

陈晓磊,林海燕,谷智,等.可控冲击波技术在混凝土内支撑破除中的应用[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(6):704-710.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250050

CHEN Xiaolei, LIN Haiyan, GU Zhi, et al. Application of controllable shock wave technology in concrete internal support breaking[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2025, 44(6): 704-710. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250050

可控冲击波技术在混凝土内支撑破除中的应用

陈晓磊¹, 林海燕¹, 谷智¹, 任婧², 张硕², 杨铁峰¹

(1. 中冶建工集团有限公司, 重庆 400084; 2. 西安闪光能源科技有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要: 针对传统钢筋混凝土内支撑破除方法噪声大、危险性高等问题, 采用现场试验与声发射监测相结合的方法, 利用可控冲击波破除混凝土内支撑, 研究冲击能量、冲击次数以及冲击波施加点位对破除效果的影响。研究表明: 冲击能量越高, 裂缝产生越早, 扩展范围越大, 贯穿性越强。增加冲击次数可增强破除效果, 但后续冲击产生裂缝的时间相对较晚。冲击波施加点位位于近边缘区时, 受自由表面反射压力波的影响, 破除效果较好。冲击波施加点位位于远边缘区时, 由于冲击波均匀传播, 拉应力的产生受限, 破除效果具有滞后性。

关键词: 可控冲击波; 钢筋混凝土; 内支撑; 声发射; 裂缝扩展; 冲击能量

中图分类号: TU746.5

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)06-0704-07

Application of controllable shock wave technology in concrete internal support breaking

CHEN Xiaolei¹, LIN Haiyan¹, GU Zhi¹, REN Jing², ZHANG Shuo², YANG Tiefeng¹

(1. MCC Construction Group Company Limited, Chongqing 400084, China;

2. Xi'an Flash Energy Technology Company Limited, Xi'an 710075, China)

Abstract: Aiming at the problems of high noise and high risk in the traditional breaking method of reinforced concrete inner support, the method of combining field test and acoustic emission monitoring was adopted to break the concrete inner support by using controllable shock wave, and the impact energy, impact times and the impact wave application point on the breaking effect were studied. The results show that the higher the impact energy, leads to earlier crack initiation, a larger expansion range, and a stronger penetration. Increasing the impact times can enhance the breaking effect, but the time when subsequent impact produces cracks is relatively late. When the shock wave application point is located near the edge area, it has a better breaking effect due to the influence of the pressure wave reflected from the free surface. When the shock wave application point is located in the far edge area, the tensile stress is limited due to the uniform propagation of the shock wave, and the breaking effect is delayed.

Keywords: controllable shock wave; reinforced concrete; internal support; acoustic emission; fracture propagation; impact energy

0 引言

沿海地区土质主要为淤泥质土, 质地松软、抗滑移能力弱, 开挖易引发坍塌等安全事故, 危险性较大^[1-2]。对于软弱地质条件下的基坑工程, 开挖过程中主要采用围护桩结合钢筋混凝土内支撑方式来进行支护^[3-4], 这种支护方式属于临时性

支护, 在地基基础由下向上施工过程中需逐层破除内支撑^[5-6]。

钢筋混凝土内支撑破除主要采用风镐、镐头机、金刚石静态切割以及爆破等方法^[7-9]。其中, 风镐及镐头机法属于机械拆除法, 即通过机械振动使被拆除对象产生裂隙, 从而形成应力集中, 裂缝不断开裂最终达到拆除目的^[10-11]。镐头机拆除

收稿日期: 2025-02-14 修回日期: 2025-05-01 接受日期: 2025-05-13 责任编辑: 黄琦

基金项目: 重庆市建设科技计划项目(城科字 2022 第 8-10 号)

作者简介: 陈晓磊(1987-), 男, 云南昆明人, 博士, 高级工程师, 主要从事结构工程方面的研究。E-mail: 383283445@qq.com

法存在效率低、噪声大、成本高,以及设备占地面积大、操作要求高、易发生安全事故等问题^[12]。金刚石静态切割拆除法主要通过一台占地面积较小的切割机(配套金刚石链锯)进行内支撑拆除,但这种作业方式只能将内支撑切割为整块状且需配合吊装设备进行转运,对现场作业条件要求较高^[13]。此外,金刚石静态切割设备属于易坏品,寿命较短,使用成本较高,且实际施工过程中金刚石切割链易发生断裂、飞溅等情况,存在安全隐患。爆破拆除法虽然经济高效,但对使用环境要求较高(野外无人区域),事前审批手续复杂且危险性极大,在钢筋混凝土内支撑拆除中应用受限^[14]。

