

# 多跨连续钢管混凝土拱桥拆除关键技术研究

万成福<sup>1</sup>, 曾文莉<sup>2</sup>

(1. 中铁二十二局集团第三工程有限公司, 福建 厦门 361000; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610000)

**摘要:**以鉴湖大桥拆除工程为研究背景,对复杂情况下钢管混凝土拱桥的拆除进行研究,首先介绍了目前桥梁拆除的方法和现状,并结合该桥梁拆除的难点提出了3种拆桥方案,通过比选确定适用于该桥的拆除方案,对拱桥拆除的总体顺序进行说明,之后分析了各施工阶段的受力特性,对拆除中位移和应力的最不利阶段的理论值和实测值进行对比分析,最后研究了材料强度和温度对结构位移和应力的影响。结果表明:钢栈桥龙门吊法最适合于有通航要求且空间受限的桥梁拆除;翼缘切割后可增大两侧作业空间,减小梁体自重;腹板拆除过程中,结构的应力和位移值与梁体悬臂长度成正比;应力和位移的理论值较实测值偏小;材料强度和温度的变化不影响结构的受力规律,结构应力和位移与材料强度成反比,与温度成正比。

**关键词:**钢管混凝土拱桥;拱桥拆除;拆除方案;数值分析;施工控制;敏感性分析

中图分类号:U445.6

文献标志码:A

## Key Techniques for Demolition of Multi-Span Continuous Arch Bridge with Concrete-Filled Steel Tubes

WAN Chengfu<sup>1</sup>, ZENG Wenli<sup>2</sup>

(1. China Railway 22nd Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610000, China)

**Abstract:** Taking the demolition project of Jianhu Bridge as the research background, the demolition of arch bridges with concrete-filled steel tubes under complex conditions was studied. First, the current bridge demolition methods and application status were introduced, and three bridge demolition schemes were put forward according to the difficulties of the bridge demolition. The appropriate demolition scheme for the bridge was selected after comparison, and the sequence of arch bridge demolition was explained. Then, the stress characteristics of the bridge at each construction stage were analyzed, and the theoretical and measured displacement and stress at the most unfavorable stage during demolition were compared. Finally, the influence of material strength and temperature on structural displacement and stress was studied. The results show that the gantry crane method for steel trestle bridges is best suited to the demolition of bridges with navigable requirements and limited space. After the flange is cut, the working space on both sides can be increased, and the self-weight of the beam can be reduced. During the demolition of the web, the stress and displacement of the structure are proportional to the cantilever length of the beam body, and the theoretical stress and displacement are smaller than measured values. The change of material strength and temperature does not affect the force law of the structure, and the structural stress and displacement are inversely proportional to the material strength and proportional to the temperature.

**Keywords:** arch bridges with concrete-filled steel tubes; arch bridge demolition; demolition scheme; numerical analysis; construction control; sensitivity analysis

收稿日期:2023-05-08

基金项目:中国铁建股份有限公司重大研发项目(编号:2020-C28);中铁二十二局集团有限公司重大研发项目(编号:RR110121H01066)

作者简介:万成福,男,大学本科,高级工程师.E-mail:19193706@qq.com

## 0 引言

随着交通量和重载车辆急剧增加以及桥梁构件老化和设计标准的提高,越来越多的桥梁因承载能力不足或不满足当前城市发展要求而面临拆除改建。桥梁拆除的难度和风险通常大于桥梁新建,目前规章制度中对于旧桥材料强度的折减系数等并未给出明确的数值,其拆除过程中的安全问题成为研究的重点<sup>[1-2]</sup>。常用的拆除方法有支架法、爆破法、机凿法和吊移法,在大型桥梁拆除中还会采用两种拆除方法相结合的方式<sup>[3]</sup>。支架法适用于桥梁建筑高度较低且桥下地基较好的情况;爆破法适用于陆地桥梁且周围建筑稀疏、桥下清渣方便的情况<sup>[4]</sup>;机凿法适用于桥梁建筑高度较低,桥梁跨度小、桥下作业空间大的情况;吊移法适用于有通航要求,桥址周围作用空间有限的情况<sup>[5-11]</sup>。在拱桥拆除中最常使用的拆除方法为爆破法和浮吊法,其次为汽车吊移法;拱桥拆除中最多的是钢筋混凝土拱桥,针对钢管混凝土拱桥的拆除研究较少,特别是水上钢管混凝土拱桥鲜有可借鉴的案例,目前钢管混凝土拱桥拆除中已采用的拆除方法仅为爆破法和浮吊法<sup>[12-14]</sup>。综上所述,对于钢筋混凝土拱桥的拆除较为成熟,但对钢管混凝土拱桥拆除鲜有研究,钢管混凝土拱桥为组合式桥梁,其内部受力更为复杂。

本文以鉴湖大桥拆除工程为依托,对多跨连续钢管混凝土拱桥拆除关键技术进行研究,通过比选确定适用于该桥的拆除方案,分析各施工阶段的受力特性,对拆除中位移和应力的最不利阶段的理论值和监控实测值进行对比分析,并研究材料强度和温度对结构位移和应力的影响。

## 1 拱桥拆除方案比选

### 1.1 工程概况

鉴湖大桥于1999年建成通车,下设六级航道通航,跨径布置:(20+40+60+40+20)m,全长304.86m。上部结构采用五跨连续预应力混凝土三室箱梁,箱梁全宽27m,底宽17m,梁高2.05m,悬臂5m,箱梁和拱肋内部均采用C40混凝土;吊杆设置为双吊杆构造,全桥共18对吊杆,主桥9对,引桥各5对。主桥下部结构为钢筋混凝土承台,采用C30混凝土浇筑。桥型布置如图1所示。

