

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.017

## 复杂环境下跨路桥梁拆除爆破方案优化研究\*

齐鹏<sup>1</sup>,尚修瑞<sup>1</sup>,刘川<sup>2</sup>,张建华<sup>1</sup>,姜婷婷<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院,武汉 430070;2. 中铁十四局集团第四工程有限公司,济南 250002)

**摘要:** 福建省大井垄大桥因道路改造需爆破拆除,该桥梁为钢筋混凝土结构,长187 m,宽24 m,中间有5排墩柱,共6跨,跨径30 m,周围环境复杂,桥梁底面距离桥下马路最高达到29 m,需严格控制爆破飞石、爆破振动、触地振动等危害。通过理论分析并运用ANSYS/LS-DYNA数值模拟软件对对称起爆、单向起爆和中间起爆三个预选方案进行模拟,通过对比爆堆范围和触地振动大小,发现中间起爆方式效果最好。通过对比不同排间延期时间的模拟结果,对原设计的短延期爆破方案进行优化,最终采用中间起爆长延期的爆破方案。同时采用预铺缓冲层、多层缠绕防护和砂土堤防护等措施来控制爆破危害。现场爆破结果表明:采用优化方案和振动控制措施后取得了良好的爆破效果,大桥实际爆堆形态与模拟结果大致吻合,各监测点的峰值振动速度与模拟结果较为接近,对周围重要设施的影响均符合要求。

**关键词:** 桥梁;拆除爆破;数值模拟;触地振动;控制措施

**中图分类号:** TD746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)03-0104-09

## Optimization of Blasting Schemes for Demolition of Cross-road Bridges in Complicated Conditions

QI Peng<sup>1</sup>, SHANG Xiu-ru<sup>1</sup>, LIU Chuan<sup>2</sup>, ZHANG Jian-hua<sup>1</sup>, JIANG Ting-ting<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. China Railway 14th Bureau Group 4th Engineering Co., Ltd., Jinan 250002, China)

**Abstract:** The Dajinglong bridge in Fujian province needs to be demolished by blasting due to road reconstruction, which is a reinforced concrete structure with length of 187 m and width of 24 m. There are 5 rows of piers and 6 spans, and span length is 30 m. The surrounding conditions are complicated. The maximum vertical distance between the bridge and the road under the bridge is 29 m. It is necessary to accurately control the hazards such as blasting flying rock, blasting vibration, and touch ground vibration. Through theoretical analysis and numerical simulation with ANSYS/LS-DYNA to simulate three pre-selected schemes, symmetrical initiation, one-way initiation and intermediate initiation. Comparing the blasting pile and the magnitude of the touch ground vibration, it is found that the intermediate initiation method is the best scheme. By comparing the simulation results of the delay time between different rows, the original design of the short-delay blasting scheme was optimized, and finally the blasting scheme with intermediate initiation and long-delay time was adopted. At the same time, measures such as pre-paved buffer layer, multi-layer winding protection and sand embankment protection are adopted to control blasting hazards. The on-site blasting outcomes show that good blasting results have been achieved after adopting the optimized scheme and vibration control measures. The actual blast pile shape of the bridge is roughly consistent with the simulation results. The peak vibration velocity of each monitoring point is relatively close to the simulation results, and meets the requirements of the surrounding important facilities.

**Key words:** bridge; demolition blasting; numerical simulation; touch ground vibration; control measures

近年来我国城市化进程不断加快,存在大量高层楼房、烟囱和桥梁等建(构)筑物需要拆除<sup>[1]</sup>,且相比于人工拆除和机械拆除,爆破拆除方式具有经济、高效等特点而应用最为广泛<sup>[2]</sup>。在城市拆除爆破中,由于现代待拆建(构)筑物以体积大、质量大、高度高的居多且爆区环境通常较为复杂,建(构)筑物在坍塌解体时具有较大重力势能,塌落触地会形成较大地震效应,使得因建筑物解体坍塌的触地振动产生较大危害<sup>[3-5]</sup>。目前,国内对普通楼房的拆除爆破的研究已经较为成熟,但由于桥梁本身结构的特点,桥梁的拆除爆破与其它建(构)筑物相比具有一定的特殊性。

近几年有不少学者针对桥梁的拆除爆破做了许多研究工作。谢先启等<sup>[6]</sup>、贾永胜<sup>[7]</sup>、叶海旺等学者在城市桥梁拆除爆破的关键控制技术取得了许多成果<sup>[8]</sup>,杨永强<sup>[9]</sup>、王璞<sup>[10]</sup>、季杉等在桥梁拆除爆破塌落振动的监测和振动影响范围等方面做了大量研究<sup>[11]</sup>,王新生<sup>[12]</sup>、茆恒阳等学者在桥梁拆除爆破的危害控制措施上做了大量工作<sup>[13]</sup>,但上述学者对桥下重点设施的防护和爆破方案的优化上涉及较少。以福建浦城大井垄大桥拆除爆破为例,充分考虑桥梁周围各种复杂条件,通过数值模拟试验设计最优爆破方案,提出具有针对性的现场爆破危害防护措施,取得良好的爆破效果。为复杂环境下跨路桥梁拆除爆破工程的精细化施工以及重点设施的防护工作提供了一定的参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

