

不同预制方式下大跨度组合梁桥受力性能分析

刘安^{1,2}, 王欣卉³, 陈志泉⁴, 习明星^{1,2}, 邵志超², 苏庆田³

(1.江西省交通投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330025; 2.江西交通咨询有限公司, 江西 南昌 330008;

3.同济大学桥梁工程系, 上海市 200092; 4.中铁二十一局集团第三工程有限公司, 陕西 咸阳 713500)

摘要: 为了明确整体预制大跨度 π 形钢混组合梁与分离预制组合梁的受力性能, 结合实际工程, 采用板壳-实体有限元方法, 计算了两种大跨度组合梁受力性能。计算结果表明: 在成桥阶段整体预制组合梁的钢梁应力比分离预制组合梁的小很多, 两种组合梁钢梁上缘的最大压应力分别为 84.3 MPa 和 229.0 MPa, 下缘的拉应力分别为 167.3 MPa 和 196.0 MPa, 两种组合梁中支点处混凝土上缘应力基本相同。钢梁在成桥十年时, 两种组合梁钢梁上缘的最大拉应力增量分别为 88.1 MPa 和 -4.0 MPa。整体预制组合梁的混凝土最大拉应力为分离预制组合梁的 0.67 倍。另外, 在施工效率和施工质量方面, 山区建造大跨度组合梁桥采用整体预制方式具有明显的优势。

关键词: 桥梁工程; 组合梁; 预制; 施工; 受力性能

中图分类号: U441

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)03-0044-05

0 引言

钢混组合结构桥梁是钢材与混凝土通过剪力连接件相结合, 充分发挥了钢材的抗拉性能和混凝土的抗压性能, 力学性能和经济性都更好, 已经成为桥梁结构形式的一个重要分支^[1-2]。随着我国交通运输业的发展和劳动力成本的逐年增加, 对环保节能等因素的要求也在提高, 桥梁快速化施工也有了更高的要求, 因此开展预制装配式钢混组合梁桥施工方法的相关研究也成为必需^[3-4]。

组合梁的建造方法比较常见的是钢梁现场整体架设、预制混凝土桥面板存放 6 个月后安装形成组合截面, 本文中称这种施工方法为分离预制。常规分离预制组合梁施工时钢梁通过整跨吊装或顶推方法安装到桥墩上, 再安装预制的桥面板, 钢梁和桥面板自重由钢梁承担, 不能充分发挥组合结构的优势, 施工现场有大量的安装和浇筑工作, 施工复杂繁琐、工期长、效率低, 施工易受外界因素影响, 施工质量不易保证^[5-7]。组合梁还可以采用把钢梁和混凝土桥面板整体预制, 形成组合截面后把组合梁整体吊装到桥墩上, 本文称这种施工方法为整体预制。为了理清大跨度组合梁采用上述两种建造方式的区别, 本文

开展了两种不同预制方式下的大跨度 π 形组合梁受力性能研究, 对整体预制大跨度钢混组合梁与分离预制大跨度钢混组合梁的受力性能、施工性能进行对比分析。

1 工程背景介绍

本文的背景项目为德州至上饶高速公路赣皖界至婺源段新建工程, 全线位于江西省婺源县。项目的凤山水特大桥、南山路特大桥、新亭特大桥、十亩特大桥和花园大桥五座大桥完全采用 60 m/30 m 跨径装配式整体预制钢板混凝土组合梁上部结构, 桥梁总长共计 6 210 m。本文研究内容为 3 × 60 m 跨径的 π 形钢混组合梁整体预制与分离预制两种预制方式的受力性能。

1.1 π 形组合梁的截面形式和尺寸

60 m 跨径的 π 形钢混组合梁主梁采用“工字型钢梁 + 混凝土桥面板”的组合结构, 钢梁和混凝土桥面板通过焊钉连接件连接起来。钢主梁材质选用 Q420D, 混凝土桥面板选用 C55 混凝土, 钢筋选用 HRB400 钢筋。单幅桥采用四片工字梁组成的“双 π 形”结构, 梁高 3.0 m。混凝土桥面板宽 12.75 m, 厚 0.25 m, 混凝土板悬臂长 1.25 m。钢主梁主要由上翼缘板、腹板、腹板纵横加劲肋、下翼缘板及横梁组成。单片钢主梁高度 2.75 m, 钢主梁中心间距 3.3 m、3.65 m, 上翼板宽 0.6 m, 下翼板宽 0.8 m、0.9 m (跨中)。在墩顶及跨间位置, 各片钢梁间设置横向联结系, 以桥跨

