



底面摩擦模拟试验的原理与应用

陈诗才 (中国科学院地质研究所)

底面摩擦仪是在近十多年来,国外、国内先后建立和发展起来的地质力学试验设备装置。其主要特点是试验直观性强,全过程清楚,试件易于制备,对多种材料破坏判据的定性度好,能模拟所有三大类(洞室、边坡、基础)工程地质结构体。有待改进的主要方面,是建立模拟真实岩体应力状态的三向加力装置和尽可能地使测试手段定量化。

一、原理和方法

在地质力学模型试验中,底面摩擦模拟法,主要是建立一个以代替岩体自重应力、地应力和工程荷载应力等的,并对应产生在模型中相似应力的力学体系。底面摩擦装置的主要原理如图1所示,转动轮A带动传送带B,作回绕运动。试件C被传送带带动,并遇受固定梁板D的阻挡,因此在BC接触面上产生了摩擦力。由于此力产生在试件的底部,故也称为底面摩擦力。这种力产生之后为使试件模拟的变形状态符合相似律,原则上不应使模型的块体产生因底面与表面二者差异所造成的畸变。在实际中为满足这个准则的要求,须对试件材料的强度、厚度、试块尺寸等进行全面的衡量评价,使之达到以底面力首要地代替岩体重力的要求。

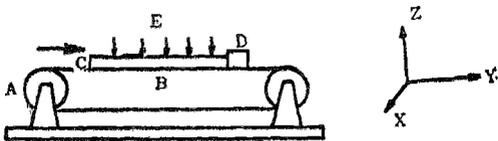


图1 装置简图

其次,现场岩体常存在构造引起的水平向地应力,通常是借助横向气体千斤顶或橡皮囊加力。这个力是可以经过调压变动的,以适应垂直向应力变化,从而为使水平向力保持恒定。

最后,加第三方向的力(图1中Z向),可使平面受力状态变为三向受力,即控制底面摩擦力。为达到这个目的,将试件的上下面之间加上一个力,而在现场这个力是水平方向的,即与水平地应力共一个水平面内。如果所模拟的问题简单,此力可不必施加或作简化处理。

对以上三个方向上所产生的力作一个综合原理分析,其底面摩擦力产生用下面公式表示:

$$\tau = \mu \gamma \dots \dots \dots (1)$$

其中 h 为模型厚度, γ 为模型材料的容重, μ 为摩擦系数。对于此剪力在运动方向上底面摩擦接触面上的累积力 τ_y 来说,是一个如图1中以沿Y方向增加的量。而只有这个累计增加量,才能用作对现场岩体垂直方向所产生的力进行模拟。在模型固定梁板D处, σ_y 值可用下面表达式:

$$\sigma_y = L_y \cdot \tau \dots \dots \dots (2)$$

其中 L_y 为模型在Y方向的长度。同时这个累积力 τ_y 对X方向产生侧向膨胀力 σ_x 。这个侧胀力 σ_x 也是一个变化的累积力,可表示为:

$$\sigma_x = K \cdot \sigma_y \dots \dots \dots (3)$$

其中 K 为侧胀系数。对于此侧向力的模拟要求,试验中,多采用控制压力泵来达到 τ_x 按比例恒定的目的。 σ_x 和 σ_y 的变化也直接影响 τ_x 值,为此,也采用控制加减压法来达到适应于野外现场岩体模拟。

二、模型试验及其材料

模拟试验中相似现象的出现,必须看其满足相似理论的三个基本定律。对于底面摩擦仪,从产生底面摩擦应力的机理出发,进一步需要满足一些特定条件,下面列举这些条件作力学分析:

