

# 海上大悬臂盖梁支架设计与施工

赵智胜

(中交第一航务工程局有限公司)

**摘要:**为解决玉湛高速公路(广东段)东海岛跨海特大桥盖梁施工支架搭设问题,对钢管支撑体系、斜撑支架体系、销棒法悬臂支撑体系3种支架方案在施工便捷性、经济性、结构安全等方面的优缺点进行对比分析。在传统销棒法施工的基础上,提出一种大尺寸型钢悬挑式盖梁支架方案,并表明该方案的施工关键工序及注意事项。通过MIDAS Civil有限元分析软件计算,该支架体系的强度、刚度及稳定性均满足要求。该方案的成功应用解决了海上大悬臂盖梁支架在不增加立杆支撑情况下的施工问题,为跨海桥梁悬臂盖梁施工提供了一种解决办法,可为后续类似工程提供借鉴。

**关键词:**盖梁支架设计;MIDAS Civil;大悬臂盖梁支架施工

## 1 工程概况

东海岛跨海特大桥位于广东湛江峡湾段,通明海水域。多年平均高潮水位3.558 m,低水位可见裸露浅滩,水流主要为涨落潮引起的海水径流,流速较小。桥址东临现有东海岛大桥,为保证桥梁设计协调性,桥梁下部结构设计形式与原桥基本保持一致均为钻孔灌注桩基础,哑铃形承台,悬臂式双肢墩,装配式预制简支箱梁,只在尺寸上略有增加。

桥梁全长4.38 km,设计时速100 km,桥面设计宽度25.25 m,是玉湛高速公路广东段全线最长跨海特大桥。桥梁采用盖梁长19 m,宽2 m,截面最高处2.35 m,立柱间净距4.7 m,悬臂外挑5.3 m,立柱高度1.355~12.582 m,两端张拉预应力结构,全桥共计盖梁145座。

## 2 重难点分析

### 1) 生态环保要求高

桥址西侧为既有东海岛岛堤,附近多生蚝养殖区,桥址东侧为广东湛江红树林国家级自然保护区,是我国北回归线以南热带红树林生态分布带中面积最大的红树林保护区。因此,生态环境保护是项目施工管控重点。

2) 盖梁数量多,支架系统的选择对施工影响较大

该桥位于玉湛高速广东段全线关键线路上,支架方案是本桥施工的关键工序,其合理性不仅直接影响进度、成本与施工质量,也直接影响后

续架梁与桥面系施工。

### 3) 受既有桥梁影响,盖梁施工空间受限

本项目桥址东临现有东海岛大桥(一级公路),设计时速80 km,两幅桥净间距1 m。进行盖梁支架设计时,要充分考虑既有桥梁空间限制。在方便支撑系统各构件安拆的同时,尽量减少运行道路通行安全风险,这也是盖梁施工管控难点之一。

### 4) 盖梁悬臂尺寸大,梁端挠度控制难

盖梁悬臂尺寸达到5.3 m,且跨海水上施工,盖梁梁端挠度控制是支架系统设计的难点。

## 3 支架方案比选

针对大悬臂盖梁支架体系进行了方案比选,因本项目桥梁盖梁数量较多,盖梁支架体系的选择在保证安全的前提下更要考虑施工便捷性和经济性,支架体系需具备高周转率、低损耗的特点。

### 3.1 钢管支撑体系

钢管支撑体系是解决大悬臂盖梁主梁跨距大最直接的措施,通过增加支点,减小支架主梁跨距或悬臂端长度,从而降低承重主梁结构尺寸。如邹海军<sup>[1]</sup>在市政桥梁中使用贝雷梁+钢管柱组成的现浇支架。本项目位于海上,水深较浅,可以通过打设钢管桩等措施增加支点,但是海上钢管桩打设成本过大,且存在拔除工序,占用钢栈桥平台使用时间,而既有桥梁、钢栈桥及施工平台均对打设钢管桩有空间上的限制。

在不打设钢管桩的情况下,通过在承台边缘增设钢管桩,减少支架主梁悬臂长度,亦是一种

处理思路。但本工程承台尺寸较小,且承台顶面低于高潮水位。直接在承台边缘增加钢管支撑需在承台顶增加构造措施,增大承台面积以满足钢管支立需要的空间。但该方案只能将原来悬臂端 5.3 m 缩短至 4.5 m 左右。经计算,不在海中打设钢管桩,仅在承台边缘增加支撑的情况下,该系统对支架主梁受力抗弯性能要求仍过高,常规 H450 型钢仍不能满足要求。故未选用该方案。

