

大凉山1号软岩隧道变形控制方案设计

许宇¹, 李净凯^{2,3}, 郭京波^{3,4}, 武薇^{3,4}, 刘金博^{3,4}

¹中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安

²石家庄铁道大学交通运输学院, 河北 石家庄

³石家庄铁道大学省部共建交通工程结构力学行为与系统国家安全重点实验室, 河北 石家庄

⁴石家庄铁道大学机械工程学院, 河北 石家庄

收稿日期: 2023年6月14日; 录用日期: 2023年7月5日; 发布日期: 2023年7月18日

摘要

以四川省大凉山1号平导洞隧道工程为背景, 针对软岩的流变性造成隧道结构不稳定、变形量大的问题, 设计隧道初支护系统。通过对喷射混凝土、锚杆、H型钢拱架提供的支护抗力和围岩自承力进行计算, 利用剪切滑移破坏法对喷射混凝土强度及厚度、钢筋网型号及间距、锚杆型号及间距、H型钢拱架型号及间距进行计算与选型。在满足预留变形量小于5 cm的条件下, 选用型号尺寸相对较小的支护材料, 对于该工程中完整性较差的V级围岩采用C25强度混凝土、HW150工字钢和 $\phi 22$ 药卷锚杆。其他支撑能力较好的围岩中分别采用型号和强度较小的支护材料, 在保障施工安全的同时节约隧道中的空间成本以及施工成本。使用有限元软件ABAQUS对隧道围岩支护结构进行仿真分析, 仿真结果表明, 应力与位移场仿真结果与计算结果相比差异较小, 证明理论计算准确性高, 为建立软弱围岩大变形下的科学支护理论提供了思路。

关键词

TBM隧道, 初支护系统, 剪切滑移破坏法, ABAQUS

Design of Deformation Control Scheme for Daliangshan No. 1 Soft Rock Tunnel

Yu Xu¹, Jingkai Li^{2,3}, Jingbo Guo^{3,4}, Wei Wu^{3,4}, Jinbo Liu^{3,4}

¹China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²School of Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei

³State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei

⁴School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei

Received: Jun. 14th, 2023; accepted: Jul. 5th, 2023; published: Jul. 18th, 2023

Abstract

Based on the TBM tunnel project of Daliangshan No. 1 pilot tunnel in Sichuan Province, aiming at the problem of large tunnel deformation in soft rock, the primary support system of TBM tunnel is designed. Through the calculation of the support resistance provided by shotcrete, anchor rod and H-shaped steel arch and the self-supporting force of surrounding rock, the shear slip failure method is used to calculate and select the strength and thickness of shotcrete, the model and spacing of reinforcement mesh, the type and spacing of anchor rod and the model and spacing of H-shaped steel arch. Under the condition that the reserved deformation is less than 5cm, the support materials with relatively small model and size shall be selected. For class V surrounding rock with poor integrity in the project, C25 strength concrete, HW150 I-steel and $\phi 22$ cartridge bolt are used. In other surrounding rocks with better support capacity, the support materials with smaller model and strength are used respectively, which can save the space cost and construction cost in the tunnel while ensuring the construction safety. It provides an idea for the design of TBM tunnel support system under large deformation of soft surrounding rock.

Keywords

TBM Tunnel, Primary Support System, Shear Slip Failure Method, ABAQUS

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国地域广阔, 地形地貌种类繁多复杂, 隧道建设是我国交通基础设施建设中的重要一环, 发展高效的地下交通网是解决交通拥堵问题的有效途径。目前关于深埋软岩隧道变形控制与科学支护方案方面的研究有待进一步完善[1]。全断面隧道掘进机在软岩地层中掘进时, 常因围岩变形过大造成 TBM 卡机和支护结构变形等问题, 轻则延误工期, 重则隧道坍塌, 造成巨大的生命财产损失。因此, 有针对性的建立软弱围岩大变形下的科学支护方案尤为必要[2]。

