

某工程地基岩体流变特性现场试验研究

白高峰¹, 赵丰博², 霍雨佳¹, 姜浩¹

(1. 河北建研建筑设计有限公司, 河北 石家庄 050022; 2. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518172)

摘要: 岩体流变是岩体的一种重要工程特性, 对于分析大荷载、长期工程的受力变形和稳定尤为重要。为了预测某重要工程的地基沉降, 针对该工程地基岩体中的3种不同岩性: 砂岩、泥质粉砂岩和泥页岩分别进行了现场流变试验。对不同岩性的流变特性做出分析, 结果表明地基岩体具有明显的流变特性, 不同岩性的蠕变过程、弹性后效和黏性流动等又存在差异。另外还分析了岩体含水状态对流变试验的影响, 表明含水率变化对软岩泥页岩变形影响明显, 对泥质粉砂岩和砂岩影响很小。采用广义 Kelvin 三参量模型对试验进行辨识, 根据模型对试验数据进行参数反演, 最后得出了地基岩体的流变参数, 为地基岩体变形预测提供了科学依据。

关键词: 基岩地基; 沉积岩; 流变; Kelvin 模型

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)05-0388-09

Field test study on rheological properties of foundation rock mass

BAI Gao-feng¹, ZHAO Feng-bo², HUO Yu-jia¹, JIANG Hao¹

(1. Hebei Jianyan Architectural Design Co., Ltd., Shijiazhuang 050022, Hebei, China;

2. China Nuclear Power Design Co., Ltd., (Shenzhen), Shenzhen 518172, Guangdong, China)

Abstract: Rock mass rheology is an important engineering characteristic of rock mass, which is particularly important for analyzing the deformation and stability of large load and long-term engineering. In order to predict the foundation settlement of an important project, field rheological tests were carried out for three different lithologies of foundation rock: sandstone, argillaceous siltstone and mud shale. Through the analysis of rheological properties of different lithologies, the results show that the foundation rock mass has obvious rheological properties, and there are differences in creep process, elastic aftereffect and viscous flow of different lithologies. In addition, the influence of water content of rock mass on the rheological test is also analyzed. The results show that the change of water content has obvious influence on the deformation of soft shale, but has little influence on argillaceous siltstone and sandstone. The generalized Kelvin three parameters model is used to identify the tests, and the parameter inversion of the test data is carried out according to the model. Finally, the rheological parameters of the foundation rock mass are obtained, which provide a scientific basis for the prediction of the foundation rock mass deformation.

Key words: bedrock foundation; sedimentary rocks; rheology; Kelvin model

1 概 述

岩石的流变性是指岩石在外界荷载、温度等条件下呈现出与时间有关的变形、流动和破坏等性质, 其本质是组成岩石的矿物组构(骨架)和结构面形态随时间不断调整, 导致其应力、应变状态亦随时间而持续地变化^[1]。流变是岩土工程变形失稳的重要原因之一。开展岩石流变特性研究, 深入了解岩石流变变形及其破坏规律, 对于基岩地基、边

坡、隧洞等岩体工程建设具有十分重大的现实意义和经济价值。

1.1 工程背景

某工程地基地层岩性为志留系下统连滩群第五组(S₁ln)沉积岩, 为一套粉砂岩为主夹泥质粉砂岩、泥页岩或互层的地层序列。根据该项目前期工程活动, 发现已建厂房地基因岩体流变所导致的地基沉降量较大, 为预测拟建厂房的地基变形规律和沉降量, 防止地基变形过大或失稳引发事故, 开

展了针对厂房地基岩体流变特性的现场试验研究。

1.2 研究现状

自从认识到岩石流变对工程建设的重要性以来, 国内外学者对岩石的流变性进行了大量的研究, 主要集中在室内流变试验和流变模型辨识两大方面。

国内外学者自 18 世纪 30 年代始, 曾对岩石的流变性进行了大量室内试验研究^[2-12], 掌握了许多岩石的流变特性与规律。但人类岩石工程的对象主要为岩体, 现场的岩体流变试验更接近于工程实际条件, 由于现场岩体流变试验耗时长、成本高, 目前现场试验的研究成果有限。

岩石流变模型的研究是流变理论的重要组成部分, 也是近几年学者研究的热点。通过模型可以把复杂的流变属性加以简化, 以直观的方式表达出来, 并为数值分析和计算处理提供方便。流变模型主要有经验模型、元件模型和损伤断裂模型^[13-16]。

本次研究特别之处在于采用了现场岩体试验, 防止了室内岩石试验未能考虑各种结构面的不足, 试验条件更接近工程使用的受力状态。

2 现场流变试验

2.1 工程地质条件

(1) 地层岩性

厂房地基地层岩性为志留系下统连滩群第五组 (S₁ln₅) 沉积岩, 为一套粉砂岩为主夹泥质粉砂岩、泥页岩或互层的地层序列。地基岩体自上而下风化程度依次为: 强风化、中等风化和微风化。厂坪高程强风化层分布范围较小, 主要为中等风化层。中等风化砂岩、泥质粉砂岩、泥页岩岩石坚硬程度分别属较坚硬、较软岩、软岩。

(2) 地质构造

场地总体为单斜地层, 岩层倾向北西, 倾角较缓, 约 5°~20°。但是局部软弱岩层中发育有小范围的褶曲现象, 局部地段受构造运动挤压影响, 倾角变化较大, 表现为揉皱强烈, 揉皱的规模较小。

