

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.06.007

船坞围堰拆除爆破数值模拟及优化分析^{*}

秦 花^① 杨 军^① 彭先泽^① 陈大勇^②

①北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室(北京,100081)

②中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室(江苏徐州,221116)

[摘 要] 利用 DDA 方法对船坞围堰的拆除爆破进行数值模拟,分析倾斜孔低水位、倾斜孔高水位、垂直孔和倾斜孔结合低水位以及垂直孔和倾斜孔结合高水位 4 种不同方案下的爆破特性和规律。研究表明:在某公司 1[#]、2[#]船坞围堰的拆除爆破过程中,水位高低对倾斜孔装药影响不大,对垂直孔和倾斜孔结合装药有明显影响;垂直孔和倾斜孔结合装药高水位工况下形成的边坡较缓,低水位工况下形成的爆堆较低,容易产生水突然涌入坞门的现象;综合分析,选择倾斜孔装药爆破会得到更好的爆破效果。

[关键词] DDA 数值模拟 船坞围堰 拆除

[分类号] TU746.5

引言

船坞围堰拆除是在船坞内部建造完成后,对船坞施工的最后一道工序^[1]。船坞围堰拆除爆破是船坞围堰拆除的一种重要手段。我国许多学者对船坞围堰拆除爆破进行了技术方面的探讨^[1-6],但少有将计算机模拟技术应用于船坞拆除爆破。利用非连续变形分析方法 DDA (discontinuous deformation analysis) 对船坞围堰爆破拆除进行分析是围堰拆除研究的一种重要手段,可预先验证施工方案的可行性^[7]。

1 工程背景

舟山中电绿科船舶修造有限公司 1[#]、2[#]船坞围

堰位于舟山长白岛东北部大满村至大湾村之间沿岸及附近水域。该工程待拆除围堰全长约 140 m,顶宽约 7 m,由 1[#]坞 8 万吨和 2[#]坞 15 万吨两个船坞组成。围堰 25 m 范围内碎石泥渣工程量约为 4600 m³,浆砌石量为 3000 m³,基岩爆破工程量约 30000 m³,25 m 范围外水下炸礁量为 15000 m³。其典型断面如图 1 所示。

2 模拟计算

2.1 计算方法

采用非连续变形分析方法 DDA 对船坞围堰拆除爆破方案进行模拟研究。DDA 很好地将连续和非连续计算融为一体,可以用来模拟岩块的移动、转

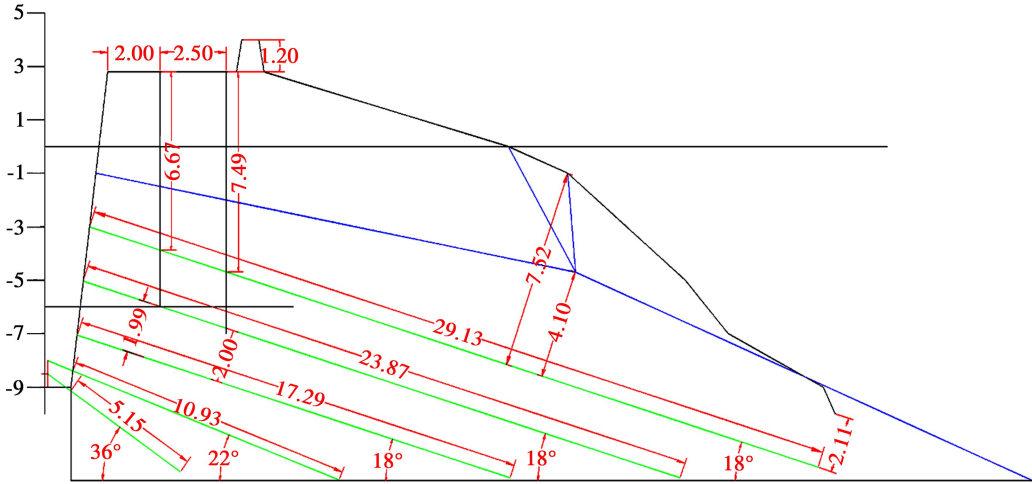


图 1 围堰炮孔布置典型断面图(单位:m)

Fig. 1 Typical profile of cofferdam blast holes layout(unit:m)

