

爆炸引起饱和砂地表沉降的试验研究

A laboratory study on surface settlement of saturated sand caused by blasting

燕琳 李世海 刘以纲
(中国科学院力学研究所,北京 100080)

文 摘 通过观察,分析模型试验的现象和结果,讨论了爆炸加密饱和砂的机理,研究了药量与地表下沉量的规律,指出在爆炸加密砂基的问题中比药量不是主要的物理参数。总结出了地表下沉量及爆炸作用范围的计算公式。研究表明,爆炸振动引起砂体的破坏与再排列是砂基密实的主要原因。

关键词 爆炸,加密,饱和砂。

中图分类号 TU 441.8

作者简介 燕琳,女,1966年生,1987年7月清华大学工程力学系固体力学专业,1990年在中科院力学所获硕士学位,现为助理研究员。1991年至1995年年从事爆炸加密饱和松散介质的研究和设计。1995年以来还从事三峡二期高土石围堰中一些力学问题的研究。

Yan Lin Li Shihai Liu Yigang

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

Abstract The mechanism of blast densification of saturated sand has been discussed by observing and analyzing the phenomena and result of model experiments. It is pointed out that specific charge's weight is not the main physical parameter in blasting densification of saturated sand, and an empirical formula is given between surface settlement and blast effective range. The result shows that disruption and rearrangement of sand caused by blasting vibration are the major reason for sand densification.

Key word blast, densification, saturated sand.

1 前 言

关于研究饱和砂中爆炸地表下沉、孔隙水压力增长及地基振动的规律,Charlie^{[1][2]}在文献中作了较为全面的总结。可以看出,由于地质条件、试验条件的限制,每个人给出的关系式有一定的差异,主要表现在:现场试验影响因素多,准确给出试验参数比较困难;室内模型试验的规模小,试验结果受边界影响明显,以至于难以得到对工程有指导意义的结论。因此,在足够大的试验池内,较为严格的试验条件下进行系统的研究就显得尤为重要。

本试验是在受边界影响较小的池内进行的,试验中严格控制砂体的初始密度及饱和条件,测量了爆炸前后砂体的密度,给出了爆后地表沉降的部分试验结果。研究了地表下沉量与药包埋深、药量及初始密度之间的关系,给出了地表相对下沉量和药包作用半径的计算公式,说明了爆炸加密饱和砂比药量不是主要的物理参数。

2 试验布置

试验是在长3m,宽3m,高2.5m的钢筋混凝土试验池内进行的,如图1所示。池内砂层厚度0.6~0.8m,在

砂池内选取0.5m×0.6m×1.2m的区域作为试验研究范围,周围砂体形成的砂墙可以很好地减弱爆炸冲击波产生的边界影响。试验时,研究区域内外均为饱和砂体,砂体密度略有差异,砂料为京郊河畔的黄褐色中粗砂,比重 $G_s = 2.65 \times 10^3 \text{kg/m}^3$,最大孔隙比 $e_{\max} = 0.842$,最小孔隙比 $e_{\min} = 0.352$,渗透系数 $k = 1.5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$,砂粒级配见表1。

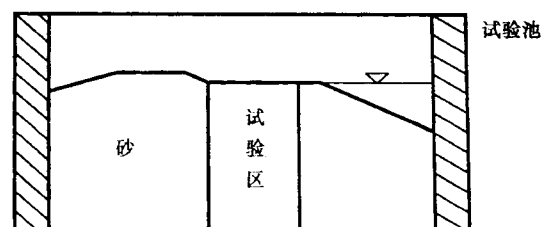


图1 模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of model

每次试验前,先将试验区域内的砂体挖出,然后利用孔径0.5cm×0.5cm的筛子将砂体筛入坑内,经过反复试验发现,通过控制筛网距砂坑的高度,可以较好的

到稿日期:1996-12-27.

