

王晓明,白云腾,录哲元,等. 内衬混凝土对预应力导入效率的影响分析及优化[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(2): 80-88.  
WANG Xiao-ming, BAI Yun-teng, LU Zhe-yuan, et al. Analysis and optimization of effect of lining concrete on efficiency of prestressing introduction[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(2): 80-88.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.02.008

# 内衬混凝土对预应力导入效率的影响分析及优化

王晓明<sup>1</sup>, 白云腾<sup>1</sup>, 录哲元<sup>2</sup>, 黄春杨<sup>1</sup>, 王炳玉<sup>1</sup>

(1. 长安大学 桥梁工程研究所, 陕西 西安 710064; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:**针对内衬混凝土对波形钢腹板褶皱效应的约束会致使波形钢腹板组合梁桥支承区的预应力导入效率降低问题,提出一种“先撑后衬”施工方法,通过调整内衬混凝土的施工顺序来改善支承区预应力导入效率;同时提出一种适用于该方法的“内撑外拉”装置,保证施工过程中波形钢腹板的稳定性;推导波形钢腹板组合梁轴向刚度计算公式,并通过简支波形钢腹板组合梁算例验证该公式的准确性。在此基础上,以 1 座四跨波形钢腹板预应力混凝土连续刚构桥为背景,建立 ANSYS 实体有限元模型,分析不同施工方法、内衬混凝土长度及厚度变化对支承区预应力导入效率的影响,并给出内衬混凝土的合理施工工序、合理长度和厚度建议。研究表明:内衬混凝土会削弱波形钢腹板的褶皱效应,显著降低支承区预应力导入效率,同时会导致有内衬梁段与无内衬梁段间的过渡段出现应力集中现象;通过采用所提出的“先撑后衬”施工方法,可以降低支承区组合梁的轴向刚度,从而显著提高支承区预应力导入效率;支承区预应力导入效率随着内衬混凝土长度和厚度的增加而减小;在实桥设计时,建议内衬混凝土最小长度应大于支点处梁高,最大长度应小于 2.15 倍支点处梁高,最大厚度应不小于支点梁高的 6%,最小厚度应满足构造要求。

**关键词:**桥梁工程;CSW-PC 连续刚构桥;有限元模型;内衬混凝土;“先撑后衬”施工方法;预应力导入效率

中图分类号:U445

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2024)02-0080-09

## Analysis and optimization of effect of lining concrete on efficiency of prestressing introduction

WANG Xiao-ming<sup>1</sup>, BAI Yun-teng<sup>1</sup>, LU Zhe-yuan<sup>2</sup>, HUANG Chun-yang<sup>1</sup>, WANG Bing-yu<sup>1</sup>

(1. Institute of Bridge Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Yellow River Engineering Consulting Co. Ltd., Zhengzhou 450003, Henan, China)

**Abstract:** Aimed at the problem that the restraint of the lining concrete on the crease effect of the corrugated steel webs will reduce the prestressing efficiency in the supporting area of composite girder bridges with corrugated steel webs. A “brace first and then lining” construction method, which adjusted the construction sequence of lining concrete, was proposed to improve the prestressing efficiency. An “internal brace and external tension” device was proposed for the

收稿日期:2023-10-27

基金项目:国家自然科学基金项目(52178104);陕西省交通科技项目(19-30K)

作者简介:王晓明(1983-),男,山西朔州人,教授,博士研究生导师,E-mail:wxm@chd.edu.cn。

通讯作者:白云腾(1995-),男,陕西延安人,工学博士研究生,E-mail:1071153073@qq.com。

brace first and then lining construction method to ensure the stability of the corrugated steel webs during construction. The formula for calculating the axial stiffness of composite girders with corrugated steel webs was derived, and the accuracy was verified by an example of simply supported corrugated steel web girder. Based on a four-span corrugated steel web prestressed concrete (CSW-PC) continuous rigid-frame bridge, an ANSYS solid finite element model was established to analyze the effect of different construction methods, variations of lining concrete length and thickness on the prestressing efficiency in the supporting area. And a reasonable construction procedure, length and thickness of lining concrete was suggested. The results show that the lining concrete reduces the crease effect and prestressing efficiency of the corrugated steel webs, and causes a stress concentration in the transition section between the lining and unlining girder sections. By adopting the brace first and then lining method, the axial stiffness of composite girders with corrugated steel webs is reduced and the prestressing efficiency is increased. The prestressing efficiency in the supporting area decreases with the increase of lining concrete's length and thickness. In the actual design, it is recommended that the minimum length of lining concrete should be greater than the height of the girder at the pier, the maximum length should be less than 2.15 times the height of the girder at the support, the maximum thickness should be more than 6% the height of the girder at the support, and the minimum thickness should meet the construction requirements. 14 figs, 23 refs.

**Key words:** bridge engineering; rigid frame bridge with corrugated steel webs; FEM; lining concrete; brace first and then lining construction method; prestressing introduction efficiency

## 0 引言

波形钢腹板组合梁(CSW)通过将传统箱梁中的混凝土腹板或平钢腹板替换为波形钢腹板,形成了一种受力明确(顶底板混凝土抗弯、波形钢腹板抗剪)的新型组合截面,充分体现了钢与混凝土各自的优点<sup>[1]</sup>。CSW可以充分利用其褶皱效应,进而为组合梁提供较强的面外刚度,同时能够显著提高预应力导入效率<sup>[2-3]</sup>。CSW可有效解决传统混凝土腹板的开裂问题,显著提高了材料的使用效率,进而使CSW的自重大幅减轻、跨越能力显著增加。鉴于上述结构优势,CSW近年来在世界各地得到了广泛应用<sup>[4-7]</sup>。

