

# 节段拼装薄壁箱梁带肋大挑臂结构研究

刘志权

(上海贝英吉工程咨询有限公司, 上海市 200433)

**摘要:** 为满足工业化建造的需求,须进一步探讨节段拼装箱梁桥的标准化断面形式。采用理论分析与数值模拟相结合的研究方法,对适应全体外预应力节段梁桥的带肋大悬臂的合理构造进行研究。结果表明,全体外预应力节段拼装箱梁桥是一种适合采用工业化建造的桥梁结构形式,采用带肋大悬臂断面形式,可以降低结构自重;加劲肋高度宜选为1 m,加劲肋厚度可选择为22 cm,采用倒梯形布置,并在加劲肋底部与侧边进行倒圆角处理;带肋大断面的斜腹板宜采用双折线腹板构造,以缓解加劲肋根部腹板局部应力集中问题;形成的带肋大悬臂断面结构,能够很好地满足工业化建造的要求,可为节段梁桥设计提供参考。

**关键词:** 节段梁桥;标准断面;带肋大悬臂;合理构造;受力分析

**中图分类号:** U441;TU997

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2026)06-0247-04

## Research on Ribbed Large-cantilever Structure of Segmental Assembled Thin-walled Box Beams

LIU Zhiquan

(Shanghai Bridging Engineering Consulting Co., Ltd., Shanghai 230433, China)

**Abstract:** To meet the demands of industrialized construction, it is necessary to further explore the standardized cross-sectional forms for segmental assembled box beam bridges. The research method combining theoretical analysis and numerical simulation is used to study the rational structure of large ribbed cantilevers suitable for all-external prestressed segmental beam bridges. The results indicate that all-external prestressed segmental assembled box beam bridge is a structural form of bridge suitable for industrialized construction. By adopting a ribbed large-cantilever cross-section, the structural self-weight can be reduced. The recommended stiffening rib height is 1 m, and the stiffening rib thickness can be selected by 22 cm, which is arranged in an inverted trapezoidal pattern, and the rounded corners are applied to the bottom and sides of the stiffening ribs. For the inclined webs of the ribbed large-section, a double-folded web structure is advisably used to alleviate the local stress concentration of the web at the root of the stiffening ribs. The formed ribbed large-cantilever cross-section structure can effectively meet the requirements of industrialized construction and can serve as a reference for the design of segmental beam bridges.

**Keywords:** segmental bridge; standard cross-sections; ribbed large-cantilever; rational structure; stress analysis

## 0 引言

体外预应力结构具备易检查、易更换、耐久性好等优势,尤其是在与节段拼装混凝土箱梁相结合后,其优势更加明显。国内外对预应力混凝土节段梁桥的研究和工程实践已有较多成果<sup>[1]</sup>。

国际上对全体外预应力节段梁桥的应用已取得了许多成功经验,如美国佛罗里达州的 Long Key Bridge 和泰国曼谷曼纳高速高架桥等。但国内节段梁工程仍以体内混合配束为主,如五峰山长江大

桥<sup>[2-4]</sup>、南昌市洪都大桥高架桥<sup>[5-6]</sup>等。全体外预应力节段梁桥只在芜湖长江公路二桥建设中得到成功应用。我国关于节段梁的相关研究已有较多成果。例如,王猛<sup>[7]</sup>对大挑臂复合截面节段梁的总体布置和结构体系进行研究,分析了采用大挑臂设计的要点。严博等<sup>[8]</sup>对大悬臂构造条件下,箱梁纵向预应力效应的变化情况进行研究,分析了后安装情况下选择悬臂结构对预应力永存效应的影响。袁水生<sup>[9]</sup>对节段梁桥的结构设计优化和工厂化生产开展研究,从工厂化生产需求的角度,对设计优化提出建议。也有学者系统梳理并总结了节段箱梁桥的力学性能研究进展<sup>[10-11]</sup>。还有学者对公路节段预制箱梁桥的预制与安装主要工艺技术进行研究,包括短线匹配预