收稿日期: 2023-03-09

作者简介: 刘安(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁建设管理工作。

中心线为对称中心,向两侧墩中心线每5 m设置一道横梁,在墩、台顶支撑处以及跨中采用实腹式横梁,跨间其他位置采用“K”形桁架式横梁。主梁横断面如图1所示。

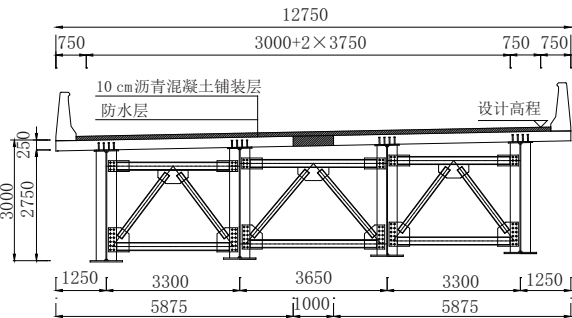


图1 主梁横断面图(单位:mm)

1.2 整体预制和分离预制的施工方法

60 m 跨径的钢梁沿全桥长度方向分为 7 个节段。钢梁节段在工厂制造、试拼装,制造完成后运输到现场。单跨钢梁总体布置如图2所示。

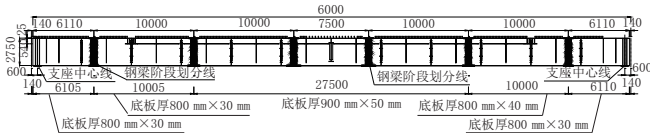


图2 单跨钢梁总体布置图(单位:mm)

对于整体预制组合梁,现场设置梁场,在梁场胎架上先按照制造线形、预拱度拼装钢梁节段及横梁,立模板浇筑混凝土桥面板进行结合,桥面板养护完成后拆除模板,形成单片 π 形梁。单片 π 形组合梁由 2 片工字型钢梁和宽度 5.875 m 的混凝土桥面板组成。双 π 形梁的混凝土桥面板之间通过浇筑 1.0 m 宽的纵向湿接缝连接,相邻两跨预制组合梁在桥墩墩顶位置预留 1.2 m 宽度的横向湿接缝。运用先简支后连续的施工工艺,分别架设每一片 π 形梁,利用施工吊架安装两片 π 形梁之间的钢横梁,通过高强螺栓与钢纵梁栓接。先浇筑纵向湿接缝,后浇筑横向湿接缝,将单片 π 形组合梁连为三跨钢梁简支-混凝土桥面板连续的组合梁桥。

对于分离预制组合梁,钢梁与混凝土桥面板分别加工制造,混凝土桥面板预制完成后存放 6 个月。钢梁节段在现场拼装完成后整体架设,待所有钢梁架设组装完成后,安装正负弯矩区的预制混凝土桥面板形成组合截面。预制混凝土板宽 5.875 m,长 2.5 m,3 × 60 m 跨径共需 120 块混凝土桥面板。纵向湿接缝宽 1 m,横向湿接缝宽 0.5 m。在安装预制混凝土桥面板时,先安装正弯矩区桥面板三跨共 $(17+14+17) \times 2=96$ 块,浇筑正弯矩区湿接缝,然后安装负弯矩区桥面板 $(6+6) \times 2=24$ 块,再浇筑负弯矩区湿接

