

# 台湾软弱岩盘隧道变形预估系统数值模拟研究

## Research on numerical simulation of deformation of soft rockmass tunnels in Taiwan

李术才, 王书法, 朱维申, 李树忱  
(中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 基于大变形分析, 运用三维有限元方法研究了台湾地区 V、VI 类岩盘隧道在不同的地应力状态、岩石力学参数和开挖方法下, 隧道围岩变形、受力与诸计算条件的关系, 为隧道安全合理设计与施工提供依据。

**关键词:** 隧道; 有限元方法; 变形预估系统

中图分类号: TU 457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2001)05-0540-04

**作者简介:** 李术才, 男, 1965 年生, 中国科学院武汉岩土力学研究所研究员, 从事裂隙岩体力学特性及加固机理研究。

LI Shu-cai, WANG Shu-fa, ZHU Wei-shen, LI Shu-chen

(Institute of Rock and Soil Mechanical, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** On the basis of the method of large deformation analysis, the paper carries out a vast amount of 3-D FEM numerical simulation and prediction on the deformation and failure possibility of the rockmasses surrounding the tunnels under various geostress, mechanical parameter and excavating conditions in Taiwan. The rockmasses concerned belong to grade V and VI according to the Taiwan classification system of tunnel's surrounding rockmass. A series of curves that predict the rockmass deformation have been drawn and the conclusion reached is of significance to guiding both designing and constructing of tunnels in future.

**Key words:** tunnel; finite element method; deformation predict system

## 1 引言<sup>y</sup>

20 世纪 50 年代中期, 台湾为谋求经济加速发展, 陆续实施了大型建设计划, 其中包括大量的隧道工程。到 1995 年, 民用隧道长度已逾 670 余 km。目前台湾正积极推动的隧道工程有公路工程、铁路工程、捷运系统及水力和电力工程隧道。在隧道工程设计与施工中, 开挖方法与支护参数的选用对于地下结构物的安定有着直接和首要的影响, 合理的开挖方法与支护参数的确定取决于对地质条件、岩体类别、埋深大小、初始地应力场以及洞室形状、尺寸的研究。目前国内外在隧道工程设计中, 一般是根据必要的地质勘察资料, 按国际上常用的方法对围岩进行分类, 依照经验模拟拟定出相应的开挖方法与支护参数。这种方法简单粗略, 且不够科学, 主要原因是事先无法了解隧道施工过程中围岩-支护体系的力学动态, 如拱顶下沉、内空收敛、围岩与支护结构的受力等这样一些可以用来评定隧道稳定的重要资料和数据, 故提出的设计方案的可靠性就有相当的局限。为此, 中国科学院武汉岩土力学研究所和台湾中兴公司合作, 采用三维弹塑性有限元方法, 针对台湾地区的 V、VI 类围岩进行了研究, 提出了隧道变形的预估值, 为隧道安全合理设计与施工提供依据。

## 2 计算条件

### 2.1 计算参数

表 1, 2 为台湾中兴公司提供的台湾地区 V、VI 类

岩盘隧道的岩体力学参数。

### 2.2 计算工况

根据所考虑的影响因素, 设计了 8 组共 58 个工况, 各工况的简要情况见表 3。

## 3 隧道开挖变形的数值模拟

采用自行研制开发的用于小变形弹塑性分析的 EP-3D 程序和用于大变形弹塑性分析的 EPL-3D 程序对隧道变形进行数值模拟<sup>[1,2]</sup>, 大变形有限元方法的基本原理见文献[3]。

### 3.1 有限元网格

分析模型的有限元网格如图 1 所示。沿隧道的方向设为  $x$  轴, 在水平面上垂直于  $x$  轴的方向设为  $y$  轴, 水平面的垂向为  $z$  轴。计算区域的大小为: 在  $x$  轴的方向长 160 m, 在  $y$  轴的方向长 60 m, 在  $z$  的方向长 130 m。采用三维 8 节点等参单元, 共划分 7200 个节点和 6048 个单元。

