

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.01.018

## 立体交叉石拱桥爆破拆除振动危害控制

林代恒,张忠祥

(贵州中天爆破有限公司,贵阳 550081)

**摘要:** 纳雍维马石拱桥与简支梁新桥水平方向呈 $41^\circ$ 斜交,全长为68 m,从新桥第5跨下28.5 m穿过,距新桥4#立柱仅0.8 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。根据石拱桥自身结构特点,爆破拆除石拱桥对周围环境的破坏,尤其是对4#立柱和墩基础的危害,我们进行了爆破和塌落振动分析,工程中采取了喇叭型爆破切口、上移东西拱脚爆破切口至第二腹拱、增加靠近4#立柱破碎切口、采用起爆网路时差“由西向东、由南向北”顺序,调整靠近4#立柱炮孔抵抗线、各个爆破切口采用不同的炸药单耗等方法,来实现石拱桥爆破拆除有向南倾倒的趋势的同时,满足塌落体最小化以及减小爆破对周围环境的影响,并利用渣石和软土堆码缓冲减振堤、搭设防护排架等安全防护措施,确保了石拱桥爆破拆除的可靠性和安全性。利用塌落振动公式计算新桥4#立柱对应桥面振动速度为3.9~5.2 cm/s,与测振仪测得该点最大振动速度3.879 cm/s相近,验证了爆破拆除石拱桥设计思路及相关参数的选取是科学、合理的。爆破拆除取得理想的效果。

**关键词:** 石拱桥; 爆破拆除; 爆破振动; 塌落振动; 振动危害; 喇叭型爆破切口

**中图分类号:** TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)01-0132-07

## Vibration Hazard Control of Blasting Demolition of Interchange Stone Arch Bridge

LIN Dai-heng, ZHANG Zhong-xiang

(Guizhou Zhongtian Blasting Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

**Abstract:** Nayong Weima stone arch bridge and the new simply supported beam bridge have a  $41^\circ$  diagonal crossing in the horizontal direction, with a total length of 68 m. It passes 28.5 m below the fifth span of the new bridge, and is only 0.8 m away from the #4 column of the new bridge. In order to ensure the successful blasting demolition of the old stone arch bridge, the in-situ buffer collapse control blasting technology is adopted to ensure the safety of the adjacent new bridge. Considering the damage to the surrounding environment caused by the blasting demolition of the stone arch bridge, especially the damage to #4 column and the pier foundation, the horn blasting notches is used based on the structural characteristics of the stone arch bridge and the analysis of blasting and collapse vibrations. At the same time, the blasting notch of the East-West arch foot is moved to the second abdominal arch, and the crushing notch close to #4 column is added. For the initiation network, the sequence of "west to east and south to north" is adopted. Other methods include adjusting the resistance line of the blast hole close to the #4 column and taking different powder factors for different blasting notches, etc. All those measures are taken to make the stone arch bridge tends to collapse to the south with a minimum collapse size and reduce the impact of blasting on the surrounding environment. Furthermore, the reliability and safety of the blasting demolition of the stone arch bridge are ensured by the safety protection measures such as stacking of slag and soft soil to cushion dikes and setting up

收稿日期:2022-11-29

作者简介:林代恒(1965-),男,总工程师、高工,爆破高级工程师,从事爆破工程设计与施工及教学工作,(E-mail)506178226@qq.com。

protective shelving. According to the collapse vibration formula, the vibration velocity of the bridge deck corresponding to the #4 column of the new bridge is calculated to be 3.9 ~ 5.2 cm/s, which is close to the maximum vibration velocity of 3.879 cm/s measured by the vibration meter. It is verified that the design idea of the blasting demolition of the stone arch bridge and the selection of the relevant parameters are scientific and reasonable. The blasting demolition has achieved ideal results, which could provide reference for similar blasting demolition projects.

**Key words:** stone arch bridge; blasting demolition; blasting vibration; collapse vibration; vibration hazards; horn blasting notch

建筑物爆破拆除时产生振动的原因:一是被拆除建筑物构件中炸药爆炸所产生的爆破振动,二是由于建筑物塌落解体对地面冲击造成的地层振动<sup>[1]</sup>。建筑物爆破拆除都是小药量装药,多个药包布置在需要爆破建筑物的失稳部位,药包多而分散,通过微差控制,炸药的爆破作用通过基础传至地面时,爆破振动衰减是非常快的,一般爆破振动衰减经验公式  $v = k(Q^{1/3}/R)^{\alpha}$  需乘以 0.25 ~ 1.0 系数进行修正<sup>[2]</sup>。在爆破拆除工程中,塌落振动造成的危害跟建筑物塌落体尺寸、塌落过程、地面结构及保护物的自有频率有关,并且建筑物塌落引起的地面振动波频率较低,主振在 10 Hz 左右<sup>[1]</sup>,而一般建筑物的自有频率多为 1 ~ 10 Hz<sup>[1]</sup>,因此,建筑物爆破拆除塌落造成危害往往比爆破振动要大得多<sup>[3]</sup>。以立体交叉的维马石拱桥爆破拆除工程为实例,采用增加爆破切口,减小塌落体积,堆码缓冲墙等措施,控制其爆破危害效应,取得了非常理想的效果。

