

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.015

深基坑支撑梁传爆方式对邻近结构物的影响*

何理^{1,2}, 钟冬望², 马建军², 伍岳², 杜泉², 李鹏¹, 明凯³, 宋琨⁴

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010;

2. 武汉科技大学 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室, 武汉 430065;

3. 北京兴油工程项目管理有限公司, 北京 100083;

4. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 宜昌 443002)

摘要: 深基坑钢筋混凝土支撑梁安全高效拆除是城市地下空间高效利用的前提。结合武汉某深基坑支撑梁爆破拆除工程实际, 运用理论分析与现场试验方法, 分析支撑梁爆破拆除不同传爆方式对邻近既有结构的影响, 对比不同传爆方式情况下邻近建筑物处振动响应状况。结果表明: 通过小药量炮孔同时起爆在支撑梁与围檩连接处形成隔振槽, 可有效阻隔支撑梁拆除爆破振动波的传播, 减小爆破振动强度及其对基坑围护结构和邻近建(构)筑物的影响, 降振率最高可达86.8%; 支撑梁不同构件类型及部位炸药单耗不同, 综合考虑爆破拆除成本、效果及安全等因素确定内侧主撑、次撑、节点及外侧主撑的最佳炸药单耗分别为0.52 kg/m³、0.46 kg/m³、1.02 kg/m³和0.52 kg/m³, 研究成果可为类似城市复杂环境深基坑支撑梁爆破拆除提供工程借鉴。

关键词: 支撑梁; 爆破拆除; 传爆方式; 降振率; 拆除效果

中图分类号: X947 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)02-0085-07

Influence of Detonation Sequence Mode for Support Beams in Deep Foundation Pit on Adjacent Structures

HE Li^{1,2}, ZHONG Dong-wang², MA Jian-jun², WU Yue², DU Quan², LI Peng¹, MING Kai³, SONG Kun⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

3. Beijing Xingyou Engineering Project Management Co Ltd, Beijing 100083, China;

4. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Safe and efficient demolish of reinforced concrete support beams in deep foundation pits is a prerequisite for efficient use of urban underground space. Combined with the actual demolition of a supporting beam of deep foundation pit in Wuhan, theoretical analysis and field test are used to analyze the influence of different detonation sequence mode on the adjacent existing structures of the supporting beam blasting by vibration response of adjacent buildings. The results show that the vibration isolation groove is formed at the joint of the support beam and the purlin by the simultaneous detonation of the small charge blasthole, which can effectively block the propagation of the blasting vibration wave of the support beam, so as to reduce the intensity of blasting vibration and its influence on the foundation pit bracing structure and adjacent buildings(structures). The highest vibration reduction rate is 86.8%. Different component types and parts of the support beam have different powder factor. Considering the factors such as

blasting demolition cost, effect and safety, the optimum powder factor of the inner main support, the secondary support, the joint and the outer main support are 0.52 kg/m^3 , 0.46 kg/m^3 , 1.02 kg/m^3 and 0.52 kg/m^3 respectively. The research results can provide engineering reference for the blasting demolition of deep foundation pit supporting beams in similar urban complex environment.

Key words: support beam; blasting demolition; detonation sequence mode; vibration reduction rate; demolition effect