对于大跨径CSW-PC连续刚构桥而言,支承区主梁截面较高且剪力较大,为了避免支承区波形钢腹板发生局部屈曲,一般会在支承区浇筑内衬混凝土<sup>[8]</sup>。内衬混凝土在实际工程中得到了广泛应用与研究,张峰等基于试验验证的有限元模型,对波形钢腹板内衬混凝土部位的抗剪机理进行了深入研究,并提出了钢-混组合梁段腹板的抗剪强度设计公式<sup>[9]</sup>。刘保东等提出内衬混凝土对波形钢腹板箱梁的抗弯、抗扭性能有明显改善作用<sup>[10]</sup>。邓文琴等结合模型试验与数值模拟对变截面CSW桥的抗扭性

能和抗剪性能进行了研究,揭示了内衬混凝土与波形钢腹板的承剪比变化规律<sup>[11]</sup>。Zhang等指出内衬混凝土会有效降低CSW的最大温度梯度<sup>[12]</sup>。Liu等以奉化江大桥为例进行了研究,给出了CSW桥内衬混凝土几何参数的取值范围<sup>[13]</sup>。Deng等研究发现,内衬混凝土可显著降低支撑区的剪切应力,并提出能有效抵抗剪力的内衬混凝土合理厚度<sup>[14]</sup>。He等提出了波形钢腹板内衬混凝土组合梁的弯曲强度、剪切强度计算方法和弯、剪共同作用下的计算相关方程<sup>[15-18]</sup>。

上述研究表明,内衬混凝土能够有效提高CSW的整体受力性能。但与此同时,内衬混凝土也带来了一些新的问题,如增加了支承区组合梁的重量,限制了波形钢腹板的褶皱效应,降低了支承区预应力导入效率<sup>[19]</sup>。针对上述问题,贺君等以1座三跨CSW桥为例,系统性研究了内衬混凝土及其几何参数变化对结构力学性能的影响,并对内衬混凝土几何参数取值进行了合理建议<sup>[20]</sup>。在此基础上,He等提出一种采用垂直或/和水平加劲肋代替内衬混凝土的新型加劲波形钢腹板,并分别通过模型试验和数值模拟对其抗剪性能进行了研究,结果表明,波形钢腹板的抗剪强度可以通过垂直加劲肋和水平加劲肋来提高,垂直加劲

肋不影响波形钢腹板的褶皱效应,但水平加劲肋在局部区域增加了波形钢腹板的轴向刚度,削弱了波形钢腹板的褶皱效应<sup>[21-22]</sup>。

内衬混凝土对 CSW 抗弯、抗剪、抗扭性能的影响已得到了广泛论证和分析。然而,鲜有文献考虑内衬混凝土施工顺序对支承区预应力导入效率的影响。因此,本文提出一种“先撑后衬”施工方法,同时提出一种适用于该方法的“内撑外拉”装置,通过调整内衬混凝土的施工顺序来改善支承区预应力导入效率。通过系统性研究内衬混凝土施工顺序及内衬混凝土的长度和厚度等参数对支承区预应力导入效率的影响,得到内衬混凝土的合理施工顺序及合理长度、厚度,研究结果可为波形钢腹板内衬混凝土的理论研究和实际工程提供依据。

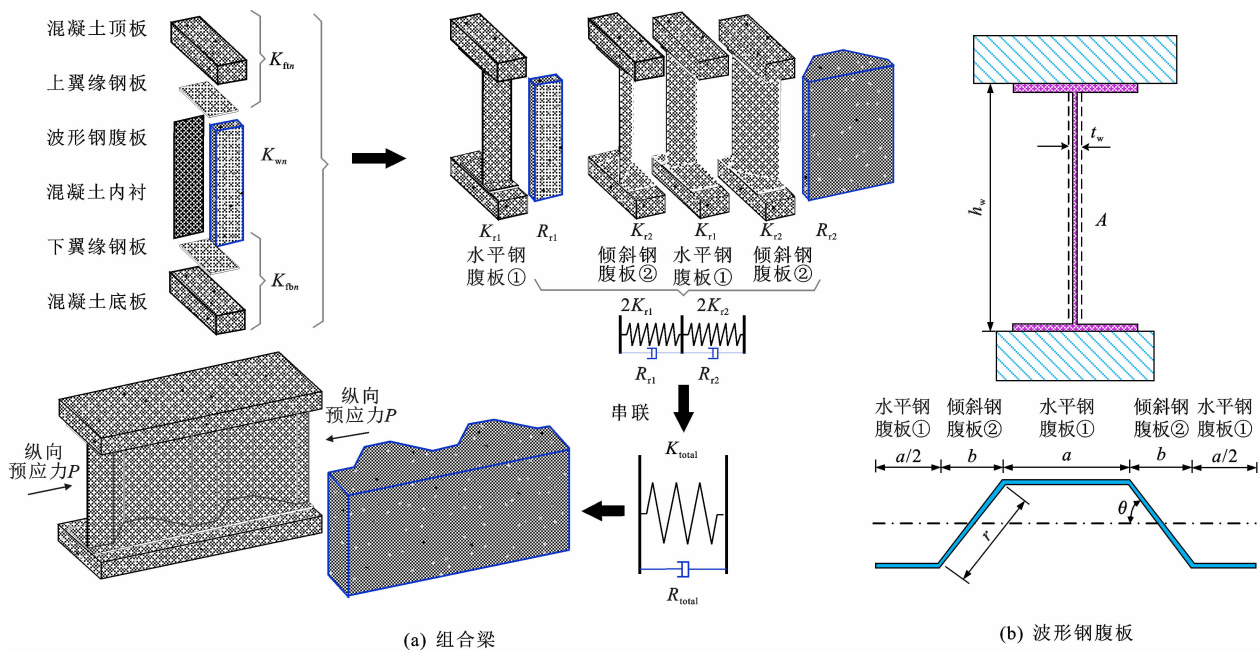


图 1 轴向刚度计算示意

Fig. 1 Calculation schematic of axial stiffness

单个波段的波形钢腹板可进一步划分为 2 个水平钢腹板①和 2 个与腹板轴线成  $\theta$  角的倾斜钢腹板②,如图 1(b)所示。在纵向预应力  $P$  作用下,水平钢腹板①只承受轴向压力;而倾斜钢腹板②同时承受着轴向压力和弯曲力矩。根据卡式定理,波形钢腹板的轴向变形  $\delta$  可以表示为

$$\delta = \frac{1}{EI} \int M \frac{\partial M}{\partial P} dx + \frac{1}{EA} \int N \frac{\partial N}{\partial P} dx \quad (1)$$

