

# 工程爆破文集

全国工程爆破学术会议论文选

第四辑

冶金工业出版社

# 工程爆破文集

全国工程爆破学术会议论文选

## 第四辑

中国力学学会工程爆破专业委员会 编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

## 内 容 提 要

本书是第四届全国工程爆破学术会议论文选编。它反映了自上一届年会4年来我国在工程爆破技术研究和应用取得的进展。主要内容包括:爆破理论研究,硃室爆破技术,深孔爆破技术,建筑物爆破拆除技术,岩石破碎技术,计算机模拟及应用,新型爆破器材,爆破安全和测试技术。

本书可供冶金矿山、煤炭、地质、石油、化工、建筑、建材、铁道、交通、水利和国防等部门从事工程爆破的科研和施工的工程技术人员及大专院校、中等技术学校有关专业的师生参考。

工 程 爆 破 文 集  
全国工程爆破学术会议论文选  
第 四 辑  
中国力学学会工程爆破专业委员会 编

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

河北省三河市印刷厂印刷



787×1092 1/16 印张 19 字数 447 千字

1993年4月第一版 1993年4月第一次印刷

印数 00,001~3,000册

ISBN 7-5024-1041-4

TD·167 定价17.50元

## 编 委 会

主 编 霍永基

副主编 冯叔瑜 边克信 杨振声

编 委 (以下按姓氏笔划为序)

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 马柏令 | 王廷武 | 王树仁 | 王鸿渠 | 龙维祺 | 许连波 |
| 刘殿中 | 吴子骏 | 汪旭光 | 张正宇 | 张永哲 | 陈宝基 |
| 周家汉 | 林学圣 | 姚 尧 | 钮 强 | 赵福兴 | 徐天瑞 |
| 高金石 | 秦明武 | 缪垂祖 |     |     |     |

13012/00

## 前 言

1989年5月22~27日中国力学学会工程爆破专业委员会在西安召开了第四届全国工程爆破学术经验交流会议。参加会议的有来自全国24个省、市、自治区的爆破专家和工程技术人员192人。会议收到有关爆破理论和实验技术研究、工程爆破设计技术、爆破安全技术、爆破器材研究及测试技术、爆破拆除技术等方面的论文184篇。这些论文报告反映了自上届年会3年多来我国在能源、交通、冶金、水利及建筑行业在应用现代爆破技术方面所取得的主要成果。

炸药是一种可以产生巨大功率的能源，它在建设人类现代文明，改造自然环境中的作用日益重要。工程爆破技术广泛立用于矿山、铁路交通、水电及各种土木建筑工程的建设施工中，已取得了巨大的社会和经济效益。炸药这种大功率的能源可以高速安全地完成采用常规人工和机械难以办到的事情。爆破理论的研究和工程爆破技术的发展在于实现炸药能量有控制的高效率、高精度的转化和应用。从爆炸力学研究土岩介质在爆炸载荷作用下的破碎及其运动规律，近年来发展的爆破处理水下海淤软基技术促进了港口建设；应用断裂力学和动光弹实验技术研究岩石在炸药作用下的破裂过程，用数学模型计算和比较测定法，分析破岩的效率，其研究成果应用在矿山开采中，提高了生产率；高精度毫秒雷管的研制和生产；数百段起爆时差的精确控制；繁华闹市区高大建筑物的爆破拆除；石料开采爆破切割技术的发展，反映了我们对爆炸现象认识的深化和对炸药爆炸作用精确的控制能力。

工程爆破设计技术的发展和提高促进了国民经济建设的发展：采用先进的光面和预裂控制爆破技术在复杂岩层中成功地修建了长14km的大瑶山隧道；应用孔口微差双交叉梯段式中继传爆的非电起爆系统，成功地实现了3000多孔，324分段，延续点火时间8秒多，起爆总药量为47.76 t，长800m的葛洲坝大江围堰爆破拆除工程。

研究爆破地震传播规律和影响，监测技术的发展，不同类建、构筑物安全震动控制阈值的提出反映了我们对环境安全与保护的重视。

充分地利用炸药能源，有效地利用和控制爆炸作用已成为工程爆破技术研究和发展的基本思想。

在本届学术会议期间，通过论文宣读和讨论，交流了在不同爆破理论课题研究和工程爆破设计中的新思想、新经验、新的施工方法。编委会在此基础上选编出版本届年会文集，选入的论文共45篇，限于编委的水平，编审工作难免有遗漏和错误的地方，恳请读者批评指正。

