

含弱透水夹层饱和砂土坡体滑坡的实验研究*

张均锋 孟祥跃 俞善炳 谈庆明

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 通过含有细砂夹层的饱和砂土在冲击载荷下的滑坡模拟实验,考察了土层参数不均匀的坡面的滑坡模式,坡体变形,破坏和不均匀渗流引起的滑坡,特别是散体粒径不均匀时出现的含水层和通道与滑坡的关系,各控制参数(载荷的和土体的)对滑坡的影响,并对这类滑坡中的现象给出了定性解释。

关键词 滑坡,饱和砂土,低渗透层

分类号 TU 475

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2003)12-2001-05

TESTING STUDY ON LANDSLIDE OF SATURATED SAND SLOPE SANDWICHED WITH LOW-PERMEABILITY LAYER

Zhang Junfeng, Meng Xiangyue, Yu Shanbing, Tan Qingming

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

Abstract The pattern of uneven seepage-induced landslide in the saturated sand slope sandwiched with a low-permeability layer under impact loading is explored by means of simulation tests. Especially, the relations between the development of landslide and the emergence of water layer and drainage pathway are described. Some major influencing factors, such as intensity of loading, thickness of fine sand layer, angle of slope, and densification degree of sand, are also examined. The testing results show that, under a certain impact loading, the structure of the sand sample undergoes irrecoverable deformation, the pore water pressure is built up immediately, and the sand sample is liquefied. The pore water is driven quickly because the permeability of the initial liquefied sand is larger than that of the origin sand, and that caused simultaneously settlement of the sand. Given that the drainage in the sand slope is along the maximum water pressure gradient (i.e. the direction perpendicular to the slope surface), the sudden settlement of the surface of sand slope is observed.

The seepage is uneven in the sand sample because of the presence of the low-permeability layer (the thin fine sand layer). During the upward seepage process of the pore water in the liquefied sand, the pore water accumulates underneath the fine sand layer and thus the shear strength at that location becomes lower than that of neighboring region, providing that the liquefied sand still holds certain strength value. When the pore water accumulates and the shear strength beneath the fine sand layer is lost gradually, the sliding of the sand slope is initiated under the combining action of gravity and pore water pressure.

The shear resistance and the sliding potential are determined by the sand sample and related to the location. The slope surface is separated into two parts because the lower reach of the sand slope undergoes a larger displacement relatively. The slide of the slope is damped, because the footing of the slope is elevated and the angle of the slope becomes smaller. A thin pore water seam can be observed just underneath the thin fine sand layer from

2002 年 1 月 8 日收到初稿, 2002 年 3 月 11 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, 高工, 现从事动载荷作用下饱和砂土的流动破坏研究工作, E-mail: zhangjf@imech.ac.cn.

the lateral side of experimental setup. The water flows along the water seam to form a drainage pathway and spills out at the fractured position of the upper surface of the slope.

The whole process of the liquefaction, drainage, settlement, and sliding is a coupling one in which some fine sand may flush away and accumulate at the location with lower initial permeability. Under a certain intensive impact loading, the sand slope will experience the process described above. Therefore, the presence of the thin fine sand layer of lower-permeability in the sand slope is one of the important factors to cause this kind of landslide.

Key words landslide, saturated sand, low-permeability layer

1 引言

人们对滑坡的研究已有近百年的历史,国内外学者对滑坡形成的条件、性质、类型以及滑体的滑移、解体、运行、停滞等做了大量研究^[1~9]。在此基础上,对可能产生滑坡的一些坡体进行监测和治理,取得了一定的效果^[10]。但大量工程实践说明,滑坡成因多种多样,尤其是在连续降雨而土层介质又不均匀的情况下,受到地震等载荷时极易发生。

地震等导致地下水压力的变化、水位上升或土层渗透性的变化,由此造成的滑坡国内外有过文献报道^[3~9]。如 1991 年格鲁吉亚发生 7 级地震后,在震中附近发生的山体滑坡是在震后 3~5 d 才发生的。由于地层中的土质均匀程度不同,地下水压力变化所产生的渗流是不均匀的,在孔隙水渗流过程中细颗粒的冲刷与堵塞等原因可能使得土体中形成弱透水层,在一定动力载荷作用下促使土体的局部软化,丧失强度并进而演变为大规模滑坡。特别是在有易液化土层(如砂、粘土、淤泥等)的情况下,极易造成滑坡。但有关机理研究方面的文献并不多。

