

# 堤下爆炸法处理淤泥地基新工艺 的理论、实验及工程应用

## (II) 桩对桩间抛石棱体下爆炸挤淤的动力响应\*

**杨振声** 燕琳 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, 连云港市 222042)

**摘要** 本文是堤下爆炸法处理淤泥地基新工艺的研究及应用的第二部分, 着重介绍该工艺应用于桩间棱体的挤淤时, 爆炸冲击波和淤泥、石块运动对桩的作用。计算和检测表明, 桩体的安全是可以得到保证的。

**关键词** 桩间加固 桩的动力响应 量纲分析 应变测量

**中图法分类号** TU 472. 9; U 656. 1

# The Theory, Experiment and Engineering Applications of the Under-Em bankment-Explosion Method for Sediment Removal

## (II) The Dynamic Response of Piles Due to Under-Em bankment Explosive for Sediment Removal

**Yang Zhensheng** Yan Lin Zhang Jiahua

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

Jin Liu

(Lianyungang Port Construction Command, Lianyungang 222042)

**Abstract** Based on model experiments and site investigation, the authors have studied how to handle soft foundation between piles by blasting, which has strong background of engineering. The method to handle soft foundation between piles by blasting is reliable, safe and easy to operate, with better strengthening effects.

**Key words** strengthening between piles dynamic response of stone-piles dimensional analysis measurement of strain

\* 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

在淤泥质海岸建设高桩码头,通常在开挖基槽后沉桩,再抛石形成棱体,往往因基槽回淤,淤泥难以清除而留下隐患,为此我们研究了堤下爆炸挤淤新工艺,以图在挤出淤泥的同时又确保桩的安全,我们从 1988 年起开展对堤下爆炸挤淤工艺的研究,1991 年起将这一工艺应用于桩间抛石棱体下挤淤,为此而进行了一系列实验研究及分析,主要围绕挤淤落底效果和桩的动力响应两个方面进行,本文是关于桩的动力响应的研究成果。

## 2 桩间爆炸挤淤的模型律

为了探索在由水、淤泥、炸药、桩及抛石体构成的复杂介质体系中实施爆炸挤淤(瞬态置换)的设计方法和施工工艺,必须进行试验。但现场原体试验受许多条件限制,难以做到多组次、多尺度,因此,模型试验成为必不可少的手段。模型试验需先建立模型律。针对桩的动力响应,对上述 5 种介质的独立物理量选取如下:

### 炸药

堤下爆炸采用条形炸药,药量  $q$  (kg/m); 特征长度  $L$ 。

炸药爆炸以爆轰波传播,不同的炸药,有不同的波速  $D$ ; 爆轰波波头压力  $P$  在稳定爆轰条件下有

$$P = \frac{1}{4} \rho_E D^2 \quad (1)$$

$\rho_E$  为炸药密度。炸药整体爆炸后,形成高温高压气团,继续膨胀做功,满足绝热膨胀规律:

$$P V^r = P_0 V_0^r \quad (2)$$

$P_0$  和  $V_0$  为初始压力及初始体积;  $r$  是爆炸气体的多方指数。

故独立物理量有  $q, L, \rho_E, D, r$ , 共 5 个。

### 水

在爆炸高压作用下,水是可压缩的,其本构关系为

$$P/P_0 = a \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \right)^k \quad (3)$$

加上水深  $H_w$ , 独立物理量亦为 5 个:

$P_0, \rho_0, a, k, H_w$ , 其中:  $a, k$  为无量纲量。

### 淤泥

属宾汉体,只要确定其  $\tau_0$  (剪切力) 和  $\alpha$  角,即可确定本构关系;加上淤泥的密度  $\rho_m$ , 厚度  $H_m$ , 独立物理量共 4 个:  $\rho_m, H_m, \alpha, \tau_0$ 。  $\alpha$  为无量纲量。

