

连续薄壁箱形肋拱桥控制爆破拆除研究与分析

马少军¹, 陈慧斌¹, 柴文东², 张春权¹, 王员³

(1.北京市市政一建设工程有限责任公司,北京市 100083; 2.北京市政建设集团有限责任公司,北京市 100048;
3.四川宇泰特种工程技术有限公司,四川 成都 610000)

摘要:蓬安嘉陵江一桥位于长江支流嘉陵江上,因地震及常年高负荷运转,总体技术状况为“五类”,不能满足设计荷载等级要求。该桥梁是四川省目前拆除的最长公路桥梁,结构类型为多跨连续薄壁箱形肋拱桥,加之存在明显病害,其拆除技术难度高、安全风险大。对于该桥梁的控制爆破拆除,采用了数值模拟、聚能切割爆破、长悬空深孔钻凿等技术手段,安全顺利地完成了拆除工作,其技术经验可为同类桥梁拆除提供借鉴。

关键词:混凝土;拱桥;箱形;爆破;拆除

中图分类号:U445.6

文献标志码:A

在改善交通状况、加强基础设施建设的历史进程中,需要拆除大量的老旧桥梁,而大型桥梁一般置于大江大河之上或城市密集人口区,其拆除工作是面临的一大难题。国内外统计资料表明,采用控制爆破方法拆除桥梁具有高效低耗、安全可靠的显著优点^[1],在实施蓬安嘉陵江大桥拆除时,针对其技术难度,工程技术人员采用数值模拟、聚能切割爆破、长悬空深孔钻凿等方法,最终安全顺利地完成了拆除工作,为同类型桥梁拆除积累了丰富的经验数据。

1 爆破工程基本概况

1.1 桥梁基本情况

蓬安嘉陵江大桥全长626.62 m,主桥结构为7孔净跨80 m连续薄壁箱形肋拱桥。该桥梁2000年正式通车,后因2008年汶川地震及常年高负荷运转,蓬安嘉陵江大桥的总体技术状况评为“五类”,上部主要承重构件的承载能力不能满足设计荷载等级要求,需拆除重建。

蓬安嘉陵江大桥下部结构:基础为直径2 m钻孔桩,每个桥墩下设4根桩,承台为10.5 m(长)×8 m(宽)的钢筋混凝土结构。墩身截面为变截面,3[#]~6[#]

墩身为钢筋混凝土结构,7[#]、8[#]墩身为7.5[#]砂浆砌块石,2[#]墩为C15片石混凝土浇筑,1[#]墩身采用预制吊装。

蓬安嘉陵江大桥上部结构:主桥跨径为80 m,矢跨比1/6;主拱圈为双肋结构,全宽8.8 m;而每肋由两片单室单箱组成,每肋宽2.4 m;单跨两肋之间由11根4 m长横系梁连接。

1.2 施工要求

蓬安嘉陵江大桥位于嘉陵江航道之上,该水域通航标准为Ⅳ级航道,因此其爆破必须考虑后期打捞等相关问题,设计要求如下:

(1) 爆破后的块件最大重量控制在5 t以内,以满足打捞技术要求及工期要求。

(2) 有效控制爆破涌浪,避免对上下游护堤、湿地公园、古建筑的损伤。

(3) 周边100 m处存在民房,爆破有害效应必须有效控制。

1.3 拆除工作难点

蓬安嘉陵江大桥爆破拆除周边环境较好,根据其结构特点设计的爆破方案将对拱上立柱、主拱肋、承台及桩基实施爆破,其施工工艺复杂、安全管控要求高。主要难点如下:

(1) 爆破施工作业点位于桥面以下,施工人员上下穿插存在高空坠落的风险。

收稿日期:2022-06-08(修改稿)

基金项目:北京市政建设集团有限责任公司项目(编号:2019-27)

