

软弱结构面剪切蠕变特性与含水率关系研究

李 鹏¹, 刘 建¹, 朱杰兵², 贺怀建¹

(1.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;

2.长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010)

摘 要: 软弱结构面往往控制着岩体的蠕变变形, 含水率又是影响软弱结构面蠕变特性的重要因素, 通过开展不同含水率条件下砂岩软弱结构面剪切蠕变试验, 得到了不同含水率条件下剪切蠕变曲线, 并考虑加载历史对试验曲线进行了修正。在此基础上, 通过模型辨识选取Burgers模型描述砂岩软弱结构面蠕变的黏弹性特性。分析了含水率对砂岩软弱结构面剪切蠕变特性的影响, 并对含水率影响软弱结构面剪切蠕变特性的机制进行了探讨。

关 键 词: 含水率; 砂岩; 软弱结构面; 剪切蠕变试验; Burgers模型

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Research on effects of water content on shear creep behavior of weak structural plane of sandstone

LI Peng¹, LIU Jian¹, ZHU Jie-bing², HE Huai-jian¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering

of Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Creep behavior of weak structural plane plays an important role in the creep deformation of rock mass. Water content of the fillings is a significant factor influencing the creep properties of the weak structural plane. 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 contents of the fillings are derived. The effects of water content on the shear creep behavior of weak structural plane of sandstone are analyzed. Based on the test results, the creep model of the weak structural plane is identified; and Burgers model is derived to describe the creep behavior of the weak structural plane. Moreover, the influences of water contents on the parameters of the creep model are further studied; and the creep mechanism of the weak structural plane of sandstone under different water contents of the fillings is presented.

Key words: water content; sandstone; weak structural plane; shear creep test; Burgers model

1 引 言

软弱结构面的蠕变特性往往控制着岩体的蠕变变形和长期强度, 含水率又是影响软弱结构面蠕变特性的重要因素, 因此对于边坡、地下洞室、坝基等大型岩体工程的长期稳定性问题考虑含水率对其软弱结构面蠕变特性的影响是必要的。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。现有文献^[1-9]主要集中在对不同类型结构面蠕变特性研究方面, 有关含水率对软弱结构面蠕变特性影响方

面的文献国内外还鲜见报道。这与含水率对工程岩体软弱结构面剪切蠕变特性的重要影响是不匹配的。

本文通过开展不同含水率条件下的砂岩软弱结构面剪切蠕变试验, 得到了不同含水率条件下的砂岩软弱结构面剪切蠕变试验曲线, 并考虑加载历史对试验曲线进行了修正。在此基础上, 通过模型辨识选取Burgers模型来描述砂岩软弱结构面剪切蠕变规律。分析了含水率对软弱结构面剪切蠕变特性的影响并对含水率如何影响软弱结构面剪切蠕变特性的机制进行了探讨。

收稿日期: 2006-09-14

基金项目: 国家自然科学基金(No.50479072, 40672192); 国家自然科学基金重点项目(No.50539090); 湖北省自然科学基金(No.2007ABB040)。

作者简介: 李鹏, 男, 1983年生, 博士研究生, 主要从事岩石力学与岩土工程的学习与研究。E-mail: pengl1983@126.com

2 不同含水率砂岩软弱结构面剪切蠕变试验

试样取自重庆鱼嘴长江大桥南岸重力锚墩, 软弱夹层为模拟天然岩体填充物而配制的膨润土、砂岩岩屑型填充物。各填充物按质量百分含量分别为: 膨润土 50%、砂岩岩屑 50% (按质量百分比其中粒径范围 2.5~2 mm 占 50%, 2~1 mm 占 25%, 1~0.5 mm 占 25%)。制成边长为 15 cm 的立方体试件。软弱夹层在试件中部, 固结稳定后其厚度为 (10±1) mm, 充填度为 330%。

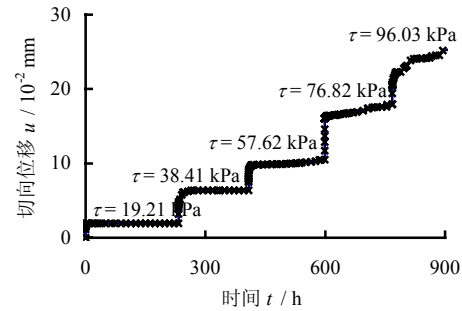
试验在 CYL 系列软岩剪切流变仪上进行。该设备采用气-液稳压式系统进行加载和稳压, 稳压效果良好。另外, 对室内温度和湿度进行了控制, 温度的变化范围在 (15±2) °C, 相对湿度变化范围控制为 (75±5)%。