式中: $N$  为预应力; $M$  为预应力的偏心弯矩; $E$  为钢腹板的弹性模量; $A$  为腹板的横截面面积( $A = h_w t_w$ ); $I$  为惯性矩( $I = h_w^3 t_w / 12$ ); $h_w$  为腹板的高度; $t_w$  为腹板厚度。

## 1 波形钢腹板组合梁褶皱效应

### 1.1 组合梁轴向刚度分析

图 1 为轴向刚度计算示意。根据卡式定理<sup>[23]</sup>,将无内衬混凝土的 CSW 分解为 3 个子单元:①混凝土顶板+上翼缘钢板( $K_{fn}$ 为上翼缘钢板与混凝土顶板的组合轴向刚度; $n=1,2$ ,分别代表水平、倾斜钢腹板);②波形钢腹板( $K_w$ 为轴向刚度);③混凝土底板+下翼缘钢板( $K_{fb}$ 为下翼缘钢板与混凝土底板的组合轴向刚度),如图 1(a)所示,每个子单元可以应用卡式定理来确定其单元轴向刚度,而无内衬混凝土的波形钢腹板组合梁总轴向刚度  $K_{total}$  可以通过对子单元刚度进行串并联组合得出。

对于水平钢腹板①而言,因为其将受到上下翼缘钢板的约束,弯曲变形远小于轴向变形,因此可忽略弯曲引起的变形。对于倾斜钢腹板②而言,偏心力矩引起的弯曲变形不可忽视。则水平钢腹板①与倾斜钢腹板②的轴向变形  $\delta_1$  和  $\delta_2$  分别如下所示

$$\delta_1 = \frac{1}{EA} \int_0^a P dx = \frac{Pa}{EA} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \delta_2 &= 2 \cos(\theta) \left[ \frac{1}{EI} \int_0^r (P \sin(\theta x)) (\sin(\theta x)) dx + \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{EA} \int_0^r P \cos(\theta) \cos(\theta) dx \right] = \\ &= 2P \cos(\theta) \left( \frac{r^3 \sin^2(\theta)}{3EI} + \frac{r \cos^2(\theta)}{EA} \right) \quad (3) \end{aligned}$$

式中:  $a$  为水平钢腹板①的水平长度;  $b$  和  $r$  分别为倾斜钢腹板②的纵向长度和实际长度;  $x$  为腹板轴线方向。

则水平钢腹板①的轴向刚度  $K_{w1}$  与倾斜钢腹板②的轴向刚度  $K_{w2}$  分别如下所示

$$K_{w1} = \frac{P}{\delta_1} = \frac{EA}{a} \quad (4)$$

$$K_{w2} = \frac{P}{\delta_2} = \left[ 2\cos(\theta) \left( \frac{r^3 \sin^2(\theta)}{3EI} + \frac{r\cos^2(\theta)}{EA} \right) \right]^{-1} \quad (5)$$

则水平钢腹板节段和倾斜钢腹板节段的组合梁刚度  $K_{r1}$  和  $K_{r2}$  分别如下所示

$$K_{r1} = K_{f1} + K_{w1} + K_{fb1} \quad (6)$$

$$K_{r2} = K_{f2} + K_{w2} + K_{fb2} \quad (7)$$

则无内衬混凝土波形钢腹板组合梁的总轴向刚度  $K_{total}$  如下

$$K_{total} = (1/K_{r1} + 1/K_{r2})^{-1} \quad (8)$$

如图 1(a) 所示, 内衬混凝土轴向刚度拆分为水平节段  $R_{r1}$  和倾斜节段  $R_{r2}$  进行计算, 同理可得, 节段内衬混凝土的总轴向刚度  $R_{total}$  如下

$$R_{total} = (1/R_{r1} + 1/R_{r2})^{-1} = \frac{12ld^2}{Eht^3} + \frac{l}{Eht} \quad (9)$$

式中:  $h$  为内衬混凝土的高度;  $t$ 、 $d$  分别为波峰与波谷处内衬混凝土的厚度。

则有内衬混凝土的波形钢腹板组合梁的梁段总轴向刚度  $K'_{total}$  可表示为

$$K'_{total} = K_{total} + R_{total} \quad (10)$$

## 1.2 算例验证

以 1 座跨径为 50 m、梁高为 5 m 的等截面简支梁为例, 分析内衬混凝土参数变化对其轴向刚度的影响。主梁顶、底板及内衬混凝土采用 C50 混凝土; 波形钢腹板采用 Q345C; 预应力钢绞线为  $\Phi^s 15.2$ , 其抗拉强度标准值  $f_{pk} = 1\ 860$  MPa, 弹性模量  $E_p = 1.95 \times 10^5$  MPa。采用 ANSYS 软件进行建模, 单元类型包括 shell181(模拟波形钢腹板)、solid45(模拟混凝土顶底板)和 link8(模拟预应力钢束)。具体结构参数如图 2 所示。  $W_1$  和  $W_2$  分别为顶板和底板宽度;  $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  分别为顶板、底板和腹板厚度。

研究内衬混凝土长度变化对纵向预应力导入效率的影响, 可将  $K_{total}$  视为常数, 则有内衬混凝土的波形钢腹板组合梁的梁段总轴向刚度  $K'_{total}$  可表示如下

$$K'_{total} = K_{total} + R_{total} = K_{total} + \frac{12ld^2}{Eht^3} + \frac{l}{Eht}$$