文[11]首次引进水膜的概念解释由地震引起的含有不渗透夹层的砂土坡面的滑坡问题。文[12]研究了饱和砂土中含有细砂层(弱透水层)时,在一定的动力载荷下出现了水膜现象,而土层就是沿水膜产生滑动,指出这是导致滑坡的一类根源。

近几年来,作者在对冲击条件下饱和砂土排水密实过程的实验研究中,发现有一定级配的饱和砂土在受到冲击载荷时,结构中出现了纵向排水通道和含水裂隙的生长与闭合的现象^[13],而这两类现象都是在最初没有细砂层存在的情况下产生的。因此,作者对液化后饱和砂土沉降的稳定性以及渗透水对细砂的冲刷作用进行了理论探讨^[14],提出冲刷-堵塞模型,用以解释沉降过程中砂样由初始的不均匀发展成明显的细砂层从而引起含水裂隙的生成等现象。

基于上述背景,作者对含弱透水细砂层的饱和砂土坡面受到冲击载荷时的滑坡现象进行了模拟实验,实验中发现这类饱和砂土坡面也出现了滑坡、断裂破坏与纵向通道等现象,它们与砂土中的细砂含量、渗流过程中细砂的输运以及砂土骨架结构的破坏有着密切的关系。作者对影响这些现象的几个主要因素进行了进一步考察。

2 实验装置与砂样

影响不均匀饱和土体的变形和稳定性的因素较多,如载荷、土体结构及变形性质、孔隙流体的渗透性等。作者设计加工了一套二维模拟实验装置,用以观测具有坡度的饱和砂土滑坡的模式和滑动过程,通过摄像分析滑坡的启动、滑移和停滞,并考察各项控制因素及其对滑坡规律的影响。

2.1 实验装置

为便于观察饱和砂土滑坡的过程,选用扁平的透明有机玻璃箱作为主要的实验装置。有机玻璃箱的宽×高×厚为 800 mm×500 mm×120 mm,箱侧面标有刻度线,细砂层上侧和坡体上表面放置示踪物(白色粉笔块),以便测量滑坡的启动和滑移量(作者曾尝试嵌入细棉线的方法来标识滑移量,但细棉线明显对滑坡起阻碍作用)。有机玻璃箱正前方有摄像机,将滑坡的整个过程记录下来,以便分析(图 1)。

2.1 砂样

实验砂样是较细的建筑用砂。筛掉 1.1 mm 以上的较大的砂粒(主要是砂砾石),通过标准检粒筛进行粒径分级,粒径级配见图 2,其他的主要参数为:有效粒径 $d_{10}=0.09$ mm,不均匀系数 $i=d_{60}/d_{10}=2.0$,最大孔隙比 $e_{\max}=0.65$,最小孔隙比 $e_{\min}=0.44$,干砂材料的比重为 $g=2.42\times 10^3$ kg/m³。在静水压头作用下,砂样定常渗流的最大渗透系数为 $k_{\max}=4.72\times 10^{-5}$ m/s,最小渗透系数为 $k_{\min}=2.46\times 10^{-5}$ m/s。

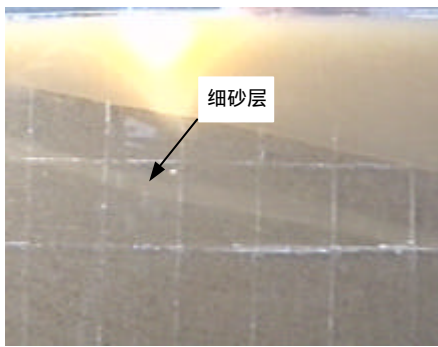


图 1 滑坡前的初始坡面

Fig.1 Initial sand slope before landslide

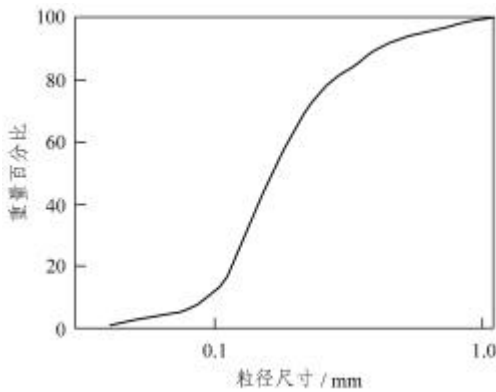


图 2 砂样的粒径级配

Fig.2 Size grading of sand sample

装砂方法是先将箱内装部分水, 将饱和砂土(砂样浸泡在水中一个月以上)慢慢连续地加入箱内, 使其自然沉降, 防止人为地造成不均匀。沉降后的砂样形成一定的坡角(约 13°)。装入一定高度后暂停装砂, 静置 5 min, 使处于悬浮状态的细砂颗粒沉降, 在砂样上方形成一层细砂层约 5 mm 厚; 继续装砂 4~5 cm, 停止装砂。待悬浮颗粒完全沉降, 水逐渐变清。这样得到的砂样参数为: 孔隙比 $e = 0.60$, 相对密度 $D_r = 23.8\%$, 比重 $g = 29 \text{ kN/m}^3$ 。

