

高墩大跨连续刚构桥中跨合龙顶推力计算方法

杨国俊¹, 郝宪武¹, 段瑞芳², 李子青¹

1. 长安大学公路学院, 西安 710064

2. 陕西交通职业技术学院, 西安 710018

摘要 为合理确定高墩大跨连续刚构桥中跨合龙的顶推力, 基于力法原理提出一种适用于单柱式墩连续刚构桥先边跨后中跨合龙的顶推力解析计算方法。以某三跨连续刚构桥施工工程为例, 应用解析法计算先边跨后中跨合龙的顶推力和顶推力, 同时利用数值模拟法建立有限元模型, 以消除5年收缩徐变及合龙温差引起的墩顶水平位移为原则进行计算比较, 并以工程实测结果进行验证。结果显示, 解析法计算值、有限元计算值和实测值三者之间误差很小, 解析法与有限元法计算误差小于10%, 表明解析法具有较高的计算精度, 能满足实际工程要求。

关键词 高墩大跨连续刚构桥; 顶推力; 合龙温差; 收缩徐变; 墩顶水平位移

由于高墩大跨连续刚构桥是墩梁固结体系, 混凝土收缩徐变及合龙温差会使主墩产生偏位, 对主墩的受力产生不利影响。为了消除其影响, 在高墩大跨连续刚构桥中跨合龙时对梁体施加一定量的顶推力, 相当于给主墩施加一个反向位移, 以消除合龙温差、后期收缩徐变等因素引起的墩顶纵向水平位移^[1]。国内外对高墩大跨连续刚构桥合龙时的顶推技术已进行了较多研究, 提出了几种计算顶推力和顶推位移的方法。刘昌国等^[2]对连续刚构桥高温合龙顶推力进行试验研究, 提出在中跨合龙时采用消除合龙温差引起的墩顶水平位移模式计算水平顶推力, 但只考虑了合龙温差引起的墩顶偏位, 忽略了混凝土收缩徐变引起的墩顶偏位; 许明雷等^[3]、蒋国云^[4]、陈洪彬等^[5]采用有限元法模拟施工过程, 以消除墩顶水平位移为原则计算顶推力; 张刚刚等^[6]提出顶推力设计原则, 并通过两座连续刚构桥的顶推力设计分析了顶推力与墩身内力及变位的相互关系, 从设计的角度分析了顶推力的控制原则; 马卫华等^[7]在非高温情况下对连续刚构桥进行顶推合龙试验, 实测顶推力、顶推位移并与理论值进行了对比分析, 但其结果主要适用于矮墩连续刚构桥, 不适合于高墩大跨连续刚构桥; 陈荣刚等^[8]、杨庆国等^[9]分别分析六跨连续刚构桥的合龙顺序对主梁的影响和非常规合龙顺序对五跨连续刚构桥的影响, 给出了多跨连续刚构桥

合龙顺序的建议; 邹毅松等^[10]以双薄壁墩的连续刚构桥为研究对象, 推导顶推力解析式, 并建立有限元模型, 进行了对比分析; Soyuk^[11]、Nutti 等^[12]分析了大跨度连续刚构桥在地震作用下的力学性能。本文基于力法原理, 研究单柱式高墩连续刚构桥先边跨后中跨合龙的顶推力解析计算方法。

1 顶推力解析式

合龙段顶推力计算公式的推导是基于三跨高墩大跨连续刚构桥, 由于中跨合龙前两墩为独立的结构体系, 相互没有作用, 所以取连续刚构桥的一个T构为计算结构简图, 如图1所示。计算采用结构力学中的力法原理^[13], 中跨合龙前结构的基本体系如图2所示。

