

鲁布革水电站岩石流变试验研究

陶振宇

(武汉水利电力学院)

林文华

(水电部第十四工程局)

一、前言

近二十余年来，在岩石力学领域中，对岩石流变的研究引起了人们的广泛兴趣，成为岩石力学发展的一个重要方向。许多研究者把“岩石的流变性状”从广义上理解为岩石的一般力学性状。如1974年在美国丹佛召开的第三届国际岩石力学大会的议题1——“岩石和岩体的物理性状”；1979年在瑞士蒙特勒召开的第四届国际岩石力学大会的议题1：“岩石和岩体的物理性状”；1979年在瑞士蒙特勒召开的第四届国际岩石力学大会的议题1：“岩石和岩体的流变性状”等论文。正如Langer(1979)的总报告所指出的，两者实际上并无大的差别〔1〕。Müller在1983年墨尔本第五届国际岩石力学大会上展望岩石力学今后研究方向时指出〔2〕：“对自然界作了不允许的简化而使人们的观点混乱的一个例子，是忽略了时间因素对岩体性状的影响。……人们从新奥法中学会了考虑时间因素——固然不是从数学上，而是间接地、从方法论上考虑。在这方面虽然取得了很大的成就，但可惜忽略了对它从理论上进行研究的注意力”。作为新奥法的主要倡导者之一，他在这里坦率地承认新奥法的理论研究还有待完善，而且也表明岩石流变研究在地下工程中的重要作用。Müller(1978)还指出〔2,3〕，“从理论上概括时间因素对地下工程的影响是流变学的任务。”……“随着时间变化的岩石性状方面的研究工作增多，将会取得很大的进展。这将对岩石工程迄今忽略过多的问题之一——即特别涉及到边坡的稳定性评价是有益的。因为边坡工程并不真是一个静态问题，更多的是动态问题。自然边坡很少是绝对静止的，它可看作是一个蠕变现象。但要在数学上求解岩石流变力学问题，时机尚未成熟，首先还不知如何找出引入计算的参数。因此，借助于室内试验和现场观测将是非常必需的和十分有益的”。

虽然Müller的这些意见我们不久前才读到，但多年来，我们正是从实践和理论的结合上走过来的〔4-12〕。从实践经验中还认识到，只有和工程设计与施工相结合的情况下才会促进岩石流变研究的发展。因此，从某种意义上讲，岩体现场位移随时间过程的观测与岩石流变试验相结合，已经越出了一般单项岩石测试的范畴，而是岩石工程的设计与施工的一个关键性环节了〔7〕。

正因为这样，我们着手研究鲁布革水电站白云质灰岩和灰质白云岩的蠕变试验。这个工作得到前电力工业部科技委水电处的大力支持，并由云南水电科学技术研究所提供试件，在此对他们的支持和帮助表示感谢。

* 先后参加仪器研制工作和试验工作的还有贾愚如、张忠亭、张扬胜、范正绮、沈小莹、黄效宁和孙淇等同志，长春试验机厂参加仪器研制的有赵仁义等同志。

试验工作由武汉水电学院岩石力学及地下建筑研究室岩石力学组有关同志参加。

二、三点弯曲蠕变试验

试件尺寸有两种，一为 $1.5 \times 3 \times 18$ 厘米；一为 $2 \times 4 \times 20$ 厘米。在试件运输过程中，有八块试件已经断裂，无法进行试验。其余 13 块试件有的经观察发现有许多短的节理，其壁面风化成黄色或褐色。例如 T_{2g} 地层的 A_3 II (3) 号试件中，刚加上一级荷载 ($P = 5.92$ 公斤) 随即断裂，其断裂处的节理壁面呈黄色或褐色。

试验方法有三：其一是快速逐级加载，直至破坏。其二是每加一级荷载后，观测一段时间（例如 24 小时，48 小时或 72 小时）的变形，然后施加下一级荷载。此时又分两种情况，或者使用这种逐级加载和观测的方法，直至破坏；或者使用逐级加载和观测到一定荷载后，保持此荷载不变，并观测其挠度，直至破坏。其三是一次加载至某一荷载，保持此荷载不变，进行长期观测。

