

# 岩体工程中流变问题的有限元分析

中国科学院武汉岩体土力学研究所 葛修润 丰定祥\*

## FINITE ELEMENT ANALYSIS FOR RHEOLOGICAL PROBLEMS IN ROCK ENGINEERING

Ge Xiu-run Feng Ding-xiang

Institute of Rock and Soil Mechanics, Academia Sinica  
Wuhan, China

### ABSTRACT

In this paper, a practical approach to rheological behavior of joints and weak intercalations in rock mass is given. In finite element analysis with this method for a rock engineering problem, good agreement is found in a comparison of the calculated results with the deformations measured.

## 一、前 言

在岩体工程的稳定分析中时间常常是一项不可忽视的因素。但是目前进行的许多非线性分析工作一般说来仅考虑了岩体、节理等应力—应变关系的力学非线性性质和强度特性，对于时间因素很少顾及。特别是根据实测的节理面、软弱夹层等的流变性质进行相应的分析的例子还很少。

本文根据某工程基坑开挖后发生层面错动的实例，参照曾在现场进行的软弱夹层剪切流变试验的实测资料进行了数值分析，提出了考虑软弱夹层等弹—塑—粘特性的实用分析方法。虽然这种分析方法还是很初步的，但以此方法所作的分析结果表明在实用上还是适宜的。

## 二、分析方法

### (一) 概 述

我们参照通常的蠕变问题的分析方法将整个需考察的时段  $T$  分为许多小的时段  $\Delta t_i$ 。基坑刚开挖后，即在考虑时间因素之前先进行弹塑性分析<sup>[1]</sup>，然后考虑时效时对于每个足够小的时段内可以假定应力状态保持不变，这时可以根据对节理、软弱夹层等的剪切流变特性曲线（实质上是蠕变特性）和当前的应力状态、如有必要也可以考虑其应力历史找出在这一时段内相对变形量或应变的增量。对岩石而言也是类似的。然后或者可以采用初应变法进行调整或者采用应力转移法进行调整。本文采用后者，这样就可以得到这时段末的新的应力状

\* 参加本项工作的还有杨家岭同志。

态和变形状态。这样的分析过程对于每个小小的时段逐个进行，最终可以得到整个时段末的结果。必需指出，时段的划分是需要注意研究的，时段划分过粗，可能得出不合理的结果。

### (二) 软弱夹层、节理面等的流变特性、简化和分析

在现场进行的粘土质粉砂岩中软弱夹层的剪切流变试验曲线如图一所示<sup>2</sup>，试验结果表明它具有如下规律：

1. 当剪切面上的剪切应力小于某一临界值时，其剪切位移基本上是瞬时的<sup>[2]</sup>，流变性质可以忽略，此一临界值可用文献<sup>[8]</sup>中 $\tau-u$ 曲线(即剪切应力-相对剪切位移曲线)的屈服点A来表示，因此，可建立如下判别准则，即满足如下条件时考虑流变性质

$$|\tau| > \tau_A = |\sigma| t_g \varphi_A + C_A \quad \text{当 } \sigma < 0 \quad (1)$$

式中 $\sigma$ 表示法向应力，受压时取负值

2. 相对剪切位移变化率随加载时间的增加而衰减，逐步趋向稳定，但如 $\tau$ 较高，接近破坏时则急剧增长。由于每一荷级的持续时间仅七天左右，因此实验曲线未能给出七天以后的变形情况，七天后的情况在计算中只能根据试验情况作出一些假定外延。

3. 考虑流变特性的相对剪切位移的大小与作用在剪切面上的应力 $\sigma$ 和 $\tau$ 有关。虽然图1中各试体和各荷级的资料有些地方还出现一些反常的情况，但就总体而言，相对剪切位移的大小与如下的无量纲量S有关：

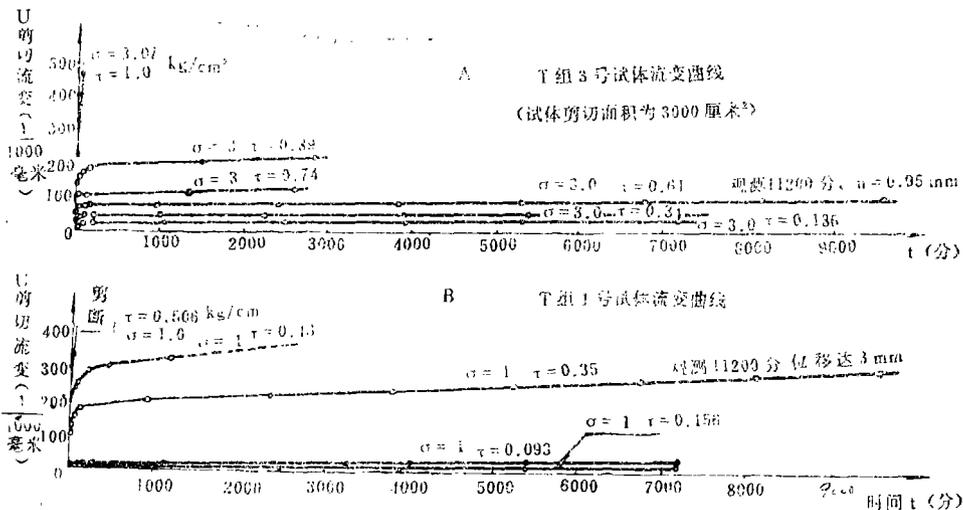


图1、试体的流变曲线

$$S = \frac{|\tau| - \tau_A}{|\tau_A|} \quad (2)$$

若  $|\tau| < \tau_A$ ，取  $S = 0$

设  $S = 1$  时随时间变化的相对剪切位移曲线为  $\bar{u}(t)$ ，则相应的速率可以  $\bar{\varphi}(t)$  记之

$$\bar{\varphi} = \frac{d \bar{u}}{d t} \quad (3)$$

图 2 为  $S(t)$ ， $\bar{u}(t)$ ， $\bar{\varphi}(t)$  的示意图。

进一步作如下简化，即任意应力状态时的  $u(t)$ ， $\varphi(t)$  按下式计算

$$\begin{aligned} u(t) &= \bar{u}(t) \cdot S \\ \varphi(t) &= \bar{\varphi}(t) \cdot S \end{aligned} \quad (4)$$

