

桩间爆炸处理软基的模型分析及试验研究

杨振声 田兰桥 任京生 张加华

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

倪祖平 卢友兵 **严耀华**

(连云港建港指挥部,江苏连云港 222042)

摘要 通过模型分析、模型实验及现场实验对爆炸法处理桩间软基这一具有较强工程背景的课题进行了深入的分析及实验研究,测量了爆炸载荷作用下桩的变形、受力状态及抛石体爆后落底宽度等,并对大量实验数据进行分析处理。认为采用堤下爆破法处理桩间软基是一种安全、可靠、加固效果好且施工工艺简单易行的新方法。同时本文还给出了供工程应用的推荐爆破参数。

关键词 桩间加固 堤下爆破 量纲分析 应变测量

ANALYSIS OF MODEL AND EXPERIMENT ON HANDLING SOFT FOUNDATION BETWEEN PILES

Yang Zhensheng Tian Lanqiao Ren Jingsheng Zhang Jiahua

(Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080)

Ni Zhuping Lu Youbing Yan Yaohua

(Lianyungang Harbor Construction Command Post, Jiangsu 222042)

ABSTRACT By analysis of model experiment in lab and site, it is deeply and carefully studied that how to handle soft foundation between piles by blasting, which has strong background of engineering. The displacement, state of strain, stone-pile and width of stone-pile after blasting are measured, and experiment data are analyzed. The method to handle soft foundation between piles by blasting is reliable, safe and easy to operate, and with better strengthening effect. At the same time, the blasting parameters are recommended for application in engineering projects in this paper.

KEY WORDS Strengthening between piles Blast under embankment
Dimension analysis Measure of strain

1 前言

高桩码头在我国逐步得到广泛的应用。工程实践中发现,由于高桩码头的棱体下淤泥未处理干净,棱体未落到持力层上,当码头后方出现堆载或其他因素的小扰动时,挡土墙和棱体

杨振声:研究员,博士生导师。

倪祖平:工程处工程师。

一起滑动,甚至将桩剪断,破坏码头。

爆炸处理软基有填石排淤法^[1]、爆夯法^[2]、堤下爆炸挤淤法^[3]等。通过对几种方法的比较,堤下爆炸挤淤法较其他方法有明显的优势。在堤下爆炸挤淤时,药包布置在淤泥内或淤泥上表面,爆炸荷载集中于嵌固点较近处,经过堆石体漫射传到桩上。爆炸荷载使土压实,吸收了许多能量,由于上面有覆盖水,淤泥流动的绝对速度很小,载荷对于桩是斜入射,因此直接作用于桩的冲击荷载很小。

通过理论分析、模型试验以及现场实验,对爆炸法处理桩间软基有了较深入的认识。分析整理大量实验数据,认为在适当控制药量的情况下,采用爆炸法处理桩间软基具有挤淤效果好、保证桩体安全、施工工艺简单易行、工期短等优点。

2 桩间爆炸处理软基的模型律

堤下爆炸挤淤法和爆炸填石排淤法,几何相似律成立,涉及桩、水、棱体、炸药、淤泥 5 种介质。

(1) 炸药。炸药的独立物理量为密度 ρ_B 、达到稳定爆轰后的爆速 D 、堤下爆炸常用单位长度药量 q 、炸药爆炸产物状态方程的多方指数 n 及药包特征长度 L 。因此,炸药共有 5 个独立物理量: ρ_B, D, q, n, L , 其中 n 是无量纲量。

(2) 水。海水在高压条件下是可压缩的,满足 Tait 本构关系: $P/P_0 = a(\rho/\rho_0)^k$, 水深 H_w 是唯一的几何特征量,因此共有 5 个独立物理量: P_0, ρ_0, a, k, H_w , 其中 a, k 是无量纲量。

(3) 淤泥。淤泥是一种 Bingham 体,只要确定剪切力 τ_0 和 θ 角,就可以确定淤泥的本构关系。加上淤泥密度 ρ_m 、厚度 h_m ,因此淤泥有 4 个独立量: $\rho_m, \tau_0, \theta, h_m$, 其中 θ 是无量纲量。

