

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.05.011

# 大跨长联 PC 连续梁桥支座预偏量分析

张军锋<sup>1</sup>, 李廷垚<sup>2</sup>, 裴昊<sup>1</sup>, 李杰<sup>1</sup>, 祝闯<sup>2</sup>

(1. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南濮泽高速公路有限公司, 河南 郑州 450016)

**摘要:** 为探究大跨长联 PC 连续梁桥施工时滑动支座预偏量的影响因素及设置原则, 以一座代表性工程为例, 结合施工过程的有限元计算, 分析合龙束预应力张拉、混凝土收缩徐变及温度作用对支座偏移量的影响, 并给出全桥合龙过程中预应力和温度变化引起的支座偏移量计算公式。研究结果表明: 从边跨向中跨顺序合龙时, 合龙束预应力和徐变效应是引起支座偏移的主要因素, 均可占到支座偏移量的 30%~50%, 收缩效应约占 20%, 这三者对各墩的支座偏移均表现为外侧桥墩大而内侧小, 且均向桥梁中心偏移; 合龙顺序对预应力效应引起的支座偏移影响较大而对收缩和徐变效应没有影响, 先部分小合龙再整体大合龙的方案可有效降低预应力效应引起的支座偏移; 相比其他因素, 温度效应引起的支座偏移一般较小, 且受合龙温度变化和合龙顺序的影响, 其对各墩的影响规律较为复杂; 考虑支座预偏时, 应考虑其全部预应力效应; 对于收缩和徐变效应, 可统一取 5 年的发展时间; 对于温度效应, 则需根据施工进度安排进行预估。

**关键词:** 大跨长联连续梁桥; 支座预偏量; 合龙束预应力张拉; 混凝土收缩; 混凝土徐变; 温度作用

中图分类号: TU973

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2025)05-0074-08

## Analysis of Pre-deflection of Bearing of Long-span and Long Connected PC Girder Bridges

ZHANG Junfeng<sup>1</sup>, LI Tingyao<sup>2</sup>, PEI Hao<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, ZHU Chuang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Henan Puze Expressway Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450016, China)

**Abstract:** In order to explore the influencing factors and setting principles of the pre-displacement of the sliding bearing in the construction of long-span and long unit PC continuous girder bridges, theoretical analysis and finite element calculation considering the construction process on a representative project were presented. The influences of prestress tension of closure bundle, concrete shrinkage and creep and the temperature action on the bearing displacement were analyzed, the calculation formulas of the bearing displacement caused by the prestress tension and temperature variation in the closure process of the whole bridge were proposed, the main factors affecting the pre-displacement of the bearing were discussed, and the influence of the closure sequence on the pre-displacement was also studied. It was found that when closing from the side span to the middle span, the prestress tension of the closure bundle and creep are the main factors for the longitude displacement of the bearing, both of which can account for 30%~50% of the bearing displacement, and the shrinkage accounts for about 20%. All three factors make each bearing shift towards the center of the bridge, and the displacement of the outside pier bearing is larger than that of the inner pier bearing. The closure sequence exhibits greater effects on the bearing displacement caused by the prestress tension, while it has no influence

收稿日期: 2025-05-06

修稿日期: 2025-06-03

基金项目: 河南省交通运输厅科技项目(2021J2); 河南省科技厅科技攻关项目(192102310484)

作者简介: 张军锋(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事结构和桥梁抗风等方面工作。E-mail: brilliantshine@163.com

通讯作者: 李廷垚(1992—), 男, 助理工程师, 主要从事高速公路建设管理等方面工作。E-mail: 634816893@qq.com

on the displacement caused by shrinkage and creep, and the scheme of partial small closure and then the whole large closure can effectively reduce the bearing displacement caused by the prestress tension. Compared with other factors, the bearing displacement caused by temperature was generally small, and the closure temperature variation and closure sequence made the influence law of temperature on each pier more complicated. All the prestress tensions should be considered when considering bearing pre-displacement; for the shrinkage and creep, the development time of 5 years can be taken uniformly; for the temperature, the pre-displacement value of the bearing should be estimated according to the construction schedule.

**Keywords:** long-span and long unit continuous girder bridge; pre-displacement of bearing; prestress tension of the closure bundle; concrete shrinkage; concrete creep; temperature action

大跨长联 PC 连续梁桥在悬臂浇筑施工过程中需要进行多次合龙施工、合龙束预应力张拉和体系转换,且施工和运营阶段始终受混凝土收缩徐变及温度作用,主梁会产生较大的顺桥向伸缩变形,致使各墩的滑动支座上垫板随主梁产生较大的顺桥向偏移。因此,在支座安装时需预设一定的反向偏移量,以抵消各跨合龙过程中以及成桥后因梁体顺桥向变形和移动所引起的支座偏移,避免支座在成桥运营阶段长期处于明显的偏心受力状态,从而在成桥运营期的平均温度下,支座上下垫板中心线近乎重合,以保证支座在运营期的正常工作。

