

# 变强度参数蠕变模型研究

何利军<sup>1,2,3</sup>, 张 涛<sup>1</sup>, 胡颖萍<sup>1</sup>

(1. 南昌航空大学土木建筑学院, 南昌 330063; 2. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 南宁 530004;  
3. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004)

**摘 要:** 为了解决非线性蠕变模型的参数取值问题, 需要把握参数变化规律, 提出了 FLAC3D 的 Cvisc 模型中关于强度参数随蠕变时间变化的 FISH 语言编写形式, 探讨了黏聚力与内摩擦角不同的变化情形对加速蠕变变形的影响规律, 得出了湛江黏土在高偏应力条件下的蠕变变形过程中, 强度参数以黏聚力减小或先有所增大后减小为主的初步结论.

**关键词:** 加速蠕变; 变强度参数; 湛江黏土

**中图分类号:** TU 433

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0254-0037(2018)03-0327-09

**doi:** 10.11936/bjntxb2017070026

## Study on Creep Model of Variable Strength Parameters

HE Lijun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, HU Yingping<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;  
2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety of Guangxi, Nanning 530004, China;  
3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of China Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of parameter selection of nonlinear creep model, it is necessary to grasp the change of parameters. The FISH language of that the variation of intensity parameters with creep time in Cvisc model of FLAC3D was proposed. The influence of different cohesion and internal friction angle on the deformation of accelerated creep was discussed, and a preliminary conclusion was drawn that the strength parameters of Zhanjiang clay were reduced or first increased and then decreased under creep of the condition of high deviatoric stress. It shows that the research contributes to exploring the law of accelerating creep, and has important theoretical significance and practical reference value for the correct simulation of creep phenomenon.

**Key words:** accelerated creep; variable strength parameters; Zhanjiang clay

对蠕变模型的研究由来已久,近5年来,赵延林等<sup>[1]</sup>提出岩石黏弹塑性应变分离的蠕变试验方法和数据处理技巧.在FLAC3D中实现BNMC蠕变损伤本构模型的二次开发,提出该模型参数的辨识方法.王军保等<sup>[2]</sup>通过将表征应力水平对岩石非线性

蠕变特性影响的函数引入到常规分数阶黏滞体的本构关系中,提出一种改进的分数阶黏滞体,能够描述岩石加速蠕变变形.杨振伟等<sup>[3]</sup>基于三维颗粒程序(PFC3D),采用Burgers流变模型,分析了伯格斯模型中的参数对瞬时强度特性和流变特性的影响.

收稿日期: 2017-07-17

基金项目: 南昌航空大学博士启动资助项目(EA2012111000); 广西防灾减灾与工程安全重点实验室开放课题资助项目(2016ZDK013); 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室开放课题资助项目(2016ZDK013)

作者简介: 何利军(1977—),男,讲师,主要从事土力学基本理论与数值模拟的研究, E-mail:70457@nchu.edu.cn

杨红伟等<sup>[4]</sup>以细粒砂岩为研究对象,对三轴压缩条件下岩石孔隙水压力分级加载蠕变试验进行了蠕变特性及模型研究.王军保等<sup>[5]</sup>基于损伤力学理论,通过引入 Kachanov 蠕变损伤演化规律,构建了可反映岩石加载瞬时变形和加速蠕变的考虑时效损伤的弹性体元件,建立了一个新的 2 元件非线性蠕变损伤模型及其蠕变方程.康永刚等<sup>[6]</sup>提出用非牛顿黏壶代替 Kelvin 模型中的牛顿黏壶,串联用一种非定常、非牛顿黏壶和塑性体并联为黏塑性体,黏塑性体关闭时,所得蠕变函数可以描述衰减蠕变和稳态蠕变.黏塑性体开启时,蠕变函数可以描述加速蠕变变形.蒋海飞等<sup>[7]</sup>采用幂函数、对数函数混合方程对加速蠕变段进行拟合,再通过类比的方法提出一个新的非线性黏性元件,并将其与塑性体并联,得到一个可以反映岩石加速蠕变特性的非线性黏塑性模型,将该模型与 Burgers 模型串联,构建一个新的六元件非线性黏弹塑性蠕变模型.此外,还提出过一个能反映不同孔隙水压作用下加速蠕变特征的二元件黏塑性蠕变模型<sup>[8]</sup>,将该模型与修正的广义 Kelvin 模型串联组成一个新的改进西原模型.范翔宇等<sup>[9]</sup>利用饱依丁-汤姆逊体与宾汉姆体,建立储气层煤岩蠕变模型.刘浪等<sup>[10]</sup>分析深部岩石在饱水情况下的流变规律,并基于统一流变力学模型,对深部饱水岩石的流变模型进行辨识,确定流变模型的相关参数.乔丽莘等<sup>[11]</sup>提出采用不可恢复应变作为内变量来描述复杂条件下岩石蠕变性质,并据此提出了岩石的内变量蠕变模型.宋勇军等<sup>[12]</sup>将含分数阶导数的软体元件与虎克体串联,引入能反映应力水平和时间影响的损伤变量,提出一种四元件非线性蠕变损伤模型.并借鉴经典元件模型的建模思路<sup>[13]</sup>,将岩石的初始屈服强度作为蠕变硬化的应力阈值,岩石的长期强度作为损伤软化的应力阈值,引入能反映岩石硬化效应的硬化函数和损伤效应的损伤变量,建立能够全面反映蠕变机制的岩石非线性蠕变模型.高赛红等<sup>[14]</sup>基于蠕变过程中的硬化-损伤机制,对高应力条件下衰减蠕变阶段的黏滞系数(硬化黏滞系数)进行修正,结合定常蠕变阶段的损伤蠕变机制,提出高应力条件下岩石损伤效应的累积-扩散机理,并据此引入以累积损伤蠕变量为判定准则的加速蠕变触发模型(非线性蠕变体)描述岩石的不稳定蠕变特征.在此基础上,引入瞬时塑性元件,与虎克体和黏弹塑性体串联,建立了一个能够完整描述岩石蠕变全过程的非线性黏弹塑性蠕变模型.