厂址区节理裂隙较为发育, 节理裂隙总体上以剪性节理为主, 节理面大部分平直闭合, 节理面可见铁质浸染, 一般延伸长度大于 3 m。

2.2 试验过程及成果

本次研究在厂坪高程开展了三点流变试验, 试验部位岩体分别为中等风化砂岩、中等风化泥质粉砂岩和中等风化泥页岩。各试验部位岩体性质见图 1。



1号试验点: 泥页岩, 灰黑色, 层理发育, 缓倾角, 层面产状 $181^{\circ} \angle 16^{\circ}$ 。发育 1 组裂隙, 与层面正交。



2号试验点: 泥质粉砂岩, 青灰色, 层理发育, 缓倾角, 岩层产状 $134^{\circ} \angle 18^{\circ}$ 。发育 1 条陡倾角长大裂隙, 贯穿点面, 裂隙面上有红褐色充填。



3号试验点: 中等风化砂岩, 青灰色, 裂隙发育, 发育 2 组陡倾角裂隙, 裂隙间距 2~4 cm, 部分裂隙微张开, 裂隙面上有红褐色充填。

图 1 试验点照片及岩体性质

Fig. 1 Test site photos and properties of rock mass

流变试验应力路径见图 2。

首先开展 0.3 MPa 应力水平下的加、卸载流变试验 (基底设计荷载约为 0.6 MPa, 0.3 MPa 为基底设计荷载的 1/2); 之后再开展 0.6 MPa 应力水平下

的加、卸载流变试验。0.6 MPa 为基底设计荷载，该级试验为整个流变的重点，稳压时间也相对较长；最后开展 1.2 MPa 应力水平下的加、卸载流变试验（1.2 MPa 为基底设计荷载 0.6 MPa 的 2 倍），该级流变试验时，泥页岩流变试验点因为反力不足，试验压力未能加载至 1.2 MPa，所以泥页岩流变试验点开展了 2 次 0.6 MPa 应力水平下的加载流变试验。

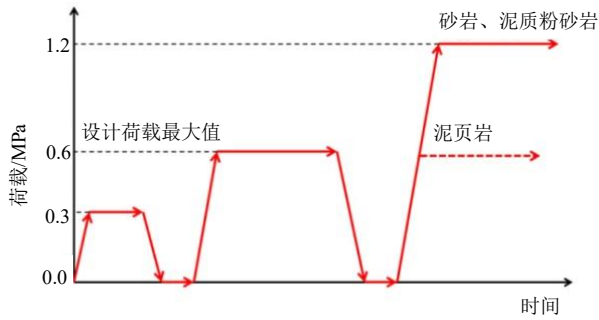


图 2 流变试验应力路径

Fig. 2 Stress path of rheological test

3 个流变试验点的变形全过程曲线如图 3~5 所示。加压过程中岩体向下压缩变形为负，退压过程中岩体向上回弹变形为正。

泥页岩给出的变形全过程曲线（图 3）中包含了 0.3 MPa 加载、卸载，0.6 MPa 加载、卸载，以及第二次 0.6 MPa 加载过程。累计观测时间超过 1 600 h（67 d）。

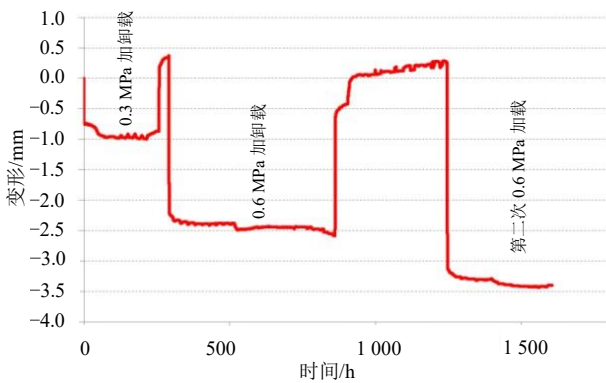


图 3 泥页岩流变试验点变形全过程曲线

Fig. 3 Curve of whole deformation process of mud shale rheological test point

泥质粉砂岩给出的变形过程曲线（图 4）中包含了 0.6 MPa 加载、卸载，1.2 MPa 加载过程。0.3 MPa 的加卸载过程曲线因为受外界影响较大，规律性较差，在上述流变过程曲线图中没有给出。给出的曲线部分累计观测时间超过 1 500 h（63 d）。砂岩给出的变形过程曲线（图 5）中包含了 0.6 MPa 加载、卸载，1.2 MPa 加载、卸载过程。0.3 MPa 的加卸载过程曲线同样因为受外界影响较大，规律性

较差，在上述流变过程曲线图中没有给出。给出的曲线部分累计观测时间超过 1 400 h（58 d）。

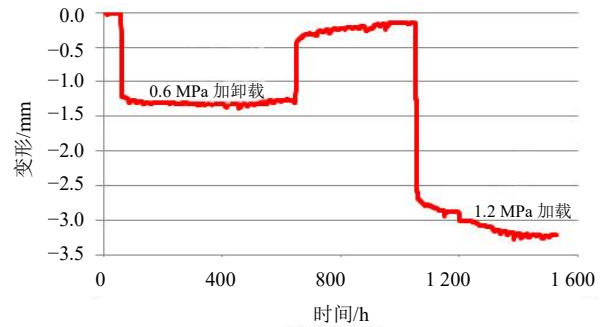


图 4 泥质粉砂岩流变试验点变形全过程曲线

Fig. 4 Curve of whole deformation process of argillaceous siltstone rheological test point

