

# 单轴压缩条件下四种岩石的蠕变和松弛试验研究

李永盛

(同济大学 上海 200092)

**摘要** 本文采用伺服刚性机对四种不同强度的岩石材料进行了单轴压缩条件下的蠕变和松弛试验,观察和分析了岩石与一般连续介质不同的蠕变和松弛规律,以及其他时效变形特点,在此基础上探讨了岩石的流变机制及其对岩体工程变形和稳定的影响。

**关键词** 时间效应,岩石试验,蠕变,松弛

## 1 前言

流变性质和时效特征是岩石材料的固有力学属性,也是用以解释和分析地质构造运动现象和进行岩体工程长期稳定性预测的重要依据。根据大地构造测试结果,地壳目前的平均蠕变速率为  $10^{-16}1/s^{[1]}$ 。不少大断层至今仍有持续移动的迹象,如美国 San Andreas 断层的移动速度为 7mm/年,在过去的七千万年内,位移总量达到 500km<sup>[2]</sup>。在边坡、隧洞、基坑、油井、铁路路基等岩体工程中,有关岩体开挖导致的岩体流变现象亦有较多的报道<sup>[3-6]</sup>。近年来,结合能源开发和环境保护所进行的天然气、液化气、油料以及核废料地下储藏课题研究,将岩石材料在不同荷载水平和不同温度条件下的长期变形与稳定问题提到了十分紧迫和重要的地位<sup>[7]</sup>。

一般认为,岩体工程中的时间效应主要是由以下几个方面的因素所引起的:

(1) 岩石材料本身所具有的粘性性质,如蠕变、松弛、滞后以及弹性后效等。一般的软岩,如盐岩、泥岩、粘土岩等,其粘滞系数  $\eta$  都达到  $10^6-10^9\text{MPa}\cdot\text{s}^{[8]}$ 。硬岩的流变性状相对较弱,如测得的花岗岩的粘滞系数  $\eta$  为  $10^{13}\text{MPa}\cdot\text{s}^{[9]}$ 。然而,由于受到成岩过程中的地质构造运动影响,岩石材料中存在各种裂隙、节理、层理等构造面,这一结构特点导致脆性岩体亦呈现较强的流变性状。同时,结构面在岩石中的随机分布特点,也使得有关岩石材料流变规律和变形特征的研究变得十分复杂和困难。

(2) 岩石材料所受到的应力水平和加载方式。在岩体开挖与支护过程中,按所处的空间位置和时间间隔,岩石材料各质点所受到的应力水平和加载速率都是不同的,而这些因素都直接影响到材料的流变规律。已有观测资料表明,当施加的应力水平相对于材料强度较低情况下,岩石材料一般表现为蠕变速率持续衰减的情况,只有在应力水平达到或超过某一限值时,材料的应变速率才维持在某一常值或持续增大,并很快导致材料的破坏<sup>[10]</sup>。

1993年4月5日收到初稿,1994年9月30日收到修改稿。

室内试验中采取不同的加载速率、加载路径以及加载形式(如单轴压缩、常规三轴等),所获得的岩石材料应力—应变—时间曲线间存在很大差别<sup>[11-13]</sup>。

(3) 温度、湿度和其他赋存环境。一般情况下,温度的提高使得岩石材料的延性性状增强,导致蠕变量值的明显提高<sup>[14]</sup>。地下水溶解和软化了充填在结构面和介质孔隙中的某些粘土质矿物颗粒。量测所得的变形值表明,与干燥试样相比,饱和岩石无论是在初始蠕变量值上,还是在稳态蠕变速率上都有相应的增长<sup>[15,16]</sup>。

室内和现场流变试验是研究材料时效特征和变形规律的主要手段。从三十年代起就有较为完整的岩石流变测试结果发表<sup>[17]</sup>,之后的六十多年期间,有关岩石材料流变性状的资料 and 成果越来越趋于丰富和完善<sup>[8,18]</sup>。蠕变和应力松弛是岩石流变试验中常用的两种观测方法。由于岩石种类繁多,性状各异,而流变试验所要求的周期长、精度高,对测试仪器又有十分严格的要求,因此岩石时效观测研究仍为当前岩石力学与工程界所密切关注。

