

# 挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究

刘志春, 朱永全, 李文江, 刘泮兴

(石家庄铁道学院, 河北 石家庄 050043)

**摘要:** 结合高地应力条件下挤压性大变形隧道——乌鞘岭隧道工程实例, 通过变形的现场量测结果, 分析了挤压性围岩隧道大变形的基本特征。采用室内试验及现场量测等手段, 综合分析确定了围岩物理力学参数, 定量分析了洞室周边产生塑性区的条件、塑性区及洞壁位移的影响因素、塑性区半径与洞壁位移的关系。以现场量测数据为依托, 结合理论计算, 参考以往类似隧道经验, 分别考虑了围岩的相对变形、强度应力比、原始地应力、弹性模量作为分级指标, 并提出了综合系数 $\alpha$ 指标, 采用综合指标判定法给出了大变形的分级标准, 以及相应的防治措施。

**关键词:** 挤压性围岩隧道; 大变形; 强度应力比; 塑性区; 分级标准

中图分类号: TU454; U456.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)05-0690-08

作者简介: 刘志春(1973-), 男, 河北景县人, 副教授, 从事隧道及地下工程的研究。E-mail: liuzhch01@163.com。

## Mechanism and classification criterion for large deformation of squeezing ground tunnels

LIU Zhi-chun, ZHU Yong-quan, LI Wen-jiang, LIU Pan-xing

(Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Based on a practical project of Wushaoling tunnel, a squeezing ground tunnel with high geostress conditions, the essential characteristics of squeezing ground tunnels were analyzed according to the monitored data. In terms of laboratory tests and in-situ monitoring, the physical and mechanical parameters of surrounding rock were synthetically established and analyzed. The condition for the generation of plastic zone around tunnels, the influencing factors of plastic zone and displacement of tunnels and the relationship between radius of plastic zone and displacement of tunnel were quantitatively analyzed. Based on the monitored data, theoretical calculation and experience of similar tunnels, considering relative deformation, strength stress ratio, ground stress, elastic ratio and comprehensive coefficient  $\alpha$  as classification indexes, the classification criterion and measures to prevent large deformation of squeezing ground tunnels were worked out.

**Key words:** squeezing ground tunnel; large deformation; strength stress ratio; plastic zone; classification criterion

## 0 引言

随着隧道工程技术的不断发展, 软弱围岩在高地应力作用下的挤压大变形隧道的工程实例越来越多。一些软岩、高地应力、挤压性围岩隧道的研究<sup>[1-10]</sup>, 由于受隧道与地层作用的复杂性、地质条件变化的多样性、地层参数的变异性、理论计算的不完善性等因素的影响, 未能提出统一的可操作的大变形分级标准。

笔者结合乌鞘岭隧道工程实例, 以室内试验、现场量测数据为依托, 结合理论计算, 并参考以往类似隧道经验, 分析了挤压性围岩隧道大变形的基本特征及机理, 提出了大变形分级标准(综合指标判定法)及相应的防治措施。

## 1 隧道产生大变形的原因及工程实例

### 1.1 隧道产生大变形的原因

各类围岩在正常施工条件下都会产生一定的变形, 不同国家、不同行业对各级围岩及各种支护结构都规定有不同的预留变形量以容纳这些变形<sup>[11-12]</sup>。大变形是相对正常变形而言, 目前还没有统一的定义和判别标准。产生大变形主要有客观和主观两方面原因, 地质条件是客观原因, 技术措施不当是主观原因, 前者是根本原因。从地质条件分析, 产生大变形的原因可能有三种<sup>[6-7]</sup>:

(1) 膨胀岩作用。具有膨胀性的围岩在一定条件下体积膨胀, 使隧道周边产生大变形。如成昆线百家岭隧道、青藏线关角隧道、宝中线堡子梁隧道都属于围岩膨胀引起的大变形。

(2) 高地应力作用下的软岩隧道挤压变形。研究

表明<sup>[6]</sup>, 当强度应力比小于 0.3~0.5 时, 即能产生比正常隧道开挖大一倍以上的变形。此时洞周将出现大范围的塑性区, 随着开挖引起围岩质点的移动, 加上塑性区的“剪胀”作用, 洞周将产生很大位移。所以高地应力是大变形的一个重要原因, 这又称为高地应力的挤压作用。在埋深大、地壳经历激烈运动, 地质构造复杂的泥岩、页岩、千枚岩、泥灰岩、片岩、煤层等都容易出现较大的挤压变形。

