

基于线性规划的连续刚构桥合龙段顶推力研究

吴 锋¹,王 斌¹,宋旭明²,程丽娟³,赵 利¹

(1. 潍坊市市政工程设计研究院有限公司,山东 潍坊 261061; 2. 中南大学 土木工程学院,
湖南 长沙 410075; 3. 湖南省交通规划勘察设计院,湖南 长沙 410008)

摘 要:为了确定多跨连续刚构桥合龙顶推力的最优解,以 1 座多跨混凝土连续刚构桥为工程背景,取各合龙段顶推力为设计变量,以各墩顶和墩底截面应力为目标函数,以顶推过程中桥墩截面应力为约束条件,基于多目标线性规划方法对合龙段顶推力进行求解。计算时忽略顶推力对主梁混凝土徐变的影响,考虑其对桥墩混凝土徐变的影响,通过线性迭代计算获得非线性最优解,同时对比 2 种顶推方案(方案 1 为 3 个顶推力;方案 2 为 2 个顶推力)的优劣。研究结果表明:采用提出的方法经过 4 次迭代即可收敛,计算方便快捷;考虑合龙顶推力产生的徐变效应时,主梁应力变化幅度相对较小,而桥墩应力变化幅度很大;合龙前施加顶推力对主梁内力影响相对较小,且可以有效调整桥墩受力,使得桥墩在成桥状态荷载组合作用下截面上下缘应力分布均匀;当实际合龙温度与设计合龙温度存在差异时,也可以通过调整顶推力使桥墩受力达到理想状态;采用方案 2 顶推时结构形成 3 个独立的框架结构,具有较大的整体刚度,便于保持顶推过程中的稳定性,虽然其增大了顶推力,但减少了顶推次数,总体而言优于方案 1。

关键词:桥梁工程;合龙顶推力;线性规划法;连续刚构桥;迭代计算

中图分类号:U444.45

文献标志码:A

Research on closure jacking force of continuous rigid frame bridge based on linear programming method

WU Feng¹, WANG Bin¹, SONG Xu-ming², CHENG Li-juan³, ZHAO Li¹

(1. Weifang Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Weifang 261061, Shandong, China;
2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China; 3. Hunan Provincial
Communications Planning, Survey & Design Institute, Changsha 410008, Hunan, China)

Abstract: In order to determine the optimal solution of closure jacking forces of multi-span continuous rigid frame bridges, a multi-objective linear programming was used to calculate the jacking force by selecting a multi-span continuous rigid frame bridge as the engineering background, the jacking force of each closure as design variables, the section stress at the top and bottom of piers as the objective function and the section stress of piers during the process of jacking as constraint conditions. The influence of jacking forces on creep of concrete of the main girder was neglected and on creep of concrete of the pier was considered. And the nonlinear optimal solution was obtained by linear iterative calculation. The advantages and disadvantages of

the two jacking plans (the number of jacking forces were three and two in the first and the second plan, respectively) were compared in the end. The results show that the calculation converges after four iterations and the procedure is proved to be quick and convenient for design, while considering the creep effect of closure jacking force, stress variation of the main girder is relatively small, while stress variation of the pier varies greatly. The jacking force applied before closure has relatively little influence on internal force of the main girder, and can also efficiently adjust stress of the pier, so that distribution of stress at the upper and lower edges of the section is uniform under load effects of completed bridge state. When the actual closure temperature is different from the designed closure temperature, stress of the pier can be reached to an ideal state by adjusting jacking forces. While adopting the second plan, three independent frame structures are formed, which have the larger integral rigidity and are easy to maintain stability during the jacking process. Although the jacking force is increased, the jacking times are reduced. Overall, the second plan is better than the first one. 3 tabs, 4 figs, 24 refs.

Key words: bridge engineering; closure jacking force; linear programming method; continuous rigid frame bridge; iterative calculation

0 引言

大跨度预应力混凝土连续刚构桥外形美观、整体性好、施工方便,在高速公路中得到广泛应用。混凝土连续刚构桥合龙后,徐变、收缩及降温等作用会使主梁缩短,桥墩发生水平变位,可能在桥墩中产生较大的内力。为此,可在主梁合龙前施加水平顶推力使桥墩发生向边跨侧位移,改善成桥后桥墩的受力状况。此外,如果主梁合龙温度与设计温度不一致,也可以通过顶推来抵消合龙温差的影响。

合龙顶推力的确定是设计过程中的关键环节,顶推力过小,对结构受力改善不大,过大则可能使得桥墩在施工过程中开裂。多跨连续刚构桥还存在不同的合龙方案及多个合龙段顶推的问题,很多学者对其合龙顶推过程进行了研究,提出了不同的计算方法。田仲初等推导了连续刚构桥顶推力与位移的关系,并对顶推力产生的效应进行了分析,但是在计算过程中未考虑顶推力对混凝土徐变的影响^[1-2];李亚林等指出施加顶推力后,箱梁应力重分布在一定程度上改善了跨中下挠以及箱梁开裂的问题^[3];栾坤鹏等发现施加顶推力改善了桥墩特别是墩底的受力^[4-7];李杰等分析了在不同顶推力作用下成桥阶段主梁的水平位移,讨论了合龙温度对顶推力及梁体纵向变形的影响^[8-9];刘海波等对刚构桥合龙力的计算、高温合龙措施进行了讨论^[10-11];殷灿彬等采用消除墩顶水平位移和消除主梁拉力这 2 种方法分别计算了合龙顶推力,并对 2 种计算方法进行了对比^[12];李建刚推导了简化的顶推力计算公式,并对

