

堤下爆炸法处理淤泥地基新工艺 的理论、实验及工程应用 (I) 堤下爆炸法的理论及实验研究*

杨振声

张加华

(中国科学院力学研究所, 北京市 100080)

金

(连云港建港指挥部, 江苏省连云港市 222042)

摘要 在淤泥质海岸建造高桩码头, 通常在开挖基槽后沉桩再抛石形成棱体。基槽中的回淤淤泥很难清除, 为此研制了堤下爆炸挤淤新工艺。本文是关于该新工艺的理论、实验及工程应用的一个总结, 分两部分, 第一部分着重介绍挤淤机理、装药工艺、模型律及药量公式等。研究及应用表明, 这种新工艺与先前我们研制成功的爆夯法及爆填法一起, 构成了较为完整的工艺系列。

关键词 堤下爆炸挤淤 模型律 药量公式

中图法分类号 TU 472. 9; U 656. 1

The Theory, Experiment and Engineering Application of the Under-Embankment Explosion Method for Sediment Removal (I) Theory and Experimental Research of Under-Embankment Explosion Method for Sediment Removal

Yang Zhensheng

Zhang Jiahua

(Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Jin Liu

(Lianyungang Port Construction Command, Lianyungang 222042)

Abstract In this paper, the model law and the formulation of the explosive charge of under-embankment explosion for sediment removal are presented. The geometric similarity is established based on dimensional analyses and experiments. The experiment shows that the explosive addition formula derived from the model can be used in engineering practice.

Key words under-embankment explosion for sediment removal model law formulation of explosive charge

* 收稿日期: 1997-09-20

杨振声 男 (已故) 研究员 博导; 张加华 男 33 岁 工程师 硕士; 金 男 58 岁 教授级高工

1 前 言

1985 年~ 1989 年, 连云港爆炸处理水下软基课题组在研究爆夯和爆填工艺的同时, 也对堤下爆炸法挤淤进行了模型试验和若干现场试验^[1]。在上述三种工艺中, 堤下爆炸法药量单耗最少, 但装药工艺未能解决, 因为要在堆石体形成之前预埋炸药, 难以符合爆破安全规程。

高桩码头桩间棱体通常是在人工开挖的基槽中抛石形成。基槽中的回淤淤泥很难清除。如考虑爆炸挤淤, 则爆夯和爆填时, 爆炸冲击荷载作用在桩上的部位较长, 对桩的安全不利(图 1), 因此课题组于 1991 年重新转向研究堤下爆炸法挤淤, 该项研究经批准被列入连云港墟沟一期建设工程。

2 堤下爆炸法装药工艺

在以往堤下爆炸法挤淤的模型试验及现场试验中, 均将药包(炸药或导爆索)预先置于泥中或泥面, 然后堆石, 而实际工程中则不允许预埋, 因此装药工艺的研究就成为堤下爆炸挤淤工艺的关键。

试验采用一根塑料绳穿在塑料管内, 将塑料管放置泥面, 管内充水, 然后抛石, 抛石结束后, 将出厂的药卷及导爆索用棉绳捆扎在 $\varnothing 3$ mm 尼龙绳上串成“糖葫芦”或条形药柱, 表面抹黄油, 由塑料绳牵引入塑料管内, 这样的工艺应满足炸药包在摩擦中不产生静电, 我们采用 EL 系列乳化炸药。其摩擦感度为零, 在 2kV 静电下不起爆。塑料管要有一定的刚度, 在抛石过程中不被压碎或产生大的变形, 又要求有一定的可弯曲性, 以便能弯出水面便于装药, 采用矿山工程给排水塑料管。

采用的 EL 系列乳化炸药药卷规格为 $\varnothing 32\text{mm} \times 200\text{mm}$, 主要性能参数为:

爆速: 4000m/s , 密度: $1.05 \sim 1.15\text{g/cm}^3$ 冲击感度: 8%, 摩擦感度: 0

通过试验, 得最大穿药速度为 3m/min , 最大穿药长度可达 50m 以上。

通过爆坑试验, 表明条形药包穿在塑料管内基本不影响炸药性能, 因为塑料管的变形能只占炸药能量的很小部分。但影响冲击波波头压力, 由于能量准则成立, 所以以能量作为检验效果的依据。