试件及试验基本情况如表 1 所示。

表 1 鲁布革地下水电站厂房区
岩石试件尺寸及试验情况（试验时温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ）

岩 石 地 层	试 件 编 号	尺 寸 (长×宽×高) (厘米)	破 坏 荷 载 (公 斤)	试 验 情 况
白云质 灰岩	A_1 I (1)	$20 \times 4 \times 2$	119.79	快速加载断裂破坏
	A_1 I (2)	$20 \times 4 \times 2$ (最大荷载 为 95.26 公 斤未破坏)	95.26	每 3 天加载一次，30 天后加载到 $P = 88.12$ 公斤后， 保持此荷载 66 天不变，进行观测。然后再加载到 95.26 公斤，32 天后试验停止，试件未破
	A_1 I (3)	$20 \times 4 \times 2$	91.55	每 24 小时加载一次，每次加载 15 公斤左右，第 6 次 加载读数后破坏
	A_1 II (1)	$18 \times 3 \times 1.5$	127.67	第一次快速加载至 $P = 106.7$ 公斤，卸载至零；再作 第二次加速加载，直至破坏
	A_1 II (2)	$18 \times 3 \times 1.5$	—	第一次加载至 41.65 公斤，保持此荷载 96 天不变， 然后加到 $P = 46.30$ 公斤，进行长时间变形观测，几乎没有 什么变形，试验共进行 128 天，后因试验室搬迁而停止 快速加载至破坏
	A_1 II (3)	$18 \times 3 \times 1.5$	125.92	
角砾状灰 质白云岩	A_2 I (1)	$20 \times 4 \times 2$	56.97	快速逐级加载，直至破坏
	A_2 I (2)	$20 \times 4 \times 2$	59.5	快速逐级加载，直至破坏
	A_2 II (1)	$18 \times 3 \times 1.5$	87.48	快速逐级加载，直至破坏
	A_2 II (2)	$18 \times 3 \times 1.5$	47.47	每次加载后，观测三天，再加下一级荷载，加到 $P =$ 47.47 公斤后，保持此荷载不变，观测其挠度，直至破坏
含方解石 脉较多灰 质白云岩	A_3 II (1)	$18 \times 3 \times 1.5$	87.48	快速逐级加载，直至破坏
	A_3 II (2)	$18 \times 3 \times 1.5$	5.92	第一级荷载后，挠度不断增加，随即沿节理断裂破坏
	A_3 II (3)	$18 \times 3 \times 1.5$	21.28	每 48 小时加载约 4 公斤，第五次加载断裂破坏

得到的试验结果如下：

第一、岩石试件直至临近破坏时刻，荷载——挠度 ($P-Y$) 曲线基本上是一条直线（图 1、2）。值得注意的是，有的试件其 $P-Y$ 曲线在起始段有微小的曲率（图 1c）；而有的 $P-Y$ 曲线在临近破坏时有所偏离（图 2）。

第二、从试件A₃ II (1)的加一卸一加载循环的P—Y曲线(图3)可以看出，试件的不可恢复的变形不大。试件加载至106.74公斤后开始卸载，总变形量为 104×10^{-4} 厘米，而不可恢复的变形量为 12×10^{-4} 厘米，仅占总变形量的11.5%，开始卸荷的荷载为破坏荷载127.67公斤的83.6%