首先,对试件材料强度的考虑。有满足试件与原型力学性质相似的条件,还需要考虑试件的强度参数,如单轴抗压强度和变形模量。这有利于克服因试件底面与表面受力不一致而导致平面方向上的畸变。如试件发生上下部位的畸变位移量,在粘性材料中可高达1cm,这将对破坏机理的研究及其力学判据造成失实的影响。其次是对材料厚度的考虑,主要是为了防止在模型剖面上产生位错。从大量软材料试验来看,一般厚度在1~1.2cm较为合适,所产生的剖面位错小。再次,摩擦系数在实际中是一变量,此即试验材料与传送带的摩擦力,在克服静摩擦后,动摩擦值常为变数。例如在图3中石蜡油重晶石为主料的洞体变形机理试验时,用干测定动摩擦力的弹簧秤上表现出测量值在0.5~20kgf范围内跳动。对于这种跳动的影响的限制,可将图1中固定梁板D变为永久固定。然而,这种处理也将对定量评价摩擦力是不利

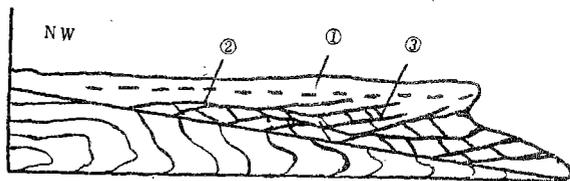


图 2 软性材料试验

的。这种跳动使惯性力增加，从而影响了洞体规律性变形，往往再迭加进一个回弹的附加变形量。克服的办法是模型材料制作精细、转速慢而恒定和传动带衔接处处理良好。

模型试验材料，基本上可以归纳为三类：软性材料、半硬性材料和硬块状材料。这三类材料，基本上属于破坏机制性模拟，尤其是软性材料也许在将来也难以实现定量化，主要是因材料的力学性质不好控制和测量，无法实现相似比较。对于硬块状材料，可以控制块间的摩擦系数，尚可达到半定量的水平。经多年试验，这些材料模拟边坡、洞室和基础三大类工程均可。除此还可对地层和结构体进行变形和机制试验。图 2 就是利用软材料对地层结构面（错断）的等距性模拟。实验表明实现其破坏机制较为理想，最理想时可出现三级序的裂隙组，与野外现场岩体互为印证，并且主体突出。

三、地质工程应用

1. 边坡 边坡工程失稳常由干产生这些破坏机制，如滑动、倾倒、转动、溃屈、蠕滑等。在底面摩擦仪上，均可采用不同材料模拟出来。硬块材料对硬岩块的滑动和倾倒，有较为理想性态表现出来。对于蠕滑型机制则适用于软性材料，并通过布网观测对应力应变分析有良好的效果。半硬性材料对溃屈破坏也有明显的表现。

图 4 是对一水库边坡倾倒破坏机制的模拟。野外岩层面倾角 15° ，由中厚层与薄层砂页岩相间组成，垂直层面的一组节理发育，故岩体呈块状。由于常处于风化和地震作用，岩体出现块状下滑，倾倒和转动，在坡下形成菱方形体和松散土的堆积体。在模型制作中采用了硬块状材料，经模型试验后块呈下滑、倾倒和转动的特征破坏，与野外所观察到的边坡破坏特点相一致。在模型试验中，大多数倾倒属正向倾倒，即块体下部为支点上部向外倒，但也出现极少数反向倾倒，即向边坡内倒，这也和野外岩体出现的破坏状况相符。从块体微观分析，如图 6 中两种基本运动学模式，倾倒和下滑，可用粗略的两种判据式判

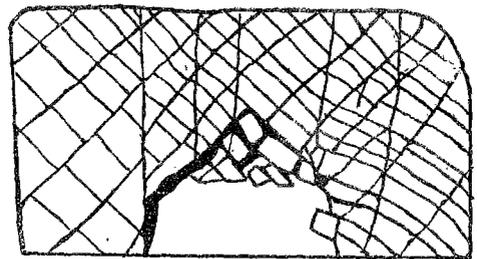


图 3 半硬性材料试验（洞体）

断。 i 为坡角； ϕ 为摩擦角； P_{\perp} 为垂直力； s 为底面面积，即 P_{\perp} 与底面的关系不同而产生变形破坏不同。从宏观来看变形量，坡角比坡顶大，坡面比坡里大。