随着我国城市建设快速发展,高层和超高层建筑的修建已成为普遍现象,大型深基坑内支撑梁工程项目也大量增多。相比于切割拆除法和静态破碎拆除法,支撑梁爆破拆除法具有拆除工期短、出渣快、造价低、效益高等优点,目前在深基坑钢筋混凝土支撑梁拆除时被广泛应用^[1-3]。由于深基坑支撑梁拆除工程大多处于城市中心地区,施工环境复杂,施工安全要求高且对工期的要求也越来越短。近年来,有很多学者对城市深基坑支撑梁爆破拆除新技术进行了相关研究。熊祖钊、钟冬望等根据理论分析和工程实际^[4],计算并评估了深基坑支撑梁爆破拆除安全系数。温尊礼、汪顺庆等结合复杂环境下深基坑支撑体系爆破拆除工程^[5,6],提出了精确爆破参数、科学起爆网路、可靠安全防护措施,并采取应力释放及换撑等技术方案,均取得了良好的爆破效果。余兴春等在支撑梁爆破拆除主起爆网路中使用数码电子雷管,在一次性点火情况下完成了近900 kg药量的拆除爆破^[7],且严格控制了单响,确保了预留格构柱及周边结构的安全。操鹏等介绍了一种轴向布孔的基坑内钢筋混凝土支撑梁爆破拆除新技术^[8],显著减少了预埋炮孔的数目,同时提出了一种轴向预埋炮孔的装药工艺,大大提高了爆破作业的安全性与拆除效率。何理等提出一种沿支撑梁轴向、垂直向同时预制炮孔的多向协同布孔技术及其装药方法^[9],并在实际工程中成功应用,有效降低了爆破有害效应,改善了爆破拆除效果。谢先启等结合层次分析法(AHP)及有限元分析软件Abaqus对深基坑支撑梁爆破拆除进行模拟计算^[10],优化基坑支撑梁爆破拆除施工顺序,并在实际施工中验证了方法的可行性。贾永胜、黄小武等根据理论分析和工程经验,提出一种从“主动控制”

和“被动防护”同时着手来控制支撑梁爆破拆除有害效应的理念^[11]。何理、陈晨等通过有限元软件LS-DYNA分析了箍筋及其切口位置对支撑梁爆破拆除效果的影响机制^[12,13],提出了钢筋混凝土支撑梁箍筋的最佳切口位置。

城市复杂环境下大型深基坑支撑梁爆破拆除往往具有单次拆除工程量大、炮孔数量多和环境复杂等特点,同时伴随有难以避免的爆破振动及飞石危害。合理的爆破参数、科学的起爆网路及可靠的防护措施是安全、高效实施城市深基坑支撑梁爆破拆除工程的关键。结合武汉复地汉正街支撑梁爆破工程实践,综合运用理论分析与现场试验方法,深入分析深基坑支撑梁爆破拆除起爆网路的不同传爆方式对邻近既有结构的影响,对比不同传爆方式情况下待保护结构物处的振动响应状况,优化支撑体系的拆除施工顺序,以期确保基坑围护结构及周边邻近建筑物安全,研究成果可为类似城市复杂环境深基坑支撑梁爆破拆除提供工程借鉴。

1 工程概况

1.1 周边环境

武汉复地汉正街支撑梁爆破工程位于武汉市硚口区沿河大道与多福路交汇处,西侧为多福路,南侧为沿河大道,东侧为友谊南路,项目整体环境见图1所示。以C2地块第2道支撑南侧支撑梁为研究对象,其平面布置见图2。图2中爆破区域范围内待拆支撑梁总体积约820 m³。



图1 项目整体环境图

Fig. 1 Overall environmental map of the project

收稿日期:2020-01-21

作者简介:何理(1986-),男,湖北十堰人,副教授、博士,从事工程爆破与岩石动力学研究,(E-mail) emp-heli@hotmail.com。

通讯作者:钟冬望(1963-),男,湖北武汉人,教授、博士生导师,从事矿山工程力学研究,(E-mail) zhongdw123@263.net。

基金项目:国家自然科学基金项目(51904210、51574184);长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室开放研究基金(CK-WV2018473/KY);三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放研究基金(2017KDJ02)

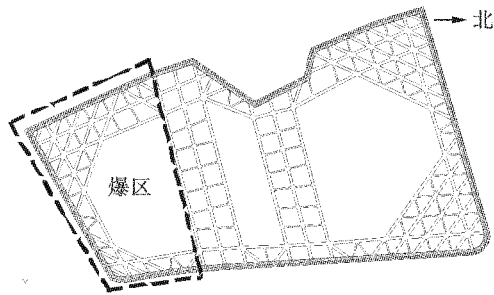
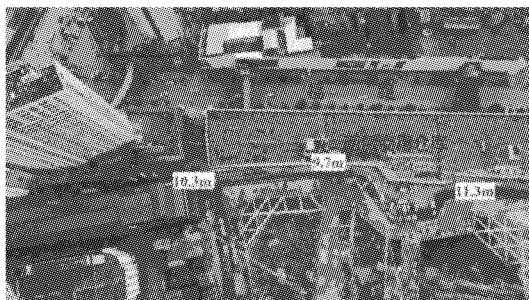