力法基本方程为

$$\delta_{11}X_1 + \Delta_{1p} = 0 \quad (1)$$

其中

$$\delta_{11} = \int \frac{\overline{M}_1 \overline{M}_1}{EI} dx = \frac{a^3}{3E_1 I_1} + \frac{a^2 h}{E_2 I_2} = \frac{(E_2 I_2 a + 3E_1 I_1 h)a^2}{3E_1 E_2 I_1 I_2} \quad (2)$$

$$\Delta_{1p} = \int \frac{\overline{M}_1 M_p}{EI} dx = -\frac{Ph^2 a}{2E_2 I_2} \quad (3)$$

收稿日期: 2015-03-21; 修回日期: 2015-08-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目(2013G1211010)

作者简介: 杨国俊, 博士研究生, 研究方向为桥梁结构及结构分析, 电子信箱: 798602505@qq.com; 郝宪武(通信作者), 教授, 研究方向为桥梁结构桥梁可靠度评价, 桥梁加固理论及方法, 电子信箱: hwx1962@126.com

引用格式: 杨国俊, 郝宪武, 段瑞芳, 等. 高墩大跨连续刚构桥中跨合龙顶推力计算方法[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 271-276; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.046

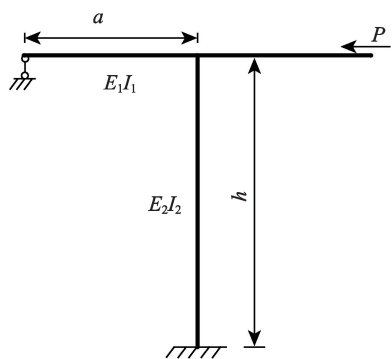


图1 计算简图

Fig. 1 Calculation diagram

将式(2)和式(3)代入到式(1)可得

$$X_1 = -\frac{\Delta_{1p}}{\delta_{11}} = \frac{3PE_1I_1h^2}{(E_2I_2a + 3E_1I_1h)a} \quad (4)$$

式中, δ_{11} 为单位力在 X_1 方向产生的位移; Δ_{1p} 为荷载 P 引起的 X_1 方向的位移; E_1 、 I_1 分别为主梁的弹性模量和截面惯性矩; E_2 、 I_2 分别为主塔的弹性模量和截面惯性矩; a 、 h 分别为桥梁边跨跨径和桥墩高度。

根据力法原理推导水平位移 Δx 和水平力 P 的相互关系。解除滑动支座的约束力,未知力用 X_1 代替,在水平方向施加水平力 P ,可得

$$\Delta_{2p} = \int \frac{\overline{M}_2 M_p}{EI} dx = \frac{Ph^3}{3E_2I_2} - \frac{h^2 X_1 a}{2E_2I_2} \quad (5)$$

将式(4)代入式(5)可得

$$\Delta_{2p} = \frac{Ph^3}{E_2I_2} \left(\frac{1}{3} - \frac{3E_1I_1ha}{2a(E_2I_2a + 3E_1I_1h)} \right) \quad (6)$$

令水平方向 $\Delta_{2p} = \Delta x$, 即

$$\Delta_{2p} = \frac{Ph^3}{E_2I_2} \left(\frac{1}{3} - \frac{3E_1I_1ha}{2a(E_2I_2a + 3E_1I_1h)} \right) = \Delta x$$

可得

$$P = \frac{\Delta x E_2 I_2}{h^3 \left[\frac{1}{3} - \frac{3E_1 I_1 h}{2(E_2 I_2 a + 3E_1 I_1 h)} \right]} \quad (7)$$

若定义 K 为墩的抗推刚度,则

$$K = \frac{P}{\Delta x} = \frac{E_2 I_2}{h^3 \left[\frac{1}{3} - \frac{3E_1 I_1 h}{2(E_2 I_2 a + 3E_1 I_1 h)} \right]} = \frac{6E_2 I_2 (E_2 I_2 a + 3E_1 I_1 h)}{h^3 (2E_2 I_2 a - 3E_1 I_1 h)} \quad (8)$$

2 工程实例计算

某桥主桥为三跨高墩大跨预应力混凝土变截面连续刚构桥(72 m+120 m+72 m),采用挂篮悬臂施工方法,边跨和中跨合龙段长度都为 2.0 m,全桥共设 3 个合龙段,即 2 个边跨合龙段和 1 个中跨合龙段,施工方案为先边跨后中跨,6°墩墩