^{*} 收稿日期:2013-05-23

作者简介:秦花(1988~),女,硕士研究生,研究方向:安全技术及工程。E-mail:qinhua 0308@163.com

动、块体间的张开、闭合等运动过程,并可据此判断岩体的破坏程度、破坏范围,根据指定滑面上力的平衡条件,计算出边坡各接触面局部安全系数和整体安全系数,从而对岩体的整体和局部稳定性作出正确的评价^[8],对于不连续块体系统力学行为的求解,具有明显优势。DDA 方法把静力和动力分析结合在一起,可进行正、反分析,从变形的角度研究块体的稳定性,不仅允许块体自身位移和变形,而且允许块体间有滑动、转动、张开等运动形式,从而能够计算多块体系统的大位移、大变形,且计算的变形是不连续的,考虑变形有一时间过程,是动态的。到目前为止 DDA 方法已经在岩土地质、边坡渗流、桥梁隧道等工程领域得到了广泛的研究和应用。选择这一方法对船坞围堰爆破拆除工程的岩石爆破过程进行模拟较为合适。

2.2 计算模型

由于围堰靠近船坞一侧比较陡,而且岩石横跨整个断面,若仅使用垂直炮孔会给施工带来很大困难,所以这里结合现实情况,对只采用倾斜孔和垂直孔与倾斜孔相结合两种情况进行了数值模拟,同样考虑水位高度,建立的 4 个 DDA 数值模型,如图 2~图 5 所示。

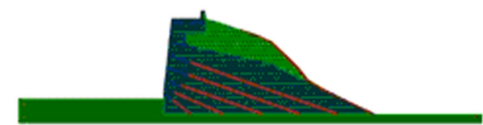


图 2 倾斜孔低水位模型
Fig. 2 Simulation of inclined holes low water level

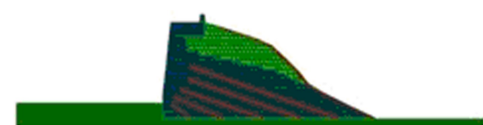


图 3 倾斜孔高水位模型
Fig. 3 Simulation of inclined holes high water level

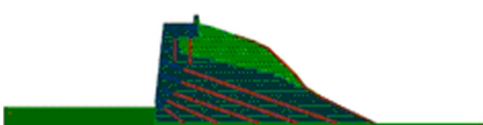


图 4 垂直孔倾斜孔结合低水位模型
Fig. 4 Simulation of vertical hole combined with inclined holes low water

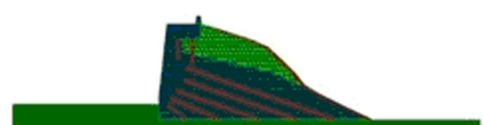


图 5 垂直孔倾斜孔结合高水位模型
Fig. 5 Simulation of vertical hole combined with inclined holes high water

断面左侧为坞门,右侧为海面,其中强风化凝灰岩和中等风化凝灰岩(图中蓝色部分)采用三角形单元,单元之间由节理连接,通过设置节理的黏结力和抗拉强度将三角形单元连接起来,从而形成大块的岩石。黏土以及碎石(图中绿色部分)采用四边形单元,单元之间也存在节理,但是节理抗拉强度和黏结力均设置为零,只设置摩擦角,从而来模拟散状的土和碎石,模型下部用两端固定的矩形块体来模拟地面,炮孔中红色部分代表装药,右侧边界上红色部分代表水压载荷,下面的绿色部分左侧地面部分是实际中的地平线,下面的右侧(海水侧)绿色地面部分是建来承接爆堆的,并非实际海底地面,在简化过程中,考虑到围堰顶部和海水部分之间的关系及爆堆的堆积受海底地面的影响并不大,故而在此做了简化。

计算模拟中的材料参数如下:岩石密度 $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$;弹性模量 $E = 2 \times 10^{11} \text{ Pa}$;泊松比 $\mu = 0.26$;岩石节理摩擦角 $\varphi = 15^\circ$,黏结力 $c = 5 \text{ MPa}$,抗拉强度 $\sigma = 5 \text{ MPa}$;混凝土密度 $\rho = 3200 \text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E = 0.31 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比 $\mu = 0.2$,节理摩擦角 $\varphi = 5^\circ$,黏结力 $c = 3 \text{ MPa}$,抗拉强度 $\sigma = 3 \text{ MPa}$ 。