作者简介:马少军,男,大学本科,高级工程师.E-mail:603761070@qq.com

(2) 各部位爆破方式不一样,拱上立柱采用浅孔爆破、主拱肋采用聚能切割爆破、承台采用间隔装药爆破、桩基采用深孔爆破,施工工艺极其复杂。

(3) 桩基外侧保留钢护筒,爆破难度极大,但其爆破效果将决定整个桥梁是否按照预定设计倒塌,爆破设计时必须充分考虑。

(4) 施工时需要进行钻凿深孔,但机械施工平台无法到达施工部位,对施工工艺要求高。

(5) 针对主拱肋的聚能切割爆破,涉及的冲击波安全隐患大,必须予以控制以确保周边受保护建筑物的安全。

2 拆除方案

2.1 桥梁受力数值模拟

蓬安嘉陵江大桥根据其结构特点和拆除要求,全桥必须一次性爆破拆除且块件最大重量不大于5 t。而爆破点位的施工会造成固有结构的破坏,为了确保施工期间桥梁不发生未爆先塌的情况,对桥梁受力结构进行数值分析,选取非应力集中点作为爆破部位。桥梁应力情况如图1所示。

2.2 爆破设计总体方案

该桥梁中间未设置制动墩,因此必须采用一次性爆破拆除的方式进行,结合桥梁受力分析图,分别采用聚能切割爆破、深孔爆破和浅孔爆破相结合的方式对桥梁进行一次性爆破拆除,设计总体思路如下:

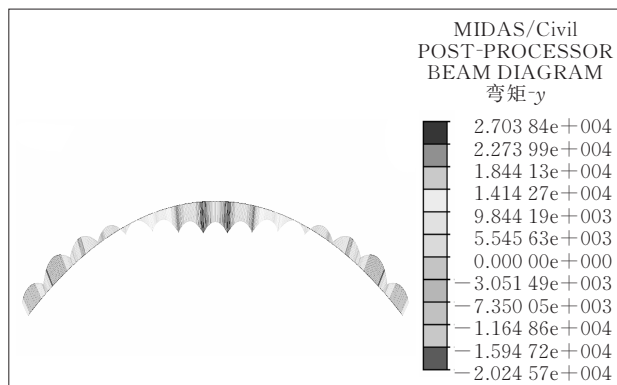
(1) 全桥采用孔内延时一次性完成桥梁上下部结构拆除,遵循多打孔、少装药的基本原则,确保安全影响在设计及标准规范要求的范围内。

(2) 上部桥面板为了保证拆除时整个桥梁的稳定性,采用浅孔爆破实施,将桥面板爆破成3~5段。

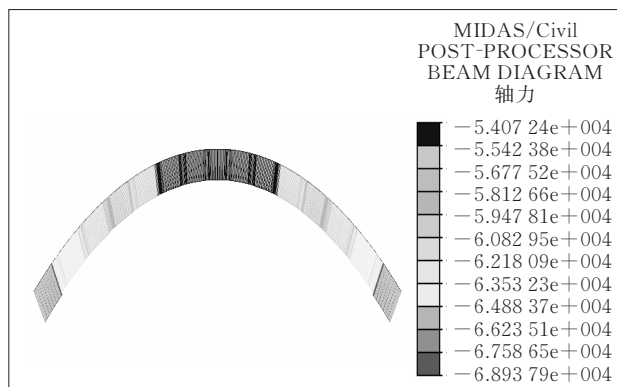
(3) 墩柱采用预处理加浅孔爆破方式进行,爆破底部3 m并预处理上部结构,确保块件重量控制在设计要求范围内。

(4) 主拱肋采用聚能切割爆破加浅孔爆破方式进行,爆破后每个主拱肋分为18段,单段重量不超过3 t。

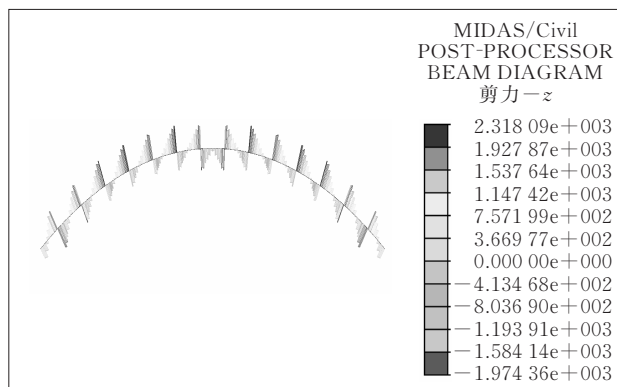
(5) 墩台、承台及桩基采用深孔爆破方式,在结构分界线处采取间隔装药,达到药量分段设计、分段填装,确保各结构体均达到预计爆破效果。因桩基深孔位置需穿过主拱肋,因此在拱肋根部位置开设天窗,从受力分析可知根部非应力集中点,其拱肋混



