

# 一米直径大岩芯页岩夹层 剪切试验的经验与研究

陈凤翔

(水电院岩土所)

## 提 要

本文介绍了利用一米直径大岩芯进行现场剪切试验的方法。在缺乏大出力加压设备的条件下,提供了满足试验要求的解决办法。通过试验,得到砂、页岩互层中薄层页岩夹层的抗剪断及抗剪试验成果,分别为 $\tau_{ck} = 0.86\sigma + 7.0$ 及 $\tau = 0.72\sigma + 0.4$ 。对剪切过程中各种变形特性及循环剪切的变形特性进行了分析。为利用夹层页岩提供了天然含水状态下、不扰动原状岩体大型现场试验的资料,同时也为开展现场大型试验提供了一个新的途径。并对今后进行这种试验,提出了一些看法。

## 前 言

在水工建设中,软弱夹层尤其是缓倾角的软弱夹层,往往是构成控制建筑物基础稳定的主要因素。大口径钻探在查明软弱夹层的具体分布位置和性状方面,有其独特的优越性。近廿多年来,长办等单位在这方面进行了大量的工作。并利用大口径钻探,在工程地质勘探、岩石工程研究、地基处理及其他方面进行了卓有成效的研究工作。但是,如何利用大口径钻探取出的岩芯,在保持天然含水量和不受扰动的条件下,对其软弱夹层进行大面积的现场剪切试验,不仅是一项具有工程实际意义的工作,而且还可研究利用取出的大岩芯,进行岩石力学和岩石工程方面的其它研究工作。这是一个值得研究的新课题。本文介绍的利用一米直径大岩芯进行现场剪切强度及其变形特性的研究,就是在这方面进行的一次尝试。

## 一、工程地质概况和试样基本性状

小浪底水库位于黄河中游山区与华北平原分界处的峡谷地段。初设最高库水位高程230m,水头100m左右。该坝区的工程地质条件较复杂,坝址一带所分布的地层为二迭~三迭石千峰统陆相红色碎屑沉积物,按其岩性划分为九层。其中影响建坝很重要的一个问题,是包括坝基持力层范围内的地层中,分布有页岩夹层及夹泥层(统称软弱夹层)。为具体了解混凝土坝地基中软弱夹层的分布及性状,共打小口径钻孔30余个,计进尺4000余m。大口径钻孔2个,进尺50余m。通过坝址两岸剖面测量,查明页岩

• 试验是在黄委会规划大队领导下进行的。参加试验工作的有李建勋、李书魁、朱学中等同志。本文经黄仁福高级工程师审阅,一并致谢。

的空间分布：在 $T^1 \sim T^4$ 岩层内所夹的页岩，长度小于100m的为多数。但有的页岩层在同一层位上呈断续出露。页岩厚一般1~3cm，较厚的有20cm。一般厚度大者延伸较长，但亦有少数页岩厚度虽大，延伸不长。垂向分布：一般相隔不到2m就有一层，密集部位每隔0.5~1.0m就有一层，稀疏部位每层页岩相间可达10m以上。从页岩岩性上观察，在同一层页岩中，粉砂质粘土页岩和粉砂质页岩互有递变现象。

试验用的大口径岩芯，属 $T^2$ 岩层，取自DT01号孔。页岩夹层的岩性全为二迭系第二层紫红色粉砂质页岩；粉砂矿物为石英、云母等颗粒；粘土矿物主要为伊利石等；具显微状页理，岩性不均一，倾角 $8^\circ \sim 10^\circ$ 。在新鲜饱和状态下，岩性密实，页理不明显，失水后风化，沿层破裂成碎片。由于钻探条件的限制，不可能选用同一层的页岩进行试验，而是选自高程131.39~116.31m范围内不同高程岩性类同的页岩（距地表12.31~26.38m）。地下水位高程137.25m，因此，全部试样均是在天然饱和状态下取出的。为使试验时试样保持天然含水状态，岩芯取出后立即进行蜡封，并用湿砂埋之。

表1 页岩的一般物理—力学性质

容重 $g/cm^3$	比重	天然含水量	吸水率	粘粒含量 %	薄片鉴定	变形模量 $kg/cm^2$	抗压强度 ( $kg/cm^2$ )	
		%	%				天然含水状态	饱和状态
2.27	2.8	0.82			以钙质胶结为主			
~	~	~	2.0	38.5	石英 5~40%	$4 \times 10^4$	235	200~220
2.53	2.82	2.22			云母 5~15%			

