

爆炸处理水下海淤软基

中国科学院力学研究所 郑哲敏 杨振声
连云港建港指挥部 金 鏊

一九八九 四

目 录

前言.....
一、水下淤泥地基处理的现况.....	1
1. 连云港水下淤泥层的形成及力学性状.....	1
2. 爆炸法处理水下淤泥地基的工程背景.....	1
3. 爆炸法处理软弱地基的已有进展.....	3
二、爆炸法处理软基的几种方法与机理研究.....	4
1. 爆炸与淤泥.....	4
2. 爆炸填石排淤法与机理研究.....	6
3. 爆夯法与机理研究.....	7
4. 堤下爆炸挤淤法与机理研究.....	8
三、爆炸处理海淤软基的模型律.....	8
1. 爆炸模型律的讨论.....	8
2. 爆炸处理软基几何相似律与能量准则.....	10
四、爆炸处理水下海淤软基的工程实践.....	12
1. 水下触地爆清淤工程.....	12
2. 水下爆夯挤淤及压密工程.....	12
3. 水下爆炸填石排淤工程.....	15
4. 其它工艺的工程性研究.....	15
五、爆炸法处理水下软基振动与安全.....	15
六、爆炸法处理水下海淤软基的发展前景.....	16
参考文献.....	18

前 言

爆炸处理水下海淤软基是一项新技术。国家经委、国家教委、中国科学院等单位列为国家第一批100项与企业横向联合的重点科技项目。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四单位组织科研组联合攻关。经过四年的工程实践、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篇科学技术报告，并由交通部和中国科学院组织了鉴定。这些科技报告经由本文作者审定。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。科研组各单位先后参加工作达40余人，他们在很艰苦条件下取得了这些宝贵的资料（见本文所引文献），作者对于参加这项工作的所有同志，和本文所参考报告的作者们表示感谢！

一、水下淤积地基处理的现状

1. 连云港水下淤泥层的形成及力学性状

连云港座落在江苏北部旧黄河水下三角洲北缘。旧黄河水下三角洲由公元 1185 ~ 1855 年期间黄河在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 $d_{50} = 2 \sim 4 \mu\text{m}$ ，小于 $5 \mu\text{m}$ 的粘粒占 60 ~ 70%，堆积厚度分布如图 1。淤泥的矿物组成为：伊利石占 65%，其次为高岭土（15%）、绿泥石（15%）、蒙脱石（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 ~ 2 米呈流塑状，含水量 $\omega > 100\%$ ，天然容重 $r = 1.45 \text{ t/m}^3$ ，机械强度 = 0，以下呈软塑状，垂直方向上物理性状均一（ $\omega = 70 \sim 80\%$ ， $r = 1.55 \text{ t/m}^3$ ）机械强度很低，按最近采用薄壁取土器严格取样试验得到的结果〔1〕，快剪指标为 $\varphi_{快} = 8^\circ$ ， $C_{快} = 0.02 \text{ kg/cm}^2$ ；固结快剪指标为 $\varphi_{固快} = 10^\circ$ ， $C_{固快} = 0.04 \text{ kg/cm}^2$ ；三轴固结不排水剪强度 $\varphi_{cu} = 1.6^\circ$ （图 2）；压缩特性： $\alpha_{1-2} = 0.21 \text{ cm}^2/\text{kg}$ ，属高压压缩性软粘土；渗透系数 $K_r = K_n = 10^{-7} \sim 10^{-8} \text{ cm/sec}$

该淤泥层以下，普遍为第三系亚粘土及粘土层，含水量 $\omega = 25\%$ ，天然容重 $r = 1.9 \sim 2.0 \text{ t/m}^3$ ，压缩系数 $\alpha_{1-2} = 0.04 \sim 0.02 \text{ cm}^2/\text{kg}$ ， $\varphi_{快} = 12 \sim 20^\circ$ ， $C_{快} = 0.3 \text{ kg/cm}^2$ ，为良好的持力层。

2. 爆炸法处理水下淤泥地基的工程背景

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。因此海岸工程中的软弱地基处理，长期以来就是我国筑港技术界普遍关注的问题连云港自不例外。根据文献〔2〕的统计，连云港自 1933 年开港以来至 1974 年，共发生较大规模的滑坡 11 次，多为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。土体变形方式为：堤顶与堤后产生较大沉陷，堤身转动外移，堤外土石隆起并向外伸展，伸展范围：堤坝式为 25 ~ 30 米，堤岸式达 35 ~ 60 米。滑动面位于淤泥层内或与下部硬土层面相接（图 3，4），滑动造成抛石体的明显变形，如果抛石体是码头棱体，则棱体的变形又将造成前方码头的破坏。因此，如何经济、有效地处理淤泥地基，就成为淤泥质港口海工建筑物设计及施工中极为重要的一环。多年来，在连云港港口工程中得到实际应用的处理办法大体可归纳为两类：

① 置换法

(a) 清淤直至硬土层, 即“全清淤”法

用挖泥船将建筑物基础部份的淤泥全部清除, 换填砂石。虽然彻底, 但挖填方量大, 因此对面积不大的较重要工程采用此法较好。工程实例有: 二码头西侧钢板桩码头板桩前后全清淤换砂(1975年); 渔轮厂及海军修船所滑道地基(1985、1987年), 渔轮厂防波堤沉箱基层地基(局部, 1985年), 庙岑二期工程木材、散粮、集装箱堆场除迫岸薄层淤泥外的全部地基(1985~86)、西大堤东段地基(1985), 均在全清淤之后回填石料。这一方法除了挖填方量大之外, 为了便于挖泥船施工, 往往还要先开挖施工航道; 而且, 由于施工组织上的限制, 基槽的回淤难以避免, 淤淤务尽也就无法做到。二码头西侧钢板桩码头棱体抛填过程中的较大规模的滑务坡, 就是由于基槽中回淤淤泥所引致。

(b) 部分清淤置换

碎石桩、深层拌和、半清淤等, 均可视为部份置换的措施。例如连云港老港区两防波堤, 淤泥底标高-1.5米, 顶面标高-1米, 清淤至-6米后回填石料至+7米; 抛石堤下仍留有10米左右的淤泥, 由于容易产生滑动, 因此抛石体两侧需设计较宽的反压平台。该防波堤1934~35年发生滑坡, 堤身外移8米, 下沉3米。采用碎石桩或深层拌和, 改变了单纯半清淤时形成的“筏基”的型式, 建筑物的稳定性较易得到保证。

(c) 强夯挤淤

这也是一种部份置换的工程措施。淤泥层较薄(一般 $< 4 \sim 5$ 米)情况下, 在淤泥上直接抛填, 然后进行强夯, 使石体下沉至硬底, 石体本身也得到密实。这种措施不同于标准意义上的强夯加固软基(Menard and Broise, 1975; Leonards 1980), 因为并未改变淤泥本身的物理、力学性能。

庙岑煤码头堆场地基的强夯挤淤, 是国内海港建筑中首次大面积用强夯法加固淤泥地基的成功例子, 加固面积数十万平方米, 强夯后地基承载力提高到 15 t/m^2 以上, 经多年观测, 沉降趋于稳定。但石体是否落到硬土层面, 未能确证。自庙岑一期工程中强夯法取得成功之后, 在庙岑二期工程(1986~)中, 强夯挤淤近一步得到应用。

② 排水固结法

通过在淤泥层中打设砂井或插入排水塑料纸板成预埋井点排水管网，在加载的条件下（堆载预压，真空预压等）加快淤泥层的排水固结从而改善淤泥的强度，在连云港的应用，主要是1974~75年施工的二码头西侧板桩码头堆场，采用砂井预压加固，砂井半径30厘米，间距250厘米，长10~15米，加固后平均沉降量约45厘米，（图5）砂井和砂垫层要耗用大量的砂而连云港缺乏优质砂源，使这一方法受到很大限制。

综上所述，在连云港港口工程中淤泥地基的处理，虽然有了若干成功的实例，但要做到经济、有效、快速、简便，还要进行新的探索。鉴于爆炸法在一般土岩中的工程应用已取得不少成功经验，我们便尝试将工程爆破的理论与方法应用于水下淤泥地基的处理，希望通过对淤泥和抛石体在爆炸冲击载荷作用下的性状及变形的观测分析，从室内试验到工程性试验，形成若干有效的施工方法，以适应淤泥地基上不同类型建筑物设计和施工的要求。

3. 爆炸法处理软弱地基的已有进展

在我们进行连云港水下淤泥地基的爆炸处理的试验研究之前，收集到有关爆炸法处理软基的国内外现状大体包括两个方面：

a) 爆炸置换法用于陆上路堤的软基处理，在(4)中，列出了四类施工方式，即

- 前端抛掷方法(Toe-Shooting method)

