

高速公路钢板组合梁结构设计研究

包江磊,孙昌禄,姜穗琪

(浙江数智交院科技股份有限公司,浙江 杭州 310000)

摘要: 钢板组合梁因具有构造简单、施工方便、结构轻巧的特点,在国内高速公路桥梁上的应用越来越广泛,一方面能够很好地适应工业化建造的要求并能满足桥梁的受力要求,另一方面钢板组合梁也具有良好的经济性。然而,在桥面板施工期及运营期的裂缝问题是制约钢板组合梁发展和运用的关键。以杭绍甬高速公路杭绍段为研究背景,对钢板组合梁的使用情况、设计参数进行了介绍,并分析了混凝土桥面板中支点处裂缝、现浇湿接缝施工期收缩裂缝产生的原因及控制措施,最后给出了基于标准化设计的混凝土桥面板设计方案。

关键词: 钢板组合梁;中支点处裂缝;施工期收缩裂缝;混凝土桥标准化设计

中图分类号: U448.216

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)08-0082-04

0 引言

与简支的混凝土结构桥梁相比,组合结构桥梁用钢结构代替了部分混凝土结构,解决了正弯矩区混凝土下缘受拉开裂等承载力降低、耐久性下降的问题。但对于连续体系的组合结构梁桥,其中支点附近仍然受到负弯矩作用,混凝土桥面板上缘受拉开裂问题依然严重。

合理的构造、施工措施可以改善墩顶受力性能^[1]。常用的构造措施有在负弯矩区设置预应力筋、增加墩顶截面配筋、中支点处采用UHPC(Ultra-High Performance Concrete)或其他高性能混凝土材料等^[2];常用的施工措施有采用先正弯矩区后负弯矩区的桥面板浇筑顺序、跨中压重、中支点钢梁先顶升后落梁的方法等^[3]。

除了墩顶位置裂缝,混凝土板湿接缝裂缝也是钢板组合梁的主要病害之一,因湿接缝处混凝土厚度较薄,温度作用更为明显,同时湿接缝暴露在空气中的面积较大,材料的收缩变形也较显著^[4]。现有研究主要从桥梁荷载、湿接缝结构形式及钢筋连接方式等方面分析湿接缝混凝土的开裂行为^[5-6],也有研究从湿接缝混凝土材料本身出发,采用UHPC^[7]或补偿收缩混凝土^[8]等材料来抑制桥面板湿接缝混凝土的开裂。

本文以杭绍甬高速杭绍段为工程背景,通过建

立MIDAS有限元计算模型对不同跨径钢板组合梁进行受力分析,针对钢混组合梁桥面板墩顶及现浇湿接缝容易开裂的问题,有针对性地优化材料和施工工序,并给出了预制桥面板标准化设计的方案。

1 杭绍甬高速公路杭绍段钢板组合梁应用情况

杭绍甬高速公路杭绍段采用双向6车道,设计速度120 km/h,路基标准宽度34.5 m。为了打造绿色构件示范项目,杭绍甬高速公路杭绍段在方案设计、构件加工、现场施工、运营管理等各个环节都突出绿色环保低碳的理念,旨在减少碳排放、降低环境污染、减轻对沿线城镇的干扰、提高行车舒适度,并且结构本身也要具有耐久性好、运营期病害少、抗灾害能力强等特点。同时,高架桥建造对工业化快速施工的需求同样迫切,首先是工期的制约,其次杭绍甬高速公路杭绍段与多条地面道路构成上下双层交通体系,且地面道路交通量繁忙、保通要求高,高架桥施工必须快速便捷,最大限度减少对地面道路行车的影响。工业化程度较高、造价比钢结构更低的钢板组合梁恰巧解决了以上问题。

本项目共新建连续高架桥约48.3 km,其中钢板组合梁共有49联(含简支结构),总计约6.2 km,占高架桥总长度的12.8%,用钢量总计约6万t。三跨连续体系钢板组合梁标准跨径为(30+50+30)m、(32.5+55+32.5)m、(35+60+35)m,简支钢板组合梁跨径为45~65 m。

