

DOI: 10.11779/CJGE201907021

# 高地应力深埋隧道断裂破碎带段大变形控制 现场试验研究

崔光耀<sup>1</sup>, 王雪来<sup>1</sup>, 王明胜<sup>2</sup>

(1. 北方工业大学土木工程学院, 北京 100144; 2. 中国中铁隧道集团有限公司, 广东 广州 511458)

**摘要:** 丽香铁路中义隧道出口平导玉龙雪山西麓断裂破碎带段围岩软弱、破碎, 受高地应力及断裂破碎带影响严重, 边墙大变形灾害突出, 以此为研究背景, 开展了4种围岩大变形控制措施的现场试验研究。试验结果表明: 采用普通加强支护措施(工况1), 无法控制该段围岩变形; 采用“抗放结合”控制措施, 下部围岩应力释放需缓释, 采用工况3(双层支护+下台阶、仰拱分开施作)方案, 试验段围岩应力得到较好控制, 但其工序繁琐, 施工进度缓慢; 采用“强支”理念的工况4(单层支护+加强拱架+预留应急加固措施)方案, 最大日变形速率、累计最大变形量均最小, 分别为3.2 cm/d和62.2 cm, 试验段全长围岩累计变形量在可控范围内, 施工工序较为简单, 施工月进尺可达90 m以上; 考虑到平导需发挥超前作用, 建议中义隧道出口平导玉龙雪山西麓断裂破碎带段采用工况4方案进行施工。研究结果可为类似工程提供参考。

**关键词:** 深埋隧道; 高地应力; 断裂破碎带; 围岩; 大变形; 现场试验

**中图分类号:** TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2019)07-1354-07

**作者简介:** 崔光耀(1983—), 男, 山东莒南人, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程研究工作。E-mail: cya0456@163.com。

## Field tests on large deformation control measures of surrounding rock of deep tunnels in fault zones with high geostress

CUI Guang-yao<sup>1</sup>, WANG Xue-lai<sup>1</sup>, WANG Ming-sheng<sup>2</sup>

(1. College of Architecture and Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China; 2. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou 511458, China)

**Abstract:** The surrounding rock at the western piedmont of Yulong Snow Mountain fault zone of Zhongyi pilot tunnel at the tunnel exit of the Lijiang-Xianggelila railway is weak and fractured affected by the high geostress and fault zone, and the large deformation of the side wall is prominent. Four kinds of large deformation control measures for the surrounding rock are taken out in the field tests. The results show that the deformation of the surrounding rock is out of control adopting the general strengthening support measures (working condition 1). It needs slow release adopting control measures of resisting and reducing the stress of the surrounding rock. The stress of the surrounding rock of the test section is better controlled by working condition 3 (double-layer support + lower bench and inverted arch excavation), but the process is tedious and the construction progress is slow. Adopting the "strong support" measure of working condition 4 (monolayer support + strengthening arch support + reserved emergency reinforcement measures), the maximum daily rate of deformation and the maximum accumulation of deformation are the minimum, 3.2 cm/d and 62.2 cm respectively, the accumulation of deformation of the full test section is within the controllable range, the construction procedure is relatively simple, and the advance progress of the construction month can reach more than 90 m. In view of the advance effect of the pilot, It's highly recommended that the western piedmont of Yulong Snow Mountain fault zone of Zhongyi tunnel exit should adopt the working condition 4. The research results can provide a reference for large deformation control measures for the surrounding rock of deep tunnels in fault zones with high geostress.

