

文章编号:1001-4888(2008)05-0396-07

炭质泥岩泥化夹层的流变特性及长期强度^{*}

杨天鸿¹, 芮勇勤¹, 朱万成¹, 申力², 刘晶辉², 杨洪海²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004; 2. 煤炭科学研究院抚顺分院, 辽宁 113001)

摘要: 通过分析炭质泥岩泥化夹层的直剪流变实验成果, 表明炭质泥岩泥化夹层的法向应力和剪应力为线性关系, 存在统一的蠕变加速阶段来临时的极限应变量。基于老化理论, 建立了适合弱层流变特性的流变力学模型, 该模型可以描述初始蠕变、等速蠕变和加速蠕变三个阶段过程。依据蠕变加速阶段来临时的极限应变量得到了长期强度方程, 从而为边坡变形分析和滑坡中长期预报提供了可靠的依据。

关键词: 炭质泥岩; 泥化夹层; 流变实验; 长期强度

中图分类号: TU454 **文献标识码:** A

0 引言

在边坡工程安全设计中, 考虑到在长期载荷作用下岩体流变引起的时效渐进破坏, 尤其是软弱夹层^[1], 具有明显的蠕变特性, 往往对破坏起控制作用, 需要确定岩石的长期强度^[2], 所以进行岩石蠕变实验、确定其长期强度对于岩土工程稳定性评价、安全设计具有重要的工程实际意义^[1-5]。

弱层的流变方程^[3]一般包括流变元件模型、理论模型和经验模型三类。元件模型是用各种元件 (Newton 体、Hooker 体、St. V 体) 组合来模拟材料的应力、应变、时间关系, 表达直观^[4], 其中西原模型比较常用和完善^[5], 但参数确定和模型识别的复杂性限制了它们的工程应用^[4]。

理论模型能够揭示导致流变破坏的损伤演化力学机制^[4], 近十年来, 基于弹塑性力学、断裂力学和损伤力学理论的理论模型不断发展和完善^[3], 国内孙钧^[6]、程谦恭^[7]、刘雄^[8]、杨春和^[9]等基于试验和理论分析建立了不同类型岩石的蠕变力学模型。国外 Schmidtke、Lajtai^[2]通过岩石静态疲劳试验, 发现在恒定载荷作用下, 试件随着时间发展逐步破坏, 对于花岗岩, 引起试件逐步破坏的最小载荷是其单轴抗压强度的 60%。Su^[10]通过不同应力水平下对试件循环加、卸载试验, 研究损伤引起的试件不可恢复的体应变, Heuze^[11]研究温度、水对岩石蠕变力学性质的作用。

经验模型是基于不同条件下试验结果和现场观测确定岩土的应力应变时间函数关系, 有扩容理论^[12]、老化理论^[13]、时空理论、流动理论和继效理论等^[13], 提供了指导工程实践的新途径, 但是对现场观测和试验数据的依赖性决定了该模型不能适应复杂的应力路径和环境因素的变化。依据老化理论建立的应力应变时间之间具有某种简单的函数关系, 数学计算比较简单, 物理意义明确, 求解问题方便^[15], 具有一定的工程适用性。但该理论是在应力恒定条件下获得的, 如果应力是变量, 将导致一定的误差, 所以老化模型适用于应力恒定或应力缓慢变化的情况。

某露天矿北帮边坡, 为典型的单斜顺层边坡, 其变形和滑动受具有蠕变特征的炭质泥岩泥化弱层控

* 收稿日期: 2007-11-10; 修订日期: 2008-10-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB209405); 国家自然科学基金项目(50674025, 50504005, 10872046, 50874024); 教育部重点科技项目(107033); 教育部新世纪优秀人才基金(NCET-05-0290)

通讯作者: 杨天鸿(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学科研教学方面的工作。

制^[14],露天开采早已完成,只用雨季水压的波动变化,可以近似认为应力变化缓慢。本文针对炭质泥岩泥化弱层流变试验数据结果,采用老化模型,建立弱层的流变模型,研究流变特性和长期强度,为边坡预测预报和工程治理提供科学依据。

