

冲击载荷下饱和砂土中流动和破坏的 X 光观测*

孟祥跃 张均锋 谈庆明 俞善炳

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 介绍脉冲 X 光机和医用 X 光机的特性,应用这两种设备进行一系列饱和砂土的冲击加载实验。利用医用 X 光机拍摄到了饱和砂土在冲击载荷作用下产生的横断裂缝、纵向排水通道以及密实沉降的照片,得到了横断裂缝和纵向排水通道的出现规律,从而为研究饱和砂土冲击液化后结构破坏与密实沉降的机理提供了一种实验观测手段。

关键词 冲击载荷, 饱和砂土, 流动和破坏, 沉降, X 光

分类号 TU 441+.5, O 347.1

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2002)06-0803-05

1 前言

饱和砂土是一种充满水的多孔介质,在冲击载荷的作用下会发生液化现象^[1~3],形成孔隙水压力^[4]。随着孔隙水压力的不断消散,就会出现饱和砂土的密实和沉降。在密实沉降的过程中,饱和砂土中发生了流动和破坏的现象。

为了搞清饱和砂土冲击液化和密实排水等过程的机理,必须对其内部流动和破坏的过程进行实验观测。但从文献资料调研情况来看,有关饱和砂土内部流动和破坏过程的观测资料还未看到。因此,本文尝试用 X 光机进行观测,利用医用 X 光机拍摄饱和砂土在冲击载荷作用下产生的横断裂缝、纵向排水通道以及密实沉降的照片,得到横断裂缝和纵向排水通道的出现规律,从而为研究饱和砂土冲击液化后结构破坏与密实沉降的机理提供一种实验观测手段。

2 实验现象简介

饱和砂土在冲击载荷作用下会发生液化和密实现象,在其内部则出现砂土结构的破坏和流动,即砂土内部的横断裂缝和纵向排水通道^[5~8]。在

砂面沉降的过程中,横断裂缝和纵向排水通道逐渐消失。在圆柱形的有机玻璃管以及有机玻璃扁盒实验中,均观察到了下面 3 类典型现象:

- (1) 在透明有机玻璃侧面,发现饱和砂土的结构中出现了横断裂缝;
- (2) 在饱和砂土的上表面可看到渗流过程中形成的纵向排水通道口;
- (3) 从透明有机玻璃的侧面还可以观察到砂土面的沉降过程。

图 1 即是砂土冲击地面后出现的横断裂缝的照片,图 2 为砂土中发生渗流时纵向排水通道形成的表面大鼓包的照片。



图 1 冲击后出现的横断裂缝
Fig.1 Horizontal cracks

2000年5月28日收到初稿,2000年8月23日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(19572068)和中国科学院重点基金资助项目。

作者 孟祥跃 简介:男,40岁,硕士,1985年毕业于中国矿业大学建筑系,现任副研究员,主要从事动载作用下饱和砂土中的破坏和流动现象的研究工作。

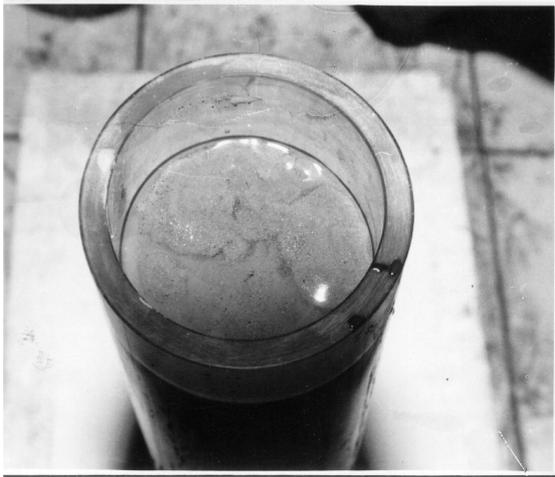


图2 纵向排水通道形成的表面大鼓包

Fig.2 Large surficial bubbles

由于横断裂缝可以从侧面观察到, 因此其产生、发展以及消失的过程可以用摄像机记录下来。纵向排水通道则只能观察到上表面出现的涌砂排水, 而具体到其内部的排水通道是怎样产生的、如何发展的以及如何消失的, 则无法用肉眼观察到。笔者曾尝试用超声波测量的方法来探测纵向排水通道的特性, 但由于纵向排水通道比较细, 而其本身就是细砂和水的混合物, 要求的分辨率比较高, 而超声波测量方法目前还达不到这么高的分辨率。为了搞清砂土在冲击载荷作用下内部横断裂缝和纵向排水通道的产生、发展以及消失的规律, 决定利用X光的穿透性, 用X光机来观测砂土内部横断裂缝和纵向排水通道的特性。

