

文章编号:0253-9993(2010)09-1451-05

# 堆石体 $K_0$ 状态单向压缩流变实验研究

石修松,左永振,张婷,王路君

(长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室,湖北 武汉 430010)

**摘要:**对两种堆石体进行了大型叠环式压缩蠕变试验,发现堆石体的应力-应变等时曲线具有明显的阶段性,当应力较低( $0 < \sigma < 0.4$  MPa)时,应力-应变等时关系接近于线性;当应力较高( $\sigma > 0.4$  MPa)时,应力-应变等时关系呈现非线性,其非线性程度随着应力的增加和时间的延续而增强。根据堆石体应力-应变等时曲线的特性,对低应力段采用线性函数拟合,高应力段采用双曲线拟合。用实验得到的应力-应变关系代替 Singh-Mitchell 模型的应力-应变关系,保留模型原有的应变-时间关系描述堆石体的压缩流变特性,在此基础上,建立了堆石体  $K_0$  状态的非线性压缩流变模型,求出了两种堆石体的模型参数。反演分析表明,该模型基本可以描述堆石体  $K_0$  状态的流变行为。

**关键词:**堆石体;压缩试验;等时曲线;流变;Singh-Mitchell 模型

**中图分类号:**TU452 **文献标志码:**A

## Experimental study of unidirectional compression creep in $K_0$ state for rockfill material

SHI Xiu-song, ZUO Yong-zhen, ZHANG Ting, WANG Lu-jun

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Ministry of Water Resources, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Gave two groups of stacked-ring compression creep test of two different rockfill materials. The results show that the isochronous stress-strain curve shows a clear phase. When the stress is low ( $0 < \sigma < 0.4$  MPa) the relationship of stress-strain is close to linear. While the stress increases to 0.4 MPa, the nonlinear relation appears and its nonlinearity increase with the stress. Based on features of stress-strain curves, used linear function to segment of low stress and hyperbolic function to segment of high stress. The stress-strain relationship of Singh-Mitchell model is substituted by stress-strain function obtained in compression creep test. The strain-time relationship of Singh-Mitchell model is reserved to describe coarse grained material's creep characteristic. Then established nonlinear creep model in  $K_0$  state and the creep parameters of rockfill used in the test were obtained. Back analysis indicates that this model can mainly describe the creep characteristic of those two rockfill material in  $K_0$  state.

**Key words:** rockfill material; compression test; isochronous curve; creep; Singh-Mitchell model

随着煤矿绿色开采技术<sup>[1-2]</sup>的提出,利用松散岩体充填采空区成为控制覆岩变形的有效手段。近年来,由于煤炭资源开采深度增加,深部围岩呈现来压快、围岩应力高、上覆岩层变形大等特点<sup>[3-4]</sup>。如果充填体的后期变形过大,上覆岩层会产生较大的拉应力,且其分布区域有可能扩展,从而引起整个顶板的破裂及失稳。以图1所示的巷式开采为例,煤柱与矸石两两相隔,充填体处于侧限压缩状态<sup>[5]</sup>,此外,传统的房柱式开采中充填体的受力也接近于侧限压缩

状态。因而研究侧限压缩状态下充填体的蠕变行为具有重要的现实意义。

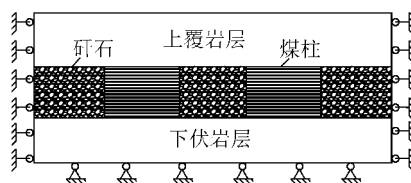


图1 巷采的地质剖面

Fig. 1 Geological profile of roadway mining

许多学者对土石坝坝基的后期变形问题<sup>[6-8]</sup>、路基的蠕变沉降<sup>[9]</sup>等问题进行了大量室内试验研究和原型观测,并在此基础上提出了各自的蠕变模型。同时,越来越多的学者已经认识到,堆石体的应力-应变关系不只与时间有关,还与其所处的应力状态有关,其流变性呈非线性特征。Singh 和 Mitchell<sup>[10]</sup>考虑了土体的非线性流变特性,总结了关于土体蠕变的研究成果,提出 Singh-Mitchell 蠕变速率方程,在此基础上建立了应力-应变-时间关系。Mesri<sup>[11]</sup>采用成熟的双曲线型应力-应变硬化模型描述散体的弹塑性性质。Burland<sup>[12]</sup>提出了瞬时压密和迟滞压密的概念,建立了荷载-变形-时间的关系。本文根据两组大型室内压缩蠕变试验,由试验所得的应力-应变等时曲线,建立应力-变等时关系,结合 Singh-Mitchell 蠕变速率方程建立堆石体的压缩蠕变模型。

