

黄土三轴剪切蠕变特性研究

王松鹤, 骆亚生

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以陕西省杨凌示范区某黄土边坡黄土试样为研究对象, 进行了一系列室内三轴剪切蠕变试验, 对三轴应力条件下黄土的剪切蠕变特性进行了研究, 分析了时间、偏应力水平对应变速率的影响。建立了适合杨凌地区黄土的经验蠕变模型, 通过与 Burgers 模型比较发现, 该经验蠕变模型具有精度高、参数少且获取途径简便的优点, 能够很好地描述杨凌地区黄土的应力-应变-时间关系。另外, 由试验资料发现三轴应力条件下黏滞系数与偏应力、时间具有密切的关系, 并推导出黏滞系数与偏应力、时间的经验公式, 并对该经验关系进行了验证。

关键词: 黄土; 剪切蠕变; 经验蠕变模型; 黏滞系数

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)10-1633-05

作者简介: 王松鹤(1985-), 男, 河北藁城人, 硕士研究生, 从事黄土力学方面的研究, E-mail: songhe@nwsuaf.edu.cn。

Triaxial shear creep characteristics of loess

WANG Song-he, LUO Ya-sheng

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: By taking the samples from a loess slope of Yangling District in Shaanxi Province as the study object, a series of triaxial shear creep tests are carried out to analyze the shear creep characteristics of loess under complex stress condition. Based on the experimental data, the impact of time and deviatoric stress on strain rate is analyzed. An empirical creep model suitable for Yangling District is proposed. It is shown that the model can describe the stress-strain-time relationship with higher accuracy, fewer parameters and easier method of obtaining parameters by the comparison between empirical creep model and experimental data. Besides, under triaxial stress condition, the viscous coefficient is closely related to the deviatoric stress and time. An empirical formula is suggested to simulate the relationship among the viscous coefficient, the deviatoric stress and the time. The verification results prove its applicability and accuracy.

Key words: loess; shear creep characteristic; empirical creep model; viscous coefficient

0 引言

西部地区工程地质问题较为突出, 季节性冻土、湿陷性黄土、滑坡等岩土力学与工程地质问题是西部大开发过程中所面临的十分重要的难题。这些难题能否顺利地解决对中国西部的建设和发展具有重大的意义。大力开展蠕变特性的研究, 查明影响蠕变的主要因素, 并采取有效措施对这些不良因素进行控制和治理, 是解决这些难题的有效途径。近年来, 许多学者致力于岩土蠕变特性的研究, 使得这一领域的研究资料和成果日益丰富和完善^[1-12]。黄土蠕变现象是黄土高原地区的岩土工程建设中不可忽视的重要因素, 黄土边坡失稳、基坑临空面的缓慢侧向位移等工程地质问题均与此密切相关。

岩土材料蠕变特性的研究主要有原位蠕变监测、室内蠕变试验和软件模拟等方式, 其中, 室内蠕变试验较为常用, 包括单向固结, 直接剪切蠕变和三轴蠕

变试验等多种方式。三轴蠕变试验可以简便准确地获得蠕变曲线及其特征参数, 其应力状态与工程实际也更接近, 是一种研究蠕变特性较为有效的手段。

结合陕西省杨凌示范区某黄土边坡黄土的室内三轴剪切蠕变试验资料, 分析了时间、偏应力水平对黄土蠕变特性的影响, 建立了黄土的经验蠕变模型, 通过与 Burgers 模型比较验证了经验蠕变模型的准确性和适用性, 并推导出黏滞系数与偏应力、时间的关系。

1 试验材料和方法

试样取自陕西省杨凌示范区某黄土边坡, 取土深度 4.0~5.0 m, 属 Q₃ 黄土, 试样物理性质指标见表 1。试验在改进后的应力型三轴蠕变仪(见图 1)上进行, 通过常规三轴剪力仪的加压系统提供围压, 由砣码通

基金项目: 国家自然科学基金项目(50578134)

收稿日期: 2009-05-14

表1 黄土的物理性质指标
Table 1 Physical indexes of Yangling loess

土样来源	比重	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	按塑性图分类	颗粒组成/%		
						>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm
杨凌	2.70	28.7	17.5	11.2	CL	16.5	62.8	20.7