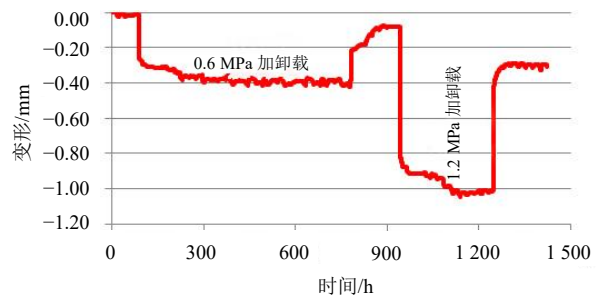


图 5 砂岩流变试验点变形全过程曲线

Fig. 5 Curve of whole deformation process of sandstone rheological test point

3 试验成果分析

3.1 成果曲线分析

图 6 中给出的泥页岩流变过程曲线包含了 0.3 MPa 加、卸载过程。

在 0.3 MPa 应力水平下，试验部位泥页岩表现出较明显的衰减流变特征，但是该段曲线形态较复杂。在流变试验过程中，由于温度变化、荷载补偿过程中的应力调整等原因，试验系统会产生一定的系统误差，此系统误差的量值是相对固定的。如果试验岩体的变形越大，该系统误差对试验结果的影响就越小。但是在 0.3 MPa 应力水平下，岩体的变形较小，此系统误差对试验结果的影响就较为显著。

在 0.6 MPa 应力加荷过程下（图 7~9），泥页岩和泥质粉砂岩在瞬时变形后，很快即达到稳定变形，其减速蠕变过程大约历时 100 h，而砂岩在此应力水平下，瞬时变形后，表现出较长的减速蠕变阶段，随后变形趋于稳定，其减速蠕变过程大约历时 350 h。砂岩相较泥质粉砂岩和泥页岩，其减速蠕变阶段更为明显，达到稳定变形所需时间较长。

在 1.2 MPa 应力加荷过程下（图 10、图 11），

泥质粉砂岩和砂岩在瞬时变形完成后, 都有明显的减速蠕变过程, 然后变形趋于稳定。泥质粉砂岩至变形稳定大约历时 400 h, 砂岩至变形稳定大约历时 200 h, 泥质粉砂岩较砂岩的减速蠕变时间较长。

各种岩性在不同应力水平下的卸荷过程均表现出弹性后效: 卸荷后, 首先出现瞬时弹性变形恢复, 随后变形恢复速率逐渐变小并趋于零, 最后趋于稳定。泥页岩卸荷后表现出大于起始状态的正变形, 但正变形量很小, 分析可能由于系统误差导致。砂岩和泥质粉砂岩卸荷后, 都存在残余应变, 且残余应变随荷载的增大而增大。

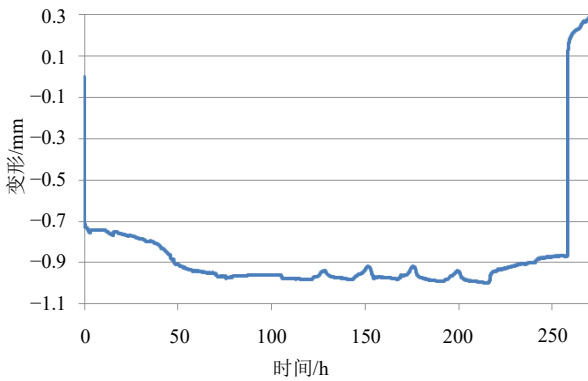


图6 泥页岩在 0.3 MPa 应力水平下的加、卸载流变曲线
Fig. 6 Rheological curve of mud shale under loading and unloading at 0.3 MPa stress level

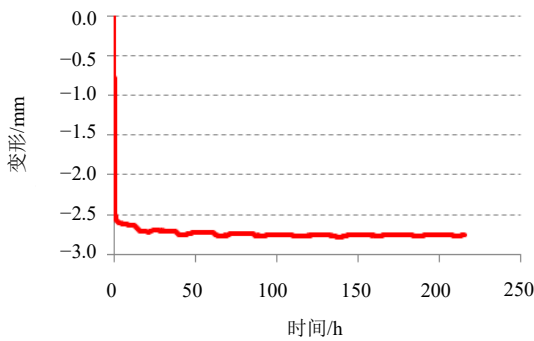


图7 泥页岩 0.6 MPa 应力水平下的加载流变曲线
Fig. 7 Rheological curve of mud shale under loading at 0.6 MPa stress level

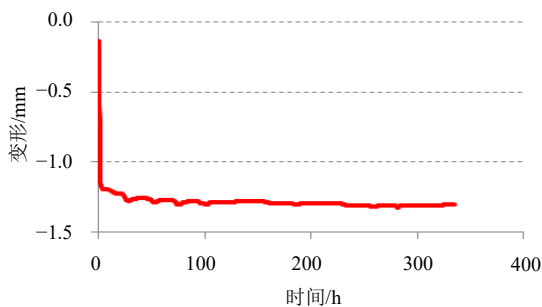


图8 泥质粉砂岩 0.6 MPa 应力水平下的加载流变曲线
Fig. 8 Rheological curve of argillaceous siltstone under loading at 0.6 MPa stress level

