

引用格式：范玉璐，曹佳文，余顺，等，2023.高地应力作用下渭武高速木寨岭隧道围岩大变形灾变预测分析研究[J].地质力学学报，29(6):786-800. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022110

Citation: FAN Y L, CAO J W, YU S, et al., 2023. Prediction and analysis on large deformation of surrounding rocks in the Muzhailing Tunnel of the Weiyuan-Wudu Expressway under high in-situ stress[J]. Journal of Geomechanics, 29(6):786-800. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022110

高地应力作用下渭武高速木寨岭隧道围岩大变形灾变预测分析研究

范玉璐^{1,2,3,4}，曹佳文⁵，余顺⁶，丰成君^{1,3,4}，张鹏^{1,3,4}，孟静^{1,3,4}，
戚帮申^{1,3,4}，王惠卿⁷

FAN Yulu^{1,2,3,4}，CAO Jiawen⁵，YU Shun⁶，FENG Chengjun^{1,3,4}，ZHANG Peng^{1,3,4}，MENG Jing^{1,3,4}，
QI Bangshen^{1,3,4}，WANG Huiqing⁷

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 北京市勘察设计研究院有限公司，北京 100038；
3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京 100081；
4. 中国地质调查局新构造与地壳稳定性研究中心，北京 100081；
5. 中国地质调查局，北京 100037；
6. 北京特种工程设计研究院，北京 100028；
7. 中国地质环境监测院，北京 100081

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China;*
3. *Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
4. *Research Center of Neotectonism and Crustal Stability, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
5. *China Geological Survey, Beijing 100037, China;*
6. *Beijing Special Engineering Design and Research Institute, Beijing 100028, China;*
7. *China Institute of Geo-environment Monitoring, Beijing 100081, China*

Prediction and analysis on large deformation of surrounding rocks in the Muzhailing Tunnel of the Weiyuan-Wudu Expressway under high in-situ stress

Abstract: This study aims to solve the significant deformation issue in the soft surrounding rocks under high in-situ stress encountered during the construction of the Muzhailing Tunnel on the Weiyuan-Wudu Expressway. We established a three-dimensional geological model to invert the in-situ stress field using ANSYS based on measured in-situ stress data in the engineering area. Then, we calculated and analyzed the deformation of the surrounding rocks by combining the inverted results with the Hoek deformation prediction formula. The result showed that the in-situ stress field in the engineering area was primarily controlled by faults, with secondary influences from rock strength and topography. In the intense tectonic deformation zone, horizontal principal stress values are generally lower than in the weak structural deformation zone. The relationship between the three principal stresses along the tunnel axis is $S_H > S_h > S_v$. The maximum horizontal principal stress

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20190317，DD20221738）

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grants No. DD20190317 and DD20221738).

第一作者：范玉璐（1992—），男，博士，工程师，主要从事地应力测量与监测、区域地壳稳定性评价等方面研究。

E-mail: fanfyl@163.com

通讯作者：曹佳文（1979—），男，博士，主要从事地质灾害、城市地质及重大工程地质安全风险等管理工作。

E-mail: cjiawen@mail.cgs.gov.cn

收稿日期：2022-07-08；修回日期：2023-06-10；责任编辑：范二平

in the intense tectonic deformation zone was the highest in the G8 section and the lowest in the G6 and G11 sections. In the weak structural deformation zone, horizontal principal stress gradually increases from the G12 section until it decreases due to reduced burial depth starting from the middle of the G14 section. The maximum horizontal principal stress orientation was generally in the NE direction, and the extruded structural belt between the faults was mostly deflected to the NEE—nearly EW direction. The deformation of the surrounding rocks was affected by rock mass strength and in-situ stress field, with rock mass strength playing a dominant role. The deformation of the surrounding rocks is mainly concentrated in the range of 20 to 80 cm, and the deformation levels are mainly moderate and intense.

Keywords: Muzhailing tunnel; high in-situ stress environment; large deformation of surrounding rocks; inversion of in-situ stress field; tunnel stability

摘要: 为解决在建渭武高速木寨岭隧道施工过程中遇到的高地应力环境下软岩大变形问题, 基于工程区已有地应力实测数据, 利用 ANSYS 有限元软件建立三维地质模型, 反演工程区地应力场, 并结合 Hoek 围岩变形预测公式计算分析隧道围岩的变形量。结果表明: 工程区的地应力场主要受断裂控制, 其次还受到岩体强度和地形的双重影响, 强构造变形区的水平主应力值普遍低于弱构造变形区, 沿隧道轴线三向主应力大小关系为最大水平主应力 (S_H) > 最小水平主应力 (S_h) > 垂直应力 (S_V), 强构造变形区最大水平主应力值在 G8 区段最大, 而在 G6 区段和 G11 区段最小; 弱构造变形区的水平主应力值自 G12 区段开始逐渐增大, 直至 G14 中段开始因埋深减小而逐渐降低。沿隧道轴线最大水平主应力方向总体为北东向, 而在断裂间挤压构造带多偏转为北东东—近东西向。高速公路隧道围岩变形受岩体强度和地应力场的双重影响, 其中, 岩体强度占主导作用, 围岩变形量主要集中在 20~80 cm 范围内, 变形等级以中等和强烈为主。

关键词: 木寨岭隧道; 高地应力环境; 围岩大变形; 地应力场反演; 隧道稳定性

中图分类号: P553 文献标识码: A 文章编号: 1006-6616 (2023) 06-0786-15

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2022110

0 引言

为满足西部地区经济发展和人民生活需求, 近年来, 中国路网建设的重心逐步由东部平原向西部强构造活动山区转移。西部山区断裂发育、岩体破碎, 区域应力高且多变, 高地应力环境下软弱围岩大变形成为困扰越岭隧道建设的主要难题之一(彭建兵等, 2020; 王栋等, 2021; 阳映等, 2021; 李彬等, 2022)。

木寨岭位于甘肃省定西市岷县, 区内断裂密布、岩体破碎, 地层岩性以板岩、炭质板岩等软岩为主(范玉璐, 2017), 在建渭武高速木寨岭隧道(高速公路隧道)和已建兰渝铁路木寨岭隧道(铁路隧道)走向相近、间隔较小, 建设过程中均存在严重的围岩大变形问题(叶康慨, 2018; 李剑超, 2019), 围岩变形量级远超现行规范对大变形的常规判识, 给隧道建设带来巨大的挑战(Chen et al., 2020; 王永刚等, 2020), 导致目前渭武高速木寨岭隧道工程进度迟缓。

围绕围岩大变形问题, 相关学者开展了大量研究(Saari, 1982; Anagnostou, 1993; Yang et al., 2017;

Cao et al., 2018; 赵东等, 2022)。Terzaghi(1946)针对隧道围岩大变形机制进行研究, 提出挤出性围岩和膨胀性围岩的概念; Tanimoto(1984)将软弱围岩挤压大变形视为岩石的弹-塑性力学行为; Aydan et al.(1996)认为岩石挤出现象是原岩应力下围岩的一种力学表现; 何满潮等(2002)依据工程地质条件及软岩大变形特征, 将围岩大变形机制归纳为3类, 分别为岩石材料相关的物化膨胀机制、工程应力相关的应力扩容机制和围岩结构相关的结构变形机制。尽管目前对于隧道大变形尚未有统一的认识(李鹏飞等, 2014; 方星桦等, 2020; 李志军等, 2020), 但普遍认为高地应力环境和低岩体强度是导致围岩大变形的主要因素。以往在木寨岭工程区开展的地应力测量工作表明工程区为高地应力环境(巨小强, 2010; 张鹏等, 2017; 李剑超, 2019), 李建伟等(2012)、胡元芳等(2013)对工程区主要岩石的力学性质进行了测试研究; 王永刚等(2020)基于监测数据分析了兰渝铁路木寨岭隧道围岩大变形分布特征, 表明围岩大变形主要发生在断裂破碎带、炭质板岩段等岩体强度低的区段。基于工程区的围岩岩性、地应力场和地质构造等多方面综合分析认为, 高地应力环境和较低的岩体强度是木寨岭工程

区隧道围岩大变形的根本原因(孙绍峰, 2012; 张波, 2014)。

解决围岩大变形问题的关键是查明工程区地应力环境,对隧道围岩稳定性等问题进行预测分析,进而为隧道动态设计施工提供参考依据(刘佑荣和唐辉明, 1999)。但工程区现有研究主要聚焦在革新施工技术、改进支护方式及优化支护参数等工程技术方面(李沿宗等, 2011; 黄明利等, 2016; 陶志刚等, 2020; 张林成, 2022),而对隧道沿线地应力场变化特征研究甚少,断裂、岩体强度、地形等对工程区地应力场的影响机制未见详细阐述,对隧道围岩岩体应力环境、围岩变形量等围岩稳定性问题也缺少系统认识。

为此,文章综合考虑地质构造、地层岩性和地形地貌等条件,首先利用 ANSYS 有限元软件建立木寨岭工程区三维地质模型,基于地应力实测数据反演工程区的地应力场,分析高速公路隧道轴线位置的地应力场非均匀性特征及主要影响因素;其次依据地应力场数值模拟结果,研判高速公路隧道沿线围岩的应力等级,分析最大水平主应力方向对隧道围岩稳定性的影响,然后依据 Hoek 围岩变形预测公式计算铁路隧道初衬后围岩变形量,并结合铁路隧道围岩变形监测数据相互印证;最后对高速公路隧道施工过程中可能产生的围岩变形量进行预测分析。研究成果可为解决渭武高速木寨岭隧道围岩大变形问题提供科学依据、为保障隧道动态设计和信息化施工提供技术支撑,也对中国西南强构造-高地应力软岩类隧道稳定性评价具有重要的参考价值。