软弱夹层的压缩流变特性，由于缺乏实测资料，也由于在剪切错动中不是主要的因素，因此在本文中予以忽略。

至于剪切流变试验中接近破坏时加速流动的情况在本文中予以忽略，因为就整个基坑而言，实测结果表明还未处于这个阶段。采用这样的简化，虽然对局部地区有误差，但就总体而言可能还是容许的。

在分析计算中用节理单元模拟软弱夹层，其非线性分析方法可参看文献[3]、[4]。

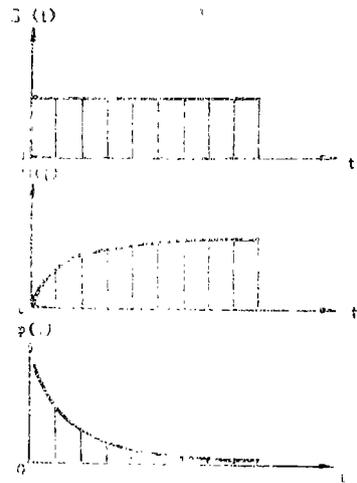


图 2、 $S(t)$ ， $\bar{u}(t)$ ， $\bar{\varphi}(t)$  曲线示意图

整个时段  $T$  可划分为几个区段 ( $T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$ )，因此， $t_0 = 0$ ， $t_1 = \Delta t_1$ ， $t_i = t_{i-1} + \Delta t_i$

$$(i = 2, 3, \dots, n-1), t_n = T,$$

某个节理单元在  $\Delta t_i$  时段由于蠕变引起的相对剪切位移量  $\Delta u^c$ ，当外载荷在整个时段  $T$  中没有变化，而由于流变而导致的应力调整变化也不很剧烈时采用如下算式，虽然是近似的，但还是适用的：

$$\Delta u^c = \left[ \frac{\bar{\varphi}(t_{i-1}) + \bar{\varphi}(t_i)}{2} \right] \cdot S(t_{i-1}) \cdot \Delta t_i \quad (5)$$

根据该节理单元的  $\Delta u^c$  很容易求出该节理单元相应的等价结点力  $\{\Delta F\}^c$ ，并同时对该单元的应力  $\{\sigma\}_{t=t_{i-1}}$  作相应的调整成为  $\{\sigma\}^*_{t=t_{i-1}}$ ，此时各节理单元和各岩石单元的等价结点力（包括新进入塑性流动单元需调整的等价结点力在内）组成了在  $\Delta t_i$  时段的总体的等价荷载列阵  $\{\Delta R\}$ 。

对于  $\Delta t_i$  时段求解方程组

$$[K] \{\Delta \delta\}^c = \{\Delta R\} \quad (6)$$

得到  $\{\Delta \delta\}^c$  后可求出在  $\Delta t_i$  时段各单元的应力增量  $\{\Delta \sigma\}_{\Delta t_i}$ ，此时  $t = t_i$  时的应力和位移按下式计算：

$$\begin{aligned} \{\sigma\}_{t=t_i} &= \{\sigma\}_{t=t_{i-1}} + \{\Delta \sigma\}_{\Delta t_i} \\ \{\delta\}_{t=t_i} &= \{\delta\}_{t=t_{i-1}} + \{\Delta \delta\}_{\Delta t_i} \end{aligned} \quad (7)$$

我们借助于模型问题的探讨来分析两个问题：（1）如何由  $\Delta u^c$  推求  $\{\Delta F\}^c$  并调整

应力：(2) 求解方程(6)及形成刚度矩阵[K]时各单元物性参数应按什么原则取用。

用图3这样的模型近似表征前述的软弱夹层等的流变性质，图中H、 $P_i$ 、 $N_i$ 分别表示弹性元件、塑性元件及粘性元件。

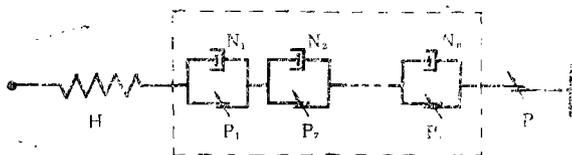


图3、流变模型图

施加荷载的瞬时可以认为虚线框内的元件组似同刚体一样，因此加载瞬时( $t=0$ )的分析就等价于一个弹-塑性体。当然在我们岩体工程中对于P的临界值不能用一特定的应力值来表征，比较方便地可用库伦准则表示。随着荷载作用时间的增长，由于粘性元件之存在，流动是可能发生的，但是在虚线框内有塑性元件与粘性元件并联，而这些塑性元件也用库伦公式来表征其临界值 $P_i$ ，其中 $P_n > P_{n-1} > \dots > P_2 > P_1$ ，因此其流动变形率与S值有关，当 $S < P_1$ 时所有 $P_1, \dots, P_n$ 都不发生塑性滑移，因此也没有流变变形。当 $S > P_1$ 且S增长时，塑性元件逐个滑移，因此流变变形率随S值增大。