顶推力的大小和墩内力情况进行了比较,提出将顶推力大小控制在抵消成桥后期 70% 的收缩徐变效应即可^[13];胡清和等通过控制墩顶水平位移来确定合理的合龙次序及顶推力大小,并对多跨连续刚构桥顶推合龙方案进行了分析比较^[14];周光伟等分析了不同合龙温度对桥梁结构内力的影响,提出了连续刚构桥在高温合龙情况下采取预施加反顶力的施工对策^[15];张刚刚等对矮墩连续刚构桥的合龙顶推力进行了计算^[16-19];姚国文等分析了考虑徐变效应的不同合龙方案下的合龙顶推力^[20-22];魏建斌等结合施工研究了高墩大跨桥梁的顶推合龙控制技术^[23];肖飞等分析了张拉底板预应力束与温度变化对合龙顶推力的影响^[24]。这几种计算方法均通过试算来确定合龙顶推力,计算结果的理论依据不明确,对于多跨连续刚构桥很难得到最优值。

本文以 1 座多跨混凝土连续刚构桥为工程背景,通过选择合适的目标函数及约束条件,利用多目标线性规划方法确定合龙顶推力。计算过程中考虑了顶推力对混凝土收缩徐变的影响,通过迭代计算获得桥墩截面拉应力最小值,使成桥后和施工过程中结构的应力处于合理范围,以确保结构安全。

1 合龙顶推力计算的线性规划方法

下图 1 所示的多跨双肢薄壁连续刚构桥有 r 个合龙段, n 个桥墩。合龙顶推力的作用类似于对桥墩施加预应力以改善其受力状态,所以对桥墩内力的影响较大,而对主梁内力的影响相对较小。因此,合龙顶推力的大小主要由桥墩轴力、弯矩和应力

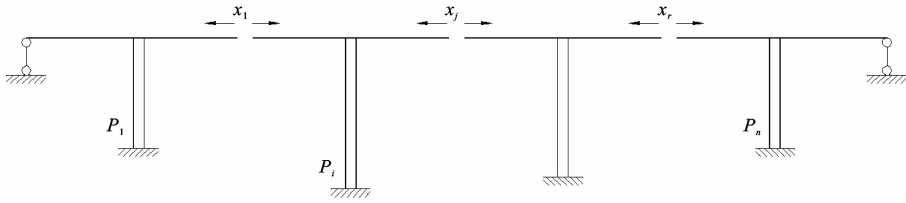


图 1 多跨连续刚构桥计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of multi-span continuous rigid frame bridge

等受力情况决定,理想的受力状态为成桥后桥墩各截面拉应力最小。由连续刚构桥的受力特点可知,如果忽略顶推力对混凝土徐变的影响,则当合龙次序确定后,顶推力与成桥状态桥墩内力为线性关系,且墩顶发生水平位移时桥墩弯矩最大截面为墩顶和墩底截面。为了使成桥状态下桥墩截面拉应力最

小,可取各合龙段顶推力为设计变量,各墩顶和墩底截面应力为目标函数,顶推施工过程中桥墩截面应力为约束条件,基于多目标线性规划方法对合龙段顶推力进行求解。

成桥阶段各桥墩截面应力 $\sigma_i (i=1,2,\dots,n)$ 可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = \frac{N_{11}x_1 + \dots + N_{1j}x_j + \dots + N_{1r}x_r + \sum N_{1g} + \sum N_{1q}}{A_1} + \\ \frac{M_{11}x_1 + \dots + M_{1j}x_j + \dots + M_{1r}x_r + \sum M_{1g} + \sum M_{1q}}{W_1} \\ \vdots \\ \sigma_i = \frac{N_{i1}x_1 + \dots + N_{ij}x_j + \dots + N_{ir}x_r + \sum N_{ig} + \sum N_{iq}}{A_i} + \\ \frac{M_{i1}x_1 + \dots + M_{ij}x_j + \dots + M_{ir}x_r + \sum M_{ig} + \sum M_{iq}}{W_i} \\ \vdots \\ \sigma_n = \frac{N_{n1}x_1 + \dots + N_{nj}x_j + \dots + N_{nr}x_r + \sum N_{ng} + \sum N_{nq}}{A_n} + \\ \frac{M_{n1}x_1 + \dots + M_{nj}x_j + \dots + M_{nr}x_r + \sum M_{ng} + \sum M_{nq}}{W_n} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: x_j 为合龙段 $j (j=1,2,\dots,r)$ 的顶推力; N_{ij} 、 M_{ij} 为合龙段 j 单位顶推力在截面 i 产生的轴力和弯矩; N_{ig} 、 M_{ig} 为成桥阶段恒载在截面 i 产生的轴力和弯矩; N_{iq} 、 M_{iq} 为活载在截面 i 产生的轴力和弯矩; A_i 、 W_i 为截面 i 的面积和弹性抵抗矩。

