

冲击载荷下饱和砂土砂面沉降的实验研究*

张均锋 孟祥跃 谈庆明 俞善炳
(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 在落锤式冲击荷载下,通过对饱和砂土砂面沉降量的测量,得到液化前和液化后又重新固结的饱和砂土相对密度的变化规律,以及相对密度增量与初始相对密度的关系。对不同落高下砂面沉降量的测量,得到冲击强度与沉降量的关系。这些结果可指导爆炸法密实砂土地基工程。

关键词 冲击载荷, 饱和砂土, 液化, 固结, 沉降

分类号 TU 441⁺

文献识别码 A

文章编号 1000-6915(2001)04-0519-05

饱和砂土沉降前后相对密实度之间的关系。

1 引言

近几年来,在我国南方沿海等地相继采用了爆炸法密实砂土地基的方法,取得了一定的成效^[1]。然而,爆破工程中遇到了大量的现象目前尚不能给出合理的解释,提出的问题也急需在理论上加以解决和指导,如喷砂冒水的时间、液化的范围、沉降量及其相关因素的确定等。

文[2]认为相对密度是无粘砂土区别于粘性土密实的一个重要判断因子(后者通常要考虑湿度),密实后的相对密度增量与初始相对密度的关系是带状分布的(如图1)。文[3]在实验室对饱和砂土进行了振动和爆炸载荷作用下的模拟实验,对密实前后的砂土结构的密实程度进行了测试,根据砂土容重测定得知,对于细砂来说,孔隙率的减小最大可达35%。文[4, 5]也对爆炸引起饱和砂土沉降作了大量的实验研究,得到了地表下沉量随时间的变化规律。

在考察饱和砂土受到冲击载荷时的排水密实模拟实验中发现了纵向排水通道、横断裂纹等非均匀现象^[6~8]。通过对孔隙水压力和砂面以上纯水层厚度变化的测量可知,两者与时间都不成正比关系,也就是说渗流过程是不均匀的。通过实验观察以及采用高分辨率摄像机进行图像分析,得到了冲击后砂面沉降量随时间的变化规律,对其进行分析得出

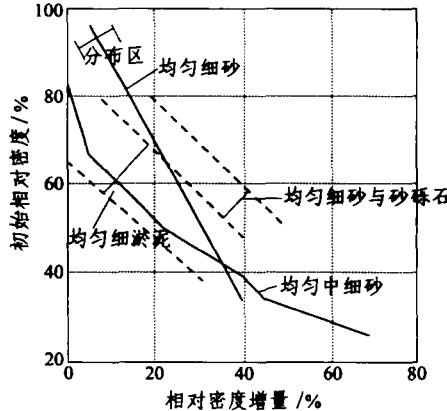


图1 密实后的相对密度增量与初始相对密度的关系

Fig.1 Relationship between increment of relative density and initial relative density

2 实验装置与砂样

2.1 实验装置

冲击实验装置及测量系统如图2所示。砂样装在透明有机玻璃管内。有机玻璃管的内径为90 mm、外径为112 mm、长度为450 mm,管的上下端各有一个法兰,下端是完全密封的,上端法兰开孔(孔径为60 mm),法兰间用拉杆拉紧。对实验中有机玻璃管和砂样间的摩擦作了考察,认为摩擦系数很小,不会影响砂土颗粒(尤其是液化后的砂土颗

1999年11月25日收到初稿,2001年1月17日收到修改稿,2001年1月25日收到改定稿。

* 国家自然科学基金重点资助项目(19572068)和中国科学院重点资助项目。

作者 张均锋 简介:男,1966年生,博士,现为助理研究员,主要从事动载荷作用下饱和砂土的液化密实方面的研究工作。

粒)的沉降。装有饱和砂样的有机玻璃管通过铝合金框架上的滑道垂直自由滑下, 撞击地面上的圆柱型铁块, 从而产生自下而上传播的冲击载荷。以上面的砂面为参考, 固定高分辨率摄像机, 并通过计算机采集图像, 记录砂面的沉降过程。

