

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.11.023

大跨径闭口钢箱组合梁桥研究进展和技术特点

周云岗, 吴 忠

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 简要介绍了大跨径闭口钢箱组合梁桥的发展情况。闭口钢箱组合梁兼具钢箱梁和槽型组合梁的优点, 特别适用于曲线半径较小、跨度较大及扭转性能要求较高的桥梁, 具有施工方便、结构性能好、经济性能较佳等优点, 在城市、山区等复杂环境中具有很强的竞争力, 获得了快速发展和应用, 因此亟需开展相关理论研究和试验论证工作。为此, 对闭口钢箱组合梁桥在设计方法、结构形式等方面的技术特点进行了归纳总结, 并分析阐述了其在设计方法、结构体系、组合桥面板和负弯矩区开裂等领域值得进一步研究的关键技术问题。

关键词: 桥梁工程; 闭口钢箱组合梁; 钢箱梁; 组合桥面板; 桥面板有效宽度; 高性能混凝土

中图分类号: U448.225

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0098-06

0 引 言

组合箱梁的断面形式按钢梁顶面是否开口, 可分为槽型钢梁(即开口箱梁)和闭口钢梁两种形式。在 20 世纪, 闭口钢箱组合梁因组合桥面板易开裂渗漏而影响结构耐久性, 导致其应用较少, 一般仅在弯梁、施工过程承受很大扭矩等特殊情况下才采用, 如瑞士纳沙泰尔湖 Vaux 高架、法国阿维尼翁 Croix Verte 高架桥和 Piou 高架桥、西班牙维斯卡亚 Laarena 高架桥等。槽型组合梁的混凝土桥面板自重占比较大, 且随着跨径增大该占比越来越高, 致使其在大跨度桥梁领域中的应用受到了限制。钢箱梁在大跨径桥梁领域被广泛应用, 但存在频发且较难解决的正交异性钢桥面板疲劳破坏和铺装易损问题^[1]。

近年来, 组合桥面板因兼具混凝土桥面板和正交异性钢桥面板的优点, 已成为研究热点。组合桥面板的承载能力、构造细节、耐久性问题, 得到了较为全面的理论分析和试验论证, 并在工程建设中得到了广泛应用。当前, 组合桥面板主要承担第二体系局部受力, 即钢箱梁承担第一体系整体受力, 组合桥面板承担车轮荷载等, 主要发挥其弯曲能力, 如广东佛陈大桥、广东马房大桥等。

闭口钢箱组合梁的典型特征是组合桥面板参与第一体系整体受力, 在跨中处能充分发挥混凝土材料的抗压性能, 进而减小钢板厚度, 节约钢材, 降低投资。近几年来, 已建、在建的闭口钢箱组合梁桥已陆续出现, 因此亟需开展相关理论研究和试验论证工作。

1 研究现状

1.1 国外研究现状

国外组合梁研究重点为精细化分析方法, 研究内容包括材料本构关系、单元开发、弹性或弹塑性连接件模拟等, 非线性计算已达到相当成熟的水平。在闭口钢箱组合梁方面, 日本在 20 世纪 80 年代末期对钢-混组合桥面板进行了开发, 并进行了车轮行车疲劳试验、有限元分析等理论和实践研究^[2]。2000 年以后, 德国、法国、荷兰和比利时等国对正交异性钢桥面板的疲劳性能进行了多种研究, 并修建了多座采用正交异性组合板的桥梁。

1.2 国内研究现状

钢板组合梁和钢箱组合梁是钢-混组合结构桥梁的主要结构形式, 近年来在我国桥梁工程中得到了广泛应用。我国关于钢-混组合结构的研究主要集中于钢-混组合结构的整体力学行为和钢-混组合桥面板的力学性能。

钢-混组合结构桥梁总体力学行为研究可分为 6 类^[3]: 钢-混组合结构桥梁工程应用研究、钢-混组合结构桥梁弯曲性能研究、钢-混组合结构桥梁空间受力行为研究、钢-混组合结构桥梁动力性能研究、