随着大跨长联 PC 连续梁桥的增多以及施工控制要求的提升,支座偏移问题也得到了一定的关注。华惠敏<sup>[1]</sup>较早给出了某 18 跨一联连续箱梁桥因混凝土收缩徐变和施工过程中温度变化引起的支座预偏量,但缺乏具体计算过程;肖星星<sup>[2]</sup>以某 14 跨一联连续箱梁桥为例,对施工过程中因温度变化引起的支座偏移量进行了较为系统的理论分析,但公式计算较为复杂;杨秀荣等<sup>[3]</sup>的研究采用各跨一次性合龙的方案,虽简化了温度效应分析过程,但一次性合龙方案的适用性较差;龚忠辉等<sup>[4]</sup>还关注了连续梁拱组合桥梁的支座预偏量,但上述文献均未考虑施工阶段合龙束预应力张拉对支座偏移的影响。文献[5-7]虽计入了合龙束预应力张拉的作用,并讨论了收缩徐变、预应力张拉及温度作用对支座产生偏移的对比,认为收缩徐变是引起支座偏移的主要因素,但所得结果主要来自有限元计算,对施工过程中支座偏移量的温度效应既未给出具体有限元计算过程,也缺乏理论分析和实用计算公式。在确定支座预偏量时,不同文献对收缩徐变效应的发展时间取值也有较大差异:文献[3,5-7]建议取 10 年,文献[2]和文献[4]则分别取 3 年和终值。文献[2,8]对降低施工过程中的支座位移给出了施工措施建

议,如对合龙顺序、临时固结解除时机以及整体施工时间等进行调整,但缺乏系统的对比分析。

另外,文献[9-13]还关注了成桥状态下整体和截面温度作用下桥梁的支座位移;文献[7,13-17]研究了摩擦摆支座的摩擦系数、摩擦摆支座的减隔震效果以及设置摩擦摆支座的结构响应与支座滑动位移等。文献[8]还针对设置支座预偏量时不可避免存在的偏差,分析了支座偏移对下部结构设计的影响。

从前述可知,大多既有文献仅采用有限元软件对支座偏移进行计算分析,对影响支座偏移量的各因素缺乏详细的论述分析及对比,尤其缺乏合龙顺序对支座偏移量的影响,这也使得同样的千米级桥梁同时考虑上述三种影响因素时,不同合龙顺序下的最大支座偏移量分别为 214.9 mm<sup>[5]</sup>和 78.9 mm<sup>[6]</sup>,差别显著。因此,本文以跨越黄河的一座大跨长联 PC 连续梁桥为依托,结合理论分析和考虑施工过程的有限元计算,研究合龙束预应力张拉、混凝土收缩徐变及温度作用下的支座偏移量并明确了主要影响因素,并考虑合龙顺序对预偏量的影响,为类似工程的支座预偏量设置提供参考。

## 1 工程概况

该项目为跨径布置 80 m + 8 × 120 m + 80 m = 1120 m 的 PC 变截面连续箱梁桥(图 1),梁高采用 1.8 次抛物线变化,上下行分离,单幅桥宽 16.56 m,中墩墩顶和跨中梁高分别为 7.5 m 和 3.5 m,采用悬臂浇筑施工,原设计为从两边跨到中跨的合龙方案(表 1)。采用摩擦摆减隔震支座,每个桥墩设左右两个支座,中墩设顺桥向固定支座,其他桥墩设顺桥向滑动支座。桥墩采用箱型空心薄壁墩,平面尺寸为 8.5 m × 4.0 m,各个桥墩的高度分布在 17 m ~ 25 m 之间。



图 1 有限元模型及墩跨编号

表 1 不同合龙方案的合龙顺序

合龙方案	合龙批次及跨号					
	I	II	III	IV	V	VI
原设计	1、10	2、9	3、8	4、7	5	6
4“Π”构	2、4、7、9	1、10	3、8	5	6	—
5“Π”构	1、3、5、8、10	6	2、9	4	7	—
实际	1→2→3	10	4	9	5	8→7→6

## 2 支座偏移因素及预偏设置

### 2.1 支座偏移因素

引起 PC 连续梁桥支座偏移的因素包括三种,即合龙束预应力张拉、混凝土收缩徐变及温度作用。支座偏移的发生则从第一个合龙段开始浇筑至整个成桥服役期,故又可分为施工阶段和成桥阶段。需要说明,施工阶段中的 T 构悬臂施工过程,虽会因混凝土收缩徐变、预应力张拉及温度作用等因素使主梁产生较大的顺桥向伸缩变形,但此时支座临时固结且各 T 构仍为静定结构,对支座并无影响,且既有伸缩量可通过后续悬浇节段的长度进行补偿。

