

# 不同含水率软弱结构面剪切蠕变试验及模型研究

李鹏, 刘建

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘要:** 软弱结构面的蠕变特性是岩体重要力学特性之一, 其蠕变特性常控制着岩体的蠕变变形和长期强度。软弱结构面中填充物的含水率是影响其蠕变特性的重要因素之一, 通过开展不同含水率砂岩软弱结构面剪切蠕变试验, 得到了具有不同含水率的砂岩软弱结构面剪切蠕变试验曲线。基于得到的剪切蠕变试验曲线, 分析了含水率对软弱结构面剪切蠕变特性及长期抗剪强度的影响规律。最后通过模型辨识, 采用改进的粘弹塑性模型来描述考虑含水率变化的砂岩软弱结构面蠕变特性。

**关键词:** 软弱结构面; 剪切蠕变试验; 含水率; 长期抗剪强度; 改进的粘弹塑性模型

中图分类号: TU458<sup>+</sup>.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2009)06-0049-05

大量的现场量测和室内试验都表明, 对于软弱岩石以及含有泥质充填物和夹层破碎带的岩体其流变属性都是非常显著的。软弱夹层和沿节理结构面的剪切流变状态是决定不连续岩体流变特征的关键<sup>[1]</sup>。工程实例表明, 大量岩体工程如边坡、坝基等失稳均由软弱结构面和沿节理结构面的剪切蠕变破坏造成的。因而研究软弱结构面的剪切蠕变特性显得尤为重要。然而, 由于结构面表面形态、充填物及充填厚度等诸多因素的影响, 使得结构面蠕变特性的研究较为复杂。在众多影响软弱结构面蠕变特性因素中, 软弱结构面充填物的含水率是影响软弱结构面蠕变特性的重要因素之一。很多岩土工程往往是由于软弱结构面中充填物含水率变化而破坏失稳的。据统计, 90%以上的水电工程大坝失事是由于水的作用引起的。含水率的变化导致岩体工程失稳给国家财产造成很大损失, 给人民生命财产安全构成极大的威胁, 故对岩体遇水后的流变失稳破坏研究是一个亟待解决的问题之一<sup>[2]</sup>。

目前, 国内外对不同结构面蠕变特性方面的研究较多<sup>[1, 3-10]</sup>, 但对不同含水率软弱结构面剪切蠕变特性, 特别是含水率对软弱结构面长期抗剪强度及

蠕变模型影响方面的研究还鲜见报道。本文通过开展不同含水率砂岩软弱结构面剪切蠕变试验, 得到了具有不同含水率的砂岩软弱结构面剪切蠕变试验曲线。基于得到的剪切蠕变试验曲线, 分析了含水率对软弱结构面剪切蠕变特性及长期抗剪强度的影响规律。最后通过模型辨识, 采用改进的粘弹塑性模型来描述考虑含水率变化的砂岩软弱结构面蠕变特性。该研究可为边坡、坝基、地下硐室等与水有关的岩体工程的安全性和稳定性分析提供良好的促进和借鉴作用。

## 1 不同含水率砂岩软弱结构面剪切蠕变试验

试样取自重庆鱼嘴大桥南岸重力锚墩, 为长石英砂岩。软弱结构面充填物质为模拟天然岩体充填物而配制的膨润土、砂岩岩屑型充填物。试样采用边长为15cm的立方体试样, 软弱结构面在试样中部, 其固结稳定后厚度为 $(10 \pm 1)$ mm, 充填度为330%。

本次试验开展了干燥状态、10%、20%、27.5%共4种含水率砂岩软弱结构面直接剪切和剪切蠕变试验。在蠕变试验过程中对试验室内进行了温度和湿度控制, 温度的变化范围在 $(15 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 相对湿度变化范围控制为 $(75 \pm 5)\%$ 。试验采用逐级增量的加载方式, 法向荷载固定不变, 大小以不使各含水率下的软弱夹层填充物挤出为宜, 本试验为0.2MPa。试验过程中对软弱结构面中填充物的含水率进行严格控制, 试验前后其含水率变化不超过2.5%。

本次试验干燥试样和27.5%含水率试样在加载至第五级后做了卸载试验, 以分析其卸载后弹性恢复和弹性后效现象。10%和20%含水率试样则按相等应力差逐级加载, 直至出现第三阶段蠕变现象。各试

