

压缩波在饱和软土中的传播试验

俞儒一 赵洪顺 黄士兴 虞国桢

(1981年10月4日收到)

文中介绍了在实验室内“核爆炸压力模拟器”所产生的压力在饱和软土中引起的压缩波的传播实验结果。实验结果表明在土中压缩波的传播速率需要考虑它的含气量——就是当含气量稍高时，波速比水中声速小很多，在一定距离后可能形成冲击波。文中并给出了土体的动变形模量等。

一 前 言

核爆炸冲击波在土中传播的速度、波形及土壤受动态压力作用时的侧压力系数、变形模量等是土中防护工程设计的重要参数。压缩波在非饱和土、岩石以及水中的传播已有大量的文献作了描述，研究得稍较成熟。对于它在饱和软土中的传播，由于存在“气相”等复杂影响以及实验条件的限制，在理论及试验研究方面进展均较缓慢。文献[1]—[3]对国外情况作了一些介绍。但有的资料，如[4]，在研究这类问题时不考虑“气相”的影响，而导致所得结论在工程实用中具有较大的局限性。国内尚未见这类资料发表。由此给抗核爆炸的防护工程的设计工作带来一定困难。

本文介绍了利用爆炸模拟器对饱和软土，在压缩波作用下，传播速度以及变形模量等特性的室内试验结果。

二 试验条件

本实验模拟的核爆炸压力是由核爆炸压力模拟器产生的。该设备外形如图1所示。由它所产生的作用在介质表面上的压力时程曲线如图2所示。

本实验中空压波形参数为：超压峰值 $\Delta P_m = 0.5 - 3.05 \text{ kg/cm}^2$ ；升压时间 $t_c = 4 - 6 \text{ ms}$ ；正压持续时间 $t_p = 0.8 - 1 \text{ sec}$ 。

模拟器加载面直径1.9米，试验腔内装以试验用土。加载表面上压力分布不均匀度小于10%。模拟器内的土体，在近土壤表面的中间区域内受动态压力作用的一定时间内，可视为处于平面压缩波作用状态。

土为淤泥质亚粘土，装入模拟器后考虑到已受扰动，故进行了连续加压 0.5 kg/cm^2 ，固结15—30天（排水条件下）。对实验用土取样测试其基本物理和力学参数数据值如表1所示。