(a) 弯矩(单位:kN·m)



(b) 轴力(单位:kN)



(c) 剪力(单位:kN)

图1 主拱肋受力图

凝土凿窗及钢筋切割等施工不会造成桥梁应力集中而倒塌^[2]。

该桥梁爆破的部位如图2所示。

2.3 施工流程

蓬安嘉陵江大桥本身承载力无法达到设计要求,爆破预处理及钻孔施工对桥梁结构将产生一定的损伤,因此该桥梁的施工流程非常重要,必须避免桥梁承载力下降时桥梁结构承受冲击力对桥梁产生不利影响^[3],以免发生未爆先塌的安全隐患。施工流程如图3所示。

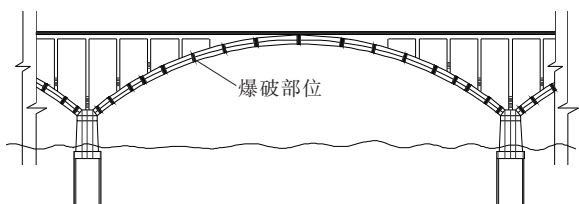


图2 桥梁爆破部位示意图

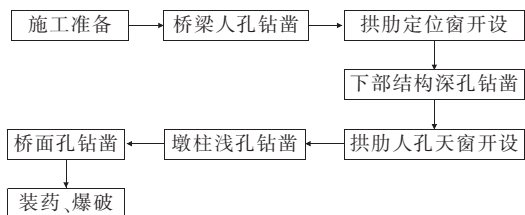


图3 桥梁爆破施工流程图

3 爆破参数设计

3.1 桥面板爆破参数设计

考虑到桥面板尺寸较长,为达到爆破块度要求,对桥面板采取浅孔爆破,将桥面板拆为5段,考虑到桥面板尺寸较长,为达到爆破块度要求,对桥面板采取浅孔爆破,将桥面板拆为5段,根据桥面板结构参数,桥面板厚度30 cm,长度1 300 cm,宽度100 cm,采用 $\phi 42$ mm孔径,打设4排炮孔,排间距分别为250 cm、300 cm,同一排炮孔竖向间距为25 cm,钻孔深度20 cm,爆破单耗取 $1\,200\text{ g/m}^3$,利用速凝水泥进行堵孔。桥面板爆破设计如图4所示。

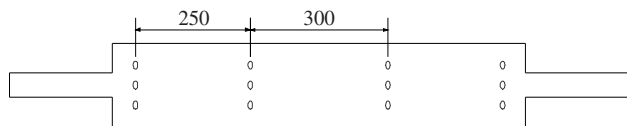


图4 桥面板爆破参数设计图(单位:mm)

3.2 拱上立柱爆破参数设计

拱上立柱采用水平浅孔实施爆破,孔位于立柱中心线,爆破处理第1~3个立柱,第1、2、3个立柱分别布孔10个、7个、4个。1[#]墩上立柱、2[#]墩上增设立柱以同样形式布孔10个,爆破单耗取 $1\,200\text{ g/m}^3$,采用集中装药方式。拱柱的爆破效果关键取决于预处理,需从上至下剥离箍筋并切断,利于爆破后折断。

3.3 主拱肋爆破参数设计

主拱肋采用的聚能切割药包由自制柔性材料敷设而成,柔性材料为铜制药罩条状,内角度 90° ,药芯为乳化炸药,爆破切割介质呈线形分布(依据拱肋尺寸),该切割药包长度为1.1 m,装药量为500 g/m。