现有钢筋混凝土内支撑破除方法普遍存在噪声大、危险系数高、效率低等问题。可控冲击波技术通过高压、高功率放电产生冲击波,先将较小功率的能量储存在储能装置中,再将能量转换为冲击波,在极短时间内以高频率、高功率密度释放能量从而达到破除目的^[15],具有低风险、无污染、作业经济性高及能耗低等优势^[16-18]。目前,可控冲击波技术已在国内多个煤矿的煤层治理中取得良好应用效果^[19-20],但在钢筋混凝土内支撑破除中未见应用。本文通过现场试验,研究可控冲击波技术在钢筋混凝土内支撑破除中的应用效果,并结合声发射监测技术分析其破坏机理,以期拓宽可控冲击波技术应用前景、增强混凝土内支撑破除效果提供技术支持。

1 试验样品与设备

1.1 试样样品

选取一组典型梁作为试验对象,该梁的截面尺寸、配筋信息及混凝土强度参数均较为常见,具有一定的代表性及通用性,见图1。

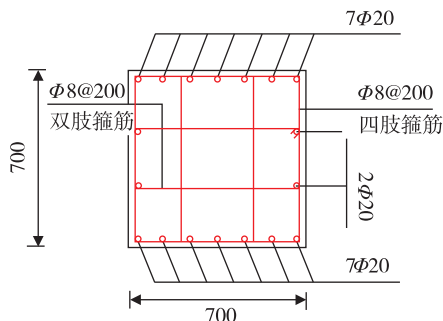


图1 试件截面及配筋(单位:mm)

Fig.1 section and reinforcement information of test piece
(unit: mm)

内支撑梁截面尺寸为700 mm×700 mm,采用C30混凝土,梁截面上下纵向受力钢筋采用7根型号为HRB400、直径为20 mm的带肋钢筋,腰筋是4根型号为HRB400、直径为20 mm的带肋钢筋,沿梁纵向布置型号为HRB400、直径为8 mm的双肢箍筋。对浇筑完成的钢筋混凝土梁以及12个150 mm×150 mm×150 mm的混凝土试件进行同条件养护,定期检测抗压强度,确保试件的平均抗压强度为37.9 MPa,标准差不超过1.5 MPa,满足试验要求。

1.2 试验设备

试验平台主要由可控冲击波装置和声发射监测装置组成。可控冲击波装置主要由脉冲电流源、高压同轴电缆、气压控制器、测量系统和能量转换器等构成,见图2。其中,脉冲电流源用于储存和压缩电能,可储存0~193 kJ电能并在100 μs内释放;高压同轴电缆将脉冲电流源输出的电流传输至能量转换器;能量转换器是用于固定和补充金属丝的专用装置。金属丝被固定在能量转换器的冲击波输出窗口,爆炸后可自动填充。主开关导通后,金属丝流过电流,经过液化、汽化及等离子体化后,金属丝的电阻率逐渐增大,最终形成等离子体通道,形成冲击波。声发射测试装置为PAC公司生产的PCI-2声发射检测仪,采集频率为20 kHz~3 MHz,放大器增益为40 dB。试验过程中将传感器置于试件侧面中部,并保证传感器与钻孔处于同一平面,涂抹耦合剂后用绝缘胶带固定。

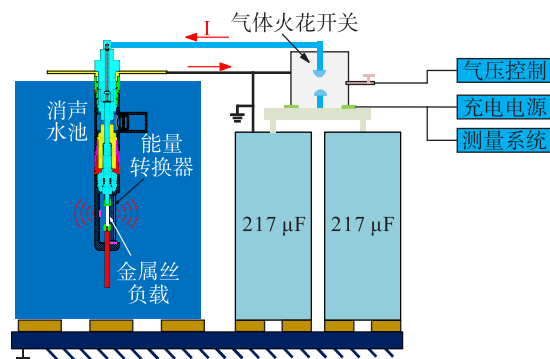


图2 可控冲击波装置结构

Fig.2 structure of controllable shock wave device

2 试验方案

依据《混凝土结构设计规范》(GB/T 50010—2010)设计钢筋混凝土内支撑梁试件,并采用可控冲击波进行爆破。钢筋绑扎及混凝土浇筑前通过PVC圆管在梁顶面布设12个预留孔,其中,试

件左侧均匀布设 6 个孔,孔间距为 300 mm;试件右侧均匀布设 6 个孔,间距为 500 mm,见图 3。预留孔位根据试件配筋图进行调整,确保孔中心距主筋边缘大于等于 50 mm,避免损伤钢筋骨架。钻

孔直径为 70 mm,深度为 500 mm。按照由孔 1 到孔 6 的顺序依次开展冲击试验。试验方案见表 1。每次冲击持续时间为 5 s,各孔冲击间隔为 30 min,确保试件应力状态稳定。

