

超大悬臂展翅连续箱梁桥设计

钟浩

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司 武汉分公司,湖北 武汉 410074)

摘要:近年来,随着城市桥梁建设的飞速发展,桥梁在建设工程中不可避免地需要跨越既有铁路和道路,该类跨线桥梁具有跨度大、桥墩空间受限等特点。同时,为满足日益增长的交通量需求,桥梁横向宽度越来越大,因此,大悬臂展翅箱梁结构的应用日益广泛。该文以武汉四环线北段(武湖—吴家山)上跨铁路桥梁工程为背景,介绍超大悬臂连续箱梁桥的设计难点,并结合理论计算,针对结构受力特点、应力状态进行分析,从结构设计角度提出解决思路 and 措施,为今后类似工程项目的设计提供借鉴和参考。

关键词:桥梁工程;展翅箱梁;结构设计;涉铁工程;超大悬臂;剪力滞效应

中图分类号:U442.5

文献标志码:A

1 工程概况

武汉市四环线北段(武湖—吴家山)起自黄陂区武湖农场汉施公路与刘大公路交叉口北侧,接青山长江公路大桥,止于东西湖区G107与十一支沟交叉处,路线全长47.113 km。在线路里程K40+429.0位置与既有铁路交叉,自南向北依次上跨京广上行客运线、京广下行客运线和京广下行货运线以及武汉北下行环发线。涉铁段跨线采用(90+150+90) m预应力混凝土连续箱梁桥^[1]。

2 工程结构设计

2.1 总体设计

本桥平面位于直线上,采用整幅布置,桥面为:1.632 m防撞护栏+19.068 m机动车道+1.5 m分隔带+19.068 m机动车道+1.632 m防撞护栏,路面为沥青混凝土结构。本桥纵断面位于 $R=16\,000$ m的凸形竖曲线上及纵坡为1.25%的下坡段上。

桥梁设计荷载为公路-I级,结构设计基准期为100年。抗震设防烈度6度,抗震防护措施等级为7

级,设计基本地震加速度为0.05g。

2.2 结构设计

为降低该工程建设过程对既有铁路运营的不利影响,设计采用两个 2×71 m T构转体施工,转体完成后,依次采用支架现浇边跨和中跨合龙段。桥梁上部结构采用变高连续箱梁截面,梁高按1.8次抛物线变化,跨中截面梁高为3.5 m,中支点处梁高为10 m。截面为单箱三室,箱梁顶宽42.9 m,底宽27 m,沿横桥向展翅悬臂长达7.95 m。顶板厚25 cm,中腹板厚80~140 cm,边腹板厚100~160 cm,支点位置腹板加厚。底板厚由跨中的28 cm按抛物线变化至中支点根部的100 cm,支点截面加厚至150 cm,桥梁标准横断面如图1所示。

梁体采用纵、横、竖三向预应力体系,纵向预应力钢束采用 $21\phi^{s}15.2$ mm、 $19\phi^{s}15.2$ mm、 $17\phi^{s}15.2$ mm、 $15\phi^{s}15.2$ mm、 $4\phi^{s}15.2$ mm共5种类型钢束;横隔梁预应力采用 $9\phi^{s}15.2$ mm钢绞线,横梁预应力采用 $19\phi^{s}15.2$ mm、 $15\phi^{s}15.2$ mm两种类型钢绞线;主桥箱梁梁高大于4 m段腹板内布置了竖向预应力,在每个腹板中采用单排交错布置,竖向预应力采用 $4\phi^{s}15.2$ mm钢绞线。

收稿日期:2022-11-11(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078054);湖南省研究生科研创新项目(编号:CX20200832)

作者简介:钟浩,男,硕士,工程师.E-mail:420277646@qq.com

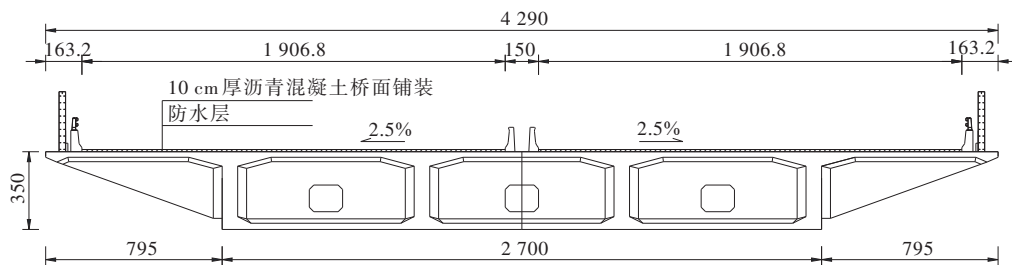


图1 桥梁标准横断面(单位:cm)