3 X光机的特性

X射线是由X射线管产生的, 其波长介于紫外线与 γ 射线之间, 为 $1019 \text{ \AA} \sim 0.006 \text{ \AA}$ 。X射线也是电磁辐射的一种, 没有质量, 不带电荷, 因此不受任何电场或磁场的偏转干扰。

根据X射线的波长范围不同, 一般分为软X射线和硬X射线。软X射线的波长为 $60 \text{ \AA} \sim 6 \text{ \AA}$, 硬X射线的波长为 $0.6 \text{ \AA} \sim 0.006 \text{ \AA}$ 。而X射线的波长主要取决于放电材料、电压、和放电时间。医用X光机所产生的X射线为软射线, 其放电材料一般为钨, 电压为 $0 \sim 120 \text{ kV}$, 放电时间为几个毫秒, 放电时的电流只有几个毫安。因此它可以连续观察和照相。软射线一般用于密度及原子序数不大的物质。脉冲X光机所产生的X射线为硬射线, 其放

电材料一般选用钨, 电压为 $0 \sim 450 \text{ kV}$, 放电时间仅为 20 ns , 比软射线时的放电时间小5个数量级, 而放电时的电流高达 10 kA , 比软射线时的放电电流大7个数量级。因此产生的硬X射线的波长非常短, 适合于穿透密度和原子序数都比较大的材料, 譬如金属材料。但脉冲X光机只能拍摄到一个时刻的照片, 而不能连续观察和照相。

4 饱和砂土中流动与破坏的X光观测

在笔者的摸索实验中, 硬X射线和软X射线都曾被用于尝试拍摄饱和砂土中的流动和结构破坏, 但由于饱和砂土的密度和其中物质的原子序数都不大, 比较接近人体骨头的密度和原子序数, 而与金属材料等物质相差较远。因此, 利用脉冲X光机观测饱和砂土冲击液化后内部结构的变形和破坏时效果不好, 即使在使用示踪材料的条件下也未能拍摄到理想的照片。而应用医用X光机(软射线)可清楚地连续观察到饱和砂土受冲击载荷作用下产生的横断裂缝、纵向排水通道、砂土密实沉降等的发生、发展及消失的过程。

4.1 砂土液化渗流后结构破坏的X光测量初探

首先用脉冲X光机(硬X射线)进行摸索实验。由于水的密度为 $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 而饱和砂土的密度为 $2.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 左右, 即使有排水通道出现, 在X光穿透的路径上平均的密度也与没有排水通道的地方相差不大。因此试图寻找一种示踪材料, 以便能在X光下反映出密度的变化。

由于铁的密度比铝的密度大了近2倍, 因此选用厚度为 5 mm 的铝板加工了一个小盒子, 其内部用于实验的区域尺寸为 $310 \text{ mm} \times 120 \text{ mm} \times 48 \text{ mm}$ 。

对示踪材料有一定的要求, 即

- (1) 不能溶于水;
- (2) 在X光机拍摄的照片中能清晰地显现出来;
- (3) 其自身密度不能太大(能在排水通道中随水和细砂一起涌出);
- (4) 其颗粒尺寸与饱和砂土的有效粒径相当。

根据这些要求, 选用了3种密度相近但金属原子序数有较大差异的物质 TiO_2 , ZnO 和 BaSO_4 作为示踪材料。通过对拍摄到的X光照片的分析比较可知, 用原子序数大的材料作示踪剂的效果要比原子序数小的材料好, 故主要探讨 BaSO_4 的示踪效果。通过对 BaSO_4 作示踪剂的一系列实验可以看出: 尽

管它作为示踪材料可以在 X 光照片中显现出来,但由于 X 光测量是平均的概念下进行的,加上排水通道的直径要小于砂土厚度一个数量级,且排水通道中也还是以水和细砂居多,这样在用 X 光拍摄的照片上几乎是看不到排水通道的。

