

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0089

贾木那大桥水压定向爆破及其数值模拟*

张勤彬¹, 程贵海¹, 徐中慧², 凌宇恒¹, 蒋文俊¹, 陈善江¹

(1. 广西大学 资源环境与材料学院, 广西 南宁 530004;

2. 西南科技大学环境与资源学院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了分析及研究薄壁空腔桥墩的水压爆破机理, 以孟加拉国贾木那大桥水压定向爆破拆除工程为研究对象, 采用显示动力学分析软件模拟了桥墩的水压爆破破碎过程, 根据数值模拟结果, 得出了水压爆破主要是利用爆炸冲击波、爆轰气体、反射拉伸波及高速水流对桥墩壁面进行破坏, 在此基础上, 探讨了桥墩水压定向爆破的药包布置方式、起爆顺序等技术问题。

关键词: 桥墩; 水压定向爆破; 有限元方法; 破碎机理

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

随着我国爆破技术的不断进步, 部分工程爆破技术也开始逐步走向国外市场, 并服务于其他周边各国的基础设施建设。孟加拉国贾木那大桥爆破拆除的成功, 开创了孟加拉国桥梁爆破拆除的先河。

对于薄壁型、箱梁钢筋混凝土结构的建(构)筑物, 由于布孔难度较大, 成本较高, 故一般不采用传统的爆破拆除方法, 采用水压爆破的拆除方案可以减少钻孔数量, 节约大量的成本, 而且采用水压爆破一定程度上也简化了起爆网路, 减小了爆破所产生飞石及粉尘的危害, 因此采用水压爆破拆除空心桥墩是较为合理的爆破方案。在我国, 水压爆破的研究工作正在不断开展, 大多数学者和工程技术人员主要通过类比实验及数值模拟技术对其进行研究。张亚宾等^[1]通过数值模拟得出了水压爆破过程中爆炸冲击波作用于构筑物壁面的传播、反射、衰减过程; 杨忠华等^[2]建立了 1/8 的钢筋混凝土分离式模型进行数值模拟计算, 阐述了混凝土的破坏机制及过程; 孙金山等^[3]通过建立一个多室箱梁的 1/4 模型进行水压爆破数值模拟, 详细的阐述了水压爆破的力学机理及爆炸荷载作用下钢筋混凝土的破坏机制。但目前对于非对称结构的工程或非对称装药的工程研究较少, 且采用传统的 1/8 模型、1/4 模型进行数值模拟计算不能较好的反映实际工程情况, 因此, 为了研究孟加拉国贾木那大桥水压爆破的破碎过程及其机理, 采用桥墩 1/2 模型对其破坏过程进行数值模拟计算, 分析了薄壁桥墩的水压爆破破碎机理, 讨论了不同的装药参数、起爆顺序等对钢筋混凝土破碎效果的影响。

1 桥墩水压爆破装药参数

桥墩水压定向爆破拆除与传统的水压爆破拆除技术不大相同, 其药包布置形式大多为非对称结构, 且其破碎机理较之对称布置药包的传统水压爆破来讲, 更加复杂, 且国内无相关类似工程案例可供参考, 为此, 通过建立桥墩 1/2 模型, 对非对称布置药包的水压爆破进行了数值模拟, 根据结果分析了桥墩水压定向爆破破碎的机理, 探讨了如何优化改进类似工程的爆破方案。

1.1 工程概况

孟加拉国贾木那(Jamuna)大桥位于孟加拉国首都达卡市郊, 是孟加拉国南北交通的主要通道, 由于

* 收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-05-31

基金项目: 国家自然科学基金(51404200)

第一作者: 张勤彬(1994—), 男, 硕士研究生, zqbGXU@163.com;

通信作者: 程贵海(1963—), 男, 硕士, 教授, cgh9076@263.net。

该桥不能适应当前交通量的需求,需对其进行爆破拆除,待拆大桥与新桥仅隔 3 m,共需要对 4 个桥墩进行爆破拆除,桥面预先进行切割分离。大桥桥墩高 15 m,为薄壁剪力墙空心封闭结构,壁厚仅 12 cm,隔板厚度为 20 cm(如图 1(a)所示),用传统钻孔爆破难度大,因此采用水压定向爆破技术。