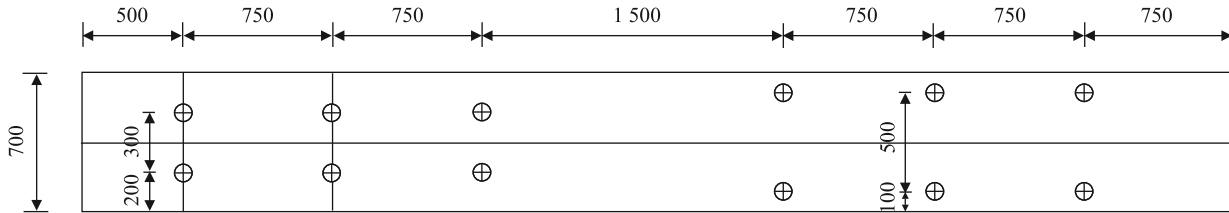


图3 试件破除孔预留位置(单位:mm)

Fig.3 reserved position of the specimen breaking hole(unit:mm)

表 1 试验方案

Tab.1 experimental scheme

钻孔序号	冲击能量/kJ	冲击次数
1	80	3
2	50	3
3	80	3
4	60	5
5	80	3
6	60	3

3 试验结果

试件致裂情况如表 2 所示。由于冲击能量、次数、先后顺序以及孔所处位置有所不同,致使各孔附近裂缝的长度及数量存在较大差异。整体来看,5 号孔处致裂程度最高,4 号孔处致裂程度最低。1 号孔冲击试验现象见图 4。

表 2 试件致裂情况

Tab.2 cracking of test piece

钻孔序号	最大裂缝长度/mm	裂缝数量
1	552	12
2	703	20
3	612	18
4	118	10
5	994	30
6	489	23



图4 1号孔冲击试验现象

Fig.4 phenomenon of impact test on hole 1

由图 4 可见,第 1 次冲击后,试件以钻孔为中心沿混凝土表面向外放射状产生 2 条主裂缝,较长的裂缝向梁体侧面延伸,形成的贯穿裂缝及次生裂缝呈网状分布,钻孔右侧、梁体侧面裂缝长度分别约为 400 mm、500 mm。第 2 次冲击后,钻孔右侧主裂缝进一步延伸、变宽,长约 552 mm,裂缝尾端水泥沿第 1 次冲击后的裂缝破碎,出现掉块现象。钻孔注水后,水从裂缝位置渗出,水面迅速下降,表明第 2 次冲击后形成了从钻孔到外壁的贯通裂缝。第 3 次冲击后,混凝土破碎程度加剧,保护层破裂脱落,钢筋结构外露,形成较多的爆破裂缝。

以 50 kJ 冲击能量冲击 2 号孔 3 次,试验现象见图 5。第 1 次冲击后试件未见明显破坏。第 2 次冲击后孔周形成 2 条主裂缝并向两端延伸,左侧、右侧的延伸长度分别约为 340 mm、350 mm,且与 1 号孔形成贯穿裂缝。第 3 次冲击后,裂缝进一步变宽、变长,向右延伸长度约为 703 mm,梁体侧面可见清晰的网状裂缝分布,钻孔注水后渗水明显。

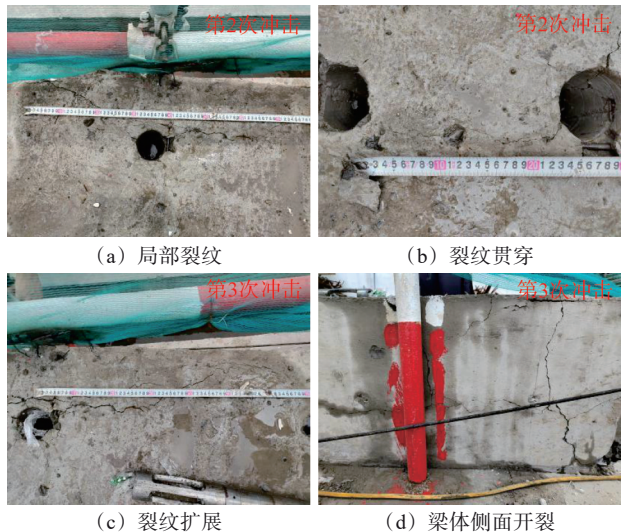


图5 2号孔冲击试验现象

Fig.5 phenomenon of impact test on hole 2

以80 kJ冲击能量冲击3号孔3次,试验现象见图6。第1次冲击后,钻孔周围局部产生微裂纹。第2次冲击后,裂缝扩展较远,右侧主裂缝延伸长度约为550 mm,次生裂缝延伸长度约为280 mm。第3次冲击后,裂缝进一步扩展,右侧裂缝明显变宽,延伸长度超过612 mm,梁体侧面形成贯穿裂缝,高度约为500 mm。