总之,用脉冲 X 光机拍摄饱和砂土中结构破坏的效果不理想,这主要是由于脉冲 X 光机发射的是硬 X 射线,适合于金属材料的探伤。用它拍摄密度和原子序数较小的饱和砂土中的破坏和流动时,则照片的层次不够清楚。

4.2 饱和砂土中结构破坏与密实沉降过程的 X 光观测

应用医用 X 光机(软 X 射线)可清楚地观测到饱和砂土在冲击载荷作用下结构破坏与密实沉降等的变化过程。这是由于医用 X 光机所产生的 X 射线的波长与饱和砂土材料比较匹配,使得监视器中的图象以及拍摄出的 X 光照片的层次比较清楚,可清晰地分辨出饱和砂土中的横断裂缝、纵向排水通道以及密实沉降的演化过程。

4.2.1 探索实验

在正式进行实验之前,首先进行了一些探索实验。在 145 mm × 33 mm × 140 mm 的有机玻璃盒内的饱和砂土中插入几根分别装有水、细砂和粗砂的塑料管,把有机玻璃盒放在医用 X 光机前进行静态实验,从监视器里可清楚地看到饱和砂土中装有砂和水的塑料管。图 3 就是拍摄到的 X 光照片。这说明饱和砂土冲击液化后的横断裂缝、纵向排水通道以及密实沉降的过程也可以借用医用 X 光机观测到。

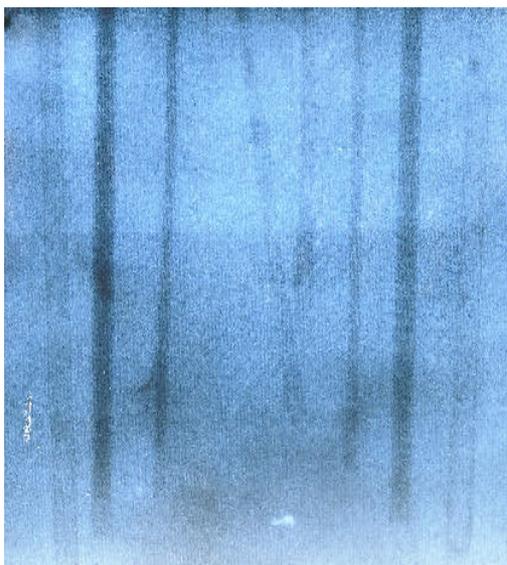


图 3 装有塑料管的 X 光照片
Fig.3 X-ray photo with plastic pipes

4.2.2 饱和砂土冲击液化后动态破坏过程的 X 光观测

饱和砂土装在 145 mm × 33 mm × 280 mm 的有机玻璃盒内。在施加冲击载荷之前,首先拍摄出初始状态下饱和砂土的照片,如图 4 所示。由图 4 可看出:饱和砂土在纵向方向上有一定的不均匀性,这主要是由于在装砂过程中未使用多孔凹形筛,但看不到有规律的不均匀性。在原始饱和砂样的底部施加一定的冲击载荷,饱和砂土发生液化,随后就会在 X 光机的监视器中观察到饱和砂土中横断裂缝、纵向排水通道以及密实沉降等的发生、发展及消失的过程。图 5 是在此过程中的某一时刻拍摄到的 X 光照片。由图 5 中的 X 光照片以及 X 光机监