1 弱层的流变试验方法及理论方程

流变试验采用四台直剪流变仪同步进行,仪器安放在保持恒湿恒温、避免震动的地方进行,一组四个式样,试验历时约两个月。陈宗基教授根据包尔茨曼叠加原理推荐了一种简便方法,即在一个试样上施加恒定的法向应力,当试样稳定后,逐级施加剪切应力,直至试样剪坏,这样只用一组试样(4~6块)进行试验,就可以得到同样正应力条件下岩体的蠕变数据。

首先对弱层进行固结快剪试验,取得不同法向力级的剪应力破坏值 σ_i 和 τ_i ,然后确定流变试验相对应的正应力和剪切载荷等级梯度,正应力按四级进行,压力 σ_i 分别为 50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa, 剪应力 τ_{0i} 由小到大分級施加,前几級可适当加大,后几級尽量加密,每一級剪力维持一周。每天测取蠕变变形量,得出每一級 σ_i 和 τ_{0i} 下的剪切蠕变变形 γ_i 与时间 t 的关系,可得四組 γ_i-t 关系数据,在试验过程中要根据变形情况对 τ_{0i} 进行适当调整,一般要增加等级,以使得最后一級 τ_{0i} 时获得试样逐步破坏的 γ_i-t 关系。

依据老化理论^[15],岩体的应力—应变状态的流变方程形式为:

$$\tau_i = G(t) \cdot \gamma_i^m \cdot \left(1 + \frac{\sigma_n}{H}\right) = c + \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (1)$$

式中, τ_i 为作用于弱层上的剪应力,kPa; $G(t)$ 为弱层的剪切变形模量函数,kPa; t 为剪切历时,h; γ_i 为弱层的应变量,%; m 为应变强化因子, $m < 1$, 描述应力应变的非线性关系; H 为 $\sigma-\tau$ 曲线在横坐标的截距,抗拉强度, kPa; σ_n 为法向应力,kPa; c 为内聚力,kPa; φ 为摩擦角。

$G(t)$ 是一随应力作用时间而变化的量,当 t 增加时, $G(t)$ 减小,与 t 成负指数的关系降低,它与瞬时剪切模量 G_0 的关系可用下式表示:

$$G(t) = \frac{G_0}{t^\alpha} \quad (2)$$

当 $t=0$ 时, $G(0)=G_0$ 为 $\sigma-\tau$ 曲线在纵坐标的截距,瞬时剪切模量,kPa; α 为试验常数。

首先依据不同历时的 $\gamma_i-\tau_i-\sigma_n$ 关系,作各种 γ_i (为恒量)时的 $\tau_i-\sigma_n$ 关系。对照 $\tau_i-\sigma_n$ 关系曲线,分析流变方程各项,其意义如下:

$$G_0 \gamma_i^m = \tau_0(\gamma_i), \quad G_0 \gamma_i^m / H = \operatorname{tg} \varphi(\gamma_i) \quad (3)$$

$\tau_0(\gamma_i)$ 为纯剪强度,kPa, $\tau_i-\sigma_n$ 曲线在纵坐标的截距。 $\varphi(\gamma_i)$ 为 $\tau_i-\sigma_n$ 关系曲线与横坐标相交的倾角。

因为 $\gamma_i=\gamma_i(t)$,亦即在一定应力下,应变量与应力作用的时间有关,所以 $\tau_0(\gamma_i)$ 、 $\varphi(\gamma_i)$ 参数不仅由应变值所决定,而且与应力作用时间有关。因而,需要作出一系列 $t=t_1, t_2, t_3 \dots$ 时刻,不同 σ_n (50, 100, 150, 200kPa)的 $\tau_i-\sigma_n$ 关系曲线,从而得出对应的 $\tau_0(\gamma_i, t)$ 、 $\varphi(\gamma_i, t)$ 等数值。然后再寻求不同 τ_i ($i=1, 2, 3 \dots$)的 $\tau_0-\gamma_i$ 关系曲线,最后求出 $G(t)$ 与 t 的关系曲线,这样 α 各数之间的关系才确定,从而得出完整的流变方程,亦即满足老化理论的弱层应力—应变—时间的本构方程。