(3) 局部水压及气压力的作用。当支护和衬砌封闭较好, 周边局部地下水升高或有地下气体(瓦斯等)作用时, 支护也会产生大变形, 这种现象并不多见。

1.2 乌鞘岭隧道工程概况及对比

乌鞘岭隧道位于兰新线兰州西—武威南段, 全长 20050 m, 是国内已建最长的单线铁路隧道, 最大埋

深 1100 m。设计为左右两座单线隧道, 线间距 40 m。隧道工程在大地构造单元上位于祁连褶皱带内, 在岭脊地段 7587 m 范围内分布由 F4~F7 四条区域性大断层为骨架构成的宽大“挤压构造带”, 带内的次级断层发育, 由于构造作用, 切割的古生界、中生界及加里东岩体被推覆于上新地层之上, 地应力条件十分复杂。其中 F7 断层为工程活动性断层, 断层宽度达 820 m。隧道设计为圆形(F7 断层区段)和椭圆形断面。隧道施工中, 在断层范围内, 特别是在 F4、F7 断层带、志留系板岩夹千枚岩地段, 围岩非常破碎, 地应力水平高, 围岩挤压作用显著, 洞室自稳能力极差, 均发生过较为严重的变形, 最大变形达 1.2 m。如表 1 为乌鞘岭隧道与国内外典型的挤压性围岩隧道的技术指标对比情况<sup>[5, 7, 13-17]</sup>。

表 1 国内外典型的挤压性围岩隧道  
Table 1 Typical squeezing ground tunnels

项目	隧道名称					
	奥地利 Tanern	奥地利 Arlberg	日本 EnasenII 号线	中国国家竹箐	中国乌鞘岭	
隧道长度/m	6400	13980	88635	4990	200500	
开挖断面/m <sup>2</sup>	90~105 (11.8×10.75)	90~103 (10.8×11.20)	12.0×10.5	82.5 (9.34×10.47)	72.0 或 84.3 (椭圆形 7.8×11.1 或圆形直径 10.36)	
用途	公路隧道	公路隧道	公路隧道	单线铁路隧道	单线铁路隧道	
施工年份	1970~1975	1974~1979	1978~1985	1993~1996	2003~2006	
埋深/m	500~1000	平均 350, 最大 740	400~450	400	450~1100	
围岩(大变形地段)	绿泥石、绢云母、千枚岩	千枚岩、片麻岩、局部为含糜棱岩的片岩、绿泥岩	风化花岗岩组成的断层破碎带, 局部为黏土	煤系地层	板岩夹千枚岩、断层泥砾、角砾、碎裂岩	
抗压强度 $R_b$ /MPa	0.4~1.6	1.2~2.9	1.7~4.0	1.7	0.735	
内摩擦角 $\phi$ /( $^\circ$ )	20~22	—	35	30	25	
原始地应力/MPa	16~27	13	10~11	8.57( $\sigma_x$ )16.09( $\sigma_y$ )	9.15~20.5	
侧压力系数	近似 1	—	近似 1	1.88	近似 1	
强度应力比	0.05~0.06	0.1~0.2	0.1~0.33	0.1~0.2	0.033~0.058	
初期支护	原设计	喷 25 cm, TH36 钢架 @75, 锚杆长 4 m	喷 20~25 cm, 可缩钢架, 锚杆长 6 m	喷 25 cm, MU-29 可缩钢架@100, 锚杆长 6 m	喷 12 cm, 模注混凝土 18 cm, 锚杆长 3 m, 有钢架	喷 15~20 cm, 锚杆长 3~4 m, 有钢架
	改变设计	喷 25 cm, TH21 钢架 @100, 锚杆长 6~9 m	除锚杆加长到 9~12 m, 其余同前	除锚杆加长至 9~13 m, 其余同前	喷 35 cm, U29 可缩钢架, 锚杆长 8 m	喷 25~45 cm, 锚杆长 4~6 m, I20 或 H175 钢架
初期支护变形速度	一般 5~10 cm/d, 最大 20 cm/d	一般 4~6 cm/d, 最大 11.5 cm/d	一般 20~25 cm, 最大 56 cm (拱顶下沉 93 cm)	3~4 cm/d	一般 4~5 cm/d 最大 16.8 cm/d	
初期支护位移	一般 50 cm, 最大 120 cm (隧底打锚杆前隆起 20 cm)	一般 20~90 cm, 最大 35 cm (拱顶下沉 15~20 cm)	一般 20~25 cm, 最大 56 cm (拱顶下沉 93 cm)	一般 80~100 cm, 最大 210 cm, 隧底隆起 60~80 cm	一般 40~80 cm, 最大 120 cm	
收敛时间/d	30~400	100~150	>300	≥100	≥100	

表2 围岩物理力学参数综合分析确定

Table 2 The physical and mechanical parameters of surrounding rock

区段	$\gamma$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )	$\nu$	$E$ /MPa	$\sigma_v$ /MPa	$\lambda$
F4 断层	24.00	200	25	0.35	1700	9.15	0.75
志留系千枚岩	24.01	200	25	0.31	1300	20.5	0.75
F7 断层	24.79	224	25	0.33	1100	11.2	1.00

