

# 爆炸处理水下软基筑堤法

中国科学院力学研究所  
北京中科力爆炸技术工程公司 张建华

## 摘要

简要介绍爆炸处理水下软基筑堤和护岸工程的施工工艺、施工安全控制、质量检验要求及方法。

## 关键词

爆炸 软基处理 筑堤

## ABSTRACT

The construction technology, safety control and quality examination requirements of blasting method for underwater soft foundation layer of dikes and revetment works are briefly introduced.

爆炸法处理水下淤泥质软基新技术,是由中国科学院力学研究所从1984年开始研究的,并与连云港建港指挥部等单位合作,发明了“爆炸排淤填石法”新的软基处理技术,发展了“水下爆夯法”、“堤下爆炸法”等多项水下软基处理新技术。

爆炸排淤填石法可用于防波堤、护岸、沿海贮灰场围堤、围海造地以及沿海养殖围堤等水工工程的淤泥质软基处理。“水下爆夯法”主要用于重力式沉箱码头和船厂滑道等抛石基床压密。

## 1 爆炸处理软基筑堤的优点

在水上筑堤工程中,爆炸处理法与常规的软基处理法相比有如下优点:

- (1) 处理宽度是常规方法的(1/2 ~ 1/3);
- (2) 由于侧向淤泥的反压以及反复爆炸振动的密实作用(海堤重度可达 $20\text{kN/m}^3$ ),改善了堤身稳定,最终沉降量不超过30cm;

(3) 与清淤法相比,堤身抛石量可减少10%~15%;

(4) 全部采用陆抛混合石料,一般情况下,陆抛混合石料单价为水抛石单价的40%~50%;

(5) 堤顶施工宽度可超过18m,便于长堤施工;

(6) 装药与抛填工序可同时进行,成堤速度仅取决于陆上抛填速度。受天气因素影响小,故施工速度大大提高。

采用爆炸法处理水下软基的综合经济效益为:比清淤挖泥法节省工程费约10%~30%;比采用土工布砂垫层法节省工程费约10%。

## 2 采用“爆炸排淤填石法”修建筑防波堤

“爆炸排淤填石法”修筑防波堤的作堤步骤(图1)是:

- (1) 用汽车与推土机抛填混合石料,一次抛填至设计堤顶高程,堤顶宽度可超过18m;
- (2) 在抛填体前方,采用陆上装药机按设

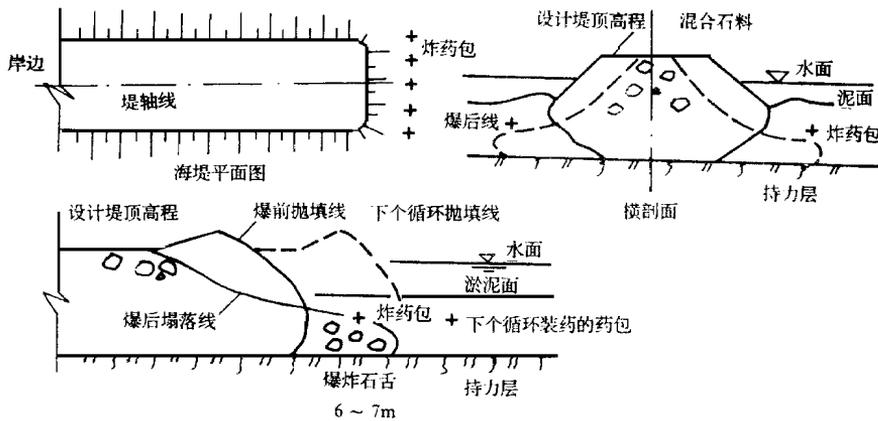


图 1 爆炸法建筑防波堤施工示意图

计位置将群药包埋于泥中；

(3) 引爆炸药：堤头抛石向前方滑移，形成爆炸石舌；

(4) 进行下个循环抛填，抛填过程中抛填体将“石舌”上部的浮淤（含水量可达 100%~200%）挤走，当抛填体达到设计断面时进行下个循环装药放炮。以后的过程就是“抛填 装药 引爆”的重复循环。在泥厚 < 10m 以下，一次循环进尺量为 6~7m；