表1 砂粒级配
Table 1 Sand gradation

粒径(mm)	10.0	5.0	2.0	1.0	0.50	0.25	0.10
小于该粒径百分数	100	99.1	92.8	86.9	57.1	32.8	9.0

保证筛入试验区域内砂体初始密度的一致性,经取样测定, $\gamma_d = 1320\text{kg/m}^3$ 。与其它类似的试验相比,该试验设置有如下优点:

1. 冲击波在近区的反射影响较小。
2. 爆炸荷载与边界的相互作用不至于改变试验结果的基本图象。

试验以电雷管作为爆源。每个雷管的药量按1.5g计算。如需一次起爆多个雷管,则将它们并列捆扎同时引爆。

3 试验现象与分析

当炸药爆炸后,药包附近一定范围内的砂体有一极短时间的向上运动过程,然后猛烈下沉,药包位置处形成许多气孔,伴随有爆炸气体冒出,持续时间约1分钟左右。在整个试验区内砂层表面较为均匀地布满排水孔,排水孔间距一般在厘米量级。随着时间的推移,砂层表面积水越来越多,积水深度可达2cm,最后排水终止,砂层表面形成一层粉细砂,细砂来自砂层内部,由小排水孔带出。

分析其现象,可以将整个过程分为三个阶段,即,爆炸作用阶段,砂体运动阶段和流体渗流阶段。

第一阶段包括冲击波的传播。高压气体膨胀推动砂体向外运动,地表短时间隆起,砂体的初始骨架排列被破坏。尽管砂体中有高压作用,但由于爆炸作用时间很短,饱和水来不及从砂体中渗出,高压气泡膨胀结束后为第二阶段。

砂体运动阶段含有复杂的力学过程。在这期间,高压气团已成为低压气团,气团周围的砂体压缩气团,气体向自由表面散逸,整个过程中砂体骨架排列重组,孔隙水在超孔隙水压力作用下向排气孔方向流动。在试验中,这一阶段持续时间在1分钟左右,地表下沉约占总下沉量的一半。定量地分析该阶段的运动机理有待于更深入的研究。

砂体的渗流阶段,可借助于土力学砂体液化渗流的概念。由于渗透系数较小,砂体的排水固结及地表下沉量的速度都比较小。

在上述三个阶段中,饱和砂中爆炸初期砂体的强

度可以忽略。爆炸作用阶段与水下爆炸类似,流体渗流可以采用土力学的研究方法讨论。第二阶段力学问题较为复杂,可以用简单的力学模型计算该阶段砂体运动过程,同时从地表下沉及孔隙水压力的试验结果也可以看出第二阶段的特殊性。

4 试验结果与分析

经过多次试验,按照一定的操作工艺,基本上能够控制住爆炸前的初始密度,即保证各组试验在大致相同的条件下进行。在此基础上,做了不同药量、埋深和爆炸次数等一系列试验,测量了爆区内的地表下沉量,得到地表下沉量及孔隙水压力随时间变化的规律。本文给出部分试验结果,并作简要的分析和说明。

图2给出了不同药量、埋深在每次爆炸时地表下沉的试验结果,从这些图中可以形象地观察到地表下沉量的大小及下沉范围。

为了定量地分析这些数据,将试验数据用加权平均的方法,计算不同参数下的地表体积改变率 S_N ,计算采用下列公式:

$$S_N(\%) = \frac{\sum \pi (a_i^2 - a_{i-1}^2) S_i}{\pi a_N^2 H} \quad (1)$$

其中 a_i 为第 i 个测点到爆源距离; a_N 为计算爆区半径; S_i 为第 i 个测点的下沉量; Q 为一次起爆药量; H 为砂层厚度,本试验中 $H = 0.6\text{m}$ 。表2给出了不同计算爆区半径条件下的体积改变率 S_N 。

