

京港澳高速5号跨线天桥爆破拆除技术研究

邹鑫, 张爱卿*, 李宗洋, 杜正信

北华航天工业学院建筑工程学院, 河北 廊坊

收稿日期: 2026年5月25日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

文章以京港澳高速公路5号跨线刚架天桥爆破拆除为工程背景, 针对桥梁高次超静定结构特性与周边复杂环境, 开展控制爆破拆除技术研究。提出拱肋、斜撑、桥面三区毫秒微差起爆技术, 实现整体向内坍塌与充分解体; 构建高速公路路面与国防光缆一体化分层防护体系, 有效控制爆破飞石危害; 建立爆破振动与塌落振动监测。工程实践表明, 该爆破方案设计合理、安全可控, 可在12 h内完成爆渣清运与道路恢复, 可为同类运营高速公路上跨天桥爆破拆除提供技术参考。

关键词

爆破拆除, 刚架拱桥, 毫秒微差起爆, 振动控制, 安全防护, 高速公路

Research on Blasting Demolition Technology of Overpass No. 5 on Beijing-Hong Kong-Macao Expressway

Xin Zou, Aiqing Zhang*, Zongyang Li, Zhengxin Du

School of Civil Engineering and Architecture, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang Hebei

Received: May 25, 2026; accepted: June 17, 2026; published: June 26, 2026

Abstract

Taking the controlled demolition of Overpass No. 5 on the Beijing-Hong Kong-Macao Expressway as a case study, this research investigates controlled demolition techniques in response to the bridge's highly statically indeterminate structural characteristics and the complex surrounding environment. A millisecond time-delay detonation technique was proposed for three zones—the arch ribs, diagonal braces, and bridge deck—to achieve a controlled inward collapse and complete disintegration; an

*通讯作者。

integrated, layered protection system combining the highway pavement with national defense optical cables was established to effectively mitigate the hazards of flying debris from the blast; a monitoring system for blast and collapse vibrations was also implemented. Engineering practice has demonstrated that this blasting plan is well-designed, safe, and controllable, allowing for the completion of debris removal and road restoration within 12 hours. It provides a technical reference for the controlled demolition of similar overpasses on operational expressways.

Keywords

Blast Demolition, Rigid-Frame Arch Bridge, Millisecond-Delayed Detonation, Vibration Control, Safety Precautions, Expressway

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着国内交通基础设施的现代化升级，早期建成的大量老旧桥梁已难以满足当前的荷载与通行需求，其拆除工作已成为城市建设中的重要课题。钢架拱桥因其结构轻盈、跨越能力较强而曾被广泛应用，但其拱肋、桥面系与桥台构成的超静定结构体系也使得传统机械拆除方法面临周期长、安全性差、交通干扰大等突出难题。在此背景下，控制爆破技术以其高效、安全、经济的特点，成为此类结构拆除的首选方法。

国内外学者围绕爆破拆除方案开展了大量研究：Jangl 等、Shaojun 等[1][2]针对拱桥提出了聚能切割深孔爆破等爆破拆除方案。王新生等[3]利用自行设计的聚能切割器对锚入桥台内的钢筋进行预切割处理和控制爆破的方案拆除。林志鹏[4]以公路钢拱桥拆除工程为研究对象，提出机械与爆破相结合的拆除方案。苏龙庆[5]以钢管混凝土拱桥爆破拆除为背景，提出主拱拆除采用四点式爆破法，两侧边拱拆除采用多点爆破法的方案。董青青[6]以武英高速公路上拱形天桥为背景，研究了采用机械-人工预处理、微差控制爆破拆除的施工方案。郑选荣等[7]以连续梁桥局部桥跨为背景，对于上部箱梁提出在箱梁内部布置药包并注水，利用水的不可压缩性传递爆破压力，使混凝土结构充分破碎；而在下部桥墩的爆破时，则采用了延时分段起爆技术，使桥墩逐排倾斜倒塌。汪龙等[8]以双谷大桥(预应力混凝土 T 梁桥)为背景，提出“一次点火、分段起爆”的微差爆破拆除方法，使桥墩柱、上部结构整体原地坍塌。周世一[9]以东阿高速某上跨高架桥为背景，提出采用工业电子雷管对墩柱进行爆破，墩柱间延时控制在 200 ms，让墩柱整体原地坍塌。边祖光等[10]以衢州市叶家大桥(石拱桥)为背景，提出针对桥墩、墩墙、拱脚等关键受力节点进行爆破拆除。综上所述，现有研究多针对普通拱桥和其他桥梁的爆破拆除技术研究，而针对高速公路、周边建筑密集、浅埋重要管线三种条件下的刚架拱桥爆破拆除研究仍不够系统。