### 3.2 斜撑支架体系

通过在立柱设置锚固预埋件增加斜撑,或如沈争等<sup>[2]</sup>在承台边缘增加钢管支撑后再通过在盖梁悬臂端设置斜撑的方式增加支点。

经计算复核,无论是增加锚固预埋件还是增加钢管支撑后再设置斜撑,均能有效解决盖梁支架主梁外端挠度过大的问题,降低支撑体系主梁型钢型号。同上节所述原因,在排除钢管支撑后,增设预埋件锚固成为首选方案。但因墩柱高度不统一,预埋件精度要求高;海上高空作业安装斜撑难度大,同时在作业空间上又受到既有跨海大桥限制,作业效率低;存在拆除后预埋件需进行防腐处理等弊端,亦未选用该方案。

### 3.3 销棒法悬臂支撑体系

销棒法支撑体系受力特点简洁,施工相对简单。但是大悬臂盖梁采用悬挑支架形式,受支撑体系梁端挠度影响,主梁材料选型成为关键。经计算,单侧单片标准型 321 型贝雷梁在 5.3 m 悬臂长度情况下不满足要求。且贝雷梁采用插销接长的方式,因插销孔隙的存在,悬臂使用时非弹性形变较大,线性控制效果差,孙凡<sup>[3]</sup>在昆楚高速盖梁施工时采用的双拼 I45b 型钢作为支架主梁经计算能满足要求。考虑到本桥盖梁数量较多,支架周转次数多,双拼 I45b 型钢在实际操作中均需要增设对拉杆或其他固定措施。为了提高施工便捷性,经设计计算采用 HN1008×302×25/40H 型钢代替双拼小尺寸型钢作为支架体系主梁,以解决施工工艺繁杂的问题。

支架布置形式:单个支点设置 2 根  $\phi 80$  mm30CrMnTi 高强钢棒,钢棒间距 30 cm;牛腿采用 30 mm 钢板制作,上设置砂箱,砂箱上下可调节空间 10 cm;主梁采用 HN1008×302×25/40H 型钢,考虑路上运输限制,主梁分节制作,单节 10 m,螺栓连接;次梁采用 I20a 工字钢,50 cm 间距布置。为了增加主梁整体稳定性,在主梁之间距离墩柱两侧各 5 cm,共增设 4 道抗滑槽钢,主梁两侧悬臂端交叉设置剪刀撑。支架系统断面图见图 1。

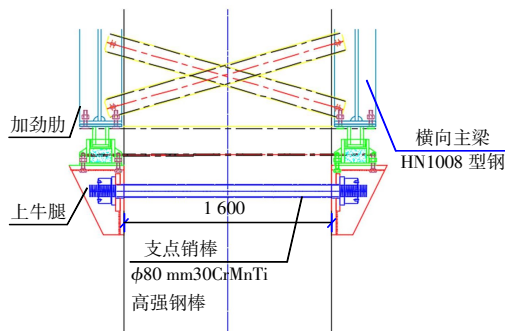


图 1 支架系统断面图

## 4 支架方案设计计算

### 4.1 计算参数

#### 1) 荷载参数

①混凝土容重: 26 kN/m<sup>3</sup>;

②模板结构自重取值: 2 kN/m<sup>2</sup>, 转化为分配梁线荷载  $q_1=0.5 \times 2=1$  kN/m;

③人机料荷载: 1.5 kN/m<sup>2</sup>, 转化为分配梁线荷载  $q_2=0.5 \times 1.5=0.75$  kN/m;

④振捣、其他动载: 2 kN/m<sup>2</sup>,  $q_3=0.5 \times 2=1$  kN/m。

#### 2) 挠度要求

刚度验算,主梁及分配梁跨中最大变形允许值  $L_1/400$  ( $L_1$  为跨径),悬臂端最大变形允许值  $L_2/250$  ( $L_2$  为悬臂长度)<sup>[4]</sup>。

