

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.08.032

大跨径连续钢混组合梁的设计及关键技术研究

段银龙¹, 余海辉², 徐东进¹

(1 广东省交通规划设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510507; 2. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 广东 广州 510507)

摘要:以汕头市国道G206跨线桥45.5 m+75 m+45.5 m连续钢混组合梁为背景,介绍大跨径钢混组合梁的构造设计及计算要点。通过对其施工方法、施工工序及墩顶负弯矩区域抗裂控制措施等关键技术研究,得出支架拆除时间、正弯矩区压重及预应力张拉对钢梁及桥面板内力有较大影响,组合梁设计时应充分考虑施工过程。最后综合考虑钢梁及面板受力情况,提出先张拉桥面板预应力后与钢梁叠合的方法是一种可用于大跨连续钢混组合梁较为合理的施工方法,值得推广与应用。

关键词:连续钢混组合梁;双槽形组合梁;施工方法;施工工序;负弯矩区;关键技术

中图分类号: U448.21+6

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)08-0119-05

0 引言

钢混组合结构最早出现在上世纪三四十年代^[1],欧美等发达国家在深入研究的基础上,建立了一些新的设计方法和施工方法,并在上世纪八十年代在西方国家得到了高度的发展。出于某种原因,在国内一直没有得到大规模的应用。近几年来,随着国家政策导向,国内掀起一股推广钢结构桥梁的热潮,多个省市都在大规模的开始使用钢混组合梁桥。其中已建成的或在建的大跨径钢混组合梁有:上海长江大桥非主通航孔桥采用的是85 m+5×105 m+90 m连续组钢混组合梁^[2]、杭州九堡大桥主梁采用的是3×85 m的连续钢混组合梁^[1]、港珠澳浅水区域采用6×85 m的连续钢混组合梁^[3]、牛田洋快速通道工程水中引桥采用的为5×70 m连续钢混组合梁等。相对于其它结构类型,钢混组合梁桥具有:强度高、韧性好;结构轻、延性好、抗震性能好^[4];工厂化生产程度高,质量易控制;钢结构工厂制作与现场施工可同步进行,工期短,效率高;可无支架施工,方便交通组织;可重复利用,实现可持续发展。虽具有较多优点,但其耐腐蚀性差,对养护要求高。

在建的国道G206跨线桥位于汕头市,是汕头市牛田洋快速通道工程中的一个跨路桥梁,桥下为现状道路,要求施工过程中保持桥下交通不中断。项目位于海边,具有海运条件,钢结构部分施工可考虑通

过水运至于附近码头,通过施工便道转运至桥位处。

1 工程概况

国道G206跨线桥桥宽32.3 m,上部结构采用分幅式设置,单幅宽度16.14 m,跨径布置为45.5 m+75 m+45.5 m。主梁采用双槽形斜腹板钢梁断面,中支点梁高3.5 m,边支点及跨中梁高为2.5 m,梁高采用二次抛物线变化。单幅桥设2道槽形梁,主梁间距为4.2 m。桥面板厚0.28 m,梗腋处加厚至0.38 m。该桥的标准横断面及总体布置分别见图1、图2。

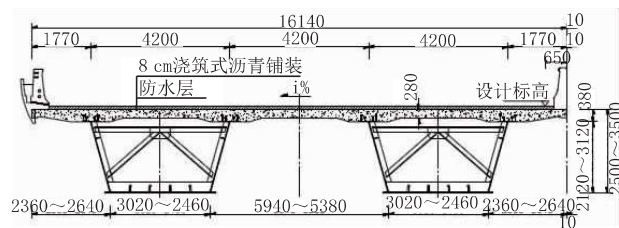


图1 标准横断面(单位:mm)

2 结构设计

2.1 设计标准

- (1)荷载等级:公路-I级。
- (2)设计车速:100 km/h。
- (3)地震动峰值加速度:0.2g。
- (4)设计基准期:100 a。
- (5)桥梁设计安全等级为一级。
- (6)耐久性设计环境类别:I类。