3 堤下爆炸挤淤机理及模型律

堤下爆炸挤淤(图 2)机理不同于爆夯和爆填, 堤下爆炸挤淤场合, 实验表明, 爆炸荷载即爆炸冲击波及爆炸气团压力使淤泥及抛石体移动形成空腔。由于抛石体惯性较大, 大部分爆炸

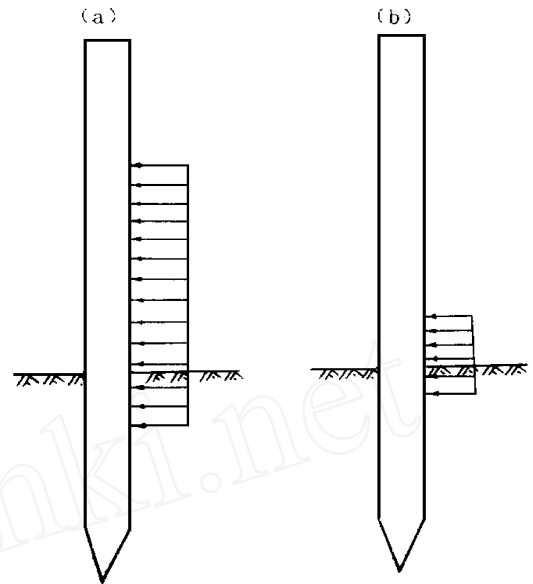


图 1 爆炸冲击波对桩的作用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blasting shock wave effect on piles

能量用于推动淤泥运动,大部分淤泥被挤向抛石体两侧,形成表面鼓包,小部分则通过抛石体间隙向上注入水中,极小部分通过挤压向下运动。空腔初期近似球形,然后发展成不规则椭球形,待发展到一定程度,空腔压力小于抛石体自重压力时,抛石体开始回落,然后淤泥也开始回缩。由于爆炸荷载作用时间很短,淤泥在被挤出过程中粘性作用很小,仅阻尼力发生作用,挤淤相对容易,而淤泥的回缩实质上是在负压作用下的水平移动,淤泥的粘性作用重新发挥,使其移动速度较慢且小于抛石体的下落速度,抛石体先行充填爆炸空腔,全部或部分落至持力层。

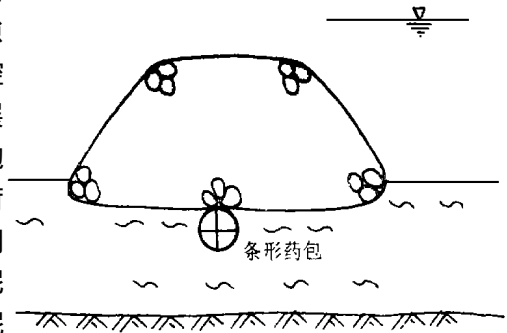


图 2 堤下爆炸挤淤布药示意图

Fig. 2 Schematic diagram of explosive placement for mud removal under an embankment

为了确定炸药量与抛石体落底宽度的关系,我们分别进行了实验室和连云港海滩吹填区的现场试验及工程性试验,证明对堤下爆炸挤淤而言,同样成立几何相似和能量准则^[2]。

堤下爆炸涉及到炸药、水、抛石体、淤泥 4 种介质,现分别讨论其独立物理量。

3.1 炸药

其基本独立物理量为药量 Q , 堤下爆炸挤淤时用单位长度药量 q ; 密度 ρ_e , 爆炸产物状态方程多方指数 ν , 爆速 D_e , 特征长度 (这里选用药包埋深) W_e , 共 5 个。

3.2 水

其基本独立物理量为初始密度 ρ_0 ; 常压 P_0 ; 常压下介质声速 a ; 无量纲状态参数 k ; 水深 H_w , 亦为 5 个。

3.3 堆石体

有堆石体密度 ρ_R ; 堆石体厚度 H_R ; 堆石体宽度 L_R ; 内摩擦角 \mathcal{Q} , 共 5 个。

3.4 淤泥

属宾汉体, 其基本物理参数为密度 ρ_m , 内摩擦角 \mathcal{Q}_m , 凝聚力 C_m , 本构参数 τ_0 , α , 几何参数取淤泥层厚度 H_m , 共计 6 个。

