

合龙方案对大跨 PC 箱梁桥成桥应力及线形的影响

申乐强

(山东省高速路桥养护有限公司, 山东 济南 250032)

摘要:大跨 PC 连续梁的合龙方案和温度等外界因素会对梁体内力分布、变形产生重要的影响。现以小清河大桥为工程背景,结合为期两周的主梁截面温度监测数据,建立空间有限元模型,研究合龙顺序、合龙温度、截面梯度温度对结构成桥应力、线形的影响。结果表明:先边跨后中跨合龙的应力分布更加平缓,所以更加合理。对于整体温度作用:合龙前升降温对结构内力影响较小。对于截面梯度温度效应:作用在中跨合龙前,对结构内力、变形影响均较大;作用在边跨合龙前,对成桥变形影响较大,但由于体系转换对成桥应力无影响。

关键词:连续梁;合龙方案;整体升降温;温度梯度;成桥内力

中图分类号: U448.21+5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)08-0133-05

0 引言

连续梁桥具有结构体系刚度大,整体性好,安全度高,桥面伸缩缝少等优点,在桥梁建造中被大量使用。而悬臂施工方法由于其施工简便、结构整体性好、便于线形控制、跨越性较好,普遍用于大跨度变截面连续梁桥的施工中。在悬臂施工过程中,涉及合龙施工、体系转换,不同合龙方案对成桥结构受力状态及线形影响很大^[1-2]。内力控制是连续梁施工控制重要任务之一,将各截面应力控制在合理范围内,防止混凝土受拉开裂,减小恒载作用下箱梁的应力水平差是连续梁悬臂施工阶段主要控制内容^[3]。

郝东东等以某七跨连续梁为背景,研究了合龙顺序对施工中各阶段挠度及主梁应力的影响,认为自边跨到中跨合龙为最优合龙方案^[4]。戴公连等人以三跨连续梁为例研究了不同合龙顺序对成桥线形的影响,认为先边跨合龙桥梁变形最为平顺^[5]。所以,选择合理的合龙顺序对控制成桥后的结构内力、变形十分重要。

除了合龙顺序,温度变化引起的结构变形在悬臂施工过程中占有很大比重^[6]。在近些年对施工过程中温度引起结构变形的研究中,发现温度升高结构下挠增大,温度降低结构下挠减小甚至产生上挠,并且温度引起的结构变形具有累计效应。但是外温最高或最低,其对应产生的挠度值并不是最大值^[7]。

温度作用存在滞后性,外温是引起施工过程中线形变化的表象,梁截面温差是导致结构变形的根本原因^[8]。同时施工过程中结构尚未铺装,而混凝土铺装可以减小截面正负梯度温差^[9-10]。因此施工阶段的梁截面的温差高于成桥时的温差,温度梯度对施工过程中结构线形的影响较成桥后大。而且在超静定结构中,梁体应力与外界温度变化密切相关^[11]。随着桥梁跨径增大,温度效应对桥梁结构的危害增大^[12]。施工过程中温度梯度的存在,一方面影响成桥后的最终线形;另一方面会引起温度次内力,可能会导致局部开裂,影响施工安全。因此,研究合龙顺序及温度效应等对于合龙施工的影响,对于改善结构成桥时的受力状态尤为必要。

现以济南-青岛小清河特大连续箱梁桥为工程背景,建立 Midas/Civil 空间有限元模型,对比分析不同合龙顺序、合龙温度下的成桥应力状态,并研究合龙时考虑截面梯度温度作用对成桥结构应力、线形的影响。

1 工程概况

小清河特大桥位于济广高速公路路段,由东向西依次跨越小清河及南水北调干渠。主桥上部结构采用 75 m+130 m+75 m 双幅对称预应力混凝土变截面连续梁桥,全桥共分为 75 个梁段,如图 1 所示。箱梁采用直腹板的单箱双室结构,箱梁顶板宽为 20.25 m,底板宽度为 12.25 m,两端及中跨跨中梁高 3.5 m,主墩墩顶处梁高 8 m,主梁梁高变化采用 1.8 次抛物线。墩顶横断面图及合龙段横断面图如图 2、图 3 所示。