大井垄大桥位于福建省浦城(闽浙界)至南平高速公路B5合同段,始建于2008年,至今已使用11年,因建阳互通连接线高速公路改造工程需将其爆破拆除。大桥全长187 m,桥面宽24 m,左右分两幅,主桥从浦城至南平有1~5#号桥墩,共6跨,共6孔,跨径为30 m,上部采用两联 $4 \times 25$  m 预应力T梁,立交桥结构如图1。

### 1.2 周边环境

大井垄大桥位于城乡结合处,四周情况较为复杂,大桥东邻城市,西邻乡镇,东侧约273 m处有居

民楼,西侧有密集居民区距离最近一处建筑物仅为72 m,立交桥下方靠近南平侧有高压线变压器、电缆,桥上也有电缆,桥下横穿一条马路,且沿马路方向埋有军用光缆。周围环境如图2。

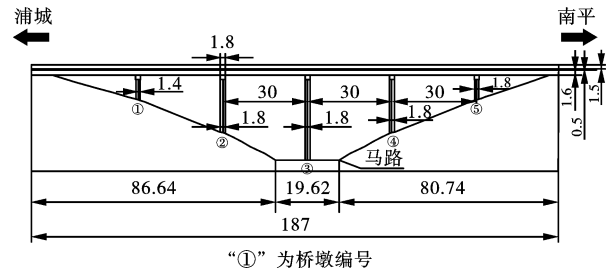


图1 大桥结构图(单位:m)

Fig. 1 Bridge structure drawing(unit:m)

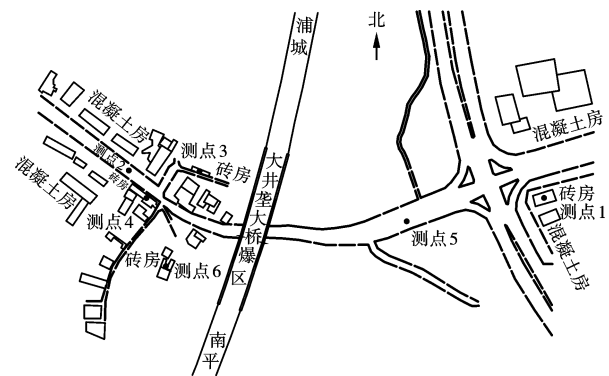


图2 桥梁周围环境平面示意图(单位:m)

Fig. 2 Environmental map around the bridge(unit:m)

### 1.3 工程难点

- 1) 桥梁底面距离桥下马路最高达到29 m,且爆破体重量大、落差大、振动大,危险系数高。
- 2) 桥体的塌落方向、爆破飞石等爆破施工控制难度较大。
- 3) 桥梁四周情况复杂居民密集且下部道路车辆人流密集,临时交通管制压力和难度巨大。
- 4) 桥下的重要设施防护难度大。
- 5) 既要减小爆破粉尘又要减小后期机械破碎的工作量,因此爆堆的块度要控制在一定范围内,对爆破技术的要求较高。

## 2 爆破方案选择及其优化

### 2.1 爆破方案初选

由于大桥周围环境复杂以及充分考虑据业主对工期、安全和技术的要求,拟采用机械拆除结合控制爆破的联合拆除方式进行施工。爆破前先对桥体表面结构和爆区周围重要设施进行预拆除,然后采用分段原地坍塌爆破方案施工。先爆破拆除1#~5#号桥墩,使上部桥体结构依次逐跨塌落,再进行机械

收稿日期:2021-04-06

作者简介:齐鹏(1995-),男,目前为武汉理工大学资源与环境学院采矿系在读硕士研究生,主要从事采矿、爆破、安全等方面研究工作,(E-mail)283782668@qq.com。

通讯作者:姜婷婷(1985-),女,博士、讲师、硕导,从事爆炸效应及其防护、岩土工程等方面的教学和科研工作,(E-mail)406601819@qq.com。

基金项目:青年自然科学基金(51804263)

二次解小和清运工作。

### 2.2 爆破关键参数

#### 2.2.1 爆破高度

根据拆除爆破“失稳原理”，对桥梁的关键承重构件进行爆破，使其失稳并在重力作用下坍塌。大井堑大桥地表以上的主要承重结构为 1~5#桥墩以及 0#台至 6#台，0#台采用柱式台，6#台采用肋板台，只要用爆破法炸毁一定高度的 1~5#墩柱，桥梁就会在自重作用下坍塌。参考压杆失稳原理，对爆破高度进行理论计算，可采用以下经验公式计算钢筋混凝土立柱的爆破高度<sup>[14]</sup>。

$$H = K(B + H_{\min}) \quad (1)$$

式中： $K$ 为爆高系数，常取 1.5~2.0； $B$ 为立柱截面边长； $H_{\min}$ 为立柱失稳的最小破坏高度， $H_{\min}$ 的取值范围为  $(30 \sim 50)d$ 。代入上式得：立柱的最小破坏高度为 2.7 m，为提高倒塌的可靠性爆破高度实取 3 m。