式(1)可改写为

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_1 = a_{11}x_1 + \dots + a_{1j}x_j + \dots + a_{1r}x_r + \\ \quad \sum \sigma_{1g} + \sum \sigma_{1q} \\ \vdots \\ \sigma_i = a_{i1}x_1 + \dots + a_{ij}x_j + \dots + a_{ir}x_r + \\ \quad \sum \sigma_{ig} + \sum \sigma_{iq} \\ \vdots \\ \sigma_n = a_{n1}x_1 + \dots + a_{nj}x_j + \dots + a_{nr}x_r + \\ \quad \sum \sigma_{ng} + \sum \sigma_{nq} \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $a_{ij} = \frac{N_{ij}}{A_i} + \frac{M_{ij}}{W_i}$; $\sigma_{ig} = \frac{N_{ig}}{A_i} + \frac{M_{ig}}{W_i}$, 为恒载应力; $\sigma_{iq} =$

$\frac{N_{iq}}{A_i} + \frac{M_{iq}}{W_i}$, 为活载最小应力。

由于恒载和活载应力不受合龙顶推力的影响,对于特定截面而言,这 2 项应力为固定值。活载应力中包含温度作用产生的应力,如果实际合龙温度与设计合龙温度有差异,可调整温度作用中升降温数值,并利用合龙顶推力调整结构应力。式(2)中桥墩各截面应力 σ_i 均为最小值,即为典型的多目标线性规划问题。根据顶推施工过程中桥墩截面的应力状态,可列出约束条件

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{11}x_1 + \dots + b_{1j}x_j + \dots + b_{1r}x_r + \sum \sigma_{1c} \leq \sigma_y \\ \vdots \\ b_{i1}x_1 + \dots + b_{ij}x_j + \dots + b_{ir}x_r + \sum \sigma_{ic} \leq \sigma_y \\ \vdots \\ b_{n1}x_1 + \dots + b_{nj}x_j + \dots + b_{nr}x_r + \sum \sigma_{nc} \leq \sigma_y \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: b_{ij} 为合龙段 j 单位顶推力在截面 i 产生的拉应力; σ_{ic} 为施工荷载在截面 i 产生的拉应力; σ_y 为施工阶段的容许拉应力。

对于上述多目标线性规划问题,为了满足各截面的受力要求,可以利用 MATLAB 优化工具箱的 fgoalattain 函数(fgoalattain 函数是基于目标达到算法使目标与待优化函数之间的差最小),通过设置合适的目标值来确定合理的合龙顶推力。

墩顶发生水平位移时,弯矩值最大截面出现在墩顶和墩底,对于双肢薄壁墩,施加顶推力时桥墩中跨侧肢轴力为拉力,而成桥阶段混凝土收缩徐变作用下桥墩边跨侧肢轴力为拉力。因此,式(2)和式(3)中的截面通常取不同截面,式(2)中的截面可取桥墩边跨侧肢的顶端和底部截面,式(3)中的截面则取中跨侧肢的顶端和底部截面。

值得注意的是,上述计算过程中忽略了合龙顶推力产生的内力对混凝土徐变的影响。虽然合龙顶推力对主梁内力影响很小,但对桥墩内力的影响相对较大,混凝土徐变对其内力的影响不宜忽略,因此,合龙顶推力与桥墩恒载内力为非线性关系。为了利用上述线性规划方法求解此非线性问题,可以通过迭代计算进行求解,计算步骤如下:

- (1)选择合龙方案及控制截面,建立结构有限元模型;
- (2)确定施工阶段容许应力 σ_y ,施加合龙顶推力初始向量 X_0 到有限元模型进行计算;
- (3)从有限元计算结果中提取 a_{ij} 、 σ_{ig} 、 σ_{iq} 、 b_{ij} 、 σ_{ic} 等参数,设置桥墩应力目标值,利用 fgoalattain 函数求解合龙顶推力的最优解向量 X_1 ;
- (4)比较 X_0 和 X_1 ,如果两者的误差在容许范围内,则 X_1 为最优解;否则用 X_1 代替 X_0 施加在有限元模型上,返回步骤(2)重新计算,直到两者误差在容许范围内,具体流程见图2。

此外,墩底刚度对合龙顶推力的计算影响较大,而根据地质资料计算的墩底刚度往往与实际存在差

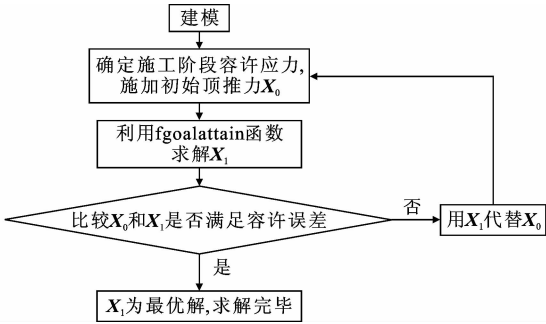


图2 算法流程
Fig. 2 Flow of algorithm

异。因此,在实际顶推合龙前应进行试顶推,根据力和位移曲线确定实际的墩底刚度。如果顶推力合力作用点不是截面形心,尚需计入偏心弯矩的影响。

2 实例分析

2.1 工程背景

文明大桥是汝城—郴州高速公路的1座特大桥梁,全桥总长1 790.88 m,主桥为跨径组合(66+6×120+66) m的混凝土连续刚构。主桥分为左右2幅,主梁为单箱单室箱形截面,梁高、底板厚度均按2次抛物线变化。箱梁T构根部梁高为700 cm,跨中梁高为310 cm。箱梁顶板全宽为1 200 cm,底板宽度为650 cm,顶板设双向2%横坡。箱梁单个T构共分18段浇筑,0号梁段长1 300 cm,其余1~17号梁段分段为(3×250+8×300+6×350) cm;边跨现浇段长500 cm;边跨和中跨合龙段长均为200 cm。主桥按22#~28#墩共7个T构对称悬臂现浇施工,两边跨500 cm现浇段搭设吊架浇筑。

