

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.016

## 紧邻既有桥梁的大型钢筋混凝土拱桥爆破拆除

王璞<sup>1</sup>,周卫华<sup>2</sup>,欧阳光<sup>1</sup>,宋志伟<sup>1</sup>,唐小再<sup>1</sup>

(1. 浙江省高能爆破工程有限公司,杭州 310030;2. 浙江省公安厅治安监督管理总队,杭州 310009)

**摘要:** 待拆除的桥梁为大型钢筋混凝土拱桥,全长为346 m,桥面宽24 m,与紧邻既有桥梁水平间距为0.5 m。为确保紧邻既有桥梁顺利的爆破拆除,采用原地缓冲塌落控制爆破技术来确保紧邻既有桥梁安全。桥梁选取的爆破部位是桥墩、拱腿、斜撑、拱顶,由于尺寸不一,在桥墩处采用深孔爆破,在拱腿、斜撑及拱顶采用浅孔爆破。根据爆破部位的尺寸材料采用不同的爆破参数,来控制爆破有害效应。通过逐跨延时爆破网路,减小一次塌落块体质量,有效的降低了塌落振动强度。应用塌落振动公式和测振仪,来验证爆破振动强度值在安全允许范围内。采用竹排和轮胎的防护方案,有效降低了飞石距离,确保了紧邻既有桥梁的安全。

**关键词:** 紧邻既有桥梁;爆破拆除;控制爆破;塌落振动

中图分类号: TU746.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)01-0112-06

## Explosive Demolition of Large Reinforced Concrete Arch Bridge Adjacent to Existing Bridges

WANG Pu<sup>1</sup>, ZHOU Wei-hua<sup>2</sup>, OUYANG Guang<sup>1</sup>, SONG Zhi-wei<sup>1</sup>, TANG Xiao-zai<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Gaoneng Corporation of Blasting Engineering, Hangzhou 310030, China;  
2. Public Security Supervision and Management Corps of Zhejiang Provincial Public Security Department, Hangzhou 310009, China)

**Abstract:** A large-scale reinforced concrete arch bridge is to be demolished, which is 346 m long and 24m wide. There is an adjacent bridge with a horizontal distance of 0.5m from the arch bridge. In order to ensure smooth demolition of existing bridges and the safety of the adjacent bridges, in-situ buffer collapse control blasting technology was adopted. The blasting parts are the piers, arches, struts and vaults of the bridge. Due to the different sizes of these parts, deep hole blasting is used at the piers, and shallow hole blasting is used at the arches, braces and vaults. Besides, in order to control the blasting effect, different blasting parameters were designed according to the sizes of different parts. By delaying the blasting network on a span-by-span basis, the mass of the collapsed block is reduced, and the strength of the collapse vibration is effectively reduced. The verification by the collapse vibration formula and vibrometer shows that the blasting vibration level is within the safe allowable range. Meanwhile, the protection scheme of bamboo rafts and tires can effectively reduce the flying stone distance and ensure the safety of adjacent bridges.

**Key words:** adjacent to existing bridge; explosive demolition; controlled blasting; collapse vibration

# 1 工程概况

## 1.1 工程环境

待拆除桥梁为大型钢筋混凝土拱桥,位于衢州市柯城区,横跨衢江,全长为346 m,桥面宽24 m。紧邻既有桥梁的主桥墩与拆除桥面水平距离仅0.5 m,桥面与拆除桥桥面的高差为2.7 m,紧邻既有桥梁与拆除桥上部结构的最小建筑净距1.1 m,与拆除桥梁拱片水平距离约1.9 m,拆除桥桥墩端部伸入既有桥面内部约2 m。紧邻既有桥梁上部桥

体钢箱中有多种跨江管道:北侧自来水管距拆除桥桥面垂直距离1.36 m,水平距离8.65 m;南侧天然气管道距拆除桥桥面垂直距离约1.6 m,水平距离4.45 m;南侧自来水管距拆除桥桥面垂直距离1.36 m,水平距离8.65 m。桥西南侧距施工用变压器60 m、工程项目部办公楼80 m、公园100 m;桥东北侧江边花园雕塑为71 m、距离本工程施工用变压器64 m,桥东南距桥边项目部临时用房50 m。桥梁爆破的周边环境极其复杂。桥梁相对位置示意图如图1所示。