收稿日期: 2009-03-02; 修订日期: 2009-04-12

基金项目: 国家自然科学基金(40672192, 40772193); 国家重点基础研究发展计划(2009CB724603); 国家自然科学基金重点项目(50539090)

作者简介: 李鹏(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事岩石力学与岩土工程的研究工作。

E-mail: pengl1983@126.com

验曲线如图 1 所示。

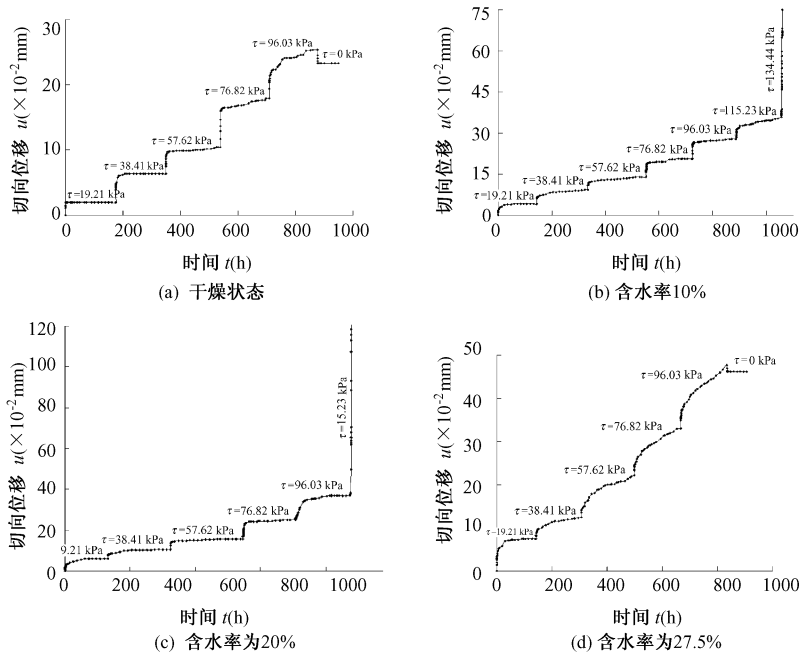


图 1 软弱结构面剪应力—剪切位移—时间关系曲线

Fig. 1 Shear stress-displacement-time responses of weak discontinuous plane

从图 1 可以看出,当含水率较低、剪应力较小时,变形主要以瞬时变形为主,并很快达到稳定状态;随着含水率及剪应力逐渐增大,减速蠕变过程所需时间逐渐增大,并出现等速蠕变阶段;当所施加剪应力水平较高时,变形急剧增长,试样很快发生破坏,如图 1c、d 所示。干燥状态试样和 27.5% 含水率试样的卸载试验表明,对于软弱结构面,卸载后弹性恢复只占瞬时变形的小部分,且无弹性后效现象。

软弱结构面在长期荷载作用下,在变形的表现形式上,是变形积累到一定程度后产生等速蠕变,再经长时间的积累,引起加速蠕变,进而导致破坏。从破坏机制上是在外荷载长期作用下,软弱结构面充填物质从分散,经历首尾连接,最终定向排列,使滑动面产生进而破坏。软弱结构面充填物质含水率越高,结构面充填物质定向排列越显著。故结构面充填物质含水率越高,软弱结构面剪切蠕变现象越显著。

## 2 不同含水率砂岩软弱结构面长期强度确定

蠕变过程从一个阶段向另一个阶段转变,是与一定的应力大小及其加载时间有关的。在减速蠕变阶段,由于所受应力小,蠕变速率逐渐减慢,所以只要应力不再增加,不管加载时间再长,蠕变也不会再发展。在等速蠕变阶段,由于所受应力大小已足以使软弱结

构面产生持续的等速蠕变,所以从这一阶段过渡,只是个时间问题。因此,这是应力和时间同时起作用的阶段,是个关键阶段。相应于这一阶段的应力值称之为长期强度<sup>[11]</sup>。通过确定不同含水率砂岩软弱结构面的长期抗剪强度,可为受含水率影响的岩体工程的稳定性分析和演变预测提供重要依据。