在 $\Delta t_i$ 时段内进行流变分析时首先以 $t = t_{i-1}$ 时的应力状态为基准，位移状态也以 $t = t_{i-1}$ 时的为基准。在 $\Delta t_i$ 时段内由于虚线框内元件变形之增长必然导致H、P元件变形之减少，但由于塑性元件P一般说来不能倒回去，这就使H元件的弹性变形减少，从而应力发生松弛，其总的应力下降值与在该时段内的流变位移量值和弹性元件的刚度有关。但是实际上总体结构上力仍要保持平衡，位移也是会发生变化的，因此这方面的调整采用施加以等价的结点力荷载加以调整。此时又可视虚框内的元件组为刚体，因此又根据判别条件按照弹塑性分析方法进行。这样的分析给出了上述两个问题的分析计算原则。但是必需注意这样的算法只是一种手段，为了力求比较符合实际情况，时段要分得比较细，至少在每一个调整过程中，由于虚框内元件组在 $\Delta t_i$ 时段内的流变变形量应小于弹性元件的变形量，最好在它的一半之下。上述的处理方法作为本文讨论的第I种处理方式，基本方案即采用这种处理方式。

为了作一些对比，在计算等价结点力和调整计算时对节理单元仍采用弹塑性矩阵，但加一补充假定 $K_{SN} = K_{NS} = 0$ 作为第II种处理方式。

### (三) 一种考虑应力历史的流变量的计算方法

上述分析方法中所采用的 $\Delta t_i$ 时段中节理单元由于蠕变引起的相对错动量 $\Delta u^e$ 的估计是按当时的应力状态计算的，它并没有考虑应力历史，要考虑应力历史可以采用继效理论，引入蠕变核的概念，并适当改造和推广到软弱夹层的时效分析，建立节理单元在某一个时刻t的由于蠕变引起的相对剪切位移量的公式(图4)

$$u^e(t) = \int_0^t S(\theta) \bar{\varphi}(t-\theta) d\theta \quad (8)$$

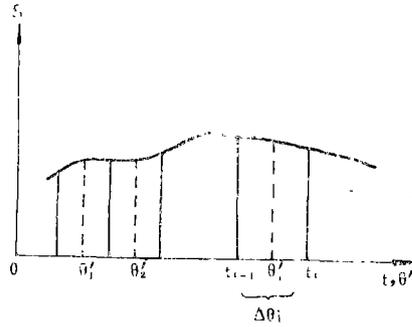


图 4、计算流变量考虑应力历史时段划分示意图

上述积分可近似写成如下形式

$$u^c(t_m) = \sum_{i=1}^m S(\theta'_i) \bar{\varphi}(t_i^m) \Delta \theta_i \tag{9}$$

式中：  $t_i^m = t_m - \theta_i$

因此，在某一时段  $\Delta \theta_m$  的蠕变相对剪切位移增量  $\Delta u^c(\Delta \theta_m)$  可由下式计算

$$\Delta u^c(\Delta \theta_m) = S(\theta'_m) \bar{\varphi}(t_m^m) \Delta \theta_m + \sum_{i=1}^{m-1} S(\theta'_i) \Delta \bar{\varphi}(t_i^m) \Delta \theta_i \tag{10}$$

式中

$$\Delta \bar{\varphi}(t_i^m) = \bar{\varphi}(t_i^m) - \bar{\varphi}(t_i^{m-1}) \tag{11}$$

由 (10) 式可知， $\Delta \theta_m$  时段的  $\Delta u^c$  值与整个应力历史有关。能反映应力历史的影响，这是它的优点。但是这样的方法是建立在线性形变规律的基础上，卸荷后变形将逐步恢复，从而不能解释剩余变形的存在。这种变形的可恢复性与现场实际观测到软弱夹层的流变性质是有矛盾的。但是在本文中我们仍然将此算法作为考虑软弱夹层时效分析的一种方案与其它方案作比较。其原因是当基坑开挖后外荷载没有变化，因此在各个时段的  $S(\theta_i)$  变化不大，从而前述的变形恢复性所带来的矛盾是不大的，当  $\Delta u^c$  按 (10) 式确定后其它的算法则是类似的。

为了考虑每条节理单元的应力历史的影响显然需要有相当大的内存以记录每一节理单元每一小时段的  $S$  值，这是很不利的，对于较大的题目时段又分得很细，而机器内存有限时显然给计算分析带来困难。当  $S$  的变化幅度不很大的情况下可以简化为只记忆当前的  $S$  值以及前几个时段的  $S$  值，如采用

$$\begin{aligned} \Delta u^c(\Delta \theta_m) = & S(\theta'_m) \bar{\varphi}(t_m^m) \Delta \theta_m + S(\theta'_{m-1}) \Delta \bar{\varphi}(t_{m-1}^m) \Delta \theta_{m-1} + \\ & + S(\theta'_{m-2}) \Delta \bar{\varphi}(t_{m-2}^m) \Delta \theta_{m-2} + S(\theta'_{m-3}) \sum_{i=1}^{m-3} \Delta \bar{\varphi}(t_i^m) \Delta \theta_i \end{aligned} \tag{12}$$

也可取得较好的效果。

#### (四) 岩石单元的流变问题

在某工程基坑错动流变分析中除考虑软弱夹层的流变分析外还考虑了岩石本身的流变问题<sup>51</sup>。分析方法则采用全量理论,在假定体应变无流变的前提下岩石单元的应变率按下式求得