本次试验开展了干燥状态, 10%, 20%, 27.5% 共 4 种含水率条件下的软弱结构面剪切蠕变试验。在进行各含水率条件岩体软弱结构面剪切蠕变试验之前先做了直接剪切试验, 以此作为蠕变过程中估算施加切向荷载的依据。试验采用逐级增量的蠕变试验方法, 法向荷载固定不变, 大小以不使各含水率条件下的填充物挤出为宜, 本试验为 0.2 MPa。首先对试件逐级施加法向应力至预定值并保持此应力不变, 预压 24 h 待法向变形稳定后再由低到高分级施加剪应力: 每施加一级剪应力, 立即观测瞬时变形, 然后分别在 5, 10, 15, 30 min, 1, 2, 4, 8, 12, 16, 24 h 测读剪切位移, 之后每天定时测读蠕变位移值两次, 待变形趋势稳定后施加下一级剪应力, 但每级剪应力至少历时 6 d。试验过程中对软弱结构面中填充物的含水率进行了严格控制, 试验前后含水率变化不超过 2.5%。

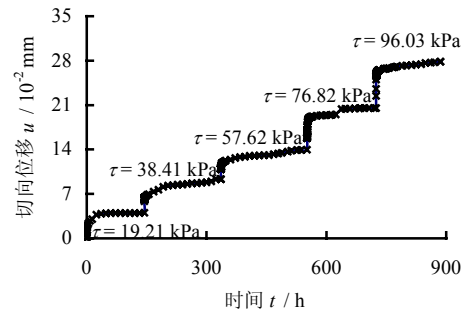
3 不同含水率砂岩软弱结构面的剪切蠕变试验结果

图1为相同法向应力、不同含水率条件试样在各级剪应力作用下的蠕变曲线。

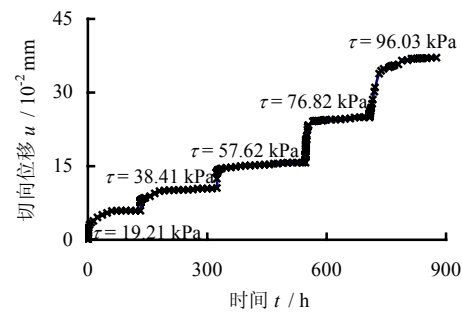
由于试验采用逐级增量加载的试验方法, 根据试验数据整理出的各级剪应力作用下的蠕变曲线, 前一级荷载产生的沿剪切方向的塑性不可逆变形必将对下一级荷载产生的剪切变形产生影响。在同一时间内, 当应力增大时, 剪切蠕变变形可能反而减小。这一结果与结构面本身的蠕变力学行为是相违背的。为了比较真实地揭示结构面在不同应力水平下的蠕变特性, 在处理试验数据时, 必须考虑加载历史对结构面剪切变形的影响。



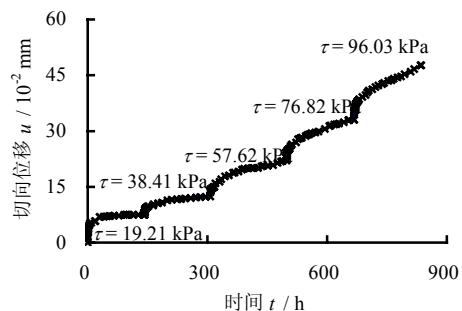
(a) 干燥状态软弱结构面剪切蠕变试验曲线



(b) 10%含水率软弱结构面剪切蠕变试验曲线



(c) 20%含水率软弱结构面剪切蠕变试验曲线



(d) 27.5%含水率软弱结构面剪切蠕变试验曲线

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 structural plane

如图2所示^[10], 第一级加载引起的蠕变, 从时间 $t=0$ 到 $t=t_0$, 材料均在不变荷载 $\sigma_1 = \Delta\sigma$ 作用下发生蠕变变形, 若试验进行到时间 t_0 时不施加下一级荷载 $\Delta\sigma$, 则由于此时材料变形已进入稳态蠕变, 材料变形将继续沿虚线进行。所以, 对试件作用增量荷载 $\Delta\sigma$ 的效果是, 发生了如图2(b)虚线与实线之