根据蠕变试验结果确定试样长期强度最直接可靠的方法是取一组试样(5~6个),在除了剪切荷载不同,而其他条件一致的情况下进行蠕变试验,使其达到破坏,并记录破坏所耗时间,然后进行处理而得到。但是,在剪切荷载只是略大于长期强度极限值的情况下,试样破坏所耗费的时间是很长的,可能是数年,而且难以保证每个试样都一致,试验数据可能出现较大的离散。因此,在试验室一般采用等时曲线来确定长期强度值<sup>[12]</sup>。在剪切应力与剪切位移等时簇曲线上确定各历时的屈服极限,各屈服极限点组成的水平渐近线所对应的剪应力值即为长期强度  $\tau_{\infty}$ 。在粘弹性体假设的前提下,利用 Boltzmann 迭加原理对原始资料进行处理,可得到各剪力作用下的剪切位移和时间蠕变曲线,进而可得各含水率试样的等时应力应变曲线簇,求出各状态试样的长期抗剪强度。但因干燥状态试样在做了五级荷载之后就做了卸载试验,采用等时应力应变曲线体现不出应力转折点,故此次试验只求得了

10%、20%及27.5%含水率砂岩软弱结构面长期抗剪强度,图2为具不同含水量砂岩软弱结构面等时应力

簇曲线,表1为具不同含水率砂岩软弱结构面直接抗剪强度与长期抗剪强度对比表。

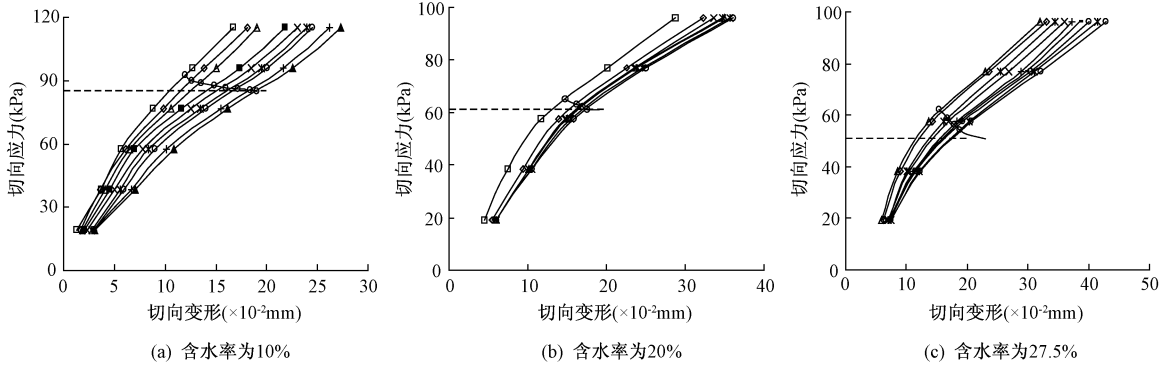


图2 剪切蠕变等时簇曲线

Fig. 2 Isochronal curves of shear creep

表1 直接抗剪强度与长期抗剪强度对比表

Table 1 Comparison between direct shear strength and long term shear strength at different water content

| 试样状态                         | 干燥     | 含水率<br>10% | 含水率<br>20% | 含水率<br>27.5% |
|------------------------------|--------|------------|------------|--------------|
| 直接剪切强度 $\tau$ (kPa)          | 218.67 | 134.44     | 97.85      | 78.46        |
| 长期抗剪强度 $\tau_{\infty}$ (kPa) | —      | 86         | 61         | 51           |

从表1中可以看出,相同状态条件下长期抗剪强度相比于直接抗剪强度明显降低,对于本次试验来说长期抗剪强度约为直接抗剪强度的64%。图3为长期抗剪强度与含水率关系曲线,从中可以看出长期抗剪强度随含水率变化基本符合指数函数关系<sup>[13]</sup>。

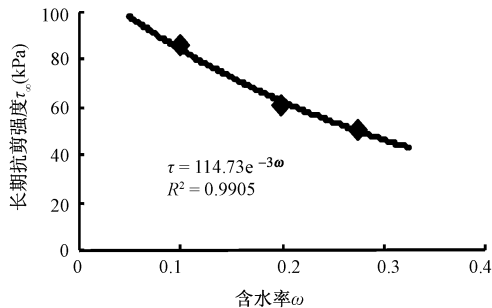


图3 长期抗剪强度与含水率变化关系曲线

Fig. 3 Relationship between long-term shear strength and water content

### 3 考虑含水率变化砂岩软弱结构面剪切蠕变模型

从砂岩软弱结构面不同含水率剪切蠕变试验结果发现,砂岩软弱结构面剪切蠕变有如下几个特点:

(1)从加载过程看,试样加载后有瞬时变形和随时

间而产生的蠕变变形。在相同应力水平下,试样含水率越高所产生的蠕变变形越显著。从干燥状态与27.5%含水率下砂岩软弱结构面剪切蠕变卸载曲线上看,所产生的瞬时弹性变形不能完全恢复,所以加载瞬时产生了弹性变形和不可恢复的塑性变形。

(2)稳态蠕变曲线反映出应变随时间增大而增大的趋势,表明模型结构中应该有粘性元件;由文献[5]、[14]、[15]知,岩石单轴蠕变、三轴蠕变及刚性承压板压缩蠕变试验卸荷后均具有明显的回弹及弹性后效现象。但从图1a、d可以看出,对于砂岩软弱结构面剪切蠕变试验卸荷后除有一微小瞬时恢复外,没有随时间增加逐渐恢复的变形,这表明软弱结构面剪切蠕变无明显弹性后效。

(3)10%与20%含水率砂岩软弱结构面剪切蠕变出现加速蠕变阶段,为反应加速蠕变阶段,模型中还应具有塑性元件。

综合考虑具不同含水率砂岩软弱结构面剪切蠕变特性,通过模型辨识,最后选用改进的粘弹塑性模型来描述具不同含水率砂岩软弱结构面剪切蠕变特性。该模型不仅能描述砂岩软弱结构面加载过程中弹性变形、瞬塑性变形、蠕变变形、蠕变破坏情况,还能较好地描述砂岩软弱结构面卸载后无弹性后效现象。图4为改进粘弹塑性模型示意图。模型中为体现瞬塑性应变及卸载后无弹性后效现象,对部分弹性元件进行改进,即将部分弹性元件改为单向卡簧元件,图4中 $G_1$ 、 $G_2$ 处即为单向卡簧。单向卡簧元件本构方程为:  $d\tau \geq 0$  时,  $\tau = G\gamma$ ;  $d\tau < 0$ ,  $\tau = \tau_0 - d\tau$ ,  $\gamma = \gamma_0$ 。本次仅考虑模型中各参数随含水率的变化关系,不考虑各参数的时间效应。

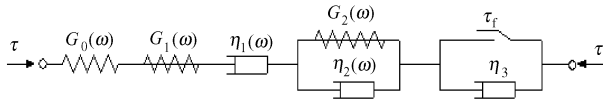


图4 改进的粘弹塑性模型

Fig. 4 Modified viscoelastoplastic model

改进的粘弹塑性模型本构方程为:

$$\begin{aligned} \text{当 } \tau \leq \tau_f \text{ 时, } \eta_1 \gamma' + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_2} \gamma'' = \\ \tau + \left( \frac{\eta_1}{G_0} + \frac{\eta_1}{G_1} + \frac{\eta_1 + \eta_2}{G_2} \right) \tau' + \left( \frac{\eta_1 \eta_2}{G_0 G_2} + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1 G_2} \right) \tau'' \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \tau > \tau_f \text{ 时, } \eta_1 \gamma' + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_2} \gamma'' = \\ \frac{\eta_1 + \eta_3}{\eta_3} \tau + \left( \frac{\eta_1}{G_0} + \frac{\eta_1}{G_1} + \frac{\eta_1}{G_2} + \frac{\eta_2}{G_2} + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_2 \eta_3} \right) \tau' \\ + \left( \frac{\eta_1 \eta_2}{G_0 G_2} + \frac{\eta_1 \eta_2}{G_1 G_2} \right) \tau'' + \frac{\eta_1}{\eta_3} \tau_f \end{aligned} \quad (2)$$

当  $\tau \leq \tau_f$  时, 在常应力  $\tau_0$  作用下, 并由初始条件  $\gamma|_{t=0} = \frac{\tau_0}{G_0} + \frac{\tau_0}{G_1}$  及  $\gamma'|_{t=0} = \left( \frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_2} \right) \tau_0$  可得该模型的应变表达式为:

$$\gamma(t) = \left( \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_1} \right) \tau_0 + \frac{\tau_0}{G_2} \left( 1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_2} t} \right) + \frac{\tau_0}{\eta_1} t \quad (3)$$