与本文有直接联系的论文成果有:杨圣奇等<sup>[15]</sup>基于在岩石剪切流变仪上得到的泥板岩剪切流变试验结果,采用库仑强度准则获得了岩石长期强度参数(长期黏聚力和长期内摩擦系数),与瞬时强度参数进行对比,结果表明,岩石黏聚力对时间的敏感程度高于内摩擦系数对时间的敏感程度,提出了一个考虑黏聚力和内摩擦系数随时间变化的塑性元件,将其与线性黏性元件并联起来,得到一个新的考虑黏聚力和内摩擦系数的非线性黏塑性体(CF-NVPB),同时,将 CF-NVPB 模型与三元件线性黏弹性流变模型串联起来,建立了一个新的考虑黏聚力和内摩擦系数的岩石非线性黏弹塑性流变模型,并推导了该非线性流变模型的蠕变方程与松弛方程.余成学等<sup>[16]</sup>在西原模型的基础上,研究建立了一种新的岩石非线性蠕变模型.首先,在分析岩石宏、微观蠕变过程的基础上,提出了蠕变参数变化率概念;以此为基础,统一建立了等速蠕变和加速蠕变阶段的岩石蠕变参数变化公式.然后,利用该非线性蠕变参数以及根据岩石的屈服软化过程,以西原模型为基础,建立了岩石的非线性弹-黏弹-黏塑性蠕变模型.最后,将单轴压缩蠕变试验结果与数值计算结果对比,验证了模型对于描述岩石全过程蠕变变形破坏的正确性.

通常认为岩石强度伴随着结构破损,即塑性剪切应变的增加而降低,与塑性剪应变或时间有关,相对于岩石而言,特殊土的力学性质更为复杂、强度敏感性更强,强度伴随时间的变化规律更复杂,即使没有塑性剪切应变发生,原状土受到扰动,强度也会发生先减后增的变化,探讨特殊土的关于变参数蠕变模型的具体形式及应用方式的论文成果有:

孔令伟等<sup>[17]</sup>基于湛江黏土的蠕变变形在低偏应力下较小,其蠕变等时曲线没有明显的屈服特征而近似为直线,表现为线性蠕变性状;当偏应力达到某一临界值后,在短时间内发展到加速蠕变阶段并发生破坏.从湛江黏土蠕变各阶段的变形机制出发,通过引入服从 Mohr-Coulomb 塑性流动规律的变参数塑性元件,将该塑性元件与广义 Kelvin 模型串联,提出描述蠕变全过程的黏弹塑性模型.同时将该模型在 FLAC3D 中进行二次开发,与 FLAC3D 中自带的 Cvisc 模型进行对比验证,结果表明,基于变参数塑性元件的黏弹塑性模型能较好地描述湛江黏土各个蠕变阶段的变形性状.

为了尽可能准确描述湛江黏土蠕变全过程,并试图从土工材料流变学角度能够给出合理解释<sup>[18]</sup>,

需要引入塑性元件,塑性元件服从的强度准则有很多种,这里还是采用 FLAC3D 描述土体常用的 Mohr-Coulomb 塑性元件. 传统塑性元件又称为摩阻元件,其是一个线性元件. 当施加的应力大于该元件的摩阻力时,元件将随时间产生持续增加的变形,一旦外力卸去,已发生的变形也不会恢复,成为永久应变. 然而,由莫尔-库伦强度理论,土体的塑性发生通常与土体的黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  两个强度参数有关. 本文提出变强度参数蠕变模型应用于湛江黏土,探讨强度参数  $c$  和  $\varphi$  的变化对土体加速蠕变阶段的影响,试图得到一些基本规律为实际工程建设提供一些建议和参考.

本文的研究对于完善非线性蠕变模型理论,促进与推动关于能描述加速蠕变阶段的蠕变全过程理论模型的构建,具有重要的意义和价值.

### 1 Cvisc 模型

Cvisc 模型是由传统经典 Burger 模型和一个塑性元件串联而成,见图 1,使得该本构模型能够描述材料的弹性、黏性、黏弹及塑性变形. 当施加的应力  $\sigma < \sigma_s$  时,只会产生前 3 部分变形,不包含塑性变形;若  $\sigma > \sigma_s$  时,则包含全部形式的变形,此时  $\sigma_s$  称为屈服应力. 在 FLAC3D 中,该塑性元件满足莫尔-库伦强度准则.