1 工程地质特征

木寨岭工程区所在的西秦岭地区位于祁连、柴达木、巴彦喀拉和鄂尔多斯等地块交汇区,同时受印度板块和太平洋板块向欧亚板块俯冲挤压作用影响,构造应力集中(Tapponnier et al., 2001; 戚帮申等, 2016),北西向断裂密集发育,且全新世以来活动强烈,区内主要活动断裂有西秦岭北缘断裂、美武-新寺断裂带、临潭-宕昌断裂和光盖山-迭山断裂(图1; 张培震等, 2002),同时构造运动引发西秦岭地区海相沉积地层强烈的动力变质作用,致使区内板岩、千枚岩等变质软岩密集分布、岩体破碎(时毓, 2012)。

木寨岭工程区纵剖面图(图2)揭示:工程区分布有美武-新寺断裂带(F2)及其次级断裂(f10—f16)共计11条,均为北西向陡倾角逆断层,断裂破碎带

宽度为160~934 m(范玉璐, 2017)。地层岩性以板岩、炭质板岩等软岩为主,局部出露砂岩等硬岩,区内岩体极其破碎,以薄层状构造为主,节理裂隙发育,局部含泥化夹层及层间挤压破碎带,板岩及炭质板岩遇水易软化崩解(陶志刚等, 2020)。地应力实测结果表明,工程区总体处于高地应力环境,最大水平侧压力系数为1.39~6.42,水平应力占主导,最大水平主应力方向为NE34°—55°,平均NE44°(巨小强, 2010; 张鹏等, 2017; 李剑超, 2019)。

在建高速公路隧道全长约为15.2 km,隧道海拔为2435~2647 m,洞身最大埋深约为629 m,隧道总体走向为SW19°,与已建铁路隧道走向相近,间隔为0.7~1.2 km(李剑超, 2019)。综合考虑工程区构造分布、岩体条件和铁路隧道围岩变形监测情况,将f10断裂至f15-1断裂之间划为强构造变形区,剩余部分为弱构造变形区(图2),强构造变形区断裂密布,断裂间挤压构造带岩体较为破碎、力学性质差,弱构造变形区断裂发育较少,岩体相对完整、力学性质相对较好。

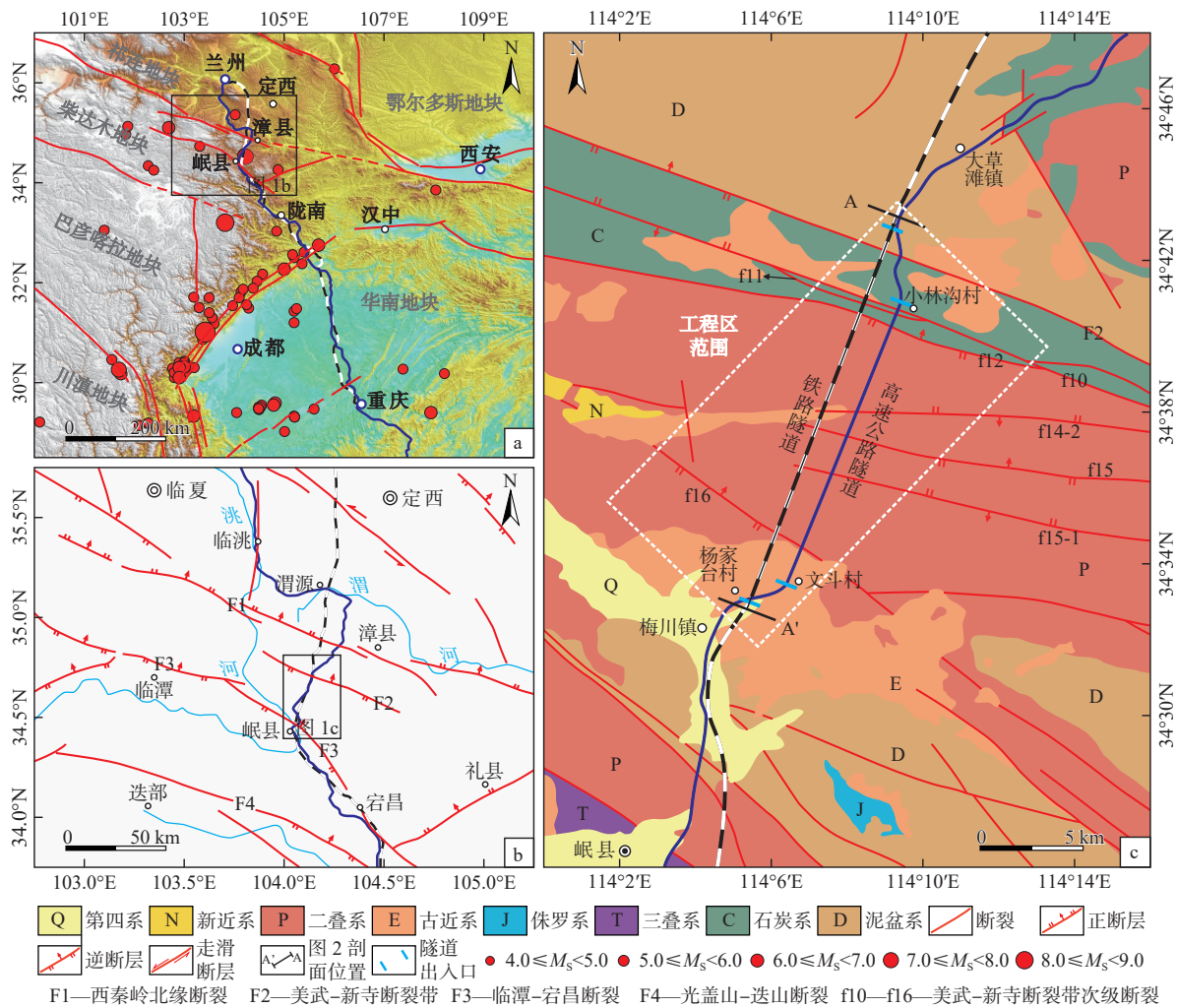
2 高速公路隧道沿线地应力场特征分析研究

通过收集工程区已有地应力实测数据,并基于地质资料建立工程区三维地质模型,开展地应力场反演分析,以查明高速公路隧道沿线地应力场分布特征。

2.1 工程区已有地应力实测数据

工程区共收集到7个钻孔共20个深度段的地应力实测数据(巨小强, 2010; 范玉璐, 2017; 李佳琪, 2019),地应力测量方法均采用水压致裂法。钻孔位置如图3a所示,除S-SK03钻孔布设在高速公路隧道沿线外,其余6个钻孔均布设在铁路隧道沿线。

地应力实测数据如表1所示:工程区地应力场主应力方向以北东向为主,三向主应力大小关系均表现为 $S_{H1} > S_{H2} > S_v$,表明工程区地应力场以水平挤压为主,相应变形样式主要为逆冲型。同时,地应力实测结果显示,相邻测孔的地应力量值差异较大,不相邻测孔在埋深相近的深度段应力值也差异较大,说明工程区地应力场复杂多变,仅依靠现有地应力测量数据并不能对工程区地应力场有一个清晰的认识。考虑到工程区断裂发育、地形起伏较大,已有地应力实测钻孔偏少、数据相对离散,应基

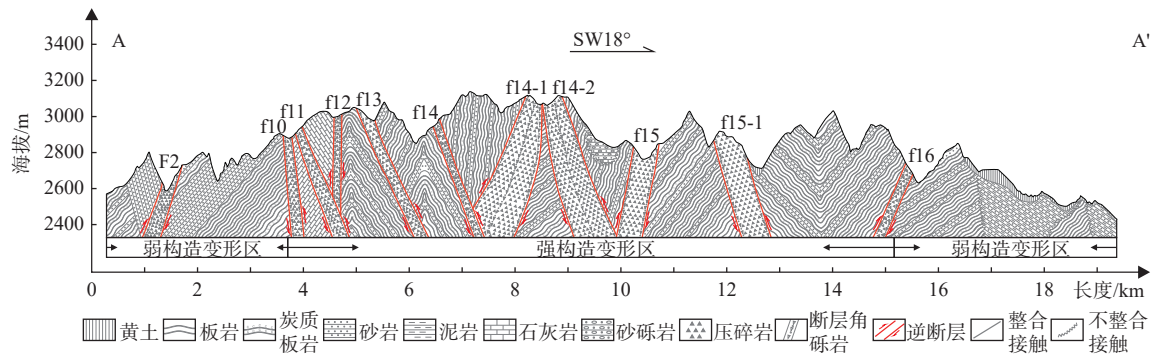


a—西秦岭地区活动断裂分布图; b—工程区及邻区断裂分布图; c—工程区地质简图

图 1 木寨岭工程区地质构造简图

Fig. 1 Regional geological and structural diagram of the Muzhailing engineering area

