

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.032

磨刀门特大桥船撞桥墩快速重建工程技术研究

孔令元¹, 巩健²

(1. 广东省公路建设有限公司, 广东 广州 510623; 2. 天津城建大学 土木工程学院)

摘要:桥墩遭受船舶撞损后往往需要长时间封闭维修,因此社会、经济影响严重。桥墩重建工程国内外有许多案例,但是大多数工程采用的重建施工方案都有各自的局限性,很难在其他工程中推广应用。磨刀门特大桥船撞桥墩重建工程通过采用门式施工支撑,改进下部重建结构设计,引入预制模板、支架及大型施工设备,实现了快速抢通重建、减少路费损失的目标。由于该施工方案具有一定的通用性,故该文结合 Midas Civil 软件对该工程采用的门式施工支撑方案进行分析及验算,总结桥墩快速重建工程的关键技术。

关键词: 桩柱式桥墩; 船舶撞损桥梁; 施工支撑; 拆除; 重建

近年来,桥墩遭受船舶撞击事故时有发生,桥墩损伤后往往需要长时间封闭维修,严重影响社会经济发展。目前国内外桥墩拆除重建工程大多采用以下施工方案:① 在桥下搭设支架,拆除桥梁上部结构;② 在受损桥墩附近搭设施工平台及围堰,对原桩基础进行拔除或加固;③ 在原位重建桥墩及桥梁上部结构。这些施工方案能够使重建结构与原桥基本保持一致,但是不能利用原上部结构,工期较长,施工期间交通完全中断。上海斜塘大桥、广州洪奇沥大桥和珠海莲溪大

桥等桥墩重建均采用此种施工方案。江都夹江大桥被撞桥墩重建方案有所创新,保留了原上部结构和桩基,新增桩基承台作为原结构的补充并利用其作为施工平台搭设支架,实施结构顶升及桥墩拆除重建,但该方案不适用于大型或受损严重的桥墩。国外一些桥墩重建、大修工程(如斯洛伐克的斯塔里桥、伦敦的水街桥)采用移动式支架和装配化施工,提高了工效、缩短交通封闭时间,但桥墩存在接缝,其防撞能力以及抗震性能仍有待验证。

(1) 边跨现浇段施工方法多样,方法选取可依据实际情况考虑,但需综合考虑方案设计的复杂程度、施工成本、施工安全风险等因素,有针对性地分析选取。

(2) 不平衡梁段施工方法能有效减短边跨现浇段长度,减弱过渡墩边跨现浇段托架施工时的偏载,该方法属于设计优化的一种施工方法。该方法需增加模型分析工作量,同时新浇梁段位移增量较大,可采取调整预拱度和增设预应力方式进行克服;另外新增悬浇段施工时需在中跨同步配重,对过程控制要求高。采用该方法施工需加强施工监控,以减小施工质量安全风险。

参考文献:

[1] 中交二航局重遵扩容工程第13合同段项目部. 魏家寨特大桥上部结构专项施工方案[Z], 2019.
[2] 梁之海. 大跨度刚构连续梁61 m高空边跨现浇段施工技

术[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2017(S1).
[3] 唐小富. 高墩连续刚构桥长边跨现浇段施工方案比选[J]. 桥梁建设, 2016(3).
[4] 白晓红. 挂篮吊架施工连续刚构边跨现浇段及合龙段的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2013(2).
[5] 赵艳纳, 贾利强, 邹兴林. 山区连续刚构桥边跨现浇段吊架法施工技术[J]. 中外公路, 2020(5).
[6] 铁木尔. 长边跨高墩大跨连续刚构桥施工方案比较[J]. 中外公路, 2019(5).
[7] 龚文锋, 刘梦伟. 连续刚构桥边跨现浇段施工方法对预拱度影响研究[J]. 北方交通, 2015(7).
[8] 龚玉华, 陈雷, 陶路, 等. 山区连续刚构桥高墩边跨现浇段施工方案[J]. 世界桥梁, 2012(3).
[9] 程伟, 陈斌, 肖红梅, 等. 不平衡长度悬浇现浇段及合龙段施工方法探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2007(6).