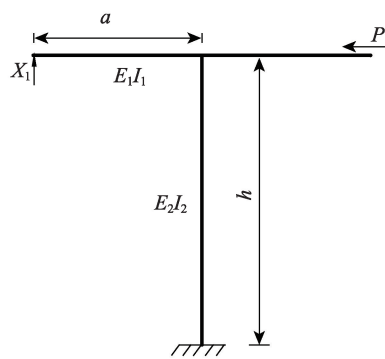


图2 基本体系

Fig. 2 Primary structure

高为 89 m,7°墩墩高为 92 m,边跨跨径为 72 m,主梁弹模、截面惯性矩分别为 3.55×10^4 MPa 和 4.76×10^{13} mm⁴,桥墩弹模、截面惯性矩分别为 3.25×10^4 MPa 和 1.247×10^{14} mm⁴。全桥结构划分为 107 单元,110 个节点,其中上部结构有 74 个单元,桥墩有 33 个单元,墩顶节点和对应的箱梁节点采用刚性连接,全桥共划分 22 个施工阶段,有限元模型如图 3 所示。

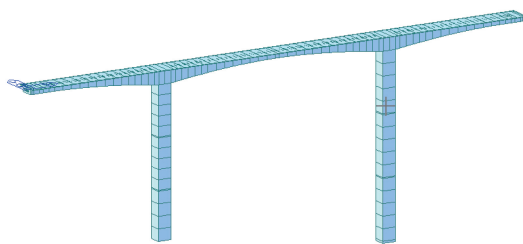


图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2.1 顶推位移计算

主桥设计合龙温度为 $(15 \pm 3)^\circ\text{C}$,按照实际施工进度,主桥的合龙时间为 11 月中旬,根据当地最近几年的气象资料,合龙期间的气温可能高于设计合龙温度,主桥实际合龙温度控制在设计合龙温度内比较困难,因此必须考虑合龙温差的影响。因此,为了确定合龙时施加于主梁的水平顶推力,应考虑如下 3 种工况的影响:

- 工况 1 假定合龙温差 5°C ,并考虑 5 年的收缩徐变;
- 工况 2 假定合龙温差 10°C ,并考虑 5 年的收缩徐变;
- 工况 3 假定合龙温差 15°C ,并考虑 5 年的收缩徐变。

1) 收缩徐变引起的墩顶位移

主桥考虑 5 年收缩徐变,采用有限元法计算各墩顶水平位移,如表 1 所示。

2) 不同温差引起的墩顶位移

分别按合龙温差 5、10、 15°C ,计算由合龙温差引起的墩顶水平位移,计算结果如表 2 所示,变化趋势如图 4 所示。合龙温差与墩顶位移之间的关系基本呈现线性变化,且为正相

表1 收缩徐变引起的墩顶水平位移

Table 1 Horizontal displacement of the pier top caused by shrinkage and creep

收缩徐变	6#墩顶位移/mm	7#墩顶位移/mm
成桥	-0.05	-2.4
5年收缩徐变	7.6	-14.0
收缩徐变	7.65	-11.6

注:向小桩号偏移为负,向大桩号偏移为正,下表同。

表2 合龙温差引起的墩顶水平位移

Table 2 Horizontal displacement of the pier top caused by closure temperature difference