**Key words:** deep tunnel; high geostress; fault zone; surrounding rock; large deformation; field test

## 0 引言

随着中国交通基础设施建设的持续深入发展, 交

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408008); 北京市青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD201704013); 北京市属高校基本科研业务费项目(110052971921/061); 昆明铁路局科技项目重点课题(K17G43)

收稿日期: 2018-09-09

通工程不断向高海拔、高纬度、高烈度地震区、高地应力区、艰险山区延伸, 交通隧道工程建设也向着“特长、深埋、地质条件复杂”方向发展, 深埋软岩大变形隧道不断涌现。如何有效控制软岩隧道的围岩稳定性是当前亟待研究和解决的关键技术问题之一<sup>[1-2]</sup>。

隧道围岩大变形可分为软岩类、深埋软岩类、挤压性围岩类、膨胀性围岩类4种<sup>[3-5]</sup>。隧道围岩大变形工程实例在国内外已屡见不鲜, 国内外专家、学者对隧道围岩大变形的控制技术进行部分研究, 主要有: 采用多层柔性支护结构有效控制了日本饭山隧道围岩变形<sup>[6]</sup>; 日本惠那山I号隧道采用刚性支护(初支采用重型H型钢+1.2 m厚钢筋砼二衬)应对围岩大变形失败<sup>[7]</sup>; 南昆铁路家竹箐隧道先采用刚性支护应对围岩大变形, 但由于变形过大, 支护破坏严重, 最后采用“以柔克刚”获得成功<sup>[8]</sup>; 木寨岭隧道采用刚性支护顺利通过断裂破碎带软弱围岩段<sup>[9]</sup>; 乌鞘岭隧道断裂破碎带采用“刚柔并济”工程措施(提高衬砌刚度+多重支护+扩大断面)应对围岩大变形获得成功<sup>[10]</sup>; 研究了采用系统锚杆加强围岩措施应对广甘高速系列隧道软弱破碎千枚岩段大变形的作用效果<sup>[11]</sup>; 关角隧道F<sub>2-1</sub>断层破碎带采用提高支护结构和围岩刚度(提高钢架刚度、设置临时横撑、边墙小导管注浆)应对围岩变形<sup>[12]</sup>; 大梁隧道极高地应力段开展了型钢钢架与格栅钢架适应性现场对比试验研究<sup>[13]</sup>; 柿子园隧道采用刚性支护(加强初支刚度+优化断面形式)顺利通过断层破碎带软岩大变形段<sup>[14]</sup>; 对围岩大变形研究现状、存在的问题与对策, 以及所提出的钢格栅混凝土核心筒支护结构应用进行了研究<sup>[15]</sup>等。综上所述, 各实际工程特点不一, 应对围岩大变形策略不可一概而论, 需要不断总结围岩大变形处治经验, 以为类似工程提供经验借鉴。本文以丽香铁路中义隧道出口平导工程为研究背景, 针对高地应力区深埋隧道断裂破碎带片理化玄武岩段围岩大变形施工控制工程技术措施进行现场试验研究, 研究成果可为中义隧道正洞掘进及类似工程施工控制措施的选取提供参考。

## 1 中义隧道出口平导工程概况

### 1.1 工程概述

丽香铁路中义隧道位于云南省丽江市玉龙纳西族自治县龙蟠乡境内, 新尚站~虎跳峡站区间, 进口里程DK36+549, 出口里程DK51+294, 全长14745 m, 隧道最大埋深1240 m。中义隧道为全线控制性工程, 由#1横洞、#2横洞及出口平导3个施工工区组织施工, 出口平导长6095 m。中义隧道位置如图1所示。



(a) 隧道位置

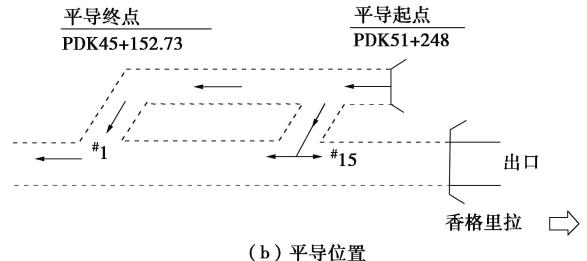


图1 中义隧道位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of location of Zhongyi tunnel

中义隧道出口段地质构造复杂, 发育有区域性断裂—玉龙雪山西麓断裂, 断裂与出口平导相交于PDK50+625—PDK49+725, 断裂破碎带段隧道埋深在600~1050 m。