收稿日期: 2020-09-05

基金项目: 交通运输部建设科技项目(编号: 2014318494020)

作者简介: 孔令元, 男, 工程师. E-mail: 18928821872@163.com

珠海磨刀门特大桥被撞桥墩重建工程在施工技术上又有所改进:① 采用在桥梁两侧搭设门式施工支撑,并通过托梁顶升、稳固桥梁上部结构,减少了对原结构的扰动,同时能满足大型施工机械设备作业要求;② 新增桩基采用了避让原桩基的设置方式,没有拆除或加固原桩基,而是在其前后新增桩基;③ 重建桥墩采用了施工空间占用小、防撞能力好、便于翻模施工的薄壁墩形式;④ 使用了预制模板和支架及多种大型施工设备,提高了工效。该桥实现了 2 个月单幅双向通车,5 个月完工双幅通车,大幅缩短了交通中断时间,不仅桥梁结构安全可控,更大幅减少了路费损失。由于该工程方案有一定的通用性,因此该文对该工程采用的门式施工支撑方案进行对比分析,并结合 Midas Civil 进行施工验算,对桥墩快速重建工程的关键技术进行总结,以期为今后相似工程提供经验参考。

1 工程概况

磨刀门特大桥位于珠江磨刀门水道入海口处,全长 3 320 m,共 10 联,主桥采用悬臂预应力连续刚箱梁(单箱单室),跨径组合为(70+2×120+70) m,引桥均为 T 梁或小箱梁。分左右两幅,间隙为 0.2 m,单幅宽 12.9 m。

2017 年 8 月台风天鸽登陆期间,该桥遭受多艘载满货物船只连续猛烈撞击,事故造成 11 个桥墩受损(左幅 9 个、右幅 2 个)。其中左幅 L31[#] 桥墩发生严重的变形和损坏,其他桥墩均为局部刮蹭破损。

1.1 左幅 L31[#] 墩受损情况

L31[#] 墩为主桥(70 m 刚箱梁边跨)与引桥(50 mT 梁)之间的过渡墩,采用双桩柱式桥墩配盖梁, $\phi 2$ m 桩柱配 $\phi 2.2$ m 的嵌岩桩基础,桩间用系梁连接。

经现场检测主要病害如下:① 引桥侧桥面相对主桥侧桥面向内偏移约 6 cm;② 连续刚箱梁 70 m 边跨及 50 mT 梁支座破损或脱落,L31[#] 墩支撑梁体掉落到盖梁顶面,致使墩顶附近桥面变形 25~29 cm;③ 墩柱擦伤弯折,系梁断裂,弯折处横向位移 165 cm;④ 左幅盖梁横向位移约 146 cm 靠在右幅盖梁上;⑤ 墩顶往 50 mT 梁侧纵向位移 40~50 cm;⑥ 箱梁 70 m 边跨下挠明显,但未见明显病害;⑦ 50 mT 梁上部结构靠 L31[#] 墩侧局部破损、横隔板开裂,因下挠致靠近 L32[#] 墩侧桥面横向开裂,未见其他明显病害。墩柱变形及破损情况如图 1 所示。

该桥梁损伤评价结果如下:① L31[#] 墩处于塑性

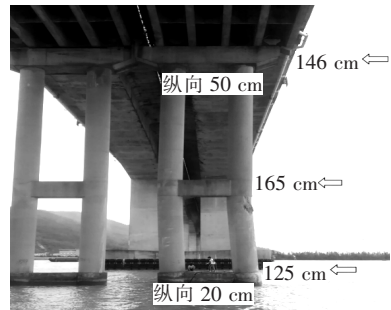


图 1 墩柱变形及破损情况

破坏阶段需要拆除重建;② 箱梁 70 m 边跨目前各项指标基本稳定,无需修复;③ 50 mT 梁最大主拉应力发生在横隔板,造成横隔板开裂,但该应力未超出钢筋受力标准值,修复后可正常使用。因此该文针对 L31[#] 墩的重建施工开展研究。

1.2 左幅 L31[#] 桥墩重建总体方案

L31[#] 墩总体采用搭设施工支撑、顶梁、拆除旧桥墩、重建新桥墩、顶升箱梁及 T 梁的思路。① 在横向 L31[#] 墩两侧水中搭设施工支撑承托箱梁及 T 梁,维持现状高程;② 顶升梁体使上部结构与盖梁分离,分块切割拆除旧盖梁、墩柱及系梁、桩基;③ 在水中搭建施工平台,重建 L31[#] 墩;④ 顶升梁体,恢复原设计高程;⑤ 修复梁体、桥面系、伸缩缝等。

