

爆炸排淤填石法机理研究

A study on the mechanism of toe-shooting method

乔继延, 丁 桦, 郑哲敏
(中国科学院 力学研究所工程科学部, 北京 100080)

摘要: 结合模型实验和数值计算, 分析了爆炸排淤填石法的机理。在模型实验中, 通过示踪法建立泥石置换的整体物理图像, 进而阐述爆炸排淤填石法的机理; 利用 LS-DYNA 动态有限元分析软件, 针对爆炸排淤填石过程进行了数值仿真, 并与实验结果进行了对比。

关键词: 爆炸排淤填石法; 模型实验; 示踪法; 数值计算

中图分类号: TU 472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2004)03-0349-04

作者简介: 乔继延(1969-), 男, 吉林省白城市人, 中国科学院力学研究所工程科学部博士研究生。

QIAO Ji-yan, DING Hua, ZHENG Zhe-min

(Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: In this paper the mechanism of toe-shooting method is studied through model experiments and numerical simulations. By utilizing tracing particles, the authors establish a whole physical diagram of replacing seaooze with rockfills, and then describe the mechanism of toe-shooting. The process of toe-shooting is simulated by using LS-DYNA dynamic FEM program, and its feasibility is verified by comparison with experimental data.

Key words: toe-shooting method; model experiment; tracing method; numerical simulation

0 前 言*

爆炸排淤填石法^[1,2]是我国从 20 世纪 80 年代中期开始发展起来的软基处理新技术, 其施工方法是: 在抛填堆石体前方淤泥内埋置群药包, 爆后抛填堆石体向形成的淤泥爆坑内塌落, 朝前塌落的堆石体形状如同“石舌”。当继续抛填至石舌断面时, 石舌上部的浮淤很容易被挤出, 形成新的抛填体。通过多次这样的循环, 就可以筑成符合设计长度的海堤(图 1)。

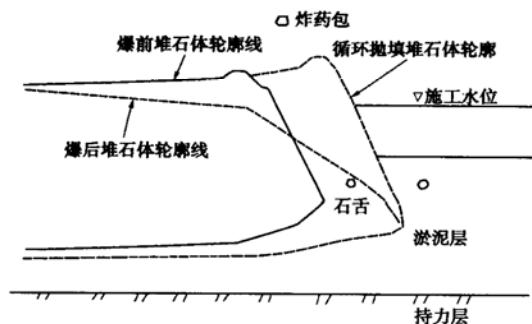


图 1 爆炸排淤填石法示意图

Fig. 1 Toe-shooting method

在上述施工方法中, 单循环中堆石体向前塌落的距离(也称进尺量)是评价泥石置换效率的重要指标, 取决于堆石体高度、炸药量、炸药埋深、炸药与堆石堤间的距离等多个施工参数。在多参数影响的情况下, 作者认为, 最基本的办法是从分析泥石置换的中间过程入手, 建立起爆炸排淤填石法的整体物理图像, 之后

再判断哪些参数是主要的, 以及这些主要参数的变化规律。本着这些想法, 笔者以模型实验和数值计算相结合, 做了部分(前期)工作。

1 模型实验

1.1 示踪实验 1

实验在长 3 m、宽 1 m、高 1 m 的爆炸池中进行。在爆炸排淤填石法的工程实践中, 多数工程的堤身高度在 10~20 m 之间, 需处理的淤泥厚度在 10 m 以上。本文模型实验的比例取为 1:30。

将带有标号的铝块爆前预埋在堆石体里(铝的密度与堆石相近, 铝块的大小与堆石的平均块度相当), 将带有标号的直径 3.5 mm 的 PVC 条和直径 3 mm 的橡胶条预埋在淤泥里做示踪物(PVC 条的密度略小于淤泥, 橡胶条的密度略大于淤泥), 并记录示踪物的初始位置, 爆后再把这些示踪物找到。根据示踪物爆前和爆后的位置变化, 推断泥石置换的中间过程。