从第一个合龙段开始浇筑至全桥合龙,随着墩梁临时固结的解除,上述各因素会使各墩的滑动支

座上垫板随主梁产生顺桥向偏移。显然,合龙束预应力张拉引起的偏移在全桥合龙且合龙束张拉完成后即全部完成。全桥合龙后,受混凝土收缩徐变作用和年均温度变化,支座偏移在成桥之后仍会继续发生,即成桥阶段的偏移仅受后两种因素的影响。

### 2.2 支座预偏设置

为确保成桥运营期支座上下垫板中心线尽量重合,应以当地年均温度和一定年限的收缩和徐变作用为目标,确定各支座从第一跨合龙开始到成桥至年均温度下的偏移量  $D$ ,并在支座安装时预设相应的反向偏移量  $D$ ,也即支座预偏量(见图 2)。合龙束预应力张拉、混凝土收缩徐变及温度作用引起的偏移量分别简称为  $D_P$ 、 $D_{SC}$  和  $D_T$ ,则总偏移量  $D = D_P + D_{SC} + D_T$ 。

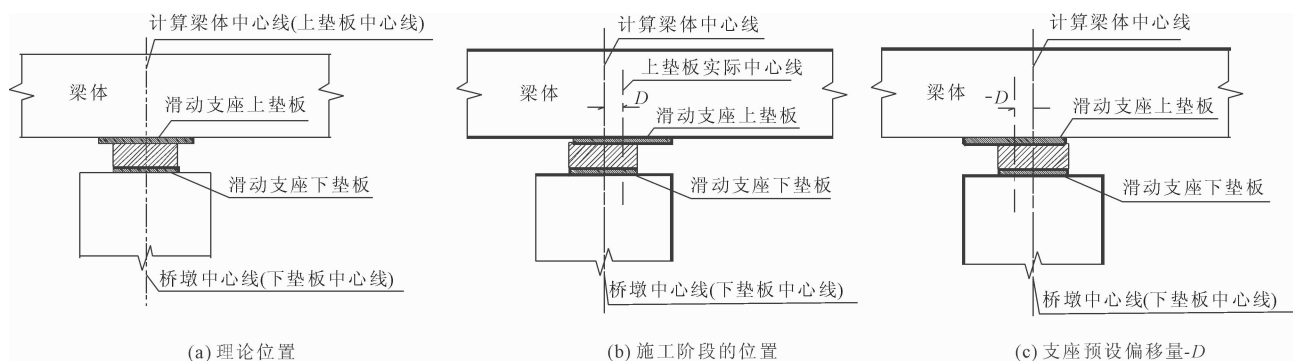


图 2 摩擦摆支座预偏示意图

### 2.3 有限元模型

采用 MIDAS Civil 建立考虑施工过程的有限元模型(见图 1),模型中不包含桩基,全桥共划分 1 910 个单元,2 054 个节点,并根据支座型号确定模型中墩顶与主梁节点间弹性连接的刚度,详见文献[18]。

本文分别对各因素引起的支座偏移量进行理论

分析并结合 MIDAS Civil 进行计算。需要说明,实际合龙顺序与设计并不完全一致(表 1),但依然遵循从两边跨向中跨的原则。计算表明,实际合龙顺序对于合龙束预应力效应和收缩徐变效应引起的支座预偏几乎没有影响,故本文对这两种因素引起的支座偏移仍以设计方案进行说明。对于温度作用,因涉及实际合龙温度,故以实际合龙顺序进行说

明。另外,提出两种先“Π”形小合龙再大合龙的形式,分别称为4“Π”构和5“Π”构合龙,进一步讨论合龙顺序对偏移量的影响。

在计算中设定以小里程向大里程方向的支座偏移量为正,反之为负。且由于中墩(83#墩)为固定墩,各因素作用下其支座偏移均近乎为0,下文不再赘述。

### 3 支座偏移量分析

#### 3.1 合龙束预应力张拉引起的偏移量 $D_p$

合龙束张拉时,合龙跨往往是一侧的墩梁临时固结尚未解除而使支座仍处于锁定状态,另一侧则已解除临时固结而使支座处于自由滑动状态,合龙束张拉和跨中梁体的压缩变形使该支座产生顺桥向偏移,且易得该支座偏移量  $D_p$  为:

$$D_p = \sum_j \sum_i \frac{N_{Pi,j} L_{Pi,j}}{E_{B,j} A_{PBi,j}} \quad (1)$$

式中: $N_{Pi,j}$ 表示第*j*跨第*i*种长度合龙束的合力,且已扣除张拉瞬时损失; $L_{Pi,j}$ 和 $A_{PBi,j}$ 表示第*j*跨第*i*种合龙束对应的主梁长度和净截面面积; $E_{B,j}$ 表示主梁各节段施工过程中的混凝土弹性模量,因在合龙束张拉时,各节段已充分养护,故可统一取主梁混凝土弹模。