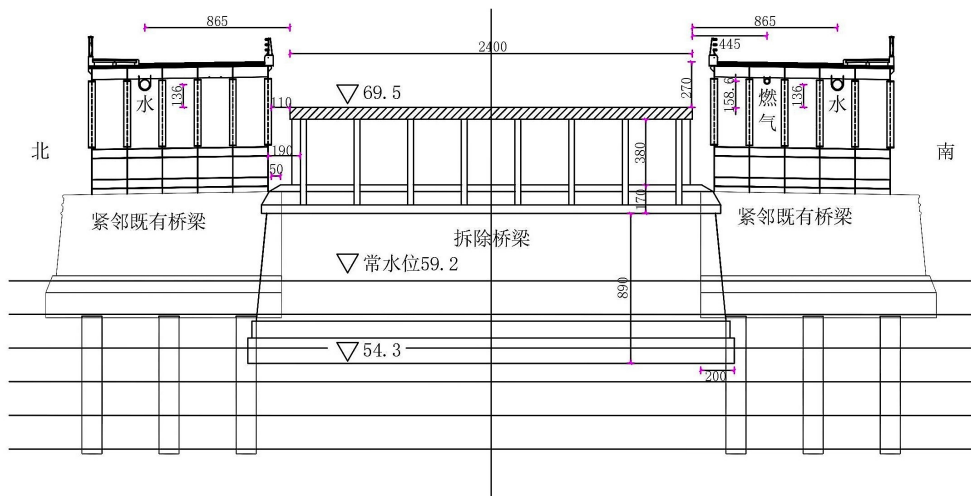


图1 桥梁相对位置示意图(单位:cm)

Fig. 1 diagram of relative position of bridge(unit:cm)

## 1.2 桥梁结构

该桥为上承式钢筋混凝土钢架式拱桥,全长346 m,桥面宽24 m,河床上有6个桥墩,7拱,单跨长为45 m,每跨拱腿斜撑的数量各为16个。主体结构由基础、桥墩、墩帽、中墩墙、拱腿、实腹段、弦杆、斜撑、桥面等结构组成。其中基础和桥墩为浆砌块石结构、体积厚大,其高度为8.9~10.2 m,厚度为3~4.7 m,长度为26.75~29 m;墩帽为钢筋混凝土结构,高度为1.7 m,底部厚3.2 m,长度为27 m;中墩墙为素混凝土结构,厚度为1.3 m,高度为3.8 m,长度为23.75 m;拱腿高1.04 m,宽度从根部的0.74 m向上不均匀渐变减少至0.6 m,结构尺寸渐变;斜撑尺寸为高0.47 m,宽0.36 m;桥面为现浇钢筋混凝土结构,桥面厚度为0.3~0.5 m。

## 2 爆破设计

### 2.1 爆破方案选取

由于爆破桥梁的自身结构和周边环境原因,桥梁爆破采用由桥梁中间向两边逐跨毫秒延时原地缓冲坍塌控制爆破方案。

爆破点主要设置在桥梁承重结构位置,有拱腿、斜撑、拱顶、中墩墙、墩帽、桥墩位置,使桥梁分块断裂塌落。由于选择爆破位置的尺寸大小不一,桥梁拆除爆破采用深浅孔结合的爆破方式<sup>[1]</sup>。在墩帽、中墩墙、桥墩处采用深孔爆破,钻孔位置从墩帽处开始穿过中墩墙至桥墩里面。拱腿、斜撑和拱顶的尺寸较小、厚度较薄,采用钻浅孔的方式来爆破。该爆破方案,装药分散,爆破有害效应较易控制,可以降低一次塌落块体质量。桥梁在爆破过程中不会向紧邻既有桥梁倾斜,对其造成破坏。采用中间向两边的逐跨毫秒延时原地缓冲坍塌控制爆破方案安全可靠。