本文以京港澳高速 5 号跨线天桥为实例，提出“对受力结构进行分区失稳爆破拆除 + 一体化防护 + 双振动控制”成套技术，重点解决高次超静定结构瞬间坍塌、高速路面与国防光缆保护、爆破有害效应精准控制等关键难题，通过现场监测验证方案安全性与可靠性，以期同类复杂环境下上跨天桥爆破拆除工程提供实践借鉴。

2. 工程概况及难点

2.1. 工程概况

本次爆破拆除对象京港澳高速 5 号跨线天桥位于京港澳高速公路湖北境鄂豫界至军山段改扩建工程

K1048+550 处,沿城高线东西方向上跨京港澳高速。天桥由桥面系、拱肋、斜撑及两侧桥台组成,桥长 52 m,宽 9.3 m。桥面厚度 0.4 m,距离京港澳高速路面高 17.5 m。桥梁共 3 根拱肋,沿桥梁中心线对称布置,单根长 9.65 m,宽 0.7 m,厚度为 0.35 m。拱上斜撑长 4.34 m(单根),厚度为 0.35 m,宽 0.4 m。

同时天桥的周边环境也较为复杂,在天桥址的两侧居民房密集,天桥的东北侧与板房距离为 15 m,天桥的东南侧与民房最近距离为 96 m,天桥的西南侧与民房最近距离为 95 m,天桥的西北侧与民房最近距离为 100 m,如图 1 所示。经调查,5 号跨线天桥下方有国防光缆和运营收费光缆沿高速中央隔离带下方通过,其埋深大约为 0.3 m。5 号跨线天桥桥上管线等设施较为密集,多为架空电线和通信管线。见图 1。



Figure 1. Aerial view of the area surrounding Overpass No. 5
图 1. 5 号天桥周边环境航拍图

2.2. 5 号跨线天桥爆破拆除的工程难点

- (1) 此次桥梁为高次超静定刚架结构,传统爆破技术难以实现瞬间整体失稳,需精准破坏关键受力体系。
 - (2) 爆破准备工作期间,京港澳高速公路实行全幅双向通行,施工组织难度大。
 - (3) 爆破区域地处高速交通要道,车流量大,要最大限度地降低爆破有害效应对高速路面、国防光缆、通信管线以及周边民房的影响,安全要求极高。
 - (4) 为保证桥头边坡的稳定性,桥台需要保留。
- 同时需实现桥体充分解体,满足 12 h 快速清渣恢复通行要求。

3. 爆破方案设计

3.1. 5 号天桥总体爆破方案

5 号跨线天桥的结构属于一个高次超静定结构[11],整个结构的稳定性由拱肋、桥面与斜撑进行支撑,拱肋的拱脚和拱顶为 5 号天桥提供了主要的水平推力和强大的结构性约束,斜撑为 5 号跨线天桥提供了轴向支撑约束和抗侧移刚度,桥面板可以起到平衡拱脚水平推力的作用和提供横向支撑防止其他承重构

件失稳。拱肋、桥面与斜撑的共同作用下构成了 5 号跨线天桥稳定性的根基。当拱肋、桥面与斜撑任一主要承重结构突然受到巨大爆破冲击力的时候都仅仅只是会引发 5 号天桥结构的内力重分布，但是 5 号跨线天桥本身不会瞬间坍塌。为此，本文结合国内桥梁爆破拆除成功案例[12][13]并提出关键截面同步破坏 + 毫秒微差有序起爆思路：在拱肋、斜撑、桥面布设炮孔，采用工业电子雷管三区毫秒微差起爆[14][15]，一次性形成大量塑性铰，使结构由超静定体系转化为几何可变体系，在自重作用下整体向内坍塌、充分解体，确保坍塌方向可控、解体充分。总体爆破方案如图 2 所示。

