

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.02.030

某空腹式连续梁桥 V 构区域受力性能研究

陈海清

(福州市城乡建设发展有限公司, 福建 福州 350003)

摘要: 为研究空腹式连续梁桥 V 构区施工及成桥阶段的受力性能,以某实际工程为背景,建立 MIDAS/Civil 有限元模型,对采用支架加扣索法施工的空腹式连续梁桥 V 构区域的施工阶段、成桥阶段进行详细的数值模拟。结果表明:施工阶段在锁扣第一张拉阶段,下弦未脱架,主要由下弦支架承重,扣索分担;在上弦非合拢段浇筑阶段,下弦、下弦支架、扣索共同承重;扣索第二次张拉后,下弦完全脱架,V 撑下弦和部分上弦重力完全由扣索和支座承重;下弦杆底缘始终处于受压状态。成桥阶段 V 构在不同荷载组合下各截面混凝土压应力均满足要求。分析结果可为该工程的建设提供技术指导,同时可供同类桥梁的参考。

关键词: 空腹式连续梁桥;V 构;支架加扣索法;数值模拟

中图分类号: U445.72

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)02-0162-05

Mechanical Behavior of a V - Type Open-spandrel Continuous Girder Bridge

CHEN Haiqing

(Fuzhou Urban and Rural Construction Development Co., Ltd., Fuzhou, Fujian 350003, China)

Abstract: MIDAS/Civil finite element model is established based on a real project, mechanical behaviors of the V - type open-spandrel continuous girder bridge with the construction method of stents method and guy method under construction stage and finished stage are carried out. The results show that: during the construction stage, the buckle cables share the gravity of the upper chord and ensure the safety of the lower chord bracket. The bottom edge of lower chord is always in the pressured state, which meets the requirements of specification. During the construction stage, the concrete compression stress of V - type under different load combinations can meet the requirements of specification. The research results can provide technical guidance for the construction of the project and can be used for the construction of similar bridges.

Keywords: open-spandrel continuous girder bridge; V - type; stents method and guy method; numerical simulation

随着桥梁工程的发展,预应力混凝土连续梁桥从材料到跨度都取得了巨大的突破。空腹式 V 构变高度梁,以 V 构的形式来增加根部梁的高度,减少结构重量,提高跨越能力,同时能使梁底呈现明显的拱形,增添桥梁的柔美^[1]。具有梁式桥、斜腿刚架桥的特点,结构受力性能较好,支座周围结构刚度比普通连续梁桥桥墩大大提高,兼具结构构件尺寸减小,造价经济等优势^[2-4],从而大大受到青睐。

但是,空腹式连续梁桥 V 构部分结构复杂,截面形式变化多样,各交汇点局部应力较大^[4-5]。同时,空腹式 V 构在上、下弦分离后又结合,形成封闭

环状结构,受施工工艺、混凝土收缩、环境温度等因素影响^[6-7],施工及运营过程中可能会产生拉应力,混凝土结构产生裂缝的机率很高,对结构的耐久性使用寿命有较大影响^[8-9]。现有资料对变截面连续梁 V 构受力性能研究还相对较少,大多仅对施工方法进行了说明,而尚未给出有关 V 构局部在各个工况下应力的明确计算方法^[10-12]。

以某实际工程为背景^[13-14],建立 MIDAS/Civil 有限元模型^[15],对 V 构区域的各个施工阶段及成桥阶段进行详细的受力分析,得到结构的实际受力状态。为该工程的建设提供技术指导,同时可供同类

桥梁参考。

1 背景工程

背景工程分左右幅采用双向八车道规模,两侧设非机动车道、人行道,桥面宽度 42.5 m。通航主跨采用 240 m 空腹式钢筋混凝土混合变截面连续箱梁结构,过渡跨采用 123.5 m 变截面连续箱梁结构,副

跨采用多孔 83 m 变截面连续箱梁结构。全桥孔跨布置为 $(71 + 9 \times 83 + 71) \text{ m} + (71 + 83 + 123.5 + 240 + 123.5 + 83 + 71) \text{ m} = 1\ 684 \text{ m}$, 分为主、副桥两联。其中主桥联长为 $(71 + 83 + 123.5 + 240 + 123.5 + 83 + 71) \text{ m} = 795 \text{ m}$, 副桥联长 $(71 + 9 \times 83 + 71) \text{ m} = 889 \text{ m}$ 。桥型布置如图 1 所示。