堆石体的密度为 1.86 g/cm^3 , 平均粒径为 25 mm, 不均匀系数约等于 3。淤泥密度为 1.65 g/cm^3 , 含水量 60%。爆前堆石体高 40 cm, 淤泥厚 40 cm, 条形布药 12 g/m(黑索金), 布药线距堆石体坡脚 10 cm, 水深 25 cm。图 2~4 分别表示爆前实验布置、爆后堆石体各部分位置变化及淤泥各部分位置变化。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10072070)

收稿日期: 2003-07-07

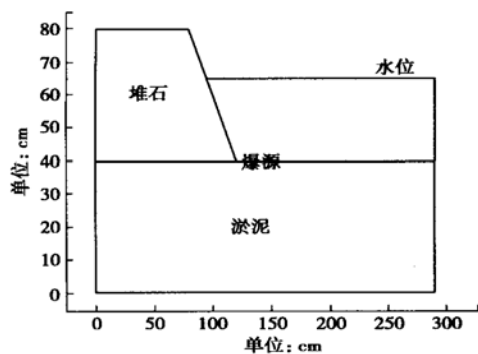


图2 实验1爆前实验布置图

Fig. 2 Arrangement of experiment 1 before ignition

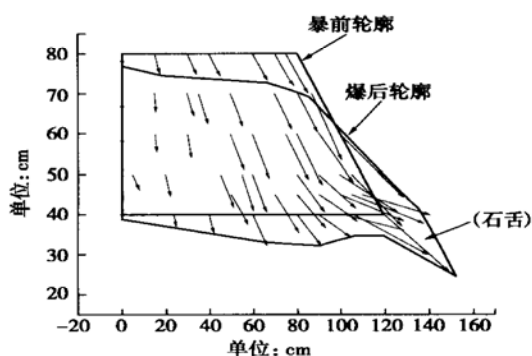


图3 实验1堆石体各部分位置的变化

Fig. 3 Location variation of rockfills in experiment 1

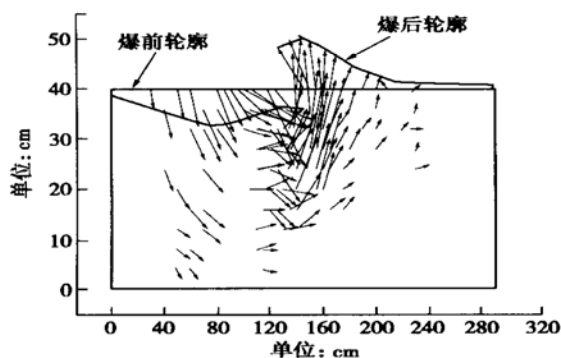


图4 实验1淤泥各部分位置变化

Fig. 4 Location variation of silt in experiment 1

根据对图3和图4的分析和推断,可以得到这样一些信息:

(1) 石舌明显地越过布药位置,石舌中的石体来源于堆石体底部前端;

(2) 爆源近区内侧(内侧定义为与堆石体推进的方向相反)的淤泥最初被爆轰产物向内向上推起,但这部分淤泥的运动受到堆石体的约束,两种介质相互挤压使淤泥改变了运动方向,并带动堆石体底部前端向爆坑方向运动,形成的泥石混合物便是后来的石舌;

(3) 爆源近区外侧(外侧定义为与堆石体推进的方

向相同)的淤泥被爆轰产物向外向上推起,之后在重力的作用下又翻转回来,盖在石舌上面;

(4) 爆源内侧远区的淤泥爆后在堆石体的重力作用下被向前向下挤压,产生较大变形,并推动石舌前进到爆源的前下方;

(5) 爆源外侧远区的淤泥变形比较小。

由于堆石体底部有部分淤泥挤入,因此爆后测得的堆石体总体积比爆前大一些。

1.2 示踪实验2

实验1用的是充分扰动后的淤泥,而在工程实践中待处理的淤泥经过了长时间的沉积。为了较真实地模拟实际情况,本节实验在淤泥配好后将其静置一个星期(密度和含水量略低于实验1)。

