

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.11.048

香山大桥珠海侧钢桁梁顶推支架设计

谢书良,吴玉贤,吴 琦,段淑红
(保利长大工程有限公司,广东 广州 511431)

摘 要:广东省中山东环高速公路香山大桥为 (136+312+880+312+136)m 双塔半飘浮体系双层桥面钢桁梁斜拉桥。大桥主跨跨越横门水道,两岸地势开阔,边跨及部分主跨梁段采用顶推法施工。珠海侧顶推钢桁梁长 600.1 m,顶推总重量约 3 万 t,荷载集度大。首先,采用 MIDAS 软件建立顶推全过程有限元模型,确定了支架设计荷载;其次,拟定了构件设计参数;接着,建立多个有限元模型验算了桥面吊机静载试验及顶推过程中最不利工况下各支架的整体强度、刚度和稳定性,承重梁、分配梁、垫梁-斜撑、柱帽、立柱-斜撑、桩帽等关键构件局部强度。最后,验算了基础承载力。计算结果表明:支架各项指标满足规范要求。顶推实施过程结构安全,施工顺利。

关键词: 钢桁梁;顶推施工;支架设计;有限元;设计验算
中图分类号: U445.4 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2024)11-0202-05

0 引 言

随着社会经济的发展,交通量急剧增长,桥梁跨径和通行能力的要求随之提高,双层桥面的钢桁梁斜拉桥是优选方案之一^[1-3]。在特殊的浅水、滩地或山谷等桥位,钢梁斜拉桥可采用先顶推全部或部分钢桁梁到位、再挂设斜拉索的施工方法^[4-8]。双层桥面钢桁梁刚度大,荷载集度大,顶推施工、特别是支架设计面临巨大的技术挑战。本文以香山大桥为背景工程,介绍其珠海侧钢桁梁顶推支架设计方案。

1 工程概况

1.1 总体设计概况

在建的广东中山东环高速公路香山大桥为 (136+312+880+312+136)m 的双塔双索面半飘浮体系上下双层各 8 车道的钢桁梁斜拉桥,立面布置示意图如图 1 所示。

该桥钢桁梁立面采用 N 字形,从过渡墩到主跨跨中的节间距为 (7.4+10.9+32×12.8+4×8.8+33×12.8)m;净高 10.0 m,桁宽 42.2 m;上下层均采用正交异性钢桥面;标准横断面示意如图 2 所示。桥面体

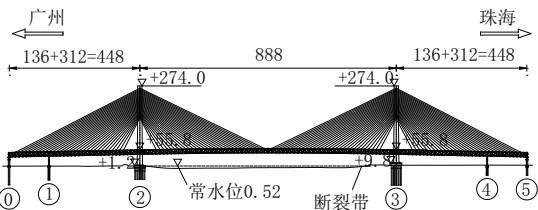


图 1 香山大桥立面布置(单位:m)
系采用密横梁体系,标准横梁间距 3.2 m。

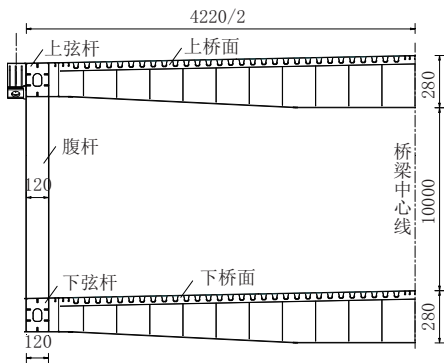


图 2 钢桁梁标准横断面(单位:cm)

香山大桥位于广东省中山市,跨越横门水道。珠海侧从由小里程往大里程方向覆盖层逐渐减少;距南塔 119~149 m 范围内存在五桂山北麓主断裂带,第四系覆盖层厚约 87~94 m,断裂带岩性主要为强风化构造角砾岩。该桥址地势开阔,属亚热带季风气候,夏秋两季常有台风,平均每年 7.3 次。桥位横门水道处于珠江下游,河床纵坡平缓,流速一般 1 m/s 左右;潮水一日两涨两落,涨潮时的最大流速为 0.7 m/s、退潮时为 1.3 m/s。