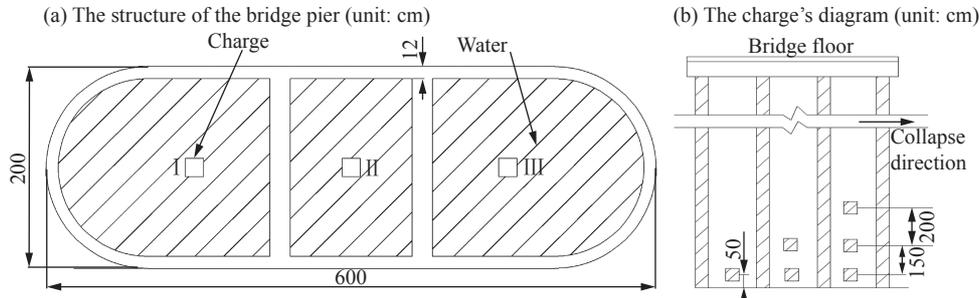


图 1 桥墩结构及装药示意图
Fig. 1 The diagram of bridge pier structure and charge

1.2 装药参数的计算

待拆桥墩为非均匀、截面形状不规则的结构体,且其高度与宽度之比远大于 1.5,根据汪旭光^[4]主编的《爆破设计与施工》的相关内容,可采用分层药包。单个药包的药量可依据下式计算:

$$Q = k(k_2\delta)^{1.6}R^{1.4} \quad (1)$$

$$R = \sqrt{S_R/\pi} \quad (2)$$

$$\delta = R(\sqrt{1 + S_\delta/S_R} - 1) \quad (3)$$

式中: Q 为药包质量, δ 为等效壁厚, R 为等效半径, k 为结构物修正系数,与材质、强度、破碎程度等相关,混凝土大部分破裂,且钢筋混凝土剥离彻底, $k=4\sim 5$; k_2 为与结构物尺寸 δ 、 R 相关的系数, $k_2=0.94+0.7\times(\delta/R)$; S_R 为通过药包中心的结构物内部水平截面面积, S_δ 为通过药包中心的结构物外壁的水平截面面积,相关参数如表 1 所示。

表 1 水压爆破相关参数
Table 1 Water pressure blasting parameters

结构物编号	δ/m	R/m	k	k_2	Q/kg
I、III	0.536	1.029	5	1.305	2.938
II	0.480	0.820	5	1.351	1.894

注: Q 分别取整数,即 I、III 区域总药量取 3 kg, II 区域取 2 kg。

由于 I、III 为不规则结构体,且壁厚不一致,这种情况下,应布置偏炸药包,使得药包偏向于厚壁一侧,偏炸距离 c 可由下式所示:

$$c = \frac{R(\delta_1^{1.143} - \delta_2^{1.143})}{\delta_1^{1.143} + \delta_2^{1.143}} \quad (4)$$

式中: c 为偏炸距离, m; δ_1 、 δ_2 侧板厚度, m。

根据式(1)~(4),计算出 I、III 号箱体的等效半径 R 为 1.029 m,等效壁厚 δ 为 0.536 m,单个箱体药包总质量 Q 取 3 kg,偏炸距离 c 为 0.3 m, II 号箱体的等效半径 R 为 0.820 m,等效壁厚 δ 为 0.480 m,单个箱体药包总质量 Q 取 2 kg^[4]。

1.3 装药参数

为了防止产生大量的飞石、水柱上冲及高压气体溢出的危害,桥墩内注水深度 12 m。为了实现桥

梁的定向倒塌, 经过计算, 在桥墩内 I 区域分层布置 3 个药包, 第一层药包质量为 $0.25Q$, Q_1 的计算值为 0.75 kg , 第二层药包质量为 $0.35Q$, Q_2 的计算值为 1.05 kg , 第三层药包质量为 $0.4Q$, Q_3 的计算值为 1.2 kg ; 在桥墩内 II 区域分层布置 2 个药包, 第一层药包质量为 $0.5Q$, 其计算值为 1 kg , 第二层药包质量为 $0.5Q$, 其计算值为 1 kg ; III 区域布置 3 kg 的单药包, 其示意图如图 1(b) 所示^[5]。