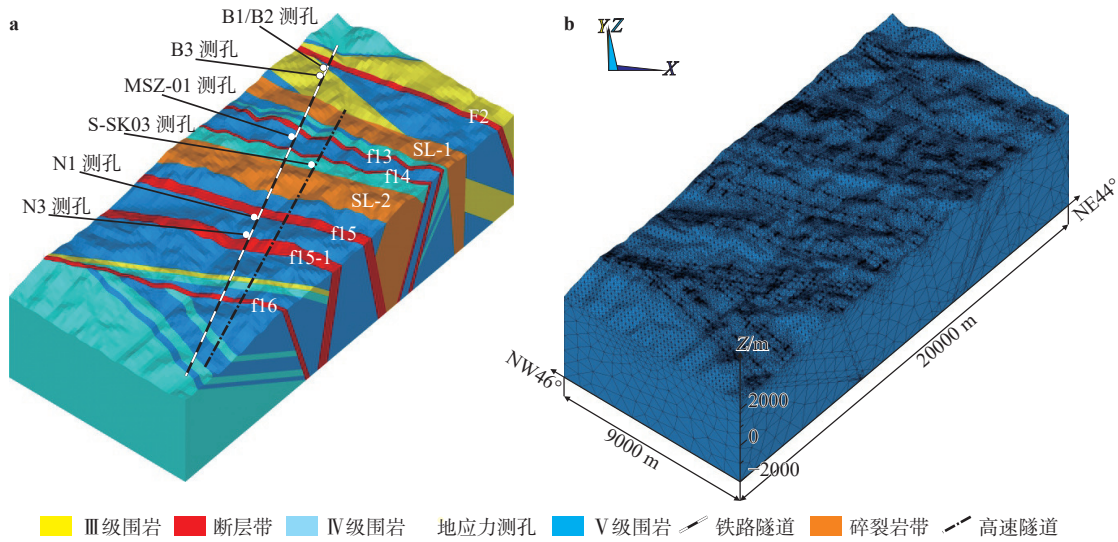
(a) Distribution of active faults in the West Qinling area; (b) Geotectonic outline of the engineering area and adjacent areas; (c) Geological sketch of the engineering area



F2—美武-新寺断裂带; f10—f16—美武-新寺断裂带次级断裂

图 2 木寨岭工程区纵剖面图 (剖面位置见 图 1)

Fig. 2 Longitudinal section of the Muzhailing engineering area (The position of the longitudinal section is shown in Fig.1)



a—工程区地质力学模型；b—工程区三维有限元网格

图3 木寨岭工程区有限元计算模型

Fig. 3 Integrated 3D FE model of the Muzhailing engineering area

(a) Geomechanical model of the engineering area; (b) 3D FE meshes of the engineering area

表1 工程区已有地应力实测数据

Table 1 Measures in-situ stress data in the engineering area

钻孔编号	序号	埋深/m	实测值/MPa				S_{ii} 方向
			S_{ii}	S_h	S_v		
B1	1	245.8	26.22	15.73	6.50	NE42°	
	2	259.8	29.87	17.17	6.88		
	3	243.2	23.98	14.66	6.44		
B2	4	256.7	32.57	18.7	6.80	NE40°	
	5	259.7	33.11	18.97	6.88		
	6	221.5	37.69	21.09	5.87		
B3	7	222.9	37.94	20.92	5.91	NE53°	
	8	225.5	38.38	21.52	5.98		
MSZ-01	9	294.9	24.95	14.95	7.97	NE34°	
	10	316	27.16	16.16	8.53		
N1	11	434.5	26.22	16.28	11.51	NE43°	
	12	443.5	29.61	18.37	11.75		
	13	445.9	30.16	18.11	11.82		
N3	14	444.5	34.98	20.63	11.78	NE55°	
	15	447.7	35.68	21.29	11.86		
	16	270.0	12.14	10.64	7.34		
S-SK03	17	300.0	11.37	10.83	8.16	NE39.6°	
	18	365.0	14.84	11.34	9.93		
	19	397.0	16.28	14.05	10.8		
	20	427.0	18.76	15.64	11.61		

于地应力实测数据,采用数值模拟手段对工程区地应力场进行模拟分析,以获取高速公路隧道沿线的

构造应力分布特征。

2.2 模型建立与应力场反演

采用ANSYS有限元软件构建三维地质模型并开展地应力场反演分析。模型如图3所示:规定ANSYS有限元软件整体坐标系X轴代表正东方向,Y轴代表正北方向,模型尺寸20000 m×9000 m,底面设在海拔-2000 m处(Z=-2000),模型长边走向NE44°,与区域最大水平主应力方向保持一致。数值模拟选用线弹性本构模型,选用Solid 185三维实体单元对模型进行网格划分,共得到单元635025个、节点数152537个。

依据木寨岭工程区工程地质资料(王建军和黄勇, 2009)和工程区及邻区已有研究成果(赵德安等, 2009; 胡元芳等, 2013; 余云燕等, 2015)确定围岩分级和岩体力学参数。岩体共分为Ⅲ级围岩、Ⅳ级围岩、Ⅴ级围岩、碎裂岩带和断裂破碎带5个等级,其中f10、f11和f12断裂走向相近且间隔小,同时f11和f12断裂相互切割,f14-1和f14-2断裂间隔小且宽度均近千米,分别将这2组断裂所在里程段围岩合并作为碎裂岩带(SL-1、SL-2),碎裂岩带围岩岩体强度介于Ⅴ级围岩和断裂破碎带之间。Ⅲ级围岩岩性以砂岩为主,Ⅳ级、Ⅴ级围岩岩性以板岩夹炭质板岩为主,碎裂岩带和断裂破碎带内岩体破碎,围岩岩性也以板岩夹炭质板岩为主。计算采用的岩体力学参数如表2所示。

表 2 岩体力学参数表

Table 2 Mechanical parameters of rock mass

围岩等级	岩性特征	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
III	砂岩	2.65	10000	0.25
IV	板岩夹炭质板岩	2.65	2200	0.30
V		2.63	1300	0.35
碎裂岩带	压碎岩(原岩以板岩夹炭质板岩为主)	2.50	1100	0.37
断裂破碎带	断层角砾岩(原岩以板岩夹砂岩夹炭质板岩为主)	2.46	1000	0.40

地应力场反演首先对计算模型整体附加重力加速度,并对模型 4 个侧面及底面施加法向位移约束,进行重力场反演。然后清除计算模型 2 个相邻侧面的法向位移约束,并基于钻孔实测水平主应力拟合梯度值对两侧面分别施加法向水平梯度载荷,考虑到仅有 S-SK03 钻孔数据随深度分布较为均匀且数据量较多,主应力随深度变化拟合梯度值较为

合理,并且该钻孔布设于高速公路隧道轴线位置,因此法向水平梯度载荷的添加仅参考 S-SK03 钻孔, S-SK03 钻孔实测最大水平主应力与最小水平主应力随深度变化的拟合梯度值分别为 0.0441 和 0.0307。对非加载侧面和底面的边界约束条件与重力场反演时保持一致,进行构造应力场反演,通过不断调试,直至各测孔主应力反演值与地应力实测值达到最大限度的拟合,同时,应力方向也与区域地应力场方向近似一致。

各测孔地应力反演值与实测值对比情况如表 3 所示。反演值与实测值对应较好,相对误差总体控制在 20% 以内,各测点的最大水平主应力方向反演值与实测值也基本保持一致,说明此次模拟反演获得的木寨岭工程区地应力场是合理、可靠的,可以满足工程区地应力场分析和围岩稳定性研究。

表 3 地应力实测值与反演值比较

Table 3 Comparison of measured and regressive in-situ stress

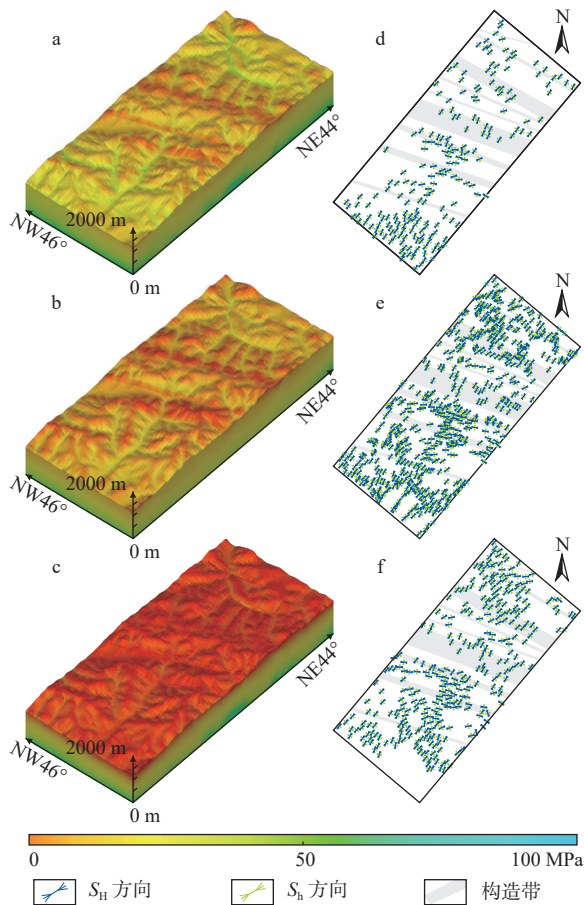
编号	序号	埋深/m	实测值/MPa				反演值/MPa及相对误差 $\delta/\%$						
			S_H	S_h	S_V	S_H 方向	S_H	$\delta(S_H)$	S_h	$\delta(S_h)$	S_V	$\delta(S_V)$	S_H 方向
B1	1	245.8	26.22	15.73	6.50	NE42°	33.78	28.8	19.59	24.5	3.85	-40.9	NE47°
	2	259.8	29.87	17.17	6.88		34.17	14.4	20.00	16.5	4.31	-37.4	
	3	243.2	23.98	14.66	6.44		30.59	27.6	18.45	25.9	4.70	-27.0	
B2	4	256.7	32.57	18.70	6.80	NE40°	33.97	4.3	19.85	6.1	5.14	-24.4	NE47°
	5	259.7	33.11	18.97	6.88		34.06	2.9	19.94	5.1	5.24	-23.9	
	6	221.5	37.69	21.09	5.87		35.06	-7.0	22.58	7.1	6.67	13.6	
B3	7	222.9	37.94	20.92	5.91	NE53°	35.06	-7.6	22.57	7.9	6.70	13.4	NE40°
	8	225.5	38.38	21.52	5.98		35.06	-8.7	22.56	4.8	6.77	13.2	
MSZ-01	9	294.9	24.95	14.95	7.97	NE34°	24.35	-2.4	17.30	15.7	9.12	14.4	NE64°
	10	316.0	27.16	16.16	8.53		24.58	-9.5	18.63	15.3	9.72	14.0	
N1	11	434.5	26.22	16.28	11.51	NE43°	28.15	7.4	18.19	11.7	11.06	-3.9	NE68°
	12	443.5	29.61	18.37	11.75		28.31	-4.4	18.44	0.4	11.40	-3.0	
	13	445.9	30.16	18.11	11.82		28.35	-6.0	18.51	2.2	11.49	-2.8	
N3	14	444.5	34.98	20.63	11.78	NE55°	28.33	-19.0	17.25	-16.4	11.48	-2.5	NE70°
	15	447.7	35.68	21.29	11.86		28.38	-20.5	17.33	-18.6	11.57	-2.4	
	16	270.0	12.14	10.64	7.34		13.52	11.4	9.75	-8.4	7.04	-4.1	
S-SK03	17	300.0	11.37	10.83	8.16	13.45	18.3	10.46	-3.4	7.83	-4.0		
	18	365.0	14.84	11.34	9.93	NE39.6°	15.85	6.8	12.02	6.0	9.54	-3.9	NE23°
	19	397.0	16.28	14.05	10.8		16.68	2.5	12.87	-8.4	10.44	-3.3	
	20	427.0	18.76	15.64	11.61		17.53	-6.6	13.81	-11.7	11.06	-4.7	