过支架施加正应力，由固定在压力室上的百分表量测轴向位移。仪器所配备的砝码及百分表均经过国家计量认证。试验室内装有温度计，用以保证试验在(20±1°C)内进行。试样包括原状、重塑和饱和3种；原状试样由原状黄土直接削制而成，重塑试样由黄土风干、碾碎、过筛后的土料压制而成，饱和试样抽气饱和。试样直径为39.1 mm，高为80 mm；由水膜转移法调整非饱和试样的含水率至目标含水率12%，16%和24%，并于保湿缸中静置48 h以上，以使水分扩散均匀。试验设置4个水平的围压，包括50，100，200和300 kPa；正应力由三轴固结不排水剪切试验确定的抗剪强度分级施加。变形稳定以每级正应力下，定时观测变形持续到稳定（一般以0.01 mm/d）为准。



图1 应力型三轴蠕变仪
Fig. 1 Stress triaxial creepmeter

2 蠕变试验结果分析

2.1 黄土蠕变特性分析

笔者基于不同初始条件黄土试样的三轴剪切蠕变试验资料，分析得到应变速率与偏应力、时间的关系，以 $w=12%$ ， $\rho_d=1.45 \text{ g/cm}^3$ ， $\sigma_3=100 \text{ kPa}$ 重塑黄土为例，见图2和图3。

由试验资料可知，在蠕变初期，应变速率迅速下降；当 t 达到一定时间后，蠕变进入第二阶段，应变速率保持某一稳定值，根据斋藤公式可以计算出此边坡的蠕变破坏历时 t_r ，以验证该黄土边坡的稳定性；经过一个较长的稳定蠕变阶段，蠕变进入加速蠕变阶段，该阶段应变速率呈迅速上升趋势，土样迅速破坏。蠕变经历了一个逐渐减小到稳定持续，再到逐渐增大的过程^[13-14]。偏应力水平对应变速率影响显著，随偏应力增大，同期应变速率逐渐提高。

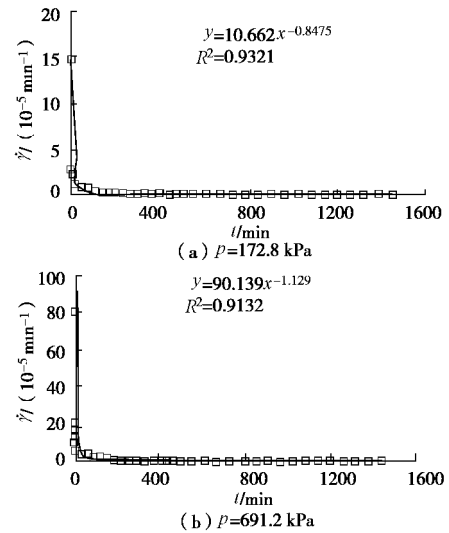


图2 应变速率与时间的关系

Fig. 2 Relation between strain rate and time

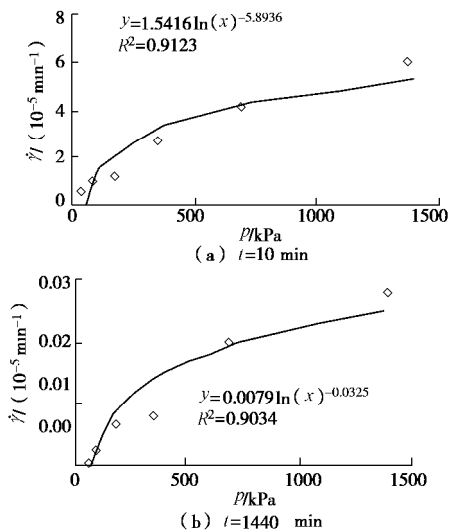


图3 应变速率与偏应力的关系

Fig. 3 Relation between strain rate and deviatoric stress

2.2 经验蠕变模型建立

通过对上述两图的分析发现，采用幂函数描述应变速率与时间的关系，用对数函数描述应变速率与偏应力的关系具有较好的效果，相关系数均在0.9以上。故应变速率可以表示为

$$\dot{\gamma} = (a \ln p + b) \left(\frac{t}{t_1} + 1 \right)^l \quad (1)$$

对式(1)积分，得到

$$g = \frac{t_1}{l+1} (a \ln p + b) \left(\frac{t}{t_1} + 1 \right)^{l+1} \quad (2)$$