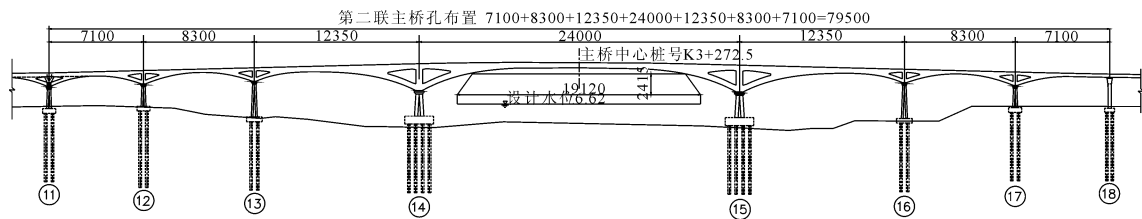


图 1 背景工程桥型布置图(单位:cm)

主 V 构细部构造图如图 2 所示,总长 56.2 m,宽 20.25 m,立柱截面高 4 m。支点位置上弦梁高 3.8 m,向两侧利用 2 次抛物线 $\Delta H = 0.003994083 X^2$ 增加梁高,上弦顶板厚 0.35 m~0.50 m,腹板厚 0.90 m,底板 0.40 m;下弦竖向高度 4.50 m,交汇后箱梁高度及梁顶至下弦底距离按 3.8 次抛物线 $\Delta H = 0.000000220481 X^{3.8}$ 变化,下弦顶板 0.8 m,底板 1.0 m,腹板和上弦同厚度。

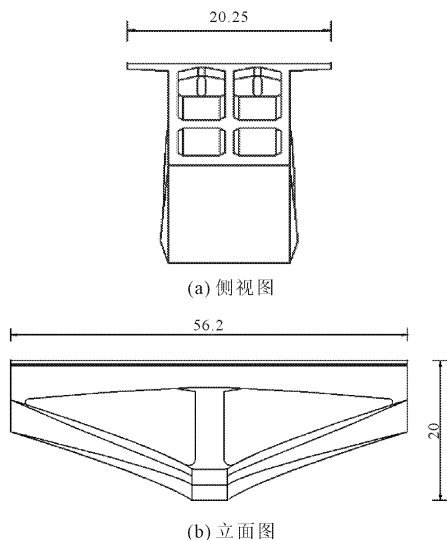


图 2 主 V 构构造图(单位:m)

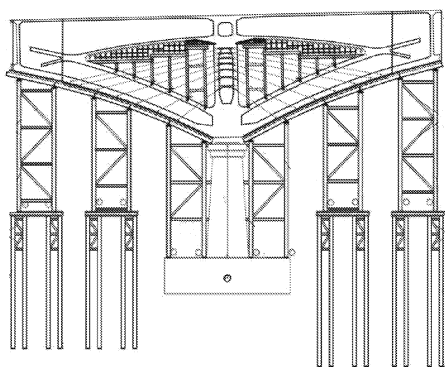
2 主 V 构施工工艺

V 构结构复杂,应力复杂,选择合适的施工工艺对结构最终受力,施工的操作性、经济性尤为关键。通常 V 构的施工工艺有全支架法施工、挂篮加支架法施工与支架加扣索法施工等。