测试用空压传感器为BPR型。土压传感器为自制的双面扁园柱形的TSY型及TDY型，其自振频率分别为4kc及20kc。等效弹模大于土的变形模量十倍以上。

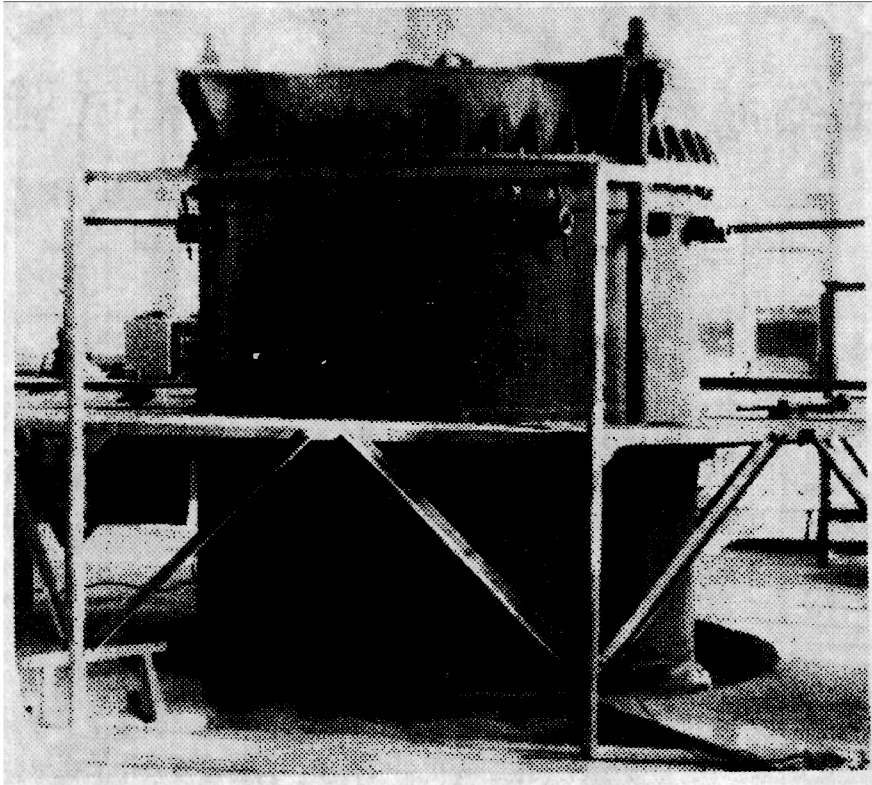


图1 核爆炸压力模拟器外形

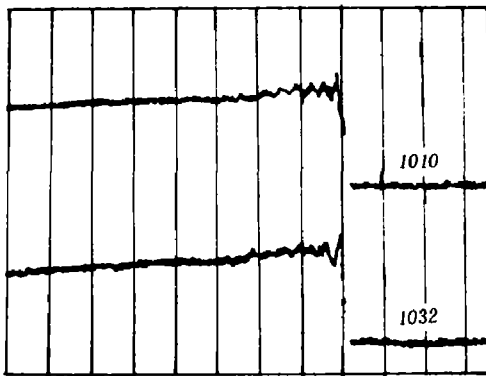


图2 在核爆炸压力模拟器内产生的动态压力时程曲线

表1 淤泥质亚粘土物理力学指标

状 态	项 目	含水量 w (%)	孔隙比 e	容 量 r ($\frac{g}{cm^3}$)	压缩模量 \bar{a} ($\frac{cm^2}{kg}$)	内聚力 c ($\frac{kg}{cm^2}$)	内摩擦角 ϕ	饱和度 G (%)
试验用土 (爆前)		40.8	1.16	1.78	0.092	0.03	$5^{\circ} 28'$	95.8
试验用土 (爆后)		43.1	1.23	1.76	0.088	0.035	$5^{\circ} 48'$	96.3
该土现场取样测值		40— —44	1.1— —1.25	1.75— —1.80	0.092	0.06— —0.10	12° — 15	95—99

三 试验结果

(一) 关于压缩波的传播速度

试验表明,对本试验用土(含气量 $\alpha = 4\%$,下同),当峰值压力在 $0.50 - 3.05 \text{ kg/cm}^2$ 时,波前的传播速度为 $91 - 114 \text{ m/sec}$,波峰的传播速度可在较大的范围内变化,其值为 $62 - 178 \text{ m/sec}$ 。峰值压力小,波速低;峰值压力大,波速高。当用声波法测试声波的传播速度时,高达 1200 m/sec 。实测数据见表2。

表2 波前及波峰传播速度

炮次	100	101	102	103	104	105	范围
峰值压力(kg/cm^2)	0.50	0.81	0.80	3.05	2.93	3.00	0.50 - 3.05
波前速度(m/sec)	114.5	91.4	99.0	111.8	104.0	/	91 - 115
波峰速度(m/sec)	62.0	104.0	95.0	177.7	163.9	175.8	62 - 178

由此可见:

1 核爆炸条件下,饱和软土中压缩波波前的传播速度,当土体中含气量 $\alpha \neq 0$ 时,不能如目前国内某些资料所介绍的以水中声速($c_0 = 1520 \text{ m/sec}$)来表征。本试验表明,波前及波峰的传播速度不仅与含气量有密切关系,还与峰值压力的大小有密切关系(特别是对于波峰的传播速度)。