本文选择了我国四种不同强度的岩石材料,采用具有伺服控制系统的刚性试验机进行了单轴压缩条件下的蠕变和松弛试验,通过观测得到的蠕变曲线和松弛曲线,提出蠕变速率随时间和应力变化的规律,以及应力松弛非连续性变化特点,并由此建立了旨在描述岩石材料应力—应变—时间的非线性本构方程。

## 2 岩石试样、测试仪器和试验方法

岩石试样为采自四川的大理岩和红砂岩,以及辽宁沈北煤田的粉砂岩和泥岩。大理岩的单轴抗压强度 $\sigma_f=120\text{MPa}$ ,属脆性硬岩。红砂岩强度稍弱,单轴抗压强度为 $60\text{MPa}$ 。其余两种岩石,即粉砂岩和泥岩均为强度较低的软岩, $\sigma_f$ 分别为 $12\text{MPa}$ 和 $5\text{MPa}$ 。岩样切割加工成 $5\times 5\times 10\text{cm}$ 的标准试件共计31块,其中粉砂岩和泥岩质地松软,加工时易掉棱缺块,后按相同宽高比 $1:2\sim 2.5$ 适当减小试件尺寸。试件端面平整度和侧面平整度控制在 $0.003\text{cm}$ 范围之内。加载前试件在自然干燥环境中置放30—45天。试验环境的温度一般控制在 $20\pm 3^\circ\text{C}$ 。试件经表面处理,在对称的两侧分别粘贴标距为 $1.5\text{cm}$ 的轴向和侧向电阻应变片,以此观测各局部质点变化和裂缝开展情况。流变试验前,首先按常规试验方法测得四种岩石的瞬时破坏强度 $\sigma_f$ 和破坏时相对应的应变值 $\epsilon_f$ ,以此作为蠕变和松弛试验的参考值,如表1所示。

测试仪器为Instron—1345伺服刚性材料试验机,最大轴压 $1000\text{KN}$ 。该机设有伺服误差小于 $0.1\%$ 的闭路控制系统,可进行位移控制、荷载控制以及应变控制的单轴压缩试验。通过系统中的函数发生器和 $x-y$ 自动记录仪可任意选择加载速率和加载方式,并同步记录试验曲线。本文所述的蠕变试验是通过试验机中的荷载控制频道实施的,伺服系统所跟踪与反馈的是荷载信息,而松弛试验则是通过位移控制频道进行,这时伺服系统所跟踪的是试件的位移量值。由于试验中的控制参数为荷载和位移,而理论模型中通常所采用的为应力和应变,两者之间存在一定的差别,其根本原因在于试验过程中试件的断面尺寸并非常值。Rutter<sup>[19]</sup>曾采用相同岩石材料进行常应力条件下和常荷载条件下的蠕变试验,发现常应力状态下材料所产生的蠕变量值大于常荷载状态下的相应值,增大幅度与观测材料的泊松比和初始孔隙度有关。

试验采用单体分级加载方法进行,即首先按常规压缩试验所获得的瞬时破坏强度 $\sigma_f$ 和

表1 四种岩石材料的常规力学参数和岩性描述  
Table 1 Normal mechanical parameters and property description of 4 kinds of rock

岩石名称	力学参数		岩性描述
	单轴抗压强度 $\sigma_f$ (MPa)	轴向极限应变 $\epsilon_f$ (%)	
大理岩	120	0.23	白色纯净,成份单一,主要有碳酸盐矿物组成,颗粒大小均匀,块状构造,无明显的纹理和裂隙发育。
红砂岩	60	0.67	褐红色,中-细粒结构,主要由石英(40%)和长石(30%)组成,偶见云母分布。钙质和铁质胶结,无裂纹及条纹存在,完整性良好。
粉砂岩	12	0.52	土红色,颗粒极细,碎屑含量高达60%,矿物成份主要为石英和长石,填隙物为铁质及粘土质,硬度小,指甲即可划出刻痕。
泥岩	5	0.55	褐红色,致密块状,外表呈土状,砂泥质结构或粉砂泥质结构。矿物颗粒无定向排列,为显微鳞状构造,可见2-4mm大小的圆形结核。