收稿日期: 2023-11-29

基金项目: 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司科研项目(K2019K069)

作者简介: 周云岗(1980—), 男, 博士, 高级工程师, 从事勘察、设计、大跨度桥梁设计理论工作。

钢-混组合结构桥梁局部受力性能研究及其他研究,研究对象主要为工字型钢梁组合梁和槽型钢梁组合梁。在闭口钢箱组合梁方面,程烨^[4]以某城市高架简支小箱梁式钢-混组合梁桥中的 1 片中梁为研究对象,分析比较了 3 种钢梁截面类型的屈曲稳定性、成桥应力及其钢材用量。张智聪^[5]阐述了闭口钢箱组合梁主要研究内容 and 应用前景。

钢-混组合桥面板包括钢-普通混凝土组合桥面板、钢-UHPC 组合桥面板和钢-STC 组合桥面板等,研究重点集中在静力承载力、疲劳性能、负弯矩区抗裂性能、裂缝计算等几个方面。邵旭东等^[1,6-13]对钢-STC 组合桥面板、钢-RPC 组合桥面板和钢-UHPC 组合桥面板的承载力、疲劳性能、抗剪连接件等力学性能进行了基础理论和试验研究。曾明根等^[14-20]对钢-普通混凝土组合桥面板、钢-UHPC 组合桥面板的承载力、结构构造、负弯矩区裂缝宽度等进行了基础理论和试验研究。张清华等^[21-25]在大纵肋正交异性钢面板结构中引入混凝土结构层,通过栓钉将钢面板与混凝土结构层组成新型大纵肋正交异性组合桥面板,并研究了其力学性能、疲劳特性等。

纵览组合梁研究历程,与闭口钢箱组合梁相关的研究主要集中于组合桥面板,成果主要围绕其承载能力和耐久性能,且主要考虑第二体系受力。

组合桥面板参与第一体系整体受力,既能充分发挥混凝土板承载能力,又能减少钢材用量,提高经济性能,因此相关研究成为了理论研究和工程实践的热点,促进了闭口钢箱组合梁的发展。

2 工程应用

钢箱梁采用组合桥面板,在整体受力分析时,仅考虑钢桥面板参与整体受力,典型工程有广州佛陈大桥^[26]、广东肇庆四会市马房大桥第 11 跨^[27]等。

钢箱梁采用组合桥面板,且其参与第一体系整体受力,结构力学特性与钢箱梁、槽型组合梁明显不同,如桥面板有效宽度取值、钢桥面板构造、连接件布置等。目前,工程实践中主要应用于曲线桥梁、大跨径桥梁、对施工有特殊需求的桥梁等,典型工程实例见表 1。

德国 Elbebridge Wittenberge 桥宽度 30.4 m,跨径组合为 126 m+160 m+126 m,组合桥面板采用 10 mm 钢板+150 mm 普通混凝土。该桥标准横断面图见图 1。

德国某公交车站跨铁路桥,标准桥宽为 11.06 m,

表 1 闭口钢箱组合梁桥统计表

国家	桥名	主跨跨径 /m	建成年份
德国	Elbebridge Wittenberge 桥	160	2012
德国	某公交车站跨铁路桥	82.132	2019
中国	济南凤凰路跨北侧大堤桥	245	2021
中国	济南凤凰路跨南侧大堤桥	165	2021
中国	上海 G1503 跨吴淞江大桥	138	2022
中国	山西临猗黄河大桥	128	在建

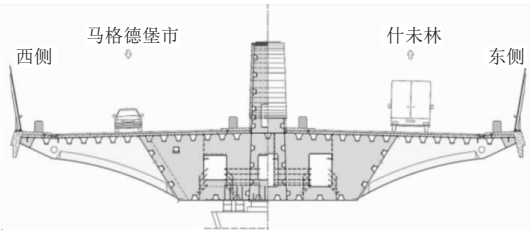


图 1 德国 Elbebridge Wittenberge 桥标准横断面图

跨径组合为 37.750 m+43.934 m+82.132 m+43.934 m+37.750 m,其中主跨和两侧次边跨采用闭口钢箱组合梁,组合桥面板采用 40 mm 钢板+200 mm 普通混凝土。该桥标准横断面图见图 2。