许多学者对软弱围岩变形控制进行了深入研究。马栋等[3]以某工程中 V 级围岩段为试验段, 对高强度钢筋网和型钢钢架的支护抗力及隧洞周位移进行实测对比, 分析了高强度钢筋网在软岩隧道中的支护效果。尚伟鹏[4]设计锚网索喷联合支护, 通过布置监测点分析巷道围岩变形, 证明了该方案可以使巷道围岩的变形量得到有效的控制。谷拴成等[5]通过建立围岩与支护结构的协调变形力学模型, 分析锚杆长度、排距和支护能力之间的关系, 避免支护过剩和支护不足的问题。李鹏[6]针对软弱围岩水平应力高、支护难度大的问题, 对巷道围岩由塑性区变为破碎区的过程进行分析, 建立该过程的围岩受力模型, 通过“锚杆 + 锚索”联合锚注支护控制技术, 控制围岩变形。王克忠等[7]通过分析围岩分层支护的耦合作用, 发现在挂网喷射混凝土支护系统中增加钢筋, 可以有效控制围岩变形。剧仲林[8]对锚杆在支护过程中提供的切向和法向力, 按照支护结构分别建立计算模型, 通过分析围岩受到的载荷和各支护结构提供的支护抗力控制沉降。

针对软弱围岩的初期支护系统, 在工程实际中, 需充分考虑各种支护材料以及围岩自承能力对围岩变形的影响, 通过剪切滑移破坏法计算支护结构提供的支护抗力和围岩自身的承载能力, 确定合理的支

护材料的组合,在满足预留变形量的条件下,降低支护成本。

2. 工程及地质条件

2.1. 工程概况

工程位于四川省凉山州境内,为乐山至西昌高速公路马边至昭觉段,大凉山1号隧道K2标平导洞TBM法施工段,全长10,688 m,最大埋深1029 m。掘进方向为从平导洞出口进洞,先经过约2900 m曲线段,然后经过约4000 m直线段,再经约2200 m曲线段,最后经过1588 m直线段到达标段终点。工段如图1所示。

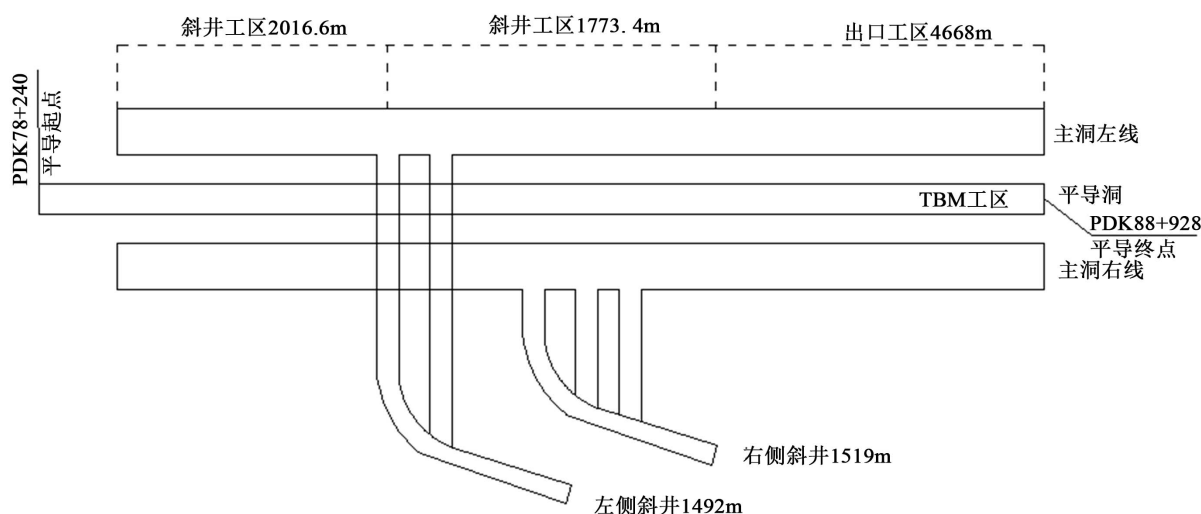


Figure 1. Schematic diagram of construction section of Daliangshan No. 1 tunnel K2 standard leveling guide tunnel using TBM method

图 1. 大凉山1号隧道K2标平导洞TBM法施工段示意图

该项目采用单护盾全断面隧道掘进机(TBM),支护形式采用混凝土、锚杆、钢拱架和钢筋网等。

2.2. 工程地质

隧道位于云贵高原与川西南山地过渡带,地势西高东低,属大凉山系。最高顶峰东北部大风山,海拔4042 m,最低处美姑河与金沙江汇合口,海拔440 m,一般高程2000 m左右。隧道洞身段地表穿越三叠系中统雷口坡组及嘉陵江组(T1j + 2L)地层,岩性主要由灰岩(II, III)、玄武岩(I)、石英砂岩、泥岩、页岩(IV, V)为主组成。其中灰岩以中厚层以上状构造为主,少量为薄层状构造。围岩已成松散碎石状结构,岩体较为松散、完整性和稳定性差,围岩强度不足,需采取喷混凝土、设置系统锚杆加钢筋网和钢拱架支撑,提高围岩结构的稳定性。

