

# 冲击载荷下饱和砂土中超孔隙水压力的 建立与消散过程\*

张均锋 孟祥跃

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

**摘要** 对落锤冲击造成饱和砂土中的冲击压力进行了测量。通过测量得到了冲击时饱和砂土中超孔隙水压力的建立和消散过程,分析了多次冲击对超孔隙水压力建立的影响,得到了一次冲击就能使饱和砂土达到完全液化的冲击强度临界值。

**关键词** 土力学, 冲击载荷, 饱和砂土, 超孔隙水压力, 液化

**分类号** TU 441+.5

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2003)09-1463-06

## BUILD-UP AND DISSIPATION OF EXCESS PORE WATER PRESSURE IN SATURATED SAND UNDER IMPACT LOADING

Zhang Junfeng, Meng Xiangyue

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

**Abstract** The shock pressure on saturated sand in a cylinder induced by impact loading is measured. The relation between the amplitude of the shock pressure and the drop-height is analyzed in terms of dimensional analysis. The whole build-up and dissipation process of excess pore water pressure is also measured. The experimental result shows that the mechanism of the build-up of excess pore water pressure induced by impact loading is the same as that induced by cycling loading. Only the increasing ratios and amplitudes of the loadings are different. The maximum value of excess pore water pressure at one point in the sand column is equal to the overburden pressure of the corresponding position. The critical intensity value of mono-impact which may cause the saturated sand to be liquefied completely is obtained. The influence of multi-impacts on the build-up of excess pore water pressure is analyzed. For the dissipation of excess pore water pressure, the experimental results show that the higher the drop-height is, the longer the dissipating time is.

**Key words** soil mechanics, impact loading, saturated sand, excess pore water pressure, liquefaction

### 1 引言

冲击造成的突然加卸载作用必然导致饱和砂土结构发生不可恢复变形,使得残余孔隙水压力得以建立、增长。在残余孔隙水压力作用下,又会发生强化渗流及砂土颗粒沉降等,反过来使得残余孔隙

水压力逐渐消散,砂土结构重新固结。这样,孔隙水压力可作为研究饱和砂土动态特性的一个重要参数,在砂土液化以及后期的渗流与结构破坏耦合作用过程中起着非常重要的作用。

饱和砂土的冲击液化与循环载荷下液化的区别在于:冲击载荷的强度高、时间短,具有较强的应力波效应;而循环载荷的作用时间长,超孔隙水压

2002年2月6日收到初稿,2002年3月8日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金重点项目(19832010)。

作者 张均锋 简介:男,1966年生,博士,现任助理研究员,主要从事动载荷作用下饱和砂土的流动破坏方面的研究工作。

力的升高是逐步累积的结果。

目前,对孔隙水压力的测量方面的工作大部分是关于循环载荷下的,而对于冲击载荷下饱和砂土中孔隙水压力的测量,大多又是在爆破现场进行的,且测量长期超孔隙水压力的误差较大(有些是采用竖管的测量办法)。在实验室内的模拟研究方面,文[1]曾记录了爆炸后冲击压力的波形,同时,测量了砂土结构密实过程中超孔隙水压力的变化,以线性模型推导出了计算完全液化了的饱和砂土结构重新固结所需时间的公式。文[2,3]在实验室中作了类似激波管的实验,对孔隙水压力的建立、增长、消散过程进行了测量,研究了一维压缩脉冲载荷作用下初始有效应力、初始密实度、孔隙水压力峰值等参数与液化的关系,但其实验中的装砂管是横向放置,且实验过程是不排水的。此外,文[4~6]也都对饱和砂土动力载荷下孔隙水压力的建立和演化做了研究。

笔者在考察冲击条件下饱和砂土排水密实的模拟实验中,发现了纵向排水通道、横断裂纹等非均匀现象<sup>[7~8]</sup>。孔隙水压力是反映这些现象的基本参数之一。为了研究饱和砂土在排水条件下受冲击载荷时的强化渗流特性和结构破坏与重固结过程,笔者设计加工了一套实验装置,用来测量孔隙水压力的建立与消散过程。

