

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.12.018

# 超长多跨预应力连续梁桥支座预偏量设置分析

史彪之<sup>1</sup>, 怀光辉<sup>1</sup>, 查怀松<sup>1</sup>, 宋健<sup>2</sup>, 钱盛域<sup>3</sup>, 周小焱<sup>3</sup>

(1. 中铁四局集团有限公司, 安徽 合肥 230041; 2. 无锡市城市重点建设项目管理中心, 江苏 无锡 214000;

3. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 跨数多于5跨且联长大于600m的超长多跨预应力连续梁桥因其整体刚度大、行车舒适性好、车致振动小等优点在公路桥梁中应用逐渐增多,然而,在其施工过程中将经历多次合龙引起的体系转换,施工周期较长而需经历温度、徐变收缩等影响,因而使其支座纵向位移难以准确计算,为其设置合理预偏量成为了施工中的关键技术问题。为此,以某21跨超长多跨预应力连续梁桥的支座预偏量设置为研究实例,通过建立全桥有限元模型,在综合考虑温度、收缩徐变、预应力施加等影响因素后,分析了“从中间向两侧合龙”与“从两侧向中间合龙”2种合龙方案在支座预偏量设置上的差异,并基于变形-内力函数计算了支座滑动过程中摩阻力对支座位移的影响大小,实现了施工过程中主梁纵向位移的精确计算分析和有效控制。

**关键词:** 超长多跨连续梁; 支座预偏量; 徐变收缩; 温度作用; 数值模拟

中图分类号: U443.36

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)12-0082-05

## 0 引言

超长多跨预应力连续梁桥不仅具有较强的跨越能力,而且能大量减少伸缩缝的使用,减缓车致振动,改善行车平顺性<sup>[1-3]</sup>。随着大位移适应能力支座的开发,超长多跨预应力连续梁桥单联长度得到了进一步延伸,但由于施工过程中多次体系转换和较长工期的影响,使得各个支座的位移难以控制<sup>[4-6]</sup>。由于超长多跨预应力连续梁桥在整个施工期存在预应力、混凝土收缩和徐变、合龙温度变化等因素,导致桥墩(台)活动支座产生了纵向位移<sup>[7-8]</sup>。若未设支座预偏量,全桥合龙后较大的支座位移将使支座、桥墩处于偏心受压状态,对支座和桥墩受力不利<sup>[9-10]</sup>。因此,需要对施工过程进行精确分析,获得支座纵向位移量,在桥墩支座的上座板与支座的理论中心线之间预设纵向偏移量,以抵消梁体施工过程中产生的纵向变形,使每个支座处于合理受力状态。

施工阶段梁体将在温度荷载、收缩徐变、预应力荷载作用下发生纵向变形,导致滑动支座发生纵向

位移。滑动支座在施工阶段产生的位移总值称为支座预偏量值<sup>[11-12]</sup>。国内学者对于长联多跨连续梁桥的支座预偏量开展了大量研究。张欣欣等<sup>[13]</sup>针对18跨连续梁桥钱江十桥,研究了收缩徐变、施工方案、合龙温度和混凝土弹性模量等因素对支座预偏量的影响,发现收缩徐变、徐变系数终极值的影响较大。刘世忠等<sup>[14]</sup>针对15跨连续跨度1434m的海子湖特大桥支座预偏量的研究表明,混凝土徐变收缩是对梁体纵向位移和支座预偏量影响最大的因素。管钟<sup>[15]</sup>比较了2种施工方案下的支座预偏量,发现临时锁定节段、固定支座设置等会对支座位移不动点、温度不动点产生影响,进而导致各个支座位移量产生差异。此外,肖星星<sup>[16]</sup>考虑到支座的四氟乙烯板在沿纵向滑动时,其自身的摩擦系数与重力作用所产生的支座摩擦阻力将使支座的纵向位移受到一定程度的限制,从而通过理论计算实现了更为准确的支座位移计算。

综上所述,支座纵向预偏量设置须准确考虑预应力张拉、混凝土收缩徐变、温度变化和支座摩阻力的影响。本文采用MIDAS Civil 2020软件,对超长多跨连续梁桥的支座预偏量进行分析,并根据实际的施工方案详细计算各支座预偏量设置值,避免由于支座位移过大而导致支座破坏;同时分析了2种施工方案对于支座预偏量设置的影响。