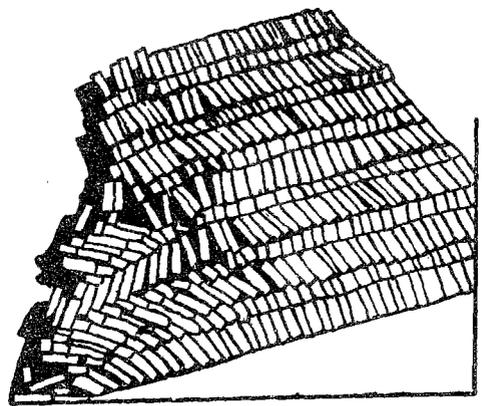


图 4 硬块状材料试验（边坡）

2. 洞室 山岩洞室的稳定是地质工程至关重要的问题。在洞体中经常发生塌拱、边墙挤出、溃屈和底鼓等嗣体围岩破坏现象。这些现象的破坏机理由于现场受防护设施和多种条件的限制不能看到其破坏过程，而破坏结果也多遭人为扰动。对比，底面摩擦仪试验各类岩石组成的洞体则有较好的效果。对于层状节理发育的硬岩，宜用硬块状材料和半硬性材料，其拱顶、拱脚和边墙均产生相应的变形破坏。对于洞体底鼓，一般根据相似材料的主要相似条件，可用软性材料来模拟。图 3 系用石腊油重晶石粉为主料所切刻成的洞室模型的试验结果。该模型主要呈现塌拱掉脚现象，与工程现场所观测到的结果一致。从计算标看来，与图 6 对比，本试验只引起洞顶、拱脚破坏，而边墙和底仍完好，分别地满足了 $\Sigma\sigma_1$ 大于（或小于） $\Sigma\tau_1$ 的关系，这两力系为破坏力与抗破坏力之总和。

3. 地基 诸如路基、桥基、和坝基等常出现下沉、剪切、滑移、挤出拉开等现象，其中尤以坝基表现为典型。对于研究基础变形破坏的材料，适用于半硬性材料，图 5 模拟一土坝坝基变形破坏。该坝系土

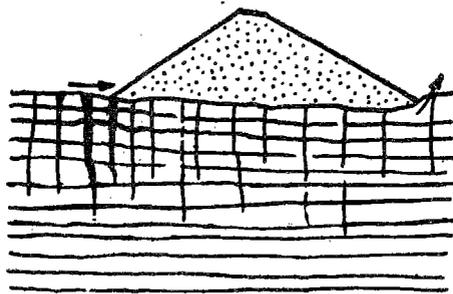


图5 坝基变形破坏

坝,其构造主要受近于水平的一组层面控制,此外垂直层理有一组节理,但连续性不好。该模型对坝体在受到库水推力和自重力的作用,坝前下沉而部份岩石挤出,坝踵下岩石沿垂直裂隙拉裂,故使坝体呈倾倒状。越向坝下部岩石受到影响越小,其影响区基本上相等干坝体高度。在图6中坝体的变形破坏判据综合归纳为 $K\sigma_1$ 大于 $[\tau]$,其中 σ_1 为坝体和水体引起的抗剪滑力, K 为侧压系数, $[\tau]$ 为允许剪应力。从计算可得本试验中达到破坏时的 τ 为 $[\tau]$ 的1.5倍,故基础破坏。

四、结语

对底面摩擦仪的原理、方法和应用的探讨,得到如下结论:

1. 底面摩擦仪是对工程岩体进行模拟的好方法,

(上接第55页)

至于垃圾填埋对地下水的可能污染途径,一般是通过包气带的间歇入渗。它的特点是固态污染物经过大气降雨的周期性淋滤,并通过包气带渗入到潜水含水层中。渗透的污水水流一般为不完全饱和水流或雨淋状态。