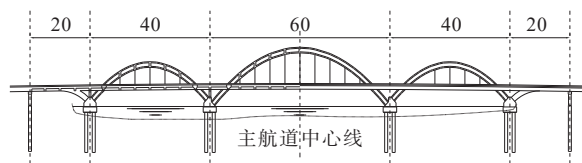
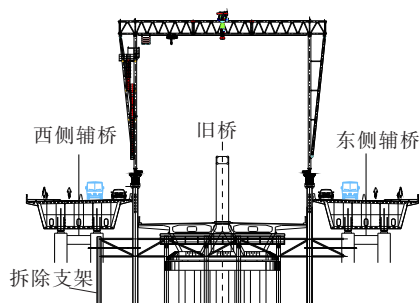


图1 桥型布置图(单位:m)

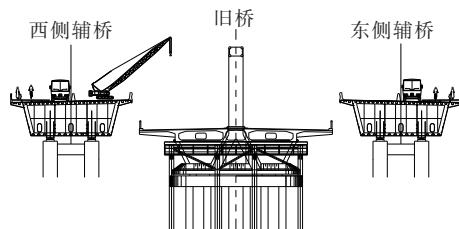
Figure 1 Bridge layout(unit:m)

### 1.2 拆除方案比选

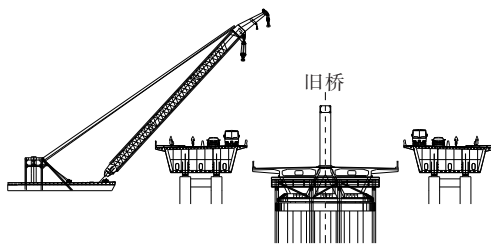
结合现有拆除方法和本桥拆除难点,提出3种拆除方案:方案1:钢栈桥龙门吊法;方案2:钢栈桥履带吊法;方案3:浮吊法,如图2所示。从技术可行性、工期、经济3方面对3种方案进行对比分析,其中工期仅进行大概估算,费用主要对机械费进行估算,对比情况见表1。



(a) 方案1:钢栈桥龙门吊法



(b) 方案2:钢栈桥履带吊法



(c) 方案3:浮吊法

图2 拆除方案

Figure 2 Demolition scheme

由表1可知:方案1在满足技术可行性及工期的条件下,经济性最高;方案2不满足技术可行性;方案3满足技术可行性及工期,但经济性最低。因此,通

表 1 方案对比  
Table 1 Scheme comparison

施工方案	工期	技术特点	经济特点	单价费用
钢栈桥龙门吊吊装施工方案	辅桥施工 180 d,旧桥拆除 110 d,新桥施工 170 d,共计 460 d	龙门吊在轨道上行走,主梁两端具有外伸悬臂梁。门式起重机具有作业范围大、适应面广、通用性强等特点操作灵活	租赁费用高,一次性采购成本较低,设备可重复利用。维护费用低,使用成本低	单台 85 t 设备成本 50 万元左右,安装成本 8 万元左右,一次性投入成本约 $4 \times 50 + 8 \times 4 = 232$ 万元。栈桥费用 320 万元。合计 552 万元
钢栈桥履带吊吊装施工方案	辅桥施工 200 d,旧桥拆除 100 d,新桥施工 170 d,共计 470 d	履带吊自身重量大,对栈桥作业平台支撑能力要求高,拆除作业时单侧辅桥局部承载力过大	租赁成本和一次性采购成本较高	单台 260 t、300 t 履带租赁 15 万元/月、18 万元/月,成本 $15 \times 2.5 \times 2 + 18 \times 5.5 = 174$ 万元,栈桥费用 450 万元,征地 24 万。合计 624 万元
浮吊吊装施工方案	辅桥施工 130 d,旧桥拆除 90 d,新桥施工 180 d,共计 400 d	浮吊在作业时必须伴有专业船舶配套使用,设锚固系统。移动较不灵活,需要占用通航航道	设备进出场费用高,租赁费高。桥梁净高 4.68 m 不能通过,通过上下游需要拆卸拼装时间	120 t、600 t 浮吊租赁费用 48 万元/月、98 万元/月,进出场费用 15 万元,成本 $48 \times 2.5 \times 2 + 98 \times 5.5 + 15 = 794$ 万元。征地 15 万元。综合成本 809 万元

过对技术可行性、工期及经济性对比,最后选用方案 1:钢栈桥龙门吊法。

2 拱桥拆除步骤

2.1 总体拆除顺序

总体拆除遵循以下原则:① 自上而下,采用逆向工序法进行鉴湖大桥拆除;② 安全第一、有序施工、化整为零。由于龙门架基础支架搭设空间有限,提出先切割翼缘增加施工作业空间,翼缘切割后两侧可分别增加约 4 m 的作业空间。总体拆除思路为:搭设水中拆除支架→拆除桥面系和翼缘板→接长龙门吊基础支架→搭设拱肋拆除支架→拆除吊杆→拆除拱肋→拆除梁体→拆除下部结构→清理现场完成拆除工作。

2.2 拆除关键技术

(1) 搭设水中拆除支架

水中拆除支架选用直径 630 mm、壁厚 10 mm 的无损伤螺旋管,采用钓鱼法纵向从桥梁两侧向跨中进行钢管桩插打,单排钢管桩打设完成后,进行管桩横向连接,横向连接采用  $\phi 219 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  钢管按 Z 字形将拆桥管桩连成整体;再采用小型浮船从桥底通过焊接于钢管上的爬梯,搭设操作平台;平台搭设完成后,沿既有鉴湖大桥梁底往下 52 cm 位置作为标高割除多余钢管桩,架设 I40b 四拼工字钢横梁,工字钢底部至梁底预留约 5 cm,采用宽度不小于 60 cm 的

