

# 钢与混凝土组合弯梁桥不同施工方法 对结构内力的影响

杨国强<sup>1</sup>, 刘强<sup>2</sup>

(1.上海市市政规划设计研究院有限公司,上海市 200031; 2.同济大学,上海市 200092)

**摘要:**随着经济和交通建设的发展,组合弯梁桥逐渐成为城市桥梁建设中的优选桥型。组合弯梁桥与直桥的受力特点不同,不同的施工方法涉及不同的体系转换问题,因此施工方法的选择会对结构的力学性能产生影响。基于组合弯梁桥的三种施工方法——先简支后连续、先支点后跨中和满堂支架施工,通过有限元软件模拟不同施工方法的施工过程,研究了不同施工方法对组合弯梁桥结构力学性能的影响,针对预制组合弯梁桥提出合理主梁、横梁施工方法,对组合弯梁桥从结构受力角度选择合理的主梁施工方法具有指导意义。

**关键词:**组合弯梁桥;有限元;结构性能;施工方法

中图分类号:U445

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2024)03-0058-05

## 0 引言

近年来,工业化转型升级,桥梁建设不断发展,其中组合桥以工业化程度高、结构轻盈、构造简单等优势<sup>[1-6]</sup>逐渐得到广泛运用。其中,组合弯梁桥作为重要桥型,施工方法涉及不同的结构体系转换,会对施工过程和成桥后主梁内力产生影响<sup>[7]</sup>。因此,学者们对相关施工方法进行了大量研究。组合桥通常先架设钢梁,再施工桥面板。钢主梁施工完成后可作为施工平台,进行桥面板的施工作业<sup>[8]</sup>。主梁的架设方法有顶推法和吊装法。

组合弯梁桥不同的施工方法会导致施工过程中和成桥后主梁及横梁不同的内力分配,影响成桥和使用阶段结构的受力性能,但目前对施工方法的研究以直梁体系为主,基于受力状态合理性需求的预制组合弯梁桥的合理施工方法研究较少。本文主要研究先简支后连续、先支点后跨中和满堂支架施工这3种主梁施工方法对预制组合弯梁桥施工阶段和运营阶段结构受力性能的影响,为组合弯梁桥选择合理的主梁施工方法提供理论参考。

本文以曲率半径为100 m组合弯梁桥为例(桥梁横断面如图1所示),进行主梁施工方法对比分析。主要研究内容分为两点,一是研究主梁施工方法

对组合弯梁桥主梁受力的影响,选取主梁内力、应力及挠度作为对比参数。二是研究主梁施工方法对横梁受力的影响,选取横梁的内力、应力作为对比参数,对比研究3种施工方法在施工全过程中及运营过程中的结构力学性能,从而基于力学性能选择更为合理的施工方法。

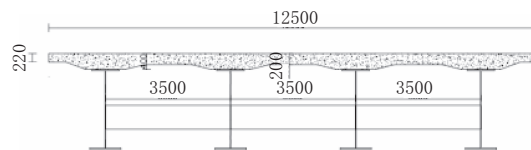


图1 标准横断面(单位:cm)

## 1 有限元模拟

### 1.1 主梁施工方法描述

方法一:先简支后连续施工方法,首先将各跨主梁架设到永久墩临时支座处,然后拼接相邻跨主梁,最后将临时支座更换为永久支座。

方法二:先支点后跨中施工方法,先将墩顶主梁节段吊装于桥墩和临时支架,各墩顶主梁节段长度由主梁受力性能确定,边墩选取正弯矩区的A梁段,过渡墩选取负弯矩区的C梁段和E梁段;然后将跨中梁段架设于临时支架,最后将墩顶梁段与跨中梁段进行拼接形成连续体系并拆除临时支架。

方法三:满堂支架施工方法,将主梁逐跨或逐段吊装于满堂支架,然后将主梁进行拼接形成整体,最后拆除满堂支架形成连续体系。

收稿日期:2023-11-13

作者简介:杨国强(1980—),男,硕士,高级工程师,主要从事桥梁理论分析、结构计算与检测评估工作。

## 1.2 施工过程模拟分析

采用通用有限元软件 MIDAS Civil 进行模拟分析,选取截面调整后的标准化模型进行施工过程模拟。各施工方法有限元模拟方法如下。

施工全过程分析中,施工荷载采用标准组合,运营过程中可能出现的荷载采用基本组合。

方法一:先简支后连续施工方法,首先激活主梁单元和临时支座,施加自重荷载。随后激活墩顶连接单元,钝化临时支座、激活永久支座,并将桥面板自重以均布荷载形式施加。最后激活模拟桥面板的板单元,以及主梁节点和桥面板节点间的刚性连接。