收稿日期:2019-01-23

作者简介:王璞(1981-),男,高级工程师、学士,现任浙江省高能爆破工程有限公司总经理,从事工程爆破研究和施工管理工作,(E-mail)1759044827@qq.com。

## 2.2 爆破参数

桥梁爆破拆除主要是对该桥梁的承重结构进行一次爆破,促使桥梁承重结构破坏后塌落下来<sup>[2,3]</sup>。

桥墩由中墩墙、墩帽及浆砌块石砌成的桥墩组成,钻孔从中墩墙开始穿过中墩墙、墩帽继续深入桥墩3.5 m,孔径90mm,间距 $a$ 为0.8 m,中墩墙的高度为3.8 m,墩帽的高度为1.7 m。中墩墙和墩帽的单耗为800 g/m<sup>3</sup>,桥墩的单耗为640 g/m<sup>3</sup>。

桥梁的其他承重结构有拱腿、斜撑和拱顶。为了达到原地缓冲坍塌爆破效果对其进行爆破,各个部分爆破孔径为38 mm,炸药单耗为1500 g/m<sup>3</sup>。在拱腿位置布置2排,每排6个水平炮孔;斜撑上布置1排6个水平炮孔;拱顶位置布置10个炮孔,采用竖直炮孔布置形式。

爆破孔装药量由体积公式计算单孔装药量

$Q^{[4]}$ 。 $Q = kaBH$ ,式中: $Q$ 为单孔药量,g; $K$ 为单位体积用药量系数(单耗); $a$ 为炮孔间距,m; $B$ 为被爆体爆破的厚度,m; $H$ 为被爆体的需要爆破的高度,m。拱腿单孔装药量计算公式 $Q = kV$ 。取 $K$ 为单位体积用药量系数(单耗),取1500 g/m<sup>3</sup>;  $V$ 为单孔负担体积下部取0.19 m<sup>3</sup>,上部取0.15 m<sup>3</sup>。

桥梁各个承重结构的钻孔位置如图2所示,桥梁爆破拆除的主要参数如表1所示。

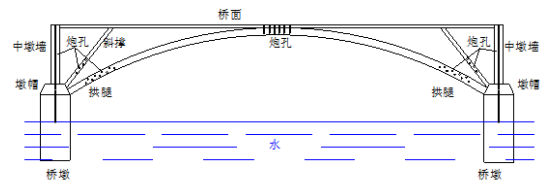


图2 钻孔位置示意图

Fig. 2 The drilling position of diagram

表1 桥梁爆破拆除的主要参数

Table 1 The main parameters of bridge blasting demolition

名称	中墩墙	墩帽	桥墩	拱腿下	拱腿上	斜撑	拱顶
孔径 mm	90	90	90	38	38	38	38
最小抵抗线 w/m	0.65	1.60	1.50	0.35	0.35	0.25	0.25
孔距 a/m	0.80	0.80	0.80	0.50	0.50	0.35	0.3
排距 b/m	/	/	/	0.34	0.34	/	/
厚度 B/m	1.30	3.20	3	/	/	0.47	0.5
爆破高度 H/m	3.80	1.70	3.50	/	/	0.36	0.65
孔深 L/m	3.80	1.70	3.50	0.55	0.47	0.25	0.95
单耗 $q/(g \cdot m^{-3})$	800	800	640	1500	1500	1500	1500
填塞 L 填/m		1.30		0.25	0.22	0.15	0.8
单孔装药量 Q/g	2000	3200	5200	300	250	100	150

## 2.3 装药结构

该桥梁爆破采用浅孔和深孔相结合钻孔装药来爆破。桥墩采用深孔装药结构:中墩墙段利用导爆索从中墩墙底部连续装填7支 $\phi 32$  mm乳化炸药,上面3支间隔0.16 m装药;墩帽段用四根 $\phi 32$  mm乳化炸药捆扎连续装填在中间;桥墩段从孔底开始,4支 $\phi 32$  mm乳化炸药捆扎为1节,每节间隔0.2 m装填6节,第7节为2支炸药捆绑填塞L堵中墩墙=1.3 m,孔口先用编织袋堵塞0.3 m,再用粗砂堵塞1 m,桥墩装药结构示意图如图3所示<sup>[5]</sup>。拱腿炮孔装药采用 $\phi 2$  mm的药卷,下部炮孔装药长度为30 cm,填充长度为25 cm;上部炮孔装药长度为25 cm,填充长度22 cm。斜撑上的炮孔采用 $\phi 32$  mm药卷,装药长度10 cm,填堵长度为15 cm。拱顶炮孔采用 $\phi 32$  mm药卷,装药长度15 cm,填堵长度为80 cm。