编委会

1990.10

# 目 录

|                                  |                                     |
|----------------------------------|-------------------------------------|
| 1. 爆炸处理水下海淤软基·····               | 郑哲敏 杨振声<br>金 镠 (1)                  |
| 2. 爆夯水下挤淤的机理与模拟试验研究·····         | 杨振声 赵成福<br>任京生 章培德<br>张名根 (13)      |
| 3. 爆炸条件下冲击波在淤泥中传播的规律·····        | 杨振声 邢维复<br>任京生 戴铭容 (18)             |
| 4. 饱和砂土中的爆炸冲击波与爆炸夯实·····         | 陆遐龄 钱瑞伍 (22)                        |
| 5. 爆炸气体对应力场增压作用的模型试验研究·····      | 朱振海 曲广建<br>杨永琦 杨善元<br>商 健 (29)      |
| 6. 定向爆破岩块飞行阻力的研究·····            | 姚 尧 (36)                            |
| 7. 定向爆破筑坝中的抛掷和滑移效应·····          | 许连波 (43)                            |
| 8. 土中压缩爆破的安全问题·····              | 沈贤玃 林学圣 (46)                        |
| 9. 土中球形药包爆炸质点速度的测量和分析·····       | 周家汉 (52)                            |
| 10. 石材开采爆破劈裂机理及新药剂研究·····        | 高金石 杨 军<br>张继春 (59)                 |
| 11. 水泥模型中条形与集中药包爆炸空腔发展的试验研究····· | 金星男 (65)                            |
| 12. 工程爆破计算机辅助设计 (CAD) 系统研究·····  | 霍永基 钱瑞伍<br>马贵臣 (70)                 |
| 13. 岩体爆破块度计算数学模型及试验研究·····       | 程 康 姚 尧<br>黄元清 刘兰亭 (77)             |
| 14. 定向爆破筑拦泥石流坝·····              | 边克信 刘殿中<br>黄长庚 (84)                 |
| 15. 用定向爆破法加固堆石坝的研究与实践·····       | 霍永基 钱瑞伍<br>张永哲 (92)                 |
| 16. 东鞍山铁矿垂直深孔底部间隔装药爆破的应用研究·····  | 范文忠 张国建<br>孙剑峰 王义达<br>张正平 刘玉琛 (99)  |
| 17. 水介质控制爆破及降低粉矿率的研究·····        | 王绍鑫 张松林<br>李建梅 (105)                |
| 18. 爆炸排淤填石法的工程应用·····            | 张建华 顾道良<br>张 亮 石 成<br>武可贵 高兆福 (110) |

|                                 |               |               |
|---------------------------------|---------------|---------------|
| 19. 深孔微差抛掷爆破的试验研究·····          | 冯叔瑜 戈鹤川       | 张志毅 (114)     |
| 20. 衡广铁路复线工程运输繁忙地段石方爆破技术·····   | 冯叔瑜 王开 金人夔    | 杨杰昌 赵杰 (120)  |
| 21. 爆夯法处理水下软基的工程应用·····         | 顾道良 张建华 高兆福   | 赵成福 武可贵 (124) |
| 22. 建筑物定向倾倒爆破堆积范围的探讨·····       | 冯叔瑜 戈鹤川       | 张志毅 (128)     |
| 23. 中深孔大爆破在桃林铅锌矿25年的实践·····     | 袁志超           | (134)         |
| 24. 爆破破岩机理动力分析·····             | 高金石           | 张继春 (139)     |
| 25. 光面爆破破裂机理的研究·····            | 凌伟明           | (145)         |
| 26. 天然块度及其在爆破块度预报中的作用·····      | 刘兰亭 李高平       | 李仕胜 (150)     |
| 27. 爆破块度的比较测定法·····             | 璩世杰 王德胜       | 于亚伦 (154)     |
| 28. 用灰色数学模型进行爆破分区·····          | 王德胜 璩世杰       | 于亚伦 (159)     |
| 29. 综合评价爆破质量的方法·····            | 马柏令 刘为洲 赵国栋   | 高士才 向远芝 (166) |
| 30. 岩石聚能装药爆破·····               | 杨永琦           | (175)         |
| 31. 复合相新岩石粉状炸药的研究与应用·····       | 江业梁           | 邓荷英 (181)     |
| 32. 矿山微差爆破技术问题的探讨·····          | 王雪峰           | (186)         |
| 33. 拆除爆破中大量雷管起爆网路的设计·····       | 吕毅            | (191)         |
| 34. 塑料导爆管非电接力式起爆网路及其可靠性分析·····  | 张正宇           | 张文煊 (196)     |
| 35. 乳胶粒状炸药及其机械化装药在地下矿的应用·····   | <b>周大明</b> 贯荔 | 熊代余 (204)     |
| 36. 深孔爆破地震效应的探讨·····            | 郭峰            | (211)         |
| 37. 大区多排微差爆破地震效应及其评价·····       | 韩子荣 刘传雄       | 张汉才 (217)     |
| 38. 黑石关旧铁路桥的拆除爆破·····           | 金骥良           | (221)         |
| 39. 保护性拆除爆破·····                | 赖世骥           | (227)         |
| 40. 北京华侨大厦拆除爆破工程设计·····         | 庞维泰 杨人光等      | (233)         |
| 41. 盐锅峡水电站机组平台及基础爆破拆除的试验研究····· | 石怀理 姚尧        | (239)         |
| 42. 爆扩桩在爆扩成孔过程中震动测试与分析·····     | 戴镇华 黄小平       | (247)         |
| 43. 磁场示踪法研究及其应用·····            | 陈善良 邢维复等      | (253)         |

|                      |     |     |       |
|----------------------|-----|-----|-------|
| 44. 爆炸锚杆挤压力测量研究..... | 刘殿书 | 方文儒 |       |
|                      | 杜玉兰 |     | (261) |
| 45. 岩石爆破中瞬态应变测试..... | 刘汉丞 | 于 卫 |       |
|                      | 何德蓉 | 孟 中 | (267) |