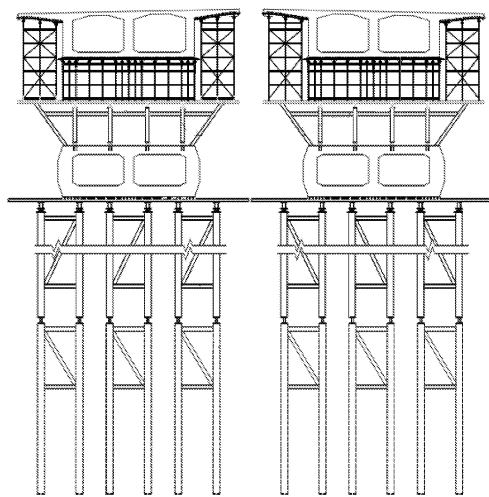
全支架法施工通过在陆上或水中搭设支架作为支撑结构,施工完 V 构下弦后,再在下弦上搭设支架施工上弦,V 构合龙后张拉永久预应力;挂篮加支架法施工通过搭设墩旁支架或三角架施工下弦 0# 节段,采用挂篮依次对称悬浇下弦节段,施工过程中通过扣索对拉调整下弦内力及线形,再在下弦上搭设支架施工上弦,最后挂篮施工 V 构合龙段;支架加扣索法通过在承台及水中搭设支架作为支撑结构。施工完 V 构下弦,第一次张拉临时预应力,在下弦上搭设支架施工上弦(分 2 次浇筑并预留后浇带),上弦第一次浇筑完成后,第二次张拉临时预应力,浇筑后浇带,浇筑上弦顶板,合龙 V 构段,张拉永久预应力完成 V 构施工。

采用支架加扣索法施工,结构受力明确,利于施工控制,且施工速度快,施工周期短。为了满足工程进度要求,该背景工程首先排除挂篮加支架法施工。同时,主 V 构高度高、混凝土方量大,自重较大,若采用全支架法经济性较差,而通过临时扣索能有效减少支架用量,因此,最终采用支架加扣索法。

具体施工如下:墩顶 56.2 m 段设置现浇支架进行混凝土浇筑。现浇支架从下往上为: $\varphi 800 \times 10$ mm 钢管桩基、2HM60 纵梁、 $\varphi 630 \times 12$ mm 承台钢管立柱、2HM60 曲梁、2[25@90 cm 次梁、纵向分配梁[8@90/30 cm、10×10 mm 木方@15/10 cm 及 15 mm 厚竹胶板模板。同时为保证施工完成后 V 构内力情况与原设计内力情况一致,在现场施工过程中增加预应力临时扣索(42 束),并通过临时扣索调整 V 构内力,使 V 构在施工完成后内力情况同设计状态接近。主墩 V 构支架断面如图 3 所示。



(a) 主墩 V 构支架纵断面图



(b) 主墩 V 构支架横断面图

图 3 主墩 V 构支架断面图

3 有限元计算模型

3.1 有限元模型

采用桥梁专业软件 MIDAS/Civil 进行分析计算,空间计算模型如图 4 所示。全桥共 587 个节点,494 个梁单元。建模过程中材料参数与实际结构一致,为 C55 混凝土(弹性模量 35.5 GPa,泊松比 0.2,质量密度 $2\,549\text{ kg/m}^3$)和 Q370qD(材料采用理想弹塑性模型,弹性模量 $2.06 \times 10^5\text{ MPa}$,泊松比 0.3,质量密度 $7\,850\text{ kg/m}^3$,屈服强度 370 MPa,抗拉强度 510 MPa)。受力钢筋采用 HRB400 普通钢筋,预应力束采用 $\phi^s 15.2$ 钢绞线,标准强度 $f_{pk} = 1\,860\text{ MPa}$,弹性模量 $E_p = 1.95 \times 10^5\text{ MPa}$ 。部分竖向预应力采用精轧螺纹钢,其标准强度 $f_{pk} = 785\text{ MPa}$,单根精轧螺

