

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2021.04.018

鱼腹式连续箱梁桥设计

解文光

[悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司, 江苏 苏州 215000]

摘 要: 连续梁桥利用支点处产生负弯矩来降低跨中的正弯矩,有效地分散了各截面的受力,由此增大了桥梁跨度。鱼腹式连续箱梁桥的边腹板呈流线形状,增加了界面抗弯、抗扭刚度的同时兼具了外形的美观性。现浇连续箱型梁桥的发展使得桥梁能够适应多种截面形式和道路线形设计,但同时增加了结构的复杂性。因此鱼腹式连续梁桥的计算需要经过精密的计算和调整以保证其安全可靠^[1-3]。通过一个鱼腹式连续箱梁桥实例,应用平面及空间有限元模型,对桥梁结构进行计算及调整优化,确保桥梁纵、横向以及桥面板等构件满足受力和抗裂等要求^[4],为类似桥型设计提供参考。

关键词: 鱼腹式;连续箱梁桥;预应力;有限元模拟
中图分类号: U448.21+5 文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)04-0065-04

1 工程概况

38 m+50 m+38 m 鱼腹式连续梁是苏州市某工程中的一段。桥面横向布置为 0.5 m(防撞护栏)+12.25 m(机动车道)+0.5 m(防撞护栏)+12.25 m(机动车道)+0.5 m(防撞护栏)=26m,结构高度为 2.5 m,主梁横断面形式为鱼腹式,桥面铺装为 7 cm 厚 C40 混凝土铺装+桥面粘结防水涂料+二层沥青混凝土铺装(规格同道路),双向横坡 2%。桥梁横断面见图 1。

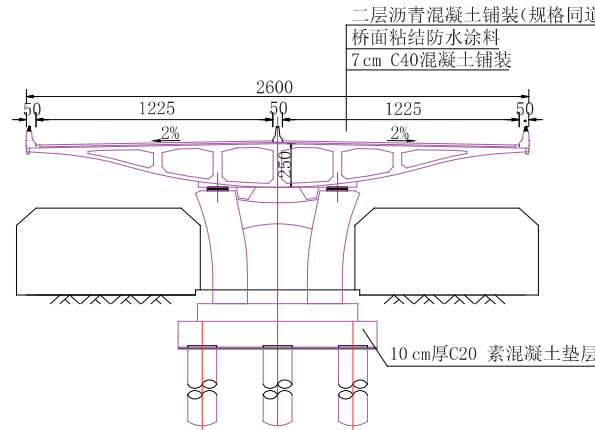


图 1 桥梁横断面布置图(单位:cm)

2 设计依据

依据资料:
桥梁总体布置横断面图;
38 m+50 m+38 m 鱼腹式连续梁主梁一般构造图;
纵向预应力钢束布置草图;

收稿日期: 2020-09-30
作者简介: 解文光(1979—),男,本科,高级工程师,从事桥梁设计工作。

结构纵向计算模型(桥梁博士)。
依据规范:
《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)
《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)

3 结构优化比较

本桥主梁为鱼腹式断面,原设计方案横断面采用了五条腹板,结构箱室相对较小,在横桥向配置预应力钢束的情况下,结构箱室可适当加大、桥面板厚度适当加大,可提高结构竖向及横向的抗弯能力,改善结构受力。因此提出了三条腹板、箱梁顶板厚度 25 cm 的横断面比选方案,见图 2~图 4。

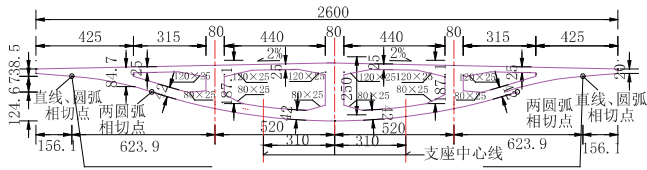


图 2 主梁近支座处横断面(单位:cm)

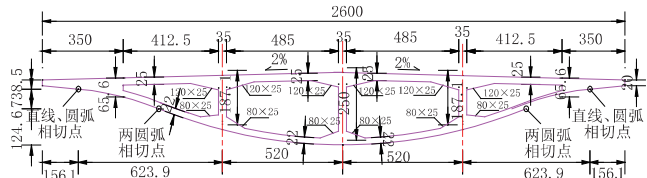


图 3 主梁跨中处横断面(单位:cm)

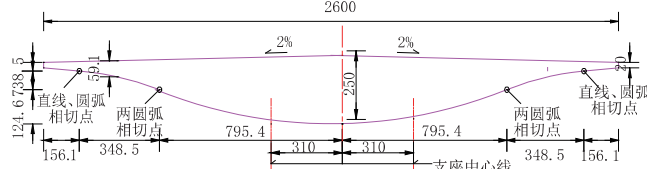


图 4 主梁横梁处横断面(单位:cm)