收稿日期: 2024-01-01

作者简介: 史彪之(1983—),男,学士,高级工程师,主要从事施工管理工作。

通信作者: 周小焱(1982—),男,博士,研究员,主要从事桥梁安全评估研究工作。电子邮箱: xiaoyizhou@seu.edu.cn

### 1 工程概况

本文依托某超长多跨连续梁桥,跨径布置为42.22 m+3×41.50 m+12×39.00 m+40.00 m+65.00 m+40.00 m+43.00 m+42.98 m,共计21跨,全长865.7 m,桥宽33 m,按照一级公路标准建设,双向6车道,设计速度80 km/h。全桥共计7个施工节段,分别命名为S1~S7;共计6个合龙段,分别命名为HL1~HL6(见图1)。第1至第5施工节段采用宽33 m的5室箱梁等截面;第5至第6施工节段桥面宽度由33 m变宽到51.87 m。22#~39#桥墩设置2个永久支座,40#~43#桥墩设置4个永久支座,永久支座采用摩擦摆式减隔震支座和速度锁定减隔震支座组合搭配使用;全桥合龙后只34#墩上为固定支座,其余均为滑动支座。22#~43#桥墩的支座布设方案见图2、图3。同时在合龙段附近建立临时桥墩,上方放置板式橡胶支座作为临时支座,当合龙段施工完成后拆除临时桥墩和支座。临时支座布置方案见图4。