注：1  $kg/cm^2 = 98.1kPa$ ，为与原资料对照，故下文及图中的单位，不再改动。

## 二、试验方法

用一米直径的岩芯进行剪切试验的试件，全部是在平洞内开挖试坑用混凝土埋固的方式固定的（活动夹具因时间关系未用上）。由于缺乏足够大的加压出力设备，水平推力采用二台200t千斤顶并联，通过一个一面是夹角约 $120^\circ$ 的弧面，一面是平面的垫板，向岩芯施加剪力。为使垫板与岩芯之间接触良好，使推力均布，在其间垫有一块厚约8mm的橡皮。两个200t千斤顶，并联在一根油管上，用一台高压电动油泵供油，在管路上安装一气包以保证压力的稳定性，达到与静力加压同样的效果。垂直压力是由一台200t千斤顶提供。为解决垂直压力能够均布的施加在一米直径岩芯上，特制了一个半截圆锥体传力垫块，一端与岩芯接触，一端通过滚杠与千斤顶接触，从而保证了垂直压力的均布。

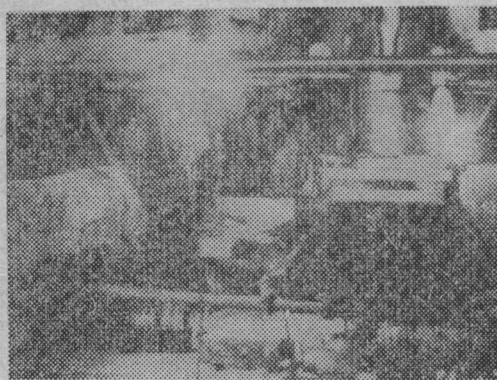


图1 试验布置

为了解剪切过程中试件各个方向的变形状态,以及作为变形稳定的控制依据,在试件的两个侧面上各安装五支测微表,用以了解试件的垂直、水平、倾斜及与推力方向垂直的侧向变形。其布置及试验的安装情况见图1。

采用直剪试验,稳定标准是选用变形条件作为控制依据。垂直荷载逐级施加至各自预定的最大荷载(以四块试件为一组),待试件中页岩夹层固结稳定后,逐级施加水平荷载至剪断,在各级荷载下均须达到稳定后始得施加下一级荷载。试验是按地层实际产状与水平面呈 $8^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的倾角,倾向推力的左侧,稍向前倾的方向进行。页岩夹层厚度 $1\sim 2\text{ cm}$ ,选用的五个大岩芯试件共有八层页岩夹层。凡一个岩芯中夹有两层页岩者,相距约在 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 左右,待下层页岩夹层试验完后,取上半截岩芯重新埋固,并对其上层页岩夹层进行试验。个别上层页岩夹层以上的砂岩较薄时(约在 $20\text{ cm}$ 以上)则填置适当厚度的混凝土,以便于安装和试验。由于选用的大岩芯中,两层页岩夹层间有相当大的间距,彼此基本上互不影响,故进行了八次试验(抗剪断和抗剪各八次)。抗剪断的八次试验中,七次是按照常规保持垂直应力始终为常数,一次是在四个不同的垂直应力下进行试验的。即在一个垂直应力下剪切至出现塑性变形后卸荷,改变垂直应力重新进行试验。

### 三、成果及分析

所试验的页岩夹层,虽不在同一层位,但从地质角度来看,岩性属于同一类型,工程地质性质近似,可以进行综合整理。从试验成果上看,对其进行综合整理后的 $\tau\sim\sigma$ 曲线是相当有规律性的(见图2)。