令 $A=at_1/(\lambda+1)$, $B=b/a$, $C=\lambda+1$, 则可得黄土的经验蠕变模型, 如下

$$g = A(\ln p + B)\left(\frac{t}{t_1} + 1\right)^C \quad (3)$$

模型中需要确定的参数有 3 个, A , B , C , 均可以由试验数据拟合出来, 见表 2。

表 2 黄土经验蠕变模型参数 ($w=12\%$, $\sigma_3=100$ kPa)

Table 2 Parameters of empirical creep model of loess ($w=12\%$, $\sigma_3=100$ kPa)

试样类型	ρ_d /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	A	B	C
重塑	1.45	0.1151	-4.0478	0.0524
	1.35	0.0752	-3.7699	0.0530
	1.26	0.1161	-3.1016	0.0629

2.3 蠕变模型比较

对常用的元件模型进行筛选, 笔者选用 Burgers 模型对黄土的应力 - 应变 - 时间关系进行模拟, 并与式 (3) 进行比较。

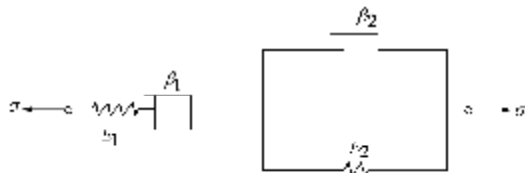


图 4 Burgers 模型

Fig. 4 Burgers model

Burgers 模型由 Kelvin 体和 Maxwell 体串联而成的四参数黏弹性模型, 在描述蠕变前两个阶段时具有较好的效果, 因而在岩土体流变理论研究和工程建设实际中获得了广泛的应用。在常应力 s_0 作用下, 其蠕变方程可以表示为

$$g(t) = s_0 \left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{b_1} + \frac{1}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2 t}{b_2}} \right) \right] \quad (4)$$

令 $A = \frac{s_0}{E_1}$, $B = \frac{s_0}{b_1}$, $C = \frac{s_0}{E_2}$, $D = \frac{E_2}{b_2}$, 则式 (4) 可简化为

$$g(t) = A + Bt + C(1 - e^{-Dt}) \quad (5)$$

以 $w=12\%$, $\rho_d=1.26 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_3=100 \text{ kPa}$ 重塑黄土为例, 通过对试验数据拟合可以得到各参数, 见表 3。

表 3 Burgers 模型参数

Table 3 Parameters of Burgers model

p/kPa	A	$B/10^7$	C	D
86.4	0.1250	1.0417	0.1549	0.0057
172.8	0.2500	2.6042	0.0896	0.0046
345.6	0.3125	2.0833	0.1372	0.0063
691.2	0.4100	3.0000	0.1566	0.0037
1382.4	0.4130	4.6875	0.3163	0.0049

用 $p=43.2 \text{ kPa}$ 的试验资料对式 (3) 和 Burgers 模型进行比较, 结果如图 5。

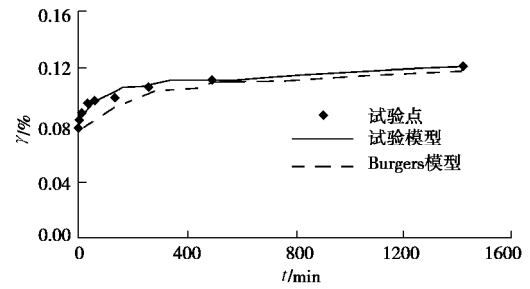


图 5 模型验证 ($\sigma_3=100 \text{ kPa}$)

Fig. 5 Model validation ($\sigma_3=100 \text{ kPa}$)