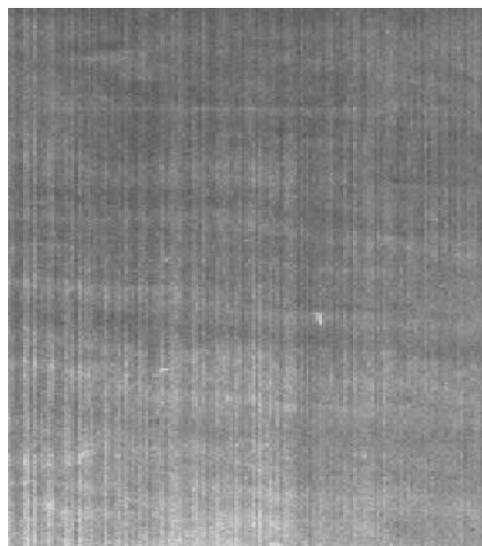


图 4 施加冲击载荷之前的 X 光照片
Fig.4 X-ray photo before loading

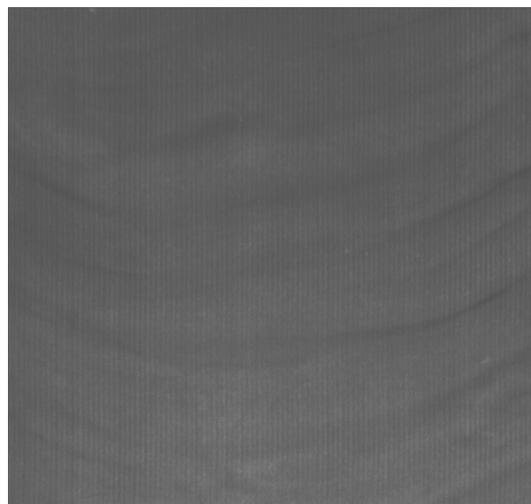


图 5 结构破坏过程中某一时刻的 X 光照片
Fig.5 X-ray photo during structure failure

视器中观察到的饱和砂土中结构破坏的变化过程，可以得到下面几点定性规律：

(1) 冲击载荷下饱和砂土结构中出现了数条横断裂缝，在某几个截面上出现了比较明显的横贯整个截面的裂纹，而靠近左右两侧的地方容易出现比较大的横断裂缝，如图 6 所示。



图 6 大的横断裂缝

Fig.6 A large horizontal crack

(2) 横断裂缝一般出现在饱和砂土的上半部分，而下半部分则很少出现。

(3) 横断裂缝之间的间距一般为 1 ~ 2 cm。

(4) 裂缝出现的时间是在冲击后约 20 s 时间，张开到闭合的时间为几十秒。

(5) 冲击载荷下饱和砂土液化后的渗流是不均匀的，砂土中会出现纵向排水通道，并且是在左右两侧附近出现的比较多，这是由于边界影响及装砂不均匀造成的。

(6) 纵向排水通道与横断裂缝之间有联系，一般来说，纵向排水通道是由于横断裂缝在某些位置发生失稳而形成的，但对于级配比较单一的砂样来说，虽然没有横断裂缝，也可形成纵向排水通道。从图 5 中可以看出，纵向排水通道多出现在左右两侧附近。

(7) 饱和砂土冲击液化后的密实沉降是不均匀的，左右两侧的沉降量要小于中间部分的沉降量，呈现出凹陷形状。不难理解，这与边界条件的影响有关。

5 实验现象的初步分析与解释

对前面所述的在冲击载荷作用下饱和砂土中出

现横断裂缝和纵向排水通道现象的机制，笔者提出如下的定性解释。

当饱和砂土受到冲击载荷后，短时内的加卸载作用使砂土骨架结构发生不可恢复的变形，从而使整个饱和砂土体系中的应力发生转移，砂土骨架的有效应力减小而孔隙水压力增大。砂土颗粒在重力作用下逐渐下落，骨架的组织结构重新排列；孔隙水则在超孔隙水压力作用下向上渗透。由于砂土颗粒有一定的级配，初始的饱和砂土砂样不可避免地存在着某种程度的不均匀性，在砂土颗粒较细的位置透水性较差，也就是说其渗透系数较小；反之，在砂土颗粒粗的位置渗透系数较大。砂土结构中出现横断裂缝的现象很可能是渗流过程中孔隙水与砂土颗粒运动的一种失稳现象。比如，在冲击液化后的砂样中，砂土颗粒粗的位置上，孔隙水渗流的速度快。由于粘性的影响，根据 Stokes 定律可知，孔隙水流动所能带走的砂土颗粒粒径就大，小于某一粒径的颗粒将被带走；而在砂土颗粒细的位置，孔隙水渗流的速度慢，孔隙水流动所能带走的砂土颗粒粒径就相对较小，孔隙水从其他位置携带至此的细颗粒有些不能被带走。这样，在初始细颗粒多的位置处，在渗流过程中细颗粒越来越多，而初始颗粒较粗的位置，细颗粒却越来越少，砂土结构中逐渐出现了含细颗粒较多的夹层。这些夹层相对来说透水性较差，是一种弱透水层。因此，饱和砂土结构的渗透性随位置的不同，出现了强、弱间隔的分布。如果确实存在某种失稳机制，那么这种间隔可能与某个(或某几个)扰动的频率或波长有关。经过一定的时间，在这些弱面处逐渐积聚了渗透向上的孔隙水，出现了水层。当这些含水层发展到与管壁相交时，就是我们透过有机玻璃管壁观察到的砂土结构中的横向裂纹。