单幅标准横断面采用4主梁,桥梁宽度16.5 m,

收稿日期:2023-10-18

作者简介:包江磊(1992—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

主梁间距 4.3 m,钢板组合梁典型横断面布置图如图 1 所示。

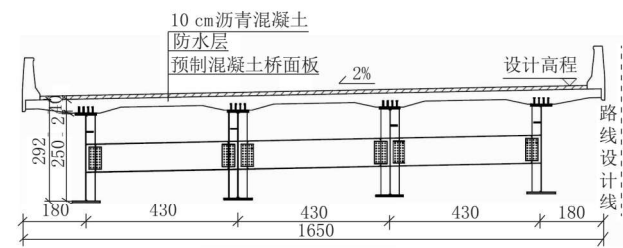


图 1 主梁标准横断面图(单位:cm)

桥面板为普通钢筋混凝土构件,标准段采用预制板,变宽段采用现浇板。桥面板横向变厚度设计,各主梁之间、挑臂端部厚度为 0.25 m,主梁支撑处厚度为 0.4 m。

横梁分为边支点处的端横梁、中支点处的中横梁以及桥跨内的小横梁,均采用工字型钢梁,横梁与主梁加劲肋通过高强螺栓连接。

表 1 给出几种标准跨径钢板组合梁的设计参数。

表 1 标准跨径钢板组合梁参数表

跨径组合		(30+50+30)m	(32.5+55+32.5)m	(35+60+35)m
用钢量/(kg·m ⁻²)		241.5	287.6	299.6
钢梁高度/m		2.5	2.8	3.1
钢梁腹板厚度/mm	支点处	20	22	22
	其他位置	16	18	18
顶板厚度/mm	边支点及中跨跨中段	26	26	26
	过渡段	34	34	34
	中墩墩顶段	44	50	50
底板厚度/mm	边支点及中跨跨中段	28	34	34
	过渡段	42	42	42
	中墩墩顶段	52	52	52

2 计算模型及主要结果分析

主梁预制桥面板采用 C40 混凝土,现浇湿接缝采用 C50 混凝土,钢主梁纵梁采用 Q345 钢材。钢筋混凝土容重取 28 kN/m³,钢材容重取 78.5 kN/m³,不参与受力的横隔板等构造作为均布荷载施加到主梁。

二期恒载包括桥面铺装、护栏等,按实际作用位置加载,其中 8 cm C50 混凝土,重力密度取 $\gamma=26\text{ kN/m}^3$,10 cm 沥青混凝土铺装重力密度取 $\gamma=24\text{ kN/m}^3$,单侧混凝土护栏线荷载取 11.6 kN/m。

主梁混凝土收缩徐变作用按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)的规定计算。汽车荷载按公路 I 级考虑,进行 4 车道

加载,考虑偏载及中载,纵、横向折减系数及汽车荷载冲击系数、主梁整体升降温及梯度温度依据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)规定取用。主、边墩支座沉降量分别取主、边跨跨径的 1/3000。

利用有限元分析软件 MIDAS 建立空间梁格模型对主梁纵向受力进行分析,梁格模型按照实际结构进行离散,按板厚模拟全部纵横梁及桥面板,桥面板与钢主梁之间采用弹性连接中的刚性,同时采用零容重的虚拟纵横梁模拟荷载传递,MIDAS 模型如图 2 所示。

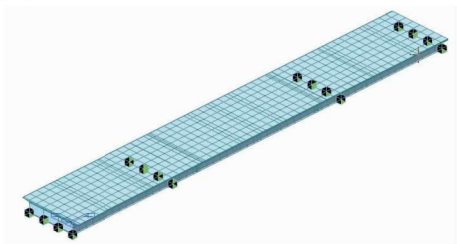


图 2 MIDAS 桥梁三维静力计算

桥面板按照普通钢筋混凝土构件进行设计,有效宽度取全部宽度,采用允许混凝土开裂的分析方法,中支座两侧各 0.15 倍跨径范围内组合梁截面刚度取开裂截面刚度。

几种标准跨径钢板组合梁的主要计算结果如表 2 所示。

表 2 钢板组合梁主要计算结果表

跨径组合	(30+50+30)m	(32.5+55+32.5)m	(35+60+35)m	限值
钢梁最大应力/MPa	232	225.1	235	270
钢梁腹板最大剪应力/MPa	77.1	75.3	72.8	155
钢梁腹板最大折算应力/MPa	257	260	267	297
中支点处裂缝宽度/mm	0.131	0.141	0.146	0.15