2 施工支撑结构设计

施工支撑是影响桥墩拆除重建施工进度及安全的关键环节,起到顶升和稳固上部结构的作用,对高效、安全完成桥墩拆除重建至关重要。首先,为尽可能压缩工期,该工程采用了较多高效的大型施工机械设备(大型浮吊、平驳、翻模等),需通过施工支撑为之提供足够的作业空间;其次,原桥墩已处于危险状态,若施工扰动过大,或有倒塌风险,因此施工支撑要避免触碰原桥墩基础,同时能稳固原桥结构,保障后续施工安全。最后,快速搭设施工支撑完成上部结构荷载转换,有利于提早恢复单幅通车。

2.1 设计方案比选

方案 1:在 L31[#] 墩横桥向两侧各插打 3 排钢管桩,每排 8 根 $\phi 1 200$ mm×12 mm(桥墩左侧预留下部结构拆除作业空间),桩顶抄平后设置 20 mm 厚盖板,然后布设纵向 3HM400×14×26 型钢及横向 4HM400×14×26 型钢作为分配梁。上层支撑架用 $\phi 1 600$ mm×16 mm 钢管 8 根、 $\phi 630$ mm×8 mm 钢

管平联3道及 $\phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 钢管斜联,在顶部放置型钢承重梁及分配梁。然后横跨支撑架搭设45 m

长托梁,截面尺寸分别为 $1\ 900\text{ mm}\times 3\ 500\text{ mm}$ (宽 \times 高)、 $1\ 500\text{ mm}\times 1\ 940\text{ mm}$ 。如图2所示。