3. 剪切滑移破坏法

3.1. 剪切滑移体

开挖圆形坑道时,垂直荷载大于侧向荷载,水平直径的两侧因压应力集中而产生剪切滑移面。当围岩因受剪切而松弛导致应力释放时,剪切滑移面不再继续扩展后,在坑道水平直径两端形成两个剪切楔形滑移块体[9]。

3.2. 支护抗力的计算

支护系统所提供的支护抗力必须与剪切滑移体的滑移力相平衡。总支护抗力包括喷砼和钢筋网、钢拱架、锚杆以及围岩自身的承载力，如式(1)所示。

$$P = P_1(\text{喷砼}) + P_2(\text{钢架}) + P_3(\text{锚杆}) + P_4(\text{围岩}) > P_{\min} \quad (1)$$

4. 基于剪切滑移破坏法的隧道支护系统设计

60年代初，奥地利的拉布塞维奇教授，首先提出了剪切滑移破坏理论，指出锚喷柔性支护破坏形态主要是剪切破坏而不是挠曲破坏，且在剪切破坏前没有出现挠曲开裂[10]。因此，通过使隧道围岩的剪切滑移位移在预留变形量之内，设计所喷混凝土的厚度。

4.1. 隧道支护结构设计计算

4.1.1. 喷砼层提供的径向支护抗力 P'_1

喷砼抗力是指沿剪切面喷砼层在剪切区所提供的抗剪力。剪切滑移体向坑道方向移动时，对喷砼层产生水平推力，当喷砼层强度不足时，剪切滑移体的上下边缘处(应力集中区)形成两个剪切滑移面。

为使喷射混凝土有一定的力学强度和耐久性以及早期强度，喷射混凝土最低设计强度不低于 15 MPa，一般设计强度为 20 MPa，根据地层结构，建议采用 C25、C30 混凝土，其设计强度及弹性模量等物理力学性能按照国家标准进行选择[11]。式中参数名称及数值选择如表 1、表 2 所示。

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 围岩物理力学参数

围岩等级	III	IV	V
重度 γ (kN/m ³)	23~25 (取 24)	20~23 (取 22)	17~20 (取 19)
变形模量 E (GPa)	6~20 (取 15)	1.3~6 (取 5)	1~2 (取 2)
泊松比 μ	0.25~0.3 (取 0.25)	0.3~0.35 (取 0.3)	0.35~0.45 (取 0.35)
内摩擦角 φ (°)	39°	27°	20°
粘聚力 c (MPa)	1 MPa	0.5 MPa	0.1 MPa
剪切角 α (°)	25.5°	31.5°	35°
剪切滑动区域宽度 b (m)	7.16 m	6.76 m	6.50 m
普氏系数 f	10	6	4

Table 2. System resulting data of standard experiment

表 2. 喷射混凝土设计参数

性能	喷射混凝土强度等级	
	C25	C30
抗剪强度 τ_v /MPa	1.80	2.10
内摩擦角 φ_1 /°	50.6	50.8
喷砼的剪切角 α_v /°	19.7	19.6

$$\alpha = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

$$b = 2a \cos \alpha \quad (3)$$

$$P'_1 = Ad_s = \frac{2d_s \tau_s}{b \sin \alpha_s} \quad (4)$$

根据混凝土设计参数和围岩参数，算得不同强度混凝土所提供的支护抗力 P'_1 如表 3 所示。

Table 3. Radial support resistance provided by concrete spraying layer P'_1

表 3. 喷砼层提供的径向支护抗力 P'_1

喷射混凝土 强度等级	不同等级围岩所需混凝土支护抗力 P'_1 (t/m ²)		
	III	IV	V
C25	$149.21 \times d_s$	$157.95 \times d_s$	$164.40 \times d_s$
C30	$174.93 \times d_s$	$185.17 \times d_s$	$192.74 \times d_s$

4.1.2. 计算钢拱架承载力 P'_2

$$P'_2 = \frac{2F_s \tau_t}{b \sin \alpha_t} \quad (5)$$

H 形钢拱架材料为 Q345, F_s 为 H 形钢材截面面积, 单位为 m²; τ_t 为钢材的抗剪强度为 392~496 MPa, 取 $\tau_t = 440 \text{ MPa} = 44,000 \text{ t/m}^2$; α_t 为钢材剪切角, $\alpha_t = 45^\circ$ 。因隧道直径为 7.93 m, 隧道开挖跨度 $5 < B \leq 10 \text{ m}$, 三级围岩支护无需设置钢拱架[12]。不同等级围岩中选用不同型号 H 形钢拱架, 计算得径向支护抗力 P'_2 如表 4 所示。