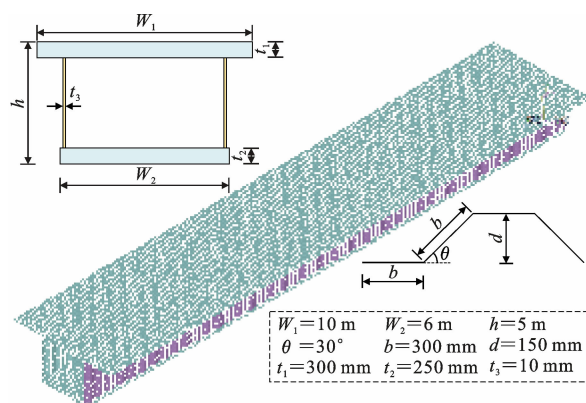


图2 算例结构参数

Fig. 2 Structural parameters of calculation example

$$K_{total} + \frac{l}{h} \left( \frac{12d^2}{Et^3} + \frac{1}{Et} \right) \quad (11)$$

解析解与有限元分析值的对比结果如图 3 所示。由图 3 可知, 解析解与有限元值吻合较好, 轴向应力随着内衬混凝土长度的增加而减小, 这表明, 内衬混凝土会约束波形钢腹板褶皱效应, 进而致使支承区预应力导入效率降低。

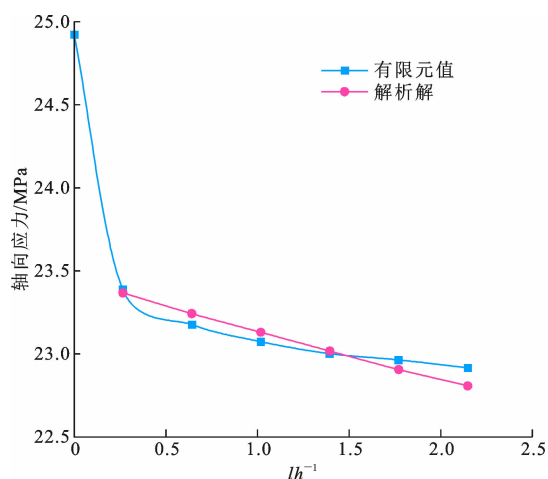


图3 内衬混凝土长度变化对轴向应力的影响

Fig. 3 Effects of inner lining concrete's length variation on axial stress

## 2 工程应用

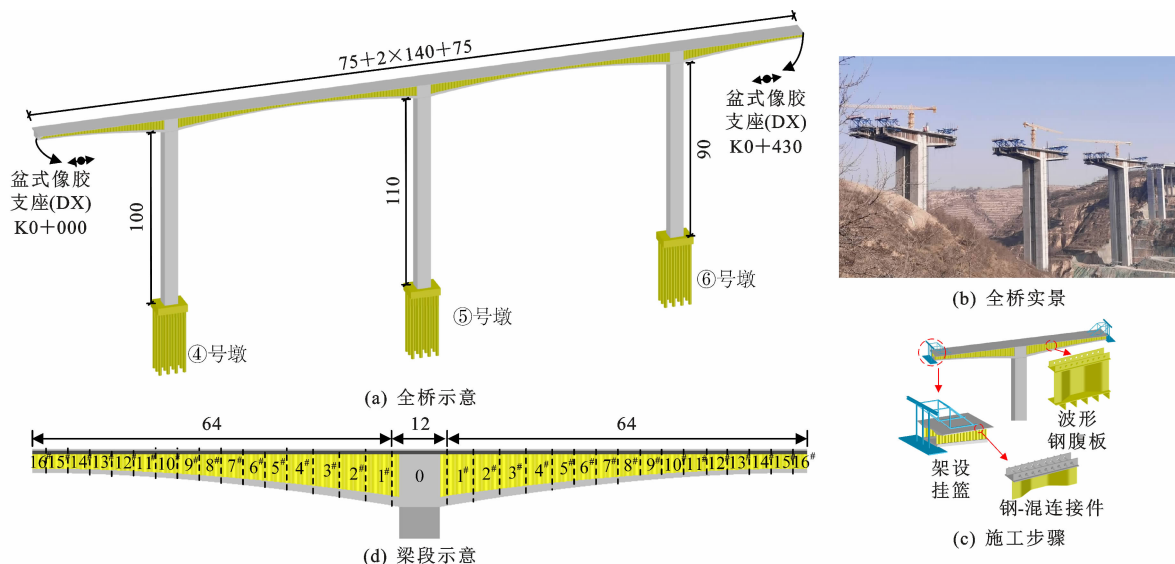
### 2.1 工程背景及有限元建模

梁渠沟大桥是陕西省首座 CSW-PC 连续刚构桥, 如图 4 所示。主桥全长 430 m (75 m + 2 × 140 m + 75 m), 主梁采用变截面单箱单室箱形截面, 顶板宽 12.65 m, 底板宽 6.65 m, 梁高和底板厚度均以系数为 1.8 次抛物线变化, 跨中梁高 3.5 m, 底板厚 32 cm, 根部梁高 8.50 m, 底板厚 120 cm。主桥桥墩为空心薄壁墩, 最大墩高 110 m, 顺桥向与横桥向宽度



分别为 7.5、7.25 m,顺桥向与横桥向壁厚均为 0.8 m,墩顶横隔梁两侧 15.6 m 范围内设置内衬混凝土,内衬混凝土根部和端部厚度分别为 100、65

cm。DX-单向活动支座如图 4(d)所示,该桥采用悬臂浇筑法进行施工,主梁共分为 16 个悬臂块段(1.6 m+9×4.8 m+6×3.2 m)编号 0<sup>#</sup>~16<sup>#</sup>。



单位: m

图 4 工程背景

Fig. 4 Engineering background

为了研究内衬混凝土对 CSW-PC 连续刚构桥纵向预应力导入效率的影响,采用 ANSYS 软件建立全桥实体有限元模型,并按照最终桥面板能够储备的轴向压应力为标准,评判内衬混凝土对预应力效率的干扰程度。值得注意的是,要对波腹板变截面箱梁内衬混凝土进行准确模拟,就需要考虑钢混接触间的黏结滑移效应。当前研究普遍将钢混间黏结力概括为 3 种:①钢混接触面的摩阻力;②混凝土的化学胶结力;③钢板的机械咬合力。