收稿日期: 2026-02-03

作者简介: 刘志权(1985—),男,博士,高级工程师,从事桥梁工程咨询与技术服务工作。

制施工技术,以及施工过程中的线形控制技术<sup>[12-15]</sup>。

桥梁工业化建造是一种系统的建造方式革新。它以标准化设计为前提,而合理的构造设计是决定工业化建造先进程度的关键因素。虽然我国已有不少应用了体外预应力节段拼装混凝土桥梁的工程实践,但各工程所用的结构形式多样,构造复杂,不利于工业化建造的推进,甚至造成资源浪费。当前我国对体外预应力节段梁合理构造的研究相对较少,而基于工业化建造需求的合理构造研究更少,无法有效指导这种结构形式的工业化建造。为满足工业化建造的需求,须进一步探讨节段拼装箱梁桥的标准化断面形式。因此,本文对适应全体外预应力节段梁桥的带肋大悬臂的合理构造进行研究。

## 1 节段梁轻型断面的概念分析

工业化建造需要结构的构造设计达到高度的标准化。如果配置体内预应力钢束,则需在箱梁制造过程中进行管道预埋与定位,且每个节段的管道形式不同,会对节段的标准化制造带来极大困难。此外,体外束锚固的齿块、槽口等构造布置,会影响预制模板的标准化,进而降低生产效率,增大生产质量控制的难度。

在工业化建造理念的指导下,当将全体外预应力形式与轻型薄壁箱梁结构相结合时,这一问题迎刃而解。在桥梁工业化建造过程中,全体外预应力形式和轻型薄壁箱梁的结合是一种有机的结合,两者间的关系如图1所示。可以从结构受力需求和工业化建造工艺2个层面论述两者的依存关系。

首先,从结构受力需求的角度考虑,轻型薄壁箱梁不仅降低了箱梁结构的自重,还降低了恒载比例,增强结构的承载能力,承担运营荷载效应,很好地弥补了全体外预应力承载能力偏低的不足。因此,可以说,轻型薄壁箱梁为全体外预应力形式提供了应用条件。

其次,从工业化建造工艺的角度考虑,全体外预应力形式,消除了体内预应力束管道设置对箱梁壁厚的限制,箱梁的壁厚只需满足受力要求即可,这为轻型薄壁箱梁的构造设计提供了可能。

在一定程度上可以认为,轻型薄壁箱梁和全体外预应力形式是一组相辅相成的组合,也是结构发展的必然产物。同时,全体外预应力形式与轻型薄壁箱梁相结合,能更好地适应工业化建造的需求。

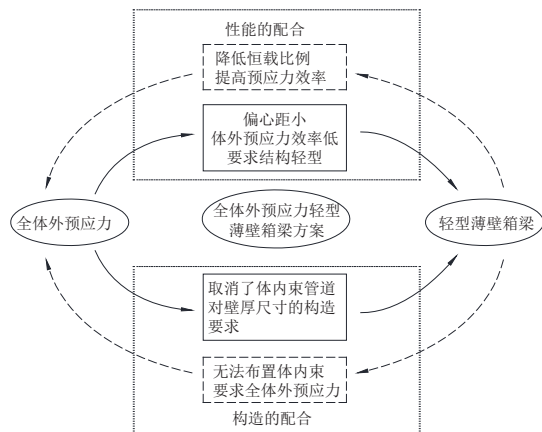


图1 薄壁箱梁与全体外预应力的关系

全体外预应力的配置为构件的标准化设计提供了条件,也提高了构件工厂化生产的标准化程度。轻型薄壁箱梁能够减小构件的移运重量,提高生产效率,同时,能够增大逐跨架设适用的跨径范围,并提升工业化建造节段梁桥的跨径适应性。

在轻型化设计原则下,应尽量增大箱梁的悬臂宽度,减小箱体重量。采用传统翼缘板构造,受到悬臂根部负弯矩的控制,翼缘的最大宽度一般不超过3.5 m。为进一步实现断面的轻型化设计,设计依托工程选用带肋翼缘构造,增大翼缘板的悬臂宽度。