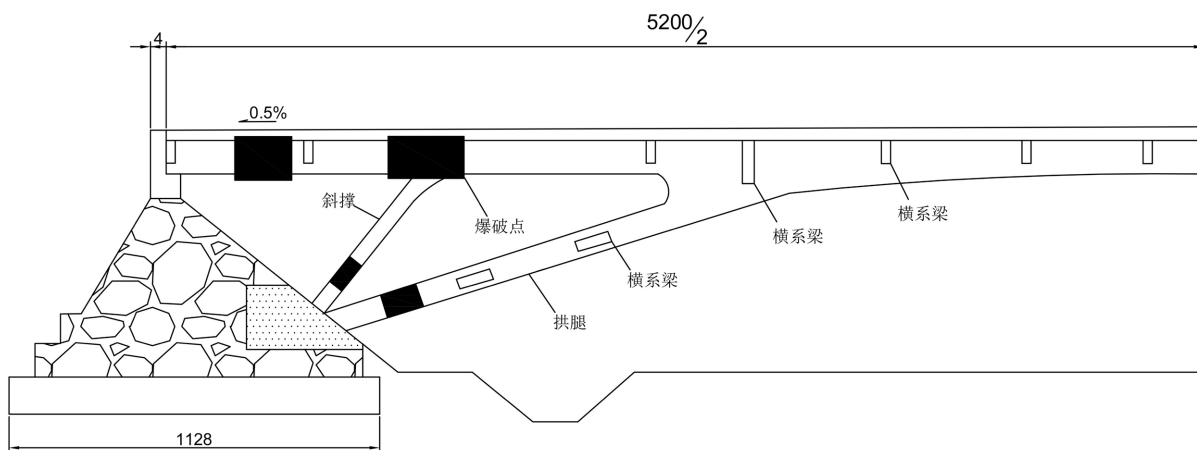


Figure 2. Schematic diagram of the overall blasting plan for Overpass No. 5 (Unit: cm)
图 2. 5 号跨线天桥总体爆破方案示意图(单位: cm)

3.2. 5 号天桥爆破参数

3.2.1. 炮孔布置

5 号跨线天桥桥面炮孔布置在拱顶轴线部位，拱顶横向布置 3 排炮孔，布置在桥面与拱肋重合部位，孔排距均为 35 cm。炮孔沿轴线布置，炮孔方向为垂直孔。考虑钻孔方便，斜撑及拱腿上沿轴线方向布置数排水平孔，炮孔矩形布置，孔排距 18~20 cm，孔深 25 cm。如图 3、图 4 所示。

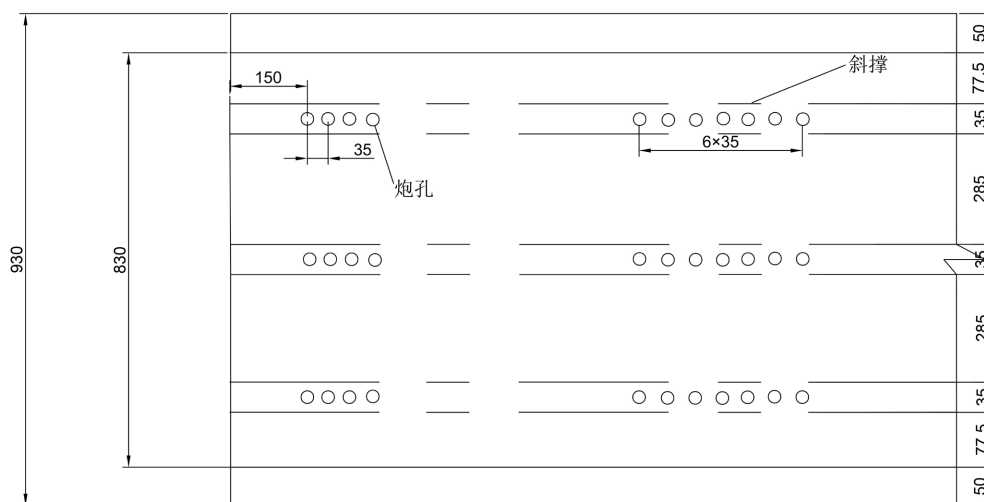


Figure 3. Layout diagram of boreholes on the deck of Overpass No. 5 (Unit: cm)
图 3. 5 号跨线天桥桥面炮孔布置图(单位: cm)