# 1. 爆炸处理水下海淤软基

郑哲敏 杨振声

(中国科学院力学研究所)

金 镠

(连云港建港指挥部)

## 摘 要

爆炸处理水下海淤软基是一项新技术, 中国科学院力学研究所、连云港远港指挥部、连云港市锦屏磷矿、交通部第三航务工程勘探设计院等四单位组织科研组联合攻关, 经过几年工程实践, 工程性试验, 模型和机理试验, 取得一批成果。本文对这项新技术作了全面的介绍, 并阐明了自己的一些观点。

爆炸处理水下软基是一项新技术。连云港建港指挥部、中国科学院力学研究所、锦屏磷矿、交通部第三航务勘探设计院等4单位组织科研组联合攻关。经过4年多的工程实践、工程性试验、模型和机理试验等, 取得了大量系统的数据, 写出了近20篇的科学技术报告。并由交通部和中国科学院组织了鉴定。为了对这项新技术有一个全面的介绍, 作者将科研组所提供的报告作一综述, 并阐明了自己的一些观点。

## 一、水下淤泥层的形成及力学性质<sup>[1][2]</sup>

由于黄河、长江、珠江等巨型多沙河流的注入, 淤泥质海岸在我国有着广泛的分布。以连云港为例, 它位于旧黄河水下三角洲北缘。旧黄河水下三角洲在公元1185年~1855年期间由苏北入海携带的巨量泥沙堆积而成。

沉积物为淤泥, 中值粒径 $d_{50}=2\sim4\mu\text{m}$ , 小于 $5\mu\text{m}$ 的粘粒占60~70%。淤泥的矿物组成为: 伊利石占65%, 其中高岭土为15%, 绿泥石为15%, 蒙脱石为4%等。由于颗粒组成极细, 加之沉积年代很近, 因此固结状况很差, 表层1~2m呈流塑状, 含水量 $\omega>100\%$ , 天然容重 $\gamma=1.45\text{t/m}^3$ 。机械强度近似于零; 表层以下呈软塑状,  $\omega=70\sim80\%$ ,  $\gamma=1.55\text{t/m}^3$ , 其机械强度, 块剪指标为 $\varphi_{\text{块}}=8^\circ$ ,  $C_{\text{块}}=20\text{kPa}$ 。固结块剪指标 $\varphi_{\text{固结}}=10^\circ$ ,  $C_{\text{固结}}=40\text{kPa}$ 。

由于淤泥强度很低, 不能承载, 否则在其上的构筑物易滑动破坏。连云港1933年至1974年, 共发生较大规模的滑坡11次。多在未处理地基上直接抛填石料所致。事故大多在施工期发生, 毫无例外发生于低潮位。构筑物的滑动破坏造成重大事故, 因此海淤地基必须加以处理。

## 二、爆炸处理海淤软基的几种方法与机理研究

爆炸处理海淤软基是以炸药为能源的一种施工方法,经过在连云港的几年实践和实验研究,发展了三种爆炸处理软基的施工方法:即爆炸排淤填石法、爆夯法和堤下爆炸挤淤法,现将这几种施工方法和有关的机理研究作一介绍。

### 1. 爆炸与淤泥[3][4][5]

炸药在空中、水中、以及岩土中爆炸的一些规律已为人们所熟知。在淤泥中爆炸的一些特性,还未见到过报导。科研组就以下几个方面作了实验研究。

在淤泥中爆炸的冲击波传播规律,和水中爆炸很相似,满足几何相似律。该实验用的是TNT炸药,其药量为200g, 800g, 1600g,放大系数为1.5和2倍,实验数据经过 $Q^{1/3}$ 无量纲化后,压力峰值和测距的关系整理如图1。

经过数学模拟,整理后如下公式

$$\Delta P = 50 \times 10^6 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{0.85} - 6 \times 10^6 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{0.12}$$

