

# 波形钢腹板组合梁桥桥面板预应力施加研究与应用

黄启梓

(福建省建筑设计研究院有限公司, 福建 福州 350001)

**摘要:** 为解决波形钢腹板组合梁桥墩顶负弯矩作用下混凝土桥面板受拉问题,探讨了波形钢腹板组合梁桥中施加墩顶预应力的有效方法;基于波形钢腹板组合梁桥的特点,针对墩顶负弯矩导致的混凝土桥面板受拉问题,采用理论分析与工程实例相结合的方式展开研究。通过深入分析桥梁结构的受力特性,提出了一套在不使用预应力束张拉的情况下,对混凝土桥面板施加有效预应力的工艺措施。研究结果表明精心设计的工艺措施能够有效实现对混凝土桥面板的预应力施加。为中大跨径波形钢腹板组合梁桥提供了新的设计思路,即无需预应力束张拉,通过特定工艺措施可对混凝土桥面板施加有效预应力,能有效抵抗恒载和活载产生的拉应力。

**关键词:** 无预应力束;预应力施加;抗裂性能;预加荷载法

**中图分类号:** U448.21

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2025)07-0123-05

## Study and Application of Prestressing on Bridge Deck of Corrugated Steel Web Composite Beam Bridges

HUANG Qizi

(Fujian Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** In order to solve the tensile problem of concrete bridge decks under the negative bending moments at the pier top of composite beam bridges with corrugated steel web plates, the effective method of applying the pier top prestress in composite beam bridges with corrugated steel web plates is discussed. Based on the characteristics of the composite beam bridge with corrugated steel web plates, and focusing on the tensile problem of the concrete bridge deck caused by the negative bending moment at the pier top, the research is carried out through the theoretical analysis and engineering examples. Through in-depth analysis of the stress characteristics of bridge structures, a set of process measures for applying effective prestress to concrete bridge decks without the use of prestressed bundle tensioning has been proposed. The research results confirm that the carefully designed process measures can effectively apply the prestress to concrete bridge decks, which provides a new design concept for medium-span and large-span corrugated steel web composite beam bridges, that is, there is no need for prestressed bundle tensioning. Through the specific process measures, the effective prestressing can be applied to the concrete bridge deck, and can effectively resist the tensile stress caused by dead and live loads.

**Keywords:** no prestressed bundle; prestressing application; crack resistance; pre-loading method

## 0 引言

波形钢腹板组合梁桥起源于20世纪80年代,腹板采用波形钢替换传统混凝土,该结构自重较小,预应力效率高,造价相对较低,是一种经济、合理、高效的结构形式<sup>[1]</sup>。钢梁与混凝土桥面之间采用特定的方式连接,使桥梁具有较高的整体强度与刚度,可以承受重载交通荷载,且无钢桥桥面铺装

易发生病害问题<sup>[3]</sup>。

波形钢腹板组合梁桥是一种特殊的钢-混凝土组合梁桥,其采用波形钢板替代平钢板,抗失稳能力强,无需设置纵横向加劲肋,且由于波形钢板自带的折皱效应,纵向抗弯刚度弱,不存在弯曲引起的腹板失稳问题,无需配置加劲肋,对混凝土桥面板的收缩徐变效应产生的约束较小,预应力损失较小。

根据材料特性,钢-混凝土组合梁桥特别适合简支体系,由于简支梁仅有正弯矩,无负弯矩,受压性能好的混凝土桥面板位于受压区,受拉性能好的钢结构位于受拉区,充分发挥了2种不同工程材料性

收稿日期: 2024-07-01

作者简介: 黄启梓(1984—),男,本科,高级工程师,从事桥梁设计工作。

能。但对于连续梁桥,由于中墩及附近区域为负弯矩区域,该区域混凝土桥面板受拉,而钢箱梁底板受压,故一般情况下均需在组合梁混凝土桥面板施加预应力以抵抗负弯矩产生的拉应力,在钢梁底板上浇注混凝土与钢梁底板共同作用以抵抗巨大的压应力。

钢-混凝土组合梁中墩顶预压力的实现方式有多种,一般可归纳为张拉预应力束法、预加荷载法、支点位移法,以及上述方法的组合运用。与张拉预应力束法相比,预加荷载法和支点位移法仅通过施工工艺措施即可实现对梁体施加预加力,能大大节约工期和造价,具有明显的优势。