横断面方案一:在比选方案(三条腹板)基础上改进,外侧腹板的顶板加腋增大。

横断面方案二:在比选方案(三条腹板)基础上改进,顶板加厚到 26 cm,外侧腹板的顶板加腋增大。

横断面方案三:原设计方案(五条腹板)。

横断面方案四:在原设计方案(五条腹板)基础上改进,顶板加厚到 25 cm,外侧腹板的顶板加腋增大。

3.1 腹板束配置形式比较

采用两种形式的腹板束,第一种腹板束的弯起段相对较长,跨越 $L/5$ 断面,弯起段角度相对较小;第二种腹板束的弯起段相对较短,弯起段基本在 $L/5$ 断面之前,弯起段角度相对较大。钢束布置见图 5、图 6。

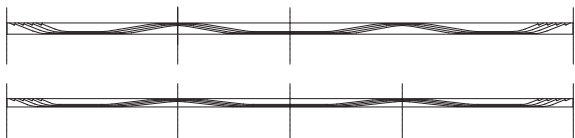


图 5 第一种腹板束(平坦腹板束)布置

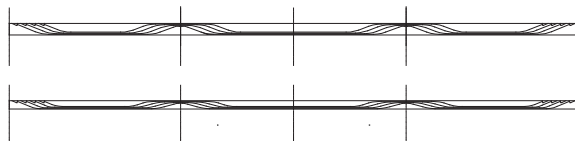


图 6 第二种腹板束(陡峭腹板束)布置

两种腹板束下结构纵向受力均能满足规范要求。第一种腹板束(平坦腹板束)在正截面及斜截面抗裂方面均优于第二种腹板束(陡峭腹板束)。因此,推荐采用较平坦的腹板束布置。下列计算种均按照较平坦的腹板束进行布置。

3.2 纵向受力比较

对四种横断面方案进行纵向配束,并比较纵向计算结果得出结论:四种横断面方案下结构纵向受力均能满足规范要求。对本桥而言,结构纵向受力非控制性因素。

3.3 桥面板受力比较

对四种横断面方案下进行桥面板配束,比较桥面板计算结果得出以下结论:

(1)桥面板横向受力较为不利,为控制因素。

(2)对于悬臂根部不施加竖向约束的情况,按照预应力构件设计的桥面板抗裂验算均不能满足规范要求。

(3)对于悬臂根部施加竖向约束的情况,按照预应力构件设计的桥面板抗裂验算均能满足规范要求。

(4)实际的桥面板受力情况介于悬臂根部施加约束与不施加约束之间。从悬臂根部不施加竖向约束的计算结果来看,方案四(五条腹板,桥面板厚度为 25 cm)抗裂性能最佳。

(5)对于桥面板计算,支座约束情况是个关键问题,因此需要采用空间模型进行深入计算分析。

由上计算结果可知,结构的纵向受力不控制结构设计,较平坦的腹板束布置对结构纵向受力较为有利。而桥面板受力则是本桥考虑的重点,因此本桥推荐采用的方案应为桥面板受力最好的方案,即图 7 显示的方案四(五条腹板,桥面板厚度为 25 cm,边腹板处加腋局部加大)。

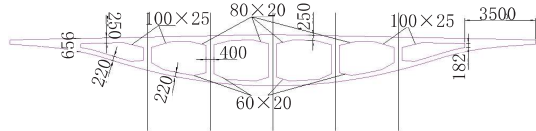


图 7 方案四

4 推荐方案平面模型计算

4.1 纵向平面计算

总体纵向计算采用平面杆系理论计算,采用同济大学桥梁博士 V3.2 进行,根据桥梁施工流程划分结构计算阶段。根据荷载组合要求的内容进行内力应力、主梁极限承载力计算,按部分预应力构件验算结构在施工阶段、使用阶段应力、极限承载力及整体刚度是否符合规范要求。计算考虑恒载、活载、温度及支座沉降。

