

# 万家寨引黄工程 7# 土质引水隧洞变形的有限元分析

王 钊 黄 杰 咸付生 吴梦喜

**摘 要** 在山西省万家寨引黄入晋工程总干线 7# 隧洞的开挖和衬砌的应力应变分析中, 为确定土体  $c$ 、 $\mu$  值和邓肯 - 张模型参数, 分别进行了加载试验和卸载试验, 本文对用两种试验获得的模型参数进行有限元变形分析的结果进行比较。

**关键词** 卸载试验 邓肯 - 张模型 隧洞变形 有限元分析 万家寨引黄工程

**中图分类号** TU 43 **文献标识码** A **文章编号** 1007-6980(2002)03-0010-04

万家寨引黄工程隧洞总干线 7# 隧洞位于偏关县葛家山至水泉河之间, 总长约 9.21 km, 其中土洞长 2.685 km, 隧洞开挖直径 6.012m, 衬砌内径 5.46, 衬砌厚 0.25 m, 每环由 4 块六角形管片组成, 管片与洞壁间用豆砾石灌浆角形管片组成, 管片与洞壁间用豆砾石灌浆回填。7# 隧洞部分穿过地质年代为第四纪(Q<sub>3</sub>)黄土, 黄土的颗粒组成和物理性质指标参见表 1 和表 2。土名为黄土状粉土。为分析计算隧洞和管片在周围土体作用下, 在通水和放空情况下的应力和变形情况, 对 7# 土洞进行有限元分析。在确定土的  $c$ 、 $\mu$  值时, 分别取原状土进行了卸载试验和加载试验, 并计算出邓肯 - 张模型中的  $k$ 、 $n$ 、 $R_f$ 、 $G$ 、 $F$ 、 $D$  进行比较。对用两种试验获得的模型参数进行有限元变形分析的结果进行比较。

表 1 黄土的颗粒组成

粒组/mm	2.0~0.05	0.05~0.005	<0.005
百分比/%	34.5	59.8	5.0

表 2 黄土的物理性质指标

相对密度	密度/g·cm <sup>-3</sup>	孔隙比	塑限/%	液限/%
2.70	1.64	0.84	16.9	25.7

## 1 土的本构模型和加卸载准则

### 1.1 土的本构模型(邓肯 - 张模型)

邓肯提出的计算模型中包含切线弹性模量  $E_t$  和切线泊松比  $\mu_t$ , 计算公式如下:

$$E_t = k p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n (1 - R_f \cdot S)^2 \quad (1)$$

$$S = \frac{(1 - \sin \phi) (\sigma_1 - \sigma_3)}{2 c \cos \phi + 2 \sigma_3 \sin \phi} \quad (2)$$

$$\mu_t = \frac{G - F \lg(\sigma_3 / p_a)}{\left( 1 - \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{k p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n (1 - R_f S)} \right)^2} \quad (3)$$

式中,  $E_t$  为切线弹性模量(MPa);  $S$  为应力水平, 定义为偏应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  与破坏偏应力  $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$  之比;  $\mu_t$  为泊松比, 当  $\mu_t < 0.5$  时, 取  $\mu_t = 0.49$ ;  $p_a$  为大气压力,  $p_a = 100$  kPa;  $k$ 、 $n$ 、 $R_f$ 、 $G$ 、 $F$ 、 $D$  为计算参数。

### 1.2 土的加卸载准则

土的抗剪强度不仅与土质有关, 还与试验时的排水条件、剪切速度、应力状态和应力历史等许多因素有关, 因此必须首先判断加卸载应力状态。

定义应力状态函数:

$$SS = S (\sigma_3 / p_a)^{0.25}$$

土单元受荷历史最大的  $SS$  值定义为  $SS_m$ , 按现有  $\sigma_3$  计算条件最大应力水平

$$S_c = SS_m / (\sigma_3 / p_a)^{0.25}$$

将  $S_c$  与单元当前的应力水平  $S$  比较, 当  $S > S_c$  时为加载, 当  $S < 0.75 S_c$  时, 为卸载。取式(4)计算卸载弹性模量:

$$E_{ur} = k_{ur} p_a \left( \frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \quad (4)$$