在抛填的路堤前方软土中埋置药包，路堤前端局部堆高(超载)，通过爆炸，路堤前端软土被回填物质置换，路堤延伸(图6)

- 底填法(Underfill Method)

在回填体底部设置药包，依靠爆炸将底部软土堆出使回填体下沉(图7)

- 抛掷开沟法(Ditching Method or Trench Shooting Method)

与上述二种方法可以适用于软土较为深厚的情况不同，本法适用于软土层较薄(>4~5米)时，爆炸在回填前进行。

- 卸荷法(Relief Method or Relief Shooting Method)

在已抛路堤两侧用爆炸抛掷方法开沟，使堤侧能下沉。本法与抛掷开沟法一样，适用于回填料为粘土(Clay type)，而不适用于易坍落的砂或砾石。

b) 爆炸压密法用于非粘性饱和土的加固

爆炸法用于非粘性饱和土的压密，类似于强夯，其基本过程可理解为在强动荷载下

土体液化和土颗粒重新排列;陆上与水下均可使用。文献〔5〕列出了这方面国内外许多工程实例,包括港口工程中的应用实例,文献〔6〕报导了在国内沿海港口进行的多项爆炸压密工程并对爆炸的地震效应给出了经验关系。

需要指出的是,收集到的资料,均属施工方法的简单描述和工程的简单报导。均未有机理性的研究和工程性试验研究,因此只能提供思路而无法从中获得工程设计与施工的指导。

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,经过几年的实践和实验研究,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

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〔7〕,如水中爆炸很相似,满足几何相似律。该实验用的是TNT炸药,其药量为200g,800g,1600g,放大系数分别为1.5倍和2倍,其结果如下表

药量(g)	200	200	200	800	200
测距(m)	0.75	1	1.5	1.6	2
压力(kg/cm ²)	324.2	203.6	149	178	112.3
	1600	200	1600	800	400
	2	3	3	3.2	4
	174.1	76.4	137.4	98.6	37.7
	1600	800	200	1600	200
	4	4.7	5	5	6
	116.5	74.9	31.5	137.4	21.1
	800	200	1600	800	1600
	6	7	7	7.9	8
	49.8	8.38	58.5	31.2	34.2
	800	1600			

续

9.5	10
18.2	22.0

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8
经过数学模拟, 整理后如下公式:

$$\Delta P = 500 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{0.85} - 60 \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{0.12}$$

其中压力 ΔP 单位为 kg/cm^2 , R 为 m , 药量 Q 单位为 kg , 所给出范围在药包直径的 $10 \sim 100$ 倍距离范围以内。

从公式看, 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。

通过实验证明, 冲击波波速和水下相近为 1550 m/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(8), 粘性力与应变率呈非线性关系, 并可表达如下

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

其中 f 是粘性力, μ 是粘性系数, α 是无量纲指数, $\dot{\gamma}$ 是剪切应变率, 而

$$\mu = 2810 \text{ Pa} \cdot \text{s}^\alpha \quad \text{或} \quad \mu = 0.02867 \text{ kg}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}^\alpha \quad \alpha = 0.11$$

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 $0.06 \sim 0.08 \text{ kg}/\text{cm}^2$, 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(9)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。 $Q/w^{1/3}$ 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钝所致。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:

$$Q^{1/3} = \pi f(n)$$

$$\text{而 } f(n) = 3\sqrt{1.5}(0.53 + 0.47n)$$

$f(n)$ 与 n 呈线性关系, 这与通常土岩爆破的药量公式有所不同。

2. 爆炸填石排淤法与机理研究

爆炸处理水下软基采用置换法, 常常想到用爆炸代替挖泥船开沟, 然后再抛填堆石的工艺, 从上节分析, 和实践证明, 爆破开沟在瞬时是可行的, 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。而下面介绍的爆炸填石排淤法实际上是一种瞬态置换法。

爆炸填石排淤法 [10], [11] 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。爆炸经过检测, 塌落的石块已落在亚粘土层上, 其形状如同“石舌”。爆炸飞出的部分淤泥和水随后又回落到“石舌”层上, 回落的淤泥含水量高, 强度降低, 这对于随后的抛填可将“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。

通过模型试验, 以及大型工程试验的观察 [10], [11], [12] 我们对于该施工方法的机理有了比较明确的认识。

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 [10], [11] 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, 也可使爆坑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 $20g$,周期为 $0.05\sim 0.1$ 秒。经过每次这样的振动都可将一部份淤泥从侧向挤出。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

用爆夯法施工时,我们将炸药放置在已堆好的堆石体或其上一一定的挂高处。堆石体下为一定深度的淤泥,淤泥层的下底与海底亚粘土层相连接。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(10)。

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,只有一小部份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(13),在爆炸箱中做了高速摄影试验,其下沉量 and 时间的试验曲线如图(11)

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,爆炸产物初始压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下逐渐减速至零。

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 $\frac{L}{H}$ 值很大时,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(14)(15)。经过分析,我们认为,爆夯时可以引起地基的强烈振动,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

堤下爆炸挤淤法是将条形药包(或多个集中药包)埋设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。其结构图如图12

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,〔16〕给出了X光和高速摄影的试验数据。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 270m/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(13)

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(14)

由以上试验和现场观察可以得到以下结论: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-拉伸波。由于堆石体是一散体,堆石体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有不大的上升位移。实践证明只有少量石块飞出,部份落回堆石体上,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,在水上表面反射为拉伸波,使水的上层部份往外飞出,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。利用这样的施工方法的前提是,堆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。

四. 爆炸处理海淤软基的模型律

为了使爆炸处理海淤软基成为工程上实用的一种施工方法,通过模型试验和对基本物理现象的探讨。建立模型律,特别是有一定通用价值的药量计算公式。

1. 爆破模型律的讨论〔17〕

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方量,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,这就要对几何相似律进行修正。

我们先以平地爆破为例，介绍几何相似与几何相似律的概念。

图 15 中 Q 为药量， w 为药包中心到地面的最小距离，即最小抵抗线， nW 为炸后漏斗直径， n 是无量纲量称为爆破指数，实验与理论表明，如果忽略重力影响（即重力加速度 g ），则在岩土性质，炸药性质（包括品种，初始密度）其它条件保持不变，而仅仅改变药包尺寸（正比于 $\sqrt[3]{Q}$ ）或及最小抵抗线这类几何条件的情况下，我们有

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

其中 f 这个函数无论在形式和数值参数方面，原则上取决于前述单纯几何条件以外的条件。例如对于强度大的岩石，同样的 $Q^{1/3}/w$ ， n 就要小些。上式又可表达为下述药量公式

$$Q = w^3 g(n)$$

这个公式告诉人们，在几何相似条件下（即 $n = \text{常数}$ ），总药量与最小抵抗线的三次方成正比，这就是所谓的几何相似律。

在复杂条件下，几何参数不止一个 n 。例如在两个等药量药包爆破条件下（图 15 b），除 n 之外，另一个几何参数是 a/w ，其中 a 是药包间距；所以在一般情况下，药量公式可表为

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

其中 n_1, n_2, \dots 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，特征加速度 G ，特征时间 T 的表达式：

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

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

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

在漏斗的形成过程中，重力加速度 g 的影响一般可以忽略，这是因为通常

$$G/g = \frac{h_G}{g w} \gg 1$$

只有在 W 很大时 (例如大于 25 米), 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。

综上所述, 土岩爆破有下述规律

(1) 漏斗的特征尺寸是初期运动的结果。在这个阶段里, 几何相似律成立。

(2) 在运动后期, 重力加速度 g 起主导作用, 至于如何起作用, 则要根据具体情况, 具体分析。

这个规律是很容易理解的, 因为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。在土岩爆破问题中, 初期运动与后期运动的特征时间至少为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$, 我们将看到, 上述规律可应用于爆炸处理水下软基。

2. 爆炸处理软基几何相似律与能量准则

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高的两个阶段。

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

其中 $n_1 = Q^{1/3}/W$ 或 $q^{1/2}/W$ 或 S/W

这里 Q 是总药量, q 是堤下爆炸挤淤法常用单位长度药量, S 是爆夯法常用的面积药量。

对于图 15, 16, D 可以称为进尺量, 对于图 16, D 则是爆炸排淤填石两个阶段间反映“漏斗”大小的尺度。

$$\text{而 } n_1 = \frac{H_1}{W}, n_2 = \frac{H_2}{W}, n_3 = \frac{H_3}{W}, n_4 = \frac{L}{W}, n_5 = \frac{C}{W}$$