收稿日期:2020-12-18

作者简介:申乐强(1981—),男,本科,工程师,从事高速公路的路桥养护工作。

箱梁底板厚度 30 cm,主墩墩顶根部底板厚度 90 cm,底板厚度变化采用 1.8 次抛物线,箱梁腹板厚度采用 60、80 cm,箱梁采用 C55 混凝土。主梁悬臂浇筑梁段划分长度为 $4 \times 2.5 \text{ m} + 4 \times 3.0 \text{ m} + 3 \times 3.5 \text{ m} + 3 \times 4.0 \text{ m} + 3 \times 4.5 \text{ m}$,采用挂篮悬臂现浇施工,挂篮自重 780 kN (含施工荷载);边跨直段长度 9.0 m,采用支架现浇施工;边跨合龙段长度 2.0 m,跨中合龙段长度 2.0 m。箱梁采用纵向、横向和竖向三向预应力,中横梁设置横梁预应力,采用高强度低松弛钢绞线 (Ⅱ级松弛),公称直径 15.2 mm,抗拉强度标准值 $f_{pk}=1\ 860 \text{ MPa}$,计算弹性模量为 $1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$,预应力钢束均采用塑料波纹管,张拉控制应力均为 1 339 MPa。

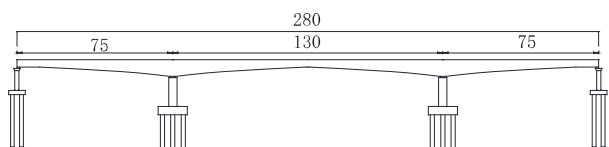


图 1 全桥立面图 (单位: m)

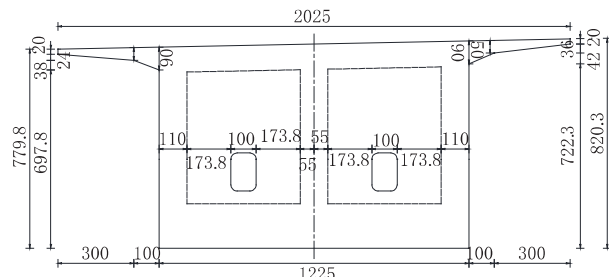


图 2 墩顶横断面图 (单位: cm)

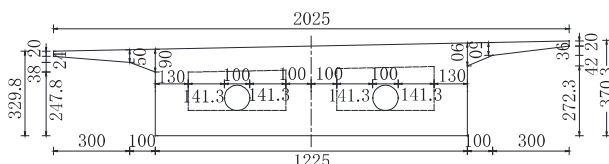


图 3 合龙段横断面图 (单位: cm)

2 合龙方案对结构受力的影响

2.1 合龙方案拟定

不同的合龙方案导致成桥状态内力不同,体系转换引起的内力重分布也不同。为了讨论不同合龙方案对成桥时结构内力的影响,比较了两种不同的合龙顺序,分别是:先边跨合龙后中跨合龙;先中跨合龙后边跨合龙 (中墩临时固结采用梁与临时支墩浇筑成整体的连接方式)。详细方案如表 1 所列。

2.2 合龙方案有限元建模及分析

按照以上合龙方案,建立有限元模型如图 4 所示,分析合龙施工方案对成桥后结构应力的影响。

两种合龙方案成桥后顶板、底板应力值见图 5、图 6 所示。应力负值代表受压,正值代表受拉。

表 1 合龙方案一览表

施工阶段	CS0 方案施工内容	CS1 方案施工内容
1	施工主墩及临时支墩、浇筑 0# 块	
2	张拉 0# 块预应力钢束	
3	安装挂篮	
4~73	依次浇筑 1#~17# 块混凝土、张拉 1#~17# 块预应力束、移动挂篮	
74	浇筑边跨直线段	
75	边跨挂篮前移作为吊架、对称压重	中跨一挂篮前移作为中跨合龙吊架、对称压重、中跨锁定
76	边跨合龙	中跨合龙
77	张拉边跨预应力钢束	张拉中跨钢束
78	拆除中墩临时固结	边跨挂篮前移作为吊架、拆除中跨合龙边跨配重
79	中跨一挂篮前移作为中跨合龙吊架、拆除边跨合龙时中跨配重	边跨重新压重、边跨锁定
80	中跨重新压重、中跨锁定	边跨合龙
81	中跨合龙	张拉边跨预应力束
82	张拉中跨预应力束	拆除中墩临时固结
83	拆除施工设备	