计算过程中,爆炸载荷作用简化为如图 6 所示的三角形压力时程曲线,该曲线能较好地表现出爆炸载荷瞬间达到最大峰值、然后逐渐衰减的特点。

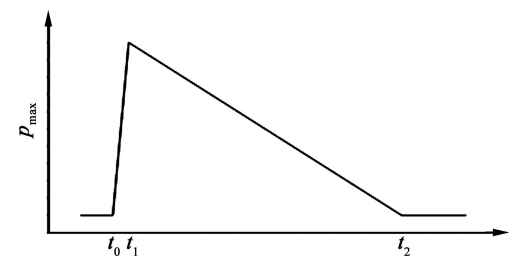


图 6 爆炸的压力时程曲线
Fig. 6 Pressure-time history of blast

模型右侧为水边界,计算过程中考虑水压的作用,而且水压力大小随模型高度变化:高水位时,水面的高程为 $+1.98 \text{ m}$;低水位时,水面的高程为 $+0.9 \text{ m}$ 。

3 计算结果分析

为准确模拟爆破过程,计算过程中,各个炮孔之间也设置了延时,垂直孔先起爆,两个垂直孔之间延时时间为 0.025 s ,倾斜孔之间延时时间为 0.065 s 。总的迭代时间步为 45000 。

3.1 爆破过程对比

通过对倾斜孔与垂直孔和倾斜孔相结合两种工况下拆除爆破过程的模拟对比,可以将围堰爆破拆

除过程分为以下 4 个阶段:裂纹形成、裂纹扩展、岩体破碎、爆堆形成。

从图 7 ~ 图 10 可以看出:

- 1) 垂直孔和倾斜孔相结合工况下,起爆后裂纹形成较多,裂纹扩展较为迅速;
- 2) 垂直孔和倾斜孔相结合工况下,岩石破碎后有明显的岩石块体飞起的现象;而倾斜孔工况下,由于倾斜孔最小抵抗线较大,只是起到松动的作用,并未出现块体飞起的现象;
- 3) 垂直孔和倾斜孔相结合工况下形成的爆堆高度较倾斜孔工况下低。

3.2 爆堆形状对比

倾斜孔低水位、倾斜孔高水位、垂直孔和倾斜孔结合低水位以及垂直孔和倾斜孔结合高水位 4 种工况下爆堆形状如图 11 所示。从图中可以看出垂直孔和倾斜孔相结合工况下岩石的破碎效果更好,分布较均匀,形成的爆堆高度较低。这是由于有垂直孔存在时爆炸载荷的作用方向是垂直于炮孔壁的,垂直孔起爆后将上部岩石完全破碎的同时,还使得上部岩石块体水平向左飞出,为倾斜孔提供了更多自由面,倾斜孔起爆后,上部的岩石失去下部岩石的支撑作用而向左下方滑动,使块体分布得更加均匀;