间的附加变形。可以从这一附加变形中，找到以 $t=0$ 作为时间起点的蠕变值和以 t_0 作为时间起点应力增量 $\Delta\sigma$ 所引起的蠕变增量 $\Delta\varepsilon(t)$ 。因此，可以以第一级荷载为基础，叠加下级荷载作用延续时间相同的蠕变增量，得到一次性荷载为 $\sigma_2 = 2\Delta\sigma$ 的蠕变曲线。继续进行的梯级加载，可在前一级的蠕变曲线上作同样的处理，得到一次性加载为 $\sigma_n = \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_i$ 的蠕变曲线，见图2(b)。按上述方法就可以从一个试件上得到 n 个不同荷载作用下的几条蠕变曲线。图 3 即为按上述方法整理出的考虑加载历史影响的软弱结构面剪切蠕变试验曲线。

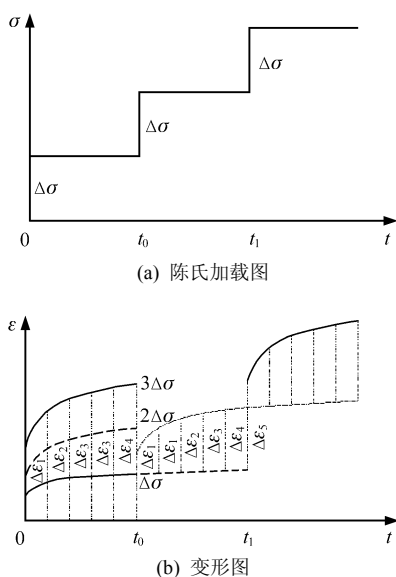


图 2 蠕变试验资料整理方法

Fig.2 Method of dealing with creep experiment data

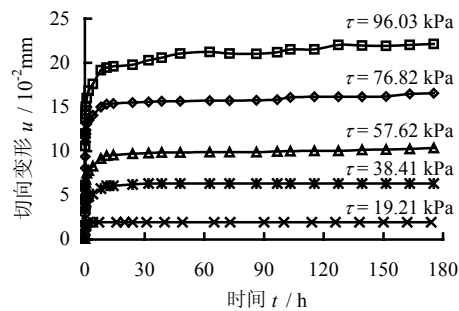
从考虑加载历史影响的砂岩软弱结构面剪切蠕变试验曲线（图3）中可以看出：

(1) 在每一级剪应力加载的瞬时，试样产生瞬时剪切位移，瞬时剪切位移量值随着应力水平的增加而增大。另当剪应力水平较小如 $\tau = 19.21$ kPa时，剪应力引起的变形基本上是瞬时的，随时间增长而产生的蠕变变形很小，但随着剪应力水平的增加随时间增长而产生的剪切蠕变变形量逐渐增大。

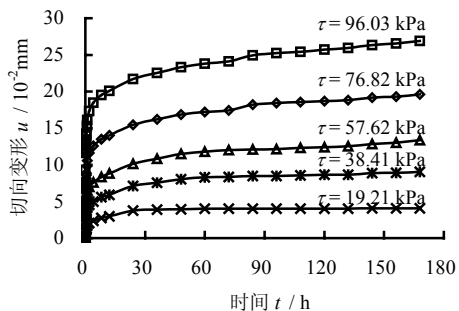
(2) 衰减蠕变段的曲线形态受到剪切应力水平的影响，随着剪应力的增大，衰减蠕变段的曲率半径逐渐增大，达到稳态蠕变段的时间逐渐增长。

(3) 随着时间的增加，各试样蠕变速率逐渐递减到一恒定值即稳态蠕变速率，并以此速率一直发展。稳态蠕变速率随着剪应力水平的增加而逐渐增大。

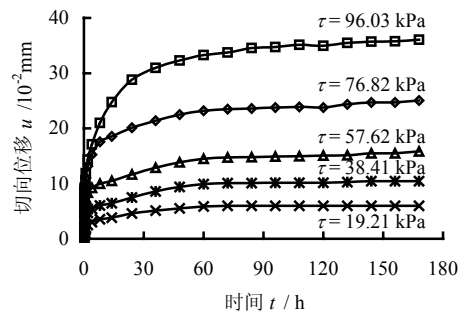
(4) 试样的剪切蠕变特性不仅与剪切应力水平有关，还与试样的含水率密切相关。



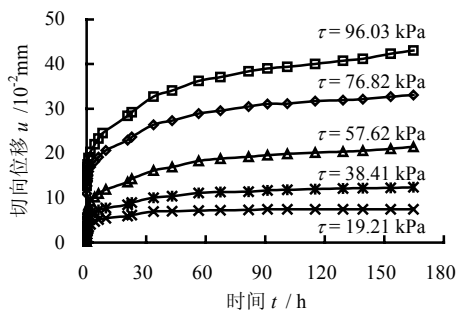
(a) 干燥状态软弱结构面剪切蠕变试验



(b) 10%含水率软弱结构面剪切蠕变试验曲线



(c) 20%含水率软弱结构面剪切蠕变试验曲线



(d) 27.5%含水率软弱结构面剪切蠕变试验曲线

图 3 考虑加载历史影响的软弱结构面剪切蠕变试验曲线
Fig.3 Shear stress-displacement-time responses of weak structural plane considering the effect of loading history

