

# 三峡大坝建成后 库水对岸坡土力学强度的影响及诱发灾难

程昌炳 罗鸿禧

(中国科学院武汉岩土力学研究所)

## 提 要

滑坡、泥石流和土壤流失的发生,与源地土的力学强度关系密切。强度大,就可以承受大的水冲击力,能减缓甚至避免滑坡、泥石流和土壤流失;强度小,则容易发生这类灾害。

从单剪的屈服强度看,某源地土的强度极低,同时从它们的物理化学特性看也很不好,含有膨胀矿物,胶结差,表面能高,性质不稳定,容易受到环境因素的影响。这些都有利于滑坡、泥石流和土壤流失。

三峡大坝建成后,将有一些环境条件改变,如水位抬高,使源地土的含水量增加,难溶盐降低和被生活脏水污染,等等。为了模拟这些环境条件的改变,将重塑样分别用蒸馏水、硫酸液、腐殖酸液和洗衣粉液饱和,再作直接剪切实验。结果表明,强度极低的源地土,其强度比原有更低,库区沿岸将会诱发大量的滑坡、泥石流和土壤流失,后患无穷。

泥石流是一种突发性的自然灾害。它的形成必须同时具备丰富的松散固体物质、足够的水源和陡峻的地形三个基本条件。松散的固体物质就是所谓泥石流固体源,它包括岩石和土。显然对于固体源之一的土——我们称之为泥石流源地土——的力学强度与泥石流的发生是关系密切的。它的强度高,在水的冲击下就可以承受大的剪力,甚至不被水冲走而减缓或不会形成泥石流。因此研究泥石流源地土的力学强度对预测泥石流的发生是有重要意义的。

三峡大坝修成后,会使很多环境因素发生变化,无疑又会引起泥石流源地土的力学性能的变化,进而也会影响到泥石流的发生和发展。

为了了解三峡库区泥石流源地土的力学性能及环境因素变化对它的力学性能的影响与发生泥石流的关系,我们在库区的一条泥石流沟取了一些原状样进行了多方面的研究。

## 一、取样情况

我们沿某泥石流沟的横断面取了一些原状样,编为样4、5、6和7号,其中样4号是塌落体,样5号是泥石流沟中的堆积物,样6号和样7号是位于沟壁的上沿向斜构造上。这4个样连系起来就好似泥石流源地土对泥石流的补充链,即固体物料——土从坡上沿崩塌,沿坡壁下滑至泥

石流沟沟底堆积的各个部分均有样品。

## 二、泥石流源地土的物理化学性质

土的物理化学性质与力学性质有密切的关系。现将源地土的物理化学性质列于表 1。

表 1 某源地土的物理和化学特性表

样	号	4	5	6	7
矿物成分 (%)	伊 利 石	16.0	13.0	15.0	14.0
	方 解 石	34.0	55.0	55.0	23.0
	石 英	37.0	25.0	22.0	37.9
	蛭 石	13.0	7.0	8.0	23.0
流 限 (%)		33.2	22.8	38.3	36.4
塑 限 (%)		18.2	12.3	16.1	19.6
塑性指数		15.0	10.5	22.2	16.8
易 溶 盐 (%)		0.043	0.033	0.030	0.033
中 溶 盐 (%)		未检出	未检出	未检出	未检出
难 溶 盐 (%)		44.89	58.07	69.79	48.59
有 机 质 (%)		0.26	0.16	0.20	0.27
游离氧化铁 (%)		1.78	1.43	1.29	3.01
游离氧化硅 (%)		0.74	0.35	0.39	1.06
游离氧化铝 (%)		0.39	0.45	0.16	0.47
游离氧化锰 (%)		0.042	0.030	0.018	0.036
总比表面积 (平方米/100克土)		107.6	57.2	66.8	159.5
阳离子代换总量 (me/100克土)		11.08	5.20	8.17	22.36
氧化—还原电位 mv		341.0	371.0	321.0	361.0
pH		8.25	8.75	9.75	8.70

从表 1 中可见,它们的矿物成分均为伊利石、方解石、石英和蛭石。从定量来看,非粘土矿物的含量还较粘土矿物的为多。蛭石具有膨胀性,易溶盐的含量很低,中溶盐全部未检出,难溶盐含量非常多,有机质的含量也很低。这些因素对力学性能的影响是不会明显的。游离态的铁、硅、铝和锰是所谓土中的胶结物质,它们的特性对土的特性影响很大,但它们的含量很低,可以认为泥石流源地土的样品的胶结均不良,结构强度一定很低。再则它们的总比表面积较大,有的达159.5平方米/克土。阳离子代换总量也较大,最高的也达22.36me/100克土,而且总比表面积的数据与阳离子代换总量的数据一致性非常好,都说明它们的表面能较高,对环境介质的吸附