由于垂直荷载不同而引起的剪切阻力的变化,大致上是按照某一比率变化。得到抗剪断强度和抗剪强度与垂直应力的关系式分别为: $\tau_{ck}=0.86\sigma+7.0$ 及 $\tau=0.72\sigma+0.4$ ,而凝聚力由于结构上的根本不同,呈现出显著差别。即剪断时,页岩夹层具有较高的颗粒结构间的凝聚力强度,但在抗剪时,颗粒间的凝聚力已经破坏,故反映出凝聚力在抗剪强度试验中显著降低。说明不同层位的页岩夹层,在岩性和工程地质性质类似的条件下,是可以组合起来进行试验的。从而说明利用同一个大岩芯的多层夹层进行试验是可行的。在一定条件下可减少开挖平洞、制备试件等工作量,特别是在利用大口径钻探检测灌浆效果时更为有利。

从变形特性来看,页岩夹层的剪切变形性质与一般脆性岩石有所不同,基本上是在呈现较大塑性变形之后,仍然具有一定的承载能力。当剪应力达到其极限强度时,呈现为突然的破坏,并伴有响声。特别是 $\sigma=5\text{ kg/cm}^2$ (I)的曲线,在远距弹性极限,当已产生较大塑性变形之后,卸荷时仍有能够恢复的弹性变形,并不因较大残余变形的出

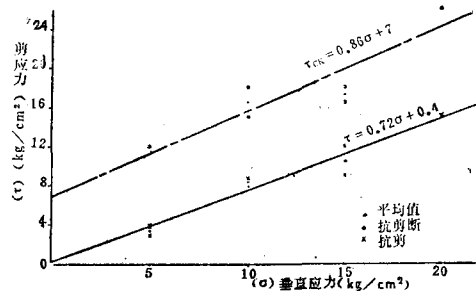


图2 直径1m岩芯页岩夹层抗剪、抗剪断垂直应力—剪应力关系曲线

现而影响页岩夹层具有弹性。而当重新加载至卸荷点并继续加载时，变形也不受卸载的影响，仍沿原曲线继续变形而呈现“单调”曲线。具有一定的“剪切强化”性质。从不同垂直应力下的剪切变形曲线来看，“剪切强化”似有随着垂直应力的增高而增大的趋势。当设计的建筑物允许一定量的变形时，页岩夹层的这些特性，在一定控制条件下可考虑加以适当的利用（见图3）。

抗剪试验的剪切变形，则与一般的岩石抗剪试验类同。开始为线性关系，当超过弹性阶段，呈现塑性变形后，很快出现较大的变位而达到破坏（见图4）

试验中发现，在各种垂直荷载作用下，由逐步施加水平荷载所产生的试件变位，是一种以水平变位为主导的“复合”变位。即除了基本的较大的水平变位外，同时还产生微量的压缩、倾斜和侧向变位。但是，这些“复合”变位一般均较小，在0.1 mm左右。从试验结果看，只有当剪应力达到或接近页岩夹层的极限强度（即在最后的1~2级水平荷载）时，这些“复合”变位才呈现显著的成倍的增大（见图5、图6）。

在垂直方向，一般均是下降（压缩）。只有当达到或接近破坏时，由于剪破面的不平整，致使剪破面以上的试件显著的上升，垂直荷载也增大（图5（A），图6（A））。而在剪切开始前，页岩夹层已受到垂直荷载的压缩固结，并已达到稳定。剪切过程中的这种压缩现象（垂直测微表装置在试件中部），可能是由于页岩的再次固结所致。

侧向变位（图5（B），图6（B）），则显然是由于剪切面呈约8°左右的倾角（即岩层倾角）倾向左侧所致。在较大的垂直应力（ $\sigma = 15\text{kg/cm}^2$ 及 $\sigma = 20\text{kg/cm}^2$ ）作用下，水平推力使用的是两个200 t千斤顶并联。从成果上看，其侧向变位并不大，只是当接近破坏时才