当  $\tau > \tau_f$  时, 在常应力  $\tau_0$  作用下, 并由初始条件  $\gamma|_{t=0}$

$= \frac{\tau_0}{G_0} + \frac{\tau_0}{G_1}$  及  $\gamma'|_{t=0} = \left( \frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_2} \right) \tau_0 + \frac{\tau_0 - \tau_f}{\eta_3}$  可得该模型的应变表达式为:

$$\begin{aligned} \gamma(t) = \left( \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_1} \right) \tau_0 + \frac{\tau_0}{G_2} \left( 1 - e^{-\frac{G_2}{\eta_2} t} \right) \\ + \frac{\tau_0}{\eta_1} t + \frac{\tau_0 - \tau_f}{\eta_3} t \end{aligned} \quad (4)$$

由文献 [16] 知在分级增量加载下软弱结构面蠕变有明显应变硬化趋势, 即每级荷载下的瞬时应力增量与瞬时弹应变增量比值并非常数。但试验过程中为避免循环加卸载对试样造成的扰动, 并未采取循环加卸载试验方法, 另外因砂岩软弱结构面剪切蠕变弹性变形较小, 故在参数辨识过程中不计此应变硬化现象, 认为每级荷载下的瞬时应力增量与瞬时弹性应变增量的比值为常数, 故此可求得各级荷载下的弹性变形, 进而求得模型中参数  $G_0$ 。之后, 根据利用 Boltzmann 迭加原理所整理出的试验结果采用多元回归分析求得改进粘弹塑性模型中各参数, 分析各级荷载水平下模型中各参数随含水率的变化规律, 通过曲线拟合可以看出, 各级荷载作用下  $G_2$ 、 $\eta_1$  随含水率变化均符合指数函数关系,  $\eta_2$  随含水率变化符合二次多项式函数关系。图5为第二级荷载作用下  $G_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$  随含水率变化关系曲线。将各应力水平下  $G_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$  随含水率变化关系代入蠕变本构模型中, 即可得各应力水平下砂岩软弱结构面剪切蠕变特性随含水率变化关系。

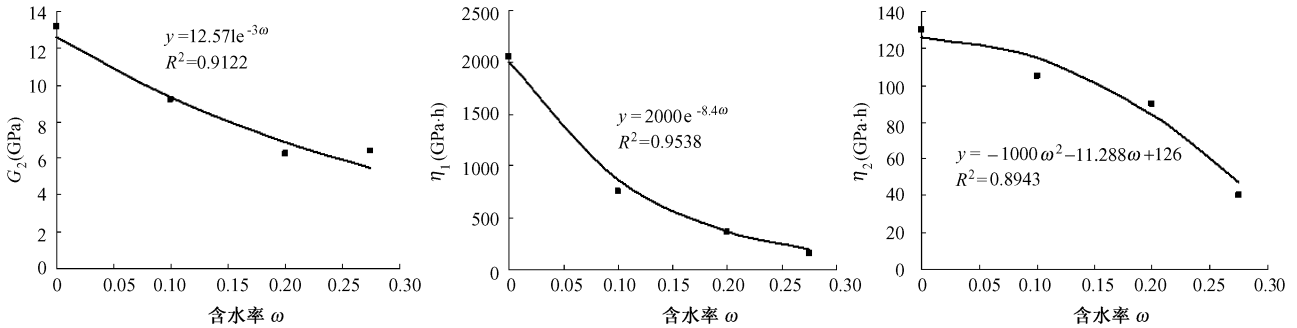


图5  $\tau=38.41\text{kPa}$  时  $G_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$  随含水率变化关系曲线

Fig. 5 Relationships between  $G_2$ 、 $\eta_1$ 、 $\eta_2$  and water content respectively at  $\tau = 38.41\text{kPa}$

表2  $\tau=38.41\text{kPa}$  时蠕变模型中各参数值

Table 2 Parameter values of creep model at  $\tau = 38.41\text{kPa}$

| 试样状态             | 干燥     | 含水率 10% | 含水率 20%                               | 含水率 27.5% |
|------------------|--------|---------|---------------------------------------|-----------|
| $G_0$ (GPa)      | 68.590 | 61.100  | 53.625                                | 48.013    |
| $G_1$ (GPa)      | 13.599 | 14.787  | 16.238                                | 17.605    |
| $G_2$ (GPa)      |        |         | $12.571e^{-3\omega}$                  |           |
| $\eta_1$ (GPa·h) |        |         | $2.000e^{-8.4\omega}$                 |           |
| $\eta_2$ (GPa·h) |        |         | $-1.000\omega^2 - 11.288\omega + 126$ |           |