Table 4. Partial design parameters of H-shaped steel arch and radial support resistance P'_2

表 4. H 形钢拱架的部分设计参数及径向支护抗力 P'_2

名义尺寸	截面面积 F_s (cm ²)	II、III 级围岩	III、IV 级围岩	IV~VI 级围岩
HW100 × 100 × 6 × 8	21.9	—	40.31	41.96
HW125 × 125 × 6.5 × 9	30.31	—	55.79	58.07
HW150 × 150 × 7 × 10	40.14	—	73.88	76.90

4.1.3. 计算锚杆对围岩的径向平均压力 P'_3

水泥药卷锚杆常用于公路隧道初期支护, 一般设计为全粘结型, 用早强型水泥为原料[13] [14] [15]。

1) 锚杆长度 L

$$L \geq L_1 + L_2 + L_3 \quad (6)$$

$$L_2 = \frac{\frac{B}{2} + H \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi}{2}\right)}{f} \quad (7)$$

式(7)中, L_1 为锚杆外露长度, 取 $L_1 = 0.1 \text{ m}$; L_2 为锚杆有效长度; L_3 为锚杆锚固长度, 取 $L_3 = 0.5 \text{ m}$; B 为隧道跨度, 取 $B = 7.93 \text{ m}$; H 为隧道高度, 取 $H = 7.93 \text{ m}$; φ 为围岩内摩擦角; f 为围岩普氏系数, 各级围岩 φ 和 f 如表 1 所示。

2) 锚杆锚固力 Q

$$Q = KL_2 e \gamma \quad (8)$$

式(8)中, K 为安全系数, $K = 1.5 \sim 2$, 取 $K = 2$; γ 为不稳定岩层平均密度。如果采用等距离布置锚杆, 每根锚杆所负担的岩体重量即为其所承受的载荷, 锚杆横向间距 t 和纵向间距 e 取值如表 5 所示。

3) 锚杆直径 d

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi\sigma}} \quad (9)$$

式(9)中, σ 为杆体材料抗拉强度, 螺纹钢锚杆的抗拉强度为 350 MPa。其余参数含义及计算结果如表 5 所示。

Table 5. Parameters and calculation results related to bolt design

表 5. 锚杆设计相关参数和计算结果

锚杆相关参数	围岩等级		
	III	IV	V
围岩影响系数 N	1.0	1.1	1.2
锚杆总长度设计值 L (m)	1.37	2.07	2.98
锚杆外露长度 L_1 (m)	0.1	0.1	0.1
锚杆有效长度 L_2 (m)	0.77	1.47	2.38
锚杆锚固长度 L_3 (m)	0.5	0.5	0.5
锚杆间距 e 和 t (m)	1.15 (取 1.0)	1.0 (取 0.8)	0.92 (取 0.8)
锚固力 Q (t/m ²)	37.19	44.42	57.87
锚杆直径 d (mm)	11.63 (取 16)	12.27 (取 20)	14.51 (取 22)
长度(m) × 根数	2 × 14	3 × 16	3 × 18
密度(根/m ²)	0.9	1.3	2

$$P'_3 = \frac{S}{e \cdot t} \quad (10)$$

$$P_3 = P'_3 \times \frac{\cos \alpha - \cos \theta_0}{\cos \alpha} \quad (11)$$

其中, S 为锚杆拉拔力, 按照国标中锚杆型号选取。由式(10)、(11)得出的平均径向支护抗力 P'_3 和锚杆承载力 P_3 计算结果如表 6 所示。

Table 6. Anchor bar is commonly used in different grades of surrounding rock

表 6. 不同等级围岩中常用锚杆钢筋受力

锚杆参数	不同等级围岩锚杆钢筋受力		
	III	IV	V
锚杆直径(mm)	φ16	φ20	φ22
锚杆拉拔力 S (t/m ²)	7.64	11.93	14.44
平均径向支护抗力 P'_3 (t/m ²)	7.64	18.59	22.56
锚杆承载力 P_3 (t/m ²)	2.22	8.55	15.36