3 设计重难点及解决思路

3.1 结构特点

本桥跨越既有铁路,由于桥下空间受限,采用超大悬臂展翅连续箱梁结构^[2-5],该桥梁在结构上具有以下特点:①跨径大,该预应力混凝土连续箱梁桥主跨为150 m;②桥梁横向宽度大,桥面为单幅布置,横向宽度达42.9 m;③超大悬臂,该桥梁单侧悬臂长度为7.95 m,两侧悬臂长度超过箱梁横向宽度的1/3;④由于悬臂较长,使得箱梁结构处于三向受力状态,空间应力分布复杂^[6-7]。

3.2 结构设计重难点

针对以上所述该桥梁超大悬臂展翅箱梁的结构特点,使得该类结构在空间上受力复杂,横向效应明显^[8-9],因此,在结构设计上存在以下需要解决的重难点:

(1) 大悬臂展翅的结构特点导致箱梁的剪力滞效应较为突出^[10-13]。梁体沿纵向各截面的顶、底板正应力分布已经不再适用初等梁理论。纵向挠曲正应力沿翼缘板宽度方向不再表现为均匀分布,悬臂翼缘段应力变化最为急剧。并且,翼缘越长,该特征会越明显。因剪力滞后效应较为明显,使得本桥箱梁结构受力复杂,设计过程中对该桥梁结构的力学分析较为困难。

(2) 本桥箱梁悬臂较长,使得桥梁结构在自重、汽车等荷载作用下,处于复杂的三向受力状态。并且大悬臂展翅箱梁的悬臂结构将在悬臂根部产生较大的横桥向弯矩,对结构横向受力较为不利,甚至导致悬臂根部顶板易开裂^[14-16]。

(3) 较大的悬臂长度会使箱梁悬臂端部在结构自重、二期恒载等作用下产生竖向挠度过大的问题,且难以控制。

3.3 解决思路与措施

针对超大悬臂展翅箱梁结构横向受力复杂和剪力滞效应明显的重难点问题,本桥在结构上设置了横隔板^[17-20]。横隔板原则上沿纵向每3.5 m设置一道,全桥共计95道,横隔板厚22 cm,1#块横隔板设置如图2所示。

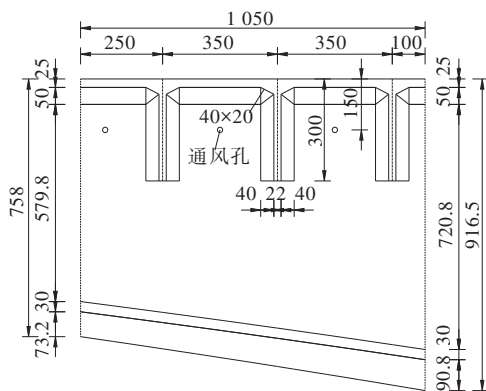


图2 1#块横隔板布置示意图(单位:cm)

设置横隔板后,大悬臂展翅箱梁的悬挑翼缘由原先一边支撑的悬臂受力状态变为三边支撑板受力状态,改善了展翅箱梁结构不利的悬臂受力模式,提高了结构的受力性能。

横隔梁作为悬挑翼缘的支撑结构,其自身沿横向处于不利的悬臂受力模式。本桥通过对横隔梁和横梁分别配置横向预应力钢束来满足结构受力的要求^[21]。横隔梁与横梁的预应力钢束具体布置形式如图3所示。

4 结构受力计算

4.1 整体模型计算

采用通用有限元软件 Midas/Civil 建立全桥模型^[22],将梁体沿纵向离散为288个梁单元,全桥共计289个节点,全桥有限元模型如图4所示。

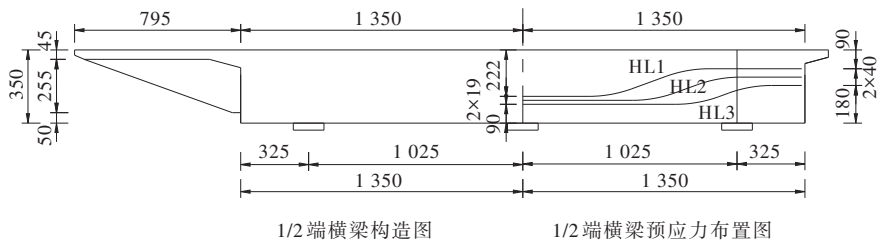


图3 横隔板与横梁预应力钢束布置示意图(单位:cm)