以第二级荷载为例, 可得模型中各参数如表2所示。

图6为  $\tau=38.41\text{kPa}$  时各含水率软弱结构面剪切蠕变试验数据点与本构模型所得曲线对比图, 从中可以看出本构模型所得曲线与试验数据点基本吻合, 说明采用的蠕变本构模型和回归所得蠕变参数是合理可

靠的。

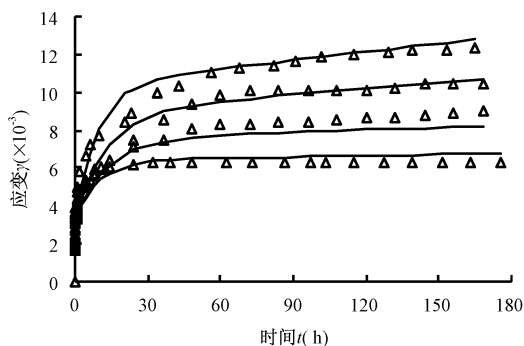


图6  $\tau=38\sim 41\text{ kPa}$  时不同含水率软弱结构面剪切蠕变试验数据点与拟合曲线对比

Fig. 6 Comparison between creep experimental data and fitting curves of different water content at  $\tau=38\sim 41\text{ kPa}$

## 4 结论

(1)在相同的应力作用下,砂岩软弱结构面的蠕变变形随着含水率的增加而增加,蠕变速率也随着含水率的增加显著加快。

(2)随着含水率的增加,砂岩软弱结构面直接抗剪强度和长期抗剪强度都显著下降,且长期抗剪强度随含水率变化基本符合指数函数关系。

(3)通过模型辨识,并从岩体软弱结构面加载、卸载和破坏各阶段实际情况出发,采用改进的粘弹塑性模型来描述具不同含水率砂岩软弱结构面剪切蠕变规律是合适的。该模型不仅能描述砂岩软弱结构面加载过程中弹性变形、瞬塑性变形、蠕变变形、蠕变破坏情况,还能较好的描述砂岩软弱结构面卸载后无弹性后效现象。

(4)本文所得含水率对砂岩软弱结构面剪切蠕变特性和长期抗剪强度等规律均是建立在本次试验基础上的,要彻底弄清含水率对软弱结构面剪切蠕变特性和长期抗剪强度规律需要大量的系统性试验。但本文仍可对边坡、坝基、地下洞室等与水有关的岩体工程的安全性和稳定性分析可提供良好的促进和借鉴作用。