2.2 结构构造设计

2.2.1 钢梁的设计

槽形钢主梁采用Q345qD材质,梁高中支点处

收稿日期:2021-02-26

作者简介:段银龙(1989—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

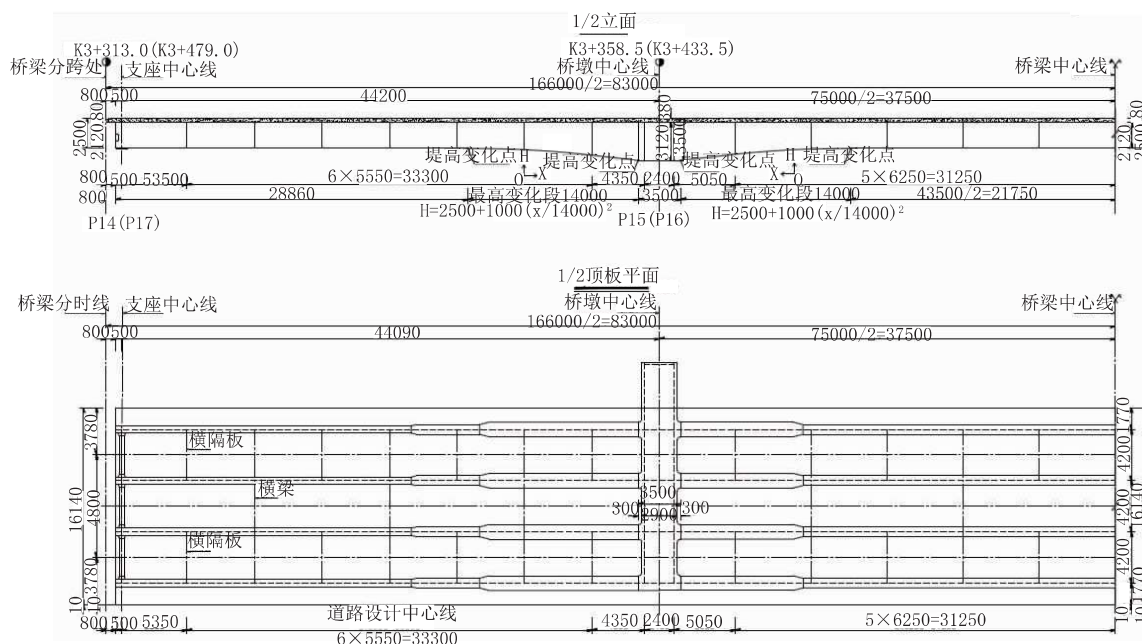


图2 总体布置(单位:mm)

3.12 m,边支点及跨中处为 2.12 m。顶板宽度 0.6~1.2 m,板厚 24 mm、32 mm、48 mm。腹板厚度为 16 mm、18 mm、24 mm,底板厚度为 20 mm、32 mm、36 mm、48 mm。腹板与顶底板的夹角保持不变,腹板间距顶宽 4.2 m,跨中及边支点处底宽 3.02 mm,中支点处底宽 2.46 m。腹板及底板设纵向加劲肋,横向设置横肋和 K 形隔板,边中跨 K 形隔板间距分别为 5.55 m 和 6.25 m,每道隔板内设置两道横肋。箱间设置隔板,每隔一道箱内隔板设置一道箱间隔板,即边中跨隔板间距分别为 11.3 m 和 12.5 m。边支点处设置端横梁,中支点处设置箱型暗盖梁。

2.2.2 桥面板及剪力钉的设计

桥面板采用 C50 混凝土,单幅宽度 16.14 m,横向支撑间距 3×4.2 m,悬臂 1.77 m。板厚 0.28 m,梗腋处及中支点暗盖梁范围加厚至 0.38 m 加厚至 0.38 m,倒角为 600 mm $\times$ 100 mm。在梁端处,考虑伸缩缝的安装,端部局部加厚至 0.5 m。桥面在中支点墩顶负弯矩范围(中支点 23.6 m),预留 0.5 m $\times$ 0.7 m 剪力槽,采用集束式剪力钉设置,并设置齿块用于顶板预应力锚固;在接近负弯矩范围处设置 1 m 的后浇带,其余范围内剪力钉均匀布置。桥面板构造见图 3。