收稿日期: 2024-09-08
基金项目: 保利长大工程有限公司科研项目(RD22-01-010)
作者简介: 谢书良(1971—),男,工学学士,高级工程师,从事路桥施工技术管理工作。
通信作者: 吴玉贤(1988—),男,工学学士,工程师,从事路桥施工技术管理工作。电子信箱:1445538310@qq.com

1.2 总体顶推方案

综合考虑钢桁梁斜拉桥结构特点、桥址地质、水文、气象、工期等条件,总体施工方案确定为:边跨及部分主跨梁段顶推、其余主跨梁段悬臂拼装。经反复优化设计,标准顶推跨径为 6 个 12.8 m 标准节间距,共计 76.8 m;珠海侧顶推的梁段总数为 28 节,总长 600.1 m;标准梁段荷载集度约为 45 t/m;最重梁段 B13 设计质量为 1 268 t;含导梁、桥面吊机及施工临时荷载等顶推总重量约 3 万 t。珠海侧顶推支架总体布置立面如图 3 所示。其中,H01 支架兼作拼装支架,纵向设两个支点;H02~H08 支架各设一个支点。

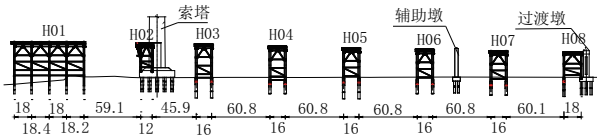


图 3 珠海侧顶推支架总体布置立面图(单位:m)

支架搭设完成后,珠海侧顶推总体流程为:(1)利用浮吊在拼装支架 H01 上散拼导梁,向前顶推;(2)利用浮吊依次散拼 B20~B17 梁段并向前顶推;(3)在 B20~B17 梁段上散拼桥面吊机;(4)桥面吊机静载试验;(5)利用桥面吊机依次吊装 B16~B01、T1、Z1~Z7 梁段,并向前顶推。

支架承重梁水平设置、铺设不锈钢板形成滑道,其上前、后共 2 个步履机和 1 个滑靴组成一组,H02~H08 标准支架布置示意图如图 4 所示;H01 支架承重梁设置两组,共 4 个步履机和 2 个滑靴。滑靴在两个步履机之间可移动一个标准节间距 12.8 m;一个 25.6 m 标准梁段顶推分两轮进行,每轮 12.8 m;每轮顶推到位后拉回滑靴,分级同步落梁后进行下一轮顶推。

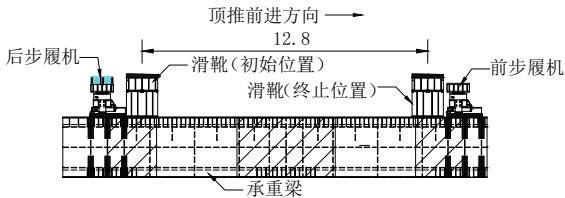


图 4 标准支架步履机及滑靴布置(单位:m)

2 支架的设计

顶推支架的设计原则可概括为 3 方面^[5-7,12]:(1)受力安全,即顶推施工阶段结构应力不超过规范值;(2)施工方便,主要体现在顶部须有足够平面尺寸作为工作平台;(3)经济节省,主要体现在结构尽量简洁、优化。