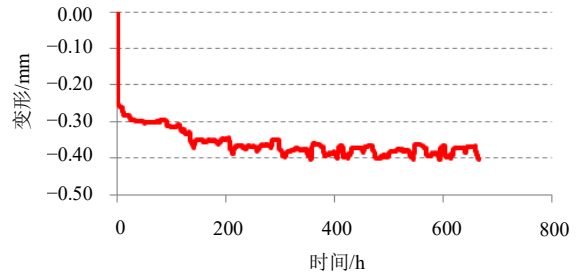


图9 砂岩在 0.6 MPa 应力水平下的加载流变曲线
Fig. 9 Rheological curve of loading of sandstone under loading at 0.6 MPa stress level

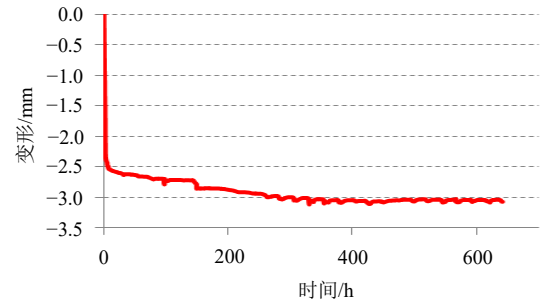


图10 泥质粉砂岩在 1.2 MPa 应力水平下的加载流变曲线
Fig. 10 Rheological curve of loading of argillous siltstone under loading at 1.2 MPa stress level

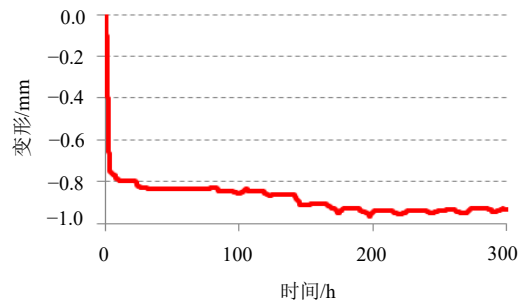


图11 砂岩在 1.2 MPa 应力水平下的加载流变曲线
Fig. 11 Rheological curve of loading of sandstone under loading at 1.2 MPa stress level

3.2 含水状态对试验的影响

以泥页岩在第一次 0.6 MPa 加载流变过程中的实测数据为依据, 分析降雨对岩体流变的影响。图 3 中, 在横坐标约 500 h 位置, 泥页岩流变曲线中有一段因连续降雨导致的变形陡坎。将该段曲线单独取出、放大, 如图 12 所示。

表 1 中给出了那段时间厂区的天气状况记录表。对比流变观测曲线和天气状况, 可以发现流变曲线形态与天气状况之间具有明显的对应关系。2015 年 1 月 27 日之前, 试验点变形一直较稳定, 每天只是随着昼夜温差变化有小幅波动。但 1 月 27 日、1 月 28 日连续 2 天降雨之后, 雨水从板房周边渗入试验岩体内, 导致岩体含水率增高。从 1 月 29 日

凌晨开始, 变形出现较明显变化, 向下的沉降变形增加了约 0.1 mm。1月29日降雨停止后, 变形有小幅回弹, 但是回弹形态较复杂, 而且未能立即恢复至降前的变形水平。另外在影响程度上, 连续2天的降雨导致泥页岩沉降变形增加了约 0.1 mm, 该试验点在 0.6 MPa 荷载作用下, 总变形量约 2.5 mm, 降雨所导致的变形占前期总变形量的 4%左右。

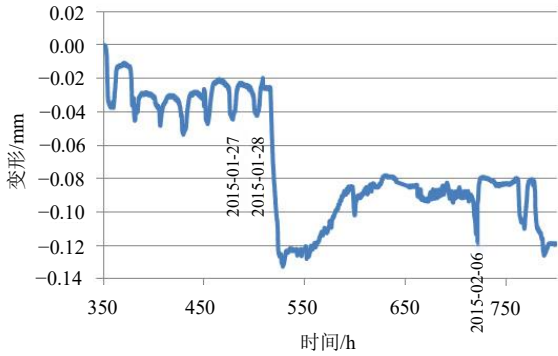


图 12 泥页岩流变曲线中的降雨影响段

Fig. 12 Rainfall influence section in mud shale rheological curve

表 1 天气记录表
Table 1 Weather chart

日期	最高温度/°C	最低温度/°C	天气
1月13日	18	10	晴
1月14日	20	10	晴
1月15日	20	10	晴
1月16日	20	12	多云
1月17日	21	13	多云
1月18日	20	13	多云
1月19日	21	13	多云
1月20日	21	13	多云
1月21日	20	13	多云
1月22日	21	14	多云
1月23日	22	15	多云
1月24日	20	16	阴
1月25日	21	17	多云
1月26日	22	17	多云
1月27日	20	17	小雨
1月28日	21	17	小雨
1月29日	22	14	阴
1月30日	13	10	小雨
1月31日	11	8	阴

对比泥质粉砂岩和砂岩流变试验点在同时间段的变形情况, 发现泥质粉砂岩和砂岩流变受降雨的影响没有泥页岩明显。说明降雨或含水状态的变化主要影响泥页岩软岩的流变。泥页岩主要以泥质

矿物为主, 与水有更强的结合性, 遇水有明显的软化性(中等风化泥页岩软化系数为 0.25), 所以会发生上述现象。

对比泥质粉砂岩和砂岩流变试验点在同时间段的变形情况, 发现泥质粉砂岩和砂岩流变受降雨的影响没有泥页岩明显。说明降雨或含水状态的变化主要影响泥页岩软岩的流变。泥页岩主要以泥质矿物为主, 与水有更强的结合性, 遇水有明显的软化性(中等风化泥页岩软化系数为 0.25), 所以会发生上述现象。