桥面横向主筋采用 C20@100 mm,纵桥向在正弯矩区域采用 C16@100 mm,墩顶负弯矩范围采用 C22。剪力钉采用 $\phi 22 \times 150$ 和 $\phi 22 \times 200$ 两种型号,靠近外侧设置较长剪力钉以提供抗拔。

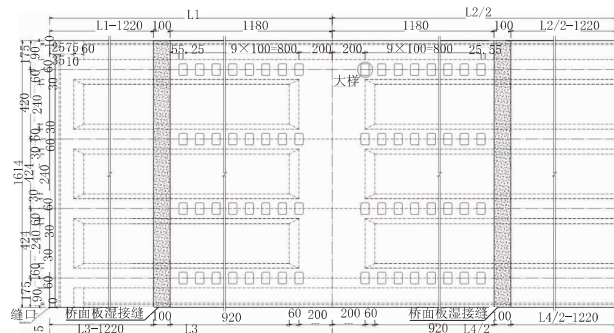


图3 桥面板构造图(单位:mm)

2.3 有限元模型的建立

2.3.1 设计荷载取值

结构一期恒载钢梁自重和混凝土面板由程序自行考虑,二期恒载:10 cm 铺装取 38.74 kN/m,内侧护栏取 10 kN/m,外侧护栏及花池取值 20.6 kN/m;整体升温按 25℃,降温按 -25℃;梯度升温按 10 cm 沥青铺装考虑;不均匀沉降按 2.5 cm 考虑,车道荷载按规范取值。

2.3.2 有限元模型的建立

利用 Midas Civil 软件建立梁格模型(见图 4),全桥共 1 078 个节点,1 241 个单元。结构荷载按组合梁分阶段受力模式考虑,即钢梁承担一期恒载,组合后承担二期恒载与活载。钢梁与混凝土板间用刚臂连接,张拉预应力时混凝土未与钢结构共同受力。模型施工阶段与实际施工步骤一一对应。

3 结构计算结果

组合梁的计算主要包括钢梁、剪力钉及桥面板

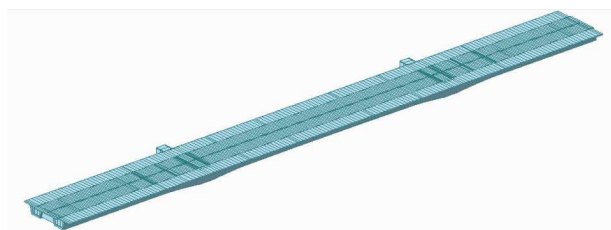


图4 Midas Civil 全桥有限元模型

三部分内容。下文将分别对其进行验算。

3.1 钢主梁的计算

3.1.1 结构强度计算

根据图5~图7,基本组合作用下,钢梁上翼缘最大拉应力 201.6 MPa,最大压应力 233.5 MPa;下翼缘最大拉应力 226.6 MPa,最大压应力 208.0 MPa;腹板最大剪应力 102.7 MPa。钢主梁应力均满足要求。

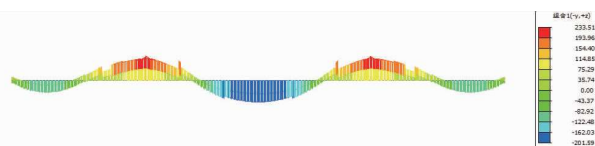


图5 基本组合钢梁上翼缘正应力图(单位:MPa)

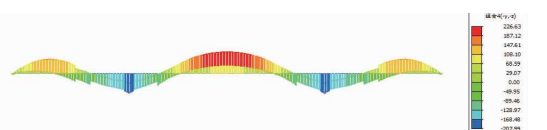


图6 基本组合钢梁下翼缘正应力图(单位:MPa)