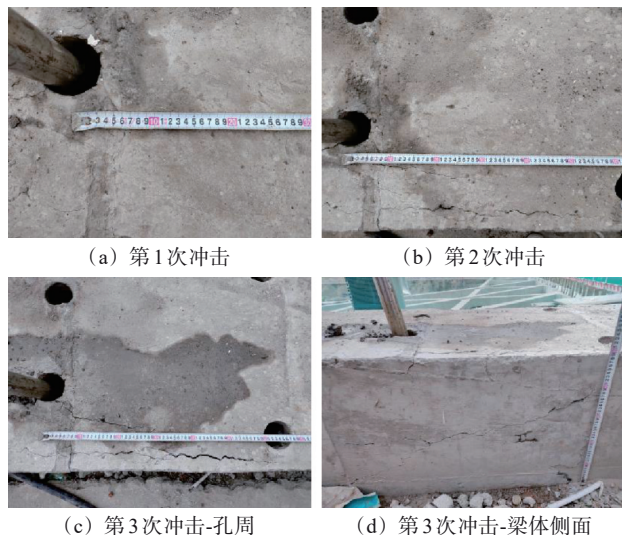


图6 3号孔冲击试验现象

Fig.6 phenomenon of impact test on hole 3

以60 kJ冲击能量冲击4号孔5次,试验现象见图7。第1次冲击后,孔周裂缝扩展距离较近,第5次冲击后,孔周发生复杂的破碎性损伤,裂缝显著变宽。

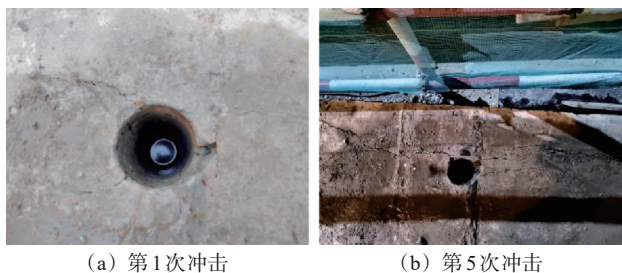


图7 4号孔冲击试验现象

Fig.7 phenomenon of impact test on hole 4

以80 kJ冲击能量冲击5号孔3次,试验现象见图8。第1次冲击后,孔周产生3条短细裂缝。第3次冲击后,表面1条裂缝延伸长度约为260 mm,钻孔内部产生次生裂缝,形成裂缝网络。第4次冲击后,最初产生的2条裂缝逐渐变宽并连通,总长度约为600 mm,梁体侧面的贯穿裂缝相互交错并形成1条长约994 mm的横向裂缝。由于5号孔与1号孔距离较近,且1号孔破碎效果较好,5号孔注水后,大量水从1号孔破碎区域流出,水面快速下降,横向裂缝也出现明显的渗水现象,表明5号孔与1号孔内

部裂隙已贯通。第6次冲击后,孔周有新的次生裂缝扩展,且开度变大,梁体侧面渗水明显。

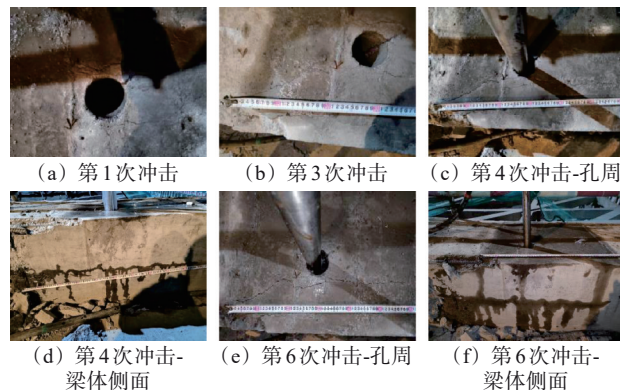


图8 5号孔冲击试验现象

Fig.8 phenomenon of impact test on hole 5

以60 kJ冲击能量冲击6号孔3次,试验现象见图9。第1次冲击后,1条裂缝延伸至2号孔,与6号孔处裂缝相交,形成贯穿裂缝,梁体侧面略见渗水现象。第2次冲击后,贯穿裂缝开度增大,钻孔右侧产生1条长度超过400 mm的新裂缝。第3次冲击后,钻孔左侧贯穿裂缝处产生细小的次生裂纹,且形态较复杂,6号孔侧面产生新的裂缝网络,渗水现象加剧。