随着渗流的进一步强化，弱面处孔隙水的积累越来越多，可观察到横贯截面的大裂纹的扩张。由于大裂纹的上方，饱和砂土是悬浮在裂纹中的水上的，随着孔隙水的逐渐排出，在重力作用下，砂土颗粒不断下落并逐渐将裂纹填满，这是裂纹闭合的第 1 种情况；裂纹闭合的第 2 种情况是由于裂纹中各处的砂土颗粒下落不均匀，在下落较快的某个位置逐步失稳，孔隙水聚集该处，很快沿结构不稳定的路径形成了大的排水通道，孔隙水沿排水通道涌出，裂纹与通道很快闭合。

孔隙水在排出过程中，由于渗流的不均匀性，水沿砂土结构较弱的方向逐渐连通而形成了排水通

道。而由于孔隙水的粘性影响，将不断携带较细的砂土颗粒向上流出，这就是在上表面看到的新涌砂现象。从砂土的上表面看，排水通道携带出来的砂土颗粒形成了一个一个小鼓包(小砂丘)，排水通道位于这些鼓包的中心。渗流结束后，由于排水通道的闭合而使鼓包中心有些凹陷。

要说明的是在整个过程中，饱和砂土的液化渗流与结构破坏是相互耦合在一起的。一方面渗流使得结构发生破坏，另一方面破坏了的结构又进一步强化了渗流。

6 结 论

实验结果表明：脉冲 X 光机产生的硬 X 射线波长较短，穿透能力强，不适合于观测饱和砂土中的结构破坏过程，即便使用了示踪剂，拍摄到的 X 光照片仍然层次不清，它适合于金属材料的探伤。而医用 X 光机产生的软 X 射线的波长的穿透能力与饱和砂土比较匹配，从而在不使用示踪剂的情况下也可以从监视器中观察到饱和砂土中横断裂缝、纵向排水通道以及密实沉降过程的产生、发展及消失，并可拍摄到每一时刻的层次清晰的照片。这为进一步研究饱和砂土在冲击载荷作用下的

液化、密实排水以及内部结构破坏的机理提供了一种有效的观测手段。

参 考 文 献

- 1 Housner G W. Liquefaction of Soil during Earthquakes[M]. Washington D C : National Academy Press , 1985 , 73 ~ 82
- 2 Ishihara K. Liquefaction and flow failure during earthquakes[J]. Geotechnique , 1993 , 43(3) : 351 ~ 415
- 3 Dowding C H , Charlie W A. A laboratory study of blast densification of saturated sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering , 1986 , 112(2) : 187 ~ 199
- 4 孟祥跃, 张均锋, 谈庆明等. 冲击载荷下饱和砂土中孔隙水压力的变化及其与液化密实的关系[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(3) : 263 ~ 267
- 5 张均锋, 孟祥跃, 谈庆明等. 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, 31(2) : 230 ~ 237
- 6 李世海, 徐以鸿, 张均锋等. 冲击载荷下饱和砂土孔压特性的简化力学模型与分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3) : 321 ~ 325
- 7 张均锋, 孟祥跃, 谈庆明等. 冲击载荷下饱和砂土密实与排水过程的初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5) : 622 ~ 625
- 8 陈存礼, 谢定义. 动荷载作用下强度发挥面和空间强度发挥面上砂土的应力应变关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(6) : 770 ~ 774

X-RAY OBSERVATION ON FLOW AND FAILURE OF SATURATED SAND UNDER IMPACT LOADING

Meng Xiangyue , Zhang Junfeng , Tan Qingming , Yu Shanbing

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

Abstract The characteristics of pulse X-ray and medical X-ray machines are introduced. A series of impact loading experiments in saturated sand are carried out. By using medical X-ray machine , the photos of the horizontal cracks , longitudinal drainage pathways and settlement in saturated sand under impact loading have been taken for several times. And then , the appearance law of the horizontal cracks and longitudinal drainage pathways are obtained. As a result , an experimental observation means is provided to study the structure failure and settlement mechanism after the saturated sand is liquefied.

Key words impact loading , saturated sand , flow and failure , settlement , X-ray