考虑桥梁上部构件在坍塌过程中要有一定的触地冲量，使桥体各构件之间相互脱开解体，便于桥梁坍塌后的二次破碎工作。考虑到部分墩柱中间有系梁，根据立柱长度不同，将 2、3、4#立柱上爆破区段分为两段，下段距离地面 0.5 m 以上 4 m，上段距离系梁 0.5 m 以上 4 m，1、5#立柱无系梁，爆破位置距离地面 0.5 m 以上 3 m，爆破具体位置如图 3 所示。

#### 2.2.2 爆破参数

由于桥梁立柱分为有系梁和无系梁两种类型，不同类型的立柱直径不同。其中 2、3、4#立柱为有系梁直径为 1.8 m，1、5#立柱无系梁直径为 1.4 m，参考以往爆破经验以立柱直径  $d_{\text{立柱}}$  为 1.8 m 的 2#

立柱为例进行设计。



图 3 桥梁各立柱的爆破位置示意图(单位:m)  
Fig. 3 Schematic diagram of blasting position of bridge columns(unit:m)

- 1) 炮孔深度  $L = (0.6 \sim 0.8) \times d_{\text{立柱}} = (0.6 \sim 0.8) \times 180 = (108 \sim 144)$  cm, 实取 135 cm。
- 2) 最小抵抗线  $W$  实为 40 cm。
- 3) 孔距  $a = (1.0 \sim 1.2)W = (40 \sim 48)$  cm, 实取 40 cm。
- 4) 排距  $b = S/a = 50$  cm(有多排炮孔时,  $S$  为每个炮孔的负担面积, 参考以往经验  $S$  取  $0.2 \text{ m}^2$  爆破效果最好)。
- 5) 炸药单耗  $k$  常取  $1.5 \sim 2.2 \text{ kg/m}^3$ , 实取  $1.8 \text{ kg/m}^3$ 。

炮孔直径均为 40 cm, 装药结构均采用连续装药结构, 炸药品种均为 2 号岩石乳化炸药。按设计药量将炸药卷装入炮孔, 每个炮眼均装 1 发电子数码雷管。采用正向起爆法将炸药卷装在孔内, 两种类型立柱的装药结构如图 4 所示, 具体爆破参数如表 1 所示。

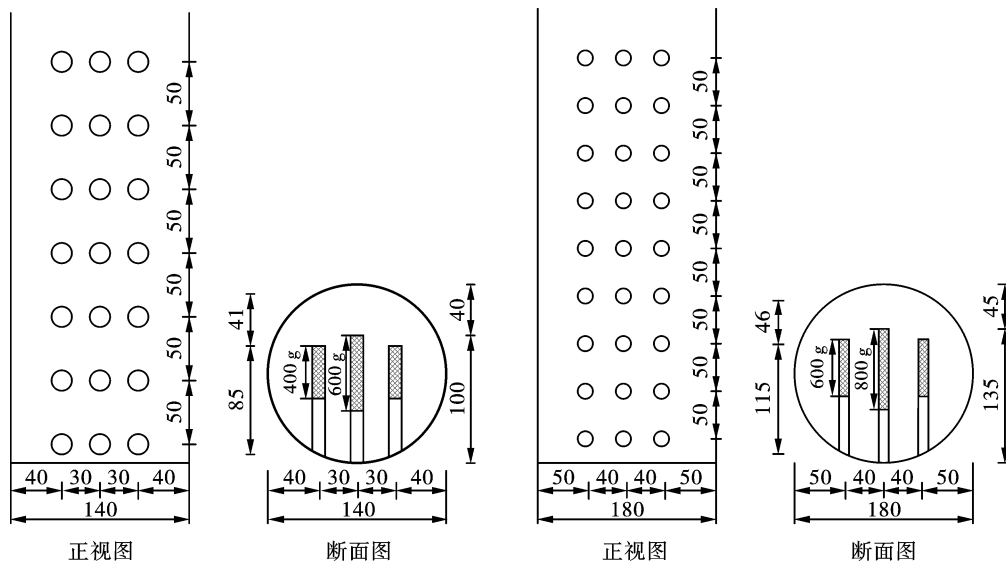


图 4 桥梁各立柱的炮孔位置示意图(单位:cm)

Fig. 4 Schematic diagram of blasthole location of bridge columns(unit:cm)

表 1 两种尺寸桥柱的爆破参数

Table 1 Blasting parameters of two sizes of bridge columns

墩柱/ mm	孔径/ mm	最小抵抗线 <i>w</i> /cm	孔距 <i>a</i> / cm	排距 <i>b</i> / cm	孔深 <i>L</i> (主/辅)/cm	单耗 <i>k</i> / ( $g \cdot m^{-3}$ )	单孔药量 <i>q</i> (主/辅)/g
140	40	40	30	50	100/85	2121	600/400
180	40	40	40	50	135/115	1800	800/600