### 3.2 隧道开挖模拟

开挖模拟采用“空气单元法”, 即对于开挖单元, 在开挖前与非开挖单元一样。开挖后, 将开挖单元的密度和体力设为 0, 弹性模量  $E$  变为一个很小的值(如只有原来弹性模量的  $10^{-6}$ , 甚至更小)。

标准开挖和非标准开挖的开挖方案完全采用甲方的设计, 开挖顺序见图 2。

表 1 岩体力学参数  
Table 1 Mechanical parameter of rockmass

岩性	埋深 75 m				埋深 150 m				埋深 300 m				埋深 500 m			
	$c$	$\varphi$	$\sigma_{cm}$	$E$	$c$	$\varphi$	$\sigma_{cm}$	$E$	$c$	$\varphi$	$\sigma_{cm}$	$E$	$c$	$\varphi$	$\sigma_{cm}$	$E$
	/MPa	/( $^{\circ}$ )	/MPa	/MPa	/MPa	/( $^{\circ}$ )	/MPa	/MPa	/MPa	/( $^{\circ}$ )	/MPa	/MPa	/MPa	/( $^{\circ}$ )	/MPa	/MPa
V 硬岩	0.17	48	0.88	1000	0.28	42	1.27	1000	0.46	37	1.84	1000	0.66	32	2.41	1000
V 中硬岩	0.14	42	0.64	600	0.23	37	0.92	600	0.38	31	1.33	600	0.53	27	1.74	600
V 软岩	0.09	29	0.30	400	0.14	24	0.43	400	0.22	19	0.63	400	0.31	16	0.82	400
VI 断层材料	0.05	25	0.16	200	0.10	23	0.30	200								

表 2 各案例岩盘挤压性岩盘( $\sigma_{cm}/p_0$ )  
Table 2 Ratio of squeezing degree of rock( $\sigma_{cm}/p_0$ )

岩性	岩盘状况	$\sigma_{cm}/p_0$			
		覆盖厚度 75 m	覆盖厚度 150 m	覆盖厚度 300 m	覆盖厚度 500 m
V 硬岩	$\sigma_c = 50$ MPa	0.470	0.339	0.245	0.193
V 中硬岩	$\sigma_c = 25$ MPa	0.339	0.245	0.177	0.139*
V 软岩	$\sigma_c = 5$ MPa	0.159	0.115*	0.084*	0.066*
VI 断层材料		0.013*	0.024*		

\* 表示  $\sigma_{cm}/p_0 \leq 0.15$ , 岩盘属高度挤压情形, 以大变形程序分析。

表 3 算例的分组情况简介  
Table 3 Summary of analyzed cases

组号	跨径/m	埋深/m	岩性	侧压力系数 $K$	施工工序	开炸影响	工况个数	大变形分析个数
A	10	75, 150, 300, 500	V 硬岩和中硬岩 VI 断层材料	1.0	标准开挖	无	14	6
B	10	75, 150, 300, 500	V 中硬岩 VI 断层材料	1.0	非标准开挖	无	6	3
C	15	75, 150, 300, 500	V 硬岩、中硬岩和软岩 VI 断层材料	1.0	标准开挖	无	14	6
D	15	75, 150, 300, 500	V 中硬岩 VI 断层材料	1.0	非标准开挖	无	6	3
E	10	75, 500	V 软岩 VI 断层材料	1.5	标准开挖	无	3	2
F	15	75, 500	V 中硬岩 VI 断层材料	1.5	标准开挖	无	3	2
G	10	75, 150, 300, 500	V 中硬岩 VI 断层材料	1.0	标准开挖	有	6	3
H	15	75, 150, 300, 500	V 中硬岩 VI 断层材料	1.0	标准开挖	有	6	3