2 弱层的流变试验成果拟合分析

2.1 蠕变试验的原始数据

蠕变试验数据见图 1 和表 1 所示。

2.2 不同剪切历时的 $\tau-\sigma_n$ 关系曲线

首先绘制不同剪切历时 t 及不同 σ_n 的 $\tau_i-\gamma_i$ 曲线,求出不同 γ_i 时与不同的 σ_n 情况下的 τ_i 值,如图 2 所示。然后绘制不同剪切历时 t ,一定 γ 值的 $\tau_i-\sigma_i$ 关系曲线,以 $t=48$ 小时为例如图 3 所示。可见 $\tau_i-\sigma_n$ 为线性关系,且各条直线均交于横坐标的同一点。 t 等于其它时刻的 $\tau_i-\sigma_n$ 关系曲线与 $t=48$ 小时的一致,限于篇幅,不一一画出。此情况下, $H=$ 常量,与 γ 和 t 无关, H 值可由 $\tau_i-\sigma_n$ 关系曲线与横坐

标的截距而求得,炭质泥岩 $H=25\text{kPa}$ 。当 $\sigma=0$ 时,上式变为:

$$\tau_0 = G(t) \gamma_i^m \quad (4)$$

τ_0 为 $\tau_i - \sigma_n$ 关系曲线在纵坐标轴上的截距。从而可得到一组 τ_i 与 γ_i 相应的数据,再利用回归分析的方法求出 $G(t)$ 与 m 二个参数。 τ_0 与 γ_i 的数值如图 4。

表 1 垂直和剪切载荷分配表

Tab. 1 Vertical & Shear load distribution sheet

垂直载荷/kPa	分级加载的剪切应力/kPa								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
50	6.22	10.88	15.54	18.65	21.76	24.87	27.98		
100	7.77	15.54	21.76	26.42	31.08	35.75	40.41	45.07	49.74
150	9.33	18.65	27.98	34.19	38.86	43.52	49.74	55.95	62.17
200	10.88	21.76	34.19	43.52	49.74	59.06	66.83	74.6	82.37
250									
300									
350									
400									
450									