4.1.4. 围岩本身提供的支护抗力 P_4

$$P_4 = \frac{\tau_n S' \cos \psi - \sigma_n S' \sin \psi}{b/2} \quad (12)$$

式(12)中, S' 为剪切滑移体长度; τ_n 、 σ_n 分别为沿滑移面的剪切应力和垂直于滑移面的正应力。不同强度混凝土和不同型号 H 形钢拱架时围岩自身的支护抗力 P_4 如表 7 所示。

Table 7. The supporting resistance of surrounding rock itself when different strength concrete and different types of H-shaped steel arch frame are P_4

表 7. 不同强度混凝土和不同型号 H 形钢拱架时围岩自身的支护抗力 P_4

喷射混凝土 强度等级	H 形钢拱架 名义尺寸	不同等级围岩自身的支护抗力 P_4 (t/m ²)		
		III (无钢拱架支护)	IV	V
C25	HW100 × 100 × 6 × 8	$2.34 + 523.84 \times d_s$	$13.80 + 435.71 \times d_s$	$4.73 + 146.27 \times d_s$
	HW125 × 125 × 6.5 × 9	$2.34 + 523.84 \times d_s$	$18.07 + 435.71 \times d_s$	$6.17 + 146.27 \times d_s$
	HW150 × 150 × 7 × 10	$2.34 + 523.84 \times d_s$	$23.06 + 435.71 \times d_s$	$7.84 + 146.27 \times d_s$
C30	HW100 × 100 × 6 × 8	$2.34 + 614.15 \times d_s$	$13.80 + 510.81 \times d_s$	$4.73 + 171.48 \times d_s$
	HW125 × 125 × 6.5 × 9	$2.34 + 614.15 \times d_s$	$18.07 + 510.81 \times d_s$	$6.17 + 171.48 \times d_s$
	HW150 × 150 × 7 × 10	$2.34 + 614.15 \times d_s$	$23.06 + 510.81 \times d_s$	$7.84 + 171.48 \times d_s$

初期支护的预留变形量不大于 5 cm 时, 需要混凝土强度等级、厚度、H 形钢拱架型号、锚杆型号如表 8 所示。

Table 8. Selection of concrete strength, thickness and type of H-shaped steel arch when the reserved deformation is 10 cm

表 8. 预留变形量为 10 cm 时混凝土强度、厚度和 H 形钢拱架型号选择

喷射混凝土 强度等级	H 形钢拱架 名义尺寸	不同围岩等级喷混凝土厚度 d_s (cm)		
		III	IV	V
		锚杆型号: 直径(mm) × 长度(m) × 根数		
		$\phi 16 \times 2 \times 14$	$\phi 20 \times 3 \times 16$	$\phi 22 \times 3 \times 18$
C25	HW100 × 100 × 6 × 8	3.57	7.85	11.88
	HW125 × 125 × 6.5 × 9	3.57	6.87	10.90
	HW150 × 150 × 7 × 10	3.57	5.72	9.76
C30	HW100 × 100 × 6 × 8	3.04	6.69	10.14
	HW125 × 125 × 6.5 × 9	3.04	5.86	9.30
	HW150 × 150 × 7 × 10	3.04	4.88	8.32

4.2. TBM 开挖初期支护参数

该 TBM 工程中开挖初期支护系统设计结果如表 9 所示。

Table 9. Supporting parameters at the initial stage of TBM excavation
表 9. TBM 开挖初期支护参数

围岩级别	预留变形量 (cm)	初期支护参数									
		C25 喷砼		钢筋网			药卷锚杆			工字钢	
		位置	厚度 (cm)	位置	直径(mm)	间距 A × a (cm)	位置	直径(mm)	长度(m)	间距 B × c (cm)	类型(cm)
III	5	全断面	5	拱部 180°	φ8	20 × 20	拱部 90°	φ16	2	100 × 100	——
IV	5	全断面	10	全断面	φ8	20 × 20	拱部 180°	φ20	3	80 × 80	HW125 × 125 × 6.5 × 9
V	5	全断面	15	全断面	φ8	20 × 20	拱部 180°	φ22	3	80 × 80	HW150 × 150 × 7 × 10

5. 仿真分析

5.1. 隧道建模

该 TBM 隧道由钢拱架以及混凝土衬砌支撑，基于有限元软件 ABAQUS，采用连续介质力学模型，建立施工过程中的 TBM 隧道支护有限元模型，对支护结构进行有限元仿真与分析。设软弱破碎岩体中的隧洞为均质圆形隧洞，隧道半径 4.98 m，隧道埋深 100 m，隧道周围黏土的本构简化为线弹性($E = 15 \text{ GPa}$, $\mu = 0.25$, $\gamma = 24 \text{ kN/m}^2$)，C30 混凝土衬砌($E = 30 \text{ GPa}$, $\mu = 0.167$)，厚度为 0.12 m，隧道网格模型如图 2 所示，其中，顶面直接取至物理对象顶面。