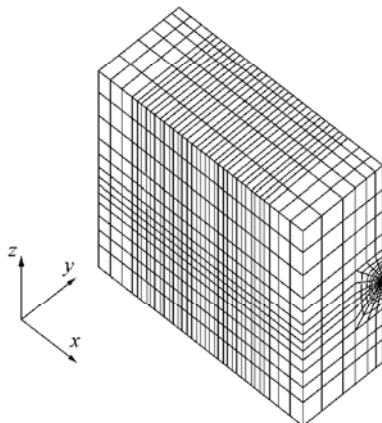
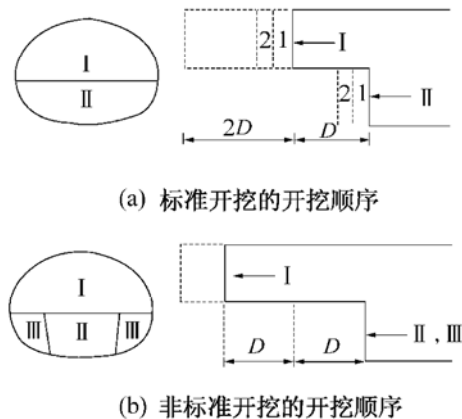


图 1 有限元网格图

Fig. 1 Mesh of computational model



(a) 标准开挖的开挖顺序

(b) 非标准开挖的开挖顺序

图 2 开挖顺序示意图

Fig. 2 Excavating order

### 3.3 支护模拟

对于锚杆支护,采用锚柱单元,其计算方法详见文献[4];对于钢拱架,采用等效计算方法计算,将钢拱架的弹性模量折算给与它相邻的混凝土,具体为

$$\text{折算后砼弹模} = \text{原砼弹模} + \frac{\text{钢拱架面积} \times \text{钢材弹模}}{\text{砼截面积}}$$

### 3.4 开炸影响模拟

开炸影响的模拟是通过降低开炸影响区岩体弹性模量和强度参数来实现的,具体做法如下。

(1) 开炸影响的范围: ①当洞径为 10 m 时,开炸影响区取为隧道洞壁内 1.0 m; ②当洞径为 15 m 时,开炸影响区取为隧道洞壁内 1.5 m。

(2) 降低开炸影响区岩体参数的准则: ①对于 V 类岩体,弹性模量  $E$ 、粘结力  $c$  和摩擦角  $\varphi$  均取原值的 0.8 倍; ②对于 VI 类岩体,弹性模量  $E$  取原值的 0.8 倍,粘结力  $c$  和摩擦角  $\varphi$  不变。

## 4 计算结果与分析

图 3 给出了 A 组工况中,不同围岩岩性的隧道顶拱下沉与跨径之比随隧道埋深变化的曲线;图 4 给出了在不同组工况中围岩为断层材料的隧道顶拱下沉随埋深变化的曲线;图 5 给出了在不同组工况中围岩为断层材料的隧道侧壁收敛随埋深变化的曲线。由于计算工况较多,其他曲线图比较类似,没有一一列出,详见文献[5]。

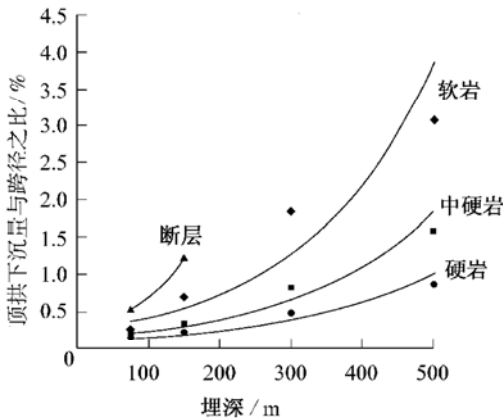


图 3 A 组工况中不同围岩岩性的隧道顶拱下沉与跨径之比随埋深变化曲线

Fig. 3 Curves for relevant settlement to buried depth for regime A

### 4.1 顶拱下沉量

(1) 当岩性越差、埋深越大和跨径越大时,顶拱下沉量越大。当埋深为 100 m 左右时,对于中硬岩,顶拱下沉量与跨径比值约为 0.15% ~ 0.50%;当埋深达 500 m 时,此比值约达 1.5% ~ 2.5%。对于软岩则可达 3.5% ~ 5.0%。