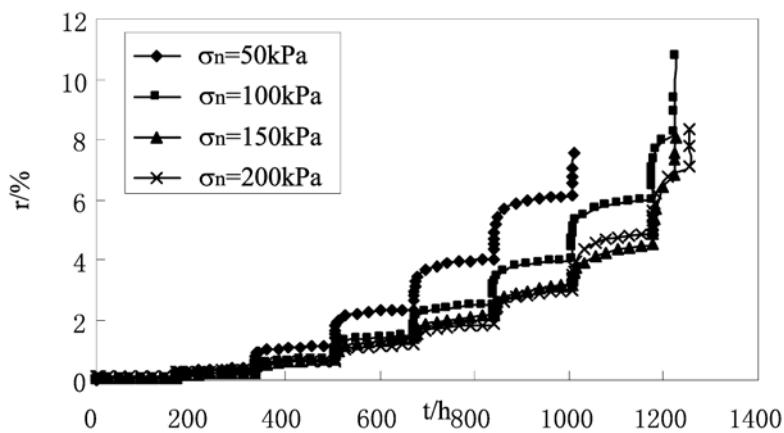


图 1 炭质页岩流变曲线

Fig. 1 Rheology curve of peat mudstone

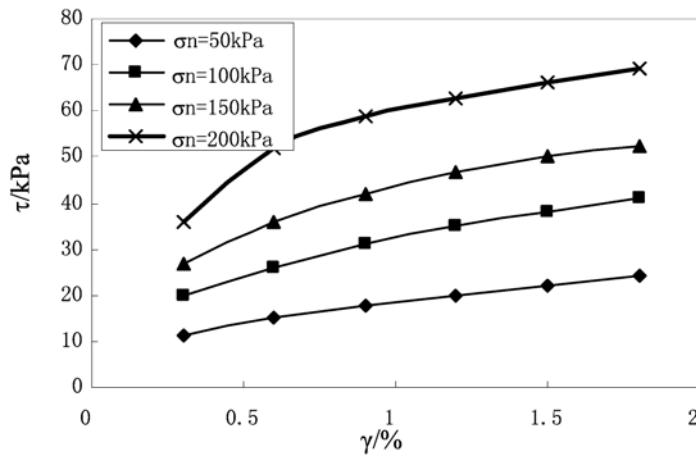
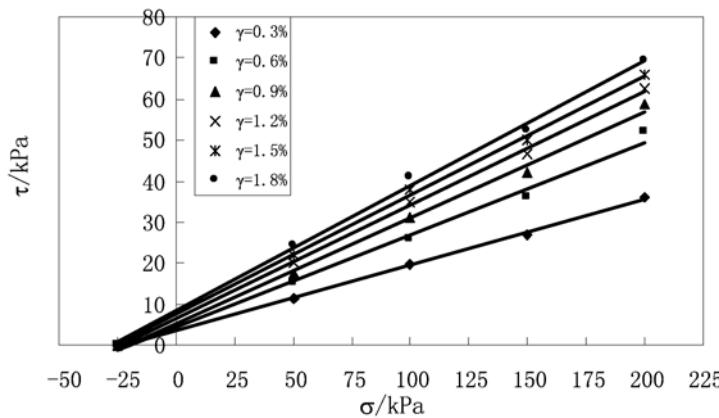
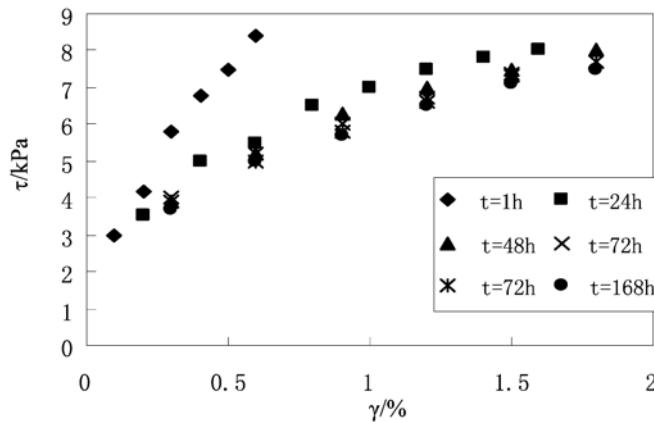


图 2 不同垂直载荷时 $\tau_i - \gamma_i$ 关系曲线

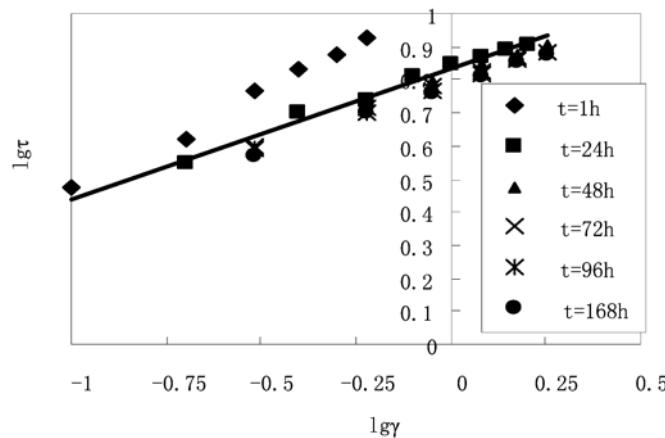
Fig. 2 Curve of $\tau_i - \gamma_i$ of different vertical load