需要特别指出,多跨桥梁由于需要进行多次合龙,所有后续各跨合龙束张拉对已处于自由滑动状态的支座均会引起偏移,故需累计,且应根据合龙口和支座的左右相对位置注意其偏移方向,这在文献[5-7]并未说明。

尽管计算原理简单,但涉及合龙束的预应力损失、合龙束范围内主梁截面变化以及混凝土弹模在施工过程中的发展等,难以直接使用该公式对 $D_p$ 进行准确计算,而在MIDAS Civil的施工过程分析中可以较为方便的得到 $D_p$ 值,这也是本文所列结果的来源。如对预应力损失、截面面积 $A_{Bi}$ 和弹模 $E_{Bi}$ 进行一定的近似后,使用式(1)所得结果亦与MIDAS Civil所得结果较为接近,该式仍可作为基本计算方法。

由各跨合龙束张拉引起的各墩支座总偏移如图3所示。各种合龙顺序下,固定墩左右两侧各墩支座偏移方向相反,也即均向固定墩偏移,但合龙顺序对支座偏移影响较大,两种先小合龙再大合龙方案的支座偏移相比原设计和实际从边跨到中跨的顺序合龙方案有明显下降。

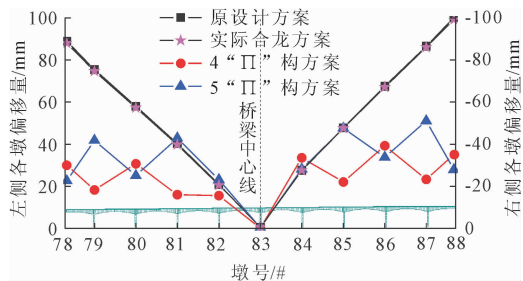


图3 各墩由合龙束预应力张拉所引起的支座顺桥向偏移量  $D_p$  (单位:mm)

原设计合龙方案下,随着距固定墩距离增加,各墩的支座偏移量也随之增加,且近似成线形增加,并在左右边墩达到最大,分别约为90 mm和100 mm。这除了结构的近似对称性以外,主要是由于采用先边跨后中跨的近似对称合龙顺序,各合龙口长度在整个合龙过程中始终不变,只是已合龙梁体不断受合龙束的压缩作用整体向固定墩平移,最终致使梁体两端发生较大的内侧平移。由此可知,合龙束张拉引起的支座偏移根源在于其所导致的跨中区段梁体压缩。但由于主梁设有纵坡且各墩墩高不同,并且由于桥梁中部两跨(第5和第6跨)采取先后合龙而非同时合龙(图1),因此左右两侧桥墩的支座偏移幅值并非完全对称。

而在两种先小合龙再大合龙方案中,“Π”构先合龙部分中跨,合龙束范围内的梁体压缩会使相邻外侧合龙口的间距即后续合龙段长度有所增加,后续合龙段浇筑时可补偿一定的梁体压缩,故最终的支座偏移量大幅下降,仅为原合龙顺序的一半。另外,各批“Π”构的先后合龙也会使支座发生反向偏移,故相邻支座的偏移量会有一定波动。

#### 3.2 混凝土收缩和徐变引起的偏移量 $D_{sc}$

混凝土的收缩和徐变是混凝土材料本身固有的特性,尽管我国规范<sup>[19]</sup>有收缩应变和徐变系数计算公式,但对实际工程因涉及截面尺寸、理论厚度以及截面轴力随跨径的变化,难以通过公式进行计算,同样可在Midas Civil的施工过程分析中计算,且可区分收缩和徐变分别给出各自在目标年限的偏移量 $D_s$ 和 $D_c$ ,且有 $D_{sc} = D_s + D_c$ 。

原合龙方案中,因结构和施工的对称性,在收缩和徐变作用下,桥梁左右沿固定墩对称位置上的各桥墩支座偏移量同样非常接近,因此图4仅给出了左侧各墩(78#—82#)的 $D_s$ 和 $D_c$ :越靠近边墩,偏移就越大,最外侧墩(78#)的 $D_s$ 和 $D_c$ 分别达到170 mm和130 mm,这同样是因为主梁自然收缩以及受

压徐变的叠加效应造成的。为便于对比,图 5 依规范<sup>[19]</sup>给出了中跨主梁 1/4 截面在年均湿度 55% 时的收缩应变  $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$  和徐变系数  $\varphi(t, t_0)$  发展曲线。容易发现,随着时间推移,其各墩支座偏移量  $D_s$  和  $D_c$  的发展趋势均分别与  $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$  和  $\varphi(t, t_0)$  基本相同,说明计算结果合理。我国规范虽给出了收缩徐变发展表达式,但未明确指出支座预偏需要考虑的发展年限,而根据欧洲规范 CEB-FIP<sup>[20]</sup>,对桥梁的收缩徐变效应持续时长可以选择 10~30 年,因此,本文以 30 年为这两者效应的发展终值。