式中 压力 $\Delta P$ 的单位为Pa,  $R$ 为m, 药量 $Q$ 为kg。所给出范围在药包直径的10~100倍范围以内。

从公式看出,淤泥中冲击波压力峰值与水下爆炸压力相比,规律基本相似,但峰值较低。

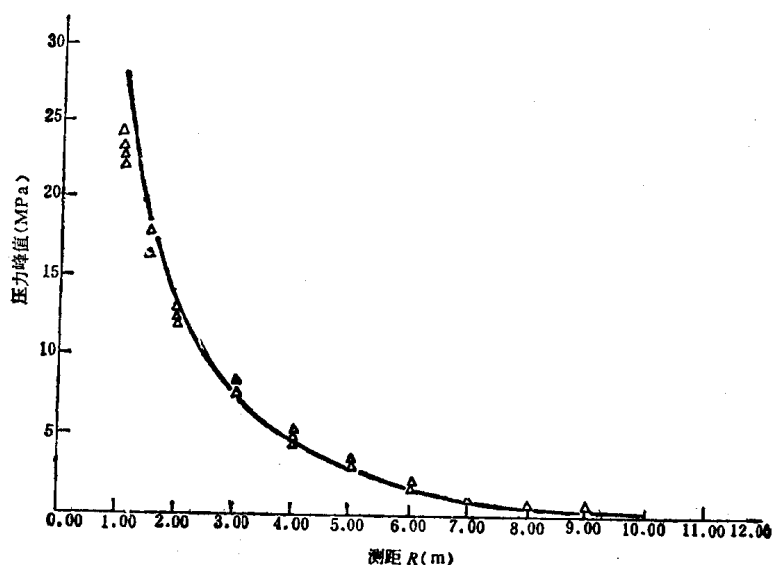


图 1 冲击波峰值与位置相对值的曲线

通过实验证明,冲击波波速和水中相近为1550m/s。

淤泥的一个重要特性是粘性,粘性力随应变率增加而加大,根据实验,粘性力与应变率呈非线性幂流的关系,并可表达如下

$$f = \mu (\dot{\gamma})^\alpha$$

式中  $f$ ——粘性力;

$\mu$ ——粘性系数,  $\mu = 2810 \text{ as}^\alpha$  或  $\mu = 28.67 \text{ kPa}$ ;

$\alpha$ ——无量纲指数,  $\alpha = 0.11$ ;

$\dot{\gamma}$ ——剪切应变率。

在爆炸条件下，我们关心的应变率是 $10^3 \sim 10^4$ 。这时粘性力只有 $6 \sim 8 \text{ kPa}$ ，相对于冲击波强度而言，淤泥的粘性是可以忽略的，即使在这种情况下，粘性力也小于淤泥的剪切强度。

在淤泥中爆炸的鼓包运动，通过试验可得到如下的现象和结论：

(1) 淤泥与土岩介质不同，爆炸空腔不产生裂缝，具有流体的特点。

(2) 鼓包运动开始和一般土岩介质鼓包并无多大差别，但鼓包形状可以发展得很尖，具有光滑的表面，在顶点附近产生小孔破裂。 $Q/\sqrt[3]{W}$ 大，即抵抗线 $W$ 很小时，鼓包破坏范围较大，这种现象也是流体的特点，其破裂可看成一种流体局部变薄所致。在炸药附近，没有压缩圈。

(3) 可见爆坑漏斗很小，这是由于除去飞出淤泥落回爆坑内外，还由于淤泥流动性很大，爆坑四周的淤泥由于重力的影响也往坑内回淤。

(4) 鼓包和爆坑基本满足几何相似律，其药量公式可按土岩爆破常规地整理：

$$Q^{1/3} = W f(u)$$

而 $f(u) = \sqrt[3]{1.5(0.53 + 0.47u)}$ 。

这里 $u$ 是爆炸作用指数， $f(u)$ 与 $u$ 呈线性关系，这与通常土岩爆破的药量公式有所不同。

## 2. 爆炸排淤填石法与机理研究<sup>[6][7][8]</sup>

爆炸处理水下软基采用置换法，即用爆炸方法开沟，抛填堆石的工艺。从上节分析和实践证明，爆破开沟在瞬时是可行的，但由于回淤的影响，造成沟很浅抛石困难，不能达到置换的要求。下面介绍的爆炸排淤填石法实际上是一种瞬态置换法。

爆炸排淤填石法，如图2是将堆石体抛填在堤头，将炸药（常用群药包）埋放在堆石体前方一定距离和一定深度处的淤泥内。爆炸时，在药包位置上及附近的覆盖水和淤泥向上方飞散，堆石体的前端向下塌落至淤泥内。爆后经过检测，塌落的石块已落至亚粘层上，其形状如同“石舌”。爆炸飞出的部分淤泥和水随后又回到“石舌”层上，回落的淤泥含水量高，强度降低，随后的抛填可将“石舌”层上的淤泥挤出，以形成一个完整的堆石体。正确布置药包和选择药量，通过这样若干次的循环，可筑成设计需要的海堤。

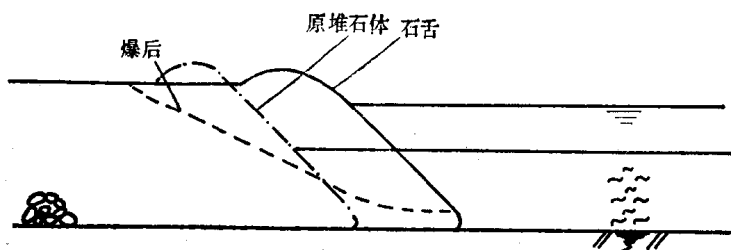


图2 爆炸前后纵断面与石舌纵向形态图

当埋在堤前淤泥内炸药引爆以后，在淤泥中有冲击波传播，与此同时爆炸气体在淤泥内膨胀做功，可在泥内形成空腔，以至成为爆坑。压力迅速降低。而堆石体的前沿，在爆

炸载荷下，提高了压力，在空腔与爆坑之间形成了压力差和重力位势差。堆石体空隙中的水和淤泥，在压力差和位势差的作用下，形成泥石流，将石块带入流向空腔和爆坑内。同时爆坑另一侧的淤泥和水，也由于同样载荷的原因，也向爆坑中运动，在某一时刻与“石舌”相撞而阻止“石舌”继续运动，直至“石舌”运动停止。这就是形成“石舌”运动和停止的原因。试验还表明，离堆石体稍远一点布药，可以使堆石与另一侧的淤泥和水在较远位置上与“石舌”相撞，可以使“石舌”长一些。用双排药包形成的爆坑，也可使另一侧的水和淤泥与“石舌”相撞位置远一些，这样可以提高施工的进尺量。