图 3 不同剪切应变 γ 时 $\tau_i - \sigma_n$ 关系曲线Fig. 3 Curve of $\tau_i - \sigma_n$ of different Shear strain γ 图 4 不同剪切历时 τ_0 与剪切应变 γ_i 的关系曲线Fig. 4 Curve of τ_0 and strain γ_i of different shear force

$\tau_0 - \gamma_i$ 的关系为指数形式, 把其转换为线性方程:

$$\lg \tau_0 = \lg G(t) + m \lg \gamma_i \quad (5)$$

不同剪切历时的各 $\lg \tau_0$ 、 $\lg \gamma_i$ 值绘在双对数坐标中时, 不同剪切历时的实验数据基本上呈线性关系, 而且其斜率相近似, 见图 5, 计算得 $m=0.385$ 。

图 5 不同剪切历时的 $\lg \tau_0$ 与 $\lg \gamma_i$ 关系曲线Fig. 5 Curve of $\lg \tau_0$ and $\lg \gamma_i$ of different shear force

2.3 剪切模量 $G(t)$ 的时间效应

从不同历时的 $\tau_0 - \gamma_i$ 关系式, 得炭质泥岩不同 γ_i 时相应的 $G(t)$ 值, 其中 $\gamma_i=1.0$ 时如表 2 所列。

表 2 不同剪切应变 γ_i 和剪切模量 $G(t)$ 关系表

Tab. 2 Relation sheet of different shear shear γ_i and shear modulus $G(t)$

t 小时	1.0	24.0	48.0	72.0	96.0	168.0
$G(t)$	9.66	6.94	6.53	6.37	6.18	6.03

用回归分析的方法可得 $G(t)$ 与 t 的关系呈负指数回归方程, 即 $a=0.0921$ 。

$$G(t) = \frac{G_0}{t^a} = \frac{7.21}{t^{0.0921}} \quad (6)$$

G_0 为瞬时纯剪切摸量; t 为剪切历时(h)。

2.4 弱层的流变方程

通过对弱层蠕变试验资料的分析, 确定了流变方程的形式, 以及流变方程的各个参数, 从而得出流变方程:

$$\tau = \frac{G_0}{t^a} \gamma^m \left[1 + \frac{\sigma_n}{H} \right] \quad (7)$$

对于炭质泥岩 $G_0=7.21$; $a=0.0921$; $m=0.385$; $H=25$ 。

3 弱层的长期强度

3.1 弱层的蠕变方程

蠕变方程是剪应力一定时应变与时间的关系。流变方程变换后即得流变岩体的蠕变方程:

$$\gamma = \frac{\tau^{1/m}}{[G_0(1 + \sigma_n/H)]^{1/m} t^{a/m}} \quad (8)$$

利用此式对炭质泥岩蠕变试验数据进行了拟合计算, 拟合情况基本良好。

3.2 蠕变过程的破坏应变量

岩土的蠕变过程可分为衰减蠕变和非衰减蠕变。衰减蠕变经初始蠕变阶段后, 变形将趋于常量。当作用的剪应力 $\tau \leq \tau_\infty$ 时亦即剪应力小于或等于岩土的长期极限强度时, 发生衰减蠕变。当 $\tau > \tau_\infty$ 时, 则发生非衰减蠕变。所以非衰减蠕变具有产生破坏的潜在可能性。当变形由稳态蠕变向加速蠕变过渡, 预示变形已将临近破坏, 用极限变形量 γ_f 来表示。对于褐色页岩来说, 由蠕变试验资料得到进入加速流动阶段的临界破坏变形量及破坏应变如表 3 所列。

表 3 弱层极限变形成果表

Tab. 3 Results of limited creep strain of the weak layer

正应力/kPa	50	100	150	200	平均值
临界破坏变形量/ $\times 10^{-2}$ mm	136.1	160.3	179	162.6	159.5
破坏应变/%	2.126	2.5	2.797	2.54	2.492