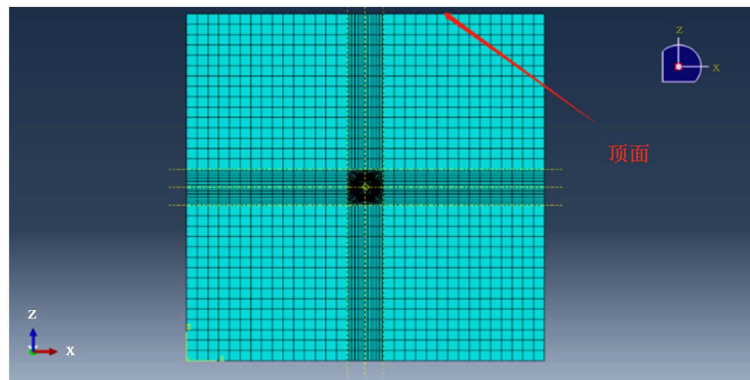


Figure 2. Tunnel mesh model
图 2. 隧道网格模型

对边界约束条件的设置中，顶面为自由面，前、后面为切向约束，左、右面为法向约束，都为水平约束，底面为三向约束。围岩、衬砌和将被开挖岩体采用实体单元(C3D8R)，整个模型共有 25,700 个单元。混凝土材料采用塑性损伤模型，围岩材料采用线性模型[16]。为保证有限元模拟结果的收敛性同时提高有限元分析的效率，在利用 ABAQUS 建模时假设 TBM 隧道混凝土界面不发生粘结滑移。

5.2. 初始应力场平衡及开挖方案设计

初始应力场是 TBM 隧道开挖之前的地应力场，由岩土体自重应力和构造应力组成，由于土体经历长期的固结，初始位移通常设为 0。通过采用 *INITIAL CONDITIONS, TYPE = STRESS、INPUT = FILENAME.INP 的方法，模拟地表起伏不平的实际山体。整个开挖过程为全断面开挖，采用“生死单元法”模拟围岩的应力释放[17]。