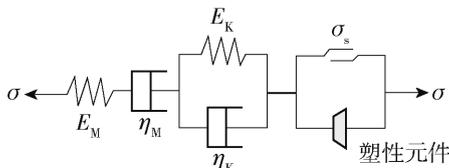


图1 Cvisc 模型

Fig.1 Cvisc model

Cvisc 模型一维本构关系为

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_M}t + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K}t}\right), & \sigma < \sigma_s \\ \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{\eta_M}t + \frac{\sigma}{E_K} \left(1 - e^{-\frac{E_K}{\eta_K}t}\right) + \varepsilon_v(t\sigma), & \sigma > \sigma_s \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\varepsilon_v(t\sigma)$  表示塑性体变形量是关于时间和应力的函数,其他参数同流变学文献一致<sup>[19]</sup>,这里不再赘述.

## 2 变强度参数

### 2.1 变强度参数的引入

在工程建设中,岩土蠕变问题是个需要重视

的棘手问题,尤其在地基处理、边坡施工和围岩开挖与支护等工程中,岩土长时间在恒定外荷载作用下,产生的持续变形会破坏其上建筑(或构筑物)的稳定性和安全性;尤其是加速蠕变的出现,给正在建设或已经完工的工程带来巨大的破坏和损失. 而由摩尔-库伦强度准则,在外荷载不变的情况下,强度参数的大小决定土体内部是否存在达到强度屈服准则的区域,即塑性区,而一旦产生塑性区便意味着该部分区域的变形量将可能不断增加. 对于具有蠕变特性的土体而言,即会出现加速蠕变现象. 所以强度参数对土体加速蠕变阶段出现与否存在一定的影响.

另外大量的土工试验及研究表明<sup>[20-21]</sup>:土体在受荷产生变形直至破坏的过程中,其强度参数并非一成不变,而是随着位移的发生,强度有增有减,另外土体的破坏过程区别于岩石,其具有一个明显的渐变过程,属于塑性破坏,而土体受荷产生的位移量是关于时间的函数. 这种受荷呈现出强度随时间变化的特征,表现出土体作为一种三相材料体,即具有颗粒滑移的一般特性又具有一定的自身结构和黏结能力的基本特征.

本文根据对湛江黏土三轴试验获得的瞬时强度指标和长期强度指标来看,蠕变引起的强度衰减主要表现为黏聚力  $c$  值的明显降低,而摩擦角  $\varphi$  变化不大<sup>[22]</sup>.

基于上述 2 个指标在时间变化上表现出的差异,引入变强度参数模型,考虑采用 FLAC3D 所自带的 FISH 语言功能定义一个函数,实现土体强度参数  $c$  和  $\varphi$  随蠕变时间发生变化,试图通过该模型来描述 160 kPa 偏应力下湛江黏土的加速蠕变阶段.

### 2.2 变强度参数的建立

文中变强度参数模型是在前述 Cvisc 模型的基础上建立起来,通过 FLAC3D 内置 FISH 语言定义函数,实现强度参数  $c$  和  $\varphi$  随着蠕变时间不断发生变化,此外,实际的土体在受荷后,即使强度产生衰减导致发生破坏,其依然具有一定的残余强度,也即其强度参数  $c$  和  $\varphi$  不会为零,所以在建立强度参数随时间变化的过程中,要么给定 2 个强度指标降低的一个最低限值;要么确定蠕变时间,通过定义它们的降低速率来控制最低值.

下面是通过 FISH 语言定义一个函数,在函数内部定义 2 个强度参数值随蠕变时间不断减小,具体实现代码如下:

```
def cvs_cs_gb
```

whilestepping

p\_z = zone\_head

loop while p\_z # null

p\_coh = y\_coh - j\_xl \* crtime

p\_fri = z\_frw - f\_js \* crtime

z\_prop(p\_z, coh) = p\_coh

z\_prop(p\_z, fri) = p\_fri

p\_z = z\_next(p\_z)

endloop

end

set y\_coh = 38e3 ;初始黏聚力为 38 kPa

set j\_xl = 2e4

set z\_frw = 25 ;初始内摩擦角为 25°

set f\_js = 5

cvs\_cs\_gb

上述代码 2 个强度参数随蠕变时间是不断降低的,用户可以根据实际情况添加 if. . else. . 条件语句来控制它们降低的最低限值. 然后将代码插入到三轴蠕变命令流文本中,通过 solveagexx 来设置 2 个不同的求解时间点,分别在软件界面通过点击 Plotitems-Add-Block-property 来选择查看黏聚力和内摩擦角是否发生变化,上述代码经过验证能够实现 2 个强度参数随蠕变时间发生改变,见图 2.

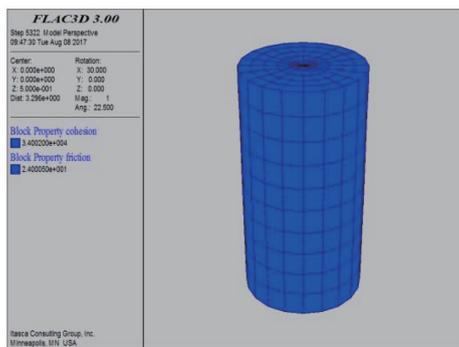


图 2 2 000 时步强度参数  $c$  和  $\varphi$

Fig. 2 Intensity of the parameters  $c$  and  $\varphi$  with 2 000 times

### 3 $c$ 和 $\varphi$ 对加速蠕变的影响

#### 3.1 $c$ 、 $\varphi$ 变化的 9 种情形

采用的模型为如图 2 所示的圆柱体,高为 1 个单位,直径为 0.5 个单位,主要分析强度参数对湛江黏土加速蠕变阶段出现的影响,虽然影响土体加速蠕变阶段出现的因素很多,如荷载水平、湿度、颗粒级配和结构等,但在这里暂不考虑. 为了通过数值模拟,准确分析 2 个强度参数对加速蠕变出现的影响程度,需要将强度参数变化分成以下 9 种情形进行简要分析:

- 1) 黏聚力和内摩擦角都不变.
- 2) 黏聚力减小,内摩擦角不变.
- 3) 黏聚力增大,内摩擦角不变.
- 4) 内摩擦角减小,黏聚力不变.
- 5) 内摩擦角增大,黏聚力不变.
- 6) 黏聚力先增后减,内摩擦角不变.
- 7) 黏聚力先减后增,内摩擦角不变.
- 8) 内摩擦角先增后减,黏聚力不变.
- 9) 内摩擦角先减后增,黏聚力不变.