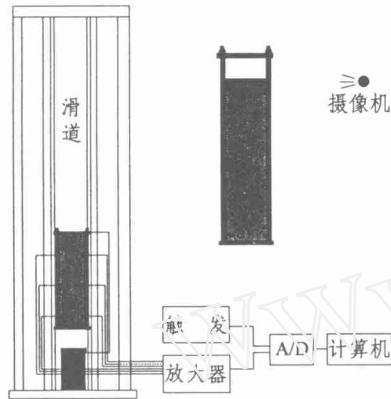


图 2 实验装置

Fig.2 Experimental setup for measuring

2.2 砂样

实验所用砂样是比较细的建筑用砂。首先用孔径为 1.1 mm 的筛子将大的砂粒(主要是砂砾石)筛掉, 再通过标准检粒筛进行粒径的分级。粒径级配如图 3 所示, 其他主要参数如下: 干砂材料的密度 $\rho_s = 2.62 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 有效粒径 $d_{10} = 0.06 \text{ mm}$, $d_{30} = 0.14 \text{ mm}$, $d_{60} = 0.35 \text{ mm}$, 不均匀系数 $C_u = 5.8$, 分级系数 $C_c = 0.93$, 最大孔隙比 $e_{\max} = 0.61$, 最小孔隙比 $e_{\min} = 0.38$ 。实验中饱和砂样的参数分别为: 孔隙比 $e = 0.58$, 相对密度 $D_r = 13\%$, 密度 $\rho = 2.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 30^\circ$, 砂样高为 400 mm。在静水力作用下, 砂样定常渗流的最大渗透系数为 $K_{\max} = 7.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, 最小渗透系数为 $K_{\min} = 4.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。

3 冲击液化后砂面的沉降

3.1 冲击载荷下砂面沉降的测量结果

将砂样提高到一定的高度, 然后使其沿滑道自由下滑, 砂样在撞击地面的铁块后受到冲击作用, 使饱和砂土发生液化并出现排水密实的现象。通过实验观察以及采用高分辨率摄像机进行图像分析, 可得到冲击后砂面的沉降规律。

从实验中可知, 冲击结束十几秒的时间内砂面沉降较慢, 当砂面上出现纵向排水通道口时, 砂面

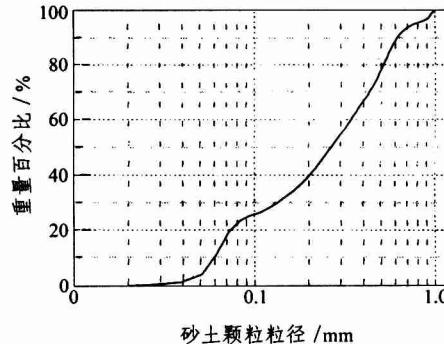


图 3 砂样的粒径级配

Fig.3 Size grading of sand sample

沉降突然加快。随着孔隙水的排出和砂土结构的重新固结, 砂面的沉降越来越慢, 直至没有明显的沉降。图 4 给出了同一砂样进行多次落高为 20 cm 的冲击所造成的砂面沉降随时间的变化规律。

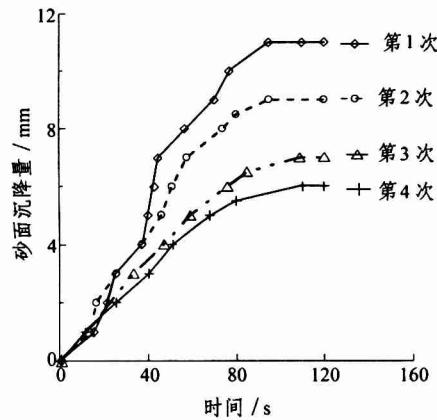


图 4 砂面沉降随时间的变化

Fig.4 Settlement of sand surface with time

从实验结果看, 每次冲击造成的砂面沉降量随冲击次数增加越来越小, 且砂面的沉降过程也逐渐均匀(曲线越来越光滑), 这是因为随着饱和砂土孔隙率的减小、相对密度的增加, 渗流过程越来越均匀。

3.2 相对密度在沉降前后的变化

在实验中, 将第一次冲击后的砂样作为第二次冲击的初始砂样, 第二次冲击后的砂样作为第三次冲击的初始砂样, ……, 在不同落高下对饱和砂土冲击前后相对密度的测量结果见表 1。