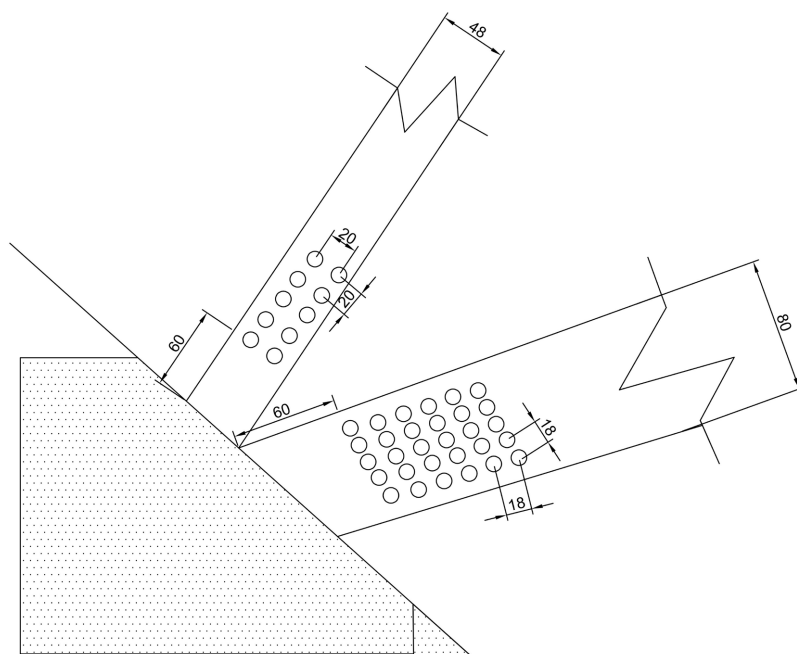


Figure 4. Layout diagram of boreholes in the arch ribs and diagonal braces of Overpass No. 5 (Unit: cm)
图 4. 5 号跨线天桥拱肋及斜撑炮孔布置图(单位: cm)

3.2.2. 孔网参数

5 号跨线天桥各主要构件孔网参数见表 1。

Table 1. List of blasting parameters for Overpass No. 5
表 1. 5 号跨线天桥爆破参数表

构件名称	孔径 (mm)	孔距 a (cm)	排距 b (cm)	孔深 l (cm)	单耗 (g/m ³)	单孔药量 q (g)	孔数 (个)	单孔药量 (g)	总装药量 (kg)	装药结构
拱肋	40	18	18	25	1818	50	144	50	7.2	连续装药
斜撑	40	20	20	25	1756	50	60	50	3	连续装药
桥面	40	35	/	43	1667	150	66	150	9.9	连续装药
合计							270		20.1	

3.3. 5 号桥起爆网路设计

采用工业电子雷管起爆网路，总体延期方案为：共分为 3 个爆破区域，拱肋底部为第 1 起爆区域，起爆时间为 50 ms；斜撑为第 2 起爆区域，起爆时间为 100 ms；桥面为第三起爆区域，起爆时间为 200 ms。起爆延期时间如图 5 所示，该延时顺序可先破坏主承力结构，再解除支撑，最后使桥面失稳坠落。该天桥设计使用的雷管数量约 270 发，需使用 1 台子机起爆器进行组网。见图 5。