式中,  $k_{ur} = 1.2 k$ , 当  $0.75 S_c < S < S_c$  时, 取式(5)计算弹性模量  $E_t$ :

$$E_t = E_t + 4(S_c - S)(E_{ur} - E_t) / S_c \quad (5)$$

## 2 土的加卸载试验

### 2.1 目的

隧洞开挖实际上是一个卸载过程, 而邓肯 - 张模型中的参数  $k$ 、 $n$ 、 $R_f$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $D$  是由加载试验整理得到的, 为了模拟试验情况, 对洞周土体和处于卸载状态的土单元, 应采用卸载试验确定抗剪强度和模型参数, 并与加载试验得到的结果比较。

### 2.2 卸载试验

卸载试验采用的仪器为 DTC - 158 - 1 型共振柱, 试样共 4 组, 编号分别为 1# - 11 - 1、1# - 14 - 4、2# - 8 - 3 和 2# - 14 - 2。试样尺寸为 50 mm × 100 mm, 试验固结围压为 300, 500, 700 kPa 三级。剪切采用应力控制的方法, 其中 1# - 11 -

1、2# - 8 - 3 的轴向压力控制为固结压力,围压逐步降低直至试样破坏,1# - 14 - 4、2# - 14 - 2 固结后加大轴向压力至 2 倍的固结压力(模拟原位的应力状态),再逐步降低围压直至试样破坏。其中 2# - 14 - 2 试样的应力和应变曲线如图 1 所示。邓肯 - 张模型参数列于表 3,  $E_t$  和  $\mu_t$  列于表 4。

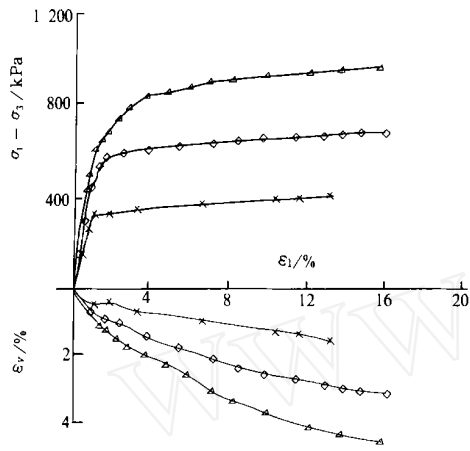


图 1 卸载试验应力应变关系曲线

× 300 kPa      o 500 kPa      Δ 700 kPa

表 3 加载试验的邓肯 - 张模型参数

	$c$	$k$	$n$	$R_f$	$G$	$F$	$D$
	/ kN · m <sup>-2</sup>		/ °				
加载	0	30.1	426	0.19	0.89	0.45	0.21
卸载	5	38	216	1.13	0.99	0.42	- 0.02

### 2.3 加载试验

加载试验共分 10 组,在低压与高压应变控制式三轴剪切仪上完成,试样尺寸为 39.1 mm × 80 mm,围压分别采用 100、200、400kPa,100、300、500 kPa 和 300、500、700 kPa 三种,上覆土层厚度大者采用较大围压。剪切速率为 0.08 mm/min。其中 2# - 14 - 2 试样的应力和应变曲线如图 2 所示。邓肯 - 张模型参数列于表 3,  $E_t$  和  $\mu_t$  列于表 4。

表 4 加卸载试验的  $E_t$  和  $\mu_t$  的比较

试验方法	参数	围压 / kPa		
		300	500	700
加载	$E_t / \times 10^4$ MPa	6.30	6.94	7.93
	$\mu_t$	0.35	0.31	0.27
卸载	$E_t / \times 10^4$ MPa	6.74	12.6	18.0
	$\mu_t$	0.431	0.433	0.436

## 3 加载和卸载的参数比较

### 3.1 模型参数

从表 3 可见,卸载试验求得的  $c$ 、 $\mu_t$  值较大,4 个试样的平均  $c$  值基本相同,而  $\mu_t$  值大 7.6°。其他模型参数  $k$ ,  $n$ ,  $R_f$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $D$  的值不易比较,可用式(1)和(3)计算得  $E_t$  和  $\mu_t$  进行比较。