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_e^c}{\sigma_e} S_{ij} \quad (13)$$

式中

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \sigma_{kk} \quad (14)$$

因此在平面应变课题中某时段 $\Delta t$ 时的由于时效的应变增量为

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta \varepsilon_x^c = \frac{\dot{\varepsilon}_e^c}{\sigma_e} \left[ \sigma_x - \frac{1}{2} (\sigma_y + \sigma_z) \right] \cdot \Delta t \\ \Delta \varepsilon_y^c = \frac{\dot{\varepsilon}_e^c}{\sigma_e} \left[ \sigma_y - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_z) \right] \cdot \Delta t \\ \Delta \varepsilon_z^c = \frac{\dot{\varepsilon}_e^c}{\sigma_e} \left[ \sigma_z - \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) \right] \cdot \Delta t \\ \Delta \varepsilon_{xy}^c = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}_e^c}{\sigma_e} \tau_{xy} \cdot \Delta t \end{array} \right. \quad (15)$$

而  $\frac{\dot{\varepsilon}_e^c}{\sigma_e}$  反映流变性质,可由单轴流变试验求得,此时,  $\sigma_e = \sigma_1$ ,  $\dot{\varepsilon}_e^c = \dot{\varepsilon}_1^c$

### 三、算 例

采用上述的流变模型,我们对某水利枢纽电站厂房基坑开挖进行了流变变形的有限元分析。计算程序是在本所编制的JR程序<sup>6</sup>的基础上补充、修改而成的。电站厂房基坑呈长方形,基坑开挖形态如图5所示,图上的AA剖面由图6给出。该处基础岩体为白垩系下统的一套红色地层,以粘土质粉砂岩为主,夹有砂岩及软弱夹层,岩层产状接近水平。该电站厂房基坑在开挖过程中及成型以后进行的一系列变形观测表明,开挖施工后岩体发生了回弹变形,尤其是岩体的侧向变形十分明显(图5、6),大量的爆破孑裂孔和大口径占孔壁沿软弱夹层发生水平错动,有的位置这种水平错动在基坑开挖瞬时就达八厘米之多,在基坑开挖后还随着时间逐渐增大<sup>7</sup>。文[1]曾对此工程实例进行了比较详细的弹塑性有限元分析,计算结果与实际观测结果吻合较好。计算表明,导致基坑开挖后沿软弱夹层发生严重错动的原因在于初始水平地应力之存在,同时又有大面积的连续分布的近于水平的极为软弱的夹层在

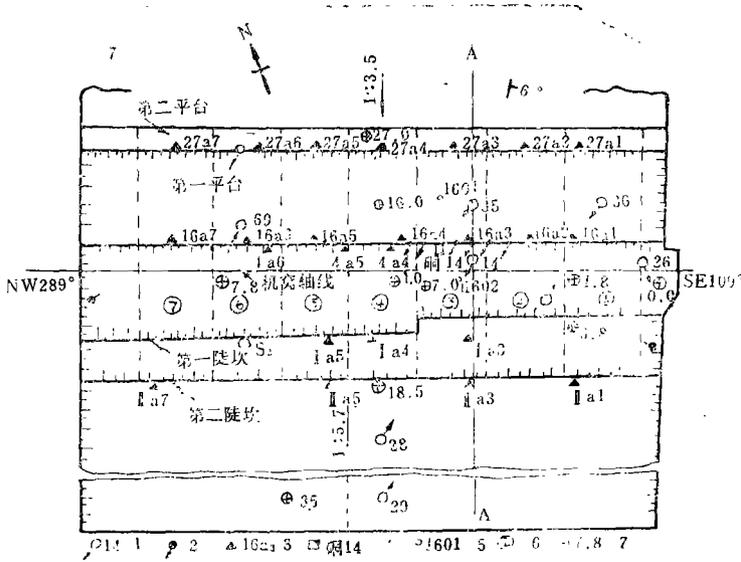


图 5、基坑开挖形态及岩体变形观测平面图

- 1、大口径钻孔 (φ 1 米) 及编号箭头指向弱面错动方向
- 2、爆破孑裂孔及编号
- 3、基线上观测点及编号
- 4、观测廊道及编号
- 5、地应力测量孔及编号
- 6、机组编号
- 7、开挖面高程 (m)

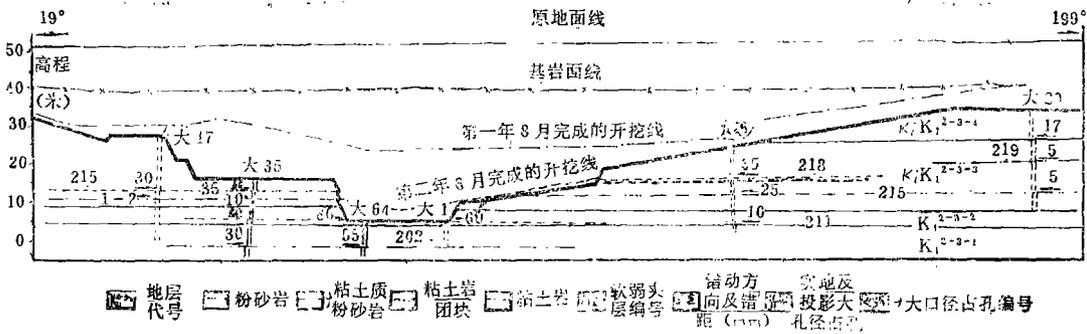


图 6、A-A 剖面岩体沿软弱夹层错动示意图

基坑底部出现。根据计算还可以知道，相应基坑底部高程的岩体中，初始水平压应力在未开挖前可达 22 公斤/厘米<sup>2</sup> 左右，这与地应力实测数据和极限平衡估算方法所得的结果基本一致。但文[1]对基坑成型后软弱夹层错动的流变问题未予讨论。

