

软弱围岩隧道掌子面挤出变形特征分析\*

朱正国,李文江,刘志春,孙明磊,武杰

(石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043)

**摘 要:**软弱围岩在隧道工程中经常遇到,它的空间大变形特征受台阶长度、台阶高度、工法及地应力水平等条件的影响。结合兰渝铁路两水隧道现场监测和数值模拟相结合的方法对软弱围岩隧道的空间变形特征进行了详细分析。研究表明:围岩越弱掌子面纵向挤出变形大小及变形速率越大,掌子面挤出变形受上台阶断面开挖高度和围岩级别影响较受台阶长度影响显著;在洞周先行变形中,拱顶下沉较水平收敛更加明显;初始地应力场应力水平增高,隧道掌子面挤出变形会大幅增加。研究结果可为指导隧道的施工和设计提供有效依据。

**关键词:** 软弱围岩;隧道;掌子面挤出变形;空间变形;数值模拟

中图分类号:U451      文献标识码:A      文章编号:1673-0836(2017)03-0711-06

Characteristics Analysis of Tunnel Face Extrusion Deformation  
in Weak Surrounding Rock

Zhu Zhengguo, Li Wenjiang, Liu Zhichun, Sun Minhlei, Wu Jie

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei, 050043, P.R. China)

**Abstract:** Weak surrounding rock is often encountered in the construction of tunnel, whose space large deformation feature is affected by length, height, construction method and ground stress condition etc. Spatial deformation characteristics of weak surrounding rock tunnel were analyzed in detail based on field monitoring and numerical simulation of Lanzhou-Chongqing railway Liangshui tunnel. The results show that: the weaker the surrounding rock is, the larger tunnel face vertical extrusion deformation and deformation rate are, the tunnel face extrusion deformation is affected more by the upper step excavation height and surrounding rock level than step length; Among the pre-deformation of cave, the crown settlement is more obvious than the horizontal convergence; when initial ground stress level increases, the tunnel face extrusion deformation will increase sharply. The research results can provide effective basis for the design and construction of tunnel.

**Keywords:** weak surrounding rock; tunnel; tunnel face extrusion deformation; spatial deformation; numerical simulation

0 引言

软弱围岩一般是指质软、结构松散、破碎的围岩。根据目前铁路隧道围岩分级方法,该类围岩一般属于V、VI级围岩。软弱围岩的工程特征主要表

现为岩石强度低、岩体结构面发育、对工程扰动的反应灵敏和变形持续时间长等。软弱围岩由于其自身强度低,在一定工程背景条件下往往表现出变形量级大、变形发展快的特点,施工中一旦控制不当,容易产生支护开裂、侵限现象,甚至产生坍塌。

\* 收稿日期:2016-07-17(修改稿)  
作者简介:朱正国(1977-),男,安徽枞阳人,博士,教授,博士生导师,主要从事于岩土工程与地下工程的教学和科研工作。E-mail:myztx@163.com  
基金项目:国家自然科学基金(51478277);河北省自然科学基金(E2016210018);河北省高校百名创新人才计划(Ⅲ)(SLRC2017054)

目前许多学者采用理论分析和数值模拟等手段对软弱围岩隧道施工力学响应的解析解、受力变形特征、监测数据统计分析及二衬施做时机等进行大量的研究工作<sup>[1-12]</sup>,取得了一定的研究成果。但从目前关于软弱围岩变形规律的研究现状来看,无论是理论研究还是现场试验,其研究重点基本集中在隧道开挖后的洞周变形上。受认识水平和监测技术的影响,关于掌子面前方及掌子面的变形的研究结果不多。而根据新意法基本原理,对于软弱围岩,恰恰是掌子面及其前方围岩变形的控制效果才是影响隧道整体稳定和变形量级的关键。为此,本文以兰渝铁路两水隧道为工程背景,系统深入地开展软弱围岩隧道三维空间全过程变形特征研究,特别是掌子面变形特征研究应该是软弱围岩隧道的重点研究内容之一,对指导设计与施工具有重要意义。

## 1 计算工况

计算工况按台阶长度、高度及支护情况进行详细分类,埋深条件取 300 m。围岩取 V 级和 VI 级,具体计算工况:

(1)上台阶不同长度的影响:单层支护台阶法施工模拟、上台阶高度为 6 m 及下台阶长度为 15 m 条件下,上台阶长度为 3 m、6 m 和 9 m 这 3 种工况。