4.1 体积改变率与药包埋深的关系

从表2可以看出,在本试验的测量范围内,中远区 ($60\text{cm} \leq a_N \leq 90\text{cm}$) 地表沉降量随着药包埋深的增加而增加,近爆区 $a_N \leq 50\text{cm}$ 内沉降量与药包埋深无明显关系。这正说明了爆炸加密饱和砂可分为两个区域,即近区以爆炸推动砂体运动为主和中远区以振动加密为主。在近区,由于相同药量下药包周围砂体的相对位移和速度梯度变化不大,故沉降量受药包埋深的影响很小。在中远区,沉降来自于爆炸荷载通过地基传递的振动,当药包埋得较深时,通过地基传递的振动能量与幅值都较大,砂体的沉降量必然较大。

表2 H_w, a_N 对体积改变率 S_N (%) 的影响Table 2 Relation between H_w, a_N and volume change percentage

H_w (cm)	a_N (cm)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
20	9.17	8.54	8.80	8.38	7.58	7.15	6.45	5.99	5.36	4.79
30	7.67	7.79	7.54	7.81	7.70	7.54	7.13	6.75	6.17	5.92
40	9.17	8.67	8.94	8.75	8.30	8.00	7.47	6.89	6.39	5.62

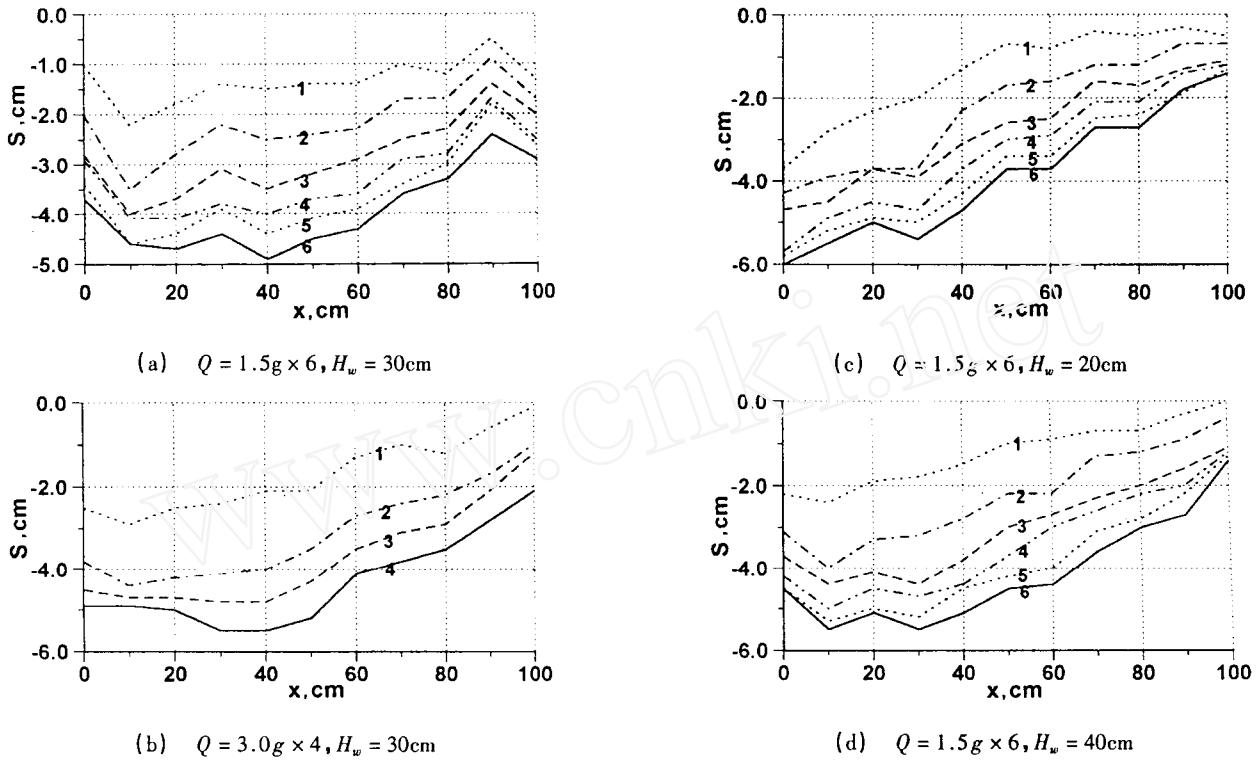


图2 爆后地表沉降量

Fig.2 Settlement after blasting

4.1 体积改变率与药包埋深的关系

从表2可以看出,在本试验的测量范围内,中远区($60\text{cm} \leq a_N \leq 90\text{cm}$)地表沉降量随着药包埋深的增加而增加,近爆区 $a_N \leq 50\text{cm}$ 内沉降量与药包埋深无明显关系。