能力较大，其性状较不稳定，这些是利于泥石流和土壤流失的发生的。体系的氧化—还原电位不太高，就已测的各样来看，其范围在321—361mv，这是在弱碱性，即pH值8.25—9.75之间测得的；若校正到pH 7时的氧化—还原电位，相应为416—486mv，这可以认为体系处于弱的氧化环境，具有弱的氧化性。如果大坝修成，水质环境中的还原性可能增加，预计目前的泥石流和土壤流失源地土（可浸部分）可能与环境介质有氧化—还原反应发生，将会给土的性质带来影响。再者，因样品是处于弱碱性环境，如遇上酸雨也会引起性质上的变化。

### 三、原状源地土的力学特性

我们所取的样品中含有不同大小的粗粒成分，又不均匀，不便于作直接剪切实验。因为在固定的剪切面上可能存在粗颗粒影响剪切效果，出现实验误差，所以我们选用单纯剪切实验来研究源地土的力学特性。又由于泥石流的发生在瞬间，土本身来不及排水，所以我们最终选择单剪（快剪）试验来研究源地土，样品尺寸6×6×2厘米，剪损时间3—5分钟。但我们所选用的仪器是受应变控制的，当样品剪至一定的程度，其中的大颗粒就会阻碍进一步的应变，所以我们不可能将样品剪切至完全破坏。为了比较的方便，我们均取屈服值而非峰值来作相对比较。这些数据列于表2。

表2 该源地土的单剪（快剪）屈服强度

样 号	4		5		6		7	
强度指标	C kg/cm <sup>2</sup>	φ 度·分	C kg/cm <sup>2</sup>	φ 度·分	C kg/cm <sup>2</sup>	φ 度·分	C kg/cm <sup>2</sup>	φ 度·分
原 状 样	0.007	0°2′	0.005	0°34′	0.015	0°40′	0.007	0°34′
原状样饱水后	0.0083	0°28′	—	—	0.0041	0°43′	0.005	0°20′

从上述屈服值的指标C、φ可以推知，它们的破坏强度很低，而且饱水后还会更低。但值得指出的是，第4号样饱水后其强度还相应提高了，这可能是由于样品的不均匀引起的假象。强度这样低的土是很容易发生泥石流和土壤流失的，因为他们无力抵抗水的足够冲力；将来水库修成后水位提高，使土的含水量增加是会朝着不利的方向发展的。

### 四、三峡库区环境因素的变化对源地土的力学特性的影响

我们用直剪（快剪）来研究库区环境因素的变化对源地土的力学特性影响，而不用上述的单剪，因为这项研究所需的土样较多，我们所取的样有限，又因原状样中含有较多的粗颗粒，又不均匀，其实验结果很难比较，因此我们用重塑样来进行实验。

重塑样的制法是将风干土碾压过2毫米筛，大于2毫米的弃之。再将小于2毫米粒径的土料碾磨至小于0.5毫米，加入适量的水使其含水量接近或略超过原状样，再击实，使其容重接近于天然容重。现将重塑前后的含水量和容重列于表3。

表3

该源地土重塑前后含水量和容重对照表

样 号	4		5		6		7	
样 态	原状样	重塑样	原状样	重塑样	原状样	重 塑 样	原状样	重塑样
含水量 (%)	1.31	17.2	7.59	10.1	14.5	17.2	18.0	21.4
容 重 (g/cm <sup>3</sup> )	+0.07 1.88-0.04	1.85	+0.09 1.96-0.10	1.93	+0.05 1.83-0.03	1.87	±0.06 1.87	1.87

我们将上述的重塑样用环刀切成面积为20平方厘米、高2厘米的圆饼，装入直剪仪中作直剪（快剪）实验，其强度值列入表4。

为了模拟大坝修成后的环境因素对土的力学性能的影响，我们将重塑样分别以蒸馏水、硫酸液、腐殖酸液和洗衣粉液来饱和。饱和后再作直剪（快剪）实验，其实验条件完成同上，其数据也列入表4中。