### 1 工程概况

拆除的维马石拱桥位于贵州毕节市纳雍县董地

乡进新村,属夹岩水库蓄水淹没区,该桥东西横跨引底河,新建的维马大桥为简支桥梁,西北-东南走向,上跨石砌拱桥,高差 28.5 m,在石拱桥东岸 27 m 处呈 41°斜交,石拱桥从新桥第五跨(跨间距 38 m)下穿过,全长 68 m,由一主拱和主拱上东西各三个腹拱组成,腹拱跨径 5.0 m;桥面宽 8.6 m,两边各 1.0 m 的人行通道,拱厚 1.2 m,主拱宽 8.0 m,拱高 15 m,桥面距河面高 26 m;东西拱脚下分别建有和主拱约宽的护坡承台,从拱脚向河中各延伸 15 m。

大桥周边环境情况(见图 1):东面 200 m 范围内有民房 7 户,距最近民房水平距离 60 m,高差 26 m;南 13 m 是横跨石拱桥的新桥 5#桥柱;西面为荒山,西南 135 m 山上有一高压铁塔、高压线平行石拱桥上方 100 m 通过;西北 300 m 范围有民房 6 户,最近民房距离 210 m;北 0.8 m 是横跨斜交石拱桥的新桥 4#桥柱,桥柱为  $\phi 1.8$  m 双桥柱,柱净间距 2.6 m,桥墩基础斜伸入石拱桥下 1.0 m;新桥下有一条通信光缆,沿桥人行道边沿悬挂。

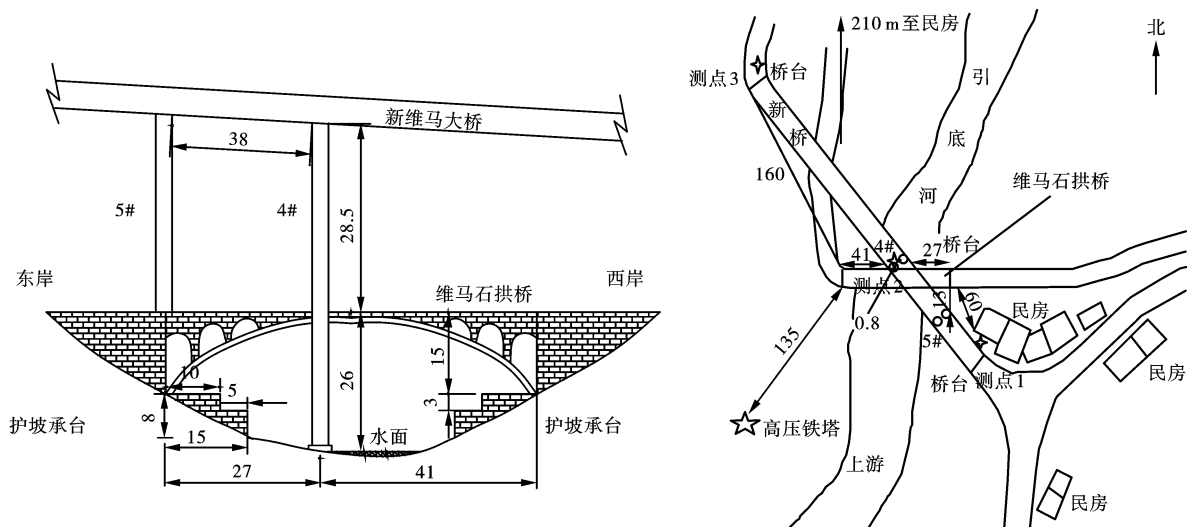


图 1 爆破区域周围环境(单位:m)

Fig. 1 The surrounding environment of the blasting area(unit:m)