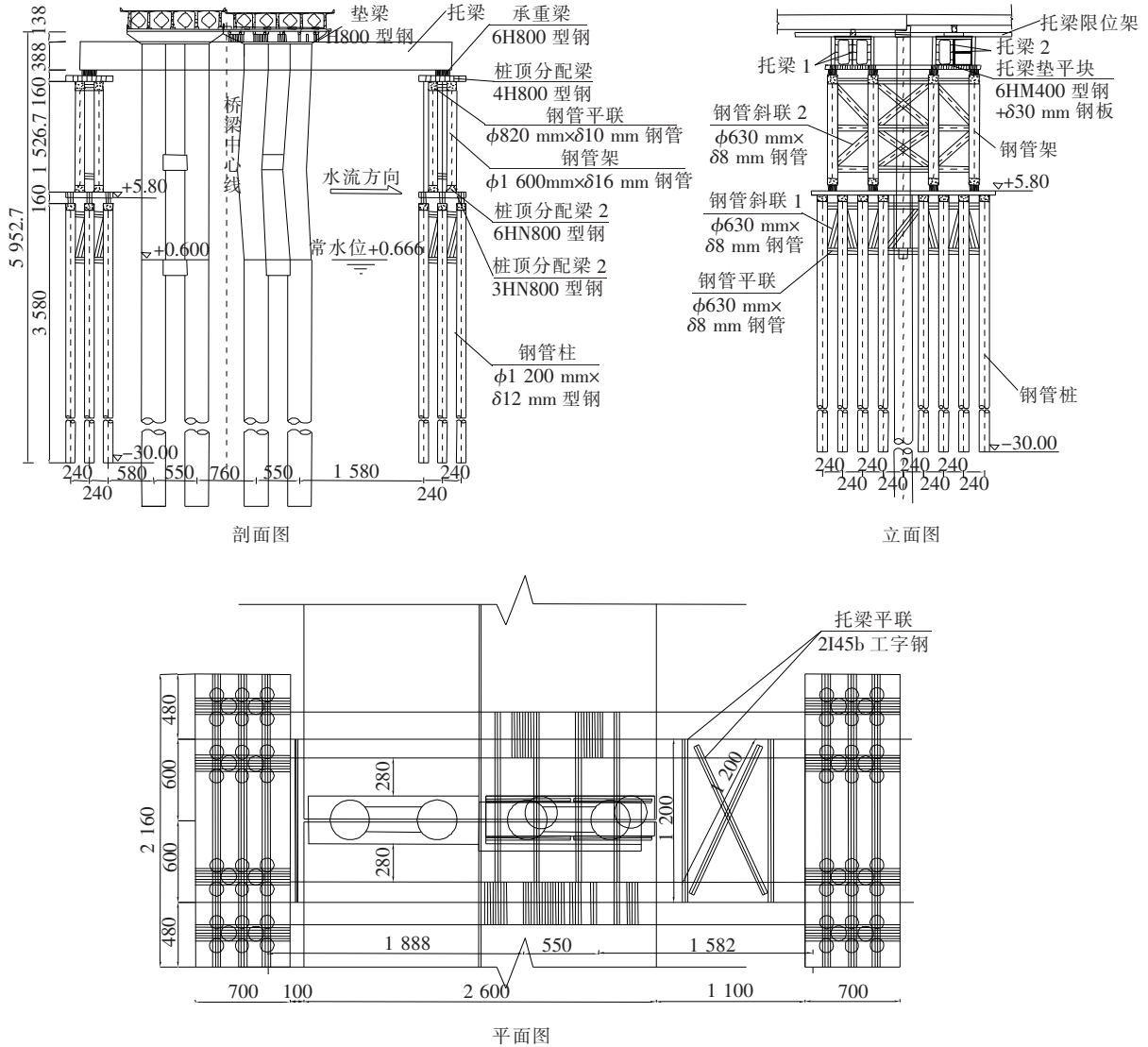


图2 方案1:施工支撑结构(除标高单位为m外,其余:cm)

方案2:在原桩基前后新增4根 $D200\text{ cm}$ 灌注桩及承台,利用承台作为施工支撑的基础。在纵桥向桥墩前后对称设置4根 $\phi 800\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 钢管柱,柱顶采用双拼 $\text{HN}500\times 300$ 热轧宽翼缘工字型分配梁,以支撑千斤顶。原 $\text{L}31^{\#}$ 墩盖梁下设置双拼 $\text{HN}500\times 300$ 热轧宽翼缘工字型承担上部结构总量。钢管柱间平联、横联、斜联均采用 $\phi 630\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 钢管。如图3所示。

墩拆除重建施工相对独立,并且先设置施工支撑架支撑箱梁及T梁后,再进行原桥墩拆除及新桥墩重建施工,确保了施工中原结构安全;施工支撑搭设快,能够更早完成箱梁及T梁荷载转换,仅2个月就能开放交通。方案2利用新桥墩桩基作为临时支架基础,成本较低但原桥墩已严重弯折变形,在未对箱梁及T梁进行支撑的情况下,在原桥墩附近施工新桥墩桩基,对受损桥梁有一定扰动,一旦发生二次事故将造成严重后果,并且施工支撑占用了桥墩拆除重建的施工作业空间,只能满足小型机械设备作业,工效低,工期约为10个月;新桥桩基完工后才能搭设临时支架,开放交通也要10个月。因此方案1安全可靠,较方案2工期缩短

两种方案具体对比分析见表1。

由表1可知:方案1能够满足大型浮吊、平驳等大型设备对作业空间的要求,提高了工效,工期短(约为5个月);临时支架搭设在桥墩横向两侧,作业面与桥

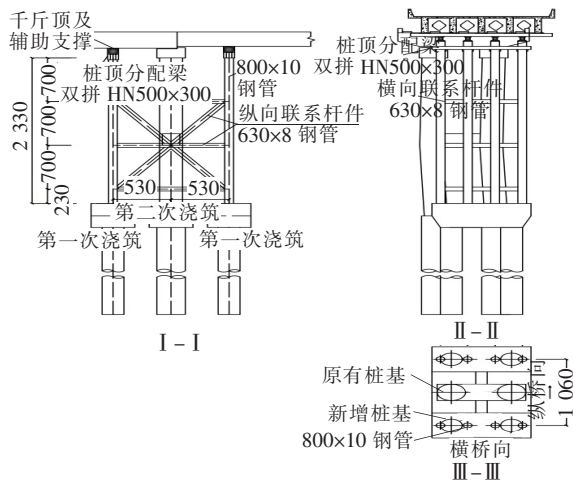


图 3 方案 2: 施工支撑结构

(除槽钢及钢管单位为 mm 外,其余:cm)