### 1.2 玉龙雪山西麓断裂地质概况

中义隧道出口平导穿越玉龙雪山西麓断裂段地质情况如图2所示。

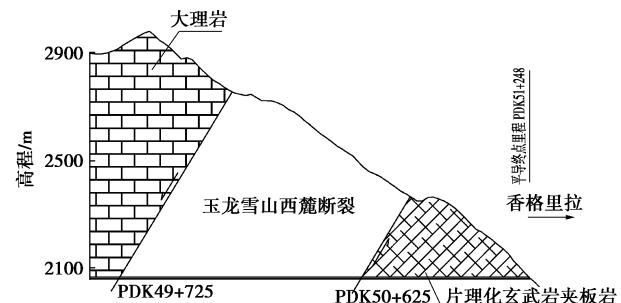


图2 玉龙雪山西麓断裂段地质情况

Fig. 2 Geological situation of fault segment at western piedmont of Yulong Snow Mountain

玉龙雪山西麓断裂为区域性正断裂, 走向NW—NE, 倾向SW—NW, 倾角60°, 上盘为片理化玄武岩夹板岩, 下盘为大理岩。

断裂破碎带岩性以片理化玄武岩(部分夹绿泥石片岩)为主, 节理、裂隙发育, 完整性差。围岩结构面多有绿泥石、蒙脱石等矿物富集, 岩体强度较弱。片理化玄武岩(部分夹绿泥石片岩)多为剪节理, 隧道开挖后, 多呈张开状, 节理面软弱, 易发生错动。断裂破碎带围岩主要物理力学参数见表1所示。

表 1 断裂破碎带围岩物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock in fractured zone

围岩	$\gamma/(kN\cdot m^{-3})$	$c/MPa$	$\phi/(^\circ)$	$E/GPa$	$\nu$
片理化玄武岩 (部分夹绿泥石片岩)	26.4~27.0	0.70~0.74	32~33	1.25~1.30	0.26

注:  $\gamma$  为重度;  $c$  为黏聚力;  $\phi$  为内摩擦角;  $E$  为变形模量;  $\nu$  为泊松比。

### 1.3 高地应力概况

玉龙雪山西麓断裂破碎带段采用水压致裂法(铅直孔)实测地应力,最大水平主应力最大值为 28.25 MPa,最大水平主应力最小值为 16.37 MPa,侧压系数为 1.61~1.94,测区为极高地应力区。

### 1.4 断裂破碎带段隧道支护结构设计

出口平导此段原设计采用IV级围岩锚喷 I 型支护,洞型为直墙+圆弧拱,跨度为 5.3 m,墙高 3.65 m,拱部半圆半径为 2.65 m。初支采用 15 cm 厚 C25 喷射混凝土、Φ6 钢筋网(网格间距 25 cm×25 cm),钢拱架采用 I18 工字钢(间距 0.8 m),系统锚杆采用 Φ22 砂浆锚杆,锚杆长度为 2.5 m,间距为 1.2 m×1.0 m(环×纵)。如图 3 所示。

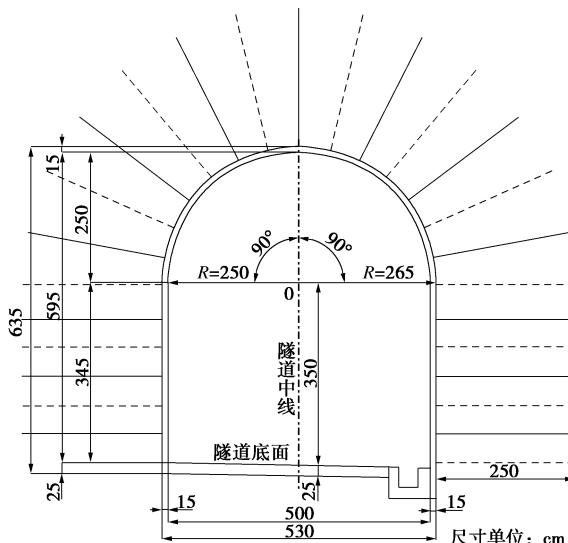


图 3 原设计横断面图

Fig. 3 Original cross-sectional design

## 2 现场试验方案

### 2.1 试验目的

出口平导进入玉龙雪山西麓断裂破碎带后,揭示的围岩岩性比地勘资料差很多,围岩软弱、破碎,受高地应力及断裂破碎带影响严重,经现场检测,平导边墙围岩松动圈在 4.5~5.0 m(图 4),边墙大变形灾害突出(图 5),如 PDK50+580 断面边墙累计最大单