同时,计算结果不可避免的会受到模型尺寸和边界效应影响,导致模型外围地应力场反演结果误

差较大。B1、B2 测孔位置距离计算模型边界约 1.6 km,地应力反演值与实测值相对误差大于 20%,

而B3测孔距离计算模型边界约1.8 km,反演值和实测值对应较好,因此初步确认边界效应的影响范围不超过1.8 km。

提取工程区三向主应力云图和海拔为2400 m、2500 m和2600 m水平面的最大水平主应力方向分布图(高速公路隧道轴线海拔高度在2435~2647 m之间),如图4所示:工程区浅层主应力大小关系为 $S_H > S_h > S_V$,最大水平主应力方向总体为北东向,与地应力实测结果相一致。工程区地应力场总体受断裂构造控制,局部受岩体强度和地形的双重影响,强构造变形区最大水平主应力值普遍低于弱



a— S_H 云图; b— S_h 云图; c— S_V 云图; d—海拔2400 m平面 S_H 方向分布图; e—海拔2500 m平面 S_H 方向分布图; f—海拔2600 m平面 S_H 方向分布图

图4 木寨岭工程区地应力场分布特征

Fig. 4 Characteristics of in-situ stress field in the Muzhailing engineering area

(a) Contours of S_H ; (b) Contours of S_h ; (c) Contours of S_V ; (d) S_H orientation distribution at an altitude of 2400 m; (e) S_H orientation distribution at an altitude of 2500 m; (f) S_H orientation distribution at an altitude of 2600 m

构造变形区,沟谷处应力较易集中。同时最大水平主应力方向在断裂附近多发生不同程度偏转,整体倾向于平行断层走向,而在断裂间挤压构造带附近多偏转为北东东—东西向。

2.3 隧道轴线地应力场特征

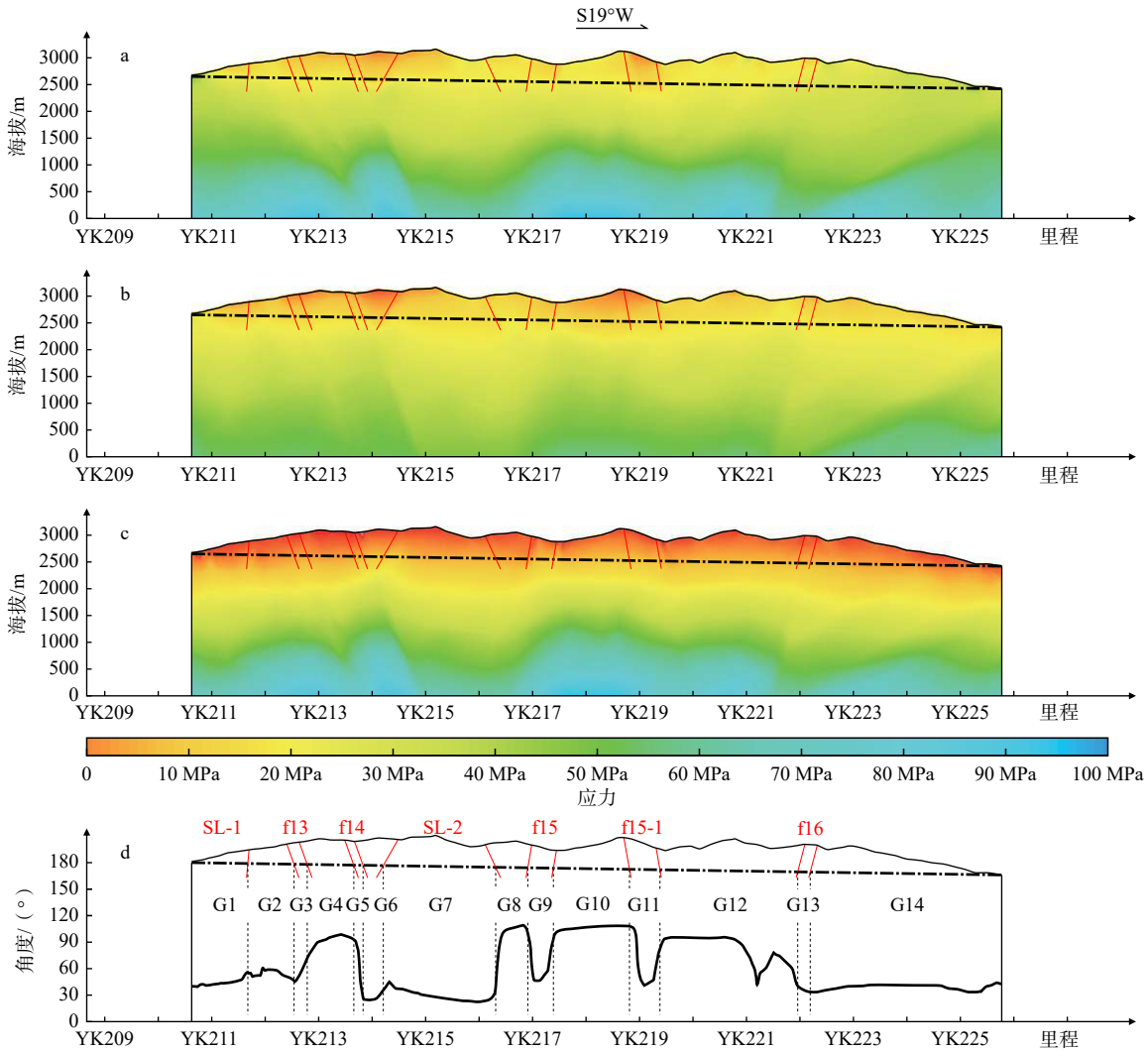
为便于叙述,以断裂破碎带和碎裂岩带为界,将高速公路隧道细分为14段,包括强构造变形区(G1—G13区段)和弱构造变形区(G14区段)两部分。沿隧洞轴线提取主应力剖面云图,并沿隧道轴线方向以20.0 m为间隔提取主应力大小和方向数据,具体如图5和表4所示。

地应力场反演结果表明,沿隧道轴线分布的地应力场并未显示出主应力值随埋深增加而增大的分布特征,地应力场主要受断裂构造控制,此外还受到岩体强度和地形的影响。强构造变形区断裂分布密集,水平主应力值总体低于弱构造变形区,并且在断裂带附近有明显降低。岩体强度相对差的区段,其水平主应力值普遍低于相邻区段。在同一围岩等级的区段水平主应力值则表现为随埋深增加而增大。最大水平主应力方向主要受断裂构造控制,断裂破碎带是最大水平主应力方向调整区,在断裂附近最大水平主应力方向会发生倾向于平行断裂走向的偏转,而在断裂破碎带内则发生倾向于垂直断裂走向的偏转。

沿隧道轴线三向主应力大小关系为 $S_H > S_h > S_V$,表明水平应力占主导作用。强构造变形区水平主应力值低于弱构造变形区,最大水平主应力值为16.95~25.49 MPa,最小水平主应力值为14.33~23.26 MPa,最大水平主应力值在G8区段最大,为22.77~25.49 MPa,而在f14断裂上盘(G6区段)和f15-1断裂(G11区段)最小,为16.95~21.19 MPa;弱构造变形区水平主应力值自G12区段开始逐渐增大,直至G14中段开始因埋深减小而逐渐降低,最大水平主应力值为27.92~38.27 MPa,最小水平主应力值为15.76~22.45 MPa。

强构造变形区最大水平主应力方向在断裂破碎带和碎裂岩带区段以北东向为主,而在断裂间挤压构造带主应力方向多偏转为北东东—近东西向,弱构造变形区除G12区段因断裂影响主应力方向为北东东—近东西向外,其余区段最大水平主应力方向主要集中在NE32.8°—44.2°。