## 2 实验装置与孔隙水压力测量系统

### 2.1 实验装置与测压系统

整个冲击实验装置及孔隙水压力的测量系统如图1所示。砂样装在透明有机玻璃管内,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6 cm),法兰间用拉杆拉紧,法兰可在滑道内上

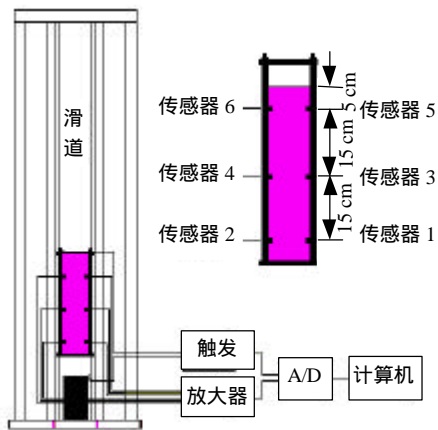


图1 实验装置与测压系统

Fig.1 Experimental setup and pressure measuring system

下自由滑动,滑道宽度可调节(以便变换不同直径的圆管)。在测量孔隙水压力时主要用内径9 cm,外径11.2 cm,长度45 cm的透明有机玻璃管。图1中,靠近底部的铁块右侧有一探针(稍高于铁块),砂样下落过程中首先触到探针,触发测压系统开始采样,信号通过A/D转换,由计算机记录和输出整个冲击过程中压力的变化。对于超孔隙水压力的建立与消散的测量则改为TCFL-8000高速示波器采样(最小采样时间可达50 ns),触发方式为内触发。

### 2.2 传感器及测点布置

#### 2.2.1 早期冲击压力测量系统

将传感器固定在管壁上,使其感受面伸入有机玻璃管内约2 mm。对测孔隙水压力的传感器在其感受面的前端装上一个带很多小孔(孔径0.6 mm)的小“铜帽”,“铜帽”通过螺纹固定在传感器上,使其前端内侧与传感器感受面保持2~3 mm的空隙(实验时先将空隙内气泡除去,使之充满水),使砂土颗粒不直接接触感受面,但孔隙水可自由通过小孔。这样通过小孔中水的传递,就可测得孔隙水压力的变化过程。装砂前,对空管进行冲击,可以验证,传感器感受不到管壁中传播的压力波。

传感器分两排布置如图1,其中,右边的传感器1,3,5的感受面前端不装“铜帽”,测的是饱和砂土中的总应力,而左边的传感器2,4,6的感受面前端装有“铜帽”,测的是孔隙水压力,砂土骨架应力由小“铜帽”承担。左右传感器在同一水平面上,最下边的传感器距下端法兰5 cm,各传感器相互间距为15 cm。

#### 2.2.2 后期超孔隙水压力测量系统

由于实验中的早期冲击压力与后期的超孔隙水压力相差3个数量级,用同一个传感器很难两者兼顾,笔者在测量后期超孔隙水压力时,用较长的细管将早期的冲击压力进行衰减,对长时间的超孔隙水压力来说变化不大,可作为准静态过程。实验中,对衰减冲击压力的细长管的选取极为重要,太细阻尼大,太粗起不到衰减作用,太软容易变形,这样都不利于压力的测量。通过实验比较,笔者采用外径7.8 mm,内径5.8 mm的硬塑料管。塑料管一端用纱网(孔径0.4 mm)包住,分别装在图1所示传感器2和4的位置(密封不透水),细管长度分别为10和7 cm,在长管另一端通过接头装上传感器,用TCFL-8000高速示波器采样。

### 2.3 砂样

实验所用砂样是较细的建筑用砂。粒径级配如

图 2 所示。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  $e_{\min} = 0.38$ , 干砂材料的重度  $g = 26.2 \text{ kN/m}^3$ 。实验中, 饱和砂样的参数为: 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  $\varphi = 30^\circ$ , 砂样高度  $400 \text{ mm}$ 。在静水压力作用下, 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  $k_{\min} = 4.3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。