### (一) 计算条件

本工程在流变计算中仍按平面应变问题处理，单元分块见图 7，结点总数 337 个，三角单元总数 381 块，节理单元总数 110 条。

为了节省机时，基坑开挖一次形成，卸荷荷载分三级加上，对于每个荷级都要求应力转移完毕。

坐标的选取、位移边界的确定亦见图 7。

工程土石方开挖前，地应力假定  $\sigma_y = -rh$  其中  $r$  为容重， $h$  为复盖层厚度， $\tau_{xy} = 0$ ，水平地应力分布假定见图 8。

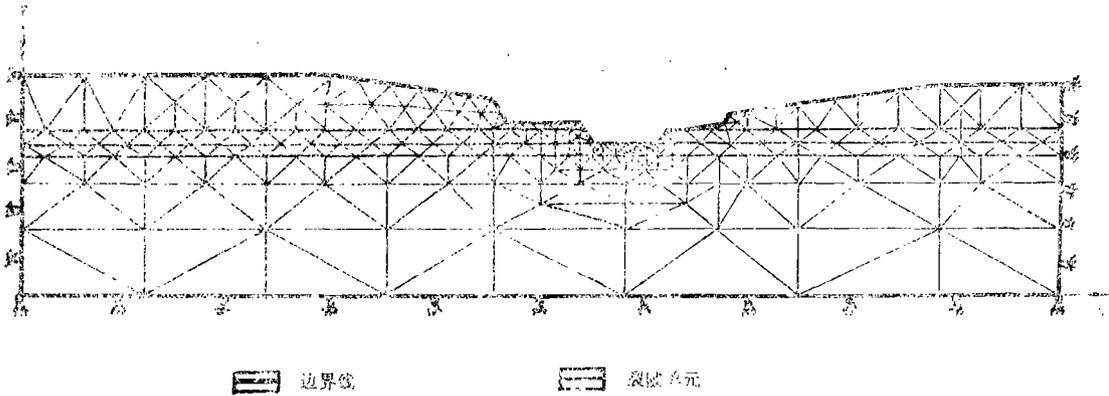


图 7、计算分块图

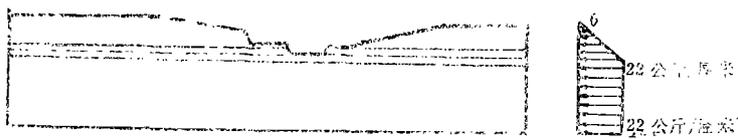


图 8、初始水平地应力分布

软弱夹层的主要力学参数参照现场实测数据选用。（表一）

软弱夹层主要力学参数

表 1

软弱夹层层位	抗剪断强度		摩擦强度		抗拉强度 (kg/cm <sup>2</sup> )	法向刚度 系数 Kn(kg/cm <sup>3</sup> )	弹性阶段 比例限内切 向刚度系数	
	C(kg/cm <sup>2</sup> )	tgφ	C(kg/cm <sup>2</sup> )	tgφ			K <sub>so</sub>	ξ
202 212 夹层 211	0.32	0.204	0.32	0.204	0	98	2	6
215 夹层	0.32	0.3	0.32	0.3	0	196	4	12

计算中岩石的变形模量为 16000 公斤/厘米<sup>2</sup>，泊松系数 0.3，容重 2.4 吨/米<sup>3</sup>，抗拉强度 3 公斤/厘米<sup>2</sup>，参照相近层位岩石的野外三轴试验实测数据，抗剪断强度  $C = 7$  公斤/厘米<sup>2</sup>， $tg\varphi = 1.26$ ，摩擦强度要低些， $C = 2.3$  公斤/厘米<sup>2</sup>， $tg\varphi = 0.9$ （参见长江水利水电科学院“某水利枢纽二、三江基岩抗剪强度试验研究报告”1973年12月）。

在流变计算中将基坑开挖完毕后的一年时间划分为 21 个时段，后十一个时段长各为一

个月（以三十天计），前十个时段总长一个月，依次分别为 0.083, 0.083, 0.124, 0.25, 0.46, 1, 2, 3, 7, 16 天。对应于每级流变效应的结点力加上以后，在流变计算中考虑可能引起的新的破坏，但不再进行应力转移迭代过程。

基坑的开挖是一个应力的卸荷过程，开挖后的应力状态可以看成是卸荷力引起的应力状态与开挖前初始应力状态迭加的结果。而假定基坑开挖前岩体在初始应力状态下流变已趋稳定，所以认为引起流变的应力应该是仅仅对应于卸荷的那一部分应力状态，即是发生流变当时的应力值与初始应力值之差。

在我们关于岩石平面应变问题的流变计算里，暂不考虑 Z 方向的流变特性，但在流变过程中，由于  $\sigma_x, \sigma_y$  的改变可以引起  $\sigma_z$  的改变。为了节省内存，对于节理单元暂只考虑 212 软弱夹层的流变特性。

根据在工地进行的野外弱面流变试验资料， $\bar{\varphi}(t)$  曲线可用下式近似表达

$$\bar{\varphi}(t) = (0.34t^{-2.1} + 1.774t^{-1.307} + 7.25t^{-0.002}) / 486 \quad (16)$$