(4) 抛石体。主要考虑抛石体的密度 ρ_R 、厚度 H_R 、内摩擦角 ϕ_R , 因此有 3 个独立物理量: ρ_R, H_R, ϕ_R , 其中 ϕ_R 是无量纲量。

(5) 桩。模型试验采用方桩,桩长 L_K 、桩距 l_K 、惯性矩 I 、密度 ρ_K 、抗压强度 σ_K 、极限弯矩 M_K 、杨氏模量 E_K , 共有 7 个独立物理量: $\rho_K, L_K, \sigma_K, M_K, l_K, I, E_K$ 。

总计有 24 个独立物理量: $\rho_B, D, q, n, L, P_0, a, k, H_w, \rho_m, \tau_0, \theta, h_m, \rho_R, H_R, \phi_R, \rho_K, L_K, \sigma_K, M_K, l_K, E_K$, 其中 n, a, k, θ, ϕ_R 是无量纲量。根据 π 定理可以得到 15 个无量纲参数,即:

$$\frac{\rho_B}{\rho_m}, \frac{\rho_B}{\rho_R}, \frac{\rho_B}{\rho_K}, \frac{L}{h_m}, \frac{H_w}{h_m}, \frac{L_K}{h_m}, \frac{l_K}{h_m}, \frac{I}{h_m^4}, \frac{H_R}{H_m}, \frac{q/\rho_B}{h_m^2}, \frac{\rho_K}{\rho_B D^2}, \frac{\rho_0}{\rho_B D^2}, \frac{E}{\rho_B D^2}, \frac{M_K}{\rho_B D^2 h_m^3}$$

在炸药、淤泥、抛石体、桩、水基本物理性质不变的情况下,淤泥中冲击波压力:

的几
$$\frac{P}{\rho_B D^2} = f\left(\frac{q/\rho_B}{h_m^2}, \frac{L}{h_m}, \frac{H_w}{h_m}, \frac{L_K}{h_m}, \frac{l_K}{h_m}, \frac{I}{h_m^4}, \frac{H_R}{H_m}\right)$$

桩的应变:
$$= f\left(\frac{q/\rho_B}{h_m^2}, \frac{L}{h_m}, \frac{H_w}{h_m}, \frac{L_K}{h_m}, \frac{l_K}{h_m}, \frac{I}{h_m^4}, \frac{H_R}{H_m}\right)$$
 线性

从小型到大型试验,只要保持上述相似参数不变即可。

3 模型实验

模型实验在中国科学院力学研究所爆炸实验室爆炸槽中进行,该槽长 4.15m、宽 3.15m、高 1.53m,壁厚 0.37m,由钢筋混凝土制成。根据实验槽的条件,考虑重力及时效的影响较小,

实验按 1:5 缩小,实验装置如图 1。

3.1 实验条件

预应力模型桩按 1:5 几何相似条件预制,其断面尺寸为 12cm ×12cm,由于实验室内无法打桩,将嵌固点加以固支;淤泥取自连云港现场;抛石体石块的大小控制在 10cm 左右(级配类似工程中抛石体的状况)。根据不同的施工特点,布置不同的抛石体,测量爆前、爆后抛石体的形状、高度。堤下爆炸挤淤法一般采用条形药包,炸药单耗为 0.2 ~ 0.3g/m³,用导爆索代替条形药包。

模型实验主要考察抛石体落底效果和评估爆后桩的安全性。

3.2 应变和压力测量

桩的变形直接影响其安全及破坏程度,因此准确测量桩的变形十分重要。为此在桩的上中下不同部位迎爆面及弯曲面粘贴多组应变片,测量爆炸瞬间桩的变形。为了分析爆炸冲击波和淤泥冲击桩的状况,在桩前后置放压力传感器测量桩的荷载。测量的系统误差控制在 10% 以内。

3.3 实验结果及分析

连云港试桩给出允许弯矩 M 为 680kN ·m。应变 为:

$$\epsilon = My/EJ$$

其中: E 是桩的杨氏模量; J 是转动惯量; y 是离中心面的距离。计算得 $\epsilon = 944\mu$, 对于模型桩相似,因而实验中得到的应变值相对于允许应变值几乎小一个数量级,如表 1 所示。模型桩承受的最大压力值见表 2。