本项目顶推支架的主要特点有 3 个方面:(1)荷载大,传力途径上构造细节须精细设计;(2)地质差,

特别是支架 H01 临近断裂带,桩基须精细设计;(3)高度大,顶推水平荷载对支架影响大。

经多轮优化,本项目顶推支架设计的主要创新点有 3 个。

(1)“永临结合”。即作为临时结构的顶推支架,充分利用永久结构,具体体现在 H02 直接支承在索塔承台和塔座上、H08 顶推前方的钢管桩直接支承在过渡墩承台上。

(2)“刚柔相接”。即作为刚度较大的桩与刚度较小的柱,通过“锚板+肋板+锚筋”的构造实现刚度渐变与有效连接。

(3)“传力简洁”。即将传统的“斜撑→立柱→平联”传力路径改化为“斜撑→平联→立柱”,回避了斜撑冲剪立柱的痛点,优化了传力路径,示意图如图 5 所示。

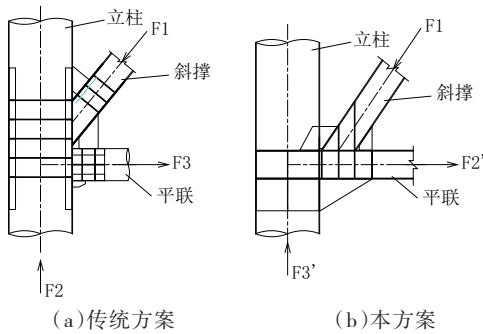


图 5 斜撑传力路径示意图

各支架主要钢构件设计参数见表 1。以标准顶推支架为例说明,其总体布置示意图如图 6 所示。从上至下为:承重梁、分配梁、钢管立柱、垫梁、斜撑 1、平联 1 及钢管连接系。承重梁和分配梁采用箱形梁,翼缘板和腹板厚度 30 mm;为减小承重梁跨径,钢管立柱之间设一道分配梁,由垫梁和斜撑 1 支撑;为避免斜撑 1 冲剪钢管立柱,斜撑 1 下端支撑于平联 1 之上,由平联 1 承受其大部分水平分力。钢管立柱之间设纵、横及斜向连接钢管。钢材除弱连接钢管采用 Q235 外,其余均为 Q355。

各支架桩基主要设计参数见表 2。桩基混凝土强度在桩帽 2 m 范围内为 C55,其余均为 C30;主筋材质均为 HRB400。

3 支架设计荷载的确定

采用有限元分析软件 MIDAS Civil 建立顶推模型^[9-11]。其中,导梁、桁梁弦杆、腹杆及桥面横梁采用梁单元,桥面板采用板单元;支点处竖向约束,并选择后排节点约束纵向和横向。根据支点位置的不同,

表 1 各支架主要钢构件设计参数

项目	H01	H02	H03~H07	H08
钢管立柱	Φ 1500 ×	Φ 2000 ×	Φ 2000 ×	Φ 1500 ×
规格 /mm	20	20	20	18
钢管立柱横桥向				
间距 /m	6	4	5	5/2.8(过渡墩侧)
承重梁高 ×	2 700 ×	2 200 ×	2 700 ×	1 700 ×
宽 /(m × m)	2 000	2 000	2 000	2 000
承重梁翼缘板和				
腹板厚 /mm	30	30	30	30
分配梁高 ×	2 200 ×	1 600 ×	1 600 ×	1 000 ×
宽 /(m × m)	1 500	1 800	1 800	1 500
分配梁翼缘板和				
腹板厚 /mm	30	30	30	30
垫梁规格	2HM588	2HN900	2HM588	2HM588
斜撑及斜撑下				
平联规格	2HN900	2HN900	2HN900	2HN900
强连接钢管	Φ 1200 ×	Φ 1000 ×	Φ 1000 ×	Φ 1000 ×
规格 /mm	14	12	12	12
弱连接钢管	Φ 820 ×	Φ 820 ×	Φ 820 ×	Φ 820 ×
规格 /mm	10	10	10	10

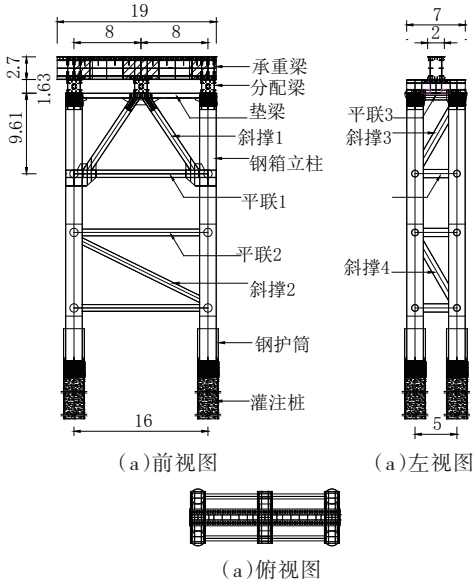


图 6 标准顶推支架总体布置图(单位:m)

表 2 各支架桩基设计参数

项目	H01	H03~H07	H08
类型	端承摩擦桩	变截面嵌岩桩	变截面嵌岩桩
桩径 /m	2	2.5/1.5	2.0/1.2
桩长 /m	82~88	10/28.0~49.9	10/26.6~32.9
主筋直径 /mm	40	40	30
主筋数量	20	32	24