以上 4 种介质共 20 个独立物理量, 其中 ν , \mathcal{Q} , \mathcal{Q}_m , k 是无量纲量, 按 π 定理, 16 个有量纲量可以组成如下 13 个无量纲相似参数, 即

$$\rho_e/\rho_m, \rho_0/\rho_m, \rho_R/\rho_m, W_e/H_m, H_R/H_m, L_R/H_m, H_w/H_m, q/(\rho_m H_m L_R), a/D_e, C_m/\rho_m D_e^2, \tau_0/\rho_m D_e^2, P_0/\rho_m D_e^2, \frac{\alpha/\tau_0}{L_R (\tau_0/\rho_m)^{-1/2}}$$

其中最后一个无量纲量反映本构关系中特征时间与剪切波到达堆石体时间之比, 如果炸药、淤泥、堆石体、水的性质不变, 同时又考虑到 $C_m/\rho_m D_e^2 \ll P_0/\rho_m D_e^2$ 和 $\tau_0/\rho_m D_e^2 \ll 1$, 以及本构特征时间 α/τ_0 与剪切波到达堆石体的时间 $L_R (\tau_0/\rho_m)^{-1/2}$ 相比为小量, 则堆石体无量纲落底宽度 $\Delta S/H_m$ 可写成:

$$\frac{\Delta S}{H_m} = f \left(\frac{W_e}{H_m}, \frac{H_R}{H_m}, \frac{H_w}{H_m}, \frac{L_R}{H_m}, \frac{q}{\rho_m H_m L_R} \right) \quad (1)$$

如药包置于泥面,起爆水深基本相同,即 $W \approx H_w$ 基本相同,上式又可简化为:

$$\frac{\Delta S}{H_m} = f\left(\frac{H_R}{H_m}, \frac{L_R}{H_m}, \frac{q}{\rho_m H_m L_R}\right) \quad (2)$$

据此安排室内及现场实验,归纳确定具体的函数关系。

4 实 验

4.1 现场试验(1988 年)

在进行爆夯法和爆填法实验期间,也进行了堤下爆炸挤淤的现场试验,在墟沟港区海滩用防水药包预先置于泥面然后堆石,主要参数及落底效果如表 1:

表 1 1988 年现场试验数据及落底效果

Tab. 1 The field test parameters and bottom width of bulk rockfill after explosion in 1988

药 量 (q) g/m	淤泥层厚度 (H_m) cm	堆石体厚度 (H_R) cm	堆石体宽度 (L_R) cm	淤泥密度 (ρ_m) g/cm ³	落底宽度 ΔS cm
3630	275	155	600	1.5	600 (全部落底)

4.2 室内模型试验(1992 年 12 月)

室内试验是针对处理桩间抛石棱体下淤泥进行的,从实验布置及结果看,棱体的落底宽度与无桩时应相仿。

实验在中科院力学所爆炸试验池中进行,其尺度为 $4.15\text{m} \times 3.15\text{m} \times 1.53\text{m}$,壁厚 0.37m ,模型桩为预应力实心方桩,几何比尺 $1/5$,在试验池四角各置 1 根模型桩,嵌固点为固支。淤泥取自连云港现场,加水搅拌至含水量 $80\% \sim 85\%$;堆石体及块石粒径亦按 $1/5$ 缩小。炸药采用导爆索,线药量 $36 \sim 54\text{g}/\text{m}$;试验单耗 $0.2 \sim 0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 。桩对爆炸荷载的动力响应的测试及分析在本文 II 中叙述,堆石体及药包布置以及爆后断面落底情况如图示,在同样的 H_R 、 H_m 条件下重复爆炸 7 次,落底宽度列于表 2,代表性较好的 II-II 断面,落底宽度约 50cm ,相当于原体 2.5m ,试验结果归纳列于表 3。

表 2 各试验炮落底宽度 (cm)

Tab. 2 The bottom width of the bulk rockfill after explosions in the lab (cm)

断面 炮号	断面		
	I - I	II - II	III - III
1	20	25	30
2	37	50	30
3	35	50	45
4	46	50	48
5	15	18	20
6	40	41	40
7	40	50	40

表 3 试验数据归纳

Tab. 3 Summary of testing data

药量 $q(\text{g}/\text{m})$	淤泥厚 $H_m(\text{cm})$	堆石厚 $H_R(\text{cm})$	堆石宽 $L_R(\text{cm})$	淤泥密度 $\rho_m(\text{g}/\text{cm}^3)$	落底宽度 $\Delta S(\text{cm})$
36~ 54	22	40	100	1.5	30~ 50

3.3 现场中间试验(1993 年 6 月)