4. 爆破实施与安全防护

4.1. 机械预切割

在爆破前，使用液压碟锯机械，沿桥台与桥面连接处进行彻底切割，切断钢筋连接，确保桥台完全分离并得以保留。同时清理产生的建筑垃圾，确保作业面整洁。

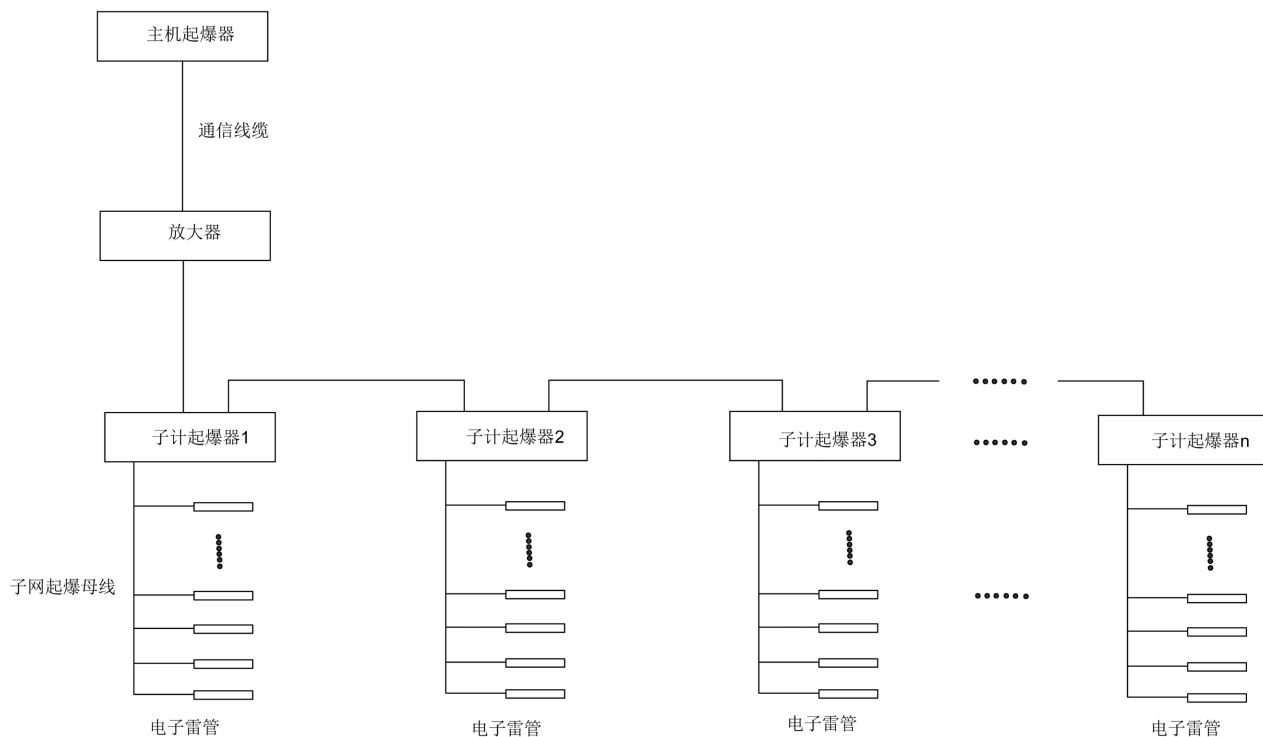


Figure 5. Schematic diagram of the network connections for Overpass No. 5
图 5. 5 号跨线天桥网路连接示意图

4.2. 钻孔作业与近体防护措施

使用直径 40 mm 的液压钻机进行钻孔。拱肋、斜撑：钻水平孔，孔深 25 cm。桥面：钻垂直孔，孔深 43 cm，孔距 35 cm (沿拱顶轴线布置 3 排)。钻孔期间，下方高速公路仍然通行。为保证钻孔期间过往车辆的安全，在天桥下方悬挂全覆盖安全网布，防止桥梁风化、钻孔作业产生的碎块脱落对过往车辆造成损坏。

4.3. 粉尘控制

- (1) 在施工过程中，采用洒水喷淋及移动式水炮机等方式对施工作业面进行降尘，以达到粉尘控制的目的。
- (2) 起爆前对近体防护的密目网洒水，通过在密目网上形成的水珠帘，吸附粉尘。
- (3) 根据现场施工需要，爆破部位挂设降尘水袋。

4.4. 个别飞散物防护措施

个别飞散物防护采用“覆盖防护与近体防护相结合”的综合防护方案，具体措施如下：

- (1) 优化设计，严格控制药量，提高炸药能量利用率，使其主要用于破碎介质，最大程度减少个别飞散物。
- (2) 覆盖防护：所有爆破立柱(桥体的梁、拱肋)采用多层包裹材料进行包裹。
- (3) 近体防护：加强对装药部位的近体防护，对装药部位采用 2 层密目安全网进行悬挂式覆盖，以防飞石的溢出。
- (4) 对于桥面爆破，在桥面上采用沙袋覆盖防护。