方法二:先支点后跨中施工方法,首先激活各墩顶支点梁段单元和支点梁段临时支撑,施加自重荷载。其次激活各跨跨中梁段单元和跨中梁段临时支撑。再次激活拼接单元,并钝化临时支撑,激活永久支座,施加桥面板自重。最后激活桥面板单元,以及主梁节点和桥面板节点间的刚性连接。

方法三:满堂支架施工方法,首先激活所有的主梁单元和临时支撑(模拟满堂支架),施加自重荷载。随后激活永久支座,施加桥面板自重。最后激活桥面板单元,以及主梁节点和桥面板节点间的刚性连接。

## 2 施工方法对主梁力学性能的影响

### 2.1 施工方法对主梁内力的影响分析

通过前面对组合弯梁桥的分析结果发现,组合弯梁桥外侧主梁的内力最大,内侧主梁的内力最小。因此,选取内侧主梁 1# 梁、外侧主梁 4# 梁进行对比分析。曲率半径为 100 m 的组合弯梁桥在施工阶段和运营过程中最不利工况下的主梁弯矩对比如图 2 和图 3 所示。从内力图中可以看出,各施工方法对 1# 主梁内力的影响较小,对 4# 主梁的影响较大;提取各施工方法 4# 主梁控制截面最大,最小内力见表 1。

分析表 1 数据,采用先简支后连续施工方法,4# 梁控制截面最大正弯矩在所有施工方法中最大。该施工方法在施工最不利工况下比先支点后跨中施工方法最大正弯矩大 33% 左右,比满堂支架施工高 38% 左右。该施工方法在使用最不利工况下比先支点后跨中施工方法最大正弯矩高 33% 左右,比满堂支架施工高 37% 左右。但先简支后连续施工方法,4# 梁控制截面最大负弯矩在所有施工方法中最小,在运营最不利状态采用该方法比先支点后跨中施工方法最大负弯矩小 12% 左右,比满堂支架施工方法小 14% 左右。从表 1 中还可以看出,先支点后跨中和满

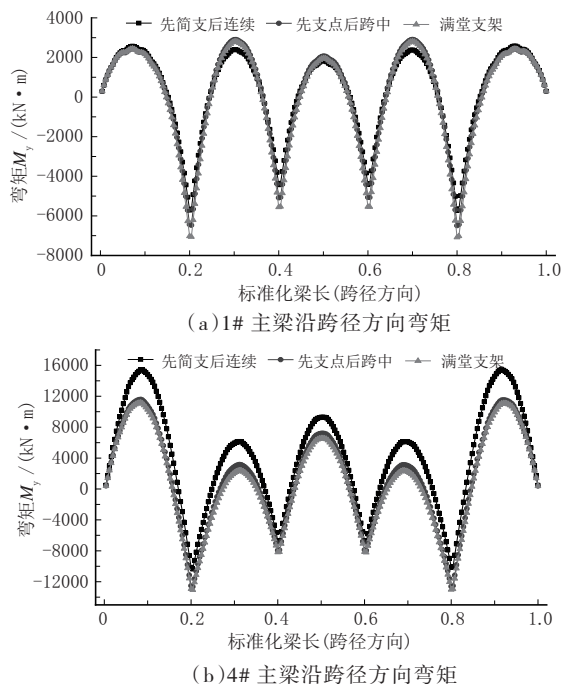


图 2 施工最不利状态各施工方法主梁内力对比

堂支架施工方法对主梁内力的影响较小,两种施工方法的主梁内力差别最大不超过 4%。综上,先简支后连续施工方法可以减小主梁负弯矩,但正弯矩会显著增大;先支点后跨中与满堂支架施工方法相比,主梁内力大小及分布则相差不大。

### 2.2 施工方法对主梁应力的影响分析

分析施工方法对各主梁关键截面应力分布的影响,对主梁截面尺寸设计优化具有重要指导意义。

通过 2.1 节对主梁内力的分析结果可知,施工方法对 4# 主梁内力的影响较大,且 4# 主梁相对其他主梁受力最不利。因此,本节选取 4# 主梁应力进行对比分析。MIDAS Civil 有限元分析软件中梁单元应力输出点说明见图 4,运营最不利状态下 4# 梁最大拉压应力对比分析见图 5、表 2。通过分析,可以得出以下结论:

(1)对比相同受力状态下主梁上翼缘点 1 应力及点 2 应力,发现点 2 应力大于点 1 应力。同样对比下翼缘点 4 应力及点 3 应力,发现点 3 应力大于点 4 应力。这说明 4# 主梁截面的外侧应力大于内侧(内侧为靠近圆心侧,外侧为远离圆心侧),因此主梁翼缘板外侧应力控制截面尺寸设计。

(2)在横梁位置处主梁截面应力大小产生突变且应力值减小,是由于横梁分担了部分内力。

(3)无论在施工最不利状态还是运营最不利状态,主梁各应力输出点应力值采用满堂支架施工方法的最小,先支点后跨中的次之,先简支后连续的最大。

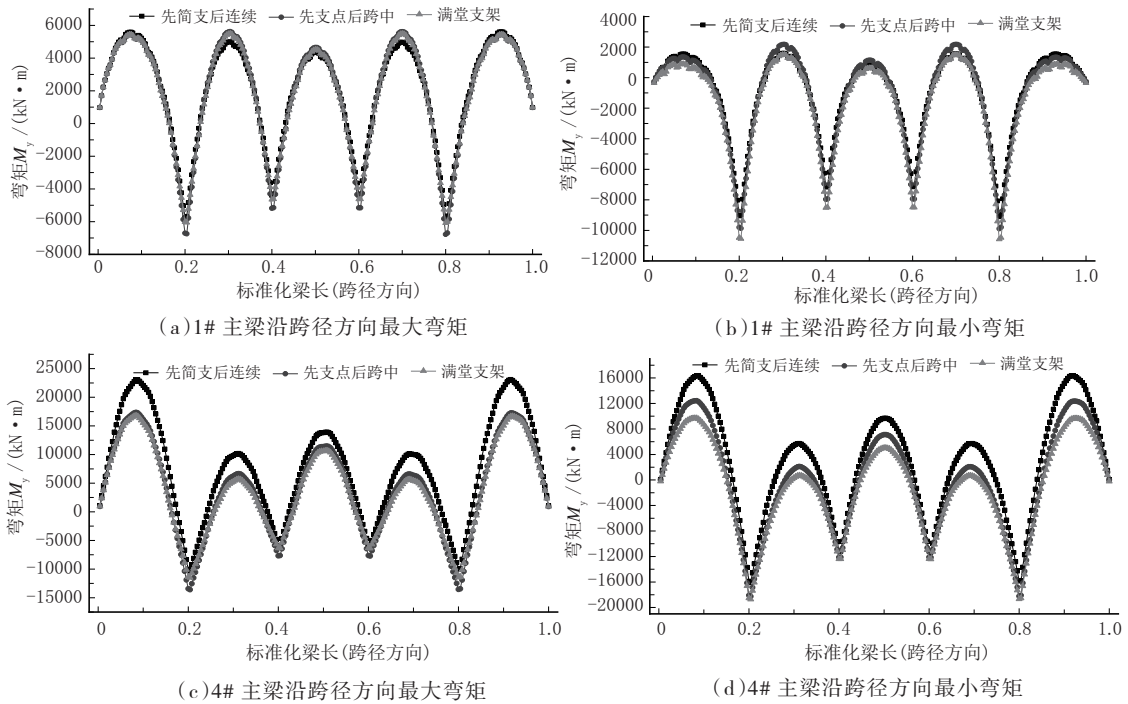
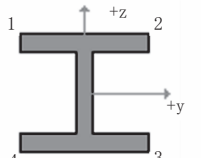


图3 运营最不利状态下各施工方法主梁内力对比

表1 各施工方法4#梁控制截面内力对比 单位:kN·m

施工方法	施工最不利状态	运营最不利状态	运营最不利状态
	内力(边跨跨中截面内力)	最大内力(边跨跨中截面内力)	最小内力(次边跨支点截面内力)
先简支后连续	15 466	23 100	-16 108
先支点后跨中	11 589	17 358	-18 272
满堂支架	11 163	16 806	-18 709

- 1: 上翼缘圆心侧组合应力输出点
  - 2: 上翼缘外侧组合应力输出点
  - 3: 下翼缘外侧组合应力输出点
  - 4: 下翼缘圆心侧组合应力输出点
- 组合应力: 轴力产生的应力加上两个方向弯矩产生的应力