近 5 个月,开放交通提前约 8 个月,路费损失减少近 8 000 万元,作为最终方案。

2.2 施工支撑结构有限元分析

对施工支撑结构采用 Midas Civil 有限元软件进行整体建模。临时支承结构受力主要考虑桥梁上部结构作用在 L31# 墩上的荷载(T 梁侧约为 11.6 t,箱梁侧约为 523 t)、8 级风荷载(或 100 年一遇风荷载)及水流力,荷载作用下钢管桩最大反力为 1 105.3 kN。在荷载作用下施工支撑结构主要构件的各项应力均小于 Q235B 及 Q345 钢材设计强度,变形也小于容许值,满足 GB 50017—2003《钢结构设计规范》要求,见表 2。

2.3 稳定性分析

(1) 钢立柱稳定性分析

表 1 施工支撑结构方案对比分析

方案	效果可靠性	技术可行性	施工便利性	经济合理性
1	作业空间充足,能够保障桥墩拆除重建的施工质量	先顶梁后拆除重建原桥墩,确保了原结构安全	便于大型浮吊、平驳船施工作业,工期较短为 5 个月	造价约 3 700 万元,但顶梁后能够及早开放交通,开放交通需 2 个月。路费损失约 2 300 万元
2	桩基承台分 2 次浇筑易开裂;原盖梁与新墩柱间可能存在接缝	在未顶梁条件下在原桥墩位置施工新桩基,对原结构有一定扰动,安全风险高	施工作业空间狭小,不利于大型施工设备作业,工期较长为 10 个月	造价约 2 100 万元;交通影响大,开放交通需 10 个月,路费损失约 1.1 亿元

表 2 荷载作用下施工支撑结构应力及变形统计

部构件	钢材	最大弯曲应力/MPa	抗弯强度设计值/MPa	最大剪切应力/MPa	抗剪强度设计值/MPa	最大变形/mm	变形容许值/mm
立柱	Q235	7.5	215				
托梁	Q335	200.4	295	46.5	170	109.5	112.5
临时墩	Q235	201.8	215	77.9	125	9.2	33.8

$\phi 1\ 200\ \text{mm} \times 12\ \text{mm}$ 钢管立柱长 31 m,截面面积 $A = 447.8656\ \text{cm}^2$,最大弯矩 M_x 为 $1\ 080.2\ \text{kN} \cdot \text{m}$ 。验算钢管立柱稳定性在规范容许范围内,详见表 3。

钢托梁材质为 Q345 钢板,其高为 3.46 m、宽为 1.9 m、两侧腹板间距为 1.8 m、厚度为 12 mm,上下盖板厚度为 24 mm,钢箱梁之间采用端截面开坡口熔透焊接+加强肋板焊接。

(2) 钢托梁稳定性分析

表 3 钢管立柱稳定性验算

长细比 $\left(\lambda = \frac{\mu l}{i}\right)$	$\left(N'_{Ex} = \frac{\pi EA}{1.1\lambda_x^2}\right) / N$	稳定性 $\left[\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{1x} \left(1 - 0.8 \frac{N}{N'_{Ex}}\right)}\right] / \text{MPa}$	容许值 f / MPa
83.3	119.186×10^5	78.9	215

注:表内各式中, N 为计算构件的轴心压力; φ_x 为弯矩作用平面轴心受压构件的稳定系数; β_{mx} 为等效弯矩系数; γ_x 为与截面模量相应的截面塑性发展系数; W_{1x} 为弯矩作用平面内对较大受压纤维的毛截面模量。

钢托梁的 $\frac{h}{b_0} = 1.92 < 6$, $\frac{l_1}{b_0} = 28.2 < 95 \times \frac{235}{f_y} = 64.71$, 整体稳定性满足规范要求。其中: h 、 b_0 、 l_1 均为箱形截面简支梁的几何参数; f_y 为钢材名义屈服强度。

钢托梁顶面最大荷载为箱梁支点反顶荷载 $P = 1.2 \times 3\ 270 = 3\ 924$ kN, 对应局部压应力 $\sigma_c = \frac{\psi F}{t_w l_z} = 61.9$ MPa < 295 MPa, 满足规范要求。其中: ψ 为集中荷载增大系数; F 为集中荷载; t_w 为腹板厚度; l_z 为集中荷载在腹板计算高度上边缘的假定分布长度。