4 软弱结构面剪切蠕变模型及参数的确定

选择一个恰当的蠕变模型，必须有完整的试验资料，仅凭蠕变数据选择模型，可能出现几种模型都能描述试验资料的情形。这样就给模型选择带来

困难,因此,有必要对经验选取的模型进行识别^[12]。

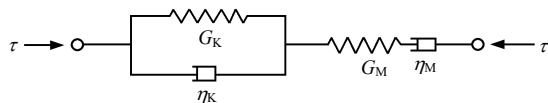


图4 Burgers 模型
Fig4 Burgers model

本次选择 4 种模型—Maxwell 模型、Kelvin 模型、广义 Kelvin 模型、Burgers 模型进行模型识别,从中筛选出 Burgers 模型作为描述本次试验的理论模型。Burgers 模型是由 Maxwell 体与 Kelvin 体串联而成的 4 参数黏弹性模型,其本构方程为

$$\tau + \left(\frac{\eta_M}{G_M} + \frac{\eta_M + \eta_K}{G_K} \right) \dot{\tau} + \frac{\eta_M \eta_K}{G_M G_K} \ddot{\tau} = \eta_M \dot{\gamma} + \frac{\eta_M \eta_K}{G_K} \ddot{\gamma} \quad (1)$$

式中: γ 为切向应变; τ 剪切应力; G, η 分别为剪切模量和黏滞系数,下标 M 和 K 分别为马克斯韦尔体和凯尔文体。

当 $\tau = \tau_0 = \text{常数}$ 时,解此本构方程,可得到 Burgers 模型的蠕变方程为

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G_K} (1 - e^{-\frac{G_K t}{\eta_K}}) + \tau_0 \left(\frac{1}{G_M} + \frac{t}{\eta_M} \right) \quad (2)$$

由式(2)可得当 t 足够大时,该蠕变曲线近似为直

线,此直线在纵轴上的截距为 γ_∞ , 即

$$\gamma_\infty = \frac{\tau_0}{G_M} + \frac{\tau_0}{G_K} \quad (3)$$

该直线的斜率为 m_∞ , 即 $m_\infty = \tau_0 / \eta_M$ 。由此可确定参数 η_M 。由于荷载往往不能瞬时施加,因此,在实际应用时按下述方法求得瞬时应变^[13]。令

$$q(t) = \frac{\tau_0}{G_K} e^{-\frac{G_K t}{\eta_K}} \quad (4)$$

式中: $q(t)$ 为蠕变试验曲线与直线延长线之间的垂直距离,该直线延长线是匀速蠕变曲线的渐近线,对上式两边取自然对数,得:

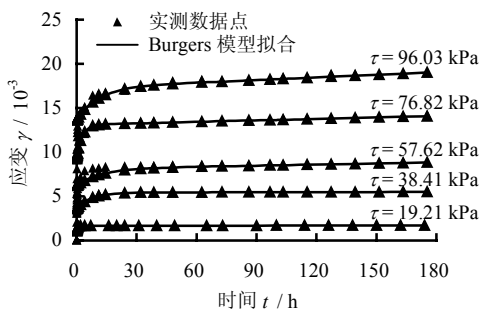
$$\ln(q) = \ln \left(\frac{\tau_0}{G_K} \right) - \frac{G_K}{\eta_K} t \quad (5)$$

上式表明, $\ln(q)$ 与 t 的关系为一直线,该直线在纵轴上的截距为 γ_q , 斜率为 m_q , 即 $\gamma_q = \ln(\tau_0 / G_K)$ 、 $m_q = -G_K / \eta_K$, 由此可确定参数 G_K, η_K 。据得到的 G_K 及(3)式又可确定 G_M 进而求得伯格斯特模型中的所有参数。