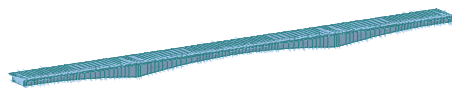


图 4 有限元建模效果图

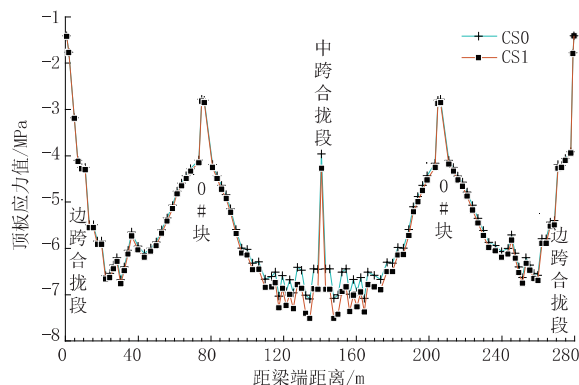


图 5 成桥顶板应力值曲线图

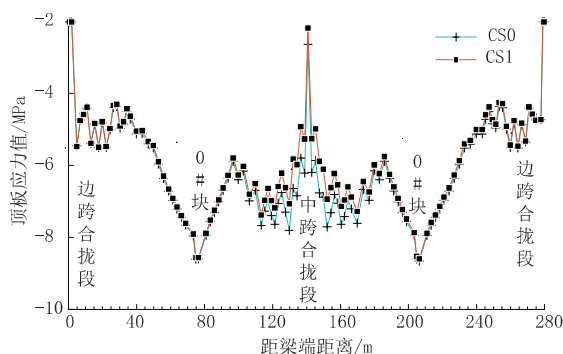


图 6 成桥底板应力值曲线图

如图 5、图 6 所示,两种合龙方案成桥后主梁全截面顶、底板为受压状态,应力分布规律基本一致。顶板最大应力都出现在中跨合龙段端部,底板应力最大值则都位于 0# 块根部。但 CS0 工况下中跨截面应力变化更加平缓。

如图 7 所示,两种合龙方案边跨截面顶、底板应力差很小,中跨截面顶、底板应力最大差值出现在中跨合龙段端部,分别为 0.44 MPa、-0.95 MPa,说明 CS0 方案跨中顶板压应力略小于 CS1 方案,底板压应力较 CS1 工况大 10%,更有利于预防运营阶段梁底开裂。综上,CS0 合龙方案更加合理。

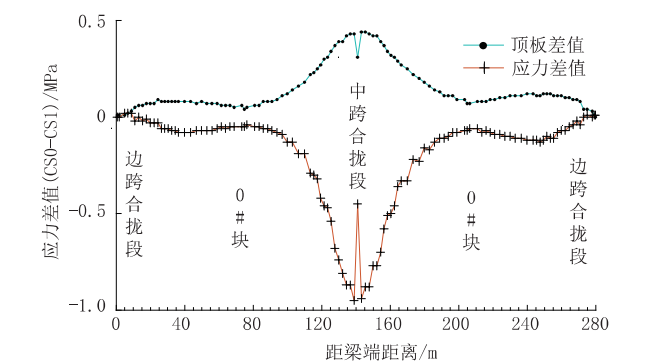


图 7 成桥顶板、底板应力差值曲线图

3 合龙温度对结构受力的影响

3.1 合龙施工整体升降温的影响

小清河特大桥设计的合龙温度为 10~20℃。为研究合龙温度对成桥后内力、变形的影响,采用先边跨后中跨合龙方案,考虑 4 种结构整体升降温方案,如表 2 所列。

表 2 整体温度荷载工况一览表

温度模型	温度荷载工况
T1	边跨合龙焊接骨架前整体升温 10℃
T2	边跨合龙焊接骨架前整体降温 10℃
T3	中跨合龙焊接骨架前整体升温 10℃
T4	中跨合龙焊接骨架前整体降温 10℃

合龙前考虑 4 种温度工况,并在合龙后撤销。在合龙前整体升降温作用下,主梁顶、底板的变形相同,温度作用撤销后顶、底板变形均已恢复,合龙前温度作用引起的顶、底板应力未超过 0.01 MPa,因此合龙前的整体升降温对成桥阶段结构应力的影响可忽略不计。

3.2 合龙梯度温度作用的影响

结构在温度作用下产生变形、内力的根本原因是梁截面温差^[7],所以研究截面温度梯度对结构的影

响很有必要。为得到温度沿梁截面高度方向的分布,在边跨合龙前对梁截面温度进行连续两周的观测。温度传感器布置在 2# 块与 1# 块交界截面中腹板位置,测点布置如图 8 所示。