爆前实验布置与实验1相同,爆后堆石体各部分位置变化和淤泥各部分位置变化如图5和图6所示。除了具有与实验1相同的特点外,实验2还有一些自身的特点:

(1) 爆源近区的泥石置换量明显增大;

(2) 在堆石体顶面沿横向出现了明显的断裂(距堤头60 cm)和台阶(距堤头40 cm),断裂宽度为2 cm左右,台阶的高度达到5 cm;

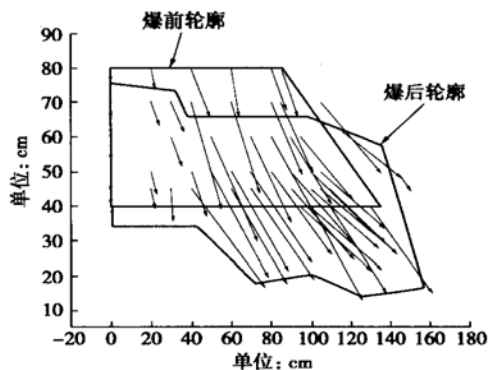


图5 实验2堆石体各部分位置的变化

Fig. 5 Location variation of rockfills in experiment 2

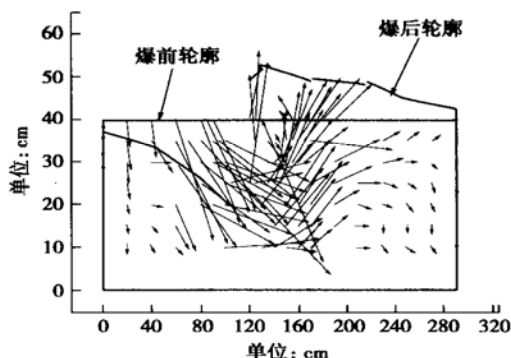


图6 实验2淤泥各部分位置的变化

Fig. 6 Location variation of silt in experiment 2

(3) 爆源附近(距爆源约40 cm)的淤泥位移明显增

大,堆石体底部的泥面上也出现了台阶。

据此,我们推断,爆源近区的淤泥在冲击载荷作用下,原先已经形成的某种结构被破坏,淤泥甚至被液化,强度也随之降低^[3,4],而爆源远区的淤泥性质变化不大。这样,在堆石体靠重力挤淤的阶段,爆源远区的淤泥由于强度较高,相对来说被挤出的少;而在爆源近区淤泥由于强度低被挤出的多,使泥石置换更为有利。

1.3 爆炸排淤填石法机理分析

根据从实验中获得的信息,我们将爆炸排淤填石法的泥石置换过程,按时间顺序阐述如下:①起爆后,爆源周围的淤泥和水在爆轰产物的推动下向四周运动,堆石体也被向上抬起,淤泥因受冲击载荷作用而强度降低;②爆源近区内侧的淤泥由于受到堆石体的阻挡,改变了运动方向,并带动堆石体底部的前端,形成泥石混合物向爆坑方向运动,这部分泥石混合物就是石舌的雏形;③爆轰产物卸载后,堆石体在自身重力作用下,整体向前向下塌落,形成石舌,并挤压淤泥向爆坑方向推进;同时爆源外侧的淤泥在重力的作用下向回翻转,在某一时刻与前进的石舌相遇。

从整体的物理图像来说,可以把爆炸排淤填石法分为两个阶段:①起爆后,爆轰产物推动爆源周围的介质向四周运动,在淤泥中形成爆炸空腔(爆坑),同时爆源近区的淤泥强度降低;②爆炸产物压力卸载后,堆石体依靠自身重力把底部的淤泥挤向爆坑方向,同时自身也向前方塌落,最终达到泥石置换的效果。

