

堤下爆炸的药量确定与挤淤效果

张加华 杨振声 金 鏐

倪祖平 严耀华

1-78

(中国科学院力学研究所, 北京 100080) (连云港建港指挥部, 江苏连云港 222042)

A 摘 要 堤下挤淤法是一种炸药单耗小、可作包芯堤的最好施工方法, 工程应用前景十分广阔。本文从模型试验和中间现场试验论证模型律, 其几何相似律成立, 模型律导出的药量公式可供工程实践参考。

关键词 堤下爆炸 药量确定 挤淤效果

挂药

TD 235.4K
TV 542

D
97,3(4)
1-5

THE FORMULATION OF EXPLOSIVE CHARGE FOR
THE METHOD OF UNDER-EMBANKMENT
EXPLOSION SEDIMENT REMOVAL

Zhang Jiahua Yang Zhensheng Jin Liu

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080)

Ni Zuping Yan Yaohua

(Lianyungang Harbor Construction Command Post, Jiangsu 222042)

ABSTRACT In this paper the formulation of explosive charge for under-embankment explosion sediment removal is presented. This method, with less explosive consumption, can be used in construction of core-wrapped embankment. It has extensive prospects in engineering application. The model regularities were analyzed through the modal experiment and the pilot test in site. The geometric similarity is established. It is likely that the explosive addition formula derived from the model regularity can be used for reference in engineering practice.

KEY WORDS Under-embankment explosion sediment removal Explosive amount
Treating effect

1 前 言

爆炸法处理海淤软基是以炸药为能源的一种施工方法, 中国科学院力学研究所等单位经过几年的实验研究和实践, 发展了3种爆炸处理软基的施工方法: ①爆夯法, 将药包布置在堆石体的表面或有一定的挂高, 密实堆石体或使堆石体下层淤泥部分挤出, 布药工艺简单。②爆炸排淤填石法, 将药包埋置在堆石体堤头前沿的淤泥中, 施工工艺较常规方法简单, 已经形成一套完整的施工工艺, 在国内已应用于数十项大中型工程中。③堤下爆炸挤淤法, 将药包预埋在堆石体的下部, 可以比较充分地利用爆炸能量, 但装药工艺较为复杂, 安全问题比较突出。

张加华: 爆炸力学与技术研究室助理研究员, 硕士。

倪祖平: 工程处工程师。

要使这一技术在工程应用中发挥效用,需要研究安全装药工艺和爆炸参数与挤淤效果的优化,在保证堆石体有一定的落底宽度条件下,选取最佳药量参数。本文从量纲分析入手,分析各参量间的关系,在实验基础上建立药量和挤淤效果的关系,即药量公式。

2 堤下爆炸挤淤的量纲分析

文献[1]指出,炸药在淤泥中爆炸后,冲击波在淤泥中传播,使淤泥中质点加速,同时覆盖在淤泥上的堆石体向水中运动,由于阻力很大,只运动很小一段距离后就落在爆坑内,达到落底的要求。

2.1 介质的独立物理量

堤下爆炸挤淤处理软基中主要涉及4种介质:炸药、水、淤泥和堆石体,其独立物理量讨论如下:

(1)炸药。炸药的基本独立物理量为药量 Q_e 或能量 E_e ,堤下爆炸挤淤时常用单位长度药量 q_e ,炸药密度 ρ_e ,炸药爆炸产物状态方程的多方指数 η ,炸药达到稳定爆轰后的爆速 D_e 和药包的特征长度 W_e 。堤下爆炸时,采用条形药包,不考虑延时特征时间,因而炸药共有5个独立物理量: $\rho_e, D_e, q_e, W_e, \eta$,其中 η 为无量纲量。

(2)水。水中爆破时,爆轰波传播至水中为一冲击波,以及爆炸气团在水中作膨胀运动,一般水的状态方程用Tait方程表示: $P=(\alpha_w^2 \rho_{w0}/n)[(\rho/\rho_w)^n - 1]$,所以,水的独立物理量为初始密度 ρ_{w0} ,常压时水介质的声速 a_w ,无量纲指数 n 和水深 H_w 。