(2)下台阶不同长度的影响:单层支护台阶法施工模拟、上台阶高度为 6 m 及上台阶长度为 6 m 条件下,下台阶长度为 9 m、15 m 和 30 m 这 3 种工况。

(3)台阶高度的影响:单层支护台阶法施工模拟、上台阶长度为 6 m 及下台阶长度为 15 m 条件下,落底高 2.3 m,上台阶高 4 m、5 m 和 6 m 这 3 种工况。

(4)工法的影响:单层支护多种工法施工模拟、上台阶高度为 6 m、上台阶长度为 6 m 及下台阶长度为 15 m 条件下,模拟标准断面台阶工法、预留核心土工法和扩大拱脚工法等 3 种工况。

(5)双层初期支护施作时机的影响:双层支护台阶法施工模拟、上台阶高度为 6 m、下台阶长度为 15 m,上台阶长度为 6 m 条件下,再施做第二层 20 cm 厚初期支护时间分别为:开挖下台阶时、与下台阶喷混凝土同时施作和与仰拱同时施作共 3

种工况。

(6)地应力水平的影响:单层支护台阶法施工模拟、上台阶高度为 6 m、上台阶长度为 6 m,下台阶长度为 15 m 条件下,侧压力系数取“ $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.75$ ”、“ $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.0$ ”、“ $\lambda_1 = \lambda_2 = 1.35$ ”、“ $\lambda_1 = 1.0$ ,  $\lambda_2 = 0.75$ ”和“ $\lambda_1 = 1.35$ ,  $\lambda_2 = 0.75$ ”等 5 种工况。

## 2 计算模型和计算参数

隧道横断面参照铁路系统时速 200 km/h 客货共线双线隧道断面标准图,隧道宽度为 14.06 m,高度为 12.49 m。

为减少边界约束效应,计算范围按左右边界距隧道中心线距离 3~5 倍洞径考虑,底部边界距隧道底部的距离按 3~5 倍隧道高度考虑。整个计算模型在 X、Y、Z 三个方向尺寸为 90 m×50 m×91.5 m(隧道顶部到模型上表面的距离为 50 m,其余 250 m 埋深通过在模型上表面施加应力来实现),模型左、右、前、后和下部边界均施加法向约束。围岩及初期支护结构均采用八节点六面体单元来模拟。三维数值计算模型如图 1。

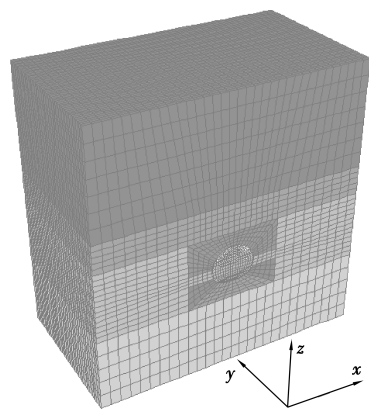


图1 三维数值计算模型

Fig. 1 Three-dimensional numerical calculation model

围岩视为摩尔-库伦理想弹塑性材料,支护结构均视为弹性材料。钢架采用 I20b 全环设置,间距为 0.5 m,初期支护为 30 cm 厚的 C25 喷射混凝土,钢架在计算模拟时根据抗弯刚度等效原理来提高初期支护的弹性模量;拱部采用  $\phi 25$  组合中空锚杆,边墙采用  $\phi 22$  全螺纹砂浆锚杆,  $L=6.0$  m, @ 100 cm×80 cm(环×纵)。围岩物理力学参数参照地质资料及现行《铁路隧道设计规范》选取,其物理力学指标如表 1。

表 1 地层和支护的物理力学性能指标

Table 1 Physical and mechanical properties of strata and support

材料 类型	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松 比	粘聚力/ MPa	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )
Ⅵ级围岩	24	0.3	0.43	0.2	24
V 级围岩	22	1	0.4	3.0	27
初期支护	22	27.1	0.2	—	—

3 掌子面挤出变形特征分析

根据两水隧道工程特点及工期控制要求,采用上、下台阶加落底施工,计算每开挖步开挖进尺 1 m,初期支护滞后一个开挖循环,即每一循环开挖时同时施做上一循环的支护。为最大限度减少边界约束对计算结果的影响,数值模拟分析的目标面设在模型的中间位置。

上述不同计算工况掌子面最大挤出变形汇总如表 2。单层支护台阶法施工模拟上台阶高度为 6 m、下台阶长度为 15 m 及上台阶长度为 6 m 时Ⅵ级围岩上、下台阶的掌子面挤出变形云图,分别如图 2 和图 3 所示(其他工况略)。