### 4.2 建模计算

计算采用有限元软件 MIDAS Civil,对支撑体系整体建模,并进行受力分析。模型如图 2 所示。

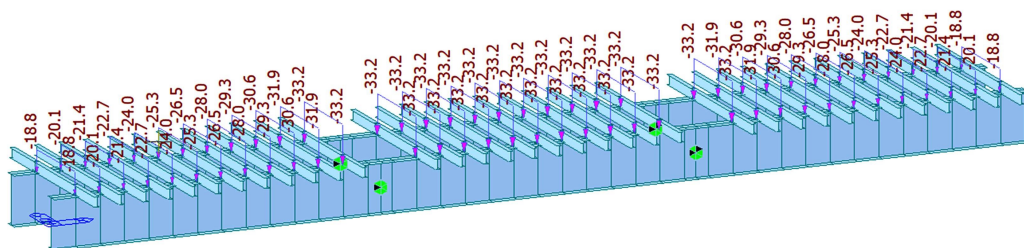


图 2 MIDAS Civil 计算模型

强度计算时荷载组合：

- ①模板、支架自重；
- ②新浇筑钢筋混凝土自重；
- ③施工人员、设备、材料等荷载；
- ④振捣荷载。

因混凝土层厚度>1 m，不计混凝土冲击荷载<sup>[4]</sup>。

刚度验算时荷载组合：模板自重、支架自重、混凝土自重。

荷载分项系数见表 1。

表 1 荷载分项系数表

荷载类型	荷载系数
支架自重、模板自重	1.2
新浇筑钢筋混凝土自重	1.2
施工人员、设备、材料等荷载	1.4
振捣荷载	1.4

经计算，结果如下：

1) 强度及刚度验算

强度及刚度验算结果如表 2 所示。

表 2 结构验算数据表

构件	项目	最大值	容许值
主梁	组合应力/MPa	88.30	215
	剪应力/MPa	38.10	125
	挠度/mm	24.00	27
分配梁	组合应力/MPa	106.80	215
	剪应力/MPa	39.50	125
	挠度/mm	3.46	10
销棒	剪应力/MPa	87.26	848

2) 屈曲分析

通过对支架结构整体建模进行屈曲分析，在 mode1 模态下(最小安全系数)，不考虑构造措施的前提下，计算得到临界荷载系数为 2.67，即在 2.67 倍的现有荷载施加时可能发生屈曲。

5 盖梁支架施工工艺及要点

5.1 施工工艺

1) 预留销棒孔

墩柱施工时，根据墩高及支架支撑体系高度计算销棒预留孔标高。预留孔标高以墩顶高程控制，预留孔至墩顶高程 $h=H-h_1$ ，其中 $H$ 为墩柱高度， $h_1$ 为支架系统高度。墩柱钢筋采用整体吊装形式，钢筋加工及拼装位于钢筋加工场，现场吊装前预先在钢筋上标记墩底、墩顶及销棒标高线，

并将 PVC 管提前安装到位，立柱预留孔中心间距按设计图设置。安装时，保证水平位置及高程±10 mm 作临时固定。墩柱钢筋现场吊装完成后，对整体钢筋平面、高程进行测量复核，并对预埋管相对位置、垂直度等进行复核，无误后进行固定。沿桥向间隔 50 cm 设置定位钢筋，预埋管两端套 φ10 mm 螺旋钢筋，预留孔处沿钢筋保护层向增设 φ10 mm 钢筋网。PVC 预埋管两端采用胶带封闭，防止水泥浆进入。墩柱混凝土施工时严格控制振捣质量，保证预埋孔处的混凝土密实。

2) 销棒、牛腿及砂箱安装

待立柱混凝土达到 100%设计强度后，采用汽车吊依次吊装销棒、两侧牛腿、砂箱。其中砂箱阴头与牛腿采用高强螺栓提前固定。砂箱阴头安装完成后，向箱内灌注标准砂，需保证标准砂干燥。砂箱阳头与支架主梁提前安装固定，支架主梁吊装时以砂箱榫口为定位。

3) 主梁安装

在地面预先完成主梁对接，对接使用高强螺栓，由中间向四周扩展，依次经初拧、复拧、终拧，每拧一遍均用不同颜色的油漆标记，防止漏拧。最后使用扭力扳手进行检测，并划线标记。主梁周转过程中需在每次吊装前检查高强螺栓连接情况，若出现螺栓松动、破损，需及时进行更换。单根主梁地面拼接好后进行整体吊装，支架主梁吊装时以砂箱榫口为定位，2 根主梁均与砂箱螺栓固定后，安装主梁之间的剪刀撑和抗倾覆型钢。抗倾型钢为 32a 槽钢，槽钢与立柱间使用木楔打紧。

4) 分配梁安装

分配梁采用 4 m 长 I20a 工字钢，间隔 0.5 m 布置在主横梁上，墩柱位置不设分配梁，分配梁与主梁间采取夹片焊接方式连接，安装时采用 25 t 汽车吊，作业人员在登高车内完成焊接。焊接时需注意不得直接将分配梁焊接至主梁上，防止主梁受热，影响受力性能，从而影响周转使用。

5) 支架预压及监控量测

支架预压重量取施工荷载的 1.2 倍，一方面通过预压消除支架体系非弹性形变，校核砂箱压沉量，保证预压之后支架体系在支架拆除时的下沉量；另一方面，通过测量监测计算主梁悬臂端挠度，为模板安装时设置预拱度提供计算依据。预压采用混凝土块进行 3 级加载。加载、卸载顺