## 1 Singh-Mitchell 蠕变方程

Singh 和 Mitchell 总结了关于土体蠕变的研究成果,并在此基础上提出了至今仍被应用的 3 参数应力-应变-时间关系方程,在此基础上建立了 3 参数的应力-应变-时间关系。

Singh 和 Mitchell 通过大量的研究成果发现:应变速率对数和时间对数的关系是线性的,即在 0.2 ~ 0.8 土体剪应力水平范围内的应变速率对数随时间对数呈线性减小,而且这种线性关系的斜率与剪应力水平是无关的。由此提出了蠕变速率方程<sup>[10,13]</sup>为  $\dot{\varepsilon} = Ae^{\gamma S} (t_1/t)^m$ , 其中,  $\dot{\varepsilon}$  为任意  $t$  时刻的应变速率;  $A, \gamma, m$  均为常量;  $e^{\gamma S}$  反映应力-应变之间的非线性关系;  $S$  为反映应力水平的量,对于本文的压缩试验,  $S = \sigma$  ( $\sigma$  为轴向应力);  $t_1$  为参考时间。

对蠕变速率方程积分可得

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon_1 + \frac{At_1}{1-m} e^{\gamma\sigma} [(t/t_1)^{1-m} - 1] & (m \neq 1) \\ \varepsilon_1 + Ae^{\gamma\sigma} \ln t & (m = 1, t > 1) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)即为 Singh-Mitchell 蠕变方程。由式(1)可知:当  $m \neq 1$  时,其应力-应变关系采用指数函数,应变-时间关系采用幂次形式;当  $m = 1$  时,其应力-应变关系仍为指数函数,应变-时间关系为对数函数形式。应变取决于  $\sigma$  和  $t$ ,对给定的  $\sigma$  值,当  $m < 1$  时,  $\varepsilon$  随  $t$  单调增加;当  $m = 1$  时,  $\varepsilon$  与  $\ln t$  成正比;当  $m > 1$  时,应变  $\varepsilon$  逐渐减小。时间  $t$  一定时,式(1)简化为指数型应力-应变硬化模型,其应力-应变关系采用指数函数拟合,这对堆石体是不适用的。尽管如

此,其应变-时间关系的幂次形式却是值得借鉴的,由本文的实验成果可知,堆石体在  $\ln \varepsilon - \ln t$  坐标系中呈现良好的线性关系。

## 2 堆石体的压缩蠕变试验及成果分析

### 2.1 叠环式压缩蠕变试验

$K_0$  状态单向压缩流变试验采用 DH500 型叠环式固结渗透仪,如图 2 所示,该仪器由液压加载系统、加压控制系统、反力框架叠环式固结仪、渗流试验水头及流量测量系统、竖向压力稳压储能器和数据采集系统组成。其特有的叠环式装置可以使侧壁与试样保持同步变形,因而能够较大限度的克服试样与侧壁间的摩擦力,以保证压缩流变实验的准确度。



图 2 DH500 型叠环式固结渗透仪

Fig. 2 Consolidation-permeameter of DH500 type

试验用料为两种不同的堆石料,简称为 FS 堆石料和 HK 堆石料,两者采用相同的级配,如图 3 所示。FS 堆石料选用花岗岩,其最大干密度为  $2.187 \text{ t/m}^3$ ,最优含水率 5%,按压实度为 0.95 制样;HK 堆石料选用变质岩,最大干密度  $2.273 \text{ t/m}^3$ ,最优含水率 6%,按压实度为 0.95 制样。为了避免温度变化对试验成果的影响,试验过程中温度控制在  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  左右。

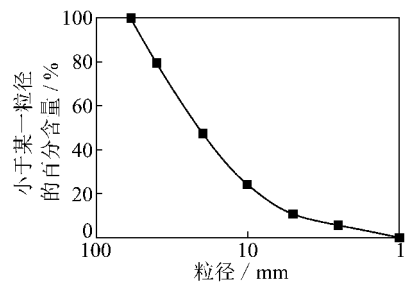


图 3 堆石料实验级配曲线

Fig. 3 Experimental graded curve of rockfill

由图 3 可知,堆石体的细料 ( $d < 5 \text{ mm}$ ) 含量约为 10%,大量工程实践表明,粗粒土中细料的含量对其工程特性有重要影响。一般堆石体的强度都是由 3 部分组成的,即细料本身的强度、粗料间的强度和粗细料间的强度。细料含量 30% 和 70% 为两个特征