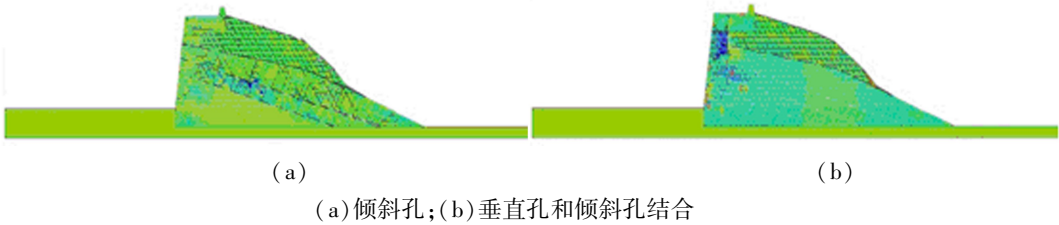


图 7 裂纹形成

Fig. 7 Crack formation

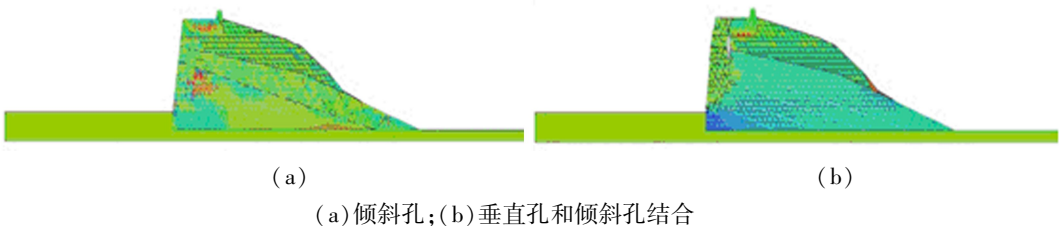


图 8 裂纹扩展

Fig. 8 Crack propagation

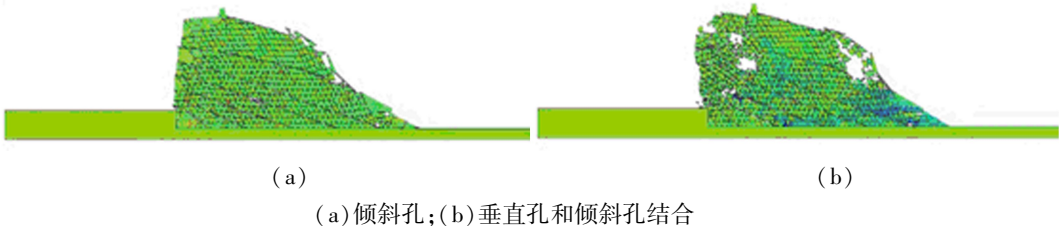


图 9 岩石破碎

Fig. 9 Rock breaking



图 10 爆堆形成

Fig. 10 Rock pile formation

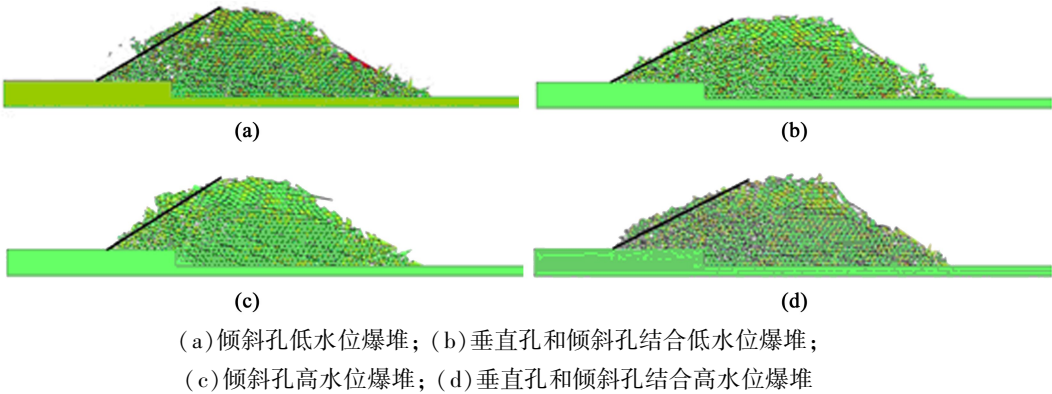


图 11 爆堆形状对比

Fig. 11 Comparison of rock pile shape

而不存在垂直孔时,由于倾斜孔最小抵抗线较大,只能起到松动的作用,而且边界处的岩石并未完全破碎,存在大块,大块的惯性力更大,滑动缓慢,会阻碍后方的块体运动,所以最后形成的爆堆较高。

图 11(a)和(c)对比可以看出,倾斜孔工况下,水位的高低对爆堆的形成无明显影响。这是由于倾斜孔装药情况下,炮孔最小抵抗线较大,容易形成大块,大块的惯性力较大,消耗相当一部分爆炸荷载,使得只有 2 m 之差的水位水压对于爆炸荷载的影响微乎其微,所以水位对于倾斜孔装药的影响并不明显。

图 11(b)和(d)对比可以看出,垂直孔和倾斜孔相结合工况下,水位的高低对爆堆的形成有一定的影响。这是由于有垂直孔存在时,岩石破碎较为均匀,岩石碎块的惯性力对爆炸荷载的消耗较少,而 2 m 的水位水压对爆炸荷载的消耗较为明显,高水位使得岩石向水压方向倾斜。