### 棱体

有 3 个独立物理量,它们是棱体密度  $\rho_R$ , 厚度  $H_R$ 、内摩擦角  $\mathcal{Q}$ 。

### 桩

模型试验中,是将桩下端焊接固定在爆炸试验池底层钢板上以代表嵌固条件,嵌固点起算的桩长为  $L_k$ , 桩的惯性矩  $I_k$ 、密度  $\rho_k$ 、抗压强度  $\tau_k$ 、极限弯矩  $M_k$ 、杨氏模量  $E_k$ , 此外还有桩的间距  $l_k$ , 合计为 7 个独立物理量。

以上 24 个独立物理量中, 有量纲量 19 个, 根据  $\pi$  定理, 得到 16 个无量纲量; 考虑到水、淤泥、棱体、桩、炸药的基本物理性质不变, 得淤泥中冲击波压力  $P/(P_E D^2)$  和桩的应变  $\epsilon$  分别与 7 个无量纲参数有关:

$$P/(P_E D^2) = f_1\left(\frac{q/\rho_E}{H_m^2}, \frac{L}{H_m}, \frac{H_w}{H_m}, \frac{L_k}{H_m}, \frac{l_k}{H_m}, \frac{l}{H_m^4}, \frac{H_R}{H_m}\right) \quad (4)$$

$$\epsilon = f_2\left(\frac{q/\rho_E}{H_m^2}, \frac{L}{H_m}, \frac{H_w}{H_m}, \frac{L_k}{H_m}, \frac{l_k}{H_m}, \frac{l}{H_m^4}, \frac{H_R}{H_m}\right) \quad (5)$$

(4)、(5) 即为桩间抛石棱体下爆炸挤淤的模型律。

### 3 桩间爆炸挤淤的模型试验及结果

#### 试验装置

试验在中科院力学所爆炸试验池 (4.15m × 3.15m × 1.53m, 壁厚 0.37m) 中进行, 几何比尺选用 1/5, 预应力模型桩截面为 0.12m × 0.12m, 块石粒径 10cm 左右。用连云港淤泥, 含水量 80% ~ 85%, 即  $\rho_m \approx 1.5 \text{g/cm}^3$ 。用导爆索起爆。

试验桩下端与底座固支以模拟工程桩的嵌固, 4 根试验桩的间距及排距为 1.4m 和 1.0m; 在桩的迎爆面的上、中、下三个位置, 即堆石体顶面、泥石交界面、桩下端三个高程, 打磨处理, 粘贴应变片; 桩前及桩后放置压力传感器, 试验布置见图 1。爆炸及堆石体落底情况已在本文 I 中介绍。