H_1 是水深, H_2 是泥深, L 是堤宽, H_3 是石层厚度, C 是药与石堤之间距离。

因此在使用分布药量情况下, 对于爆夯和堤下爆炸挤淤, 只要保持其它几何条件 (及所有物理条件, 如炸药品种, 密度, 土质等) 不变, 就有

$$\frac{D}{W} = f\left(\frac{S}{W}\right), \frac{D}{W} = g\left(g \frac{q^{1/2}}{W}\right)$$

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间的关系。

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, 如果炸药能量的利用率是常数 (不依几何尺寸变化), 即变形功正比于药量, 则有

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

$D \propto S$, 在爆夯中, $D \propto q^{1/2}$ 在堤下排淤中均有所试验验证 [13][16]。这样形式的描述称之为能量准则。

对于爆炸填石, 除了形成漏斗这个初期过程外, 还必需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。正如前章所阐述“石舌”的形成, 由于爆炸压力和爆坑的压力差及位势差的作用下, 而堤本身形成泥石流进行坑底。爆炸压力差是几何相似的, 而位势差则需要进行分析 and 讨论。考虑到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, 我们做以下假设, 堤头部份在重力作用下运动, 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, 其剪切流动应力正比于正应力 (如图 17) 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 $g w^2$ (单位宽度, 下同), 变形阻力正比于 $g w^2$, 所以其合力正比于 $g w^2$ 。因为是在重力作用下, 所以运动的时间正比于 $(\frac{w}{g})^{1/2}$ 。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

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

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填石排淤也是适用的。

在变形功正比于变形体体积的条件下, 根据能量准则, 我们又有

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

这个关系式, 在 (18) 的实验中也基本得到验证。

我们注意到,在前式中重力加速度被消去了。这就是所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的试验研究工作,是将机理性的试验研究与工程性试验结合起来进行的;工程效益对进一步的试验研究提供了支持,从而形成了一种良性循环。

工程性试验,先从小型工程开始,逐步走向大型的较复杂的工程。

1. 水下触地爆清淤工程〔19〕

具体的工程对象为渔轮厂迁建工程摇架坑清淤及渔轮厂迁建工程北护岸西段基槽清淤(1985.8-10),前者泥层厚1~2.7米,上复砂层0.4米;后者泥层厚2米,在进行该两项工程性试验之前,在墟沟海淤(西大沙,泥层厚2-3米,上复砂层0.3~0.4米)安排了中间试验。

上述两项工程性试验均达到设计要求,图18为摇架坑爆炸清淤前后的基坑断面,基坑底部残留0.5米厚经充分扰动的淤泥,不影响水抛石落到硬土面上。

上述工程性试验得到的认识是,泥面上触地爆形成爆坑或基槽(条形药包时)是“挤淤”而非“抛掷”。在淤泥层较薄时可以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清淤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〔14〕〔15〕〔20〕〔24〕

在未经处理的淤泥地基上抛石,通过水中爆炸使抛石体下沉落底并自身受到压密。这一施工方式作为爆炸法处理水下软基的主要工艺之一,安排进行了较多的中间试验和工程性试验。

中间试验(1985.6~10)安排在连云港指挥部物资处场地,共两块,平面爆夯场地(10×25米)、斜面爆夯场地(20×100米),泥层厚度均为3米左右,上复0.3~0.4米砂层,抛石厚度2米,试验表明,石体以垂直下挤为主,侧向扩散不大;在下挤过程中,经4次爆夯,石体压密可达20%;斜面爆夯可用于理坡。

代表性的工程性试验前后共安排三项:

渔轮厂迁建工程滑道基床爆炸压密(1986.6-7)。是在全清淤地基上对抛石基床进行压密。施工段全长94米,石体厚度2.3~6.3米,顶宽10米,正式施工前

先行试爆(12×15米),石层厚4.5米,经二次爆夯,夯实率达18%,认为可行,转入正式施工。二遍爆夯,局部补夯,总夯实率为22%,基床坡脚基本无侧向移动。(图19)。

⑩渔轮厂迁建工程直立岸壁基床爆炸挤淤及压密(1986.7-9)

南段(45m)为未清淤段。

泥厚1-2米,上复砂层

0.7~0.5米,要求爆夯后石体落底宽度达到1.4米,夯实率不低于20%;

北段(68米)为已全清淤段,抛石体厚4.5米,要求爆夯夯实宽度不低于1.0米,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,水抛基床并自西向东,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:对抛石体实施三次爆夯,一次整平。

这一项工程性试验是关键性试验,因为直立岸壁后方(西侧)为渔轮厂厂区,要回填场地且在厂房所在处实行强夯,因此基床及岸壁要在巨大的侧向荷载下保持稳定。为此在施工中安排了磁力计及沉降板观测以了解落底情况;安排了沉降及位移观测以了解直立岸壁的稳定情况,结果均令人满意。

⑪集装箱管理楼抛石基础的爆夯挤淤密度(1986.8-12)

管理楼占地1389米²;抛石层下淤泥厚3米,施工顺序为:抛填石料至+3.0米(石层厚度2米)高潮位时爆夯共5次,然后加抛至+5.2米,改用强夯(180^t-m)处理,对爆夯效果进行全面检测包括:沉降观测、沉降板观测、磁力计检测、承载力校核(通过与强夯对比)、铅孔检测。表明效果良好:北区累计沉降2.4米,最大4.414米,南区为1.3米和2.66米,残留淤泥0.4~0.6米且性质也已改变;石层承载力>7 t/m²,超过设计要求。

综上所述,爆夯挤淤压密的施工工艺简单,但是爆炸能量的利用不充分,能有效地挤淤的泥层厚度一般小于4米。

3. 水下爆炸填石排淤工程[18][21][23]

在抛石体前端插入药包(埋深药包),通过在淤泥中形成爆炸空腔,促使抛石体沉底。这一方法的提出,是希图充分利用爆炸能量,实现对较深厚淤泥层的爆炸清淤,因此我们的爆炸处理水下软基的总的研究中,填石排淤法的研究处于突出的地位。

中间试验在墟沟海滩和避港指挥部物资处堆场北侧进行(1985.6-10),该两处的试验海堤分别为 $13 \times 30\text{m}$ 和 $4 \times 17\text{m}$,淤泥层厚3.6米,堆石高7米。

工程性试验包括:

④墟沟港区东护岸(1986.6-8)

在陆抛段进行,处理堤长180米(南端30米不需处理);泥层厚2.5~3.4米上复砂层0.5米,用堤侧向埋入药包方式。钻孔桥检验表明石层已落底。

在水抛段进行(图中a段),处理堤长80米,亦采用侧面插入药包方式,辅以爆夯。用体积法估计,石体亦已落底。

⑤海军防波堤一、二期工程(1986~1988)

一期工程:堤长180米,堤轴线处淤泥厚度从近岸处的3米左右向北逐渐增厚,端部处为12米;设计堤底宽度30米,堤顶宽10米。

二期工程:为一期工程的延伸,堤长150米,堤轴线下淤泥12~16米

海军防波堤工程,由于所处理的软基为深厚淤泥层,使得这一工程性试验具有特殊重要的意义。

爆炸填石排淤分别在堤端和两侧进行。在堤端前方实施埋深群药包爆炸,促使端部堆石坍落前伸,形成落底的石舌。在石舌上方抛填堆高,进行下一轮爆炸。堤侧用爆填造成侧向坍落,形成石舌和所需的边坡,辅以斜面及平面爆夯为理坡和安放护面块体创造条件。

在第二期工程施工的同时,对一期防波堤进行了沉降及位移观测,测点间距20米。观测结果表明,三个月内沉降即告结束,最大沉降量25毫米,平均沉降量19毫米,二期防波堤沉降观测也表明三个月内沉降中止,最大沉降量200毫米,平均(120米长范围内)为76毫米。位移量,一、二期工程均为零。

经爆炸排淤填石法处理后的抛石体基底状况,经钻孔检测,可绘出如下图式(图21)。表明落底宽度堤心为15米左右,内外侧各为8米左右。

海军防波堤工程,由于采用了爆炸法,避免了原设计中规定的用挖泥船进行基槽全清淤的工艺,节省了施工航道及基槽的挖泥费用;同时,利用了堤脚两侧淤泥的反压对堤身稳定的有利作用,减小了堤断面,节省了抛石量,以及避免了水抛作业等,使工程造价大幅度下降;二期工程即是利用一期工程节省的投资造成的。该项工程采用爆炸法,比原设计节约投资约540万元,经济效益十分显著。