因此,我们关心的三个重要问题是:①对于一定药量、一定抵抗线,在淤泥中形成的爆炸空腔有多大;②怎样定量描述堆石体和淤泥在重力作用下的变形过程;③冲击载荷怎样影响淤泥的强度。对于第三个问题,本文暂不做讨论,这里仅就淤泥强度不变的情况(以示踪实验1为例),以LS-DYNA动态有限元分析软件为工具,通过数值计算来回答前两个问题。

2 数值计算

以示踪实验1为计算原型。在堤头推进和石舌形成过程中,由于沿堤身纵向各断面的运动基本相同,因此可以把问题简化为二维平面应变问题。

2.1 相关介质的本构模型及模型参数

在爆炸排淤填石法中,涉及到四种介质,即堆石体、淤泥、炸药和水。

考虑到流体不抗剪切的特点,本文将水等效为屈服应力为零的理想塑性体。

取堆石体和淤泥为Drucker-Prager理想弹塑性模型,其屈服准则采用广义的von Mises屈服准则^[5],表达式为:

$$\phi = \sqrt{J_2} + \alpha_1 - k = 0. \quad (1)$$

式中 J_2 和 I_1 分别为偏应力张量第二不变量和应力张量第一不变量;在平面应变状态下, $\alpha = \frac{\sin \Phi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \Phi)}}$; $k = \frac{\sqrt{3}c \cdot \cos \Phi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \Phi)}}$; c 和 Φ 分别为介质的内聚力和内摩擦角。根据室内常规实验,堆石体 $c = 0$, $\Phi = 45^\circ$;淤泥(扰动) $c = 2 \text{ kPa}$, $\Phi = 6^\circ$ 。

采用JWL状态方程^[6]描述爆轰产物的压力-体积关系:

$$p = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}, \quad (2)$$

式中 p 为爆轰产物的压力; A , B , ω , R_1 , R_2 是与炸药特性相关的常数; E_0 为炸药的初始内能密度; V 为爆轰产物的相对体积(爆轰产物体积/炸药初始体积)。对于密度为 1.7 g/cm^3 的黑索金炸药, $A = 1140 \text{ GPa}$, $B = 24 \text{ GPa}$, $\omega = 0.34$, $R_1 = 5.70$, $R_2 = 1.65$, $E_0 = 5.56 \times 10^9 \text{ J/m}^3$ 。

2.2 计算步骤

根据从模型实验中获得的整体物理图像,数值计算按以下步骤进行:

(1) 将计算区域划分为单元并给定相关介质的本构模型及模型参数。从炸药起爆开始模拟,起爆后,爆源周围的介质在爆轰产物的推动下开始运动(图7)。

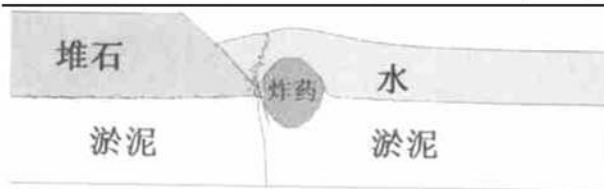


图7 起爆后第6 ms

Fig. 7 Six milliseconds after ignition

(2) 当计算进行到一定阶段时,会出现因单元畸变导致的计算不稳定现象。此时需要对计算区域重新划分网格,并通过插值的办法,将原网格中各点的速度赋给新网格中的各点。

(3) 当爆炸空腔发展到一定阶段时,鼓包表面将发生破坏,使空腔内的压力瞬间卸载。在本文中,爆炸空腔与鼓包顶点之间的剩余厚度内的介质是水,我们给出的破坏条件是,水单元出现拉应力时就破坏了。

(4) 空腔破坏后,堆石体、水和淤泥在重力作用下以一定的初速度做减速运动。

(5) 由于部分水体的速度仍在 10 m/s 以上,单元畸变很快,计算遇到很大困难(需要重分网格的次数太多)。我们采取的办法是,将水单元从计算区域中去掉,代之以静水压力加在淤泥表面上。