由图 5 及表 4 知, 通过与 Burgers 模型比较发现, 笔者建立的经验蠕变模型具有较高的精度, 曲线形态与试验点符合较好, 另外模型参数获取的途径也较为简便, 在描述黄土的应力 - 应变 - 时间关系时具有良好的效果。

表 4 黄土经验蠕变模型参数 ($w=12\%$, $\sigma_3=100 \text{ kPa}$)

Table 4 Parameters of empirical creep model of loess ($w=12\%$, $\sigma_3=100 \text{ kPa}$)

时间 /min	试验值	经验点	相对误差 /%	Burgers	相对误差 /%
1	0.0798	0.0806	0.9461	0.0758	5.3339
2	0.0815	0.0826	1.3937	0.0759	7.3535
5	0.0856	0.0863	0.8392	0.0764	12.0594
10	0.0887	0.0897	1.0968	0.0772	14.9588
30	0.0943	0.0957	1.4968	0.0801	17.7772
60	0.0976	0.0999	2.3305	0.0840	16.2482
120	0.1000	0.1043	4.2713	0.0903	10.7130
240	0.1054	0.1089	3.3108	0.0990	6.4765
480	0.1106	0.1137	2.8275	0.1078	2.6265
1440	0.1200	0.1219	1.5445	0.1200	0.0206

2.4 黏滞系数分析

黄土具有明显的黏滞性, 其黏滞系数可表示为

$$h = p/\eta \quad (6)$$

由试验资料整理出 $p - \eta$ 关系曲线, η 可由曲线斜率求得。以 $w=12\%$, $\rho_d=1.45 \text{ g/cm}^3$, $\sigma_3=100 \text{ kPa}$ 为例, 由分析出的 $\eta - t$ 及 $\eta - p$ 关系曲线发现, 黏滞系数 η 与时间 t 、偏应力 p 均具有密切的关系, 不仅是时间的函数, 还与应力水平有关^[15], 如图 6~8 所示。

从图 6 可以看出, 黏滞系数 η 随时间 t 的增加而变大; 在蠕变初期黏滞系数增长较快, 随蠕变发展黏滞系数的增长逐渐变缓。

由图 7 知, 在双对数坐标下, 采用直线关系来描述 $\ln \eta - \ln t$ 关系具有良好的效果, 即

$$\ln h = a + b \ln \left(\frac{t}{t_1} + 1 \right) \quad (7)$$

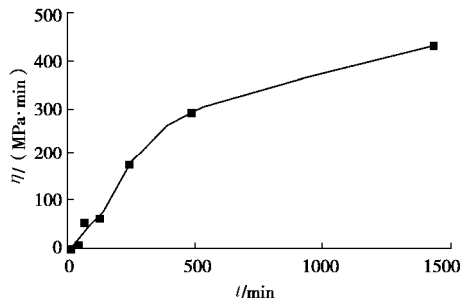


图6 黏滞系数与时间的关系 ($p=691.2$ kPa)

Fig. 6 Relation between viscous coefficient and time ($p = 691.2$ kPa)

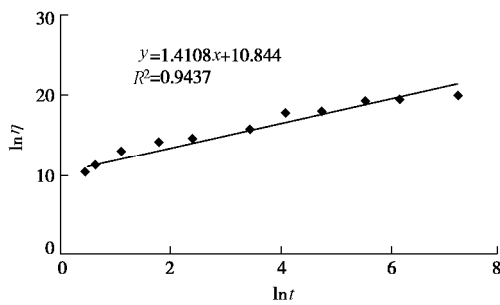


图7 双对数坐标下黏滞系数与时间的关系 ($p=691.2$ kPa)

Fig. 7 Relation between viscous coefficient and time in log-log coordinates ($p=691.2$ kPa)