缝,最后形成三跨钢梁简支-混凝土桥面板连续的组合梁桥。

2 计算方法及荷载

2.1 有限元模拟方法

采用通用有限元软件 ANSYS 建立全桥板壳-实体有限元模型进行计算。钢主梁、横隔板以及纵横加劲肋采用 shell181 单元,混凝土桥面板采用 solid95 单元,钢梁横撑采用 beam188 单元,焊钉采用 combin14 单元模拟。建模时不考虑桥面横坡及纵坡,同时忽略混凝土板中钢筋的作用。钢梁顶、底板、腹板及其他采用高强螺栓拼接处,建模时视作板件连续处理。钢梁间横隔板和“K”形横撑与钢板梁采用节点耦合连接。全桥共划分单元约 28 万个,节点约 61 万个。整体预制组合梁和分离预制组合梁的单跨梁体有限元模型如图3和图4所示。



图3 整体预制组合梁有限元模型

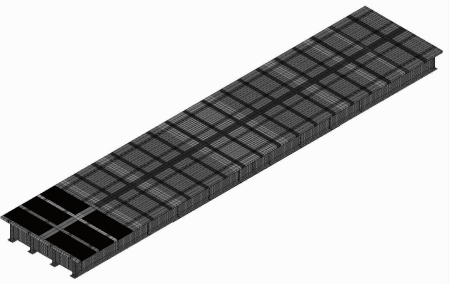


图4 分离预制组合梁有限元模型

梁体支座布置如图5所示。

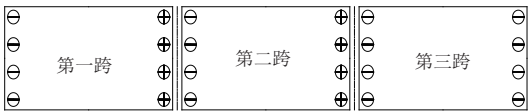


图5 支座布置图

2.2 荷载介绍

计算主要考虑恒载和活载的组合,其中恒载包括钢梁重量、混凝土桥面板重量、混凝土湿接缝重量、桥面铺装、护栏、辅助设施以及收缩徐变作用,活载包括汽车荷载和温度荷载。结构自重按照构件实际断面计入,二期恒载按均布荷载施加,温度作用采用单元升降温方式施加,收缩按单元等效降温施加,通过改变相应年限的混凝土参数来考虑徐变作用,

车道荷载为横向三车道,未考虑偏载作用,设计荷载等级为公路-I级,均布荷载三跨满布,集中力作用于中跨跨中位置。

3 计算结果

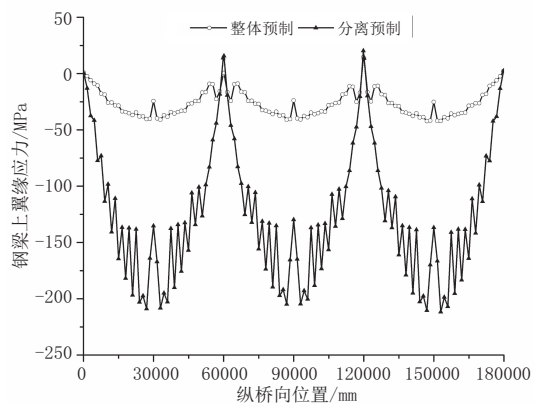
为探究整体预制和分离预制两种施工方法对组合梁受力和变形的影响,本文计算组合梁承载能力极限状态下作用的基本组合,选择恒载、成桥初期、运营情况三个时间对比分析。荷载以及各种作用的数值按照实际结构采用,各种作用的系数按照《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)的有关规定采用。

3.1 恒载作用下两种组合梁的受力情况

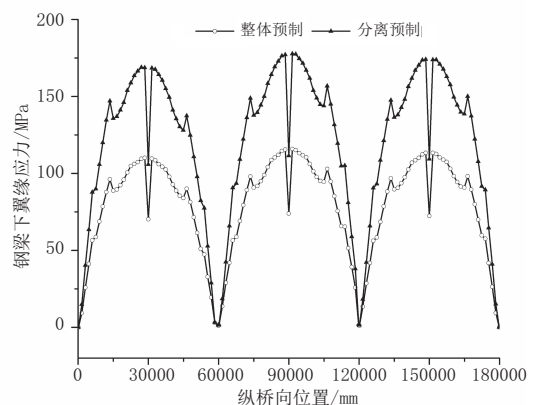
两种预制组合梁在恒载作用下钢梁上缘和下缘纵桥向应力分布如图6所示。整体预制组合梁钢梁上缘的最大压应力为42.2 MPa,下缘的最大拉应力为115.9 MPa;分离预制组合梁钢梁上缘的最大压应力为211.9 MPa,下缘的最大拉应力为177.6 MPa。最大拉压应力均出现在跨中截面附近。可以看出分离预制组合梁的钢梁受力远大于整体预制组合梁的钢梁受力,前者的钢梁上缘和下缘受力分别为后者的5.02倍和1.53倍,主要是前者承担了全部的钢梁与混凝土桥面板的自重,而后者是组合梁承担了全部的荷载。因此,恒载作用下钢梁在相同应力水平时,采用整体预制组合梁会比采用分离预制组合梁节省钢材用量在50%以上,对于长线连续梁采用整体预制组合梁具有明显的经济优势。