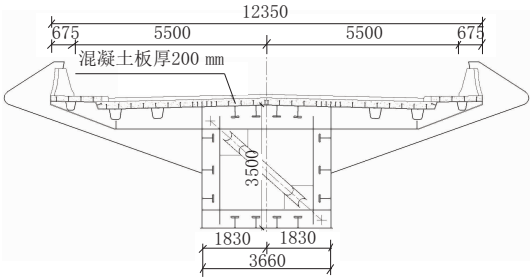


图 2 德国某公交车站跨铁路桥标准横断面图(单位:mm)

中国济南凤凰路跨大堤桥梁^[28],桥宽 54~61.7 m,南侧跨大堤桥梁跨径组合为 104 m+165 m+104 m,组合桥面板采用 16 mm 钢板+120 mm 普通混凝土;北侧跨大堤桥梁跨径组合为 154 m+245 m+154 m,组合桥面板采用 16 mm 钢板+80 mm UHPC。该桥标准横断面图见图 3。

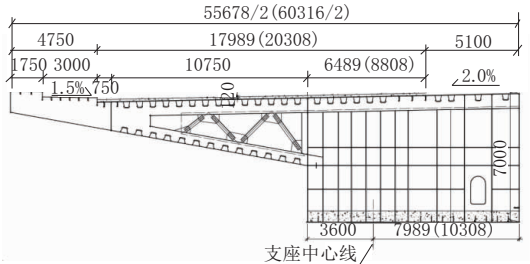


图 3 济南凤凰路跨大堤引桥横断面图(单位:mm)

中国上海 G1503 高速公路跨吴淞江大桥,桥宽为 16.25~28.143 m,跨径组合为 85 m+138 m+81 m,组合桥面板采用 16 mm 钢板+150 mm 普通混凝土板。该桥标准横断面图见图 4。

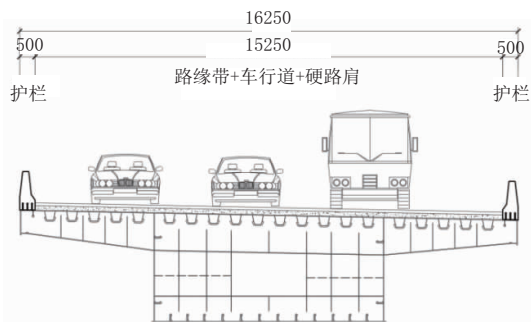


图4 上海G1503高速公路跨吴淞江大桥横断面图(单位:mm)

中国山西临猗黄河大桥^[29],标准桥宽26 m,跨径组合为112 m+14×128 m+14×128 m+120 m,组合桥面板采用16 mm钢板+280 mm普通混凝土板。该桥标准横断面图见图5。

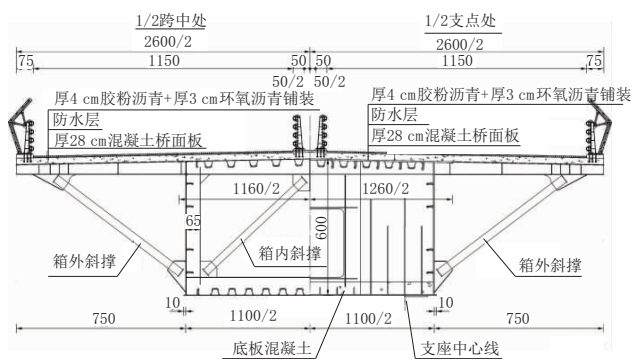


图5 山西临猗黄河大桥标准横断面图(单位:cm)