式中, h 表示黄土土样的黏滞系数, t 为蠕变历时 (min), t_1 为单位时间 ($t_1=1$ min), a, b 为模型参数, 可由试验数据求得。对式 (7) 进行转化可得

$$h = A\left(\frac{t}{t_1} + 1\right)^B, \quad (8)$$

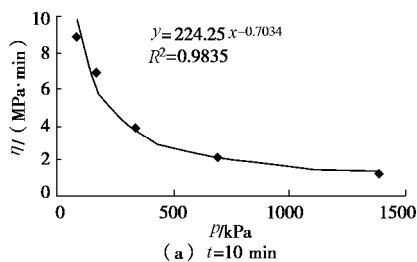
式中, $A=e^a, B=b$, 表明可采用幂函数描述 $h - t$ 关系。

由图 8 知, 黄土试样黏滞系数 h 随偏应力水平 p 逐渐提高而减小, 在较高应力水平范围内黏滞系数随应力水平变化呈线性衰减趋势。通过对黏滞系数 η 与偏应力 p 的关系进行拟合发现, $h - p$ 采用幂函数描述时效果较好, 见图 8。

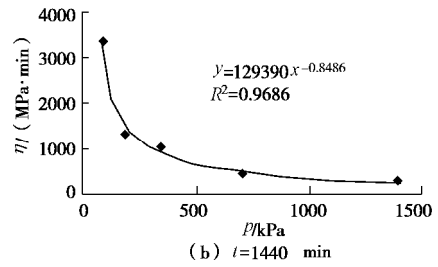
于是, 黏滞系数与偏应力、时间的关系可表示为

$$h = ap^m\left(\frac{t}{t_1} + 1\right)^l. \quad (9)$$

采用 $p=43.2$ kPa 的试验数据对式 (9) 进行验证, 结果如图 9。



(a) $t=10$ min



(b) $t=1440$ min

图8 黏滞系数与偏应力的关系

Fig. 8 Relation between viscous coefficient and deviatoric stress

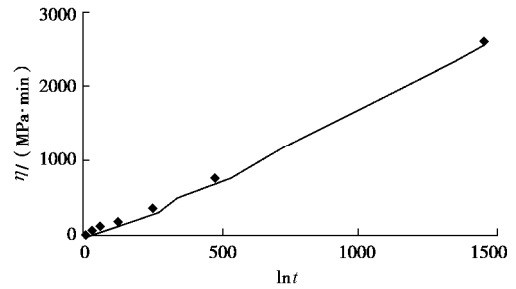


图9 试验点与理论曲线的比较

Fig. 9 Comparison between experimental results and theoretical curves

由图 9 发现, 由式 (9) 计算出的理论曲线与试验点吻合很好, 并且具有相同的曲线形态, 表明该式在描述黄土黏滞性上具有较高的精度和较好的适用性。

3 结 论

(1) 蠕变经历了一个逐渐减小到稳定持续, 再到逐渐增大的过程; 偏应力水平对蠕变速率影响显著, 随偏应力增大, 同期蠕变速率逐渐提高。

(2) 建立了适合杨凌地区黄土的经验蠕变模型, 通过与 Burgers 模型比较发现, 该经验蠕变模型具有精度高, 参数少且获取途径简便的优点, 能够很好地描述杨凌地区黄土的应力-应变-时间关系。

(3) 通过对试验资料进行分析, 发现三轴应力条件下黏滞系数与偏应力、时间具有密切的关系, 并推导出黏滞系数与偏应力、时间的关系, 验证了该经验关系的合理性和准确性。

然而, 基质吸力、颗粒组成差异等对非饱和黄土蠕变特性的影响以及如何将蠕变试验成果应用于工程实际指导生产方面仍需要进一步的研究探讨。

参考文献:

[1] 卢萍珍, 曾 静, 盛 谦. 软黏土蠕变试验及其经验模型研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1041 - 1044, 1052. (LU Ping-zhen, ZENG Jing, SHENG Qian. Creep tests on soft clay and its empirical models[J]. Rock and Soil Mechanics,