对于两种预制组合梁,取1.5跨混凝土桥面板90 m长度段进行应力描述,混凝土桥面板上表面纵桥向正应力云图如图7所示。两种预制方法中支点处的混凝土桥面板与钢梁接触处产生应力集中,分离预制方法正弯矩区段混凝土桥面板与4片钢梁接触处产生明显的应力集中。两种组合梁混凝土的最大拉应力均出现在中间支点附近,整体预制组合梁混凝土桥面板上表面最大拉应力为9.2 MPa,最大压应力9.7 MPa,分离预制组合梁混凝土桥面板上表面最大拉应力为10.9 MPa,最大压应力6.8 MPa。分离预制组合梁的混凝土拉应力略大于整体预制组合梁,为后者的1.18倍,但前者的压应力较小,为后者的0.70倍。

在恒载作用下整体预制组合梁和分离预制组合梁最大竖向挠度分别为109.3 mm和248.1 mm,后者为前者的2.28倍,在减少组合梁的预拱度设置方



(a) 钢梁上翼缘纵桥向应力



(b) 钢梁下翼缘纵桥向应力

图6 钢梁纵桥向应力(单位:MPa)

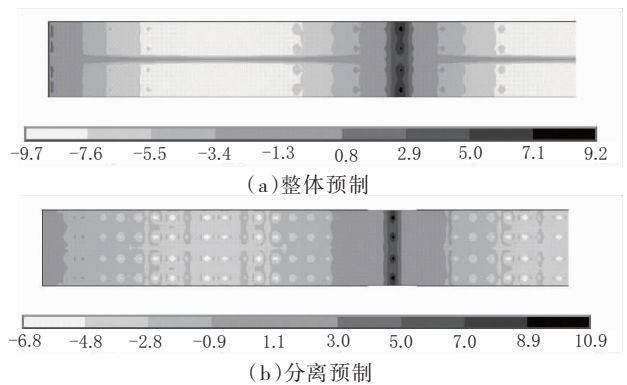


图7 混凝土桥面板上表面纵桥向应力云图(单位:MPa)

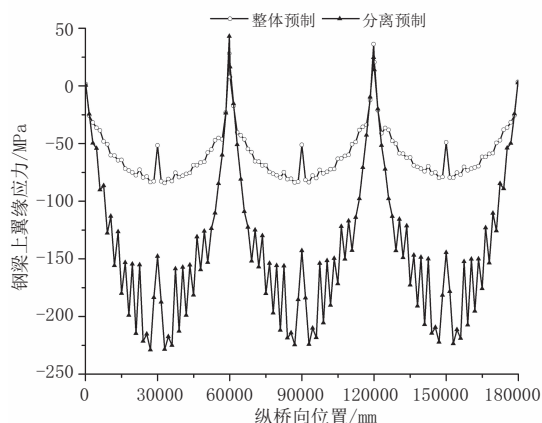
面,整体预制组合梁具有较好的优势。

3.2 成桥初期两种组合梁的受力

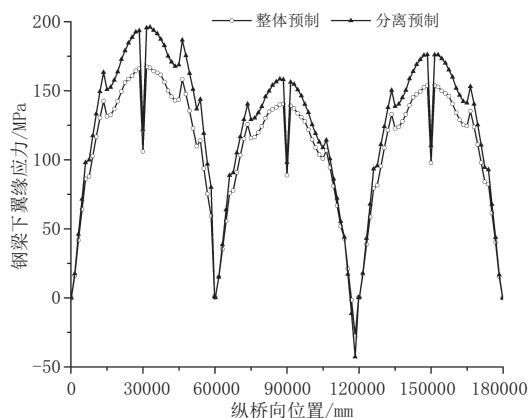
计算分析两种预制方式的组合梁在成桥初期的受力和变形情况。整体预制组合梁考虑恒载作用、混凝土6个月的收缩和温度效应。由于分离预制组合梁的混凝土桥面板放置6个月后进行安装,故仅考虑恒载作用和温度效应。