2.2.3 爆破网路

由一个起爆器连接两个子起爆器,两个子起爆器分别引出起爆主线,分别置于桥梁左幅和右幅的下方,将左幅和右幅炮孔的数码雷管分别连接在起爆主线上,初定方案起爆网路和延期时间如图 5 所示。

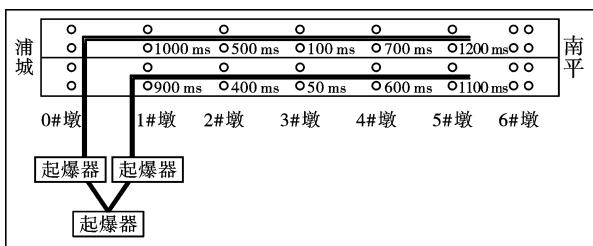


图 5 初定方案起爆网路示意图(单位:ms)

Fig. 5 Schematic diagram of initiation network for preliminary scheme(unit:ms)

2.3 爆破方案优化

2.3.1 起爆顺序优化

为探究在相同的延期时间下采用何种起爆顺序能获得最好的爆破效果,预选出对称起爆法(由桥体两侧起爆向中间传爆)、单向起爆法(从桥体一侧起爆向另一侧传爆)和中间起爆法(由桥体中间起爆并向两侧传爆)三种起爆顺序的方案。利用 ANSYS/LS-DYNA 软件采用上述图 5 中的延期时间对上述三种不同起爆顺序的方案进行数值模拟,采用整体式模型对钢筋混凝土结构进行建模,桥梁材料选用 \* MAT\_BRITTLE\_DAMAGE, 单元类型为 SOLID164,采用六面体网格划分,使用关键字 \* LOAD\_GRAVITY\_PART 给桥梁施加重力,使用关键字 \* ADD\_EROSION 删除单元模拟爆破缺口的形成,建立如图 6 所示的模型,并赋予模型不同的参数进行模拟计算。



图 6 桥梁模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of bridge model

1) 起爆顺序对爆堆的影响

为研究起爆顺序对桥体爆破拆除所形成爆堆大小的影响,在后处理软件 LS-Prepost 中分别导出三种爆破方案的爆堆,如图 7 所示,三种起爆顺序方案具体的爆堆参数如表 2 所示。

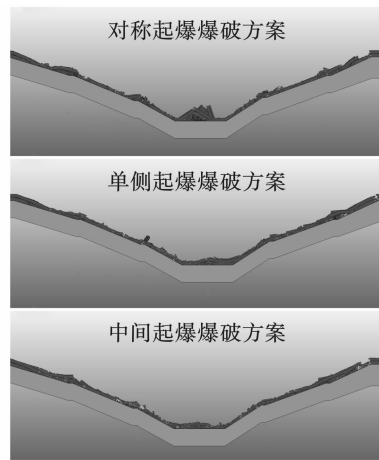


图 7 三种起爆方式的爆堆图

Fig. 7 Explosion pile diagram of three initiation modes

表 2 三种爆破方案的爆堆参数

Table 2 Blasting parameters of three blasting schemes

方案	爆堆长度/m	爆堆宽度/m	爆堆最 高度/m	坍塌 时间/t
对称起爆爆破方案	184.3	24.6	7.1	3.25
单向起爆爆破方案	186.5	26.0	4.2	3.55
中间起爆爆破方案	188.6	25.2	3.5	3.75

通过图 7 和表 2 可知:若只考虑爆堆因素时,中间起爆的爆破方案效果最优。三种起爆方式中,对称起爆爆破方案的效果最不理想,相较于其他两种方案,其爆堆堆叠高度过高且破碎效果较差;受地形因素影响,三种起爆方式所产生的爆堆长度和宽度的差距不太明显。因此,若此次拆除爆破采用对称起爆的起爆方案,将会导致爆堆堆叠过高,甚至爆破废墟块度过大而不利于二次破碎与装运。

2) 爆破顺序对触地振动的影响

建筑物在拆除爆破过程中会产生塌落振动和爆破振动,而塌落振动远大于爆破振动,因此实际上通常只考虑塌落振动对建筑物的影响。以下对不同爆



现场地面情况的模型,在模型中对应现场重点防护对象的区域选取测点。模型中测点位置如图9所示,测点1的位置对应桥西侧4层楼,距离爆区中心90 m;测点2的位置对应桥西侧七层楼,距离爆区中心160 m;测点3的位置对应桥西侧岔路口,距离爆区中心120 m;测点4的位置对应桥东侧西区华府,距离爆区中心280 m。各测点垂直方向最大振动速度如表6所示。

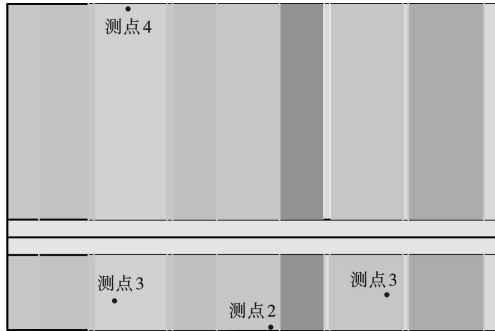


图9 模型中各测点的示意图

Fig. 9 Schematic diagram of each measuring point in the model

表6 三种延期时间模拟方案的测点最大振动速度  
Table 6 Maximum vibration velocity of measuring points in three delay time simulation schemes