(3)堆石体。堆石体是一种散体介质,主要考虑其密度 ρ_r ,厚度 H_r ,宽度 L_r ,内摩擦角 φ_r ,共有4个独立物理量: $\rho_r, H_r, L_r, \varphi_r$ 。

(4)淤泥。淤泥的本构关系和粘性有关,基本上是一种Bingham体,满足 $\tau = \tau_0 + \lambda \dot{\gamma}$,其中: τ 是剪应力; $\dot{\gamma}$ 是剪应变率; τ_0 和 λ 是本构关系的独立物理量,淤泥的物理参数取密度 ρ_m ,内摩擦角 φ_m ,内凝聚力 C_m ,内凝聚力 C_m 实际上是淤泥屈服破坏的一种标志,几何参数取淤泥层原始厚度 H_m ,共有6个独立物理量: $\rho_m, \varphi_m, C_m, \tau_0, \lambda, H_m$ 。

2.2 无量纲分析

通过以上分析,4种介质共有19个独立物理量: $\rho_e, D_e, q_e, W_e, \eta, \rho_{w0}, a_w, n, H_w, \rho_r, H_r, L_r, \varphi_r, \rho_m, \varphi_m, C_m, \tau_0, \lambda, H_m$,其中 $\eta, \varphi_r, \varphi_m, n$ 是无量纲量,根据 π 定理,可以组成12个无量纲参数,即:

$$\frac{\rho_e}{\rho_m}, \frac{\rho_{w0}}{\rho_m}, \frac{\rho_r}{\rho_m}, \frac{W_e}{H_m}, \frac{H_r}{H_m}, \frac{L_r}{H_m}, \frac{H_w}{H_m}, \frac{q_e}{\rho_m H_m L_r}, \frac{a_w}{D_e}, \frac{C_m}{\rho_e D_e^2}, \frac{\tau_0}{\rho_e D_e^2}, \frac{\lambda/\tau_0}{L_r(\tau_0/\rho_m)^{-1/2}}$$

其中 $\frac{\lambda/\tau_0}{L_r(\tau_0/\rho_m)^{-1/2}}$ 反映本构关系中特征时间与剪切波到达堆石体边缘的时间之比。

以堆石体落底宽度 ΔS 表示堤下爆炸挤淤效果,这样有:

$$\frac{\Delta S}{H_m} = f\left(\frac{\rho_e}{\rho_m}, \frac{\rho_{w0}}{\rho_m}, \frac{\rho_r}{\rho_m}, \frac{W_e}{H_m}, \frac{H_r}{H_m}, \frac{L_r}{H_m}, \frac{H_w}{H_m}, \frac{q_e}{\rho_m H_m L_r}, \frac{a_w}{D_e}, \frac{C_m}{\rho_e D_e^2}, \frac{\tau_0}{\rho_e D_e^2}, \frac{\lambda/\tau_0}{L_r(\tau_0/\rho_m)^{-1/2}}, \eta, \varphi_r, \varphi_m, n\right) \quad (1)$$

如果炸药、淤泥、堆石体、水的基本性质不变,在爆炸作用时间内应变率和重力不起作用时,堆石体落底宽度 ΔS 可表示为:

$$\frac{\Delta S}{H_m} = f\left(\frac{W_c}{H_m}, \frac{H_r}{H_m}, \frac{L_r}{H_m}, \frac{H_w}{H_m}, \frac{q_c}{\rho_m H_m L_r}\right) \quad (2)$$

上式满足几何相似律。

当淤泥厚度不大, 堤下爆炸挤淤时条形药包直接铺设在淤泥面, 可以不考虑药包埋深 (W_c/H_m) 对挤淤效果的影响, 在实验数据成为单调函数时, 式(2)可以写为:

$$\frac{\Delta S}{H_m} = f\left(\frac{H_r}{H_m}, \frac{L_r}{H_m}, \frac{H_w}{H_m}, \frac{q_c}{\rho_m H_m L_r}\right) = \left(\frac{H_r}{H_m}\right)^a \left(\frac{L_r}{H_m}\right)^b \left(\frac{H_w}{H_m}\right)^c \left(\frac{q_c}{\rho_m H_m L_r}\right)^d \quad (3)$$