22#~28#桥墩为悬浇连续刚构主墩,为双肢变截面空心墩。空心墩两肢间中心距700 cm,壁厚60 cm,单肢空心墩顶部截面尺寸为350 cm×700 cm,中部截面尺寸为300 cm×700 cm,底部尺寸由中部尺寸按坡率50:1向墩底逐渐放大直达承台顶。左幅桥的桥形布置如图3所示。

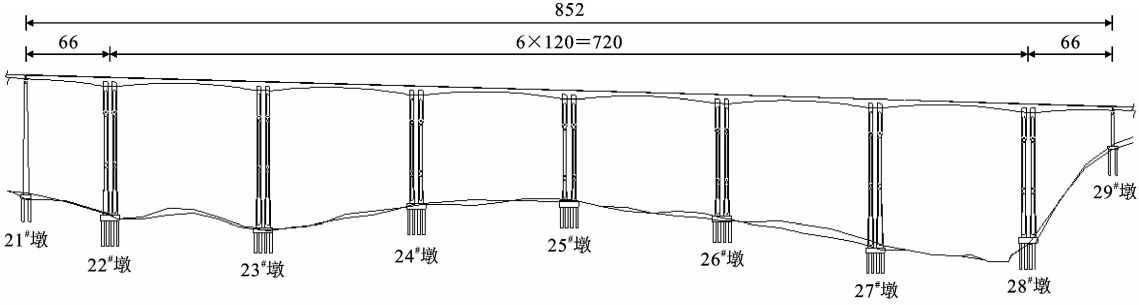


图3 文明大桥总体布置
Fig. 3 General arrangement of Wenming Bridge

单位: m

拟定 2 种合龙方案,均为对称施加顶推力。方案 1:① 吊架施工,合龙 21[#]与 22[#]、28[#]与 29[#]墩之间的边跨;② 在 24[#]与 25[#]、25[#]与 26[#]墩之间的主跨同时施加顶推力 X_1 并合龙;③ 在 23[#]与 24[#]、26[#]与 27[#]墩之间的主跨同时施加顶推力 X_2 并合龙;④ 在 22[#]与 23[#]、27[#]与 28[#]墩之间的主跨同时施加顶推力 X_3 并合龙,形成连续刚构桥。方案 2:① 吊架施工,合龙 21[#]与 22[#]、28[#]与 29[#]墩之间的边跨;② 在 24[#]与 25[#]、25[#]与 26[#]墩之间的主跨同时施加顶推力 X_1 并合龙;③ 合龙 22[#]与 23[#]、27[#]与 28[#]墩之间的主跨;④ 在 23[#]与 24[#]、26[#]与 27[#]墩之间的主跨同时施加顶推力 X_2 并合龙,形成连续刚构桥。

2.2 有限元计算模型

利用 MIDAS Civil 2015 建立空间梁单元有限元模型,主梁单元长度根据施工节段确定,全桥共划分为 1 030 个单元,1 045 个节点。主梁两端为滑动支座,墩底为弹性支承,支承刚度根据地质资料计算桩土共同作用来确定。混凝土收缩徐变按《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)计算,由于混凝土收缩徐变通常在成桥后 5~10 年才稳定,所以计算中取成桥后 10 年为收缩徐变完成的稳定状态。

2.3 顶推力优化计算

由于采用对称顶推,文明大桥合龙方案 1 共有 3 个顶推力,方案 2 有 2 个顶推力。式(2)中的控制截面取 22[#]~24[#]、26[#]~28[#]墩边跨侧肢的墩顶及墩底截面,式(3)中的控制截面则取相应桥墩的中跨侧肢的墩顶和墩底截面。

2.3.1 合龙方案 1

合龙方案 1 顶推力初始值取 1 000 kN,即采用 $X_0=[1\ 000\ 1\ 000\ 1\ 000]^T$ 进行迭代计算。经过 4 次迭代,前后 2 次顶推力的最大相对误差小于 0.5% 时停止迭代,经过优化后合龙方案 1 的顶推力 $X_1=[1\ 250\ 1\ 380\ 1\ 720]^T$ 。图 4 为墩顶累计水平位移,位移方向以图 2 中向右侧为正。

图 4 所示 2 个阶段中荷载并无差别,可以看出,施加顶推力对主梁内力影响很小,而墩顶水平位移差主要取决于主梁轴向收缩徐变变形,因此顶推力对成桥后混凝土收缩徐变产生的墩顶水平位移影响很小。除 25[#]墩外,顶推力 X_1 作用下成桥状态墩顶均有向边跨侧的水平位移,成桥状态下墩顶位移为 0 并不能使桥墩达到最好的受力状态。不施加顶推力和施加顶推力 X_1 时桥墩应力见表 1,其中以压应