3 实验现象与定性结果

从装好砂样的有机玻璃箱底部给予一定强度的冲击, 观察饱和砂土坡面受冲击载荷后的滑坡和孔隙水渗流等现象。

冲击的强度可以用底部孔隙水压力的峰值作为标志, 当冲击造成有机玻璃箱内底部的孔隙水压力峰值超过 80 kPa 时, 就会发生以下现象: (1) 受到冲击时, 饱和砂土坡面会有向下的突然沉陷; (2) 细砂层上方的砂层发生以细砂层为滑动面的剧烈滑坡; (3) 细砂层下方出现含水层, 逐渐从坡面上游

的 1/3 处形成的排水通道排出; (4) 在排水通道形成的位置坡面轮廓变为凹形。

通过观察和测量(图象分析)可知: 饱和砂土坡面受到冲击后的突然沉陷量约为 1 cm(坡面上游沉陷量大于下游的沉陷量, 以实验装置的中间位置为准)。随着沉陷的结束(约 1 s), 细砂层上方的砂层开始启动下滑, 滑动是整体的, 速度由慢而快, 再由快而慢, 滑动可持续 6 s。以坡体中部(横向)的上表面为参考点, 最大的滑移量可达 5.2 cm, 图 3 给出了一次典型实验的结果, 其中图 3(a), (b)分别为滑移量、滑移速度随时间的变化。大约在冲击后 5 s, 在细砂层下面逐渐形成一层含水夹层(图 4), 由于该层具有一定坡度, 层内的水顺坡向上渗流, 在坡面上游距上顶端 1/3 的位置处形成排水通道(约 10 s 左右), 见图 5, 此时细砂层以上的砂层大致分为两部分, 高处的部分基本不滑动, 而低处部分继续向下滑, 在分离处, 坡面形成凹形如图 6。随着坡面坡脚的逐渐升高(由于容器的限制), 滑坡慢慢停止。

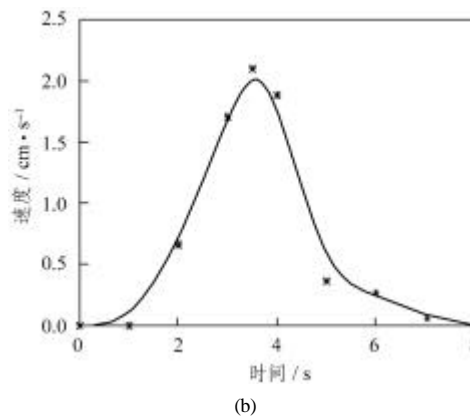
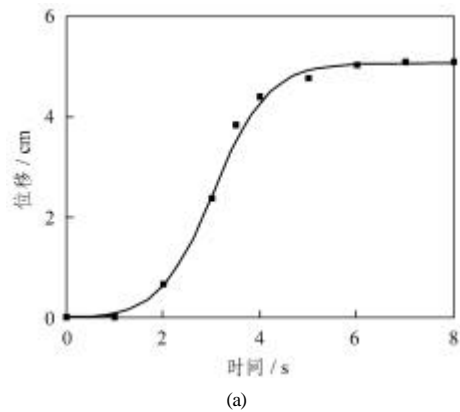