试验在无桩条件下进行,试验区(连云港墟沟港区一期工程西侧、二期工程围堰南侧)滩面

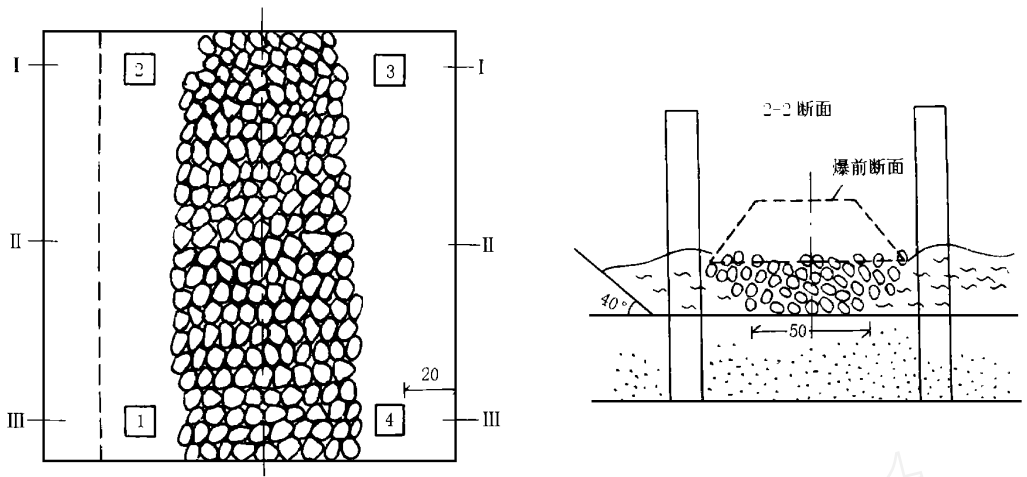


图 3 堤下爆炸挤淤室内试验装置

Fig. 3 The schematic diagram of lab test apparatus of explosion under embankment

高程+ 3.50m (连云港零点), 抛石厚度与淤泥层厚度之比 $H_R/H_m > 3$, 低潮时布药, 高潮位有水覆盖时爆炸, 再在低潮位时人工挖石检测落底宽度, 用前节所述炸药及装药工艺装药。该处海滩表层为 1.1m 厚的淤泥层, $\gamma = 1.5\text{g}/\text{cm}^3$, 含水量 80% ~ 90%, 其下为 0.3m 厚粉砂层, 再下依次是 0.5m 厚淤泥层、亚粘土层、粘土层等。

共进行 7 组试验, 前 5 组为单条形药包双侧挤淤试验, 第 6 组为双条形药包包心堤试验, 第 7 组为无覆盖水单条形药包双侧挤淤试验。1~ 6 组试验取得的数据列于表 4。单药包双侧挤淤的典型断面及双药包包心堤典型断面如图 4。图 4(b) 表明, 两条药包外侧抛石体全部落底, 而由于炸药能量的相互制约, 中间淤泥不能排出, 形成包心断面。

表 4 现场中间试验数据汇总

Tab. 4 Summary field of testing data

炮号	抛石宽度 L_R (cm)	淤泥层厚度 (cm)		抛石厚度 H_R (cm)	起爆水深 H_w (cm)	淤泥密度 ρ_m (g/cm^3)	每米药量 q (g/m)	落底宽度 ΔS (cm)
		抛石前 H_m	抛石后 H_m					
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	350	118	78	117	100	1.50	589	220
6	320	101	61	121	100	1.50	295 × 2	220

3.4 现场试验 (1994 年 6 月)

在有桩条件下进行, 试验区位于墟沟港区建设中的高桩码头内侧, 淤泥面平均标高 - 3.8m, 码头基槽挖泥标高 - 4.9m, 故棱体抛填前基槽内淤泥厚度 1.1m, 淤泥含水量 80% ~ 90%。采用前述规格之 EL 系列乳化炸药及装药工艺。试验区布局见图 5。代表性爆前爆后断