(5) 当堤身处理超过 50m 时，进行两侧埋药爆炸处理。则堤宽可达到设计宽度，两侧抛石落底宽度增加，达到设计断面；

(6) 用爆炸法理坡，并爆夯密实坡脚平台。

### 3 采用“爆炸排淤填石法”建筑护岸

用“爆炸排淤填石法”修筑护岸的施工步骤（图 2）如下：

(1) 根据护岸稳定要求确定软基处理宽度，按设计处理宽度确定护岸抛填前沿线，用汽车、推土机抛填混合

石料并达到设计要求的抛填前沿线 and 设计高程；

(2) 在护岸抛填体行进方向的淤泥内，用陆上装药机按设计要求埋入群药包。装药长度由一次装药能力与安全要求确定；

(3) 引爆炸药：抛石体向行进方向滑移，形成泥下爆炸石舌；

(4) 进行下个循环抛填、装药、引爆工序。一般进行 1~2 次循环，就可完成护岸的软基处理，并能满足设计及稳定要求；

(5) 用爆夯法理坡  
用“爆炸排淤填石法”建筑护岸，比建筑防波堤的经济效益高、施工速度快。

### 4 爆炸法处理水下淤泥质软基筑堤的工程质量检测与验收

堤身稳定性与允许沉降量是检验筑堤工程

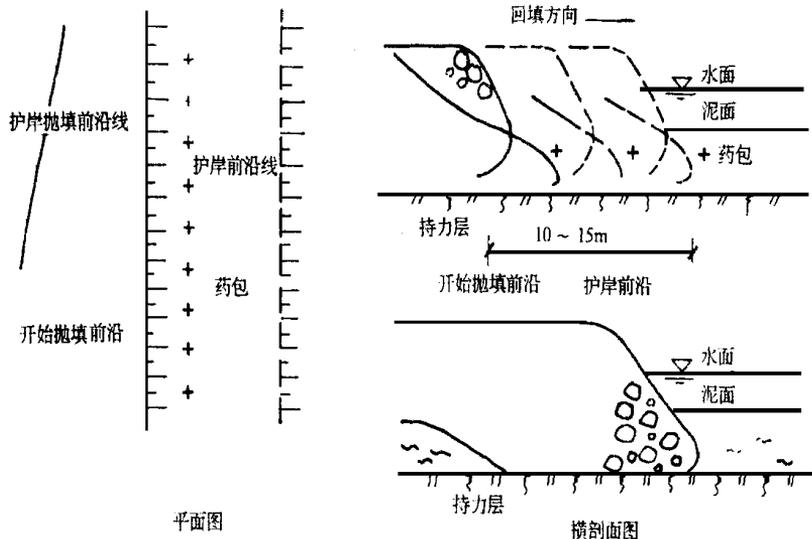


图 2 爆炸法修筑护岸药包布置图

质量的两项根本要求。

#### 4.1 设计参数的检测与验收

爆炸法处理水下软基的主要设计参数:

(1) 爆后抛石体底部深度 ( $H_1$ ); (2) 爆后抛石体的重度 ( $\gamma_2$ )、内摩擦角 ( $\alpha_2$ ); (3) 抛石体下部, 由于爆炸产生的泥~石混合体的厚度 ( $H_3$ )、摩擦角 ( $\alpha_3$ ); (4) 爆后混合体下部与持力层之间残留淤泥的厚度 ( $H_4$ )、重度 ( $\gamma_4$ ) 以及摩擦角 ( $\alpha_4$ )。

这些设计参数, 可通过钻孔取样, 对已建工程反演以及大量的中、小型实验结果比较进行检测。

#### 4.2 施工期的工程质量控制及检测参数

爆炸法处理水下软基是一种多循环处理方法, 因此对前循环的工程质量进行施工期检测, 根据验测结果及时调整爆炸参数, 这对于保证工程质量是必要的。

施工期工程质量检测内容:

(1) 统计抛石量, 用体积平衡法逐段计算爆炸进尺量与测算抛石体底部深度;

- (2) 用钻机探测爆炸石体长度与深度;
- (3) 设置观测点, 进行位移、沉降监测;
- (4) 物探检测。

#### 4.3 竣工验收检测

竣工检测内容有:

- (1) 断面测量;
- (2) 钻孔检测;
- (3) 抛石量与体积平衡测算;
- (4) 长期位移、沉降观测;
- (5) 物探检测。

根据上述检测数据, 按设计要求与国家标准编写竣工报告。

#### 5 爆炸法处理海堤、护岸软基的钻孔检测

钻孔取样, 是检验爆炸处理海堤、护岸软基工程质量的重要手段。通过钻孔检验可获得以下数据:

- (1) 抛石层底部高程;
- (2) 抛石层下面泥~石混合体的厚度, 重度、含水量以及泥、石比例;

(3) 混合体与持力层间是否夹有淤泥层并取样作淤泥的土力学指标试验;

(4) 爆后持力层高程及其土力学指标;