方案	测点1/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	测点2/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	测点3/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	测点4/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
齐发爆破方案	4.25	3.86	4.06	1.24
原设计短延期爆破方案	2.76	2.41	2.67	0.86
优化长延期爆破方案	0.32	0.49	0.54	0.11

理论上若只考虑延期时间时,在同种爆破方案中(中间起爆爆破方案)采用齐发爆破和短延期的爆破方案的触地振动均会大于优化长延期方案,因为桥梁立柱的爆破越集中桥体构件的触地时间也会越集中,进而触地振动的叠加也会更明显,触底振动也会更大。图9和表6的数据也符合这一规律,由图9和表6可知:采用齐发爆破和短延期的爆破方案的触地时均有部分测点的触地振动均会超过安全规定值而采用长延期爆破方案测点的触地振则均符合安全规范。因此若只考虑延期时间时,采用从中间起爆的长延期微差爆破方案效果最佳。

综合上述模拟结果,此次爆破施工拟采用从中间起爆的长延期微差爆破方案。出于对桥下军用光缆和周围居民区的安全考虑,决定在采取优化爆破

方案的基础上还额外增加一些安全防护措施以最大程度保障重要设施的安全。

### 3 爆破安全防护措施

#### 3.1 爆破振动校核

拆除爆破和岩土爆破产生地震波的机制有所不同,但对于爆源附近的建筑物而言,地震波对他们的影响程度同样取决于起爆药量的大小、距爆源距离、地震波传播的介质等因素,通常采用的垂直振动速度计算公式计算爆破振动<sup>[15]</sup>

$$V = K'K(Q^{1/3}/R)^\alpha \quad (2)$$

式(1)中: $V$ 为振速; $K, K', \alpha$ 为爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数,根据爆破安全规程选取<sup>[15]</sup>;  $Q$ 为单段最大一次起爆药量; $R$ 为安全距离。由施工方案知,立柱采用C30混凝土,系梁采用C30混凝土,对应强度属于中硬岩石,对应爆破安全规程规定,取 $K' = 0.25, K = 250, \alpha = 1.8, R = 71.9 \text{ m}, Q = 64 \text{ kg}$ 。

带入公式(2)得到: $V = 0.345 \text{ cm/s}$ ,符合规程要求。

#### 3.2 飞石距离核算及飞石防护措施

##### 1) 飞石距离核算

拆除爆破采用飞石弹道公式<sup>[15]</sup>

$$V_0 = 20(Q^{1/3}/W)^2 \quad (3)$$

$$R_f = v_0^2/g \quad (4)$$

式中: $v_0$ 为个别飞石的初速, $\text{m/s}$ ;  $Q$ 为设计中单孔装药量; $W$ 为最小抵抗线; $g$ 为重力加速度; $R_f$ 为个别飞石最大飞散距离。

当采用飞石防治措施时,可参考熊炎飞的飞石速度修正公式<sup>[16]</sup>

$$R_f = (f_1 f_2 v_0^2 \sin^2 \alpha)/g \quad (5)$$

式中: $f_1$ 为介质系数,钢筋混凝土常取9.23~9.60;  $f_2$ 为防护系数共采取了五层防护,且有铁丝网,故防护系数取0.02;  $\alpha$ 为飞石抛射角,设计中取40°。将数据代入上式得 $R_f$ 为92 m。

##### 2) 飞石防护措施

爆破区域100 m范围内禁止任何人员及车辆停留,并对周围玻璃构建筑物进行预拆除或者重点保护;对于100 m范围内无法拆除的构(建)筑物,使用彩钢板进行围护,确保飞石不会影响到建筑物;对于桥面区域,采用先覆双层胶皮,然后压袋装土,最后覆盖草帘的防护措施;对于桥梁墩柱,则在爆破位置往两端各延伸0.5 m的区域采用由内到外双层草帘(10 cm以上)、单层铁丝网、单层草帘、单层竹排的顺序进行包被防护,桥梁墩柱区域防护措施如图10所示。