通过有限元分析得到,桥梁在施工阶段,上缘最大压应力为15.4 MPa,下缘最大压应力为11.2 MPa,主梁最大挠度在边跨,为0.3 cm,最大反拱位移在中跨,为8.1 cm。标准组合下,结构上缘最大应力为15.4 MPa,下缘为11.2 MPa,标准组合下1/2主梁上、下缘应力包络图如图5所示。

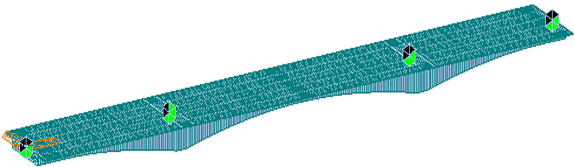
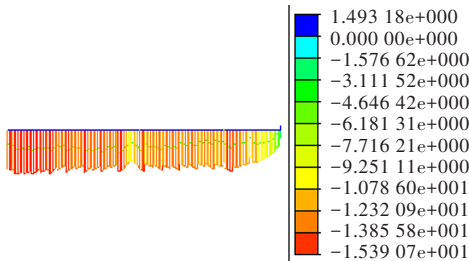
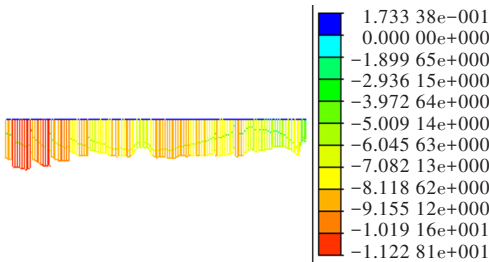


图4 全桥有限元模型



(a) 上缘



(b) 下缘

图5 标准组合下1/2主梁上、下缘应力包络图(单位:MPa)

根据计算结果可知,桥梁结构在各个阶段的强度、刚度以及抗裂等性能均满足规范要求。

4.2 横梁计算

纵向荷载通过腹板传力,最终作用于横梁上,根据纵向计算结果,可得出各种荷载作用下的支点反

力,将其以集中荷载的形式作用于横梁上,对横梁进行受力计算。运营阶段横梁应力结果如表1所示。

表1 运营阶段横梁应力结果

位置	端横梁压应力/MPa		中横梁压应力/MPa	
	最大	最小	最大	最小
上缘	8.5	2.1	5.4	2.9
下缘	7.6	1.2	5.1	2.7

由表1可知:横梁应力满足A类构件要求。并且,根据计算结果,端横梁与中横梁的承载能力和应力状况均满足规范要求,由于文章篇幅所限,计算结构不一列举。

4.3 局部实体分析

由于超大悬臂展翅箱梁结构横向效应明显,空间呈复杂的三向受力状态。因此,本桥以关键节段0[#]块及其相邻的施工节段为对象,采用有限元仿真软件FEA建立空间实体单元模型,考虑结构自重、二期恒载、预应力以及全桥模型提取的结构内力进行受力分析^[22-23]。

在0[#]块支点中心对称断面施加对称约束,在其底部4个支座位置分别施加纵向和竖向约束,其中一个支座施加横向约束,保证其边界条件与实际桥梁保持一致,最终0[#]块实体有限元模型如图6所示。

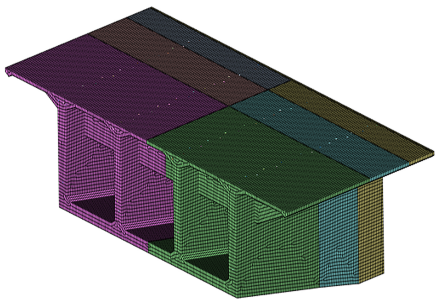


图6 0[#]块实体有限元模型

使用阶段在最不利弯矩组合下,横隔板和中横梁的应力结果如图7、8所示,横隔板的最大正压应力

为 10.59 MPa, 满足规范要求, 最大正拉应力为 3.09 MPa, 出现在顶、腹板交界位置, 可通过倒角和加强普通钢筋进行控制。

中横梁的最大正压应力为 -16.50 MPa, 最大正拉应力为 1.78 MPa, 满足规范要求。此外, 计算结果显示, 在最不利剪力组合下, 各构件的应力状态均满足规范要求。