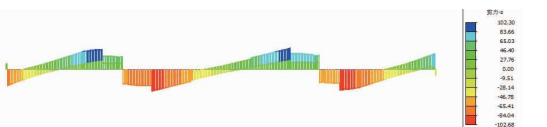


图7 基本组合钢梁剪应力图(单位:MPa)

3.1.2 结构位移及预拱度

最大活载竖向挠度 $39.4 \text{ mm} < L/500 = 150 \text{ mm}$,刚度满足要求。组合梁应设置预拱度,预拱度大小宜为结构自重标准值加 $1/2$ 车道荷载频遇值产生的挠度值,经计算跨中处预拱度值为 219 mm ,由此来设置预拱度。

3.1.3 稳定验算

稳定验算主要包括整体稳定及局部加劲验算。对于箱形截面,成桥后整体稳定不控制设计。底板加劲验算按刚性加劲检算,均满足要求;腹板按规范两道纵向加劲梁进行验算,横肋间距及横肋惯性矩均满足规范要求。支点加劲验算,按局部承压及加劲板角焊缝分别验算均满足要求。

3.1.4 疲劳强度

疲劳验算采用疲劳荷载模型 I,考虑多车道的影响,并考虑折减。底板纵肋与底板采用自动双面角焊缝,细节类别为 110;箱梁腹板与顶底板采用手工

焊,细节类别为 100。对应力幅较大的截面进行验算。选择边跨跨中、中支点和中跨跨中三个位置的截面进行疲劳验算,三个截面均为拉-压循环截面,经验算均满足要求。

3.1.5 支反力及倾覆

标准组合作用下,边支座最小反力为 489 kN ,最大为 3923 kN ;中支座小反力为 6575 kN ,最大为 21874 kN 。在正常使用过程中,支座不脱空,经计算倾覆系数为 $28 > 2.5$ 满足要求。

3.2 剪力钉的计算

根据计算结果,剪力钉设计不控制设计,设计采用横桥向每排 4 个剪力钉的形式进行布置,纵向间距分别取 100 mm 、 200 mm 、 300 mm 三个等级。

3.3 桥面板的计算

桥面板计算主要包括横桥向面板计算及纵桥向计算。横向计算取一个节段 (5.55 m),采用 Midas Civil 进行计算,模型见图 8。模型中桥面板及 K 形撑为梁单元,钢梁顶底板及腹板采用板单元模拟。根据计算内力进行配筋,横向主筋采用 $\text{C}20@100 \text{ mm}$ 时,腹板根部及跨中部分裂缝宽度均小于 0.12 mm 。

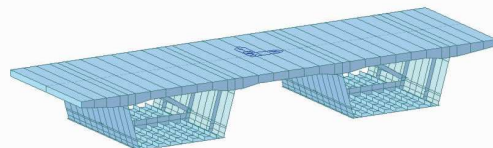


图8 桥面板横向计算模型

负弯矩区混凝土的桥面板内配置 24 束 $\phi 15.2-5$ 的预应力钢束,采用先张拉桥面板预应力后与钢梁叠合的施工方法。负弯矩区钢梁上翼缘布置群钉,浇筑混凝土时预留剪力钉槽口,张拉预应力后再浇筑剪力钉槽口,使混凝土板与钢梁共同受力。因墩顶区域出现拉应力,应对混凝土截面进行抗裂验算。经验算,考虑钢筋及预应力效应后,混凝土裂缝小于 0.1 mm ,抗裂验算满足要求。

4 关键技术的研究

大跨径连续钢混组合梁的设计关键在于施工方法、施工工序的选择及墩顶负弯矩区的抗裂的控制措施。下文将对此关键技术进行探讨研究。

4.1 施工方法及施工工序

钢混组合梁施工方案的选择,直接决定其受力,设计时应充分考虑。大跨径的连续钢混组合梁,一般受制于地面交通或者通航限制,通常选取先架设钢梁,再施工面板的方案,面板也可采用预制或现浇。