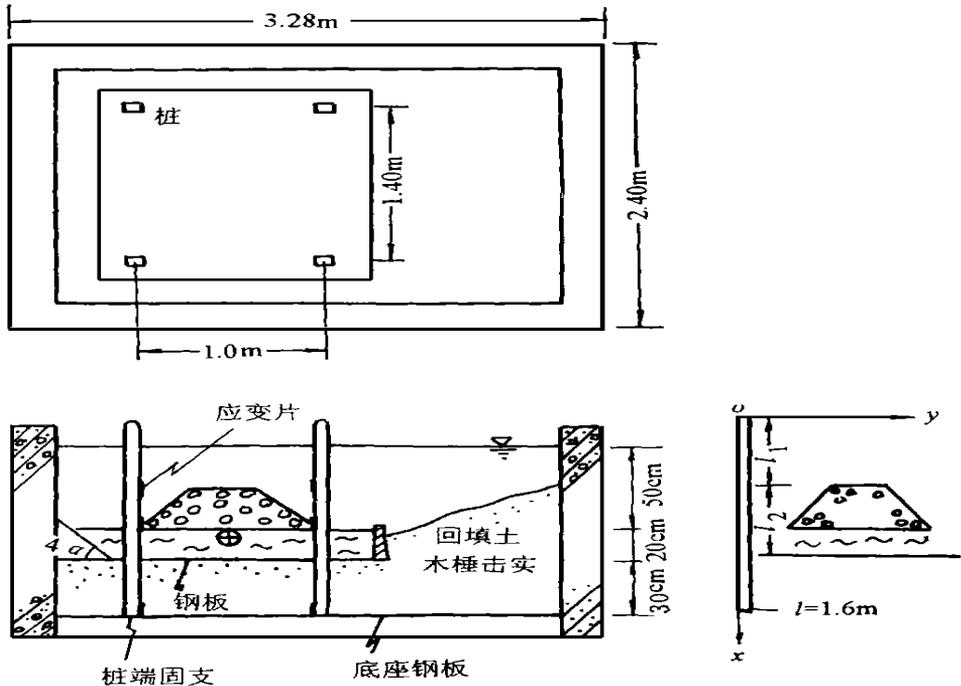


图 1 桩间爆炸挤淤模型试验布置

Fig. 1 Schematic diagram of model layout of squeezing mud method of explosion between piles

### 实验结果及分析

连云港以前试桩给出极限抗裂弯矩 $M$ 为 $300\text{kN}\cdot\text{m}$ ,由 $\epsilon = \frac{M_y}{EJ}$ ,算得原体桩( $l=12\text{m}$ )允许应变 $\epsilon = 416.5\mu\epsilon$ , $\epsilon$ 是相似的,因此可与模型实测值对比,模型试验实测最大应变值见表1,均小于允许值,且除个别点外,均在 $100\mu\epsilon$ 以下。

试验桩最大冲击波压力列于表2,表明桩前最大冲击波压力为 $30\sim 50\text{atm}$ ;压力过程线显示,冲击波之后有一压力的持续过程,但量值不大,说明淤泥冲击桩的作用是次要的。

表1 桩应变最大值(模型试验)

Tab. 1 The maximum pile strain in model test

| 炮 号 |                  | 桩 号  |      |      |           |   |   |                |   |   |                 |    |     |           |      |      |      |      |  |      |      |      |
|-----|------------------|------|------|------|-----------|---|---|----------------|---|---|-----------------|----|-----|-----------|------|------|------|------|--|------|------|------|
|     |                  | 1#   |      |      | 2#        |   |   | 3#             |   |   | 4#              |    |     |           |      |      |      |      |  |      |      |      |
|     |                  | 上    | 中    | 下    | 上         | 中 | 下 | 上              | 中 | 下 | 上               | 中  | 下   |           |      |      |      |      |  |      |      |      |
| 1   | 正 <sub>max</sub> | 43.6 |      |      |           |   |   |                |   |   | 320*            | 28 | 9.8 | 52        | 52   |      |      |      |  |      |      |      |
|     | 负 <sub>max</sub> | - 43 | - 69 | - 62 |           |   |   |                |   |   |                 |    |     | - 278*    | - 54 | - 63 | - 57 | - 59 |  |      |      |      |
| 2   | 正 <sub>max</sub> | 37.5 |      |      |           |   |   |                |   |   | 187*            |    |     |           |      |      |      |      |  |      |      |      |
|     | 负 <sub>max</sub> | 25.8 |      |      |           |   |   |                |   |   |                 |    |     |           |      |      |      |      |  | - 45 | - 76 |      |
| 3   | 正 <sub>max</sub> |      |      |      |           |   |   |                |   |   |                 |    |     |           |      |      |      |      |  | 34.9 |      |      |
|     | 负 <sub>max</sub> | - 59 |      |      |           |   |   |                |   |   |                 |    |     |           |      |      |      |      |  | - 41 | - 60 |      |
| 4   | 正 <sub>max</sub> | 33   |      |      | 26 43     |   |   | 53 75 36       |   |   | 44 64           |    |     |           |      |      |      |      |  |      |      |      |
|     | 负 <sub>max</sub> | - 75 |      |      | - 41 - 53 |   |   | - 16 - 40 - 17 |   |   | - 38 - 71 - 127 |    |     |           |      |      |      |      |  |      |      |      |
| 5   | 正 <sub>max</sub> | 46   |      |      | 12 87     |   |   | 37 104 10      |   |   | 31 46 36        |    |     |           |      |      |      |      |  |      |      |      |
|     | 负 <sub>max</sub> | - 81 |      |      | - 71 - 52 |   |   | - 37 - 11 - 52 |   |   | - 35 - 73 106   |    |     |           |      |      |      |      |  |      |      |      |
| 6   | 正 <sub>max</sub> |      |      |      |           |   |   |                |   |   | 36              |    |     | 68 162 33 |      |      |      |      |  |      |      |      |
|     | 负 <sub>max</sub> | - 87 |      |      |           |   |   |                |   |   |                 |    |     |           |      |      |      |      |  | - 58 | - 75 | - 49 |