## 2 挤压性围岩隧道大变形的基本特征及机理

### 2.1 挤压性围岩隧道大变形的基本特征

软弱围岩在高地应力作用下发生挤压大变形及破坏的特征不仅受围岩本身力学性质的影响,还与原始地应力状况及工程因素等有关。一般说来,其变形及破坏有如下特征<sup>[6, 10, 14]</sup>:

#### (1) 变形量大

家竹箐隧道初期支护周边位移曾达 2100 mm,乌鞘岭隧道岭脊段最大变形 1209 mm。平均变形按 F4、志留系板岩夹千枚岩、F7 几区段分别为 90~120, 200~400, 150~550 mm。

#### (2) 变形速率高

奥地利的陶恩隧道最大变形速率高达 200 mm/d,一般也达 50~100 mm/d。乌鞘岭隧道岭脊段变形量测开始阶段变形速率最高达 167 mm/d,分区段最大变形速率分别可达 73, 165, 167 mm/d。

#### (3) 变形持续时间长

由于软弱围岩具有较高的流变性质和低强度,开挖后应力重分布的持续时间长。变形的收敛持续时间也较长。日本惠那山隧道时间大于 300 d,关角隧道通车两年后变形还在发展。乌鞘岭隧道大变形区段变形持续时间大于 100 d。

#### (4) 支护破坏形式多样

由于原始应力状态因方向而异,围岩也具有各向异性,初期支护常常不均匀受力,破坏形式也是多样的。喷层开裂、剥落先在受力较大的部位发生。型钢拱架或格栅发生扭曲,坍塌随即发生。衬砌做好后,大变形常使衬砌严重开裂,挤入净空。底部上鼓使道床严重破坏只好中断行车。

#### (5) 围岩破坏范围大

高地应力使坑道周边围岩的塑性区增加,破坏范围增大。特别是支护不及时或结构刚度、强度不当时围岩破坏范围可达 5 倍洞径。一般锚杆长度伸不到弹性区,这常是导致喷锚支护失效的根本原因。

### 2.2 围岩物理力学参数的综合分析

乌鞘岭隧道岭脊地段围岩软弱,地质构造强烈,该种地层条件给围岩物理力学参数的试验确定带来了极大困难,分别采用了取样室内试验、原位岩体试验、

地应力测试、围岩压力测试、围岩参数的位移反演和地应力场模拟分析等方法,但目前各种测试方法都有其局限性。综合各种试验及分析手段,并结合铁路隧道规范建议及现场隧道施工实践,确定岭脊地段围岩物理力学参数的建议值,如表 2<sup>[15]</sup>。

### 2.3 挤压性围岩隧道大变形的机理

#### (1) 洞室周边产生塑性区的条件

由侧压力系数为 1 的圆形洞室弹性阶段理论解:

$$\sigma_r = \sigma_v - (R_0/r)^2 \sigma_v \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_v + (R_0/r)^2 \sigma_v, \quad (2)$$

式中,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  分别为洞室周边围岩的径向和切向应力,  $\sigma_v$  为原始地应力 ( $p_0$ ),  $R_0$  为洞室半径,  $r$  为围岩中计算点的半径。

在洞周处  $r = R_0$ ,  $\sigma_\theta = 2\sigma_v$ ,  $\sigma_r = 0$ , 所以当应力比  $R_0/\sigma_v < 2$  时,洞室周边将产生塑性变形。

#### (2) 塑性区的影响因素分析

圆形均质地层塑性区半径的理论公式

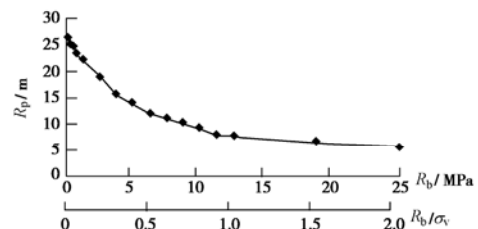
$$R_p = \left[ \frac{(p_0 + c \cdot \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{p_i + c \cdot \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \cdot R_0, \quad (3)$$

式中,  $R_p$  为塑性半径,  $R_0$  为隧道半径,  $p_0$  为地应力,  $p_i$  为支护抗力。

由式 (3) 可知,当地应力  $p_0$  增大时,塑性半径  $R_p$  也增大;当围岩抗压强度  $R_b (= \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi})$  减小时,塑性区半径也将增大。