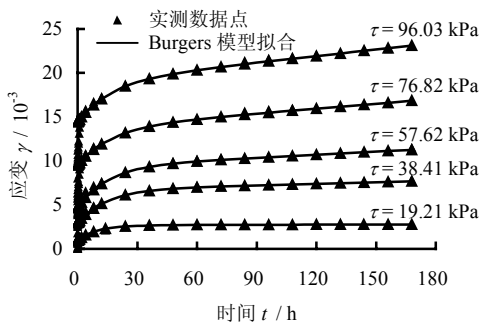
按上述方法对各含水率条件下软弱结构面剪切蠕变 Burgers 模型进行拟合,得到各含水率条件软弱结构面剪切蠕变参数,详见表 1。由实测数据点与采用该方法拟合的 Burgers 模型对比图(图 5)可以看出,拟合效果良好。

表 1 各含水率条件下软弱结构面剪切蠕变 4 参数 Burgers 模型计算过程及参数值
Table 1 Calculation process and parameters value of four parameters Burgers model

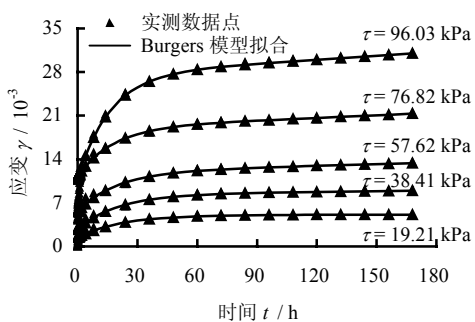
试验状态 含水率/%	切向应力 /MPa·s	m_∞ /10 ⁻⁵	γ_∞ /10 ⁻³	$\ln q = -\frac{G_K}{\eta_K} t + \ln \frac{\tau_0}{G_K}$		G_K /MPa·s	η_K /MPa·s	G_M /MPa·s	η_M /MPa·s
				$m_q / 10^{-3}$	$\gamma_q / 10^{-3}$				
干燥	19.205	0	1.667	-2 407.808	-7 365.95	30.367	12.611	18.569	100 000
干燥	38.410	0	5.427	-142.983	-304.461	21.01	146.944	10.671	100 000
干燥	57.616	0.431	8.101	-88.191	-6 269.694	30.439	345.154	9.281	13 950.605
干燥	76.821	0.560	13.093	-379.797	-5 558.378	19.927	52.469	8.316	13 718.036
干燥	96.026	0.994	17.270	-94.858	-5 610.339	26.238	276.599	7.055	9 660.563
10	19.205	0.047	2.691	-100.956	-6 367.606	11.190	110.840	19.703	40 602.540
10	38.410	0.574	6.713	-67.881	-5 591.003	10.294	151.646	12.881	6 691.637
10	57.616	1.149	9.326	-66.955	-5 368.131	12.356	184.547	12.355	5 013.138
10	76.821	1.870	13.693	-60.039	-5 483.332	18.486	307.912	8.054	4 108.074
10	96.026	2.465	18.960	-59.616	-5 397.509	21.207	355.739	6.654	3 895.578
20	19.205	0.047	5.031	-45.554	-624.917	5.324	116.885	13.489	4 0861.7
20	38.410	0.396	8.282	-50.021	-192.083	6.907	138.097	14.115	9 699.494
20	57.616	0.915	11.848	-52.130	-72.447	9.193	176.356	10.323	6 296.83
20	76.821	1.389	18.971	-57.973	-856.378	9.875	170.354	6.863	5 530.669
20	96.026	2.048	27.529	-61.986	-89.313	5.732	92.483	8.909	4 688.769
27.5	19.205	0.333	5.945	-53.910	-970.746	7.524	139.576	5.661	5 767.267
27.5	38.410	1.01	9.010	-50.031	-5 367.852	8.235	164.602	8.837	3 802.97
27.5	57.616	2.144	14.708	-46.923	-4 780.567	6.866	146.328	9.121	2 687.313
27.5	76.821	2.47	24.160	-45.916	-4 425.398	6.418	139.779	6.301	3 110.161
27.5	96.026	4.844	28.694	-55.038	-4 259.976	6.799	123.541	6.589	1 982.369