4.5. 高速公路路面与管线防护

为保证桥体构件塌落冲击时不损害路面和中间隔离带光缆,在桥体投影面下方采用多种防护方式。对于路面,在路面铺设钢板及彩条布后,主要用灌土沙袋、沙土、竹跳板等材料进行分层组合防护,填筑高度不低于 1 m,坡度 1:1.5。对于中间隔离带光缆,将中间波形板进行临时拆除后,先采用 1 层沙袋进行铺设,然后再铺设钢板,钢板上方再填筑高度不低于 1 m 的土堆。

5. 现场试验方案与监测结果分析

5.1. 测点布置

为了全面监控爆破、塌落振动[16]对邻近保护对象的影响,避免民事纠纷或为处理民事纠纷提供法律依据,拟选取爆破振动监测点设于东北侧板房(距爆心 15 m)、东南侧民房(96 m)、西南侧民房(95 m)、西北侧民房(100 m)的基础处,以及国防光缆路由正上方地面(距爆心最近处约 0 m);如图 6 所示。



Figure 6. Schematic diagram of measurement point layout for Overpass No. 5
图 6. 5 号跨线天桥测点布置示意图

5.2. 监测时间、监测频率

整个 5 号天桥爆破拆除全过程都对东北侧板房、东南侧民房、西南侧民房、西北侧民房进行现场检测,5 号天桥爆破拆除前 1 天进行各监测设备调试,起爆前后(-5 min 至+30 min)进行高频采集数据。5 号天桥爆破拆除前后对东北侧板房、东南侧民房、西南侧民房、西北侧民房进行 1 次/2 小时的人工测量;同时爆破振动、塌落振动检测数据在爆破瞬间采用不低于 1000 Hz 的采样率进行连续检测。

5.3. 监测结果分析

(1) 爆破振动速度

根据《爆破安全规程》(GB 6722-2014) [17]规定,爆破振动速度按下式计算[18]-[20]

$$V = k \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中, V 为爆破振动速度, cm/s; Q 为单响最大起爆药量, kg; R 为保护目标至爆区中心距离, m; k 为与地质条件有关的系数, α 为地震波衰减系数,本工程取 $k = 32.1$, $\alpha = 1.54$ 。

选取 ZK1048 + 550 刚架拱桥(5 号桥)四周最近民房进行安全校核,爆破振动速度实测值及安全评价

见表 2。

Table 2. Predicted and measured vibration velocity values and safety assessment for the blasting of Overpass No. 5
表 2. 5 号跨线天桥爆破振动速度预测值、实测值及安全评价

保护目标	距离 R(m)	k 、 α 值	Q_{\max} (kg)	$V_{\text{允许值}}$ (cm/s)	$V_{\text{预测值}}$ (cm/s)	$V_{\text{实测值}}$ (cm/s)	评价
东北侧板房	15			3.5	2.43	1.61	安全
东南侧民房	96	$k = 32.1$ $\alpha = 1.54$	9.9	2.0	0.14	0.09	安全
西南侧民房	95			2.0	0.14	0.09	安全
西北侧民房	100			2.0	0.13	0.09	安全

根据现场爆破振动监测结果, 东北侧板房、东南侧民房、西南侧民房、西北侧民房的实测爆破振动速度均远低于《爆破安全规程》(GB 6722-2014) [17]中保护对象第 2 类的爆破安全质点振动速度允许值, 现场试验测得的各检测点的振动速度均在安全允许范围内。东北侧板房(15 m)实测值为 1.61 cm/s, 低于安全允许值 3.5 cm/s, 东南侧民房(96 m)、西南侧民房(95 m)和西北侧民房(100 m)的实测值均为 0.09 cm/s, 低于安全允许值 2.0 cm/s; 现场监测数据表明爆破振动效应得到有效控制。

(2) 塌落振动

建筑物在塌落倒地瞬间对地面的冲击也会产生振动, 现广泛应用的塌落振动计算公式为[18]-[20]

$$V = K_t * \left[\frac{\left(\frac{MGH}{\delta} \right)^{\frac{1}{3}}}{R} \right] * \beta \quad (2)$$

式中: V 为天桥塌落引起的地表振动速度, cm/s; m 为下落构件质量; G 为重力加速度, m/s^2 ; H 为构件重心的高度, m; δ 为地面介质的破坏强度, MPa, 一般取 10 MPa; R 为建筑物距冲击地面中心的距离; K_t 、 β 为衰减参数, 本工程取 3.37、1.66。