#### a) 围岩抗压强度 $R_b$ 及强度应力比 $R_b/\sigma_v$

图 1 为乌鞘岭隧道分区段塑性区半径与围岩抗压强度及强度应力比的关系,塑性区半径随围岩强度及强度应力比的增加而减小。

图 1 F7 断层塑性区半径与  $R_b$  及  $R_b/\sigma_v$  的关系Fig. 1 Relationship of radius of plastic zone with  $R_b$  and  $R_b/\sigma_v$  in F7 fault zone

b) 地应力  $p_0$

图 2 为乌鞘岭隧道分区段塑性区半径与地应力的关系, 随地应力的增加, 塑性区半径不断增加, 当地应力  $p_0 < 10$  MPa 时, 塑性区增大较明显,  $p_0 > 10$  MPa 时, 塑性区半径增大速率减缓。

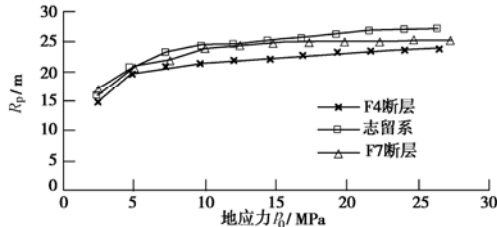


图 2 分区段塑性区半径与地应力的关系

Fig. 2 Relationship between radius of plastic zone and ground stress in different zones

c) 侧压力系数  $\lambda$

塑性区形状与侧压力系数密切相关, 图 3 为 F7 断层区段塑性区形状与侧压力系数的关系。根据计算结果, 洞室形状的变化仅影响塑性区的范围, 而对塑性区的分布规律影响不大。

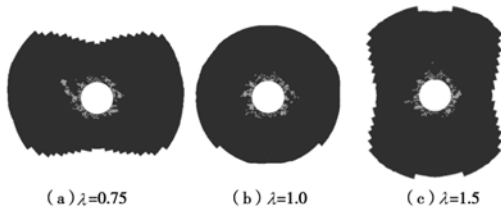


图 3 F7 断层区段  $\lambda$  与塑性区形状的关系

Fig. 3 Relationship between shape of plastic zone and coefficient of lateral pressure in faults F7

塑性区半径及形状均与地层弹性模量  $E$  无关。

(3) 塑性半径与洞壁位移的关系

圆形均质地层洞壁位移的理论公式如下:

$$u = \frac{1 + \mu}{E} \left\{ p_0 - \frac{c}{\tan \varphi} \left[ \left( \frac{R_p}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 1 \right] - p_i \left( \frac{R_p}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \right\} \frac{R_p^2}{R_0} \quad (4)$$

由式 (4) 可知,  $u$  与  $R_p^2$  成正比。图 4 为 F7 断层区段洞壁位移与塑性区半径的关系, 拱顶下沉与墙腰水平位移均与塑性区半径平方基本成线性关系。

(4) 洞壁位移的影响因素

a) 埋深  $H$

当仅考虑自重应力场时, 隧道埋深与地应力成正比。图 5 为 F7 断层洞壁位移与埋深的关系, 洞壁位移随埋深增加而增大。F7 区段圆型隧道拱顶位移大于墙腰, 其它区段墙腰水平位移大于拱顶下沉。

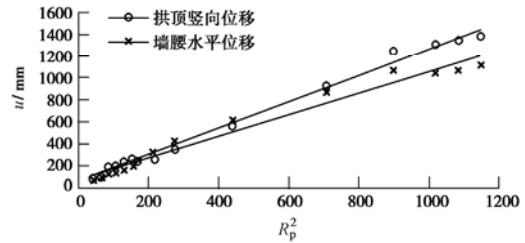


图 4 洞壁位移与塑性区半径关系

Fig. 4 Relationship between displacement of tunnels and radius of plastic zone

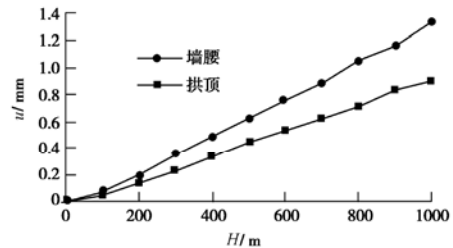


图 5 F7 断层洞壁位移随埋深的变化规律

Fig. 5 Relationship between displacement of tunnels and burial depth of fault F7

b) 侧压力系数  $\lambda$

图 6 为 F4 断层洞壁位移与侧压力系数  $\lambda$  的关系曲线。拱顶竖向位移随侧压力系数增长而增大趋势较明显, 墙腰水平位移: 当  $\lambda < 1.2$  时变化不明显, 当  $\lambda > 1.2$  时随  $\lambda$  增长而增大。