钢板塞紧<sup>[15]</sup>。

(2) 拆除翼缘板

利用既有的横梁作为悬挑梁,其上搭设 I20 工字钢横梁悬挂需要切除的翼板,翼板悬挑架设计示意如图 3 所示。

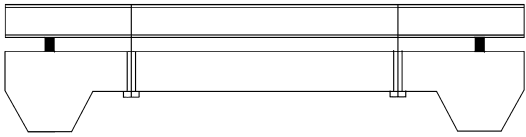


图 3 翼板悬挑架设计示意图

Figure 3 Design of cantilever frame for wing plate

(3) 搭设拱肋拆除支架,拆除吊杆和拱肋

拱肋拆除支架采用 4 根直径为 377 mm 的螺旋焊管组焊成  $200 \text{ cm} \times 300 \text{ cm}$  的钢管支墩,钢管间采用 [14 槽钢设置剪刀撑,同一个拱肋拆除支架之间用 2 根  $\phi 219 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  钢管进行横向连接,顺桥向单个拱肋外侧按  $45^\circ$  支撑于地面锚固钢板上。待拱肋拆除支架搭设完成后,从中跨向边跨对称拆除吊杆和拱肋,吊杆拆除后进行拱肋拆除。

(4) 梁体拆除

主桥梁体的拆除原则为纵向由跨中向边跨方向逐跨拆除,依次切割顶底板、横梁、腹板,各节段划分如图 4 所示,待主跨梁体拆除完后进行边跨梁体拆除。

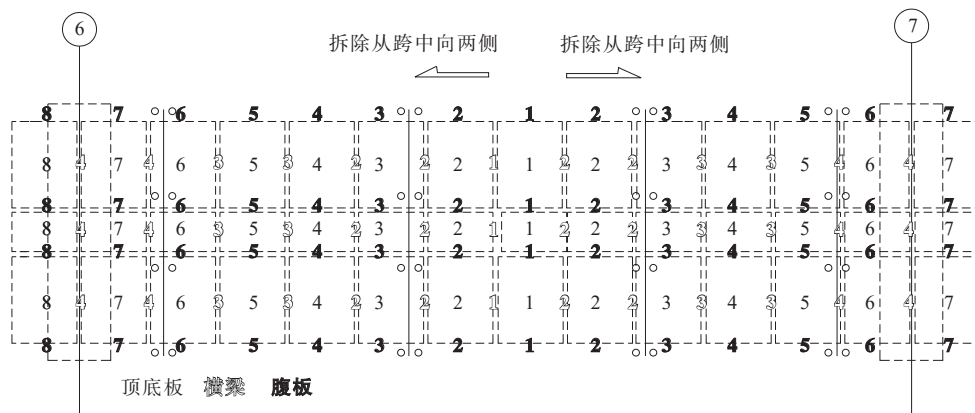


图4 主桥梁体拆除顺序

Figure 4 Demolition sequence of main beam body

### 3 拱桥拆除过程分析

#### 3.1 建立全桥有限元模型

##### (1) 钢管混凝土拱肋模拟

鉴湖大桥进行过一次加固,拱肋顶部钢板凿除后重新胶黏,钢管和混凝土的相互作用较小,因此采用刚度叠加法计算钢管混凝土的刚度。刚度叠加法是将钢管混凝土看作一个组合结构,不考虑材料间的相互作用,各自计算材料截面特性,最后进行叠加的方法<sup>[16]</sup>。在有限元模型中采用联合截面的形式模拟,拱肋选择梁单元建立,根据《钢管混凝土结构技术规程》(CECS 28—2012)<sup>[17]</sup>,刚度换算公式为:

$$EI = E_s I_s + E_c I_c \quad (1)$$

式中: $I$ 为换算后截面惯性矩; $I_c$ 为混凝土截面惯性矩; $I_s$ 为钢管截面惯性矩; $E$ 为换算后弹性模量; $E_c$ 为混凝土弹性模量; $E_s$ 为钢管弹性模量。

##### (2) 荷载取值

自重:素混凝土重度为  $25 \text{ kN/m}^3$ ,钢筋混凝土重度为  $26.5 \text{ kN/m}^3$ ;二期恒载(包括桥面铺装、护栏)取值为  $100 \text{ kN/m}$ ;混凝土收缩徐变:拱桥已建成20年,拆除前混凝土收缩、徐变已基本稳定,则可不考虑;吊杆张拉力按加固图纸进行取值;温度荷载取每个阶段施工前的实测值。

预应力荷载:在梁体拆除之前,按照设计图纸进行预应力钢筋的布置和张拉,梁体开始拆除后,为计算更准确,文献[18]中提出被切断的预应力钢筋的残余预应力值可按照先张法预应力筋的传递长度计算。参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)<sup>[19]</sup>中表6.1.8选取预应力

钢筋的预应力传递长度  $l_{tr}$ ,采用静力切割的预应力筋属于骤然释放预应力,传递长度  $l_{tr}$ 的起点应从距构件末端  $0.25l_{tr}$ 开始计算,则  $l_{tr} = 100d$ 。

##### (3) 边界模拟

拱肋临时拆除支架在相应节点处采用一般支撑仅竖向约束的方式来简化模拟;桥墩和水中拆除支架底部采用固结形式;桥梁两端采用铰接形式;拱肋和吊杆、墩柱和主梁均采用共节点方式;翼缘和主梁、吊杆和主梁均采用刚性连接模拟。