Table 3. Measured and predicted vibration velocity values and safety assessment for the collapse of Overpass No. 5
表 3. 5 号跨线天桥塌落振动速度实测值、预测值及安全评价

保护目标	距离 R (m)	K_t 、 β 值	m (t), H (m)	$V_{\text{允许值}}$ (cm/s)	$V_{\text{预测值}}$ (cm/s)	$V_{\text{实测值}}$ (cm/s)	评价
东北侧板房	37			1.5	1.35	1.08	安全
东南侧民房	116	$K_t = 3.37$ $\beta = 1.66$	$m = 550$ $H = 12$	1.5	0.21	0.16	安全
西南侧民房	116			1.5	0.21	0.16	安全
西北侧民房	120			1.5	0.19	0.15	安全

ZK1048+550 刚架拱桥(5 号跨线天桥)总重约 760.5 t, 依次触地最大塌落质量取 $m = 550$ t; 塌落重心高度取 $H = 12$ m; 其塌落振动实测值见表 3。

根据现场塌落振动速度监测结果, 东北侧板房、东南侧民房、西南侧民房、西北侧民房的实测爆破振动速度均远低于《爆破安全规程》(GB 6722-2014) [17]中保护对象第 2 类的爆破安全质点振动速度允许值, 现场试验测得的各检测点的振动速度均在安全允许范围内。东北侧板房(15 m)实测值为 1.08 cm/s, 低于安全允许值 1.5 cm/s, 东南侧民房(96 m)和西南侧民房(95 m)实测值为 0.16 cm/s, 低于安全允许值 1.5 cm/s, 西北侧民房(100 m)的实测值为 0.15 cm/s, 低于安全允许值 1.5 cm/s; 现场监测数据表明塌落振动

速度得到有效控制。

(3) 预测值与实测值差异性分析

① 地质条件的复杂性

5号跨线天桥下的国防光缆埋深浅,仅0.3m,且天桥下方为高速公路路面结构,地表土层松散,可能导致爆破冲击波传播过程中高频成分快速衰减,从而降低实测质点峰值振动速度。

② 结构解体过程的非理想性

理论计算为理想化的刚体自由下落,一次性释放全部势能。而实际桥体解体过程为逐步破坏,承重构件相继失稳。桥体整个塌落过程也并非单点集中冲击,而是多点、分阶段、不规则接触地面,能量分散于较大面积,导致地面振动强度低于集中冲击假设。

(4) 爆破效果

爆破后5号跨线天桥瞬间失稳,桥体按设计方向整体向内坍塌、充分解体,飞石、冲击得到有效控制,国防光缆、高速路面、周边房屋均未受损。

6. 局限性与展望

6.1. 爆破方案的适用范围与局限性

本文提出的“三区毫秒微差定向失稳爆破+一体化分层防护+双振动控制”成套技术,在京港澳高速5号跨线天桥爆破拆除工程中取得了良好效果,但仍存在以下适用范围与局限性:

(1) 结构类型适应性限制

本文提出的爆破方案主要适用于高次超静定刚架拱桥结构。对于其他类型桥梁因其受力体系与失稳模式存在本质差异需重新设计方案,不能直接套用。

(2) 环境条件的适用性限制

本次爆破方案成功实施的前提条件是桥下空间大。而对于桥下净空极低、周边建筑物距离过近或桥址下方存在特殊地下管线情况下,需增加其他防控措施。

(3) 防护体系的可迁移性问题

本文提出的“钢板+沙袋+土堆”一体化防护体系是针对高速路面与浅埋国防光缆保护的定制化方案。当保护对象为高敏感建筑、水源和历史文物建筑时,防护设计要求、振动控制标准、飞石防护距离均会显著提高。

6.2. 未来研究方向建议

建议建立覆盖刚架拱桥、桁架桥、连续梁桥、斜拉桥等多种桥型的爆破拆除数据库,整合不同工程的爆破参数、地质条件、振动实测数据、防护做法与解体效果评价。基于大数据分析,优化针对不同结构类型与保护等级的经验系数(如 k 、 α 、 K_1 、 β 值),提高经验公式的普适性与安全性。同时在“双碳”目标背景下,建议研究降低爆破粉尘、减少振动噪声、提高建筑垃圾再生利用率的技术路径。