## 2.4 起爆网路

在本次桥梁爆破拆除的起爆网路中,主要需要考虑的因素有爆破单响,爆破振动对紧邻既有桥梁的影响,确保爆破桥梁的解体效果,减小单个桥梁块体的质量来降低塌落振动的强度。在本次爆破中采用复式导爆管网路起爆法,由桥中间向桥两边逐跨延时原地缓冲坍塌爆破<sup>[6-8]</sup>。

起爆网路连接时将各跨桥墩的拱顶、拱腿加斜撑、桥墩深孔作为三个独立的爆破分区。单跨结构拱顶、拱腿加斜撑及桥墩深孔之间的延时时间为100 ms,相邻跨桥墩之间的延时时间为200 ms。网路分区孔内装入高段位澳瑞凯高精度延时600 ms孔内雷管,孔外采用澳瑞凯高精度延时9 ms地表雷管进行大把抓联接,通过四通和导爆管将分区联接成一个复式的闭合网路如图4所示。

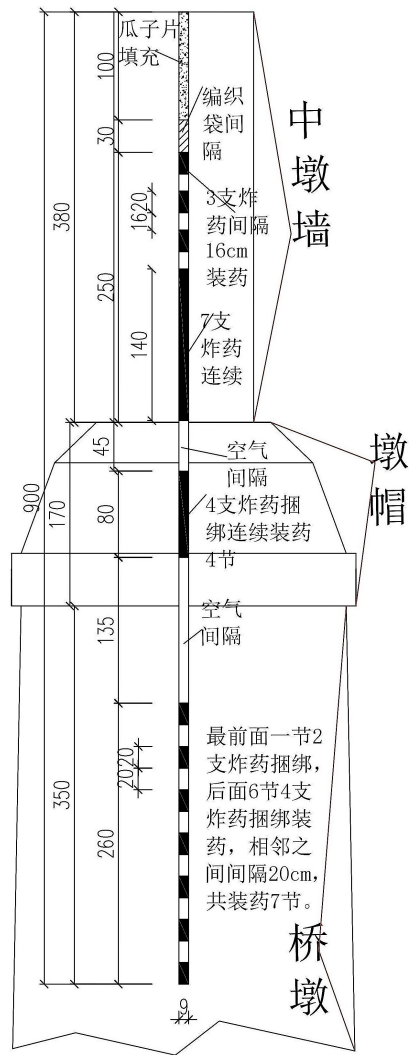


图 3 桥墩装药示意图(单位:cm)

Fig. 3 Diagram of the dock charge (unit: cm)

### 3 爆破安全设计

#### 3.1 爆破振动控制及验算

(1) 桥墩、管线的爆破振动控制标准

《爆破安全规程》<sup>[9]</sup>中关于新浇大体积混凝土(C20龄期:7~28 d)的控制标准为8~10 cm/s。

根据《中国地震烈度表》<sup>[7]</sup>(GB/T17742—2008)的规定,地下管线抗震烈度按7度计算,对应地面质点允许振动速度为10~18cm/s。考虑到一定的安全系数,对地下管线安全振速取V=5cm/s。

(2) 爆破安全振动校核

爆破后产生的振动是通过桥墩传到基础后再传至地面至既有桥及管线上,爆破振动发生衰减。根据《爆破安全规程》,爆破振动的大小用地面质点的振动速度来衡量,振速的采用下式计算

$$v = k'K \left( \sqrt[3]{Q_{\text{齐}}}/R \right)^\alpha$$

式中: $Q_{\text{齐}}$ 为齐次爆破的最大药量,kg; $R$ 为保护目标到爆点之间的最小传播距离,m; $v$ 为质点振动速度,cm/s; $K$ 、 $\alpha$ 为不同结构、不同方法影响振动的系数的值分别取180和1.7; $k'$ 为衰减系数(0.25~0.75)取0.3。根据爆破桥梁周边环境可以对周边设计进行爆破振动计算见表2所示。