显然上述 9 种情形不能完全包含 2 个强度参数指标可能出现的所有变化范围. 此外,还有黏聚力和摩擦角可能呈抛物线形式同时变化,发生先增后减、先减后增或呈指数函数形式变化等等,这些变化形式应当结合工程实际进行具体分析,现仅讨论以上 9 种情形所产生的影响,对于其他变化情况可参照同样的分析方法.

#### 3.2 数值计算参数

为了便于分析,将数值结果与试验数据进行比较,选用湛江黏土在 160 kPa 偏应力下初始蠕变阶段和稳定蠕变阶段试验数据,采用 Burger 三维本构关系拟合相关参数,拟合方法与前述相同,强度参数已由试验测定得到,初始黏聚力可选取为 38 kPa,内摩擦角为 25°<sup>[17]</sup>,拟合出相关参数见表 1.

表 1 160 kPa 下 Burger/Cvisc 模型相关参数

Table 1 Relevant parameters of the Burger/Cvisc model under 160 kPa

$\sigma_1$ /kPa	$K$ /kPa	$G_M$ /kPa	$\eta_M$ /(kPa·h <sup>-1</sup> )	$G_K$ /kPa	$\eta_K$ /(kPa·h <sup>-1</sup> )	$R$
160	39 018	18 008	1 858	12 963	227	0.997 2

#### 3.3 9 种情形分析比较

1) 强度参数不发生变化,单纯 Cvisc 模型进行数值计算,其结果与三轴蠕变试验数据对比见图 3.

从图 3 可以看出:当依据在偏应力 160 kPa 下

前 2 阶段试验数据拟合出的参数,在强度参数不变的情况下,整个蠕变曲线是趋向于稳定,没有发生加速蠕变现象,且 2 条曲线在初始蠕变阶段和稳定蠕变阶段基本一致.

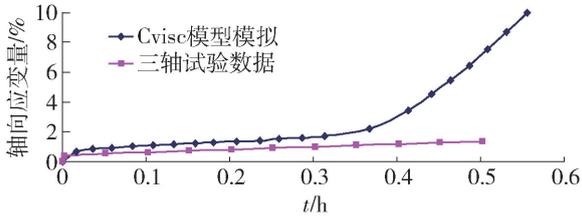


图3 Cvisc 模型数值计算结果与三轴蠕变试验数据对比

Fig. 3 Comparison of numerical results of Cvisc model with test data of triaxial creep

2) 强度参数按情形 2、3 变化, 采用一次函数  $y = at + b$  进行描述,  $a$  为黏聚力变化率,  $\text{kPa/h}$ ,  $b$  为初始黏聚力  $38 \text{ kPa}$ ;  $t$  为蠕变时间, 蠕变步长设为  $5 \times 10^{-5}$ ; 虽然蠕变是一个历时很长的过程, 但试验状态下的加速蠕变历时很短, 湛江黏土的加速蠕变时间只能记录到  $0.55 \text{ h}$ , 与此对应, 计算模拟的总蠕变时间定为  $0.5 \text{ h}$ , 内摩擦角  $25^\circ$ 。情形 2、3 分别是黏聚力下降和增加, 而为了更直观表明黏聚力变化对加速蠕变阶段出现时间的影响, 将上述 2 种情况依据黏聚力的变化速率快慢又各分为 4 小类, 具体如下:

① 黏聚力随蠕变时间不断降低, 摩擦角不变; 下降情况见图 4, 所得数值计算结果见图 5。

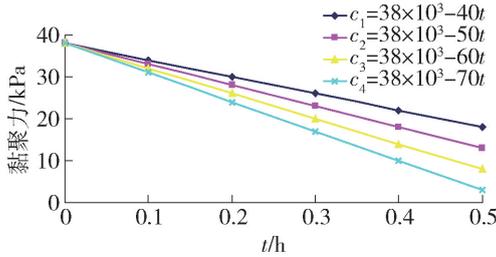


图4 黏聚力递减曲线

Fig. 4 Decreasing cohesion vs. time curves

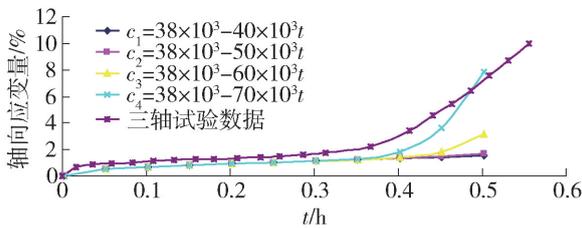


图5 黏聚力递减蠕变曲线

Fig. 5 Creep curves with decreasing cohesion

由图 5 可以看出, 在变强度参数模型中, 随着给定黏聚力降低幅度的增大, 试样会逐渐出现加速蠕变现象, 且加速蠕变量随着黏聚力的降低而不断增大。另外, 如果将稳定蠕变阶段的延长线与加速蠕变阶段切线的交点称之为“突变点”, 意即由稳定蠕