顶推全过程共划分为 67 个施工步骤。顶推模型最大结构如图 7 所示。

推施工过程的荷载主要包括两个部分:(1)主梁自重 G ,通过软件自动加载;(2)桥面吊机空载时支点反力 f ,标准梁段顶推时其前支点单滑靴反力为



图 7 最大顶推结构模型

436 t,后锚点单滑靴反力为 38 t,以节点荷载形式模拟。

依据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)荷载组合如下:组合一, $1.0 \times G+1.0 \times f$,用于确定支架设计荷载及顶推过程施工控制;组合二, $1.2 \times G+1.2 \times f$,用于顶推梁的强度验算。在荷载组合一下,珠海侧顶推过程支点反力最大值见表 1,其中 H01-1 表示 H01 支架广州侧支点,H01-2 表示 H01 支架珠海侧支点,具体数值见表 3。

表 3 顶推过程各支点反力最大值

编号	H01-1	H01-2	H02	H03	H04	H05	H06	H07	H08
反力 /t	1 722	1 752	1 990	1 914	1 907	1 905	1 909	1 832	1 189

在荷载组合二下,主梁的最大组合应力为 173.4 MPa,小于钢桁梁 Q420 钢材的强度设计值 320 MPa,满足强度要求。各支点最大反力工况下,在该支点施加强迫竖向位移 +1 cm,反力增量见表 4。

表 4 竖向位移 +1 cm 时反力增量

编号	H01-1	H01-2	H02	H08
反力增量 /t	173	202	175	14

综合考虑工厂制造、现场施工和测量的误差,施工控制误差设为 2 cm,可得各支点反力控制值见表 5。

表 5 支点反力控制值

编号	H01-1	H01-2	H02	H08
反力控制值 /t	2068	2156	2340	1217

依据表 3 和表 5,各支架竖向荷载设计值见表 6。

表 6 支架竖向荷载设计值

编号	H01	H02~H07	H08
设计荷载 /t	2100	2300	1300

4 支架有限元验算

4.1 整体受力验算

采用 MIDAS Civil 建立各支架杆系有限元模型,对桥面吊机静载试验工况及顶推过程最不利工况下各支架的整体强度、刚度和稳定性进行验算。

(1)荷载与荷载组合

主要荷载包括:(1)支架自重 G ;(2)顶推梁竖向

荷载 F , 桥面吊机静载试验工况下 H01-1 滑靴处 2245 t、H01-2 滑靴处 743 t, 顶推过程最不利工况据表 7 取值; (3) 顶推过程水平力, 顺桥向水平力 F_x 取 F 的 5%, 横桥向水平力 F_y 取 F 的 3%; (4) 施工风荷载 F_g , 设计风速按工作状态下 8 级风 20.4 m/s 取值; (5) 水流力 F_w , 设计流速取 1.3 m/s; (6) 波浪力 P , 取设计波高 $H=1.34$ m、波周期 $T=4.1$ s、波长 $L=60$ m; (7) 台风 F_t , 设计风速按中山市 100 a 重现期的基本风速 32.8 m/s 取值。

H01 支架处于河道内, 其荷载组合如下:

组合一: $1.2 \times G + 1.26 \times F + 1.26 \times F_x + 1.26 \times F_g + 1.26 \times F_w + 1.26 \times P$ 。

组合二: $1.2 \times G + 1.26 \times F + 1.26 \times F_y + 1.26 \times F_g + 1.26 \times F_w + 1.26 \times P$ 。

组合三: $1.2 \times G + 1.26 \times F + 1.26 \times F_t + 1.26 \times F_w + 1.26 \times P$ 。

组合四: $1.2 \times G + 1.26 \times F + 1.26 \times F_x + 1.26 \times F_g$ 。

组合五: $1.2 \times G + 1.26 \times F + 1.26 \times F_y + 1.26 \times F_g$ 。

组合六: $1.2 \times G + 1.26 \times F + 1.26 \times F_t$ 。

H02~H08 支架处于岸上, 不考虑水流力 F_w 和波浪力 P , 其组合四~六荷载组合四~六对应上述组合一~三。

(2) 计算工况

桥面吊机静载试验工况下, 滑靴不动, 仅一个计算工况。顶推过程中, 如图 4 所示滑靴在支架承重梁上移动区间长 12.8 m, 故选择具有代表性的四分点位置(即滑靴初始位置、1/4、1/2、3/4、滑靴终止位置)作为计算工况, 一共 15 个荷载组合工况, 如表 7 所列。