参照《工程岩体分级标准》(GB/T 50218)(中华人民共和国水利部,2015),将围岩强度应力比



SL-1、SL-2—破碎岩带; f13—f16—美武—新寺断裂带次级断裂; G1—G14—变形区段编号

a—隧道轴线纵剖面 S_H 云图; b—隧道轴线纵剖面 S_h 云图; c—隧道轴线纵剖面 S_v 云图; d—隧道轴线 S_H 方向

图 5 高速公路隧道轴线主应力云图及最大水平主应力方向

Fig. 5 Stress contours and orientation of S_H along the highway tunnel axis

(a) S_H cloud chart of longitudinal section of the tunnel axis; (b) S_h cloud chart of longitudinal section of the tunnel axis; (c) S_v cloud chart of longitudinal section of the tunnel axis; (d) S_H orientation of the tunnel axis

(R_c/σ_{max}) 作为评价岩体初始应力影响的定量指标, 其中 R_c 为岩石饱和单轴抗压强度, σ_{max} 为垂直洞轴线方向的最大初始应力。各级围岩 R_c 值依据隧道工程区岩石点荷载试验实测结果进行估算(胡元芳等, 2013), 主要岩石点荷载强度值 ($I_{S(50)}$) 如表 5 所示。

高速公路隧道围岩强度应力比计算结果如表 6 所示。隧道全线 R_c/σ_{max} 比值均小于 4, 其中强构造变形区 R_c/σ_{max} 比值为 1.33~3.06, 弱构造变形区 R_c/σ_{max} 比值为 1.85~3.29, 表明高速公路隧道全线存在发生围岩大变形的初始应力条件。

3 隧道围岩大变形预测

3.1 方法与参数确定

围岩大变形作为高地应力区软岩隧洞工程时常遇到且最难控制的灾害之一, 如何依据现有地质资料预判围岩变形等级和变形量成为解决围岩大变形问题的关键。针对这一问题, 国内外提出了诸多解决方法(王成虎等, 2011; 孙元春等, 2012)。

Singh et al.(1992)提出考虑重力因素和岩体质量分级的预测公式, Jimenez and Recio(2011)在此基

表4 高速公路隧道轴线位置地应力分段统计

Table 4 Sectional statistics of in-situ stress of the highway tunnel axis position

分区	分段	S_H/MPa	S_V/MPa	S_V/MPa	S_H 方向
强构造变形区	G1	22.71~23.54	16.32~18.44	0~6.28	NE43.8°—56.2°
	G2	20.91~23.26	16.35~19.18	2.07~8.28	NE45.2°—61.1°
	G3	20.91~21.74	16.36~18.48	7.41~8.27	NE45.3°—73.7°
	G4	21.31~23.88	18.48~19.12	6.50~10.27	NE73.7°—98.6°
	G5	18.21~21.31	15.93~18.86	10.27~11.93	NE25.2°—92.7°
	G6	17.94~21.19	14.33~17.56	11.80~13.76	NE24.5°—34.4°
	G7	21.19~24.69	17.56~22.61	9.32~13.80	NE22.2°—46.6°
	G8	22.77~25.49	20.77~23.26	5.99~9.32	NE46.6°—109.2°
	G9	20.91~22.77	18.06~20.77	9.05~12.51	NE46.5°—100.6°
	G10	20.76~24.81	14.52~18.65	9.05~11.90	NE91.9°—108.4°
	G11	16.95~20.76	15.85~19.31	8.87~11.73	NE40.77°—108.0°
	G12	20.48~29.28	19.31~25.35	6.89~11.06	NE40.5°—95.6°
	G13	29.28~31.11	22.45~24.87	10.02~10.74	NE33.5°—41.0°
弱构造变形区	G14	27.92~38.27	15.76~22.45	1.28~10.02	NE32.8°—44.2°

表5 围岩点荷载强度取值表

Table 5 Values of point load strength of tunnel surrounding rocks

岩性特征	围岩等级	$I_{S_{50}}/\text{MPa}$
砂岩	Ⅲ	4.5
板岩夹炭质板岩	Ⅳ	3.0
	Ⅴ	2.4
压碎岩	碎裂岩带	2.0
断层角砾岩	断裂破碎带	1.7

础上采用统计学方法对公式进行了修正, Goel et al.(1995)也提出了类似公式,并考虑了隧道断面尺寸; Wood(1972)提出以岩块单轴抗压强度与上覆岩体自重应力的比值作为评价隧道稳定性的指标;考虑到岩块单轴抗压强度一般并不能代表岩体强度, Jethwa et al.(1984)建议采用岩体单轴抗压强度与上覆地压之比作为预测指标, 张祉道(2003)则建议选取岩体抗压强度与地应力(隧道断面上最大主应力和最小主应力平均值)的比值作为预测指标; Hoek(2001)利用轴对称有限元分析法对大量岩体进行了分析,得到在有支护压力、原地应力作用下隧道围岩的相对变形预测公式。通过对比评判上述诸多方法, Hoek(2001)提出的变形预测公式考虑支护应力、原地应力、岩体强度和岩体质量分级等诸多因素,相对较为全面;并且该方法把变形预测值与围岩挤压变形程度联系在一起,便于工程应用(王成虎等, 2011)。因此,文中采用Hoek围岩变形预测公式开展隧道围岩大变形预测,公式如下所示:

表6 高速公路隧道沿线围岩强度应力比

Table 6 Ratio of surrounding rock strength along the highway tunnel

分区	分段	R_c/σ_{\max}
强构造变形区	G1	1.76~2.03
	G2	2.16~2.61
	G3	1.57~1.88
	G4	2.20~2.52
	G5	1.54~2.03
	G6	2.47~3.06
	G7	1.55~1.99
	G8	2.04~2.29
	G9	1.43~1.70
	G10	2.10~2.51
	G11	1.56~1.93
	G12	1.79~3.10
	G13	1.27~1.41
弱构造变形区	G14	1.85~3.29

$$\varepsilon_t = 0.15 \left(1 - \frac{p_1}{p_0} \right) \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-\left(\frac{3}{p_0} + 1 \right) \left(3.8 \frac{p_1}{p_0} + 0.54 \right)} \quad (1)$$

$$\sigma_{cm} = (0.0034m_i^{0.8}) \sigma_{ci} [1.029 + 0.025e^{(-0.1m_i)}]^{GSI} \quad (2)$$

式中: ε_t —相对变形量; p_0 —原岩应力; p_1 —隧道衬砌支护抗力,参照工程地质资料, p_1/p_0 取0.1(Hoek and Marinos, 2000; 胡元芳等, 2013); σ_{cm} —岩体单轴抗压强度; σ_{ci} —原岩单轴抗压强度,可基于围岩点荷

载强度进行估算; m_i —Hoek-Brown 常数, 反映岩石材料摩擦特性; GSI—地质强度指标, 反映岩体质量分级特点。围岩变形分级标准如表 7 所示。

公式(2)中, m_i 和 GSI 2 个参数的取值对计算结果影响巨大, Hoek(2001)通过对大量岩石三轴试验资料和岩体现场试验成果的统计分析, 总结出各类岩石对应的 m_i 值和不同结构、风化程度、完整性的岩体对应的 GSI 值。基于工程区各类岩体实际情况, 参照 Hoek-Brown 常数 m_i 估算表和地质强度指数 GSI 估算表 (Hoek and Marinos, 2000; 王建军和黄

表 7 围岩大变形分级表

Table 7 Large deformation classification table

大变形等级	相对变形量(ϵ_r)/%
无	<1.0
轻微	1.0~2.5
中等	2.5~5.0
强烈	5.0~10.0
极强	>10.0

勇, 2009; 胡元芳等, 2011), 选定各级围岩对应的 m_i 值和 GSI 值, 如表 8 所示。

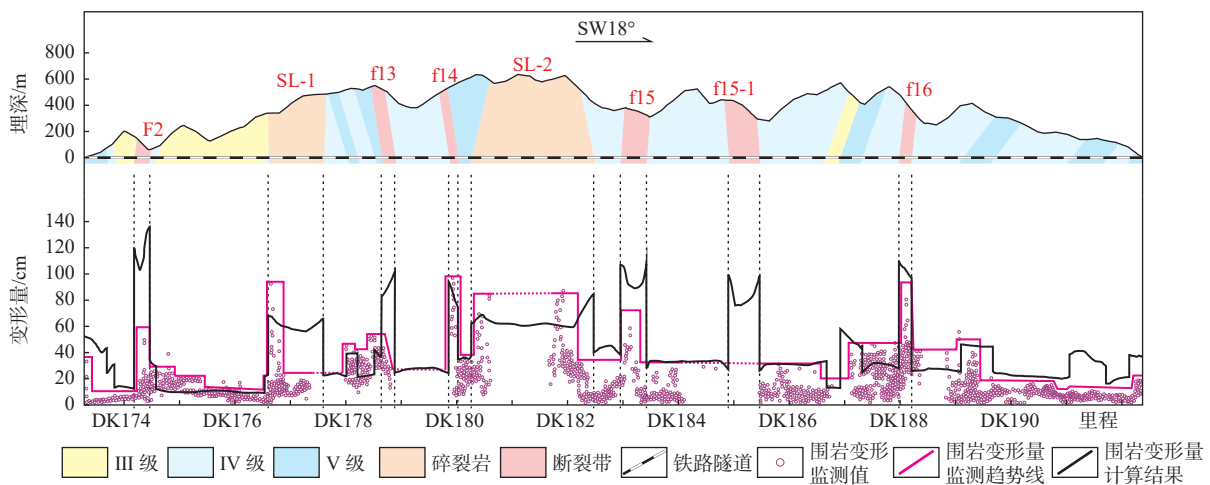
表 8 岩体强度计算参数估值表

Table 8 Estimation of rock mass strength calculation parameters

岩体条件	描述	围岩等级	m_i	GSI	取值依据
砂岩	薄层—中厚层状构造, 节理裂隙较发育, 将岩体切割成块状, 部分接触面光滑	III	15	35	
板岩夹炭质板岩	以板岩为主, 薄层板状构造, 节理、裂隙发育, 有黏性土充填, 岩体破碎	IV	9	20	Hoek and Marinos, 2000 王建军和黄勇, 2009 胡元芳等, 2011
压碎岩	成分以板岩为主, 碎石状, 强风化	V	7	20	
断层角砾岩	以细角砾为主, 其余为断层泥及砂粒充填, 原岩以软质板岩为主, 强风化	碎裂岩带	7	10	
		断裂破碎带	7	10	