侧变形达 69 cm。

本段平导主要以掌子面后方变形为主,产生的原因主要是:岩体较为破碎(以片理化玄武岩为主),围岩塑性区较为宽厚,不能发挥围岩的自承能力,当作用于初支上的围压较大,随时间的推移围岩体将会产生一定的塑性流动,当初支不足以抵挡塑性区域内作用于其上的围压时,初支产生变形而破坏,从而产生隧道围岩大变形灾害。



图 4 围岩松动圈检测

Fig. 4 Detection of loose circle of surrounding rock



图 5 边墙大变形灾害

Fig. 5 Disaster of large deformations in side wall

原设计不适合控制此段围岩大变形,急需探索适应此段围岩岩性、变形特点的新型支护结构,并为正洞掘进施工方案选取提供参考,为此开展现场试验研究。

### 2.2 试验工况

控制高地应力区软弱围岩大变形可从两方面采取措施:①提高围岩的自承能力,可采取围岩注浆、打设锚杆等措施;②采取合适的支护体系,可改变边墙曲率、增设套拱、加强拱架等措施。

试验段采用两台阶法进行施工(图 7),台阶长度为 2 m。试验段边墙采用围岩注浆并施设 6.5 m 的长锚杆对围岩进行加固,长锚杆采用 Φ25 螺纹钢筋制作,

间距为  $1.2\text{ m} \times 1.0\text{ m}$  (环×纵)。试验段开挖断面改为V级围岩锚喷支护(曲墙-仰拱型), 本次现场试验主要对初支层数、钢架种类、开挖顺序进行研究, 现场试验工况见表2所示。以工况4为例, 试验工况支护横断面如图6所示。

表2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况	试验方案	实施里程
1	单层支护(预留变形20 cm, I18钢拱架)	PDK50+560— PDK50+520
2	双层支护+下台阶、仰拱一次性开挖(预留变形40 cm, I18钢拱架)	PDK50+520— PDK50+460
3	双层支护+下台阶、仰拱分开施作(预留变形40 cm, I18钢拱架)	PDK50+460— PDK50+285
4	单层支护+加强拱架+预留应急加固措施-套拱(预留变形40 cm, H175钢拱架; 当收敛变形值达到35 cm后, 施作套拱, 采用I18钢拱架)	PDK50+285— PDK50+195