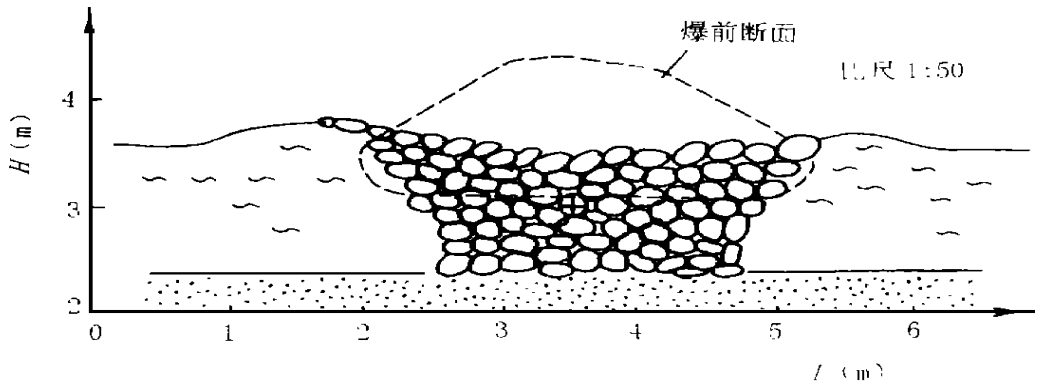


图 4(a) 单条形药包双侧挤淤爆前、爆后断面(第 5 炮)

Fig. 4(a) The cross-section of filling material before and after explosion at single strip package (Test No. 5)

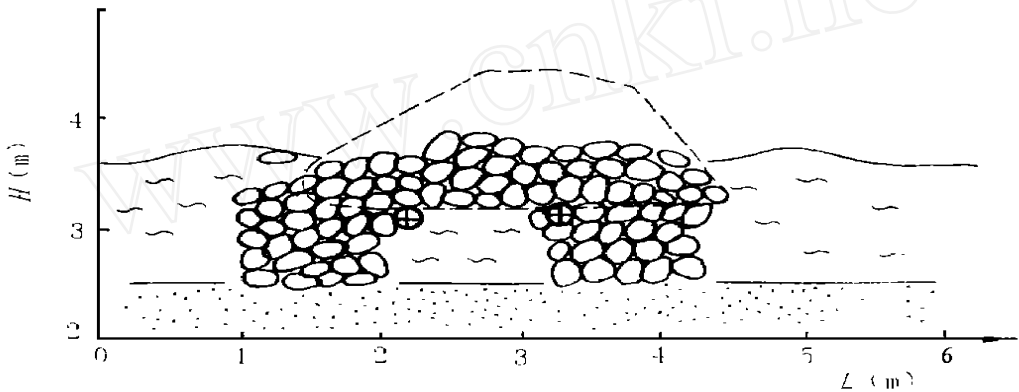


图 4(b) 双条形药包包心堤爆前、爆后断面(第 6 炮)

Fig. 4(b) The cross-section of filling material before and after explosion at double strip packages (Test No. 6)

面见图 6、图 7, 抛石体落底宽度由外形测量按体积平衡法得到。

试验参数及落底宽度列于表 5。

表 5 1994. 6 现场试验

Tab. 5 The field test parameters and bottom width of bulk rockfill

炮号	条形药包位置及长度	药量 Q (kg)	线药量 q (kg/m)	抛石厚 H_R (m)	抛石底宽 L_R (m)	淤泥厚 H_m (m)	淤泥密度 ρ_m (g/cm^3)	顶面下沉 (m)	落底宽 ΔS (m)	备注
No. 1	1、2号桩之间, 7m	8.4	1.2	1.8	4.0	1.1	1.5	0.4	1.5	起爆不完全
No. 2	3、4号桩之间, 7m	8.4	1.2	1.8	4.5	1.1	1.5	0.76	2.5	
No. 3	1号桩南侧, 7m	8.4	1.2	2.4	5.0	1.1	1.5	0.54	2.0	
No. 4	3号桩南侧, 7m	8.4	1.2	2.0	4.7	1.1	1.5	0.84	2.5	
No. 5	2、4号桩北侧, 14m	16.8	1.2	1.7	4.7	1.1	1.5	0.7~0.2	2.0	