式中 t 以天为单位， $\bar{\varphi}(t)$  以厘米/天为单位（图 9）。七天以后的  $\bar{\varphi}(t)$  函数我们取为  $\bar{\varphi}(7)$ ，在本文的讨论中，我们还将就完全取用 (16) 式以及一天后  $\bar{\varphi}(t)$  取用  $\bar{\varphi}(1)$  的情况进行试算对比。

岩石流变特性缺乏现场的试验资料，暂按等速流变处理。根据现场变形观测资料，

在基本方案中选取  $\frac{3\epsilon^0}{2\sigma_0} = 2.5 \times 10^{-7}$  厘米<sup>2</sup>/公斤·天，这与有关资料中同类型岩石的流变参数在量级上是一致的。

### (二) 计算结果

图 10 给出了在下面讨论中将要提到的一些特征部位。

图 10 中的 C 点处于基坑底部开挖后 212 软弱夹层的出露处，是一个有代表性的部位，该处在基坑开挖后因流变而产生的错动量由表二给出。

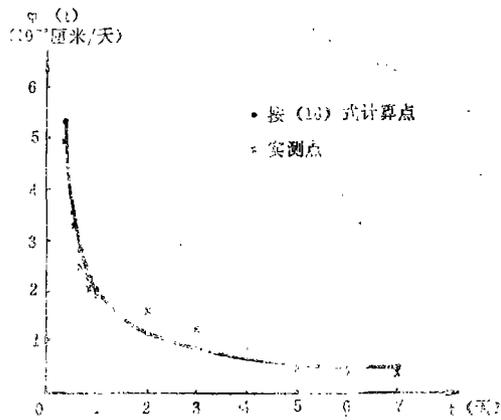


图 9、 $\bar{\varphi}(t)$  函数曲线

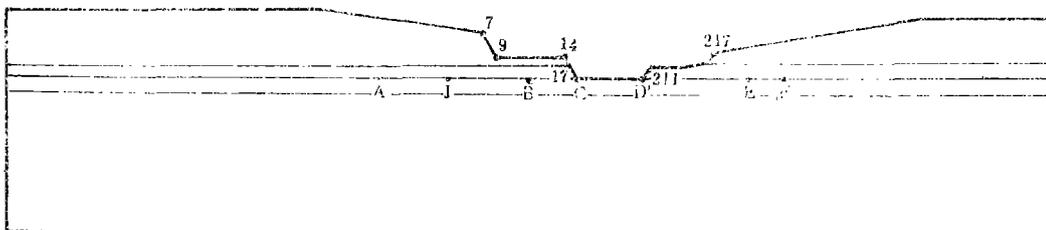
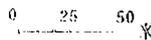


图 10、计算图形中的某些特征位置

C 点处软弱夹层错动流变值

表 2

流变时间(天)	1	7	14	30	90	180	270	360
流变错动量(cm)	0.04	0.07	0.09	0.14	0.33	0.71	1.15	1.63

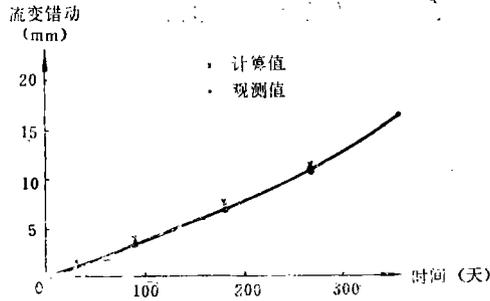


图11、C点处软弱夹层流变错动曲线(观测资料根据文献〔7〕整理)

它和实测资料十分一致(图11)

计算结果中基坑表面某些点的流变位移值由表三给出,表中  $u$  表示  $x$  方向位移,  $v$  表示  $y$  方向位移,对应于流变时间为 0 的一栏表示基坑开挖瞬时各点的位移量。

基坑表面某些点的流变位移值(单位:厘米)

表 3

点号	位移分量	流 变 时 间 (天)				
		0	1	30	180	360
7	$u$	5.32	5.35	5.53	6.48	7.70
	$v$	1.54	1.54	1.54	1.57	1.62
9	$u$	6.44	6.48	6.66	7.66	9.05
	$v$	2.22	2.22	2.26	2.50	2.85
14	$u$	9.24	9.28	9.34	10.99	12.92
	$v$	3.63	3.64	3.70	4.10	4.63
17	$u$	10.23	10.27	10.48	11.70	13.44
	$v$	4.16	4.17	4.26	4.81	5.52
211	$u$	-10.61	-10.68	-10.88	-12.02	-13.50
	$v$	4.49	4.50	4.62	5.26	6.04
217	$u$	-6.64	-6.68	-6.87	-7.95	-9.43
	$v$	2.73	2.73	2.78	3.13	3.64