图 3 滑移量、滑移速度与时间的关系

Fig.3 Slide displacement, slide velocity versus time

在滑坡的过程中, 细砂层以下的砂土也会有一

定的侧向位移，但位移量不大，靠近细砂层处的位

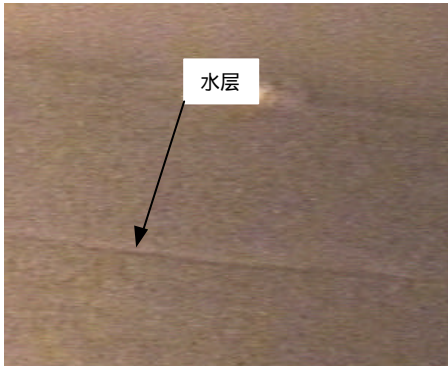


图 4 细砂层下的含水层

Fig.4 Water layer underneath fine sand layer

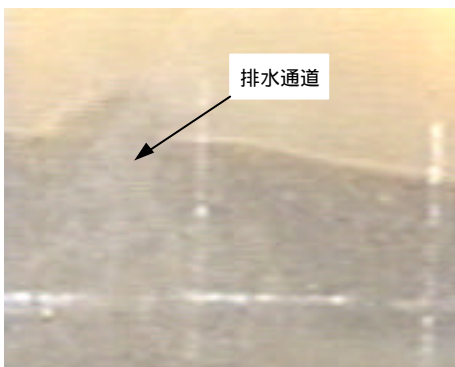


图 5 排水通道

Fig.5 Drainage pathway

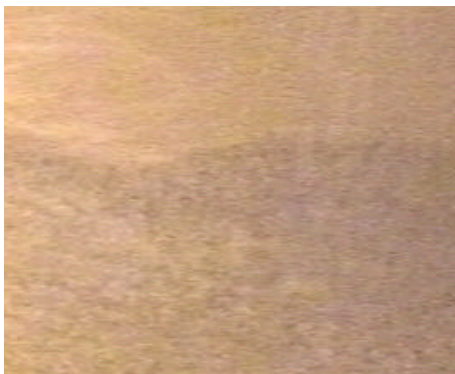


图 6 滑坡后的凹形坡面

Fig.6 Concave profile of slope after landslide

移一般在 1 cm 左右。

4 几个主要参数对实验现象的影响

在这样一类具有坡面的饱和砂土体受冲击载荷后的滑坡问题中，载荷性质、砂土和孔隙流体的几何、物理和力学性质都将对滑坡产生影响。我们分别改变冲击载荷大小、饱和砂样的密实度、细砂夹

层厚度、坡面坡角、砂样总深度等，得到了以下定性的实验结论。

(1) 冲击载荷：当冲击载荷使砂样底部的孔隙水压力(这里暂称冲击压力)超过 80 kPa 时，坡角大于 6° 的坡面都会发生滑坡；冲击压力越大，能产生滑坡的坡面坡角越小。一般地，冲击压力越大，滑坡会越剧烈；当冲击压力达到 1.5 MPa 时，再增大冲击强度也不会产生更大位移量的滑坡，即一次冲击所导致的滑坡位移量是有一最大限值的。

(2) 冲击次数：对砂样进行一定强度的冲击，待滑坡与渗流结束，再次施加同样强度的冲击。这样反复多次，观察发生的现象。第二次冲击后，滑坡会继续以细砂层为滑面滑动，只是滑移量小于第一次冲击的结果。细砂层下出现的含水层持续时间稍长。坡体分离处的凹口继续加大，随着冲击次数的增加及该处下游部分滑移量的积累，分离面明显形成了以上游部分为主体的新的坡体。继续增加冲击次数，直至坡角或坡脚不足以再发生滑坡。

(3) 坡角：坡角对滑坡的发生、滑移速度、滑移量的大小等都起重要的作用。饱和砂土坡面的最大临界坡角约为 30° 。当冲击超过 1.5 MPa 时，能发生滑坡的坡面坡角大于 6° 。而当坡面坡角低于 6° 时，基本不会产生滑坡，只是液化后的砂样在沉降时有一定的侧向位移(无滑移面)。

(4) 细砂层厚度：细砂层在饱和砂土坡体滑坡中作用非常重要，滑坡发生时，细砂层就是滑移面，含水层也是在细砂层处出现。影响滑坡的细砂层厚度视细砂层的透水性而定，透水性越好，导致滑坡的细砂层厚度就要求越厚；反之，透水性越差，细砂层的厚度就越薄。在本实验中，细砂层是在装砂过程中暂停装砂时，由悬浮的细颗粒沉积而成的，一般在 5 mm 左右。

(5) 砂样密实度：砂样越密实，越不易产生滑坡，或滑坡的滑移量越小。

(6) 砂样总深度：砂样深度越深，滑坡越容易发生，滑坡持续时间也越长，滑移量越大。但若细砂层的下面砂层较薄而上面砂层较厚，则不会发生滑坡。当细砂层下面的砂样层厚度一定时，上面的砂样层越厚越不易产生滑坡。

