由式(1)可知:

$$\frac{d^2 u_s}{dx^2} = \frac{d\epsilon_{s0}}{dx} = 0 \quad (7)$$

则式(6)可表达为:

$$\frac{d^2 u_0}{dx^2} = \zeta^2 u_0 \quad (8)$$

式中: $\zeta = \sqrt{\frac{k_x}{E_c A_c}}$ 。

对式(8)所示的微分方程进行求解,其通解为:

$$u_0 = a_1 \operatorname{ch}(\zeta x) + a_2 \operatorname{sh}(\zeta x) \quad (9)$$

式中: a_1 和 a_2 为待定系数,可通过边界条件确定。

(1) 在 $x=0$ 处,由于塔梁固结, $u_0=0$,由此得 $a_1=0$ 。

(2) 在合龙口 $x=l$ 处,轴向力 $N_0=0$,即:

$$N_0|_{x=l} = E_c A_c \frac{d(u_0 - u_{s0})}{dx} \Big|_{x=l} = 0 \quad (10)$$

将式(1)代入上式后,可得:

$$a_2 = \frac{\epsilon_{s0}}{\zeta \operatorname{ch}(\zeta l)} \quad (11)$$

由此得到主梁的轴向水平位移:

$$u_0 = \frac{\epsilon_{s0} \operatorname{sh}(\zeta x)}{\zeta \operatorname{ch}(\zeta l)} \quad (12)$$

当 $x=l$ 时,式(12)表示主梁一侧悬臂段的轴向变形量;对于另一端的变形量,同样利用式(12)求出;两个轴向变形量之和,即为合龙口长度的变化量。

从式(12)可以看出:合龙口长度变化量不仅与温度作用产生的应变有关,还与支承条件、主梁长度均有关系。

1.2 拉索与主梁之间温差

假设拉索整体温度比主梁温度高 T_1 ,则 T_1 引起的拉索长度变化 Δs 为:

$$\Delta s = \alpha_l T_1 S_0 \quad (13)$$

式中: α_l 为拉索材料热膨胀系数; S_0 为索长。

根据几何关系, Δs 引起的索锚点沿 x 方向位移 u_{s1} 为:

$$u_{s1} = \Delta s / \cos \alpha_{si} = \alpha_i T_1 x / \cos^2 \alpha_{si} \quad (14)$$

继续采用弹性地基梁模型分析主梁的受力,将每根拉索的弹性支承刚度平均分配到与其相邻的主梁。取如图2所示的微元体,沿 x 轴方向的力平衡条件,即式(2),仍然成立,只是拉索支承对主梁的水平反力 τ_0 需改写为由主梁与拉索变形之差产生的反力:

$$\tau_0 = k_x (u_1 - u_{s1}) \quad (15)$$

式中: u_1 为主梁轴向位移。

则式(2)可改写为:

$$E_c A_c \frac{d^2 u_1}{dx^2} = k_x (u_1 - u_{s1}) \quad (16)$$

将式(14)代入上式可得:

$$\frac{d^2 u_1}{dx^2} - \zeta^2 u_1 + \frac{\zeta^2 \alpha_i T_1}{\cos^2 \alpha_{si}} x = 0 \quad (17)$$

式(17)所示齐次方程的解由通解和特解组成, $u_1 = u_{1g} + u_{1s}$,分别可表示为:

$$u_{1g} = c_1 \operatorname{ch}(\zeta x) + c_2 \operatorname{sh}(\zeta x) \quad (18)$$

$$u_{1s} = \frac{\alpha_i T_1}{\cos^2 \alpha_{si}} x \quad (19)$$

由边界条件确定通解中的待定系数:

(1) 在 $x=0$ 处,由于塔梁固结, $u_{1g}=0$,由此得 $c_1=0$ 。

(2) 在合龙口 $x=l$ 处,轴向力 $N_0=0$,即:

$$N_0|_{x=l} = E_c A_c \left. \frac{du_1}{dx} \right|_{x=l} = 0 \quad (20)$$

由此解得:

$$c_2 = \frac{-\alpha_i T_1}{\zeta \operatorname{ch}(\zeta l) \cos^2 \alpha_{si}} \quad (21)$$