随着有关闭口钢箱梁理论研究和工程实践的深入,必将大大增强该桥型的竞争力,工程应用也将越来越广泛。

3 技术特点

3.1 设计方法

闭口钢箱组合梁中钢梁常用断面形式有:无挑臂箱型断面(见图6)、有挑臂箱型断面(见图7)、有挑臂横梁箱型断面(见图8)和多箱单室箱型断面(见图9)这4种。

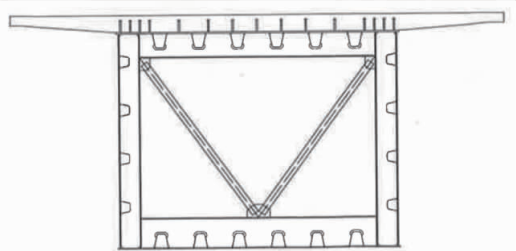


图6 无挑臂箱型断面

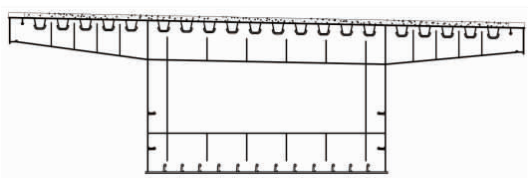


图7 有挑臂箱型断面

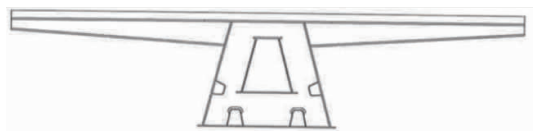


图8 有挑臂横梁箱型断面

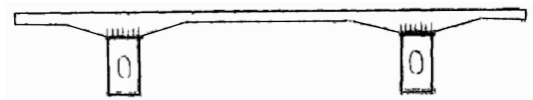


图9 多箱单室箱型断面

图6和图7所示箱梁断面腹板之间的顶板为组合桥面板,区别为挑臂是否为组合桥面板;图8箱梁断面主要特征为箱梁箱室较小,钢顶板有效宽度一般取全宽,两侧设置大挑臂支撑混凝土板;图9箱梁断面为多个小箱梁作为纵梁,上设混凝土桥面板,本质上与组合钢板梁受力模式相同。可见,图8和图9闭口箱型断面的受力特点本质上与组合钢板梁或槽型组合箱梁一致,设计方法可参照现行规范进行。

图6和图7组合梁为典型闭口钢箱组合梁,主要特征为桥面板以组合桥面板为主,其受力特点与传统开口组合梁不同。组合桥面板是否参与主梁整体受力,决定了结构类型。组合桥面板若参与第一体系整体受力,主梁按组合钢箱梁考虑,则可充分发挥混凝土板承载能力,有效减少钢桥面板厚度,节约投资;若仅参与第二、第三体系受力,主梁整体仍以钢箱梁受力为主,则组合桥面板的主要作用为增强钢桥面板刚度,改善其疲劳性能,同时解决沥青铺装损坏问题。目前,组合桥面板研究主要集中于第二、第三体系,较少涉及第一体系。

闭口钢箱组合梁计算方法主要参照钢箱梁相关规范进行,但其组合桥面板受力特点、构造形式均具有独特性,如组合桥面板中钢板和混凝土板的有效宽度取值、钢板和混凝土板厚度取值、钢板加劲肋形式和间距、剪力连接件形式和间距、混凝土板的材料类型等,均与钢箱梁、组合钢板梁、组合槽型箱梁等常用结构不同。因此,闭口钢箱组合梁的设计理论和方法均有待进一步研究完善。

3.2 结构形式

3.2.1 组合截面

早期,组合梁断面常采用多箱截面,随着跨径增大,单箱断面成为了普遍采用的截面形式之一。组合箱梁的钢梁部分,根据顶面是否开口分成槽型截面和闭口截面。一直以来,闭口钢箱组合梁一般在曲线半径较小、抗扭要求较高条件下使用^[30],而且受困于耐久性问题,组合桥面板只有在保证混凝土完全无

渗透的情况下使用^[31]。

由于大跨径桥梁的混凝土桥面板重量太大,而钢桥面板的疲劳病害和铺装损坏问题日益突出,闭口钢箱组合梁桥焕发出新的生命力,特别是在大跨度、不规则平面线形、城市快速施工等情况下,与预应力混凝土连续梁、槽型组合梁、钢箱梁等结构类型相比,在施工速度、难度、跨越能力、耐久性、养护等方面,都体现出较为明显的优势。