(4)其它工艺的工程性研究

在墟沟试验区及东护岸还进行了两种工程性研究:

a) 用埋深药包对淤泥进行强扰动后进行水上抛填(图 22 中墟沟试验区); 试验堤长 40 米, 泥层厚 4 米; 用埋深药包进行二次强扰动。

b) 堤下爆炸挤淤。在图 22 中东护岸 C 段进行, 淤泥层厚 4 米, 用钻孔检验了落底效果。

需要指出的是, 墟沟东护岸工程, 与前述渔轮厂直立岸壁一样, 都有后方的场地回填, 即要承受侧面载荷。采用不同方法分别实施爆炸施工的墟沟东护岸各段, 在后方回填后均能保持稳定, 因此也都是成功的。

综上所述, 我们在连云港进行的爆炸法处理水下软基的工程性试验至少有以下一些特点:

1. 在工程性试验之前均经过了机理性试验和中间试验, 保证了工程性试验及试验验证两方面均取得成功。

2. 工程性试验涉及到港口各类海工建筑物的地基处理, 包括海堤、护岸、直立岸壁、抛石棱体等, 处理方式上, 也多种多样, 为不同建筑物的软基处理提供了选择余地。

3. 经济效益上, 均取得了满意的结果。

4. 在每一种工程试验中, 均尽可能地安排了试验、检测工作, 例如用磁力计、沉降板、钻孔等检查石体落底效果, 通过沉降、位移观测检查工程的稳定性, 通过测震分析爆炸的震动效应等, 在爆炸处理的机制和施工工艺等方面积累了较多的资料。

五 爆炸法处理水下软基的安全保障

爆炸法处理水下软基的安全保障包括安全施工及爆炸对周围建筑物的震害控制 [22]

为了避免或缩小炸药在水中或泥中爆炸产生的地震波对周围民房和重要工程设施的有害影响, 试验组制订了详细的爆炸震动观测计划。由于采用多种施爆工艺, 爆炸产生的地震波可以在基岩、亚粘土、堆石散体、淤泥和水等不同性质的介质中传播, 致使震波传播情况变得相当复杂。我们的测震工作, 目的就在于针对不同的施工工艺和施工地点, 归纳出各自的表征震波的经验参数, 具体言之, 就是确定震波速度, 经验公式,

$$V=K\left(\frac{Q^{1/3}}{R}\right)^{\alpha}$$

中的参数K与 α ，通过系统的观测，共确定出六组(K, α)值如下表：

	K	α
磨刀塘护岸工程触地爆炸	280	1.51
海军防波堤排淤填石法	450	1.65
二航基地排淤填石法	500	1.43
二航基地平面爆夯法	1140	1.84
墟沟围堰排淤填石法	36	0.75
墟沟围堰平面爆夯法	530	1.82

爆炸施工对附近工程设施的影响，通过震动速度的测定和影响观测，积累了若干重要的经验，例如海军防波堤施工时，距爆点300米的沉箱驳岸和340米的船体车间均未出现震害，波两处测得的震动速度为2.0厘米/秒；磨刀塘摇架坑及护岸施工时，距爆源280米的油罐基座也未出现震害，测得该处的震动速度为3.86厘米/秒。

六 爆炸法处理水下淤泥地基的发展前景

针对连云港港口建设而进行的这一项试验研究，实际上是一项全面的研究，即包括机理性的试验研究、工程性的试验研究和作为这二者之间的桥梁的相似律的建立。因此它的成果应该具有普遍性，从已经完成的工程试验来考核，这类施工方法适用于各种类型的海工建筑物的淤泥地基的处理，工程造价低，施工简便，有良好的经济效益，因此有普遍推广的价值。

作为软基处理的一种新的途径，理论和实践两方面都要进一步深化和发展，以便能在不远的将来建立起关于这一新技术的设计与施工规范。

1. 理论上的深化

在过去几年所进行的工程试验中，出现了一些值得进一步研究的对象，研究这些现象对改进施工工艺，提高施工效率和降低造价将会起促进作用，例如：改变炸药品种和装填密度能否明显地提高爆填工效？在“石舌”上抛填，当出现超抛（抛填位置

超出石舌前端)时, 施工中出现的状况是: 新“石舌”的尺度加长了, 产生这种对提高工效有利的现象的机制是什么? 如何有效地利用这一现象? 从力学上判断, 如果在抛石体端部前方埋置两排炸药, 利用远端药包的爆炸减少石舌前进的阻力以加长石舌前进的距离是否可能? 又例如, 用爆炸排淤填石法形成稳定的抛石堤断面, 是否堤心的淤泥一定要清除? 在爆炸震动作用下, 抛石体(散体)的本构关系(宏观的受力与变形的关系)及堤身稳定的机制如何? 即如果保留堤心的淤泥而堤身在自重和外载荷(特别是侧面荷载)下能维持稳定, 如何来建立表达这种稳定状态的计算图式? 再如堤下爆炸挤淤法, 从力学上判断, 其对炸药爆炸能量的作用是优越的, 但在施工工艺方面进行的研究不多。

2. 进一步的工程实践

几年来的试验研究工作, 相当程度上是为着在连云港西大堤工程上加以应用。西大堤全长6700米, 其中1600米为全清淤段, 5100米原设计为全清淤, 现确定改用爆炸法处理淤泥。已确定采用爆炸排淤填石法辅以两侧的爆夯施工工艺, 将通过完成这一工程, 并将这5100米海堤作为一个难得的试验场所, 来积累丰富的经验, 包括完善施工机具, 施工组织等, 从而使这一技术获得进一步发展; 另一方面, 也适当选择承接连云港以外的工程, 将这一新的方法加以推广。

参 考 文 献

- [1] 魏汝龙等 连云港淤泥的物理力学性指标的统计分析
南京水利科学研究所土工所(土) 8833
- [2] 高宏兴 港口软基处理的调查及建议
《海洋工程》 1983年第4期
- [3] 吴正友 席平 连云港吹填区围堰滑坡处理及软基指标反算
连云港建港指挥部内部资料 1988.10
- [4] Blasters Handbook
E. L. Du Pont de Newcurs & Company
- [5] 葛顺群 爆破压密法及其应用实例
《海洋工程》1985年第3期
- [6] 马乃耀 挤压爆破处理软土地基 一项海港建设处理软土地基新技术
土岩爆破文集(第二辑)冶金出版社, 1985
- [7] 杨振声, 邢绿复, 任京生, 戴铭榕, 爆炸条件下冲击波在淤泥中传播的规律
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [8] 许连坡 在强动荷载作用下连云港海淤的粘性
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [9] 许连坡, 顾道良, 李世海: 海淤中爆破的一些现象和问题
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [10] 张建华, 张亮, 顾道良, 武可贵 爆炸排淤填石法的实验研究
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [11] 许连坡 “爆炸填石排淤”法的作用机理
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [12] 杨振声, 许连坡等 爆炸处理海淤软基机理试验研究 《连云港爆炸处理
水下海淤软基锚定会材料》
- [13] 杨振声, 赵成福, 任章生, 章培德, 张名根 爆夯水下淤的机理与模拟试
验研究
《第四届全国工程爆破会议报告》

- [14] 武可贵, 高兆福, 顾道良, 赵成福 水下抛石基床的爆炸密实新技术
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [15] 顾道良, 张建华, 高兆福, 武可贵 连云港渔轮厂沉箱驳岸基床的爆炸处理
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [16] 杨振声, 赵成福 任京生, 章培德 张名根 堤下爆炸挤淤模拟试验与机理
实验研究
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [17] 郑哲敏, 相似律, 药量公式, 优化及其它
中国科学院力学研究所研究报告 1987
- [18] 张建华, 顾道良, 石成, 张亮, 武可贵, 高兆福 连云港海军防波堤爆炸排
淤填石处理软基工程 《第四届全国工程爆破会议报告》
- [19] 赵成福, 顾道良, 章培德, 倪祖平, 触地爆炸挤淤处理海淤软基的试验报告
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [20] 徐国强, 赵成福, 石成, 陈善良 连云港集装箱管理楼地基爆炸处理工程总结
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [21] 张建华, 武可贵, 高兆福, 张亮, 石成, 石峰 爆炸排淤填石法处理防波堤
大厚度淤泥软基的工程实践
《第四届全国工程爆破会议报告》
- [22] 陈善良 爆炸处理海淤软基的震动效应测试研究
《第四届全国工程爆破会议文集》
- [23] 顾道良, 和喜莲 爆炸法处理海淤软基研究中的高速摄影
《第四届全国工程爆破会议文集》
- [24] 陈善良, 邢维复, 戴铭榕 白云裳 磁力计算踪法研究及其应用。
《第四届全国工程爆破会议文集》