3.3 流变模型辨识

考虑模型应为后续数值计算服务的实用性和简便性, 本次流变试验模型采用常用的广 Kelvin 模型描述, 该模型由虎克体与 Kelvin 体串联组成, 即三参数广义 Kelvin 模型^[17], 模型结构见图 13。

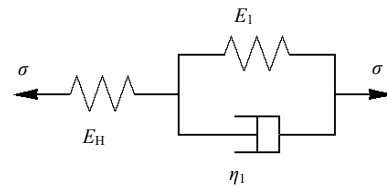


图 13 广义 Kelvin 模型示意图

Fig. 13 Schematic diagram of generalized Kelvin model

模型中各元件的物理意义如下: E_H 为弹簧的弹性模量, 反映加卸载瞬时的弹性变形性质; E_1 为 Kelvin 体的弹性模量; η_1 为 Kelvin 体的黏滞系数, 反映蠕变速率 (η_1 越大, 蠕变速率越小)。

三参量广义 Kelvin 蠕变模型的本构方程如下:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_H} + \frac{\sigma}{E_1} \left(1 - \exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1} t\right) \right) \quad (1)$$

式中: ε 为应变; σ 为应力, MPa; E_H 为弹簧的弹性模量, MPa; E_1 为 Kelvin 体的弹性模量, MPa; η_1 为 Kelvin 体的黏滞系数, MPa·h; t 为时间, h。

式(1)反映的是应力(σ)和应变(ε)之间的关系, 现场流变试验获得的是荷载(P)和变形(w)之间的关系。要将式(1)中的应力(σ)-应变(ε)关系转换成荷载(P)-变形(w)关系, 经过较复杂的数学、力学推导, 相关研究可以参见参考文献^[18], 得出基于三参量广义 Kelvin 模型的承压板法岩体载荷蠕变公式如下:

$$w(t) = \frac{1PD}{4E_H} \left(\frac{2E_H^2 E_1 + 2E_H E_1^2 + 3K(E_H + E_1)^2}{AE_1} + \frac{-3E_H^3}{2A(E_H + 6K)} \exp\left(\frac{-At}{E_H \eta_1 + 6K \eta_1}\right) - \frac{E_H}{2E_1} \exp\left(\frac{-E_1 t}{\eta_1}\right) \right) \quad (2)$$

其中: $A = E_H E_{H1} + 6K E_H + 6K E_1$

式(2)中: w 为承压板表面变形, mm; P 为荷载,

MPa; D 为承压板直径, m; E_H 为瞬时模量, GPa; K 为体积变形模量, GPa; μ 为泊松比。

体变模量 K 与弹簧模量 E_H 的转换关系如下:

$$K = \frac{(1+\mu)E_H}{3(1-2\mu)} \quad (3)$$

3.4 流变参数反演

弹簧模量 E_H 按下式计算:

$$E_H = \frac{E_0}{1+\mu} \quad (4)$$

式中: E_0 为瞬时弹性模量, 按式(5)计算, 计算时变形采用加卸载过程中的瞬时变形。

$$E_0 = \frac{7}{4} \cdot \frac{(1-\mu^2)PD}{w} \quad (5)$$

式中: μ 为泊松比; P 为试验压力, MPa; D 为承压板直径, m; w 为变形, mm。

流变本构模型中的弹性模量 E_1 、黏滞系数 η_1 依据按式(2)在实测蠕变曲线的基础上, 采用非线性最小二乘法拟合优化求解。得到拟合曲线见图 14~16。

从图中可以看出, 模型对实测曲线拟合效果较好, 根据拟合结果, 得出不同岩性的流变参数, 见表 2。

表 2 中给出了与广义 Kelvin 模型相对应的地基岩体流变参数, 还给出了地基岩体的瞬时模量 E_0 和长期模量 E_∞ 。该成果参数可以直接带入三维地质数值计算模型开展流变数值计算, 可以得到不同时刻地基岩体变形场、地基岩体变形达到基本稳定所需要的时间、地基岩体在加(卸)载完成时的瞬时变形和考虑流变变形的最终变形量。