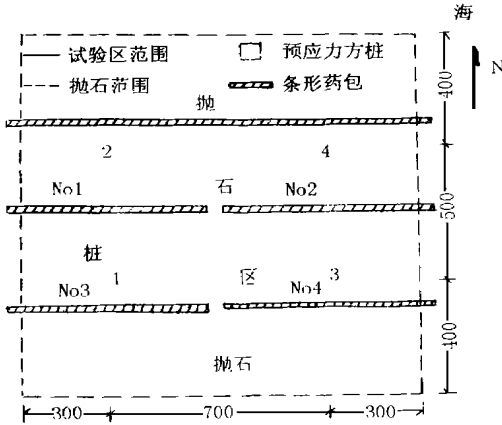


图 5 试验区桩位及药包布置图

Fig. 5 The piles position and arranged explosive packages in the test area

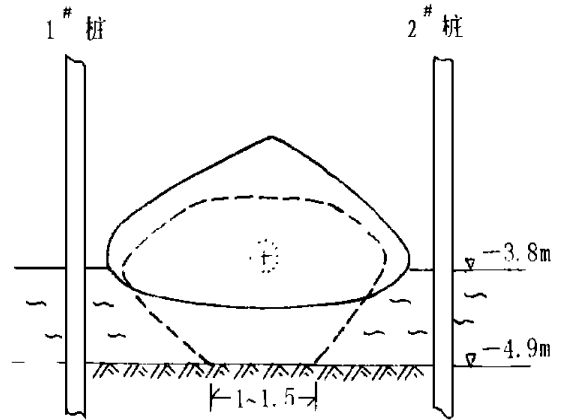


图 6 1# 桩~ 2# 桩间抛石体爆前、爆后断面

Fig. 6 The cross-section of rock-fill between pile 1 and pile 2 before and after explosion

4 药量公式及讨论

根据上述各次试验资料, 利用(2)式, 可归纳得到以实现抛石体落底宽度为目的的堤下爆炸挤淤药量公式。由各炮实测数据算得无量纲参数列于表 6。

表 6 各炮无量纲参数汇总 $H_m = H_m - 0.3H_R$

Tab. 6 Non-dimensional parameters of each explosion test

		$\frac{\Delta S}{H_m}$	$\frac{q}{\rho_m H_m L_R}$	$\frac{H_R}{H_m}$	$\frac{L_R}{H_m}$
88 现场		2.626	1.467×10^{-4}	0.564	2.182
92 室内	1.	3.0	1.091×10^{-4}	1.818	4.545
	2.	5.0	1.636×10^{-4}	1.818	4.545
93 现场	1.	4.0	1.686×10^{-4}	1.875	4.464
	2.	2.083	1.045×10^{-4}	0.809	3.191
	3.	2.361	1.401×10^{-4}	0.891	3.261
	4.	2.432	1.181×10^{-4}	0.921	3.070
	5.	2.821	0.951×10^{-4}	0.992	2.966
94 现场	2.	3.607	1.217×10^{-4}	1.198	3.168
	2.	4.464	1.616×10^{-4}	1.636	4.091
	3.	5.260	1.455×10^{-4}	2.182	4.545
	4.	5.0	1.547×10^{-4}	1.818	4.273
	5.	3.390	1.547×10^{-4}	1.545	4.273

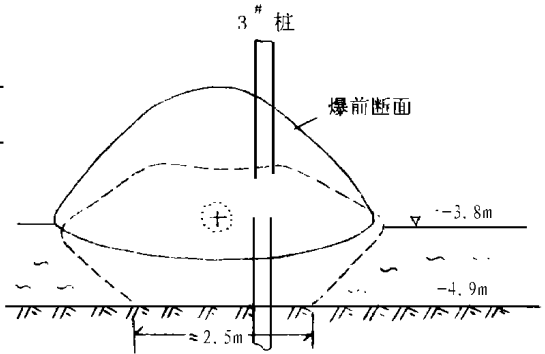


图 7 3# 桩南侧抛石体爆前爆后断面

Fig. 7 The cross-section of rock-fill to the south of pile 3 before and after explosion

将(2)式写成标准函数式:

$$\frac{\Delta S}{H_m} = k \left(\frac{q}{\rho_m H_m L_R} \right)^\alpha \left(\frac{H_R}{H_m} \right)^\beta \left(\frac{L_R}{H_m} \right)^\gamma \quad (3)$$

代入表(6)中数值, 解得

$$\alpha \doteq 1, \quad \beta \doteq 1, \quad \gamma \doteq -1$$

于是可将(2)式右边括号内三个无量纲量归并成一个无量纲量:

$$\frac{q}{\rho_m H_m L_R} \times \frac{H_R}{H_m} \times \frac{H_m}{L_R} = \frac{q H_R}{\rho_m H_m L_R^2}$$