表4

模拟的环境因素对该重塑源地土的抗剪强度的影响

原 样 号	4		5		6		7	
强度参数	C kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$	C kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$	C kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$	C kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$
A 重塑样	0.32	20°	0.30	25°	0.28	20°	0.27	15°
B 重塑样 饱水后	0.10	18°	0.03	22°30′	0.10	19°	0.09	14°30′
C 重塑样饱 硫酸液后	0.06	12°30′	0.01	19°	0.02	22°	0.03	15°30′
D 重塑样饱 腐殖酸液后	0.03	18°	0.12	18°	0.05	22°	0.12	15°30′
E 重塑样饱 洗衣粉液后	0.10	12°30′	—	—	0.05	22°	0.080	13°

用饱和样品，是考虑到大坝修成后，大量蓄水提高了水位，会使某些位置土的含水量增加。我们以含水量增加到极限状态即饱和状态来看其影响。

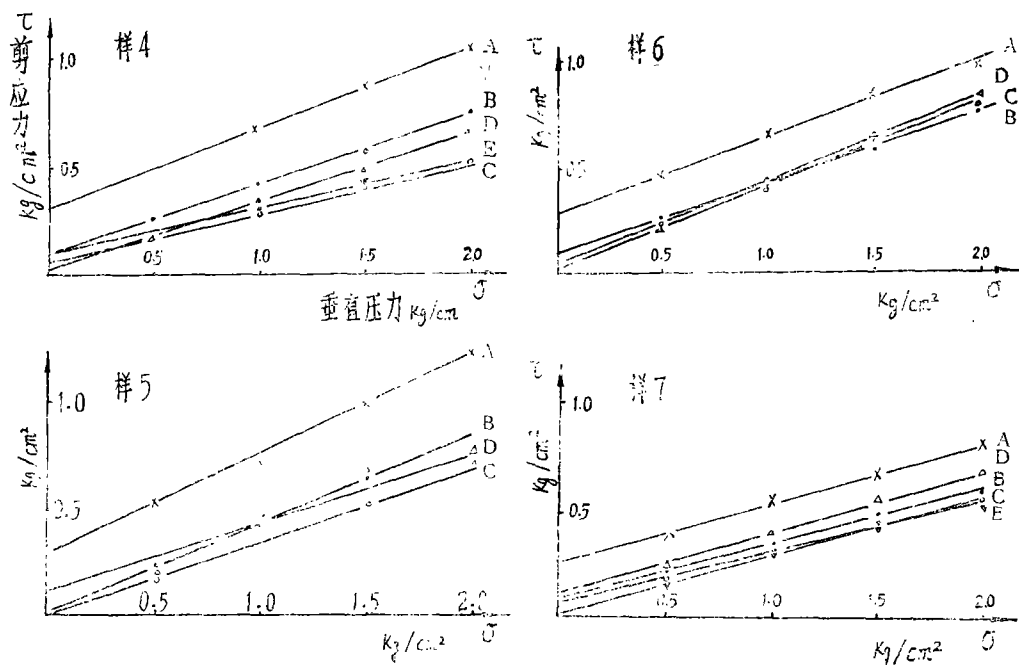
我们用硫酸液来饱和土样，是为了模拟酸雨对土的侵蚀。据有关资料报道，四川某地出现的酸雨其pH值已达3，我们强化这个条件用pH值为2的硫酸来饱和土样。

我们用腐殖酸液来饱和土样，是考虑到大坝修成后库区蓄水使很多有机物被淹，增加土料的浸渍程度而增加有机质含量。其方法是取腐殖酸10克用浓氨水140毫升溶解之，再稀至2升，然后将已重塑好的样品放入，使之饱和。

用一枝花洗衣粉溶液来饱和样品，是考虑到大坝修成后库区人口密度加大，会增加生活用水

排污,使土料受到污染的影响,洗衣粉液的浓度用0.5%的,待样品饱和后作直剪(快剪)。

直剪的实验结果,绘制成图1。从图中我们可以得出,它们的强度指标,凝聚力 $C$ 和摩擦角 $\phi$ ,也列于表4中。从图1和表4中,均可见环境条件改变对土样的强度影响明显,均使其强度降低。为了分析这个降低的原因,我们测定了重塑样在受环境因素作用后的含水量、有机质、碳酸