目前已建成的中大跨径波形钢腹板组合梁桥,一般采用变截面形式,大多均采用张拉预应力束法,鲜少采用无预应力束布置。庞建利等<sup>[4]</sup>对预应力波形钢腹板桥进行了正弯矩性能试验研究;赵品等<sup>[5]</sup>对外预应力筋对抗弯性能贡献进行了研究;贾文坤等<sup>[6]</sup>分析体内预应力筋竖向偏位和张拉误差对桥梁结构变形、应力及稳定性影响规律。

从现有文献资料可知,目前对有布置预应力束的波形钢腹板组合梁桥研究较多,但是针对无预应力束布置的波形钢腹板组合梁桥研究较少,为了促进这种桥型应用推广,本文以工程实例为背景,运用

计算机仿真分析、对比、验证预加荷载法预压力施加效果,分析预加荷载与桥面板预应力储备的关系,通过研究解决实际工程的关键技术问题,对类似工程设计、建设提出一些建议。

## 1 工程概况

鹅头溪大桥位于福州市连江县,是福州现代物流城重要节点,为城市主干路大桥,设计行车速度为60 km/h。桥梁为5跨连续梁结构,总长280 m,跨径布置为45 m+56 m+78 m+56 m+45 m的无预应力束波形钢腹板组合梁桥,边跨梁高2.0 m,中跨跨中梁高2.0 m,中跨支点4.3 m,梁底高度变化采用2次抛物线。鹅头溪大桥在主跨达到78 m的情况下大胆地尝试采用了无预应力钢筋设计,在满足桥梁安全适用的前提下大大降低了施工难度,具有很好的经济与实用价值,桥梁整体造型轻盈优美,与周围环境相协调(见图1、图2)。

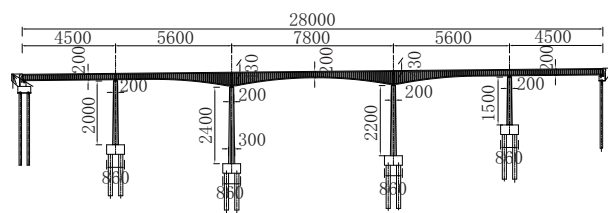


图1 桥型布置图(单位:cm)

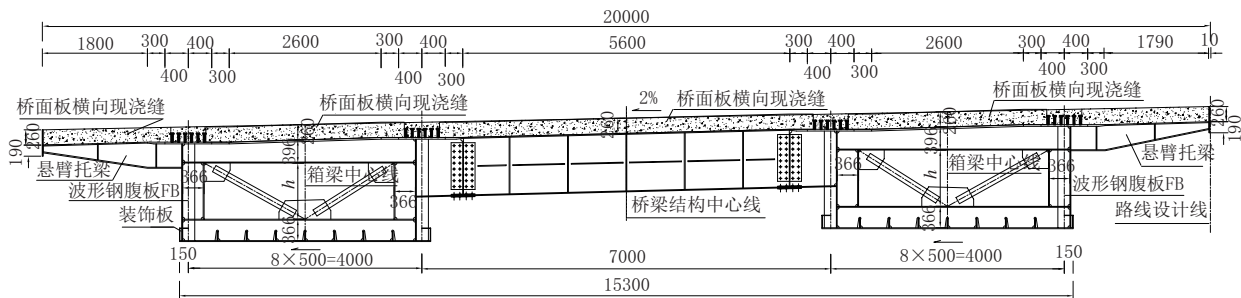


图2 主梁横断面图(单位:mm)

桥梁横向为左右两幅布置,平面处于路平弯段,路线设计线半径 $R=1\ 500\text{ m}$ 。车行道横坡为双向2.0%,每幅横向宽20 m。桥面板为预制普通钢筋混凝土板和现浇普通钢筋混凝土板相结合的方式。

波形钢腹板采用BCSW1600型,波板水平幅宽430 mm、斜幅水平方向长370 mm、波高220 mm。波形钢腹板与顶底板采用焊接连接。由于桥梁平面处于平曲线段,钢腹板采用以折带曲的方法形成道路曲线,腹板节段间采用贴脚焊缝形式连接。每幅桥梁中心线处钢箱梁节段长度划分按照中间腹板波形的整倍数或半整倍数进行划分,两边腹板因弧长造成的非标准波长误差,在梁端主梁节段线附近的波