因贴片问题,应变不回零。

表2 压力最大值(模型试验)

Tab. 2 The maximum pressure on piles in model test

| 炮 号        | 1    | 2    | 3 | 4    | 5 | 6    |
|------------|------|------|---|------|---|------|
| 桩前压力 (atm) | 6.40 | 11.0 |   | 36.0 |   | 27.9 |
| 桩后压力 (atm) |      |      |   | 7.8  |   |      |

## 4 模型试验结果的解析解释

### 理论判断

采用堤下爆炸挤淤时,桩的受力特点可描述为:桩在未被夹支的条件下,其最大弯矩发生在嵌固点附近。堤下爆炸的冲击荷载作用位置靠近嵌固点,不易使桩产生较大的弯曲;其次,药包置于淤泥中,上复块石,爆炸冲击波能量中的相当大部分转化为块石垂直运动的动能,因此,实际上只有淤泥层通过外挤运动作用于桩上,而这种作用是不大的。

### 解析解释

#### 桩的动力响应方程

将桩简化为悬臂梁,固支于嵌固点;将爆炸冲击荷载简化为平面波,作用范围为淤泥层厚

度, 爆炸冲击荷载曲线由实验资料确定; 不计粘土层对桩的约束, 在这些条件下, 爆炸荷载引起的梁的横向位移  $y(x, t)$  满足:

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \bar{f}(x, t) \quad (6)$$

其中:  $\bar{f}(x, t)$  为作用于梁上的力,  $m$  为梁的单位长度质量,  $E$  为材料的弹性模量,  $J$  为桩的转动惯性矩。 (6) 式即为桩的动力响应方程。

解析解及结果分析

通过冲量积分法和主振型法对 (6) 式求解, 求解过程将另文报道。冲量积分法的出发点是: 基于爆炸冲击荷载作用时间在 1m s 以内, 小于桩的自振周期, 因此, 可用冲量  $I(x)$  来代替  $\bar{f}(x, t)$ ;  $I(x) = \int_0^t f(x, t) dt$ 。主振型法的出发点是, 基于爆炸作用场合, 低频振动是结构破坏的主要原因, 因此可仅考虑一阶振型的振动情况而忽略高阶振型。二种方法得到桩的动应变解, 用试验桩参数:  $E = 2.0 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ ,  $\rho = 2.3 \text{g/cm}^3$ ,  $l = 1.6 \text{m}$ ,  $b = 0.12 \text{m}$  代入, 得二种方法的  $\epsilon$  值见表 3,  $P_m$  为爆炸冲击波波峰压力;  $\theta$  为爆炸作用时间。与表 1 实测值对比, 可知基本相符。