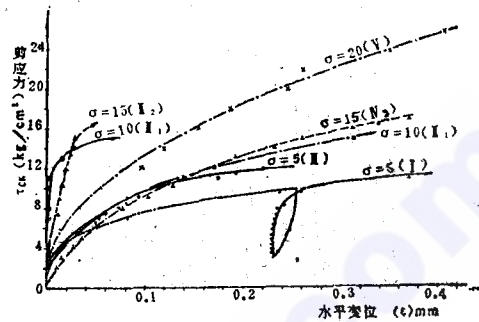


图3 直径1m岩芯页岩夹层抗剪断剪应力—水平变位关系曲线

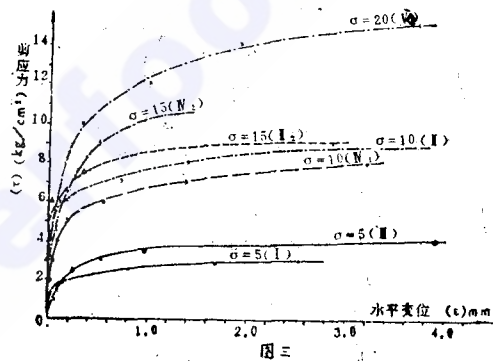


图4 直径1m岩芯页岩夹层抗剪断剪应力—水平变位关系曲线

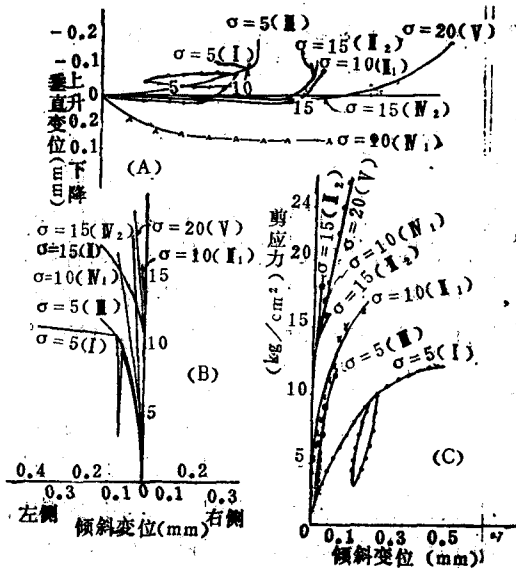


图5 直径1m岩芯页岩夹层抗剪断过程中试件复合变位关系曲线

增大。这说明两个并联的千斤顶是同步的。用这一方法解决缺乏大型出力设备问题基本上是成功的。

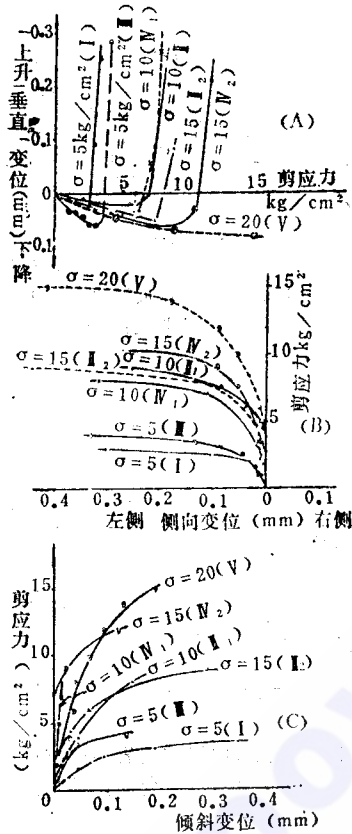


图6 直径1m岩芯页岩夹层抗剪剪切过程中试件复合变形关系曲线

试验结果。当  $\sigma = 5\text{kg/cm}^2$  时，在出现明显的塑性变形后卸荷，仍具有一定的弹性。从随后的几个不同垂直应力作用下的剪切循环来看，也似乎具有“剪切强化”性质。这种特性对作为坝基的岩体来说，由于水库水位的变化而形成的循环剪切作用是有利的。在设计中似乎也可以作为储备能量加以考虑。

剪切破坏全部发生在页岩夹层内部。剪破面的起伏差不大，一般均较平整，有擦痕及少量页岩碎屑，个别页岩夹层内含有少量由于龟裂而充填钙质粉砂岩的岩脉（见图8）各剪破面的详细情况从略。而在试验安装时，由于受到页岩厚度的限制，均是将垫板安装在页岩夹

剪切过程中的倾斜变位（图5（C），图6（C）），主要是由于岩层顺剪切方向稍向前部下倾所致。另外，虽注意到将剪切垫板沿岩层倾角紧靠剪切面，尽可能减小弯矩的产生。但由于弧形垫板有10cm高，其合力中心距剪破面仍有5cm的力臂，可能也是造成倾斜变位的原因之一。