2 在饱和软土中,波前和波峰的传播速度之比并非近似保持为常数。对于本实验用土,当 $\Delta P_m = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ 时, $V_{st} < V_m$;但当峰值压力增大时, $V_{st} > V_m$ 。 ΔP_m 愈高,超前愈快。所以,在工程设计中,当土中含气量不等于零时,简单地取水中声速作为爆炸压缩波波前在饱和软土中的传播速度将偏大。

(二) 波形

压力波波形的工程角度来看,至关重要的是在传播过程中峰值压力上升时间 t_c 的变化情况。本实验表明:当 $\Delta P_m = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ 时,随传播距离 R 的增加 t_c 缓慢地增加;当 $\Delta P_m = 0.80 - 3.05 \text{ kg/cm}^2$ 时,随 R 增加 t_c 减少。峰值压力小时,减小较慢;峰值压力大时,减小迅速。图3为根据部份实测数据绘制的 $R - t_c$ 典型变化情况。图4为 $\Delta P_m = 0.81 \text{ kg/cm}^2$ 及 $\Delta P_m = 2.93 \text{ kg/cm}^2$ 时的实测波形。图4中*号部位有一下凹及以后部份的上翘,系由于试验设备的边壁摩擦所引起的剪力波影响及设备底部反射等因素所造成。但它们对波形的起跳点位置及波形的前沿上升的斜率并无影响。图中最上面的一条波形注有BPR字样者系模拟器所产生的作用在介质表面上的动态压力。

由此可见:

(1) 在饱和软土中, t_c 的变化规律并不像非饱和土中那样单一地随 R 的增加而增加,

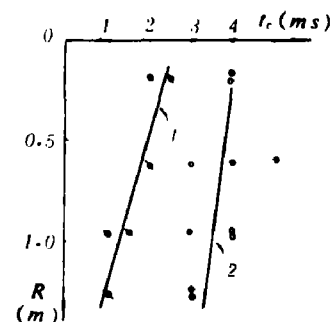


图3 饱和软土中 $R - t_c$ 试验曲线, 1. $\Delta P_m = 3 \text{ kg/cm}^2$
2. $\Delta P_m = 0.8 \text{ kg/cm}^2$