A—重塑样, B—重塑样饱水后, C—重塑样饱硫酸液后,  
D—重塑样饱腐殖酸液后, E—重塑样饱洗衣粉液后。

图1 泥石流源地土重塑样的抗剪强度与垂直压力关系

盐含量的变化,其结果见表5。从表5中可以明显看到,重塑样在受到环境因素影响后其含水量、碳酸盐和有机质的含量均有很大的变化,正是由于这些变化才致使样品的强度降低。现具体分析如下:

重塑样饱水后含水量大量增加,所以强度降低是容易理解的,不必再析。

重塑样饱硫酸液后,碳酸盐的含量都下降(见表5),含水量都增加外,主要是碳酸盐受到侵蚀的结果,在所研究的样品中碳酸盐原含量均很多(见表1)。如此高的碳酸盐有一部分可能是起胶结作用的,特别是细粒部分,在硫酸作用下这部分起胶结作用的碳酸盐会受到一定程度的损失,同时土中的其他胶结成分也会受到一定程度的影响,有不同程度的损失。这些都会直接影响到土的凝聚力 $C$ 值。另外硫酸盐对土作用时,土中的碳酸盐颗粒因受到硫酸的侵蚀作用,会使原来较粗糙、尖锐的棱变得平滑一些,而原来较平滑的地方也可能变得更粗糙、尖锐一些,所以摩擦角 $\phi$ 有的增大,有的减小。从表5中可以看出,重塑样用硫酸溶液浸泡后,其碳酸盐的含量虽然下降,但下降幅度不大,最大的也仅下降大约7%(6号重塑样)。这与我们采用的用硫酸作用于样品的实验方法有关。我们是将块状样(重塑后)浸泡于硫酸溶液中,借以模拟酸雨对土体的影响。这种实验方法的采纳是要尽量模拟现场的情况。因此可以预见,现有的泥石流源地土料在未来酸雨作用下虽然本身的硫酸盐不会完全被消耗尽,但强度是会下降的。

表5

重塑样在模拟环境因素影响下有些种类含量的变化

原样号	4			5			6			7		
含量种类 (%)	含水量	有机物	碳酸盐	含水量	有机物	碳酸盐	含水量	有机物	碳酸盐	含水量	有机物	碳酸盐
A 重塑样	17.3	0.26	41.39	16.7	0.16	58.07	17.3	0.26	69.79	21.4	0.27	43.56
B 重塑样 饱水后	21.1						24.3			26.7		
C 重塑样饱 硫酸液后			41.92	17.1			25.1		62.05	27.3		46.96
D 重塑样饱腐 殖酸液后	23.0	0.36		17.3	0.20		23.4	0.30		25.2	0.39	
E 重塑样饱洗 衣粉液后	26.1	0.30					0.24	0.13		26.1	0.37	

重塑样饱腐殖酸液后的有机质含量明显增加，它在原状样中的含量为0.16—0.27%；饱腐殖酸液后含量达0.20—0.39%，且含水量也增加。因此，它使土样强度降低的原因也有两方面：其一为含水量增加；其二为有机质含量增加，因有机质可增加土的分散性，特别在高含水量的情况下。

重塑样饱洗衣粉液后使土的强度降低的原因，除有同于样品受到腐殖酸的影响外，还有交换性钠离子的影响，因洗衣粉液中含有钠离子，它可将土上吸附的其它阳离子置换，增加土的分散性。

可见泥石流源地土在上述模拟环境因素的影响下还会使已经很低的强度进一步降低，这也更利于泥石流和土壤流失的发生。

## 结 语

本研究的泥石流源地土疏松孔隙比大，粗颗粒多，又不均匀，胶结差，本身强度极低，易于被水冲走而为泥石流和水土流失提供大量的固体物料。同时这些土的表面能较高，性质较活泼，易于受到环境因素变化的影响。在模拟的大坝修成后可能出现的环境条件改变下受到不同程度的物理和化学的侵蚀，使它们的凝集力明显下降而导致抗剪强度进一步降低，更易于被水冲走而形成泥石流和其它灾害。

当然，泥石流源地土因所处地理位置不同，受环境因素变化的影响也不尽相同，如直接与库区水相接触的土，它可能同时受到水分、有机质、生活排污、酸雨等的影响较甚，使性质变差很多；而不能与库区水直接接触的，其影响的种类就会少一些，对性质的改变也可能小一些，这要结合具体的地形地貌和水库的规模来研究。本文是假定这些源地土均可能受到各模拟的环境因素变化影响的研究结果，还有些问题待进一步研究。