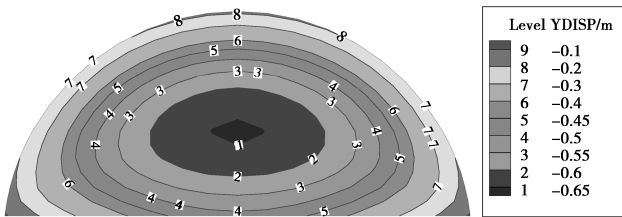


图 2 上台阶长度为 6 m 工况上台阶掌子面挤出变形

Fig. 2 Tunnel face extrusion deformation of upper bench section when the length of upper bench is 6 m

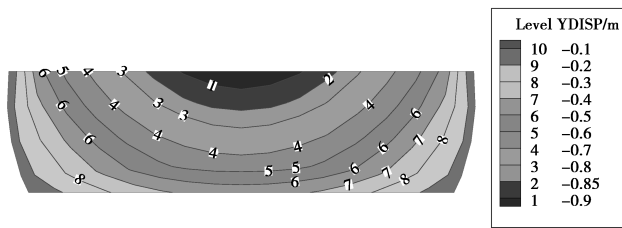


图 3 上台阶长度为 6 m 工况下台阶掌子面挤出变形

Fig. 3 Tunnel face extrusion deformation of lower bench section when the length of upper bench is 6 m

表 2 各计算工况掌子面最大挤出变形

(单位:mm)

Table 2 Tunnel face maximum extrusion deformation in each calculation condition (unit:mm)

计算工况		围岩级别			
		V 级		Ⅵ级	
		上 台阶	下 台阶	上 台阶	下 台阶
不同 上台阶 长度	3 m	147	160	665	941
	6 m	148	137	655	935
	9 m	148	128	656	891
不同 下台阶 长度	9 m	142	181	643	916
	15 m	143	182	655	935
	30 m	143	181	656	941
不同 上台阶 高度	4 m	101	209	456	958
	5 m	120	202	547	962
	6 m	136	189	632	957
不同 工法	台阶工法	143	182	655	935
	预留核心土工法	96	211	448	1010
	扩大拱脚工法	141	179	659	952
第二层 初期支护 施作时机	开挖下台阶时	139	171	640	884
	与下台阶喷混凝土 同时施作	139	171	641	885
	与仰拱同时施作	141	174	654	906
地应力 水平 (侧压力 系数)	$\lambda_1 = \lambda_2 = 0.75$	158	193	640	970
	$\lambda_1 = \lambda_2 = 1.0$	227	277	865	1 251
	$\lambda_1 = \lambda_2 = 1.35$	347	423	1 169	1 636
	$\lambda_1 = 1.0, \lambda_2 = 0.75$	160	198	670	1 010
	$\lambda_1 = 1.35,$ $\lambda_2 = 0.75$	172	213	765	1 148

注: $\lambda_1$ 为隧道横断面方向侧压力系数, $\lambda_2$ 沿隧道轴线方向侧压力系数。

由表 2 和图 2、图 3 可得,对于深埋隧道,V 级和Ⅵ级围岩区段掌子面的稳定性问题不容忽视,施工中应采取适当措施,以有效控制掌子面变形,并确保掌子面稳定。在台阶法施工过程中,掌子面挤出变形受上台阶断面开挖高度和围岩级别影响较受台阶长度影响显著。从变形云图可以看出,上台阶最大挤出变形发生在掌子面中部偏下位置,下台阶最大挤出变形发生在台阶顶部。具体各工况计

算结果分析如下:

(1)上台阶长度影响。随着上台阶长度增加,V级围岩上台阶掌子面挤出变形基本上没有变化,但下台阶掌子面挤出变形逐渐减小,受台阶长度影响较大;VI级围岩上台阶掌子面挤出变形减小,下台阶的掌子面挤出变形比上台阶的掌子面挤出变形大,但上台阶长度的变化对上、下台阶掌子面的挤出变形影响较小。

(2)下台阶长度影响。随着下台阶长度的增加,V级围岩上台阶掌子面挤出变形变化很小,且下台阶的掌子面挤出变形比上台阶的掌子面挤出变形大;VI级围岩掌子面挤出变形呈增大的趋势,下台阶的掌子面挤出变形比上台阶的掌子面挤出变形大,最大值达 941 mm。