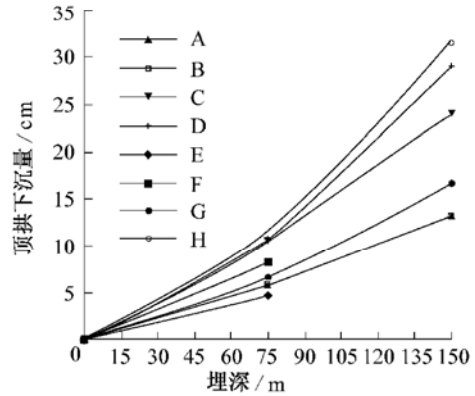


图 4 围岩为断层材料的隧道顶拱下沉随埋深变化曲线

Fig. 4 Curves for relevant settlement to buried depth

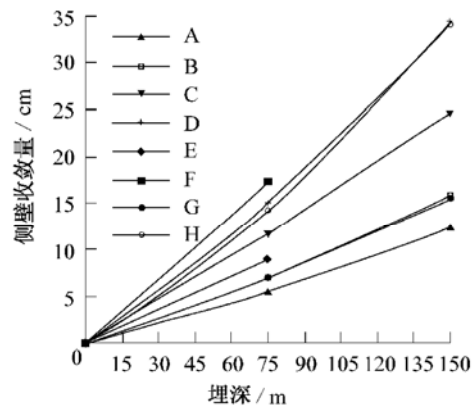


图 5 围岩为断层材料的隧道侧壁收敛随埋深变化曲线

Fig. 5 Curves for relevant convergence of side wall to buried depth

(2) 非标准开挖略大于标准开挖。对 10 m 跨径的隧道,非标准开挖的顶拱下沉量与标准开挖最大相差为 3.5% 左右;对 15 m 跨径的隧道,最大值约为 20% (近 5 cm)。

(3) 考虑不良开炸影响比无开炸影响者大。对 A 和 G 类型工况,顶拱下沉量平均增大 20%,最大增加量约为 42%,当跨径为 15 m 时最大增加量约 31%。

(4) 侧向地应力大时,多数情况下下沉量减小。但当条件恶劣时,由于支护破坏,隧洞失稳,情况则相反。

### 4.2 仰拱隆起量

其变化规律与顶拱下沉量类似,但其量值大于顶拱下沉值,且各种因素的影响比对顶拱影响大,岩性较差和埋深较大时更如此。对于中硬岩,当埋深从 100 m 增加到 500 m 时,仰拱隆起量与跨径比值从 0.2% 左右增长至 2.5%;对于软岩,此值可达到 8% 左右。

### 4.3 侧面壁收敛量

除侧向压力外其他各种因素对其影响的规律与顶拱下沉的情况类同,对中硬岩其侧壁收敛量与跨径比值与顶拱情况相似。

与标准开挖相比,非标准开挖的侧壁收敛量最大增加量约为 43%。对于 10 m 跨径的隧道,考虑开挖不

良影响时,侧壁收敛量增加量的平均值约为 20.5%,最大增加量为 37%;对于 15 m 跨径的隧道,考虑开挖不良影响时,侧壁收敛量增加量的平均值约为 19%,最大增加量为 43%。

15 m 跨径时侧壁最大收敛量与跨径比值比 10 m 跨径时平均增大 22%,最大增大量约为 60%。对于 10 m 跨径的隧道,侧向应力增大 0.5 倍时,收敛量增大了 42% 以上。

#### 4.4 围岩塑性区

围岩塑性区随着上述不利因素的增加而增大。当埋深大、围岩为软岩时,与 10 m 跨径相比,15 m 跨径隧道的塑性区厚度增大 1 倍以上,其量值已接近隧道之半径。当侧向地应力较高时,顶拱和仰拱塑性区增加,侧壁的塑性区则会减小。不良开炸影响对仰拱的塑性区影响较大。