纹钢筋张拉控制应力为 $0.9f_{pk} = 706.5\text{ MPa}$,物理参数均按照对应规范设定。

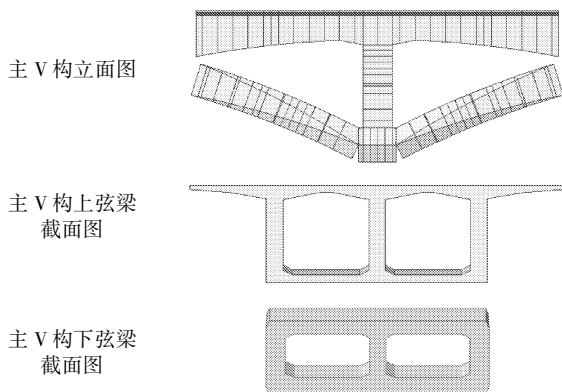


图 4 有限元计算模型

3.2 主 V 构

主 V 构空腹细部构造模型如表 1 所示,上弦梁通过 29 个节点和 28 个梁单元进行模拟;下弦梁通过 45 个节点和 44 个梁单元进行模拟。

表 1 主 V 构截面模型



3.3 边界条件

采用有限元 MIDAS/Civil 进行边界条件模拟时,V 构结构与主梁交汇处及主梁立柱连接均采用刚性连接模拟,V 构墩梁临时约束以及永久支座采用弹性连接,通过设置竖向、横向向、纵向向($SD_x = 2.4 \times 10^8\text{ MPa}$, $SD_y = 2.4\text{ MPa}$, $SD_z = 2.4\text{ MPa}$)刚度进行模拟。主梁中心节点和立柱、立柱底部节点和支座顶部节点之间均采用刚性连接模拟,支座底部用一般支承固结,边跨、次边跨、次主跨现浇段的临时支架采用弹性连接的仅受压模拟。主 V 构结构的扣索施工通过赋予两次扣索张拉力的只受拉桁架单元来模拟,主 V 构结构对应的上弦主梁、边 V 构结构和次边 V 构结构的支架施工均采用弹性连接的仅受压模拟。有限元模型中相对应的边界模拟如图 5 所示。

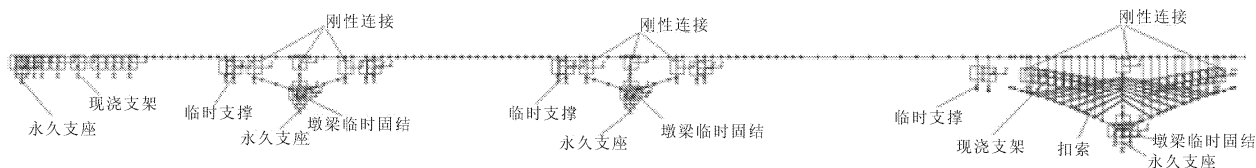


图 5 边界条件模拟

3.4 荷载组合

施工阶段分析采用标准值组合,考察施工期间各作用的标准值合力效应;成桥阶段主要考察短期效应组合,成桥阶段考察的主要组合为:恒载 + 支座沉降 + 汽车 + 人群 + 温度 + 制动力。

4 施工阶段 V 构受力性能分析

4.1 施工步骤

主墩 V 构高度 20 m,根据其结构特点,立柱分为 5 次浇注,上、下弦分 4 次对称浇注。在上弦正中位置设置湿接缝以防止箱梁混凝土开裂。各施工阶段索张力大小,依据 V 构施工顺序计算,保证施工期间结构的安全、成桥后线性与应力达到设计要求。

4.2 主要杆件受力性能分析

经验算,纵梁、曲梁、次梁、纵向分配梁等杆件受力情况如表 2 所示,均小于规范限值,主要杆件受力满足设计要求。

表 2 主要杆件受力情况 单位:MPa

序号	构件名称	容许应力 (剪应力)	计算应力 (剪应力)
1	竹胶板	40(3.4)	8(0.7)
2	方木	40(1.2)	8.2(0.8)
3	[8	170(100)	84.2(31)
4	2[25	170(100)	139(18)
5	2HM600	170(100)	104(23)
6	2I56	170(100)	84.6(28.3)

4.3 施工阶段 V 构受力性能分析

V 构扣索施工重点关注混凝土构件应力、扣索拉力、支架反力三个方面,与此密切相关的施工阶段分别为:阶段一:扣索第一次张拉;阶段二:上弦非合龙段浇筑;阶段三:扣索第二次张拉。

施工阶段属短暂状况,混凝土应力计算主要对构件在预应力和自重等施工荷载作用下截面边缘混凝土的法向应力进行计算,应力验算主要有:

$$\text{法向拉应力 } \sigma'_{ct} \leq 0.7f'_{tk} = 1.92 \text{ MPa}$$

$$\text{法向压应力 } \sigma'_{ct} \leq 0.7f'_{ck} = 19.88 \text{ MPa}$$

各主要施工阶段 V 撑上、下弦截面混凝土顶、底缘法向拉应力及法向压应力示于表 3 和表 4,发现所有混凝土应力均小于规范限值。

各主要施工阶段扣索拉力示于表 5。各主要施工阶段支架反力示于表 6。各主要施工阶段 V 撑截面底缘法向应力示于表 7。

表 3 各主要施工阶段下弦截面混凝土应力 单位:MPa

应力类型	应力部位	应力		
		阶段一	阶段二	阶段三
拉	顶缘	0.1	0.2	0.4
	底缘	—	—	—
压	顶缘	0.6	0.4	1.6
	底缘	0.9	1.1	2.5