## 2 加劲肋关键参数优化

### 2.1 加劲肋根部高度研究

在带肋大悬臂结构中,加劲肋根部的高度是决定加劲肋对桥面板加劲效果的主要因素。如果加劲肋根部的高度不足,会导致大悬臂翼缘刚度不足,造成翼缘板根部应力过大,无法满足承载要求。如果加劲肋高度过大,会导致节段自重增加,且预制施工脱膜困难,不利于生产。本文利用ANSYS软件建立空间实体有限元模型,以图2所示的尺寸为基本构型,以55 t标准车作用在悬臂端部的控制工况为例,进行参数分析。

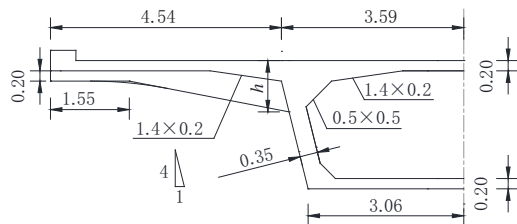


图2 带肋断面关键参数示意(单位:m)

对于图3所示的2区域,随着加劲肋高度的变化,在荷载标准值组合下,加劲肋下缘的压应力会有所变化,但均在可控制范围内。加劲肋根部的压应力不控制加劲肋的高度。

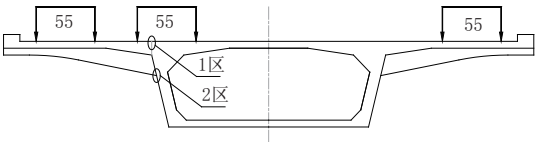


图3 带肋断面受力的控制区域及最不利加载位置(单位:t)

悬臂根部截面1区上缘的横桥向应力与加劲肋高度变化的关系如图4所示,在加劲肋根部高度由1.3 m优化至0.9 m的过程中,翼缘板顶部的横向拉应力会逐渐增大,翼缘板的总体刚度有所下降。在高度由1.3 m降低至1 m的过程中,横向拉应力的变化趋势相对较为平缓。但当肋根部高度由1 m减小至0.9 m的过程中,翼缘根横向拉应力增加的速率有较为明显的变化。当加劲肋根部高度为0.9 m时,在荷载标准值组合下,顶部出现的拉应力已经超过3 MPa,这对箱梁顶板的耐久性会有一定影响。

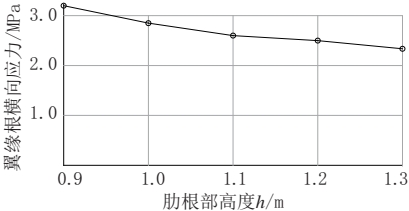


图4 悬臂翼缘根部应力变化曲线

随着加劲肋高度的变化,加劲肋根部2区的压应力变化如图5所示。在荷载标准值组合下,加劲肋下缘的压应力会有所变化,但均在可控制范围内。加劲肋根部的压应力不控制加劲肋的高度。

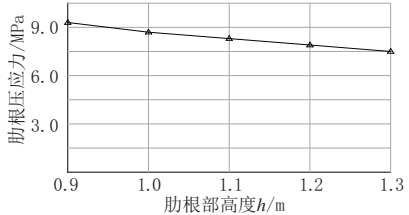


图5 加劲肋根部压应力变化曲线

以上分析结果表明,加劲肋的高度不宜小于1 m,以确保悬臂翼缘根部具有较好的抗裂性。当加劲肋过高时,侧模脱模的难度很大,不利于预制生产。综合考虑受力与生产的要求,悬臂加劲肋根部的高度宜选为1 m。

2.2 加劲肋宽度分析

加劲肋的宽度决定了加劲翼缘板的刚度,在合理加劲肋高度确定的条件下,可分析加劲肋的合理宽度。分析结果表明,在车轮作用于加劲肋正上方时,车辆荷载主要由加劲肋承担,此时,结构的变形情况是判断加劲肋宽度是否合理的直接依据。

本研究将加劲肋的宽度分别按照20、25、30、

35 cm 4种参数进行分析。当加劲肋根部高度为定值1 m时,车辆荷载布置如图3所示。应力随加劲肋厚度变化的规律如图6所示,当加劲肋厚度小于0.3 m时,应力基本呈现线性变化;当加劲肋厚度大于0.2 m时,根部的压应力均能满足要求。