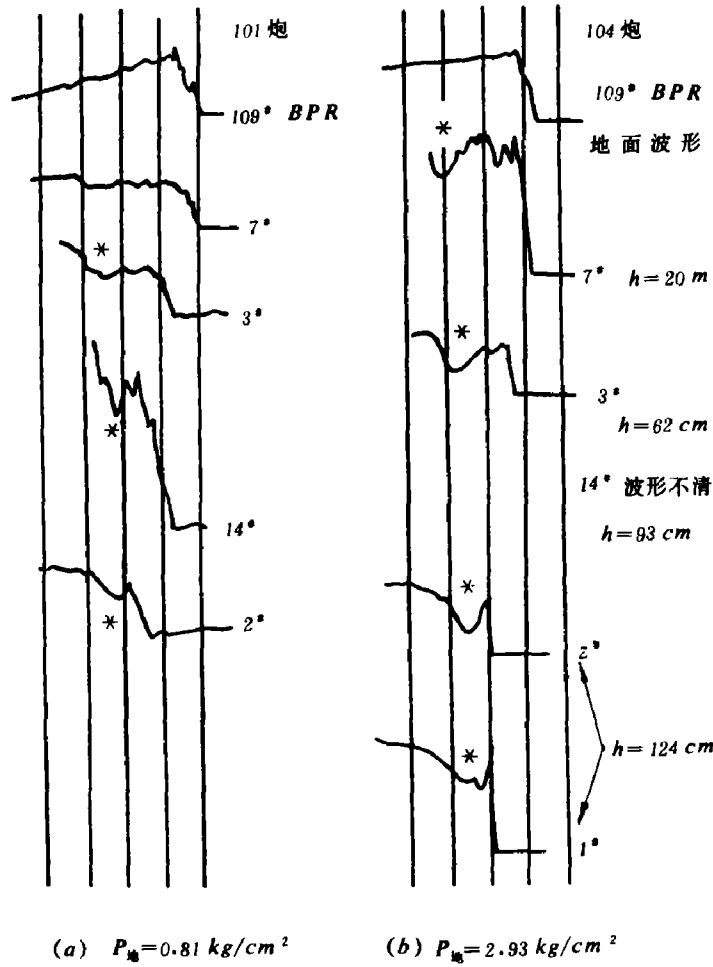


图4 不同深度 h 处实测波形

而是在小压力范围内随 R 增加缓慢地增加；在较大压力时，随 R 增加而减小。压力愈高，减小愈快。

(2) 在常用工程压力范围内，饱和软土中的压缩波传播一定距离后，将有可能形成冲击波。

表3 动侧压力系数 $\xi_{动}$ 实测数据

炮 次	100	101	102	103	104	105	平均
$\Delta P_{水平} (kg/cm^2)$	0.44	0.84	0.83	3.22	3.23	3.28	
$\Delta P_{垂直} (kg/cm^2)$	0.42	0.72	0.75	2.97	3.01	3.06	
$\xi_{动} = \Delta P_{垂直} / \Delta P_{水平}$	0.95	0.86	0.90	0.92	0.93	0.93	0.92

(三) 侧压力系数

对本实验用土, 由静态土工常规试验测得内摩擦角为 $5^{\circ}28' - 5^{\circ}48'$ 。由此算得在静力作用下侧压力系数 $\xi_{st} = 0.81$ 。同一试验用土, 在本实验动态压力作用下, 测得其侧压力系数 $\xi_{dt} = 0.92$ 。实测数据见表 3。

(四) 动变形模量

变形模量是研究波在土中传播及土中结构动力分析的重要参数。同一种土, 随测试方法的不同, 特别是动态压力作用下其加载速度的不同, 变形模量可以有数倍乃至百倍以上差异。从工程角度上看, 比较可靠的实验室测试方法是选择一种和工程实际承受的动态压力相似的压力作用于土介质, 测取 $E-\sigma$ 曲线关系。本试验则利用波动理论导出的普遍公式 $v_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}}$, 根据实测的波速推求 E_{dt} 。这种方法常用来测定现场土体的 E_{dt} 。本实验发现, 随着峰值压力的不同, E_{dt} 虽然变化很大, 但是将它和有侧限测得的静态变形模量 E_{st} 比较, 发现二者之比在 6.1—8.0 的范围内变化。其结果见表 4。

表 4 变形模量测试值

压 力	静 态	0—0.5	0.5—1.0	1.0—2.0	2.0—3.0
	动 态	0.5	0.8		2.93—3.05
$E_{dt} (kg/cm^2)$		68.6	177.2		531.8
$E_{st} (kg/cm^2)$		11.1	22.7	50.0	66.7
E_{dt}/E_{st}		6.1	7.8		8.0

由此可见, 对本试验用土, 在上升时间为 $t_c = 4 - 6 ms$ 的爆炸压力作用下有: $E_{dt}/E_{st} = 6 - 8$ 。

四 关于一些问题的讨论

(一) 关于波速

饱和软土中, 波速与土体中的气体的含量有关这一观点在资料 [1]—[3] 中有所阐述, 但未见有实际的或模拟的核爆炸压力波的传播试验报告。本试验在实验室内以模拟的核爆炸压力直接作用于饱和软土, 测得饱和软土中的压缩波速也是遵循与含气量有关这一规律。其中波前的传播速度在定量上大体与资料 [1] 所介绍的小装药化爆结果接近。而波峰的传播速度则还与峰值压力的大小有密切关系。