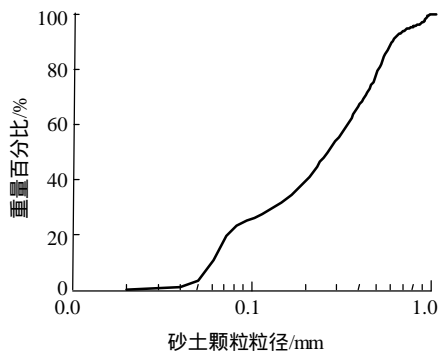


图 2 砂样的粒径级配

Fig.2 Size grading of sand sample

### 3 冲击引起的孔隙水压力

#### 3.1 测量结果

实验时将砂样提到一定高度, 使其沿滑道自由落下, 撞击底部的铁块, 由探针触发, 通过计算机测得冲击压力随时间的变化过程。变换砂样的下落高度即可调节载荷的强度。图 3 为落高 30 cm 时的冲击压力波形(这里仅给出传感器 1, 2 处的情况, 采样时间间隔为  $6 \mu\text{s}$ )。

由图 3 可知, 每条压力曲线中都有 3 组冲击信号, 其中, 第 1 组为首次冲击压力, 170 ms 处的第 2 组为砂样被反弹起又落下后的第 2 次冲击, 250 ms 处的为第 3 次冲击, ...。

变换冲击落高, 就可得到不同冲击强度下总应力和孔隙水压力的变化规律。每一落高至少做 3 次实验, 表 1 给出了各测点的压力峰值(3 次测量的平均值)。

#### 3.2 冲击压力与落高的关系

当饱和砂土垂直下落受到冲击载荷时, 由冲击形成的冲击压力的最大值(砂样底端处的压力峰值  $p_{\text{peak}}$ )的大小不但与冲击落高有关, 而且与砂土介质的性质有关, 即冲击压力峰值必是这些因素的某一确定函数, 即

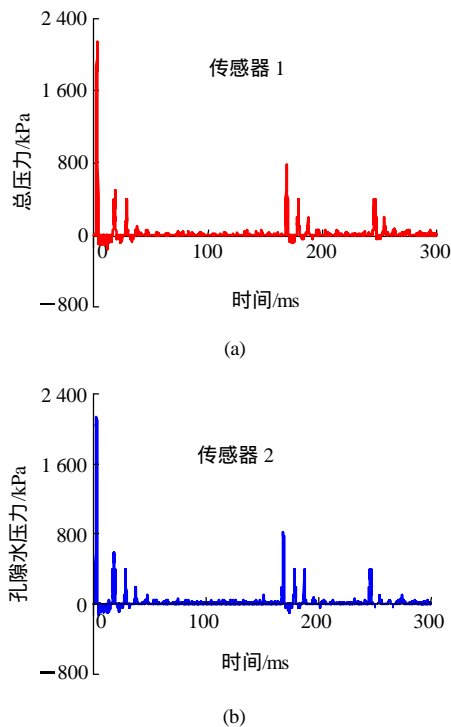


图 3 冲击总压力和孔隙水压力随时间的变化

Fig.3 Variation of total shock pressure and pore water pressure with time

表 1 不同落高下的压力峰值

Table 1 Peak-values of pressure under different drop-heights

冲击落高/cm	压力峰值/ $10^3 \text{ kPa}$					
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
30	2.10	2.10	1.80	1.60	0.80	0.73
20	1.70	1.70	1.50	1.40	0.65	0.56
15	1.50	1.50	1.30	1.22	0.44	0.40
10	1.30	1.30	1.10	0.95	0.33	0.29
5	0.98	0.97	0.69	0.46	0.21	0.11
2	0.49	0.48	0.36	0.32	0.14	0.07

$$p_{\text{peak}} = f(r_s, r_w, c_s, c_w, d_{10}, c_u, n, R, H_0, h, g, \Lambda) \quad (1)$$