图 5 为有限元模型示意,采用 ANSYS 软件建立实体模型的要点如下:

- (1)用板壳-实体单元建立 CSW-PC 连续刚构桥的有限元模型,共划分得到约 360 万个单元;
- (2)使用 shell181 板壳单元模拟波形钢腹板,使用 solid45 实体单元模拟混凝土顶底板,使用 link8 杆系单元模拟预应力筋;
- (3)波形钢腹板与混凝土顶底板的连接方式采用 MPC 进行模拟;
- (4)腹板与内衬混凝土之间通过栓钉连接,栓钉用 combin39 弹簧单元模拟,考虑栓钉的剪切滑移效应;
- (5)施工阶段模拟采用生死单元的方式进行。

## 2.2 “先撑后衬”施工方法及其“内撑外拉”装置

为了不影响纵向预应力导入效率,施工过程

中应考虑内衬混凝土的合适浇筑“时机”。因此,本文提出一种“先撑后衬”施工方法,“先撑后衬”是指在悬臂施工时,先暂缓浇筑内衬混凝土,使用临时支撑装置维护波形钢腹板的抗剪和抗屈曲性能,待完成相应梁段预应力张拉后再浇筑内衬混凝土。“先撑后衬”施工示意如图 6 所示,用于“先撑后衬”施工方法的“内撑外拉”装置如图 7 所示。

CSW-PC 连续刚构桥悬臂施工过程中,内衬混凝土的“先撑后衬”施工方法如下:

- (1)完成支承区梁段波形钢腹板的安装后,仅浇筑混凝土顶底板,延后浇筑内衬混凝土;
- (2)安装“内撑外拉”的临时支撑装置,该装置可保障波形钢腹板在悬臂施工过程中的稳定性;
- (3)待预应力钢束张拉到一定阶段后,拆除“内撑外拉”装置,浇筑内衬混凝土;
- (4)采用传统方法进行剩余节段的悬臂施工。

## 2.3 施工工序对纵向预应力导入效率的影响

内衬混凝土施工工序分为正常浇筑、先撑后衬和不浇筑 3 种方式,通过提取预应力加载模型的混凝土桥面板轴向压应力值来对比纵向预应力导入效率。

内衬混凝土施工工序对顶板轴向压应力的影响

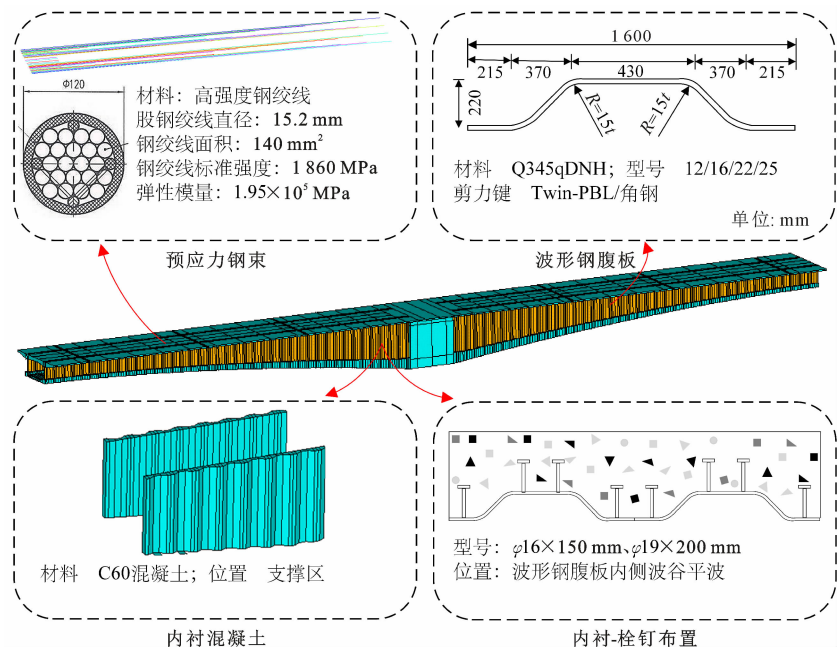


图 5 有限元模型示意

Fig. 5 Schematic of finite element model

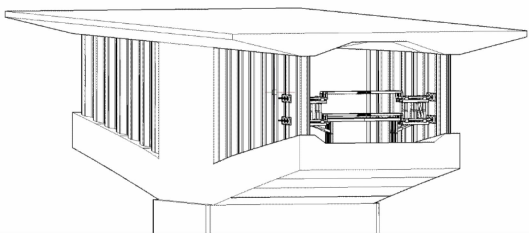


图 6 “先撑后衬”施工方法

Fig. 6 “Brace first and then lining” construction method

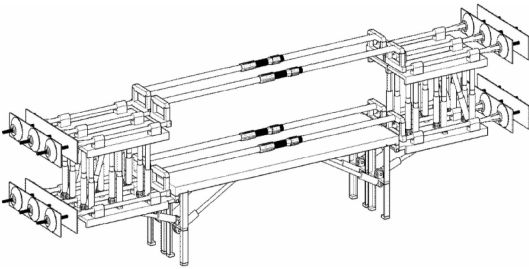


图 7 “内撑外拉”装置

Fig. 7 “Internal brace and external tension” device

如图 8 所示。由图 8 可见:当采用“先撑后衬”法进行施工时,所有梁段的顶板轴向应力均呈上升趋势,顶板轴向应力增长百分比随着距墩顶距离的增大而减小,增长幅度最大的是墩顶 0<sup>#</sup> 梁段,增大了 7.94%;其次是 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 梁段,分别增长了 3.51%、2.56%和 2.23%;施工工序对后续梁段的顶板轴向应力影响较小,平均增长百分比为 0.13%,可以忽略不计。由此可得,内衬混凝土会显著提高