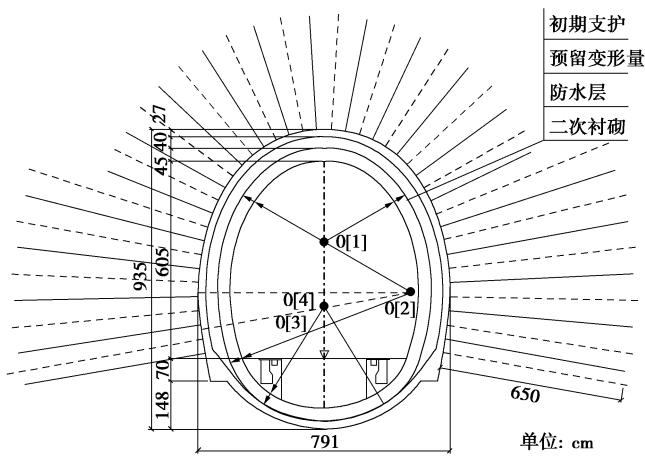


图6 试验工况支护横断面图

Fig. 6 Cross-sectional drawing of test working conditions

### 2.3 监测布置

试验段每隔5 m设置监测断面, 变形严重段落监测断面加密。每个监测断面分别设置上台阶收敛测线、下台阶收敛测线及拱顶沉降测点, 如图7所示。

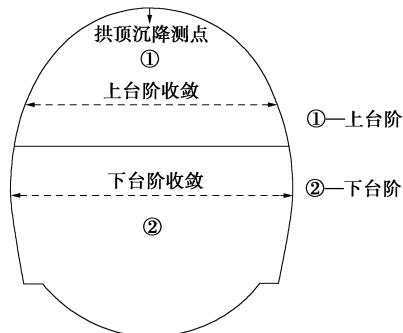


图7 监测布置

Fig. 7 Arrangement of monitoring points

## 3 现场试验结果及分析

### 3.1 试验结果及分析

#### (1) 工况1: 单层支护

此段地层岩性以片理化玄武岩为主, 夹杂部分绿泥石片岩, 围岩软弱破碎, 局部存在裂隙水。采用曲墙-仰拱单层支护体系后, 平导边墙大变形未能有效控制, 试验段边墙单侧变形普遍大于20 cm, 最大达50 cm, 现场换拱频繁, 此试验方案失败。以PDK50+555断面下台阶收敛为例进行说明, 如图8所示。

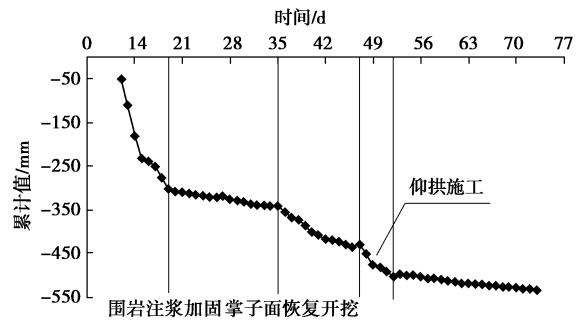


图8 PDK50+555断面下台阶收敛值与时间关系曲线

Fig. 8 Curves of convergence value in bottom bench and time of PDK50+555

由图8可知, PDK50+555断面下台阶收敛前期超限(达到31 cm), 经过现场注浆加固围岩后, 下台阶收敛逐渐稳定; 当掌子面恢复开挖后, 下台阶收敛继续加大, 待仰拱施工完成后, 下台阶收敛趋缓, 但仍未稳定, 最终累计变形达54.97 cm, 现场被迫进行换拱处理。

PDK50+536—PDK50+521段初支一次换拱后, 边墙变形仍难以控制, 不得不进行初支二次换拱, 如图9所示。

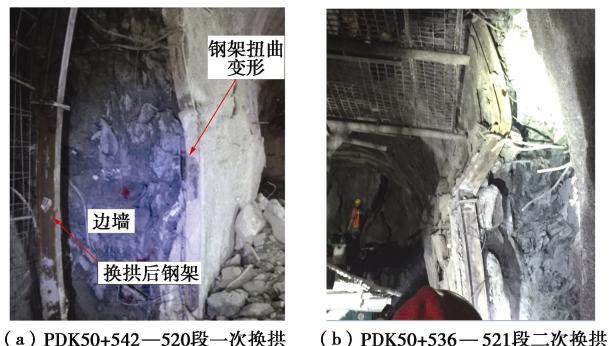


图9 工况1试验现象

Fig. 9 Test phenomena of working condition 1

#### (2) 工况2: 双层支护+下台阶、仰拱一次性开挖

该方案为“抗放结合”施工措施, 即允许第一层初支产生一定的变形, 释放部分地应力后, 再施作套

拱(第一层初支变形达到30 cm后)。

采用此方案, PDK50+520—PDK50+477 试验段基本能够控制围岩变形, 未出现初支侵限而换拱的情况。

PDK50+477—PDK50+460 试验段仰拱出现开裂、隆起, 最高隆起14.8 cm(图10), 现场被迫爆破原仰拱并重新施作; 边墙出现大变形侵限而换拱, 以PDK50+468 断面变形监测曲线为例进行说明, 如图11所示。