2 桥墩水压爆破有限元计算模型

2.1 算法的选择

为了模拟桥墩的水压爆破过程, 采用 ANSYS/LS-DYNA 程序, 对桥墩进行了前处理建模、修改关键字、递交计算、结果后处理、重启动等分析过程, 其中可采用 Lagrange 算法、Euler 算法、任意 Lagrange-Euler 算法(ALE)。由于 Lagrange 算法多用于固体的应力应变分析, 故钢筋混凝土采用 Lagrange 网格, Euler 算法多用于流体材料的分析中, 在桥墩水压爆破的数值模拟中, 由于涉及有钢筋混凝土、炸药、水、空气等相关材料, 所选取的算法是 ALE 算法, 即流固耦合算法, 利用此种算法可以兼得上述两种算法的优点。求解过程中, 炸药爆炸产生的荷载通过水介质采用流固耦合算法自动作用到钢筋混凝土网格上, 在荷载的作用下钢筋混凝土网格发生形变, 相应的结构体又反作用于流体介质, 改变其流动状态及压力变化状态, 进而实现对流体-固体之间耦合响应过程的模拟^[2]。

2.2 有限元计算模型

水压爆破模拟采用 1 号桥墩下半段作为研究对象, 为简化分析及节约计算时间, 取桥墩 1/2 模型进行分析, 药包按正方体几何尺寸建模, 同时起爆, 如图 2 所示。桥墩内注水高度为 12 m , I、III 区域药包布置于中心偏厚壁 0.3 m , 第一层药包距底板 0.5 m , 第二层药包距底板 2 m , 第三层药包距底板 4 m 。采用钢筋混凝土等效模型, 为满足精度要求, 网格大小设置为 2 cm , 模型顶部采用自由边界, 桥墩外壁周围与空气接触的壁面采用无反射边界, 桥墩 1/2 模型的对称面及桥墩底部采用法向约束。

2.3 材料本构模型及状态方程

水压爆破中涉及炸药、钢筋混凝土、水、空气等材料, 且会产生大变形, 所以需要考虑钢筋混凝土结构在大应变及高围压的条件下的损伤及破坏过程, 在 ANSYS/LS-DYNA 中有着丰富的材料模型, 通过对关键字的修改, 能较好地反映该工程水压爆破时的实际情况。

2.3.1 炸药参数及其状态方程

炸药采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型, 用 *INITIAL_DETONATION 定义炸药的起爆顺序及位置, 通过添加 *EOS_JWL 状态方程描述炸药爆炸时的爆轰气体状态, 式(5)用于表征爆炸时 JWL 状态方程决定的压力:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (5)$$

式中: p 为由 JWL 状态方程确定的爆轰压力, V 为爆轰产物的初始相对体积比, E_0 为炸药的初始比内能, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为 JWL 状态方程相关的物理常量, 本文使用的炸药相关参数取值见表 2。

表 2 乳化炸药计算参数

Table 2 Computational parameter of emulsion explosive

A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3})$	$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4 192	1 447	4 300