形平幅段进行统一调整。两道钢纵梁采用大横梁形式,单幅横向两片纵向钢梁采用钢横梁连接,支点位置采用钢箱横梁连接,跨间区域采用工字钢横梁。

钢混组合梁剪力连接件采用焊钉连接,钢纵梁和横梁顶均布置圆柱头焊钉,焊钉规格采用D22×200 mm。

桥面板除支点闭合钢箱区域采用现浇混凝土外,在开口钢箱及钢横梁范围采用矩形预制板,板厚26 cm,纵横向湿接缝连接。横桥向设置5块,箱室顶预制板宽度3.4 m,横梁预制板宽度6.4 m,悬臂预制板宽度2.2 m,预制桥面板顺桥向长度分为2.9 m和3.7 m两种规格,通过湿接缝宽度调整道路曲线对桥

面板预制宽度的影响。混凝土桥面板不仅是组合梁结构中承担纵向力的关键组成部分,而且也是承受车辆和行人荷载的直接构件。本例中预制的混凝土桥面板选用了C50等级的混凝土,以确保其结构性能。此外,为提高结构的抗裂性和耐久性,湿接缝部分采用了C60等级的低收缩钢纤维混凝土,这种材料的选用旨在减少因收缩引起的裂缝,从而提高整体结构的稳定性和承载能力。

## 2 有限元分析模型

### 2.1 结构离散

采用MIDAS Civil软件进行纵向建模分析。鉴于该软件的截面库中未涵盖波形钢腹板箱型截面,为了高效且准确地构建模型,将复杂的波形钢腹板简化为等效的平钢板,据此对主梁进行了等效截面的设计<sup>[7-8]</sup>。主梁采用梁格模型,两条主纵梁之间采用横梁连接,主梁节点与横梁节点采用刚性连接。混凝土桥面板在两纵梁间按分离处理,在纵梁单元间横向布置虚拟横梁模拟桥面板刚度。根据实际情况模拟支座节点,在永久支座及分段吊装临时支撑处设支座节点,主梁与支座节点采用弹性连接。结构离散图如图3所示。



图3 结构模型图

### 2.2 荷载加载

部分较均匀分布的无法模拟或无须模拟的细部构件通过计算模型自重与实际重量的差值以线性荷载加载于梁单元之上。

桥面混凝土浇筑时由于未与钢梁形成组合截面,先以荷载形式加载于钢梁之上,待混凝土强度达到设计值时钝化该荷载并激活组合截面。按该方法建模,钢梁在受到混凝土桥面板自重荷载后再形成组合截面,与实际受力与变形情况相符。

计算桥梁结构因均匀温度作用引起的外加变形或约束变形时,应从受到约束时的结构温度开始,考虑最高和最低有效温度的作用效应<sup>[8]</sup>。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)可知,该桥址所在地位于我国东南沿海温热地区,混凝土桥面板钢桥最高温度39℃,最低-1℃,该桥约束时温度暂按20℃考虑,故计算时升、降温温差分别取值19、21℃。组合梁梯度温度效应根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)取值,温升 $T_1=14℃$ , $T_2=$

5.5℃;温降 $T_1=-7℃$ , $T_2=2.7℃$ 。

汽车荷载等级采用城—A级,横向折减系数按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)取0.78。多主梁模型的车道荷载需要采用程序中的“横向联系梁”模式加载,为避免模拟车轮作用处无单元导致程序报错,除两纵梁间采用虚拟横梁连接外,桥梁悬臂部分也应建立虚拟横线梁单元。

## 3 预加荷载原理与试算

预加荷载法基于材料力学和结构力学原理,在材料弹性范围内,材料受到应力时会产生弹性变形,当应力消失时,变形会恢复。预加荷载法就是利用这一原理,在连续梁桥梁正弯矩区域预加一定量的临时荷载,使墩顶负弯矩区产生拉伸,浇注负弯矩区混凝土桥面板后,将临时荷载卸载,因弹性变形的恢复使负弯矩区混凝土产生预压力。