7. 总结

(1) 提出刚架拱桥“三区毫秒微差”定向失稳爆破技术。通过拱肋(50ms)→斜撑(100ms)→桥面(200ms)时序起爆,使高次超静定结构快速转化为几何可变体系,实现桥体整体向内坍塌、充分解体,满足快速清渣与道路快速恢复要求。

(2) 构建高速公路路面与浅埋国防光缆一体化分层防护体系。采用钢板、沙袋、土堆联合防护,并结合多层覆盖与近体防护,实现飞石、冲击、振动三重控制,确保高速公路、国防光缆及周边民房零损伤。

(3) 建立爆破振动与塌落振动双指标安全控制方法。依据 GB 6722-2014 开展预测计算与现场实测, 各测点振动速度均远低于规范允许值, 安全控制效果显著。

(4) 本工程实现 12 h 内完成爆渣清运并恢复交通, 爆破方案高效、安全、经济, 具有较强的工程适用性与推广价值, 可为运营高速公路沿线老旧天桥爆破拆除提供典型参考。

参考文献

- [1] Jangl, S., Kavicky, V. and Pilat, M. (2021) Design of Bridge Blasting Demolition. *MATEC Web of Conferences*, **352**, Article 00002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202135200002>
- [2] Shaojun, M.A., Huibin, C., Wendong, C., et al. (2023) Research and Analysis on Controlled Blasting Demolition of Continuous Thin-Walled Box Ribbed Arch Bridge. *Journal of China & Foreign Highway*, **43**, 130-134.
- [3] 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.
- [4] 林志鹏. 上跨公路钢架拱桥的拆除方案选择[J]. 交通世界, 2019(34): 109-110+114.
- [5] 苏龙庆. 桥梁爆破拆除施工工艺[J]. 交通世界, 2022(24): 89-91.
- [6] 董青青. 浅谈武英高速公路拱形天桥爆破拆除技术[J]. 四川建材, 2020, 46(11): 142-143.
- [7] 郑选荣, 任凯, 刘蕊, 等. 连续梁桥局部桥跨爆破拆除技术研究[J]. 爆破, 2025, 42(2): 129-139.
- [8] 汪龙, 郭磊. 复杂环境下高架桥快速爆破拆除技术研究[J]. 重庆建筑, 2023, 22(7): 49-51+57.
- [9] 周世一. 高架桥拆除爆破有害效应控制及应用[J]. 工程爆破, 2026, 32(1): 116-124.
- [10] 边祖光, 章皓南, 诸葛翰卿, 等. 石拱桥爆破拆除对相邻桥梁的影响研究——以衢州市叶家大桥为例[J]. 浙江科技大学学报, 2026, 38(1): 86-97.
- [11] 赵明生, 龙源, 贾永胜, 等. 预应力混凝土连续梁桥控制爆破拆除[J]. 爆破, 2015, 32(4): 103-109.
- [12] 谈亭, 吴节松. 下承式钢管混凝土系杆拱桥总体设计与计算分析[J]. 安徽建筑, 2025, 32(2): 169-170+173.
- [13] 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.
- [14] 宋歌, 龙源, 纪冲, 等. 城市高架桥爆破拆除数值模拟研究[J]. 爆破, 2013, 30(4): 108-112.
- [15] 亓兴军, 刘青. 爆炸作用下曲线梁桥的倒塌模式[J]. 爆破, 2015, 32(4): 110-117.
- [16] 杨永强, 胡进军, 谢礼立, 等. 高架桥爆破拆除触地振动速度特征分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(11): 151-154.
- [17] 国家安全生产监督管理总局. 爆破安全规程: GB 6722-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [18] 程浩伦, 邹新宽, 赵军, 等. 上跨高速公路无铰拱桥控制爆破拆除[J]. 工程爆破, 2016, 22(2): 77-79+88.
- [19] 谢钱斌, 张先东. 3 座内部结构复杂的烟囱的爆破拆除[J]. 工程爆破, 2017, 23(2): 62-66.
- [20] 谢钱斌, 熊万春. 2 座 90 m 高的双曲线冷却塔爆破拆除[J]. 工程爆破, 2018, 24(3): 44-49.