桥宽不超过 20 m 时,闭口钢箱梁断面一般采用单箱单室;桥面宽度达 20 m 以上时,可以采用单箱双室或单箱多室^[32]。

3.2.2 钢箱梁

闭口钢箱组合梁的钢梁构造形式与常规钢箱梁相同,包含顶板、底板和腹板等主要板件及其纵横向加劲体系。由于钢梁顶板与混凝土板结合形成组合桥面板,共同受力,因此其受力特性与普通钢箱梁存在明显差异。

首先,混凝土板与钢板相结合,显著增强了钢桥面板的刚度,基本解决了钢板受压屈曲失稳问题。因此,在连续梁桥的跨中区域,钢顶板不需考虑局部受压稳定折减,有效地提高了钢板利用率,降低了造价。

其次,由于组合桥面板刚度提高,钢板在活载作用下的局部受力得到显著改善,为优化钢板的纵向加劲肋提供了空间。为提高钢桥面板刚度,传统正交异性钢桥面板的纵向加劲肋一般采用 U 形肋,其加工难度、焊接量、曲线适应性均不如直板肋、球扁钢等。研究表明^[18-19],组合桥面板可以选用板肋、倒 T 肋、球扁钢等类型加劲,其承载能力和刚度完全满足《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)等现行规范要求。同时,由于组合桥面板刚度增强,加劲肋间距可以适当加大,既能节省钢材,又能减少焊缝。

再次,在受压区,组合桥面板可充分发挥混凝土板抗压性能,相应地减薄钢板厚度,节约钢材。同时,组合桥面板刚度提高,可有效改善钢桥面板疲劳问题。

最后,组合桥面板的自重比钢箱梁大很多,导致连续梁中墩处底板钢板承受更大的压力,屈曲失稳问题突出。此问题同样可以采用组合板解决,即底板顶面设置混凝土板,采用剪力键连接形成组合底板,在充分发挥混凝土板承压能力的同时,又使钢板局部受压稳定性得到了增强。

3.2.3 桥面板

闭口钢箱组合梁的典型特征是采用正交异性组合桥面板。组合桥面板主要有:钢-普通混凝土组合桥面板和钢-UHPC 组合桥面板 2 种类型。

组合桥面板主要有以下几个特点:

(1)混凝土板厚度较薄。与常规混凝土桥面板相比,组合桥面板中的混凝土板受力明显较小,故其厚度相对减小。然而,从构造要求出发,组合桥面板中的混凝土板参与第一体系受力,其配筋要求又与常规混凝土桥面板相似,考虑钢筋保护层厚度、钢筋直径等因素,混凝土板厚度也不宜太小。研究表明^[33],钢-普通混凝土组合桥面板中的混凝土板厚度一般为 90~150 mm,钢-UHPC 组合桥面板中的混凝土板厚度一般为 40~80 mm。

(2)负弯矩区设计理念各异。如前所述,由于组合桥面板存在耐久性问题,以往使用组合桥面板的条件十分苛刻,限制了其发展。研究表明,在正常使用阶段,组合桥面板的裂缝较小,足以满足混凝土结构耐久性要求^[11];在其他情况下,可通过选用抗拉性能较强的 UHPC 材料来提高组合桥面板的抗裂性能,同时减轻结构自重。考虑到 UHPC 材料造价较高,可以采用钢-普通混凝土-UHPC 新型组合桥面板,以降低 UHPC 使用量,进而减少投资。

(3)混凝土板收缩徐变影响较大。闭口钢箱组合梁的钢梁顶板可作为混凝土板的模板,施工便利性得到显著增强。但混凝土板施工一般采用现浇方式,由此产生了收缩徐变问题。混凝土板收缩徐变越大,组合桥面板内力重分布越显著,混凝土板内力转移给钢板的比例越高,导致钢板材料用量增加,混凝土板利用率下降,经济优越性下降。因此,组合桥面板应采用有效措施来控制混凝土板的收缩徐变,如改善养护措施、降低混凝土收缩性能、采用合理的施工方法等。