在大厚度淤泥的工程实践中，当炸药埋深达不到要求时，起爆后，爆坑底部尚有一层淤泥，通过实践检测“石舌”并不到底。随后抛石体也可能不落底，但是爆炸排淤填石法是一个堤头反复循环和两侧的爆炸。爆炸能量是可引起堆石体下地基的振动，根据目前测量，每次振动加速度约 $20\text{ g}$ ，周期为 $0.05\sim 0.1\text{ s}$ 。经过每次这样的振动都可将一部分淤泥从侧向挤出。从海军防波堤的最后检测看堆石体都能基本落底。

### 3. 爆夯法及机理研究<sup>[9][10]</sup>

用爆夯施工时，我们将炸药置在已堆好的堆石体或其上一定的挂高处。堆石体下为一定深度的淤泥，淤泥层的下底与海底粘土层相连接。为了使堆石体保持平面整体向淤泥中运动，在爆夯时，常用平面布药，即采用点阵式等距离方式布置药包。为了充分利用炸药的能量，均在药包上有一定深度的覆盖水情况下起爆，爆前装置如图3。

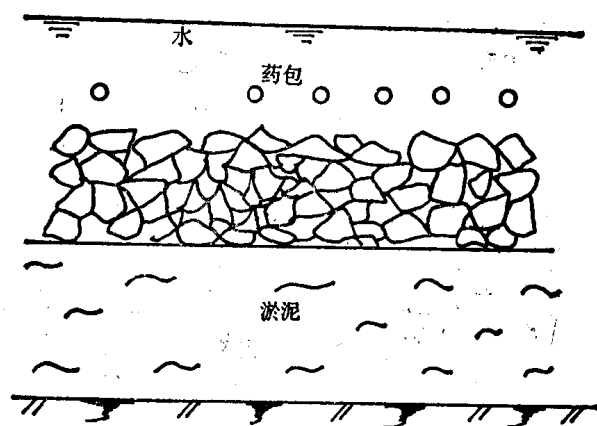


图3 爆夯前装置图

炸药起爆后，当冲击波作用到覆盖水自由面时，反射为稀疏波，将水拉断带走一层水，而爆炸气团作用将水隆起。在爆炸载荷作用下，石块之间引起错位，使空隙率减少，另一方面爆炸作用使整个堆石体向淤泥中运动，将淤泥从堆石体外泥面挤出，钻探结果表明，只有一小部分淤泥挤入堆石体的空隙内，因而总的爆炸能量看来主要用于侧向挤淤。

为了深入研究爆夯的机理，在爆炸箱中做了高速摄影试验，其下沉量和时间的试验曲线如图4。

试验曲线表明，爆夯下沉运动有一个很短的加速过程，此后有一较长时间近似匀速的过程，最后减速至终止。经过分析，爆炸产物初始力很高并伴有冲击波，因而淤泥运动有

一加速过程。当爆炸气团迅速膨胀，其压力随之降低，当低至和淤泥的强度和阻力相当时，就出现一个近似匀速的过程。这时气团压力较低，淤泥的质量大；因而有一个比较长时间的匀速过程。随后，爆炸气团浮出水面或逸出，堆石体在淤泥强度和阻力作用逐渐减速至零。