表 7 顶推过程支架计算工况表

序号	F 位置	荷载组合	
		H01	H02~H08
1~3	滑靴初始位置	组合一~三	组合四~六
4~6	滑靴前移 3.2 m	组合一~三	组合四~六
7~9	滑靴前移 6.4 m	组合一~三	组合四~六
10~12	滑靴前移 9.6 m	组合一~三	组合四~六
13~15	滑靴终止位置	组合一~三	组合四~六

(3) 强度验算结果

各项推支架强度验算结果汇总见表 8, 可见强度满足规范要求。

(4) 刚度验算结果

重点验算承重梁和分配梁的竖向刚度及钢管立柱的水平刚度, 计算结果见表 9, 满足规范要求。

表 8 各支架最大应力

单位: MPa

支架编号	正应力		剪应力	
	最大值	设计值	最大值	设计值
H01	255.8	275	152.7	155
H02	252.9	275	131.2	155
H08	236.2	275	153.6	155
H03~H07	241.2	275	153.9	155

表 9 各支架最大位移

单位: mm

支架编号	承重梁挠度		分配梁挠度		立柱水平位移	
	最大值	容许值	最大值	容许值	最大值	容许值
H01	10.1	22.5	5.5	15.0	65.0	104.4
H02	7.9	24.0	7.0	15.0	23.0	64.1
H08	12.1	22.5	8.5	12.5	24.9	68.8
H03~H07	10.5	20.0	7.8	12.5	38.5	86.0

(5) 稳定性验算结果

各项推支架第一阶稳定系数最小值见表 10, 可见第一阶稳定系数均大于 4, 满足规范要求。

表 10 支架最小第一阶稳定系数

支架编号	第一阶稳定系数最小值
H01	15.8
H02	26.4
H08	20.8
H03~H07	13.9

4.2 顶推过程局部强度验算

以标准支架 H03 为例, 选择承重梁、分配梁、斜撑—垫梁、柱帽、斜撑—立柱局部及桩帽等关键局部, 采用 MIDAS FEA 软件建立实体模型进行强度验算^[13]; 荷载取自 4.1 节整体模型的最不利工况; 最不利局部应力汇总见表 11, 部分应力云图如图 8 所示, 可见均满足要求。

表 11 支架 H03 最大局部应力

部位	材料	项目	最大值 /MPa	设计值 /MPa
承重梁	钢材 Q355	等效应力	268.7	270
分配梁	钢材 Q355	等效应力	249.7	270
斜撑— 垫梁局部	钢材 Q355	等效应力	266.6	270
柱帽	钢材 Q355	等效应力	263.1	270
斜撑— 立柱	钢材 Q355	等效应力	248.1	270
桩帽	钢材 Q355	等效应力	167.2	270
桩帽	混凝土 C55	第 1 主应力	1.60	1.89
桩帽	混凝土 C55	第 3 主应力	15.6	24.4

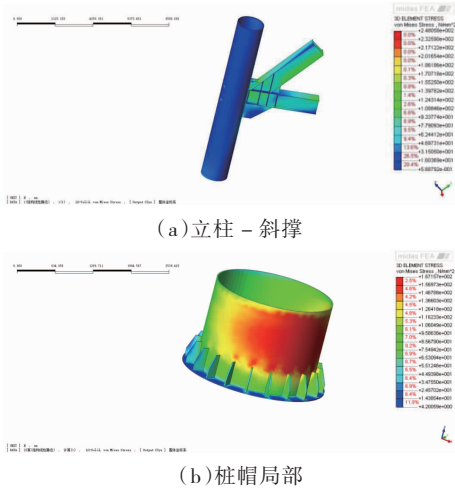


图8 H03关键局部钢结构等效应力

5 支架基础承载力验算

参考《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)表 3.0.7-2,单桩承载力抗力分项系数取 $r_R=1.25$;参考式 3.0.9,结构重要性系数取 $r_0=1.0$;参考条 3.0.6:承载力特征值乘以相应的抗力分项系数应大于相应的组合效应,即桩基的抗弯承载力 M_{ud} 和轴向受压承载力 R_a 要求为