式中:  $p_{\text{peak}}$  为冲击压力峰值;  $f$  为某一函数;  $r_s, r_w$  分别为砂土材料和孔隙水的密度;  $c_s, c_w$  分别为砂土骨架和孔隙水的体积压缩模量;  $d_{10}, c_u$  分别为砂样的有效粒径和均匀系数;  $n$  为孔隙率;  $R$  为管径;  $H_0$  为砂样高度;  $h$  为冲击落高;  $g$  为重力加速度。这里, 假设冲击过程中孔隙水还来不及渗流, 故不考虑水的粘性与渗透性。

根据  $\pi$  定理, 由式(1)可得

$$\frac{P_{peak}}{r_w g H_0} = f_1 \left( \frac{r_s}{r_w}, \frac{c_s}{r_w g H_0}, \frac{c_w}{r_w g H_0}, \frac{d_{10}}{H_0}, c_u, n, \frac{R}{H_0}, \frac{h}{H_0}, L \right) \quad (2)$$

在本实验中，上式等号右边括号内的前 7 个无量纲数是不变的，故有

$$\frac{P_{peak}}{r_w g H_0} = K_1 \left( \frac{h}{H_0} \right)^a \quad (3)$$

式中： $K_1$ ， $a$  为无量纲常系数。根据各传感器测量的结果与表 1，对实验数据进行拟合(如图 4)，可得到冲击压力随竖直落高的变化规律如下式：

$$\frac{P_{peak}}{r_w g H_0} = 6.5 \times 10^2 \left( \frac{h}{H_0} \right)^{0.53} \quad (4)$$

式中： $H_0$  取实验中砂样加装的高度 40 cm。

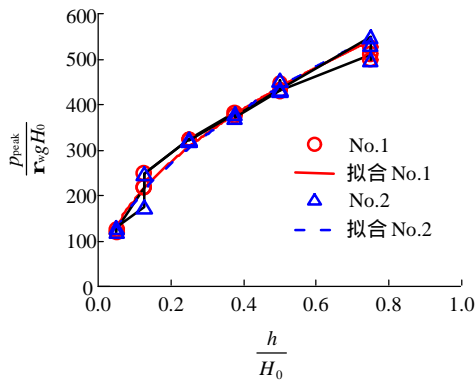


图 4 冲击压力峰值与落高的关系

Fig.4 Peak-values of shock pressure versus drop-heights

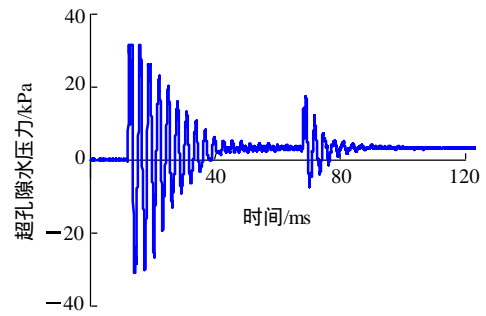
### 4 超孔隙水压力的建立与增长

冲击压力反映的是载荷的强度和作用时间。在冲击过程中没有发生明显的渗流，冲击结束时也没有出现文[5]所述的横断裂纹、纵向通道等现象，砂面沉降也是在后期的超孔隙水压力作用下发生的，因此，有必要对长时间的超孔隙水压力的变化历程进行测量。

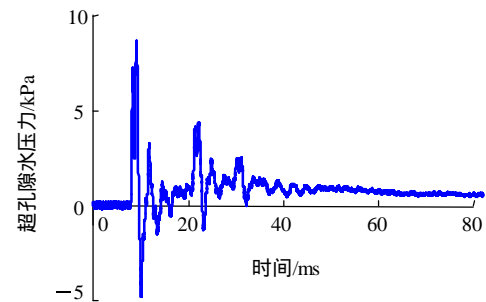
#### 4.1 两次或多次冲击对超孔隙水压力建立的影响

由图 3 可知，在本次落锤实验中，砂样受到冲击后被弹起，再下落又受到冲击，…，如此经受几次冲击。那么，多次冲击对超孔隙水压力的建立有何影响？图 5(砂样高度 35 cm)给出了两次或多次冲击时超孔隙水压力随时间的变化(这里只给出传感器 2 的采样，采样改用 TCFL-8000 高速示波器)。