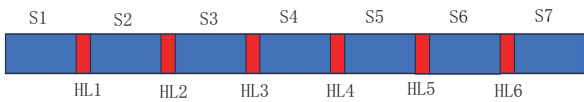


图1 全桥施工节段和合龙段示意图

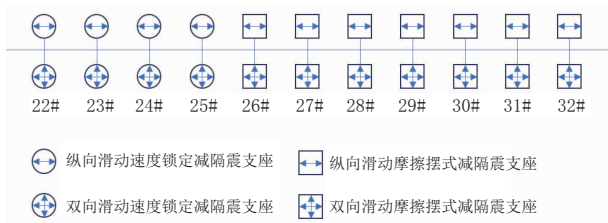


图2 22#墩~32#墩支座布置方案

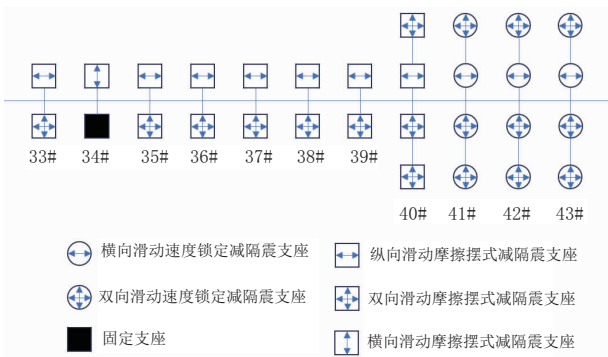


图3 33#墩~43#墩支座布置方案

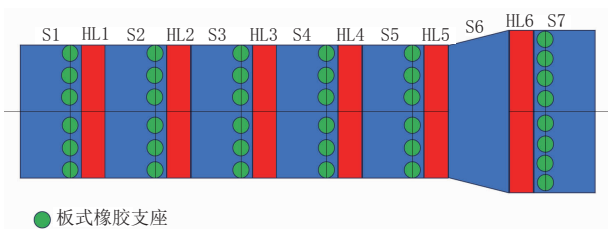


图4 板式橡胶支座布置方案

### 2 全桥有限元模型与支座摩阻力模拟

#### 2.1 全桥有限元模型构建

采用MIDAS Civil 2020软件建立主桥结构模型。主梁为C50预应力混凝土梁,采用梁单元模拟;预应力采用索单元模拟。全桥模型共有单元894个,节点1075个。预应力钢束的锚下应力按照1395 MPa控制,应用后张法。孔道偏差系数设置为0.0015、孔道摩擦系数为0.25、钢筋回缩和锚具变形为0.006 m、钢筋松弛系数为0.3、导管直径为0.09 m,通过控制这5个参数在施加预应力时进行折减。混凝土的收缩、徐变系数取值按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)设置。全桥采用满堂支架施工,在激活单元时同时激活预应力荷载,通过设置各个节段的材料龄期来分析结构的早期收缩徐变;激活永久支座和临时支座边界条件,当合龙施工结束后,钝化临时支座。本桥各桥墩均为刚性墩,因此只建立上部结构,不考虑桥墩的影响。模型在支座对应位置自下而上采用一般支撑+弹性连接+刚性连接3种模式相结合的方式模拟支座,通过设置弹性连接的刚度来模拟支座的约束方向,在下方的节点约束全部自由度,并建立临时约束支座组和永久约束支座组,通过钝化与激活来模拟施工过程的体系转化。各个施工节段的支座模拟如图5所示。

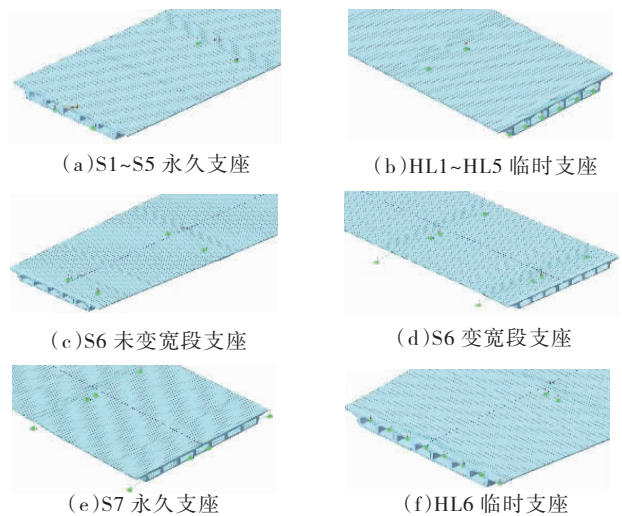


图5 不同施工节段的支座模拟

#### 2.2 支座摩阻力模拟

永久支座采用摩擦摆式减隔震支座和速度锁定减隔震支座,临时支座为板式橡胶支座。其中板式橡胶支座剪切刚度较小,其结构变形能力可以适应主梁的纵向变形,即临时支座不会在主梁变形时产生摩擦阻力。而永久支座为减隔震支座结构,在未发生

地震荷载作用时,此类支座以球形支座的工作方式运行。该支座工作时,先产生静摩擦力,随着外部作用增大,静摩擦力也逐渐增大,当其超过最大值时,支座开始滑动,此时产生的滑动摩擦力小于最大静摩擦力。但最大静摩擦力存在时间短,且在主梁变形时产生的是滑动摩擦力,因此以滑动摩擦力来模拟支座摩阻力作用。由于上部结构形式发生变化,每个支座的反力和摩阻力均不相同,表1列出了各桥墩上滑动支座对应的支座摩阻力。以39#墩为例,在MIDAS Civil 2020软件中建立该墩支座的变形-内力函数(见图6)来模拟支座摩阻力,并以0.1 mm作为支座是否发生滑动摩擦的判据。图6中:支座的滑动摩擦系数×支座的反力=1 005 kN,此支座正常工作的位移范围为200 mm。

表1 各桥墩支座摩擦阻力数值 单位:kN

桥墩号	支座摩阻力	桥墩号	支座摩阻力	桥墩号	支座摩阻力
22#	240	30#	438	38#	456
23#	420	31#	474	39#	1 005
24#	483	32#	429	40#	600
25#	492	33#	435	41#	333
26#	429	34#	0	42#	411
27#	435	35#	429	43#	189
28#	474	36#	435		
29#	426	37#	480		