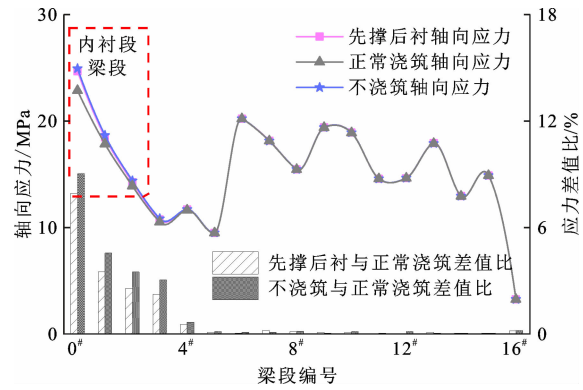


图 8 内衬混凝土施工工序对顶板轴向压应力的影响

Fig. 8 Effect of inner lining concrete's construction procedure on axial compressive stress of top plate

支承区内衬段组合梁的轴向刚度,而采用“先撑后衬”法进行施工可以明显降低支承区组合梁的轴向刚度,提高支承区波形钢腹板的褶皱效应,从而增强支承区预应力导入效率,几乎可以达到与“不浇筑”内衬混凝土时相同的效果。

### 3 参数分析

#### 3.1 内衬混凝土厚度的影响分析

为了分析内衬混凝土厚度  $t$  对纵向预应力导入效率影响,共建立 13 个参数分析有限元模型。每个模型的内衬混凝土长度  $l$  保持不变,即均浇筑 0<sup>#</sup>、1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup> 号梁段的内衬,内衬混凝土长度为 8.65 m,调整内衬混凝土的浇筑厚度  $t$  分别为 0、5、10、15、

20、25、30、35、40、50、70、90 cm 后,进行预应力加载,通过提取各模型顶板轴向压应力对比纵向预应力导入效率。内衬混凝土厚度变化示意如图 9 所

示,内衬混凝土厚度变化对顶板轴向压应力的影响分析如图 10 所示,其中,有内衬梁段(0<sup>#</sup>~2<sup>#</sup>号梁段)顶板轴向压应力分析如图 11 所示。

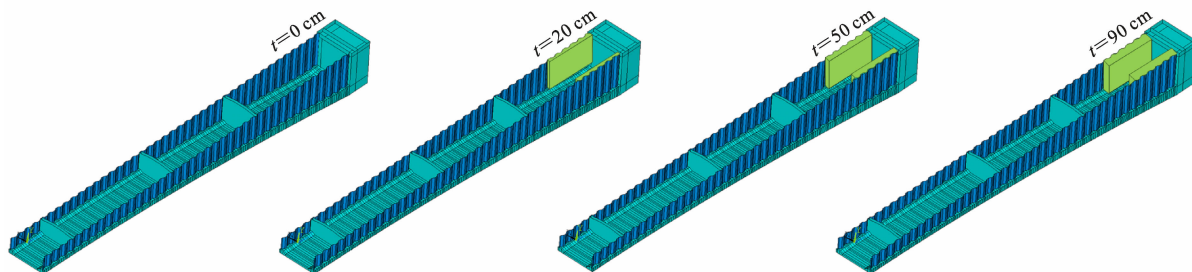


图 9 内衬混凝土厚度变化

Fig. 9 Thickness variations of inner lining concrete

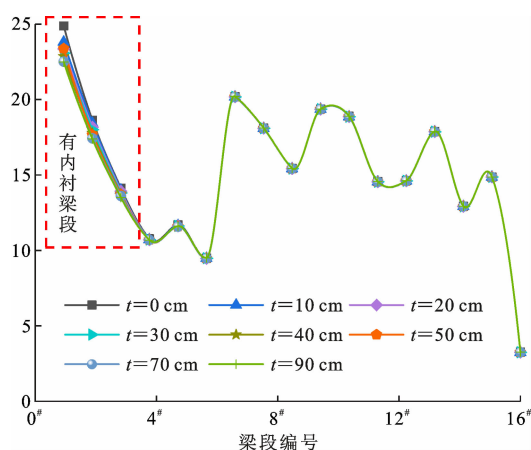


图 10 内衬混凝土厚度变化对顶板轴向压应力的影响

Fig. 10 Effects of inner lining concrete's thickness variation on axial compressive stress of top plate

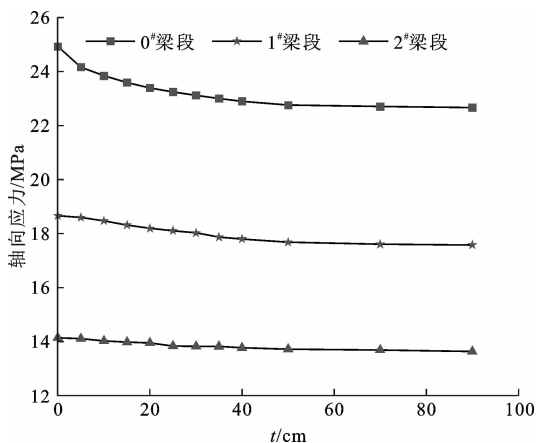


图 11 有内衬梁段的顶板轴向压应力分析

Fig. 11 Analysis of axial compressive stress of top plate of lined concrete girder section

由图 10 和图 11 可知,随着腹板厚度的增加,有内衬梁段的顶板轴向压应力不断减小且逐渐趋于平缓,当  $t > 50$  cm,即支点梁高的 6% 时,有内衬梁段的轴向应力几乎不发生改变,因此建议内衬混凝土

最大厚度应不小于支点梁高的 6%。其中,0<sup>#</sup> 梁段顶板轴向压应力最大差值为 2.41 MPa,差值百分比为 9.67%;1<sup>#</sup> 梁段顶板轴向压应力最大差值为 1.26 MPa,差值百分比为 6.73%;2<sup>#</sup> 梁段顶板轴向压应力最大差值为 0.61 MPa,差值百分比为 4.31%。随着腹板厚度的增加,无内衬梁段的顶板轴向压应力几乎不发生改变。由此可知,内衬混凝土会削弱有内衬梁段波形钢腹板的褶皱效应,降低其预应力导入效率,但该影响会随着内衬混凝土厚度的增大而逐渐减弱。