### 3.1 主要施工流程

- (1)施工桩基、承台、墩柱等下部结构,安装永久支座,工厂分块预制桥面板,工厂加工钢梁;
- (2)搭建临时支墩,安装临时支座;
- (3)钢梁分段吊装并纵向、横向连接;
- (4)浇筑墩顶底衬混凝土、腹板内衬混凝土、横梁混凝土;
- (5)在正弯矩区段,安装预制混凝土桥面板,并浇筑纵横向湿接缝,确保桥面板与钢梁之间的紧密连接;
- (6)正弯矩区段桥面纵横向湿接缝混凝土强度满足设计规定值后,拆除全部临时支撑,完成体系转换;
- (7)在正弯矩区段布置临时荷载(水箱),严格按设计规定值加载;
- (8)安装负弯矩(中支点附近)区段预制混凝土桥面板,浇筑纵横向湿接缝并养护;
- (9)水箱同步卸载,主梁施工完成。

### 3.2 临时荷载施加试算

为得到最优的预加荷载值,设计时对预加荷载值进行试算,加载区间为各跨跨中位置,预加荷载采用线荷载进行模拟,分别取60、90、120 kN/m进行试算(见图4)。

桥梁的纵向结构设计为对称分跨,因此,只展示一半的数据结果(见表1至表4)。

从计算结果可知:临时水箱荷载分别采用60、90、120 kN/m时,对跨中桥面上下缘应力影响甚微,对墩

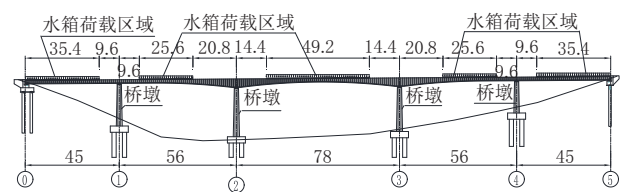


图4 临时荷载加载区域(单位:m)

表1 水箱卸载阶段桥面板上缘应力 单位:MPa

| 加载/<br>(kN·m <sup>-1</sup> ) | 节点号       |           |           |           |           |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                              | 第一孔<br>跨中 | 1#墩<br>墩顶 | 第二孔<br>跨中 | 2#墩<br>墩顶 | 第三孔<br>跨中 |
| 60                           | 4         | 1.3       | 1.4       | 1.7       | 4.7       |
| 90                           | 4         | 2.1       | 1.6       | 2.6       | 4.8       |
| 120                          | 4         | 2.9       | 1.7       | 3.5       | 5.0       |

表2 水箱卸载阶段桥面板下缘应力 单位:MPa

| 加载/<br>(kN·m <sup>-1</sup> ) | 节点号       |           |           |           |           |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                              | 第一孔<br>跨中 | 1#墩<br>墩顶 | 第二孔<br>跨中 | 2#墩<br>墩顶 | 第三孔<br>跨中 |
| 60                           | 2.6       | 0.8       | 0.8       | 1.4       | 3.2       |
| 90                           | 2.6       | 1.3       | 0.9       | 2.2       | 3.4       |
| 120                          | 2.6       | 1.8       | 1.0       | 3.0       | 3.5       |

表3 二期恒载加载阶段桥面板上缘应力 单位:MPa

| 加载/<br>(kN·m <sup>-1</sup> ) | 节点号       |           |           |           |           |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                              | 第一孔<br>跨中 | 1#墩<br>墩顶 | 第二孔<br>跨中 | 2#墩<br>墩顶 | 第三孔<br>跨中 |
| 60                           | 5.2       | -0.2      | 1.4       | 0.1       | 6.2       |
| 90                           | 5.2       | 0.6       | 1.5       | 1.0       | 6.4       |
| 120                          | 5.2       | 1.3       | 1.7       | 1.8       | 6.6       |

表4 二期恒载加载阶段桥面板下缘应力 单位:MPa

| 加载/<br>(kN·m <sup>-1</sup> ) | 节点号       |           |           |           |           |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                              | 第一孔<br>跨中 | 1#墩<br>墩顶 | 第二孔<br>跨中 | 2#墩<br>墩顶 | 第三孔<br>跨中 |
| 60                           | 3.4       | -0.3      | 0.8       | 0         | 4.4       |
| 90                           | 3.5       | 0.2       | 0.9       | 0.7       | 4.6       |
| 120                          | 3.5       | 0.6       | 1.0       | 1.4       | 4.7       |

顶桥面板应力影响显著,如1#墩墩顶30#节点处,水箱荷载由60 kN/m增加为90 kN/m,线荷载增加50%,桥面板上缘应力由1.3 MPa增加为2.1 MPa,增加量为53.8%,水箱荷载由90 kN/m增加为120 kN/m,线荷载增加33.3%,桥面板上缘应力由2.1 MPa增加为2.9 MPa,应力增量为38.1%(见图5)。