在每一拱肋靠近横隔板处对拱肋上、下底板及外侧腹板进行人工剔槽,剔槽宽度为42 cm,深度为1.5 cm,人工剔槽内安放柔性线形聚能药包,药包外用 $\phi 40$ mm软胶管进行固定,并用泡沫剂将胶管口与混凝土壁再次粘贴固定,在人工剔槽两侧每隔500 mm采用电钻钻孔,打入膨胀螺栓,每隔500 mm用管卡把胶管再一次固定于混凝土上,确保药包安放的稳定性,保证药包的爆炸能量充分作用于需切割的混凝土上;每个柔性线形聚能药包采用双股导爆索进行连接,通过采用分段连接双发延时雷管连接于总起爆网路起爆。拱肋布药截面图如图5所示。

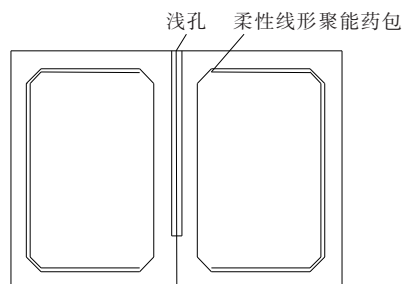


图5 箱体截面上药包布置剖面图

3.4 墩、承台及桩基爆破参数设计

该桥梁下部结构采用总体设置孔位,分段设计、分段装药的模式进行,其爆破孔位布置情况如图6所示。

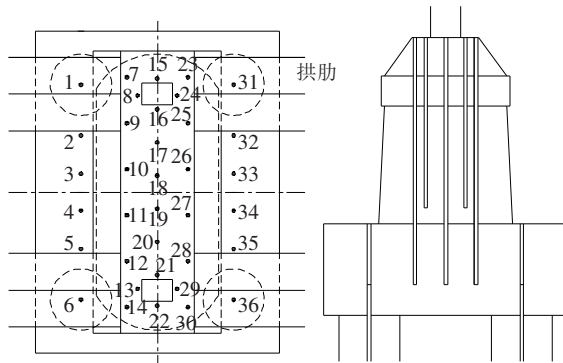


图6 桥墩下部结构孔位布置图

桩基爆破参数设计:综合考虑桩基尺寸、爆破效果及施工可行性等因素,每根桩基仅在截面上圆心位置布孔一个,通过桩基的孔同时也要承担爆破承台的任务,则可初步确定1、6、31、36号孔孔位。桩基的爆破单耗取 $1\,200\text{ g/m}^3$,采用间隔装药,单桩装药量75.40 kg(底部适当加强装药,实际装药量取80 kg)。

承台及墩爆破参数设计:桩基爆破孔位穿过承台,可直接作为承台爆破孔,同时设置2~5、7、9~12、14、23、25~28、30、32~35号孔位。承台单耗取 $1\,200\text{ g/m}^3$ 。不同孔位孔网参数不同,分类进行计算如表1所示。

表1 桥墩爆破参数

孔号	爆破部位	孔深/ m	装药长 度/m	线装药密度/ (kg·m ⁻¹)	填塞长 度/m	总药量/ kg
1、6、31、36	桩基	23.0	20.00	4.00		80.0
	承台		1.25	10.00	1.75	12.5
2、5、32、35	承台	2.4	1.00	12.00	1.40	12.0
3、4、33、34	承台	2.4	0.90	10.00	1.50	9.0
7、14、23、30	承台	8.0	1.10	10.00	4.40	11.0
	墩帽		1.00	2.00	1.50	2.0
8、13、24、29	墩身	6.5	1.00	2.00		2.0
					2.50	
			3.00	1.60		4.8
9~12、25~28	承台	8.0	2.00	5.50		11.0
	墩帽		1.00	3.20	1.00	3.2
	墩身		4.00	2.20		8.8
15、22	承台	8.0	2.00	3.75		7.5
	墩帽		1.00	1.50	1.00	1.5
	墩身		4.00	1.00		4.0
16~21	承台	8.0	2.00	2.75		5.5
	墩身		1.00	2.00	1.00	2.0
	墩帽		4.00	1.40		5.6