(3)台阶高度影响。V级围岩下台阶掌子面的挤出变形都比上台阶掌子面的挤出变形大,随着上台阶高度的增加,上台阶掌子面挤出变形逐渐增加,而下台阶的掌子面最大挤出变形逐渐减小;VI级围岩下台阶掌子面的挤出变形都比上台阶掌子面的挤出变形大,随着上台阶高度的增加,上台阶掌子面挤出变形呈增加的趋势,上台阶高度对下台阶掌子面的挤出变形基本上不影响。

(4)工法影响。V级围岩和VI级围岩不同工法掌子面挤出变形规律基本上一致,预留核心土法对控制上台阶掌子面的挤出变形效果非常明显,有利于掌子面稳定,而扩大拱脚法因开挖断面面积增大,掌子面挤出变形与标准断面台阶法基本差不多。

(5)第二层初期支护施做时机影响。V级围岩和VI级围岩掌子面挤出变形规律基本上一致,第二层初支施做时机越晚,掌子面挤出变形越大,与下台阶喷混凝土同时施做第二层初支的掌子面挤出变形和开挖下台阶时施做第二层初支基本一样,但对施工来说,与下台阶喷混凝土同时施做第二层初支比较方便,所以建议施工第二层初支的时机为与下台阶喷混凝土同时施做。

(6)地应力水平影响。V级围岩和VI级围岩掌子面挤出变形受地应力水平影响规律基本上一致,随着初始地应力场应力水平增高,隧道掌子面挤出变形会大幅增加;隧道掌子面挤出变形受沿隧

道纵向的侧压力系数( $\lambda_2$ )影响很大,受沿隧道横断面方向侧压力系数( $\lambda_1$ )影响较小。

### 4 掌子面挤出变形与洞周变形的关系

典型工况下(双线隧道VI级围岩)洞周变形施工过程演化形态如图 4 所示。

由图 4 可知,隧道施工变形一般由 3 个部分构成,即掌子面前方先行变形、掌子面变形和掌子面后方变形。对于软弱围岩隧道,空间变形(特别是掌子面前方先行变形)十分显著。因此,施工过程中如何实现对隧道空间变形的有效控制,并确保洞室稳定是决定成功与否的关键所在。

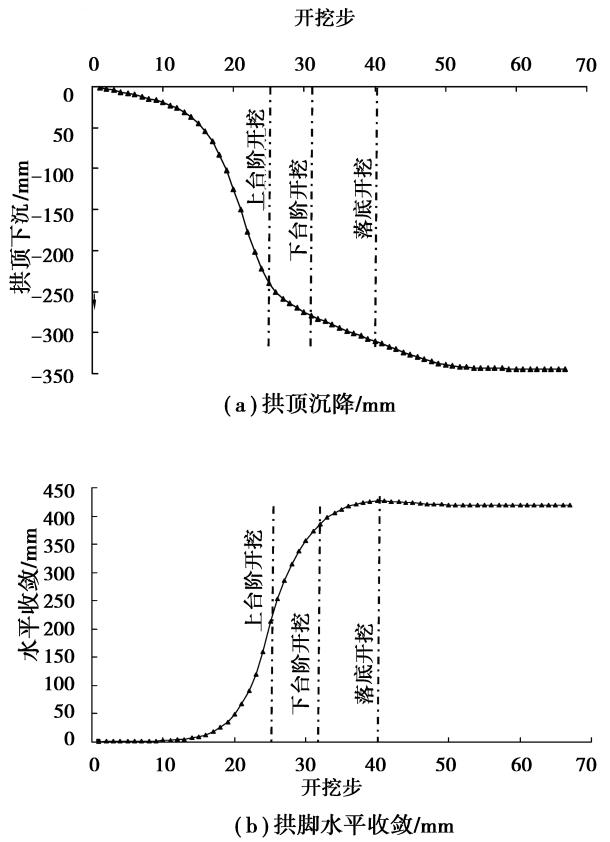


图 4 洞周典型部位变形演化形态

Fig. 4 Evolution of deformation of cave typical parts

为进一步揭示软弱围岩隧道的变形特征,列出各计算工况掌子面挤出变形与洞周预变形计算汇总结果如表 3(因篇幅关系,只列出 VI 级围岩计算结果)。



表 3 VI 级围岩各计算工况掌子面挤出变形与洞周变形结果

Table 3 Tunnel face extrusion deformation in each calculation condition in VI-class surrounding rock mass and the deformation calculation results of the cave