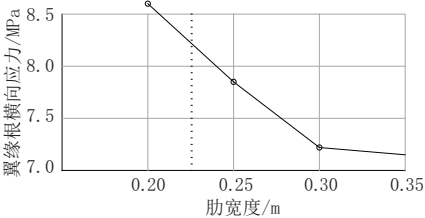


图6 加劲肋根部下缘压应力

在车辆荷载作用下,悬臂端部相较于悬臂根部的相对位移结果如图7所示。当加劲肋厚度小于0.3 m时,应力基本成线性变化;当加劲肋厚度大于0.2 m时,翼缘板自身的变形均较小。控制悬臂位移不超过5 cm,可选择悬臂厚度为0.22 m。

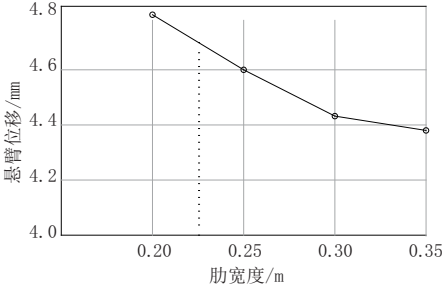


图7 悬臂端部位移变化曲线

从施工构造的角度考虑,加劲肋的最小宽度,应满足一定要求,即在混凝土浇筑过程中,粗骨料能够顺利进入钢筋笼内,确保混凝土浇筑的密实性,有效保障混凝土的强度。综合力学性能和施工工艺,加劲肋宽度可选择为22 cm,同时,为确保顺利脱膜,可采用倒梯形布置,并对加劲肋侧边斜率按照1:0.05控制,并在加劲肋底部与侧边进行倒圆角处理。在制造过程中,钢筋笼的构造尺寸可按照构造不变的方式进行,便于钢筋的标准化施工。

2.3 加劲肋根部构造优化

箱梁翼缘加劲后,当荷载作用在翼缘上时,加劲肋以受弯模式为主。加劲肋根部传递至腹板的侧向力近似于线性分布。这种侧向力,使得腹板的受力模式与传统箱梁腹板的受力模式有较大差别,腹板承受抗剪与面外弯曲的耦合受力状态。这种受力特点,导致与加劲肋相交处的腹板存在明显的应力集中现象,这对腹板的抗裂性带来一定影响。同样,竖向应力也存在明显的集中现象,这种局部效应在设计时须妥善处理。

为满足预制节段轻型化的要求,腹板设计采用了一种双折线的构造形式,即对加劲根部位置进行加厚。同时,设计对腹板与顶板的倒角进行优化,减小倒角尺寸,以小倒角与顶部变厚的腹板相配合。这种设计既满足了箱内顶板根部的受力要求,又避免了腹板加厚带来的节段重量增大的问题。节段腹板加厚的构造优化设计如图8所示,优化取消的1区面积为 $0.053\text{ m}^2$ ,增加的2区面积为 $0.049\text{ m}^2$ 。

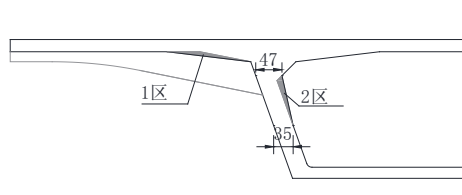


图8 双折线的腹板构造优化设计(单位:cm)

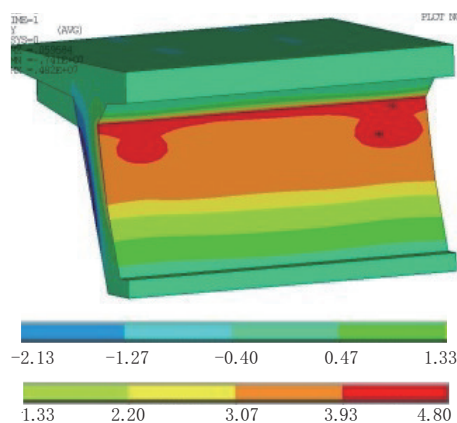


图9 优化前后腹板竖向应力图(单位:MPa)