3.5 爆破网路设计

针对此次控爆工程的特点,爆破主网路的设计思路为先分段起爆桥梁下部结构,再分段起爆各桥墩,一

次性完成整个桥梁的全部拆除。为了保证整个爆破网路的准爆及最大单段药量不宜过大,采用全桥导爆索网路并进行孔内延时^[4],孔内雷管段位如图7所示。

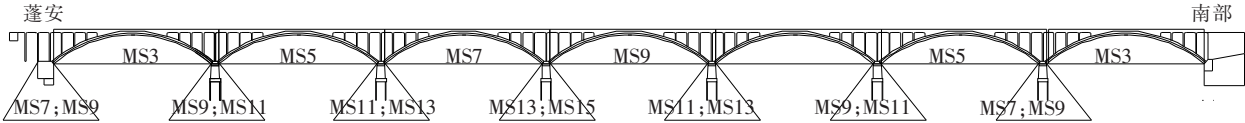


图7 爆破网路设计图

3.6 爆破安全设计

(1) 爆破振动安全校核

由于桥梁上部结构爆破时并没有直接与基岩相触,因此,其产生的结构振动不会直接传递到基岩上,而是要经过与其相连的桥墩通过桥基再传到基础上^[5]。因此,控制爆破振动的重点是单墩的爆破振动,桥梁周边的民用建筑物、加油站振动允许标准控制速度分别为1.5 cm/s、0.5 cm/s。振动安全校核以全桥的最大单段药量进行,采用以下公式:

$$V=K_1K\left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^{\alpha} \tag{1}$$

式中:Q为单响药包重量(kg);R为控制点距爆源中心的距离(m);K、α为与爆破点地质有关的系数,K=150,α=1.8;K₁为拆除爆破折减系数,由于此次爆破所有炮孔均距地面较高,根据以往楼房拆除爆破振动数据分析,该工程取K₁=0.3;V为控制点的地面质点振动速度。

经校核,各建(构)筑物的振动计算值均在安全

允许范围内。

(2) 飞石安全校核

桥梁在无任何防护的情况下进行爆破,采用如下公式进行爆破飞石安全核算:

$$R_F=20K_Fn^2W \tag{2}$$

式中:K_F为安全系数,取1.5;n为最大一个药包的爆破作用指数,该工程采用的抛掷爆破取值1.5;W为最大一个药包的最小抵抗线,为1.5 m。

经计算,此次爆破飞石距离为101.25 m,低于露天区域的警戒范围300 m,安全可靠。但此次爆破为控制爆破,对炮孔以拆除爆破的安全防护标准进行覆盖防护和近体防护,一般可将飞石控制在15 m以内^[6]。

(3) 爆破水中冲击波安全校核

当一次爆破炸药量超过1 000 kg,对人员和施工船舶的水中冲击波安全允许距离,按下式计算:

$$R=K_0\sqrt[3]{Q} \tag{3}$$

式中:R为水中冲击波的最小安全允许距离;Q为一次起爆的炸药量,水下部分炸药量汇总为4 106.5 kg;

K_0 为系数,对水里游泳人的影响,取60。

经计算,该工程水中冲击波的安全允许距离为960.82 m,因此由海事部门对航道上下2 000 m进行管制,禁止人员和船舶进入。

(4) 涌浪安全校核

爆破后桥体瞬间落入水中,会诱发涌浪造成次生灾害。根据能量理论分析,涌浪生成区应出现在原桥上、下游30~50 m范围内,且波长峰值接近桥体宽度的一半,随后逐步衰减^[7]。涌浪平均高度按下式计算:

$$\Delta h = MH / (\rho Sh) \quad (4)$$

式中: Δh 为涌浪平均升起高度(m); M 为落入河中物体质量,计算取值为桥梁上部结构,10 043 t; H 为坍塌体距水面高差,取13.7 m; ρ 为水的密度,取1 t/m³;S为生成涌浪区域面积,按上下游30 m范围内计算得到,取28 920 m²;h为水域平均深度(m),按照经验取最浅处保证安全余量,取4 m(适用于结构体坍塌后全部没入水中的工况)。