图10 PDK50+468 断面附近仰拱开裂隆起

Fig. 10 Arch crack and uplifting deformation beside section PDK50+468

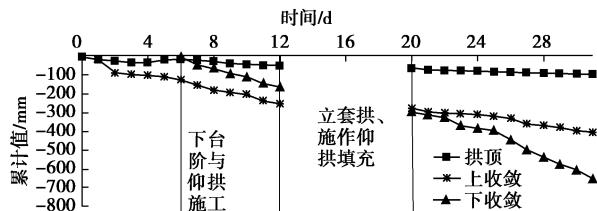


图11 PDK50+468 断面变形监测历时曲线

Fig. 11 Duration curves of section deformation monitoring of PDK50+468

由图11可以知, PDK50+468 断面施工全过程拱顶沉降均相对较小, 下台阶与仰拱施工后, 上下台阶收敛变形持续增大, 加设套拱并施作仰拱填充后, 上台阶收敛变形有所变缓, 下台阶收敛变形仍持续增大, 累计变形达65.21 cm, 因无收敛趋势, 现场被迫进行换拱处理。

### (3) 工况3: 双层支护+下台阶、仰拱分别施作

该方案在工况2的基础上, 对平导围岩地应力的释放采取了进一步控制, 下台阶与仰拱分别施作, 下部围岩应力释放达到“缓释”目的。该方案同工况2方案, 当第一层初支变形达到30 cm后, 施作第二层初支(套拱)。

试验段采用该方案进行施工, 控制变形收敛效果明显, 未出现变形过大造成侵限换拱情况。以PDK50+335 断面变形监测曲线为例进行说明, 如图12所示。

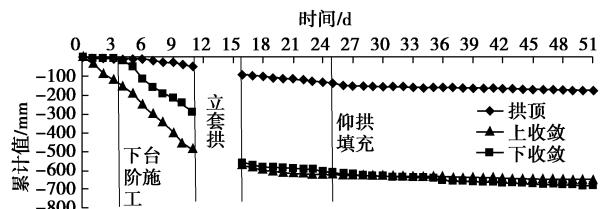


图12 PDK50+335 断面变形监测历时曲线

Fig. 12 Duration curves of section deformation monitoring of PDK50+335

由图12可知, 套拱施工前上下台阶收敛变形持续增大, 套拱施作后变形速率显著降低; 待仰拱填充施作后, 变形速率进一步降低, 变形趋于稳定。

试验段累计收敛变形均控制在70 cm之内(小于边墙预留变形总量80 cm), 且变形均基本达到稳定, 不需换拱。但本方案施工效率低下, 每月进尺只能维持在50 m左右。

### (4) 工况4: 单层支护+加强拱架+预留应急加固措施

该方案以“抗”为主, 属于“强支”方案。试验段 PDK50+285—PDK50+280、PDK50+270—PDK50+250、PDK50+243—PDK50+195 成功控制了围岩变形; 试验段 PDK50+280—PDK50+270、PDK50+250—PDK50+243, 现场施工初支收敛变形超过了35 cm, 采取了预留加固措施, 施作套拱(I18 钢拱架)后控制了围岩变形, 以 PDK50+244 断面变形监测曲线为例进行说明, 如图13所示。

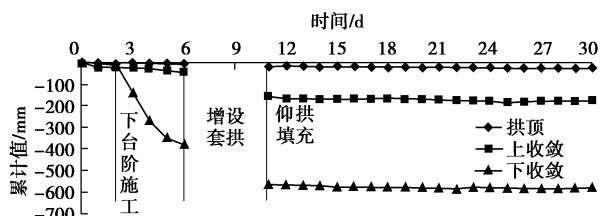


图13 PDK50+244 断面变形监测历时曲线

Fig. 13 Duration curves of section deformation monitoring of PDK50+244

由图13可知, PDK50+244 断面下台阶施工后变形速率增大, 下台阶收敛变形累计超过35 cm时, 现场及时增设了套拱, 套拱施作后收敛变形速率明显降低, 待仰拱填充施作完成后, 收敛变形基本达到稳定。