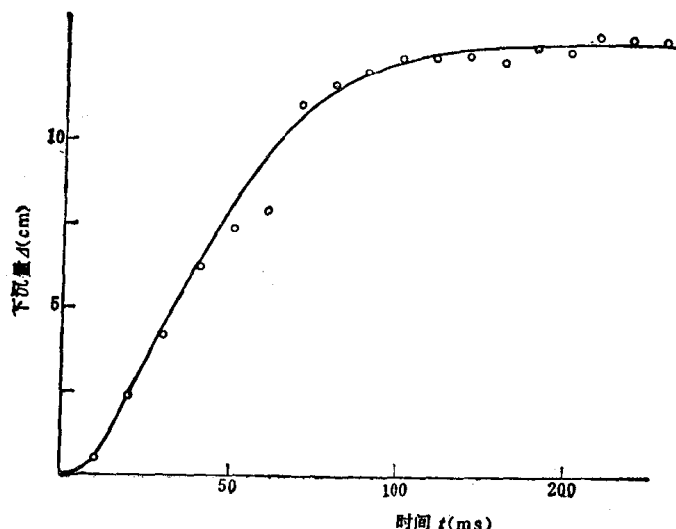


图 4 爆夯条件下板的下沉量与时间的高速摄影试验曲线

我们注意到，在同样炸药量，堆石体厚度不变情况下，下沉量和  $\frac{L}{H}$  有关， $L$  是堆石体的宽度， $H$  是淤泥的深度。 $\frac{L}{H}$  值很小时，堆石体较易下沉；当  $\frac{L}{H}$  很大时，堆石体下沉量很小。因此爆夯通常要通过几次爆炸才能达到要求，一般不易将所有淤泥挤出。这是不难理解的，因为  $\frac{L}{H}$  小时，淤泥侧向逸出路径短，阻力当然也就愈小、爆夯可使堆石体密实，这有很大的工程意义。经过分析，我们认为，爆夯时可以引起地震的强烈振动，从而将堆石体振动密实。试验表明，密实率可达 22%，爆夯对于修建水下平台却有很好的应用前景。

#### 4. 堤下爆炸挤淤施工方法及其机理研究<sup>[11]</sup>

堤下爆炸挤淤法是将条形药包（或多个集中药包）埋在堆石体下淤泥中或淤泥表面上的一种施工方法。在堆石体上有覆盖水，有时也无覆盖水。其结构如图 5。

炸药引爆后，爆炸压力将淤泥从堆石体淤泥面挤出，随后堆石体在重力作用下落至被挤出淤泥的空间。这样施工方法的优点是爆炸能量得到比较充分的利用，但装药较为复杂，安全问题比较突出，需要进一步研究。

为了阐明机理，进行了 X 光和高速摄影的试验，这些试验都是在爆炸箱中进行的。X 光试验照片说明了爆炸挤淤的过程。在试验药量条件下，爆炸空腔初始有一个加速过程，最大速度为 27.0m/s，空腔膨胀运动时间很短。爆炸空腔位移与时间的试验曲线如图 6。