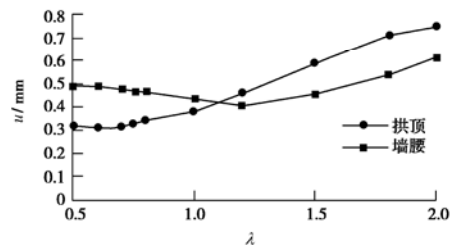


图 6 F4 断层洞壁位移随侧压力系数的变化规律

Fig. 6 Relationship between displacement of tunnels and coefficient of lateral pressure of fault F4

c) 弹性模量  $E$

在其它条件不变的情况下, 洞壁位移与弹性模量成反线关系, 即洞壁位移随弹性模量的增大而减小。

d) 强度应力比

图 7 为志留系地层区段拱顶下沉及墙腰水平位移与强度应力比的关系曲线。位移随强度应力比的增大而减小。

2.5 软岩隧道产生大变形的条件

软弱围岩隧道在高地应力、低强度应力比的条件下, 有可能产生大变形。图 5 和图 7 数值模拟结果可

表3 预留变形量

Table 3 Preformed deformation 单位: mm

规范或 标准名称	围岩级别					
	铁路单线(公路双车道)			铁路双线(公路三车道)		
	IV	V	VI	IV	V	VI
铁路隧道设计规范 TB10003-2005	30~50	50~80	设计确定	50~80	80~120	设计确定
公路隧道设计规范 JTG D70-2004	50~80	80~120	量测确定	80~120	120~150	量测确定
新奥法指南	30~50	50~70	—	50~70	70~100	—
日本新奥法指南	25~75	75~150	>150 (膨胀岩)	50~150	150~300	>300 (膨胀岩)
标准设计(专隧 0014)	40	80	120	—	—	—
标准设计(专隧 0034)	—	—	—	100~150	150~200	—

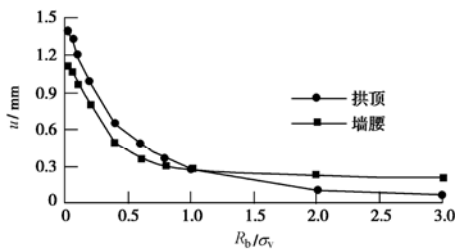


图7 志留系洞壁位移随强度应力比的变化规律

Fig. 7 Relationship between displacement of tunnels and strength stress ratio in Siluric zone

以很好地说明这一点,洞壁位移随地应力增长而增长,当强度应力比小于 0.5 时洞壁位移随强度应力比的变化十分显著。也就是说,软弱围岩隧道产生大变形是与围岩本身的物理力学性质以及地应力场的特征密切相关的,并非所有的软弱围岩隧道都会产生大变形。软岩在高地应力作用下所承受的围岩压力以形变压力为主,而松弛压力很小,从而在较大的形变压力作用下产生较大的挤压变形。

### 3 大变形分级标准的确定

#### 3.1 国内外现状

大变形是相对正常变形而言的。不同国家不同行业都制订有不同的预留变形量以容纳这些正常变形。表3为IV~VI级围岩的预留变形量。

(1) 铁二院喻渝<sup>[5]</sup>从预留变形量出发,取预留变形量的 0.8 倍作为正常变形值的上限,取上述正常值的 2 倍作为大变形的下限,即单线隧道发生 25 cm、双线隧道发生 50 cm 的位移,则认为发生了大变形。并得出不同侧压力系数的应力比临界值,即  $\lambda=1$  时,  $\sigma_v/R_b=3$ ,  $\lambda=2$  时,  $\sigma_v/R_b=2$ 。

(2) 铁二局<sup>[6]</sup>分别以围岩变形量、相对变形量、原始地应力及应力比为指标进行变形等级划分,确定了挤压性隧道的大变形分级标准如表4所示。

(3) 重庆交通学院徐林生<sup>[7]</sup>提出公路隧道围岩大变形三级划分方案如表5所示。

表4 挤压性隧道的大变形分级标准

Table 4 Classification criterion of large deformation of squeezing ground tunnels

指标	大变形分级		
	I	II	III
应力比 $\sigma_v/R_b$	3.0~5.0	5.0~8.0	>8.0
原始地应力/MPa	5.0~10.0	10.0~15.0	>15.0
相对变形/%	4.0~7.0	7.0~10.0	>10.0

表5 公路隧道围岩大变形分级方案

Table 5 Classification of large deformation of highway tunnels

指标	大变形分级		
	I	II	III
一般估计变形量/mm	15~30	30~50	>50
相对变形量/%	1.5~3	3.0~5	>5

(4) 张祉道<sup>[10]</sup>以洞壁相对位移为参数,列出不同严重程度大变形等级分类,如表6所示。

表6 大变形等级之现场判定

Table 6 Determination of degree of large deformations

指标	大变形等级		
	轻度	中等	严重
$\frac{U_a}{a}$ /%	3~6	6~10	>10
双车道公路隧道	20~35	35~60	>60
单线铁路隧道	15~25	25~45	>45