依据桥梁周边管线及紧邻既有桥的桥墩情况,确定重点需要保护的设施的最小距离的最大单响药量为41.6 kg时,管线和桥墩的爆破振动在安全允许范围之内。

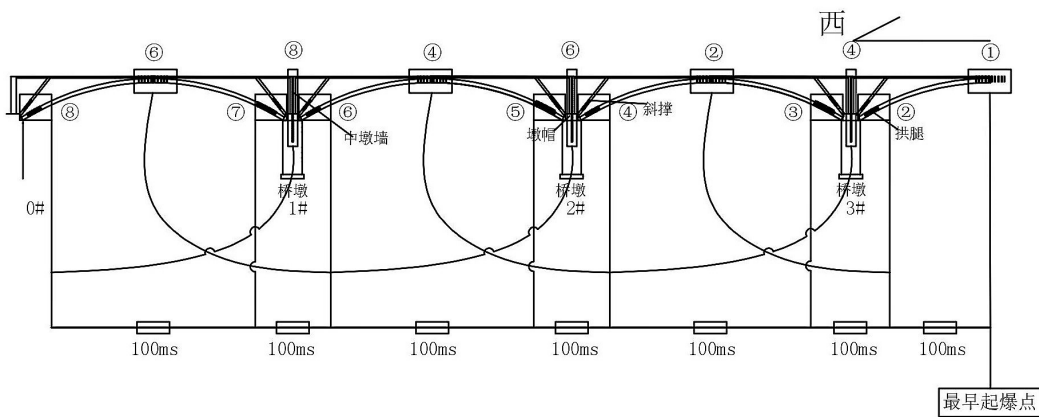


图 4 中间向西起爆网路

Fig. 4 Detonate the network from middle to the west

#### 3.2 塌落振动的控制验算及测振

(1) 桥墩的爆破塌落振动控制标准

根据《中国地震烈度表》<sup>[7]</sup>(GB/T17742—2008)的规定,结合紧邻桥梁抗震设计(地震烈度VI度、丙

类抗震、抗震设计方法C类),对应参考地面质点允许振动速度为5~9 cm/s,综合考虑本工程复杂环境确定:本次爆破中,既有桥梁塌落振动速度控制标准为8 cm/s。

表2 周边管线及桥段爆破振动验算表

Table 2 Checking tables for blasting vibration of surrounding pipelines and bridge sections

保护物名称	至装药中心的最小传播距离/m	控制标准/ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )	最近爆破部位	设计最大单响 药量/kg	爆破振动速度/ ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )
北侧既有桥自来水管线	36.9	5	各深孔	41.6	0.97
南侧既有桥自来水管线	36.9	5	各深孔	41.6	0.97
南侧既有桥天然气管线	33.3	5	各深孔	41.6	1.15
桥东通讯地下管线	110	5	6#深孔	41.6	0.15
2#、4#桥墩	13.9	10	老桥 2#、5#深孔 南1、北1区	8.4	2.06
1#、5#桥墩	25.8	10	老桥 1#、6#深孔	41.6	1.78
3#桥墩	28.9	10	老桥 3#、4#深孔	41.6	1.47

## (2) 塌落振动的预测计算结果

在桥面触地冲击过程中,由孙金山教授等的建(构)筑物拆除爆破塌落触地振动预测模型研究论文研究<sup>[8]</sup>,可知把桥面塌落体与地面变形塑性体可视为封闭的系统,则其可更好地满足动量守恒定律。

由地面塑性区在获得初速度后将向弹性区传递振动能量,根据以往的振动速度衰减模型,将距离振源R处的最大振动速度公式表示为 $v_R = m_1 v_1 R^{-\beta} / m_2$ 。式中: $\beta$ 为衰减系数取值为1,旁边既有桥紧邻R取1m,塌落块体与河面接触时速度 $V_1$ 取12 m/s,塌落块体质量 $m_1$ 取1 356 900 kg,分别将上述数据代入理论推导公式,可得紧邻既有桥梁桥墩估算振动速度,如表3所示。