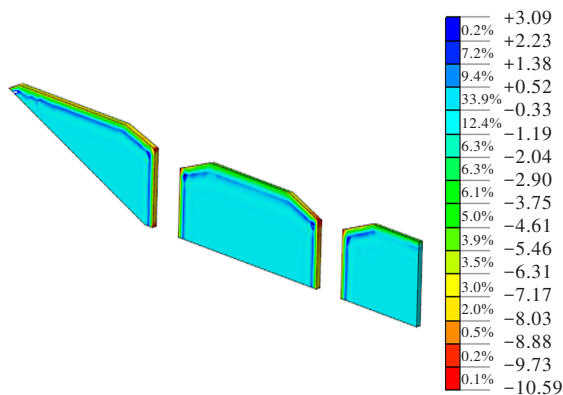


图 7 横隔板正应力云图(单位:MPa)

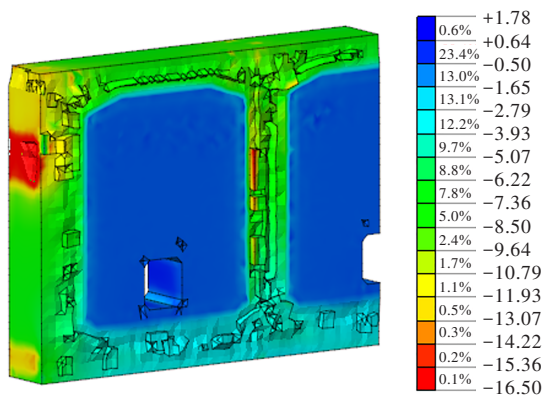


图 8 中横梁正应力云图(单位:MPa)

选取 0[#]块和 1[#]块交界处顶板, 提取其顶板顶面的纵桥向应力, 结果如图 9 所示。

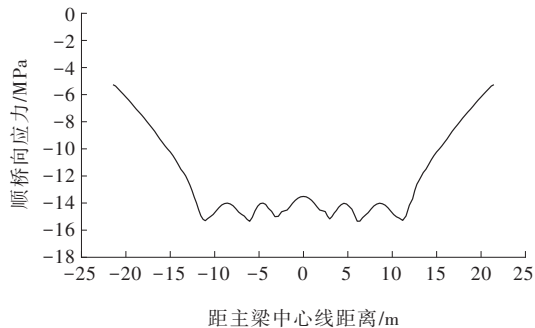


图 9 箱梁顶板纵向应力沿横桥向分布图

由图 9 可以看到: 顶板纵桥向应力沿横桥向呈现一定的不均匀性。其中, 在距主梁中心线 4.5 m 和 13 m 位置为主梁腹板位置, 以腹板中心线为对称轴, 顶板纵桥向应力呈现先增大后减小的规律。分析其主要原因在于: 腹板范围及顶板加腋部位, 顶板厚度较大, 相应的顺桥向应力会较小, 随着顶板厚度的减薄, 顶板应力稍许增大。由于剪力滞效应的存在, 与腹板中心距离越远, 顶板的纵向应力又逐渐减小。箱室范围内的顶板顺桥向最大应力为 15.34 MPa, 最小应力为 13.51 MPa。

而在箱室外侧的大悬臂段, 由于悬臂宽度达到了 7.95 m, 远超常规箱梁, 剪力滞效应也较为明显, 翼缘端部的顺桥向应力仅有 5.26 MPa。因此, 全桥纵向有限元模型中, 应充分考虑大悬臂的剪力滞效应, 对其悬臂按有效宽度进行折减。

根据选取截面的应力分布数据, 对翼缘范围内的应力分布在横桥向进行等效积分计算, 换算得到大悬臂翼缘段的有效分布宽度为 4.46 m。根据规范 [24] 公式 (4.3.4-4) 计算得到的有效分布宽度为 3.96 m。可知有限元分析结果较规范公式计算结果略大。因此, 按现行规范计算大悬臂箱梁的有效分布宽度是偏于保守安全的。

5 结语

本文以武汉市北四环(武湖—吴家山段)跨铁路段桥梁工程为例, 介绍超大悬臂展翅箱梁的结构特点和设计重难点, 并基于该种结构的受力模式在设计中提出解决思路 and 措施。同时, 采用 Midas/Civil 与 FEA 软件分别建立全桥模型和关键节段的实体有限元模型, 对桥梁结构进行受力分析。