点,自然地将堆石体性质不同的三大类,在每一类堆石中细料含量的变化会对强度和变形特性产生不同的影响。本文所用的堆石料中细料的含量较低,堆石体的强度和变形特性主要由粗料间的强度决定。

大型叠环式流变试验分两组进行,分别对应 FS 堆石料和 HK 堆石料。对第 1 组试验:分别按  $\sigma = 0.1、0.2、0.4、0.8、1.6、3.2$  MPa 施加竖向荷载,在恒定的应力状态下稳定若干时间(1 ~ 8 d),记录不同时刻试样变形,直至变形基本稳定为止。第 2 组为平行试验,分别按  $\sigma = 0.2、0.4、0.8、1.6$  MPa 施加竖向荷载。将试验得到的应变-时间关系绘在双对数坐标轴上,如图 4 所示。

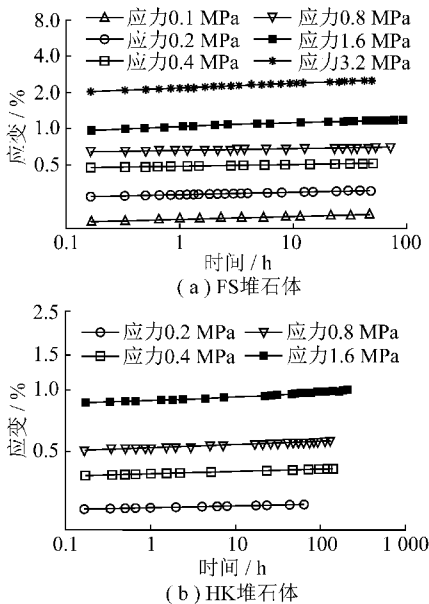


图 4 堆石体双对数坐标系下流变-时间关系曲线  
Fig. 4 The relationship between creep and time of rockfill material in log-log coordinate

由图 4 可知:应变与时间在  $\ln \varepsilon - \ln t$  坐标系中呈现良好的线性关系,并且在不同应力水平下的  $\ln \varepsilon - \ln t$  关系几乎是相互平行的直线,即不同应力状态下的应变均与时间成幂次形式,因此 Singh-Mitchell 蠕变速率方程的应变-时间关系是值得借鉴的。

### 2.2 应力-应变等时关系

Singh-Mitchell 蠕变速率方程的应变-时间关系对堆石体是适用的,下面将研究堆石体的等时应力-应变关系。图 5 为两组堆石料压缩蠕变试验对应的应力-应变等时曲线。

由图 5 可知,不同时间的应力-应变等时曲线较为相似,本次试验得到的应力-应变等时关系具有明显的阶段性,当应力较低 ( $0 < \sigma < 0.4$  MPa) 时,应力-应变关系接近于线性;当应力较高 ( $\sigma > 0.4$  MPa) 时,应力-应变等时关系呈现非线性,说明本次实验堆石

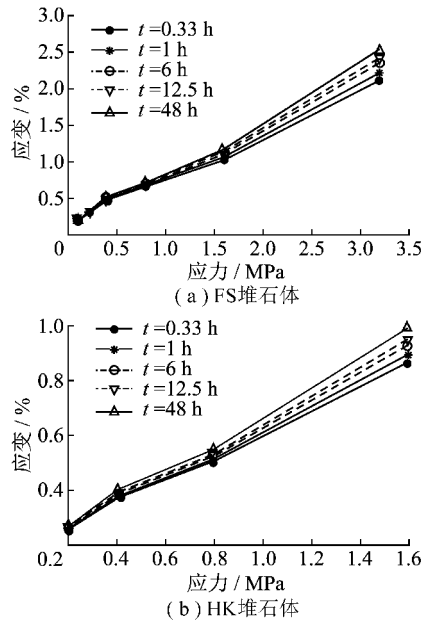


图 5 堆石体的应力-应变关系等时曲线  
Fig. 5 Isochronous stress-strain curves of rockfill material

料非线性的程度随应力的增加而增强;除此之外,随着时间的延续,堆石体应力-应变的非线性程度也是增加的。笔者认为,这是由堆石体的结构变化引起的,当应力较小时,堆石体处于较均匀的状态,类似于弹簧的特性,因而其表现出的流变特性近似于线性;当应力较大或随着时间的延续,堆石体变形不断增加时,颗粒的破碎加剧,堆石体的结构受到破坏,其应力-应变等时曲线开始呈现非线性特征。