表 4 各主要施工阶段上弦截面混凝土应力 单位:MPa

应力类型	应力部位	应力		
		阶段一	阶段二	阶段三
拉	顶缘	—	0.3	0.3
	底缘	—	—	0.7
压	顶缘	—	—	0.5
	底缘	—	0.5	0.3

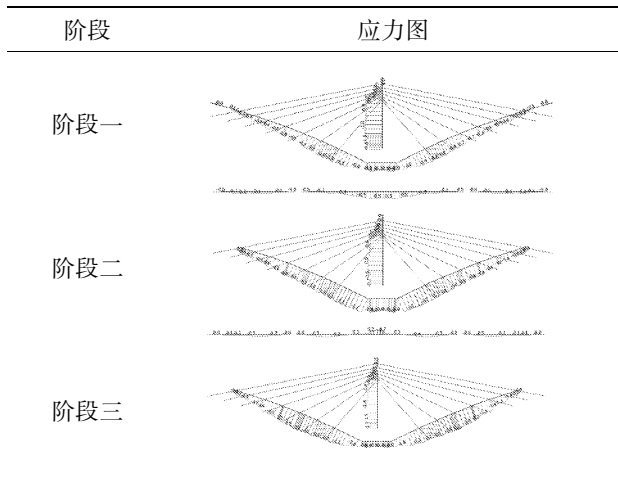
表 5 各主要施工阶段扣索拉力

阶段	阶段一	阶段二	阶段三
扣索拉力/kN	3000	3000	7000~8000

表 6 各主要施工阶段支架反力

阶段	阶段一	阶段二	阶段三
支架反力/kN	836	10545	—

表 7 各主要施工阶段 V 撑截面底缘法向应力 单位:MPa



在第一阶段,计算结果为:V 撑下弦支点最大反力为 836 kN,拉索内力为 3 000 kN,下弦未脱架,支架可共同承受下弦的重量,拉索初步参与受力。主 V 撑下弦已经施工完成,由于下弦支架无法承担 V 撑全部重力,此次进行扣索张拉主要为下弦支架分担后续上弦施工带来的重力。

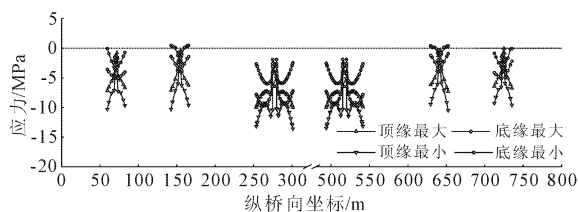
在第二阶段,计算结果为:V 撑上下弦交汇处反

力合力为 10 545 kN,下弦支架共有 24 根钢管桩提供 18 720 kN 设计承载力,支架系统有足够承载力。采用下弦支撑上弦现浇支架,上弦浇筑带来的重量由支架、下弦、拉索三者共同承担。

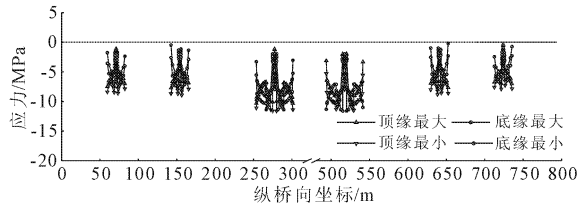
在第三阶段,计算结果为:下弦支架反力为 0 kN,拉索内力为 7 000 kN ~ 8 000 kN。下弦完全脱架,V 撑重力由拉索和支座承担,主 V 撑尚未合拢形成超静定的结构。