极限应变  $\epsilon_f$  (表1), 将拟施加的最大荷载或最大位移分成若干等级, 然后在同一试件上由小到大逐级施加荷载或位移, 各级荷载和位移所持续的时间根据试件的应变速率或应力速率变化情况予以确定。本文试验中当观测到的位移增量小于 0.001mm/h(蠕变试验), 荷载衰减速率小于 0.1N/h(松弛试验)时, 即认为因施加该级荷载或位移所产生的蠕变或松弛已基本趋于稳定, 遂施加下一级荷载或位移。参照岩石的试验方法, 加载速率取为  $\sigma = 0.5 \text{ MPa/s}$  (蠕变试验) 和  $\dot{\epsilon} = 3.75 \times 10^{-5} / \text{s}$  (松弛试验)。第  $n + 1$  级荷载施加后在  $t$  时刻所产生的蠕变值, 为前  $n$  级荷载和第  $n + 1$  级荷载增量在相应时刻产生蠕变的叠加值。由于在  $n$  级荷载施加过程中, 试件已经受到累积损伤或局部开裂, 因而与多体一次加载测试方法相比, 单体分级加载方法测得的材料蠕变或松弛量值有可能偏大, 按此计算得到的材料强度偏低, 根据室内实测结果<sup>[20]</sup>, 其下降幅度一般在 10% 左右, 这对工程应用而言是偏于保守与安全的。由于单体分级加载方法能在同一试件上观测得到不同应力或位移水平的变形或应力变化规律, 大大节省了所需试件和观测仪器的数量, 同时亦能避免因岩石性质不均匀性导致的试验结果离散性等, 因而这一方法在岩土流变试验中仍得到较为广泛的应用。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 蠕变规律

通过蠕变试验测得的四种岩石变形与时间曲线如图 1 所示, 图中的曲线是当施加的荷载为岩石瞬时单轴抗压强度的 75% 时, 通过对所测试验数据回归分析整理后得出的。除大理岩之外, 其他三种岩石都观测到试件的破坏。由图中的曲线可知:

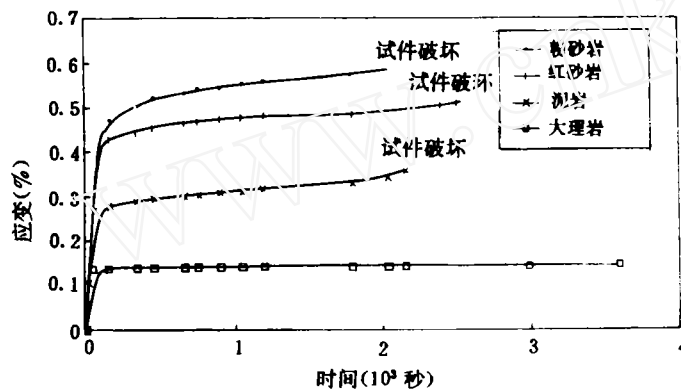


图 1 四种岩石的蠕变曲线 ( $\sigma/\sigma_f = 75\%$ )

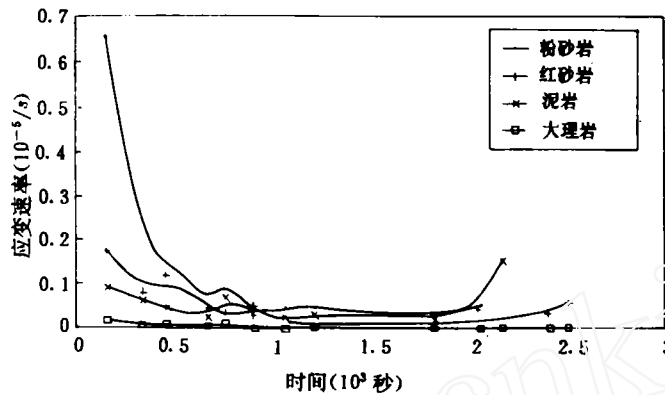
Fig. 1 Creep curves of 4 kinds of rock ( $\sigma/\sigma_f = 75\%$ )