通过爆破塌落振动的动量守恒,计算出来桥墩

的振动速度在地基摩擦角 $35^\circ$ 时竖直方向振动速度为2.3 cm/s,远小于塌落振动控制标准的8 cm/s。

表3 紧邻既有桥梁桥墩估算振动速度

Table 3 Estimated vibration velocity of adjacent bridge piers

地基摩擦角	桥墩1基础	桥墩2基础	桥墩3基础
$35^\circ$	2.3 cm/s	2.3 cm/s	2.3 cm/s

## (3) 爆破实测振动值

爆破振动测试结果,爆破过程采用测振仪对既有桥的桥墩进行振动测量,爆破时桥墩的质点峰速进行监测,确保大桥安全。监测时在既有桥桥墩处布置测点,监测质点爆破实测振动波形图如5所示:最大实测振动值5.087 cm/s。桥梁的塌落振动控制在允许振动范围之内,符合设计要求。

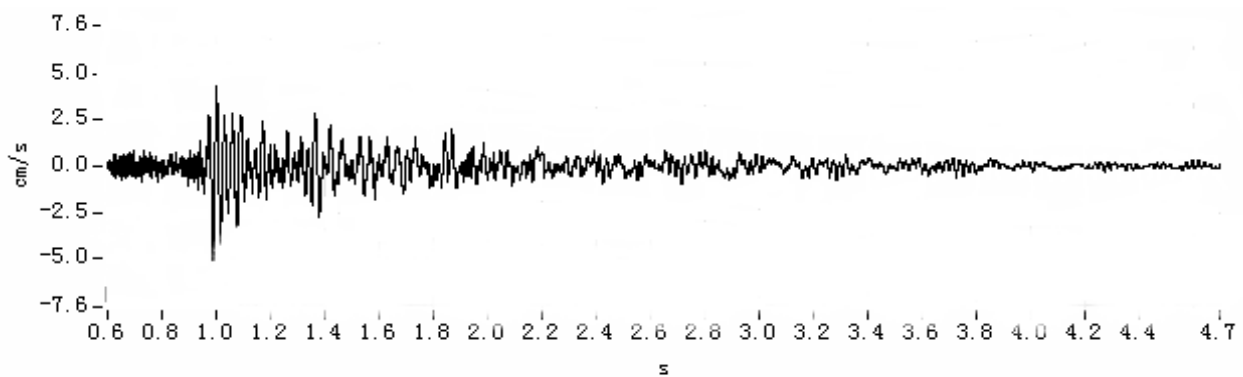


图5 爆破实测振动波形图

Fig. 5 Blasting measured vibration waveform

## 3.3 爆破安全防护

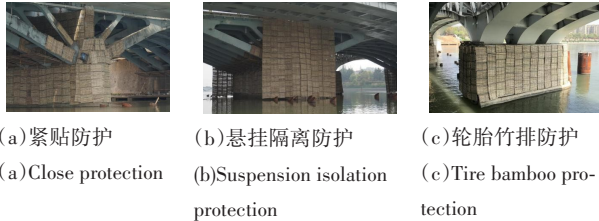
老桥爆破拆除时,紧邻既有桥梁处于正常运营状态,水平间距最小仅为0.5 m。爆破和坍塌过程中,避免飞石距过远,老桥部分结构可能会撞击紧邻既有桥梁的桥墩底部,造成既有桥梁桥墩局部受

损,我们采取一定的防护措施。

通过在所有钻孔装药爆破部位的外侧表面覆盖两层竹笆进行防护,在既有桥梁和拆除桥梁之间对应爆破部位的空隙处挂设竹笆墙,形成整体竹笆防护墙,阻挡爆破飞石危害既有桥梁及周边设施。