弯梁桥圆心侧

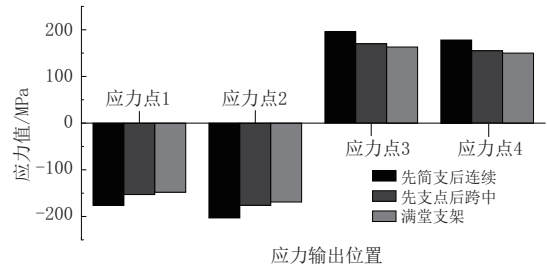
图4 应力输出点

(4)从表2可以看出,采用先简支后连续施工方法,主梁上下翼缘应力安全系数最小,分别为1.05、1.09;采用先支点后跨中施工方法,主梁上下翼缘应力安全系数次之,分别为1.21、1.26;采用满堂支架施工方法,上下翼缘应力安全系数最大,分别为1.25、1.29。

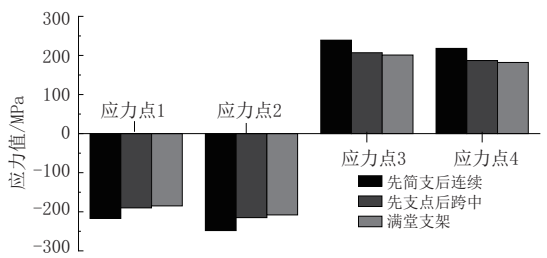
### 2.3 施工方法对各主梁恒载挠度的影响分析

计算得出各施工方法下主梁的恒载挠度如图6所示。从图中可以得出以下结论:

(1)采用先支点后跨中和满堂支架施工成桥后,2#、3#、4#主梁次边跨支点位置及中跨支点位置会



(a)施工最不利状态



(b)运营最不利状态

图5 各施工方法4#主梁最大拉压应力对比

表2 各施工方法运营最不利状态下4#主梁应力分析

主梁施工方法	先简支后连续	先支点后跨中	满堂支架
上翼缘最大应力 /MPa	-248	-215	-208
下翼缘最大应力 /MPa	239	207	201
应力允许值 /MPa	260	260	260
上翼缘安全系数	1.05	1.21	1.25
下翼缘安全系数	1.09	1.26	1.29