(1) 四种岩石在加载瞬时均有一定量的弹性应变, 瞬时弹性反应的量值及其斜率与岩石材料的力学性质有关。

(2) 瞬时弹性变化之后, 四种岩石材料出现了以下三种不同的情况。由于大理岩属时间效应不很明显的脆性材料, 其后续与时间有关的蠕变仅占变形总量的 4%, 蠕变曲线很快趋于水平。粉砂岩和红砂岩在弹性变形之后出现蠕变速率逐渐减小的过渡蠕变阶段, 然后进入稳态蠕变阶段, 持续一段时间后, 当蠕变速率略有增大时即发生试件破坏, 其加速蠕变阶段表现得并不明显。泥岩在弹性变形之后几乎是直接进入稳态蠕变阶段的, 其过渡蠕变阶段持续的时间十分短暂, 但在材料破裂前出现比较明显的征兆, 在蠕变曲线中即有变化速率迅速增大的上翘段。

(3) 与表 1 所示的瞬时单轴抗压强度相比, 图中出现的材料破坏反映了岩石时效特征在强度方面的表现。对于时间效应比较明显的岩石种类, 如所观测的泥岩、粉砂岩和红砂岩, 长期强度仅为瞬时强度的 75% 或更低, 但对于时间效应不十分明显的岩石, 如所测试的大理岩, 其长期强度则与瞬时强度较为接近。只有当所施加荷载接近或等于材料的长期强度时, 才可能出现如图 1 所示的完整的蠕变曲线和试件破坏。

计算图 1 中岩石蠕变曲线对应于各时刻的斜率, 即蠕变速率, 可以得到材料蠕变过程中蠕变速率与时间的关系曲线如图 2 所示。在整个加载过程中, 试件的蠕变速率经历了减

图 2 四种岩石的蠕变速率与时间的关系曲线( $\sigma/\sigma_f = 75\%$ )Fig. 2 Relationship between creep rate and time of 4 kinds of rock( $\sigma/\sigma_f = 75\%$ )

小、稳定和增大三个阶段,各阶段出现与否及其延续时间则与所观测的岩石材料性质以及施加的荷载水平有关。图 2 中的泥岩、粉砂岩和红砂岩的蠕变速率都出现了上述三个阶段,但各阶段持续的时间长短存在一定的差别。其中蠕变速率保持为常量的稳定阶段持续时间较长,表示材料即将破坏的蠕变速率增大阶段所延续的时间往往很短,一般在蠕变速率稍有增大后试件就发生断裂破坏,反映在蠕变速率-时间曲线上,最终的曲线上翘段相当短暂。由于岩石为非均质和非连续的材料,因此在下降至稳定阶段蠕变速率出现上下略有波动的情况。由图 2 可知,大理岩在相当于其单轴抗压强度的 75% 荷载作用下,仅出现了蠕变速率下降段,很快衰减为零后即保持不变,表明该种材料的流变性能并不明显。

### 3.2 松弛规律

试验中测得的不同岩石材料的松弛曲线之间变化比较大,其中以抗压强度较低的泥岩和抗压强度中等的红砂岩最为典型,前者表现为连续的和比较光滑的曲线,与一般的连续介质形态较为接近;后者则出现不连续和间断性突变状况。以下通过这两种典型曲线予以描述。

#### 3.2.1 连续型应力松弛曲线

图 3 为泥岩在不同应变水平作用下测得的应力松弛曲线,从曲线的变化规律看,由于材料的组成比较均匀,颗粒相对致密,因而应力衰减的轨迹较为平缓 and 连续,与一般连续介质的松弛曲线比较接近,具体表现在:

- (1) 随着应变水平的提高,材料应力松弛量相应增大,两者间基本呈线性变化关系。
- (2) 在某一级应变水平作用下,岩石的应力松弛速率在加载完成初期较大,随时间逐渐减小,最终趋于零值。
- (3) 当施加的应变水平比较高,如图 3 中应变值为 0.54% 情况,试件应力在经过一段时间的应力调整以后,因裂缝扩展等原因发生整体性破坏,在加载后 500 秒时断面应力突然从 1.5MPa 下降为零。