由图 5(a)可以看出，砂样在受到第一次冲击时，只要载荷强度足够大(超过某一临界值)，超孔隙水压力就能稳定在 4 kPa 左右(近似等于砂样的初始有效上覆压力值)，第二次以后的冲击对超孔隙水压力的稳定值的大小没有影响。但是，由图 5(b)可知，当第一次冲击的载荷强度低于这个临界值时，超孔隙水压力就达不到 4 kPa。在这里，笔者引入循环载荷下砂土液化的常用概念，当超孔隙水压力值达到初始有效上覆压力值时，则称饱和砂土的状态为完全液化；而当超孔隙水压力值低于初始有效上覆压力值时，称这种情况下饱和砂土的状态为部分液化或不完全液化。图 5 说明，当第一次冲击载荷的强度超过某个临界值时，砂土就会完全液化；当第一次冲击载荷的强度小于某个临界值时，砂土只能是部分液化，此时，若有连续第二次或多次的冲击，则孔隙水压力会继续增长，否则，孔隙水压力就会逐渐消散。



(a)



(b)

图 5 多次冲击的超孔隙水压力随时间的变化  
Fig.5 Excess pore water pressure versus time under multi-impacts

#### 4.2 一次冲击下超孔隙水压力的建立

从前面分析知道，一次冲击时，只要载荷强度超过某个临界值，就可使超孔隙水压力完全达到最大值。图 6 是砂土受一次冲击时超孔隙水压力的两条典型的实验曲线。

由图 6(a)可知，饱和砂土在受到足够强的冲击

时, 超孔隙水压力的稳定值达到了初始有效上覆压力值(约 4 kPa), 并能维持该值一定的时间, 也就是说饱和砂土已完全液化。而图 6(b)中, 当饱和砂土所受的冲击强度不够大时, 超孔隙水压力没有达到初始有效上覆压力值, 或者刚刚达到就开始下降, 这说明砂土没有完全液化, 而是部分液化。同时可看出超孔隙水压力的上升过程(图 6(b)中, 从 10~30 ms): 当压力的幅值比超孔隙水压力大时, 超孔隙水压力叠加在冲击压力上, 且其幅值也很小, 可通过计算压力变化的中轴线得到; 当压力衰减到较小的幅值时, 超孔隙水压力就较为明显了。如果冲击仅仅引起饱和砂土的部分液化, 则超孔隙水压力在冲击引起的振动效应停止后就开始消散(图 6(b))。应当注意到, 上述实验中, 冲击载荷的幅值相对来说都不是很大(小于 100 kPa), 可以认为, 冲击载荷在这个范围内引起饱和砂土超孔隙水压力的建立与循环载荷引起的超孔隙水压力相比, 其不同之处, 是加载速率(频率)及载荷强度(幅值)。

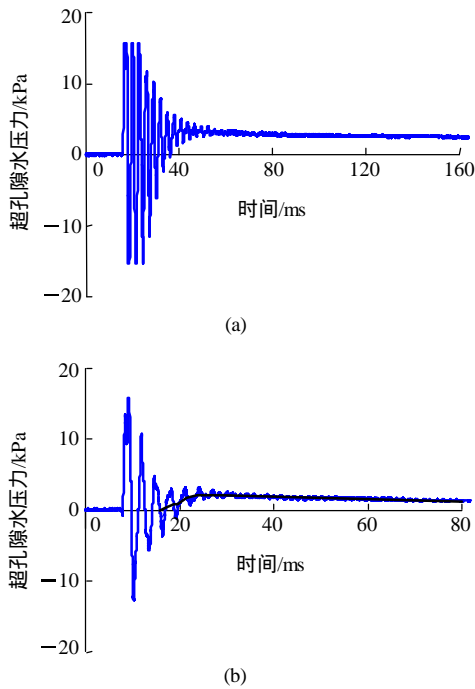


图 6 一次冲击下超孔隙水压力的随时间的变化  
Fig.6 Excess pore water pressure versus time under mono-impact