注: 应力最大截面的上下翼缘厚度尺寸在40~60 mm之间,应力允许值取260 MPa。

出现明显的反拱现象(主梁发生向上的位移)。采用先简支后连续施工方法,反拱现象则不明显(混凝土

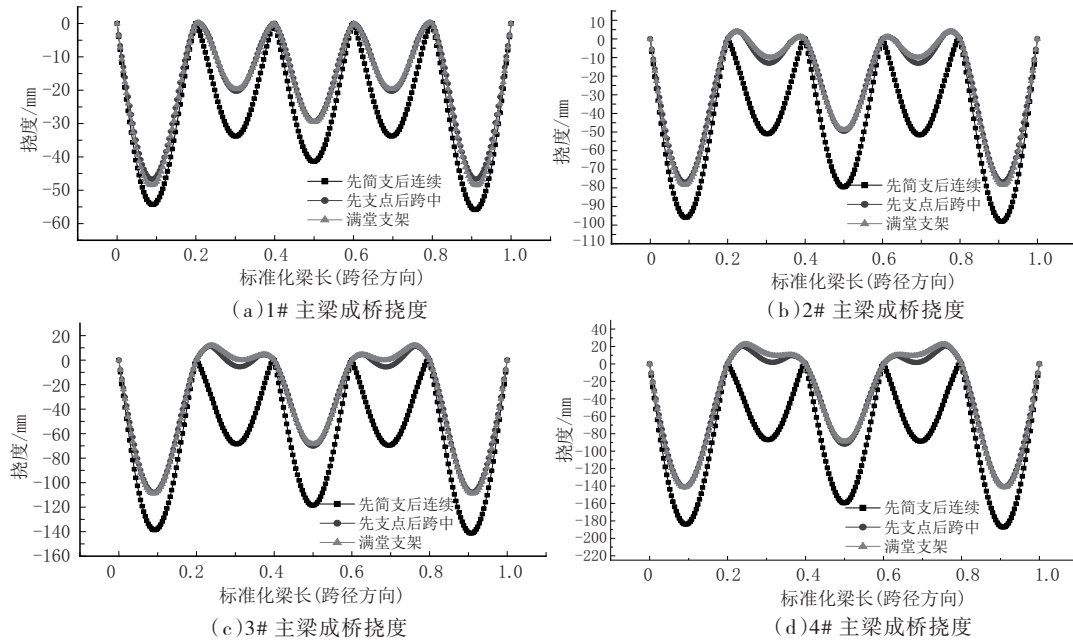


图6 各施工方法主梁成桥挠度对比

桥面板铺装后产生很小的反拱)。

(2)各主梁在边跨跨中截面正挠度最大,在次边跨支点截面负挠度最大,提取各施工方法下主梁的最大挠度对比见表3、表4。从表中可以计算出,采用先简支后连续施工方法,1#~4#主梁的最大恒载正挠度比先支点后跨中施工方法分别高约19.6%、27.4%、31.0%、32.9%,最大恒载负挠度分别低约16.2%、76.3%、85.6%、88.0%。采用先支点后跨中施工方法,1#~4#主梁的最大恒载正挠度和满堂支架施工方法相差在4%以内,最大恒载负挠度除1#梁相差为16.1%外(1#负挠度大小都不超过1mm),其他主梁相比相差不超过8%。通过分析可知,采用先简支后连续施工方法,各主梁的恒载正挠度最大,负挠度最小;采用先支点后跨中和满堂支架施工,各主梁恒载挠度几乎相同。

表3 各施工方法主梁边跨跨中截面恒载挠度对比 单位:mm

施工方法	1#	2#	3#	4#
先简支后连续	-55.8	-98.2	-141.4	-187.3
先支点后跨中	-46.7	-77.0	-107.9	-140.9
满堂支架	-48.5	-78.4	-108.9	-141.4

表4 各施工方法主梁此边跨支点截面恒载挠度对比 单位:mm

施工方法	1#	2#	3#	4#
先简支后连续	0.23	0.93	1.66	2.51
先支点后跨中	0.27	3.91	11.54	20.94
满堂支架	0.33	4.19	12.13	22.73

### 3 施工方法对横梁力学性能的影响

#### 3.1 施工方法对横梁内力的影响分析

通过MIDAS Civil计算出各施工方法在施工最不利状态下和运营最不利状态下横梁内力,并进行对比分析,结果见表5、表6及图7、图8。同时可以得出以下结论:

表5 各施工方法施工最不利状态下横梁最大内力 单位:kN·m

施工方法	最大正弯矩	最大负弯矩
先简支后连续	648.3	1 066.1
先支点后跨中	867.1	920.6
满堂支架	901.9	884.9

表6 各施工方法运营最不利状态下横梁最大内力 单位:kN·m

施工方法	最大正弯矩	最大负弯矩
先简支后连续	1 880.0	6 127.5
先支点后跨中	1 703.4	6 114.3
满堂支架	1 658.0	6 116.4

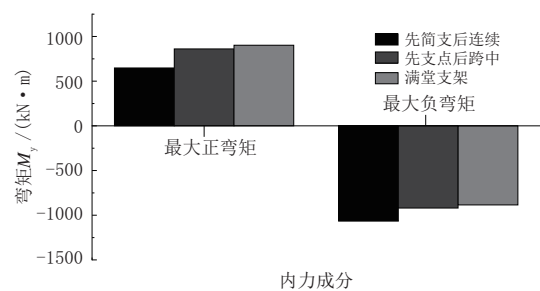


图7 各施工方法施工最不利状态下横梁最大弯矩值对比

(1)各施工方法在施工最不利状态,横梁正弯矩最大值出现在次边跨支点处横梁与4#梁连接位置。

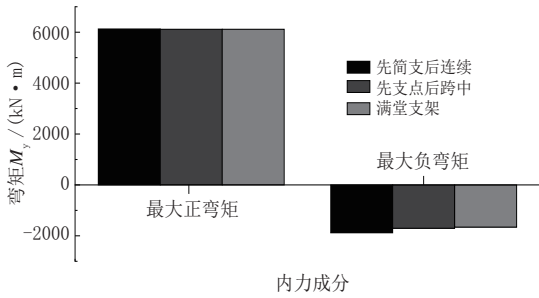


图 8 各施工方法运营最不利状态下横梁最大弯矩值对比

从图 7 中可以看出,满堂支架施工方法在所有施工方法中横梁正弯矩最大,其值为 901.9 kN·m;先支点后跨中施工方法横梁最大正弯矩为 867.1 kN·m;先简支后连续施工方法横梁最大正弯矩为 648.3 kN·m。横梁的负弯矩最大值出现在边跨跨中横梁与 4# 连接位置,满堂支架施工方法横梁最大负弯矩最小,为 -884.9 kN·m;先支点后跨中施工方法次之,最大负弯矩为 -920.6 kN·m;先简支后连续施工方法最大,最大负弯矩为 -1 066.1 kN·m。