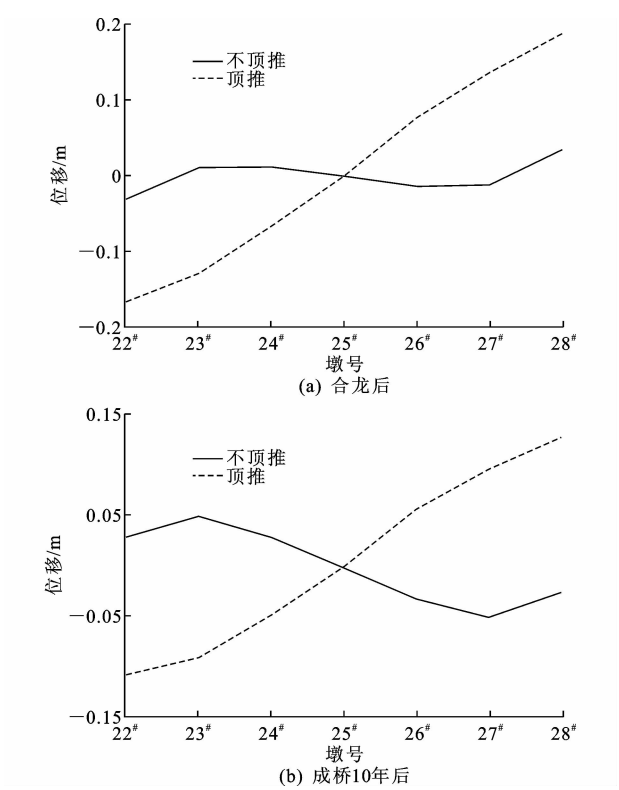


图 4 墩顶累计水平位移
Fig. 4 Cumulative horizontal displacements of top of piers

截面		合龙后				成桥 10 年后			
		不顶推		顶推		不顶推		顶推	
		上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘	上缘	下缘
22 [#] 墩左肢墩顶截面		0.6	2.1	3.3	-0.1	-0.6	3.0	1.3	1.4
22 [#] 墩左肢墩底截面		1.8	1.6	0.4	3.2	2.3	0.8	1.3	2.0
22 [#] 墩右肢墩顶截面		-0.2	1.1	1.7	-1.4	-1.0	2.1	0.3	0.4
22 [#] 墩右肢墩底截面		1.3	1.1	-0.4	2.4	2.0	0.5	0.8	1.4
23 [#] 墩左肢墩顶截面		0.6	1.3	2.8	-0.3	-0.1	1.9	1.5	0.7
23 [#] 墩左肢墩底截面		1.5	1.2	0.6	2.5	1.8	0.8	1.1	1.8
23 [#] 墩右肢墩顶截面		0.5	1.3	2.0	-0.9	-0.1	1.9	1.0	0.3
23 [#] 墩右肢墩底截面		1.5	1.2	0.2	2.1	1.9	0.8	0.9	1.6
24 [#] 墩左肢墩顶截面		0.6	1.2	2.3	0.1	0.1	1.6	1.4	0.7
24 [#] 墩左肢墩底截面		1.8	1.4	0.8	2.8	2.1	1.0	1.3	2.1
24 [#] 墩右肢墩顶截面		0.6	1.3	1.7	-0.4	0.2	1.6	1.0	0.4
24 [#] 墩右肢墩底截面		1.8	1.4	0.5	2.4	2.1	1.1	1.1	1.8
25 [#] 墩左肢墩顶截面		1.0	0.9	1.0	0.8	0.9	0.8	1.0	0.8
25 [#] 墩左肢墩底截面		1.6	1.6	1.6	1.7	1.6	1.6	1.6	1.6
25 [#] 墩右肢墩顶截面		0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8
25 [#] 墩右肢墩底截面		1.6	1.6	1.6	1.6	1.5	1.6	1.6	1.6

力为正。

从表 1 可以看出,由于计算过程中设置了约束条件,施加顶推力后各阶段应力均在控制范围内。相对于不顶推,施加顶推力后合龙时桥墩截面上下

缘应力差别变大,而成桥 10 年后桥墩截面上下缘应力则相对均匀。

合龙顶推力会改变主梁及桥墩内力,进而改变主梁及桥墩徐变效应的大小。计算表明,在收缩徐变完成后,是否考虑合龙顶推力产生的徐变效应,二者主梁应力变化幅度为 $-0.7\sim 0.5$ MPa,应力变化在 12.2%以下。最大差值出现在边跨跨中位置,中跨应力变化在 5.0%以下。合龙顶推力在桥墩中产生的徐变应力为 $-1.1\sim 1.1$ MPa,桥墩应力较小,其徐变应力所占比例很大,差值百分比为 $-327.0\%\sim 301.4\%$,在计算过程中不能忽略。恒载和活载组合作用下桥墩截面最不利应力见表 2。