表 1 模型桩最大应变值

Table 1 The maximum strain of model pillar

炮号	1#桩			2#桩			3#桩			4#桩		
	上	中	下	上	中	下	上	中	下	上	中	下
1	43.6						320.0	28.0	9.8		52.0	52.0
	-43.0	-69.0	-62.0				-278.0	-54.0	-63.0		-57.0	-59.0
2	37.5					564.0	187.0					59.0
	-25.8								-45.0			-76.0
3												34.9
	-59.0								-41.0			-60.0
4	33.0			26.0	43.0		53.0	75.0	36.0	44.0	64.0	
	-75.0			-41.0	-53.0		-17.0	-40.0	-17.0	-38.0	-71.0	-127.0
5	46.0			12.0	87.0		37.0	104.0	10.0	31.0	46.0	36.0
	-81.0			-71.0	-52.0		-37.0	-11.0	-52.0	-35.0	-73.0	106.0
6					36.0	258.0				68.0	162.0	33.0
	-87.0				-58.0	-194.0			-75.0	-49.0		-123.0

拉应变为正、压应变为负,单位 μ 。

表 2 模型桩承受的最大压力值, kPa

Table 2 The maximum stress of model pillar

炮号	1	2	4	6
桩前	640	1100	3600	2790
桩后			780	

由表 1 看出,除个别点外,一般的应变均在几十个微应变的范围,表 2 中最大压力值发生在迎爆面,只有 3600kPa,因此爆炸效应对桩的影响很小。

爆炸后抛石体的落底宽度及形状直接关

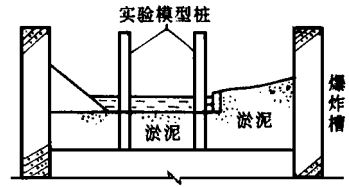


图 1 模型实验装置示意图

Fig. 1 The schematic diagram of simulated test apparatus

系到桩基的加固效果,表3给出了一组爆炸后抛石体落底宽度的测量值。现场桩间爆炸时若按1:5放大,则落底宽度达2.5m,可以达到加固桩基的目的。

表3 爆后抛石体落底宽度,cm

炮号	1	2	3	4	5	6	12月22日
端部断面	20	37	35	46	15	40	40
中部断面	25	50	50	50	18	41	50
端部断面	30	30	45	48	20	40	40

由表3可知,端部断面落底宽度较小,这是由于条形药包的端部效应引起的,实际工程中可以用加长药包长度来解决这一问题。对于淤泥冲击桩的问题,王永杰^[4]在爆夯机理一文中作了详细计算,在此不再赘述。

可以认为:在淤泥含水量80%的情况下,堤下爆炸挤淤法两侧挤淤落底宽度可达50cm(相当于工程中2.5m),一侧挤淤落底宽度可达40cm(相当于工程中2.0m)。测得桩应变值在 10μ 左右,与理论计算相符,这在工程实践中满足安全要求。从压力波形以及工程情况来看,爆炸过程中桩前、桩后均承受压力,最大压力在4MPa以内,作用时间较短,作用点靠近桩的嵌固点,桩表面不易破坏,这与理论分析计算一致。

4 桩间爆炸处理软基现场实验

在对爆炸法处理桩间软基分析计算及室内实验的基础上,于1994年6月2~10日,在连云港墟沟港区高桩码头附近进行现场桩间爆炸实验。现场实验主要目的是验证室内实验结果;分析和解决现场实验中出现的問題;改进及完善桩间爆炸现场施工工艺,为工程应用提供技术参数及技术依据。

4.1 实验情况

(1)实验地点。现场实验区位于墟沟高桩码头内侧,该区域淤泥面平均标高-3.8m,挖泥竣工标高-4.9m,回淤厚度约1.1m。淤泥表层的含水量在100%以上,下层为80%~90%。

(2)实验桩的制备。现场采用4根1:1的工程用桩,实验桩由水上打桩船沉桩至设计深度,桩顶高程+4.7m、入土深度11.7m。

(3)预埋塑料管及抛石。利用已有桩位将装药塑料管定位,塑料管位于抛石体底部的中心线上。桩间爆炸处理软基采用堤下爆炸的施工工艺,待抛石完成后将条形药包用导爆索连接后穿入预先埋好的塑料管内。现场实验采用EL系列乳化炸药。