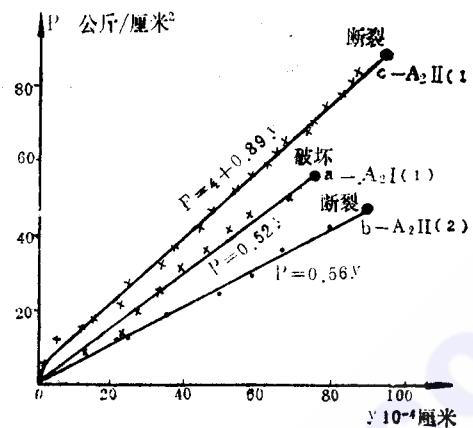
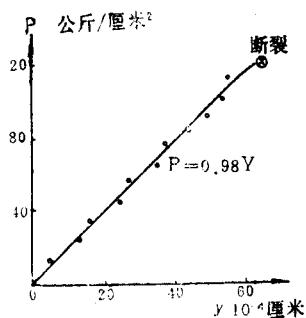
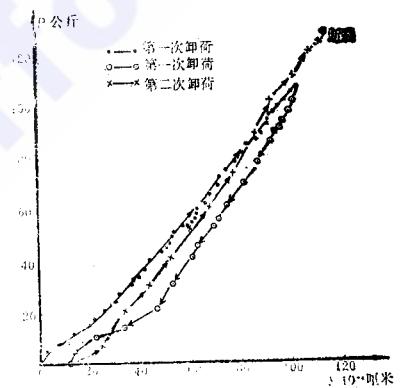
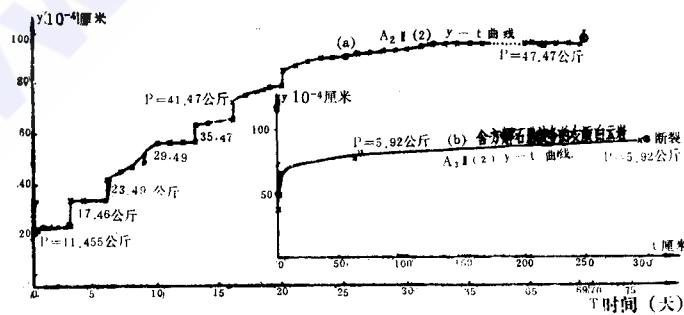


图1 角砾状灰质白云岩P—Y曲线

曲线 1a—A₂ I (1);1b—A₂ II (2);1c—A₂ II (1)。图2 白云质灰岩A₁ II (1)的P—Y曲线

第三、不论是逐级加载至某一荷载后长期稳定不变，直至破坏(图4a)，还是一次加载后稳定不变进行观测直至破坏(图4b)，这两种情况下岩石试件直至非常靠近破坏的时刻，都呈现脆断现象，没有明显的第三阶段蠕变的反弯急剧发展趋势，这与我们过去对二滩正长岩和黄石大理岩等岩石的试验结果有所区别[13][14]。

图3 A₃ II (1)的P—Y加一卸一加载曲线图4 A₂ II (2)与A₃ II (2)的P—Y曲线

第四、对于远低于瞬时破坏荷载(例如1/3左右)，如A₁ II (2)试件则长期观测到的变形几乎是不变的，

第五、从所进行的试验结果看， A_1 组的岩石承载力最大， A_2 组次之， A_3 组变化最大。

第六、根据这些试验得到的岩石粘滞系数 $\eta = i \times 10^{11}$ 泊，这里 $i = (1 \sim 9)$ ，比一般岩石的室内试验结果略低^[15]。这可能是鲁布革的岩石中大量存在隐节理和微节理的缘故。

三、三轴流变试验

为了进行三轴流变试验，首先需要研制专用的岩石三轴流变仪。这一工作从 1978 年开始笔者即着手搜集资料，进行调研，选定方案，联系制造厂家等一系列工作^[7,8,12]，终于研制成功 RYS-7 型岩石三轴流变仪（武汉水利电力学院与长春试验机厂合作完成），并于 1984 年 4 月通过技术鉴定。

我们研制的 RYS-7 型岩石三轴流变仪，主要为中等坚硬岩石的三轴和单轴流变试验的专用设备。该仪器是由五个独立筒体与其有关的增压器等组成，可以同时对五个试件进行试验，以便观测在不同围压和轴压作用下岩石的蠕变性能。并且，五个筒体分为两组，一为高压组（三个），其轴向应力的可调范围为 400—1500 公斤/厘米²；一为低压组（二个），其轴向应力的可调范围为 100—400 公斤/厘米²。两组的围压均为 80—300 公斤/厘米²，相应被测试岩层的埋深约 1,000 米。其所以分为两组，是为了提高测量精度，因为压力的测量精度与其可测定压力的大小和范围有密切关系。

三轴压力筒体由两部分组成，下部为轴向压力的二次增压器，上部为压力室。压力室内经为 100 毫米，试件尺寸为 $d \times h = 25 \times 75$ 毫米。在低压组的压力室中，并配有作拉伸用的反向装置，测试拉应力的范围为 100—200 公斤/厘米²。