变阶段向加速蠕变阶段转化的明显转折点, 那么从图中可以看出随着黏聚力降低速率进一步增大, 该“突变点”不断左移, 表明黏聚力降低, 保持其他因素不变, 土体在相同条件下更容易出现加速蠕变达到破坏。最后, 从图中显而易见, 在降低速率为  $70 \times 10^3$  时, 该数值曲线与三轴试验曲线基本一致。

② 黏聚力随蠕变时间不断升高, 内摩擦角不变; 由于  $c = 38 \text{ kPa}$  时不会出现加速蠕变, 此时继续增加黏聚力, 显得毫无意义, 所以为了表明黏聚力的增加对加速蠕变的影响, 这里将黏聚力初始值设为  $8 \text{ kPa}$ 。升高情况如图 6, 所得数值计算结果见图 7。

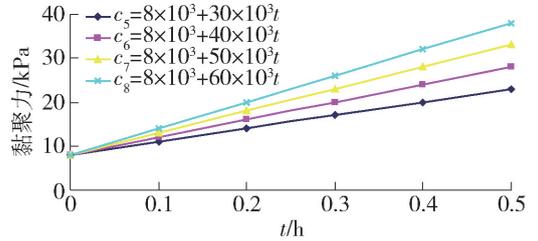


图6 黏聚力递增曲线

Fig. 6 Increased cohesion vs. time curves

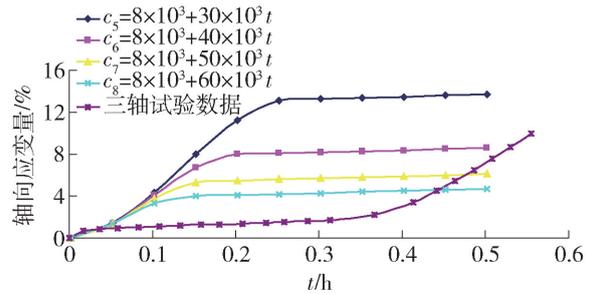


图7 黏聚力递增蠕变曲线

Fig. 7 Creep curves with increased cohesion

从图 7 可知: 初始黏滞系数为  $8 \text{ kPa}$ , 4 条模拟曲线都是“S”型曲线, 而不同于“反倒 S”型的三轴试验数据的, 此时蠕变曲线只包含初始蠕变和稳定蠕变 2 个阶段; 曲线的竖直位置次序表明随着黏聚力增长速率的提高, 轴向应变量逐渐减小, 稳定蠕变的“稳定点”, 也就是曲线由斜向上到水平的拐点逐渐左移。

3) 强度参数按情形 4、5 变化, 同样分为 2 种情况, 采用一次函数  $y = ct + d$ ;  $d$  为初始内摩擦角,  $c$  为降低或升高速率,  $t$  为蠕变时间。

① 内摩擦角随蠕变时间不断降低, 给定初始值为  $25^\circ$ , 黏聚力不变; 变化情况见图 8, 所得数值计算结果见图 9。

由图 9 显然可知: 内摩擦角对土体的加速蠕变

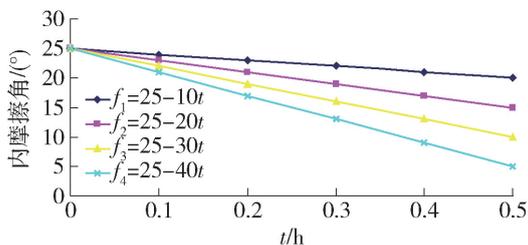


图8 内摩擦角递减曲线

Fig. 8 Decreasing internal friction angle vs. time curves

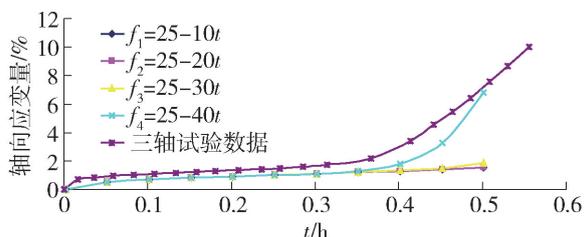


图9 内摩擦角递减蠕变曲线

Fig. 9 Creep curves with decreasing internal friction angle

阶段存在影响. 影响规律为随着内摩擦角降幅的提高,加速蠕变阶段的出现越发明显,随着内摩擦角降幅的增加,蠕变曲线的“突变点”不断左移,意味着加速蠕变阶段的提早出现.

② 内摩擦角随蠕变时间不断增加,黏聚力不变;同样为了表明内摩擦角增加对加速蠕变阶段的影响,给定内摩擦角初始值为 $5^\circ$ . 具体变化情况见图10,所得数值计算结果见图11.

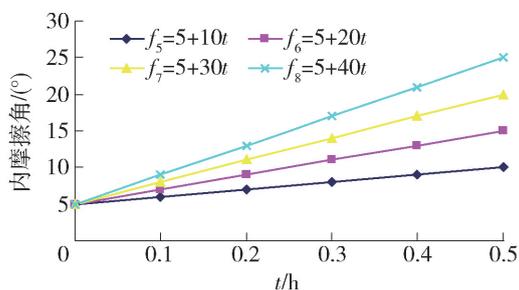


图10 内摩擦角递增曲线

Fig. 10 Increased internal friction angle vs. time curves

图11表明:在内摩擦角增幅最低时, $c=10$ ,得到最早加速蠕变曲线;当增幅达到 $c=20$ 时,得到稳定蠕变曲线,未出现加速蠕变阶段,所以随着内摩擦角增幅逐渐增大,蠕变曲线会逐渐变缓,导致对应的变形量明显降低,加速蠕变阶段不再显现.