为验证参数取值是否合理, 在针对高速公路隧道开展围岩大变形预测分析前, 先基于地应力场反演结果和 Hoek(2001)围岩变形预测公式计算铁路隧道沿线围岩变形量, 并与实际监测结果进行对比, 结果如图 6 所示。计算结果与监测结果趋势上基本吻合, 围岩大变形主要分布在强构造变形区,

断裂破碎带和碎裂岩带是变形最剧烈的区段, 其次是断裂间挤压构造带, 变形量值主要集中在 20~70 cm 之间。说明结合工程区地应力场反演结果和 Hoek 围岩变形预测公式的隧道围岩大变形分析是可靠的, 参数的选取也是合理的, 可以用于高速公路隧道围岩大变形的预测分析。



F2—美武-新寺断裂带; SL-1、SL-2—破碎岩带; f13—f16—美武-新寺断裂带次级断裂

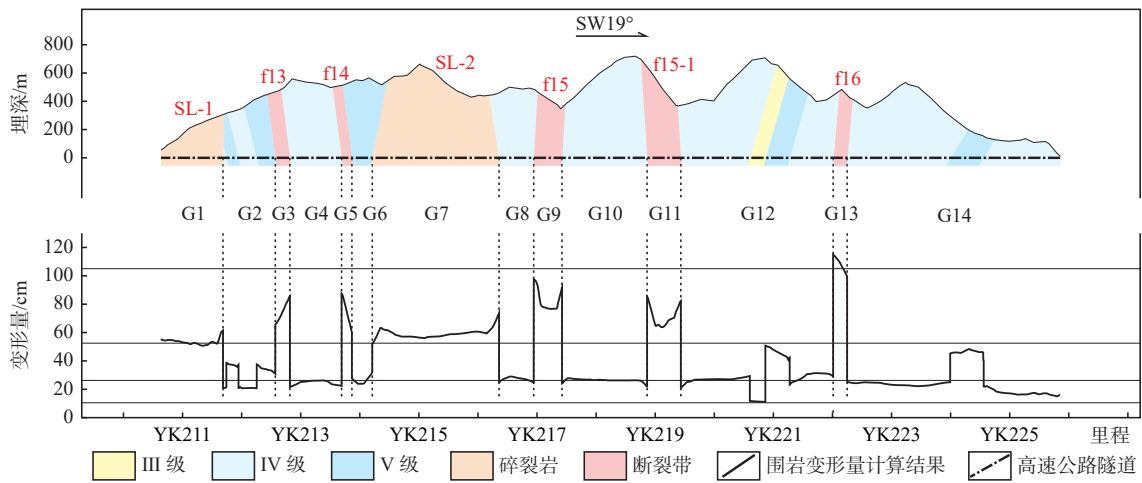
图 6 铁路隧道围岩大变形计算结果

Fig. 6 Calculation results of large deformation of surrounding rocks of the railway tunnel

3.2 高速公路隧道围岩大变形预测

根据公式(1)和公式(2), 结合隧道沿线地应力

场模拟结果, 高速公路隧道各区段围岩初衬后变形量预测结果如图 7 和表 9 所示。



SL-1、SL-2—碎裂岩带；f13—f16—美武—新寺断裂带次级断裂；G1—G14—变形区段编号

图7 高速公路隧道围岩变形量预测

Fig. 7 Prediction of surrounding rock deformation in the highway tunnel

表9 高速公路隧道围岩稳定性分析结果分段统计

Table 9 Sectional statistics of highway tunnel surrounding rock stability

分区	分段	围岩等级	Σ/cm	变形等级
强构造变形区	G1	SL-1	50.55~61.63	中等—强烈
	G2	IV—V	20.50~38.93	轻微—中等
	G3	F13	66.09~85.21	强烈
	G4	IV	21.57~26.17	轻微
	G5	F14	59.21~87.96	强烈
	G6	V	23.70~32.14	中等
	G7	SL-2	51.93~74.18	中等—强烈
	G8	IV	24.70~29.01	轻微—中等
	G9	f15	76.57~97.60	强烈
	G10	IV	21.73~27.81	轻微—中等
	G11	f15-1	63.69~85.86	强烈
	G12	III—V	10.93~50.74	轻微—中等
	G13	f16	99.15~114.75	强烈—极强
弱构造变形区	G14	IV—V	14.76~48.38	轻微—中等

(1) 围岩大变形主要分布在强构造变形区, 各断裂破碎带和碎裂岩带是变形最剧烈的区段, 其次为断裂间挤压构造带。变形量主要集中在中等和强烈2个等级, 局部变形等级为轻微或极强, 围岩最大变形量为119.41 cm, 最小变形量为12.69 cm。

(2) 对隧道全线围岩变形量进行统计: 变形量在10~30 cm段落占比为56.1%, 30~50 cm段落占比为12.8%, 50~80 cm占比为26.9%, 80~120 cm占比为4.2%, 隧道围岩大变形量值主要集中在20~80 cm范围内(图8)。

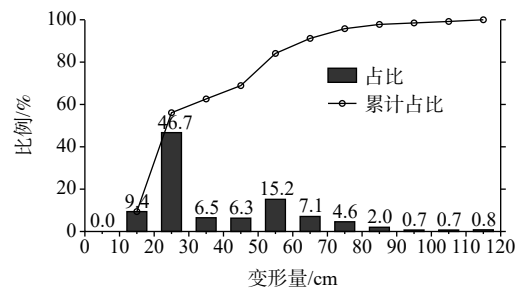


图8 高速公路隧道围岩变形统计

Fig. 8 Statistical distribution of large deformation in the highway tunnel

(3) 总体而言, 轻微变形段主要出现在 III—IV 级围岩, 中等变形段主要集中在 V 级围岩, 强烈—极强变形段集中分布在断裂破碎带和碎裂岩带, 局部而言, 断裂破碎带和碎裂岩带外围围岩变形量远高于内部, 主要原因是内部主应力值低于外围。围岩变形分布特征表明围岩变形受岩体强度和地应力场的双重影响, 而岩体强度占主导作用, 这与工程区已有研究成果相符。

4 讨论

渭武高速公路木寨岭隧道工程区地应力场数值模拟选用线弹性本构模型, 主要考虑到地应力场的弹性假设, 同时工程区模型尺度较大、结构复杂, 并且当前涉及工程区岩体力学性质的研究不足, 相较于弹塑性本构模型, 弹性本构模型尽管未考虑塑性破坏、应力重分布等问题, 但所用参数少、易于确定, 并能很好地解决实际问题, 因此更为适用。

已有研究表明地应力场在断裂附近会发生调整,最大水平主应力方向在靠近断裂区域易于发生倾向于平行断层走向的偏转,而在断裂带内部则会发生倾向于垂直断层走向的偏转,同时断裂带内的岩体力学性质与上下两盘围岩相差越大,则断裂对局部地应力场扰动越大,应力场方向变化越是复杂(苏生瑞等,2002;颜天佑等,2018;陈世杰等,2020)。渭武高速木寨岭隧道地应力场反演结果与已有认识相符,断裂构造是工程区地应力场分布特征的主控因素,对局部地应力的量值和方向都有显著的影响,沿隧道轴线主应力方向在断裂附近发生调整,同时以f14断裂为例,断裂下盘围岩力学性质相对强于上盘围岩,最大水平主应力方向也表现出在下盘区段的调整幅度相对上盘区段更大的分布特征。木寨岭工程区地应力场反演分析结果不仅可以为解决高速公路隧道围岩大变形问题提供数据支撑,同时也进一步探讨了断裂影响区域地应力场的特征。

高地应力环境和低岩体强度两大围岩变形因素对渭武高速木寨岭隧道不同区段的影响不尽相同。断裂破碎带和碎裂岩带地应力场主应力值相对偏低,主应力方向与隧道走向相近,但受构造活动影响强烈,岩体破碎、岩体强度差,是全线围岩大变形问题最严重的区段;而断裂间挤压构造带岩体完整性相对较好,但主应力值也相对偏高,主应力方向也与隧道走向夹角过大,不利于隧道围岩稳定,建议在施工过程中,结合隧道各区段围岩稳定性特征适当调整支护方案。隧道全线水平应力占主导,隧道横截面轴向应力与垂向应力比值主要分布在1.18~3.50之间,而断裂破碎带和碎裂岩带区段比值为1.29~2.79,在隧道施工过程中面对围岩变形量大的区段,建议参考隧道横截面轴向应力与垂向应力比值结果,适当调整横截面形状,增大横截面横轴与纵轴的比值,用以抵消水平主应力的作用,便于隧道围岩稳定。