左右两侧龙门吊基础支架与水中支架相连,模型中通过对各连接节点处施加外力来考虑施工过程中龙门吊基础支架对水中支架的影响,该外力是通过单独建立龙门吊基础支架模型来提取,由于篇幅有限,不对龙门吊的建模分析过程进行描述。钢管混凝土拱桥全桥模型如图5所示。

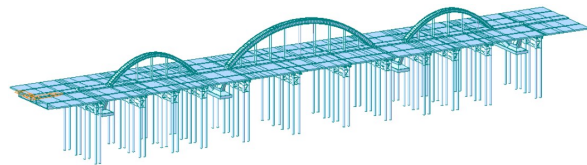


图5 钢管混凝土拱桥全桥模型

Figure 5 Full bridge model of arch bridges with concrete-filled steel tubes

##### (4) 施工阶段划分

有限元模型中,每拆除一个阶段通过钝化相应的单元来模拟,模型中具体的施工阶段划分见表2。

#### 3.2 拱桥拆除过程静力分析

##### (1) 位移变化

CS1~CS39拆除阶段单拱肋钢管混凝土拱桥的



最大位移变化如图 6 所示。

表 2 施工阶段工序划分

Table 2 Tasks at each construction stage

施工序号	施工阶段内容
CS1	成桥
CS2	切割翼缘、桥面系
CS3~CS7	对称切割主跨吊杆 1~5
CS8~CS10	对称切割边跨吊杆 1~3
CS11~CS15	对称切割主跨、边跨拱肋
CS16~CS23	对称切割主跨顶底板 1~8
CS23~CS27	对称切割主跨横梁 1~4
CS28~CS35	对称切割主跨腹板 1~8
CS36~CS39	对称切割边跨 1~4

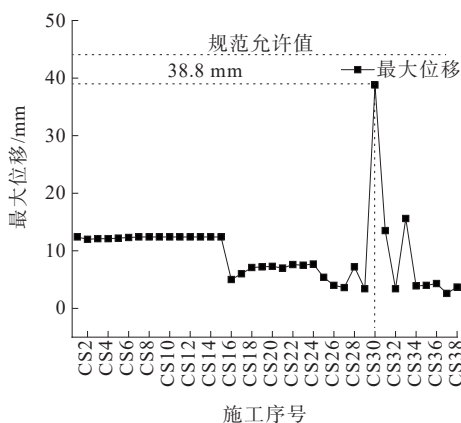


图 6 位移变化

Figure 6 Changes in displacement

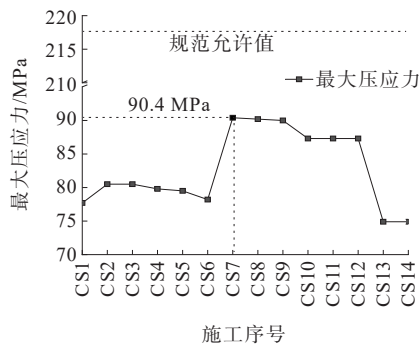
由图 6 可知:吊杆和拱肋切割后最大位移值减小;主跨腹板拆除阶段(CS28~CS35)的最大位移值波动较大,其原因是跨中腹板切割后,梁体变为悬臂节段,临时支撑对梁体的位移约束有限,悬臂段越长对应的位移值越大,CS30 阶段达到悬臂长度最大值 13 m,其对应的最大位移为 38.8 mm。CS30 工序以后位移值相对较小,且施工控制中以应力控制为主,位移为辅。

## (2) 应力变化

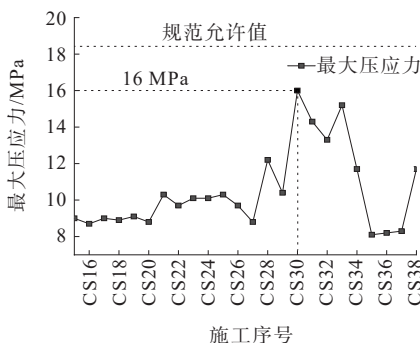
CS1~CS39 拆除阶段单拱肋钢管混凝土拱桥的截面最大应力变化如图 7 所示。

由图 7 可知:主跨吊杆切割后桥墩产生不平衡力,最大压应力增加了 10 MPa,达到最大值 90.4 MPa;吊杆和拱肋切割后,梁体重量由水中临时支架支撑,最大压应力减少;主跨腹板拆除阶段(CS28~CS35)的最大压应力值波动较大,悬臂段越长对应的压应力

越大,CS30 阶段对应的最大压应力值为 16 MPa。C40 混凝土的抗压强度为 18.4 MPa,钢材的抗压强度为 215 MPa,拱桥拆除过程中应力均处于安全范围内。



(a) CS1~CS14 拆除



(b) CS15~CS38 拆除

图 7 拆除过程中最大应力值

Figure 7 Maximum stress during demolition

## 3.3 拱桥拆除施工控制方法和内容

### 3.3.1 拱桥拆除施工控制方法

桥梁拆除中常使用的施工控制方法为倒装分析法,该方法是以实际成桥状态作为分析的初始状态,按照与实际施工相反的顺序进行结构分析,原理与桥梁拆除一致<sup>[20-21]</sup>。倒装分析法无法考虑混凝土的收缩、徐变问题,在桥梁的拆除过程中混凝土的收缩、徐变基本稳定,可不用考虑,因此采用倒装施工法作为本桥的施工控制方法。