将实验结果进行拟合如图 5 (这里只给出落高 30 cm 的), 可得到沉降后的相对密度与初始密度之间的线性关系为

表1 沉降前后相对密度的测量结果

Table 1 Measuring result of relative densities

落高/cm	初始相对密度/% (2~3次平均)	沉降后相对密度/% (2~3次平均)	初始相对密度/% (2~3次平均)
30	13.0	35.0	22.0
	35.0	52.0	17.0
	52.0	64.5	12.5
	64.5	76.0	11.5
	76.0	85.0	9.0
20	85.0	91.0	4.0
	13.0	35.0	22.0
	35.0	49.3	14.3
	49.3	51.0	11.7
	61.0	70.0	9.0
15	13.0	35.0	22.0
	35.0	50.5	15.5
	50.5	65.0	13.0
	65.0	78.0	13.0
	78.0	83.0	5.0
10	13.0	35.0	22.0
	35.0	49.0	14.0
	49.0	61.0	12.0
	61.0	70.0	9.0
	70.0	76.0	6.0

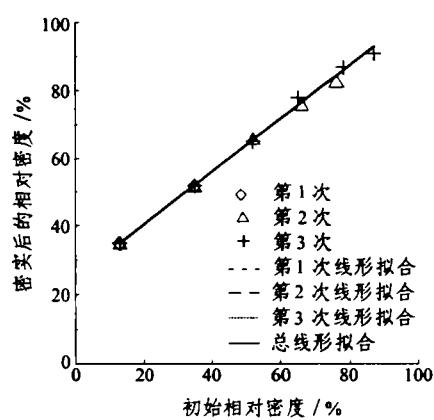


图5 沉降前后相对密度的关系

Fig.5 Change of relative density

$$D_{ij}^{i+1} = A_j + B_j \times D_{ij}^i \quad (1)$$

式中: D_{ij}^i , D_{ij}^{i+1} 分别为第 j 个冲击高度时第 i 次冲击前的相对密度和冲击沉降后(也是第 $i+1$ 次冲击前)的相对密度; A_j , B_j 为无量纲常数。对表 1 拟合, 式(1)中的无量纲常数 A_j , B_j 在不同落高的值见表 2。

表2 不同落高下无量纲常数 A_j , B_j 的值Table 2 Non-dimensional constants A_j , B_j under different impact

冲击落高 / cm	30	20	15	10
A_j	25	25	24	25
B_j	0.81	0.73	0.80	0.74

由式(1)可知, 砂面沉降后相对密度的增量与冲击前初始相对密度的关系也是线性的, 即

$$\Delta D_{ij}^i = D_{ij}^{i+1} - D_{ij}^i = A_j - (1 - B_j) D_{ij}^i \quad (2)$$

图 6 是将表 1 的实验结果(以落高 30 cm 为例)按照式(2)进行拟合的结果。可知, 初始相对密度越小, 沉降后的相对密度增量越大, 砂面的沉降量就越大; 反之, 初始相对密度越大, 沉降后的相对密度就越小, 砂面的沉降量也就越小。

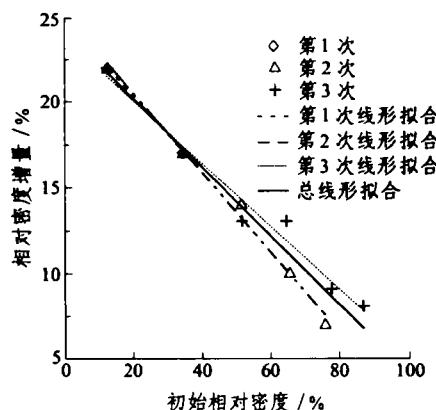


图6 相对密度增量与初始相对密度的关系

Fig.6 Relationship between increment of relative density and initial relative density

从图 5, 6 可知, 冲击后砂土结构的相对密度和相对密度的增量都与初始相对密度有关。那么饱和砂土在多次受到冲击时, 相对密度和相对密度增量又是如何变化的呢? 以冲击落高 30 cm 为例进行分析。按照表 1 给出的实验结果, 将相对密度(初始值不同)随冲击次数的变化规律用图 7(a)表示(N 为冲击次数), 将相对密度增量(初始相对密度为 13%)随冲击次数的变化用图 7(b) 表示。