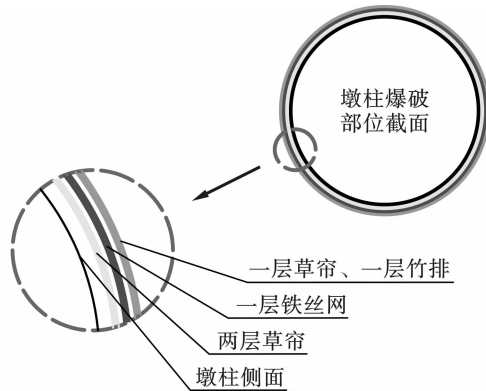


图 10 飞石防护措施示意图

Fig. 10 Schematic diagram of protection measures for flying stones

### 3.3 爆破触地振动核算及桥下重点对象防护

#### 1) 爆破触地振动核算

由于因采用微差爆破方式桥体每跨的触地时间不同计算每跨的触地振动较为复杂,为保险起见按照整体原地坍塌计算触地振动,利用公式(6)

$$V_i = k_i \left[ \frac{R}{(MgH/\sigma)^{1/3}} \right]^\beta \quad (6)$$

式中:  $V_i$  为塌落引起的地面振动速度;  $M$  为下落构件的质量,  $g$  为重力加速度,取  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $H$  为构件的塌落高度,取  $20 \text{ m}$ ;  $\sigma$  为地面介质的破坏强度,取  $10 \text{ MPa}$ ;  $R$  为观测点至冲击地面中心的距离(距桥最近的建筑物为桥梁西侧简易房,距离为  $84.3 \text{ m}$ ),取  $R = 84.3 \text{ m}$ ;  $k_i$  为塌落振动速度衰减系数,取值范围为  $3.37 \sim 4.09$ ;  $\beta$  为衰减指数,  $\beta$  范围为  $-1.66 \sim -1.80$ ,桥内钢筋和混凝土共  $10\,000 \text{ t}$  左右,单幅为  $5\,000 \text{ t}$ ,将上述数据代入公式(6)得  $V_i$  为  $1.41 \text{ cm/s}$ 。由此可知,当构筑物距离桥梁倒塌触地位置  $84 \text{ m}$  以上时,桥梁触地引发的振动小于  $1.5 \text{ cm/s}$ ,构建筑处于安全范围。

#### 2) 桥下重点对象防护

由于桥下情况复杂,桥下有军用光缆、电缆和马路,且桥梁悬空高度较高,为了最大限度的减小桥梁坍塌对桥下军用光缆和电缆的影响,决定采取以下安全防护措施:将爆破区域  $100 \text{ m}$  范围内所有能迁移的管线全部迁移;对无法迁移的军用光缆,采用先覆盖  $10 \text{ mm}$  钢板,再覆盖  $1.5 \text{ m}$  厚的沙土,最后在沙土上覆盖一层废旧轮胎的多重防护措施;对于桥下马路,充分考虑安全、经济等因素采取预铺设沙土缓冲层的保护措施;桥下各重点对象的防护措施如图 11 所示。

## 4 现场爆破效果分析

### 4.1 爆破过程

大桥于 2019 年 8 月 30 日晚间顺利起爆,采用

优化后的中间起爆长延期爆破方案,起爆  $2 \text{ s}$  后大桥按设计顺序逐跨解体坍塌,总共历时约  $6 \text{ s}$ 。桥体塌落解体较充分,实际爆破效果与数值模拟效果整体吻合,完全达到预期的爆破效果,爆破过程和数值模拟如图 12 所示。



图 11 桥下重点防护措施图

Fig. 11 Key protection measures under bridge

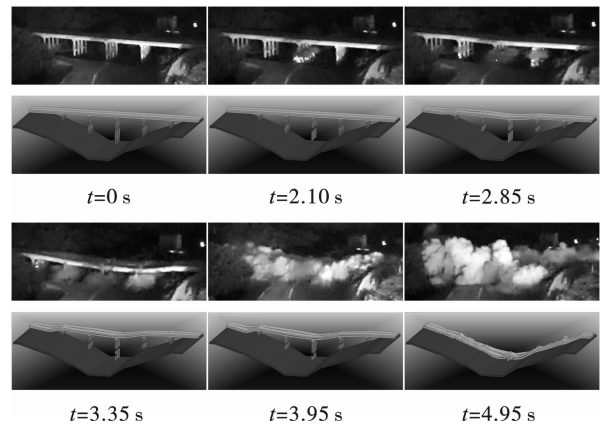


图 12 爆破过程及数值模拟对比图

Fig. 12 Key protection measures under bridge blasting process and numerical simulation comparison diagram

### 4.2 振动监测结果

此次检测共布置 6 个测点,选用 5 台 BP-00 型和 1 台 Blast-UM 型爆破振动测试仪,测点位置见图 2。测点 1 位于桥东侧西区华府,距离爆区中心  $280 \text{ m}$ ;测点 2 位于桥西侧公路,距离爆区中心  $200 \text{ m}$ ;测点 3 位于桥西侧 4 层楼,距离爆区中心  $90 \text{ m}$ ;测点 4 位于桥西侧七层楼,距离爆区中心  $160 \text{ m}$ ;测点 5 位于桥东侧起爆点,距离爆区中心  $160 \text{ m}$ ;测点 6 位于桥西侧岔路口,距离爆区中心  $120 \text{ m}$ ,测点位置见图 13,各测点的实测最大振动速度见表 7。

由表 7 可知:在实测中竖直方向振动速度通常最大,与模拟结果相比,实测结果中径向与切向振动速度峰值相对偏大,但垂向振动速度峰值两者基本吻合。

表7 三种延期时间方案实际各测点最大振动速度

Table 7 Actual maximum vibration velocity of each measuring point in three delay time schemes