### 3.2 内衬混凝土长度的影响分析

为了分析内衬混凝土长度  $l$  对纵向预应力导入效率的影响,共建立 6 个参数分析有限元模型。每个模型的  $t$  均为 30 cm,调整  $l$  分别为 2.25、5.45、8.65、11.85、15.05、18.25 m,进行预应力加载,通过提取各模型顶板轴向压应力来对比纵向预应力导入效率。内衬混凝土长度变化示意如图 12 所示,内衬混凝土长度变化对顶板轴向压应力的影响分析如图 13 所示,其中,内衬长度变化段(0<sup>#</sup>~5<sup>#</sup> 梁段)的顶板轴向压应力分析如图 14 所示。

由图 13 和图 14 可知,内衬混凝土会使得相邻的无内衬梁段顶板轴向压应力增大,有内衬梁段顶板轴向压应力会随着内衬混凝土长度的增大而减小。由图 14 可知:当  $l < 8.65$  m 和  $l > 18.25$  m 时,顶板轴向压应力随内衬混凝土长度变化的变幅较小;当  $l$  为 8.65~18.25 m 时, $l$  增加会使得相邻的无内衬梁段顶板轴向压应力显著增大,因此建议  $l$  取 8.65~18.25 m,即最小长度应大于支点处梁高,最大长度应小于 2.15 倍支点处梁高。其中,0<sup>#</sup> 梁段顶板轴向压应力最大差值为 2.36 MPa,差值百分比为 9.46%;1<sup>#</sup> 梁段顶板轴向压应力最大差值为

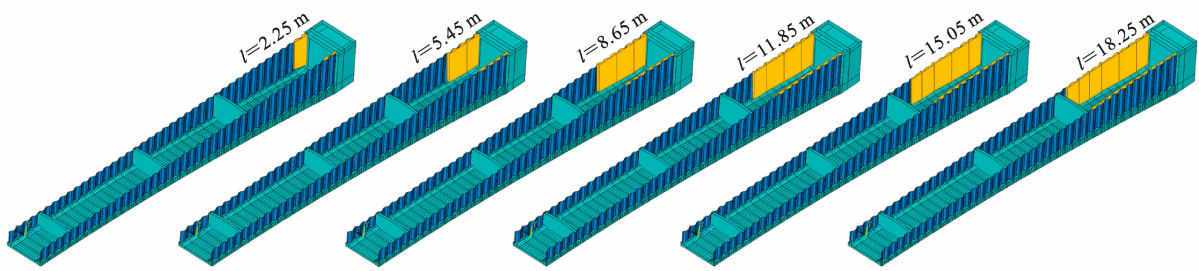


图 12 内衬混凝土长度变化  
Fig. 12 Length variations of inner lining concrete

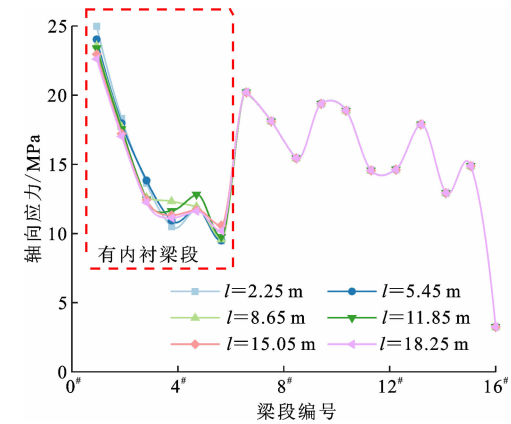


图 13 内衬混凝土长度变化对顶板轴向压应力的影响  
Fig. 13 Effects of inner lining concrete's length variation on axial compressive stress of top plate

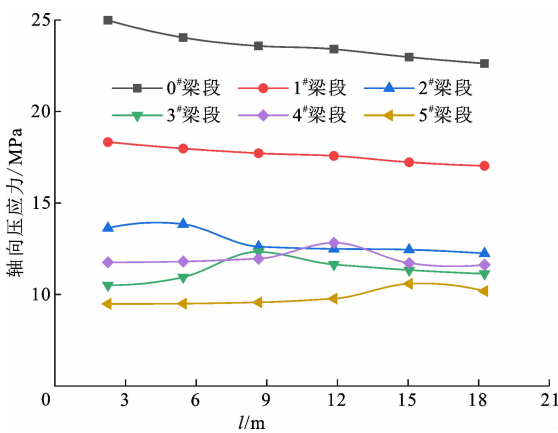


图 14 有内衬梁段的顶板轴向压应力分析  
Fig. 14 Analysis of axial compressive stress of top plate of lined concrete girder section

1.31 MPa,差值百分比为7.09%;2# 梁段顶板轴向压应力最大差值为 1.59 MPa,差值百分比为11.52%;3# 梁段顶板轴向压应力最大差值为 1.83 MPa,差值百分比为 14.81%;4# 梁段顶板轴向压应力最大差值为 1.21 MPa,差值百分比为 9.41%;5# 梁段顶板轴向压应力最大差值为 1.12 MPa,差值百分比为 10.43%。由此可知,内衬混凝土会削弱有内衬梁段波形钢腹板的褶皱效应,降低有内衬梁段的纵向预应

力导入效率;此外,内衬混凝土会导致有内衬梁段与无内衬梁段间的过渡段出现应力集中现象。

4 结 语

(1)内衬混凝土会削弱波形钢腹板的褶皱效应,显著降低支承区预应力导入效率,同时会导致有内衬梁段与无内衬梁段间的过渡段出现应力集中现象。

(2)采用“先撑后衬”法进行施工可以显著降低支承区组合梁的轴向刚度,提高支承区波形钢腹板的褶皱效应,增强支承区预应力导入效率,几乎可以达到与“不浇筑”内衬混凝土时相同的效果。

(3)当实际工程采用变厚度内衬设计时,建议内衬混凝土最大厚度应不小于支点梁高的 6%,最小厚度应满足构造要求;建议内衬混凝土长度应处于 8.65~18.25 m,即最小长度应大于支点处梁高,最大长度应小于 2.15 倍支点处梁高。