得到主梁的轴向水平位移:

$$u_1 = \frac{\alpha_i T_1}{\cos^2 \alpha_{si}} \left[x - \frac{\operatorname{sh}(\zeta x)}{\zeta \operatorname{ch}(\zeta l)} \right] \quad (22)$$

对于索梁温差作用下合龙口长度的变化量,可以利用两个主梁悬臂端轴向水平位移之和来表示。该变化量同样与温差作用、支承条件、主梁长度有关。

2 算例分析

2.1 方法检验

以宜宾盐坪坝长江大桥的中跨合龙口长度分析为例,检验本文所提出的方法。该桥为主跨480 m的双塔双索面混合式叠合梁斜拉桥,塔高182.9 m,桥跨布置(45+51+97+480+97+51+45) m,桥梁全长

866 m。边跨主梁采用预应力混凝土梁,中跨为钢主梁与混凝土桥面板共同受力的叠合梁,叠合梁共划分为41个节段,每个节段由两道钢主梁、3道横梁、3道小纵梁、6道挑梁、18块预制桥面板、5道纵向湿接缝和3道横向湿接缝组成。全桥共21对索168根斜拉索,中跨1#~5#索间距为10.5 m,6#~21#索间距为11.1 m,斜拉索采用OVM250环氧分丝涂覆高强度低松弛平行钢绞线拉索体系,抗拉强度1 860 MPa。合龙前主梁悬臂长度为236.4 m,合龙段长度为0.72 m。

为了对比,使用Midas软件建立该桥的空间有限元模型(图3),其中中跨钢纵梁和横梁采用梁单元模拟,桥面板采用板单元模拟,拉索采用只受拉单元模拟,全桥共4 629个节点,6 312个单元。采用有限元方法和本文所提出方法同时对中跨合龙前合龙口长度进行分析。在本文方法中,取中间拉索,即第NS11拉索,对主梁产生的平均刚度作为弹性地基梁模型的支承刚度 k_x ,混凝土和钢材的热膨胀系数分别为 $1 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 和 $1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。按照两种方法分别计算主梁和拉索整体温度变化时合龙口长度的变化,得到的结果如图4所示。

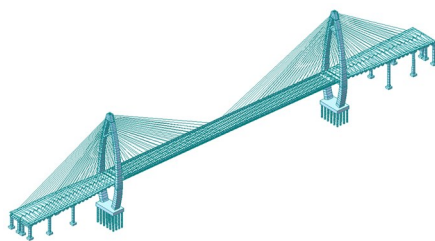


图3 宜宾盐坪坝长江大桥有限元模型

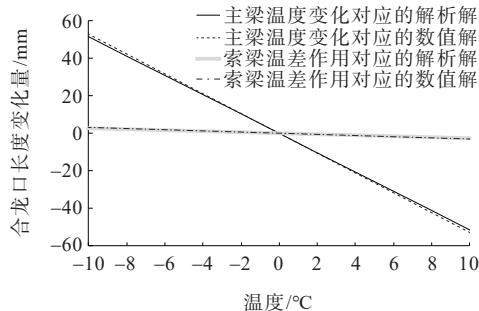


图4 合龙口长度变化量随温度的改变曲线

从图4可以看出:无论是主梁还是拉索温度变化,本文方法计算结果均与有限元模型结果相接近,两者最大值相差0.7 mm,相对误差约3%。说明本文方法能够准确预测合龙口长度随温度的变化,但相

对于有限元方法,本文方法分析过程简单直观,结果可直接用公式表达。同时可以看出:主梁合龙口长度变化量随温度作用呈线性变化,相对主梁整体温度变化,索梁温差作用产生的合龙口长度变化相对较小,仅占主梁温度效应的5%。

为了进一步验证本文方法,采用中跨合龙前实测数据进行对比分析。为了准确确定合龙段长度,施工单位对合龙口长度进行了24 h连续观测,如图5所示。图中同时列出了本文计算结果,在计算时将主梁温度变化和索梁温差作用产生的效应进行叠加,看作桥梁结构整体温度变化产生的响应。