这些实验结果可以作为参考应用于爆炸密实砂土地基的工程实际。例如在先期实验基础上得到现场砂土性质和类似图 5, 6 这样的关系, 就可预先估算出每次冲击所能达到的密实效果(包括密实后的相对密度以及沉降量等)。

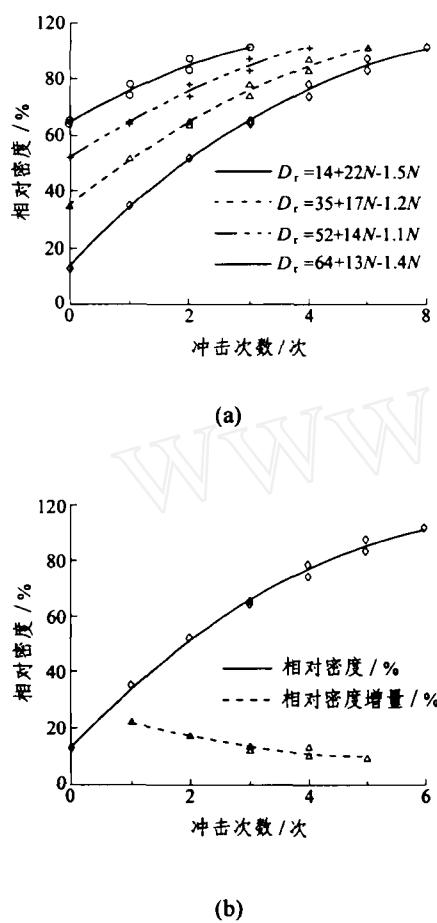


图 7 相对密度和相对密度增量随冲击次数的变化
Fig.7 Changes of relative density and increment of relative density with impact number

3.3 砂面沉降与冲击落高间的关系

不同的冲击落高,造成的砂面沉降量是不同的,也就是说砂样的重新固结与冲击强度是有关系的。实验中采用同样的装砂方法,使每次的砂样参数都不变(初始相对密度为13%),然后在不同的高度下落,待饱和砂土完全固结后,测量冲击造成的砂面沉降量见表3,得到砂面沉降量与冲击落高的关系如图8所示。

表3 不同落高下的砂面沉降量
Table 3 Settlement of sand surface under different drop-height

冲击落高/cm	30	20	15	10	2	1
沉降量/mm(2~3次平均)	11.2	10.5	10.3	10.3	8.0	4.5

由实验结果可知,冲击强度越大,砂面沉降量就越大;但两者间并不是线性关系,而是当冲击达

到一定的强度时,即使再增加冲击强度,砂面沉降量的变化也是相对较为缓慢。

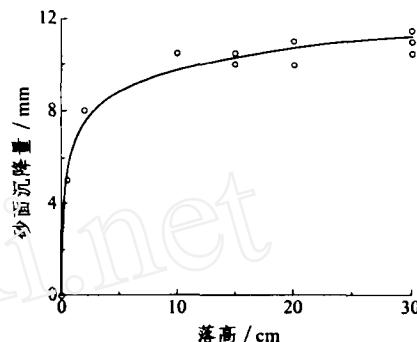


图 8 砂面沉降与落高的关系
Fig.8 Relationship between settlement of sand surface and drop-height

砂面沉降量 S 除了与冲击落高 h 有关外,还与砂样本身的性质(砂样高度 H_0 、孔隙水密度 ρ_w 、砂土材料密度 ρ_s 、砂土初始孔隙比 e_0 、孔隙水的体积压缩模量 c_w 和砂土骨架的体积模量 c_s)有关,即 S 必是这些参数的某个函数:

$$S = f(h, H_0, g, \rho_w, \rho_s, e_0, c_w, c_s) \quad (3)$$

若取砂样高度 H_0 、孔隙水的密度 ρ_w 和重力加速度 g 为独立量,由量纲分析可得

$$\frac{S}{H_0} = f\left(\frac{h}{H_0}, \frac{\rho_s}{\rho_w}, e_0, \frac{c_w}{\rho_w g H_0}, \frac{c_s}{\rho_w g H_0}\right) \quad (4)$$