$$r_R M_{ud} > r_0 M_{max} \tag{1}$$

$$r_R R_a > r_0 R_{max} \tag{2}$$

其中, M_{max} 表示桩基的弯矩组合效应最大值, R_{max} 表示桩基的轴力组合效应最大值。

提取 4.1 节整体模型的最不利工况结果,可得到桩基包括 R_{max} 的最不利约束力,进一步跟据《码头结构设计规范》(JTS 167—2018)附录 B 中的 m 法可得出桩身入土段的最大弯矩 M_{max} 。同时,依据桩基构造参数和地质参数可得 M_{ud} 和 R_a ,列表见表 12;从中可见,式(1)(2)均满足要求。

表 12 各支架桩基承载力

桩基编号	$M_{ud} / (kN \cdot m)$	$M_{max} / (kN \cdot m)$	R_a / kN	R_{max} / kN
H01	8 072	1 649	14 887	14 279
H08	7 121	2 207	14 094	8 736
H03~H07	15 981	3 351	17 646	15 206

6 实施效果

按照的支架设计方案施工,2024 年 3 月 27 日完成桥面吊机试吊,至 2024 年 7 月已顺利完成 B05 梁段顶推,B04 安装到位照片如图 9 所示。顶推过程中,各支架基础沉降在 10 mm 以内,结构未出现塑性变形,安全顺利。



图9 B04 安装到位照片

7 结 语

(1)综合顶推施工全过程的有限元分析和支点强迫位移的影响分析,确定了各支架设计荷载;设计了各支架的构造参数。

(2)验算了桥面吊机静载试验工况和顶推过程最不利工况的整体强度、刚度和稳定性,验算了 H03 支架承重梁、分配梁、斜撑—垫梁连接处局部、柱帽局部、斜撑—立柱连接处局部和桩帽局部等关键局部的局部强度,验算了桩基承载力,论证了支架设计的可行性。

(3)香山大桥珠海侧钢桁梁按本文方案顶推,支架基础沉降稳定,结构未出现塑性变形,施工安全顺利,达到预期目标。

参考文献:

[1] 秦顺全.武汉天兴洲公铁两用长江大桥关键技术研究[J].工程力学,2008,25(增刊2):99-105.
[2] 高宗余.沪通长江大桥主桥技术特点[J].桥梁建设,2014,44(2):1-5.
[3] 秦顺全,徐伟,陆勤丰,等.常泰长江大桥主航道桥总体设计与方案构思[J].桥梁建设,2020,50(3):1-10.
[4] 李传习,邹桂生.法国米约高架桥-7塔斜拉桥的设计与施工[J].世界桥梁,2005(4):18-20.
[5] 涂满明,姚发海.超大跨连续钢桁梁多点顶推架设施工技术[J].交通科技,2009(1):19-21.
[6] 郭宗平.渝黔铁路新白沙沱长江特大桥钢桁梁架设技术[J].桥梁建设,2019,49(3):114-118.
[7] 幸思佳,沈炫.渝黔铁路新白沙沱长江特大桥主桥施工技术[J].施工技术(中英文),2023,52(14):110-115.
[8] 倪学平,谭旺,阳维华,等.洪奇门特大桥钢箱梁智能顶推施工关键技术[J].世界桥梁,2024,52(3):29-35.
[9] 罗程巍,钟振华,朱勇骏,等.公轨两用大跨长联刚性悬索加劲钢桁梁桥施工技术[J].施工技术(中英文),2022,51(17):90-93.
[10] 袁红伟,张国文,樊超,等.螺溪洲大桥主桥顶推施工全过程仿真分析[J].公路,2024,69(3):110-115.
[11] 闫磊,闫金宁,韩恒,等.大跨连续钢桁梁桥顶推施工全过程可靠度评估[J].长安大学学报(自然科学版),2024,44(4):48-65.
[12] 董政,张鹏.郑州黄河公铁两用桥主桥钢桁梁支架拼装及顶推技术[J].铁道标准设计,2010(9):66-69.
[13] 刘小燕,欧阳华,沈炼.波纹钢板组合箱梁桥有限元精细化建模方法研究[J].钢结构,2013,28(6):1-4,39.