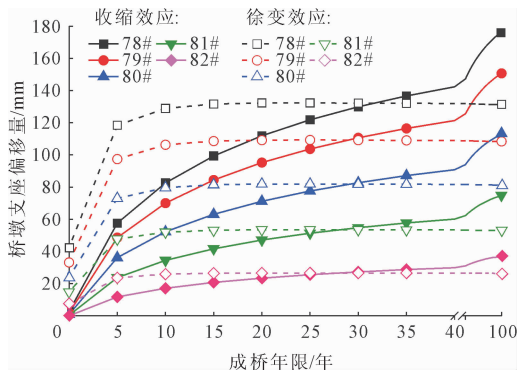


图 4 收缩和徐变引起的各墩支座偏移(单位:mm)

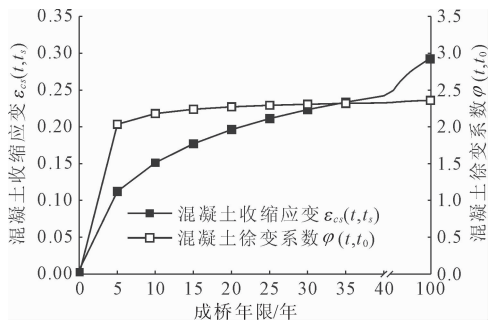


图 5 收缩应变  $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$  和徐变系数  $\varphi(t, t_0)$  发展曲线

从图 4 和图 5 可知,受施工进度的影响,各墩收缩和徐变效应引起的支座偏移有较大差异,但发展规律基本一致。另外,尽管收缩和徐变均为时间效应,且在施工过程中就均已发生,但各自随时间的表现有较大差异。

徐变效应与受力有关,施工过程中就因自重和预应力的存在而持续增加,但其主要表现在前期。原合龙方案中,从初次合龙至全桥合龙完成历时约 2 个月,全桥合龙时各墩因徐变引起的支座偏移已经占徐变终值的约 30%,前 5 年的徐变量即可达到终值的约 89%,后期增长极为缓慢,且在 15 年后近乎稳定。

收缩的时间效应更为显著。在全桥合龙完成

时,收缩引起的各墩支座偏移基本为 0;但随着时间的增长,其引起的各墩支座偏移在 5 年和 10 年时可分别达到收缩效应 30 年偏移量的约 44% 和 63%。之后收缩效应虽持续增长,但较为缓慢,100 年时的偏移量也仅为 30 年的 136%。

确定支座预偏量时,需要考虑收缩和徐变各自发展一半时对应的年限,以使支座的上下垫板中心线在整个服役期内尽量重合。但因收缩和徐变的时间效应发展不同,这将分别对应两个不同的时间,不便应用。从计算可知,对两者可统一取 5 年的发展时间,此时徐变效应发展略超过 50%,收缩效应略低于 50%,但两者综合恰接近 30 年甚至 100 年收缩徐变效应的 50%。如此设定支座预偏,在不考虑其他两个因素的情况下,成桥 5 年时,支座上垫板即可基本恢复至支座中心线位置处。

另外,由于收缩效应与结构受力无关,仅与混凝土龄期有关,而两种新的合龙方案与原方案相比也只有合龙段龄期略有差异,故所得收缩效应与原方案近乎一致。徐变效应因与受力有关,两种新的合龙方案所得徐变效应与原方案相比在各墩互有增减,且外侧墩略有减小,内侧墩略有增加,但变化总体在 15% 以内(见图 6),即合龙方案对收缩和徐变效应导致的支座偏移影响不大。

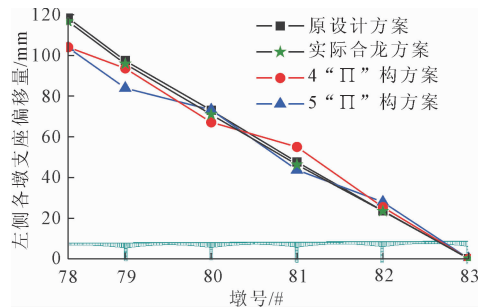


图 6 三种合龙方案 5 年徐变引起的支座偏移  $D_c$

### 3.3 温度作用引起的偏移量 $D_T$

成桥状态下,气温的季节变化本身会引起主梁的伸缩和支座的滑动,故在确定支座预偏时,应以当地年均气温作为成桥后的目标温度,以保证在气温随季节变化时,支座可在中心两侧左右对称滑动。同时,施工过程中环境温度也是不断变化的,尚需考虑施工过程中温度变化的影响。分析易知,在既定的合龙方案下,决定支座偏移的仅是各跨合龙时的温度以及成桥后的目标温度。显然,如果各跨合龙温度均为当地年平均气温,则温度作用对支座偏移量的影响为 0。由此可将温度作用引起的某支座偏