在流变十个月后基坑表面各点位置见图12。

软弱夹层中某些部位应力随时间的变化由表四给出。

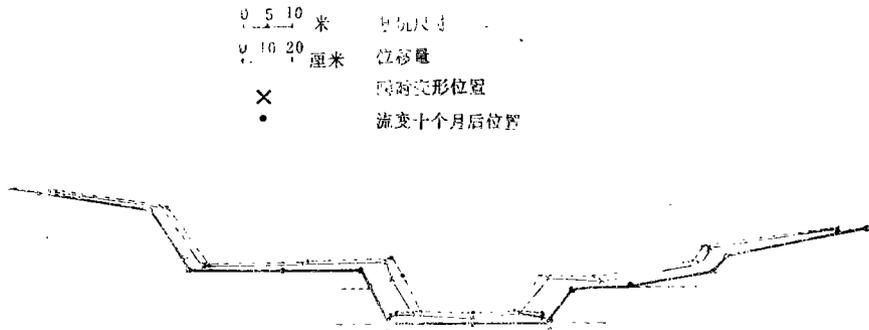


图 12、基坑表面各点的瞬时变形和十个月后的流变变形

软弱夹层某些部位应力随时间的变化

表 4

位置 (参见 图 10)	应力分量 (kg/cm <sup>2</sup> )	流 变 时 间 (天)							
		0	1	14	30	90	180	270	360
A	$\tau$	1.55	1.48	1.47	1.45	1.36	1.29	1.29	1.30
	$\sigma$	-6.01	-6.01	-6.00	-5.98	-5.94	-5.89	-5.86	-5.84
B	$\tau$	0.57	0.29	0.34	0.36	0.43	0.40	0.57	0.40
	$\sigma$	-1.21	-1.21	-1.24	-1.27	-1.39	-1.50	-1.54	-1.61
C	$\tau$	1.36	1.36	1.39	1.43	1.57	1.71	1.82	1.92
	$\sigma$	-5.11	-5.11	-5.26	-5.46	-6.14	-6.82	-7.37	-7.84
D	$\tau$	-0.86	-0.84	-0.87	-0.86	-0.94	-1.00	-1.05	-1.09
	$\sigma$	-2.65	-2.64	-2.70	-2.77	-3.02	-3.33	-3.57	-3.75
E	$\tau$	-1.38	-1.37	-1.38	-1.38	-1.39	-1.35	-1.30	-1.35
	$\sigma$	-5.21	-5.21	-5.20	-5.18	-5.12	-5.03	-5.01	-5.06
F	$\tau$	-1.57	-1.56	-1.57	-1.57	-1.57	-1.42	-1.52	-1.53
	$\sigma$	-6.12	-6.12	-6.11	-6.09	-6.02	-5.96	-5.89	-5.85

表中正应力取负值表示受压，剪应力取正值表示软弱夹层上部岩体相对于下部岩体发生朝 X 方向的错动状态。

在流变一年后图 10 中 JC 地段软弱夹层相对错动量变化情况见图 13。

从计算结果可以看出，总的说来在流变过程中，岩体中的应力值将会发生变化，但变化量不大。流变的过程也是一个应力调整的过程，有的略有上升的趋形，有的略有下降的趋势。基坑表面各点的流变情况主要取决于岩体的流变特性，由于我们在本计算中基本上是按等速流变处理的，所以基坑表面各点的流变位移也基本上接近随时间按比例发展。

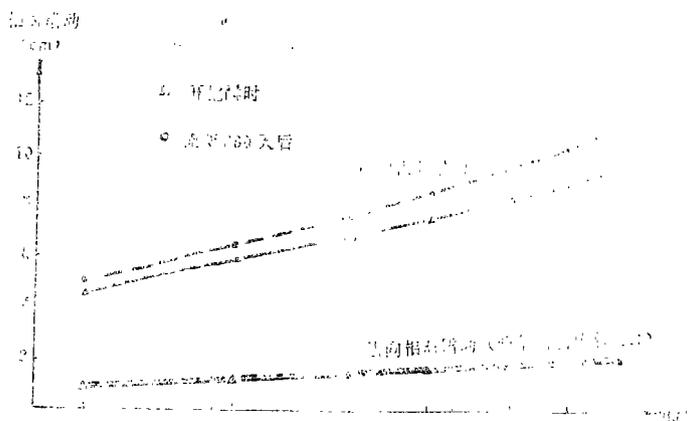


图13、JC地段(图10)软弱夹层相对错动流变图

### (三) 讨 论

为了讨论前面提到的关于节理单元流变处理的两种方式以及流变特性参数对于计算结果的影响,我们除了基本方案外还进行了其它十一个题的计算。各题条件见表五。

各 题 计 算 条 件 表

表 5

题号	节理单元处理方式	节理单元流变特性参数 $V$ (天)	岩石单元流变特性参数 $\frac{3\dot{\epsilon}_e}{2\sigma_e}$	备 注
21	I	7	0	
22	I	7	$2.5 \times 10^{-7}$	即基本方案
24	I	7	$1.0 \times 10^{-7}$	
25	I	7	0	采用考虑应力历史的流变量的计算方法
23	I	400	0	
10	II	7	0	
17	I	7	$0.3 \times 10^{-7}$	
18	I	7	$0.55 \times 10^{-7}$	
16	I	7	0	采用考虑应力历史的流变量的计算方法
13	I	1	0	
15	I	400	0	

节理单元流变特性当时间  $t \leq v$  时,采用(16)式所示  $\bar{\varphi}(t)$  的表达式,当  $t > v$  时,取用  $\bar{\varphi}(v)$ 。各题在C点处(图10)软弱夹层错动量的变化情况由表六给出。

表六给出的是相对于基坑刚成型时错动的流变增量。在本计算中,基坑开挖瞬时C点位置软弱夹层错动量为9.53厘米,与文[1]中的8.58厘米略有差异,这是由于在文[1]的