表 2 方案 1 最不利应力

Tab. 2 Most unfavorable stress under plan 1 MPa									
截面	不顶推				顶推				
	上缘	上缘	下缘	下缘	上缘	上缘	下缘	下缘	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	
22# 墩左肢墩顶截面	3.8	-4.8	7.0	-1.2	5.8	-2.8	5.4	-2.8	
22# 墩左肢墩底截面	5.6	-1.1	4.2	-2.5	4.6	-2.0	5.4	-1.3	
22# 墩右肢墩顶截面	2.2	-3.8	5.0	-1.1	3.5	-2.5	3.3	-2.7	
22# 墩右肢墩底截面	3.7	0.2	2.4	-1.1	2.5	-1.0	3.3	-0.2	
23# 墩左肢墩顶截面	2.3	-2.5	4.7	-0.7	3.9	-0.9	3.6	-1.9	
23# 墩左肢墩底截面	4.2	-0.5	3.0	-1.3	3.5	-1.2	4.0	-0.3	
23# 墩右肢墩顶截面	2.9	-3.0	4.6	-0.7	4.0	-1.9	3.0	-2.4	
23# 墩右肢墩底截面	3.1	0.6	2.3	-0.4	2.1	-0.3	3.0	0.3	
24# 墩左肢墩顶截面	2.7	-2.4	4.5	-1.1	4.0	-1.1	3.6	-2.0	
24# 墩左肢墩底截面	4.6	-0.4	3.4	-1.2	3.8	-1.2	4.4	-0.2	
24# 墩右肢墩顶截面	3.2	-2.5	4.2	-1.0	4.0	-1.7	2.9	-2.2	
24# 墩右肢墩底截面	3.7	0.5	3.0	-0.6	2.7	-0.6	3.8	0.1	
25# 墩左肢墩顶截面	2.7	-0.8	3.1	-1.1	2.7	-0.8	3.1	-1.1	
25# 墩左肢墩底截面	3.9	-0.7	3.7	-0.4	3.9	-0.7	3.7	-0.4	
25# 墩右肢墩顶截面	3.3	-1.3	2.9	-1.1	3.3	-1.4	2.9	-1.1	
25# 墩右肢墩底截面	2.8	0.3	3.2	0.3	2.8	0.3	3.2	0.3	

从表 2 可以看到,施加顶推力后桥墩最大拉应力明显小于未施加顶推力时,未施加顶推力时 22# 墩左肢墩顶截面最小应力达到 -4.8 MPa,顶推后减小为 -2.8 MPa。此外,顶推后截面上下缘应力也较均匀。

2.3.2 合龙方案 2

合龙方案 2 只有 2 个顶推力,初始值均取 1 000 kN,即 $\mathbf{X}_0=[1\ 000\ 1\ 000]^T$ 进行迭代计算。经过 4 次迭代,前后 2 次顶推力的误差均小于 0.3%,停止迭代计算,优化后的顶推力为 $\mathbf{X}_1=[550\ 3\ 200]^T$ 。

与合龙方案 1 的计算结果类似,是否施加顶推力对成桥后收缩徐变产生的墩顶水平位移基本没有影响。顶推施工过程中桥墩拉应力控制在 2.5 MPa

以内,成桥状态下收缩徐变稳定后,22#、23#、27#、28# 墩顶分别有向边跨侧的水平位移 0.094、0.087、0.094、0.105 m。在收缩徐变完成后,是否考虑合龙顶推力产生的徐变效应,二者主梁应力变化幅度为 $-0.5\sim 0.5$ MPa,应力变化最大百分比为 10.9%。最大差值出现在 22# 与 23#、27# 与 28# 墩之间的跨中。合龙顶推力在桥墩中产生的徐变应力为 $-1.1\sim 1.1$ MPa,由于桥墩应力较小,因此徐变应力所占比例很大,差值百分比为 $-391.6\%\sim 163.9\%$,在计算过程中不能忽略。

表 3 给出了恒载和活载组合作用下 22#~25# 桥墩截面最不利应力。

表 3 方案 2 最不利应力

Tab. 3 Most unfavorable stress under plan 2 MPa									
截面	不顶推				顶推				
	上缘	上缘	下缘	下缘	上缘	上缘	下缘	下缘	
	最大	最小	最大	最小	最大	最小	最大	最小	
22# 墩左肢墩顶截面	3.7	-4.9	7.0	-1.2	5.7	-2.9	5.3	-2.9	
22# 墩左肢墩底截面	5.6	-1.0	4.1	-2.6	4.6	-2.0	5.3	-1.4	
22# 墩右肢墩顶截面	2.2	-3.8	5.0	-1.0	3.7	-2.3	3.3	-2.7	
22# 墩右肢墩底截面	3.8	0.3	2.4	-1.2	2.6	-0.9	3.3	-0.2	
23# 墩左肢墩顶截面	2.5	-2.3	4.5	-1.0	4.2	-0.6	3.1	-2.4	
23# 墩左肢墩底截面	4.1	-0.6	3.1	-1.2	3.3	-1.4	4.1	-0.3	
23# 墩右肢墩顶截面	3.2	-2.7	4.4	-0.9	4.5	-1.3	2.7	-2.6	
23# 墩右肢墩底截面	3.0	0.6	2.4	-0.3	2.0	-0.4	3.1	0.4	
24# 墩左肢墩顶截面	2.7	-2.4	4.4	-1.2	3.3	-1.8	4.0	-1.6	
24# 墩左肢墩底截面	4.6	-0.4	3.4	-1.2	4.2	-0.8	3.9	-0.8	
24# 墩右肢墩顶截面	3.2	-2.4	4.2	-1.0	3.6	-2.1	3.6	-1.5	
24# 墩右肢墩底截面	3.7	0.5	3.1	-0.6	3.3	0.0	3.4	-0.3	
25# 墩左肢墩顶截面	2.7	-0.8	3.1	-1.1	2.7	-0.8	3.1	-1.1	
25# 墩左肢墩底截面	3.9	-0.7	3.7	-0.4	3.9	-0.7	3.7	-0.4	
25# 墩右肢墩顶截面	3.3	-1.3	2.9	-1.1	3.3	-1.4	2.9	-1.1	
25# 墩右肢墩底截面	2.8	0.3	3.2	0.3	2.8	0.3	3.2	0.2	