在堤下爆炸挤淤模型试验或现场实验时进行系统实验, 确定堆石体厚度 (H_r/H_m)、堆石体宽度 (L_r/H_m)、药量 ($q_c/\rho_m H_m L_r$) 和水深 (H_w/H_m) 与挤淤效果 ($\Delta S/H_m$) 的关系。

3 药量公式的建立

公式(3)表达了各参数间的关系, 反映了模型试验与现场 1:1 试验的一致性, 通过现场实验建立堤下爆炸挤淤时药量与挤淤效果的关系。

3.1 实验结果与分析

现场实验在连云港港区进行, 堆石体布置在浅海滩潮间地带, 共进行了 5 组实验, 爆前爆后各参数列于表 1。

表 1 现场实验参数

Table 1 Test parameters on site

序号	堆石宽度 L_r , cm	堆石前淤泥 厚度 H_m , cm	堆石后淤泥 厚度 H_m' , cm	堆石厚度 H_r , cm	起爆水深 H_w , cm	淤泥密度 ρ_m , g/m ³	药量 q_c , g/m	落底宽度 ΔS , cm
1	250	56	25	105	100	1.50	354	100
2	300	94	72	76	100	1.50	442	150
3	300	92	72	82	100	1.50	580	170
4	350	114	74	105	100	1.50	707	180
5	400	118	78	117	100	1.50	589	220

按公式(3)将实测参数整理成无量纲参数, 如表 2 所示。

表 2 实验无量纲参数

Table 2 Dimensionless test results

序号	L_r/H_m	H_r/H_m	$q_c/\rho_m H_m L_r$ ($\times 10^{-4}$)	$q_c H_r/\rho_m H_m L_r^2$ ($\times 10^{-4}$)	$\Delta S/H_m$	$\Delta S/H_r$	$(H_m - H_m')/H_r$	H_r'/H_m
1	3.192	0.809	1.045	0.265	1.596	2.080	0.289	0.766
2	3.261	0.891	1.401	0.383	1.848	2.360	0.244	0.783
3	3.070	0.921	1.181	0.354	1.579	2.430	0.381	0.649
4	3.390	0.992	0.832	0.244	1.864	2.821	0.342	0.661
5	4.464	1.875	1.686	0.708	1.786	4.000	0.295	0.446

量纲分析时, 以 $\Delta S/H_m$ 表示堤下爆炸挤淤效果, 由于炸药能量作用的实际淤泥厚度 H_m' 是一个因变量, 与原始淤泥厚度 H_m 和堆石体厚度有关, 假定堆石体自重挤淤的沉降量 ΔH 与堆石体厚度 H_r 在淤泥极限承载力范围内, ΔH 与 H_r 成线性关系: $\Delta H = k_1 H_r$ (k_1 为经验参数), 实际挤淤深度 H_m' 与堆石体的关系为:

$$H_m' = H_m - \Delta H = H_m - k_1 H_r \quad (4)$$

引入一个因变参量 $\Delta S/H_m'$ 代替 $\Delta S/H_m$ 反映堤下爆炸挤淤效果, 按公式(3)的形式, 分析

表 2 中的数据, 将实验点示于图 1, 对 5 组实验进行线性拟合, 当水深 (H_w/H_m) 大于某一值时, 近似成线性关系:

$$\Delta S/H_m = K' q_e H_r / \rho_m H_m L_r^2 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{H_m} &= K' \frac{q_e H_r}{\rho_m H_m L_r^2} \frac{H_m'}{H_m} \\ &= K' \frac{(q_e \rho_m H_m L_r) (H_r/H_m)}{L_r/H_m} \frac{H_m'}{H_m} \quad (5') \end{aligned}$$

其中: $K' = 6.8 \times 10^4$ 。

3.2 药量公式分析

公式 (4)、(5) 即为现场实验总结出的堤下爆炸挤淤的药量公式, 将 (4) 代入 (5') 中, 得:

$$\frac{\Delta S}{H_m} = K' \left(\frac{q_e}{\rho_m H_m L_r} \right) \left[\frac{H_r}{H_m} - k_1 \left(\frac{H_r}{H_m} \right)^2 \right] \left(\frac{L_r}{H_m} \right)^{-1} \quad (6)$$