该仪器采用压缩氮气（气压不低于 80 公斤/厘米²，最高达 150 公斤/厘米²）作为动力源，经过分配室进行减压阀，以较低的工作压力分别送入轴向增压器和围压增压器，使油压稳定地作用在试件上。氮气压力源的优点是不受停电的影响。减压阀是一个压力调整装置，它能使压力保持在额定值的范围内。

筒体上装有测量轴向变形和径向变形用的差动变压器，以及千分表和百分表，并留有电测导线。声发射探头装在支座内，顶盖用螺丝和筒体连接，便于试件安装。

试件的变形测量可用机械式（千分表和百分表）和电气仪表（电阻片法）来进行。而轴向压力和围压是通过精密压力表测量。该机有一台 SFI-1 型声发射仪，可巡回监测各试件的裂纹发展状态；并与有三支笔的 $x-y$ 函数仪连接，以描绘声发射频率曲线和累积曲线。

应用该仪器进行了鲁布革岩石的单轴和三轴试验，实践证明，该仪器压力稳定，性能符合设计要求。

由于缺灰质白云岩试件，在这次试验中只进行了白云质灰岩试验。

试件尺寸为 $d \times h = 25 \times 75$ 毫米。共有三个试件，分别置于上述专用岩石流变仪中的 1 号、3 号和 4 号压力室进行试验。另有两个试件作快速三轴试验。试件是室内风干状态，经测定白云质灰岩的瞬时割线弹性模量为 51.9×10^4 公斤/厘米²，单轴抗压强度

为 1035 公斤/厘米²

试验前，先将电阻片贴于试件上，为了防止试验中加固压时油浸入试件，在贴片后的整个试件表面涂上一层高分子树脂胶，然后套上橡胶膜套，并将上下压头装上，用橡皮筋扎紧两端。安装试件时，先打开压力室顶盖，检查加压活塞是否正确复位，再将准备好的试件放入压力室内，检查电阻片引线，声发射探头引线是否接通，符合要求后盖上压力室顶盖。其它测试仪表，管道等均要符合试验要求。在一切准备工作完成后才能开始试验。

试验时，根据工程场地岩体所承受的地应力状态来确定围压。试验取 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 及 100 公斤/厘米²。

试件加载前，先加一定预压（施加 0.5 吨的轴向压力）然后将百分表、千分表，差动变压器及应变仪调零或初读数，再施加围压，最后加大轴压而使试件破坏。这是一般三轴试验的程序。