5 冲击滑坡现象的定性分析与解释

对前面所述的饱和砂土坡体在冲击载荷作用下发生滑坡过程的各种实验现象，我们提出如下定性解释。

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, 骨架的组织结构重新排列, 砂土骨架的有效应力减小, 而孔隙水压力增大, 使饱和砂土液化。初始液化的砂样渗透性较强, 孔隙水排出很快, 砂土颗粒也很快下沉。同时, 由于坡体中各处的排水速度不同, 这样冲击造成的水压力在垂直于坡面方向上形成较大的压力梯度, 砂土颗粒在高压梯度下产生突然位移, 整个坡体结构的坡度在冲击作用下也有一定程度的减小, 于是就会看到砂样在冲击后产生突然下沉。

砂样液化后, 孔隙水在超孔隙水压力作用下向上渗透, 丧失强度的坡体在重力作用下有向下滑动的趋势。同时由于细砂层的存在, 砂样渗透性是不均匀的, 当孔隙水向上渗流到细砂层的位置时, 细砂层的渗透性较低, 从而使孔隙水逐渐积聚在细砂层的边界处, 此时该处抗剪强度要小于其周围各处的强度(沉降过程中砂样仍具有一定的强度), 当孔隙水越来越多, 其强度逐渐丧失掉时, 重力作用下的坡体就会开始启动滑坡。在整个坡体中, 各处的应力分布不同, 上游部分的坡体滑动势小于下游部分, 这样在某一位置就形成了分离, 随着下游部分的继续滑移, 就出现了凹形的轮廓。实验中由于边界的限制, 坡脚越来越高, 坡角则越来越小, 滑坡就逐渐减慢直至停止。在细砂层下, 孔隙水排出速度小于从下渗透至该处的速度, 积聚的孔隙水越来越多, 这样在细砂层下面就形成了一层含水层。层内的水沿细砂层的坡度向斜上方渗流, 在滑坡坡体分离处(该处由于变化最剧烈, 因此强度最低, 结构最薄弱), 逐渐向外排出并逐步连通形成通道。

在整个渗流、滑坡过程中, 饱和砂土坡体是先液化后滑坡, 而坡体滑移与含水层的形成是相互耦合在一起的: 一方面渗流使得砂土结构强度降低, 并发生破坏导致滑坡; 另一方面破坏了砂土结构, 进一步使渗流加强, 并产生通道。

7 结 语

饱和土体中粒径较小的颗粒在孔隙水作用下, 会不断被冲刷掉, 从而造成输运与堵塞, 形成透水性较差的弱透水层。而含有弱透水层的饱和砂土坡体在冲击载荷作用下, 会出现滑坡、含水层、排水通道等现象。这些现象与冲击载荷的强度、砂样的

几何形态、物理力学性质等都有关系, 其中弱透水层是导致滑坡的重要原因之一。研究这类地质条件下滑坡的成因、滑移面的形成及其发展规律, 将有助于对滑坡产生机理的认识, 从而有利于对危险边坡的监测和治理, 以及治理新技术的开发和利用。但是要完全从机理上阐明滑坡的成因, 还须作更系统的实验研究, 对各个控制参数作更详细的考察和定量描述。

参 考 文 献

- 1 胡广韬, 张珂, 赵法锁. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1995
- 2 王恭先. 滑坡过程的力学分析[A]. 见: 《滑坡文集》编委会编. 《滑坡文集》第八集[C]. 北京: 中国铁道出版社, 1991, 17~28
- 3 Jibson RW, Prentice C S, Borisoff B A, et al. Some observations of landslides triggered by the 29 April 1991 Racha Earthquake, Republic of Georgia[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(4): 963~973
- 4 Crozier M I Determination of palaeoseismicity from landslide[A]. In: Bell ed. Landslide[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1991, 1 173~1 180
- 5 Mazen E. Adib Slope failure in weathered claystone and siltstone[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(9): 787~797
- 6 梅其岳. 天荒坪开关站滑坡的形成条件和滑动机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 25~28
- 7 罗先启, 姜清辉, 葛修润等. 黄腊石滑坡群石榴包滑坡稳定性的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 29~33
- 8 朱文彬, 秦四清, 万志清. 降雨触发滑坡的尖点突变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 502~508
- 9 胡明鉴, 汪稔, 张平仓. 蒋家沟流域松散砾石土斜坡滑坡频发原因与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1 831~1 834
- 10 崔政权, 李宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999
- 11 Seed H B. Design problems in soil liquefaction[J]. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE. 1987, 113(8): 827~845
- 12 Kobusho T. Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(10): 817~826
- 13 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
- 14 Cheng Che-Min, Tan Qingming, Peng Fujiao, et al. On the mechanism of the formation of horizontal cracks in a vertical column of saturated sand[J]. Acta Mechanica Sinica, 2001, 17(1): 1~9