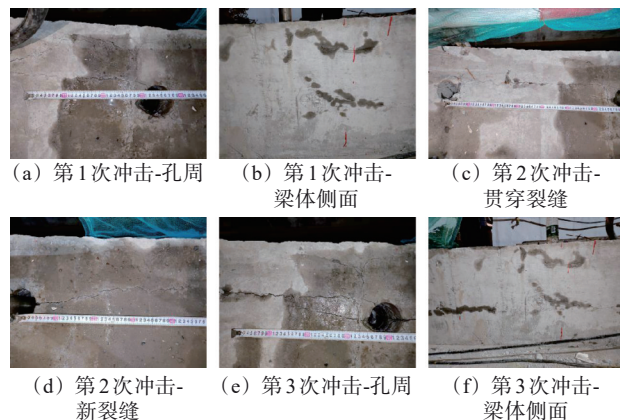


图9 6号孔冲击试验现象

Fig.9 phenomenon of impact test on hole 6

为评估可控冲击波拆除混凝土内支撑过程中产生的噪声,采用TES-1358型分贝仪实测冲击波作业噪声为82~85 dB。该数值低于风镐(110 dB)、爆破(130 dB)方法产生的噪声,满足《建筑施工场界环境噪声排放标准》(GB 12523—2011)的相关限值要求。

4 作业参数对试验结果的影响

4.1 冲击能量对破除效果的影响

冲击能量的大小对裂缝扩展范围和破坏程度

有直接影响。以 1 号孔和 2 号孔为例,冲击能量越高,裂缝扩展距离越远,试件破坏程度越高。产生这种现象主要有两方面原因:一是冲击波的能量密度随传播距离的增大而衰减;二是冲击波的能量越高,产生的压力波强度越大。压力波在传播过程中,介质中的质点被强烈压缩并迅速移动形成局部高压区,产生较大的压缩应力。压力波遇到不同介质会发生反射,产生拉应力,由于混凝土结构的抗拉强度远低于抗压强度,更易在拉应力作用下发生破裂。

不同冲击能量下声发射振铃计数对比见图 10。在较低冲击能量 (50 kJ) 下,振铃计数的峰值出

现较晚且振铃计数较小,表明 50 kJ 冲击能量在冲击试验早期阶段对试件结构的破坏较为有限,裂缝的萌生和扩展速度较慢。高冲击能量 (80 kJ) 下,声发射振铃计数在冲击试验早期阶段迅速增加,且峰值较高,裂缝形成和扩展过程更为剧烈,表明冲击能量对混凝土裂缝扩展的影响较大。通过以上分析可知,增大冲击能量可显著提高裂缝的产生速率,导致混凝土内局部应力迅速达到破坏极限,短时间内产生大量裂缝。80 kJ 冲击能量下,振铃计数的高值频率和数量均较高,与前文冲击试验结论一致。

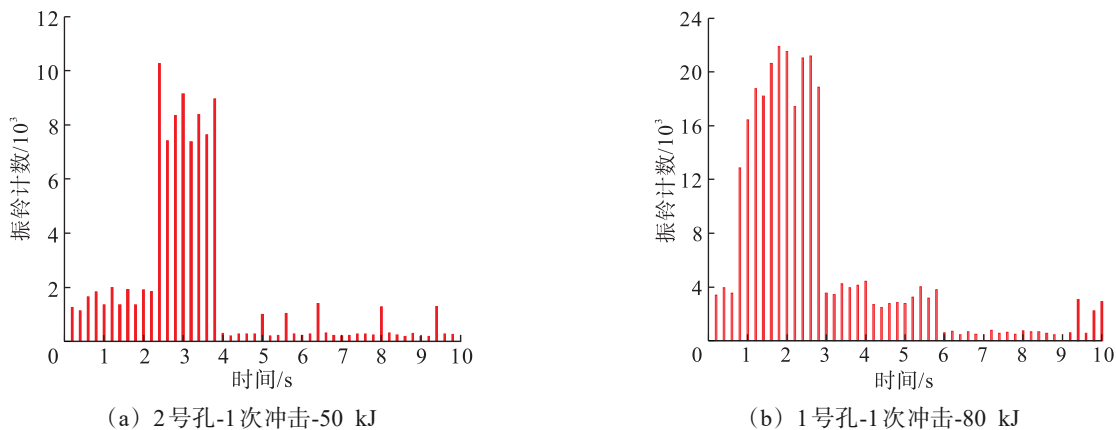


图 10 不同冲击能量下声发射振铃计数对比

Fig.10 comparison of acoustic emission ring count under different impact energy

4.2 冲击次数对破除效果的影响

不同冲击次数下声发射振铃计数对比见图 11。随着冲击次数的增加,振铃计数显著增加的时间逐渐延后,声发射振铃计数出现累积效应,即后续冲击对混凝土产生的破坏作用更强。第 3 次冲击