## 2 爆破拆除总体设计

### 2.1 工程难点

1) 石拱桥北距新桥4#桥墩立柱仅0.8 m,南距新桥5#桥墩13 m,石拱桥拱高15 m,要保证石拱桥拆除坍塌,不偏移碰撞新桥桥墩及立柱。

2) 新桥4#墩基础有部分伸入到石拱桥下方,拆除石拱桥,需控制塌落振动对新桥4#桥墩的影响。

3) 维马石拱桥东岸距民房仅60 m,其上方有通信光缆和高压线,需控制爆破飞石方向和距离。见图2。



图2 新桥与石拱桥位置实景照片

Fig. 2 Location of the new bridge and stone arch bridge

### 2.2 爆破方案的确定

#### 2.2.1 从塌落振动因数考虑

一般石砌建筑物抗拉、抗剪强度相对很低,石拱桥结构稳固位置在拱顶和两岸拱脚部位<sup>[4]</sup>,对石拱桥的拆除只需破坏桥拱顶支撑就可使桥梁失稳坍塌<sup>[5]</sup>。但是为保证爆破后桥体塌落不影响新桥,多设爆破切口<sup>[6]</sup>,让桥体在塌落触地前充分解体破碎,减小桥体塌落振动。

#### 2.2.2 从倾倒方向考虑

采取向南设置喇叭形爆破切口和控制起爆方向、时差,让桥身有向南倾斜的趋势。桥身向南倾斜重点保护对象是距离桥东端头13 m的新桥5#桥柱。如果把石拱桥看做一个整体的刚性结构物,拆除桥的倾倒铰支点应在东、西两岸拱脚北侧端,假设桥梁为刚性倾倒,以铰支点为圆心,桥倾倒的最大距

离为: $(15^2 + 8.0^2)^{1/2} = 17$  m,而铰支点到5#桥柱距离为: $8 + 13 = 21$  m,即使该桥以铰支点刚性倾倒,距5#桥柱还差 $21 - 17 = 4$  m,因此石拱桥在倾斜塌落解体过程中,不会对5#桥柱造成破坏。让石拱桥倾倒,是从理想的设计思路考虑的,而石拱桥一旦破坏了它的结构支撑,得到应力释放,它的刚性将不复存在,爆破设计只求有向北的倾倒趋势,即满足了爆破设计要求。

#### 2.2.3 爆破总体设计

在主拱上设置4个爆破切口,其中3个为喇叭型爆破切口和一个矩形破碎切口,每个切口靠北减少1排孔,增大北侧抵抗线,采用微差控制爆破,让石拱桥桥体在塌落冲击地面前破碎解体。东西两岸拱脚各设一个爆破切口,切口上移至中间腹拱内,这有利于石拱桥下落块体均匀,减小塌落振动<sup>[6,7]</sup>。

## 3 爆破参数设计

### 3.1 爆破切口

1) 对桥主拱进行爆破,爆破切口布置在主拱拱顶中央和靠近4#桥柱部位,靠近4#桥柱切口增加桥体破碎解体。拱顶中央爆破切口为喇叭型爆破切口,长:4.9~2.1 m、切口宽为路面宽;4#立柱旁爆破切口为矩形破碎切口,长:3.5 m,切口宽为路面宽。

2) 爆破主拱拱脚切口布置在东西拱脚第2个腹拱内,东西拱脚切口长度均为4.9~2.1 m。

### 3.2 孔网参数

钻孔方向垂直于拱面,孔径 $d = 40$  mm;最小抵抗线: $W = 60$  cm;孔距: $a = 70$  cm、排距: $b = 55$  cm;孔深: $L = 0.7 \times 1.2$  m(拱圈厚度) = 85 cm;单耗: $q = (0.8 \sim 2.0)$  kg/m<sup>3</sup>,不同爆破切口采用不同的炸药单耗<sup>[8]</sup>:拱顶单耗为 $q = 0.85$  kg/m<sup>3</sup>、靠近4#立柱和东拱脚单耗为 $q = 0.43$  kg/m<sup>3</sup>、西拱脚单耗为 $q = 1.30$  kg/m<sup>3</sup>。见表1。

表1 爆破参数

Table 1 The blasting parameters

爆破区域	主拱厚/m	a/m	b/m	L/m	孔径/mm	单耗/(kg·m <sup>-3</sup> )	单孔药量/kg	炮孔数/个	切口长/m	同段最大药量/kg	总药量/kg
拱顶	1.2	0.7	0.55	0.85	40	0.85	0.4	86	4.9~2.1	6.0	34.4
拱顶柱旁	1.2	0.7	0.55	0.85	40	0.43	0.2	71	3.5	2.2	14.2
西拱脚	1.2	0.7	0.55	0.85	40	1.35	0.6	88	4.9~2.1	12.0	52.8
东拱脚	1.2	0.7	0.55	0.85	40	0.43	0.2	93	4.9~2.1	4.2	18.6
合计								338			120.0

## 4 爆破网路设计

### 4.1 起爆顺序

将整座桥从桥跨中心拱顶、靠近4#立柱、东西二拱脚共分为4个爆区3个时段。爆破切口顺序:4个切口按“由西向东”即先西拱脚、然后拱顶和靠近4#立柱同时、最后东拱脚切口起爆;同一爆破切口排间“逐排起爆”,起爆顺序:“由南向北”<sup>[9]</sup>。