### 3.3.2 拱桥拆除施工控制内容

(1) 线形控制:桥梁拆除中结构线形控制的目的是保证拆桥过程中结构的安全性,即桥梁的变形间接控制应力不超出容许值<sup>[22]</sup>。鉴湖大桥拆除过程中的线形监控位置包括拱肋、主梁及桥墩。由于篇幅有限,仅对主梁线形的测点布置情况进行展示,在每跨的  $L/2$ 、 $L/4$  均处设置测点,如图 8 所示。

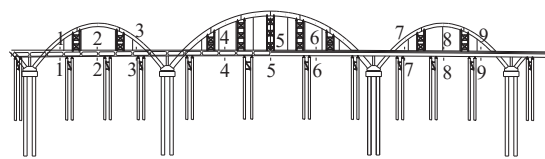


图8 梁体线形测点布置图

Figure 8 Layout of linear measuring points of beam body

(2) 应力控制:桥梁监控中一般以应力控制为主,应力相较于位移来说对结构的影响更大,是施工安全预警的重要依据,拆桥过程中应实时掌握结构的应力值,确保拆除过程的安全性<sup>[22]</sup>。鉴湖大桥在拆除过程中的应力监控位置包括拱肋、主梁及桥墩。主梁应力测点布置与线形测点布置情况相同,由于篇幅有限,仅对桥墩应力的测点布置情况进行展示,桥墩应力测试断面分别布置在距离墩顶、墩底 50 cm 处,单个桥墩共 8 根支撑,共布置 16 个测试截面,墩顶测点布置如图 9 所示。

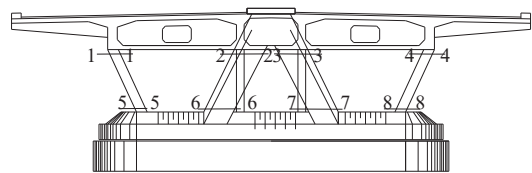


图9 桥顶测点布置图

Figure 9 Layout of measuring points at the top of bridge

3.4 理论值和实测值对比分析

由于篇幅有限,梁体应力和位移、桥墩应力和位移均取最不利阶段 CS30 拆除后进行对比,结果如表 3、4 及图 10 所示。

从表 3、4 及图 10 中可以得到:梁体应力的理论值总体来说较实测值小,最大误差为 0.7 MPa;梁体位移理论值比实测值小,最大误差为 2.7 mm。桥墩的侧柱应力和位移都较大,右侧梁体处于拆除阶段,其应力和位移较左侧大,理论值和实测值最大应力和位移误差分别为 1.2 MPa 和 0.6 mm。应力和位移理论值比实测值小的原因是桥梁在运营 20 年后不可避免出现材料强度降低等问题,而在模型中未考虑这些原因,因此导致桥梁的刚度偏大,理论计算值较实测值偏小。

4 参数敏感性分析

从 3.4 节中可以看出理论值和实测值之间存在

表3 CS30阶段梁体理论值和实测值对比

Table 3 Comparison of theoretical and measured values of beams at CS30 stage

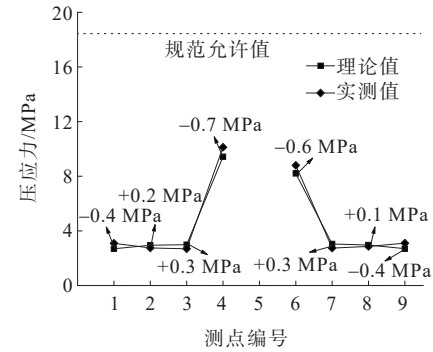
梁体	应力/MPa			下挠值/mm		
	理论值	实测值	差值	理论值	实测值	差值
1	-2.7	-3.1	-0.4	-1.4	-4.1	-2.7
2	-3.0	-2.8	0.2	-2.7	-5.4	-2.7
3	-3.0	-2.7	0.3	-1.6	-4.1	-2.5
4	-9.4	-10.1	-0.7	-19.6	-22.0	-2.4
5	—	—	—	—	—	—
6	-8.2	-8.8	-0.6	-13.4	-16.0	-2.6
7	-3.0	-2.7	0.3	-1.6	-4.0	-2.4
8	-3.0	-2.9	0.1	-2.7	-5.3	-2.6
9	-2.7	-3.1	-0.4	-1.4	-3.9	-2.5

表4 CS30阶段桥墩理论值和实测值对比

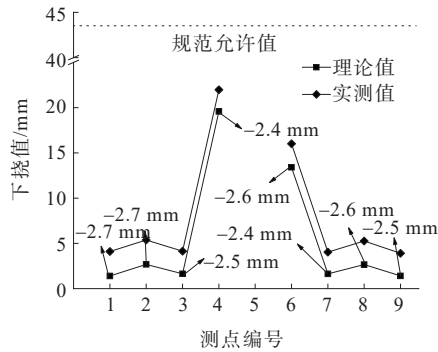
Table 4 Comparison of theoretical and measured values of bridge piers at CS30 stage

桥墩	应力/MPa			横向位移/mm		
	理论值	实测值	差值	理论值	实测值	差值
1	-0.80	-1.00	-0.20	0.0	0.0	0.0
2	-0.80	-0.90	-0.10	0.0	0.0	0.0
3	-5.30	-6.10	-0.80	-2.9	-3.4	-0.5
4	-5.30	-6.10	-0.80	-2.9	-3.4	-0.5
5	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
6	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0
7	-1.88	-2.78	-0.90	-2.0	-2.6	-0.6
8	-1.88	-2.78	-0.90	-2.0	-2.6	-0.6
9	-0.10	-0.10	0.00	—	—	—
10	-0.10	-0.10	0.00	—	—	—
11	-10.60	-11.80	-1.20	—	—	—
12	-10.60	-11.80	-1.20	—	—	—
13	-0.10	-0.10	0.00	—	—	—
14	-0.10	-0.10	0.00	—	—	—
15	-16.00	-17.10	-1.10	—	—	—
16	-16.00	-17.10	-1.10	—	—	—