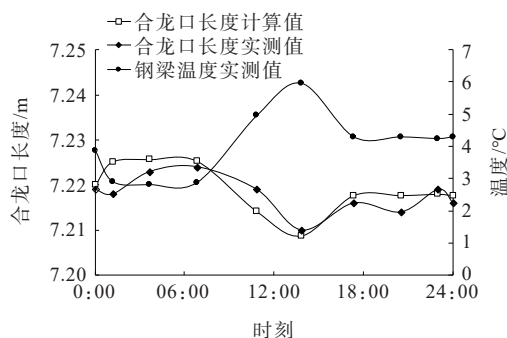


图5 合龙口长度在24 h范围内的变化实测值

从图5可以看出:合龙口长度随着温度的变化而变化,虽然实测与计算数据局部有偏差,但实测数据最大值和最小值均与计算值相接近,其变化趋势与计算值相仿,说明本文方法可用于现场合龙口长度估算和参数分析。

2.2 参数分析

在上述分析中,采用中间索对主梁的平均支承刚度作为弹性地基梁模型的支承刚度 k_e 。而每根索对主梁的支承刚度均不同,根据宜宾盐坪坝长江大桥斜拉索布置形式,拉索对主梁平均支承刚度为198~1 385 kN/m。为此图6分析了在其他参数不变的情况下,支承刚度变化对合龙口长度的影响。

从图6可以看出:当支承刚度由198 kN/m变为1 385 kN/m时,合龙口长度变化了1.5 mm,占总长度变化量的2.8%。因此合龙口长度随支承刚度变化很小,在上述分析中采用中间索对主梁的平均支承刚度作为 k_e ,能够满足工程需求;同时也说明采用本文提出的弹性地基梁模型能够准确预测大跨度斜拉桥合龙口长度的变化。

图7分析了主梁面积变化对合龙口长度的影响。

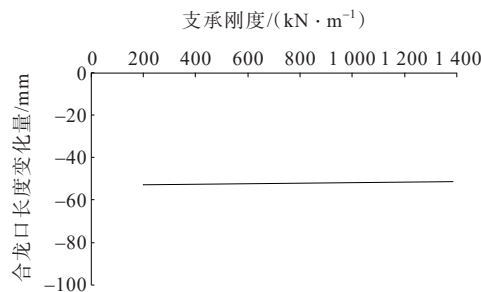


图6 合龙口长度随支承刚度的变化

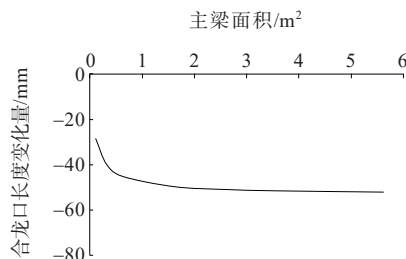


图7 合龙口长度随主梁面积的变化

由图7可以看出:合龙口长度变化量随主梁面积非线性变化,当主梁面积小于0.5 m²时,合龙口长度增速较快,这是由于面积减小的主梁产生的应变值较大,合龙口变形变化量较大。而主梁面积大于0.5 m²时,曲线趋于平缓,说明当主梁面积足够大时其不会对合龙口变化量产生影响。

3 结论

(1) 利用弹性地基梁模型,建立整体温度作用下斜拉桥主梁轴向变形的分析模型,结合温度变形和结构支承边界条件,得到主梁合龙口长度随温度变化的解析表达式。

(2) 通过与宜宾盐坪坝长江大桥的有限元数值模拟结果及实测结果的对比,表明本文所提出解析解的准确性和有效性,同时与数值解相比,解析解简单直观,能够准确地揭示温度对大跨度斜拉桥主梁合龙口长度的作用机理。

(3) 主梁合龙口长度变化量随温度作用线性变化;相对索梁温差作用,主梁整体温度变化产生的合龙口长度变化较大。

(4) 合龙口长度受拉索支承刚度的影响较小,但会受到主梁截面面积的影响,合龙口长度的变化量随着主梁截面面积的增加而增加,当截面面积大于一定数值时,合龙口长度变化量趋于平缓。