试验段累计收敛变形最大值为62.2 cm, 小于边墙预留变形总量80 cm(左右边墙各40 cm), 且收敛变形基本达到稳定, 不需换拱。本方案施工效率较工况3有较大提升, 月进尺约90 m。

### 3.2 试验对比分析

将4种工况试验结果列于表3所示。



表3 试验结果

Table 3 Test results

工况	试验方案	里程	长度/m	换拱长度/m	换拱百分比/%	最大日变形速率/(cm·d <sup>-1</sup> )	累计最大变形量/cm	平均月进尺/m
1	单层支护	PDK50+560—PDK50+520	40	40	100	5.6	76.8	15
2	双层支护+下台阶、仰拱一次性开挖	PDK50+520—PDK50+460	60	17	28.33	3.9	76.2	40
3	双层支护+下台阶、仰拱分段施作	PDK50+460—PDK50+285	175	0	0	3.6	68.9	50
4	单层支护+加强拱架+预留应急加固措施(套衬)	PDK50+285—PDK50+195	90	0	0	3.2	62.2	90

由表3可知:

(1)工况1将支护体系由IV级围岩锚喷I型支护(直墙-底板型)改为V级围岩锚喷支护(曲墙-仰拱型),并辅以围岩加固措施(围岩注浆及施设6.5 m长锚杆等),试验段全长40 m均未控制住围岩大变形,试验段全长限,被迫换拱,试验失败。这说明所采取的支护刚度不足以抵抗围岩应力,可从继续提高单层支护的刚度、适度释放围岩压力两个方面予以改进工程控制措施。

(2)工况2和工况3均属于“抗放结合”控制措施,即提高支护刚度又释放一定的围岩压力。工况2下台阶与仰拱一次性开挖,此阶段下部围岩应力释放急促,导致PDK50+477—PDK50+460试验段共17 m出现仰拱开裂隆起、边墙大变形限灾害,不得不重新施作仰拱及换拱,影响了施工进度。工况3在此基础上,下台阶与仰拱分别施作,下部围岩应力释放得到有效控制,试验段全长175 m未出现围岩大变形限灾害,但由于工序繁琐,施工进度受到限制,月进尺仅50 m,如按此方案进行施工,出口平导无法起到超前作用,将严重影响中义隧道出口工区总体施工进度。

(3)工况4以加快平导施工进度为目的,在提高边墙围岩承载能力和抗变形能力的基础上(围岩注浆及施设6.5 m长锚杆加固围岩),采用“强支”方案(预留应急加固措施),实现了围岩-支护双向加强、共同承载的目的,有效控制了试验段边墙的围岩变形。试验段全长90 m未出现围岩大变形限灾害,实现了安全、快速施工的目的,该方案月进尺达90 m,且有继续提升的空间。该方案适用于工期较紧、经加固围岩具有较好承载能力和抗变形能力的高地应力软岩隧道。

## 4 结 论

(1)中义隧道出口平导玉龙雪山西麓断裂破碎带

段围岩软弱、破碎,且该段埋深大、地应力极高,采用普通加强支护措施(工况1),无法控制围岩变形。

(2)采用“抗放结合”控制措施(工况2,3),围岩变形得到较为有效的控制。工况2所采取的“下台阶与仰拱一次性开挖”,下部围岩应力释放急促,致使部分试验段落出现围岩大变形,造成限换拱,影响了施工进度,不建议采用。工况3克服了工况2的缺点,下台阶与仰拱分别施作,下部围岩应力释放得到有效控制,但该方案工序繁琐,施工效率低下,施工进度缓慢。