采用合龙方案 2 时,与不施加顶推力相比,桥墩最大拉应力由 -4.9 MPa 减小为 -2.9 MPa,截面上下缘应力也较均匀,应力状态明显改善。

如果实际合龙温度与设计合龙温度存在差异,只需在计算过程中改变式(2)中 σ_{i0} 的数值,即可得到新的优化顶推力。如采用合龙方案 2 时,当实际合龙温度比设计合龙温度高 5 ℃时,迭代后的优化顶推力为 $\mathbf{X}_1=[732\ 3\ 840]^T$ 。

3 结 语

(1)选择成桥状态下桥墩截面应力为目标函数,施工状态截面应力为约束条件,将顶推力计算转换为多目标线性规划问题,利用迭代计算考虑混凝土

收缩徐变的影响,通过 MATLAB 的优化工具箱可以方便地确定合理的合龙顶推力,使得运营阶段桥墩截面拉应力最小。从迭代计算过程来看,采用本文方法在计算文明大桥顶推力过程中经过 4 次迭代即可收敛,计算方便快捷。

(2)合龙顶推力会改变主梁及桥墩内力,进而改变主梁及桥墩徐变效应。计算表明,是否考虑合龙顶推力产生的徐变效应,二者主梁应力变化幅度相对较小,而桥墩应力变化幅度很大,在计算过程中不能忽略。因此,使用解析方法在计算合龙顶推力过程中如果不考虑其徐变效应将引起较大误差。

(3)合龙前施加顶推力对主梁内力影响相对较小,但是可以有效调整桥墩受力,使得桥墩在成桥状态荷载组合作用下截面上下缘应力较均匀。当实际合龙温度与设计合龙温度存在差异时,也可以通过调整顶推力使桥墩受力达到理想状态。

(4)与合龙方案 1 相比,合龙方案 2 在合龙 23[#] 与 24[#]、26[#] 与 27[#] 墩之间的主梁前,结构形成 3 个独立的框架结构,分别具有较大的整体刚度,便于保持顶推过程中的稳定性,但是也加大了顶推力。合龙方案 1 需要进行 3 次顶推,方案 2 只需要 2 次顶推,减小了施工工作量。总体而言,合龙方案 2 优于合龙方案 1。

(5)下一步可应用本文方法研究不同桥墩类型(矮墩连续刚构桥、V 形墩刚构桥)的合龙顶推力计算收敛速度,并对相应施工方案进行对比。

参考文献:

References:

- [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.
TIAN Zhong-chu, MO Dong-hua. Study on closure jacking force and its effect for long-span continuous rigid frame bridge with high-rise piers[J]. Highways & Automotive Applications, 2011(5):160-162.
- [2] 田仲初,陈耀章,赵利平,等.连续钢梁顶推过程局部接触分析及改善措施[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(4):44-50.
TIAN Zhong-chu, CHEN Yao-zhang, ZHAO Li-ping, et al. Local contact analysis and improvement measures of continuous steel girder incremental launching [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(4):44-50.
- [3] 李亚林,周 玮.连续刚构桥顶推力计算方法及受力性能分析[J].交通科技与经济,2007,9(5):6-8.
- LI Ya-lin, ZHOU Wei. The closure jacking force and the performance after jacked of continuous rigid frame bridge[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2007, 9(5):6-8.
- [4] 栾坤鹏,张雪松,高洪如.连续刚构桥合龙顶推力优化计算方法[J].鲁东大学学报:自然科学版,2011,27(1):92-96.
LUAN Kun-peng, ZHANG Xue-song, GAO Hong-ru. Numerical method of continuous rigid frame bridge jacking force for optimization[J]. Ludong University Journal: Natural Science Edition, 2011, 27(1):92-96.
- [5] 陈洪彬,陈 群,王 斐,等.大跨度连续刚构桥合龙顶推效应分析及方案设计[J].公路,2009(7):209-211.
CHEN Hong-bin, CHEN Qun, WANG Fei, et al. Analysis on closure jacking force of long-span continuous rigid frame bridge [J]. Highway, 2009 (7): 209-211.
- [6] 李传习,王 琛,董创文,等.基于相位变换的顶推曲梁桥自适应无应力构形控制[J].中国公路学报,2014,27(2):45-53.
LI Chuan-xi, WANG Chen, DONG Chuang-wen, et al. Control of self-adaptive unstressed configuration for incrementally launched curved girder bridge based on phase transformation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2):45-53.
- [7] 赵人达,张双洋.桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J].中国公路学报,2016,29(2):32-43.
ZHAO Ren-da, ZHANG Shuang-yang. Research status and development trend on incremental launching construction of bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(2):32-43.
- [8] 李 杰,陈 彬.连续刚构桥顶推力计算与优化分析[J].郑州大学学报:工学版,2013,34(6):85-89.
LI Jie, CHEN Bin. Analysis of continuous rigid frame bridge jacking force calculation and optimization[J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2013, 34(6):85-89.
- [9] 李 军,曾一帆,陈 辉,等.大跨径连续刚构桥中跨合龙顶推力研究[J].铁道科学与工程学报,2015,12(2):335-341.
LI Jun, ZENG Yi-fan, CHEN Hui, et al. Study on mid-span jacking force for long span continuous rigid-frame bridges[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(2):335-341.
- [10] 刘海波.大跨度连续刚构桥中跨高温合龙技术[J].铁道建筑,2005(5):15-17.