优化后,腹板的竖向应力分布情况如图9所示。采用双折线的腹板构造形式,既提高了与加劲肋根部相交处腹板的刚度,又缓解了由加劲肋根部传递的横向荷载引起的应力集中现象,应力由 $7.5\text{ MPa}$ 降低到 $4.8\text{ MPa}$ ,缓解效果约为36%。双折线腹板构造形式,不仅满足了腹板的受力要求,还满足了节段轻型化的要求,是一种可配合带肋大悬臂构造的腹板结构形式。

### 3 带肋断面的合理构造

在设置加劲肋的情况下,悬臂的合理宽度可选为 $4.2\sim 4.5\text{ m}$ 。在悬臂厚度为 $0.22\text{ m}$ 的情况下,每榀预制节段设置1道加劲肋,可满足翼缘板根部的受力要求。加劲肋根部高度为 $1.0\text{ m}$ ,平均宽度为 $0.22\text{ m}$ ,采用倒梯形布置。加劲肋采用双折线形,端部高度可选为 $0.18\sim 0.20\text{ m}$ ,等高区段长度宜按照 $1.5\text{ m}$ 控制。为便于加工制作,等高段与变高段之间部分采用圆弧过渡,圆弧半径不应小于 $2\text{ m}$ 。在设计加劲肋

后,翼缘板与腹板的承托尺寸可进一步减小,承托水平尺寸可按照 $1\text{ m}$ 控制。

为缓解加劲肋根部压力对腹板造成的应力集中现象,腹板采用双折线设计,以缓解由加劲肋根部传递至腹板的应力集中现象。变厚高度可选择距离顶板上缘 $1.5\text{ m}$ 处,作为变厚起点,确保加劲肋根部处于腹板变厚区段。带肋断面的合理构造如图10所示。

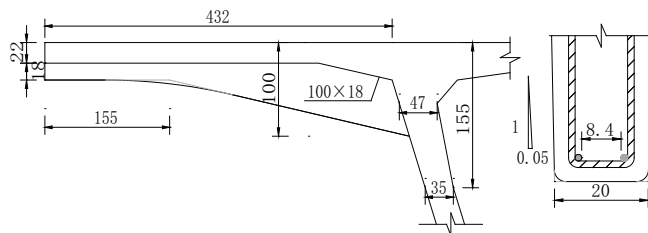


图10 加劲肋合理构造示意图(单位:cm)

在设计时,可以根据路基断面确定合理的顶板宽度,并根据跨径确定箱梁梁高。在箱梁外部按照宽度 $4.2\sim 4.5\text{ m}$ 设计箱外翼缘,最后确定斜腹板间距,形成标准化节段梁轻型箱梁断面。在满足受力需求的同时,实现箱梁的轻型化设计,能够更好地满足标准化预制拼装施工的需求。

### 4 结 语

针对全体外预应力节段拼装薄壁箱梁标准化施工的需求,本文对节段拼装薄壁箱梁带肋断面的合理构造进行研究,形成以下主要成果。

(1)全体外预应力节段拼装箱梁桥是一种适用于工业化建造的桥梁结构形式。为降低箱梁自重,可优先采用带肋大悬臂断面形式。

(2)针对带肋大悬臂,加劲肋高度宜选为 $1\text{ m}$ ,加劲肋宽度可选择为 $22\text{ cm}$ ,采用倒梯形布置,加劲肋侧边斜率按照 $1:0.05$ 控制,并在加劲肋底部与侧边进行倒圆角处理。

(3)带肋大断面的斜腹板宜采用双折线腹板构造,在满足腹板受力的同时,实现节段的轻型化设计。

(4)设计可根据不同的路基宽度和桥梁跨径确定箱梁的宽度和高度,在配合带肋悬臂构造的基础上,形成适应全体外预应力节段梁的标准化断面。

#### 参考文献:

- [1] 卢永成. 桥梁工业化建造综述[J]. 城市道桥与防洪, 2024(11): 4-8; 16.
- [2] 徐瑞丰, 韩大章, 单宏伟. 宽幅预制节段梁在五峰山长江大桥中的