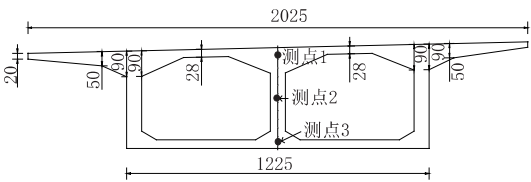


图 8 2# 块测点布置图(单位:cm)

温度观测期间,每天早上 8 点及下午 1 点对温度实测值进行提取,测点 1、2、3 温度实测值分别用 t_1 、 t_2 、 t_3 表示,如表 3、表 4 所列。

表 3 8:00 各测点温度实测值一览表

日期	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$	$t_3/^\circ\text{C}$	温差(t_1-t_3)/ $^\circ\text{C}$
8.4	30.4	30.8	30.7	-0.3
8.5	32.1	30.6	30.4	1.7
8.6	33.6	30.6	29.9	3.7
8.7	31.7	30.2	29.6	2.1
8.8	31.2	29.2	28.9	2.3
8.9	33.4	29.6	28.9	4.5
8.10	26.2	25.2	30.4	-4.2
8.11	25.6	25.8	26.7	-1.1
8.12	28.9	26.1	25.4	3.5
8.13	26.2	26.4	24.7	1.5
8.14	26.7	26	25.3	1.4
8.15	28.6	26.1	25.1	3.5
8.16	29.3	26.2	25.3	4

表 4 13:00 各测点温度实测值一鉴表

日期	$t_1/^\circ\text{C}$	$t_2/^\circ\text{C}$	$t_3/^\circ\text{C}$	温差(t_1-t_3)/ $^\circ\text{C}$
8.4	37.2	30.8	30.5	6.7
8.5	40	30.7	30	10
8.6	38.3	30.7	29.7	8.6
8.7	41.4	30.3	29.6	11.8
8.8	40.6	29.6	29.1	11.5
8.9	36	29.6	28.8	7.2
8.10	32	26.3	36	-4
8.11	37.1	25.8	25.2	11.9
8.12	40.7	26.2	25.2	15.5
8.13	31.7	26.5	25.4	6.3
8.14	39.1	26.2	25.2	13.9
8.15	40.4	26.3	25.3	15.1
8.16	40.7	26.5	25.3	15.4

由于测试时间为夏天,梁截面温差基本表现为正温度梯度。下午 1 时温度沿梁截面变化明显,且最大正温差为 15.4℃。选取正温度梯度为 15℃,参照

《公路桥涵设计通用规范 JTG D60—2015》,选取正温度梯度的 -0.5 倍作为负温度梯度,数值模拟采用梯度温度方案如表 5 所列。

表 5 梯度温度荷载工况一览表

梯度温度模型	温度荷载工况
T5	边跨合龙焊接骨架前梯度升温 15°C
T6	边跨合龙焊接骨架前梯度降温 7.5°C
T7	中跨合龙焊接骨架前梯度升温 15°C
T8	中跨合龙焊接骨架前梯度降温 7.5°C

合龙前考虑 T5~T8 温度荷载工况,并在合龙后撤销。主梁顶板、底板应力结果如图 9~ 图 12 所示,变形结果如图 13、图 14 所示(挠度为负代表下挠,为正代表上挠)。

