第42卷 第6期	Ę	2	国	岩	溶	Vol. 42	No. 6
2023 年 12 月	CARS	OLC	OGI	CA	SINICA	Dec. 2	2023

李红明,孙炜锋,张红日,等.深埋隧道精细地应力场反演研究——以滇西南双江至沧源高速姜染山隧道为例[J].中国岩溶,2023,42(6):1247-1257. DOI:10.11932/karst2023v029

李红明¹,孙炜锋^{2,3},张红日¹,秦向辉^{2,3},冯 坚¹,魏见海¹, 兰素恋⁴,张重远^{2,3},孙东生^{2,3}

(1. 广西交科集团有限公司, 广西南宁 530007; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 自然资源 部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081; 4. 广西交通职业技术学院, 广西南宁 530007)

摘 要:针对复杂地质条件下深埋隧道精细应力场准确反演以及主要地质条件对地应力场影响问题, 以滇西南双江至沧源高速姜染山隧道为例开展研究。采用精细 DEM 数据、实测地质资料建立隧址 区精细地质模型,以地应力实测数据和 GPS 速度场数据作为联合约束条件,开展姜染山隧道工程区 精细地应力场反演计算,揭示了隧址区精细应力场特征及主要地质条件影响作用。结果表明:隧道 区模拟变形速度场与 GPS 观测结果基本一致,模型能够较好反映工程区现今构造应力环境;隧址区 地应力场存在应力水平西高东低、主应力方向局部偏转的特征,近 E-W 向的小黑江断裂对研究区地 应力场的影响主要表现为造成主应力方向小幅偏转,未造成应力量值急剧变化,局部次级断裂和地 形叠加影响作用有限;隧道沿线最大主应力在 7.47~27.23 MPa之间,中间主应力在 1.59~15.12 MPa之 间,最小主应力在 0.01~6.71 MPa之间,隧道沿线应力水平总体上未表现出明显异常特征;基于反演 精细应力场数据的岩石应力强度比方法计算结果显示,现今地应力条件下,隧道岩石强度应力比结 果总体在 0.20~0.48 之间,表明隧道围岩整体为无岩爆和轻微岩爆情况。本研究实例表明,复杂地质 条件下,利用精细 DEM 和实际断层资料等,可以建立适合工程区尺度的精细地质模型,有效揭示工 程区应力场特征和主要地质条件影响作用,支撑隧道围岩工程稳定性评价。

关键词:地应力;深埋隧道;精细应力场;有限元数值模拟;双江-沧源高速

中图分类号: U452.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4810 (2023) 06-1247-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引 言

地应力是赋存于地下岩体内的一种应力,是地 壳内构造变形、断裂活动和工程岩体破坏的直接力 源^[1-4],准确查明工程区域地应力场特征及其形成机制,是交通工程选线、地下工程设计科学化的前提^[5-7]。地应力主要源于构造应力、自重、残余应力和热应力等^[8]。受地形、断裂、节理裂隙、地层力学

收稿日期:2022-12-10

资助项目:国家重点研发计划项目"膨胀土边坡水敏性以及生态护坡研究(2022KY1136)";交通运输部重点科技项目"公路高边坡多点约束型锚索加固理论、技术与监测预警";中铁十七局集团科技项目"花岗岩隧道洞渣特性以及路用技术研究";广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划资助项目

第一作者简介:李红明(1982-),男,博士研究生,高级工程师,主要从事道路材料运用和岩土工程勘察设计、地质灾害处治技术研究等工作。 E-mail:1109705105@qq.com。

性质差异和高地温等影响,表现出应力方向显著偏 转或者量值突变[9-14]。滇西南地处云贵高原西部、青 藏高原东南缘、川滇菱形块区西南部^[8],新生代以来, 印度板块向东持续俯冲到缅甸弧和滇西地块之下[15], 造成青藏高原强烈隆升,并导致川滇菱形块体以及 滇西南块体等的东南向挤出^[16], 塑造了滇西南复杂 的构造格局、强烈的构造活动。已有研究表明,云南 地区现今构造应力场极其复杂,最大主应变具有显 著的西高东低、北强南弱的分布特征[17-18];其中,滇 西南地区现今构造应力场复杂多变,且明显受到了 构造活动和断裂影响,非均匀性特征十分显著^[19-20]。 因此,对于滇西南复杂构造应力场背景下的线性工 程规划建设、隧道工程灾害防治等,获取工程区精细 应力场十分重要。但是,由于现场原地应力测量成 本高、耗时长、钻探条件要求严格,限制了深埋长大 隧道大规模地应力测量的开展,一般情况下,只开展 少量的地应力测量工作。如何应用有限的地应力测 量数据,准确反映复杂地质条件下隧道工程区地应 力场特征是普遍存在的问题。