(5) 利用钻孔作十字板、静压  $P_s$  值等参数检测。

按实验研究与工程检验要求, 几年来共取得 200 多个钻孔资料。经分析, 爆炸处理后的抛石层底部状况可分为三类: 抛石直接落在持力层上; 抛石层与持力层之间有一层泥~石混合体; 抛石层下为泥~石混合体, 混合体与持力层间留有淤泥。呈第 2 类状况居多。

在抛石体上钻孔, 并取得下界面的准确数据, 难度较大。钻孔检验中必须做到: (1) 在达到预计抛石层底面 2~3m 前, 只能采用回转钻进; (2) 在接近预计抛石层底面约 1m 时, 要求每 10min 记录一次钻进压力、时间、钻进量以及手感、声响等, 并即时作出判断。

由于钻孔检测费用很高, 此法多用作抽查。

## 6 物探检测

### 6.1 物探探测海堤石层底部界面的可行性

宏观上看海堤底部存在一个物理分界面, 通常称为底界面, 它是抛填石层与持力层的接触界面。在这底界面的上下存在着明显的密度与波阻抗的差异性, 这些物理差异性使能应用地震反射波法探测底界面的状况, 检测施工质量。

通过对海堤反射波的频谱分析发现, 海堤中心频率  $f = 70\text{Hz}$ , 平均纵波速度  $V_p = 780\text{m/s}$ , 求得中心波长  $\lambda = 1/f \cdot V_p = 11.1\text{m}$

根据地震勘探基础理论, 分析地震勘探垂直向分层能力即垂向分辨率, 是中心波长的 1/4 (即 2.8m), 因此当探测混合层的厚度时, 如果混合层厚度  $< 2.8\text{m}$ , 浅震反射波法无法探测出来。从实际钻孔资料看, 一般混合层厚度在 2m 左右, 所以浅层反射波法是无法探测到的。实际水下平台厚度一般  $> 6\text{m}$ , 可以采用浅层反射波法进行水下平台的探测。

### 6.2 探测原理

根据弹性波理论，当在堤面上，人为地给以一激震力（锤击力或爆炸力），这时则产生弹性效应，产生应力波，该波的一部分则沿堤体向下传播，当遇到底界面时，由于底界面具有波阻抗差，在底界面上形成了反射波，该波又沿着堤身向上传播到堤面上来。通过安置在堤面上的检波器，接收到反射波，这时在程序控制下的探测系统记录了反射波往返路程的时间与波形特征（图3）。最后由计算机分析波形特征与时间、速度，根据测点高程坐标，即可给出每测点下的底界面标高。

将野外收集的原始波形数据，经过 CASE

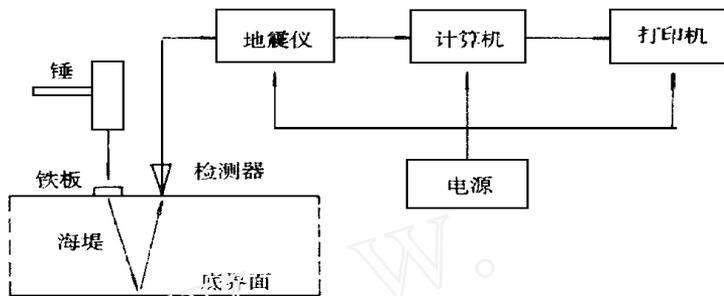


图3 物探检测工作示意图

系统软件处理，提取有效波，舍去干扰波。最后，将计算数据输入计算机，启动 DPP 绘图软件，绘制成各种表格。

### 7 爆炸法处理水下软基工程的沉降

海堤、护岸等工程的稳定与后期沉降是软基处理工程质量的主要控制标准。现简要介绍一些已竣工的爆炸处理软基工程的长期沉降观测结果。

连云港某防波堤二期工程，堤长 180m，最大淤泥厚度 12m。经爆炸处理后，设置了 10 个沉降观测点，三个月连续观测的结果为：最大累计沉降量 2.8cm，10 点平均累计沉降量 1.9cm。紧邻的渔轮机防波堤（采用全清淤挖泥），观测一年的沉降量达 24.5cm。

连云港西大堤，淤泥厚度为 6~8m，分别对清淤段与爆炸处理段，各设 5 个沉降观测点，连续观测三个月。前者累计沉降量为 22.6mm，后者累计沉降量为 18mm。

连云港渔轮机沉箱驳岸地基有 4m 厚淤泥，采用爆炸挤淤法全清淤，在处理后的基床上安置沉箱。在 10 个沉箱上共设 44 个沉降观测点。竣工一年的平均累计沉降量 < 15mm。

连云港墟沟港区 1 号仓库面积为 100 × 78 m<sup>2</sup>，下部淤泥厚度 < 4.5m。该仓库区采用斜面爆夯法部份清淤处理。经爆炸处理石层下部留有 0.8~2m 淤泥。爆炸停止后共布 9 个沉降点观测，8 个月平均累计沉降量为 23.6cm。