4) 黏聚力按情形6变化,内摩擦角不变. 初始黏聚力设为 $5\text{ kPa}$ ,按照先增后减变化规律,分为4

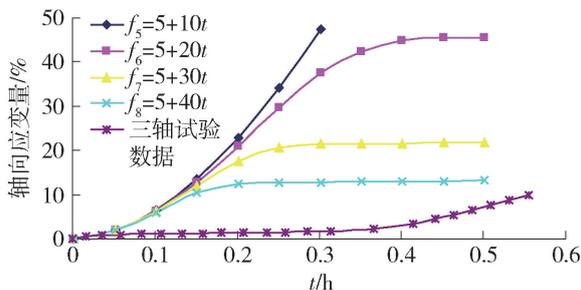


图11 内摩擦角递增蠕变曲线

Fig. 11 Creep curves with increased internal friction angle

种变化幅度,采用二次函数(抛物线形式)来描述黏聚力的变化情况,具体见图12,依据变化情况所得数值计算曲线见图13.

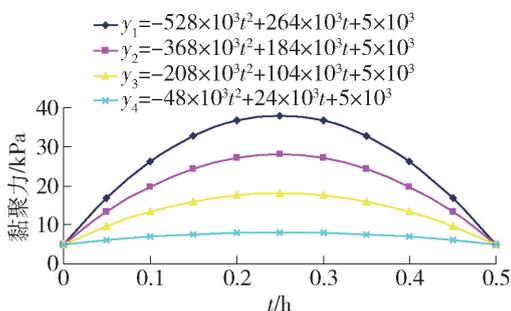


图12 黏聚力先增后减曲线

Fig. 12 First increasing and then decreasing cohesion vs. time curves

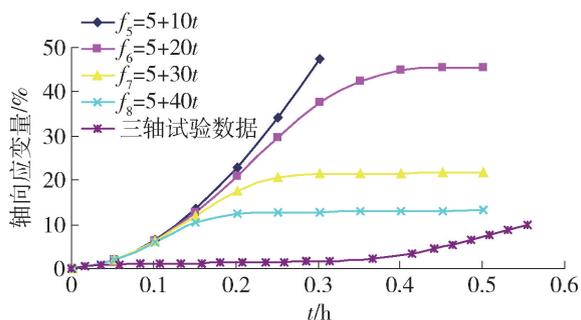


图13 黏聚力先增后减蠕变曲线

Fig. 13 Creep curves with first increasing and then decreasing cohesion

由图13可以看出:在黏聚力先增后减变化幅度最小时,出现最大加速蠕变,随着黏聚力变化幅度的增大,蠕变曲线的“突变点”逐渐右移,加速蠕变阶段出现时间推后且对应的蠕变量明显降低.

5) 黏聚力按情形7变化,内摩擦角不变. 根据黏聚力先减后增的变化幅度不同,分为4种情况,同样采用二次函数(抛物线形式)来进行描述,具体见图14,依据变化情况所得数值计算曲线如图15.

在图15中,曲线为“S”型曲线,黏聚力先减后

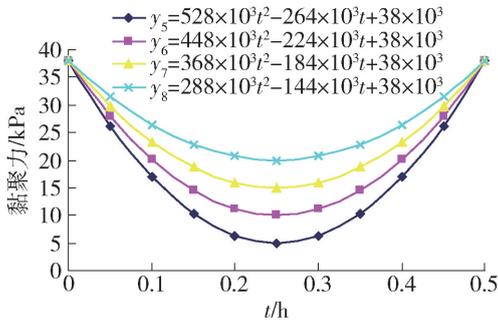


图 14 黏聚力先减后增曲线

Fig. 14 First decreasing and then increasing cohesion vs. time curves

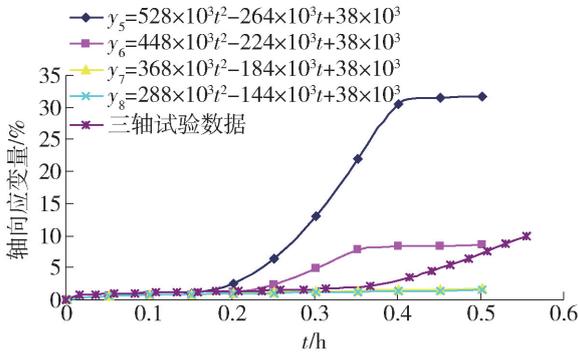


图 15 黏聚力先减后增蠕变曲线

Fig. 15 Creep curves with first decreasing and then increasing cohesion

增变化幅度较大时,轴向应变量较大,随着幅度的降低,“稳定点”逐渐左移。

6) 内摩擦角按情形 8 变化,黏聚力不变. 内摩擦角根据先增后减的变化幅度不同,分为 4 种情况,也是采用二次函数(抛物线形式)来进行描述,具体见图 16,依据变化情况所得数值计算曲线见图 17.