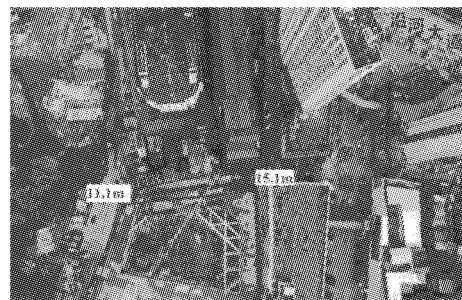
图 2 支撑梁平面布置图

Fig. 2 Plane layout of support beam

待爆区域东侧为拆迁后空地, 西侧紧邻商用仓



(a) 爆区西侧
(a) West side of the explosion area



(b) 爆区南侧
(b) South side of the explosion area

图 3 爆区周边环境图

Fig. 3 Environmental map of the explosion area

库, 最近距离仅为 9.7 m, 南侧与北侧均为居民楼, 待爆区域南侧与居民楼最近距离为 11.1 m, 北侧与居民楼最近距离为 31.2 m, 爆区周边环境见图 3。

1.2 项目概况

C2 地块基坑开挖深度大, 基底标高 -14.2 m, 等级为一级, 安全要求高。基坑共两道支撑, 总方量约 10 000 m³, 三层地下室, 设计采用支护桩加横向钢筋混凝土支撑结构作为基坑支护, 立柱为桩基型钢柱结构, 其它均为钢筋混凝土结构, 构件的混凝土强度等级为 C40, 保护层厚度 35 mm, 配筋率约 1.2% ~ 2.6%。

1.3 支撑梁孔网参数

本次支撑梁爆破采用提前预埋炮孔, 即布孔组根据炮孔设计要求, 在支撑梁浇灌混凝土前绑扎固定直径为 42 mm 的 PVC 管预埋炮孔, 并注意封口以防泥土、砼渣充填入预置 PVC 管内, 见图 4 所示。

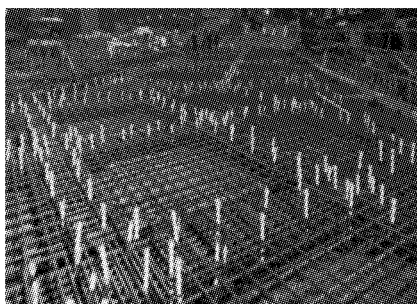


图 4 预制炮孔图

Fig. 4 Pre-buried blasthole

支撑梁预埋炮孔参数如表 1 所示。支撑梁炮孔布置如图 5 所示。

2 振动监测方案

由于待拆支撑梁位于 C2 地块靠南部分, 爆区西侧与南侧分别紧邻商用仓库及民用住宅, 需要严格控制爆破拆除支撑梁时的负面效应, 确保邻近结构物安全。爆破拆除前通过实地踏勘, 选取距离爆区近、建筑结构物损毁风险大的 6 个点作为振动监测布置点。振动测点布置如图 6 所示。

振动测试仪器采用由成都泰测科技研发的 Mini-Blast I 型爆破振动测试仪, 仪器具备 24 Bit 国内最高采集精度, 动态范围高达 100 dB, 可同步采集三个方向振动信号。信号采集时, 设置仪器为自动工作模式, 仪器自适应爆破现场环境。

表 1 预埋炮孔参数

Table 1 Pre-buried blasthole parameters

构件名称	构件编号	构件尺寸 (b × h)/mm	孔径/mm	孔深/mm	炮孔排数	孔距/mm	排距/mm	侧向抵抗线/mm
围檩	WL	1400 × 1100	42	750	3	800	350	350
主支撑	ZC	1300 × 1100	42	750	3	800	320	330
次支撑	CC	600 × 800	42	550	1	500	-	300