编号	距离/m	X(水平径向)		Y(水平切向)		Z(垂直方向)	
		主频/Hz	振速/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主频/Hz	振速/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )	主频/Hz	振速/ ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
BP-001	280	3.51	0.06	3.42	0.0700	4.56	0.07
Blast-UM	200	7.32	0.05	5.32	0.0600	4.82	0.07
BP-003	90	9.35	0.14	8.95	0.1888	7.31	0.29
BP-004	160	16.72	0.06	6.73	0.0700	5.56	0.07
BP-005	160	5.37	0.06	5.90	0.0700	6.58	0.08
BP-006	120	6.14	0.07	6.27	0.0900	8.00	0.09

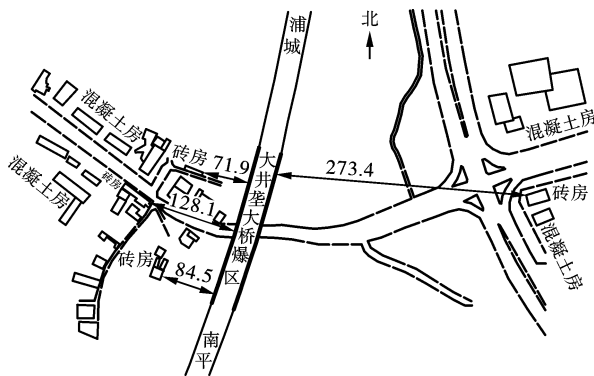


图13 爆破振动检测点布置示意图(单位:m)

Fig.13 Layout of blasting vibration detection points(unit:m)

## 5 结论

1)通过对跨路桥梁爆破拆除进行理论分析、计算及数值模拟,优选出了最符合工况的中间起爆的长延期微差爆破施工方案,安全高效的完成了爆破拆除任务。

2)对于周围复杂环境特别是靠近居民区且桥下有重要设施的跨路桥梁爆破拆除工程,可采取中间起爆的长延期微差爆破结合机械拆除的联合施工方案,还可采取调整炸药单耗、增加微差延期时间、铺设缓冲层、修建沙土堤、多层包被防护等安全措施来控制爆破危害。

3)将数值模拟的结果与实际爆破施工的各项数据进行对比,此次跨路桥梁拆除爆破的各项指标都符合相应的规程,本次拆除爆破所使用的各种减振技术取得很好减振效果,为类似拆除爆破工程提供了一定的参考价值。

## 参考文献 (References)

[1] 谢先启. 拆除爆破技术的发展与展望[J]. 爆破, 2019, 36(2):1-12.  
 [1] XIE Xian-qi. Development situation and trend of demolition blasting technology[J]. Blasting, 2019, 36(2):1-12. (in Chinese)

[2] 汪旭光. 中国工程爆破新进展[J]. 河北科技大学学报, 2009, 30(1):1-7.  
 [2] WANG Xu-guang. New progress and development of engineering blasting in China[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2009, 30(1):1-7. (in Chinese)  
 [3] 冯剑平. 桥梁结构的爆破拆除数值模拟优化研究[D]. 西安:长安大学, 2016.  
 [3] FENG Jian-ping. Numerical simulation and optimization of blasting demolition of bridge structures[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (in Chinese)  
 [4] 禹兵兵. 桥梁结构爆破拆除数值模拟的研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2018.  
 [4] YU Bing-bing. Research on numerical simulation of blasting demolition of bridge structures[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2018. (in Chinese)  
 [5] 张建华, 谌彪, 黄刚, 等. 卸荷槽对冷却塔拆除爆破的数值模拟研究[J]. 爆破, 2020, 37(3):122-128.  
 [5] ZHANG Jian-hua, CHEN Biao, HUANG Gang, et al. Numerical simulation research on demolition blasting of cooling tower by unloading slot[J]. Blasting, 2020, 37(3):122-128. (in Chinese)  
 [6] 谢先启, 贾永胜, 姚颖康, 等. 复杂环境下城市超长高架桥精细爆破拆除关键技术研究[J]. 中国工程科学, 2014, 16(11):65-71, 77.  
 [6] XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Study on key technologies of fine blasting demolition of urban super-long viaduct in complex environment[J]. Engineering Science, 2014, 16(11):65-71, 77. (in Chinese)  
 [7] 贾永胜, 谢先启, 李欣宇, 等. 建(构)筑物控制爆破拆除的仿真模拟[J]. 岩土力学, 2008(1):285-288.  
 [7] JIA Yong-sheng, XIE Xian-qi, LI Xin-yu, et al. Simulation of controlled blasting demolition of buildings (structures) [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(1):285-288. (in Chinese)  
 [8] 叶海旺, 余红兵, 周建敏, 等. 复杂环境下危桥控制爆破拆除[J]. 爆破, 2015, 32(1):116-120.  
 [8] YE Hai-wang, YU Hong-bing, ZHOU Jian-min, et al. Controlled blasting demolition of a dangerous bridge in a com-