### 4.2 延期时间设计

起爆网路采用非电雷管和数码电子雷管混合起爆网路。孔内装双发MS12段毫秒导爆管雷管,孔外每2排用MS3段接力,形成复式交叉起爆网路;延时设置:4个爆破切口、3个延时区,采用数码电子雷管实现爆区延时:西拱脚为0 ms、拱顶和靠近4#立柱为110 ms、东拱脚为230 ms。各爆区采取:“逐排起爆”,孔间延时0 ms,每2排一个段,排间延时50 ms;爆区孔外延时530 ms,整个爆区总延时1030 ms。见表2、图3。

表2 爆区延时设计

Table 2 The design of the delay times

爆区名称	爆区延时/ms	孔间延时/ms	排间延时/ms	爆区总延时/ms
西拱脚	0	0	50	250
拱顶和拱顶柱旁	110	0	50	360
东拱脚	230	0	50	480
合计	同一爆破切口每2排一个段,孔内12MS段、孔外3MS接力,爆破切口间数码电子雷管延时。			1030 ms

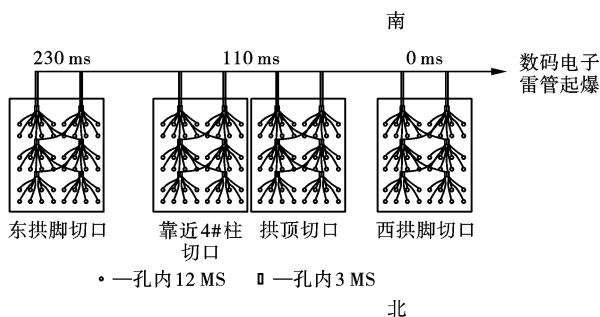


图3 石拱桥起爆网路示意图

Fig. 3 The detonator network diagram of the stone arch bridge

## 5 爆破安全设计

### 5.1 爆破振动安全设计

#### 5.1.1 需要保护的對象

维马石拱桥东距民房水平距离60 m,高差

26 m;南13 m是横跨石拱桥的新桥5#桥墩,该桥墩基础和石拱桥拱脚在同一高程;西面为荒山、西南135 m有一高压铁塔(高差100 m)、西北160 m是新桥西岸桥台、210 m有民房(高差均为28.5 m);北0.8 m是横跨石拱桥的新桥的4#桥柱;还有悬挂于新桥下的通信光缆。

#### 5.1.2 安全距离核算

一般民用建筑物的质点安全振动允许速度为(2.0~2.5) cm/s,石拱桥附近民房安全允许质点振动速度按1.0 cm/s控制;根据《中国地震烈度表》<sup>[10]</sup>,纳雍当地建构筑物设计抗震设防烈度为6度,抗地震加速度值为0.05 g,新桥也按此标准设计,其0.05 g加速度值可等效爆破质点振动速度13 cm/s产生的危害,该桥振度按10 cm/s控制<sup>[9]</sup>。

##### 1) 爆破振动验算

此次爆破拆除最大单次起爆药量为2排炮孔一个段,在西拱脚,最大单段药量为12 kg。由于保护对象与各爆破切口距离不等,表3作为相对爆心距离进行爆破振动安全验算。

根据萨道夫斯基经验公式

$$v = K'K \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\alpha$$

式中: $v$ 为被保护目标的安全振动速度,cm/s; $Q$ 为最大单段起爆的炸药量(60 m民房受爆破振动影响的只是东拱脚同段最大药量4.2 kg。 $R$ 为爆点中心至被保护目标的距离, $R=60$  m; $K, \alpha$ 为与爆破地形、地质条件等有关的系数和地震波衰减指数, $K$ 取200, $\alpha$ 取1.7。 $K'$ 为爆破拆除衰减修正系数,取0.4。见表4。

##### 2) 塌落振动

由于缺乏石拱桥的相关资料,桥面估算桥体重量3800 t,塌落重心分东西两部分,分别距东西两岸15 m,重心高度在桥高2/3处即10 m。

根据中科院力学所给出的爆破拆除塌落振动公式

$$v_i = K_i \left[ \frac{R}{\left( \frac{MgH}{\sigma} \right)^{1/3}} \right]^\beta$$

式中: $v_i$ 为塌落引起的地面振动速度,cm/s; $M$ 为下落结构物的质量,落地质量取石拱桥重量,估算约为3800 t,但石拱桥由拱顶爆破切断后,下落重心有两个,分别在桥东西两拱脚重心处;塌落重量估算东岸重量 $M_{东}=1900$  t,西岸重量 $M_{西}=1900$  t。 $g$ 为重力加速度, $g=9.8$  m/s<sup>2</sup>;H为结构物重心所在位置高度,重心对应应在护坡承台边缘处,其重心高 $H=18$  m; $R$ 为观测点至冲击地面中心的距离,距离民房