简而言之,组合桥面板发展遇到的首要问题是耐久性问题,即负弯矩区开裂问题;其次是要提高组合桥面板的材料发挥效率,即尽可能减小混凝土板的收缩徐变。

3.2.4 钢与混凝土板连接

组合桥面板的连接件与钢板组合梁、槽型组合箱梁相似,常选用剪力钉、开孔钢板等。由于组合桥面板中的混凝土板较薄,剪力钉连接件一般较常规栓钉矮,研究表明短栓钉承载力与其直径的 2 次方成线性比例,而栓钉长度对承载力几乎无影响^[11,34]。

4 关键技术问题

4.1 设计方法

组合桥面板为闭口钢箱组合梁的典型结构特征,而组合桥面板的出现主要源于钢桥面板的疲劳问题和铺装损坏病害难以克服,需要利用混凝土板来加强钢板刚度,减轻相关病害。基于此,组合桥面板一般考虑承担第二、第三体系受力,不参与第一体系受力。这类桥梁严格意义上仍是钢箱梁,按现行钢结构桥梁设计即可。

闭口钢箱组合梁的组合桥面板参与第一体系整体受力,其受力特性与传统的钢结构桥梁、开口组合梁明显不同,主要表现在以下三方面。

(1)与钢箱梁桥相比,闭口钢箱组合梁的断面形心显著上移,跨中区域腹板受压区占比下降,故其加劲体系可适当简化,可节约材料,减少焊接量,方便施工。

(2)与钢箱梁桥相比,组合桥面板的自重显著增大,中墩顶钢梁底板压曲稳定性问题突出。同样,采用混凝土板+钢板组合结构,可充分发挥混凝土抗压性能,减少钢材用量,降低造价。

(3)组合桥面板的有效宽度取值与钢箱梁、开口组合梁不同。钢-混凝土板之间通过连接件传递剪力来实现共同受力,由于受剪力钉刚度、剪力滞后效应等因素影响,钢-混凝土板不能完全同步受力,因此两者的有效应力分布宽度也必然不同。目前,国内外规范对钢箱梁、开口组合梁的翼板有效宽度均有相关规定,如表2所示。

表2 国内外规范涉及桥面板类型表

规范名称	钢桥面板	混凝土桥面板	组合桥面板
JTG D64—2015	✓	✓	
AASHTO	✓	✓	
BS5400	✓	✓	✓
Eurocode	✓	✓	
道桥示方书	✓	✓	

表中钢桥面板适用于钢结构桥梁;混凝土桥面板适用于钢板组合梁、槽型钢箱梁、窄箱闭口钢箱组合梁等;组合桥面板适用于闭口钢箱组合梁等。其中英国规范BS5400对组合桥面板有所表述,但其按钢箱梁取值,不符合实际受力状况,故组合桥面板的有效宽度需仔细研究。

4.2 结构体系

闭口钢箱组合梁的结构体系主要有以下几方面

值得深入探讨。

(1)闭口钢箱组合梁的边中跨比、跨高比等总体参数。闭口钢箱组合梁介于预应力混凝土梁和钢箱梁之间,总体参数有其独有特点。同时,与钢箱梁相比,闭口钢箱组合梁可采用双结合结构,即钢箱梁顶、底板均采用钢-混凝土组合结构,故可通过增加顶、底混凝土板厚度来达到降低梁高的目的。这也为净空受限的桥梁方案提供了一种选择。

(2)闭口钢箱组合梁桥的典型特征为桥面板采用组合桥面板。组合桥面板结构形式一般采用钢-普通混凝土组合桥面板、钢-UHPC组合桥面板、钢-普通混凝土-UHPC组合桥面板。不同类型的组合桥面板具有不同的负弯矩区抗裂性能,故其经济适用跨径范围也不相同,有必要进行对比研究。