(4)本文仅研究了“先撑后衬”施工方法对波形钢腹板连续刚构桥悬臂施工过程中支承区预应力导入效率的影响,后续仍需补充临时横撑的局部精细化分析数据,进一步论证“先撑后衬”施工方法的可行性。

参考文献:

References:

[ 1 ] HE J,LIU Y Q,CHEN A R,et al. Mechanical behavior and analysis of composite bridges with corrugated steel webs: State-of-the-art[J]. International Journal of Steel Structures,2012,12(3):321-338.  
[ 2 ] INAAM Q, UPADHYAY A. Accordion effect in bridge girders with corrugated webs[J]. Journal of Constructional Steel Research,2022,188:107040.  
[ 3 ] 林梦凯,冀 伟,李海莲,等. 波形钢腹板工字型钢梁的手风琴效应研究[J]. 铁道科学与工程学报,2016,13(2):283-288.  
LIN Meng-kai,JI Wei,LI Hai-lian,et al. Study on accordion effect of corrugated steel webs I-shaped steel girder[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2016,13(2):283-288.



- [4] CHEN Y Y, DONG J C, XU T H. Composite box girder with corrugated steel webs and trusses—A new type of bridge structure[J]. *Engineering Structures*, 2018, 166: 354-362.
- [5] HE J, LI X, LI C X, et al. A novel asynchronous-pouring-construction technology for prestressed concrete box girder bridges with corrugated steel webs[J]. *Structures*, 2020, 27: 1940-1950.
- [6] DENG W Q, LIU D, XIONG Y Q, et al. Experimental study on asynchronous construction for composite bridges with corrugated steel webs[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 157: 93-102.
- [7] WANG X D, MIAO C Q, WANG X M. Prediction analysis of deflection in the construction of composite box-girder bridge with corrugated steel webs based on MEC-BP neural networks[J]. *Structures*, 2021, 32: 691-700.
- [8] 李宏江. 波形钢腹板 PC 组合箱梁几个特殊问题研究进展[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(2): 440-454.
- LI Hong-jiang. Review on special issues in prestressed concrete box girders with corrugated steel webs[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(2): 440-454.
- [9] 张 峰, 李术才, 李宏江, 等. 波形钢腹板内衬混凝土部位抗剪性能[J]. *交通运输工程学报*, 2016, 16(1): 16-24.
- ZHANG Feng, LI Shu-cai, LI Hong-jiang, et al. Shearing performances of corrugated steel webs encased with concrete[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2016, 16(1): 16-24.
- [10] 刘保东, 胥 睿, 李祖硕, 等. 内衬混凝土对波形钢腹板刚构桥扭转和畸变性能的影响[J]. *中国铁道科学*, 2017, 38(3): 31-39.
- LIU Bao-dong, XU Rui, LI Zu-shuo, et al. Impact of inner lining concrete on torsion and distortion performance of continuous rigid frame bridge with corrugated steel webs[J]. *China Railway Science*, 2017, 38(3): 31-39.
- [11] 邓文琴, 刘 朵, 王 超, 等. 变截面波形钢腹板内衬混凝土组合梁剪扭性能试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(4): 618-623.
- DENG Wen-qin, LIU Duo, WANG Chao, et al. Test study on shearing and torsional behavior of concrete-encased non-prismatic composite girder with corrugated steel webs[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(4): 618-623.
- [12] ZHANG F, SHEN J A, LIU J Y. Effect of encased concrete on section temperature gradient of corrugated steel web box girder[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2021, 24(11): 2321-2335.
- [13] LIU D, ZHAO X B, DENG W Q, et al. Design of lining concrete of multi-cell composite girder bridge with corrugated steel webs[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers—Structures and Buildings*, 2023, 176(1): 13-27.
- [14] DENG W Q, ZHANG J D, ZHOU M, et al. Experimental study of shear behaviour of concrete-encased non-prismatic girder with CSWs[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2019, 71(19): 989-1005.
- [15] HE J, LIU Y Q, CHEN A R, et al. Shear behavior of partially encased composite I-girder with corrugated steel web; Experimental study[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 77: 193-209.
- [16] HE J, LIU Y Q, CHEN A R, et al. Bending behavior of concrete-encased composite I-girder with corrugated steel web[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 74: 70-84.
- [17] 贺 君, 刘玉擎, 吕 展, 等. 波形钢腹板内衬混凝土组合梁弯、剪性能试验[J]. *中国公路学报*, 2017, 30(7): 94-100, 143.
- HE Jun, LIU Yu-qing, LU Zhan, et al. Test on flexural and shearing performance of concrete-encased composite girder with corrugated steel webs[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(7): 94-100, 143.
- [18] HE J, WANG S H, LIU Y Q, et al. Mechanical behavior of a partially encased composite girder with corrugated steel web; Interaction of shear and bending[J]. *Engineering*, 2017, 3(6): 806-816.
- [19] HUANG L, HIKOSAKA H, KOMINE K. Simulation of accordion effect in corrugated steel web with concrete flanges[J]. *Computers & Structures*, 2004, 82(23/24/25/26): 2061-2069.
- [20] 贺 君, 刘玉擎, 吕 展, 等. 内衬混凝土对波形钢腹板组合梁桥力学性能的影响[J]. *桥梁建设*, 2017, 47(4): 54-59.
- HE Jun, LIU Yu-qing, LU Zhan, et al. Effects of encased concrete on mechanical behavior of composite girder bridge with corrugated steel webs[J]. *Bridge Construction*, 2017, 47(4): 54-59.
- [21] WANG S H, HE J, LIU Y Q. Shear behavior of steel I-girder with stiffened corrugated web, Part I: Experimental study[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 140: 248-262.
- [22] HE J, WANG S H, LIU Y Q, et al. Shear behavior of steel I-girder with stiffened corrugated web, Part II: Numerical study[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 147: 106025.
- [23] OH J Y, LEE D H, KIM K S. Accordion effect of prestressed steel beams with corrugated webs[J]. *Thin-Walled Structures*, 2012, 57: 49-61.