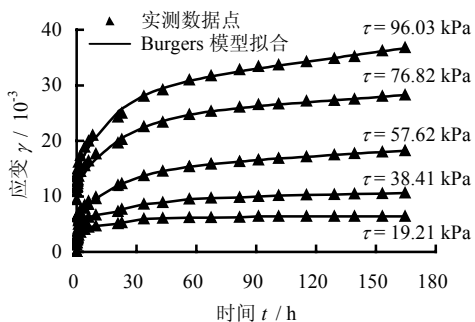
(a) 干燥状态实测点与Burgers模型对比



(b) 10%含水率条件实测点与Burgers模型对比



(c) 20%含水率条件实测点与Burgers模型对比



(d) 27.5%含水率条件实测点与Burgers模型对比

图 5 各含水率条件蠕变试验曲线实测数据点与 Burgers 模型拟合效果对比图

Fig.5 The contrast creep curves between tests and Burgers model in different water contents

5 含水率对软弱结构面剪切蠕变特性的影响及机制分析

5.1 含水率对软弱结构面剪切蠕变特性的影响

由相同应力水平下不同含水率软弱结构面剪

切蠕变对比曲线(图6)可以得到:

(1) 相对于随时间而增长的蠕变应变量, 含水率对砂岩软弱结构面瞬时剪切应变影响较小。如表 2 所示在 $\tau = 38.41$ kPa 时各含水率条件下试样的瞬时剪切应变量相差很小(最大值与最小值相差 1.3 倍), 而随时间增长的蠕变应变量却相差很大, 175 h 后 27.5 %含水率条件试样的蠕变应变量是干燥状态试样的 2.3 倍。

表 2 不同条件瞬时应变与蠕变应变量对比表
Table 2 The contrast of instantaneous shear strain and creep shear strain at different conditions($\tau = 38.41$ kPa)

应变量 $\gamma / 10^{-3}$	含水率			
	干燥状态	10 %	20 %	27.5 %
瞬时剪切应变量	2.21	2.59	2.85	2.94
48 h 蠕变应变量	3.42	4.40	5.20	6.16
90 h 蠕变应变量	3.42	4.74	5.80	7.04
175 h 蠕变应变量	3.42	5.26	6.08	7.77

(2) 含水率会改变试样减速蠕变段的曲线形态, 含水率越高, 减速蠕变段的曲率半径越大, 而减速蠕变段的曲率半径直接影响到试样达到稳态蠕变速率的时间, 即随着试样含水率的增加试样达到稳态蠕变速率的时间逐渐增长, 图 7 为 $\tau = 96.03$ kPa 时各含水率试样蠕变速率对比曲线, 从图中我们可以看出干燥条件下试样蠕变速率递减的最快, 最先进入稳态蠕变阶段, 10 %含水率条件试样次之, 27.5 %含水率条件试样最后进入稳态蠕变阶段。

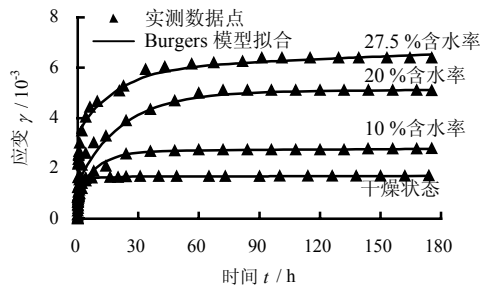
(3) 含水率会改变试样稳态蠕变速率, 随着含水率升高试样稳态蠕变速率逐渐增大。如图 7 示, 在 $\tau = 96.03$ kPa 时干燥条件试样稳态蠕变速率为 $0.26 \mu\text{m/h}$, 而 27.5 %含水率条件下的稳态蠕变速率为 $0.6 \mu\text{m/h}$, 两者相差达 2.3 倍。

(4) 含水率会降低软弱结构面的初始蠕变强度, 如图 6(b)所示, 在 $\tau = 38.41$ kPa 时, 加载后干燥状态试样切向应变很快达到稳定, 并未出现随时间而增长的蠕变应变, 而 27.5%含水率条件试样则产生了明显的蠕变应变, 并一直以一恒定的蠕变速率继续发展。

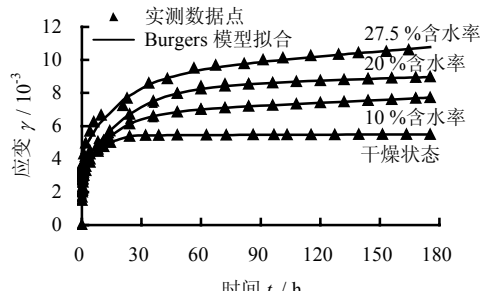
5.2 含水率对蠕变本构模型参数的影响

由表 1 可以看出, Burgers 模型中各参数不仅与应力水平有关而且还与试样的含水率条件密切相关。

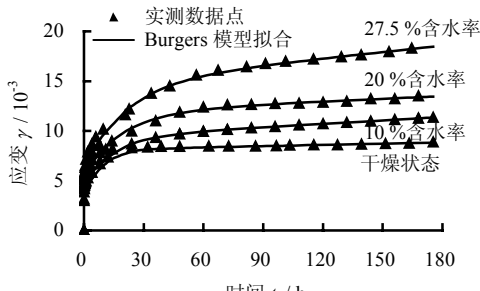
剪切模量 G_M 反应瞬时剪切应变, 具有随剪切应力增大而减小、随含水率升高而减小的趋势。这与瞬时剪切应变随应力升高而增加、随含水率升高而增加的试验结果是吻合的。