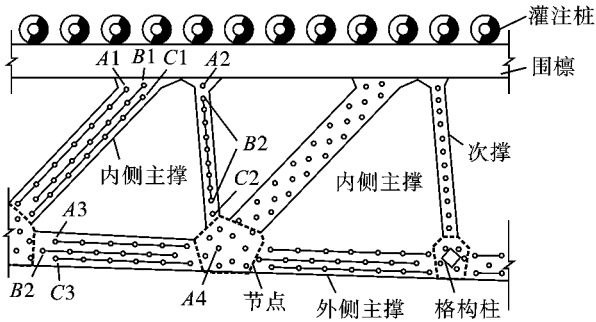


图5 撑结构图

Fig. 5 Support structure

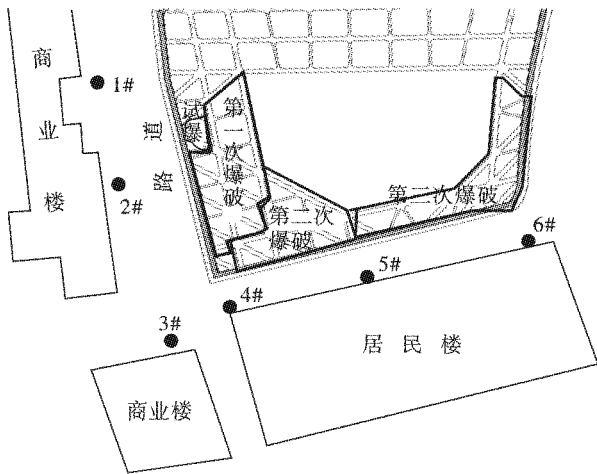


图6 振动测点布置图

Fig. 6 Layout of vibration measuring point

3 不同传爆方式下邻近结构物振动响应分析

根据工程实际情况,C2地块南区第二道支撑梁通过爆破法先行拆除主支撑与次支撑部分,暂时保留第二道支撑围檩结构,后期再对围檩部分进行统一拆除。正式爆破前选取不影响支撑体系稳定性的2根支撑梁进行试爆(如图6所示),炸药单耗取值为 0.8 kg/m^3 ,试爆效果良好,支撑梁横向箍筋被炸断,梁身混凝土破碎充分,试爆效果见图7所示。

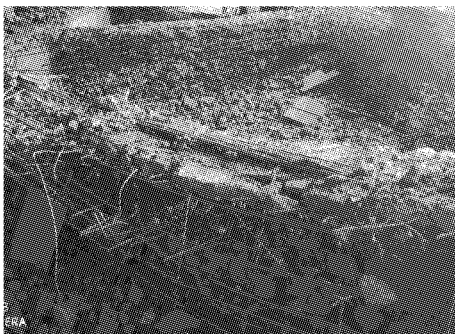


图7 支撑梁试爆效果

Fig. 7 Test explosion effect of support beam

为控制爆破规模,图2中爆区范围内支撑梁共计分为3次进行爆破拆除,各次拆除区域如图6所示。第1次爆破与第2次爆破支撑梁方量均为 240 m^3 ,第3次爆破支撑梁方量约为 340 m^3 。同试爆一样,孔内均使用MS19导爆管雷管,孔外3~5个炮孔捆为一扎通过双发MS3段进行传爆,其中在支撑与围檩连接处(或节点处)最多3个炮孔为一扎。

第1、2次爆破时装药量设计见表2。

表2 装药量设计

Table 2 Charge design of blasthole

支撑类型	炮孔编号	单孔药量/g	炸药单耗/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
内侧主撑	A1	250	0.83
	B1	450	
	C1	250	
次撑	A2	200	0.67
	B2	150	
	C2	200	
外侧主撑	A3	250	0.79
	B3	450	
	C3	200	
节点	A4	550	1.02