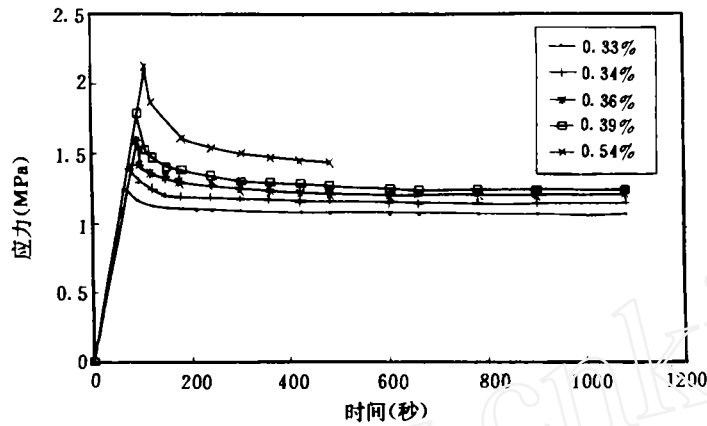


图3 泥岩的应力松弛曲线

Fig. 3 Stress relaxation curves of claystone

### 3.2.2 阶梯型应力松弛曲线

图4为试验测得的红砂岩具有代表性的应力松弛曲线。由图4可知，试件首先承受了0.5%的作用应变并保持荷载不变，断面应力从46.5MPa很快下降至37MPa，随后不再变化。第二级荷载在7000秒时施加，作用在试件上的应变水平增至0.52%，加载后断面应力较快从41MPa减少到30MPa，维持了600秒后，在所施加应变值不变的情况下，于A点(图4)突然下跌，应力值瞬时减小幅度为10MPa。之后，试件应力维持在19MPa水平上暂时不变，但80分钟后在B点处再次发生瞬时应力下降，这次应力松弛的幅度有所减小，为5MPa。经过两次剧变后，试件维持在12.5MPa的应力水平直至试验结束。试验中观测到，伴随两次瞬间应力下降，试件宏观裂缝有明显的扩展和延伸。非连续型松弛规律的特点亦

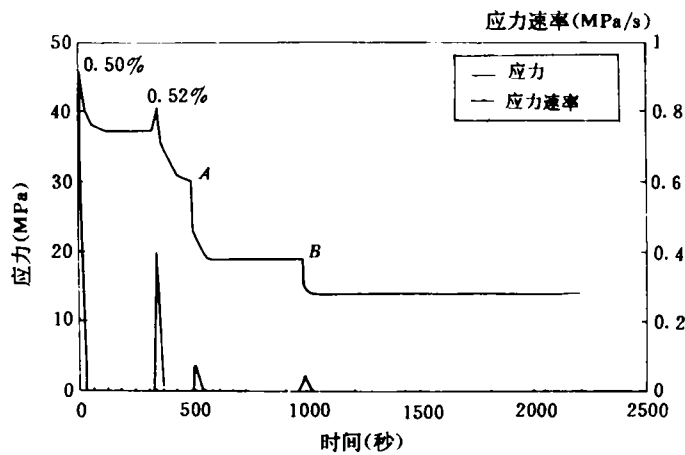


图4 红砂岩的应力松弛曲线

Fig. 4 Stress relaxation curves of red sandstone

可由应力变化速率与时间的关系曲线观察得到。图 4 中的应力速率曲线在 A 点和 B 点处出现了两次脉冲型瞬间增大, 但 B 点处的脉冲幅度明显小于 A 点处的相应值, 表明经过前一次的应力释放后, B 点处对应的试件能量积聚已大为减小。过了 B 点后, 试件应力变化速率下降为零, 材料恢复静力平衡。

非连续型的应力松弛规律与岩石试件中的裂缝开展具有十分紧密的联系。当试件承受一定的应变约束后, 介质中初始损伤点首先因强度不足而产生局部性开裂, 或沿试件本身带有的初始微裂隙产生扩展, 以缓解应力集中现象。开裂处介质原先承担的大部分应力逐渐转移到试件的其他质点, 导致新的应力集中、新的裂缝产生和原有裂缝的进一步延伸和扩展。在应变水平保持常值的条件下, 这一应力调整过程充满着能量积聚与能量耗散的交替变化, 反映在时间轴线上则为时而平缓、时而陡峭的应力衰减曲线。这是岩石材料在流变状态方面不同于其他理想粘性介质的重要区别。Langer 曾指出, 鉴于岩石结构和结构组成(颗粒结构、非连续面分布等)对岩体内力分布起到如此重要的影响, 岩石流变力学必须是不连续介质力学或结构流变力学<sup>[31]</sup>。岩石非连续性的流变性质超出了一般线性粘弹性理论关于材料变形连续、均匀、各向同性等假设, 使得有关这一课题的研究具有相当的难度, 同时亦具有其独特性。