式 (6) 与式 (3) 相比, 堤下爆炸挤淤效果 ($\Delta S/H_m$) 与各参量间的关系为:

$$\frac{\Delta S}{H_m} \sim \frac{q_e}{\rho_m H_m L_r} \quad \frac{\Delta S}{H_m} \sim \left(\frac{L_r}{H_m} \right)^{-1} \quad \frac{\Delta S}{H_m} \sim \left[\frac{H_r}{H_m} - k_1 \left(\frac{H_r}{H_m} \right)^2 \right]$$

当药量、堆石体宽度一定时, 要取得最大落底宽度, 相应的最佳抛石厚度为:

$$\frac{d(\Delta S/H_m)}{d(H_r/H_m)} = K' \left(\frac{q_e}{\rho_m H_m L_r} \right) \left(\frac{L_r}{H_m} \right)^{-1} \left[1 - 2k_1 \frac{H_r}{H_m} \right] = 0$$

即 $H_r = H_m/2k_1$, 由实验得 $k_1 = 0.30$, 所以 $H_r = 1.67H_m$ 时, 挤淤深度最大:

$$\left. \frac{\Delta S}{H_m} \right|_{\max} = 0.833K' \frac{q_e}{\rho_m H_m L_r} \left(\frac{L_r}{H_m} \right)^{-1} = 0.833K' \frac{q_e}{\rho_m L_r^2} \quad (10)$$

在最佳堆石厚度条件下, 最大落底宽度 ($\Delta S/H_m$) 与线药量成正比, 而与堆石体宽度平方成反比, 可见, 堆石体的宽度大大影响落底效果。

$$\text{将 (4)、(5) 式改写成: } \frac{\Delta S}{L_r} = K' \frac{q_e}{\rho_m L_r^3} \left(H_r - 0.30 \frac{H_r^2}{H_m} \right) \quad (11)$$

对有些工程要求堆石体全部落底, 即 $(\Delta S/L_r) \geq 1$, 则最小药量为:

$$q_e \geq K \rho_m L_r^3 \left(H_r - 0.30 \frac{H_r^2}{H_m} \right) \quad (\text{式中 } K = 1/K' = 1.473 \times 10^{-5}) \quad (12)$$

4 药量公式验证

堤下爆炸挤淤药量公式 (4)、(5) 是由 5 组实验数据分析整理所得, 其应用范围可通过以往的几次实验结果进行比较和验证。

4.1 模型实验

1988 年在长 2.0m、宽 1.0m、高 1.0m 的铁箱中进行了堤下爆炸挤淤的模型实验, 用 90cm × 60cm 的钢板和配重模拟堆石体, 钢板及配重相当于 20cm 的堆石体, 淤泥厚度 21cm, 不同水深条件下, 药量 ($q_e/L_r H_m$) 与下沉量 (Δ/H_m) 的关系示于图 2。实验结果表明, 当水深 H_w 大于某一值后, 药量和下沉量基本呈线性关系, 经线性拟合得:

$$\Delta/H_m = 0.401 \times 10^4 q_e/L_r H_m$$

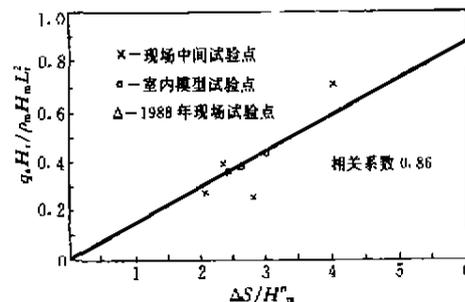


图 1 现场实验曲线
Fig.1 Curve of test in site

当钢板完全落底 ($\Delta/H_m=1$) 时, $q_1/L_r H_m=2.294 \times 10^{-4}$, 即 $q_1=31.4\text{g/m}$, 换算成普通炸药 $q_1=47.14\text{g/m}$.