60 m 和最近新桥 4#桥柱 0.8 m,按路面中心距离东拱脚 15 m 处和西拱脚 15 m 处为重心位置,计算两个塌落体振动速度。其他保护对象距离较远,把塌落重心等同于桥中心计算塌落振动速度。 $\sigma$  为地面介质破坏强度,取 10 MPa; $K_t$  为衰减系数,取 3.37。

式中: $K_t = 3.37$ , $\beta$  衰减系数取: $\beta = -1.67$ ,代入上述算得值见表 5。民房: $V_t = 0.97 \text{ cm/s} <$

$1.5 \text{ cm/s}$ ;5#、4#桥墩在不采取任何措施的情况下,塌落振动最大值: $V_t = 15.6 > 10 \text{ cm/s}$ ,超过了钢筋混凝土简支桥梁的设定抗震判据。但如果采取垒沙袋墙等减振措施的情况下,其塌落振动可降低,其值仅为计算值的  $1/4 \sim 1/3$ <sup>[1]</sup>,则在 4#桥墩基础  $V_t = (1/4 \sim 1/3) \times 15.6 = 3.9 \sim 5.2 \text{ cm/s}$ 。见图 4。

表 3 爆破区域距周围保护目标距离

Table 3 The distance between the blasting area and surrounding protection targets

爆破目标	方位	保护目标	距离/m	爆心距离/m	备注
爆破石拱桥区域	北侧	新桥 4#桥柱	0.8	27.4	爆心在西岸拱脚
	南侧	新桥 5#桥柱	13.0	13.0	爆心在东岸拱脚
	西北侧	民房(高差 28.5 m)	210.0	210.0	爆心在西岸拱脚
	西北侧	桥台(高差 28.5 m)	160.0	160.0	爆心在西岸拱脚
	西南侧	高压塔(高差 100 m)	135.0	135.0	爆心在西岸拱脚
	东南侧	民房(高差 26 m)	60.0	60.0	爆心在东拱脚处

表 4 爆破振动速度

Table 4 The blasting vibration velocity

爆破目标	方位	保护目标	环境距离/m	爆心距离/m	振速/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	备注
爆破石拱桥区域	北侧	新桥 4#桥柱	0.8	27.4	0.74	爆心在东岸拱脚
	南侧	新桥 5#桥柱	13.0	13.0	2.30	爆心在东岸拱脚
	西北侧	民房(高差 28.5 m)	210.0	210.0	0.04	爆心在西岸拱脚
	西北侧	新桥西测控点	160.0	160.0	0.06	爆心在西岸拱脚
	西南侧	高压塔(高差 100 m)	135.0	135.0	0.08	爆心在西岸拱脚
	东南侧	民房(高差 26 m)	60.0	60.0	0.17	爆心在东岸拱脚

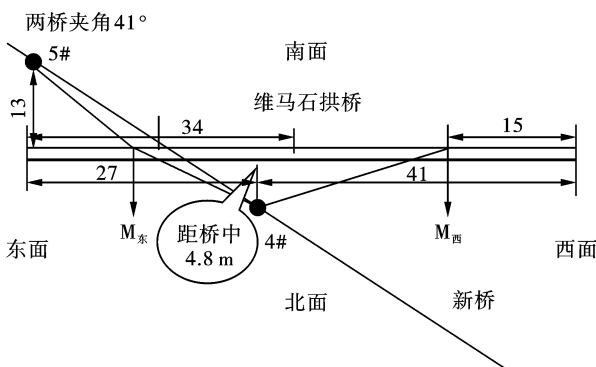


图 4 石拱桥塌落分析图(单位:m)

Fig. 4 The collapse analysis diagram of the stone arch bridge(unit:m)

## 5.2 爆破飞石距离

拆除控制爆破无防护条件下个别飞石的最大飞散距离,根据经验公式<sup>[11]</sup>

$$R_{\max} = 70q^{0.58}$$

式中: $R_{\max}$  为个别飞石最大距离,m; $q$  为炸药单

耗, $\text{kg}/\text{m}^3$ ,经计算得: $R_{\max} = 81.5 \text{ m}$ 。

## 5.3 安全防护措施

### 5.3.1 维马新大桥 4#桥墩立柱及减振防护

①预拆除东岸护坡承台,将其渣石堆码在 4#桥墩基座南侧 5 m 范围内用砂石、松土、沙袋和废旧轮胎堆码减振墙进行防护;

②对 4#墩两根立柱实施钢管排架进行包裹防护,排架内靠石拱桥侧用废旧轮胎充填<sup>[12]</sup>;