移量  $D_T$  分为全桥合龙前和全桥合龙后两部分:前者是由全桥合龙过程中各跨合龙温度不一致所引起的,而后者是全桥合龙完成后由全桥整体升降温引起的,并可表示为:

$$D_T = \sum_i \alpha \Delta_{Ti} L_{Ti} + \alpha \Delta_{TT} L_{TT} \quad (2)$$

$$\Delta_{Ti} = T_{i+1} - T_i \quad (3)$$

$$\Delta_{TT} = T_T - T_n \quad (4)$$

式中: $\alpha$  为混凝土的线膨胀系数; $T_i$  和  $T_n$  为第  $i$  次合龙和最后一跨合龙时的合龙温度; $T_T$  为当地年均气温; $\Delta_{Ti}$  为全桥合龙前的前后跨合龙温差; $\Delta_{TT}$  为最后一跨合龙后的温差; $L_{Ti}$  表示在施工过程中,该支座(已释放顺桥向约束)到临近固定端的距离; $L_{TT}$  表示全桥合龙后,该支座(已释放顺桥向约束)到临近固定端的距离。

式(2)中第一项和第二项分别表示全桥合龙前和合龙后的温度变化对于该支座偏移的影响。计算中需要注意正负温差引起的支座偏移方向的差异,以及固定墩左右两侧活动支座移动方向的差异。

该工程各跨实际合龙顺序、合龙温度  $T_i$ 、年均气温  $T_T$  以及各项温差  $\Delta_{Ti}$  和  $\Delta_{TT}$  如表2所示,同时还以78#、80#和86#墩为例,依式(4)给出整个施工过程的支座偏移计算所需  $L_{Ti}$  和  $L_{TT}$ ,表3还给出了这几个桥墩支座偏移随施工进度变化的变化,其中  $L_M$  和  $L_S$  分别为中跨和边跨的长度。

表2 各跨实际合龙温度及相关计算参数

合龙序号	跨号	$T_i, T_T$ /°C	$\Delta_{Ti}, \Delta_{TT}$ /°C	$L_n, L_{TT}$		
				78#	80#	86#
1	1	18	—	—	—	—
2	2	21	+3	$L_S$	—	—
3	3	20	-1	$L_M + L_S$	—	—
4	10	17	-3	$2L_M + L_S$	$L_M$	—
5	4	21	+4	$3L_M + L_S$	$L_M$	—
6	9	21	0	$3L_M + L_S$	$2L_M$	—
7	5	6	-15	$4L_M + L_S$	$2L_M$	—
8	8	7	+1	$4L_M + L_S$	$3L_M$	—
9	7	12	+5	$4L_M + L_S$	$3L_M$	$L_M$
10	6	11	-1	$4L_M + L_S$	$3L_M$	$2L_M$
成桥	12	+1		$4L_M + L_S$	$3L_M$	$3L_M$

从表3可知,公式与有限元所得结果非常接近,最终及过程中所得偏移量的偏差均不超过0.4 mm,这也说明了所给上述公式计算方法的合理性。温度作用下依然是对外侧桥墩的支座偏移更为明显,并且受施工过程中温度变化的影响,施工过程中的支

座偏移会比成桥后的合龙效应还更为显著。这主要是由于各跨的合龙温度本身在年平均气温上下波动,各支座偏移量在施工过程中会出现前后抵消的现象。另外,根据偏移方向的定义,右侧各墩(84#~88#)支座偏移量与相应合龙温差的变化趋势相同,而左侧各墩(78#~82#)支座偏移量变化趋势与温差趋势相反。同时,由于左侧各跨率先进行多次合龙,使得受整体升降温影响的梁段长度更大,因此左侧各墩支座受温度影响更大。但相比前两种作用,温度作用引起的偏移量要小得多,最大偏移仅为78#墩的28.8 mm。

表3 实际合龙顺序下的支座顺桥向偏移量  $D_T$  单位:mm

分析方法	施工进度	桥墩编号				
		78#	79#	87#	88#	
Civil 结果	第1跨	0.0	0.0	0.0	0.0	
	第2跨	-2.3	0.0	0.0	0.0	
	第3跨	1.9	1.1	0.0	0.0	
	第10跨	9.5	7.2	0.0	0.0	
	第4跨	-12.7	-9.6	0.0	3.1	
	第9跨	-0.1	-0.1	0.0	0.0	
	第5跨	65.7	54.0	-17.9	-29.7	
	第8跨	-5.3	-4.6	1.2	2.0	
	第7跨	-27.9	-24.0	11.8	15.7	
	第6跨	5.6	4.8	-3.7	-4.5	
	成桥	-5.6	-4.8	4.7	5.4	
	合计	28.8	24.0	-3.9	-8.0	
	公式结果合计		28.8	24.0	-3.6	-7.6
	差值		0.0	0.0	0.3	0.4