5 成桥阶段 V 构受力性能分析

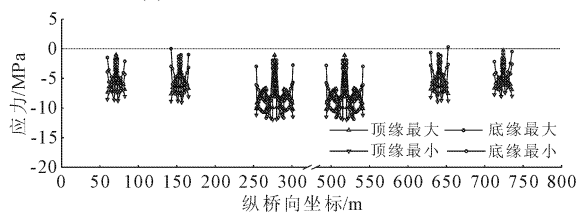
V 构受力性能按规范要求的荷载组合进行验算。三类最不利荷载组合作用下构件顶缘、底缘产生的应力如图 6、图 7 所示,由图 7 可知,成桥阶段 V 构处于受压状态,且最大压应力小于规范限值,符合要求。



(a) 承载力极限状况最不利荷载组合



(b) 正常使用极限状况作用短期效应组合



(c) 弹性阶段应力验算的标准荷载组合

图 6 V 构应力包络图(单位:MPa)

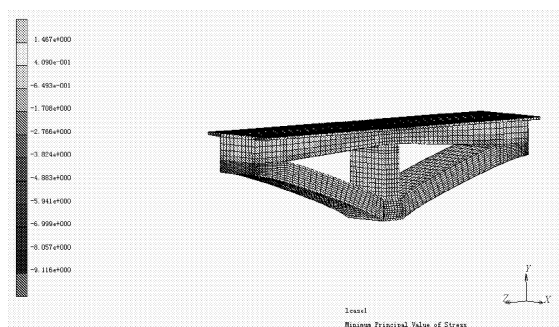


图 7 V 构承载力极限状态组合下最大主应力云图(单位:MPa)

6 结论

(1) 施工阶段应重点关注混凝土构件应力、扣索拉力、支架反力三个方面,及与此密切相关的三个阶段:在锁扣第一张拉阶段,下弦未脱架,主要由下弦支架承重,扣索分担;在上弦非合拢段浇筑阶段,下弦、下弦支架、扣索共同承重;扣索第二次张拉后,下弦完全脱架,V 撑下弦和部分上弦重力完全由扣索和支座承重。下弦杆底缘始终处于受压状态,满足设计要求。

(2) 成桥阶段 V 构在承载能力极限状况最不利荷载组合、正常使用极限状况、弹性阶段应力验算的标准组合下,各截面混凝土压应力均满足要求。

参考文献:

- [1] 张亚东,张依睿.V 形墩连续刚构桥结构设计与分析[J]. 南京工程学院学报(自然科学版),2017,15(2):29-33.
- [2] 徐郁峰,苏成,谭林新.光大大桥动力特性分析与测试[J]. 中外公路,2009,29(4):122-124.
- [3] 邵长宇.九堡大桥组合结构桥梁的技术构思与特色桥梁[J]. 桥梁建设,2009(6):42-45.
- [4] Li G D, Bi H T, Li B H, et al. Safety assessment of slant legged rigid frame bridge based on field testing[J]. Key Engineering Materials, 2013,574:163-175.
- [5] 徐治芹,马春佳.V 形墩连续刚构桥受力特性分析[J]. 城市道桥与防洪,2015(8):33-36,8.
- [6] 龚俊虎.大跨度 V 形墩连续刚构与拱组合桥受力特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [7] 张承林.连续刚构桥 V 形墩的极限承载力分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017,13(8):236-238.
- [8] 王立峰.大角度 V 撑蝶形拱式连续梁桥受力性能的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.
- [9] 程炜钢,徐伟,冯东明.V 形墩连续刚构桥静动力行为及地震响应分析[J]. 南京工程学院学报(自然科学版),2012,10(1):11-16.
- [10] 李中培,郑俊,姜浩,等.V 形墩满堂支架施工中的临时束张拉力分析[J]. 华东公路,2016(5):19-21.
- [11] 穆伟.矮墩大跨预应力 V 形连续刚构桥设计分析[J]. 公路,2016,61(7):108-111.
- [12] 苏鹏.连续刚构桥梁高墩悬臂施工监控与稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(3):216-220.
- [13] 林涛.大跨度空腹式钢-混凝土混合连续梁桥钢箱梁长度参数分析[J]. 2018,16(6):94-98.
- [14] 董科,冯新.福州马尾大桥空腹式连续梁桥 V 撑箱梁施工技术[J]. 施工技术,2017,46(11):8-11.
- [15] 王义.某连续梁桥悬臂施工过程的仿真分析[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(4):106-109.