通过进一步的分析,倾斜孔低水位爆堆边坡处角度为 30.55° ,倾斜孔高水位爆堆边坡处角度为 31.94° ,垂直孔和倾斜孔结合低水位爆堆边坡处角度为 27.64° ,垂直孔和倾斜孔结合高水位爆堆边坡处角度为 26.25° 。红色部分为水压线,明显当垂直孔和倾斜孔高水位爆堆形成后,水压线顶部超出或接近爆堆顶部,说明垂直孔和倾斜孔结合高水位工况下形成爆堆的边坡更加平缓,容易产生水突然涌入坞门的现象,不利于后期清渣工作。

3.3 块体位移变化对比

为进一步了解 4 种工况爆破过程中块体的运动规律,对模型不同区域的块体进行跟踪研究。选择的测量点如图 12 所示。1 号测量点位于第一排垂直孔左侧,2 号测量点位于两个垂直孔之间,3 号测量点位于水边界附近,得出位移时间曲线如图 13 ~

图 18 所示。

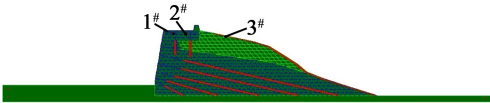
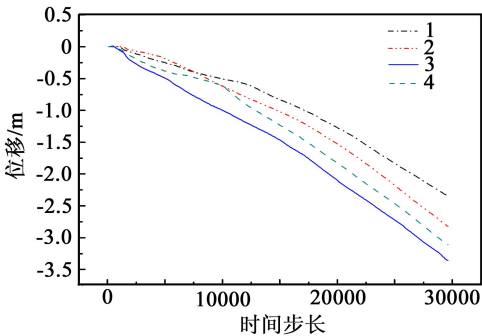


图 12 测量点位置

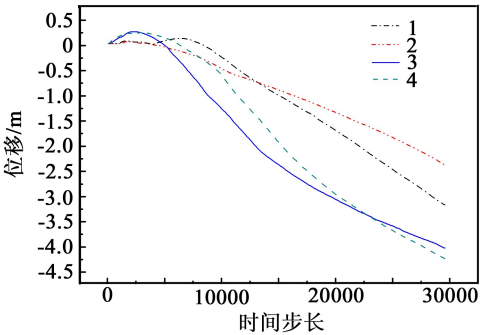
Fig. 12 Position of measurement points



1 – 倾斜孔低水位;2 – 倾斜孔高水位;3 – 垂直孔和倾斜孔结合低水位;4 – 垂直孔和倾斜孔结合高水位

图 13 1#测量点水平方向位移时间曲线

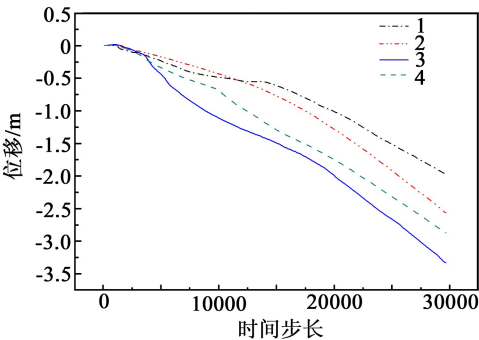
Fig. 13 Horizontal displacement time plot of measuring point 1#



1 – 倾斜孔低水位;2 – 倾斜孔高水位;3 – 垂直孔和倾斜孔结合低水位;4 – 垂直孔和倾斜孔结合高水位

图 14 1#测量点垂直方向位移时间曲线

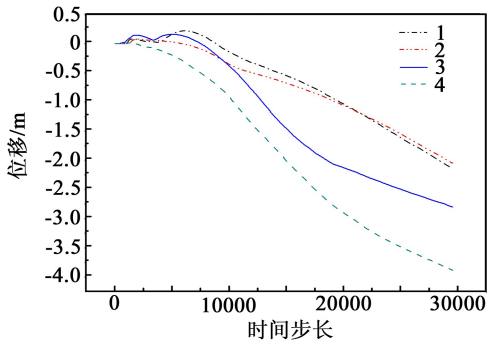
Fig. 14 Vertical displacement time plot of measuring point 1#



1 - 倾斜孔低水位;2 - 倾斜孔高水位;3 - 垂直孔和倾斜孔结合低水位;4 - 垂直孔和倾斜孔结合高水位

图 15 2#测量点水平方向位移时间曲线

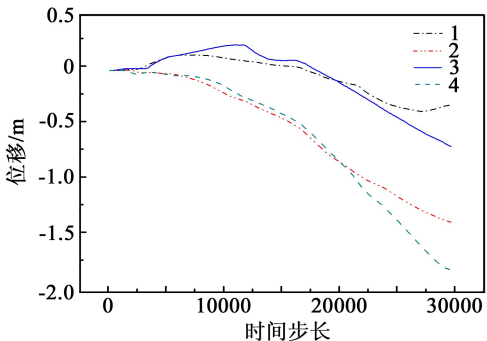
Fig. 15 Horizontal displacement time plot of measuring point 2#