文中渭武高速木寨岭隧道围岩变形量的预测结果可为解决木寨岭工程区围岩大变形问题提供科学依据,为提高隧道施工进度和防灾减灾提供保障。但受地质模型不确定性和岩石物理力学参数不确定性的影响,各断裂破碎带和碎裂岩带内部围岩变形量计算值差异性不明显,并且木寨岭工程区建模时并未按实际情况在模型中相应的开挖出隧道空间,仅针对隧道轴线位置初始地应力场进行分

析,并未考虑隧道开挖对地应力场的影响,对渭武高速木寨岭隧道和兰渝铁路木寨岭隧道之间的相互影响也没有研究。下一步将会针对这些科学问题继续开展研究工作,同时在此次研究成果基础上,后续将采用弹塑性本构模型对木寨岭工程区地应力场及隧道围岩稳定性做进一步研究。

5 结论

文中首先采用有限元软件构建木寨岭工程区数值模型,反演分析工程区及高速公路隧道沿线地应力场,然后结合Hoek围岩变形预测公式计算分析渭武高速木寨岭隧道围岩变形量,主要结论如下。

(1)沿隧道轴线水平应力占主导作用,强构造变形区最大水平主应力值在G8区段最大,为22.77~25.49 MPa,而在f14断裂上盘(G6区段)和f15-1断裂(G11区段)最小,为16.95~21.19 MPa;弱构造变形区水平主应力值自G12区段开始逐渐增大,直至G14中段开始因埋深减小而逐渐降低,最大水平主应力值为27.92~38.27 MPa,最小水平主应力值为15.76~22.45 MPa。强构造变形区最大水平主应力方向在断裂破碎带和碎裂岩带区段以北东向为主,而在断裂间挤压构造带主应力方向多偏转为北东东一近东西向,弱构造变形区除G12区段因断裂影响主应力方向为北东东一近东西向外,其余区段最大水平主应力方向主要集中在NE32.8°—44.2°。

(2)沿隧道轴线分布的地应力场主要受断裂构造控制,其次还受到岩体强度和地形的双重影响。强构造变形区水平主应力值总体低于弱构造变形区,同时水平主应力值在岩体强度相对差的区段普遍低于相邻区段,而在同一围岩等级的区段则表现为随埋深增加而增大。最大水平主应力方向主要受断裂构造控制,断裂破碎带是最大水平主应力方向调整区,在断裂附近最大水平主应力方向会发生倾向于平行断裂走向的偏转,而在断裂破碎带内则发生倾向于垂直断裂走向的偏转。

(3)高速公路隧道围岩变形预测分析结果显示,隧道围岩变形受岩体强度和地应力场的双重影响,其中岩体强度占主导作用。围岩变形量主要集中在中等和强烈两个等级,围岩变形量值主要集中在20~80 cm范围内,各断裂破碎带和碎裂岩带是隧道围岩变形最剧烈的区段,其次是断裂间挤压构造带。

References

- ANAGNOSTOU G, 1993. A model for swelling rock in tunnelling[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26(4): 307-331.
- AYDAN Ö, AKAGI T, KAWAMOTO T, 1996. The squeezing potential of rock around tunnels: Theory and prediction with examples taken from Japan[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 29(3): 125-143.
- CAO C Y, SHI C H, LEI M F, et al., 2018. Squeezing failure of tunnels: a case study[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 77: 188-203.
- CHEN J X, LIU W W, CHEN L J, et al., 2020. Failure mechanisms and modes of tunnels in monoclinic and soft-hard interbedded rocks: a case study[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(4): 1357-1373.
- CHEN S J, XIAO M, CHEN J T, et al., 2020. Disturbance law of faults to in-situ stress field directions and its inversion analysis method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(7): 1434-1444. (in Chinese with English abstract)
- FAN Y L, 2017. The measurement of in-situ stress in the typical project area of the Muzhailing Tunnel of Lanzhou-Chongqing railway and its engineering geological significance[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing). (in Chinese with English abstract)
- FANG X H, YANG Z, YANG J S, et al., 2020. Large deformation characteristics and control measures of surrounding rock in altered granite stratum of high ground stress tunnel[J]. *China Railway Science*, 41(5): 92-101. (in Chinese with English abstract)
- GOEL R K, JETHWA J L, PAITHANKAR A G, 1995. Tunnelling through the young Himalayas-A case history of the Maneri-Uttarkashi power tunnel[J]. *Engineering Geology*, 39(1-2): 31-44.
- HE M C, LV X J, JING H H, 2002. Characters of surrounding rockmass in deep engineering and its non-linear dynamic-mechanical design concept[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 21(8): 1215-1224. (in Chinese with English abstract)
- HOEK E, MARINOS P, 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses[J]. *Tunnels and Tunnelling International*, 32(11): 45-51.
- HOEK E, 2001. Big tunnels in bad rock[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(9): 726-740.
- HU Y F, LIU Z Q, WANG J Y, 2011. Squeezing deformation prediction of soft rocks under high ground stress and its application[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 48(3): 28-34. (in Chinese with English abstract)
- HU Y F, WANG J Y, SONG Z, et al., 2013. Predicting and controlling of the squeezing deformation in soft rock under high ground stress in Muzhailing Tunnel on Lanzhou-Chongqing Railway[C]//Proceedings of the 12th tunnel and underground engineering symposium across the strait. Emeishan: China Civil Engineering Society: 244-249. (in Chinese)
- HUANG M L, ZHAO J M, TAN Z S, et al., 2016. Analysis of the deformation and mechanical characteristics of the surrounding rock-Lining structure of the muzhailing tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 53(6): 89-99, 107. (in Chinese with English abstract)
- JETHWA J L, SINGH B, SINGH B, 1984. Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions-A new approach[C]//Proceedings of ISRM symposium on design and performance of underground excavations. Cambridge: ISRM Symposium, 231-238.
- JIMENEZ R, RECIO D, 2011. A linear classifier for probabilistic prediction of squeezing conditions in Himalayan Tunnels[J]. *Engineering Geology*, 121(3-4): 101-109.
- JU X Q, 2010. Analysis on characteristics of ground stress in Muzhailing Tunnel around mountainous areas as well as its application[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 36(2): 33-35. (in Chinese with English abstract)
- LI B, ZHANG W, WEN R, 2022. Study on the hydraulic fracturing in-situ stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi: Engineering geological significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 28(2): 191-202. (in Chinese with English abstract)
- LI J C, 2019. Optimization of excavation method for Muzhailing Tunnel in Weiwu expressway research on deformation control measures[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)
- LI J Q, 2019. Study on construction deformation prediction and large deformation classification standard of Muzhailing Tunnel of Weiwu Expressway[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University. (in Chinese with English abstract)
- LI J W, LEI S Y, LI Z, et al., 2012. Investigation on rheologic properties of carbonaceous slate in Muzhailing Tunnel[J]. *Tunnel Construction*, 32(1): 36-40. (in Chinese with English abstract)
- LI P F, ZHAO Y, LIU J Y, 2014. Deformation characteristics and control method of tunnel with weak surrounding rock[J]. *China Railway Science*, 35(5): 55-61. (in Chinese with English abstract)
- LI Y Z, GAO P, ZOU C, et al., 2011. Deformation analysis and primary support parameter optimization: case study on Muzhailing Tunnel[J]. *Tunnel Construction*, 31(3): 320-324, 339. (in Chinese with English abstract)
- LI Z J, GUO X X, MA Z W, et al., 2020. Research status and high-strength pre-stressed primary (type) support system for tunnels with large deformation under squeezing conditions[J]. *Tunnel Construction*, 40(6): 769-782. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y R, TANG H M, 1999. Rockmass mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese)
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2015. Standard for engineering classification of rock mass: GB/T 50218-2014[S]. Beijing: China Planning Press. (in Chinese)
- PENG J B, CUI P, ZHUANG J Q, 2020. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(12): 2377-2389. (in Chinese with English abstract)
- QI B S, ZHANG P, FENG C J, et al., 2016. Current in-situ stress state and seismic risk in Sichuan-Gansu-Shaanxi border area[J]. *Geology in China*, 43(5): 1814-1827. (in Chinese with English abstract)
- SAARI K, 1982. Analysis of plastic deformation (squeezing) of layers intersecting tunnels and shafts in rock[D]. Berkeley: University of California.
- SHI Y, 2012. Formation and tectonic evolution of the eastern Qinling Orogen, Central China[D]. Nanjing: Nanjing University. (in Chinese with English abstract)
- SINGH B, JETHWA J L, DUBE A K, et al., 1992. Correlation between observed support pressure and rock mass quality[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7(1): 59-74.
- SU S R, ZHU H H, WANG S T, et al., 2002. The effect of fracture properties