模型实验中, $H_r=20\text{cm}$, $H_m^*=H_m-0.30H_r=15\text{cm}$, 要使 $\Delta S=60\text{cm}$, 所需的药量按式(12)计算得: $q_2=54.9\text{g/m}$, 与 q_1 相差 14.1%。实验中用钢板模拟堆石体, 有一定误差。

4.2 桩间处理软基模型试验

实验在室内 $4.15\text{m} \times 3.15\text{m} \times 1.50\text{m}$ 的爆炸池中进行, 堆石体宽度 $L_r=100\text{cm}$ 、高度 $H_r=40\text{cm}$ 、淤泥厚度 $H_m=22\text{cm}$, 进行了两组试验, 药量分别为两股导爆索 $2 \times 12\text{g/m}$ 和三股导爆索 $3 \times 12\text{g/m}$, 线药量换算成普通炸药为 36g/m 和 54g/m , 实测堆石体的落底宽度为 $30 \sim 50\text{cm}$ 。按公式(5)预测落底宽度 ΔS 分别为: 当 $q_3=36\text{g/m}$ 时, $\Delta S=29.1\text{cm}$; $q_3=54\text{g/m}$ 时, $\Delta S=44.1\text{cm}$ 。与实测落底宽度吻合较好。

4.3 工程实验

1988年进行了堤下爆炸挤淤工程试验。实验堤长 7.1m 、底宽 6.0m 、顶宽 2.9m 、堆石厚度 1.55m 、淤泥厚度 $2.5 \sim 3.0\text{m}$ (平均 2.75m)、表层有 $0.8 \sim 1.0\text{m}$ 的薄砂层, 药量 $q_4=3.63\text{kg/m}$ 。实验中将条形药包埋置在砂层和淤泥界面, 将砂层当成堆石体的一部分, 爆后堆石体下沉量平均 1.68m , 基本全部落底, $\rho_m=1.5 \times 10^3\text{kg/m}^3$, $L_r=6.0\text{m}$ 、 $H_r=2.45\text{m}$ 、 $H_m=1.85\text{m}$ (平均值), 按公式(12)计算堆石体完全落底所需的药量为 $q_5 \geq 3.23\text{kg/m}$, 与实验用药量 $q_4=3.63\text{kg/m}$ 很接近。

通过以上3组实验验证, 说明由现场实验总结出的公式(4)、(5)较好地反映了堤下爆炸挤淤药量与挤淤效果的关系, 以上各次实验点分别示于图1。

5 结 论

(1) 通过对堤下爆炸挤淤中各物理量的分析, 由实验总结出的公式(4)、(5)可以作为工程应用的药量公式。与文献(2)中的药量公式相比, 这一公式全面反映了堤下爆炸挤淤技术中淤泥、堆石体和药量的关系。

(2) 以往的实验均是在 $(L_r/H_m) \leq 3$ 的条件下进行, 公式(4)、(5)是由 $(L_r/H_m) \geq 3$ 的实验数据总结出来的, 也适用 $(L_r/H_m) \leq 3$ 的情况。

(3) 当药量、淤泥的参数确定后, 对一定的堆石体宽度要获得最好的挤淤效果, 堆石体高度 $H_r=1.67H_m$ 。

(4) 要使堆石体完全落底, 药量需满足: $q \geq K\rho_m L_r^3 \left(H_r - 0.30 \frac{H_r^2}{H_m} \right)$

参 考 文 献

- 1 Zheng Zhemin, Yang Zhensheng, Jin Liu. Underwater Explosion Treating of Marine Soft Foundation. China Ocean Engineering, 1990, 5(2): 213 ~ 234.
- 2 杨振声, 赵成福等. 堤下爆炸挤淤模拟试验与机理试验的研究. 第四届全国工程爆破学术会议论文集. 西安, 1989.
- 3 杨振声, 张加华等. 桩间爆炸处理软基课题研究报告集. 中国科学院力学研究所, 1996.

(收稿日期: 1997-04-17)

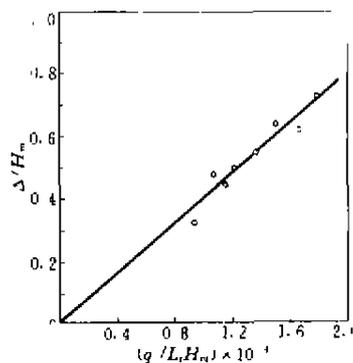


图2 模型实验曲线
Fig.2 Curve of model experiment