③两根立柱中间搭设的钢管架采用斜拉连接和直接加固。

### 5.3.2 石拱桥爆破切口飞石防护

爆破飞石控制主要是拱顶和靠近 4#立柱爆破切口二部分,东西拱脚切口有桥面阻挡,切口对应南北两侧无保护对象,不需要进行覆盖防护。对桥面二切口的安全防护措施:用架管在爆破区域上方搭设排架,高 0.3 m,再在上面铺设一层竹跳板、上面加压一层沙袋覆盖,形成防护空间罩。见图 5。

表 5 桥梁塌落对周围保护目标振动速度

Table 5 The influence of bridge collapse on vibration velocity of surrounding protective targets

爆破目标	方位	保护目标	环境距离/m	塌落中心距离/m		振速/(cm·s <sup>-1</sup> )	
				东岸	西岸	东岸	西岸
爆破石拱桥 区域	北侧	新桥 4#桥柱	0.8	12.9	26.4	15.6	4.7
	南侧	新桥 5#桥柱	13.0	19.8	54.6	7.6	1.4
	西侧	新桥西桥台	160.0	160.0		0.34	
	西北侧	民房(高差 28.5 m)	210.0	210.0		0.24	
	西南侧	高压塔(高差 100 m)	135.0	135.0		0.45	
	东南侧	民房(高差 28.5 m)	75.0	85.7		0.97	



图 5 爆破防护照片

Fig. 5 The blasting protection photos

破前后效果见图 6。



图 6 爆破前后效果对照

Fig. 6 The effect comparison before and after blasting

## 6 爆破效果与结语

### 6.1 爆破效果

2021 年 10 月 12 日 17:50 起爆,从爆破开始到桥体解体下落,整个过程持续了 4 s,桥体有向南倾斜的趋势,下落块体距 4#立柱最近距离 1.5 m,桥体下落向北偏移了 0.7 m。飞石向南最远距离 50 m,向北飞石主要是西拱脚和拱顶切口产生,最远距离 20 m,东拱脚和靠近 4#立柱向北几乎没有飞石。石拱桥东段大部分在空中解体,西端塌落块体较大,爆

### 6.2 振动监测结果

在爆破周边共布置 3 个测点,每个测点采用 1 台三维速度传感器,监测水平径向、水平横向和垂直方向的振动速度和主振频率。监测点位置设置:测点 1 位于新桥东南面 60 m 房屋基础处;测点 2 位于新桥桥面中心对应 4#立柱处;测点 3 位于新桥西端 160 m 桥面。见表 6。

表 6 各测振点振动监测数据

Table 6 The monitoring data of each measurement point

测点	距离/m	X(水平径向)		Y(水平切向)		Z(垂直向)		备注
		V/(cm·s <sup>-1</sup> )	主振/Hz	V/(cm·s <sup>-1</sup> )	主振/Hz	V/(cm·s <sup>-1</sup> )	主振/Hz	
测点 1	60.0	0.123	10.8	0.219	7.2	0.093	11.5	水平距离 塌落振动
测点 2	54.5	2.390	4.3	1.740	5.0	3.879	7.7	垂直距离 塌落振动
测点 3	160.0	0.037	196.9	0.041	301.2	0.072	320.0	水平距离 爆破振动

### 6.3 振动分析

测点 1:通过图谱分析,测点 1 检测到三个频率的波形,第一个爆破振动不明显,在最大振动波峰出现以前有一个小幅振动波形, $v=0.1$  cm/s。最大质点振动速度在第二时间  $t=1.07$  s 时切向 Y 轴上出现, $v=0.219$  cm/s,主振频率  $f=7.2$  Hz;第三个波峰在  $t=2.9$  s 出现, $v=0.18$  cm/s,频率  $f=9.0$  Hz。塌落振动  $v=0.219$  cm/s 为最大振动,与计算值  $v=0.97/4=0.24$  cm/s 接近。见图 7。

测点 2:最大质点振动速度在时间  $t=2.78$  s 时垂直向 Z 轴上出现, $v=3.88$  cm/s,主振频率  $f=7.7$  Hz;未出现第二个波峰。通过图谱分析,测点 2 只有一个低频率的塌落振动,未检测到爆破振动。塌落振动计算  $v=15.6/4=3.9$  cm/s,与计算值等同。见图 8。

测点 3:最大质点振动速度在时间  $t=0.64$  s 时垂直向 Z 轴上出现, $v=0.072$  cm/s,主振频率  $f=320$  Hz;出现第二个波峰时间在  $t=3.3$  s,  $v=$