研究表明: 合理设置横隔板能够有效改善超大悬臂展翅箱梁结构翼缘板的悬挑受力模式。同时, 通过布置合理的横向预应力钢束, 能够有效解决横隔板和横隔梁的悬挑受力问题, 最终使得桥梁结构受力状态满足规范要求。超大悬臂展翅箱梁结构翼缘板存在较为明显的剪力滞效应, 在结构纵向计算分析中应考虑有效宽度折减, 按现行规范公式进行计算是偏于安全的。

本桥结构设计安全可靠, 现已建成, 即将通车,

该桥梁设计方法可为今后同类型桥梁工程设计提供参考。

参考文献:

- [1] 刘润舟.(70+125+70)m跨铁路转体连续梁桥设计[J].铁道标准设计,2013,57(12):67-70.
- [2] 王标新,朱国华.大悬臂展翼斜腹板连续箱梁在城市桥梁中的设计与应用[J].中外公路,2010,30(1):159-162.
- [3] 徐岩.大悬臂展翅箱梁悬臂长度分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2012,34(4):55-58.
- [4] 丁延书,罗浩,宋旭明,等.超大悬臂箱梁的施工挂篮构造设计及受力分析[J].建筑施工,2018,40(5):749-751.
- [5] 施顺涛.展翅梁在深圳火车站高架桥中的应用[J].铁道标准设计,1994,38(3):21-23.
- [6] 杨柏松.横向大悬臂箱梁桥模型与曲线箱梁桥模型受力状态特征分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [7] 乐小刚,余晓琳.大悬臂预应力宽箱梁桥空间效应研究[J].城市道桥与防洪,2017(1):43-46,8.
- [8] 肖金梅.大悬臂展翅混凝土连续箱梁桥横向受力分析[D].广州:华南理工大学,2015.
- [9] 肖金梅,颜全胜.横隔板对大悬臂展翅箱梁横向受力的影响分析[J].广东公路交通,2016,42(5):48-51.
- [10] 陈亮.展翅大悬臂斜腹板预应力混凝土连续箱梁剪力滞效应分析[D].长沙:中南大学,2013.
- [11] 雒家琪,董毓利,赵明岩.集中荷载和均布荷载作用下悬臂箱梁剪力滞效应试验[J].华侨大学学报(自然科学版),2022,43(1):44-50.
- [12] 郭增伟,李龙景,张俊波.变截面悬臂箱梁剪力滞效应的比拟杆分析方法[J].土木工程学报,2019,52(8):72-80.
- [13] 刘志宏,宗金东,熊红霞.大悬臂斜腹板箱梁力学分析的空间网格模型探讨[J].交通科技,2019(5):52-54,59.
- [14] 严松,颜鹏飞.某大悬臂翼缘板连续梁桥裂缝成因分析及加固研究[J].交通科技,2019(4):41-44.
- [15] 陈平燕.大悬臂薄腹板连续箱梁桥腹板开裂病害原因分析及加固方法研究[J].公路,2019,64(3):115-119.
- [16] 彭崇梅,李小年,赵勇.在役大悬臂箱梁桥顶板加劲肋纵向开裂成因分析[J].公路,2017,62(4):75-78.
- [17] 贾布裕,余晓琳,杨铮,等.大悬臂展翅预应力混凝土箱梁桥极限承载力影响因素分析[J].中外公路,2016,36(6):89-92.
- [18] 沈翔,吉伯海,肖龙,等.钢箱梁横隔板-U肋疲劳裂纹钢板加固参数分析[J].科学技术与工程,2022,22(34):15245-15251.
- [19] 吴岩.横隔板布置对不同斜交角度简支钢箱梁受力影响分析[J].工程技术研究,2020,5(22):1-3.
- [20] 余晓琳,贾布裕,杨铮,等.大悬臂展翅预应力混凝土宽箱梁桥极限承载力分析[J].铁道科学与工程学报,2015,12(6):1379-1386.
- [21] 聂磊.考虑横向预应力施工误差的大悬臂箱梁桥面板可靠度分析[D].武汉:华中科技大学,2016.
- [22] 刘新华,李秋,彭元诚,等.湖北云南庄特大桥设计关键技术[J].中外公路,2021,41(1):112-116.
- [23] 苏红军.混凝土箱梁桥剪应力偏载系数简化计算方法[J].中外公路,2020,40(1):155-159.
- [24] 中交公路规划设计院有限公司.公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范:JTG 3362—2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.