图7为一块试件在四种不同垂直应力下的

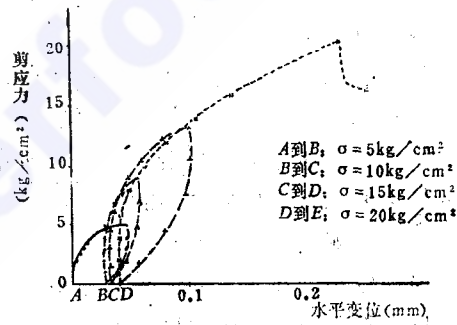


图7 直径1m岩芯页岩夹层抗剪剪应力—水平变位关系曲线

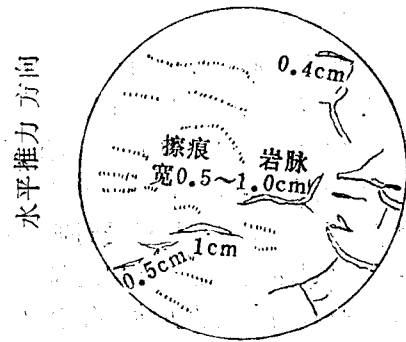


图8 剪断破裂面素描图循环剪切Ⅳ3

1. 本剪断层岩性为粉砂质页岩。
2. 沿剪力方向顺层面断裂。断裂面平整未见阶梯。
3. 页岩龟裂中充填钙质砂岩岩脉。宽度一般0.5~0.1 cm。
4. 剪切方向 SE 110° 近似垂直于倾向
5. 层面倾向 NE 35° 倾角约8°。

层上面的砂岩上，但均未从其接触面处剪断。说明本地区的砂、页岩互层的胶结面是良好的。弱面是在页岩内部。

### 四、评价及看法

1.在目前大口径钻探日益得到广泛关注和使用的情况下，利用其取出的大岩芯进行野外大型岩石力学试验，不失为一种开展现场试验的新途径。在有口径钻探的条件下，对试验研究来说，具有省钱、快速和提高试验成果质量的优点。

2.所介绍的试验方法，对今后开展类似试验具有一定的借鉴和参考价值。特别是在缺乏大出力加压设备的情况下，提供了满足试验要求的解决办法。

3.页岩夹层的变形特性，特别是“剪切强化”现象，为进一步研究“软弱夹层”和认识、利用“软弱夹层”提供了具有一定价值的实地状态的第一性资料。

4.本文主要是针对层状结构岩体进行大直径试件抗剪试验，提出可供借鉴的经验。对于块状裂隙切割岩体，似有参考意义。为大口径钻探增添一项使用价值。

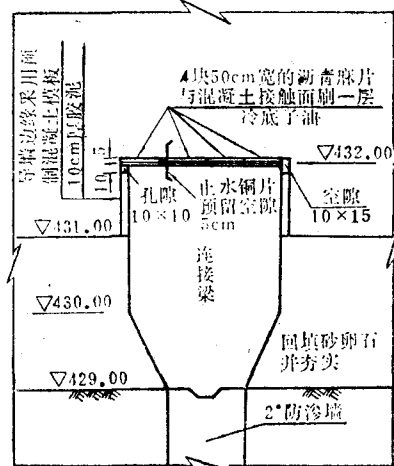
5.作者认为：大直径岩芯除可进行抗剪试验外，还可同时进行现场大试件的单轴压缩试验，分别测定各夹层或裂隙间的变形及其综合变形。另外，还可进行声波测试或其他测试手段进行检测，并与地层、钻孔、测井等各项实地检测的成果进行比较，以利于提高试验成果的可靠性和研究相互间的关系性。为科学试验的对照和互比提供一个可资比较的实例。



(上接40页)

### 四、结束语

该项工程作为导流明渠左导墙部分已完建运行，堆石坝正在施工。施工过程中由于料源关系，沥青采用60°甲及5°沥青的混合料，重量比为6:4，麻片与原设计标准不同。由于麻片厚度较薄，约1mm左右，改用层数为36~38层，铺设垫层仍为5mm。按照这种方式铺设其最终压缩厚度可达35cm以上，相应地层承载力将有所减少，防渗墙的应力将有所增加，由于防渗墙所采用的混凝土标号较高，对结构物的应力应变影响不大。进一步的分析有待于取得较长时间的观测资料后，对垫层的蠕变方程复核算。



详图B