(4)桩的监测系统。每根桩浇注前,在桩的预应力钢筋上粘贴4组应变片,测量桩的瞬态变形;用RSM-16H桩体动测仪监测爆炸冲击波对桩体的影响;用经纬仪监测实验过程中桩体的偏移。

(5)抛石体沉降量测量。每一炮爆炸前后测量抛石范围内海底泥面高程及抛石体高程。

4.2 实验结果及分析

(1)桩体变形。本次实验进行了5次爆破,共记录30组有效应变,见表4。拉应变值除一点外都在 725μ 以内,压应变最大值为 784.6μ 。其中3#桩第4炮时个别点拉应变为 1036.4μ ,而相邻的上下两点为 139μ 和 120μ ,因此认为该点为测量造成的异常点。连云港试桩的允许弯矩 M 为 $680\text{kN}\cdot\text{m}$ 、预应力混凝土方桩的允许应变值为 944μ ,所得的最大瞬态应变值除异常点外均在允许应变范围内,因此在本实验爆炸荷载作用下桩身是安全的。

(2)桩体动测仪检测结果。对4根实验桩爆前、爆后均用桩体动测仪进行了检测。分析及计

表 4 现场实验桩最大瞬态应变值

Table 4 The maximum instaneous strain of the testing pillar on site

桩号	测点	最大瞬态应变, μ							
		第 1 炮		第 3 炮		第 4 炮		第 5 炮	
1 #	1	+153		+586	-382	+33	-78		
	2	+91	-155	+660	-520	+30	-40		
	3	+126	-200	+395	-674	+13	-44		
	4	+210	-110	+454	-233	+50	-50		
2 #	1	+200	-420					+493	-300
	2								-382
	3	+211	-532					+353	-759
	4	+350	-200					+270	
3 #	1			+54	-108	+139	-785		
	2			+309	-36	+1036	-240		
	3			+147	-347		-459		
	4			+200	-20	+120	-120		
4 #	1								
	2								-300
	3								
	4							+725	-750

拉应变为正、压应变为负,第 2 炮爆后未测量。

表 5 爆炸后桩顶位置偏移值, cm

Table 5 The displaced data of the apex of testing pillar after explosion

桩号	第 1 炮	第 3 炮	第 4 炮	第 5 炮
1 #	A = -6	A = -2	A = +1	A = -6
	B = -4	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

A 表示向南为正、B 表示向西为正,第 2 炮爆后未测量。

图中 1 # ~ 4 # 为桩号,括号内、外分别为爆后、爆前高度,以黄海高程为基准,高度均为负值,单位为米。抛石体落底宽度示意图见图 3。

总体看来,爆炸后抛石体中间部分下沉量较大,挤淤效果较好,其中尤以第 2 ~ 5 炮效果较好。石层落底效果与抛石体的厚度及其均匀性有很大的关系,石层顶面沉降量与 1993 年现场中间试验下沉量相比较小,因此在工程施工中,应严格控制抛石质量。

4.3 棱体挡土墙落底宽度计算

棱体抗水平滑动稳定性计算中,桩间石体的落底宽度按 2.5m 计,共处理两个条宽。连云港淤泥粘结力 $C = 2\text{kPa}$, $\phi = 2^\circ$,持力层(亚粘土) $C = 30\text{kPa}$, $\phi = 12^\circ$ 。后方均布荷载按 $Q = 30\text{kPa}$ 计,稳定系数 $K = 1.2$,求棱体挡土墙下底宽度(将棱体看成一个半刚性整体)。

(1) 棱体内侧主动土压力:

算可知,检测波形连续、无畸变,波传播速度等均无异常变化,通过对波形的分析认为没有损坏桩身。

(3) 桩顶位移。表 5 给出了 4 根桩 4 次爆炸后的桩顶位移,均为各炮爆后与实验桩原始位置之差值。由测量结果知,经多次爆炸后桩的偏移除 3 # 桩第 5 炮爆后向南偏移量较大外,均在允许范围内。

(4) 抛石体落底效果。根据爆炸前后抛石体顶面高程测量数据,加权平均计算出爆炸后的平均沉降量,按体积平衡法推断抛石体的落底宽度和深度。5 次爆炸后测量结果见图 2,