温差/℃	6#墩顶位移/mm	7#墩顶位移/mm
5	2.3	-3.1
10	4.6	-6.3
15	6.7	-9.4

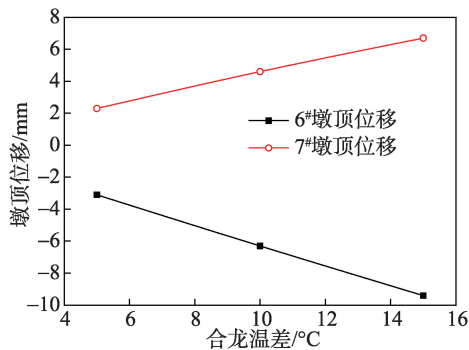


图4 墩顶位移随合龙温度的变化

Fig. 4 Relationship between pier top displacement and temperature difference

关,合龙温差增加时各墩顶的水平位移随之增加。

3) 不同工况下的墩顶位移

主墩(6#墩和7#墩)在温差和混凝土收缩徐变作用下,经过一段时间运营后,墩顶会产生水平偏位。高墩在水平方向的柔度较大,对主梁因温度或收缩徐变引起的轴向变形约束能力较差,可以认为主墩的水平偏位量 Δx 与主梁的轴向变形量 Δl 相等^[14],即 $\Delta x = \Delta l$ 。 Δx 由温度和收缩徐变作用引起,因此

$$\Delta x = \Delta l = \Delta x_1 + \Delta x_2 \quad (9)$$

式中, Δx_1 为温差引起的轴向变形, Δx_2 为收缩徐变引起的轴向变形。

主墩偏位计算结果如表3所示。按消除墩顶水平位移法计算合龙顶推力的原则,表3所示的墩顶偏位即为实际的中跨合龙段顶推位移。

表3 不同工况下的墩顶水平位移

Table 3 Horizontal displacement of pier top under different conditions

工况	6#墩顶位移/mm	7#墩顶位移/mm	跨中相对位移/mm
温差5℃+5年收缩徐变	10.0	-14.7	24.7
温差10℃+5年收缩徐变	12.2	-17.9	30.1
温差15℃+5年收缩徐变	14.3	-21.0	35.3

2.2 顶推力计算

按各墩墩顶的顶推位移与合龙温差、收缩徐变产生的墩顶水平位移相抵消的原则,通过有限元法计算3种工况下的顶推力,结果如表4所示。

表4 不同工况下的顶推力计算结果

Table 4 Calculated values of jacking force under different conditions

工况	顶推力 P_1 /kN	顶推力 P_2 /kN
温差5℃+5年收缩徐变	1898	1951
温差10℃+5年收缩徐变	1958	2000
温差15℃+5年收缩徐变	2025	2050

由表3、表4分析可知,顶推位移与顶推力是不对称的,但实际顶推时为了施工操作过程的同步性和对称性,需要对顶推力进行对称化处理(即2个顶推力取均值),实际工程顶推时以顶推位移控制为主,顶推力为辅,用顶推力校核顶推位移,将顶推位移作为顶推施工的控制参数。在上述3种工况下顶推力的变化如图5所示,6#墩的顶推力 P_1 和7#墩的顶推力 P_2 随着工况逐渐增大,基本呈现线性变化,类似于墩顶位移与合龙温差之间的变化趋势。

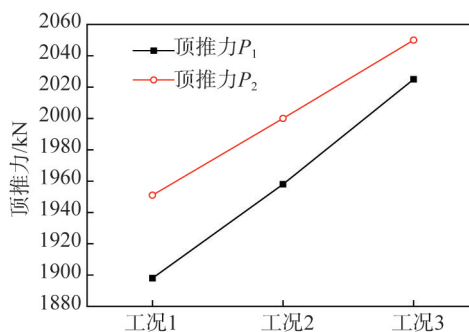


图5 各工况下顶推力变化比较

Fig. 5 Comparison of jacking force closure under different conditions

计算假设合龙温差和收缩徐变引起的结构变形在线弹性范围以内,对顶推力 P_1 、 P_2 在3种工况下的分布进行拟合,得到顶推力与合龙温差的关系为

$$P_1 = 1833 + 12.7\Delta t \quad (10)$$

$$P_2 = 1901 + 9.9\Delta t \quad (11)$$

式中, Δt 为合龙时实测的现场温度与设计合龙温度的差值。

根据预埋温度传感器测得的实测温度与设计合龙温度计算合龙温差, 将合龙温差代入式(10)和式(11)即可求得实际的顶推力。利用式(10)和式(11)可以方便地应对合龙时温差变化的情形, 有利于工程施工。