- plex environment [J]. *Blasting*, 2015, 32 ( 1 ): 116-120. (in Chinese)
- [9] 杨永强,胡进军,谢礼立,等. 沌阳高架桥爆破拆除塌落引起的地面振动特征[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(5):110-114.
- [9] YANG Yong-qiang, HU Jin-jun, XIE Li-li, et al. Characteristics of ground vibration caused by blasting collapse of Zhuanyang viaduct [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(5):110-114. (in Chinese)
- [10] 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):107-112.
- [10] WANG Pu, ZHOU Wei-hua, OUYANG Guang, et al. The blasting demolition of a large reinforced concrete arch bridge adjacent to an existing bridge [J]. *Blasting*, 2020, 37(1):107-112. (in Chinese)
- [11] 季 杉,谢伟平,王 礼. 爆破振动与塌落触地振动特点及传播规律试验研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(11):195-201.
- [11] JI Shan, XIE Wei-ping, WANG Li. Experimental research on characteristics and propagation law of blasting vibration and ground-touching vibration [J]. *Vibration and Shock*, 2018, 37(11):195-201. (in Chinese)
- [12] 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.
- [12] WANG Xin-sheng, ZHANG Ying-cai. Study on key technology of blasting demolition of overpass on operating expressway [J]. *Blasting*, 2018, 35(4):84-89. (in Chinese)
- [13] 茆恒阳,郑德明,廖和平,等. 复杂环境下 350m 钢筋混凝土桥梁爆破拆除[J]. *爆破*, 2019, 36(4):108-111.
- [13] MAO Heng-yang, ZHENG De-ming, LIAO He-ping, et al. Demolition of a 350m reinforced concrete bridge by blasting in complex environment [J]. *Blasting*, 2019, 36(4):108-111. (in Chinese)
- [14] 齐世福,夏裕帅,谢兴博,等. 复杂环境下高大楼房控制爆破技术[J]. *工程爆破*, 2015, 21(1):20-24, 4.
- [14] QI Shi-fu, XIA Yu-shuai, XIE Xing-bo, et al. Controlled blasting technology for tall buildings in complex environment [J]. *Engineering Blasting*, 2015, 21(1):20-24, 4. (in Chinese)
- [15] GB 6722—2014 爆破安全规程 [S]. 北京:中国标准出版社, 2015.
- [16] 熊炎飞,董正才,王 辛. 爆破飞石飞散距离计算公式浅析[J]. *工程爆破*, 2009, 15(3):31-34.
- [16] XIONG Yan-fei, DONG Zheng-cai, WANG Xin. Analysis of calculation formula for flying distance of blasting flying rock [J]. *Engineering Blasting*, 2009, 15(3):31-34. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚

(上接第 44 页)

- [6] FOURNEY W L, BARKER D B, HOLLOWAY D C. Model studies of explosive well stimulation techniques [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*, 1981, 18(2):113-127.
- [7] MOXON N T, MEAD D, RICHARDSON S B. Air-decked blasting techniques: some collaborative experiments [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(5):25-30.
- [8] 刘江超,高文学,王林台,等. 水封爆破装药结构优化数值分析及其应用[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(9):57-62, 96.
- [8] LIU J C, GAO W X, WANG L T et al. Numerical analysis on the charge structure optimization under hydraulic blasting and its application [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(9):57-62, 96. (in Chinese)
- [9] 李启月,边志伟,郑 静,等. 预留光爆层水压爆破在大断面公路隧道施工中降低爆破危害的应用[J]. *矿冶工程*, 2019, 39(5):1-5.
- [9] LI Q Y, BIAN Z W, ZHENG J et al. Application of water pressure blasting with a reserved smooth blasting layer in the construction of large-section highway tunnel for mitigating blasting impacts [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(5):1-5. (in Chinese)
- [10] 万嗣鹏,陶铁军,陈二平,等. 小断面隧道快速掘进爆破方案优化研究[J]. *中国矿业*, 2020, 29(11):178-183.
- [10] WAN S P, TAO T J, CHEN E P et al. Study on optimization of blasting scheme for fast tunneling of small section tunnel [J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(11):178-183. (in Chinese)
- [11] 闻 磊,李夕兵,吴秋红,等. 花岗斑岩 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型参数研究[J]. *计算力学学报*, 2016, 33(5):725-731.
- [11] WEN L, LI X B, WU Q H, et al. Study on parameters of Holmquist-Johnson-Cook model for granite porphyry [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2016, 33(5):725-731. (in Chinese)
- [12] LSTC, LS-DYNA keyword user's manual [M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [13] 夏 祥,李海波,李俊如,等. 岩体爆生裂纹的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2006(11):1987-1991.
- [13] XIA X, LI H B, LI J R, et al. Numerical simulation of blast-induced cracks in rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006(11):1987-1991. (in Chinese)
- [14] 刘江超. 干燥饱和风化花岗岩动态力学特性及损伤演化规律研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2017.
- [14] LIU J C. Study on dynamic mechanical properties and damage evolution law of dry and saturated weathered granite [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)

英文编辑:黄 刚