第1次爆破与第2次爆破中,针对与围檩相连接部分支撑梁分别采用图8、图9所示的传爆方式。

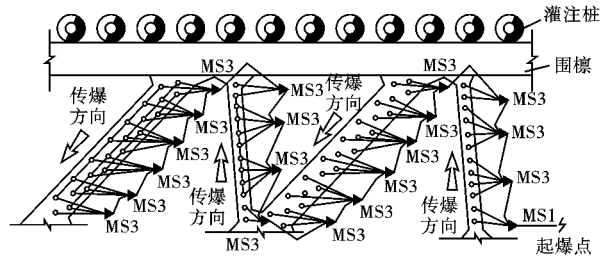


图8 第1种传爆方式

Fig. 8 The first mode of detonation transmission

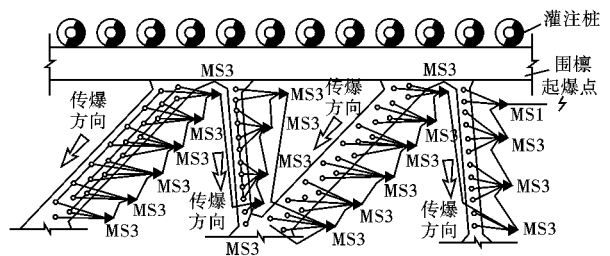


图9 第2种传爆方式

Fig. 9 The second mode of detonation transmission

大体量支撑梁连续爆破拆除前,先通过2~3个炮孔同时起爆破碎支撑梁与围檩连接处混凝土,形成隔振槽,可阻断后续炮孔爆破振动波向围檩方向

传播, 削弱并降低围护结构的地震波强度, 减小爆破振动对基坑围护结构及周边建(构)筑物的影响。见图 10。

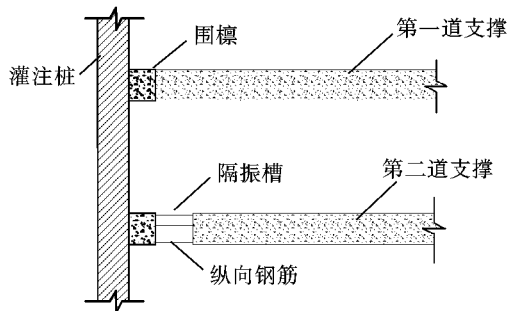


图 10 隔振槽示意图

Fig. 10 Diagram of vibration isolation groove

通过现场振动测试, 两次爆破试验共测得十二组爆破振动信号, 典型爆破振动信号时程曲线如图 11 所示。

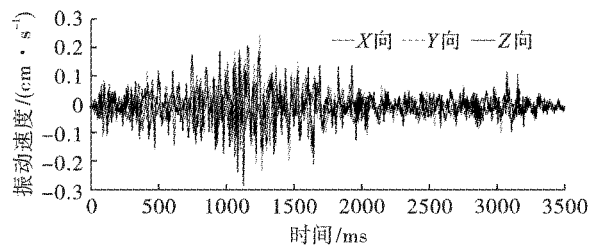


图 11 爆破振动速度时程曲线

Fig. 11 History curve of blasting vibration velocity

由图 11 的振动信号时程曲线可以看出, 爆破振动持续时间较长, 达到 3 s 左右, 主要是因为支撑梁爆破方量大, 延时段数多造成的; 并且由于段间延期时间均为 50 ms, 分段振动波相互叠加干扰, 导致爆破振动速度峰值出现在时程曲线中期, 而非出现在时程曲线初期。

两种不同传爆方式情况下的振动监测数据见表 3。

表 3 不同传爆方式下测点振动速度及主频

Table 3 Vibration velocity and frequency of measuring points under different mode of detonation transmission

传爆方式	最大单响药量/kg	测点	距离/m			振动速度峰值/(cm·s ⁻¹)			振动主频/Hz		
			H	D	R	径向	切向	垂直向	径向	切向	垂直向
1	1.45	1#	7	23	24.0	0.85	0.76	1.00	24.54	12.58	31.75
		2#		21	22.1	0.90	0.40	1.27	22.86	20.20	26.85
		3#		55	55.4	0.12	0.09	0.23	11.20	16.13	25.32
		4#		52	52.5	0.18	0.25	0.28	61.54	17.78	34.78
		5#		61	61.4	0.19	0.37	0.84	30.56	21.35	32.21
		6#		75	75.3	0.56	0.01	0.01	26.33	20.46	27.53
2	1.45	1#	7	53	53.5	0.16	0.08	0.50	39.37	37.88	41.15
		2#		46	46.5	0.46	1.09	0.57	17.70	29.63	26.14
		3#		44	44.6	0.07	0.05	0.16	39.22	37.17	39.37
		4#		24	25.0	0.16	0.10	0.24	38.61	39.22	40.98
		5#		32	32.8	0.13	0.01	0.32	26.01	12.65	20.11
		6#		50	50.5	0.09	0.10	0.23	21.36	11.87	22.69