表 3 模型桩动应变计算值

Tab. 3 The Calculation value of dynamic strain of piles in model test

|  |       | 冲量积分法  |  |  | 主振型法   |  |  |
|--|-------|--|--|--|--|--|--|
|  |       | $l_1 = 0.4 \text{m}$<br>$l_2 = 0.6 \text{m}$ | $l_1 = 0.5 \text{m}$<br>$l_2 = 0.7 \text{m}$ | $l_1 = 0.6 \text{m}$<br>$l_2 = 0.8 \text{m}$ | $l_1 = 0.4 \text{m}$<br>$l_2 = 0.6 \text{m}$ | $l_1 = 0.5 \text{m}$<br>$l_2 = 0.7 \text{m}$ | $l_1 = 0.6 \text{m}$<br>$l_2 = 0.8 \text{m}$ |
| $I = 420 \text{N} \cdot \text{s}$<br>$P_m = 19.13 \text{kg/cm}^2$<br>$\theta = 0.2 \text{m s}$ | $x_1$ | 60.7   | 84.2   | 110.5  | 55.3   | 76.8   | 100.8  |
|  | $x_2$ | 38.1   | 52.9   | 69.4   | 34.8   | 48.2   | 63.3   |
|  | $x_3$ | 27.5   | 38.1   | 50.1   | 25.1   | 34.8   | 45.7   |
| $I = 820 \text{N} \cdot \text{s}$<br>$P_m = 48.0 \text{kg/cm}^2$<br>$\theta = 0.16 \text{m s}$ | $x_1$ | 117  | 163  | 213  | 111  | 154  | 202  |
|  | $x_2$ | 73.6   | 102  | 134  | 69.8   | 96.8   | 127  |
|  | $x_3$ | 53.2   | 73.8   | 96.8   | 50.3   | 69.8   | 91.7   |
| $I = 980 \text{N} \cdot \text{s}$<br>$P_m = 36.0 \text{kg/cm}^2$<br>$\theta = 0.2 \text{m s}$  | $x_1$ | 142  | 196  | 258  | 104  | 144  | 190  |
|  | $x_2$ | 88.9   | 123  | 162  | 65.4   | 90.8   | 119  |
|  | $x_3$ | 64.1   | 88.9   | 116  | 47.2   | 65.5   | 85.9   |

注:  $x_1 = 0.1 \text{m}$ ,  $x_2 = 0.5 \text{m}$ ,  $x_3 = 0.7 \text{m}$

代入原体桩参数 ( $E = 2.0 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ ,  $\rho = 2.3 \text{g/cm}^3$ ,  $l = 12 \text{m}$ ,  $b = 0.6 \text{m}$ ), 冲击波波峰压力取  $P_m = 48 \text{kg/cm}^2$ , 二种方法得到的动应变值见表 4, 表明在此冲击波压力下, 桩是安全的。

表 4 原体桩 ( $l = 12 \text{m}$ ) 动应变计算值

Tab. 4 The calculation value of dynamic strain of pile ( $l = 12 \text{m}$ ) in prototype test

|       | $l_1 = 2.5 \text{m}, l_2 = 3.5 \text{m}$ |       |       | $l_1 = 3.0 \text{m}, l_2 = 4.0 \text{m}$ |       |       | $l_1 = 3.5 \text{m}, l_2 = 4.5 \text{m}$ |       |       |
|-------|--|-------|-------|--|-------|-------|--|-------|-------|
|       | $x_1$                                    | $x_2$ | $x_3$ | $x_1$                                    | $x_2$ | $x_3$ | $x_1$                                    | $x_2$ | $x_3$ |
| 冲量积分法 | 118                                      | 70.0  | 51.9  | 156                                      | 92.2  | 68.4  | 197                                      | 117   | 86.6  |
| 主振型法  | 85.5                                     | 50.6  | 37.5  | 113                                      | 66.7  | 49.5  | 143                                      | 84.4  | 62.6  |

表中,  $x_1 = 0.5 \text{m}$ ,  $x_2 = 3.0 \text{m}$ ,  $x_3 = 4.0 \text{m}$   $P_m = 48 \text{kg/cm}^2$

## 5 桩间爆炸挤淤的现场试验

该项试验在 1994 年于连云港墟沟港区进行, 试验布置及抛石体落底效果等见本文之 I。原体桩截面  $0.6\text{m} \times 0.6\text{m}$ , 长  $20\text{m}$ , 制桩前在钢筋上打磨粘贴应变片, 每根桩布置 4 组应变片, 各组距桩顶分别为  $7.5\text{m}$ ,  $8.3\text{m}$ ,  $8.9\text{m}$ ,  $12.5\text{m}$ , 桩的入土深度  $11.7\text{m}$ 。

### 桩体瞬态变形测量

共进行了 5 炮试验, 由应变片获取变形资料, 第 2 炮未有记录。共有 29 组有效应变数据, 列于表 5。

表 5 原体试验, 桩的动应变实测值(动应变:  $\mu\epsilon$ )