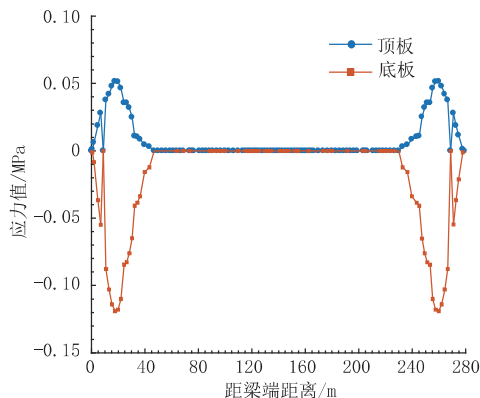


图 9 T5 温度作用下成桥顶底板应力值曲线图

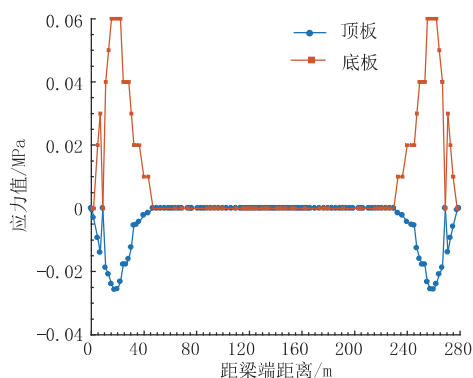


图 10 T6 温度作用下成桥顶底板应力值曲线图

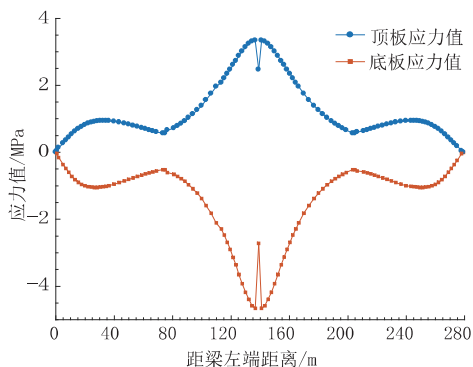


图 11 T7 温度作用下成桥顶、底板应力值曲线图

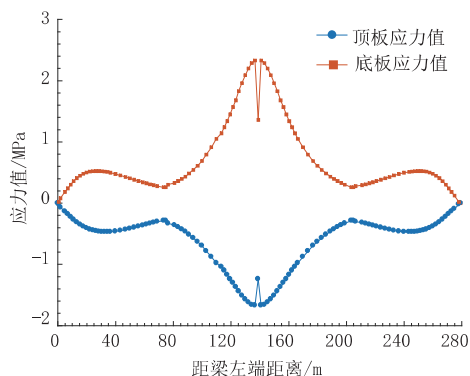


图 12 T8 温度作用下成桥顶底板应力值曲线图

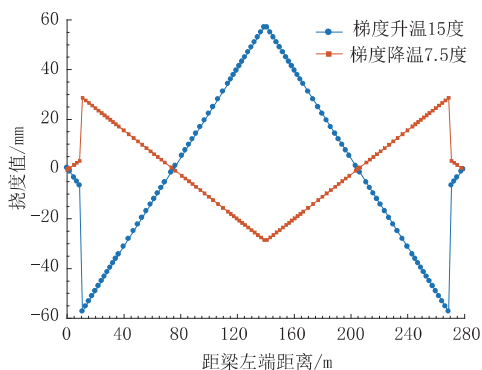


图 13 T5、T6 温度作用下成桥挠度值曲线图

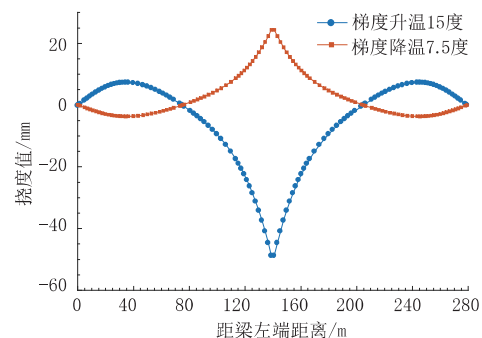


图 14 T7、T8 温度作用下成桥后挠度值曲线图

由图 9、图 10 可知,在 T5 荷载温度作用下,成桥后顶板受拉、底板受压;在 T6 温度荷载作用下的顶、底板受力情况相反。但由于中墩临时固结拆除释放结构撤温变形,温度效应对结构应力影响很小。在 T7、T8 温度荷载作用下,顶板、底板应力结果如图 11、图 12 所示。中跨合龙前梯度升温 15°C ,合龙后撤销。成桥状态,梯度温度作用下全截面顶板受拉、底板受压,拉、压应力最大值分别为 3.2 MPa 、 -4.7 MPa ,位于中跨合龙段端部。中跨合龙前梯度降温 7.5°C ,成桥仅温度作用下截面受力情况与升温相反,拉、压应力最大值分别为 2.4 MPa 、 -1.7 MPa ,位于中跨合龙段端部。

从上述结果可知,由于体系转换的影响,边跨合龙前梯度温度作用对成桥应力的影响可不计。而中跨合龙前梯度温度作用对成桥应力影响较大,所以

中跨合龙需要重视合龙温度的影响。

如图13所示,在T5温度荷载作用下,边跨下挠、中跨上挠,T6温度荷载作用下主梁变形方向相反。T5、T6温度荷载作用下主梁变形最大值的绝对值分别为57.3 mm、29.8 mm。边跨悬臂变形与中跨悬臂变形都关于0#块顶部极对称。产生此现象的原因是:温度梯度作用撤销后,中跨悬臂的温度下变形变为0,而边跨温度下变形仅减小一部分且边跨产生温度次内力;中墩临时固结拆除后,旋转约束释放,此时边跨应力部分释放导致其梯度温度下变形增大,同时边跨结构的变形导致中跨悬臂产生与其等值反向的变形。