注:①  $U_a$  为洞壁位移,  $a$  为隧道当量半径;② 变形及位移均在初期支护已施工的条件下产生,该支护系常规标准支护。

(5) 日本采用相对应应变判断围岩的挤出程度并划分等级<sup>[9]</sup>,如表7所示。

表7 挤出程度的分类

Table 7 Classification of squeezing degree

指标	挤出程度				
	无挤出	轻微挤出	中等挤出	严重挤出	最严重挤出
	NS	LS	FS	HS	VHS
$\varepsilon_0^a / \varepsilon_0^c$	$\leq 1$	$1 \sim \eta_p$	$\eta_p \sim \eta_s$	$\eta_s \sim \eta_f$	$\geq \eta_f$

注:相对应变  $\eta_p, \eta_s, \eta_f$  分别等于岩土材料应力-应变曲线中硬化阶段、屈服阶段、软化阶段极限应变  $\varepsilon_p, \varepsilon_s, \varepsilon_f$  与弹性极限应变  $\varepsilon_e$  的比值。

3.2 大变形分级标准的确定

将大变形分级标准分为设计和施工两个阶段, 在设计阶段, 初步确定大变形分级标准, 并在此分级标准下提出相应大变形防治设计措施; 在施工阶段, 根据现场地质情况、施工变形情况等进一步细化大变形分级标准并提出变形管理基准。

(1) 设计阶段大变形分级标准

在设计阶段, 根据围岩力学参数及地应力测试结果, 初步确定大变形分级标准, 并提出相应大变形防治措施, 如表 8 所示。

表 8 设计阶段大变形分级标准

Table 8 Classification of large deformation during design stage

分级指标	大变形等级		
	I	II	III
强度应力比	0.5~0.25	0.25~0.15	<0.15
原始地应力/MPa	5~10	10~15	>15

(2) 施工阶段大变形分级标准

在施工阶段, 综合以往的各种大变形分级的标准及方法, 并考虑乌鞘岭隧道的具体特点, 结合围岩物埋力学指标、现场量测及理论分析结果, 分别考虑相

表 9 施工阶段大变形分级标准的综合指标判定法

Table 9 The comprehensive indexes for classification of large deformation during construction stage

分级指标	大变形的等级		
	I	II	III
相对变形 $\frac{U_a}{a}$ /%	3~5	5~8	>8
强度应力比 $\frac{R_b}{\sigma_v}$	0.5~0.25	0.25~0.15	<0.15
原始地应力 $\sigma_v$ /MPa	5~10	10~15	>15
弹性模量 $E$ /MPa	2000~1500	1500~1000	<1000
综合系数 $\alpha$	60~30	30~15	<15
围岩及支护特征	开挖后洞壁围岩位移较大, 持续时间较长; 一般支护开裂或破损较严重	开挖后围岩位移大, 持续时间长; 一般支护开裂或破损严重	开挖后围岩位移很大, 持续时间很长; 一般支护开裂或破损很严重

注: ①相对变形是指洞壁位移与隧道当量半径之比; ②弹性模量为岩石的弹性模量。

表 10 乌鞘岭隧道典型大变形区段变形量测统计

Table 10 The monitored deformation of typical large deformation sections in Wushaoling Tunnel

区段	长度/m	位置	量测变形/mm		变形速率/(mm·d <sup>-1</sup> )	
			最大	平均	最大	平均
F4 断层右线	450	主带	324.31	125.12	73.46	25.62
		影响带	343.10	91.87	58.58	19.55
志留系地层右线	3165	千枚岩为主	932.45	422.97	165.33	80.65
		板岩为主	473.91	211.25	122.05	38.72
F7 断层右线	827	进入断层初期	716.12	353.54	153.21	70.24
		设计施工改进后	310.51	124.87	79.65	30.76
F7 断层左线	817	进入断层初期	1209.38	831.01	167.53	87.54
		设计施工改进后	367.03	195.60	81.61	35.90

对变形  $U_a/a$  (%)、强度应力比  $\sigma_v/R_b$ 、原始地应力  $\sigma_v$ 、弹性模量  $E$  及综合系数  $\alpha$  等因素, 采用综合指标判定法确定大变形分级标准, 如表 9 所示。

综合系数  $\alpha$  为考虑围岩抗压强度、地应力、弹性模量及侧压力系数几个因素, 隧道变形随  $(1+\nu)/E$  的增长而增长, 而随  $R_b/\sigma_v$  的增长而减小,  $\alpha$  取无量纲量, 定义为

$$\alpha = \frac{1+\lambda}{1+2\lambda} \cdot \frac{E}{\sigma_v} \cdot \frac{R_b}{\sigma_v} \quad (5)$$