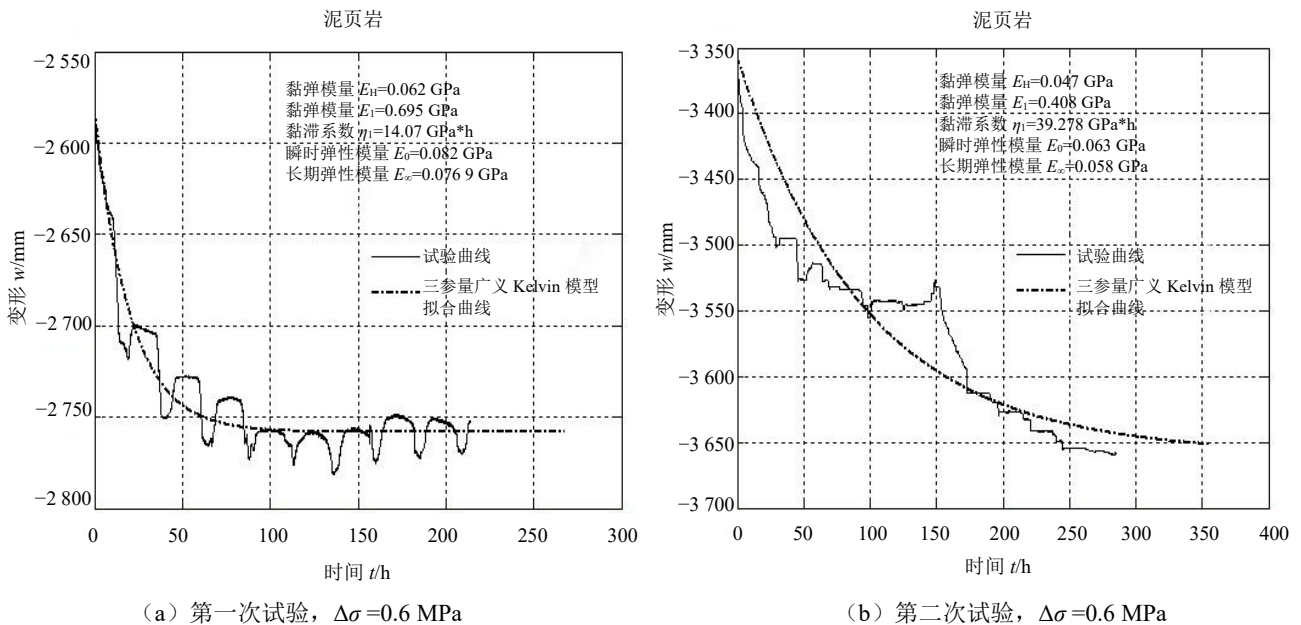


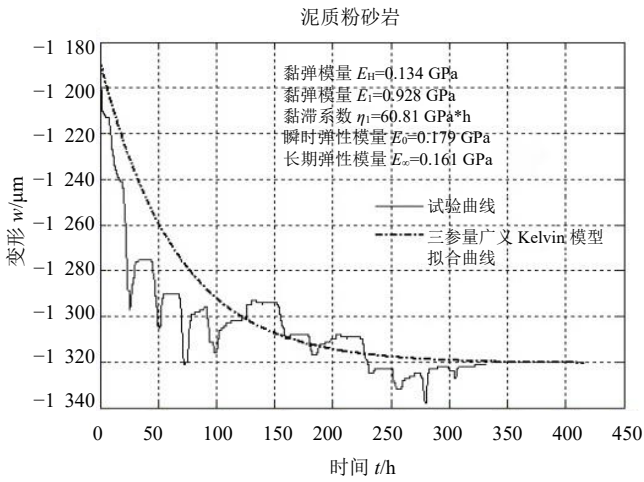
图 14 泥页岩蠕变试验曲线与蠕变方程拟合曲线

Fig. 14 Rheological test curve and fitting curve of mud shale

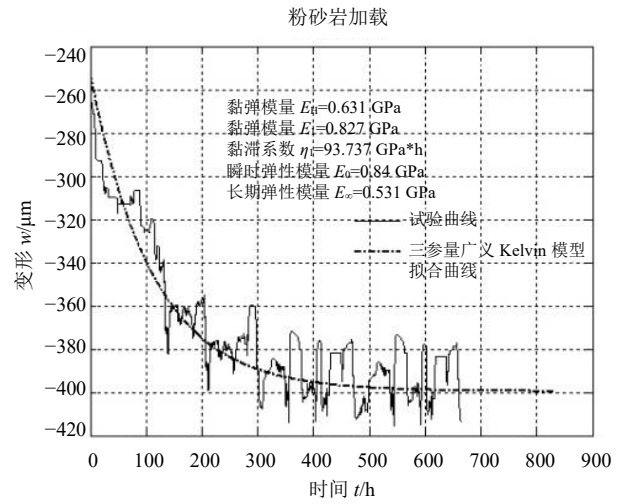
表 2 广义 Kelvin 流变模型参数及瞬时模量与长期模量

Table 2 Parameters of generalized Kelvin rheological model, instantaneous modulus and long-term modulus

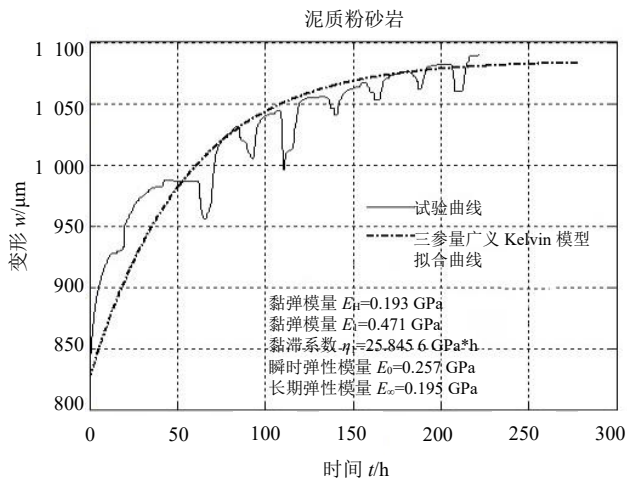
岩性	试验压力/ MPa	三参量广义 Kelvin 模型参数			瞬时模量 E_0 /GPa	长期模量 E_∞ /GPa
		E_H /GPa	E_1 /GPa	η_1 /(GPa·h)		
泥页岩	$\Delta\sigma=0.6$	0.06	0.70	14.07	0.082	0.077
		0.05	0.41	39.28	0.063	0.058
泥质粉砂岩	$\Delta\sigma=0.6$	0.13	0.93	60.81	0.180	0.160
	$\Delta\sigma=-0.6$	0.19	0.47	25.85	0.260	0.200
砂岩	$\Delta\sigma=1.2$	0.13	0.35	44.50	0.180	0.140
	$\Delta\sigma=0.6$	0.63	0.83	93.74	0.840	0.530
	$\Delta\sigma=-1.2$	0.43	1.24	96.52	0.580	0.460
		0.54	2.08	17.52	0.720	0.600