注: 表 3 中 H 为垂直距离, m; D 为水平距离, m; R 为直线距离, m。

由表 3 中振动速度及其主频统计结果可以看出, 各测点处质点振动速度峰值 (PPV) 总体上呈现出垂直向最大, 水平径向次之, 水平切向最小的规律。然而, 各测点处 PPV 与爆心距离的关系并不明显, 分析其原因主要包含两个方面: 一是爆破区域位于第二道水平支撑, 与地表监测点存在高程差, 同时水平支撑外围有围檩及灌注桩等所组成的围护结构, 地质地形差别及围护结构浇筑质量差异等因素都会影响爆破地震波传动规律; 二是支撑梁爆破拆除方式的特殊性, 支撑梁爆破拆除时爆破振动只能沿其轴向方向传至围檩、灌注桩直至基坑外部岩土

区域, 不同的支撑布置形式及其与围檩所成角度均会影响振动能量的传递效率。同时文中的传爆方式 1 和传爆方式 2 也存在本质区别, 传爆方式 1 考虑便于接线联网的原则, 在处理与围檩相连的支撑时采用“S”形方式传爆, 而传爆方式 2 则在爆破拆除支撑梁时均注重先切断支撑梁与围檩的连接, 而后由围护结构向基坑内侧传爆。

现将表 3 中不同传爆方式情况下相近爆心距处的质点振动速度对比情况列于表 4。

由表 4 可以看出, 传爆方式 1 和传爆方式 2 均采用孔内高段别 (MS19)、孔外低段别 (MS3) 及 3 ~

5 孔为一孔的接力传爆方式,通过控制单响药量较好的限制了爆破振动强度值。尤其是传爆方式 2,在爆破拆除支撑梁时均注重先切断支撑梁与围檩的

连接,而后由围护结构向基坑内侧传爆,相比于传爆方式 1 最大降振率可达到 86.8%。

表 4 不同传爆方式情况下振动速度对比

Table 4 Comparison of vibration velocity under eifferent explosion transmission mode

数据组别	R/m		PPV/(cm·s ⁻¹)								
	传爆方式 1	传爆方式 2	传爆方式 1			传爆方式 2			降振率 η/%		
			径向	切向	垂直向	径向	切向	垂直向	径向	切向	垂直向
第一组	24.0	25.0	0.85	0.76	1.00	0.16	0.10	0.24	81.2	86.8	76.0
第二组	52.5	50.5	0.18	0.25	0.28	0.09	0.10	0.23	50.0	60.0	17.9
第三组	61.4	53.5	0.19	0.37	0.84	0.16	0.08	0.50	15.8	78.4	40.5

注:降振率 $\eta = (PPV_1 - PPV_2) / PPV_1 \times 100\%$

综合表 3 及表 4 可以得到,监测点处的爆破振动主频主要集中在 15~40 Hz 范围内,高于基坑周边建筑物的自振频率,基坑周边各测点处 PPV 最大值也仅为 1.27 cm/s,根据爆破安全规程(GB6722—2014),爆破振动对邻近基坑建(构)筑物未造成危害。

4 工程实例应用

针对图 6 中的第 3 次支撑梁爆破(方量约为 340 m³),结合支撑梁试爆及第 1、2 次爆破拆除效果,并同时考虑基坑周边建筑物安全及外侧主撑临空面处防护难度与强度等因素,对支撑梁各构件炸药单耗及单孔药量进行优化,第 3 次爆破时装药量设计见表 5。

表 5 装药量设计

Table 5 Charge design of blasthole

构件类型	炮孔编号	单孔药量/g	炸药单耗/(kg·m ⁻³)
内侧主撑	A1	150	0.52
	B1	300	
	C1	150	
次撑	A2	150	0.46
	B2	100	
	C2	150	
外侧主撑	A3	150	0.52
	B3	350	
	C3	100	
节点	A4	150	1.02