Tab. 5 The observed value of dynamic strain of pipe in prototype test

| 桩号 | 测点 | 第 一 炮       | 第 三 炮       | 第 四 炮         | 第 五 炮       |
|----|----|-------------|-------------|---------------|-------------|
| 1# | g1 | + 153       | + 586 - 382 | + 33 - 78     |             |
|    | g2 | + 91 - 155  | + 660 - 520 | + 30 - 40     |             |
|    | g3 | + 126 - 200 | + 395 - 674 | + 13 - 44     |             |
|    | g4 | + 210 - 110 | + 454 - 233 | + 50 - 50     |             |
| 2# | g1 | + 200 - 420 |             |               | + 493 - 300 |
|    | g2 |             |             |               | - 382       |
|    | g3 | + 211 - 532 |             |               | + 353 - 759 |
|    | g4 | + 350 - 200 |             |               | + 270       |
| 3# | g1 |             | + 54 - 108  | + 139 - 785   |             |
|    | g2 |             | + 309 - 36  | + 1 036 - 240 |             |
|    | g3 |             | + 147 - 347 |               | - 459       |
|    | g4 |             | + 200 - 20  | + 120 - 120   |             |
| 4# | g1 |             |             |               |             |
|    | g2 |             |             |               | - 300       |
|    | g3 |             |             |               |             |
|    | g4 |             |             |               | + 725 - 750 |

表中: + 为拉应变, - 为压应变, g1, g2, g3, g4 分别为距桩顶  $7.5\text{m}$ 、 $8.3\text{m}$ 、 $8.9\text{m}$ 、 $12.5\text{m}$ 。

表中第 4 炮 g2 出现  $1\ 036\mu\epsilon$  的高值, 远高于相邻的上下两点, 可认为是测量造成的异常点。排除此点, 最大压应变为  $785\mu\epsilon$ , 最大拉应变为  $725\mu\epsilon$ 。由连云港以往试桩资料给出该种桩的允许弯矩  $M = 680\text{kN} \cdot \text{m}$ , 算得其允许应变值为  $944\mu\epsilon$ , 故桩是安全的。

### 桩体动测仪检测

由中科院武汉岩土力学研究所工程检测中心检测鉴定, 结论是“未发现桩身出现损坏”。

### 桩顶位移测量

表 6 现场试验实测桩顶位移(cm)

Tab. 6 The observed value of pile top displacement in prototype test (cm)

| 桩号 | 第 1 炮   | 第 3 炮   | 第 4 炮   | 第 5 炮    |
|----|---------|---------|---------|----------|
| 1# | A = - 4 | A = - 2 | A = + 1 | A = - 6  |
|    | B = - 6 | B = - 4 | B = - 4 | B = - 8  |
| 2# | A = - 7 | A = - 6 | A = - 6 | A = - 9  |
|    | B = 0   | B = + 2 | B = 0   | B = - 1  |
| 3# | A = - 9 | A = - 8 | A = - 5 | A = - 13 |
|    | B = - 9 | B = - 7 | B = - 6 | B = - 10 |
| 4# | A = - 7 | A = - 3 | A = 0   | A = - 5  |
|    | B = - 7 | B = - 5 | B = - 4 | B = - 9  |

除第 2 炮未测外,各炮桩顶偏移值录于表 6,可知普遍出现向海侧的桩顶位移,5 炮最终位移一般小于 10cm,但 3 号桩最大位移达到 13cm。

## 6 现场原体试验结果的解析解释

上述现场原体试验结果表明,桩顶有较大的残余位移,但桩体应变小于允许值,动测检验也证明桩体并未破坏。对此现象,通过如下解析模拟加以解释。

与前述室内试验的解析模拟不同的是,室内试验,桩底端焊接固定于底座以模拟桩的嵌固,由于该点的强约束作用,加之土层较薄,计算中略去了土层约束。现场原体桩打入土层十几米,土体约束不能忽略,而且嵌固点也有位移及转角,并非完全固支;室内试验使用导爆索,现场使用乳化炸药,后者的冲击波压力峰值远高于前者,测得的桩体正面最大冲击波波峰压力平均达  $187\text{kg}/\text{cm}^2$ ,时间系数  $\theta = 0.9 \sim 1.3\text{ms}$ 。根据这些情况,要对计算方法加以改进。