### 4.3 造成砂土液化的冲击载荷强度临界值的确定

为了进一步探讨冲击载荷强度与超孔隙水压力之间的关系, 实验中需控制冲击的强度, 使饱和砂土只受一次冲击, 且载荷强度逐渐加大。实验测得的压力曲线见图 7。

由实验结果可知, 当一次冲击压力的强度低于

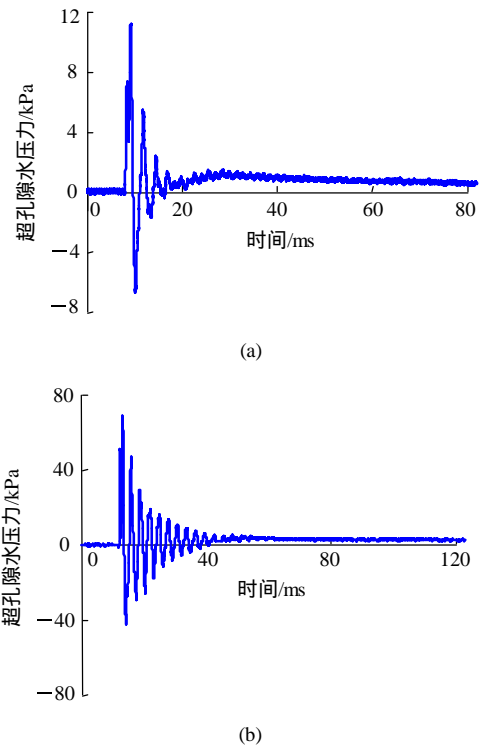


图 7 一次冲击下超孔隙水压力的建立  
Fig.7 Build-up of excess pore water pressure under mono-impact

70 kPa 时, 超孔隙水压力的值或者低于初始有效上覆压力值(4 kPa)或者刚达到又很快下降, 见图 7(a)。因此, 使饱和砂土中超孔隙水压力稳定在初始有效上覆压力值所需要的冲击压力强度为 70 kPa。当饱和砂土受到的冲击载荷强度低于该临界值时, 砂土只能被部分液化; 而当冲击载荷强度大于该临界值时, 砂土就会完全液化。

### 4.4 超孔隙水压力的长期消散

饱和砂土在较强的冲击载荷下, 超孔隙水压力完全建立起来, 即达到完全液化状态。在超孔隙水压力作用下, 砂土中将发生渗流和结构破坏, 同时破坏了的结构又会使渗流逐渐强化。随着孔隙水的不断排出, 超孔隙水压力逐渐消散, 相对其建立时间来说, 消散过程是一个长期的过程。

实验得到的超孔隙水压力消散过程见图 8(砂样高度 40 cm, 图 8(a), (b)对应的落高分别为 30 cm, 2 cm)。可以看出, 超孔隙水压力都达到了最大值, 即初始有效上覆压力(传感器 2 处为 4 kPa、传感器 4 处为 2 kPa)。但持续时间却不相同: 冲击载荷越强(落高越高), 超孔隙水压力持续时间越长; 此外, 传感器 2 处的超孔隙水压力消散比传感器 4 处的要早一些, 当其压力接近传感器 4 处的压力时, 两者一同消散。