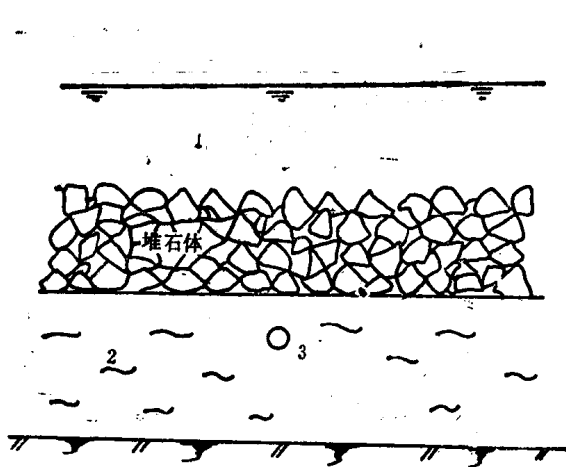


图 5 堤下爆炸挤淤法结构图

1—水；2—淤泥；3—药包

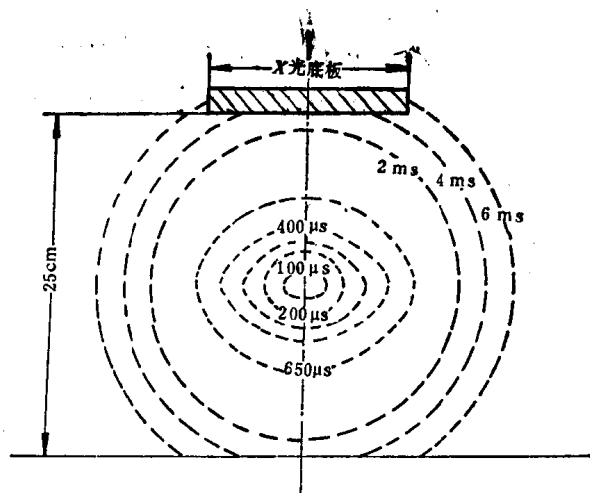


图 6 X光试验爆炸空腔不同时间的图象

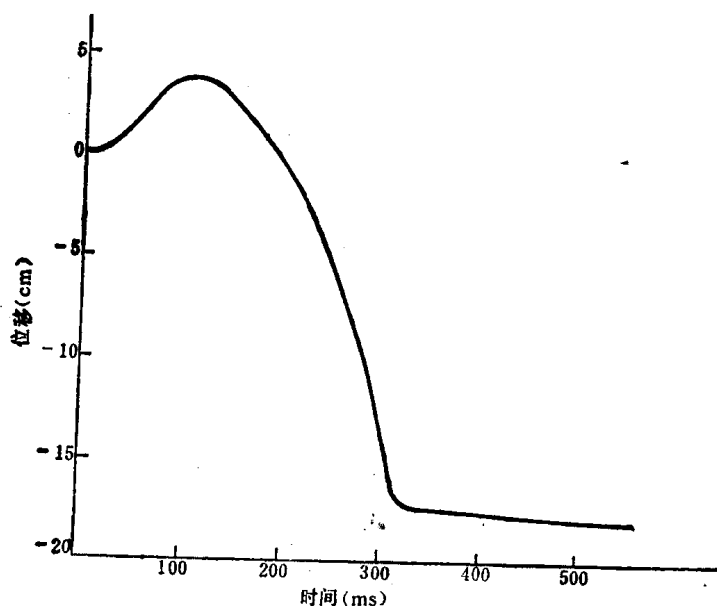


图 7 板的运动位移与时间曲线

高速摄影表明，堆石体有一上升的运动过程，然后自由落体落至空腔内。没有覆盖水的条件下，高速摄影整理的试验曲线如图 7。

由以上试验和现场观察可以得到以下的结论：炸药引爆以后，冲击波在淤泥和堆石体中传播。淤泥面上没有覆盖水时，冲击波传至堆石体的上表面，将反射一拉伸波。由于堆石体是一个散体，堆石体的上部分石块将以一定速度往上运动，带走冲击波的能量。堆石体由于有较大质量，在爆炸气团继续推动下是不大的上升位移。实践证实只有少量石块飞出，部分落回至堆石体上，其余散落在淤泥面上。当淤泥面上有覆盖水时，冲击波将传入水中，在水表面反射为拉伸波，使水的上层部分往外飞出，而整个堆石体基本无飞散的现象，只有向上作整体运动。爆炸压力将淤泥挤出堆石体外后，堆石体便回落到爆炸空腔内而形成所设计要求的堤。下落后石体的形态，基本保持原在淤泥面堆石体的形状。用这

样施工方法筑堤，单位耗药量很低，能充分利用炸药的能量。利用这样的施工方法的前提是，抛石体在淤泥面上能保持稳定而不致于滑动，而且预埋炸药在施工上可以实现并确保安全。

### 三、爆炸处理海淤软基的模型律<sup>[12]</sup>

在土岩爆破中，广泛应用几何相似律于计算爆坑尺寸和抛掷力量，只有当最小抵抗线超过二、三十米时，重力影响才逐渐表现出来。这时就要对几何相似律进行修正。

在岩土性质、炸药性质（包括品种、初始密度）保持不变，而仅仅改变药包尺寸或最小抵抗线的条件下，在单药包条件下，

$$n = f\left(\frac{Q^{1/3}}{W}\right)$$

式中  $W$ ——最小抵抗线；

$Q$ ——炸药量；

$n$ ——爆破指数。

在群药包条件下， $Q$ 、 $W$ 不一样，这时应考虑其他药包的作用，这时

$$Q = W^3 f(n_1, n_2, \dots)$$

其中  $n_1, n_2$  等都是无量纲的几何参数。

几何相似律还给出岩土的特征运动速度  $V$ ，特征加速度  $G$ ，特征时间  $T$  的表达式。

$$V = h_v \left( \frac{Q^{1/3}}{W}, n_1, n_2, \dots \right)$$

$$G = \frac{1}{W} h_g \left( \frac{Q^{1/3}}{W}, n_1, n_2, \dots \right)$$

$$T = W h_t \left( \frac{Q^{1/3}}{W}, n_1, n_2, \dots \right)$$

在漏斗形成过程中，重力加速度  $g$  的影响一般可以忽略，这是因为通常

$$G/g = \frac{h_g}{gW} \gg 1$$

只有  $W$  很大时， $G/g$  才变得足够小，以至需要考虑  $g$  对特征加速度和漏斗形成过程的影响。岩土块体飞出漏斗后， $G$  降为零，从此以后块体在重力加速度和空气阻力作用下运动，不再服从几何相似律，这一点很容易证明。

重力对速度的贡献是  $gt$ ，对位移的贡献是  $\frac{1}{2}gt^2$ ，只有  $t$  足够大，而且初始速度或加速度足够小时，重力才起作用。

上述规律可应用于爆炸处理水下软基。

爆夯、堤下爆炸挤淤都可以认为是初期运动为主的，而爆炸排淤填石则可以认为包含在时间上分离的两个阶段。

初期运动，在忽略重力和粘性的条件下，几何相似律应成立。因此

$$D/W = f(n_1, n_2, \dots)$$

式中  $n_1 = Q^{1/3}/W$  或  $n_1 = q^{1/3}/W$  或  $n_1 = s/W$

$Q$ ——总药量;

$q$ ——堤下爆炸挤淤法常用单位长度药量;

$s$ ——爆夯法常用的面积药量;

$D$ ——反映漏斗大小的尺度;

$$n_2 = H_1/W, \quad n_3 = H_2/W, \quad n_4 = H_3/W, \quad n_5 = L/W, \quad n_6 = \frac{c}{W}$$

式中  $H_1$ ——水深;

$H_2$ ——泥深;

$L$ ——堤宽;

$H_3$ ——石层厚度;

$c$ ——药与石堤之间的距离。

因此对于爆夯和堤下爆炸淤泥, 只要保持其它几何条件及所有物理条件(如炸药品种、炸药密度、土质等)不变, 就有

$$\frac{D}{W} = f\left(\frac{s}{W}\right) \text{ 或 } \frac{D}{W} = f(q^{1/2}/W)$$