(3)采用“强支”理念的工况4,最大日变形速率、累计最大变形量均最小,试验段全长围岩累计变形量在可控范围内,施工工序较为简单,施工月进尺可达90 m以上。

(4)为发挥平导的超前作用,提升工程整体的施工进度,建议中义隧道出口平导玉龙雪山西麓断裂破碎带段采用工况4(单层支护+加强拱架+预留应急加固措施)进行施工。

## 参考文献:

- [1] ORESTEPP, PEILAD. Modelling progressive hardening of shotcretein convergence-confinement approach to tunnel design[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1997, **12**(3): 425 – 431.
- [2] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010. (WANG Meng-shu. Tunnelling and underground engineering technology in China[M]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese))
- [3] 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. Engineering mechanics of soft rock[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [4] 关宝树, 赵 勇. 软弱围岩隧道施工技术[M]. 北京: 人民

- 交通出版社, 2011. (GUAN Bao-shu, ZHAO Yong. Construction technology of tunnel in soft surrounding rock[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))
- [5] 赵 勇. 隧道软弱围岩变形机制与控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012. (ZHAO Yong. Study on deformation mechanism and control technology of weak rock surrounding tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [6] 近藤敏达. NATM 调查. 计测と施工管理の問題点[J]. 施工技术, 1977(11): 76 - 80. (KONDO T. The management problem of measurement and control in tunnel construction with the NATM[J]. Construction Technology, 1977(11): 76 - 80. (in Japanese))
- [7] KIMURA F, OKABAYASHI N, KAWAMOTO T. Tunneling through squeezing rock in two large fault zones of the Enasan tunnel II[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1987, 20(3): 151 - 166.
- [8] 张祉道. 家竹箐隧道施工中支护大变形的整治[J]. 世界隧道, 1997(1): 7 - 16. (ZHANG Zhi-dao. Regulation of support large deformation for Jiazhuqing tunnel in construction[J]. Modern Tunneling Technology, 1997(1): 7 - 16. (in Chinese))
- [9] 刘 高, 张帆宇, 李新召, 等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5521 - 5526. (LIU Gao, ZHANG Fan-yu, LI Xin-zhao, et al. Research on large deformation and its mechanism of muzhailing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5521 - 5526. (in Chinese))
- [10] 李国良, 朱永全. 乌鞘岭隧道高地应力软弱围岩大变形控制技术[J]. 铁道工程学报, 2008(3): 54 - 59. (LI Guo-liang, ZHU Yong-quan. Control technology for large deformation of high land stressed weak rock in wushaoling tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2008(3): 54 - 59. (in Chinese))
- [11] 邹育麟, 何 川, 周 艺, 等. 强震区软弱破碎千枚岩隧道系统锚杆支护作用效果分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 2001 - 2008. (ZOU Yu-lin, HE Chuan, ZHOU Yi, et al. Analysis of supporting effect of systematic bolts applied to weak and broken phyllite tunnels in meizoseismal area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 2001 - 2008. (in Chinese))
- [12] 万 飞, 谭忠盛, 马 栋. 关角隧道  $F_{2-1}$  断层破碎带支护结构优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 531 - 538. (WAN Fei, TAN Zhong-sheng, MA Dong. Optimizing design of support structure for Guanjiao tunnel in fault-rupture zone  $F_{2-1}$ [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 531 - 538. (in Chinese))
- [13] 张德华, 刘士海, 任少强. 高地应力软岩隧道中型钢与格栅支护适应性现场对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2258 - 2266. (ZHANG De-hua, LIU Shi-hai, RENG Shao-qiang. Research on selection of steel and steel grid for tunnel support in soft rock with high geostress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2258 - 2266. (in Chinese))
- [14] 丁远振, 谭忠盛, 马 栋. 高地应力断层带软岩隧道变形特征与控制措施研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 1): 129 - 134. (DING Yuan-zhen, TAN Zhong-sheng, MA Dong. Study on large deformation characteristics and control measures of soft rock tunnel in fault zone with high geostress[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(S1): 129 - 134. (in Chinese))
- [15] 李术才, 徐 飞, 李利平, 等. 隧道工程大变形研究现状、问题与对策及新型支护体系应用介绍[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(7): 1366 - 1376. (LI Shu-cai, XU Fei, LI Li-ping, et al. State of the art: challenge and methods on large deformation in tunnel engineering and introduction of a new type supporting system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(7): 1366 - 1376. (in Chinese))