在保护桥墩挂设堆放轮胎并覆盖竹排为缓冲层, 缓减老桥散落部件冲击既有桥梁桥墩的危害, 起到保护桥墩的作用。爆破防护示意图如图6所示。

通过主动防护有效的降低飞石距, 飞石距离在老桥的20 m范围内, 爆破后桥梁塌落块体没有对紧邻既有桥梁及周边设施造成破坏。



(a)紧贴防护 (a)Close protection  
(b)悬挂隔离防护 (b)Suspension isolation protection  
(c)轮胎竹排防护 (c)Tire bamboo protection

图6 爆破防护图

Fig. 6 The blast protection diagram

## 4 爆后效果

爆破后该桥严格按照爆破设计的原地塌落方式塌落, 达到预期爆破效果。没有向紧邻既有桥梁倾斜, 保证既有桥梁桥墩及基础未受到损伤, 紧邻既有桥梁的桥墩及周围管线等设施均未受爆破拆除有害效应的影响, 爆后效果如图7所示。爆破过程中飞石未对保护对象造成危害, 符合《爆破安全规程》(GB6722—2014)<sup>[9]</sup>相关规定。



图7 爆破效果图

Fig. 7 Blasting effect diagram

## 5 结语

对紧邻既有桥梁老桥的成功爆破拆除的施工工艺和技术上总结: 在爆破施工中选择合理的爆破部位及钻孔方式及爆破参数是成功爆破的关键; 采用逐跨延时原地缓冲塌落爆破的方案, 通过减小一次塌落质量, 来减小塌落振动强度; 运用塌落振动公式、振动公式校核及测振仪对爆破振动进行实

测, 爆破振动在安全允许范围之内; 通过竹笆轮胎防护措施能够有效的降低爆破飞石、冲击波的危害。

## 参考文献 (References)

- [1] 支文超, 孟祥栋. 580 m长钢筋混凝土箱型拱桥爆破拆除[J]. 爆破, 2017, 34(3): 100-103.
- [1] ZHI Wen-chao, MENG Xiang-dong. Explosive demolition of 580 m long reinforced concrete box-type arch bridge[J]. Blasting, 2017, 34(3): 100-103. (in Chinese)
- [2] 刘士兵, 郑永泽, 贺攀, 等. 复杂环境下334 m钢筋混凝土刚架拱桥爆破拆除[J]. 工程爆破, 2017, 23(1): 59-63, 80.
- [2] LIU Shi-bing, ZHENG Yong-ze, HE Pan, et al. Blasting demolition of a 334 m reinforced concrete rigid frame arch bridge in complex environment [J]. Engineering Blasting, 2017, 23(1): 59-63, 80. (in Chinese)
- [3] 王守伟. 复杂环境下钢筋混凝土箱形拱桥的拆除爆破技术研究[J]. 重庆建筑, 2018, 17(9): 42-45.
- [3] WANG Shou-wei. Study on demolition blasting technology for box-ribbed arch bridge of reinforced concrete under complex environments [J]. Chongqing Architecture, 2018, 17(9): 42-45. (in Chinese)
- [4] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 445-454.
- [5] 王新生, 张英才. 运行高速公路上跨天桥爆破拆除关键技术研究[J]. 爆破, 2018, 35(4): 84-89.
- [5] WANG Xin-sheng, ZHANG Ying-cai. Research of key technology of blasting demolition on flyover bridge running highway [J]. Blasting, 2018, 35(4): 84-89. (in Chinese)
- [6] 刘国军, 梁锐, 杨元兵. 复杂环境下钢筋混凝土简支梁式桥爆破拆除[J]. 爆破, 2017, 34(4): 115-119.
- [6] LIU Guo-jun, LIANG Rui, YANG Yuan-bing. Explosive demolition of reinforced concrete simply supported beam bridge under complex environment [J]. Blasting, 2017, 34(4): 115-119. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T17742—2008中国地震烈度表[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [8] 孙金山, 谢先启, 贾永胜, 等. 建(构)筑物拆除爆破塌落触地振动预测模型研究[J]. 工程爆破, 2014, 20(2): 25-28.
- [8] SUN Jin-shan, XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, et al. Forecast model of peak vibration velocity induced by the collapse of structures in demolition blasting projects [J]. Engineering Blasting, 2014, 20(2): 25-28. (in Chinese)
- [9] 国家安全生产监督管理局. GB6722—2014爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.