(2)式左边以 H_m 代替 H_m ; $H_m = H_m - \Delta H$, ΔH 为抛石体自重挤淤沉降量, 由试验实测统计, 对连云港淤泥 ($\rho_m \doteq 1.5 \text{g/cm}^3$), $\Delta H = 0.3H_R$, 即

$$H_m = H_m - 0.3H_R \quad (4)$$

将表(6)数据, 点绘相关图如图 8 所示, 可知呈线性相关, 其相关关系为:

$$\frac{q H_R}{\rho_m H_m L_R^2} = (1.47 \times 10^{-5}) \frac{\Delta S}{H_m} \quad (5)$$

(5)式即为反映无量纲落底宽度与无量纲药量参数之间关系的公式(药量公式)。

讨论如下:

(1) 关于取得最佳落底宽度的抛石厚度

由(5)式和(4)式, 可写出

$$\frac{\Delta S}{H_m} = k \frac{q H_R (H_m - 0.3H_R)}{\rho_m H_m^2 L_R^2} = k \left(\frac{q}{\rho_m H_m L_R} \right) \left[\frac{H_R}{H_m} - 0.3 \left(\frac{H_R}{H_m} \right)^2 \right] \left(\frac{L_R}{H_m} \right)^{-1} \quad (6)$$

在给定药量和抛石体底宽条件下, 获得最大落底宽度所相应的抛石厚度应满足

$$\frac{d\left(\frac{\Delta S}{H_m}\right)}{d\left(\frac{H_R}{H_m}\right)} = 0$$

即 $1 - 0.6 \frac{H_R}{H_m} = 0, H_R = 1.67H_m$ 。抛石厚度为淤泥厚度的 1.67 倍时, 落底宽度最大。

(2) 抛石宽度对落底效果的影响

当 $H_R = 1.67H_m$ 时, 得最大落底宽度, 其值为

$$\frac{\Delta S}{H_m} = k \frac{q}{\rho_m H_m L_R} [1.67 - 0.3(1.67)^2] \left(\frac{L_R}{H_m} \right)^{-1} = 0.567 \times 10^5 \frac{q}{\rho_m L_R^2} \quad (7)$$

$$k = \frac{1}{1.47 \times 10^{-5}}$$

(7)式表明, 在一定的药量、抛石体堆高及淤泥厚度下, 抛石体宽度的增加会大大影响落底效果, 为了适应较大抛宽的工程要求, 提出了“包心堤”断面的构想。

(3) 抛石体全部落底的条件。

抛石体全部落底, 即 $\Delta S / L_R = 1$, 由(6)式可写出

$$\frac{\Delta S}{L_R} = \frac{k}{\rho_m} \frac{q}{L_R^3} \left(H_R - 0.3 \frac{H_R^2}{H_m} \right)$$

故全部落底所需药量 q 为

$$q = \frac{(1.47 \times 10^{-5}) \rho_m L_R^3}{H_R - 0.3 \frac{H_R^2}{H_m}} \quad (8)$$