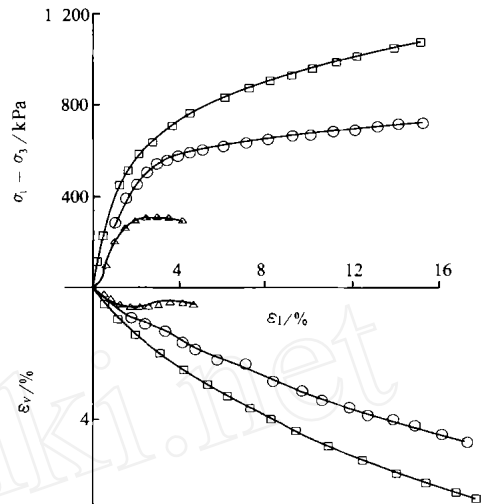


图 2 加载试验应力应变关系曲线

□ 700 kPa      ○ 500 kPa      △ 300 kPa

### 3.2 $E_t$ 和 $\mu_t$ 的比较

考虑到卸载时土体的硬化具有较大抵抗变形的能力,常常把加载试验得到模型参数代入式(4)来计算弹性模量。也可把卸载试验得到的模型参数直接带入邓肯 - 张模型计算。下面用这两种方法计算进行比较:

选用围压  $\sigma_3$  分别为 300, 500, 700 kPa, 并取  $\sigma_1 - \sigma_3 = 50$  kPa, 可以算出 3 组不同的  $E_t$ ,  $\mu_t$  (见表 4)。不难看出采用卸载试验模型参数直接计算所得的  $E_t$  比用加载试验得到模型参数代入公式(4)得到的  $E_t$  大,同时卸载时的泊松比也比加载时大。

## 4 有限元变形计算结果比较

### 4.1 网络的划分

在进行有限元计算时,由隧洞从内向外依次为,三圈管片单元,两圈豆砾石单元,土单元。单元的划分见图 3。

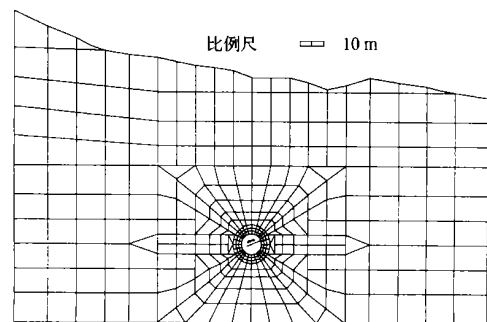


图 3 7# 洞 0+63 断面有限元计算网络

### 4.2 计算方案和施工模拟

#### 4.2.1 计算方案

- (1) 断面堆积形成过程产生的初始应力;
- (2) 隧洞开挖引起的应力释放和洞周位移分布;
- (3) 管片和回填豆砾石在其自重和周围松动土压力作用下产生的应力和变形;

(4) 隧洞通水放空等工况下管片的位移和应力。

其中有隧洞开挖释放荷载法和松动土压力的施加。

4.2.2 隧洞开挖的释放荷载法

释放荷载的概念是由邓肯在 1963 年提出的,其基本思想是:开挖引起的应力和位移的变化,起因于开挖边界应力解除的结果,即在开挖边界上作用一卸荷结点荷载,其大小等效于原来作用在该边界上的边界初始应力,但方向相反。将释放荷载法用于隧洞开挖,其步骤如下:

(1) 将外边界范围取得足够大,例如大于开挖洞径的 3~4 倍。

(2) 计算山体堆积过程,未开挖前的初始应力场  $\{ \sigma \} = [ x, y, x_3 ]^T$ 。

(3) 据初始应力计算开挖边界的面力  $x, y$

$$\begin{cases} x = x_1 \cos \alpha + x_2 \sin \alpha \\ y = y_1 \sin \alpha + y_2 \cos \alpha \end{cases}$$

式中,  $\alpha$  为边界单元外法线与  $x$  轴夹角。

(4) 由面力计算等效结点力,再反向作为荷载施加于洞壁,并计算产生的应力增量  $\{ \sigma \}$  和位移增量  $\{ \delta \}$ 。

(5) 开挖后的应力场等于初始应力加应力增量,即  $\{ \sigma \} = \{ \sigma_0 \} + \{ \sigma \}$ ,而  $\{ \delta \}$  是开挖引起的,正是洞壁和周围土体的变形。

4.2.3 松动土压力

由于隧洞上方土的成拱作用,隧洞衬砌后,作用在管片上的土压力并不等于上方土的自重,而是取决于上方松动土体的压力。太沙基曾用试验和理论推导,得出松动土体的范围,其高度(从隧洞水平直径向上)约为 3 倍的洞径。根据松动土的高度,并假设静止土压力系数  $K_0 = 1 - \sin \phi$ ,可以计算出衬砌的外压力,作为结点荷载计算管片的应力和位移。