经计算,涌浪平均高度 Δh 为1.19 m,对两岸建筑物不会造成影响。

4 施工关键工艺

该项目爆破设计复杂,施工工艺更加复杂,部分施工工艺的处理将决定施工精度,对爆破是否成功起决定性作用。

(1) 桥面板定位孔钻凿工艺

因桥下无设备施工作业空间,将潜孔钻设置在桥面上作业(第一步工序),钻头将通过桥面板开凿的钻孔通道、空气、拱肋、墩体、承台、桩基等抵达预计钻孔位置,路径全长约30 m(悬空长度约15 m)。桥面板和拱肋因结构脆弱、内置钢筋密集等因素无法采用潜孔钻直接成孔,必须采用新工艺进行。

桥面板定位孔首先用全站仪定位桥墩孔位平面相同位置,用取芯钻开凿约30 cm后,先取出上部芯体,再使用风钻直接钻通桥面板剩余约7 cm的混凝土,再将桥面板底部钢筋进行切割,以此形成桥面定位孔。使用该方法开凿的定位孔孔壁光滑,可充分发挥辅助钻孔定位、减少钻孔震动的作用,以确保下部孔位的钻凿精度。

(2) 潜孔钻定位、减震工艺

钻孔悬空路径较长,如不采取措施,钻杆、钻头在如此长的空间旋转摆动幅度很大(50 cm以上),因

而项目部在加工厂订做了钢质的减震套管(内定心环),使用膨胀螺丝固定于孔位处预先开凿的定位槽内,潜孔钻通过减震套管后再钻孔,钻孔摆动幅度大的问题得到了解决。

(3) 桩基爆破预处理工艺

该桥梁每个墩台下有4根桩基,桩基的钢护筒在建设桥梁后没有拆除。如果直接实施爆破,其钢护筒的夹制作用可能导致桩基建渣无法抛出,出现爆而不倒的情况。此次爆破的预处理方法采用潜水员进行水下氧切割方法,切割位置为钢护筒底部与河床连接处,360°平切一圈,同时在桩基横截面与直径相交处两点垂直切割两条线。为保证安全,垂直线上每切割2 m,间隔10 cm,再继续切割,如此往复。

5 爆破效果与总结

蓬安嘉陵江大桥施工时严格按照工序及设计方案进行,施工期间对桥梁变形利用全站仪进行定期观测,未发现明显移位及安全隐患。爆破后,桥梁按设计顺利倒塌,其振动、冲击波和涌浪均低于预期分析和安全允许值,桥梁爆破取得圆满成功。针对类似钢筋混凝土多跨连续薄壁箱形拱桥,其结构脆弱,爆破预处理及钻孔施工对桥梁受力结构有一定的破坏,施工时应严格规划施工工艺,尤其是桥梁结构受到一定破坏时,存在冲击和振动的工序先行实施;同时该桥型拆除时均面临施工机具无法展开等情况,该文的施工方法可为同类工程提供一定的经验支持。

参考文献:

- [1] 刘殿中.工程爆破实用手册[M].北京:冶金工业出版社,1999.
- [2] 胡滨,梁养辉,刘百来,等.公路钢波纹板拱桥受力特征分析[J].中外公路,2020,40(4):120-123.
- [3] 王海峰.控制爆破拆除钢筋混凝土双曲拱桥[J].爆破,2004,21(2):66-67.
- [4] 雷振,李彬,池恩安.钢筋混凝土双曲拱大桥深孔爆破拆除技术[J].爆破,2008,25(3):74-77.
- [5] 洪英维.单拱肋连续梁-拱组合桥结构设计研究[J].中外公路,2020,40(1):65-69.
- [6] 单成林,马兴键.空腹式石拱桥主拱圈的3种增大截面法加固效果分析[J].中外公路,2019,39(5):156-160.
- [7] 陈峰,周敦,安风明,等.地震作用下群桩体系桥梁连续倒塌模拟研究[J].中外公路,2019,39(2):113-120.