式(3)、(4)的 f 不是同一个函数(只为方便记)。

在实验中, ρ_w , ρ_s , e_0 , c_w , c_s 不变, 上式除第一项外, 全是不变量, 故有

$$\frac{S}{H_0} = f\left(\frac{h}{H_0}\right) \quad (5)$$

对表3中实验结果无量纲化后进行拟合,可得砂面沉降量与落高的关系为

$$\frac{S}{H_0} = 0.29 + 0.035 \ln\left(\frac{h}{H_0}\right) \quad (6)$$

这个实验结果同样可指导工程实际。例如,在爆炸密实地基时,为了达到一定的密实度,不能只是一味地加大爆破药量,因为当药量超过某一重量时,即使再加大药量,密实的效果也不会有明显改善。相反,按照图7中相对密度增量与冲击次数的关系,应当适当减小爆破的药量而进行多次爆破。这样从最终密实效果上看,在消耗等量的炸药时,

采用小药包多次爆破的效果会比采用单一大药包一次爆破的效果更好。

此外,由图4砂面沉降与时间的关系,可计算出渗流过程中最大的渗透系数。在实验中,最大的强化渗透系数是静水压力下最大渗透系数的4~6倍。例如,由图4计算的 $k(t)|_{\max} = 4.0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ 。因此,最大的强化渗透系数要比静水力实验得到的最大渗透系数($k_{\max} = 7.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)大5.5倍。

4 结语

通过对砂面沉降量的测量,得出饱和砂土液化前和液化又重新固结后的相对密度的变化规律,以及相对密度增量与初始相对密度的关系。对不同落高下砂面沉降量的测量,可得到冲击强度与沉降量的关系。这些实验结果所得出的结论与文[3, 7]中的结果基本一致,都可作为参考推广应用到饱和砂土地基的密实处理工程中。值得注意的是液化后的渗流不再是均匀的,即不再符合Darcy定律,而是一种强化的渗流;特别是由于强化了的渗流造成砂土结构的破坏现象(如出现排水通道),更值得进一步探讨,因为这与岩土工程中管涌产生的机理是一致的。

参 考 文 献

- 1 李世海, 刘以刚, 米而千等. 爆炸加密饱和松散介质技术及其发展[A]. 见: 栾茂田编. 第五届全国土动力学学术会议论文集[C]. 大连: 大连理工大学出版社, 1998
- 2 Byron J Prugh. Densification of soils by explosive vibration[J]. Journal of the Construction Division, ASCE., 1963, 89(1): 79~101
- 3 Ivanov P L. Compaction of Noncohesive Soils by Explosion[M]. Leningrad: Izdatel'stvo Literatury Po Stroitel'stvu, 1967. Translated from Russian by the Indian National Scientific Documentation Center, New Delhi. Published in 1972 for the U. S. Department of Interior, Bureau of Reclamation and the National Science Foundation, Washington, DC
- 4 李世海, 刘以刚, 燕琳. 饱和砂中爆炸地表下沉量随时间变化规律的理论研究[A]. 见: 霍永基编. 工程爆破文集第五辑[C]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993
- 5 燕琳, 李世海, 刘以刚. 爆炸引起饱和砂土地表沉降的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 50~53
- 6 张均锋, 孟祥跃, 俞善炳等. 冲击荷载下饱和砂土渗流和破坏的实验研究[J]. 力学学报, 1999, 31(2): 230~237
- 7 孟祥跃, 张均锋, 俞善炳等. 冲击载荷下饱和砂土中孔隙水压力的测量及其与液化密实关系的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3): 263~267
- 8 张均锋. 冲击载荷下饱和砂土渗流强化与结构破坏的实验研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 1998

LABORATORY STUDY ON THE SETTLEMENT OF SAND SURFACE OF SATURATED SAND UNDER IMPACT LOADING

Zhang Junfeng, Meng Xiangyue, Tan Qingming, Yu Shanbing

(Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

Abstract The settlement of saturated sand in a cylinder induced by impact loading is measured. The changes of relative density and initial relative density are also deduced. The relationship between intensity of impact and settlement of sand surface is obtained by changing the drop-height of sand sample. The measured results are identical to related correlative reference and can be referred and generalized for application in engineering.

Key words impact loading, saturated sand, liquefaction, consolidation, settlement