序按 0、50%、100%、120%、100%、50%、0 控制。加载、卸载时间间隔以 2 次荷载沉降位移观测数据差值为 0 且不小于 2 h 控制。加载过程中每级加载或卸载后对支架标高变化量进行测量,观测数据以间隔 2 次测量数据稳定为准。以单侧主梁为例,依次在主梁梁端、盖梁梁端、牛腿支点、主梁跨中对称布置观测沉降位移观测点,各点位加载前标高分别以  $h_{ia0}(i=1,2,\dots,7)$ 、 $h_{ia50}(i=1,2,\dots,7)$ 、 $h_{ia100}(i=1,2,\dots,7)$ 、 $h_{ia120}(i=1,2,\dots,7)$  表示,卸载后标高分别以  $h_{ib0}(i=1,2,\dots,7)$ 、 $h_{ib50}(i=1,2,\dots,7)$ 、 $h_{ib100}(i=1,2,\dots,7)$  表示,测量点位编号由左至右依次为 1—7,即支点点位为 3、5,盖梁梁端两侧点位为 2、6。

支架预压完毕后进行数据处理,计算支架体系非弹性变形与弹性变形数据。加载时支点处变化高程  $\Delta h_1 = h_{ia0}(i=3,5) - h_{ia100}(i=3,5)$ ,即以 100% 施工荷载值计算螺栓间隙等非弹性形变+标准砂压沉量。加载前、后支点高度变化量  $\Delta h_2 = h_{ib0}(i=3,5) - h_{ib100}(i=3,5)$ ,表示螺栓间隙等非弹性形变。砂箱压缩量  $\Delta h = \Delta h_1 - \Delta h_2$ ,通过测量  $\Delta h$  控制砂箱填砂高度,保证卸载时支架下沉空间足够。

同理计算盖梁梁端弹性变形  $\Delta h'$ ,用来控制盖梁底模安装预拱度设置。本支撑体系中,各杆件强度指标冗余值较大,梁端挠度冗余值较小,为保证盖梁浇筑完成后两侧标高位置的准确性,方便设置预拱度,于盖梁两端底模分别设置可调节高程的三角支撑。同时,悬臂体系梁端挠度指标对荷载值变化较为敏感,120% 施工荷载预压时梁端挠度值较大,因此只作为安全性验证使用。

浇筑过程中同样针对混凝土浇筑荷载 0、50%、100% 进行监控量测,同时与理论计算值进行对比分析,便于首件施工后及时总结,调整预拱度设置值。

#### 6) 支架拆除

混凝土浇筑完成,达到规定强度后优先拆除侧模,进行张拉压浆作业。张拉分 2 次进行,一批次张拉完成后进行支架拆除作业,架梁完成后进行二次张拉。

支架拆除时,两侧砂箱同步打开放砂孔,使支架体系整体下沉。然后由上至下依次拆除盖梁底模、支架主梁间抗倾覆槽钢及侧向剪刀撑、主

梁、牛腿及销棒。主梁整体起吊拆除,并及时检查中间接头螺栓连接副状态,以备下次使用。

#### 5.2 施工要点

1) 本施工方法对预留销棒孔水平位置精度要求较高,因此在立柱施工时需要确保预留孔洞平面位置精度。在实际操作过程中砂箱与主梁采用高强螺栓连接,通过螺栓孔开成椭圆的措施可将水平安装误差要求扩大至  $\pm 10$  mm,能够满足施工要求。

2) 因本施工方法主要控制指标为盖梁端部挠度,在支架预压时,应采用 100% 施工荷载作为弹性变形数据参考,设置预拱度,120% 预压荷载仅作为施工安全性验证。

3) 砂箱作为支架系统竖向调节节点,是保证施工完毕后模板及支架拆除的关键点,因此砂箱内砂采用试验用标准砂,保证拆模时,砂能从砂箱预留孔流出。因本项目地处沿海,空气湿度大,在实际使用时还需保证砂子干燥,因此需及时关注砂含水率,定期烘烤除湿。

#### 6 结语

盖梁支架在结构设计上往往存在多种方案,方案的选型要结合工程实际背景综合研判后做出选择,因此方案本身并无最优,只有最适合。本文通过对比钢管支撑体系、斜撑支架体系、销棒法悬臂支撑体系 3 种支架设计方案,结合施工实际工况选择悬臂支架系统,解决了海上大悬臂盖梁施工时盖梁端部增设支撑不便的问题,主梁挠度实测值与理论计算值基本保持一致,支架系统强度、刚度及稳定性均满足要求。但该体系同样存在缺点:主梁自重较大,需配合大型吊装设备使用;梁端悬臂挠度较大,对挠度值的设置需进行复核调整。

#### 参考文献:

- [1] 邹海军. MIDAS/Civil 在大悬臂倒 T 形盖梁支架验收中的应用[J]. 价值工程, 2020, 39(11): 173-174.
- [2] 沈争,任珠慧. 大悬臂现浇盖梁支架体系工艺研究与应用[J]. 华北交通工程, 2023(5): 18-21.
- [3] 孙凡. 双肢墩大悬臂盖梁支架设计及施工研究[J]. 价值工程, 2022, 41(10): 105-107.
- [4] 周水兴,何兆益,邹毅松,等. 路桥施工计算手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2001.