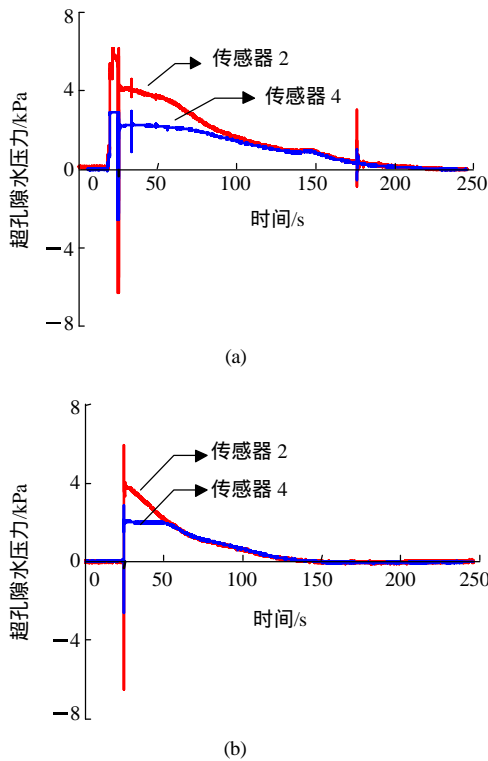


图 8 超孔隙水压力随时间的消散过程

Fig.8 Dissipating process of excess pore water pressure versus time

很显然，超孔隙水压力的消散与饱和砂土中渗流的变化、结构的重新固结和沉降等有直接关系。

### 5 结 语

冲击造成饱和砂土中的冲击压力反映了载荷的强度、加载速率与作用时间，而对多次和一次冲击时饱和砂土的超孔隙水压力建立过程的测量结果表明：当一次冲击的载荷强度超过某个临界值时，超孔隙水压力的稳定值就能达到初始有效上覆压力(即

饱和砂土完全液化)，第二、三次冲击对超孔隙水压力的建立没有影响；而当第一次冲击的强度低于该临界值时，超孔隙水压力的稳定值达不到初始有效上覆压力，此时，第二次、第三次冲击将使超孔隙水压力继续增加。饱和砂土的冲击液化是由于加载速率高、冲击的载荷强度大于临界值；而循环载荷下砂土的液化是多次循环加卸载作用、超孔隙水压力逐步累积达到初始有效上覆压力而造成的。

### 参 考 文 献

- 1 Ivanov P L. Compaction of noncohesive soils by explosions[R]. Izdatel' stvo Literatry Po Stroitel' stvu, Leningrad, Translated from Russian by the Indian National Scientific Documentation Center, New Dehli, Published in 1972 for the U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation and the National Science Foundation, Washington, DC, 1967
- 2 Veyera G E, Charlie W A. Liquefaction of shock loaded saturated sand[A]. In: Cakmak A S ed. Soil Dynamics and Liquefaction[C]. New York; Elsevier Science Publisher, 1987, 205~219
- 3 Jone M B, Deanna S D, Charlie W A. One-dimensional shock and quasi-static liquefaction of silt and sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(10): 1 874~1 889
- 4 钟贻军, 牟崇元. 砂土振动液化危险性分析方法比较研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 87~89
- 5 鲁晓兵, 张加华, 杨振声. 饱和砂土中孔压的演化过程[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(增): 766~769
- 6 雷学文, 王吉利, 白世伟等. 动力排水固结中孔隙水压力增长和消散规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 79~82
- 7 张均锋, 孟祥跃, 谈庆明等. 冲击载荷下饱和砂土砂面沉降的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 519~523
- 8 张均锋, 孟祥跃, 俞善炳等. 冲击载荷下饱和砂土渗流和破坏的实验研究[J]. 力学学报, 1999, (2): 230~237

## 新书简介

《城市地铁建设与环境岩土工程》一书由史佩栋主编，孙 钧、刘建航主审，45 万字，订价 80 元。

该书收入 2002 年 12 月 18~20 日在杭州举行的“地下工程高级技术论坛——城市地铁建设与环境岩土工程”的报告和论文。全书分为：(1) 特邀报告(9 篇)，(2) 考察报告与国外动态(2 篇)，(3) 专题论述(15 篇)，(4) 个案报道及其他(7 篇)。四大部分共 33 篇。这些篇章凝聚了我国各地(包括台湾地区)在地铁/捷运及相关领域中长期积累的宝贵经验，分析了某些重大事故，报道了最新的科研成果和技术创新，同时也提出了一系列有待进一步探讨的课题。

该书可供从事地铁/地下工程的规划、设计、施工、管理、科研、教学的科技人员及决策者阅读、研究与参考。有兴趣的读者可通过下列地址订阅：邮编：310011，杭州莫干山路 470 号二楼姚紫萍，电话/传真：0571-88847750。