图1 连云港海峡淤泥层厚度分布

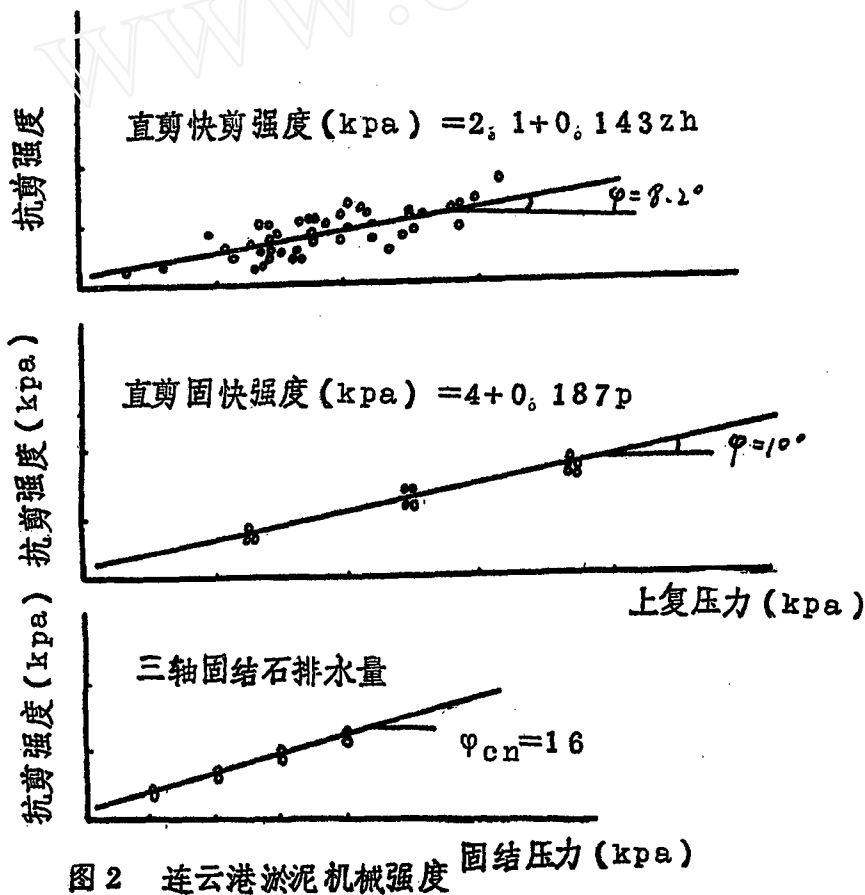


图2 连云港淤泥机械强度

图3 淤泥中抛石体滑动方式引用(1)

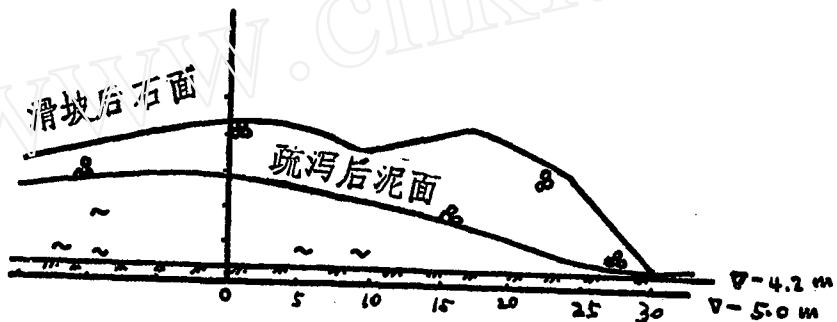
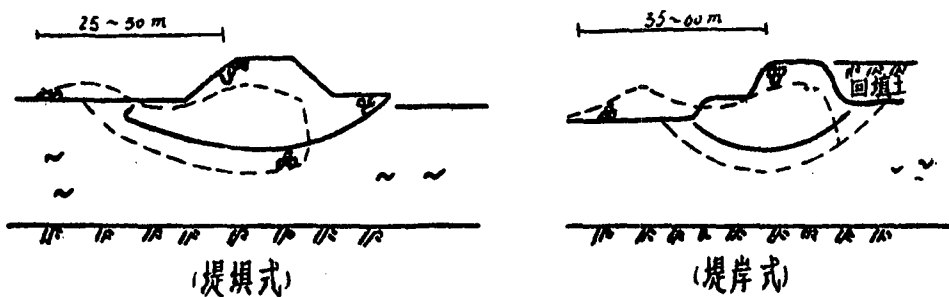


图4 滑动面接触土层的情况

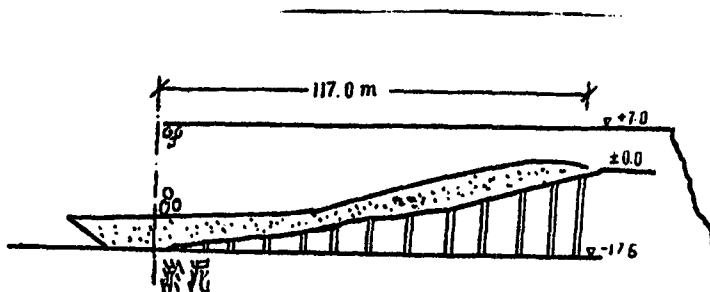
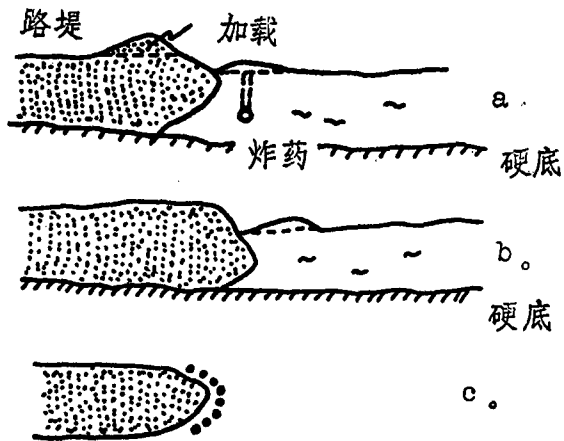