针对此问题,目前研究思路主要有两类,一类是 采用线性或多元回归的方式将主应力简化为深度等 项的线性函数,从而将有限测点实测结果扩展获得 区域地应力分布规律[21-22],由于地应力非均匀性特征, 如果研究区活动构造发育或者地形比较复杂,其结 果将存在较大不确定性;第二类是以实测地应力数 据作为依据,采用数值模拟方法,反演获得工程区应 力场,进而为工程设计施工提供参考[23-24]。此类研究 中,准确的地质模型和边界条件是反演地应力场准 确与否的关键,也是分析断裂、地形等对地应力场影 响的基础。由于三维地质建模的复杂性和计算规模 相对较大,三维地应力场模拟中往往对地形、断裂等 条件进行简化,但过于简化可能会导致这些条件对 地应力场影响作用无法被准确识别,并可能影响模 拟结果准确性,完全不简化又容易造成模型剖分、计 算无法进行,这种情况在复杂地质条件下尤为突出。 如何在复杂地质条件下有效构建精细地质模型构建, 反演应力场并识别主要条件影响作用成为应力场反 演中难题之一。对此,本文以滇西南双江至沧源高 速姜染山特长隧道为实例,尝试利用精细 DEM 数据 和实际断层资料,建立小尺度三维地质模型,结合中 国大陆速度场实测结果作为边界约束条件,进而开 展工程场区精细应力场分析的方法。

研究中,考虑隧道工程规模、区域地层、断裂规 模及活动性,采用 30 m 精度 DEM 数据,建立了姜染 山隧道工程区精细三维地质有限元模型,并综合利 用地应力实测数据和精细 GPS 水平运动速度场作为 约束条件^[25],计算工程区精细构造应力场,揭示了工 程区地应力场特征,分析了地形和断裂的影响作用; 进一步结合工程地质条件分析了姜染山隧道围岩稳 定性。本研究对复杂地质条件下深埋隧道应力场精 细研究有一定指导意义,对于滇西南地区地应力场 及其非均匀性研究有参考意义。

1 工程概况

1.1 区域地质条件

研究区地处云贵高原西南部,自然地理条件属 于横断山中南部的盆岭与纵谷地区;构造上处位于 冈底斯-念青-唐古拉褶皱系之昌宁-孟连褶皱带内, 经历了复杂的构造变形历史,断裂活动强烈。本区 新构造运动的起始时间大约为上新世早期,喜山运 动第Ⅲ幕强烈影响本区,除使中生代地层发生褶皱 变形以外,沿一些老的断裂发生强烈的错动和动力 变质作用,局部地段发生断陷作用,形成古近系盆地, 堆积了很厚的上古近系陆相煤系地层。第四纪以来, 由于欧亚大陆和印度大陆碰撞作用加剧,青藏高原 强烈隆升,研究区域也随之隆升,与此同时沿主要断 裂形成了一系列第四纪小型断陷盆地,新构造运动 与地震活动表现强烈。

1.2 隧道地质概况

双江-沧源高速公路位于滇西南临沧市境内,是 规划中的云贵高原西部重要交通线路,全长 51.621 km, 共设置特大桥 4座,深埋特长隧道 2座。该高速线路 穿越区断裂活动较为强烈,主要为 V 型构造侵蚀峡 谷地貌,中深切沟谷发育,局部地形起伏极大。本文 研究的姜染山隧道为分离式隧道,全长 4 647 m,隧道 最大埋深约 566.70 m,是该高速的控制性工程之一。

姜染山隧道工程区的地形地貌主要为构造侵蚀 中山峡谷,海拔在920~1560m之间,陡峭山峰林立, 切割深度在200~700m,山体坡度多在30°~45°之间, 隧道进出口地段,尤其是出口部位的地形较陡,中间 段地形海拔虽然较高,但是地形起伏变化相对较缓 (图1、图2)。地质勘察表明,隧址区地层覆盖层为



图 1 研究区地形地质与姜染山隧道布置平面图





Fig. 2 Profile of the geological conditions of the Jiangranshan tunnel

第四系残坡积(Q4^{el+dl})地层,下伏地层为二叠系上统 南皮河组(P_{2n})粉砂岩、二叠系下统大明山组(P_{1dm}) 石灰岩、石炭系上统鱼塘寨组(C_{3y})石灰岩(图 2)。 其中二叠系地层是隧道区的主要地层,主要岩性有 粉砂岩、灰岩等,岩体节理裂隙发育,整体较完整,局 部段岩体破碎。石炭系出露地层主要集中在研究区 西北角,主要岩性为中风化灰岩,岩体破碎(图 1、 图 2)。