选取钢托梁弯矩、剪力最大值对应截面, 并分 3 个区格进行钢托梁腹板局部稳定性验算(图 4), 各项应力及局部稳定性满足规范要求, 详见表 4。其中 h_w 为腹板高度。

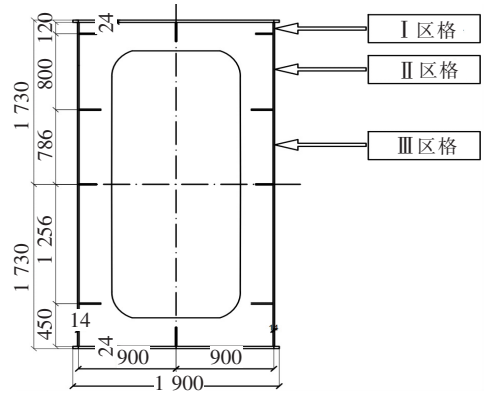


图 4 钢托梁截面图(单位: mm)

(3) 支架整体稳定性验算

利用有限元软件对支架进行验算, 在承受荷载作

表 4 钢托梁腹板局部稳定性验算

截面点	区格	腹板边缘弯曲压应力	腹板剪应力	腹板边缘局部压应力	局部稳定性
		$\left(\sigma = \frac{M \frac{h}{2}}{I_x}\right) / \text{MPa}$	$\left(\tau = \frac{V}{h_w t_w}\right) / \text{MPa}$	$\left(\sigma_c = \frac{\psi F}{t_w l_z}\right) / \text{MPa}$	$\frac{\sigma}{\sigma_{cr1}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c \cdot cr1}}\right)^2$
T 梁截面 1(剪力 $V_{T1} = 2\ 541$ kN, 弯矩 $M_{T1} = 36\ 800$ kN·m)	I	182.6	30.6	30.6	0.63
	II	166.4	30.6	21.5	0.59
T 梁截面 2($V_{T2} = 269.8$ kN, $M_{T2} = 38\ 400$ kN·m)	I	190.6	3.2	30.6	0.63
	II	173.6	3.2	21.5	0.59
箱梁截面($V_x = 1\ 822.1$ kN, $M_x = 39\ 755$ kN·m)	I	197.5	21.9	61.9	0.69
	II	179.9	21.9	51.7	0.66

注: ① 区格 III 与 II 区格相比, 临界应力相同, 但区格 III 的弯曲应力、局部压应力较小, 故不计算; ② 当 $\frac{\sigma}{\sigma_{cr1}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr1}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c \cdot cr1}}\right)^2 < 1$ 时, 满足规范要求。

用下其 1~5 阶模态失稳系数(整体稳定性系数)呈上升趋势且均大于 5, 满足规范要求, 见表 5。

表 5 1~5 阶模态支架失稳系数统计

模态	特征值	容许误差
1	22.332 600	$1.398\ 6 \times 10^{-35}$
2	23.017 942	$6.769\ 6 \times 10^{-37}$
3	27.934 694	$5.506\ 4 \times 10^{-30}$
4	28.414 094	$1.442\ 0 \times 10^{-28}$
5	38.533 380	$4.517\ 9 \times 10^{-18}$

2.4 施工支撑快速搭设

施工支撑采用装配式结构。支撑架、托梁限位架、托梁等部件提前定制, 在平驳上组拼, 分别用 350 t/100 t 浮吊进行吊装, 精确定位后焊接固定。

其中, 托梁长 49 m, 单条重 196 t, 利用平驳运至指定位置, 然后用 2 台 350 t 浮吊进行吊装。为后续梁底顶托、拆除梁段等需要, 预先在托梁上焊接施工护栏、设置吊装控制刻度线等。

3 桥墩快速拆除重建工程技术

桥梁下部结构拆除重建施工具有作业面狭小、工期紧的特点, 上述施工支撑通过托梁支撑桥梁上部结构, 既有助于保障原结构安全, 还为大型机械设备提供了充足的施工作业空间。为更早完工恢复交通, 该工程还在施工支撑结构搭设、损坏下部结构拆除、新桥墩重建等方面使用了一系列快速可靠的工程技术: ① 采用了大量预制拼装结构的支架和模板, 并在构件的制造及安装过程中, 通过空间计算分析、测量控制技术及