- on stress field in the vicinity of a fracture[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 32(6): 655-658. (in Chinese with English abstract)
- SUN S F, 2012. Characteristics of soft rock tunnels and large deformation control technology in the Lanzhou-Chongqing railway[J]. *Modern Tunneling Technology*, 49(3): 125-130. (in Chinese with English abstract)
- SUN Y C, GAO B, XU Z L, et al., 2012. Research on prediction method for squeezing deformation of surrounding rock of tunnel[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 29(2): 50-54. (in Chinese with English abstract)
- TANIMOTO C, 1984. NATM-1[M]. Tokyo: Morikita Shuppan.
- TAO Z G, LUO S L, KANG H W, et al., 2020. Analysis of deformation law and creep characteristics of carbonaceous slate in highway tunnel[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(5): 898-906. (in Chinese with English abstract)
- TAPPONNIER P, ZHIQIN X, ROGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294(5547): 1671-1677.
- TERZAGHI K, 1946. Rock defects and loads on tunnel supports[C]/Introduction to rock tunnelling with steel support, RV proctor and TC white. Youngstown: Commercial Shearing and Stamping Company.
- WANG C H, SHA P, HU Y F, et al., 2011. Study of squeezing deformation problems during tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 32(S2): 143-147. (in Chinese with English abstract)
- WANG D, WANG J F, LI T B, et al., 2021. Analysis of three-dimensional movement characteristics of rockfall: A case study at a railway tunnel entrance in the southwestern mountainous area, China[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(1): 96-104. (in Chinese with English abstract)
- WANG J J, HUANG Y, 2009. Engineering geological investigation report of Muzhailing Tunnel of Lanzhou-Chongqing Railway[R]. Xi'an: China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd. (in Chinese)
- WANG Y G, DING W Q, LIU Z Q, et al., 2020. Classification standard of large deformation and construction time of second lining in Muzhailing Tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 16(4): 1116-1122. (in Chinese with English abstract)
- WOOD A M M, 1972. Tunnels for roads and motorways[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 5(1-2): 111-126.
- YAN T Y, CUI Z, ZHANG Y H, et al., 2018. Study of distribution characteristics of in-situ stress field in occurrence area of crossing active fault tunnel engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 39(S1): 378-386. (in Chinese with English abstract)
- YANG S Q, CHEN M, JING H W, et al., 2017. A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'an coal mine, China[J]. *Engineering Geology*, 217: 89-101.
- YANG Y, YAN Q H, YI J J, et al., 2021. Application of Integrated Geophysical Exploration Technology to the Survey of the Songshan Tunnel in Yanqing, Beijing[J]. *Geology and Exploration*, 57(6): 1374-1383. (in Chinese with English abstract)
- YE K K, 2018. Dismantling and enlarging technology for ridge core section of Muzhailing Tunnel on Lanzhou-Chongqing Railway[J]. *Tunnel Construction*, 38(4): 640-648. (in Chinese with English abstract)
- YU Y Y, CHEN Z M, LI G L, et al., 2015. Three dimensional FE regression analysis of multivariate geo-stress field of Muzhailing Tunnel[J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 34(1): 6-11. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG B, 2014. Study on deformation mechanism of slate in Muzhailing Tunnel[J]. *Railway Engineering*(5): 57-59. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L C, ZHOU C, TANG J T, et al., 2022. Application of the Two-Component Wide-Field Electromagnetic Method to Engineering Survey of A Deep Tunnel[J]. *Geology and Exploration*, 58(4): 857-865. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P, SUN Z G, WANG Q N, et al., 2017. In-situ stress measurement and stability analysis of surrounding rocks in the north section of deep buried tunnel in Muzhailing[J]. *Journal of Geomechanics*, 23(6): 893-903. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P Z, WANG Q, MA Z J, 2002. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 430-441. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Z D, 2003. Discussion and study on large deformation of tunnel in squeezing ground[J]. *Modern Tunneling Technology*, 40(2): 5-12, 40. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO D A, LI G L, CHEN Z M, et al., 2009. Three-dimensional FE regression analysis of multivariate geostress field of Wushaoling Tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(S1): 2687-2694. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO D, TIAN Q, HAO F J, 2022. Study on Large Deformation Classification of Deep Buried Carbonaceous Slate Tunnels[J]. *Geology and Exploration*, 58(6): 1261-1271. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈世杰, 肖明, 陈俊涛, 等, 2020. 断层对地应力场方向的扰动规律及反演分析方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 39(7): 1434-1444.
- 范玉璐, 2017. 兰渝铁路木寨岭隧道典型工程区地应力测量及工程地质意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 方星桦, 杨曾, 阳军生, 等, 2020. 高地应力隧道蚀变花岗岩地层围岩大变形特征及控制措施[J]. *中国铁道科学*, 41(5): 92-101.
- 何满潮, 吕晓俭, 景海河, 2002. 深部工程围岩特性及非线性动态力学设计理念[J]. *岩石力学与工程学报*, 21(8): 1215-1224.
- 胡元芳, 刘志强, 王建宇, 2011. 高地应力软岩条件下挤压变形预测及应用[J]. *现代隧道技术*, 48(3): 28-34.
- 胡元芳, 王建宇, 宋冶, 等, 2013. 兰渝线木寨岭隧道高地应力软岩挤压大变形预测及控制[C]/第十二届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会论文集. 峨眉山: 中国土木工程学会: 244-249.
- 黄明利, 赵建明, 谭忠盛, 等, 2016. 兰渝铁路木寨岭隧道岭脊段衬砌-围岩结构体系变形受力特征分析[J]. *现代隧道技术*, 53(6): 89-99, 107.
- 巨小强, 2010. 木寨岭隧道越岭区区域地应力特征分析及应用[J]. *铁道勘察*, 36(2): 33-35.
- 李彬, 张文, 文冉, 2022. 陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析[J]. *地质力学学报*, 28(2): 191-202.
- 李佳琪, 2019. 渭武高速木寨岭隧道施工变形预测及大变形分级标准研究[D]. 兰州: 兰州交通大学.
- 李剑超, 2019. 渭武高速木寨岭隧道开挖工法优化与变形控制措施

- 研究[D].兰州:兰州交通大学.
- 李建伟,雷胜友,李振,等,2012.木寨岭隧道炭质板岩流变力学特性研究[J].隧道建设,32(1):36-40.
- 李鹏飞,赵勇,刘建友,2014.隧道软弱围岩变形特征与控制方法[J].中国铁道科学,35(5):55-61.
- 李沿宗,高攀,邹翀,等,2011.木寨岭隧道变形分析及初期支护参数优化研究[J].隧道建设,31(3):320-324,339.
- 李志军,郭新新,马振旺,等,2020.挤压大变形隧道研究现状及高强预应力一次(型)支护体系[J].隧道建设(中英文),40(6):769-782.
- 刘佑荣,唐辉明,1999.岩体力学[M].武汉:中国地质大学出版社.
- 彭建兵,崔鹏,庄建琦,2020.川藏铁路对工程地质提出的挑战[J].岩石力学与工程学报,39(12):2377-2389.
- 戚帮申,张鹏,丰成君,等,2016.川甘陕交汇地区现今地应力环境与地震危险性[J].中国地质,43(5):1814-1827.
- 时毓,2012.中国中部东秦岭造山带的形成和演化[D].南京:南京大学.
- 苏生瑞,朱合华,王士天,等,2002.断裂物理力学性质对其附近地应力场的影响[J].西北大学学报(自然科学版),32(6):655-658.
- 孙绍峰,2012.兰渝铁路软岩隧道特征及大变形控制技术[J].现代隧道技术,49(3):125-130.
- 孙元春,高波,许再良,等,2012.隧道围岩挤压变形预测方法研究[J].铁道工程学报,29(2):50-54.
- 陶志刚,罗森林,康宏伟,等,2020.公路隧道炭质板岩变形规律及蠕变特性研究[J].中国矿业大学学报,49(5):898-906.
- 王成虎,沙鹏,胡元芳,等,2011.隧道围岩挤压变形问题探究[J].岩石力学,32(S2):143-147.
- 王栋,王剑锋,李天斌,等,2021.西南山区某铁路隧道口高位落石三维运动特征分析[J].地质力学学报,27(1):96-104.
- 王建军,黄勇,2009.兰渝铁路木寨岭隧道工程地质勘察报告[R].西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司.
- 王永刚,丁文其,刘志强,等,2020.木寨岭隧道大变形分级标准与支护时机研究[J].地下空间与工程学报,16(4):1116-1122.
- 颜天佑,崔臻,张勇慧,等,2018.跨活动断裂隧洞工程赋存区域地应力场分布特征研究[J].岩土力学,39(S1):378-386.
- 阳映,闫清华,衣骏杰,等,2021.综合物探技术在北京延庆松山隧道勘察中的应用[J].地质与勘探,57(6):1374-1383.
- 叶康慨,2018.兰渝铁路木寨岭隧道岭脊核心段扩拆技术[J].隧道建设(中英文),38(4):640-648.
- 余云燕,陈志敏,李国良,等,2015.木寨岭隧道三维地应力场多元回归宏观拓展分析[J].兰州交通大学学报,34(1):6-11.
- 张波,2014.木寨岭隧道板岩变形机理研究[J].铁道建筑(5):57-59.
- 张林成,周聪,汤井田,等,2022.双分量广域电磁法在深埋隧洞工程勘察中的应用[J].地质与勘探,58(4):857-865.
- 张培震,王琪,马宗晋,2002.中国大陆现今构造运动的GPS速度场与活动地块[J].地学前缘,9(2):430-441.
- 张鹏,孙治国,王秋宁,等,2017.木寨岭深埋隧道北段地应力测量与围岩稳定性分析[J].地质力学学报,23(6):893-903.
- 张祉道,2003.关于挤压性围岩隧道大变形的探讨和研究[J].现代隧道技术,40(2):5-12,40.
- 赵德安,李国良,陈志敏,等,2009.乌鞘岭隧道三维地应力场多元有限元回归拓展分析[J].岩石力学与工程学报,28(S1):2687-2694.
- 赵东,田倩,郝付军,2022.深埋炭质板岩隧道的大变形分级研究[J].地质与勘探,58(6):1261-1271.
- 中华人民共和国建设部,2015.工程岩体分级标准:GB/T 50218—2014[S].北京:中国计划出版社.