实验与理论分析的任务就是确定上述函数的具体形式及其与淤泥力学性质和几何参数的关系。

我们注意到, 如果变形阻力基本上不随  $D$  变化, 则  $D$  正比于变形功。容易证明, 如果炸药量的利用率是常数(不依几何尺寸变化), 即变形功正比于药量, 则有

$$D \propto s \quad D \propto q^{1/2}$$

这已经为实验所验证<sup>[9][11]</sup>, 这样形式的描述为能量准则。

对于爆炸排淤填石, 除了形成漏斗这个初期过程外, 还必须考虑堤头塌落和石舌形成这个后续过程, 才能确定每次爆炸的进尺量。正如前面所阐述“石舌”的形成, 爆炸压力和位势差的作用下, 堤本身形成泥石流进入坑底。爆炸压力差是几何相似的, 而位势差则需要进行一定的分析和讨论。考虑牵涉到的堤头石方量很大而且炸药包与之保持较远的距离, 我们做以下的假设, 堤头部分在重力作用下运动, 其初始几何状态是在堤头前部已有一个几何相似的漏斗, 初始速度为零。另外除了继续忽略粘性力外, 我们假设石体和土体为塑性体, 满足库仑摩擦条件, 即  $\tau = \sigma_n + g\varphi$ , 剪切流动应力正比于正应力, 于是我们可以对堤头石体做以下估算, 这种估算虽不能定量, 但能保证在量纲上是正确的。

这时, 非平衡的推动力正比于  $gw^2$ , (单位宽度, 下同), 变形阻力正比于  $gw^2$ , 所以其合力正比于  $gw^2$ , 因为是在重力作用下, 所以运动时间正比于  $\left(\frac{w}{g}\right)^{1/2}$ 。另外参与运动的总质量正比于  $w^2$ 。因此根据牛顿第二定律, 堤头塌落的特征长度, 例如, 以石舌长度  $P$  为表征, 我们有

$$P \propto \frac{gW^2}{W^2} \left[ \left( \frac{W}{g} \right)^{1/2} \right]^2 = W$$

这一结果表明, 在重力作用下的后期运动, 也是服从几何相似律的。既然前期与后期都满足几何相似律, 那么整个过程便是几何相似的, 因此前面所叙述的药量公式对爆炸排

淤填石也是适用的。

在变形功正比于变形体积的条件下，根据能量准则，我们又有

$$\frac{q}{PH} = \text{const}$$

这个关系式也在工程中得到验证。

我们注意到，在前式中重力加速度被消去了。这就是说如果我们用爆炸所引进的地震加速度  $G$  代替  $g$ ，以上讨论不变。

#### 四、爆炸法处理水下淤泥地基的工程实践

连云港爆炸法处理水下软基，是将机理性和工程性试验结合起来进行的。以下介绍几个类型工程的实例。

##### 1. 水下触地爆清淤工程<sup>[13]</sup>

具体的工程对象为渔轮厂摇架坑清淤和北护岸西段基槽清淤（1985.8~1985.10），前者泥厚1~2.7m，上覆砂层0.4m；后者泥层厚2m。上述两项工程达到设计要求。摇架坑爆炸清淤前后的基坑断面见图8。

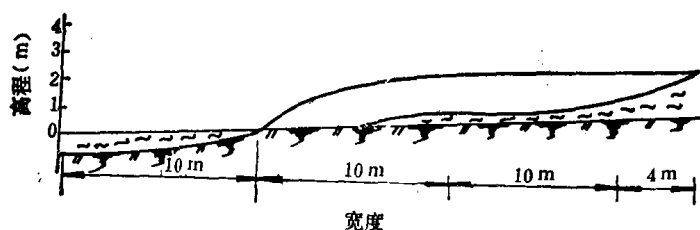


图8 摇架坑接触地爆清淤效果图

上述工程实践，得到触地爆是“挤淤”而非“抛掷”的认识。这在淤泥层较薄时可获得较好的清淤效果，特别是避免了浅水区、薄泥层条件下，挖泥船几乎难以进行或代价太高，改用本法后，经济效益是明显的。

##### 2. 水下爆夯挤淤及压密工程<sup>[10][14][15][16]</sup>

爆夯是爆炸处理水下软基的主要工艺之一，其代表性的工程可介绍三项：

###### a. 渔轮厂滑道基床爆炸压密(1986.6~1986.7)

渔轮厂滑道是在全清淤地基上对抛石基床进行压密。施工段全长94m，石体厚度2.3~6.3m，顶宽10m（见图9），经过二次爆夯，局部补夯，总夯实率为22%，基床坡脚基本无侧向移动，满足工程要求，简化了现行的夯实工艺。

###### b. 渔轮厂沉箱驳岸基床的爆炸处理

渔轮厂沉箱驳岸类似一个直立式码头，基床要求很高。从图10南段45m为未清淤段，泥厚1~2m，上复砂层0.5~0.7m，要求爆夯后石体落底宽度到14m，夯实率不低于20%；北段68m为已全清淤段，抛石体厚4.5m，要求爆夯夯实宽度不低于10m，夯实率不低于20%。

南段施工顺序为：用埋深药包爆炸破坏砂层；对基床西侧已有抛石层用爆夯法压到硬土面，实施爆夯5~6次，通过预埋磁力计及沉降板观测，确证落底宽度已达到要求。

北段：对抛石体实施三次夯实，一次整平。