(3)从力学角度出发,闭口钢箱组合梁克服了钢箱梁桥面板疲劳问题,也比槽型组合梁适用于更大的跨径,具有一定的竞争优势。应该从经济角度出发,考虑施工方案等因素,比较不同跨径范围内上述三者的经济性能,为设计方案选择提供参考。

4.3 组合桥面板

由于混凝土板提高了钢板的刚度,相比于传统钢箱梁,组合桥面板的构造具有很大的优化空间。

首先,钢板的厚度可适当减小。研究表明,综合考虑钢板制造加工、施工期间受力需求等因素,钢板最薄可达8mm。设计时,有必要进一步研究钢板/混凝土板厚度比,以便充分发挥2种材料性能。

其次,钢桥面板加劲肋形式和间距优化。通常,钢桥面板多采用U形肋,其焊缝量大,曲线适应性差。组合桥面板刚度明显增大,可选用板肋、球扁钢等易加工,且曲线适用性强的加劲肋。同时,加劲肋间距可适当放大,使加劲肋数量减少。设计时,优化钢桥面板构造形式,既能节约材料,又能简化施工,便于养护,具有现实意义和实用价值。

此外,钢-混凝土组合梁之间连接件布置优化。由于受剪力钉刚度、剪力滞后效应等因素影响,连接件传递剪力大小沿横桥向是不相同的,随其与钢箱梁腹板距离的不同而变化。因此,有必要分析剪力键的受力规律,并根据分析结果确定不同区域剪力连接件的间距等,使剪力连接件能充分发挥承载能力。

4.4 负弯矩区开裂

负弯矩区开裂影响组合桥面板的耐久性。设计时,需仔细分析开裂区范围,通过增加混凝土板抗裂性能、控制最大裂缝宽度等方式来解决桥面板开裂

问题。因此,有必要深入开展钢-混凝土组合桥面板的名义开裂应力、开裂范围确定方法、裂缝宽度计算方法等方面研究。

5 结 语

闭口钢箱组合梁兼具槽型组合箱梁和钢箱梁的优点,既能克服正交异性钢桥面板的疲劳破坏和铺装易损难题,又能大大增加槽型组合梁的跨越能力,具有广泛的应用前景和实用价值。该桥型特别适用于曲线桥、大跨度桥和扭转性能要求高的桥梁,具有施工方便、结构性能好、经济性能较佳等优点,在城市、山区等复杂环境中具有很强的竞争力。随着组合桥面板的理论研究和实践不断完善,必将促进闭口钢箱梁进一步发展,关于其力学性能、经济性能、设计方法等相关研究也将成为研究热点。

参考文献:

- [1] 邵旭东,甘屹东,李嘉,等.钢-超薄 UHPC 组合桥面板界面抗剪焊接构造[J].中国公路学报,2018,31(11):91-101.
- [2] 田其轩.日本钢-混凝土组合桥的发展趋势[J].公路交通技术,2000(3):64-70.
- [3] 肖林,卫星,温宗意,等.钢-混组合结构桥梁 2019 年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(5):168-182.
- [4] 程烨,解来江.城市高架简支小箱梁式钢-混组合梁桥设计分析[J].市政技术,2017,35(5):52-53.
- [5] 张智聪.山西省闭口钢箱组合梁主要研究内容与应用前景分析[C]//中国土木工程学会总工程师工作委员会 2021 年学术年会暨首届总工论坛论文集.北京:中国土木工程学会总工程师工作委员会,2021:412-414.
- [6] 詹健,邵旭东,曲宛桐,等.钢-STC 轻型组合桥面结构多参数分析[J].公路交通科技,2018,35(5):73-81,90.
- [7] 吴佳佳,邵旭东,刘榕.钢-UHPC 轻型组合梁桥面板结构型式研究[J].公路工程,2017,42(4):76-81,101.
- [8] 邵旭东,郑晗,黄细军,等.钢-UHPC 轻型组合桥面板横向受力性能[J].中国公路学报,2017,30(9):70-77.
- [9] 邵旭东,李召辉,吴佳佳,等.钢-UHPC 轻型组合桥面板局部修补技术试验[J].中国公路学报,2017,30(7):58-64.
- [10] 李文光,邵旭东,方恒,等.钢-UHPC 组合板受弯性能的试验研究[J].土木工程学报,2015,48(11):93-102.
- [11] 邵旭东,张松涛,张良,等.钢-超薄 UHPC 层轻型组合桥面性能研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(1):22-27.
- [12] 邵旭东,曹君辉,易笃韬,等.正交异性钢板-薄层 RPC 组合桥面基本性能研究[J].中国公路学报,2012,25(2):40-45.
- [13] 刘梦麟,邵旭东,张哲,等.正交异性钢板-超薄 RPC 组合桥面板结构的抗弯疲劳性能试验[J].公路交通科技,2012,29(10):46-53.
- [14] 曾明根,武彧,苏庆田.钢纤维混凝土组合桥面板负弯矩区开裂性能试验[J].吉林大学学报(工学版),2022:1-10.
- [15] 戴昌源,苏庆田.钢-混凝土组合桥面板负弯矩区裂缝宽度计算[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(6):806-813.
- [16] 戴昌源,苏庆田,冯小毛,等.纤维混凝土组合桥面板裂缝宽度计算方法[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(6):788-795.
- [17] 贺欣怡,吴冲,苏庆田,等.组合桥面板球扁钢加劲肋螺栓接头力学性能[J].同济大学学报(自然科学版),2020,48(10):1425-1432.
- [18] 苏庆田,韩旭,姜旭,等.U 形肋正交异性组合桥面板力学性能[J].哈尔滨工业大学学报,2016,48(9):14-19.
- [19] 苏庆田,贺欣怡,曾明根,等.T 形肋正交异性组合桥面板力学性能[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(3):341-347.
- [20] 苏庆田,薛智波,韩旭,等.开口 U 形肋组合桥面板基本力学性能[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(5):651-657.
- [21] 张清华,程震宇,邓鹏昊,等.新型钢-UHPC 组合桥面板抗弯承载力模型试验与理论分析方法[J].土木工程学报,2022,55(3):47-64.
- [22] 张清华,郭伟峰,崔闯,等.新型大纵肋正交异性钢-混凝土组合桥面板疲劳特性研究[J].公路,2015,60(12):71-77.
- [23] 张清华,刘益铭,卜一之,等.大纵肋正交异性组合桥面板疲劳性能研究[J].中国公路学报,2017,30(3):226-235.
- [24] 张清华,舒刚,卜一之.正交异性组合桥面板界面滑移效应研究[J].桥梁建设,2017,47(1):47-52.
- [25] 张清华,张鹏,刘益铭,等.新型大纵肋正交异性组合桥面板力学性能研究[J].桥梁建设,2017,47(3):30-35.
- [26] 郑楷柱,何海,梁立农,等.佛陈大桥(扩建)的轻型组合桥面结构设计[J].城市道桥与防洪 2015(9):101-103.
- [27] 李嘉,冯啸天,邵旭东,等.STC 钢桥面铺装新体系的力学计算与实桥试验对比分析[J].中国公路学报,2014,27(3):39-44.
- [28] 常付平,许为民,李盘山,等.济南凤凰黄河大桥总体设计[J].城市道桥与防洪,2021(11):66-70.
- [29] 韩锋,杨华.临猗黄河大桥总体设计[J].世界桥梁,2022,50(5):7-13.
- [30] 邵长宇.梁式组合结构桥梁[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [31] Badoux Jean Claude. 二十五年来瑞士结合梁桥的发展[J].国外桥梁,1986(4):71-78.
- [32] 邵长宇.组合结构桥梁的发展与应用前景[J].城市道桥与防洪,2016(9):11-15.
- [33] 吴忠,周云岗.大跨径闭口钢箱组合梁关键技术研究[R].上海:上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,2022.
- [34] 邵旭东,周环宇,曹君辉.钢-薄层 RPC 组合桥面结构栓钉的抗剪性能[J].公路交通科技,2013,30(4):34-39,64.