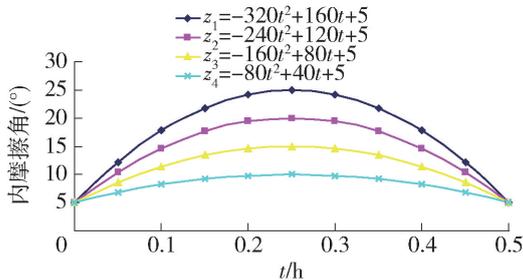


图 16 内摩擦角先增后减曲线

Fig. 16 First increasing and then decreasing internal friction angles vs. time curves

在图 17 中,4 条模拟曲线都是“反倒 S”型,“突变点”的水平位置在前 3 条上并没有明显变化,轴向应变最大的第 4 条更多的是受内摩擦角偏小的

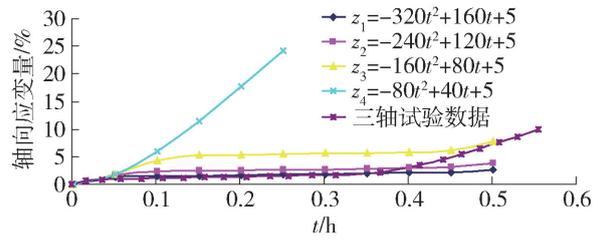


图 17 内摩擦角先增后减蠕变曲线

Fig. 17 Creep curves with first decreasing and then increasing internal friction angle

影响。

7) 内摩擦角按情形 9 变化,黏聚力不变. 内摩擦角根据先减后增的变化幅度不同,分为 4 种情况,同样也是采用二次函数(抛物线形式)来进行描述,具体见图 18,依据变化情况所得数值计算曲线如图 19:

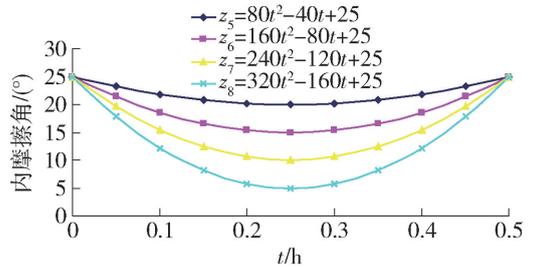


图 18 内摩擦角先减后增曲线

Fig. 18 First decreasing and then increasing internal friction angle vs. time curves

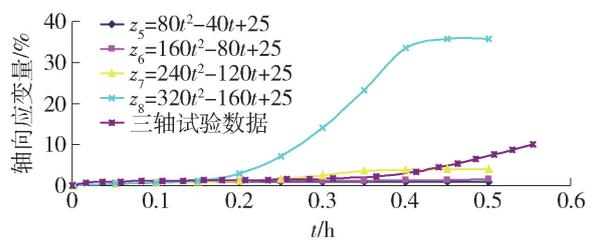


图 19 内摩擦角先减后增蠕变曲线

Fig. 19 Creep curves with first decreasing and then increasing internal friction angle

4 条模拟曲线都是“S”型,与试验曲线的“反倒 S”型不同. 同样的,随先减后增幅度的增大,轴向应变变量增大。

综合对上述 5 种情形的分析,可以得出如下结论:

- 1) 黏聚力和内摩擦角对土体的加速蠕变阶段存在显著的影响。
- 2) 黏聚力或内摩擦角增加,会使得土体难以进入加速蠕变阶段;反之,土体会提前进入加速蠕变

阶段.

3) 从模拟曲线与三轴试验曲线的变化趋势的对比来看,黏聚力和内摩擦角按线性减小、黏聚力按抛物线先增后减与内摩擦角先增后减时,模拟曲线与试验曲线变化规律能够保持一致.

4) 模拟曲线与三轴试验曲线的变化趋势最不一致的是:黏聚力和内摩擦角按线性增加、黏聚力按抛物线先减后增与内摩擦角先减后增时,模拟曲线以“S”型曲线为主,而试验曲线是“反倒S”型.

## 4 结论

1) 本文从采用 Cvisc 模型无法描述湛江黏土加速蠕变阶段,且依据对湛江黏土的长期和瞬时强度指标的差异来看,引入变强度参数模型,讨论强度参数变化对土体加速蠕变阶段的影响.然后将强度参数变化分为9种情形,采用 FISH 语言定义变强度参数模型进行数值计算,将模拟曲线与三轴试验曲线的变化趋势进行对比,结合试验研究得出的湛江黏土内摩擦角变化不大的结论,可以得出湛江黏土在能导致加速蠕变的高偏应力条件下的强度参数变化规律:以黏聚力逐渐减小或先有所增大后减小为主要变化趋势.

2) 综合而言,本文是通过数值模拟探讨强度参数的变化规律对于高偏应力条件下蠕变变形的影响,所做研究工作对于探索加速蠕变的内部机理,具有较为重要的意义和价值.

## 参考文献:

[1] 赵延林,唐劲舟,付成成,等.岩石黏弹塑性应变分离的流变试验与蠕变损伤模型[J].岩石力学与工程学报,2016,35(7):1297-1308.

ZHAO Y L, TANG J Z, FU C C, et al. Rheological test of separation between viscoelastic-plastic strains and creep damage model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (7): 1297-1308. (in Chinese)

[2] 王军保,刘新荣,王铁行.基于改进分数阶黏滞体的岩石非线性蠕变模型[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(4):1461-1467.

WANG J B, LIU X R, WANG T X. A nonlinear creep model for rocks based on modified fractional viscous body[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(4): 1461-1467. (in Chinese)

[3] 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].岩石力学,2015,36(1):

240-248.