基于弧长法的HB-FRP黏结滑移特性研究

徐向锋¹,李鹏飞²,李忻忻¹,张璐珂³,高磊³

(1.山东交通学院 交通土建工程学院,山东 济南 250357;2.山东省滨州公路工程有限公司,山东 滨州 256600;

3.山东大学 岩土与结构工程研究中心,山东 济南 250061)

摘要:HB-FRP(Hybrid Bonding FRP)与混凝土的黏结性能是HB-FRP加固混凝土结构的关键。该文建立HB-FRP单剪数值模型,采用双线性本构考虑FRP与混凝土的界面黏结滑移,采用三线性本构考虑钢扣件部位的界面黏结滑移,采用双弹簧模拟钢扣件部位的黏结滑移特性。基于弧长法开展HB-FRP单剪模型的加、卸载的全过程,研究其受力性能。与试验数据对比分析验证数值模型的有效性,揭示卸载过程中HB-FRP的黏结滑移特性,修正已有黏结滑移模型。对粘贴长度进行参数分析,基于分析结果计算HB-FRP的有效黏结长度为2 500 mm左右,揭示在有效黏结长度范围内钢扣件数量与其抵抗剥离荷载能力呈线性关系。

关键词:HB-FRP;黏结滑移;弹簧;弧长法;单剪试验;有效黏结长度

中图分类号:U445.7+2

文献标志码:A

0 引言

Wu等^[1]结合化学粘贴和机械锚固提出了一种新的粘贴技术(Hybrid Bonding FRP,简称HB-FRP),该技术简单高效,能有效解决常规粘贴FRP技术(External Bonding FRP,简称EB-FRP)易剥离的工程病害。国内外学者对HB-FRP加固技术开展了相

关试验研究、数值模拟和理论分析。

试验研究方面:Wu等^[1]通过抗弯加固梁的试验研究发现其界面黏结强度比传统的外贴FRP板高7.5倍;Yun等^[2]通过HB-FRP双剪疲劳试验,得到了HB-FRP加固混凝土结构的破坏形态,研究表明HB-FRP钢扣件部位的混凝土剥离厚度较EB-FRP要大;颜俊辉^[3]在试验数据分析的基础上研究了HB-FRP体系的加固作用机理、破坏模式以及给出

参考文献:

- [1] 刘生奇,蒋本俊.武汉二七长江大桥跨中钢梁合龙施工技术[J].桥梁建设,2012,42(4):7-13.
- [2] 田卫东,柳俊峰.合肥南淝河大桥主桥合龙施工技术[J].桥梁建设,2012,42(S1):126-130.
- [3] 涂光亚,颜东煌,陈常松,等.荆岳长江公路大桥中跨合龙施工技术[J].桥梁建设,2013,43(4):105-109.
- [4] 高宗余.青洲江大桥结合梁斜拉桥设计[J].桥梁建设,2001,31(4):13-17.
- [5] 贾少敏,赵雷,杨兴旺.嘉绍大桥主航道桥几何合龙控制[J].公路交通科技,2014,31(4):87-93.
- [6] 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.
- [7] 韩大章,李正,华新.江苏灌河大桥设计[J].预应力技术,2007(4):3-7.
- [8] 刘俊胜,王宏,王智龙,等.大跨径结合梁斜拉桥的主跨合龙技术[J].公路交通技术,2010,26(4):67-70.
- [9] 易云焜,谢泽福,牛海喜.厦漳跨海大桥南汉主桥定时合龙技术[J].桥梁建设,2013,43(2):105-109.
- [10] 李国豪.桥梁结构稳定与振动[M].北京:中国铁道出版社,1992.
- [11] 柳惠芬.斜拉桥的实用简化分析[D].上海:同济大学,1995.
- [12] 张哲,万其柏.应用弹性地基梁法计算斜拉桥无索区长度[J].大连海事大学学报,2010,36(2):95-99.

收稿日期:2022-11-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51578323)

作者简介:徐向锋,女,硕士,副教授.E-mail:404943332@qq.com