本桥的施工方案为:架设钢梁(拆除支架)→正弯矩区混凝土浇筑→负弯矩区混凝土浇筑→负弯矩区预应力张拉(叠合前)→浇筑负弯矩剪力钉槽口→施工后浇带→铺装与栏杆→成桥运营。

为研究施工工序、施工方法对成桥内力的影响,本文通过下列四个方案研究:(1)支架的拆除时机;(2)正弯矩区压重;(3)预应力的张拉与否及张拉时机。其中方案一为实际工程设计,方案二调整支架在完成混凝土浇筑参与受力后拆除,方案三为正弯矩区域压重(荷载按1 m高水箱考虑),方案四为负弯矩区桥面板与钢梁叠合后张拉预应力。方案五为桥面板不施加预应力。各方案的具体计算结果见表1。

表1 各方案钢梁及桥面板的内力和应力结果

分类	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
边跨弯矩/(kN·m)	6 786.3	2 883.1	7 190.9	6 574.6	6 510.9
中支点弯矩/(kN·m)	-57 382.3	-33 938.8	-67 903.4	-53 071.5	-57 411.8
中跨弯矩/(kN·m)	23 774.0	11 302.8	25 655.6	22 830	23 774.7
边跨上缘应力/MPa	-62.3	-6.4	-63.5	-61.6	-62
边跨下缘应力/MPa	49.4	41.3	55.3	46.5	49.4
中支点上缘应力/MPa	113	39.6	152.5	95.5	113.1
中支点的下缘应力/MPa	-112.3	-94.9	-113.6	-113	-112.4
中跨上缘应力/MPa	-129.3	-21.3	-132.8	-127.5	-129.1
中跨下缘应力/MPa	98.8	87.3	113.5	91.7	98.8
桥面板应力/MPa	-2.3	3.7	-6.3	-0.9	2.6

根据表2计算结果:对比方案一和方案二可知,支架拆除时机对钢梁内力影响非常大,对钢梁下缘应力影响8%~15%,后拆除支架对钢梁内力改善较多,但对施工支架及面板较为不利,设计时应着重考虑支架拆除时机;对比方案一和方案三可知,正弯矩区域压重是在正弯矩区叠合后,对正弯矩区域顶板应力基本无影响,对正弯矩底板及负弯矩区域顶底板应力较大,本方案可用牺牲钢梁受力来改善混凝土的受力,以达到调整钢梁与混凝土面板的内力分配比例;对比方案一和方案四可知,叠合后张拉预应力,钢梁要参与受力,预应力部分效应转移到钢梁

上,会改善钢梁的受力,但对面板受力较为不利,对比方案一和方案五可知,先张拉桥面板预应力后与钢梁叠合的施工方法,预应力的张拉对钢梁几乎无影响,全部效应由混凝土承担,受力较好。

4.2 墩顶负弯矩区抗裂控制措施

大跨连续钢混组合梁墩顶负弯矩区域桥面板易出现裂缝,负弯矩区抗裂问题是设计必须要考虑的。针对此问题的常用方法有:(1)施加预应力荷载^[5];(2)支点强迫位移^[6];(3)负弯矩区桥面板采用超高性能材料^[7];(4)压重法;(5)调整施工工序法;(6)柔性连接件组合法^[8]。

对于墩顶负弯矩区桥面板抗裂的处理,受不同设计理念的影响,各设计单位采取的方法不尽相同。通常上述方法(1)、(2)、(3)、(6)可选取一种,结合(4)和(5)来改善桥面板受力,但同时应考虑钢梁的受力。本桥设计采用调整施工工序的方法和先张拉桥面板预应力后与钢梁叠合的施工方法。

根据表1可知:张拉预应力可以改善墩顶桥面板受力,但对钢梁内力有影响,先张拉预应力后叠合的方案效果更好。拆除支架时机及压重法对桥面受力均有改善,但会使钢梁受力变的不利,设计可结合具体情况选用。