构件的空间调节措施,解决了构件现场安装的匹配性问题;②使用了较多大型施工机械,提高了工效;③新增桩基采用了避让原桩基的设置方式,没有拆除或加固原桩基础,而是在其前后设置了新桩基础;④重建桥墩采用了施工空间占用小、防撞能力好、便于翻模施工的薄壁墩。

3.1 损坏下部结构整块拆除

采用 1 000 t 浮吊将下部结构分两次切割拆除,较分多段拆除或破碎后拆除,施工效率大幅提高。首先顶升 T 梁和箱梁,用混凝土钢管、钢板支垫;接着拆除盖梁挡块、支座垫石及附属物;然后分两次切割拆除下部结构,利用盖梁、中系梁作为吊点依次吊出。

3.2 下部结构重建

(1) 原桥桩基已严重变形,不能直接利用,水下部分也难以全部切除。为避让原桩基,将新增 4 根 D200 cm 成孔灌注桩设置在其前后位置。

(2) 承台高 3 m,封底厚度 1 m,长 10.76 m,宽 9.5 m。承台套箱模板兼做阻水围堰,采用大块定型钢模板,由标准平面模板及 12 块转角定型钢模(高 4.5 m)组拼。为提高工效,套箱采用预拼装再整体下放工艺。首先在桩基护筒上安装分配梁、反吊底板,并对套箱进行预拼装,然后用 80 t 液压千斤顶将套箱(重 52 t)连续、整体下放至设计标高,套箱底板的高程偏差需及时调整。封底及承台混凝土浇筑后拆除套箱。

(3) 薄壁墩身宽 1.8 m,长 6.4 m,高约 24 m。为加快施工速度,薄壁墩身采用翻模技术分 3 节段浇筑。利用承台预留位置搭设墩身模板支架固定,采用 80 t 浮吊+20 t 卷扬机提升安装模板。

(4) 盖梁模板整体加工、整体吊装安装。为加快底模铺设,特将盖梁两端悬挑部分底模支架设计为整体钢胎架,侧模采用定型钢模板并搭配[16 槽钢骨架及 $\phi 20$ mm 对拉螺杆。安装盖梁模板采用侧模包底模与端模的方法,利用墩身预埋牛腿作为支撑,通过卷扬机结合人工安装。

4 结 论

针对磨刀门大桥桥墩重建工程采用的门式施工支撑进行对比分析,并结合 Midas Civil 进行验算,对该桥墩快速重建工程技术进行总结,得到以下结论:

(1) 采用在桥梁两侧搭设施工支撑,并通过托梁顶升、稳固桥梁上部结构的方案,减少了对原结构的扰动,同时能满足大型施工机械设备作业要求。

(2) 没有拆除或加固原桩基础,而是在其前后设置了新桩基础。

(3) 重建桥墩采用了对施工空间占用小、防撞能力好、便于翻模施工的薄壁墩形式。

(4) 使用了预制模板和支架及多种大型施工设备,提高了工效。

参考文献:

- [1] 孔宪卫,张庆河.基于船舶操纵模拟的船撞桥概率研究[J].中国安全生产科学技术,2019(10).
- [2] 朱俊羽,祝露,韩娟,等.某航道桥下部结构受船舶撞击后安全性能评估及修复[J].世界桥梁,2020(1).
- [3] 周传林,孙大松,杨辉.连续梁桥下部结构船只撞损维修加固处理[J].公路,2014(4).
- [4] Petr Novotny, Pavlína Juchelková, Pavel Svoboda, Jiří Strásky. New Sary Most (Old Bridge) Across Danube River in Bratislava[J]. Procedia Engineering, 2016, 156: 288—295.
- [5] Alastair Courtney. Transforming Delivery of Water Street Bridge Abutment in London UK through Innovation[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2020, 173(3): 119—125.
- [6] 欧智菁,薛文浩,谢铭勤,等.装配式混凝土桥墩施工技术综述[J].中外公路,2020(1).
- [7] 郭健,郑阳飞,宋神友.考虑海域水位变化的船撞桥流固耦合分析[J].桥梁建设,2019(6).
- [8] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S].
- [9] JTG/T F50—2011 公路桥涵施工技术规范[S].
- [10] JTG D63—2007 公路桥涵地基及基础设计规范[S].