两种预制组合梁在成桥初期阶段钢梁上缘和下缘纵桥向应力分布如图8所示。整体预制组合梁钢梁上缘的最大压应力为84.3 MPa,下缘的最大拉应力为167.3 MPa;分离预制组合梁钢梁上缘的最大压应力为229.0 MPa,下缘的最大拉应力为196.0 MPa。

可以看出分离预制组合梁的钢梁受力仍大于整体预制组合梁的钢梁受力,前者的钢梁上缘和下缘受力分别为后者的2.72倍和1.17倍。相比于恒载作用下的钢梁受力,两种不同预制方式组合梁的钢梁受力差值有较大幅度的减少。



(a) 钢梁上翼缘纵桥向应力



(b) 钢梁下翼缘纵桥向应力

图8 钢梁纵桥向应力(单位:MPa)

对于两种预制组合梁,混凝土桥面板上表面纵桥向正应力云图如图9所示。两种组合梁混凝土的最大拉应力均出现在中间支点附近,整体预制组合梁混凝土桥面板上表面最大拉应力为19.1 MPa,最大压应力14.6 MPa,分离预制组合梁混凝土桥面板上表面最大拉应力为19.7 MPa,最大压应力11.0 MPa。分离预制组合梁的混凝土拉应力与整体预制组合梁大致相等,但前者的压应力较小,为后者的0.75倍。

在成桥初期整体预制组合梁和分离预制组合梁最大竖向挠度分别为177.8 mm和277.8 mm,后者为前者的1.56倍。相比于恒载作用下两种不同预制方式组合梁的竖向挠度差值也有较大幅度的减少。

相比于恒载作用,成桥初期两种预制方式组合梁之间的钢梁应力和挠度差值减小,主要是由于整体预制方式混凝土在成桥初期有6个月收缩作用产生的。

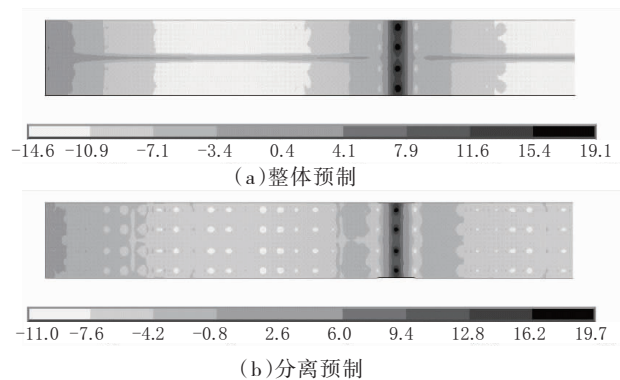
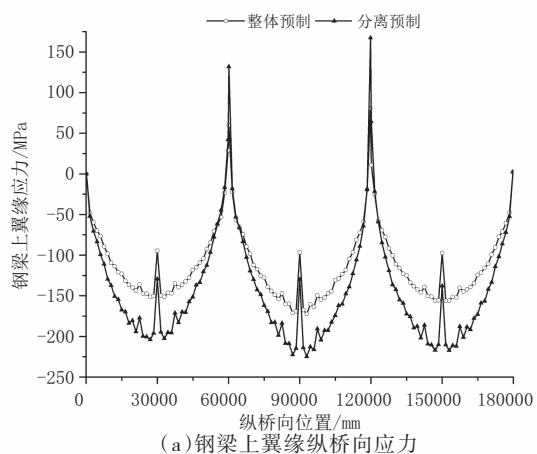