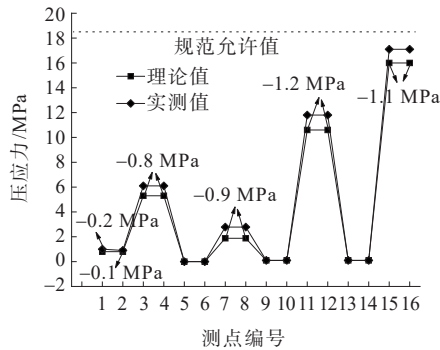
误差,引起误差的原因可能是材料强度降低、温度变化等,目前并没有规范明确规定其取值范围。因此,采用有限元模型对材料强度、温度进行敏感性分析,确定各个因素对结构应力和位移的影响性大小。



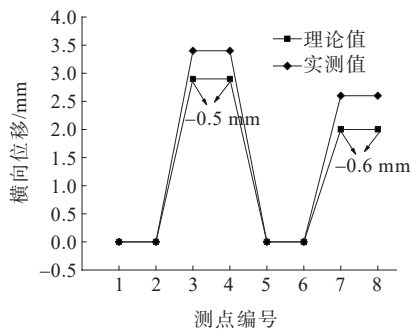
(a) 梁体 CS30 阶段应力对比



(b) 梁体 CS30 阶段下挠值对比



(c) 桥墩 CS30 阶段应力对比



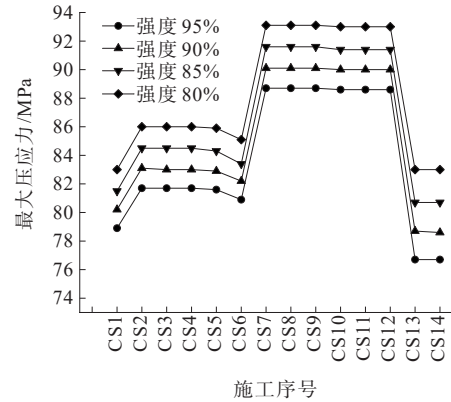
(d) 桥墩 CS30 阶段横向位移对比

图 10 关键拆除阶段理论值和实测值对比

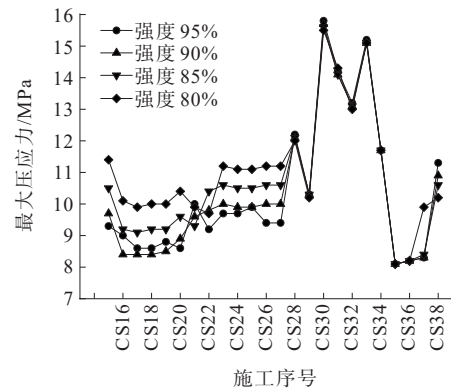
Figure 10 Comparison of theoretical and measured values at key demolition stages

#### 4.1 材料强度的影响

鉴湖大桥结构内部的材料强度已降低,目前规范中未明确材料强度的折减系数,有学者<sup>[9]</sup>提出在旧桥拆除模型中可将材料强度降低 20% 来模拟。为研究材料强度降低对桥梁结构应力和位移的敏感性,分别将混凝土和钢筋的材料强度降低 5%、10%、15%、20%,最大压应力和位移曲线如图 11、12 所示。



(a) CS1~CS14 阶段最大压应力对比



(b) CS15~CS38 阶段最大压应力对比

图 11 材料强度对结构最大压应力的影响

Figure 11 Influence of material strength on maximum compressive stress of structure

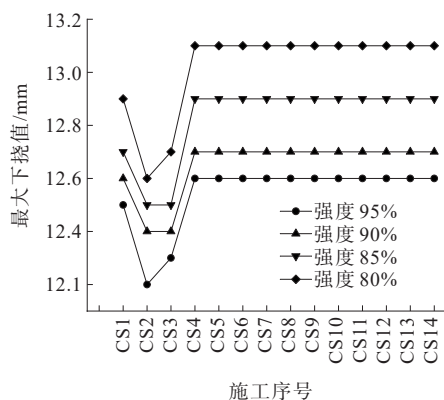
由图 11、12 可知:材料强度的变化不影响结构的受力规律,拆除过程中压应力最不利阶段为仍 CS7,位移最不利阶段仍为 CS30;材料强度与结构压应力、位移成反比,材料强度每下降 5%,拱肋最大压应力增加 1.5 MPa,梁体最大压应力增加 0.6 MPa,结构最大下挠值增加 2.4 mm。

#### 4.2 温度的影响

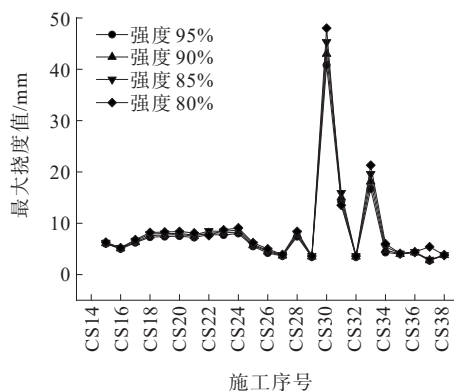
研究表明温度对钢管混凝土拱桥的应力和位移有影响<sup>[23-25]</sup>。模型中的温度为该阶段施工前测定,但