根据堆石料应力-应变等时曲线的特性,采用分段函数对其进行拟合。对低应力段 ( $0 < \sigma < 0.4$  MPa) 采用线性函数拟合,高应力段采用双曲线拟合。拟合关系可表述成式(2)所示的形式,图 6 为堆石料的应力-应变等时关系的分段拟合结果。

$$\varepsilon = \begin{cases} a + b\sigma & (0 < \sigma \leq \sigma_p) \\ \frac{c(\sigma - \sigma_p)}{[1 - d(\sigma - \sigma_p)]} + \varepsilon_p & (\sigma_p < \sigma) \end{cases} \quad (2)$$

( $\sigma_p, \varepsilon_p$ ) 为线性段与非线性段的分界点,对本文的两种堆石料,可取  $\sigma_p = 0.4$  MPa,其他拟合参数的取值见表 1(鉴于篇幅,仅得出  $t = 1$  和  $t = 6$  的结果)。

表 1 堆石体的应力-应变等时曲线的拟合参数

Table 1 Fitting parameters of isochronous stress-strain curves of rockfill material

拟合参数	FS 堆石料		HK 堆石料	
	$t = 1$	$t = 6$	$t = 1$	$t = 6$
$a$	0.080 0	0.081 8	0.135 0	0.141 1
$b$	1.037 6	1.067 1	0.623 0	0.622 0
$c$	0.403 3	0.418 7	0.292 6	0.310 0
$d$	0.121 4	0.129 7	0.261 0	0.261 4

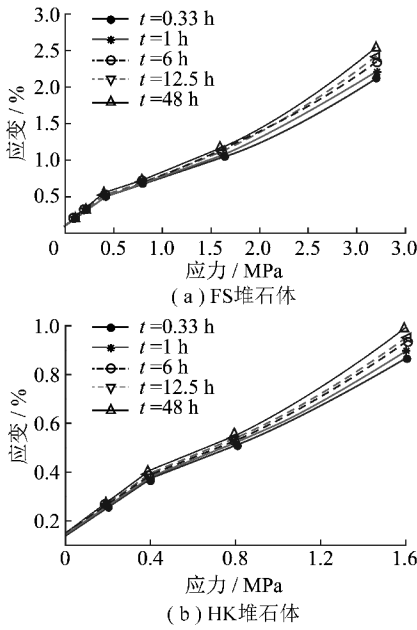


图 6 堆石体的应力-应变等时关系的分段拟合结果  
Fig. 6 Sub-fitting results of isochronous stress-strain relation of rockfill material

由图 6 可知,式(2)所示的拟合函数可以很好的描述试验得到的堆石料的应力-应变等时关系。

### 3 堆石体的压缩蠕变模型

将式(2)得到的应力-应变等时函数关系代替式(1)的应力-应变关系,同时保留 Singh-Mitchell 蠕变方程的应变时间关系,在此基础上建立堆石体压缩蠕变的非线性模型。将两组试验  $\ln \varepsilon - \ln t$  坐标系中的数据点用直线拟合,应力分别为 0.1、0.2、0.4、0.8、1.6、3.2 MPa 时,FS 堆石料的直线斜率分别为 0.013 1、0.016 6、0.017 8、0.023 4、0.021 4、0.030 1;HK 堆石料的直线斜率分别为 0.009 0(0.2 MPa)、0.011 3(0.4 MPa)、0.014 3(0.8 MPa)、0.021 0(1.6 MPa)。

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \frac{At_1}{1-m} e^{\gamma\sigma} [(t/t_1)^{1-m} - 1] \quad (3)$$

令  $\varepsilon_0 = \varepsilon_1 - At_1/(1-m)e^{\gamma\sigma}$ ,  $\varepsilon_0$  可理解为瞬时弹塑性应变,若取  $\varepsilon_0 = 0$ ,则式(3)将变为更简单的形式,即

$$\varepsilon = \alpha e^{\gamma\sigma} (t/t_1)^\beta \quad (4)$$

其中,  $\alpha = At_1/(1-m)$ ;  $\beta = 1 - m$ 。试验资料表明,式(4)可以描述诸多土类的蠕变行为<sup>[14-16]</sup>。