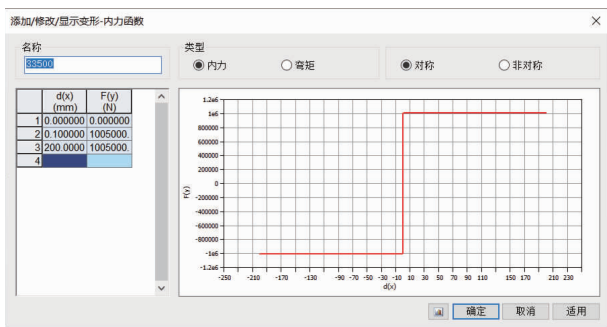


图6 支座的变形-内力函数

### 3 超长多跨连续梁桥支座预偏量计算分析

#### 3.1 支座预偏量计算原理

支座纵向位移量主要包括:施工阶段开始至全桥合龙前由预应力张拉引起的位移 $\Delta_1$ 、混凝土收缩和徐变引起的位移 $\Delta_2$ 、体系转换前后环境温度变化引起的位移 $\Delta_3$ 。同时,上述3项位移均受支座摩阻力的阻碍作用,记为 $\Delta_4$ 。因此,各支座纵向预偏量设置值 $\Delta$ 为:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \Delta_4 \quad (1)$$

在数值模拟中, $\Delta_1$ 通过设置S1~S7施工节段和

合龙段的预应力钢束进行计算; $\Delta_2$ 通过设置时间依存材料中28 d龄期强度、相对湿度、构件大致尺寸等参数进行计算; $\Delta_3$ 通过获取混凝土浇筑日期和合龙施工日期的温度,计算提前转化前后的温差,再通过整体升温模拟温度作用下的支座位移进行计算; $\Delta_4$ 通过在支座弹性连接位置设置变形-内力函数,并计入非线性影响进行计算。

#### 3.2 施工方案一:从两侧向中间合龙(未考虑支座摩擦阻力)

从两侧向中间合龙的施工方案一顺序为:S1、S2施工(2022年10月25日)→S4施工(2023年2月10日)→S5施工(2023年3月10日)→S3施工(2023年4月15日)→S6施工(2023年5月1日)→S7施工(2023年6月10日)→HL3、HL4施工(2023年7月22日)→HL2、HL5施工(2023年8月8日)→HL1、HL6施工(2023年9月18日)。计算超长多跨连续梁体系转换前后的温差,全部温差工况如下:工况1,S1、S2至S4施工节段,降温6℃;工况2,S4至S5施工节段,升温8℃;工况3,S5至S3施工节段,升温6℃;工况4,S3至S6施工节段,升温2℃;工况5,S6至S7施工节段,升温1℃;工况6,S7至HL1和HL6施工节段,升温6℃;工况7,HL1、HL6至HL2、HL5施工节段,升温3℃;工况8,HL2、HL5至HL3、HL4施工节段,降温9℃。

分别计算由预应力荷载、收缩徐变荷载、温度荷载引起的支座位移,支座位移以向右为正、向左为负。支座预偏量为支座位移的相反值,通过箭头符号表明预偏量设置的方向。施工方案一的支座位移和预偏量值见表2。由表2可见:施工方案一中由预应力荷载引起的最大支座位移位于22#墩,向右位移31.3 mm;由混凝土收缩徐变荷载引起的最大支座位移位于22#墩,向右位移26.8 mm;由温度荷载引起的最大支座位移位于25#墩,向右位移29.5 mm。支座预偏量向左、向右设置的最大值分别位于全桥的边侧桥墩,22#桥墩支座需设置向左的74 mm预偏量;43#桥墩支座需设置向右的68.1 mm预偏量。

#### 3.3 施工方案二:从中间向两侧合龙(未考虑支座摩擦阻力)

从中间向两侧合龙的施工方案二顺序为:工况1~工况5与施工方案一相同;HL1、HL6施工(2023年7月22日)→HL2、HL5施工(2023年8月8日)→HL3、HL4施工(2023年9月18日)。温差工况1~