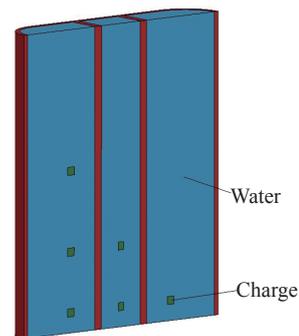


图 2 桥墩水压爆破有限元模型

Fig. 2 Finite element model of water pressure blasting plan of bridge pier

2.3.2 钢筋混凝土本构模型

钢筋混凝土模型采用**MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE* 材料进行数值模拟分析,该材料模型对于模拟结构物在大应变、高应变率、高围压及高强度荷载作用下材料的损伤及其破坏过程具有较好的效果。在 JHC 模型中需要定义的材料参数为:密度 ρ 为 2 650 kg/m³,弹性模量为 3.15×10⁴ MPa,剪切模量为 1.278×10⁴ MPa,抗压强度为 35 MPa,抗拉强度为 3.6 MPa,泊松比取 0.2。其他参数采用 HJC 模型中的相关参数进行表征,其中标准化黏结强度参数 A 为 0.79,标准化压力硬化参数 B 为 1.6,应变率系数 C 为 0.007,压力硬化指数 N 为 0.61,标准化最大强度为 7.0 GPa,损伤参数 D_1 、 D_2 分别为 0.04、1.0,屈服压力 p_c 为 0.016 5 GPa,锁定压力 p_l 为 0.80 GPa,压力常数 K_1 、 K_2 、 K_3 分别为 85 GPa、-171 GPa、208 GPa,断裂前塑性应变系数为 0.01,屈服时体积应变参数 μ_{crush} 为 0.001,锁定体积应变参数 μ_{lock} 为 0.10。

2.3.3 水介质模型

水采用**MAT_NULL* 描述,用**EOS_GRUNEISEN* 表征其状态方程,其密度为 1 000 kg/m³。

3 数值模拟结果与分析

3.1 水压爆破模拟结果分析

采用 1/2 桥墩模型,炸药在水中爆炸后,水介质中爆炸冲击波在 I、II、III 区域内经过传播、干涉、反射及来回反复震荡等过程作用于钢筋混凝土桥墩的四壁,如图 3 所示。

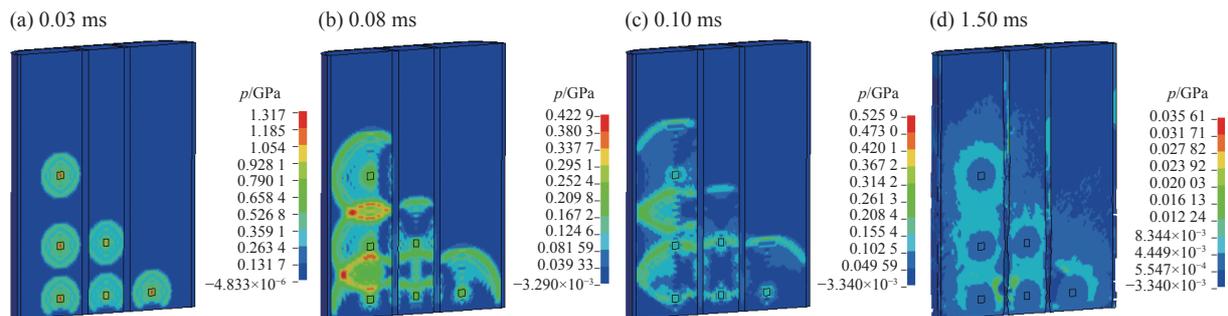


图 3 爆炸冲击波传播过程

Fig. 3 Blasting shock wave propagation progress

3.1.1 水压爆破中水的作用机理

水压爆破中,水作为一种特殊的传播介质,在爆破过程中起到的作用主要有:

(1)能量传递作用。为了比较相同条件下炸药在不同传播介质中能量的传递效率,在同一计算模型中仅将 K 文件里的材料(2 号材料模型)关键字修改为空气后再进行计算。通过数值模拟的对比可以得出:在水压爆破中,水作为被爆结构物与炸药之间的传播介质,主要起着均匀传递爆轰波能量的作用,且由于水的弱压缩性,水介质本身消耗的能量较少,爆轰波能量在水里的传播效率较高,如图 4 所示,当炸药周围的传播介质为水时,炸药爆炸时的能量耗散较小,桥墩结构的总体能量峰值为 4.031 MJ,当炸药周围为空气介质时,能量大部分以热能、声能等形式耗散,桥墩结构的总体能量峰值为 0.490 3 MJ。