另外各方法选择时还应注意:支点强迫位移法包括支点落梁法和顶落梁法,它们更适用于两跨或三跨桥梁。以抗拔不抗剪剪力钉为代表的柔性连接件组合法,在北京、深圳的中小跨径组合梁中有较多应用,但调研到的运用于实际项目的跨径都在60 m以下。瑞士的Jean-Paul Lebet和Manfred A.Hirt认为强迫位移法更用于中小跨径桥梁,大跨径桥梁应优先考虑预应力方案^[6]。对于预应力及强迫位移法,随着时间的推移,欧洲的部分学者认为预应力效应会逐渐消失,设计理念允许采用桥面板开裂的设计理念^[9-10],这也与邵长宇大师的思路不谋而合。

综上,对于大跨连续钢混组合梁,先张拉桥面板预应力后与钢梁叠合是一种较为合理的施工方法,并且对钢梁应力基本无影响,预应力效应又能较大发挥出来,较好的控制墩顶面板的应力和裂缝水平。

5 结 语

该文通过对国道G206 45.5 m+75 m+45.5 m大跨度钢混组合梁的设计构造、计算内容及设计关键技术的探讨研究,得出以下结论:

(1)国道G206大跨度钢混组合梁钢梁的强度、

刚度、稳定及疲劳均满足规范要求;

(2)桥面板横向及纵向计算裂缝均满足规范要求;

(3)施工工序和施工方法对钢梁及墩顶负弯矩区桥面受力均有较大影响,两者之间处于此消彼长的关系,设计时应着重考虑,选择合理的方法使得钢梁与混凝土面板处于合理的内力分配比例;

(4)墩顶负弯矩区桥梁面板的控制措施是设计难点与痛点,综合考虑钢梁及面板受力,认为先张拉桥面板预应力后与钢梁叠合的方法是一种可用于大跨连续钢混组合梁较为合理的施工方法,可有效的控制墩顶负弯矩区桥面板的应力和裂缝水平。

参考文献:

- [1] 邵长宇.梁式组合结构桥梁[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
[2] 王猛.钢-混凝土连续组合梁的设计分析[J].城市道桥与防洪,

2014(12):53-55.

- [3] 刘沐宇,李倩,黄岳斌,等.港珠澳大桥钢-混组合连续梁桥超长
时间收缩徐变效应[J].中国公路学报,2016,29(12):60-69.
[4] 赵伟,殷超.中小跨径钢板梁桥结构内力分析[J].工业建筑,2015
(增刊1):701-705,721.
[5] Dezi Luigino, Leoni Graziano, Tarantino Angelo Marcello. Time-De-
pendent Analysis of Prestressed Composite Beams [J]. Journal of
Structural Engineering, 1995.
[6] 苏庆田.钢桥钢与钢-混组合桥梁概念和结构设计[M].北京:人民
交通出版社,2014.
[7] 邵旭东.组合梁负弯矩区 UHPC 接缝抗弯性能试验研究[Z].
[8] 聂建国,陶慕轩,聂鑫,等.抗拔不抗剪连接新技术及其应用[J].土
木工程学报,2015,48(4):7-14,58.
[9] 杜亚凡.结合梁桥的混凝土桥面板设计[J].国外桥梁,1998(2):
39-41.
[10] Jean claude badoux, 颜麦.二十五年来瑞士结合梁桥的发展[J].国
外桥梁,1986(4):71-78.

(上接第 115 页)

4 结 语

采用“线形、横断面、纵断面及路基处理”的四位一体工程设计方案,原地保留了古树,为当地已迁出居民留下了乡愁记忆,实现了回得去的故乡,验证了保护方案的可行性,为今后此类工程设计提供

了参考。

参考文献:

- [1] 谢兴刚,石红旗.浅议城市建设中的古树名木保护——以太原
为例[J].园林科技,2013(4):35-37.
[2] 王兰,冯李华.合肥经开区:百年古树着“新装”[EB/OL].http://
www.ahwang.cn/p/1770478.html,2018-01-09.