计算 工况		上台 阶掌 子面 挤出 变形 /mm	上台		拱脚处		拱顶下沉		拱脚沉降	
			阶掌		收敛					
							先行		先行	
			终值	变形	终值	变形	终值	变形	终值	变形
			/mm	比例	/mm	比例	/mm	比例	/mm	比例
				/%		/%		/%		/%
不同	3 m	665	460	55.7	362	68.8	252	34.5		
上台阶	6 m	655	472	45.8	376	65.7	273	27.1		
长度	9 m	656	500	39.8	392	63.3	301	21.9		
不同	9 m	643	418	50.7	344	69.5	225	30.7		
下台阶	15 m	655	472	45.8	376	65.7	273	27.1		
长度	30 m	656	588	36.7	430	57.9	376	19.9		
不同	4 m	456	510	30.6	365	61.1	239	26.4		
上台阶	5 m	547	480	35.4	370	63.5	253	25.3		
高度	6 m	632	474	41.4	376	64.9	272	23.5		
不同 工法	台阶 工法	655	472	45.8	376	65.7	273	27.1		
	留核心 土工法	448	446	43.5	365	62.7	284	26.8		
	扩大拱 脚工法	659	232	92.2	365	67.4	169	14.8		
第二层 初期支 护施作 时机	开挖下 台阶时	640	408	50.0	343	68.8	235	28.5		
	与下台 阶喷混 凝土同 时	641	416	49.8	345	68.7	236	28.4		
	与仰拱 同时	654	464	47.0	367	66.8	262	27.5		
地应力 水平 (侧压力 系数)	$\lambda_1=0.75,$ $\lambda_2=0.75$	640	500	36.4	252	62.3	137	15.3		
	$\lambda_1=1.0,$ $\lambda_2=1.0$	865	640	42.8	281	66.5	155	19.4		
	$\lambda_1=1.35,$ $\lambda_2=1.35$	1 169	968	48.6	375	68.3	218	21.6		
	$\lambda_1=1.0,$ $\lambda_2=0.75$	670	662	44.0	258	66.7	138	16.7		
	$\lambda_1=1.35,$ $\lambda_2=0.75$	765	1 036	49.2	365	64.1	206	20.4		
	平均值	668.5	531	46.5	354	65.4	23.8	24.1		

注:先行变形指上台阶掌子面开挖到模型中间分析目标面时各洞周相应变形大小。

由表 3 可知,软弱围岩隧道在施工过程中掌子

面的挤出变形和洞周先行变形均相对明显,拱顶下沉先行变形比例达 65.42%,拱脚处水平收敛先行变形比例达 46.55%,上台阶掌子面挤出变形的发生势必将引起上部核心部土体(掌子面前方土体)的横向收缩变形(若不计体变的影响)。所以在实际工程中,若采取有效措施将掌子面挤出变形控制在一个较合理的范围内,则拱顶先行变形也可得到较好控制。

5 典型工程现场试验结果

为反映隧道施工过程中掌子面内部围岩的变形规律,兰渝铁路两水隧道在国内首次开展隧道掌子面内部纵向位移及沉降量测。两水隧道位于甘肃省武都区白龙江左岸中山区,地形较为陡峻,相对高差为 400 m,隧道最大埋深为 346 m,为双线隧道,全长 4 922.35 m。隧道全段岩性以千枚岩夹板岩及炭质千枚岩夹板岩为主,弱富水,围岩级别为 V 级。施工中采用台阶法开挖方式。测试中,掌子面内部纵向位移采用意大利 SISGEO 公司的 T-REX 滑动测微计进行量测;掌子面内部沉降采用国产 XB338-B 型智能数显滑动式沉降仪进行量测。

根据数值分析结果,掌子面挤出变形影响范围在开挖面前方 1.2~1.3D(D 为隧道宽度),上台阶断面最大值发生位置为上台阶中下部。现场测管埋设位置基本与上台阶掌子面计算最大挤出变形发生位置相一致,采用潜孔钻机成孔,钻孔直径为 130 mm,孔深 30 m,埋设  $\phi 70$  PVC 测管,测管外每隔 1 m 设一个磁力测环,测管与孔壁间注水泥浆锚固。测试工作于 2010 年 6 月全面展开,图 5 为现场测管埋设的照片,测试结果如图 6 和图 7。