图 8、图 9 为本报告结构纵向计算采用的有限元模型以及主梁纵断面。



图 8 结构纵向有限元模型

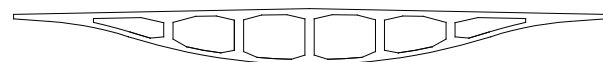


图 9 主梁纵断面

在持久状况短期效应组合下,正截面全部满足规范要求,可以满足抗裂要求。

在持久状况长期效应组合下斜截面抗裂计算表明,本桥箱梁截面满足规范正截面抗裂要求。

在持久状况短期效应组合下斜截面抗裂计算表明,本桥箱梁截面满足规范斜截面抗裂要求。

对持久状况构件的应力计算表明,法向正应力能满足规范要求。

钢束张拉控制应力为 1395 MPa,部分钢束使用状态应力不能满足规范要求。

主梁的承载能力极限状态强度能够满足规范要求。

4.2 横梁平面计算

横梁计算采用全断面布置,按照一次落架的施工方法采用平面杆系理论进行计算^[5-6],考虑长度为 6 倍顶板厚度的顶底板参与横梁受力,按部分预应力 A 类构件设计,验算极限承载力及整体刚度是否符合规范要求。

在持久状况短期效应组合下,横梁正截面基本可以满足抗裂要求。

在持久状况长期效应组合下,横梁正截面基本可以满足抗裂要求。

在持久状况短期效应组合下斜截面抗裂计算表明,中横梁及端横梁满足规范斜截面抗裂要求。

对持久状况构件的应力计算表明,中横梁及端横梁法向正应力均能满足规范要求。

部分区域承载能力极限状态强度能够满足规范要求。考虑普通钢筋作用后可满足规范要求。

4.3 桥面板计算

桥面板横向框架按照一次落架的施工方法采用平面杆系理论进行计算,沿主梁纵向取出 1 m 宽度,将车轮荷载按有效分布宽度计算出作用在每延米桥面板的荷载值,在其实际作用范围按最不利加载。根据荷载组合要求的内容进行内力、应力、极限承载力计算,按 A 类预应力混凝土构件验算结构在施工阶段、使用阶段应力、极限承载力及整体刚度是否符合规范要求。

图 10 为桥面板模型。

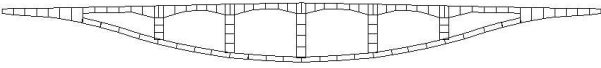


图 10 桥面板计算模型

在持久状况短期效应组合下,桥面板最外侧两条腹板之间上缘局部区域拉应力不能满足规范要求外,正截面可以满足抗裂要求。在持久状况长期效应组合下,桥面板最外侧两条腹板之间上缘局部区域拉应力不能满足规范要求外,正截面可以满足抗裂要求。斜截面抗裂计算表明,基本满足规范斜截面抗裂要求。持久状况构件的应力计算表明,法向正应力能满足规范要求。部分区域承载能力极限状态强度能够满足规范要求。

桥面板平面计算模型对边界条件模拟不准确,因此受力情况有待空间计算结果检验。

5 推荐方案空间梁格模型

采用 MIDAS-CIVIL 结构分析软件建立梁格模型进行计算,分析计算纵向、横梁及桥面板受力情况。结构计算的几何模型、有限元模型见图 11、图 12。



图 11 梁格几何模型

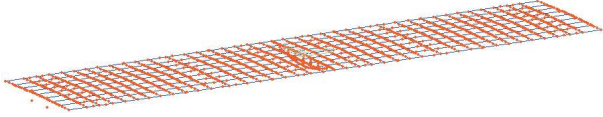


图 12 梁格有限元模型

荷载参照表 1,考虑以下四种荷载组合:

组合一:一期恒载+二期恒载+支座沉降+收缩徐变+温度梯度正温差+汽车对称加载

组合二:一期恒载+二期恒载+支座沉降+收缩徐变+温度梯度负温差+汽车对称加载

组合三:一期恒载+二期恒载+支座沉降+收缩徐变+温度梯度正温差+汽车偏载

组合四:一期恒载+二期恒载+支座沉降+收缩徐变+温度梯度负温差+汽车偏载

表 1 作用荷载

荷载	备注
结构自重	C50 混凝土容重 $\gamma=26.5 \text{ kN/m}^3$ 钢材、钢绞线、钢筋和钢丝容重 $\gamma=78.5 \text{ kN/m}^3$
二期荷载	0.07 m 厚 C40 混凝土铺装, 26 kN/m^3 ; 0.1 m 厚沥青混凝土桥面铺装, 23 kN/m^3 ; 防撞墙、中央分隔墩每延米 10 kN/m 。
活荷载	公路 - I 级,双向 6 车道,包括对称布载及偏载
温度	升温时: $T_1=14^\circ\text{C}$, $T_2=5.5^\circ\text{C}$ 降温时: $T_1=-7^\circ\text{C}$, $T_2=-2.75^\circ\text{C}$
支座沉降	1 cm
收缩徐变	程序自动计算