这正说明了爆炸加密饱和砂可分为两个区域,即近区以爆炸推动砂体运动为主和中远区以振动加密为主。在近区,由于相同药量下药包周围砂体的相对位移和速度梯度变化不大,故沉降量受药包埋深的影响很小。在中远区,沉降来自于爆炸荷载通过地基传递的振动,当药包埋得较深时,通过地基传递的振动能量与幅值都较大,砂体的沉降量必然较大。

4.2 在药量、埋深相同的条件下,小药量、多次爆炸的加密总效果较好

图3给出了总药量9.0g、药包埋深30cm,每次起爆按1.5g,3.0g,4.5g三种状态下的下沉曲线。可以看出,1.5g炸药分6次爆炸无论是加密深度还是加密

范围都优于其它两种。结合土力学循环荷载加密松散介质的试验,介质的密度不仅与循环加载的幅度有关,还与加载的往返次数有关。多次爆炸增加了砂体的振动次数,密实效果就要好些。有关砂体密度与药量、爆炸次数之间的关系, Ivanov^[3]首次给出了定量的描述,他给出的计算公式可以说明一些问题并用于指导工程。但是,他的工作没有考虑前一次爆炸砂基密实对后一次爆炸的影响。

4.3 地表下沉量与爆炸次数

在受到同样爆炸作用的条件下,砂体初始密度越小,地表下沉量就越大,这是由砂体自身的性质决定的。研究爆炸加密饱和砂,注意爆炸次数与能量之间的关系。由图2可以清楚的看到,随着爆炸次数的增加,地表下沉量逐渐减小。说明饱和砂初始密度越大,加密越困难。前三次的爆炸占总下沉量的80%,这一结果对工程实践有一定的指导意义。

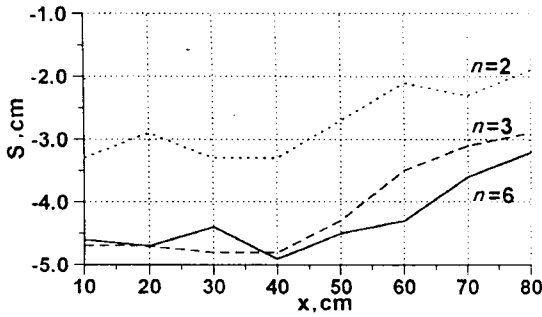


图3 总药量 $Q = 9.0g$ 爆后地表沉降量
Fig.3 Settlement after blasting at $Q = 9.0g$

5 关于地表下沉量的计算公式

我们借用水下爆炸的理论来讨论地表沉降量与药量的关系。事实上,饱和砂中爆炸,砂体中颗粒间的摩擦力与爆炸荷载作用相比可以忽略不计。一旦砂体液化,其力学特性几乎与水相同。因此,就爆炸荷载推动砂体运动而言,完全可以引用水下爆炸的研究方法和结论。