- LIU Hai-bo. Closure technology of mid-span for large-span continuous rigid frame bridge under high temperature [J]. Railway Engineering, 2005 (5): 15-17.
- [11] 胡文学, 钟 永. 关于在非设计合拢温度时合拢连续刚构桥问题的探讨[J]. 中南公路工程, 1998, 23(4): 27-28.
HU Wen-xue, ZHONG Yong. Discussion on closure of continuous rigid frame bridge under the off-design temperature[J]. Central South Highway Engineering, 1998, 23(4): 27-28.
- [12] 殷灿彬, 王解军, 唐 灿. 连续刚构桥高温合拢顶推力的计算方法研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(1): 111-116.
YIN Can-bin, WANG Jie-jun, TANG Can. Algorithms for the jacking force of high-temperature closure of a continuous rigid-frame bridge[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2009, 29(1): 111-116.
- [13] 李建刚. 预应力混凝土连续刚构桥合拢问题的相关研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
LI Jian-gang. The research about closure of prestressed concrete continuous rigid frame bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [14] 胡清和, 邓江明, 周水兴, 等. 多跨连续刚构桥顶推合拢方案研究[J]. 中外公路, 2009, 29(3): 109-114.
HU Qing-he, DENG Jiang-ming, ZHOU Shui-xing, et al. Research on closure scheme of multi-span continuous rigid frame bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(3): 109-114.
- [15] 周光伟, 陈得良, 刘 榕. 连续刚构桥合拢温度的合理确定及高温合拢对策[J]. 长沙交通学院学报, 2006, 22(3): 15-19.
ZHOU Guang-wei, CHEN De-liang, LIU Rong. Study on rational of determination joining temperature of PC continuous rigid frame bridge and their resolutions [J]. Journal of Changsha Communications University, 2006, 22(3): 15-19.
- [16] 张刚刚, 吴重男. 连续刚构桥合拢段顶推力设计探讨[J]. 中外公路, 2011, 31(5): 119-122.
ZHANG Gang-gang, WU Chong-nan. Discussion on design of closure jacking force of continuous rigid frame bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(5): 119-122.
- [17] 吴 彪. 矮墩连续刚构桥合拢段的顶推施工[J]. 公路, 2004(7): 165-167.
WU Biao. Construction of closure of long-span continuous rigid frame bridge with low piers by pushing[J]. Highway, 2004(7): 165-167.
- [18] 祝立君, 潘永清, 何国亮. 矮墩连续刚构桥顶推合拢的计算分析与施工实践[J]. 交通标准化, 2011(20): 101-104.
ZHU Li-jun, PAN Yong-qing, HE Guo-liang. Calculation and construction of closure of low-pier continuous rigid frame bridge with pushing force[J]. Transportation Standardization, 2011(20): 101-104.
- [19] 张茂龙, 杨成斌. 矮墩连续刚构桥合拢顶推力研究[J]. 湖南工程学院学报: 自然科学版, 2011, 21(2): 92-94.
ZHANG Mao-long, YANG Cheng-bin. Research on closure jacking force of low pier continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering: Natural Science Edition, 2011, 21(2): 92-94.
- [20] 姚国文, 宋文锋, 周志祥, 等. 多跨连续刚构桥水平顶推力与合拢顺序优化[J]. 公路与汽运, 2008(1): 91-93.
YAO Guo-wen, SONG Wen-feng, ZHOU Zhi-xiang, et al. Optimization on closure jacking force and closure order of long-span continuous rigid frame bridge [J]. Highways & Automotive Applications, 2008(1): 91-93.
- [21] 王凌波, 郑 斐. 内置劲性骨架的 PC 箱梁桥合拢段时变性能分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(4): 69-75.
WANG Ling-bo, ZHENG Fei. Time-varying performance analysis of PC box girder bridge with inner stiff skeleton at closure section[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(4): 69-75.
- [22] 潘国兵, 刘 毅. 多跨连续刚构桥主梁合拢方案研究及对应顶推力计算[J]. 公路交通科技, 2012, 29(7): 193-195, 198.
PAN Guo-bing, LIU Yi. Research on closure scheme and calculation on jacking force of long-span continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(7): 193-195, 198.
- [23] 魏建斌, 魏家乐, 马 玲. 高墩大跨连续刚构桥顶推合拢控制技术研究[J]. 世界桥梁, 2014, 42(4): 39-43.
WEI Jian-bin, WEI Jia-le, MA Ling. Study of control techniques for closure of long-span continuous rigid frame bridge with high-rise piers by pushing [J]. World Bridges, 2014, 42(4): 39-43.
- [24] 肖 飞, 顾箭锋, 陈玉清, 等. 连续刚构桥顶推关键技术研究[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2013, 26(4): 76-79.
XIAO Fei, GU Jian-feng, CHEN Yu-qing, et al. Research on the key technology of continuous rigid-frame bridge jacking[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering: Natural Science Edition, 2013, 26(4): 76-79.