是一个拆除阶段的时间较长,日照温度在不断变化,查阅施工月份当地最低温度和最高温度资料,取温

度为 15℃、20℃、25℃、30℃进行研究,最大应力和位移曲线如图 13、14 所示。



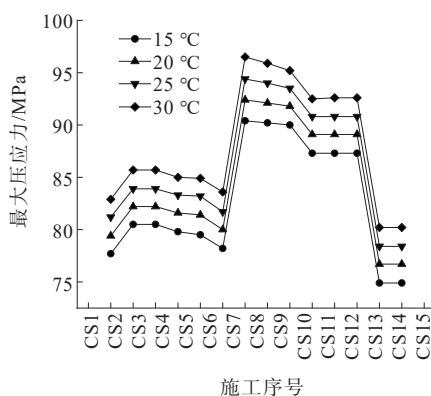
(a) CS1~CS14阶段最大下挠值对比



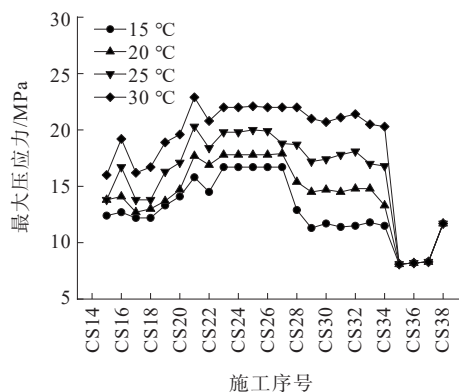
(b) CS15~CS38阶段最大下挠值对比

图 12 材料强度对结构最大下挠值的影响

Figure 12 Influence of material strength on maximum deflection of structure



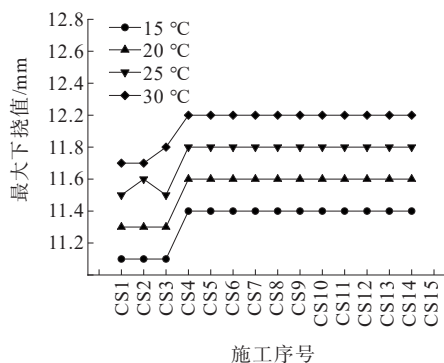
(a) CS1~CS14阶段最大压应力对比



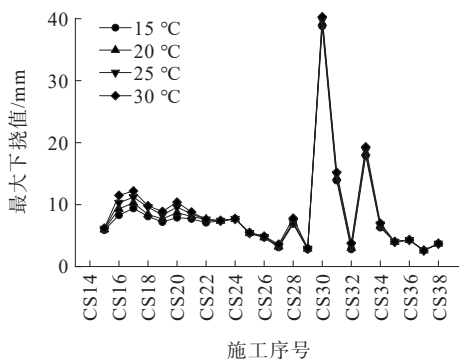
(b) CS15~CS38阶段最大压应力对比

图 13 温度对结构最大压应力的影响

Figure 13 Influence of temperature on maximum compressive stress of structure



(a) CS1~CS14阶段最大下挠值对比



(b) CS15~CS38阶段最大下挠值对比

图 14 温度对结构最大下挠值的影响

Figure 14 Influence of temperature on maximum deflection of structure

由图 13、14 可知:温度的改变不影响结构的受力规律,CS7 为拆除过程中压应力最不利阶段,CS30 为

位移最不利阶段;温度与结构压应力、位移成正比;温度每增加 5℃,拱肋最大压应力增加 2 MPa,梁体最大



压应力增加 2.5 MPa,结构最大下挠值增加 0.5 mm。

综上所述,对结构应力的敏感性:温度大于材料强度;对结构位移的敏感性:材料强度大于温度。材料强度相同情况下:拱肋应力更敏感;温度相同情况下:梁体应力更敏感。二者在分析时均不能忽略,在有条件情况下可对结构材料进行现场强度试验;偏安全考虑,温度可取该拆除阶段中的最高温度。

## 5 结 论

通过对多跨连续钢管混凝土拱桥拆除关键技术的研究,可以得到以下主要结论:

(1) 对有通航要求、施工作业空间有限的待拆桥梁,钢栈桥龙门吊法更有优势;先切割翼缘的方式不仅可以有效减小梁体自重,还可增加梁体两侧的作业空间。

(2) 主跨吊杆拆除后,桥墩的不平衡力达到最大,压应力达到最大值 90.4 MPa;主跨腹板切割后,梁体处于悬臂节段,悬臂段越长对应的压应力和位移值越大,最不利阶段为 CS30;应力和位移的理论值比实测值偏小,但差值均较小。