(2)水楔劈裂作用。当炸药在水介质中爆炸时,

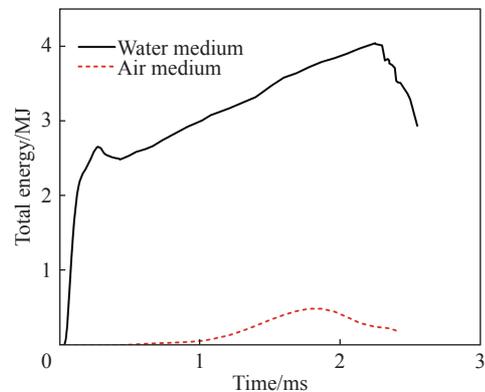


图 4 不同传播介质时桥墩总体能量历时曲线

Fig. 4 The total energy diachronic curve of bridge pier in water and air mediums

水中炸药爆炸产生的冲击波到达结构物壁面时, 围绕着桥墩壁面产生环向裂隙及径向裂隙, 随后水介质及爆轰气体快速进入到裂隙中, 进而对裂隙作用, 使其扩展、延伸, 水起到了良好的水楔作用。由于水的密度大及压缩性差, 水介质携带着大量爆炸冲击波能量作用于结构物, 水楔对微观裂纹的劈裂作用要远大于气楔的劈裂作用^[6]。

(3) 缓能作用。采用水压爆破主要是靠水介质进行能量传递, 炸药爆炸后的冲击波及气体产物在水中的传播速度要远小于在空气中的传播速度, 因此, 爆炸冲击波及爆轰气体能较均匀作用于结构物的壁面上, 桥墩壁面只产生破裂、脱筋, 而不产生飞石及过粉碎, 水介质的低渗流速度又阻碍了爆轰气体的快速外泄, 这不但提高了炸药能量的利用率, 还有效降低了噪声, 起到了良好的缓冲作用。

3.1.2 水压爆破对结构物的破碎机理

炸药在水介质中爆炸后, 对桥墩周围壁面的破坏作用形式主要有爆炸冲击波的作用、爆轰气体的膨胀做功、反射拉伸波及高速水流的破坏作用。桥墩的破坏过程如图 5 所示, 为方便观察桥墩破坏过程, 在 selpar 中设置不显示 part 2 水介质单元。

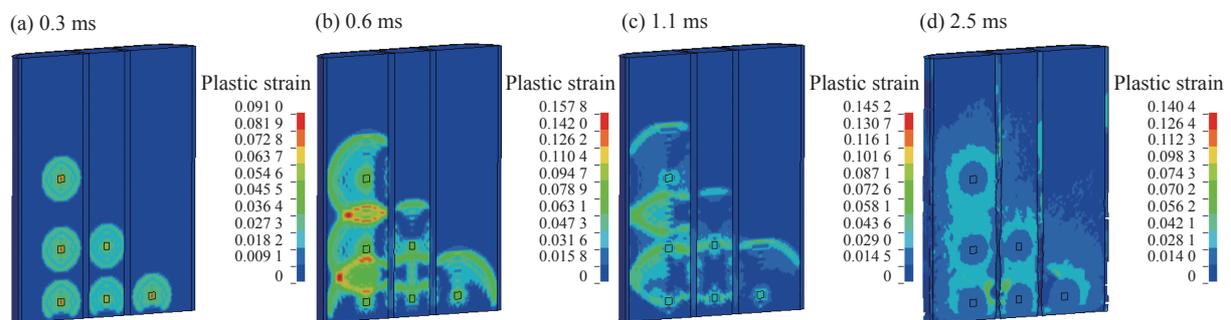


图 5 桥墩破坏过程

Fig. 5 Break progress of bridge pier

(1) 爆炸冲击波的作用。如图 3(a) 所示, 炸药爆炸后, 爆轰波传递到药包表面, 近水层受到爆炸荷载的冲击, 0.03 ms 时产生的冲击波首先到达底板, 距离药包较近的单元受到的压力为 0.268 GPa, 水中局部密度增大, 水中质点传播速度约为 1 900 m/s; 如图 3(b) 所示, 0.08 ms 时冲击波发生强烈的干涉现象, 两层不同药包间对称面上的冲击波由于干涉叠加, 增大了冲击波的峰值压力及传播速度, 但是药包层间部分区域由于干涉相消, 冲击波压力及传播速度被衰减了。约 0.1 ms 时, 冲击波到达中间隔板及左右两侧板, 由于传播过程能量的耗散, 冲击波到达侧板的峰值压力约为 0.026 3 GPa, 如图 5(a) 所示, 由于入射波强度大于边壁面的极限抗压强度, 在桥墩外层将出现龟裂现象, 但由于时间极短, 宏观裂纹来不及扩展, 水介质及爆轰气体暂时不会外泄^[7]。