### 参考文献:

[ 1 ] 孙钧. 岩土材料流变及其工程应用[ M ]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

- [ 2 ] 王泳嘉, 王来贵. 岩体浸水后的流失失稳理论及应用[ J ]. 中国矿业, 1994, 3(1): 36—40.
- [ 3 ] Jian Liu, Xia-ting Feng, Xiu-li Ding, et al. In Situ Tests on Creep Behavior of Rock Mass with Joint of shearing zone in Foundation of Large-scale Hydroelectric Projects [ J ]. Key Engineering Materials, 2004, 262: 1097—1103.
- [ 4 ] 朱珍德, 李志敬, 朱明礼, 等. 岩体结构面剪切流变试验及模型参数反演分析[ J ]. 岩土力学, 2009, 30(1): 99—104.
- [ 5 ] 丁秀丽, 付敬, 刘建, 等. 软硬互层边坡岩体的蠕变特性研究及稳定性分析[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3410—3418.
- [ 6 ] 徐平, 杨挺青, 徐春敏, 等. 三峡船闸高边坡岩体时效特性及长期稳定分析[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 163—168.
- [ 7 ] XU Ping, YANG Ting-qing, ZHOU Huo-ming. Study of the creep characteristics and long-term stability of rock masses in the high slopes of the Three Gorges Ship Lock, China[ J ]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(Supp. 1): 261—266.
- [ 8 ] 杨圣奇, 徐卫亚, 杨松林. 龙滩水电站泥板岩剪切流变力学特性研究[ J ]. 岩土力学, 2007, 28(5): 895—902.
- [ 9 ] 沈明荣, 朱银桥. 规则齿形结构面的蠕变特性试验研究[ J ]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 223—226.
- [ 10 ] 肖树芳. 泥化夹层蠕变全过程的模拟及微结构的变化[ J ]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(2): 113—124.
- [ 11 ] 许东俊. 软弱岩体流变特性及长期强度测定法[ J ]. 岩土力学, 1980(1): 37—50.
- [ 12 ] 长江水利委员会长江科学院. SL264—2001 水利水电工程岩石试验规程[ S ]. 北京: 中交水运规划设计院, 2001.
- [ 13 ] 李鹏, 刘建, 朱杰兵, 等. 软弱结构面剪切蠕变特性与含水率关系研究[ J ]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1865—1871.
- [ 14 ] 李荣, 孟英峰, 罗勇, 等. 泥页岩三轴蠕变实验及结果应用[ J ]. 西南石油大学学报, 2007, 29(3): 57—59.
- [ 15 ] 张强勇, 张建国, 杨文东, 等. 软弱岩体蠕变模型辨识与参数反演[ J ]. 水利学报, 2008, 39(1): 66—72.
- [ 16 ] 赵延林, 曹平, 陈沅江, 等. 分级加卸载下节理软岩流变试验及模型[ J ]. 煤炭学报, 2008, 33(7): 748—753.

(下转第 67 页)

- [ 7 ] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的实验研究[ M ] . 北京: 科学出版社, 1991.
- [ 8 ] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 土体冻胀和盐胀机理[ M ] . 北京: 科学出版社, 1995.
- [ 9 ] 刘鸿绪, 朱卫中, 朱广祥, 等. 再论冻胀量与冻胀力的关系[ J ] . 冰川冻土, 2001, 23(1): 63-66.
- [ 10 ] 陈湘生, 濮家骊, 罗小刚, 等. 土壤冻胀离心模拟试验[ J ] . 煤炭学报, 1999, 24(6): 615-619.
- [ 11 ] 何平, 程国栋, 朱元林. 土体冻结过程中的热质迁移研究进展[ J ] . 冰川冻土, 2001, 23(1): 92-98.

## Study on frost heaving property of silty caly

PENG Li-yun, LIU Jian-kun, TIAN Ya-hu

(*Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*)

**Abstract:** Through the one-dimensional frost heaving test in open system of silty clay, taken from Beijing to Baotou and Baotou to Lanzhou railway subgrade, the freezing and frost heaving behavior of the soil were analyzed, taking into the consideration of the influence of the cooling temperatures. The following conclusions can be drawn: (1) Silty clay was a kind of soil which was sensitive to frost, soil and the water supplement were the main factors to cause frost damages at that area. (2) Cooling temperature had great influence on the course of freezing and frost of the soil, the depth of freezing increased with the descending of the cooling temperature, while frost heaving decreased with the cooling temperature descending. (3) An inversely proportion relationship existed between the frost heaving ratio and the freezing rate, at the very small freezing rate, the depth of freezing almost had no increase, but the larger frost heaving rate was observed.

**Key words:** silty clay; frost heaving amount; frost heaving ratio; freezing rate; frost heaving rate

责任编辑: 张明霞

(上接第 53 页)

## Experimental and theoretical studies on the effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone

LI Peng, LIU Jian

(*State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*)

**Abstract:** Creep behavior of weak structural plane is one of the most important mechanical characteristics of rock mass and always has an important influence on deformation and long-term strength of rock mass. Water content of the fillings is a significant factor influencing the creep properties of the weak structural plane. In this study, by multi-stage loading, a series of shear creep tests on the weak structural plane of sandstone with different water contents are conducted. The curves of the shear creep deformation vs. time under different water content of the fillings are derived. The effects of water content on the shear creep behavior and long-term shear strength of weak structural plane of sandstone are analyzed. Compared with the shear strength by rapid shear test, the long-term strength has sharply decreased. Based on the test results and analysis, modified viscoelastoplastic model is identified to describe the behavior of water content influencing on the weak structural plane of sandstones and parameters of this model are also given through back analysis.

**Key words:** weak structural plane; shear creep test; water content; long-term shear strength; modified; viscoelastoplastic model

责任编辑: 张明霞