(6) 当爆坑不再继续扩大时, 全部区域中各点的速度接近零, 堆石体和淤泥在重力作用下回落。

(7) 此时, 石舌的形状已经越来越明显了。

(8) 前进的石舌与回流的淤泥相遇, 堆石体和淤泥的终态形成, 计算结束(图 8)。



图 8 堆石体和淤泥的终态

Fig. 8 Final shapes of rockfills and silt

2.3 数值计算结果与实验结果的对比

按照上节所述的步骤数值模拟实验 1, 爆后堆石体终态的对比如图 9 所示。

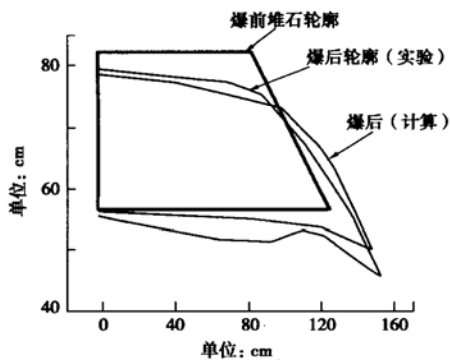


图 9 堆石体的终态数值计算与模型实验的对比

Fig. 9 Comparison between experiment and numerical simulation for final shape of rockfills

从图 9 可以看出数值计算能够大致模拟实验结果。根据以往的经验, 由于岩土类介质本构关系的复杂性和模型参数的不易确定性, 做到这样程度的模拟是可以接受的。图中堆石体下沉的实验值偏大, 原因也包括: ①堆石体在下沉过程中, 底部陷入淤泥中, 而在数值计算中没有考虑; ②拾取预埋的示踪物是在爆后几天时间里完成的, 由于淤泥有黏性, 会发生一些蠕

变变形, 而在计算中没有考虑。

3 结论和问题

3.1 结论

(1) 从整体的物理图像来说, 可以把爆炸排淤填石法分为两个阶段: ①起爆后, 爆轰产物推动爆源周围的介质向四周运动, 在淤泥中形成爆炸空腔(爆坑), 同时爆源近区的淤泥强度降低; ②爆炸产物压力卸载后, 堆石体依靠重力把底部的淤泥挤向爆坑方向, 同时自身也向前方塌落, 最终达到泥石置换的效果。

(2) 本文的计算程序和材料模型, 可以大致地模拟爆炸排淤填石的全过程, 数值计算可行。

3.2 问题

(1) 本文给出的爆炸空腔的破坏条件不是十分严格。不过, 破坏前空腔尺寸随时间的变化已经很慢, 因此对计算结果带来的误差并不大。

(2) 淤泥是具有黏性的介质, 因此淤泥的本构模型中本来应当考虑黏性。我们曾做过数值实验, 证明了在小尺度条件下, 淤泥的黏性效应可以忽略不计。

(3) 用数值方法确实进尺量与主要参数之间的定量关系, 建立爆炸排淤填石法的模型律, 将是我们后续工作的内容。

参考文献:

- [1] ZHENG Zhe-min, YANG Zhen-sheng, JIN Liao. Underwater explosion treatment of marine soft foundation[J]. China Ocean Engineering, 1991, 5(2): 213-234.
- [2] 张建华, 张亮, 顾道良, 等. 爆炸排淤填石法实验研究[A]. 第四届全国工程爆破会议报告[C]. 1989.
- [3] 张翠兵. 厚层淤泥中采用爆炸定向滑移法修筑防波堤机理研究[D]. 铁道部科学研究院, 2001.
- [4] 白冰, 周健, 曹宇春. 冲击荷载作用下软粘土变形和孔压的若干问题[J]. 同济大学学报, 2001, 29(3): 268-272.
- [5] 章根德. 土的本构模型及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [6] 丁玉奎. 炸药冲击波激励惰性气体闪光及应用研究[D]. 北京理工大学, 2000.