图5 二码头两侧推动砂井加固示意图



a 爆前侧视图

b 爆前俯视图

图6 前端抛掷法示意图

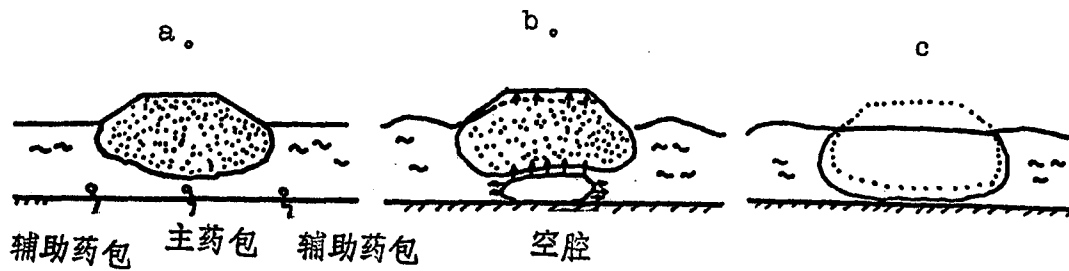


图7 底填法示意图 a 爆前 b 爆后

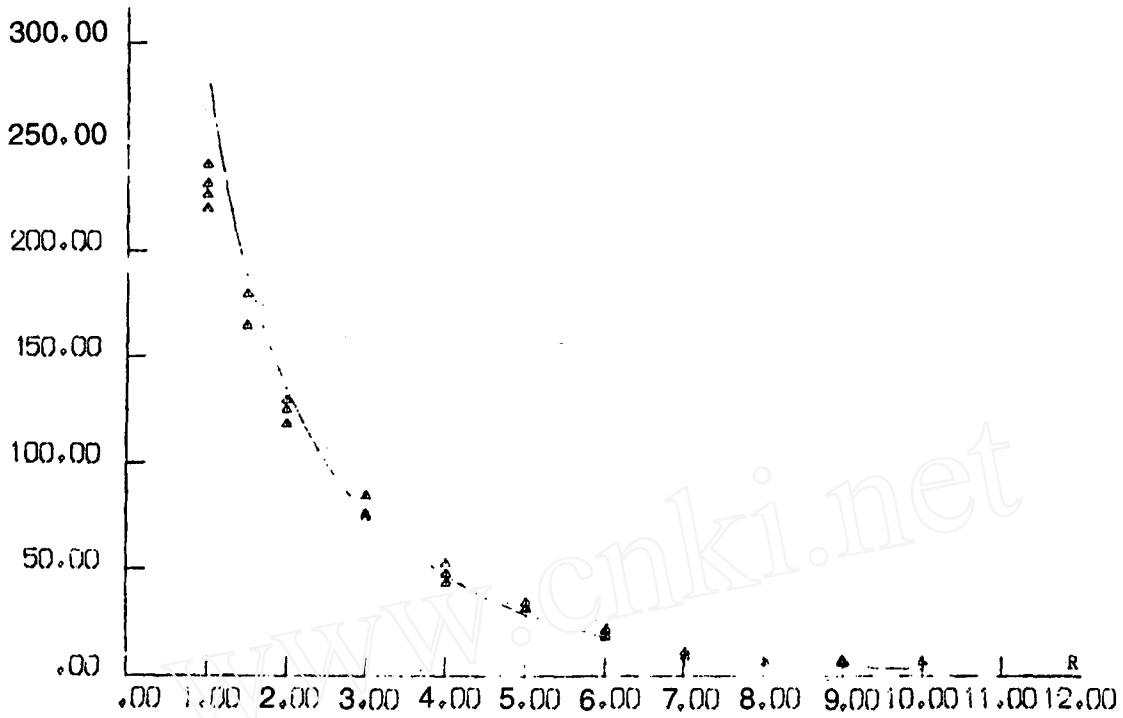


图8 冲击波峰值与位置相对值的曲线

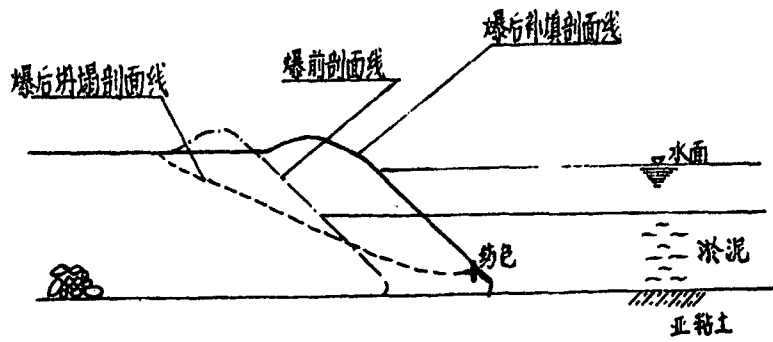


图9 爆炸前后纵断面与石舌纵向形态图

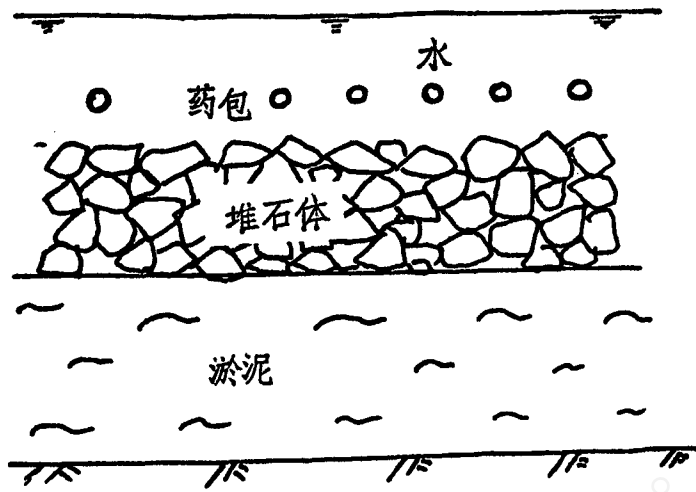


图 10 爆夯前装置图

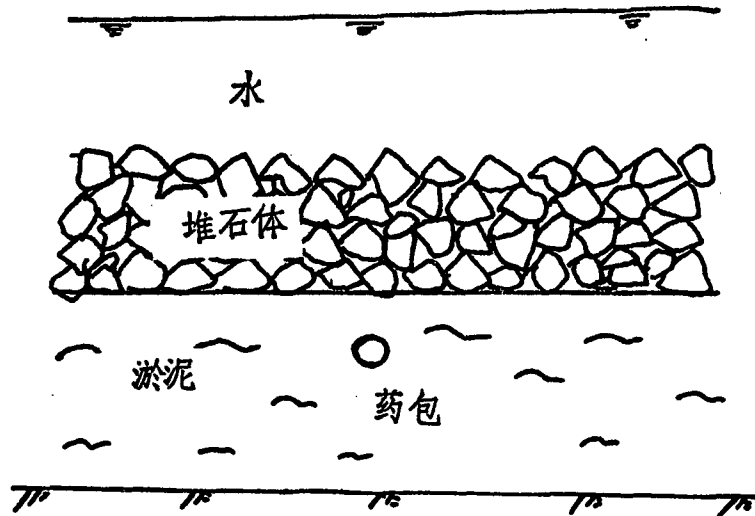


图 1 2 堤下爆炸挤淤法结构图