式(2)得到的应力-应变等时函数关系代替式(4)的应力-应变关系可得

$$\varepsilon = \begin{cases} (A + B\sigma)(t/t_1)^\beta & (0 < \sigma \leq \sigma_p) \\ \frac{C(\sigma - \sigma_p)}{[1 - D(\sigma - \sigma_p)]} (t/t_1)^\beta + \varepsilon_p & (\sigma_p < \sigma) \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $A = \alpha a, B = \alpha b, C = \alpha c$  均为常量参数;  $t_1$  一般取 1 h;  $\beta$  反映应变速率的大小,由不同应力下拟合直线斜率的数据可知,  $\beta$  是与应力状态有关的模型参数,两者大致呈式(6)所示的对数关系,即

$$\beta = \eta \ln \sigma + k \quad (6)$$

图 7 为  $\beta$  与应力  $\sigma$  的对数曲线拟合结果,可见,对数拟合曲线基本可以反映两者之间的关系,拟合系数见表 2。至此,式(5)、(6)完整的给出了堆石体非线性压缩蠕变模型的基本形式,该模型中共有 8 个参数:  $A、B、C、D、\eta、k、\sigma_p、\varepsilon_p$ 。若取参考时间  $t_1 = 1$  h,则模型具体数值见表 2。

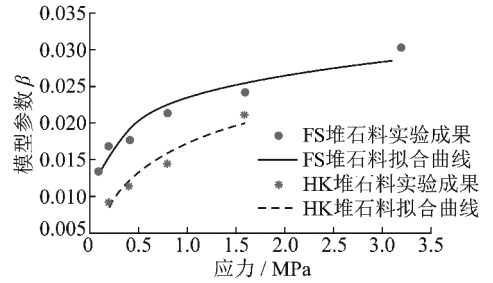


图 7 模型参数  $\beta$  与应力  $\sigma$  的关系曲线  
Fig. 7 Curves between parameter  $\beta$  of model and stress  $\sigma$

表 2 堆石体  $K_0$  状态非线性压缩蠕变模型参数  
Table 2 Parameter values of compression creep model of rockfill material

模型参数	FS 堆石料	HK 堆石料
$A$	0.080 0	0.135 0
$B$	1.037 6	0.623 0
$C$	0.403 3	0.292 6
$D$	0.121 4	0.261 0
$\eta$	0.004 6	0.005 6
$k$	0.023 1	0.017 1
$\sigma_p/\text{MPa}$	0.400 0	0.400 0
$\varepsilon_p$	0.449 3	0.384 2

由表 2 中的模型参数反演压缩蠕变曲线,在  $\ln \varepsilon - \ln t$  坐标系下绘出计算值与实验值的曲线(图 8)。由图 8 可知,本文建立的堆石体非线性压缩蠕变模型是可靠的,在建立模型的过程中已经给出了模型参数的求解方法和具体数值,其中  $(\sigma_p, \varepsilon_p)$  为应力-应变等时曲线线性段与非线性段的分界点,可通过对应应力-应变等时曲线的直接观察得出;  $\eta、k$  可由不同应力下应变-时间数据  $\ln \varepsilon - \ln t$  坐标系中的拟合直线的斜率得到;  $A、B、C、D$  可通过  $t = t_1$  时的应力-应变等时曲线拟合求得。

### 4 结 论

(1) 堆石体的应力-应变等时曲线具有明显的阶

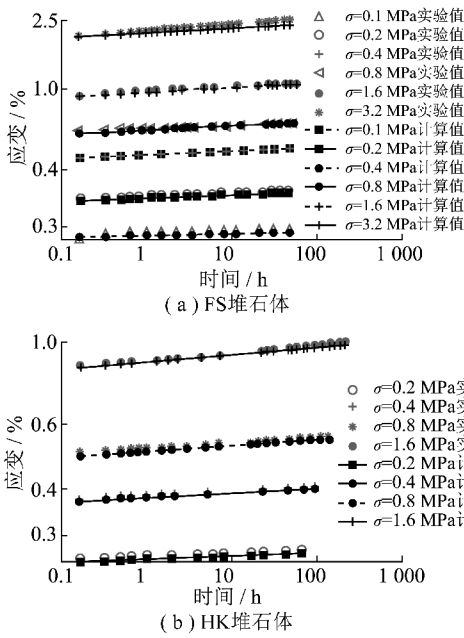


图8 堆石体的计算值与试验数据在双对数坐标系下的比较  
Fig. 8 Comparison of rockfill materials between calculated values and experimental data in log-log coordinate