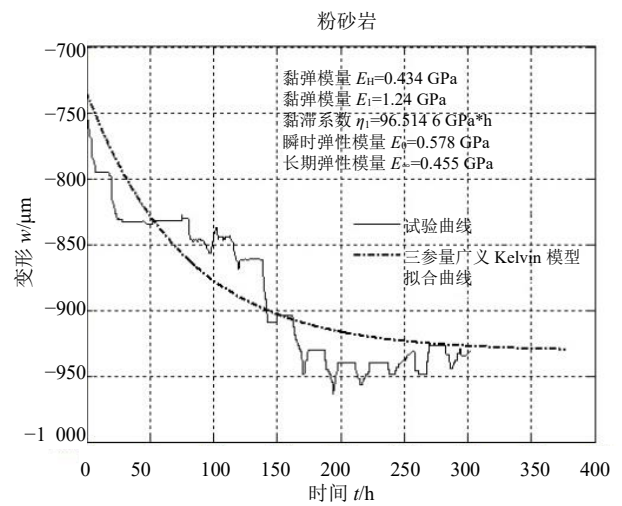
(a) $\Delta\sigma = 0.6 \text{ MPa}$



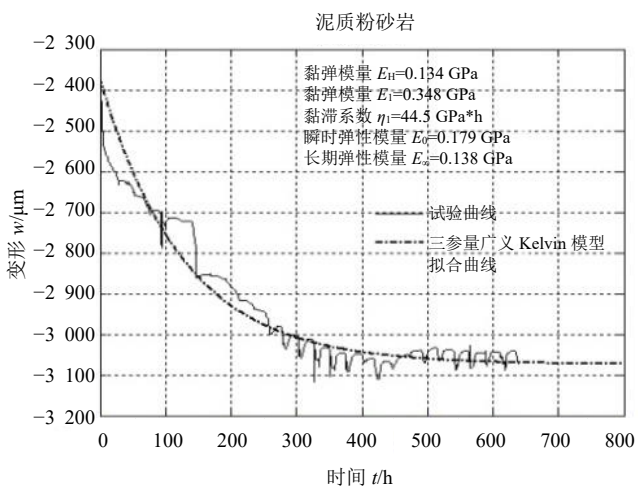
(a) $\Delta\sigma = 0.6 \text{ MPa}$



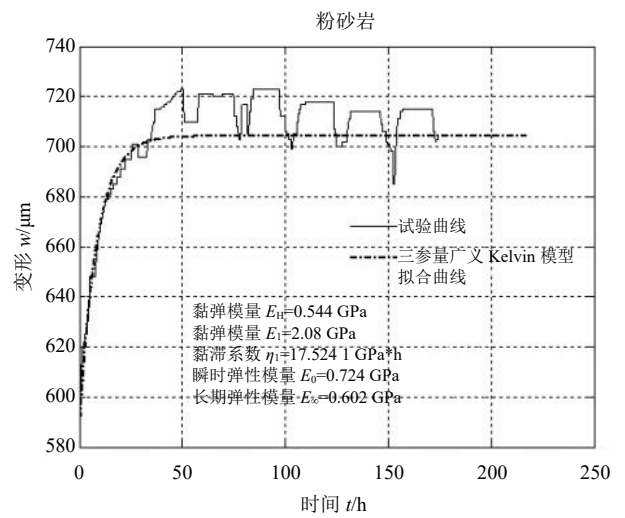
(b) $\Delta\sigma = -0.6 \text{ MPa}$



(b) $\Delta\sigma = 1.2 \text{ MPa}$



(c) $\Delta\sigma = 1.2 \text{ MPa}$



(c) $\Delta\sigma = -1.2 \text{ MPa}$

图 15 泥质粉砂岩蠕变试验曲线与蠕变方程拟合曲线
Fig. 15 Rheological test curve and fitting curve of argillaceous siltstone

图 16 砂岩蠕变试验曲线与蠕变方程拟合曲线
Fig. 16 Rheological test curve and fitting curve of sandstone

4 结 论

(1) 三种岩性在加载、卸载过程中都表现出一定的流变性, 恒载下呈衰减蠕变特征: 变形量随时间增长, 但变形速率逐渐减小并趋于零。

(2) 由于构成岩石矿物不同和岩石结构的差异, 在蠕变过程中表现为, 在低应力水平 (0.6 MPa) 荷载下, 泥质粉砂岩和泥页岩比砂岩达到变形稳定所需蠕变时间短; 在高应力水平 (1.2 MPa) 荷载下, 泥质粉砂岩比砂岩达到变形稳定所需蠕变时间长。