综合系数  $\alpha$  的设定是基于洞壁位移的影响因素分析及式 (4) 而确定, 结合现场量测变形及理论计算规律而确定了表 9 中  $\alpha$  的限值。如对于该隧道 F7 断层,  $\lambda=1.0$ ,  $R_b=0.7035$  MPa,  $\sigma_v=11.2$  MPa,  $E=1100$  MPa, 则  $\alpha=4.1$ 。如图 8 为椭圆形断面和圆形断面隧道变形与综合系数  $\alpha$  的关系曲线。

4 大变形分级标准验证及防治措施

4.1 大变形分级标准的验证

乌鞘岭隧道典型大变形区段的实测变形如表 10。

由表 10, F4 断层、志留系地层、F7 断层几个典型大

表 11 综合指标判定法确定几个隧道的大变形等级

隧道名称	分级指标					大变形等级
	$\frac{U_a}{a}/\%$	$\frac{R_b}{\sigma_v}$	$\alpha_v/\text{MPa}$	$E/\text{MPa}$	$\alpha$	
陶恩	4.5~10.8	0.05~0.06	16.00~27.00	—	2.56	III
阿尔贝格	1.8~3.2	0.10~0.20	13.00	—	—	II
惠那山 II 号线	1.8~5.0	0.10~0.33	10.00~11.00	—	20.50	II
家竹箐	8.1~21.3	0.10~0.20	16.09	—	5.96	III
乌鞘岭 F7 断层	1.7~10.2	0.063	11.20	1100	4.10	III
志留系	2.5~11.6	0.031	20.60	1300	1.40	III
乌鞘岭 F4 断层	1.1~4.2	0.320	9.15	1700	41.60	I

表 12 不同大变形等级的防治措施

阶段	措施内容	大变形的等级		
		I	II	III
设计	改善洞室形状	—	可采用	采用
	锚杆、钢架、网、喷联合支护	采用	采用	采用
	初期支护	—	必要时采用	必要时采用
	喷混凝土中掺钢纤维	—	可采用	可采用
	补强长锚杆	—	—	可采用
	H 型钢	—	—	可采用
施工	预留变形量/cm	15~25	25~35	35~40
	多重、分次支护	—	可采用	可采用
	二次衬砌	采用	采用	采用
	钢筋混凝土	采用	采用	采用
	加强监控量测	采用	采用	采用
	短台阶、弱爆破、早封闭	采用	采用	采用
	循环进尺/m	2~2.5	1~2	0.5~1

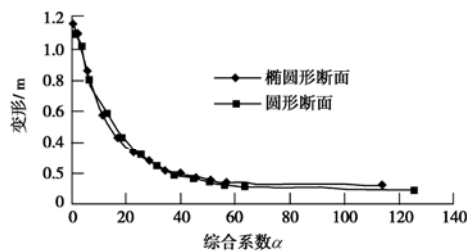
图 8 隧道变形与综合系数  $\alpha$  的关系

Fig. 8 Relationship between deformation of tunnels and comprehensive coefficient

变形区段最大相对变形分别达到 4.2%，11.6%和 10.2%。采用表 9 的大变形分级标准进行综合判定表 1 中几个隧道的大变形等级如表 11 所示。

#### 4.2 大变形的防治措施

在乌鞘岭隧道设计施工初期阶段，由于对高地应力条件下挤压性围岩大变形隧道认识不足，造成了最大达 1209 mm 的变形侵限，后期经过开展大量的试验和研究工作，针对该隧道的特点，采用分阶段综合控制法的柔性设计理念，即容许围岩变形、释放地应力、降低支护压力、同时约束围岩松弛和过分变形，达到了保持隧道稳定的目的。具体措施包括：选择合理的断面形状，留足预留变形量，短锚管超前支护，中等长度系统锚杆和少量补强锚杆围岩加固，多重支护，

适当提高衬砌刚度和适当提前施作二次衬砌。

针对表 8、表 9 的大变形分级情况，采取相应防治大变形的措施如表 12。

## 5 结 论

(1) 乌鞘岭隧道岭脊区段属于高地应力条件下的挤压性围岩大变形隧道。

(2) 挤压性围岩隧道大变形具有变形量大、变形速率高、变形持续时间长、支护破坏形式多样及围岩破坏范围大的基本特征。

(3) 塑性区半径随围岩强度应力增加而减小，随地应力增大而增大，塑性区形状与侧压力系数有关。洞壁位移与塑性区半径的平方成正比，随埋深的增大而增大，随弹性模量及强度应力比的增大而减小。

(4) 以室内试验、现场量测数据为依托，结合理论计算结果，提出的综合指标判定法确定大变形分级标准，并得到了工程验证，采取了系列大变形防治措施，经设计、施工和运营后的实践验证，隧道大变形得到了控制，隧道结构稳定。