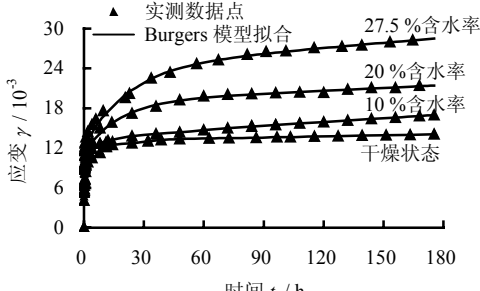
(a) $\tau = 19.21 \text{ kPa}$



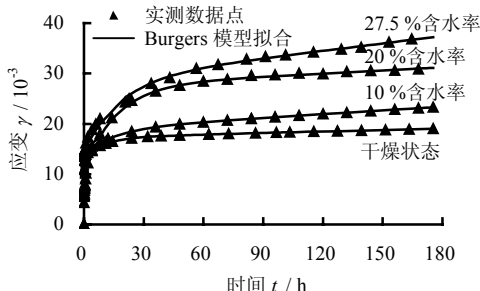
(b) $\tau = 38.41 \text{ kPa}$



(c) $\tau = 57.62 \text{ kPa}$



(d) $\tau = 76.82 \text{ kPa}$



(e) $\tau = 96.03 \text{ kPa}$

图6 不同含水率软弱结构面剪切蠕变曲线对比
Fig.6 Comparison among weak structural plane creep curves in different water contents

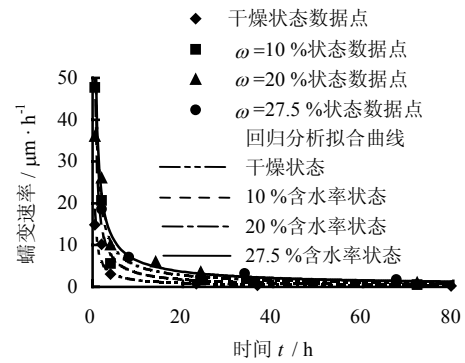


图7 相同应力水平下各含水率软弱结构面剪切蠕变速率对比 ($\tau = 96.03 \text{ kPa}$)

Fig.7 Comparison among creep ratios of weak structural plane at different water contents under the same stress

黏滞系数 η_M 反应稳态蠕变速率, 具有随应力升高而降低、随含水率升高而减小趋势。与试样的稳态蠕变速率随应力升高而升高、随含水率升高而增大的试验结果也是吻合的。

剪切模量 G_K 、黏滞系数 η_K 反应减速蠕变段的曲线形态, 但是, 从参数辨识所得结果来看 G_K 和 η_K 值比较离散, 随应力水平和含水率变化的规律均不明显。

5.3 不同含水率条件下软弱结构面剪切蠕变机制分析

水与岩土体之间主要存在如下3种作用^[15], 即物理作用(包括润滑作用、软化和泥化作用、结合水的强化作用)、化学作用(包括离子交换、溶解、水化、水解、溶蚀、氧化还原作用)及力学作用(静水压力及动水压力作用)。含水率对软弱结构面剪切蠕变特性影响除体现为水的存在对结构面充填物起到润滑、软化及泥化作用, 从而使得在相同应力水平下剪切蠕变变形量、剪切蠕变速率随含水率的升高而增大外, 还体现为水在蠕变过程中对软弱夹层黏土颗粒定向排列, 即片理化有显著促进作用, 从而导致随着含水率的升高软弱夹层抗剪强度降低。软弱结构面中的蒙脱石是亲水性矿物, 具有很强的吸水性, 随着含水率的升高这些颗粒吸水后表面性能发生变化, 使得颗粒间吸力降低, 产生弱化。而且处于软弱结构面中的水还可以减小充填物之间及充填物与岩石界面之间的摩阻力, 起到润滑作用。水的存在还会改变结构面中充填物的物理性状, 结构面中充填物随含水率的增加发生由固态向塑态直至液态的弱化效应, 弱化结构面充填物的物理力学性能, 从而影响软弱结构面剪切蠕变特性。另外在恒定的应力作用下, 试样的含水率越高试样内部产生的孔隙水压就越高, 这样作用在试样骨架上的有