从以上沉降观测结果可知：用爆炸法处理的软基，长期累计沉降值均能满足设计的使用要求。

### 8 爆炸处理软基的淤泥出路

爆炸处理软基的效果，一方面与布药参数有关，同时也决定于被置换的淤泥是否有充分出路。这里，对影响排淤出路的主要因素作一简介。

#### 8.1 排淤分布

由钻孔资料得到的爆后地质柱状图为：抛石层、泥石混合层、残留淤泥层以及持力层。

泥、石混合层中，淤泥含量约占 70%，一般情况下，混合层约占自然淤泥厚度的 20%，其含泥量约占爆炸总排泥量的 15% 左右。

残留淤泥层厚度变化范围比较大，其值为自然泥厚的 10%~30%。

综合上述结果，抛石体内及其下部的含泥量，约占爆炸总排泥量的 30%~40%，对于部份清淤法处理，其含泥量将更大。

爆炸将淤泥挤向抛填体两侧，形成侧向淤泥包。排淤量可根据泥包断面判断，其排淤量约占爆炸总排泥量的 20%~25%。

爆炸循环处理中，抛填体前沿形成 50~100m 半径的排淤摊散范围。摊散范围内淤泥含水量极大，易流动。排出的这部份淤泥约占爆炸总排泥量的 25% 左右。余下的约 10%~

20% 淤泥在爆炸过程中将被涡浪、潮汐带走。

## 8.2 影响排淤出路的因素

爆炸方法与爆炸参数、基础几何形状与尺寸，淤泥特性与厚度是影响排淤出路的主要因素。其中基础的几何形状与尺寸的影响更为重要。长条形基础的排淤效果最好，因此海堤、护岸工程采用爆炸处理软基的效果最佳。

由于爆炸法近似瞬间排淤换石，因此，在海堤、护岸等条形基础中，爆炸排泥总量远小于机械挖泥量，通常前者为后者的  $1/2 \sim 1/4$ 。

## 9 爆炸法处理水下软基的震动效应

爆炸法处理水下软基的爆破震动效应不同于土岩介质中的爆破震动效应，首先，海淤爆炸处理，爆源是在水下或淤泥中，爆炸产生的地震波是在基岩、亚粘土、堆石散体、淤泥和水等这些不同性质和密度的多层介质中传播，它较之士岩介质中的爆破地震波传播情况要复杂得多。再者，爆炸法处理海淤软基要考虑其震动影响的，往往是在距爆源较近的人造陆城。

基于海淤爆炸处理时震动效应的特殊性，必须对这一领域的爆炸震动效应进行系统的测试分析，掌握其传播规律。因此，随着爆炸法处理海淤软基应用范围的扩大，我们对不同形式的爆破和不同介质中地震波的传播规律进行了系统的观测。

海淤爆破时的震动效应，其传播规律可用如下经验公式表示：

$$V = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)$$

式中：

- V 震动最大速度 (cm/s) ;  
Q 一次爆炸时的总药量 (kg) ;

R 爆源与观测点的距离 (m) ;

K、与爆炸形式和地质、地形条件有关的参数 (附表)。

附表

爆炸方式	测点地质状况	K	
爆炸排淤填石	岩基	450	1.65
触地爆炸	岩基	280	1.51
爆炸排淤填石	抛石地基	36	0.75
爆夯	抛石地基	530	1.82

各工程在水下软基爆炸处理中，我们对不同工业设施进行了爆炸震动效应的观测，如在某防波堤的爆炸施工中，在距爆点 300m 的沉箱码头和 340m 以外的船体车间，当一次爆炸的总药量为 500 ~ 910kg 时，其震动速度 2.0m/s。通过对沉箱码头进行的系统的沉降和稳定观测，未发现异常。对渔轮厂厂房按 7°地震烈度设计，监测结果远小于规定控制值，宏观观察也未发现异常。在距滑道约 50m 的沉箱码头基床爆夯处理，对于正在进行的混凝土浇注工作（养护时间在 4 ~ 7d）没有导致浇注质量的下降。在磨刀塘摇架坑，护岸工程触地爆炸法施工时，在距爆源 280m 的油罐基座，当一次起爆总药量最大为 3600kg 时，基座的震动速度为 3.68cm/s，爆后对油库设施进行了详细检查，没有任何异常。

总而言之，爆炸法处理海淤软基的各种形式的爆炸，通过震动效应的监测，调整爆炸设计参数，是能够保证其周围重要工业设施和民房安全的。

\* 本工作得到了郑哲敏先生的指导和帮助，在此表示感谢。