(3) 砂岩和泥质粉砂岩卸荷后, 都存在残余应变, 且残余应变随荷载的增大而增大。

(4) 在恒荷载下, 岩体含水率的变化对软岩泥页岩变形影响较明显, 但对泥质粉砂岩和砂岩的变形影响较小。

(5) 采用三参数广义 Kelvin 模型, 对流变试验曲线拟合, 拟合效果较好, 得出了地基岩体的各项流变参数。

参考文献

- [1] 王思敬, 杨志法, 傅冰骏. 中国岩石力学与岩石工程的世纪成就与展望[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集, 2004: 1-9.
WANG Si-jing, YANG Zhi-fa, FU Bing-jun. Century achievements and prospects of rock mechanics and rock engineering in China[C]//Collected Papers of the Eighth National Conference on Rock Mechanics and Engineering, 2004: 1-9.
- [2] GRIGGS D T. Creep of rocks[J]. Journal of Geology, 1939, 47: 225-251.
- [3] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106.
SUN Jun. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [4] 杨圣奇. 岩石流变力学特性的研究及其工程应用[D]. 南京: 河海大学, 2006.
YANG Sheng-qi. Research on rheological properties of rock and its engineering application[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [5] 李永盛. 单轴压缩条件下四种岩石的蠕变和松弛试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1995(1): 39-47.
LI Yong-sheng. Experimental research on creep and relaxation of four kinds of rocks under uniaxial compression[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995(1): 39-47.
- [6] OKUBO S, NISHIMATSU Y, FUKUI K. Complete creep curves under uniaxial compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1991, 28(1): 77-82.
- [7] 杨彩红, 王永岩, 李剑光, 等. 含水率对岩石蠕变规律影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 695-699.
YANG Cai-hong, WANG Yong-yan, LI Jian-guang, et al. Testing study about the effect of different water content on rock creep law[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 695-699.
- [8] 姜永东, 鲜学福, 熊德国, 等. 砂岩蠕变特性及蠕变力学模型研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1478-1481.
JIANG Yong-dong, XIAN Xue-fu, XIONG De-guo, et al. Study on creep behaviour of sandstone and its mechanical models[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1478-1481.
- [9] SUN J, HU Y Y. Time-dependent effects on the tensile strength of saturated granite at Three Gorges Project in China[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3/4): 306.
- [10] 来结合, 张忠亭, 罗居剑, 等. 锦屏水电站绿片岩蠕变特性研究[C]//第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集, 2004: 903-909.
LAI Jie-he, ZHANG Zhong-ting, LUO Ju-jian, et al. Creep characteristics of greenschist at Jinping hydropower station[C]//Collected Papers of the Eighth National Conference on Rock Mechanics and Engineering, 2004: 903-909.
- [11] MARANINI E, YAMAGUCHI T. A non-associated viscoelastic model for the behavior of granite in triaxial compression[J]. Mechanics of Materials, 2001, 33: 283-293.
- [12] 陈卫忠, 朱维申, 李术才. 节理岩体断裂损伤耦合的流变模型及其应用[J]. 水利学报, 1999(12): 33-37.
CHEN Wei-zhong, ZHU Wei-shen, LI Shu-cai. Rheology and fracture damage-coupled model for rock mass and its application[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(12): 33-37.
- [13] 万玲. 岩石类材料粘弹塑性损伤本构模型及其应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
WAN Ling. Viscoelastic-plastic damage constitutive model for rock materials and its application[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.

- [14] 杨振伟, 金爱兵, 周喻, 等. 伯格模型参数调试与岩石蠕变特性颗粒流分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 240-248.
YANG Zhen-wei, JIN Ai-bing, ZHOU Yu, et al. Parametric analysis of Burgers model and creep properties of rock with particle flow code[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 240-248.
- [15] 马珂, 宛新林, 贾伟风, 等. 岩石蠕变模型研究进展及若干问题探讨[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(10): 43-47.
MA Ke, WAN Xin-lin, JIA Wei-feng, et al. Advances in rock creep model research and discussion on some issues[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(10): 43-47.
- [16] 刘传孝, 黄东辰, 王龙, 等. 岩石蠕变破坏实验曲线的微观阶段特征研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S2): 219-223.
LIU Chuan-xiao, HUANG Dong-chen, WANG Long, et al. New recognition to microcosmic cracks' properties evolving with different creep phases of rock mechanical testing curves[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 219-223.
- [17] 夏才初. 统一流变力学模型及用蠕变试验辨识流变力学模型的方法[G]//盛世岁月——祝贺孙钧院士八秩华诞论文选集. 上海: 同济大学出版社, 2006: 505-516.
XIA Cai-chu. Unifying rheological mechanics model and identifying rheological mechanics model by creep test[G]//Anthology About Congratulations on Academician Sun Jun's 80th Birthday. Shanghai: Tongji University Publish House, 2006: 505-516.
- [18] 熊诗湖, 周火明, 钟作武. 岩体载荷蠕变试验方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2121-2127.
XIONG Shi-hu, ZHOU Huo-ming, ZHONG Zuo-wu. Study of methodology of plate-loading creep test of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 2121-2127.

【简讯】

2022年第六届国际土木和建筑材料会议 (ICCBM 2022)

2022年第六届国际土木和建筑材料会议 (ICCBM 2022) 将于2022年1月21—24日在三亚举行。

ICCBM 2022 由美国科学工程学会、澳大利亚斯威本科技大学、沙特阿拉伯阿尔法萨尔大学、韩国根特大学全球校区、日本东京大学等共同组织举办。

会议文章出版:

投稿的论文将经过同行评审, 接收论文将会提交 Key Engineering Materials (ISSN 1662-9795) 出版, 出版的论文集将被提交到 EI Compendex, Scopus 和 Thomson Reuters, Inspec 等知名学术数据

库中进行检索。

过往论文集均已被 EI Compendex, Scopus 成功检索。更多详情, 请登陆会议官方网站: <http://iccbm.org/>

征稿说明:

征稿主题请参考: <http://iccbm.org/cfp.html>

投稿方式:

将文章上传到会议投稿系统

<http://confsys.iconf.org/submission/iccbm2022>

联系人:

会议秘书: 林老师

邮箱: iccbm@sciei.org

电话和微信: +86-18207777775