各题在 C 点位置软弱夹层错动流变量对照表 (单位: 厘米) 表 6

题号	流 变 时 间 ( 天 )								
	0	1	7	14	30	90	180	270	360
21	0.0	0.04	0.05	0.06	0.09	0.17	0.28	0.37	0.45
22	0.0	0.04	0.07	0.09	0.14	0.33	0.71	1.15	1.63
24	0.0	0.04	0.06	0.07	0.11	0.24	0.48	0.75	0.85 <sup>(300天)</sup>
25	0.0	0.01	0.02	0.02	0.04	0.13	0.24	0.34	0.43
23	0.0	0.04	0.05	0.06	0.07	0.09	0.11	0.12	0.13
10	0.0	0.04	0.05	0.06	0.09	0.16	0.27	0.36	0.44
17	0.0	0.04	0.06	0.07	0.10	0.23	0.43	0.65	0.87
18	0.0	0.04	0.06	0.08	0.12	0.29	0.59	0.93	1.28
16	0.0	0.01	0.02	0.02	0.04	0.12	0.23	0.33	0.42
13	0.0	0.04	0.08	0.12	0.21	0.48	0.79	0.99	1.12
15	0.0	0.04	0.05	0.06	0.07	0.09	0.11	0.12	0.13

计算中, 基坑开挖卸荷分三个阶段进行, 而在本计算中基坑开挖卸荷是一次形成的。

1. 在 21 与 22 两题中, 节理单元具有相同的流变特性, 但 21 题没有考虑岩石的流变性能, 这样它在一年后 C 点处的流变量将仅 4 毫米左右, 远小于实测值。从 10、13、15 三个题的比较亦可以看出, 若是完全不考虑岩石流变特性, 软弱夹层流变特性参数的大小对于整体流变错动量的影响将是有限的, 根据 (16) 式, 方案 13 在一天后即按  $\bar{\varphi}(1)$  取值进行等速流变, 其速度达到第 10 题  $\bar{\varphi}(7)$  等速流变速度的 4.5 倍, 但在流变一年后, C 点处流变错动量 13 题只比 10 题大 1.5 倍。

从上面的讨论可以看出, 在通常的流变试验中, 虽然软弱夹层等弱面的流变特性要比岩石的流变特性显著得多, 但这并不意味着在考虑具体工程的流变问题时可以忽略岩石的流变特性。事实上, 岩体中各部分的变形都是互相影响、互相制约的。就以算例中的 C 点处的错动流变来说, 虽然该处软弱夹层的存在是产生这种错动的前提条件, 但其错动量并不是仅由该软弱夹层的流变特性所能决定, 而是整个这个区域岩石和软弱夹层等流变特性的综合反映, 仅仅软弱夹层的流变特性是不可能产生这样大的流变错动量的。

2. 从 21 与 10、25 与 16、23 与 15 三对共六个题的比较可以看出, 前面提到的关于节理单元流变量的两种处理方式 I 和 II 在本算例中结果差别很小。

3. 从 10、17、18 以及 21、22、24 两组共六个题的比较可以看出, 岩石流变特性参数的量值对于软弱夹层错动量有很大影响。

4. 从 16、10 以及 25、21 两组共四个题的比较可以看出, 尽管采用考虑应力历史的流变量的计算方法与不考虑应力历史的计算方法两者原理不同, 但在本算例中, 由于在流变过程中应力变化不大, 所以它们的结果差别不大。但在考虑应力历史的流变量的计算过程中, 由

于(16)式曲线在 $t$ 较小时变化剧烈,时段的划分必须更加注意,若分段过粗或分法不当都会产生比较大的计算误差。

#### 四、结 论

1. 本文提出了考虑岩体中软弱夹层等弱面的弹—塑—粘特性的实用分析方法,并结合某工程基坑开挖后发生层面错动的实例,参照现场实测资料进行了数值计算,分析结果与实测结果符合较好。

2. 本文在确定流变量时讨论了不考虑应力历史和考虑应力历史两种方法,计算分析表明,在外荷载没有变化、流变过程中应力变动不大的情况下,两种方法的计算结果是近似的。

3. 在某岩体工程中,虽然软弱夹层的存在是造成层间错动及错动流变的前提条件,但软弱夹层层间错动的流变量并不仅仅取决于该软弱夹层的流变特性,而是取决于整个这个区域岩石和软弱夹层的整体的流变特性;在该工程算例中仅由于软弱夹层流变特性产生的层间错动流变量仅为实测流变量的 $\frac{1}{4}$ 。

#### 参 考 文 献

- [1] 丰定祥、扬家岭、葛修润,“某水利枢纽电站厂房基坑岩体位移变形有限元分析”,《岩土工程学报》,1980年,第1期。
- [2] 许东俊,“软弱岩体流变特性及长期强度测定法”,“岩土力学”,1980年,第1期。
- [3] Ke Hsu—Jun (葛修润),“Non—linear analysis of the mechanical properties of joint and weak intercalation in rock” proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics Vol.2/Aachen/2—6 April 1979.
- [4] Ge Xiu-xun (葛修润),“Non—linear analysis of joint element and its application in rock engineering” Int. J. of Num. and Analyt. Methods in Geomechanics(即将发表)。
- [5] KLEIN, J. “The application of finite elements to creep problems in ground freezing” proceedings of the 3rd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics Vol.1/Aachen/2—6 April 1979.
- [6] “J R 程序及其说明”,中国科学院武汉岩体土力学研究所 1979.6.
- [7] Tseng Chao—min, Chou Hsing—chih and Hsu Jui—chun “Rock—mass deformations in gentle and multiple weakly—intercalated bedrocks during deep excavating of the foundation pit” (此文曾在1978年9月于西班牙马德里召开的第三届国际工程地质会议上交流)。