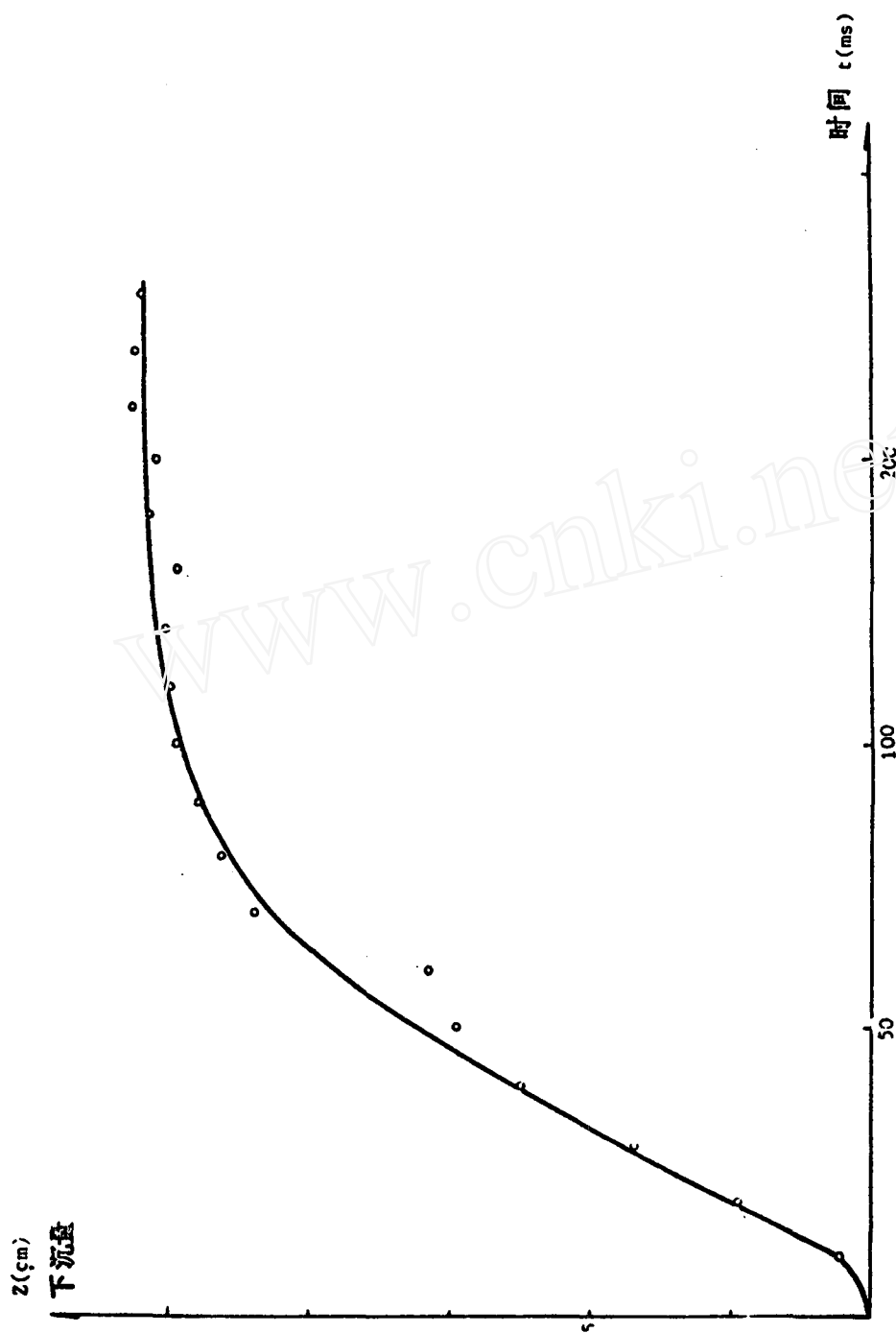


图 1: 爆炸条件下板的下沉量与时间的高速摄影试验曲线

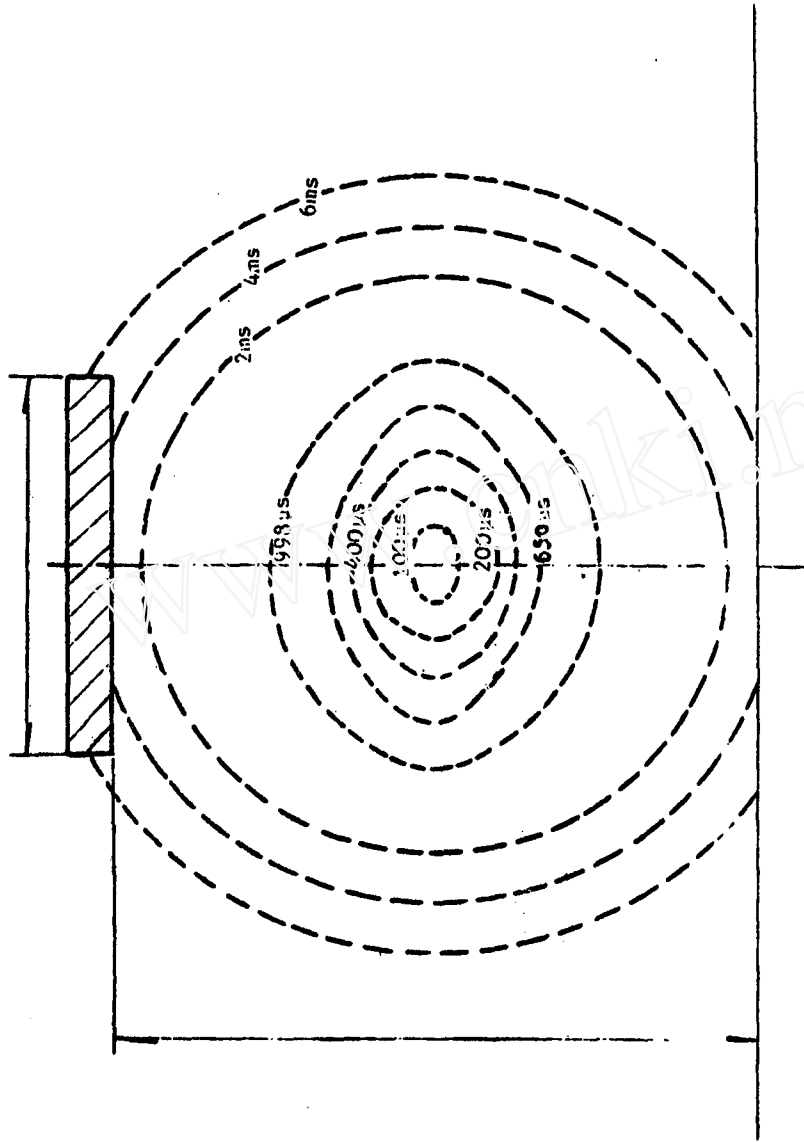


图 23 X 光试验爆炸空腔不同时间的图象

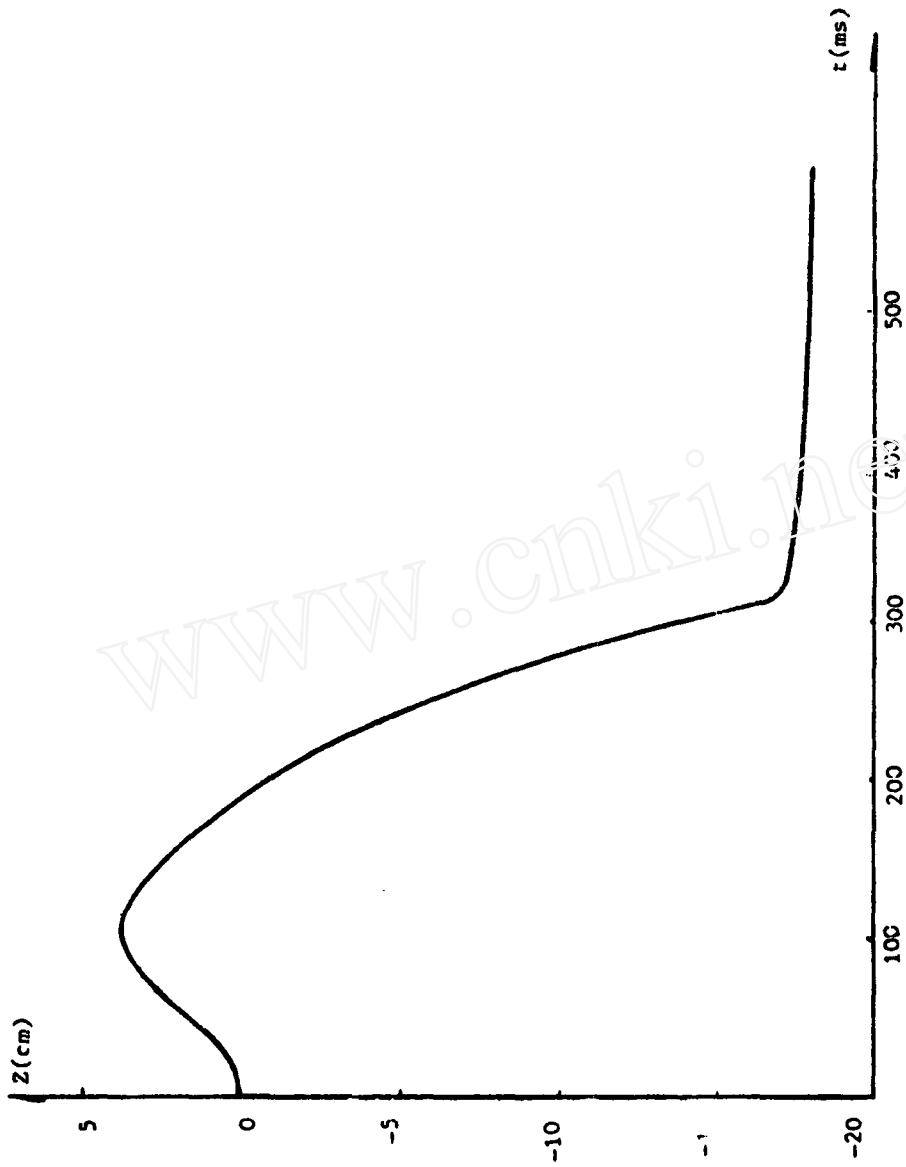


图 14 板的运动位移与时间曲线

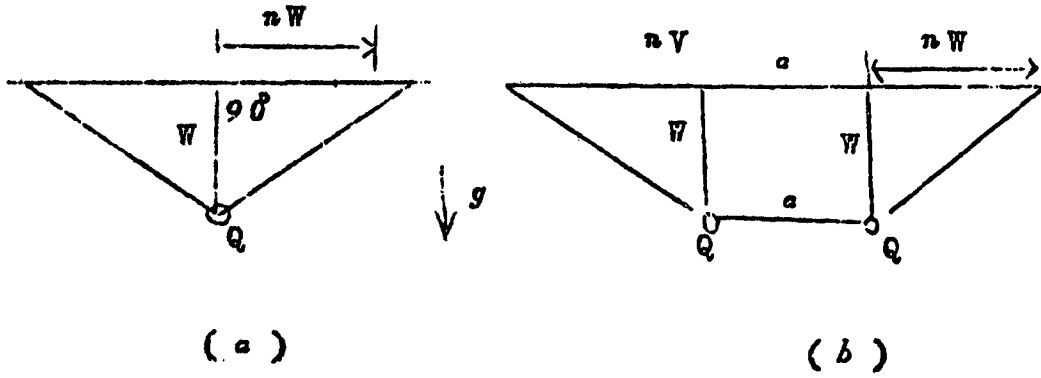


图 15 平地爆破

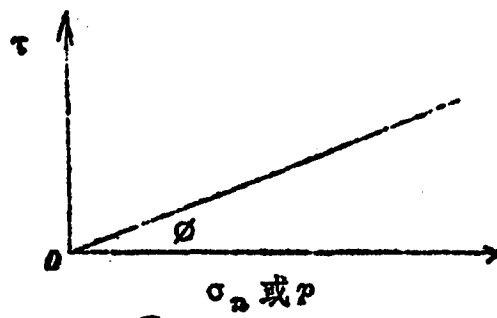


图 16

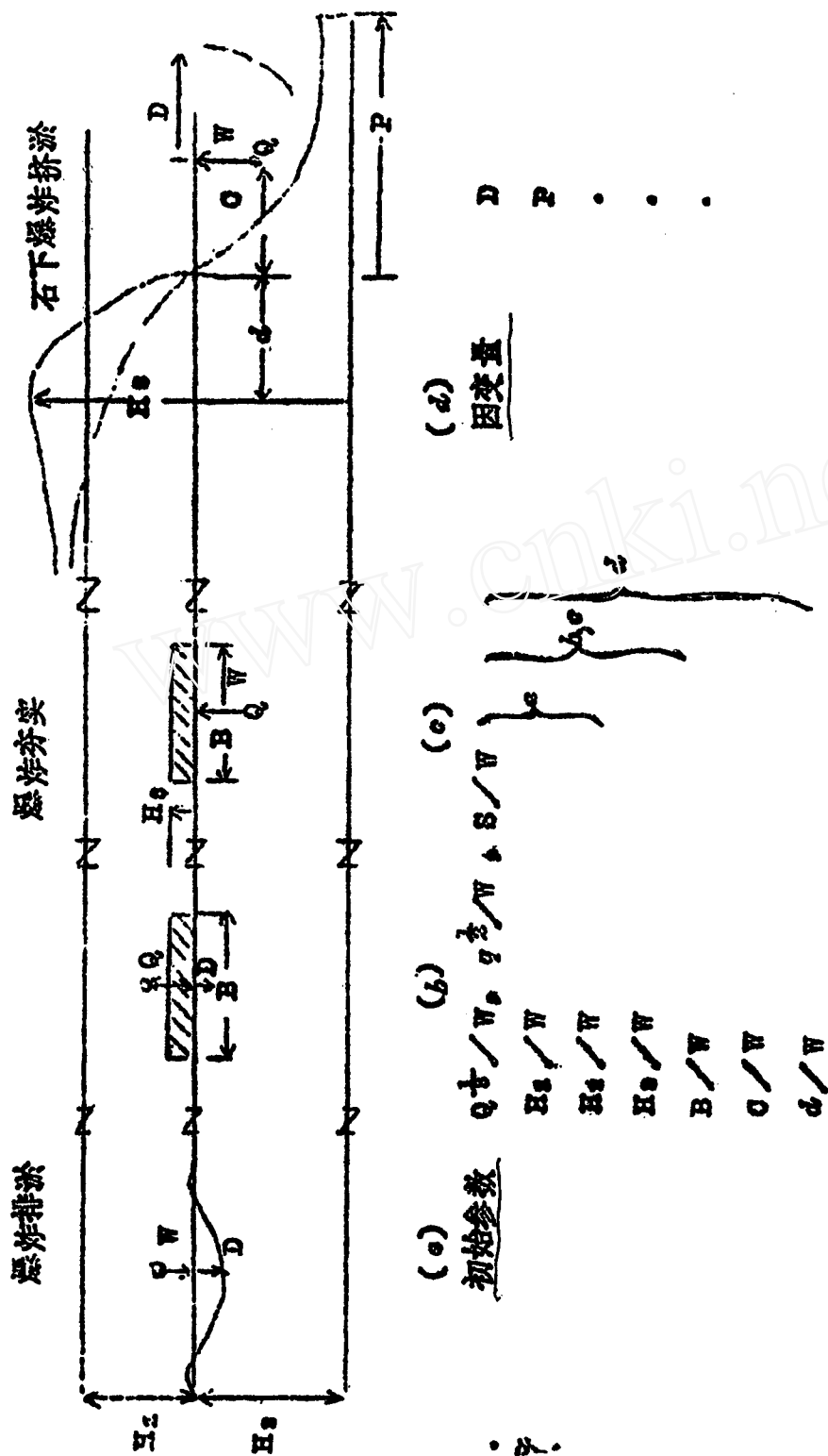


图17