(2)各施工方法在运营最不利状态,从内力等值线图中可以看出,其最大正弯矩和最大负弯矩分布位置与施工最不利状态相似。从图 8 可以看出,各施工方法下横梁最大正负弯矩差别很小。经计算,横梁正弯矩值相差小于 0.3%,负弯矩相差小于 13.4%。

### 3.2 施工方法对横梁应力的影响分析

分析各施工方法在运营最不利状态下横梁的应力,结果见表 7 和图 9。从中可以得出:横梁的最大拉应力出现在边支点横梁与 4# 梁连接处的截面上翼缘,最大压应力出现在次边跨支点横梁与 4# 梁连接处的截面上翼缘。先支点后跨中施工方法横梁的最大拉压应力最小,经计算最大拉应力比先简支后连续小 16.7%,比满堂支架施工小 4.2%。最大压应力比先简支后连续小 19.3%,比满堂支架施工小 7.7%。

## 4 结 语

先简支后连续施工方法会使主梁产生较大的内

表 7 各施工方法运营最不利状态下横梁最大应力 单位:MPa

施工方法	最大拉应力	最大压应力
先简支后连续	137.7	133.8
先支点后跨中	114.5	108.0
满堂支架	119.8	117.3

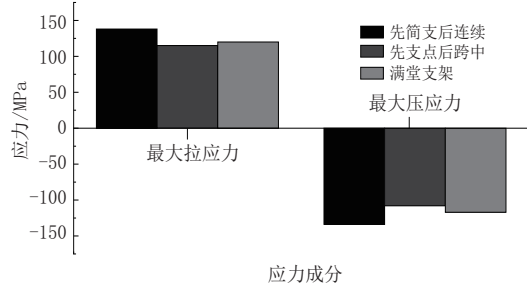


图 9 各施工方法运营最不利状态下横梁最大拉应力值对比

力,主梁截面的应力也较大,以至于截面强度安全系数仅为 1.05,危及结构的安全性。且采用该施工方法的主梁挠度最大,进而危及结构的适用性,从结构力学性能角度考虑,不宜选用此主梁施工方法。先支点后跨中和满堂支架施工方法,从主梁内力、应力、挠度及横梁内力、应力上对比分析可知,结构的受力性能相似,结构受力均匀,结构内力及应力峰值均较小。因此,可以结合实际情况选择先支点后跨中或满堂支架施工方法。

### 参考文献:

- [1] 刘玉擎.组合结构桥梁[M].北京:人民交通出版社,2005.
- [2] 迪根库布.混凝土箱梁桥[M].北京:人民交通出版社,1981.
- [3] 穆祥纯.我国城市桥梁建设的创新与发展[C]//第十八届全国桥梁学术会议论文集(上册).北京:人民交通出版社,2008:146-153.
- [4] 姚宝文.关于中小曲线梁桥设计的分析[J].城市建设理论研究,2014(14):1-3.
- [5] 于金琪.横隔板设置对小箱梁的作用[J].四川建筑,2009,29(1):135-136.
- [6] 王健.城市组合梁桥施工方法概述[J].城市道桥与防洪,2020,253(5):208-212.
- [7] 王炎.大跨度连续弯梁桥施工控制关键技术研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [8] 邵长宇.梁式组合结构桥梁[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.

(上接第 48 页)

- [6] 贺耀北,方博夫,刘榕,等.中小跨整体预制 II 形钢板组合梁力学与经济性研究[J].公路交通科技,2019,36(12):62-68.
- [7] 苏庆田,戴昌源,许园春.分离式双箱组合梁斜拉桥收缩徐变效应分析[J].结构工程师,2015,31(3):56-62.
- [8] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].

- [9] 刘永健,高诣民,周绪红,等.中小跨径钢-混凝土组合梁桥技术经济性分析[J].中国公路学报,2017,30(3):1-13.
- [10] 刘界鹏,周保旭,余洁,等.装配整体式钢-混凝土组合梁栓钉抗剪连接件受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2017,38(S1):337-341.