二期恒载加载后,桥梁跨中正弯矩区段桥面板压应力增大,而桥墩支点负弯矩区段桥面板压应力显著减小,如1#墩墩顶30#节点处,水箱荷载为60 kN/m时,桥面板上、下缘应力由1.3、0.8 MPa减少为-0.2、-0.3 MPa。由计算结果可知,水箱荷载为60 kN/m时,在加载二期恒载作用后,1#墩墩顶桥面板已无预应力储备,出现拉应力。当水箱荷载为90 kN/m时,在加

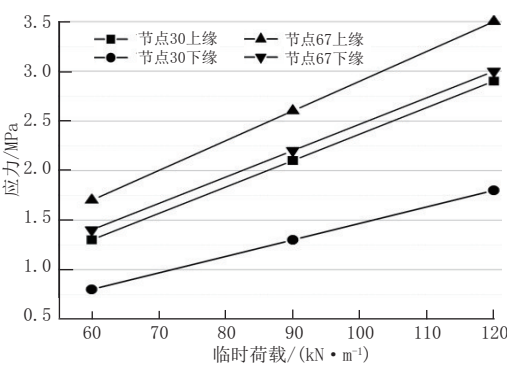


图5 不同临时荷载作用下水箱卸载阶段桥面板应力

载二期恒载作用后,桥面板上、下缘应力为0.6、0.2 MPa,当水箱荷载为120 kN/m时,在加载二期恒载作用后,桥面板上、下缘应力为1.3、0.6 MPa(见图6)。

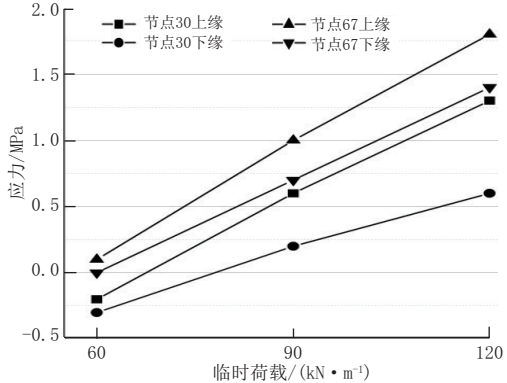


图6 不同临时荷载作用下二期荷载加载阶段桥面板应力

根据对比分析可知,增加临时荷载,对桥面板混凝土应力储备效果明显,桥面板混凝土压应力储备与水箱荷载呈线性关系。实际工程运用中,可根据实际预应力储备需求,如成桥压应力储备值、裂缝宽度等,考虑实际施工条件的限制,如桥梁宽度、可供堆载临时荷载的空间、采用的临时荷载材料等,选择合适的临时荷载值。本例设计时,根据临时荷载加载试算结果及成桥验算结果,选用90 kN/m临时荷载作为设计方案,纵桥向加载位置如图7所示。

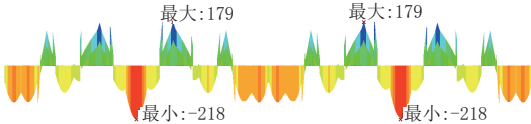


图7 基本组合钢梁顶缘应力(单位:MPa)

4 成桥验算结果

4.1 持久状况应力验算

按照文献《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)提供的公式7.2.1-2验算:验算安全系数最小的位置, $\gamma_0\sigma = -255\text{ MPa} \leq 270\text{ MPa}$ 。根据验算结果可知,在承载能力极限状态下,结构抗弯承载能力均大于弯矩组合值,满足规范要求(见图8)。

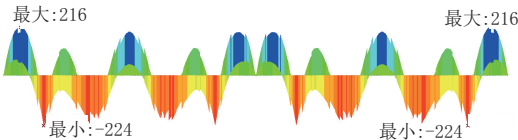


图8 基本组合钢梁底缘应力 (单位:MPa)

4.2 波形钢腹板屈曲验算

波形钢腹板组合屈曲验算按照《波形钢腹板组合梁桥技术标准》(CJJ/T 272—2017)中的公式 5.2.3 验算。

$$\gamma_0(\tau_{md} + \tau_{td}) \leq \tau_{cr}$$
$$\tau_{cr} = \frac{1}{\left( \tau_{cr,L}^4 + \tau_{cr,G}^4 \right)^{\frac{1}{4}}}$$