1 - 倾斜孔低水位;2 - 倾斜孔高水位;3 - 垂直孔和倾斜孔结合低水位;4 - 垂直孔和倾斜孔结合高水位

图 16 2#测量点垂直方向位移时间曲线

Fig. 16 Vertical displacement time plot of measuring point 2#

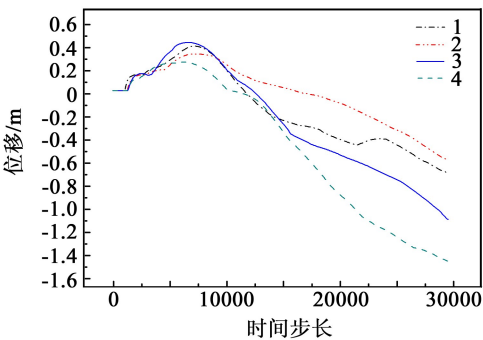


1 - 倾斜孔低水位;2 - 倾斜孔高水位;3 - 垂直孔和倾斜孔结合低水位;4 - 垂直孔和倾斜孔结合高水位

图 17 3#测量点水平方向位移时间曲线

Fig. 17 Horizontal displacement time plot of measuring point 3#

位移时间曲线图中可以看出,4 种工况下均有如下过程:在起爆后,炸药的内能先是转化为机械能,机械能将岩石间的节理破坏,使岩石产生裂纹,形成块体,机械能逐渐损耗,剩下的机械能转化为岩石块体的动能,使模型上部块体由于受到爆炸载荷



1 - 倾斜孔低水位;2 - 倾斜孔高水位;3 - 垂直孔和倾斜孔结合低水位;4 - 垂直孔和倾斜孔结合高水位

图 18 3#测量点垂直方向位移时间曲线

Fig. 18 Vertical displacement time plot of measuring point 3#

的作用而被抛出,块体的动能又转化为势能,达到最高点,出现垂直向上的最大位移,最后由于块体自身重力的作用又垂直向下运动,最后达到平衡位置。

通过图 13 ~ 图 18 的对比,可以看出:垂直孔与倾斜孔结合布孔的情况下,3 个测量点的水平和垂直位移均大于单纯使用倾斜孔的情况,进一步说明垂直孔的存在加强了岩石破碎;水位高度对 1 号和 2 号测量点的水平方向位移影响不大,对 3 号测量点的影响较为明显(图 17)。这是因为 3 号测量点位于水的边界上,直接受到水的压力的作用,当前面岩石破碎以后,水压推动整个围堰向左运动,水位越高,水压越大,而 1 号和 2 号测量点在起爆前由于节理黏结力的存在,水压的作用力小于岩石节理的强度,可以忽略不计,爆破以后 1 号和 2 号测量点所在块体已经从围堰上脱离下来,所以并不受水压的影响;垂直孔与倾斜孔结合布孔低水位工况下,1 号和 2 号测量点的块体水平位移量最大,这也进一步说明了垂直孔装药低水位时爆破产生的爆堆底面积最大,爆堆高度最小,容易产生水突然涌入坞门的现象。

4 结论

运用非连续变形分析方法,通过合理的假设和简化,对舟山中电绿科船舶修造有限公司 1#、2#船坞围堰进行倾斜孔低水位、倾斜孔高水位、垂直孔与倾斜孔结合低水位、垂直孔与倾斜孔结合高水位 4 种工况的爆破拆除进行了数值模拟研究,结果表明:

1) 对倾斜孔装药和垂直孔与倾斜孔相结合装药 2 种工况下爆破过程的模拟可以看出,整个爆破过程都可以分为 4 个阶段:裂纹形成、裂纹扩展、块体抛掷、爆堆形成。垂直孔和倾斜孔相结合装药工况下,岩石破碎效果最好,但容易形成飞石。