计算结果由表 2 列出。

表 2 持久状况短期效应组合下计算结果

位置	正截面	斜截面
纵梁	1、2 号梁两端正应力 存在负值	1、2、3、4 号梁两端主拉 应力比较大
端横梁	满足	满足
中横梁	满足	满足
桥面板	满足	满足

6 推荐方案空间实体模型

梁格的划分需根据经验,梁格划分不同,结构受

力性能也就不同,因此梁格模型结果与结构实际受力情况还有所差距。本章采用 ANSYS12.0 建立如图 13、图 14 所示的全桥实体模型进行计算,对多种工况下结构受力情况进行分析,借以把握结构受力规律,指导结构设计。

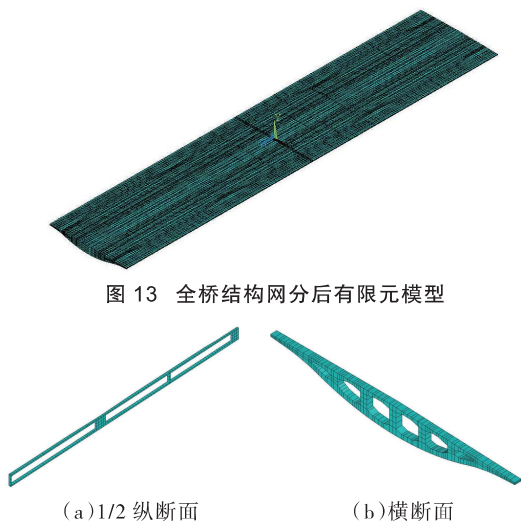


图 13 全桥结构网分后有限元模型

图 14 有限元模型断面示意图

通过对此单箱六室鱼腹式箱梁三跨连续桥梁结构的三维仿真分析,主要得出以下结论:

(1)除局部区域外,空间实体模型计算结果与平面模型及梁格模型计算结果规律基本一致。

(2)由于箱梁截面较宽,截面内各腹板高度变化较大,结构中心线两侧各 4.5 m 共 9 m 范围内顶、底板正应力分布相对较均匀,箱梁悬臂部分及边室部分截面顶、底板纵向正应力变化剧烈,截面剪力滞效应比较明显。

(3)纵向受力最小压应力主梁除中跨跨中下缘局部区域外,上、下缘一般有不小于 2 MPa 的压应力富裕。建议纵向底板钢束规格适当加大,以增加压应力安全储备。纵向主拉应力均能满足规范要求。

(4)在横梁下缘在悬臂区段及预应力钢束锚固位置,存在较大的拉应力,中横梁接近 5.0 MPa,端横梁接近 3.0 MPa,其余均能满足规范要求。悬臂区域出现的拉应力系模拟失真所致,横梁下缘拉应力为锚下应力集中,建议在局部区域适当加大普通钢筋含量。

(5)对于桥面板,除悬臂上局部区域最大拉应力达 2.4 MPa 外,其余均能满足规范要求。桥面板出现的拉应力系模拟失真所致。

(6)在恒载和预应力作用下,中间三道腹板为主要抗剪部位,共承担了 80%左右的截面总剪力。

荷载主要由中间三条腹板传递,超过总荷载的

60%,因此横梁计算模型中假定腹板均匀传递恒载是偏于安全的。

(7)在恒载作用下,中间三道腹板范围顶、底板形成的断面(结构中心线两侧各 4.5 m 范围内)为主要受力区域,提供 70%以上的抗弯能力。建议在纵向普通钢筋配置时,建议适当增加中间 9 m 区域的钢筋配置。

7 推荐方案预应力布置优化

纵梁空间计算结果表明,50 m 跨跨中区域底板钢束配置偏少,平面计算表明部分钢束使用应力偏大需增加钢束配置;端横梁钢束与纵向钢束冲突,形状需要调整^[7];桥面板钢束规格需减小到 15-3。

比较分析计算结果后得出以下结论:

(1)部分纵向底板钢束规格加大及部分钢束张拉控制应力减小后,结构受力有明显改善,各项应力均满足规范要求。推荐采用调整后的钢束布置。

(2)调整钢束后的端横梁,结构各项受力能够满足规范要求。

(3)桥面板钢束应力规格减小后,桥面板下缘拉应力增大,桥面板受力变差。因此推荐采用原来的桥面板钢束规格 15-4。

8 结论及建议

本文结合苏州市某工程中的一段,建立平面和空间模型分析了鱼腹式连续梁不同腹板布置形式的受力情况,通过分析结果对方案进行逐步优化。采用桥梁博士软件对四个不同方案的纵向受力、横梁受力及桥面板受力进行分析计算。结果表明,桥面板受力较不利,是结构设计中的控制因素。