后,振铃计数继续保持较高水平,但个别时间段内振铃计数有所减小,这是由于经过 3 次冲击后,混凝土内部已生成较多裂缝,新裂缝的产生受限,冲击过程中主要以已有裂缝发生扩展为主。

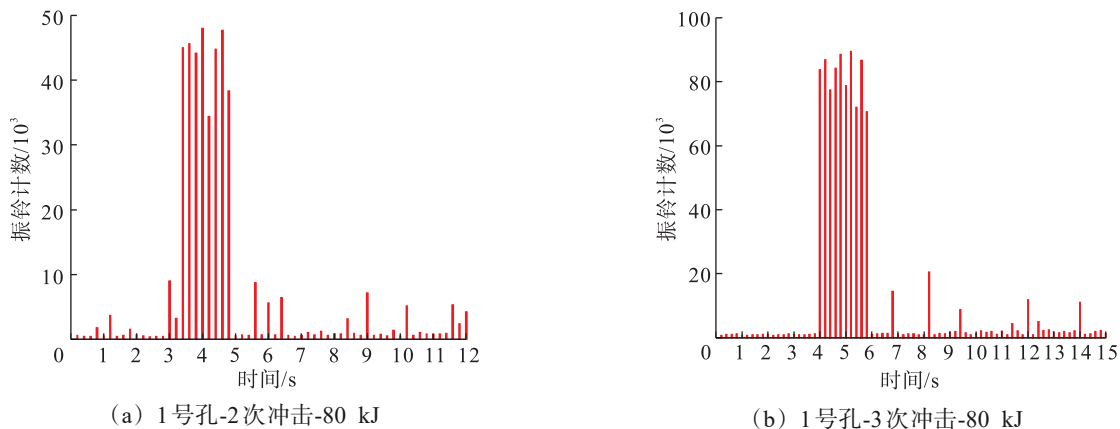


图 11 不同冲击次数下声发射振铃计数对比

Fig.11 comparison of acoustic emission ring count under different impact times

随着冲击次数的增加,裂缝扩展距离有所增大,破坏程度逐渐加剧。产生这种现象的原因如

下:一是应力累积效应,每次冲击过程中,冲击波均会在介质中产生应力,并通过叠加逐渐累积;

在后续冲击过程中,新的冲击波与已有的残余应力场相互作用,可能导致应力局部增大^[21],当达到强度极限时,混凝土发生断裂。二是疲劳破坏原理,在多次冲击作用下,即使最初混凝土能吸收部分能量并承受一定的拉应力,但由于其局部非均质性而产生损伤,力学性能发生劣化,在多次冲击的反复拉伸和压缩作用下,出现疲劳破坏。三是已有缺陷的控制作用,在前几次冲击后,混凝土会产生裂缝,通常裂缝尖端为应力集中点,可放大后续冲击波的局部作用,加速裂缝扩展。此外,已有裂缝会增加混凝土内自由表面和边界的数量,导致冲击波易发生反射,且反射波通常以拉应力的形式出现,因此后续冲击波往往能产生较大的破坏力。

通过以上分析可知,每次冲击均会导致混凝土内部产生新裂缝或加剧已有裂缝的扩展,具有累积效应。随着冲击次数的增加,结构的抗破坏能力逐渐下降,裂缝产生的速率加快,破坏模式更为复杂,与冲击试验观察到的混凝土破坏程度逐渐加剧现象一致。

4.3 冲击波施加点位对破除效果的影响

冲击试验中,1号孔、3号孔、5号孔的冲击能量均为80 kJ,其中,1号孔距离试件左边缘最近,5号孔次之,3号孔最远。根据冲击试验结果,1号孔破坏程度最重,5号孔次之,3号孔最轻,可见冲击波施加点位对破除效果具有一定的影响,具体表现为越靠近试件边缘,破坏程度越重。这是由于不同冲击波施加点位下,应力波传播的初始路径、边界条件以及反射和干涉方式有所不同。当冲击波施加点位靠近试件边界,其能量会迅速到达边界。在边界处,由于自由表面效应,压力波被反射为拉应力波,混凝土更易产生裂缝或使裂缝扩展。此外,由于边界处易发生应力集中,会促进裂缝的萌生和扩展。当冲击波施加点位远离试件边界,冲击波可向多个方向均匀传播,由于混凝土这种较为均质且多孔的材料可吸收和耗散部分冲击能量,反射波的形成发生延迟,冲击波需经过较长的路径才能到达结构边界,且在传播过程中能量逐渐衰减,破坏作用随之减弱。

3号孔冲击点位相对更接近试件内部,以80 kJ冲击能量冲击3号孔1次,声发射振铃计数见图12。与靠近试件边界施加冲击波相比,在更靠近试件内部的位置施加冲击波时,声发射振铃计数明显延迟,振铃计数的高峰出现较晚,表明内部裂缝的形成和扩展速度相对较慢,且裂缝的分布较为分散。在冲击后期,声发射振铃计数依然显著增