0.03 cm/s,主振频率 $f = 15$  Hz左右。通过图谱分析,测点3有两个振动及塌落和爆破振动。最大振

动是爆破振动计算, $v = 0.07$  cm/s,与计算值 $v = 0.06$  cm/s接近。见图9。

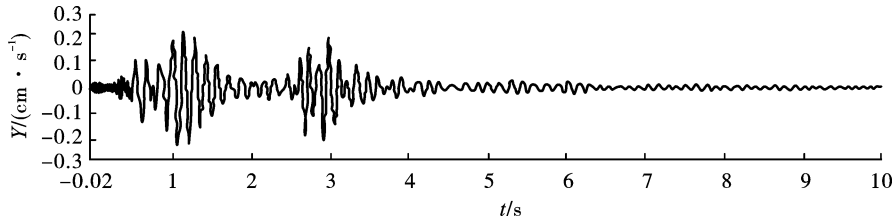


图7 测点1最大振动波形图

Fig. 7 Maximum vibration waveform of measuring point 1

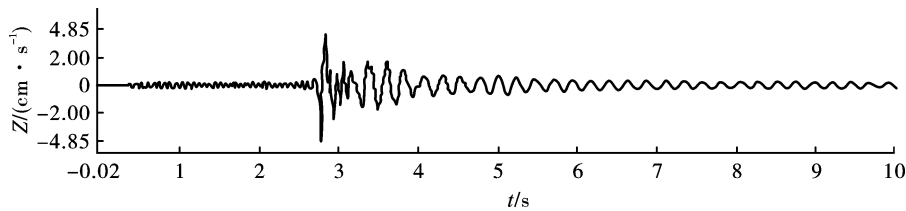


图8 测点2最大振动波形图

Fig. 8 Maximum vibration waveform of measuring point 2

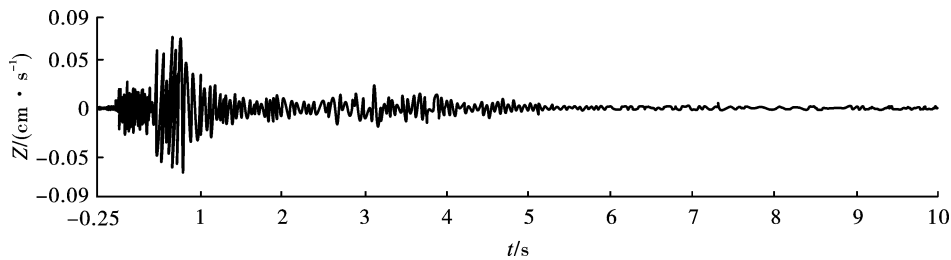


图9 测点3最大振动波形图

Fig. 9 Maximum vibration waveform of measuring point 3

在实测振动波形中,测点2只在 $t = 2.78$  s出现了一个塌落振动波峰,未见爆破振动波形,说明4#立柱虽然空间距离距爆破点最近,但爆破点介质的扰动途径至4#立柱已经衰减消耗殆尽。通过以上数据分析,证明爆破拆除石拱桥设计思路及相关参数的选取是科学、合理的。

#### 6.4 结语

1)喇叭形爆破切口以及起爆网路延时设计,爆破切口“由西向东”,排间“由南向北”的起爆顺序,有利于形成抗拉性较弱的石拱桥向南倾倒趋势,保证了桥体塌落不伤及距新桥0.8 m处的4#立柱及桥墩基础。

2)上移石拱桥东西两端爆破切口至中间腹拱,和增加靠近新桥4#立柱爆破切口,均匀分割桥体,有利于桥体在空中解体均匀,减小塌落振动<sup>[13]</sup>。

3)在新桥4#桥墩基础堆码渣石软土墙,可使塌落振动减小,塌落振动速度仅为没采取措施的 $1/4 \sim 1/3$ <sup>[1]</sup>,这一理论得到实践的验证。

#### 参考文献 (References)

- [1] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京:冶金出版社, 2012:692-693.
- [1] WANG Xu-guang. Blasting design and construction[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 689-693. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社, 2014
- [2] State Administration of Quality Supervision Inspection and. GB/6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [3] 中国工程爆破协会. 中国典型爆破工程与技术[M]. 北京:冶金工业出版社, 2006.
- [3] China Society of Explosive and Blasting. Typical blasting engineering and technology in China[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006. (in Chinese)