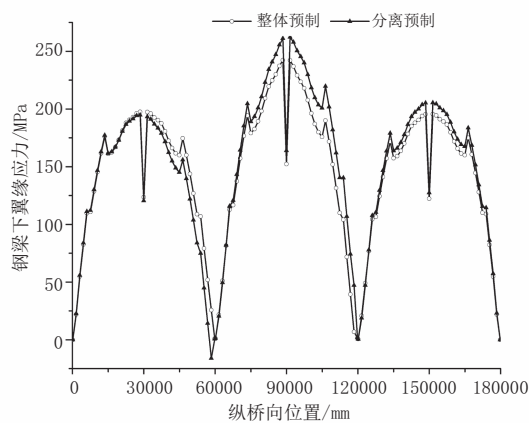
图9 混凝土桥面板上表面纵桥向应力云图(单位:MPa)

3.3 运营情况下两种组合梁的受力

两种预制组合梁在运营情况下钢梁纵桥向上缘和下缘应力分布如图10所示。整体预制组合梁钢梁上缘的最大压应力为172.4 MPa,下缘的最大拉应力为242.3 MPa;分离预制组合梁钢梁上缘的最大压应力为225.0 MPa,下缘的最大拉应力为262.2 MPa。可以看出分离预制组合梁的钢梁受力仍大于整体预制组合梁的钢梁受力,前者的钢梁上缘和下缘受力分别为后者的1.31倍和1.08倍。相比于成桥初期,在长期运营情况下两种不同预制方式组合梁的钢梁受力差值又有较大幅度的减少,两种预制方式的钢梁应力水平相差不到10%。



(a) 钢梁上翼缘纵桥向应力



(b) 钢梁下翼缘纵桥向应力

图10 钢梁纵桥向应力(单位:MPa)

对于两种预制组合梁,混凝土桥面板上表面纵向桥向正应力云图如图 11 所示。两种预制方法中支点处的混凝土桥面板与钢梁接触处产生应力集中。两种预制组合梁混凝土桥面板最大拉应力出现在中支点处,最大压应力出现在中跨跨中。整体预制组合梁混凝土桥面板上表面最大拉应力为 34.2 MPa,最大压应力 30.4 MPa,分离预制组合梁混凝土桥面板上表面最大拉应力为 51.4 MPa,最大压应力 26.5 MPa。分离预制组合梁的混凝土拉应力为整体预制组合梁的 1.50 倍,但前者的压应力较小,为后者的 0.87 倍。两种组合梁在正常使用情况下,中支点附近的混凝土均要发生开裂,从按弹性计算得到的混凝土应力水平看,采用整体预制组合梁的混凝土开裂比分离预制组合梁的要轻一些,或者在相同裂缝宽度情况下整体预制组合梁的混凝土钢筋用量要比分离预制的少一些。

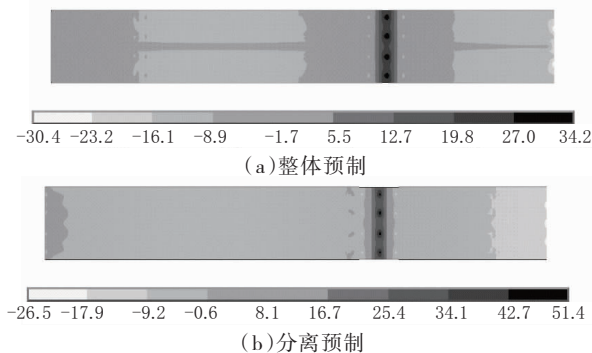


图 11 混凝土桥面板上表面纵向桥向应力云图(单位:MPa)

在运营情况下整体预制组合梁和分离预制组合梁最大竖向挠度分别为 277.5 mm 和 323.2 mm,后者为前者的 1.16 倍。相比于成桥初期两种不同预制方式组合梁的竖向挠度差值在 15% 左右。

4 施工装备与效率问题讨论

对于整体预制组合梁,先整孔吊装组合梁,完成第一跨组合梁的安装。后续桥跨施工时可以采用架桥机逐跨架设,梁段可采用运梁车在架设好的梁上运梁。待所有组合梁安装完成后,浇筑纵横向湿接缝,形成连续组合梁。整体预制组合梁在工厂中加工制作,现场的拼接、浇筑工作较少,组合梁的质量有保障,施工效率高,工期短。这种施工方法可适合山区等地形复杂环境中,节省了施工便道的投入。但整体预制组合梁的架设需要采用大型的吊装机械,常采用架桥机进行架设,一次投入的机械成本高,但若桥梁施工的线路长时,其综合成本低。