### 桩的动态响应的张有龄法静态解

出发点是,虽然爆炸荷载是高频振动,但桩的自振为低频振动,桩在爆炸冲击荷载下亦主要产生低频响应,因此,可以用桩的静态解作为其振动的主振型,以亚粘土层为界,桩的动态响应方程为:

$$\text{土层以上: } \quad \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = \bar{f}(x, t) \quad (7)$$

$$\text{土层以下: } \quad \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + kby = \bar{f}(x, t) \quad (8)$$

式中,  $E$ 、 $J$  分别为桩的弹性模量和转动模量;  $\bar{m}$ 、 $b$  为桩的单位长度质量及截面特征尺度,  $k$  为水平地基反力系数。  $\bar{f}(x, t)$  为爆炸荷载:

$$\bar{f}(x, t) = P_m b e^{-t/\theta} \quad (9)$$

静态条件 ( $\partial y / \partial t^2 = 0$ ) 下求解 7、8 式,取  $E = 2 \times 10^4 \text{MPa}$ ,  $b = 0.6\text{m}$ ,  $\rho = 2.3\text{g}/\text{cm}^3$ , 得动态响应值见表 7 及图 2。

表 7 张有龄法动态响应值

Tab. 7 The dynamic response value of Chang's method

|                      | 顶点位移 (cm) | 最大应变 $\epsilon(\mu\epsilon)$ |
|----------------------|-----------|------------------------------|
| $l_1 = -1.0\text{m}$ | 11.73     | 615                          |
| $l_2 = 1.5\text{m}$  |           |                              |
| $l_1 = -1.2\text{m}$ | 13.6      | 713                          |
| $l_2 = 1.5\text{m}$  |           |                              |

可知, (i) 动态响应的最大位移在桩顶,一般可略超过 10cm,在土层下 1.5m 处位移为零,亚粘土层总体位移量很小, (ii) 嵌固点(即应变最大点)在土层下 0.5~1.0m 处,其应变值为 600~700 $\mu\epsilon$ , 小于允许应变值。

### 堆石体侧向压力

上述静态解中的桩顶位移,随着时间衰减,将回复为零,因此不能反映实际发生的桩顶残余位移。这种在桩自振后仍保留的残余位移,根据桩间棱体下爆炸挤淤作用机理的分析,本质上与爆炸冲击荷载无关,而是堤下爆炸挤淤、抛石下落过程中,伴随桩的动态响应振动和淤泥的流动,使落下的块石在达到稳定的同时,对桩形成侧向压力所致,可用张有龄静态加载法加

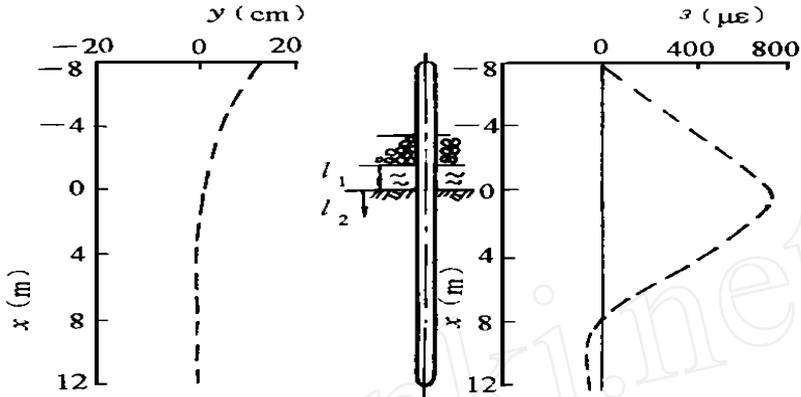


图 2 张有龄法动态响应分布

Fig. 2 The dynamic response value distribution of Chang method

以估计:

受力平衡方程:

$$\text{土层以上: } EJ \frac{d^4 y}{dx^4} = \begin{cases} 0 & -8 < x < l_1 \\ H & l_1 < x < 0 \end{cases}$$

$$\text{土层以下: } EJ \frac{d^4 y}{dx^4} + kby = 0, x > 0$$

其中地基反力系数  $k$  与连云港粘土的贯入击数对照列于表 8。计算过程将另文报道, 结果列于表 9, 可知:

(i) 桩顶残余位移及桩的应变均随土的硬度增加而减小、随侧向压力增大而增大;

(ii) 桩体最大应变发生在土层以下 1.5m 处, 可称其为嵌固点, 此处水平位移不为零;

(iii) 对连云港亚粘土, 如取  $k = 15N/cm^2$ , 当桩顶产生残余位移 12.1cm 时, 对应侧向压力  $H = 4kg/cm^2$ , 最大应变  $\epsilon_{max}$  为  $916\mu\epsilon$ , 仍小于允许值  $944\mu\epsilon$ , 桩是安全的。虽有较大的桩顶位移而桩体仍为安全的原因, 主要在于嵌固点可以有水平位移。

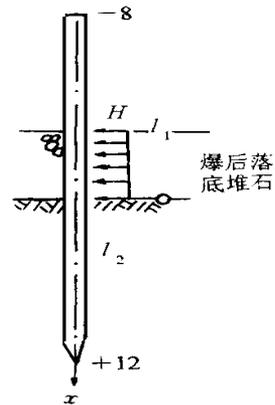


图 3 堤下爆炸法堆石体对桩的作用示意图

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic action of bulk rockpill on piles by explosion under embankment

表 8  $k$  与贯入击数的关系

Tab. 8 The relationship between  $k$  and number of blows

| 土的状态        | 极 软 | 软    | 中 等   | 硬      | 很 硬    | 极 硬     |
|-------------|-----|------|-------|--------|--------|---------|
| 贯入击数        | < 2 | 2~ 4 | 4~ 8  | 8~ 15  | 15~ 30 | > 30    |
| $k(N/cm^3)$ | < 4 | 4~ 8 | 8~ 16 | 16~ 30 | 30~ 60 | 60~ 100 |

表 9 侧向压力与桩顶残余位移及应变的关系

Tab. 9 The relationship of residual displacement and strain with lateral pressure

| $k$ | 侧压力 $H$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) | $y_{\text{顶}}$ ( $\text{cm}$ ) | $\epsilon_{\text{max}}$ ( $\mu\epsilon$ ) | $k$ | 侧压力 $H$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) | $y_{\text{顶}}$ ( $\text{cm}$ ) | $\epsilon_{\text{max}}$ ( $\mu\epsilon$ ) |
|-----|-------------------------------------|--------------------------------|---|-----|-------------------------------------|--------------------------------|---|
| 10  | 2                                   | 6.9                            | 415                                       | 20  | 2                                   | 5.8                            | 389                                       |
|     | 3                                   | 9.3                            | 599                                       |     | 3                                   | 7.7                            | 560                                       |
|     | 4                                   | 11.5                           | 778                                       |     | 4                                   | 9.5                            | 724                                       |
|     | 5                                   | 13.4                           | 947                                       |     | 5                                   | 11.2                           | 890                                       |
| 15  | 2                                   | 6.1                            | 398                                       | 30  | 2                                   | 5.1                            | 373                                       |
|     | 3                                   | 8.3                            | 576                                       |     | 3                                   | 6.8                            | 537                                       |
|     | 4                                   | 10.3                           | 746                                       |     | 4                                   | 8.5                            | 698                                       |
|     | 5                                   | 12.1                           | 916                                       |     | 5                                   | 10.0                           | 855                                       |

## 7 结 语

1 本项研究成果,从模型试验、工程试验、测量及检测以及理论分析,论证了将堤下爆炸法挤淤用于桩间抛石棱体下软基处理是可行的,可以在工程中应用。

2 本项研究,对堤下爆炸挤淤用于桩间抛石棱体下软基处理时桩的受力变形状况进行了探讨,通过解析模型的求解,说明嵌固点可以平行移动,因而虽然桩顶有较大位移,桩的最大应变值仍在允许范围内,是安全的。

\* 在郑哲敏院士指导下完成 参试人员还有严耀华、卢友兵、田维军、倪祖平、田兰桥、任京生、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