(2) 爆轰气体的膨胀作用。随着冲击波的作用后, 爆轰气体作用下形成的水球迅速向外膨胀做功, 首先达到底板, 然后传至中间及周围侧板, 水球的快速膨胀使水介质空化区消失, 并突跃式的将能量作用于结构物壁面, 进一步使桥墩隔板、外壁的裂纹扩展、延伸^[4], 如图 5(b)、(c) 所示, 爆轰气体作用时间约为 2.5 ms。

(3) 反射拉伸波作用。水介质作用于桥墩周壁后, 在桥墩内不断产生脉动现象, 如图 3(d)、图 5(c) 所示, 压缩波传至壁面后反射成拉伸波, 由于钢筋混凝土的抗拉强度要远小于抗压强度, 所以桥墩壁面宏观裂纹开始迅速扩展, 桥墩开始发生较大变形及位移, 进而内壁发生破坏, 桥墩混凝土开始开裂并脱落;

(4) 高速水流的作用。如图 5(d) 所示, 随着桥墩壁面的破坏, 具有较大残压的水流从宏观裂纹及破坏口中高速冲出, 对桥墩壁面进一步进行破坏。

3.2 数值模拟结果对比与分析

为了研究装药形式、偏炸距离等因素对薄壁桥墩水压定向爆破效果的影响, 对比分析了多次数值模拟的结果, 如图 6 所示, 图 6(a) 为非对称装药条件下偏炸距离 0.3 m 的爆后效果, 图 6(b) 为非对称装药条

件下偏炸距离小于 0.2 m 的爆后效果,图 6(c) 为非对称装药条件下偏炸距离等于 0.2 m 的爆后效果,图 6(d) 为对称装药条件下偏炸距离 0.2 m 的爆后效果。

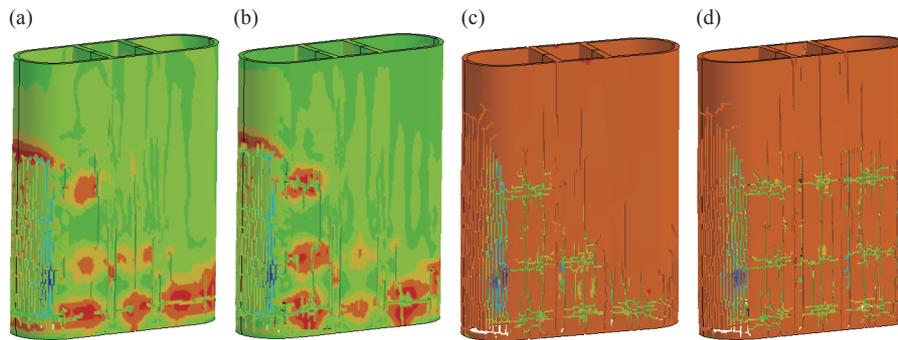


图 6 不同装药条件下桥墩爆破效果

Fig. 6 Blasting result of bridge pier under different conditions

3.2.1 偏炸距离的影响

在水压爆破实践中,对于壁厚不同的结构物,为了取得良好的爆破效果,需要偏离待拆除结构物的中心布置炸药。在本工程中,按照不规则断面结构物偏炸距离计算经验公式(式(4))得出的偏炸距离为 0.3 m,但通过多次数值模拟的结果,发现偏炸距离 $c \geq 0.3$ m 时,桥墩外壁破碎不充分,爆破效果不佳,如图 6(a) 所示;当将偏炸距离从 0.3 m 逐渐减小时,桥墩周壁及中间隔板破碎效果逐渐变好,当偏炸距离为 0.2 m 时,桥墩隔板及周壁破碎充分,爆破效果好,如图 6(c) 所示;当偏炸距离从 0.2 m 逐渐变小时,桥墩中间隔板爆破效果变差,不利于桥墩定向倒塌,如图 6(b) 所示。