不同跨径组合梁运营阶段承载能力极限状态基本组合下弯矩及剪力包络图如图 3 至图 5 所示,已考虑重要性系数 1.1。

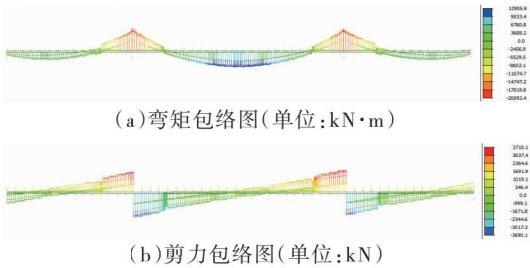


图 3 (30+50+30)m 跨径基本组合弯矩及剪力包络图

以(30+50+30)m 跨径组合钢梁为例分析施工阶段钢梁应力。(30+50+30)m 跨径组合梁典型施工阶段钢梁应力如表 3 所示。

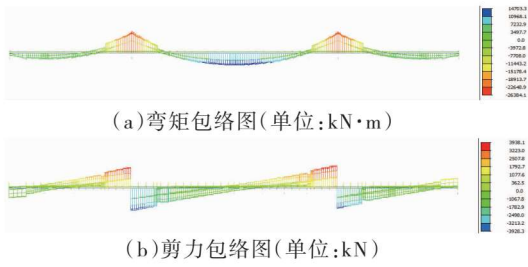


图4 (32.5+55+32.5)m跨径基本组合弯矩及剪力包络图

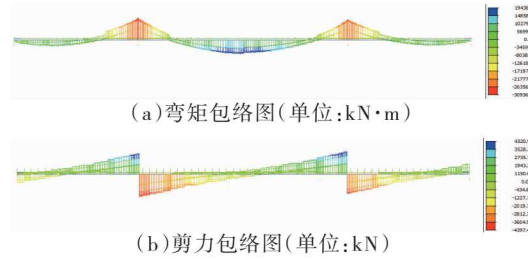


图5 (35+60+35)m跨径基本组合弯矩及剪力包络图

表3 (30+50+30)m钢板组合梁施工阶段钢梁应力表

施工阶段	墩顶钢梁应力/MPa		跨中钢梁应力/MPa	
	上缘	下缘	上缘	下缘
钢梁节段架设	3.1	-2.2	-20.3	16.6
横梁连接	3.8	-2.7	-20.8	17.2
拆除临时支架	12.3	-8.8	-27.1	22.6
跨中桥面板与钢梁叠合	81.1	-57.6	-82.7	65.1
墩顶桥面板与钢梁叠合	83.4	-59.7	-83.1	65
二期恒载加载	105.9	-91.3	-91.2	90.6
10 a 收缩徐变	116.6	-111.7	-122.9	68.6