对于分离预制组合梁的施工,先架设钢梁,然后

分别安装正、负弯矩区桥面板并浇筑纵横向湿接缝。在现场需要安装大量混凝土板,并浇筑钢梁和混凝土板之间的大量焊钉连接孔。钢梁通过龙门吊或者整联顶推安装架设,不可以梁上运梁,在桥梁沿线一般需要布置施工便道供汽车吊或者龙门吊等行走,整联顶推则需要设置临时墩,在复杂地形区无法使用。由于桥面板的纵向分段预制,存在大量的横向湿接缝,需要现场浇筑,大量现浇段的施工质量也不易控制,混凝土容易出现由于养护不到位过早出现收缩裂缝等问题,施工较复杂、工期长、效率低,施工成本高。

相对于分离预制组合梁,整体预制组合梁不需要现场安装混凝土板,大量减少了横向湿接缝的数量,施工效率较高。钢梁与混凝土之间的连接以及混凝土板安装在工厂内,外界环境的不利因素影响少,质量可控,工业化装配化程度高。

5 结 论

以 3×60 m 跨径的钢混组合梁桥分析了整体预制和分离预制不同施工方式下大跨度钢混组合梁受力性能的差异,得到以下结论:

(1) 相比于分离预制组合梁,整体预制组合梁受力更合理,仅在恒载作用下分离预制组合梁的应力水平比整体预制组合梁的应力高出 50% 以上,随着荷载的增加和时间的增长,两种组合梁的应力水平差值逐渐减少,在长期运营情况下二者钢梁的应力水平最小差值为 8%。同时两种梁体的变形能力呈现出与应力相似的变化规律。

(2) 相比于分离预制组合梁,整体预制组合梁的施工效率更高,在预制场形成的 π 形组合梁具有更高的质量保证率,当采用大型的施工机械运输和吊装整体组合梁节段时在长线桥梁中具有良好的经济性能和推广应用前景。

参考文献:

- [1] 聂建国. 钢-混凝土组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [3] 苏庆田, 胡一鸣, 徐晨, 等. 整体预制钢-混凝土组合梁桥合理结构研究[J]. 建筑钢结构进展, 2020, 22(2): 93-100.
- [4] 王文前. 装配式钢-RPC 轻型组合桥面结构关键技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [5] Peng B, Peng R, Su H, et al. Structural Rationality Research on Integrated Prefabricated I-Shaped Steel-Concrete Composite Girder Bridges[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 455(1): 12-21.

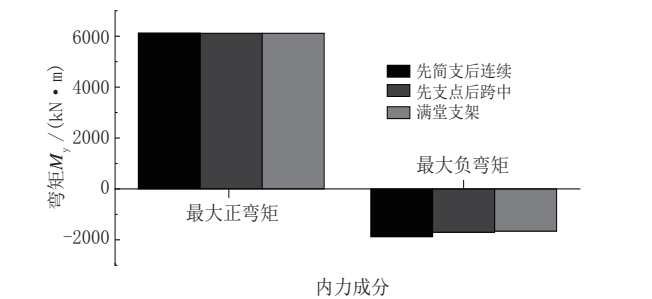


图8 各施工方法运营最不利状态下横梁最大弯矩值对比

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

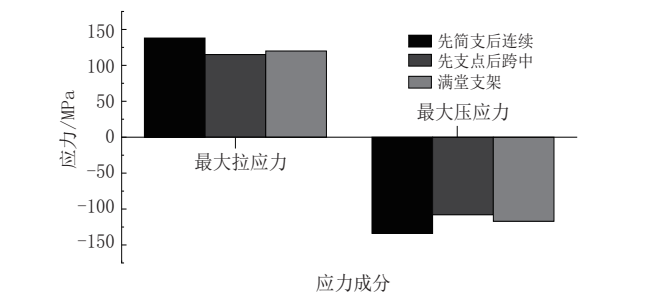


图9 各施工方法运营最不利状态下横梁最大拉应力值对比

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.