(3) 材料强度和温度的变化不影响结构的受力规律,结构应力和位移与材料强度成反比,与温度成正比,二者在分析时均不能忽略。

### 参考文献:

### References:

- [1] ABUDAYYEH O, SAWHNEY A, EL-BIBANY H, et al. Concrete bridge demolition methods and equipment[J]. Journal of Bridge Engineering, 1998, 3(3): 117-125.
- [2] 谭仁兵, 马马, 霍啸苏. 非对称独塔斜拉桥拆除工艺研究[J]. 中外公路, 2020, 40(5): 177-181.  
TAN Renbing, MA Ma, HUO Xiaosu. Research on the dismantling process of asymmetric single-pylon cable-stayed bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(5): 177-181.
- [3] 肖列. 城市核心地段高架桥静力切割拆除技术的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.  
XIAO Lie. Research on the application of static cutting and demolition technology for viaducts in the core area of the city[D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [4] 李琦, 杜斌, 刘奇, 等. 大跨度桁式组合拱桥拆除施工可行性分析[J]. 中外公路, 2022, 42(6): 142-145.
- LI Qi, DU Bin, LIU Qi, et al. Feasibility analysis for demolition construction of long-span truss composite arch bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(6): 142-145.
- [5] LUCCIONI B M, AMBROSINI R D, DANESI R F. Analysis of building collapse under blast loads[J]. Engineering Structures, 2004, 26(1): 63-71.
- [6] MOLIN C, LAURITZEN E. Blasting of concrete: Localized cutting in and partial demolition of concrete structures[J]. Recycling Demolished Concrete and Masonry, 1992: 257-301, 111.
- [7] 管伯伦. 爆破工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.  
GUAN Bolun. Blasting Engineering[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1993.
- [8] 钟冬望, 廖乃正, 马建军, 等. 建筑工程中地下构筑物综合拆除技术[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2000, 23(3): 278-280.  
ZHONG Dongwang, LIAO Naizheng, MA Jianjun, et al. Comprehensive demolition technology of underground structures in construction engineering[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2000, 23(3): 278-280.
- [9] 赵涵. 大跨度预应力混凝土桁式组合拱桥拆除技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.  
ZHAO Han. Research on demolition technology of long-span prestressed concrete truss composite arch bridge[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [10] 石成. 钢筋混凝土连拱上部结构拆除施工与控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.  
SHI Cheng. Reinforced concrete multi-arch superstructure demolition construction and control[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [11] 唐成斌. 大跨度钢拱桥的拆除与控制[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.  
TANG Chengbin. Demolition and control of long-span steel arch bridges[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2004.
- [12] 岳忠文, 黄翔. 钢管混凝土系杆拱桥临时系杆法拆除技术[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(1): 143-145, 147.  
YUE Zhongwen, HUANG Xiang. Demolition technology of temporary tie rod method for CFST tied arch bridge[J]. Heilongjiang Transportation Science and Technology, 2020, 43(1): 143-145, 147.
- [13] 王君刚. 钢管+钢筋混凝土混合结构拱桥爆破拆除关键

- 技术研究[D].泉州:华侨大学,2016.
- WANG Jungang. Research on key technologies of blasting demolition of steel pipe and reinforced concrete hybrid arch bridge[D]. Quanzhou:Huaqiao University,2016.
- [14] 马少军,陈慧斌,柴文东,等.连续薄壁箱形肋拱桥控制爆破拆除研究与分析[J].中外公路,2023,43(1):130-134.
- MA Shaojun, CHEN Huibin, CHAI Wendong, et al. Research and analysis on controlled blasting demolition of continuous thin-walled box ribbed arch bridge[J]. Journal of China & Foreign Highway,2023,43(1):130-134.
- [15] 王新明.浅谈柔性系杆拱桥拆除施工技术[J].四川水泥,2019(12):147.
- WANG Xinming. Talking about the construction technology of flexible tied arch bridge demolition[J]. Sichuan Cement,2019(12):147.
- [16] 仲世琦.大跨度钢筋混凝土系杆拱桥施工监控与关键技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.
- ZHONG Shiqi. Research on construction monitoring and key technologies of long-span reinforced concrete tied arch bridges[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [17] 哈尔滨工业大学,中国建筑科学研究院.钢管混凝土结构技术规程:CECS 28—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.
- Harbin Institute of Technology, China Academy of Building Research. Technical specifications for concrete-filled steel tube structures: CECS 28—2012[S]. Beijing: China Planning Press,2012.
- [18] 张治成,胡开建,李强,等.旧桥拆除中的预应力筋放张效果探讨[J].华东公路,2012(3):68-71.
- ZHANG Zhicheng, HU Kaijian, LI Qiang, et al. Discussion on the effect of prestressed tendons in the demolition of old bridges[J]. East China Highway,2012(3):68-71.
- [19] 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.
- CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. Specifications for design highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG 3362—2018[S]. Beijing:China Communications Press Co.,Ltd.,2018.
- [20] 郭圣栋,林继乔,张敏,等.预应力混凝土连续梁桥“恒载零挠度设计”新理念[C]//全国既有桥梁加固、改造与评价学术会议论文集.南京,2008.
- GUO Shengdong, LIN Jiqiao, ZHANG min, et al. New concept of “Dead-load Zero Deflection Design” for prestressed concrete continuous girder bridges[C]// Proceedings of the National Academic Conference on Reinforcement, Reconstruction and Evaluation of Existing Bridges. Nanjing, 2008.
- [21] 余志武,谈遂.预应力混凝土桥梁施工控制结构分析计算方法[J].铁道科学与工程学报,2006,3(6):7-13.
- YU Zhiwu, TAN Sui. Analysis and calculation method of prestressed concrete bridge construction control structure [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3 (6): 7-13.
- [22] 汤旭.混凝土箱梁桥拆除结构受力特性及施工控制研究[D].武汉:湖北工业大学,2021.
- TANG Xu. Research on the mechanical characteristics and construction control of the demolition structure of concrete box girder bridges[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.
- [23] 李自林,寇天旺.钢管混凝土拱桥日照温度应力分析[J].河北水利电力学院学报,2019(1):10-15.
- LI Zilin, KOU Tianwang. Analysis of sunshine temperature stress of CFST arch bridge[J]. Journal of Hebei Institute of Water Conservancy and Electric Power, 2019(1):10-15.
- [24] HUNT B, COOKE N. Thermal calculations for bridge design[J]. Journal of the Structural Division, 1975, 101(9): 1763-1781.
- [25] ELBADRY M M, GHALI A. Temperature variations in concrete bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(10): 2355-2374.