采用图 9 所示第 2 种传爆方式对第 3 次待拆支撑梁进行连线起爆,测得邻近基坑各建筑物处质点振动速度及主频见表 6。

支撑梁爆破拆除效果如图 12 所示。

表 6 各建筑物处质点振动速度及主频

Table 6 Vibration velocity and frequency of particle at each building

测点	振动速度峰值/(kg·m ⁻¹)			振动主频/Hz		
	径向	切向	垂直向	径向	切向	垂直向
1#	0.48	0.53	0.98	40.98	29.53	40.66
2#	0.35	0.41	0.53	25.38	17.96	26.55
3#	0.18	0.31	0.41	39.10	27.77	42.89
4#	0.15	0.10	0.23	50.29	43.69	28.67
5#	0.12	0.06	0.07	13.26	20.15	16.88
6#	0.05	0.08	0.10	16.98	23.21	15.52



图 12 支撑梁爆破效果

Fig. 12 Blasting effect of support beam

工程实例应用结果表明,第 3 次支撑梁爆破时的 PPV 均控制在 1 cm/s 以内,振动主频主要集中在 15~45 Hz 范围内,振动速度与主频满足安全要求;支撑梁爆破拆除效果好,梁身钢筋与混凝土脱离,混凝土碎而不飞且没有大块;周边摄影监测结果表明未有爆破飞石抛出基坑防护区域,同时在爆破完成后第一时间借助降尘雾炮对基坑内爆破区域洒水,爆破粉尘控制效果良好,未对周边环境造成污染。

5 结论

(1)大体量支撑梁连续爆破拆除前,先通过小

药量炮孔同时起爆在支撑梁与围檩连接处形成隔振槽,可有效阻隔支撑梁拆除爆破振动波的传播,减小爆破振动强度及其对基坑围护结构和邻近建(构)筑物的影响,降振率最高可达到86.8%。

(2)针对相同混凝土强度等级的支撑梁,不同构件类型及部位的炸药单耗也不尽相同,工程实践中需根据各次爆破效果不断进行优化改进,通过综合考虑安全防护难度、爆破器材成本及爆破拆除效果确定各构件、各部位最佳炸药单耗。

(3)本次支撑梁爆破拆除工程内侧主撑、次撑、节点及外侧主撑的最佳炸药单耗分别为 0.52 kg/m^3 、 0.46 kg/m^3 、 1.02 kg/m^3 和 0.52 kg/m^3 。

参考文献 (References)