为进一步分析施工过程中温度作用的影响,按实际合龙方案并考虑极端温变情况,即从第一跨合龙开始温度持续升高或降低,以消除整个合龙过程中温度波动对支座偏移的抵消作用,由此根据式(4)所得两个边支座偏移量如表4所示。

表4 四种工况下78#、88#墩的支座偏移量  $D_T$  单位:mm

桥墩编号	工况 A (3°C~12°C)	工况 B (12°C~3°C)	工况 C (12°C~21°C)	工况 D (3°C~21°C)
78#	-34.8	-15.6	15.6	-19.2
88#	13.2	37.2	-37.2	-24.0

对比表3和表4可以看出,整个合龙过程中温度持续升高或降低时,引发的支座位移更为显著;从表4可以看出,合龙过程中的温度变化范围完全在平均气温以上或以下时(工况A—工况C),其所得支座偏移要比温度变化范围在平均气温上下时(工况D)更为显著;对比工况A和B可知,即使在同一

合龙顺序下,相反的温度变化所产生的支座位移也并非相反,这仍与合龙顺序有关。

### 3.4 综合分析

在实际合龙顺序下,分析三种因素作用下各墩支座产生的顺桥向偏移量(表 5),合龙束预应力效应约占 30%~47%,收缩效应约占 18%~24%,徐变效应约占 37%~49%(收缩和徐变均取 5 年时的结果),温度约占 -15%~10%,也即合龙束预应力和徐变效应是引起支座产生顺桥向偏移的主要因素;收缩效应为次要因素;温度为不确定因素,有可能会产生与合龙束预应力效应和收缩徐变效应相反方向的支座位移。同时,结合表 4 可知,可在保证混凝土工作性能的条件下,尽可能使合龙温度低于年平均气温,使温度作用所引起的支座位移抵消部分由合龙束预应力张拉和混凝土收缩徐变效应所产生的支

座位偏移。

需要注意的是,对于温度效应引起的支座位移,在缺乏各跨的合龙温度时是无法确定的,而支座位移量需要在支座安装时就要确定,因此不得不进行预估。鉴于其在总的支座位移量中占比不高(表 4、表 5),故可根据施工进度安排和历史气温资料预测各跨的合龙温度,从而得到预估的支座位移量。

另外,合龙束预应力、收缩和徐变以及温度作用(除个别桥墩支座)均使各墩支座上垫板产生向桥梁内侧的偏移量,三者作用的叠加更是让各墩支座位移向桥梁内侧产生了较明显的偏移。根据支座位移量与预偏量的关系,应沿支座位移量的相反方向设置支座位移量。因此,对于本桥各墩的支座,均应向桥梁外侧即桥梁两端方向设置预偏量。

表 5 各墩引起的支座总顺桥向偏移量及占比(实际合龙顺序)

墩号	支座顺桥向偏移量/mm				合计	占比/%			
	预应力引起的变形	5 年收缩	5 年徐变	温度引起的变形		预应力引起的变形	5 年收缩	5 年徐变	温度引起的变形
78#	87.9	57.7	116.7	28.8	291.1	30.2	19.8	40.1	9.9
79#	74.7	48.6	95.9	24.0	243.2	30.7	20.0	39.4	9.9
80#	57.3	36.0	71.0	13.3	177.6	32.2	20.3	40.0	7.5
81#	39.8	23.5	46.3	3.7	113.3	35.1	20.7	40.9	3.3
82#	20.5	11.5	23.5	-7.0	48.5	42.3	23.7	48.4	-14.4
83#	0.5	0.0	0.2	0.0	0.7	—	—	—	—
84#	-27.6	-10.8	-21.9	1.1	-59.2	46.6	18.2	37.0	-1.8
85#	-47.6	-22.0	-43.3	1.0	-111.9	42.5	19.7	38.7	-0.9
86#	-67.2	-33.4	-65.9	6.8	-159.7	42.1	20.9	41.3	-4.3
87#	-86.0	-45.1	-88.2	-3.9	-223.2	38.5	20.2	39.5	1.8
88#	-99.2	-53.7	-107.0	-8.0	-267.9	37.0	20.0	40.0	3.0

需要强调的是,研究中对合龙顺序仅考虑了其对各墩支座位移的影响,合理合龙顺序还需综合考虑结构受力、主梁竖向变形以及合龙口的高差等因素,详见文献[18]。

## 4 结论

以一座大跨长联 PC 连续梁桥为例,结合有限元计算,分析了全桥合龙过程中多种因素对支座位移量的影响,并给出了各活动支座预偏量设置值,讨论了影响支座位移量的主要因素并考虑了合龙顺序对预偏量的影响。主要结论如下:

(1) 在既定的从边跨向中跨的顺序合龙方案下,合龙束预应力和徐变效应是引起支座产生顺桥向偏移的主要因素,均可占到支座位移量的 30%~

50%,收缩效应为次要因素,约占 20%,且这三者对各墩支座位移的影响规律一致,均表现为外侧桥墩的支座位移大而内侧偏移小,且均向桥梁中心偏移。

(2) 相比其他因素,温度效应引起的支座位移一般较小,但受合龙温度变化和合龙顺序的影响,其对各墩的影响规律并不明确,有可能会产生其他效应相反方向的支座位移,并且全桥合龙过程中的温度变化范围完全在平均气温以上或以下时,其所得支座位移要比温度变化范围在平均气温上下时更为显著。

(3) 合龙顺序对预应力效应引起的支座位移影响较大而对收缩和徐变效应没有影响,相比从边跨到中跨的合龙顺序,先部分小合龙再整体大合龙的方案可有效降低预应力效应引起的支座位移。

(4) 在确定的合龙方案下,考虑支座预偏时,对于预应力效应,应考虑其全部效应;对于收缩和徐变效应,对两者可统一取5年的发展时间;对于温度效应,则需根据施工进度安排和历史气温资料预测各跨的合龙温度,从而得到预估的支座偏移量。

### 参考文献:

- [1] 华惠敏. 钱塘江二桥多跨长联铁路连续梁设计[J]. 桥梁建设,1992(3):1-9.
- [2] 肖星星. 年温差对多跨长联桥的影响分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2008,31(4):639-644.
- [3] 杨秀荣,李猛,姚丝思. 一次性合龙的长联多跨连续刚构桥梁支座预偏量计算分析[J]. 城市道桥与防洪,2016(3):112-113.
- [4] 龚忠辉,李小云. 拉萨河特大桥新型支座安装技术[J]. 桥梁建设,2005,35(5):46-48.
- [5] 刘世忠,杨延超,潘存尚,等. 15跨一联 PC 连续梁桥支座纵向预偏量设置研究[J]. 桥梁建设,2020,50(3):32-38.
- [6] 张欣欣,马坤全,张骏. 长联多跨客运专线连续梁桥支座预偏量的研究[J]. 城市轨道交通研究,2010,13(10):42-47.
- [7] 潘存尚. 海子湖十五跨一联 PC 连续箱梁桥悬臂施工关键技术研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2019.
- [8] 张立江. 王岗至万乐联络线松花江大桥主桥设计[J]. 桥梁建设,2006,36(2):32-35.
- [9] 程业,潘旦光,吴勇,等. 混凝土箱梁支座位移实验及有效温度计算[J]. 工程力学,2017,34(9):220-229.
- [10] 彭大文,陈朝慰,林志平,等. 混凝土 T 梁的温度-位

移测试及计算研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2007,35(2):270-275.

- [11] 邓扬,李爱群,丁幼亮. 大跨悬索桥梁端位移与温度的相关性研究及其应用[J]. 公路交通科技,2009,26(5):54-58.
- [12] 夏樟华,朱三凡,宗周红. 基于健康监测的大跨度连续刚构桥支座位移评估[C]//崔京浩. 第18届全国结构工程学术会议. 广州,2009:542-548.
- [13] 周云,危俊杰,李剑,等. 基于 InSAR 技术的大跨桥梁温度变形监测研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(3):39-50.
- [14] 欧阳柳,王少华,李冰,等. 摩擦摆支座滑动位移量选取研究[J]. 机械设计与制造,2018(5):89-92.
- [15] Palazzo B, Castaldo P, Vecchia P D. Seismic reliability analysis of base-isolated structures with friction pendulum system [C]//2014 IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems Proceedings. Naples, 2014:1-6.
- [16] 张永亮,刘聪聪,李晓钟,王春阳. 长联连续梁桥双曲面球型减隔震支座参数影响研究[J]. 桥梁建设,2022,52(1):94-100.
- [17] 丁世跃,刘世忠,潘存尚,等. 摩擦摆支座对复杂多跨长联 PC 连续梁桥支座预偏量的影响[J]. 江西建材,2020(4):14-16.
- [18] 裴昊. 大跨长联 PC 梁式桥结构体系及温度效应研究[D]. 郑州:郑州大学,2023.
- [19] 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018 [S]. 北京:人民交通出版社,2018.
- [20] CEB-FIP Model Code 1990: design code[S]. London: Thomas Telford Services Ltd, 1993.

(上接第73页)

- [9] 郑一苇. 市政工程顶管施工中的沉井结构优化设计[J]. 市政交通水利工程设计,2022(7):87-89.
- [10] 陈西鹏. 长距离污水管道顶管工程中的沉井施工关键技术研究[J]. 工程施工技术,2024(16):209-211.
- [11] Alonso E E, Pinyol N P, Fernández P. Caisson Failure Induced by Wave Action [M]//Developments in

Geotechnical Engineering. Springer India, 2015:45-93.

- [12] Peng Fangle, Dong Yunhao, Wang Hailin, et al. Remote-control technology performance for excavation with pneumatic caisson in soft Ground [J]. Automation in Construction, 2019,105:102834.