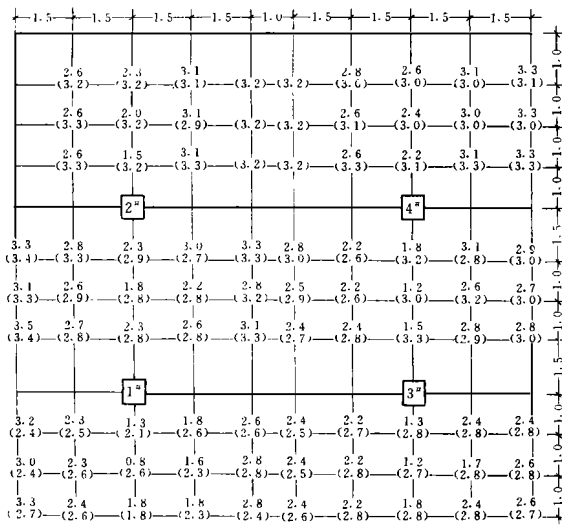


图 2 现场实验抛石体爆炸前后位置变化

Fig. 2 Changes of height data of bulk rockfill on site testing before and after explosion

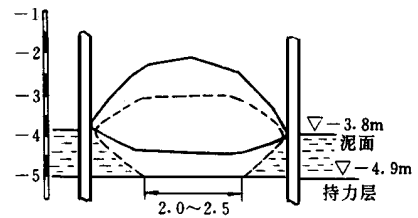


图 3 抛石体落底宽度示意图

Fig. 3 The schematic diagram of bottom width of bulk rockfill

$$P_1 = Q(h_1 + h_2)k_0 + Qh_3k_1 + \frac{1}{2}h_1^2k_0/2 + \frac{1}{2}h_1h_2k_0 + \frac{1}{2}h_3k_1 + \frac{1}{2}h_2^2k_0/2 + \frac{1}{2}h_2k_1 + \frac{1}{2}h_3^2k_1/2$$

式中： k_0 、 k_1 分别为石层、淤泥的侧压力系数， $k = \text{tg}^2(45^\circ - \varphi/2)$ ， φ 为介质的内摩擦角； h_1 、 h_2 分别为水上、水下堆石和土层容重； h_1 、 h_2 分别为水上、水下堆石层厚度， h_3 为石层下土层厚度。

(2) 棱体外被动土压力： $P_2 = \frac{1}{3}h_3^2k_2/2$

k_2 为被动土压力系数， $k_2 = \text{tg}^2(45^\circ + \varphi/2)$ 。

(3) 棱体侧向水平推力： $P = P_1 - P_2 = 68.84\text{t/m}$

(4) 桩间棱体水平抗滑力： $T_1 = (c_1 \text{tg} \varphi + C_1) = 25.75\text{t/m}$

稳定系数 $K = (T_1 + T_2) / P$ ， $T_2 = (h_1 \text{tg} \varphi_1 + h_2 \text{tg} \varphi_2 + h_3 \text{tg} \varphi_3 + C) L$

取稳定系数 $K = 1.2$ ，计算得挡土墙下棱体落底宽度 $L = 6.6\text{m}$ 。

5 结 论

桩间爆炸处理软基室内实验和现场实验均取得了较满意的测试数据及实验结果。可以认为：

- (1) 只要选用适当的爆炸参数，可以保证桩体的变形在允许范围内，因此桩体是安全的；
- (2) 爆炸后堆石体落底宽度达到设计要求，清淤效果良好，达到加固桩基之目的；
- (3) 通过对施工工艺程序的现场实验检验，认为这一新技术有较好的应用前景；
- (4) 将本试验的结果应用于工程时，推荐单位长度药量 $q = 1.2 \sim 1.6\text{kg/m}$ 。

参 考 文 献

- 1 郑哲敏, 杨振声, 金 . 爆炸处理水下软基. 工程爆破文集(第四辑). 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- 2 杨振声, 赵成福, 任京生. 爆夯机理及模型试验研究. 工程爆破文集(第四辑). 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- 3 杨振声等. 堤下爆炸药量确定与挤淤效果. 中国科学院力学研究所, 1996.
- 4 王永杰. 爆夯法处理水下海淤软基的数值模拟 [博士学位论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1991.

(收稿日期: 1997 - 06 - 24)