- [1] 叶建军,程大春,明军. 基坑钢筋混凝土临时支撑梁绿色拆除爆破技术[J]. 爆破,2017,34(1):101-107.
- [1] YE Jian-jun, CHENG Da-chun, MING Jun. Green explosive demolition of temporary reinforced concrete pit-supporting beams [J]. *Blasting*, 2017, 34(1): 101-107. (in Chinese)
- [2] 何理,钟冬望,李琳娜,等. 布孔方式对支撑梁爆破拆除的影响机制[J]. 爆破,2018,35(3):85-91.
- [2] HE Li, ZHONG Dong-wang, LI Lin-na, et al. Influence mechanism of blasthole arrangement on explosive demolition of support beam [J]. *Blasting*, 2018, 35(3): 85-91. (in Chinese)
- [3] 蒋成荣,唐春海,蒙少明,等. 复杂环境下基坑支撑梁爆破拆除[J]. 爆破,2014,31(2):111-114.
- [3] JIANG Cheng-rong, TANG Chun-hai, MENG Shao-ming, et al. Explosive demolition of support beam of foundation pit in complicated environment [J]. *Blasting*, 2014, 31(2): 111-114. (in Chinese)
- [4] 熊祖钊,钟冬望,许梦国,等. 建筑基坑内支撑梁爆破拆除安全性评估[J]. 武汉冶金科技大学学报,1999,22(1):50-53.
- [4] XIONG Zu-zhao, ZHONG Dong-wang, XU Meng-guo, et al. The safety appraisal and scheme selection of blasting demolition of the strutting beam in foundation pit [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 1999, 22(1): 50-53. (in Chinese)
- [5] 温尊礼,顾月兵,韩文红. 基坑围护钢筋混凝土支撑精确爆破拆除[J]. 探矿工程,2015,42(3):80-84.
- [5] WEN Zun-li, GU Yue-bing, HAN Wen-hong. Accurate blasting demotion of reinforced concrete support for foundation pit enclosure [J]. *Exploration Engineering*, 2015, 42(3): 80-84. (in Chinese)
- [6] 汪顺庆,杨志,韩光明,等. 超大面积钢筋混凝土支撑梁爆破拆除[J]. 工程爆破,2007(2):65-67.
- [6] WANG Shun-qing, YANG Zhi, HAN Guang-ming, et al. Blasting demolition of reinforced concrete girders with super area [J]. *Engineering Blasting*, 2007(2): 65-67. (in Chinese)
- [7] 余兴春,常世懿,张孟昌,等. 使用数码电子雷管爆破拆除基坑支撑梁[J]. 爆破,2013,30(4):104-107.
- [7] YU Xing-chun, CHANG Shi-yi, ZHANG Meng-chang, et al. Application of digital electronic detonator to explosive demolish of supporting beam [J]. *Blasting*, 2013, 30(4): 104-107. (in Chinese)
- [8] 操鹏,吴剑锋,钟冬望,等. 基坑支撑梁轴向布孔爆破拆除技术及应用[J]. 爆破,2017,34(3):96-99.
- [8] CAO Peng, WU Jian-feng, ZHONG Dong-wang, et al. Application of explosive demolition technology of foundation pit support beam based on axial hole layout [J]. *Blasting*, 2017, 34(3): 96-99. (in Chinese)
- [9] 何理,钟冬望,操鹏,等. 多向协同布孔法爆破拆除深基坑支撑梁的应用[J]. 工程爆破,2017,23(4):44-47.
- [9] HE Li, ZHONG Dong-wang, CAO Peng, et al. Application of blast demolition deep foundation pit support beam of multi-directional synergy arrangement of blasthole [J]. *Engineering Blasting*, 2017, 23(4): 44-47. (in Chinese)
- [9] HE Li, ZHONG Dong-wang, CAO Peng, et al. Application of blast demolition deep foundation pit support beam of multi-directional synergy arrangement of blasthole [J]. *Engineering Blasting*, 2017, 23(4): 44-47. (in Chinese)
- [10] 谢先启,钟冬望,贾永胜,等. 基于AHP的深基坑支撑梁爆破拆除顺序研究[J]. 爆破,2017,34(3):90-95.
- [10] XIE Xian-qi, ZHONG Dong-wang, JIA Yong-sheng, et al. Study of demolition order of deep foundation pit support beam based on AHP [J]. *Blasting*, 2017, 34(3): 90-95. (in Chinese)
- [11] 黄小武,贾永胜,姚颖康,等. 城市基坑支撑梁爆破拆除安全防护措施探讨[J]. 爆破,2018,35(2):114-117.
- [11] HUANG Xiao-wu, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Discussion on safety protection of explosive demolition of support beam in city [J]. *Blasting*, 2018, 35(2): 114-117. (in Chinese)
- [12] 何理,钟冬望,涂圣武,等. 箍筋对深基坑支撑梁爆破拆除的影响机制[J]. 金属矿山,2018(8):45-50.
- [12] HE Li, ZHONG Dong-wang, TU Sheng-wu, et al. Influence mechanism of stirrup on blasting demolition of support beams in deep foundation Pit [J]. *Metal Mine*, 2018(8): 45-50. (in Chinese)
- [13] 陈晨,钟冬望,司剑峰,等. 箍筋切口位置对支撑梁爆破拆除影响数值分析[J]. 爆破,2018,35(2):101-106.
- [13] CHEN Chen, ZHONG Dong-wang, SI Jian-feng, et al. Numerical analysis of influence of stirrup-cutting position on explosive demolition of support beam [J]. *Blasting*, 2018, 35(2): 101-106. (in Chinese)