3.2.2 药包布置形式的影响

为对比分析药包布置形式对桥墩定向水压爆破效果的影响,在桥墩水压爆破模拟中采用对称装药和非对称装药两种计算模型,通过数值模拟结果可以得出,采用非对称装药能较好的实现桥墩爆破时能在预定位置产生定向切口,如图 6(c) 所示,桥墩在自重应力及冲击波的作用下产生较大弯矩,进而实现桥墩的定向爆破拆除;当采用对称装药时,桥墩周壁及中间隔板破碎情况大体一致,不能形成定向切口,如图 6(d) 所示,这种情况下极易出现桥墩爆后整体下坠,塌而不倒,甚至反向倒塌,因此,采用对称装药形式不仅不能实现桥墩定向倒塌,还存在极大的安全隐患,故在同类工程中不推荐采用对称装药结构。

3.3 水压爆破结果分析与讨论

根据现场爆破效果及数值模拟的结果,虽然该桥梁的水压定向爆破拆除达到了预期的效果,但为了优化及改进类似工程的水压爆破方案,桥墩的爆破参数仍值得探讨、改进:

(1) 根据数值模拟及现场爆破效果,采用理论公式计算得到的药包布置的偏炸距离 0.3 m 偏大,左右两侧板的冲击破坏不明显,左右两侧板的破碎效果不佳,因此药包的偏炸距离应小于 0.3 m,如本工程中设置 0.2 m 左右的偏炸距离,左右两侧板的破碎效果将有所改善;

(2) 各药包同时起爆,根据图 3(b) 可以看出,由于同仓两层炸药爆炸后的冲击波发生强烈的干涉现象,其能量被削弱,因此对于布置分层药包的水压爆破工程,药包层间合理设置延期时间可以增大炸药能量的利用率,但层间延期时间不宜过长,应控制在 2.5 ms 以内,否则会使得爆轰气体及水介质从先破坏的爆破切口中泄出,而达不到预定的爆破效果;

(3) 由于采用导爆管雷管,其延期精度不高,进而使得右仓的爆破效果不佳,在以后同类工程中可引进数码雷管,其延期精度可满足各类工程需求^[8],通过多次水压爆破实践经验发现,当各药包总延期时间不大于爆轰气体作用时间时,合理设置药包延期时间可有效的改善爆破效果;

(4) 由于桥墩结构的缺陷及其废旧老化等因素,桥墩内各仓蓄水能力严重不足,此次爆破过程中采用 3 台流量为 20 m³/h 的水泵不停地给各水压仓供水,但根据后来类似爆破工程的实践经验,采用高强度聚乙烯水袋进行灌水填装显得更经济可行。

4 结 论

以孟加拉国贾木那大桥的水压定向拆除爆破工程为背景, 采用显示动力学分析软件 ANSYS LS-DYNA 对桥墩的水压爆破进行了数值模拟, 分析了桥墩的水压爆破破坏形式及过程, 并对爆破方案进行了讨论, 得出以下结论:

(1) 在该薄壁桥墩水压爆破工程中, 采用传统的经验公式计算出的偏炸距离 0.3 m 布置药包时, 其两侧圆弧侧板破碎效果不佳, 通过数值模拟得出偏炸距离为 0.2 m 时, 桥墩周壁及中间隔板破碎效果最佳, 在以后同类工程实践中, 可采用经验公式结合数值模拟的结果设置药包偏炸距离, 以达到爆破效果最佳的目的;

(2) 在桥墩水压定向拆除爆破中, 采用非对称装药结构可较好的实现桥墩爆破时能在预定位置产生定向切口, 桥墩在其自重应力及冲击波作用下, 能产生较大的弯矩, 使得桥墩实现定向倒塌, 通过数值模拟结果的对比, 采用对称装药结构进行爆破时, 桥墩容易出现塌而不倒, 造成巨大安全隐患, 在同类工程中应避免采用对称装药结构;