2.3 实测验证

对该工程进行了实地监测, 在合龙当天对埋设于主梁内的温度场测点进行温度测量, 并对所有测点的测量温度求平均值, 设计合龙温度比实测合龙温度高 3℃ 左右; 按式(10)计算 6#墩的顶推力为 1870 kN, 按式(11)计算 7#墩顶推力为 1930 kN, 在实际加载时为确保安全取顶推力为 1800 kN, 并按照 0→30%→60%→80%→100% 的顺序逐级加载, 测量 6#墩、7#墩在各级载荷下的墩顶位移, 并与解析法、有限元法的

计算值进行比较, 如表 5、图 6 和图 7 所示。

从表 5 分析可以看出, 解析法计算值、有限元法计算值和实测值三者较吻合。在刚开始顶推时, 有限元法计算值偏大于实测值, 这主要是由于力在混凝土结构中传递时有滞后现象, 当顶推力逐渐增大时, 有限元法计算值与实测值越来越接近。由图 6 可知, 当顶推力为 0~800 kN 时, 有限元法计算值与解析法计算值相当接近; 当顶推力大于 1200 kN 时, 逐渐消除力传递滞后现象后, 实测值与有限元法计算值越来越接近, 6#墩的有限元法计算值与实测值之间偏差为 2%, 解析法计算值与实测值之间的最大偏差为 11%, 表明实测值存在一定的误差, 而解析法计算值与有限元法计算值的偏差为 9.2%。由图 7 可知, 当顶推力为 0~800 kN 时, 解析法计算值与实测值相当接近, 随着顶推力的增大, 解析法计算值小于有限元法计算值和实测值, 这是由于解析法没有考虑结构轴向变形、剪切变形对墩顶位移的影响, 会有一定的偏差, 但总体而言, 解析法计算结果较可靠, 能满足工程精度的要求。

表 5 墩顶位移实测值与计算值比较

Table 5 Comparison between measured values and calculated values of displacement of pier top

顶推力/kN	6#墩顶位移/mm			7#墩顶位移/mm		
	有限元计算值	解析法计算值	实测值	有限元计算值	解析法计算值	实测值
0	0	0	0.2	0	0	-0.1
540	-3.0	-3.0	-2.0	4.4	3.2	3.3
1080	-5.9	-5.4	-5.3	8.7	5.8	7.6
1440	-7.8	-7.4	-7.7	11.6	7.9	10.2
1800	-9.8	-8.9	-10.0	14.5	9.5	12.5

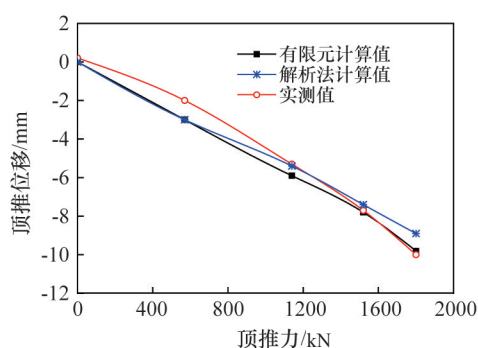


图 6 6#墩墩顶位移

Fig. 6 Displacement of 6# pier top

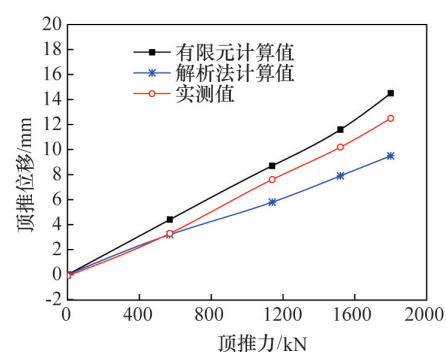


图 7 7#墩墩顶位移

Fig. 7 Displacement of 7# pier top

合龙顶推时墩顶高程的变化如表 6、图 8 和图 9 所示, 可以看出有限元计算值与实测值较接近, 随着顶推力增大, 有限元计算值与实测值越来越接近, 当顶推力达到 1800 kN 时,