#### 4.5 隧道纵向变形与塑性区稳定速率

(1) 当岩性较好或埋深不大时,隧道在轴方向的变形或塑性区的发展稳定较快,约在 3 个轮进内(1 个轮进约 3.33 m)即大体上不变。

(2) 当岩性较差或埋深大时,其稳定时间大约要 4~6 个轮进才能达到。

#### 4.6 混凝土衬砌的破坏分布

混凝土衬砌的破坏规律如下:

(1) 对所有工况,衬砌拉破裂多数发生在隧道的下半部,有些情况已发展到顶拱部位;

(2) 对于不同跨径,跨径越大,拉破坏范围情况稍好些;

(3) 非标准开挖方案衬砌受损程度比标准开挖小,这是因为受拉破坏的衬砌多在隧道的底拱或下部,而非标准开挖的下部施工明显滞后,做衬砌时围岩变形已得到较多的释放,因此后续的下部衬砌相对来说要承受较小的围岩变形,破坏也就小一些。

## 5 结 论

(1) 当埋深增大、岩性变差和跨径增大时,顶拱下沉量、仰拱隆起量和侧面壁收敛量都会增大。大部分

情况下,当埋深从 100 m 增至 500 m 时,顶拱下沉量、仰拱隆起量和侧壁收敛值与洞跨的比值从 0.15% 增加到 2.0% 左右。对软岩最大值可达 5%~8%。

(2) 非标准开挖时围岩收敛量一般都比标准开挖方案的数值大,平均增加 20%,最大的情况可相差 43%。但非标准开挖时衬砌的受拉破坏比标准开挖时要轻微些。

(3) 考虑不良开炸影响时,围岩位移平均增加 20%~30%,最大增加量可达到 42%。

(4) 一般情况下,当初始侧向地应力增大时,顶拱和仰拱收敛量会有所减小,侧壁收敛量会增加;但当埋深很大或岩性很差时,顶拱和仰拱收敛量反而因围岩的破坏而增加,对软岩或跨径较大情况侧壁收敛量有时增大到 43%。

(5) 塑性区的变化规律基本上体现为:当岩性越差、埋深越大和跨径越大时,塑性区也越大。非标准开挖、不良开炸影响和侧向地应力增加也会导致塑性区增加。

(6) 当岩性中等和埋深不大时,隧道工作面后方约 3 个轮进的长度处围岩的变形或塑性区发展即趋稳定;但当岩体软弱或埋深大时,则要达到 4~6 个轮进的长度,才趋于稳定。

参加本文工作的还有邱祥波、陈卫忠,此外本研究得到杨家岭研究员、张玉军副研究员和张中生博士的大力支持,在此一并致谢!

#### 参考文献:

- [1] Bath K J, Ozdemir H. Elastic-plastic large deformation static and dynamic analysis[J]. *Compt Struct*, 1976, 6(2): 81~92.
- [2] 朱伯芳. 有限单元法原理和应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [3] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理与数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [4] 张强勇, 朱维申, 程峰. 裂隙岩体损伤锚柱单元支护模型及其应用[J]. *岩土力学*, 1998, 19(4): 19~24.
- [5] 软弱岩盘隧道变形预估系统的数值模拟研究[R]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 2001.

## 欢迎订阅《水电能源科学》(季刊)

《水电能源科学》是由国家教育部主管、中国水力发电工程学会和华中科技大学共同主办的学术性刊物——中国水力发电工程学会会刊。刊物面向从事水、电、能源开发与研究的科研、教学、管理人员,主要刊登有关水、电、能源及其相关学科的新理论、新技术、新方法以及工程应用的新成果。

本刊大 16 开本,正文 88 页,每册定价 6 元,全年 24 元,各地邮局均可订阅,邮发代号 38-111。编辑部地址: 武汉华中科技大学; 邮编: 430074; 电话: 027-87542126; 传真: 027-87543892; E-mail: sdneyhmt@263.net。

(《水电能源科学》编辑部 供稿)