(3) 采用同时起爆, 药包层间发生较为强烈的干涉现象, 削弱了冲击波能量, 类似工程可合理设置药包层间延期时间, 以减弱冲击波的干涉相消现象, 进而增大炸药能量的利用率, 但层间延期时间应根据实际工况决定, 且应保证爆轰气体不提前外泄, 本工程中层间延期时间应小于 2.5 ms;

(4) 由于导爆管雷管的延期误差较大, 采用普通导爆管雷管的精度不能达到工程需求, 因此在同类工程中可采用数码电子雷管进行爆破作业, 以提高雷管延期精度及爆破破碎效果。

参考文献:

- [1] 张亚宾, 张云鹏, 李占金, 等. 水压爆破的数值模拟 [J]. *河北理工大学学报 (自然科学版)*, 2007, 29(4): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0262.2007.04.001.
ZHANG Yabin, ZHANG Yunpeng, LI Zhanjin, et al. Study on hydraulic blasting with numerical simulation [J]. *Journal of Hebei Polytechnic University (Natural Science Edition)*, 2007, 29(4): 1-4. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0262.2007.04.001.
- [2] 杨忠华, 杨军, 陈大勇. 混凝土拱座空心立柱水压爆破数值模拟研究 [J]. *爆破*, 2010, 27(4): 70-73. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2010.04.018.
YANG Zhonghua, YANG Jun, CHEN Dayong. Study on water pressure blasting of reinforced arch seat and hollow pillar numerical simulation [J]. *Blasting*, 2010, 27(4): 70-73. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2010.04.018.
- [3] 孙金山, 姚颖康, 吴亮, 等. 高架桥混凝土多室箱梁水压爆破破碎机理数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 299-306. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0299-08.
SUN Jinshan, YAO Yingkang, WU Liang, et al. Numerical simulation of water-pressure blasting mechanism in breaking viaduct box girder [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 299-306. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0299-08.
- [4] 汪旭光. 爆破设计与施工 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 454-460.
- [5] 金淳圭. 水压控制爆破合理参数的确定 [J]. *爆炸与冲击*, 1992, 12(4): 363-370.
JIN Chungui. Determination of proper parameters of water pressure control blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1992, 12(4): 363-370.
- [6] 袁俊平, 王启贵. 水力劈裂楔劈效应试验研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(12): 3360-3364. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.12.003.
YUAN Junping, WANG Qigui. An experimental study of wedge splitting effect of hydraulic fracturing [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(12): 3360-3364. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.12.003.
- [7] 张世文, 胡美娥, 贾宏志. 冲击波加载区域对冲击波速度和衰减的影响 [J]. *应用力学学报*, 2016, 33(3): 371-377. DOI: 10.11776/cjam.33.03.B052.
ZHANG Shiwen, HU Meie, JIA Hongzhi. Influence of shockwave loading area on its propagating velocity and decay law [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2016, 33(3): 371-377. DOI: 10.11776/cjam.33.03.B052.
- [8] 罗福友. 城市爆破中电子雷管与导爆管雷管的应用对比 [J]. *火工品*, 2017(2): 57-60. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2017.02.015.

LUO Fuyou. Application contrast of digital electronic detonator and ordinary detonator in city blasting [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2017(2): 57–60. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2017.02.015.

Directional water pressure blasting of Jamuna bridge and its numerical simulation

ZHANG Qinbin¹, CHENG Guihai¹, XU Zhonghui², LING Yuheng¹, JIANG Wenju¹, CHEN Shanjiang¹

(1. *School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China;*

2. *Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, Sichuan, China*)

Abstract: In this study we investigated the mechanism of water pressure blasting in the thin-walled bridge pier, taking the water pressure directional blasting demolition project of Jamuna bridge as the research object and using the explicit dynamics analysis software to simulate the crushing process of the water pressure blasting in the bridge pier. The numerical simulation results show that the failure of the bridge pier mainly depends on the explosive shock wave, the detonation gas, the reflected tension wave and the high-speed flow. Based on these findings, we examined the technical problems of the arrangement of the explosive charge and the order of detonation in the directional water pressure blasting in the bridge pier.

Keywords: bridge pier; water pressure directional blasting; finite element method; crushing mechanism

(责任编辑 王易难)