YANG Z W, JING A B, ZHOU Y, 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. (in Chinese)

[4] 杨红伟,许江,聂闻,等.渗流水压力分级加载岩石蠕变模型[J].宜宾学院学报,2015,15(6):1-5.

YANG H W, XU J, NIE W, et al. Study on the creep model of rocks under step loading of seepage pressure[J]. Journal of Yibin University, 2015, 15 (6): 1-5. (in Chinese)

[5] 王军保,刘新荣,邵珠山,等.岩石非线性蠕变损伤模型研究[J].现代隧道技术,2014,51(3):79-84.

WANG J B, LIU X R, SHAO Z S, et al. A study of the nonlinear creep damage model for rocks [J]. Modern Tunneling Technology, 2014, 51 (3): 79-84. (in Chinese)

[6] 康永刚,张秀娥.一种改进的岩石蠕变本构模型[J].岩土力学,2014,35(4):1049-1055.

KANG Y G, ZHANG X E. An improved constitutive model for rock creep [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1049-1055. (in Chinese)

[7] 蒋海飞,刘东燕,赵宝云,等.高围压高压条件下岩石非线性蠕变本构模型[J].采矿与安全工程学报,2014,31(2):284-291.

JIANG H F, LIU D Y, ZHAO B Y, et al. Nonlinear creep constitutive model of rock under high confining pressure and high water pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(2): 284-291. (in Chinese)

[8] 蒋海飞,刘东燕,黄伟,等.高围压下不同孔隙水压作用时岩石蠕变特性及改进西原模型[J].岩土工程学报,2014,36(3):443-451.

JIANG H F, LIU D Y, HUANG W, et al. Creep properties of rock under high confining pressure and different pore water pressures and a modified Nishihara model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 443-451. (in Chinese)

[9] 范翔宇,张千贵,艾巍,等.煤岩储气层岩石蠕变特性与本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增刊2):3732-3739.

FAN X Y, ZHANG Q G, AI W, et al. Research on creep property and constitutive model of rock in coal bed gas reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (Suppl 2): 3732-3739. (in Chinese)

[10] LIU L, WANG G M, CHEN J H, et al. Creep experiment and rheological model of deep saturated rock [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of

- China, 2013, 23(2): 478-483.
- [11] 乔丽苹,王者超,李术才,等. 岩石内变量蠕变模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3529-3537, 3603.
- QIAO L P, WANG Z C, LI S C, et al. An internal-variable creep model for rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(12): 3529-3537, 3603. (in Chinese)
- [12] 宋勇军,雷胜友. 基于分数阶微积分的岩石非线性蠕变损伤力学模型[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 91-95, 112.
- SONG Y J, LEI S Y. Mechanical model of rock nonlinear creep damage based on fractional calculus[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 91-95, 112. (in Chinese)
- [13] 宋勇军,雷胜友,刘向科. 基于硬化和损伤效应的岩石非线性蠕变模型[J]. 煤炭学报, 2012, 37(增刊2): 287-292.
- SONG Y J, LEI S Y, LIU X K. Non-linear rock creep model based on hardening and damage effect[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(Suppl 2): 287-292. (in Chinese)
- [14] 高赛红,曹平,汪胜莲,等. 改进的岩石非线性黏弹塑性蠕变模型及其硬化黏滞系数的修正[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 936-943.
- GAO S H, CAO P, WANG S L, et al. Improved nonlinear viscoelasto-plastic rheological model of rock and its correction of hardening coefficient of viscosity [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 936-943. (in Chinese)
- [15] 杨圣奇,朱运华,于世海. 考虑黏聚力与内摩擦系数的岩石黏弹塑性流变模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 291-297.
- YANG S Q, ZHU Y H, YU S H. Nonlinear visio-elasto-plastic rheological model of rock with consideration of cohesion and internal friction coefficient [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(3): 291-297. (in Chinese)
- [16] 余成学,崔旋. 岩石非线性蠕变模型[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(1): 25-28.
- SHE C X, CUI X. Research on nonlinear creep model of rock [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 42(1): 25-28. (in Chinese)
- [17] 孔令伟,何利军,张先伟. 湛江黏土的蠕变模型与变参数塑性元件[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2241-2246.
- KONG L W, HE L J, ZHANG X W. Creep model of Zhanjiang clay and plastic components with variable parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(8): 2241-2246. (in Chinese)
- [18] 黄明奎. 公路工程材料流变学[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2010.
- [19] 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.
- [20] 刘志伟. 土体强度参数对边坡隧道影响数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(4): 176-180.
- LIU Z W. Numerical stimulation analysis for the effects of soil mass strength parameters on the tunnels with side slopes [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(4): 176-180. (in Chinese)
- [21] 周春梅,赵子鹏,鲁阳. 含水量对滑带土强度变形参数及滑坡稳定性的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 213-219.
- ZHOU C M, ZHAO Z P, LU Y. The influence of water content on strength and deformation parameters of sliding zone and slope stability [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 213-219. (in Chinese)
- [22] 孔令伟,臧濛,郭爱国,等. 湛江强结构性黏土强度特性的应力路径效应[J]. 岩土力学, 2015, 36(A1): 19-24.
- KONG L W, ZANG M, GUO A G, et al. Effect of stress path on strength properties of Zhanjiang strong structured clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(A1): 19-24. (in Chinese)

(责任编辑 郑筱梅)