- 2008, **29**(4): 1041 - 1044, 1052. (in Chinese))
- [2] 王常明, 王清, 张淑华. 滨海软土蠕变特性及蠕变模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 227 - 230. (WANG Chang-ming, WANG Qing, ZHANG Shu-hua. Creep characteristics and creep model of marine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(2): 227 - 230. (in Chinese))
- [3] 陈晓平, 朱鸿鹄, 张芳枝, 等. 软土变形时效特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2142 - 2148. (CHEN Xiao-ping, ZHU Hong-hu, ZHANG Fang-zhi, et al. Experimental study on time-dependent deformation of soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(12): 2142 - 2148. (in Chinese))
- [4] 刘悦, 黄强兵. 模拟堆载作用的黄土边坡土体变形机理试验[J]. 地球科学与环境学报, 2007, **29**(2): 183 - 187. (LIU Yue, HUANG Qiang-bing. Test study for simulating soil deformation mechanism of loess slope under load condition[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, **29**(2): 183 - 187. (in Chinese))
- [5] 刘保健, 张晓荣, 程海涛. 应变控制下压实黄土的动三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(6): 1073 - 1076. (LIU Bao-jian, ZHANG Xiao-rong, CHENG Hai-tao. Study on compacted loess under strain control at dynamic triaxial test[J]. Rock and soil mechanics, 2007, **28**(6): 1073 - 1076. (in Chinese))
- [6] 汪斌, 朱杰兵, 唐辉明, 等. 黄土坡滑带土的蠕变特性研究[J]. 长江科学院院报, 2008, **25**(1): 49 - 52. (WANG Bin, ZHU Jie-bing, TANG Hui-ming, et al. Study on creep behavior of slip band soil of Huangtupo landslide[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, **25**(1): 49 - 52. (in Chinese))
- [7] 尹光志, 王登科, 张东明, 等. 含瓦斯煤岩三维蠕变特性及蠕变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(2): 2631 - 2636. (YIN Guang-zhi, WANG Deng-ke, ZHANG Dong-ming, et al. Research on triaxial creep properties and creep model of coal containing gas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(2): 2631 - 2636. (in Chinese))
- [8] 郭增玉, 张朝鹏, 夏旺民. 高湿度 Q_2 黄土的非线性流变本构模型及参数[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, **19**(6): 780 - 784. (GUO Zeng-yu, ZHANG Chao-peng, XIA Wang-min. Nonlinear rheological constitutive models and their parameters of high moisture Q_2 loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, **19**(6): 780 - 784. (in Chinese))
- [9] 吴燕开, 陈红伟, 张志征. 饱和黄土的性质与非饱和黄土流变模型[J]. 岩土力学, 2004, **25**(7): 1143 - 1146. (WU Yan-kai, CHEN Hong-wei, ZHANG Zhi-zheng. Characteristics of loess and rheological model of unsaturated loess in Xi'an[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(7): 1143 - 1146. (in Chinese))
- [10] 程海涛, 刘保健, 谢永利. 压实黄土应力 - 应变 - 时间特性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, **28**(1): 6 - 9. (CHENG Hai-tao, LIU Bao-jian, XIE Yong-li. Stress-strain-time behavior of compacted loess[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, **28**(1): 6 - 9. (in Chinese))
- [11] 马莉英, 肖树芳, 王清. 黄土的流变特性模拟与研究[J]. 实验力学, 2004, **2**(19): 179 - 182. (MA Li-ying, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Simulation and study on rheological behavior of loess[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2004, **2**(19): 179 - 182. (in Chinese))
- [12] 张长庆, 苗天德, 王家澄, 等. 冻结黄土蠕变损伤的电镜分析[J]. 冰川冻土, 1995, **17**(增刊): 54 - 59. (ZHANG Chang-qing, MIAO Tian-de, WANG Jia-cheng, et al. An analysis on creep damage of frozen loess by electron-microscope[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, **17**(S0): 54 - 59. (in Chinese))
- [13] MUNSON D E, DAWSON P R. Salt constitutive modeling using mechanism maps[C]// The Mechanical Behavior of Salt, The First Conference[S.I.]. Tech Publications, Trans. 1984: 717 - 737.
- [14] HUNSCHE U. Measurement of creep in rock salt at small strain rates [C]// The Mechanical Behavior of Salt, Proceedings of the Second Conference[S.I.]. Tech Publications, Trans. 1984: 187 - 196.
- [15] 孙均. 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. (SUN Jun. Rheology of geomaterials and its engineering application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))