5.3. 仿真结果与分析

开挖仿真完成后，围岩的应力分布云图如图 3(a)~(c)，隧洞发生的位移如图 4(a)~(c)所示。

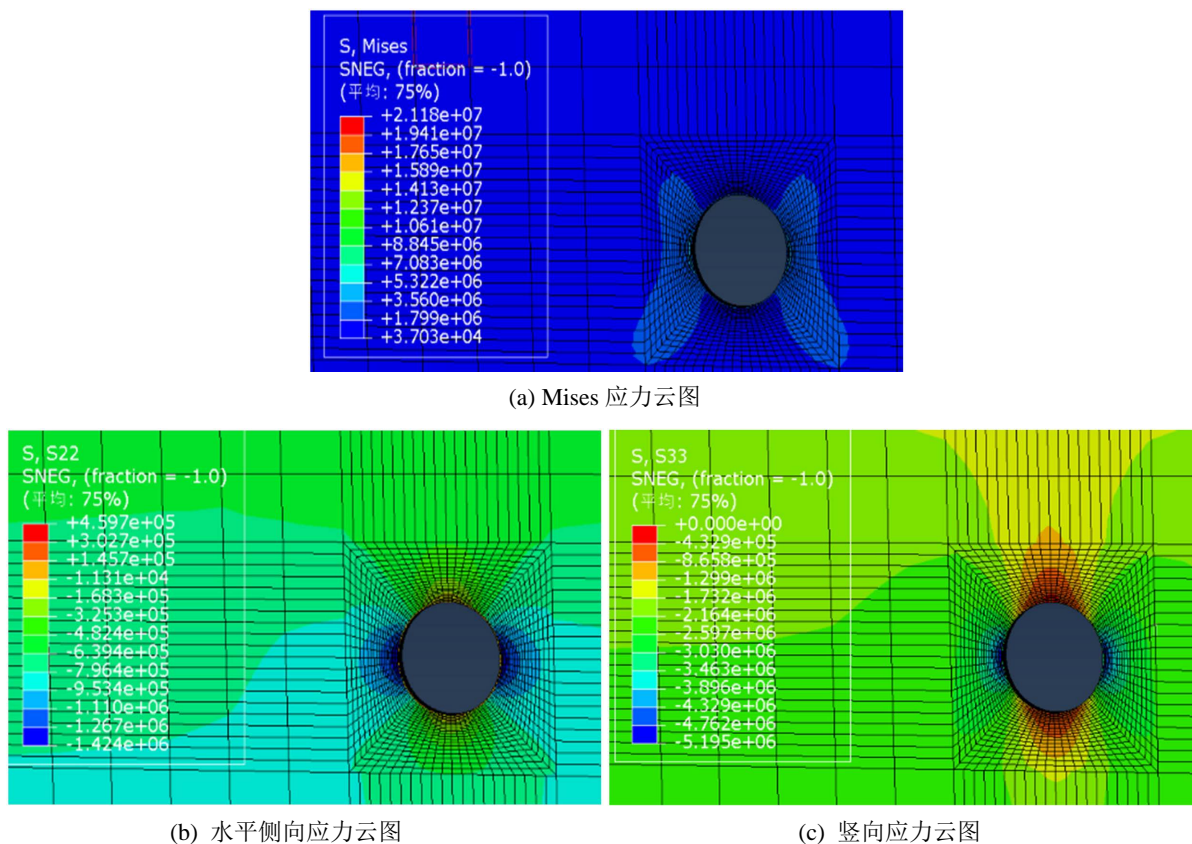
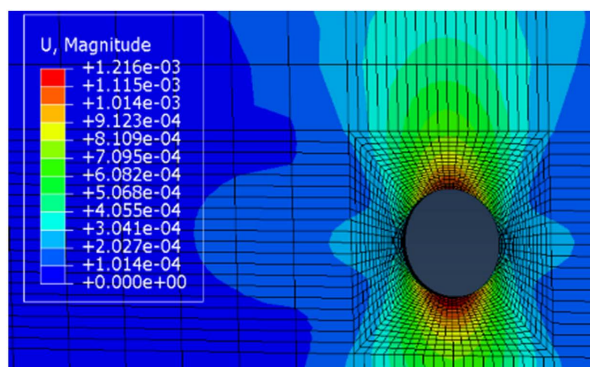


Figure 3. Cloud diagram of surrounding rock stress distribution

图 3. 围岩应力分布云图

分析围岩应力仿真结果，发现整个围岩开挖后水平侧向应力在 $-1.424e6 \sim 4.597e5$ Pa 之间，竖向应力在 $-5.195e6 \sim -4.329e5$ Pa 之间，Mises 应力在 $3.703e4 \sim 2.118e7$ Pa 之间，其中，Mises 应力与理论计算数值相比误差小于 20%，围岩拱顶和仰拱出现明显的应力释放区；拱肩和拱腰出现应力集中区域，其中最大应力出现在隧洞的拱腰部位，大小为 $2.118e7$ Pa。



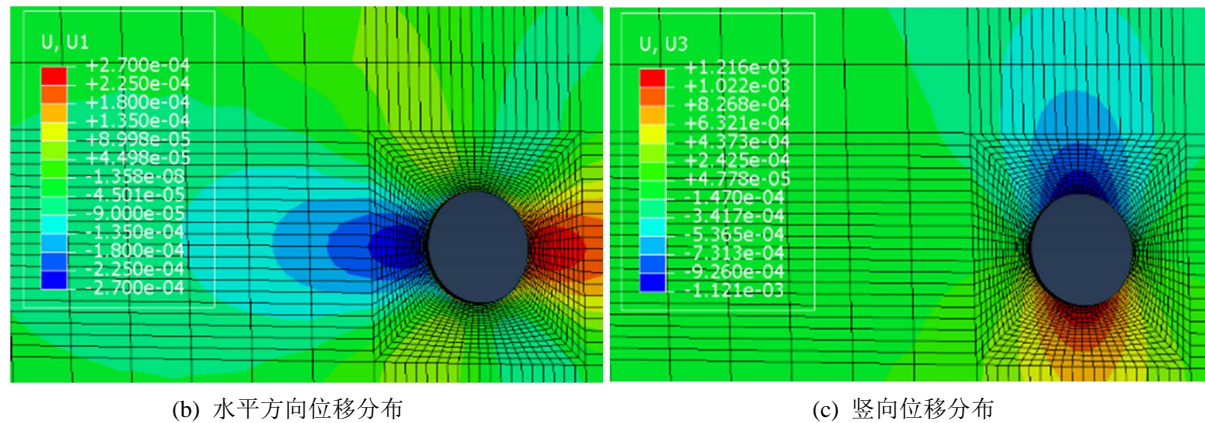


Figure 4. Cloud map of displacement distribution of surrounding rock
图 4. 围岩位移分布云图