效应力减小, 进而弱化软弱结构面的剪切性能, 影响软弱结构面的剪切蠕变特性。

6 结 论

含水率对砂岩软弱结构面剪切蠕变特性具有显著的影响, 概括起来含水率对砂岩软弱结构面蠕变特性的影响主要体现在以下几个方面:

(1) 含水率对软弱结构面剪切蠕变变形的影响非常显著, 随着含水率的变化软弱结构面剪切蠕变特性发生了较大改变。加载175 h 后27.5 %含水率条件下砂岩软弱结构面蠕变变形与干燥条件下蠕变变形量可相差2~6倍。

(2) 含水率条件可以改变试样减速蠕变段的曲率半径, 即改变软弱结构面达到稳态蠕变段的时间。

(3) 含水率条件可以改变软弱结构面的初始蠕变强度, 随着含水率的升高软弱结构面的初始蠕变强度逐渐降低。在 $\tau = 38.41$ kPa 时, 27.5 %含水率条件试样产生了明显的蠕变变形而干燥状态试样加载后变形很快达到稳定, 并未出现明显的蠕变变形。

(4) 含水率对软弱结构面剪切蠕变特性的影响除表现为水的存在对软弱结构面充填物起到润滑、软化、泥化作用并减小作用在试样骨架上的有效应力外, 还表现为水在蠕变过程中对软弱夹层黏土颗粒走向排列, 即片理化有显著促进作用, 从而导致随着含水率的升高软弱夹层抗剪强度降低, 弱化软弱结构面剪切蠕变性能。

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] LIU Jian, FENG Xia-ting, DING Xiu-li, 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: 1 097-1 103.
- [3] 丁秀丽, 刘建, 刘雄贞. 三峡船闸区硬性结构面蠕变特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2000, 17(4): 30-33. DING Xiu-li, LIU Jian, LIU Xiong-zhen. Experimental study on creep behaviors of hard structural plane in TGP's permanent lock regions[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2000, 17(4): 30-33.
- [4] 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): 3 410-3 418. DING Xiu-li, FU Jing, LIU Jian, et al. Study on creep behavior of alternatively distributed soft and hard rock layers and slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(19): 3 410-3 418.
- [5] 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. XU Ping, YANG Ting-qing, XU Chun-min, et al. Creep characteristic and long-term stability of rock mass in ship lock high slope of the Three Gorges Project[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(2): 163-168.
- [6] 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.
- [7] 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. YANG Sheng-qi, XU Wei-ya, YANG Song-lin. Investigation on shear rheological mechanical properties of shale in Longtan Hydropower Project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(5): 895-902.
- [8] 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. SHEN Ming-rong, ZHU Yin-qiao. Test study on creep characteristics of regular teeth-shaped structure faces[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(2): 223-226.
- [9] 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. XIAO Shu-fang. Whole creep process simulation of clay gouged intercalation and microstructure transformation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1987, 6(2): 113-124.
- [10] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [11] YANG Chu-he, DAEMEN J J K, YIN Jian-hua. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(3): 233-242.
- [12] 吴玉山, 陈尤雯. 不良岩层现场大型三轴压缩流变试验及流变模拟分析[J]. 岩土力学, 1992, 13(1): 21-29. WU Yu-shan, CHEN You-wen. Rheologic test and simulation analysis of large scale in-site triaxial compression on defective strata behavior[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1992, 13(1): 21-29.
- [13] 沈振中, 徐志英. 三峡大坝地基花岗岩蠕变试验研究[J]. 河海大学学报, 1997, 25(2): 1-7. SHEN Zhen-zhong, XU Zhi-ying. Creep test for the Three Gorges Dam foundation[J]. **Journal of Hohai University**, 1997, 25(2): 1-7.
- [14] 朱合华, 叶斌. 饱水状态下隧道围岩蠕变力学性质的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1 791-1 796. ZHU He-hua, YE Bin. Experimental study on mechanical properties of rock creep in saturation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(12): 1 791-1 796.
- [15] 仵彦卿. 地下水与地质灾害[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 303-310. WU Yan-qing. Groundwater and geological hazard[J]. **Journal of Underground Space**, 1999, 19(4): 303-310.
- [16] 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.