岩石三轴蠕变试验，是在荷载恒定的条件下，观测试件的变形和应变随时间的过程。这次试验结果如图 5 及 6 所示。试验时温度为 10°C ± 3°C。

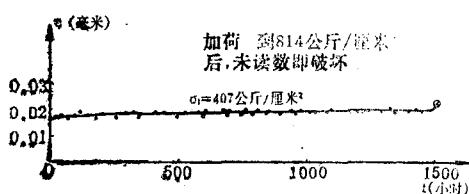


图 5 1 号试件的蠕变曲线（白云质灰岩）
单轴蠕变试验

试验结果：

第一、鲁布革水电站白云质灰岩有明显的脆性特征；在蠕变发展到破坏时，其变形并无显著增大的趋势；试件常沿一定的微节理面破坏，与三点弯曲试验所观察到的现象相同。

第二、由于试验初期没有安装空调设备，虽然试验受温度的影响颇为明显，但从总的的趋势看

还是符合规律的。

第三、从 1 号及 3 号三轴蠕变试验结果所得的强度指标为

$$\tau = 1.50 + 0.68\sigma \quad (1)$$

而三轴快速试验所得的结果（图 7）为

$$\tau = 1.70 + 1.38\sigma \quad (2)$$

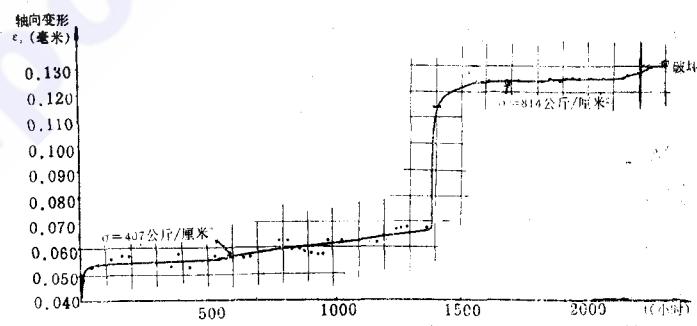


图 6 三轴蠕变曲线（围压 $\sigma_2 = \sigma_3 = 100$ 公斤/厘米²）

这里， τ 和 σ 的单位均为公斤/厘米²。

可见，两者相差很大，其 f 值分别为 0.68 及 1.38，前者仅为后者的 49.3%；但 c 值相差不大，分别为 150 及 170 公斤/厘米²，前者为后者的 88.2%。

第四、用微机对试验结果进行计算，得到的粘滞系数 η 也是 10^{11} 泊的数量级，与三点弯曲结果较为吻合。

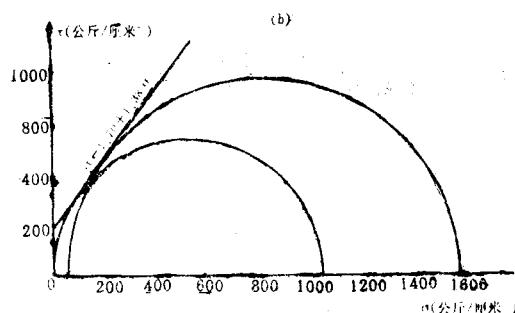


图 7 白云质灰岩三轴流变快速试验

四、结 论

综上所述，可以认为：

第一、用我们新近研制的岩石三轴流变仪进行蠕变试验，是可行的，密封性能良好，压力稳定，操作简便。

第二、三点弯曲试验和三轴蠕变试验表明。鲁布革岩石的粘滞系数为 10^{11} 泊的数量级。

第三、对鲁布革水电站岩石的蠕流试验表明，此种岩石的蠕变破坏呈明显的脆性破坏，并且强度有明显的降低，尤其是 f 值的降低甚剧，这是值得注意的。

第四、鲁布革水电站岩石的微节理对岩石力学性能的影响是重要的，在设计和施工中应予以足够的注意。

参 考 文 献

- [1] M. Lager (1979), 岩石与岩体的流变性状, 国际岩石力学学会第四届大会总报告译文集, 中国科学院武汉岩土力学研究所等译, 1984年8月
- [2] L. Muller (1983), Future Development and Directions in Rock Mechanics, 5 th International Congress of ISRM. Merbourne.
- [3] L. Muller (1978), Der Felsbau III (Tunnebau) Stuttgart
- [4] 陶振宇 (1976), 水工建设中的岩石力学问题, 水利电力出版社
- [5] 陶振宇 (1980), 岩石的流变特性及其在喷锚支护中的应用, 《地下工程》, 第4期
- [6] 陶振宇、张忠亭、贾愚如 (1982), 国外水工地下工程岩石力学量测概述, 《地下工程》, 第10期
- [7] 陶振宇、贾愚如 (1983), 关于岩石流变试验问题, 《勘察科学技术》, 第1期
- [8] 陶振宇、张忠亭 (1984), 岩石流变性研究概述, 《水利水电技术》, 第5期
- [9] 陶振宇 (1982), 岩石蠕变试验与现场观测的比较分析, 武汉水利电力学院
- [10] 陶振宇 (1981), 岩石边坡的蠕变特性, 武汉水利电力学院
- [11] 陶振宇 (1984), 从盐池矿区岩石滑坡看天福庙坝肩的稳定性, 《岩石力学》, 第11期
- [12] 陶振宇、贾愚如 (1984), 岩石三轴流变仪, 《岩石力学》, 第10期
- [13] 陶振宇等 (1981), 二滩水电站正长岩的断裂与流变试验研究的初步报告, 武汉水利电力学院
- [14] 陶振宇等 (1982), 黄石大理岩和小浪底红色砂岩的断裂与流变的试验研究, 武汉水利电力学院
- [15] 陶振宇 (1981), 岩石剪切模量的现场测定方法, 《岩土工程学报》, 第3期