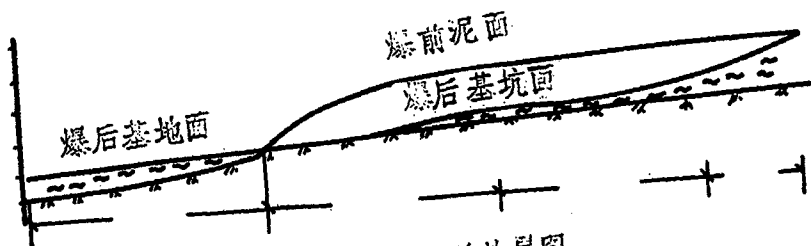


图 18 括架接触地爆清淤效果图

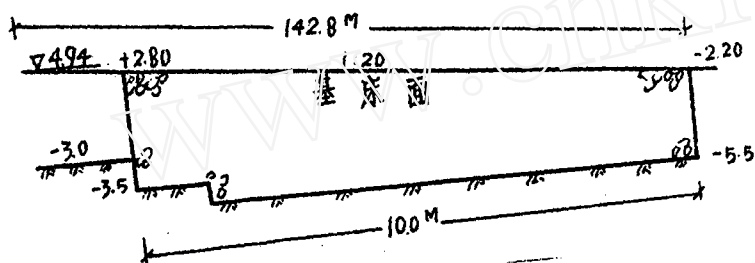


图 19 渔轮厂滑道基床示意图

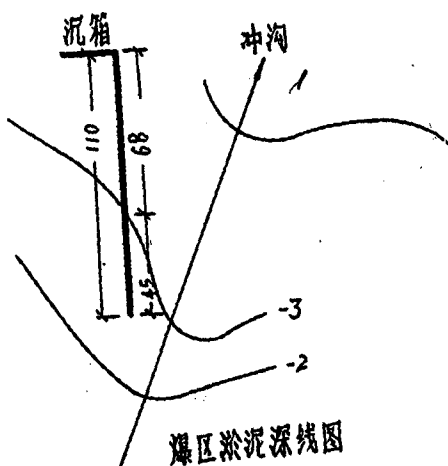


图 20 直至岸壁平面坝箱

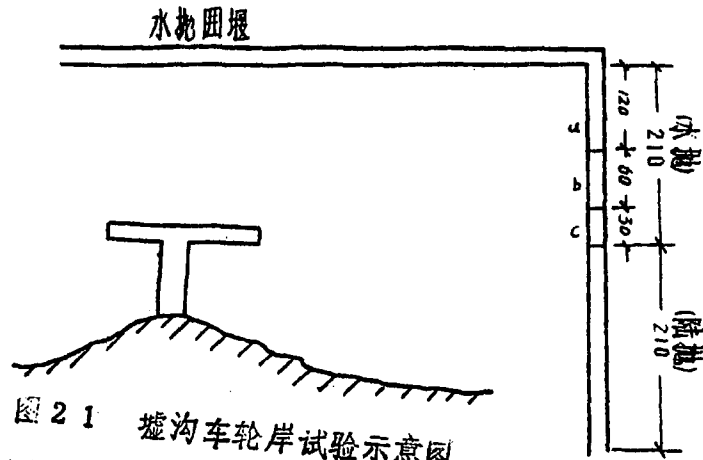


图 21 墟沟车轮岸试验示意图

水抛围堰处理:

- a. 排淤填石(侧强扰)形成石舌再爆夯.
- b. 单纯爆夯.
- c. 爆炸自重排淤.

陆抛围堰试验: 填石排淤+斜夯

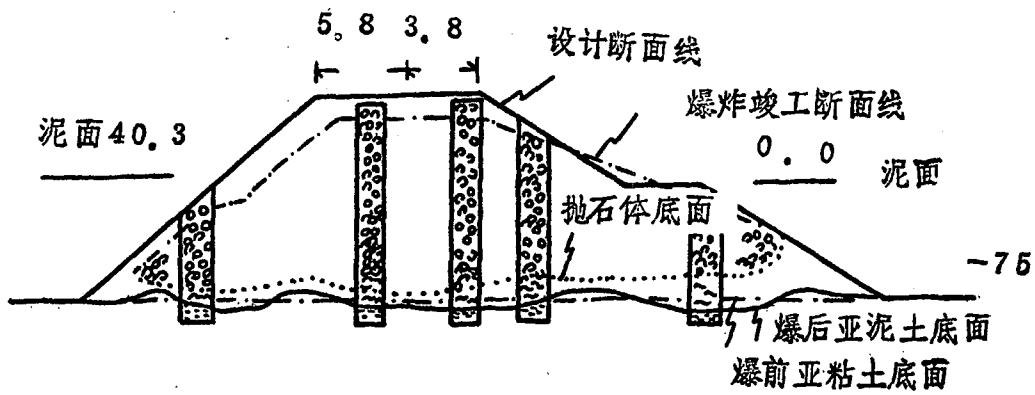


图 22 0+85 断面爆炸竣工钻孔检查海底状及图