

土的卸载试验和在万家寨引水隧洞变形分析中的应用

Unloading test of soil and application in deformation analyses of Wanjia Zhai water transmission tunnel

王 钊^{1,2}, 黄 杰¹, 咸付生³, 吴梦喜⁴

(1. 武汉大学 土木建筑学院, 湖北 武汉 430072; 2. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084; 3. 山西水利水电勘测设计院, 山西 太原 030024; 4. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0525-03

作者简介: 王 钊(1945-), 男, 江苏扬州人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土工合成材料、非饱和土和数值分析的研究。

1 概 述^{*}

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间, 总长约9.21 km, 其中土洞长2.685 km, 隧洞开挖直径6.012 m, 衬砌内径5.46 m, 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回填。[#]7隧洞部分穿过地质年代为第四纪(Q3)黄土, 其颗粒组成和物理性质指标见表1、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, 及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 、 φ 值时, 分别取原状土进行了卸载、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。文中还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

Table 1 Size grading of loess

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

Table 2 Physical properties of loess

G_s	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	e	$w_p/\%$	$w_L/\%$
2.70	1.64	0.84	16.9	25.7

2 土的本构模型和加卸载准则

2.1 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变形模量 E_t 和切线泊松比 $\mu_t^{[1]}$, 计算公式如下:

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

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

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

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: μ_t

为泊松比, 当 $\mu_t \geq 0.5$ 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。

2.2 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 σ_3 计算条件最大应力水平 $S_c = SS_m / (\sigma_3/p_a)^{0.25/2}$ 。将 S_c 与单元当前的应力水平 S 比较, 当 $S \geq S_c$ 时, 为加载; 当 $S \leq 0.75S_c$ 时, 为卸载, 计算卸载弹性模量的公式为

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

式中 $k_{ur} = 1.2k$ 。当 $0.75S_c \leq S \leq S_c$ 时, 计算弹性模量 E_t 的公式为

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

3 土的加卸载试验

3.1 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, 为了模拟实际情况, 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。

3.2 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 $\Phi 50 \times 100$ 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二倍的固结压力(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见图 1。按式(1)~ (3)整理得邓肯- 张模型参数列于表 3, E_t 和 μ_t 列于表 4。

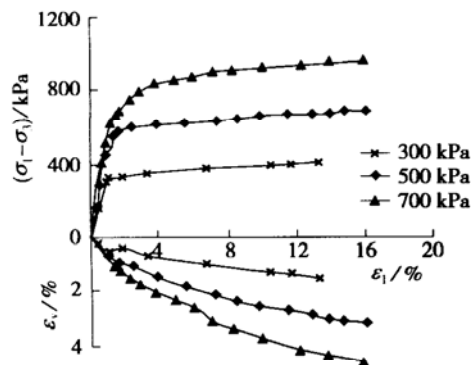


图 1 卸载试验应力应变关系曲线

Fig. 1 Curves of stress versus strain from unloading test

表 3 加卸载试验的邓肯- 张模型参数

Table 3 Parameters of Duncan- Chang model from loading and unloading tests

	c $/(\text{kPa})$	φ $/(^{\circ})$	k	n	R_f	G	F	D
加载	0	30.1	426	0.19	0.89	0.45	0.21	5.00
卸载	5	38.0	216	1.13	0.99	0.42	- 0.02	0.04

表 4 加卸载试验的 E_t 和 μ_t 的比较

Table 4 Comparison of E_t and μ_t from loading and unloading tests

试验方法	参数	围压		
		300 kPa	500 kPa	700 kPa
加载	$E_t / 10^3 \text{MPa}$	6.30	6.94	7.93
	μ_t	0.35	0.31	0.27
卸载	$E_t / 10^4 \text{MPa}$	6.74	12.6	18.0
	μ_t	0.431	0.433	0.436

3.3 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 $\Phi 39.1 \times 80 \text{ mm}$,围压分别采用 100 200 400 kPa, 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。按式(1)~ (3)整理得邓肯- 张模型参数列于表 3, E_t 和 μ_t 列于表 4。

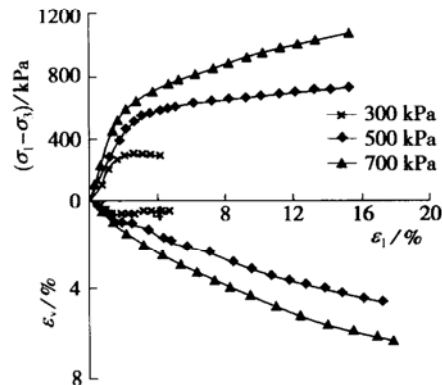


图 2 加载试验应力应变关系曲线

Fig. 2 Curves of stress versus strain from loading test

4 加载和卸载的参数比较

4.1 模型参数

从表 3 可见,卸载试验求得的 c , φ 值较大,4 个试样的平均 c 值基本相同,而 φ 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), (3)计算得 E_t 和 μ_t 进行比较。