加,表明虽然初期裂缝扩展较慢,但随着冲击波的多次反射与叠加,结构的内部应力逐渐累积,裂缝不断扩展。通过以上分析可知,冲击波施加点位的不同会显著影响声发射特征,即施加点位靠近边界会导致混凝土早期破坏严重,而靠近内部会导致破坏效应滞后,裂缝扩展较为分散。

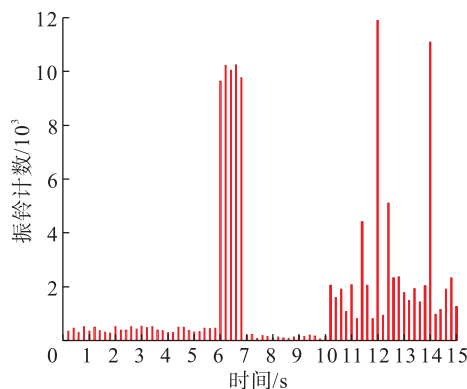


图12 3号孔声发射振铃计数

Fig.12 acoustic emission ringing count of hole

5 结论

(1) 冲击能量越大,钢筋混凝土试件裂缝产生时间越早,扩展范围越广,贯穿性越强。这是由于冲击波作用后形成的压力波在传递过程会逐渐衰减,施加的能量越大,在衰减前形成复杂应力扰动的可能性越大

(2) 多次冲击会产生疲劳破坏效应。在已有裂缝的情况下,反射压力波会形成拉应力,加速混凝土开裂。冲击次数越多,较上次冲击破除效果越好,但新裂缝产生时间较晚,整体呈现由局部劣化到裂缝迅速扩展再到整体结构破坏的渐进过程。

(3) 当冲击波施加点位靠近试件边界,冲击波可更快到达自由表面,易形成压缩波反射,从而产生强烈的拉应力,导致裂缝迅速扩展。当冲击波施加点位远离试件边界,冲击波的效应过程因能量衰减而显著滞后。

参考文献(References):

- [1] 门宝辉.南水北调西线工程调水区径流序列特性分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009,28(1):149-151.
MEN Baohui. Analysis of run-off characteristic of south-to-north water transfer scheme via the western route in water-exporting region[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2009, 28(1):149-151.
- [2] 龚玲峰.沿海地区深厚淤泥质地层地铁深基坑设计[J].铁道建筑技术,2022(5):69-71,103.
GONG Lingfeng. Design of deep foundation pit for subway in deep