表2 施工方案一 支座位移和预偏量设置

单位:mm

桥墩号	预应力荷载 支座位移	收缩徐变荷 载支座位移	温度荷载 支座位移	支座预 偏量	预偏方向
22#	31.3	26.8	15.9	74.0	←
23#	20.1	12.5	20.3	52.9	←
24#	14.7	0.3	24.8	39.8	←
25#	8.6	-11.9	29.5	26.2	←
26#	13.5	17.4	6.2	37.1	←
27#	5.9	7.1	10.5	23.5	←
28#	0.5	-4.2	14.8	11.1	←
29#	10.2	11.3	-1.2	20.3	←
30#	2.9	2.7	0	5.6	←
31#	-2.6	-6.4	-1.2	10.2	→
32#	12.6	18.9	-13.3	18.2	←
33#	5.4	9.9	-6.6	8.7	←
34#	0	0	0	0	
35#	4.8	7.1	-3.5	8.4	←
36#	-2.3	-1.3	0	3.6	→
37#	-7.7	-11.0	3.5	15.2	→
38#	-0.3	4.7	-11.0	6.6	→
39#	-4.1	-5.6	-10.6	20.3	→
40#	-16.9	-13.0	-10.1	40.0	→
41#	-21.8	-23.7	-9.7	55.2	→
42#	-16.8	-12.6	-19.5	48.9	→
43#	-26.6	-22.0	-19.5	68.1	→

表3 施工方案二 支座位移和预偏量设置

单位:mm

桥墩号	预应力荷载 支座位移	收缩徐变荷 载支座位移	温度荷载 支座位移	支座预 偏量	预偏方向
22#	15.1	20.3	-4.5	30.9	←
23#	3.9	5.9	0	9.8	←
24#	-1.5	-6.5	4.5	3.5	→
25#	-14.2	-12.5	9.1	17.6	→
26#	10.5	19.4	20.3	50.2	←
27#	3.3	9.4	24.6	37.3	←
28#	-2.3	-2.2	28.9	24.4	←
29#	11.1	16.5	8.1	35.7	←
30#	3.7	7.7	9.3	20.7	←
31#	-1.9	-2.0	10.5	6.6	→
32#	13.1	20.0	-13.3	19.8	←
33#	5.6	10.5	-6.6	9.5	←
34#	0	0	0	0	
35#	4.3	5.2	-8.1	1.4	←
36#	-3.1	-4.1	-4.7	11.9	→
37#	-8.8	-14.2	-0.8	23.8	→
38#	1.5	2.7	-18.0	13.8	→
39#	-2.5	-7.8	-17.6	27.9	→
40#	-15.9	-15.4	-17.1	48.4	→
41#	-20.1	-25.8	-16.7	62.6	→
42#	-2.6	-5.3	0	7.9	→
43#	-12.7	-14.4	0	27.1	→

工况5也与施工方案一相同;工况6,S7至HL3、HL4施工节段,升温6℃;工况7,HL3、HL4至HL2、HL5施工节段,升温3℃;工况8,HL2、HL5至HL1、HL6施工节段,降温9℃。

施工方案二的支座位移与预偏量值见表3。由表3可见:施工方案二中由预应力荷载引起的最大支座位移位于41#墩,向右位移20.1mm;由混凝土收缩徐变荷载引起的最大支座位移位于41#墩,向右位移25.8mm;由温度荷载引起的最大支座位移位于28#墩,向左位移28.9mm。支座预偏量向左、向右设置的最大值分别位于22#桥墩和41#桥墩,22#桥墩支座需设置向左的30.9mm预偏量,41#桥墩支座需设置向右的62.6mm预偏量。

比较上述2种施工方案可见,合龙方案的不同会导致由预应力荷载、收缩徐变荷载、温度荷载这3种荷载引起的最大支座位移出现在不同的桥墩上。对比2种方案设置预偏量的最大值,方案二向左最大预偏量(30.9mm)小于方案一向左最大预偏量

(74mm);方案二向右最大预偏量(62.6mm)小于方案一向右最大预偏量(68.1mm),可见方案二的预偏量控制要优于方案一。原因是支座位移的最大值通常发生在桥梁的两侧,而方案一过早地合龙边侧主梁,在边界条件改变的情况下由预应力荷载、收缩徐变荷载、温度荷载引起的边侧支座位移过大,最终导致方案一的预偏量控制值要大于方案二。

### 3.4 考虑支座摩擦阻力时的施工方案二

当考虑支座摩擦阻力时,需在计算软件中打开非线性分析功能,如此系统在计算由预应力荷载、收缩徐变荷载、温度荷载引起的支座位移时会自动考虑支座摩擦阻力作用。考虑支座摩擦阻力的方案二支座预偏量见表4,其与未考虑支座摩擦阻力的方案二支座预偏量的相对误差见表5。