可知, 当 L_R 增加时, 全部落底所需药量将呈 3 次方增加。

(4) 关于“包心堤”断面

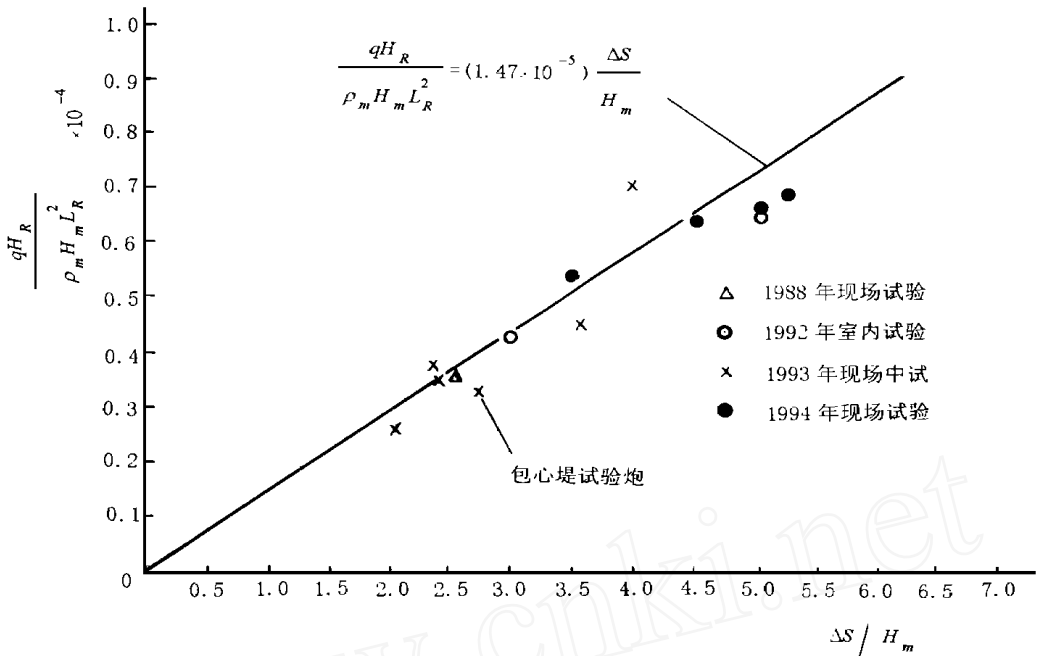


图 8 无量纲落底宽度与无量纲药量参数的经验相关

Fig. 8 Empirical relation between dimensionless bottom width of bulk rockfill and dimensionless explosive amount

(7)、(8)二式均表明,抛石体底宽增加,将大大影响落底效果或大幅度增加药量,为此而提出通过堤下爆炸挤淤形成两条或数条一定宽度的落底棱体,即“包心堤”断面(图 4b)。由于抛石体在多次爆炸振动作用下能够充分密实,探坑试验表明,其内摩擦角可达 $51^\circ \sim 52^\circ$;已接近岩体(54°),因此包心堤类似于“半岩体”,即受拉时为散体,受压时类似岩体,压载在淤泥上,有很好的整体性和压力传递性。在连云港墟沟港区大吹填区(50万 m^2 ,吹泥厚度 6m ,1994 年完成)围堰施工中,龙口段即采用了两侧落底,中间有淤泥包芯的包心堤断面,没有任何滑动破坏的现象,证明是成功的。

前述表(4)中第 6 炮为包心堤试验炮,其无量纲落底宽度参数与无量纲药量参数点据在图 8 中落在相关线附近。初步表明,包心堤的药量设计可以采用(5)式。

包心堤的落底宽度 l 的确定要满足棱体的稳定性,例如,对于后方填土的情况,总侧向土压力为 P 。如抛石体自重为 M ,总底宽为 L ,淤泥和亚粘土的摩擦角和粘结力分别为 (φ, c_1) 和 (φ, c_2) ,总抗滑力 τ 为

$$\tau = (\sigma_1 \text{tg } \varphi + c_1)(L - l) + (\sigma_2 \text{tg } \varphi + c_2)l$$

在棱体为半岩体情况下,

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{M}{L}g$$

取抗滑安全系数为 K ,则落底宽度 l 应满足:

$$l = \frac{KP - \left(\frac{M_g}{L} \operatorname{tg} \varphi + c_1\right)L}{\frac{M_g}{L} (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi) + (c_2 - c_1)} \quad (9)$$

5 结 语

(1) 堤下爆炸挤淤的机理不同于爆夯和爆炸排淤填石法, 因此, 是一种新的工艺。通过理论分析和比较充分的室内及现场试验以及工程性试验, 解决了装药工艺, 获得了药量公式, 使这一工艺达到了实用要求。

(2) 抛石体底宽是影响堤下爆炸挤淤效果的主要因素, 为此而提出了“包心堤”断面的构想并进行了现场试验, 证明“包心堤”是提高堤下爆炸挤淤效果的有效措施。初步试验表明, 落底宽度可按药量公式(5)计算。连云港吹填围堰龙口堤下挤淤是包心堤构想的一个成功的工程应用实例。

(3) 以上试验和成果结论均是针对有一定覆盖水时的堤下爆炸挤淤的情况。在无覆盖水条件下, 1988 年模型试验 ($L_R/H_m < 3$) 得到的爆后断面呈倒梯形, 即 $\Delta S/L_R < 1$, 表明落底效果不理想; 1993 年现场中间试验时也安排了一炮 ($L_R/H_m > 3$) 结果少量块石被抛掷, 抛石体下沉不明显。

本文在郑哲敏院士指导下完成。参试人员还有严耀华、田维军、倪祖平、田兰桥、任京生、卢友兵、陈昌林、杨立保、郭继业。

参考文献

- 1 杨振声等. 堤下爆炸挤淤模型与机理试验研究. 第 4 届全国工程爆破学术会议文集. 北京: 冶金出版社, 1989
- 2 郑哲敏, 杨振声, 金 . 爆炸法处理水下软基. 第 4 届全国工程爆破学术会议文集. 北京: 冶金出版社, 1989