隧道工程区断裂较发育,主要发育两条第四纪 断裂,即汗母坝断裂(F₁)和小黑江断裂(F₂),以及其 他3条次级断裂等5条断裂(图1、图2),其中,汗母 坝断裂长度约25km,总体走向N325°W,倾向东或 西,倾角较陡,一般为65°~75°,局部直立,断层在地 形地貌上特征显著,部分断层面清晰可见,发育 2~10m左右断层带,胶结坚硬,研究表明该断裂是一 条全新世活动断裂。小黑江断裂,总体走向为北西 西向,倾向变化较大,倾角略缓,地形地貌上显示为 走滑断层,局部段地层显示出压扭特征,研究表明其 为早-中更新世断裂。其他三条断裂规模较小,五条 断裂共同构成了研究区较复杂的断裂系统,需要在 研究中重点考虑。

1.3 地应力实测结果

姜染山隧道工程所在的滇西南地区现今构造应 力场十分复杂,但是区域上实测地应力数据稀少,可 以参考的实测地应力数据缺乏,为此利用布设在隧 道中部的勘察钻孔,开展了水压致裂地应力测量工 作(图1),获得了工程区实测地应力场资料,初步了 解了工程区地应力场特征。通过现场测量,共获得 5组有效测试数据,测试结果见表1。

实测地应力数据表明,测点414m深度范围内 最大、最小水平主应力值分别为9.90~22.18 MPa 和5.14~11.25 MPa;最大、最小水平主应力值随深 度增加梯度系数分别为0.06736 MPa·m⁻¹和0.0307 中国岩溶

Table 1 Results of the hydraulic fracturing measurements											
测段	测段中心			压裂参数	数/MPa	主应力值/MPa			S _H		
序号	深度/m	$P_{\rm H}$	P_0	$P_{\rm b}$	$P_{\rm r}$	$P_{\rm s}$	Т	$S_{ m H}$	$S_{ m h}$	$S_{ m v}$	方向
1	231.50	2.31	0	4.72	3.19	2.82	1.53	9.90	5.14	6.11	
2	307.00	3.07	0	10.33	6.38	5.85	3.95	17.31	8.92	8.10	
3	367.00	3.67	0	11.23	7.53	6.78	3.70	20.15	10.45	9.69	N12°W
4	393.00	3.93	0	13.90	7.64	7.32	6.26	22.18	11.25	10.38	N10°W
5	414.00	4.14	0.14	10.42	4.50	6.12	5.92	22.00	10.26	10.93	

表 1 水压致裂地应力测量结果

MPa·m⁻¹,显示隧址区处于较高应力水平。测点处 地应力场总体以水平主应力作用为主,最大主压 应力方向为N11°W方向,与区域构造应力场方向 基本一致^[26]。单孔地应力测试结果为我们了解隧 道工程区地应力场特征提供了很好的指示,但是 由于隧道附近地质条件复杂且局部地形变化显著, 工程区地应力场可能存在非均匀性特征,为了更 加准确获得隧道洞身段地应力场,进而为隧道围 岩工程稳定性评价提供可靠支撑,需要在上述实 测的基础上,借助数值模拟,获得隧址区精细构造 应力场。

2 隧道应力场有限元模拟

除极简单地质、地形条件下的应力场分布可以 通过解析法计算外,复杂地形下地应力场分布、地形 和构造作用影响分析都需要借助数值模拟方法,如 有限元法、有限差分法和边界元方法等^[20, 27-30]。综合 考虑计算精度和计算复杂程度,本研究采用有限元 方法进行三维应力场数值计算。

2.1 主要断裂及地块

研究区几何模型构建数据来源为1:20万区调 地质图件、1:5万数字高程图(DEM)和隧道工程区 工程地质勘察资料,建模时采用 CGCS2000 坐标系。 为准确反映隧道工程区地形地貌特征,考虑研究区 范围、隧道规模、断裂时代和规模,建模时采用了采 用 30 m 精度 DEM 数据量化地形地貌特征,以更好 的匹配隧道长度、埋深和断层的规模。三维地形模 型显示,该精度数据建模可以有效反映隧址区地形 切割变化特征(图3)。为反映隧道工程区构造条件, 根据前述研究区主要断裂的分布情况,在模型中考 虑的断裂主要有汗母坝断裂(F_1)、小黑江断裂(F_2), 以及次级断裂(F_{3} 、 F_{4} 以及 F_{5})。鉴于上述断裂规模 上存在显著差异,且有主要断裂和次级断裂的差别, 为在模型中体现不同级别、规模、活动时代断裂的 潜在影响作用,结合断裂地质调查资料,建模时断裂 宽度与断层活动性成正比,其中区域性断裂 F1 和 F2 的宽度按照20m设置,这与调查发现的断层带宽度 可达10m先符合;其余次级断层的宽度按照10m 设置,断裂产状结合现场调查资料和钻探资料,这些