3.3 长期强度的基本方程

将稳定蠕变阶段向加速蠕变阶段的过渡点作为岩土破坏的状态, 此时变形量 γ_f 作为岩土流变破坏的标准。试验证明, 蠕变变形极限值对同一种岩土是常数, 与应力无关, 与在应力作用下达到破坏所持续的时间无关。所以, 长期破坏准则可取变形达到某固定的蠕变变形值, 从而建立长期强度条件: $\gamma_f=$ 常数。

将长期强度条件代入方程式(8), 经变换可得岩土长期强度方程为:

$$\tau_f = \frac{G_0(1 + \sigma_n/H)\gamma_f^m}{t^a} = \frac{G_0 \cdot \gamma_f^m}{t^a} + \frac{G_0 \cdot \gamma_f^m}{H \cdot t^a} \sigma_n \quad (9)$$

所以,

$$c = \frac{G_0 \cdot \gamma_f^m}{t^a}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{G_0 \cdot \gamma_f^m}{H \cdot t^a} \quad (10)$$

表4 弱层的长期强度参数表

Tab. 4 Long term intensity parameter sheet of weak layer

<i>t</i> 年	0.04	0.2	0.6	1	3	5	7	10	15
c kPa	8.0	6.89	6.23	5.95	5.37	5.12	4.97	4.81	4.63
φ°	17.75	15.41	13.99	13.39	12.12	11.58	11.24	10.88	10.49
$\operatorname{Tg} \varphi$	0.32	0.276	0.249	0.238	0.215	0.205	0.199	0.192	0.185

通过极限平衡方法可以得到不同时间强度时的边坡稳定系数,若计算得到的稳定条件下的安全系数时间比边坡服务年限短,则需要采取措施提高边坡的稳定系数,推迟加速阶段来临的时间。以上是蠕变控制作用下的边坡中长期滑坡预报方法。

4 结论

本文通过分析炭质泥岩泥化夹层的直剪流变试验成果,表明炭质泥岩泥化夹层的法向应力和剪应力为线性关系,存在统一的蠕变加速阶段来临时的极限应变量。基于老化理论,建立了适合弱层流变特性的流变力学模型,该模型可以描述初始蠕变、等速蠕变和加速蠕变三个阶段过程。依据蠕变加速阶段来临时的极限应变量得到了长期强度方程,从而为边坡变形分析和滑坡中长期预报提供了可靠的依据。

文中泥化弱层流变特征与长期强度方程,数学计算比较简单,物理意义明确,求解问题方便,具有一定的工程适用性。已为某露天煤矿边坡稳定性评价、滑坡预报及边坡治理工程设计所采用^[14],取得了较好的经济、社会效益,同时也证明了该方法是一种实验可行、理论正确、成效显著的方法。