段性,当应力较低( $0 < \sigma < 0.4$  MPa)时,应力-应变关系接近于线性;当应力较高( $\sigma > 0.4$  MPa)时,应力-应变等时关系呈现非线性,其非线性程度随着应力的增加和时间的延续而增强。

(2)根据堆石体应力-应变等时曲线特性,采用分段函数进行拟合。对低应力段( $0 < \sigma < 0.4$  MPa)采用线性函数拟合,高应力段采用双曲线拟合,由此得到了本次试验的应力-应变等时函数关系。

(3)用实验得到的应力-应变关系代替 Singh-Mitchell 模型的应力-应变关系,采用模型原有的应变-时间关系描述堆石料的压缩蠕变特性,在此基础上建立了堆石体  $K_0$  状态的非线性压缩蠕变模型。

(4)用本文建议的非线性压缩蠕变模型求出了两种堆石体的模型参数,参数的求取过程简单,物理意义明确,反演曲线与试验结果也较为吻合。

参考文献:

[1] 缪协兴,钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报,2009,26(1):1-14.  
Miao Xiexing, Qian Minggao. Research on green mining of coal resources in China: current status and prospects[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 1-14.

[2] 钱鸣高,许家林,缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报,2003,32(4):343-348.  
Qian Minggao, Xu Jialin, Miao Xiexing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 343-348.

[3] 马占国,兰天,潘银光,等. 饱和破碎泥岩蠕变过程中孔隙变

化规律的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(7): 1 447-1 454.

Ma Zhanguo, Lan Tian, Pan Yinguang, et al. Experimental study of variation law of saturated broken mudstone porosity during creep process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(7): 1 447-1 454.

[4] 邓喀中,张冬至,张周权. 深部开采条件下地表沉陷预测及控制探讨[J]. 中国矿业大学学报,2000,29(1):52-55.  
Deng Kazhong, Zhang Dongzhi, Zhang Zhouquan. Study on prediction and control of surface subsidence in deep mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1): 52-55.

[5] 石修松,马占国,潘银光. 巷式开采控制覆岩变形的力学分析[J]. 地下空间与工程学报,2010,6(1):8-13.  
Shi Xiulong, Ma Zhanguo, Pan Yinguang. Mechanical analysis of controlling covering rock deformation in roadway mining[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 8-13.

[6] 梁军. 高面板堆石坝流变特性研究[D]. 南京:河海大学,2003.

[7] 程展林,丁红顺. 堆石料蠕变特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(4):473-476.  
Cheng Zhanlin, Ding Hongshun. Creep test for rock fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 473-476.

[8] 沈凤生,陈慧远,潘家铮. 混凝土面板堆石坝的蓄水变形分析[J]. 岩土工程学报,1990,12(1):74-81.  
Shen Fengsheng, Chen Huiyuan, Pan Jiazheng. Deformation analysis for concrete faced rockfill dam during reservoir filling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(1): 74-81.

[9] 孙吉主,王勇. 考虑损伤和流变的软土路基变形分析[J]. 武汉理工大学学报,2006,28(4):75-78.  
Sun Jizhu, Wang Yong. Analysis of deformation of soft ground considering damage and creep[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(4): 75-78.

[10] Singh A, Mitchell J K. General stress-strain-time function for soils[J]. J. of Soil Mech. Found. Div. ASCE., 1968, 94(1): 21-46.

[11] Mesri G, Febres-Cordero E, Shields D R, et al. Shear stress-strain-time behavior of clays[J]. Geotechnique, 1981, 31(4): 537-552.

[12] Burland J B. On the compressibility and shear strength of natural clays[J]. Geotechnique, 1990, 40(3): 329-378.

[13] 沈珠江. 理论土力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.

[14] 李军世,林咏梅. 上海淤泥质粉质粘土的 Singh-Mitchell 蠕变模型[J]. 岩石力学,2000,21(4):363-366.  
Li Junshi, Lin Yongmei. Singh-Mitchell creep model of Shanghai very soft silt clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(4): 363-366.

[15] 李军世,孙钧. 上海淤泥质粘土的 Mesri 蠕变模型[J]. 土木工程学报,2001,34(6):74-79.  
Li Junshi, Sun Jun. Mesri's creep model for Shanghai silt-clay[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(6): 74-79.

[16] 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 Changming, Wang Qing, Zhang Shuhua. Creep characteristics and creep model of marine soft soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(2): 227-230.