4.3 隧洞的变形分析和比较

用卸载试验参数求得的隧洞开挖洞周位移和管片安装在松动土压力作用下管内壁的位移分别表示于图 4 的左

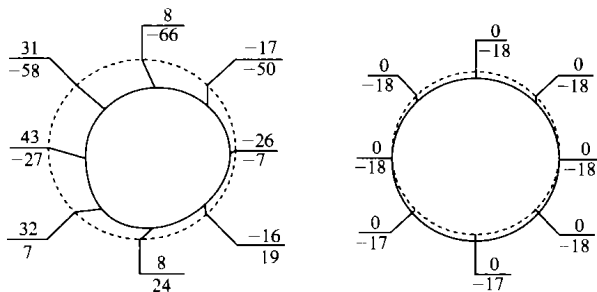


图 4 7# 洞 0+63 断面位移(采用卸载试验模型参数)

右两图,用加载试验配合加卸载准则计算得到的位移分别见图 5 的左右两图。图中虚线是洞壁和管片内壁,虚线圆上共给出 8 点的位移矢量,并用分数表示位移的大小,其中,分子为水平位移(向右为正),分母为竖向位移(向上为正),将位移矢量连成实线。可见隧洞洞顶的位移向下,洞底向上,洞的高度减小;管片安装后,因松动土压力是对称施加的,其位移基本对称。现列表比较两种计算结果的差别(见表 5 和表

6)。可以看出,在隧洞开挖洞周位移计算中,采用卸载试验模型参数计算的洞高的减少为 90 mm,比采用加载试验参数的小 19 mm;而在施加松动土压力管壁位移的计算中,采用加载试验模型参数计算的宽度增加 1 mm,而用卸载试验参数计算的宽度基本不变。

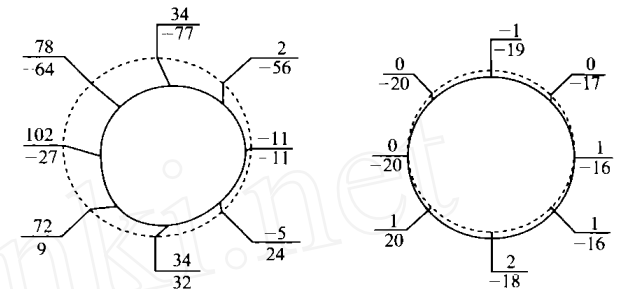


图 5 7# 洞 0+63 断面位移(采用加载试验模型参数)

从表中数据还可看出卸载模型计算的位移较小,例如,隧洞竖向变形仅为加载模型计算得的 0.82 倍,水平向变形约为 0.61 倍,此外,水平方向位移的分布更为合理,表现在因地表倾斜引起的洞壁左侧向右位移大于洞壁右侧向左的位移(参见表 5)。其中卸载试验相差较小,43 和 -26,而对比值 102 和 -11。此外,松动土压力作用下管片位移的对称性也较好(见表 6)

表 5 洞壁位移比较 mm

试验方法	洞顶		洞底		高度	洞左		洞右		宽度
	$U_x$	$U_y$	$U_x$	$U_y$	减少	$U_x$	$U_y$	$U_x$	$U_y$	减少
加载试验	34	-77	34	32	109	102	-27	-11	-11	113
卸载试验	8	-66	8	24	90	43	-27	-26	-7	69

表 6 管片内侧位移比较 mm

试验方法	管顶		管底		高度	管左		管右		宽度
	$U_x$	$U_y$	$U_x$	$U_y$	减少	$U_x$	$U_y$	$U_x$	$U_y$	减少
加载试验	-1	-19	2	-18	1	0	-20	1	-16	-1
卸载试验	0	-18	0	-17	1	0	-18	0	-18	0

5 结 论

为考虑卸载状态土的应力应变关系,可以用加载试验配合加卸载准则获得模型参数,也可直接用卸载试验求取模型参数,从山西万家寨粉质黄土的加卸载试验结果的比较和隧洞变形计算结果的比较,可以看出:

(1) 由卸载试验获得的抗剪强度较高,其中  $c$  值基本不变,而  $\phi$  值平均增大  $7.6^\circ$ 。

(2) 卸载试验得到的  $E_t$  和  $\mu_t$  比较大,且随  $\sigma_3$  的增大,  $E_t$  和  $\mu_t$  的增大更明显。

(3) 用卸载试验的模型参数计算得到的位移较小,且位移的分布更合理。建议对于隧洞和土坡开挖及处于卸载状态下的土单元,应用卸载试验求取模型参数,进行有限元分析。

(4) 可以用弹性理论边界条件公式(6)计算开挖边界的释放荷载。

(下转第 49 页)