若地下水一旦遭受垃圾渗出液的污染,也有可能污染物通过井孔和层间越流方式,由潜水含水层转移到承压含水层(当潜水位高于承压水位时)。

4. 通过对填埋场表层不同厚度土样的室内模拟淋滤试验,查明填埋场包气带对污染物的物理化学吸附能力或自然净化能力,以及查明污染物在包气带中迁移和转化的机制。通过评价区试坑渗水试验,估算填埋垃圾渗出液的地面入渗量。上述工作的目的是为不采用垃圾填埋衬层设计方案提供可行性依据。

5. 收集填埋地区多年降雨量资料,并且通过统计分析,确定丰水年份不同量现期的年降雨量和多年日最大降雨量,其目的是为垃圾渗出液数量的估算和污水处理厂规模的设计提供一定的依据。

6. 在自然防护条件较差地区设置垃圾卫生填埋场时,为安全采用填埋衬层结构的需要(如塑料板),还必需在填埋场地进行工程地质标准彻入试验,掌握天然地基土的容许承载力,确定垃圾极限堆放高度,以防因天然地基土的不均匀沉降引起衬层撕裂,造成渗出液沿衬层裂缝渗入地下的隐患。

通过上述工作的综合分析,对环境卫生部门提出的垃圾卫生填埋结构设计进行多方案优选、单方案优

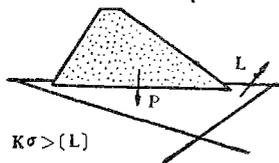
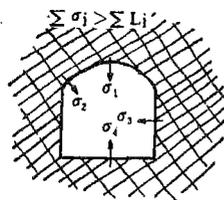
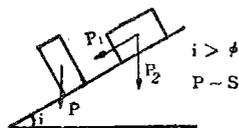


图6 综合破坏判据图

简单明瞭,能观察到模型变形的全过程。

2. 底面摩擦力的产生必须认真地研究,不得产生大量的回跳,否则将影响岩体真实的变形,对变形破坏机理的分析失实。

3. 底面摩擦仪应用于工程地质力学分析试验的三大基本方面,在理论上和实际上有很好的相似性。

4. 底面摩擦仪达到基本的条件是容易的,但要提高到二向和三向受力,则须要经过难苦的努力。

化或提出补救措施,甚至可以否定原填埋结构设计,提出新的代替方案,以使城市垃圾填埋达到更加安全有效和经济合理的环境保护效果。

参考文献

- [1] 俞锡弟《城市垃圾粪便无害化处理及其综合利用的研究》环境科学,1986年第四期。
- [2] 夏增祿 钟佐黎等《酚氨污水灌溉对土壤及地下水的影响》,环境科学,第二期1978年。
- [3] 供水水文地质手册,第二册地质出版社。
- [4] Bouwer H. Groundwater Hydrology. McGraw-Hill, N. y. 1978.
- [5] Freeze, R. A., Cherry, J. A. Groundwater. Prentice-Hall Inc. 1979.
- [6] Exler, H. J., Defining the Spread of groundwater Contamination below a waste tip, cole J. A. (ed), Groundwater pollution in Europe. Water information center, N. Y., P. 215—226, 1972.
- [7] Paze, H. G., Hayman, C. H., Removal of ABS and other sewage components by infiltration through Svils. Groundwater, Vol. 4, Nu. 1, P. 10—15, 1966.
- [8] Hutohinson, N., Microbiological Aspects of groundwater pollution, in: cole J. A. (ed.), Groundwater Pollution in Europe. Water Information Center, N. Y. P. 167—202, 1974.
- [9] Miller, R. H. The soil as a Biological Filter in: Sopper W. E., L. T. Kardes (ed.), Recycling Treated Municipal Wastewater and Sludge through Forest and Cropland. The Penn. State University Press, P. 71—92, 1973.