致谢 本文的研究成果是在马新民教授级高级工程师和霍起元高级工程师指导下完成的,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 任光明,聂德新,米德才.软弱层带夹泥物理力学特征的仿真研究[J].工程地质学报,1999,7(1):65—71(Ren Guangming, Nie Dexin, Mi Decai. The Simulation Study of Physical-Mechanical Properties of Intercalated Gouge in Weak-Lager Zones. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(1):65—71(in Chinese))
- [2] Schmidtke R H, Lajtai E Z. The long-term strength of Lac du Bonnet granite[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1985, 22: 461—465.
- [3] 袁静,龚晓南,益德清.岩土流变模型的比较研究[J].岩石力学与工程学报,2001,20(6):772—779(Yuan Jing, Gong Xiaonan, Yi Deqing. Comparison study on rheological constitutive models. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6):772—779(in Chinese))
- [4] 徐平,杨挺清.岩石流变试验与本构模型辨识[J].岩石力学与工程学报,2001,20(增):1739—1744(Xu Ping, Yang Tingqing. Current research on the rheological test and model identification of rock. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(supp.):1739—1744(in Chinese))
- [5] 曹树刚,边金,李鹏.岩石蠕变本构关系及改进的西原正夫模型[J].岩石力学与工程学报,2002,21(5):632—634(Cao Shugang, Bian Jin, Li Peng. Rheologic constitutive relationship of rocks and a modifical model. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5):632—634(in Chinese))
- [6] 孙钧.岩土材料流变及其工程应用[M].北京:水利电力出版社,1990(Sun Jun. Rheological theory of rock and soil and its application in enginerings. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1990(in Chinese))
- [7] 程谦恭,胡厚田,彭建兵,胡广韬.高边坡岩体渐进性破坏粘弹塑性有限元数值模拟[J].工程地质学报,2000,8(1):25—30(Cheng Qiangong, Hu Houtian, Peng Jianbing, Hu Guangtao. Visco-Elastoplastic Finite Element Simulation of Progressive Failure of High-Steep Rock Slope. Journal of Engineering Geology, 2000, 8(1):25—30(in Chinese))

- [8] 刘雄. 岩石流变学概论[M]. 北京:地质出版社,1994(Liu Xiong. An introduction to Rock Rheology. Beijing: Geological Press,1994(in Chinese))
- [9] 杨春和,高小平,吴文. 盐岩时效特性实验研究与理论分析[J]. 辽宁工程技术大学学报,2004,23(6):764—766 (Yang Chunhe, Gao Xiaoping, Wu Wen. Experiment studies and theoretic analysis of time dependent properties of rock salt. Journal of Liaoning Technical University 2004,23(6):764—766(in Chinese))
- [10] Su K, Ghoreychi M, Chanchole S. Experimental study of damage in granite[J]. Geotechnique, 2000,50: 235—241.
- [11] Heuze F E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rocks-a review[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1983,20: 3—10.
- [12] 陈宗基. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报,1991,10(2):299—312 (Tan Tjongkie. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991,10(2):299—312(in Chinese))
- [13] 范广勤. 岩土工程流变力学[M]. 煤炭工业出版社,1993 (Fan Guangqin. Rheologic Mechanical of Rock and Soil. China Coal Industry Press,1993(in Chinese))
- [14] 芮勇勤. ,蠕动边坡稳定性及其变形、失稳的预测与控制[D],中国矿业大学(博士学位论文),1998(Rui Yongqin, Stability of Creeping Slope and its Instability Prediction on Deformation Progress, Ph. D, China University of Mining and Technology,1998(in Chinese))
- [15] 马新民,霍起元,芮勇勤. 露天煤矿边坡工程研究[J]. 露天采煤技术,1995,8(1):2—7(Ma Xinmin, Huo Qiyuan, Rui Yongqin. Slope Engineering of Open-pit Coal Mine. Open Exploitation Technique, 1995, 8 (1): 2 — 7 (in Chinese))

Rheological Characteristics and Long-Term Strength of Siltized Intercalation Interbedded in Peat Mudstone

YANG Tian-hong¹, RUI Yong-qin¹, ZHU Wan-cheng¹, SHEN Li², LIU Jing-hui², YANG Hong-hai²

(1. Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Fushun Branch CCRI, Liaoning 113001, China)

Abstract: Linear relation between the normal and shear stress in muddy intercalation and the existence of unified ultimate strain at accelerated creep were proved based on the direct shear rheological tests results of muddy intercalation interbedded in brown mudstone. A rheological model suitable to describe the rheological characteristics of weak layer was established based on deterioration theory. This model is capable of describing three creep phases, i. e. transient creep, stable creep and accelerated creep. At last, the long-term strength was obtained based on ultimate strain at the beginning of the accelerated creep, which thereby can provide reliable evidence for slope deformation analysis and long and medium term landslide forecast.

Keywords: peat mudstone; siltized intercalation bed; rheological test; long-term strength