典型施工阶段钢梁应力如图6至图8所示。

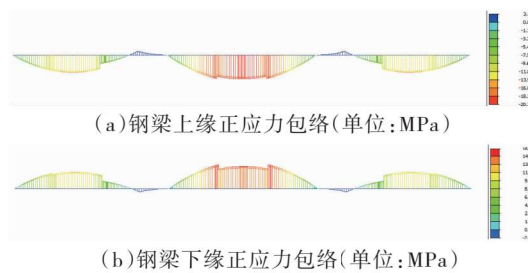


图6 (30+50+30)m钢梁节段架设阶段钢梁应力包络图

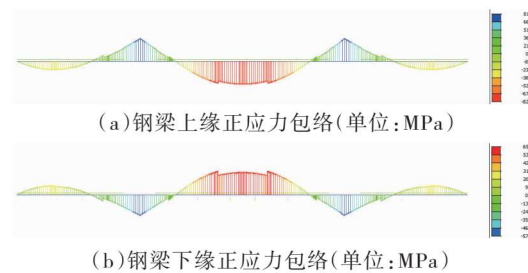


图7 (30+50+30)m跨中桥面板与工字梁叠合阶段钢梁应力

由表2可以看出,中支点处裂缝宽度是控制钢板组合梁设计的关键因素之一,3种跨径中支点处裂

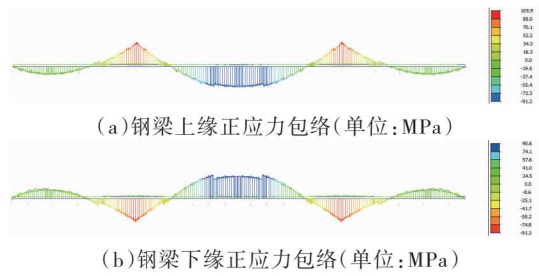


图8 (30+50+30)m二期荷载加载阶段钢梁应力包络图

缝宽度均达到限值的85%以上,因此本文对中支点处裂缝控制措施进行了探讨。

3 墩顶混凝土桥面板裂缝控制措施

组合梁混凝土桥面板裂缝宽度在满足规范限值的同时还需考虑对耐久性的影响。为满足结构在正常使用阶段性能安全可靠,连续体系的钢混组合梁桥负弯矩区混凝土桥面板按照是否允许混凝土开裂可分为两种类型^[9]。

(1)不允许开裂,在混凝土桥面板中施加预压力,使桥面板在荷载组合作用下不产生拉应力,或拉应力不超过抗拉设计容许值。

(2)允许开裂,但裂缝宽度控制在合理范围内,本项目裂缝宽度限制在0.15 mm以内。

除了满足规范中对裂缝宽度的要求外,设计过程中还需考虑钢筋直径对裂缝形式的影响。在满足裂缝宽度限值的情况下,采用小直径钢筋时,裂缝“细、密”,而采用大直径钢筋时裂缝“疏、松”,本项目从耐久性的角度考虑,组合梁桥面板纵桥向主筋采用20 mm带肋钢筋。

为控制裂缝,本项目现浇混凝土采用C50微膨胀聚丙烯腈纤维混凝土,聚丙烯腈纤维的参数如表4。

表4 聚丙烯腈纤维参数表

直径/ μm	长度/ mm	抗拉强度/ MPa	模量/ MPa	建议掺量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^3)$
10~20	12	≥ 500	≥ 500	1.2~1.8

4 现浇湿接缝施工期收缩裂缝控制措施

为有效地控制湿接缝混凝土施工期收缩裂缝,本项目结合有限元计算结果和过往项目工程经验,对组合梁桥面板的材料用料及指标、施工工序提出如下几点建议。

(1)预制板约束较强,随着桥面板浇筑长度的增加,约束应力逐渐增大,应采用微膨胀混凝土,保证水中14 d的限制膨胀率不小于0.025%、水中14 d转空气中28 d的限制膨胀率不小于0.010%。

(2)为控制膨胀材料质量,宜采取膨胀性能较高的膨胀材料,膨胀剂应符合《混凝土膨胀剂》(GB/T 23439—2017)的要求,保证 20℃水中 7 d 的限制膨胀率不小于 0.050%、转空气中 21 d 的限制膨胀率不小于 -0.01%。

(3)第一次抹面应在混凝土浇筑完成后立即进行,第二次抹面宜在混凝土表面轻按无水痕时进行并及时对表面进行覆盖、保湿保温养护,以消除可能产生的塑性裂缝。

(4)预制板保湿养护不少于 14 d,现浇湿接缝保湿养护不小于 7 d。每块预制桥面板浇筑时,要求一次完成,中间不设施工缝。

(5)湿接缝位置的预制桥面板断面应均匀凿毛,凿毛时间控制在不小于浇筑混凝土初凝后 3 d,且强度不小于 3.5 MPa。

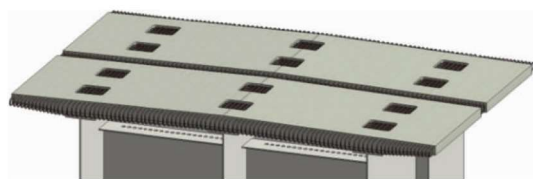
(6)湿接缝段按照先浇筑每跨跨中范围内的湿接缝,后浇筑墩顶负弯矩区加强板范围内的湿接缝的顺序进行。