2) 通过倾斜孔低水位、倾斜孔高水位、垂直孔

和倾斜孔结合低水位以及垂直孔和倾斜孔结合高水位 4 种工况下爆堆形状的对比,可以看出:倾斜孔工况下,水位高低对爆破效果无明显影响,形成爆堆较高;垂直孔和倾斜孔结合工况下,水位高低对爆破效果有一定影响,且高水位时爆堆边坡较为缓和,容易产生水突然涌入坞门的现象。

3)通过 4 种工况下 3 个测量点的位移时间曲线的对比,可以看出:垂直孔和倾斜孔结合低水位工况下,爆堆底面积较大,高度较低,容易产生水突然涌入坞门的现象。

4)通过对数值模拟结果的综合分析,得出结论:倾斜孔装药会得到更好的爆破效果。

参 考 文 献

[1] 唐小再. 船坞围堰拆除爆破技术研究及工程应用 [D]. 赣州:江西理工大学, 2011.
Tang Xiaozai. Blasting technology research and engineering application about the dock cofferdam demolition [D]. Ganzhou:Jiangxi University of Science and Technology, 2011.

[2] 宋志伟,陈锋华,汪竹平,等. 船坞围堰爆破拆除过流控制研究及工程应用[J]. 工程爆破,2010,16(1):52-54.
Song Zhiwei, Chen Fenghua, Wang Zhuping, et al. Overflow control study and engineering application about dock cofferdam blasting demolition [J]. Engineering Blasting,2010,16(1):52-54.

[3] 陈俊海,仲彦. 浮船坞系船墩拆除施工技术[J]. 水运工程,2009(11):177-181.

Chen Junhai, Zhong Yan. Construction technology for demolishing of floating dock's mooring dolphins [J]. Port & Waterway Engineering,2009(11):177-181.

[4] 吕庭刚,黄志强. 倾斜深孔爆破拆除船坞围堰[J]. 工程爆破,2007,13(1):62-65.
Lü Tinggang, Huang Zhiqiang. Demolition of boatyard cofferdam by blasting with sloping deep holes [J]. Engineering Blasting,2007,13(1):62-65.

[5] 金沐. 舟山长白岛 1[#]和 2[#]船坞围堰拆除爆破[J]. 工程爆破,2011,17(3):58-61.
Jin Mu. Blasting demolition of 1[#] and 2[#] boatyard cofferdams in Changbai island and Zhoushan city [J]. Engineering Blasting,2011,17(3):58-61.

[6] 张中雷,应海剑,李鸿飞,等. 坞内充水条件下船坞围堰爆破网路的施工与防护[J]. 爆破器材,2010,39(4):28-32.
Zhang Zhonglei, Ying Haijian, Li Hongfei, et al. Construction and protection for blasting network of dock cofferdam under water-filled condition [J]. Explosive Materials,2010,39(4):28-32.

[7] 赵根,王秀杰,吴新霞,等. 三峡三期 RCC 围堰拆除爆破倾倒效果 DDA 模拟[J]. 固体力学学报,2006(S1):148-154.
Zhao Gen, Wang Xiujie, Wu Xinxia, et al. DDA numerical simulation of demolition blasting of TGP's III-phase upstream RCC cofferdam [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2006(S1):148-154.

[8] 何传永,孙平. 非连续变形分析方法程序与工程应用 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

Numerical Simulation and Optimization Analysis for Demolition Blasting of Dock Cofferdam

QIN Hua^①, YANG Jun^①, PENG Xianze^①, CHEN Dayong^②

①State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing,100081)

②State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology
(Jiangsu Xuzhou, 221116)

[ABSTRACT] DDA method was used to simulate the demolition blasting of dock cofferdam. Blasting characteristics and rules in 4 different states, including inclined holes low water level, inclined holes high water level, vertical holes combined with inclined holes low water level and vertical holes combined with inclined holes high water level, were analyzed. The results show that in the demolition blasting process of 1[#] and 2[#] dock cofferdam of a company, the water level has little effect on the charge of slant holes, but has significant effect on the combination of vertical holes and inclined holes. Vertical holes combined with inclined holes form a gentler slope in high water level, and a lower rock pile in low water level. Both of them may result water pour into dock instantly. Under the comprehensive analysis, it shows that the charge of inclined holes will get better blasting results.

[KEY WORDS] DDA, numerical simulation, dock cofferdam, demolition