6#墩高程有限元计算值与实测值偏差为 2%, 而 7#墩高程有限元计算值与实测值偏差为 5%, 计算精度较高。

表6 墩顶高程的变化

Table 6 Change of elevation of pier top

顶推力/kN	6#墩顶高程/mm		7#墩顶高程/mm	
	有限元计算值	实测值	有限元计算值	实测值
0	0	-0.1	0	-0.1
540	1.5	1.1	1.7	1.2
1080	3.0	2.7	3.4	3.1
1440	4.1	4.0	4.6	4.4
1800	5.1	5.0	5.8	5.5

注:高程变大为正值,变小为负值。

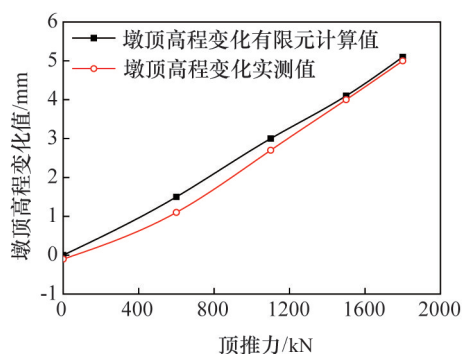


图8 6#墩墩顶高程变化

Fig.8 Change of elevation of 6# pier top

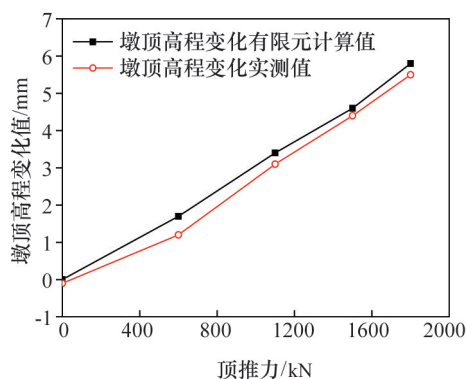


图9 7#墩墩顶高程变化

Fig. 9 Change of elevation of 7# pier top

3 结论

根据力法原理提出的顶推力解析计算方法,适用于先边跨后中跨合龙的单柱式高墩大跨连续刚构桥。解析法计算结果与有限元软件计算结果和实测结果基本一致,且三者之间的误差很小,证明解析法的精度较高,能满足工程实际要求。

对于本研究计算实例的某三跨高墩大跨预应力混凝土

变截面连续刚构桥,在先边跨后中跨的合龙顺序下,确定该桥的两墩相对顶推位移为24.3 mm,顶推力为1800 kN,在施工中以顶推位移控制为主、顶推力控制为辅的原则,达到顶推的理想效果。

参考文献(References)