由围岩位移场仿真结果可知, 整个隧段最大水平侧移为 0.27 mm, 发生在隧洞拱肩处; 最大的竖向位移为 1.216 mm, 发生在隧洞顶端处; 最大合位移为 1.216 mm。比较(b)、(c)两个图的隧洞的水平方向位移和竖向位移, 隧洞的竖向位移较大, 隧洞上覆岩体的重量及埋置深度是导致位移差异的主要原因。与理论计算的结果比较, 小于理论计算数值。

6. 结论

本研究以四川省大凉山 1 号软岩隧道工程为背景, 提供了有效的软岩隧道变形控制方案。

1) 通过对喷射混凝土、锚杆、H 形钢拱架提供的支护抗力和围岩自承力进行计算, 利用剪切滑移破坏法对喷射混凝土强度及厚度、钢筋网型号及间距、锚杆型号及间距、H 形钢拱架型号及间距进行计算与选型。

2) 对 C25 和 C30 混凝土进行厚度计算, 在满足预留变形量小于 5 cm 的条件下, 选用型号尺寸相对较小的支护材料, 采用 C25 强度混凝土、HW150 工字钢和 $\phi 22$ 药卷锚杆。其他支撑能力较好的围岩中采用强度较小的支护材料, 在保障施工安全的同时降低施工成本。

3) 通过软件 ABAQUS 对隧道围岩支护结构进行仿真分析, 围岩开挖后的 Mises 应力与理论计算数值相比误差小于 20%, 计算结果较准确, 最大应力出现在隧洞的拱腰部位, 拱顶和仰拱出现明显的应力释放区, 覆岩体重量及埋深导致隧道水平位移和横向位移存在差异, 且隧道位移仿真结果小于理论计算值, 理论计算结果较可靠。

基金项目

“超大埋深复杂地质条件下 TBM 隧道建造技术研究”(院科(川藏)19-14-01)。

参考文献

- [1] 刘飞. 矿建巷道用支护锚杆参数的选择与优化[J]. 机械工程与自动化, 2018(4): 199-200.
- [2] 刘嫦娥, 张青, 牟春来, 曹伟轩. 某水电站引水隧洞 TBM 支护选型设计[J]. 水电与新能源, 2021, 35(7): 31-34, 38.
- [3] 马栋, 谭忠盛, 丁远振, 等. 高强钢筋格栅在 V 级围岩隧道中的支护效果研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(S2): 14-20.
- [4] 尚伟鹏. 软岩巷道围岩变形规律及支护方案研究[J]. 山东煤炭科技, 2021, 39(2): 4-6, 8.

-
- [5] 谷拴成, 周攀, 黄荣宾. 锚杆-围岩承载结构支护下隧洞稳定性分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(S1): 122-130.
- [6] 李鹏, 朱永建, 王平, 等. 高水平应力下巷道围岩破坏机理及其控制技术[J]. 矿业工程研究, 2020, 35(1): 33-40.
- [7] 王克忠, 李仲奎, 王玉培, 等. 大型地下洞室断层破碎带变形特征及强柔性支护机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2455-2462.
- [8] 剧仲林. 软岩隧道初期支护沉降变形分析及控制方法[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S2): 92-102.
- [9] 齐梦学. 我国 TBM 法隧道工程技术的发展、现状及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1964-1979.
- [10] 侯献语. 岩土力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2017.
- [11] 西安力学学会《工程应用力学手册》编写委员会编. 工程应用力学手册[M]. 西安: 陕西人民教育出版社, 1994.
- [12] 颜炳玲. 隧道施工技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018.
- [13] 吴德兴. 新型锚杆支护技术与工程实践[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2019.
- [14] 易晨星, 侯克鹏, 者亚雷. 锚杆支护参数的优化[J]. 有色金属(矿山部分), 2018, 70(2): 64-68.
- [15] 王文才, 赵洪玉, 芦阳, 王彦斌. 锚杆支护参数的确定及应用[J]. 水力采煤与管道运输, 2013(4): 10-12.
- [16] H.卡斯特奈. 隧道与坑道静力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [17] 王超, 赵光明, 孟祥瑞. 考虑锚固复合承载体效应的巷道安全支护参数分析[J]. 金属矿山, 2015(8): 53-57.