5 桥面板标准化设计

设计阶段的标准化不仅能够缩短设计周期,也可以从简化施工工序、提高施工质量、节约工程造价、降低环境影响等方面优化设计方案,形成一套可推广使用的通用图体系。

钢板组合梁的钢主梁、横梁为工字钢截面,早已适合自动化流水线生产。为了使混凝土桥面板同样满足工厂化生产、装配化施工的需要,本项目将混凝土桥面板分为预制段和联端现浇段,纵向连接采用钢筋混凝土湿接缝,横向则由 2 块板组成,在中梁 1/2 处设纵向湿接缝连接。桥面板上需预留剪力钉槽,钢梁上翼缘在挖槽处及横向湿接缝处设置剪力钉,通过后浇混凝土与钢梁连接。预制桥面板根据板宽分为 6 类:3 m 标准桥面板、3 m 标准加强桥面板、3 m 墩顶过渡桥面板、3 m 梁端过渡桥面板、3.5 m 非标准桥面板和 2.75 m 梁端桥面板,两块预制桥面板横向之间设置 0.50 m 宽的湿接缝。纵、横向湿接缝内预留环形钢筋并错位连接,桥面板构造如图 9 所示,安装预制板前,应保证预制板有 2 个月以上的存放期,并采用 C50 微膨胀聚丙烯腈纤维混凝土作为湿接缝材料,以降低混凝土收缩、徐变对结构的影响。

桥面横坡由盖梁横坡、混凝土桥面板横坡共同形成,桥面板预制时,承托底面横坡为 0%,顶面横坡



(a) 桥面板整体构造



(b) 湿接缝及剪力钉槽

图 9 钢混组合梁混凝土桥面板示意图

为 2%,当超高过渡段横坡 $\neq 2\%$ 时,通过调整桥面板与上翼缘结合处的橡胶垫条厚度,使得桥面板横坡与设计横坡一致。该方法应用于超高变化段,只需微调橡胶垫条高度就能保证钢梁、预制桥面板与标准段一致,满足标准化设计的要求。

6 结 语

本文对杭绍甬高速杭绍段工程钢板组合梁的使用情况、设计参数进行了介绍,并结合主要计算结果分析了墩顶混凝土桥面板裂缝、现浇湿接缝施工期收缩裂缝产生的原因及控制措施。作为可满足标准化设计的桥梁结构类型,钢板组合梁可广泛应用于各类跨越节点桥梁,在具有消除项目建设关键线路的卡点、有效节省工期、提高建设效率、节约工程投资等优势的同时,实现了快速工业化建造。

参考文献:

- [1] 程子涵.钢板组合梁桥关键受力性能分析与试验研究[D].长沙:湖南大学,2020.
- [2] 郭一枝,贺耀北,焉学永,等.连续钢板组合梁力学性能研究[J].世界桥梁,2019,47(4):58-63.
- [3] 郑和晖,巫兴发,黄跃,等.钢-混组合连续梁负弯矩区桥面板抗裂措施[J].中外公路,2014,34(5):152-155.
- [4] 王海啸,王峻,唐风华,等.湿接缝混凝土早期收缩开裂行为与裂缝控制技术研究[J].混凝土,2021(4):9-12,15.
- [5] 申雁鹏,郭文龙,韩之江,等.混凝土桥面板湿接缝纯弯破坏行为试验研究[J].桥梁建设,2019,49(3):34-39.
- [6] 苏庆田,胡一鸣,田乐,等.用于组合梁桥面板湿接缝的弧形钢筋连接构造[J].中国公路学报,2017,30(9):86-92.
- [7] 张永涛,田飞.预制桥面板 UHPC-U 型钢筋湿接缝受力性能试验研究[J].桥梁建设,2018,48(5):48-52.
- [8] 倪玲,周永兴,邓杨芳,等.补偿收缩混凝土在桥面现浇湿接缝的试验研究[J].混凝土,2009(11):47-49,53.
- [9] 常江.连续组合梁桥负弯矩区受力性能试验研究[D].上海:同济大学,2009.