- layer of mucky soil in coastal area[J]. Railway Construction Technology, 2022(5): 69-71, 103.
- [3] 周越洲, 杨慎银, 王嵩, 等. 深厚淤泥软土地区某基坑坍塌事故分析及处理[J]. 建筑结构, 2024, 54(15): 128-135.
ZHOU Yuezhou, YANG Shen Yin, WANG Song, et al. Analysis and treatment for collapse accident of a foundation pit in deep and thick sullage soft-soil area[J]. Building Structure, 2024, 54(15): 128-135.
- [4] 管大刚, 胡志明, 郑鹏鹏, 等. 开挖顺序及内支撑早期刚度对软土基坑稳定性影响规律[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(2): 181-190.
GUAN Dagang, HU Zhiming, ZHENG Pengpeng, et al. Influence laws of excavation sequence and early stiffness of inner support on stability of foundation pit in soft soil[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(2): 181-190.
- [5] 徐海惠, 吴成刚, 张远荣. 内支撑体系下装配式车站基坑支护受力研究[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(2): 119-126.
XU Haihui, WU Chenggang, ZHANG Yuanrong. Stress of prefabricated subway station foundation pit support under internal support system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(2): 119-126.
- [6] 陈玮, 汪森, 江巍, 等. 河网区域特高压输电线路钢板桩围堰施工技术方案设计[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, 40(2): 61-65.
CHEN Wei, WANG Sen, JIANG Wei, et al. Construction technique design of steel sheet pile cofferdam for constructing UHV transmission line in river network regions[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2018, 40(2): 61-65.
- [7] 周志鸿, 王柄锐, 谭贵, 等. 典型软土地层管廊基坑垫层换撑可行性研究[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(3): 140-151.
ZHOU Zhihong, WANG Bingrui, TAN Gui, et al. Feasibility study on cushion replacement support for pipe gallery foundation pit in typical soft soil strata[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(3): 140-151.
- [8] 郑长青, 叶海旺, 侯云锋. 建(构)筑物拆除爆破倒塌运动规律研究[J]. 工程爆破, 2024, 30(5): 193-205.
ZHENG Changqing, YE Haiwang, HOU Yunfeng. Movement and collapse law of structures demolition by blasting[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(5): 193-205.
- [9] 于明亮, 李越, 刘伟, 等. 狭长低矮城市建筑定向拆除爆破[J]. 工程爆破, 2024, 30(3): 82-88.
YU Mingliang, LI Yue, LIU Wei, et al. Directional demolition blasting of long, narrow and low urban buildings[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(3): 82-88.
- [10] 王中州, 李娇娇, 秦宾宾, 等. 薄基岩破碎顶板工作面回撤通道稳定性及控制研究[J]. 煤矿安全, 2021, 52(6): 230-236.
WANG Zhongzhou, LI Jiaojiao, QIN Binbin, et al. Study on stability and control of retracement channel with thin bedrock and broken roof[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(6): 230-236.
- [11] 徐文化, 张敏, 何华庭, 等. 一种基于高压水射流的混凝土表面处理设备研究[J]. 流体机械, 2022, 50(7): 9-14.
XU Wenhua, ZHANG Min, HE Huating, et al. Research on a concrete surface treatment equipment based on high-pressure waterjet[J]. Fluid Machinery, 2022, 50(7): 9-14.
- [12] 苏尔好. 瞬态冲击荷载作用下刚性道面动态响应分析[J]. 施工技术, 2015, 44(17): 47-51.
SU Erhao. Analysis of dynamic response of rigid pavement in process of breaking with pickaxe machine[J]. Construction Technology, 2015, 44(17): 47-51.
- [13] 刘勇, 诸葛仲彦, 付饶, 等. 基坑支护结构的绿色拆除与处理技术[J]. 施工技术, 2017, 46(14): 13-17.
LIU Yong, ZHUGE Zhongyan, FU Rao, et al. Green demolition and treatment technology of foundation excavation retaining structure[J]. Construction Technology, 2017, 46(14): 13-17.
- [14] 贾永胜, 刘桂勇, 黄小武, 等. 山城地区框剪结构群楼安全高效爆破拆除[J]. 爆破, 2024, 41(1): 98-105.
JIA Yongsheng, LIU Guiyong, HUANG Xiaowu, et al. Efficient blasting demolition of frame-shear structure buildings in mountain city[J]. Blasting, 2024, 41(1): 98-105.
- [15] 张永民, 邱爱慈, 秦勇. 电脉冲可控冲击波煤储层增透原理与工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 79-85.
ZHANG Yongmin, QIU Aici, QIN Yong. Principle and engineering practices on coal reservoir permeability improved with electric pulse controllable shock waves[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 79-85.
- [16] 陈海俊, 陈忠, 胡彪, 等. 构造区硬岩可控冲击波预裂参数优化与实践[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(5): 857-865.
CHEN Haijun, CHEN Zhong, HU Biao, et al. Optimization of parameters for controllable shock waves pre-splitting in hard rocks in tectonic zones[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(5): 857-865.
- [17] 安世岗, 陈殿赋, 张永民, 等. 可控电脉冲波增透技术在低透气性煤层中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 138-145.
AN Shigang, CHEN Dianfu, ZHANG Yongmin, et al. Application of controllable electric pulse wave permeability-enhancing technology in the low-permeability coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(4): 138-145.
- [18] 苏士龙, 张永民, 李文刚, 等. 可控冲击波增透技术在吉宁低孔低渗松软煤层中的应用[J]. 中国矿业, 2021, 30(5): 173-179.
SU Shilong, ZHANG Yongmin, LI Wengang, et al. Application of controllable shock wave antireflection technology in Jining low porosity and low permeability soft coal seam[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(5): 173-179.
- [19] 张永民, 蒙祖智, 秦勇, 等. 松软煤层可控冲击波增透瓦斯抽采创新实践: 以贵州水城矿区中井煤矿为例[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2388-2400.
ZHANG Yongmin, MENG Zuzhi, QIN Yong, et al. Innovative engineering practice of soft coal seam permeability enhancement by controllable shock wave for mine gas extraction: a case of Zhongjing Mine, Shuicheng, Guizhou Province, China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2388-2400.
- [20] 张迪, 张永民, 李建栋, 等. 可控冲击波煤层增透技术在穿层钻孔中的应用[J]. 煤炭工程, 2023, 55(6): 73-78.
ZHANG Di, ZHANG Yongmin, LI Jiandong, et al. Application of controllable shock wave seam permeability enhancement in cross-seam drilling[J]. Coal Engineering, 2023, 55(6): 73-78.
- [21] EKSTRÖM J, REMPLING R, PLOS M. Spalling in concrete subjected to shock wave blast[J]. Engineering Structures, 2016, 122: 72-82.