由图 6 和图 7 知,根据测试结果,隧道围岩内部纵向位移明显,最大纵向位移为 127 mm,靠近掌子面部位纵向位移速率明显大于深部测点,先行变形影响范围约为 1.2 倍洞跨;隧道掌子面围岩内部变形速率较大,最大沉降达 99.8 mm,先行变形影响范围约为 1.5 倍洞跨。另外,此实验段拱顶下沉值为 112~124 mm,即拱顶下沉的先行变形比例约 45.8%,与 V 级围岩数值模拟结果一致。



图 5 埋管作业

Fig. 5 Pipe burying

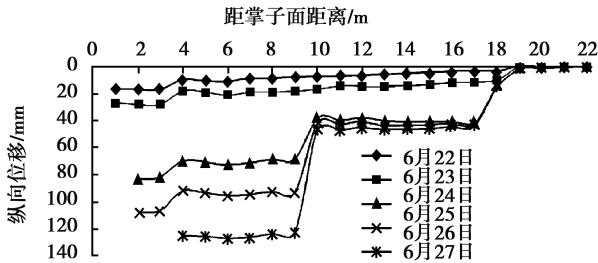


图 6 掌子面内部纵向位移量测结果

Fig. 6 Measurement results of longitudinal displacement of internal tunnel face

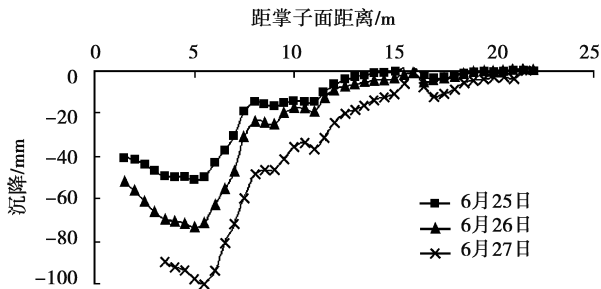


图 7 掌子面内部沉降量测结果

Fig. 7 Measurement results of settlement of internal tunnel face

## 6 结论

(1)隧道施工变形一般由 3 个部分构成,即掌子面前方先行变形、掌子面变形和掌子面后方变形。对于软弱围岩隧道,空间变形(特别是掌子面前方先行变形)十分显著。因此,施工过程中如何实现对隧道空间变形的有效控制,并确保洞室稳定是决定成功与否的关键所在。

(2)随着初始地应力场应力水平增高,隧道掌子面挤出变形会大幅增加;隧道掌子面挤出变形受沿隧道纵向的侧压力系数影响很大,受沿隧道横断面方向侧压力系数影响较小。

(3)在先行变形中,拱顶下沉较水平收敛更加明显,围岩越差,拱顶下沉的先行变形比例越高,甚至越过 50%,说明软弱围岩隧道施工中加强拱部超前预支护对控制大变形有重要意义。

(4)软弱围岩隧道施工过程中,掌子面纵向挤出变形明显,掌子面挤出变形受上台阶断面开挖高度和围岩级别影响较受台阶长度影响显著,而且随着围岩越弱挤出变形越发显著,上台阶最大挤出变形发生在掌子面中部偏下位置,下台阶最大挤出变形发生在台阶顶部。对于大断面软弱围岩隧道,施工过程中应采取预留核心土、掌子面超前预加固等措施,以确保掌子面的稳定,并使掌子面挤出变形得到有效控制。

(5)典型工程的实测结果还反映出软弱围岩隧道施工中变形速率较大这一特点,因此,在实际工程中应严格贯彻“紧支护、快封闭”这一原则。

## 参考文献 (References)

- [1] Yang X L, Huang F. Influences of strain softening and seepage on elastic and plastic solutions of circular openings in nonlinear rock masses [J]. Journal of Central South University, 2010, (17): 621-627.
- [2] 黄阜, 杨小礼. 考虑渗透力和原始 Hoek-Brown 屈服准则时圆形洞室解析解[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1627-1632. (Huang Fu, Yang Xiaoli. Analytical solution of circular openings subjected to seepage in Hoek-Brown media [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1627-1632. (in Chinese))
- [3] Yang X L, Zou J F. Stability factors for rock slopes subjected to pore water pressure based on the Hoek-Brown failure criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 43 (7): 1146-1152.
- [4] 何满潮, 郭宏云, 陈新, 等. 基于和分解有限变形力学理论的深部软岩巷道开挖大变形数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 2): 4050-4055. (He Manchao, Guo Hongyun, Chen xin, et al. Numerical simulation analysis of large deformation of deep soft rock engineering based on solar decomposition theorem[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (Supp. 2): 4050-4055. (in Chinese))