工程试验表明,爆炸加密砂基一般将 Q/H_w^3 控制在 0.08 以下,由此决定着爆炸产生的气团不会直接冲出砂面。高压气体膨胀后,还要在静水压力作用下收缩,与水下爆炸相比,该问题属于深水问题。在这里,类似于深水中爆炸,我们也引入特征长度 L ,它与炸药能量及静水压力有关,即:

$$L = \left(\frac{\alpha Q Q_c}{P_a} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

其中 P_a 为大气压力与砂体静水压力之和; Q 为药量 (kg); Q_c 为炸药爆能 (J/kg); α 为炸药利用常数,取 0.05。

如果认为砂体密度的改变主要来自于爆炸气体推动作用(忽略其它因数的影响),则可直接写出求解相对下沉量的无量纲方程,即

$$\frac{S}{H} = f\left(\frac{L}{R}\right) \quad (3)$$

其中 S 为地表下沉量; H 为砂层厚度; R 为测点到药包位置的 水平距离。

将试验中初始密度相同、不同药量、不同埋深的一组地表下沉量的测量结果,用线性拟合见图 4,得到计算下沉量的公式为

$$\frac{S}{H} = (4.11 - 1.21 \frac{R}{L})/100 \quad (4)$$

取 $\delta(\%) = S/H$, 得

$$\delta(\%) = 4.11 - 1.21 \left(\frac{P_a}{\alpha Q Q_c} \right)^{\frac{1}{3}} R \quad (5)$$

本试验中, $\rho g H_w \ll P_0$, 即 $P_a = P_0$, 则

$$\delta(\%) = K_1 - K_2 \left(\frac{P_a}{\alpha Q Q_c} \right)^{\frac{1}{3}} R \quad (6)$$

其中 $K_1 = 4.11; K_2 = 1.21$ 。

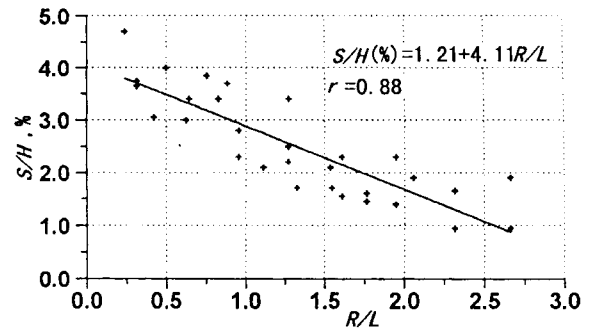


图4 相对沉降量拟合曲线

Fig.4 Linear matching of relative settlement

公式中考虑了药量和静水压力的影响,从中可以看出:增加药量,相对下沉量增大;测点距药包越远,地表下沉量越小。

进一步讨论公式,当下沉量为零时,可以求得药包的作用范围为

$$R_c = \frac{K_1}{K_2} \left(\frac{P_a}{\alpha Q Q_c} \right)^{\frac{1}{3}} R \quad (7)$$

上面的公式与 Ivanov 提出的爆炸作用范围公式

$$R_c = KQ^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

相比,对于相同的炸药和静水压力,两者是一致的。

6 结 论

本文在分析室内模型试验结果的基础上,讨论了爆炸加密饱和砂的机理,认为砂体加密主要发生在砂体运动阶段。研究了药量与地表下沉量的规律后指出在研究的问题中,比药量不是主要的物理参数。本文还总结出了地表下沉量及爆炸作用范围的计算公式。研究表明,高压气体推动砂体运动是引起砂基加密的主要原因。

参 考 文 献

- 1 Charlie W A, Martin J P. Blast induced soil liquefaction phenomena and evaluation. International symposium on soils under cyclic and transient loading, swansea, UK. 1980.
- 2 Charlie W A, Jacobs P J, Doehring D O. Blast-induced liquefaction of an alluvial sand deposit', geotechnical testing journal, GTJODJ, 1992, 15(1)14 ~ 23.
- 3 Ivanov P L, Krutov A P. Compaction of noncohesive soils by explosions. Izdatel' stvor Literaturny Po Stroitel' stvu, Leningrad, 1967.