#### 参考文献:

- [1] FRANCLISS F O. Weak rock tunnelling[M]. Boston: A A

- Balkema Press, 1997.
- [2] KIDYBINSKI A, DUBINSKI J. Strata control in deep mines[M]. Rotterdam: A A Balkema, 1990.
- [3] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程地质力学研究进展[J]. 工程地质学报, 2000, 8(1): 46 - 62. (HE Man-hao, JING Hai-he, SUN Xiao-ming. Research progress of soft rock engineering geomechanics in China coal mine[J]. Journal of Engineering Geology, 2002, 8(1): 46 - 62. (in Chinese))
- [4] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (HE Man-chao, JING Hai-he, SUN Xiao-ming. Soft rock engineering geomechanics[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [5] 喻 渝. 挤压性围岩支护大变形的机理及判定方法[J]. 世界隧道, 1998(1): 46 - 51. (YU Yu. Serious deformation of surrounding rock in squeezing ground[J]. World Tunnel, 1998(1): 46 - 51. (in Chinese))
- [6] 中铁二局集团有限公司. 不良地质隧道的开挖及支护技术研究总报告及分项报告[R]. 成都, 2000. (China Railway Erju Group Corporation. The research report of excavation and support technology of unfavorable geological condition tunnel[R]. Chengdu, 2000. (in Chinese))
- [7] 徐林生, 李永林, 程崇国. 公路隧道围岩变形破裂类型与等级的判定[J]. 重庆交通学院学报, 2002, 21(2): 16 - 20. (XU Lin-sheng, LI Yong-ling, CHENG Chong-guo. Judging of the deformation-cracking type and grade about surrounding rock of highway tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2002, 21(2): 16 - 20.)
- [8] EGGER P. Design and construction aspects of deep tunnels (with particular emphasis on strain softening rocks)[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 403 - 408.
- [9] AYDAN O, AKAGI T, KAWAMOTO T. The Squeezing potential of rocks around tunnels, theory and prediction[J]. Rock mechanics rock engineering, 1993, 26(2): 137 - 163.
- [10] 张祉道. 关于挤压性围岩隧道大变形的探讨与研究[J]. 现代隧道技术, 2003, 40(2): 5 - 12. (ZHANG Zhi-dao. Discussion and study on large deformation of tunnel in squeezing ground[J]. Modern Tunneling Technology, 2003, 40(2): 5 - 12. (in Chinese))
- [11] TB 10003—2001 铁路隧道设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. (TB 10204—2002 Code for design of railway tunnel[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. (in Chinese))
- [12] TB 10204—2002 铁路隧道施工规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2001. (TB 10003—2001 Code for construction on tunnel of railway[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001. (in Chinese))
- [13] 铁道第一勘察设计院, 石家庄铁道学院, 等. 乌鞘岭隧道岭脊地段复杂应力条件下的变形控制技术研究阶段成果总报告[R]. 兰州: 铁道第一勘察设计院, 2004. (The First Railway Survey & Design, Shijiazhuang Railway Institute, et al. The collectivity phase report of deformation control technology in complicated stress condition of Wushaoling tunnel[R]. Lanzhou: The First Railway Survey & Design, 2004. (in Chinese))
- [14] 朱永全, 刘志春, 李文江, 等. 乌鞘岭隧道岭脊地段复杂应力条件下的变形控制技术研究(专题报告一)现场测试阶段成果报告[R]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2004. (ZHU Yong-quan, LIU Zhi-chun, LI Wen-jiang, et al. The phase report of monitoring, the first special report, in the phase report of deformation control technology in complicated stress condition of Wushaoling Tunnel[R]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway Institute, 2004. (in Chinese))
- [15] 朱永全, 刘志春, 李文江, 等. 乌鞘岭隧道岭脊地段复杂应力条件下的变形控制技术研究(专题报告五) 结构安全性评价及变形控制基准研究成果报告[R]. 石家庄: 石家庄铁道学院, 2004. (ZHU Yong-quan, LIU Zhi-chun, LI Wen-jiang, et al. The report of structure security and criterion of deformation control, the if special report, in the report of deformation control technology in complicated stress condition of Wushaoling Tunnel[R]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Railway Institute, 2006. (in Chinese))
- [16] 刘志春, 李文江, 孙明磊, 等. 乌鞘岭隧道 F4 断层区段监控量测综合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1502 - 1511. (LIU Zhi-chun, LI Wen-jiang, SUN Ming-lei, et al. Monitoring and comprehensive analysis in F4 section of Wuqiaoling Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1502 - 1511. (in Chinese))
- [17] 刘志春, 孙明磊, 贾晓云, 等. 乌鞘岭隧道 F4-F7 断层区段压力、应力实测与分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(2): 13 - 17. (LIU Zhi-chun, SUN Ming-lei, JIA Xiao-yun, et al. The monitoring and analysis of pressure and stress in F4-F7 fault regions of Wushaoling Tunnel[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19(2): 13 - 17. (in Chinese))