### 3.3 长期强度和残余强度

从岩石材料具有的强度条件看, 蠕变观测所揭示的是计入时效特征后介质的长期强度指标, 该值较常规瞬时强度有明显的降低。图 1 中的泥岩、粉砂岩和红砂岩尽管在物理力学性质方面有所不同, 但均在相当于瞬时单轴抗压强度的 75% 定常荷载作用时发生了破坏。这一现象对于承受荷载水平比较高、工作年限比较长的岩体工程尤为重要。对于某些时效特征较为明显的岩石材料, 按瞬时强度设计往往难以保证工程在长期工作条件下的安全和稳定, 计入材料的时间效应成为校验工程强度的必要手段。

应力松弛试验中岩石在定常应变作用下破裂后仍具有的抗力, 似可认为是破裂后岩石材料所具有的残余强度。在应力松弛试验中, 岩石试件所受到的是应变约束, 加载后试件随即产生轴向压缩和侧向膨胀, 初始的裂隙亦有所扩展, 使得加载引起的介质内应力集中现象得到一定程度的缓解, 同时也使实际施加在试件上的外力有所减小。这时如果材料仍具有的内部抗力, 即残余强度大于或等于外荷载, 则试件重新进入静力平衡状态; 反之, 如果开裂与变形导致材料强度完全或严重丧失, 则试件在瞬时或短时间内即破坏。阶梯状的变形曲线不可能在蠕变试验中出现, 原因在于蠕变试验中试件所受到的外力是常量, 该值不会因为试件产生了变形而有所减小, 试件开裂只会加剧材料内的应力集中, 从而加速试件的破坏。应力松弛试验中所观测到的岩石残余强度现象, 与岩体工程中的岩柱, 如矿柱、煤柱的受力状态存在一定程度的相似性。尽管出现许多裂缝和岩块掉落, 一般情况下岩柱仍具有相当的支撑强度, 并能够在很长时间内保持静力平衡。从另一方面考虑, 岩体材料通过变形适当增大可以使得介质内的应力集中现象得到缓解, 积聚的能量得以释放, 因此可以认为, 在外力变化不大的情况下, 破碎岩体不易发生诸如岩爆等剧烈变形。对于刚度很大、地应力水平较高、能量积聚剧烈的岩体地层, 允许产生适量的变形和裂缝是减小突发性能量释放和避免工程事故的有效手段。

## 4 结论

(1) 在一定水平的定常应力作用下, 岩石材料一般都出现蠕变速率减小、稳定和增大三个变化阶段, 但各阶段出现与否及其延续的时间, 则与所观测的岩石性质和所施加的应力水平有关。

(2) 试验中观测到岩石的松弛曲线具有连续型和阶梯型两种典型的变化规律, 前者与一般的连续介质比较接近, 而后者则具有非连续性和突变性的特征。造成这两种不同表现现象的原因, 主要在于材料本身所具有的力学特性, 如初始损伤和裂隙、介质不均匀性等。

(3) 蠕变试验观测所揭示的是计入时效特征后介质的长期强度指标, 该值明显小于相同材料的瞬时强度, 这对于承受荷载水平比较高、工作年限比较长的岩体工程具有十分重要的意义。应力松弛试验中岩石在定常应力作用下破裂后仍具有的抗力, 可以认为是岩石材料破裂后的残余强度, 这对解释岩体工程的岩柱强度、岩爆等现象较为有益。

(4) 岩体工程中流变分析所计入的时间一般均以年、月考虑, 在地质构造研究领域覆盖的时间域则更长。由于受试验设备和其他条件的限制, 本论文所观察的岩石流变现象相当短, 另外在试件数量、加载方式、测试内容等方面还存在诸多不足, 这些均有待今后研究中进一步改进。