言编写, 它们是结构计算宝贵的资源, 如果要将以前所有的 Fortran 语言用 VBA 改编, 其工作量无疑是巨大的, 而且不利于充分利用过去工作成果, 最理想的方案是: 利用 VBA 与 Fortran 混合编程, 把 Fortran 编译成动态链接库, 用 VBA 开发用户界面及编写调用动态链接库的接口程序。从而实现 Fortran 程序与 VBA 程序之间的数据传递<sup>[2]</sup>。

#### 4 扩展数据的应用

在 AutoCAD 的图形文件中, 除了保存图形本身的各种数据以外, 还可以保存用户的数据。这样, 在 VBA 程序中的某些数据可以不必要单独作为外部数据文件保存, 而可以直接存储在图形文件中。利用扩展数据可以达到该功能。在前期处理中, 可以对每个单元存储单元信息(包括单元号、材料号), 在有限元后处理中可以对单元储存应力信息(对板壳单元储存正应力、剪应力, 对梁、杆单元则储存轴向应力)。扩展数据的应用使图形和材料信息、应力信息相结合, 用户可以方便地检查网格数据, 按需要随意查询应力信息。以梁杆单元的信息查询为例。启动“梁、杆信息”对话框, 选中“储存信息”选择框和“应力信息”按钮, AutoCAD 屏幕显示梁格空间结构图, 同时命令行显示“Select an object”, 用户只要用鼠标点击任一杆, 则立即显示该单元的单元信息、材料信息、应力信息。当然, 也可以选中“标注应力值”选择框, 在空间图上标注应力值, 或根据后处理成果整理要求, 按截面显示各截面轴向应力图, 这里不再阐述。

梁杆单元的信息查询部分代码如下:

```
.....
L YL 为创建扩展数据的申请名
DataType (0) = 1001: Data (0) = "L YL"
.....
储存信息
111. Set XData DataType , Data
```

```
.....
提示用户选择物体
ThisDrawing. Utility. GetEntity returnobj , baseP-
nt , " Select an object "
returnobj. GetXData "L YL" , xtypeOut ,
xdataOut .....读取实体的扩展数据
Msgbox .....以消息框形式显示扩展数据
```

#### 5 结 语

(1) 有限元前后处理是有限元分析的重要环节, 利用 VBA 二次开发技术结合 AutoCAD 强大的图形功能, 以可视化和人机交互方式进行有限元前后处理, 大大改善了有限元前、后处理能力。

(2) VBA 编程简单, 功能强大, 具有丰富的信息资源; AutoCAD 2000 ActiveX 技术标准的应用以及日益完善的图形功能, 使基于 AutoCAD 平台的 VBA 开发技术充分显示了其优越性, 为专用有限元软件及其它 CAD 软件的开发提供了一条值得借鉴的途径。

#### 参 考 文 献

- 1 武君胜. 有限元分析计算的可视化技术及其实现. 计算机辅助工程, 1995(1)
- 2 张国宝. AutoCAD VBA 开发技术. 北京: 清华大学出版社, 2000
- 3 陈和群, 彭宣茂. 有限元微小程序与图形处理. 南京: 河海大学出版社
- 4 鲜飞军. 一种具有友好用户界面的专用有限元软件的开发方法. 计算机工程与应用, 2001(3)

#### 作者简介

任智峰 男 硕士研究生 河海大学水电学院 南京 210098  
 朱 杰 男 助工 南京水利水电规划设计院 南京 210008  
 秦海鹏 男 硕士研究生 河海大学水电学院 南京 210098

(收稿日期 2002-06-25)

(上接第 12 页)

#### 参 考 文 献

- 1 Duncan J. M., Seed R. B., Wong K. S. and Ozawa Y., A computer program for finite element analysis of dams. Research Repor No. SV/GT/84-03, 1984
- 2 王 钊, 王协群. 三峡工程二期围堰低高防渗心墙方案的有限元分析. 武汉水利电力大学学报, 1997(3)
- 3 周小文. 盾构隧道土压力离心模型试验及理论研究[学位论文]. 北京: 清华大学, 1999. 5

#### 作者简介

王 钊 男 教授 武汉大学 武汉 430072  
 苏 杰 男 研究生 武汉大学 武汉 430072  
 咸付生 男 高工 山西水利水电勘测设计院 太原 030024  
 吴梦喜 男 博 士 中国科学院力学研究所 北京 100080

(收稿日期 2002-06-29)