采用平面计算程序对结构纵向、横梁及桥面板进行计算。结果表明,结构纵向受力、横梁受力基本均能满足规范要求,但部分纵向钢束的使用应力超过了规范限值。桥面板除最外侧两条腹板之间上缘局部区域拉应力不能满足规范要求外,其余均能满足规范要求。但是桥面板计算模型中边界条件失真,因此需要通过空间模型进一步检验。空间全桥结构实体模型计算结果与平面模型规律基本一致;50 m 跨跨中区域底板钢束配置偏少;横梁除局部应力集中及局部计算模拟失真外,受力均能满足规范要求;桥面板受力除局部计算模拟失真外,受力均能满足规范要求。

对部分纵向底板钢束规格加大,调整钢束的张

(下转第 74 页)

小结:标准组合下吊杆安全系数 >3.0 ,满足规范要求。

3.5 由人群荷载计算最大竖向挠度

人群荷载计算最大竖向挠度见图 6。



图 6 人群荷载计算最大竖向挠度

在人群荷载作用下最大竖向挠度为 $22.8 \text{ cm} < L/450 = 32.2 \text{ cm}$, 挠度满足要求。

3.6 人行桥自振频率验算

自振模态特征值见表 2。

表 2 自振模态特征值

模态号	自振频率 /Hz	周期 /s
1	0.74	1.35
2	1.38	0.72
3	1.94	0.52

从以上计算结果可知,桥梁前三阶自振频率为 0.74 Hz , 1.38 Hz , 1.94 Hz , 分别为竖向振动,水平振动,竖向振动。桥梁自振频率较低,,均不能达到人行桥规范要求频率范围。宜设置合适的阻尼器来减小结构的动力响应。下一阶段设计时,应当进行人致振动专项设计和地震响应分析。

4 施工方案简介

桥梁施工主要步骤:

(1)孔灌注桩采用机械成孔,完成桩基、承台、桥墩以及临时墩施工;

(2)搭设临时支架、采用少支架法安装钢箱梁;

(3)安装边跨主梁压重块,安装主塔和横撑、张拉斜拉索并观测钢箱梁在施工过程中的变形,及时记录钢箱梁挠度,对观测数据进行分析整理,以指导

施工进度;

(4)拆除临时支墩,再安装跨中附近横撑、张拉斜拉索;

(5)安装栏杆、施工桥面系;

(6)调整成桥索力;

(7)完善桥面系;

(8)钢结构的外表氟碳漆防腐;

(9)竣工运营。

5 下一阶段尚需要进行研究工作

本工程桥梁主跨 145 m ,采用单索面结构,为世界最大跨径单索面反向芬克式桁架结构桥,在设计方面尚无先例可循。下阶段桥梁设计将主要在以下三个方面开展研究论证工作:

(1)结合相关详规,对桥型方案进行优化、深化设计。

(2)桥梁静力性能研究

a. 压杆稳定研究;

b. 主梁偏载作用下的扭转稳定研究。

(3)桥梁动力性能研究

a. 人致桥梁振动研究;

b. 地震作用研究;

c. 风振研究。

参考文献:

- [1] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [2] 尼尔斯 J.吉姆辛.缆索支承桥梁[M].北京:人民交通出版社,2002.
- [3] 项海帆,等.桥梁结构理论(第2版)(研究生教学用书)[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [4] 中交公路规划设计院.公路桥涵设计通用规范[M].北京:人民交通出版社,2015.
- [5] 重庆交通科研设计院.公路斜拉桥设计细则[M].北京:人民交通出版社,2007.

(上接第 68 页)

拉控制应力和端横梁钢束布置,避免了和纵向底板钢束相冲突。钢束调整后,结构受力均能满足规范要求。

参考文献:

- [1] 黄虹.宁波市明州大桥主桥系梁设计[J].中国市政工程,2014(2): 12-14, 105.
- [2] 刘大中.都江堰市青城大桥系梁设计[J].城市道桥与防洪,2020(8): 107-109.

- [3] 刘冬瑛,谢文军.桥梁工程风险分析研究方法综述[J].城市道桥与防洪,2009(4):123-125.
- [4] 刘佳钰,张军.关于桥梁设计中的荷载问题和解决分析[J].城市道桥与防洪,2015(7):69-70.
- [5] 章开东.闽江特大桥高墩大跨刚构连续桥设计[J].城市道桥与防洪, 2015(6):60-62.
- [6] JTG D60—2004,公路桥涵设计通用规范[S].
- [7] 裴伟民,王静,叶政权.道路桥梁设计中的隐患及解决措施的分析[J].城市道桥与防洪,2015(3):72-73.