## 5 参考文献

- 1 陈宗基: 岩石力学的发展方向. 岩石力学与工程学报, 1990; 9(3): 175—183
- 2 Franklin J. A. & Dusseault M. B.: Rock Engineering. McGraw-Hill Publishing Co., 1989
- 3 Yamaguchi U. & Shimotani T.: A case study of slope failure in limestone quarry. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1986; 23(1)
- 4 Minh D. N. & Habib P.: Time dependent behaviour of a pilot tunnel driven in hard marls, *Design and Performance of Underground Excavations* (E. T. Brown & Hodson J. A. Edited). 1984
- 5 Trow W. A. & Lo K. Y.: Horizontal displacements induced by rock excavation; Scotia Plaza, Toronto, Ontario. Can. Geotech. J., 1989; 26
- 6 Zhang Zhongchun & Wang Shengzu: Long-term monitoring of subgrade stability of the Qinghai-Tibet Railway in the Charhan Playa Region, *Engineering in Complex Rock Formation*. 1986
- 7 Kemeny J. M. & Cook N. G. W.: Time-dependent borehole stability under mechanical and thermal stresses; application to underground nuclear waste storage, *Rock Mechanics as A Multi-Disciplinary Science, Proc. 32nd US Symposium*. The University of Oklahoma, Norman; 1991
- 8 Lama R. D. & Vukoburi V. S.: Handbook on Mechanical Properties of Rocks. Vol. 1, TRANS TECH PUBLICATIONS, 1978
- 9 Ito H.: On rheological behaviour of in situ rock based on longterm creep experiments, *Proc. of the 7th Cong. ISRM*. Aachen; 1991
- 10 Tan Tjong-kie & Kang Wen-Fa: Locked in stresses, creep and dilatancy of rocks, and constitutive equations. *Rock Mechanics*, 1980; 13; 5—22
- 11 Bieniawski Z. T.: Time-dependent behaviour of fractured rock. *Rock Mechanics*, 1970; 2; 123—137
- 12 Wawersik W. R.: Time-dependent behaviour of rock in compression, *Proc. 3rd Cong. ISRM*. Denver; 1974



- 13 Passis A. & Kaiser P. K. : Stress path dependence of creep parameters, *Proc. of the 7th Cong. ISRM*. Aachen: 1991
- 14 Hardin J & Carte N. : Rheological properties of rocks at high temperatures, *Proc. of the 4th Cong. ISRM*. Suiss: 1979
- 15 Afronz A. & Harvey J. M. : Rheology of rocks within the soft to medium strength range. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geotech. Abstr*, 1974; 11
- 16 Hetteema M. H. , Pater C. J. & Wolf K. H. A. A. : Effects of temperature and pore water on creep of sandstone rock, *Rock Mechanics as A Multi-Disciplinary Science, Proc. of the 32nd US Symp.* . The University of Oklahoma: Norman, 1991
- 17 Griggs D. : Creep of rocks. *J. Geol.* , 1939; 47: 225—251
- 18 Robertson E. C. : Viscoelasticity of rocks, in *State of Stress in the Earth's Crust* (W. R. Judd Ed. ), New York: Elsevier, 1964
- 19 Rutter E. H. : On the creep testing of rock at constant stress and constant force. *Int. J. Rock Mech. Sci.* , 1972; 9: 191—195
- 20 刘雄: 软岩抗剪强度单体测定法试验研究. *岩石力学与工程学报*, 1990; 9(1): 63—67
- 21 Langer M. : Rheological behaviour of rock masses, *Proc. of the 4th Inter. Cong. of ISRM*. Suiss: 1979

## CREEP AND RELAXATION OF 4 KINDS OF ROCK UNDER UNIAXIAL COMPRESSION TESTS

Li Yongsheng

(Tongji University, Shanghai 200092)

### Abstract

The time-dependent behaviour of creep and relaxation of 4 kinds of rock are investigated under uniaxial compression condition by using the servocontrolled hydraulic testing machine. On the basis of discussion on the experimental curves of creep and relaxation and other time related deformation phenomena of rock specimen, the author provides the understanding and opinion about the rheological mechanism of the rock-like materials.

**Key words** time-dependent behaviour, rock test, creep, relaxation