这里要强调指出的是: 在估计实际地下饱和土地层中的含气量时, 应充分注意由现场从地层深处取出土样时, 由于扰动所带来的含气量的变化。通常用该土样由实验室测得的含气量将比它处于原始状态时的数值要大。这是因为在地下时, 由于存在地层压力, 气体中的可溶解部份大量地溶于水中。土样从地层中取出后, 由于地层压力的消失, 它们会从水中释放出来。同样, 由于地层压力的消失, 即使未溶解于水中的那部份气体也会适当膨胀它们的体积。因此土样中的气体的体积在被扰动前后会有较大的变化。当考虑上述因素后, 将实验室

测定值用于实际工程时加以适当的修正是十分必要的。

(二) 关于波形

众所周知,在介质中传播的波形是由介质实际的本构关系所决定的。对于 $\sigma-\varepsilon$ 曲线凹向应力轴($d^2\sigma/d\varepsilon^2 > 0$)的非线性介质(如饱和软土、水)中传播的压力波在传播过程中,加载段的升压时间 t_c 应当是愈来愈小的,并将最终成为强间断的冲击波形式。本实验用饱和软土的单轴侧限压缩试验的结果(见图5)正表明 $\tau-\varepsilon$ 曲线凹向应力轴的非线性特点。本试验表明在含气量低于某一限值(本试验为4%)的饱和软土中,当峰值压力超过某一数值(本试验中 $\Delta P_m \geq 0.8 \text{ kg/cm}^2$)后,

t_c 是随 R 增加而减小的。其中当压力较大时,例如

当 ΔP_m 大至 3 kg/cm^2 左右, t_c 随 R 增加而减小极为明显。无疑最终会形成冲击波。但是,在现场条件下尚未观察到冲击波现象。实验室工作情况和野外工作情况的差别,土体实际存在的力学性质、应力状态和实验室试验一维状态相比存在的差别,可能是妨碍冲击波形成的原因。当然,由于这方面试验工作本身做得较少,从而难以提供足够的试验依据也是对这一矛盾现象至今未能解决的原因之一。即便如此,在工程设计中,对于饱和软土中 t_c 的计算仍沿用非饱和土中的算法及计算参数,特别是取 $V_w/V_w = 3$ 无疑有可能引入不安全的因素。

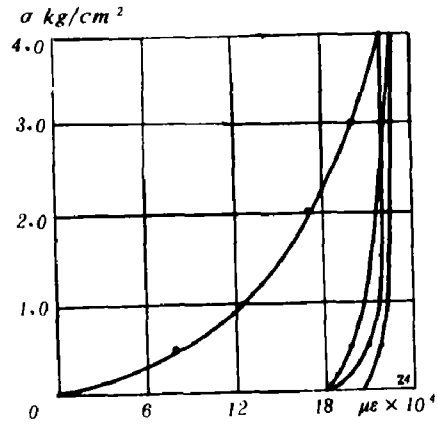


图5 试验用土的实测 $\sigma-\varepsilon$ 曲线

参 考 文 献

- [1] Ляхов Т. М. "Основы динамики взрыва в грунтах и жидких средах" (1964).
- [2] Richart, F. E., Woods, R. D., Hall, J. R., 土与基础的振动 [美] 中国建筑工业出版社 (1970).
- [3] "The air force manual for design and analysis of hardened structures" AFWL-TR-74-102 (1980).
- [4] Nikolayevsky, V. N. "The theory of shock wave propagation in soft water saturated soils" (1971).

TEST OF COMPRESSIVE WAVE PROPAGATING IN SOFT SATURATED SOIL

Yu Ruyi Zao Hongshun Huang Shixing Yu Guozhen

Abstract

This paper introduces the test results of the propagation of compressive waves induced in the saturated soft soil by the dynamic pressure which is generated by means of a "nuclear blast load simulator" in the laboratory. The test results indicate that the velocity of the compressive waves in soil is related to its air content, i. e. when the air content is slightly great, the wave velocity in soil is far lower than that of sound in water. In some cases, shock waves may be formed at a certain depth. Some informations about the dynamic deformation modulus of soil, etc. from the tests are also given.