根据计算结果可以看出,考虑支座摩擦阻力后,支座预偏量的设置方向并未改变,但对于不同桥墩上支座预偏量计算结果的影响不同,最大误差值出现在35#桥墩,为64%。

表4 考虑支座摩擦阻力的施工方案二支座位移与预偏量设置 单位:mm

桥墩号	(预应力荷载+收缩徐变荷载)支座位移	温度荷载支座位移	支座预偏量	预偏方向
22#	34.9	-4.6	30.3	←
23#	8.6	0	8.6	←
24#	-9.4	4.4	5.0	→
25#	-28.4	8.8	19.6	→
26#	28.6	19.1	47.7	←
27#	11.2	23.4	34.6	←
28#	-6.1	27.7	21.6	←
29#	26.4	7.7	34.1	←
30#	10.2	8.9	19.1	←
31#	-5.0	10.2	5.2	→
32#	23.7	-12.9	10.8	←
33#	15.8	-6.3	9.5	←
34#	0	0	0	
35#	10.1	-7.8	2.3	←
36#	-6.4	-4.1	10.5	→
37#	-22	-0.4	22.4	→
38#	5.8	-17.0	11.2	→
39#	-8.6	-16.2	24.8	→
40#	-29.5	-16.0	45.5	→
41#	-44.2	-44.2	59.8	→
42#	-7.3	0	7.3	→
43#	-26.9	0	26.9	→

表5 考虑与未考虑支座摩擦阻力的预偏量设置误差 单位:%

桥墩号	相对误差	桥墩号	相对误差	桥墩号	相对误差
22#	2	30#	8	38#	19
23#	12	31#	21	39#	11
24#	43	32#	45	40#	6
25#	11	33#	0	41#	4
26#	5	34#	0	42#	8
27#	7	35#	64	43#	1
28#	11	36#	12		
29#	4	37#	6		

### 4 结 语

(1)提出了考虑支座摩擦阻力时在预应力钢束张拉、混凝土收缩徐变、施工阶段温度荷载作用下的支

座位移计算方法,并利用MIDAS Civil 2020软件对支座预偏量开展了精确计算分析。

(2)不同合龙方案对于受到预应力荷载、收缩徐变荷载、温度荷载作用的支座位移影响不同,其数值具有较大差异。在本文的施工工序和环境温度变化下,从中间向两侧合龙的施工方案二对于支座预偏量的设置更为有利。

(3)本文提出采用MIDAS Civil软件中自带的变形-内力函数功能可实现支座摩擦阻力的模拟。考虑支座摩擦阻力可以实现更为准确的支座预偏量控制。

#### 参考文献:

[1] 叶再军.多跨长联预应力混凝土连续梁桥施工控制研究[D].武汉:武汉理工大学,2006.

[2] 刘尧.多跨长联预应力混凝土连续梁桥施工技术及其线形控制[D].西安:长安大学,2019.

[3] 肖啸.基于不同施工进度下多跨连续梁桥合龙顺序的研究[D].长沙:中南大学,2014.

[4] 叶再军,周红云,吴学伟.悬臂施工多跨连续梁桥合龙方案优化研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2016,40(4):676-679.

[5] 许倩.基于高墩大跨预应力混凝土连续梁的悬臂合龙技术[J].交通世界,2022(24):48-50,58.

[6] 潘博.多跨长联连续梁桥合龙关键问题研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.

[7] 李登武,何振华.多跨连续梁桥支座预偏量的影响因素研究[J].西部交通科技,2022(4):172-175.

[8] 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.

[9] 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[D].兰州:兰州交通大学,2019.

[10] 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,201(3)112-113.

[11] 王振宇.海子湖多跨长联PC连续梁桥施工阶段若干问题研究[D].兰州:兰州交通大学,2019.

[12] 雷建华,周德.多跨连续梁桥体系转换时支座反力与位移计算方法[J].桥梁建设,2021,51(4)60-65.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 管钟.超长联预应力混凝土连续梁桥合龙顺序对结构效应的影响分析[D].武汉:华中科技大学,2019.

[16] 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(4):639-644.