4.2 E_t 和 μ_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 σ_3 分别为 300, 500, 700 kPa, 并取 $(\sigma_1 - \sigma_3) = 50 \text{ kPa}$, 可以算出三组不同的 E_t , μ_t 值(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。当 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 分别等于 100 kPa 和 200 kPa 时,具有相同规律。

5 有限元变形计算结果比较

5.1 网格的划分

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、两圈豆砾石单元和土单元。单元的划分见图 3。图中为四结点单元,其后被自动剖分为三角形单元。

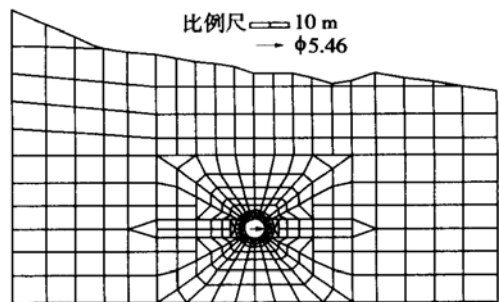


图 3 [#] 7 洞 0+ 63 断面有限元计算网格

Fig. 3 FEM mesh of section 0+ 63 in tunnel NO. 7

5.2 计算方案和施工模拟

(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。其中须说明的有隧洞开挖释放荷载法和松动土压力的施加。

(2) 隧洞开挖的释放荷载法

释放荷载的概念是邓肯 1963 年提出的,其基本思想是:开挖引起的应力和位移的变化,缘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,其步骤为:①将外边界范围取得足够大,例如大于开挖洞径的三四倍;②计算山体堆积过程,未开挖前的初始应力场 $\{\sigma_0\} = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]^T$;③据初始应力计算开挖边界的面力 x, y ,即

$$\begin{cases} x = \sigma_x \cos \alpha + \tau_{xy} \sin \alpha \\ y = \sigma_y \sin \alpha + \tau_{xy} \cos \alpha \end{cases} \quad (6)$$

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

(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^[3]。根据松动土的高度,并假设静止土压力系数 $K_0 = 1 - \sin \varphi$,可以计算得衬砌的外压力,作为结点荷载计算管片的应力和位移。

5.3 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后在松动土压力作用下管内壁的位移见图4(a), (b),用加载试验配合加卸载准则计算得到的位移见图5(a), (b)。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。现比较两种计算结果的差别(见表5, 6)。可看出,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。

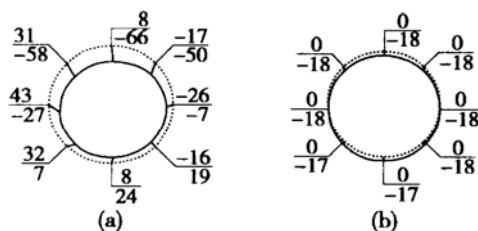


图4 #7洞0+63断面位移(采用卸载试验模型参数)

Fig. 4 Displacement of section 0+63 in tunnel NO. 7

从表中还可看出用卸载模型计算的位移较小,隧洞

竖向变形仅为加载模型计算位移的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,见表5。其中卸载试验相差较小,为43, -26 mm,而加载试验为102, -11 mm。此外,松动土压力作用下管片位移的对称性也较好。见表6。

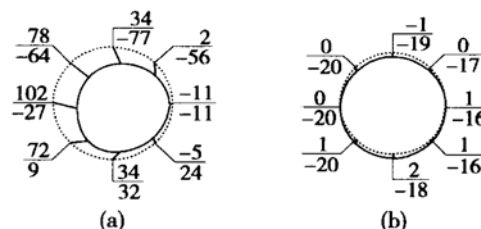


图5 #7洞0+63断面位移(采用加载试验模型参数)

Fig. 5 Displacement of section 0+63 in tunnel NO. 7

表5 洞壁位移比较

Table 5 Comparison of displacement on inner face of tunnel mm

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

表6 管片内侧位移比较

Table 6 Comparison of displacement on inner face of tunnel ring mm

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

6 结 论

为考虑卸载状态土的应力应变关系,可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 φ 值平均增大7.6°;②卸载试验得到的 E_t 和 μ_t 比较大,且随 σ_3 的增大, E_t 和 μ_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式(6)计算开挖边界的释放荷载。

参考文献:

- [1] Duncan J M, Seed R B, et al. A computer program for finite element analysis of dams (Research Report NO SV/GT/84-03) [R]. Department of Civil Engineering, Stanford University, 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[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(3): 1-6.
- [3] 周小文. 盾构隧道土压力离心模型试验及理论研究[D]. 北京: 清华大学, 1999.