根据图9可知,包含了剪力以及扭转的截面剪应力设计值 $\gamma_0(\tau_{md} + \tau_{td})$ 小于组合屈曲临界剪应力 $\tau_{cr}$ ,满足规范要求。

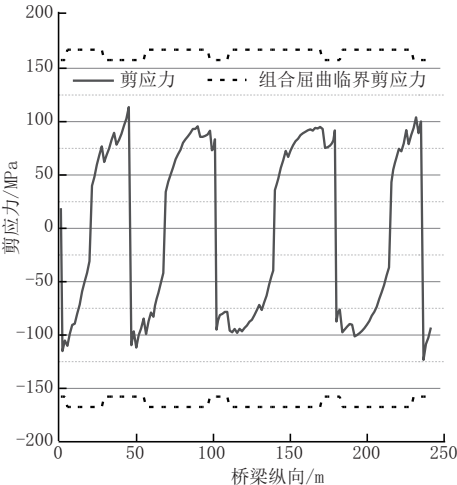


图9 组合屈曲验算

4.4 桥面板裂缝宽度验算

组合梁混凝土桥面板在正常使用极限状态下最大裂缝宽度应按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)计算,由作用频遇值组合效应引起的开裂截面纵向受拉钢筋应力 $\sigma_{ss}$ 应按文献《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)中第 7.5.2 条计算。

计算混凝土桥面板裂缝宽度,效应采用荷载频遇值组合。由图10验算结果可知,桥面板最大裂缝宽度为0.16 mm,满足规范要求。

5 结 语

本文通过有限元计算分析预加荷载量与墩顶负

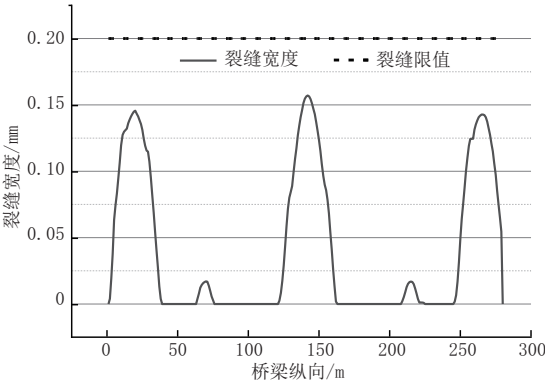


图10 频遇值组合桥面板裂缝宽度

弯矩区预压力储备的关系,表明预加荷载量与实现的预应力储备值呈线性关系。确定合适的预加荷载量对于桥梁设计至关重要,应综合考虑桥梁的跨径、宽度、临时堆载材料等因素,并结合成桥后的验算结果来作出选择。

目前,通过预加荷载法对中大跨径波形钢腹板组合梁桥进行桥面板负弯矩区施加预压力,达到无须进行预应力束张拉的桥梁案例较少,这种通过施工措施、合理调整桥面板混凝土浇筑顺序即可实现施加预应力效果的工艺比传统通过张拉预应力钢束的方式有明显的优势,具有施工方便快捷、有效降低工程造价的优势。通过工程实例分析研究表明该法在该类桥型中具有很好的推广价值。

参考文献:

[1] 熊锋,郑尚敏.剪切变形对波形钢腹板PC连续梁桥施工中徐变效应的影响[J].公路工程,2019,44(5):9-13;24.  
[2] 代亮,陈宜言,陶慕轩.深圳东宝河新安特大桥设计与创新[J].城市道桥与防洪,2017(1):55-57;70.  
[3] 陈宜言.波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2009.  
[4] 庞建利,毛云程.波形钢腹板箱梁正弯矩区的受力性能研究[J].公路交通科技,2024,41(5):87-96;107.  
[5] 赵品,韩恒涛,荣学亮,等.变截面波形钢腹板连续梁的抗弯性能试验研究[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(3):425-433.  
[6] 贾文坤,安渊博,张宇峰,等.预应力筋偏差对波形钢腹板箱梁桥的受力影响[J].武汉工程大学学报,2023,45(2):220-226.  
[7] 游正君,曹萱,严靖.大跨径波形钢腹板箱梁桥试设计与结构验算[J].工程与建设,2021,35(1):37-40;51.  
[8] 陈冰.大跨无预应力波形钢腹板组合连续梁桥设计关键技术[J].福建建筑,2023(5):112-116.  
[9] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].