- 的影响研究[J]. 露天采矿技术, 2021, 36(1): 22-25.
- [6] HAN Liang, YAN Jie. Study on site vibration of open-pit coal mine and its influence on slope safety[J]. *Open-cast Mining Technology*, 2021, 36(1): 22-25. (in Chinese)
- [7] 谭清燕, 何慕平. 露天矿山爆破振动监测及分析方法研究[J]. *世界有色金属*, 2020(19): 152-153.
- [7] TAN Qing-yan, HE Mu-ping. Research on monitoring and analysis method of blasting vibration in open-pit mine [J]. *World Nonferrous Metals*, 2020(19): 152-153. (in Chinese)
- [8] 阳生权, 张家辉, 吕中玉, 等. 较大高程差迎波坡面爆破地震地形效应分析[J]. *工程爆破*, 2021, 27(1): 22-28.
- [8] YANG Sheng-quan, ZHANG Jia-hui, LV Zhong-yu, et al. Analysis of the seismic topographical effect of blasting on the upside-wave slope with large elevation difference[J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(1): 22-28. (in Chinese)
- [9] 黄伯强, 李启才. 带交互作用的双因素方差分析的线性回归建模[J]. *统计与决策*, 2021, 37(1): 10-15.
- [9] HUANG Bo-qiang, LI Qi-cai. Linear regression modeling of two-factor analysis of variance with interaction[J]. *Statistics and Decision*, 2021, 37(1): 10-15. (in Chinese)
- [10] 孙冰, 罗志业, 曾晟, 等. 爆破振动影响因素及控制技术研究现状[J]. *矿业安全与环保*, 2021, 48(6): 129-134.
- [10] SUN Bing, LUO Zhi-ye, ZENG Sheng, et al. Research status of blasting vibration influencing factors and control technology[J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2021, 48(6): 129-134. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方

(上接第 138 页)

- [4] 曹跃, 庞端根, 杨昌森, 等. 大型石拱桥坍塌爆破拆除[J]. *爆破*, 2005, 22(2): 61-63.
- [4] CAO Yue, PANG Duan-gen, YANG Chang-sen, et al. Demolition of a large stone arch bridge by collapse blasting[J]. *Blasting*, 2005, 22(2): 61-63. (in Chinese)
- [5] 林梅玲. 公路石拱桥爆破拆除施工技术[J]. *交通科技与经济*, 2006, 34(2): 86-199.
- [5] LIN Mei-ling. Construction technology of dismantlement and blasting for a stone arch bridge [J]. *Technology Economy in Areas of Communication (TEAC)*, 2006, 34(2): 86-199. (in Chinese)
- [6] 吴远林, 詹振铨, 池恩安. 兴钛石拱桥爆破拆除的数值模拟研究[J]. *工程爆破*, 2013, 19(3): 43-44.
- [6] WU Yun-lin, ZHAN Zhen-qiang, CHI En-an. Numerical simulation research of blasting demolition of xingtai stone arch bridge[J]. *Engineering Blasting*, 2013, 19(3): 43-44. (in Chinese)
- [7] 孙永, 李中辉, 李健飞, 等. 复杂环境下分离立交桥控制爆破拆除[J]. *爆破*, 2020, 37(3): 95-98.
- [7] SUN Yong, LI Zhong-hui, LI Jian-fei, et al. Demolition blasting of large shaft ridge separation overpass in complex environment[J]. *Blasting*, 2020, 37(3): 95-98. (in Chinese)
- [8] 茆恒阳, 郑德明, 廖和平, 等. 复杂环境下 350 m 钢筋砼桥梁爆破拆除[J]. *爆破*, 2019, 36(4): 108-111.
- [8] MAO Heng-yang, ZHENG De-ming, LIAO He-ping, et al. Blasting demolition of a 350 m reinforced concrete simply supported beam bridge in complex environment[J]. *Blasting*, 2019, 36(4): 108-111. (in Chinese)
- [9] 蒋跃飞, 何贤辉, 刘桐, 等. 双侧紧贴运营新桥的大型桥梁爆破拆除技术[J]. *工程爆破*, 2019, 25(3): 32-34.
- [9] JIANG Yue-fei, HE Xian-hui, LIU Tong, et al. The blasting demolition technology of large-scale bridge in close proximity to bilateral new operational bridges [J]. *Engineering Blasting*, 2019, 25(3): 32-34. (in Chinese)
- [10] 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
- [10] State Administration of Quality Supervision Inspection and. GB/T17742—2008 The Chinese seismic intensity scale[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [11] 汪旭光, 于亚伦. 拆除爆破理论与工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [12] 王璞, 周卫华, 欧阳光, 等. 紧邻既有桥梁的大型钢筋混凝土拱桥爆破拆除[J]. *爆破*, 2020, 37(1): 108-112.
- [12] WANG Pu, ZHOU Wei-hua, OUYANG Guang, et al. Explosive demolition of large reinforced concrete arch bridge adjacent to existing bridges [J]. *Blasting*, 2020, 37(1): 108-112. (in Chinese)
- [13] 齐鹏, 尚修瑞, 刘川, 等. 复杂环境下跨路桥梁拆除爆破方案优化研究[J]. *爆破*, 2021, 38(3): 104-111.
- [13] QI Peng, SHANG Xiu-rui, LIU Chuan, et al. Optimization of blasting schemes for demolition of cross-road bridges in complicated conditions [J]. *Blasting*, 2020, 37(3): 104-111. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方