在T7、T8温度荷载作用下,主梁变形如图14所示。在T7温度荷载作用下,边、中跨变形最大值分别为8.3 mm、-48.8 mm;在T8温度荷载工况下,边中跨变形最大值分别为-4.5 mm、23.6 mm。结合图11、图12可知,T7、T8温度荷载作用下边跨挠度、应力值随距边跨端部的距离先增大后减小,呈现二次曲线线型,最大值位于边跨合龙段端部。中跨挠度、应力值随距0#块距离增大而增大,最大值位于中跨悬臂端部,而应力值在中跨合龙段出现骤然减小。

综合来看,存在温度梯度作用时进行合龙口锁定,温度效应对结构成桥后的应力、变形都影响较大,因此应选择截面温差较小时合龙。

4 结 论

(1)先边跨后中跨与先中跨后边跨合龙两种合龙方案下顶板、底板压应力差值不大,但先边跨后中跨合龙的应力变化更加平顺。因此,先边跨合龙方案更优。

(2)在边跨合龙时,梯度升降温对成桥阶段主梁应力无影响,但对主梁线形影响较大。而中跨合龙时,梯度升降温,对成桥主梁应力、变形均有较大影响。

(3)主梁线形、内力受合龙时梯度温度作用的影响较大,合龙前整体升降温对结构应力影响不大。由于温度作用滞后性的存在,合龙时应关注梁截面梯度温度,选择梁截面梯度温度较小时进行合龙施工。

参考文献:

- [1] 刘会球.大跨度单线铁路混凝土连续梁桥施工合龙方案研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(3):706-711.
- [2] 包仪军,丁明波,朱龙.合龙方案对多跨连续梁桥施工监控的影响分析[J].铁道标准设计,2016,60(3):82-86.
- [3] 李剑锋,季日臣.多跨预应力混凝土连续梁桥合龙顺序研究[J].铁道建筑,2018,58(2):42-44.
- [4] 郝东东,陈文.多跨连续梁桥合龙方案对比分析研究[J].四川建筑科学研究,2016,42(3):133-135.
- [5] 戴公连,王伟民,刘柯.基于变形的铁路混凝土连续梁合龙方案比较[J].桥梁建设,2014,44(4):96-101.
- [6] 刘东升,李金枝,冯仲仁.连续箱梁桥悬臂施工过程中温度梯度效应的空间分析[J].世界桥梁,2007(3):45-47+54.
- [7] 董旭,蔚龙祥,路军,等.预应力混凝土连续梁桥温度-挠度试验研究[J].公路工程,2016,41(3):198-202.
- [8] 张通.大跨梁桥悬臂施工期间温度效应监测与分析[J].兰州理工大学学报,2011,37(4):135-138.
- [9] 方志,汪剑.大跨预应力混凝土连续箱梁桥日照温差效应[J].中国公路学报,2007(1):62-67.
- [10] 袁磊,王石磊,张勇.混凝土铺装箱梁桥的合理温度梯度[J].铁道建筑,2015(4):1-5.
- [11] 曹立波,赵晓龙,刘姗姗.大跨度连续箱梁悬臂施工温度效应研究[J].施工技术,2011,40(19):98-101+110.
- [12] 肖勇刚,陈海兵,胡斯亮.混凝土连续箱梁施工中的温度效应分析[J].中外公路,2008(2):106-109.

~~~~~  
(上接第132页)

法,随着步履式顶推设备的发展,顶推吨位越来越大,控制系统越来越智能化,顶推施工的应用也将越来越广泛。采用顶推施工的钢箱梁桥设计除了满足运营阶段的安全性能外,关键还需对施工过程进行详细分析,进行特殊设计。

### 参考文献:

- [1] JTG D60—2015,公路桥涵通用设计规范[S].

- [2] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [3] 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.
- [4] 谢福君,张家生.钢箱梁顶推参数影响及稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(6):1485-1492.
- [5] 谢祺.步履式顶推施工工艺对钢箱梁局部受力的分析研究[D].四川成都:西南交通大学,2015.
- [6] 陈卓.横向四滑道步履式顶推钢箱梁局部受力分析与同步控制研究[D].湖南长沙:长沙理工大学,2018.