- [1] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Xiang Haifan. Structural theory of higher bridge[M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [2] 刘昌国, 殷灿彬. 连续刚构桥高温合龙顶推力的分析与试验研究[J]. 公路工程, 2009,34(5): 83-86.
Liu Changguo, Yin Canbin. Analysis and experiment on jacking force with high temperature closure for continuous rigid frame bridge[J]. Highway Engineering, 2009, 34(5): 83-86.
- [3] 许明雷, 罗力军. 排调河一号特大桥中跨合龙顶推控制[J]. 桥梁建设, 2011,79(4): 79-82.
Xu Minglei, Luo Lijun. Control of pushing for closure of central span of Paidiao River bridge No.1[J]. Bridge Construction, 2011, 79(4): 79-82.
- [4] 蒋国云. 大跨连续刚构桥中跨顶推合龙施工技术[J]. 施工技术, 2012, 41(3): 38-40.
Jiang Guoyun. Jacking construction technology of middle span closure of long span continuous rigid frame bridge[J]. Construction Technology, 2012, 41(3): 38-40.
- [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(7): 209-211.
Chen Hongbin, Chen Qun, Wang Fei, et al. Jacking effect analysis and scheme design of long span continuous rigid frame bridge[J]. Highway, 2009, 7(7): 209-211.
- [6] 张刚刚, 吴重男. 连续刚构桥合龙段顶推力设计探讨[J]. 中外公路, 2011, 31(5): 119-123.
Zhang Ganggang, Wu Zhongnan. Discussion on the design of jacking force of closure of continuous rigid frame bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(5): 119-123.
- [7] 马卫华, 孙全胜. 连续刚构桥非高温顶推合龙试验分析[J]. 低温建筑技术, 2011, 33(4): 83-85.
Ma Weihua, Sun Quansheng. Jacking test analysis with non high temperature continuous rigid frame bridge[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2011, 33(4): 83-85.
- [8] 陈荣刚. 六跨连续刚构组合梁桥合龙方案研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(7): 91-96.
Chen Ronggang. Study on closure scheme of six-span continuous rigid frame composite girder bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(7): 91-96.
- [9] 杨庆国, 唐瑞. 非常规合龙顺序对连续刚构桥影响分析[J]. 公路工程, 2015, 40(1): 133-136.
Yang Qingguo, Tang Rui. The influence study of unconventional closure method on continuous rigid frame bridge[J]. Highway Engineering, 2015, 40(1): 133-136.
- [10] 邹毅松, 单荣相. 连续刚构桥合龙顶推力的确定[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(2): 12-15.
Zou Yisong, Shan Rongxiang. The confirmation closure jacking force of continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2006, 25(2): 12-15.
- [11] Soyluk K. Comparison of random vibration methods for multi-support seismic excitation analysis of long-span bridges[J]. Engineering

- Structures, 2004, 26 (11): 1573–1583.
- [12] Nuti C, Vanzi I. Influence of earthquake spatial variability on differential soil displacements and SDF system response[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34(11): 1353–1374.
- [13] 李廉锴. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- Li Liankun. Structural mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989.
- [14] 雒帅. 高墩大跨PC连续刚构桥合龙顶推控制[D]. 长安大学, 2012.
- Luo Shuai. Jacking Control of closing the PC continuous rigid bridge with high-piers and large-spans[D]. Chang'an University, 2012.
- [15] 闫晓宇, 李忠献, 韩强, 等. 多点激励下大跨度连续刚构桥地震响应振动台阵试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(7): 81–89.
- Yan Xiaoyu, Li Zhongxian, Han Qiang, et al. Shaking tables test study on seismic responses of a long-span rigid-framed bridge under multi-support excitations[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7): 81–89.
- [16] Sivakumaran K S. Analysis of concrete structure subjected to sustained temperature gradients[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1984, 1 (3): 404–410.

An analytical method for jacking force of middle span closure for high pier and long-span continuous rigid frame bridge

YANG Guojun¹, HAO Xianwu¹, DUAN Ruifang², LI Ziqing¹

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China

Abstract In order to determine the jacking force of middle span closure for the high-pier and long-span continuous rigid frame bridge reasonably, an analytical method for jacking force of continuous rigid frame bridge with single pier under closure sequences is developed based on the force method. Taking the construction work of a three span continuous rigid frame bridge as an example, the jacking force and displacement of the middle span closure are calculated by the analytical method, then numerical simulation method is applied to establish the finite element model. The jacking force and displacement are calculated and compared with the principle of eliminating the horizontal displacement of pier top caused by the five-year shrinkage and creep of concrete and closure temperature difference. Monitoring records in practical engineering have shown that the calculating results by the proposed analytical method are basically the same as those by the finite element method (FEM) and the real measurements, and that the error between calculating results by the analytical method and FEM is less than 10%, which indicates that the analytical method has a relatively high calculation accuracy and can meet the requirement of practical engineering.

Keywords high-pier and long-span continuous rigid frame bridge; jacking force; closure temperature difference; shrinkage and creep; horizontal displacement of the pier top

(责任编辑 韩星明)