Fig. 3 Three-dimensional geological units and model boundary of the study area

断裂将模型分为 6 个块体(图 3)。建模时,将模型的 几何特征点导人 ANSYS,采用 APDL 命令流方式建 立区域模型,其中,模型 X 轴方向为正东, Y 轴方向 为正北, Z 轴方向为垂直向上。模型整体东西长 5 600 m,南北长 3 400 m,模型深度至海拔-1 000 m。为了 降低有限元数值计算边界效应影响,在模型四周设 置宽 4 000 m 边界。模型整体采用四面体单元 solid186 划分网格,共建立 246 175 个节点, 171 651 个单元(图 3)。

2.2 地质模型及参数

本研究采用了 ANSYS 有限元软件进行应力场 模拟。在有限元模拟计算中,需要在地质模拟基 础上,利用各地层单元物理力学性质参数构建物 理模型。研究区内出露的地层主要有: P_{2n}中厚层 状粉砂岩、P_{1dm} 灰岩和 C_{3y} 灰岩等。本研究中物理 模型建立及介质参数主要依据工程勘察资料以及 室内岩石力学实验数据,断层采用常用的弱化其 力学性质参数的方式处理,模型中各地质体物理 力学参数见表 2。

表 2 模型材料物理力学参数表

 Table 2
 Physical and mechanical parameters of the materials used in the model

体序号	地层名称	岩性	密度/g·cm ⁻³	E/GPa	泊松比
1	$P_1 dm$	灰岩	2.65	20	0.4
2	P_2n	粉砂岩	2.40	18	0.35
3	$C_{3}y$	灰岩	2.30	18	0.3
4	f	断层破碎带	2.10	10	0.35

2.3 位移边界条件

为了使模拟结果更好地反映研究区现今构造应 力环境,提高模拟结果的准确性和可靠性,本研究中 计算模型边界条件采用位移约束,位移数据依据 1995—2020年中国大陆地区 GPS速度场结果^[25],并 采用 0.1°的内插网格速度场获取研究区边界位移数 据(图 4)。计算时垂直边界参考中国大陆地区 GPS 速度场差值结果,底面采用全约束边界,顶面自由, 在竖直方向施加重力荷载(9.8 m·s⁻²)。经过多次反 复试算,最终确定的模型水平方向约束条件:北部和 南部边界位移方向为 N5°W~N20°W,西部边界位移 方向为 N10°W~N20°W,东部边界位移方向为 N5°W (图 5)。



图 5 模型施加的位移边界条件



3 模拟结果分析

3.1 位移场

基于上述地质模型和边界约束条件,首先计算 了研究区模拟位移场,结果如图 6,其中白色箭头代 表了研究区模拟获得的位移方向,紫色短线是根据 Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC)提供的 1995—2020 年间 GPS 实测数据



图 6 研究区位移场分布图(图中白色箭头为本次数值计算速度场,紫色短线为实测位移场插值结果)

Fig. 6 Map of displacement field distribution in the study area (The white arrow represents the numerical calculation velocity field; the short purple lines represent the interpolation results of the measured velocity field.)

插值结果。对比结果显示,本研究三维模拟结果给出的研究区北侧变形速度场在 5.4~5.6 mm·a⁻¹之间, 南侧变形速度场在 5.4~5.5 mm·a⁻¹之间, 与 GPS 实测 位移场 5.4~5.6 mm·a⁻¹ 基本吻合, 仅在模型西北端部 有较明显的偏差; 模拟结果给出的研究区变形速度 场运动方向整体在 165°~200°之间, 与 GPS 实测位移 场方向总体为 171°的特征基本一致, 对比结果也表 明本研究设置的边界条件较为合理, 能够很好的反 映研究区的现今构造环境, 能够揭示现今变形场特 征和应力场, 因此利用本模型和边界条件获得应力 场特征也将能反映研究区现今地应力场特征。上述 模拟结果给出的位移场特征还表明, 研究区现今变 形特征受研究区中部高山地形的阻挡, 在研究区东 北和西北部河谷地区表现出了顺时针偏转的特征。

3.2 应力场

根据上述边界位移条件,模拟计算了研究区地 应力场特征(图 7),并将其与实测值进行了对比 (图 7a)。结果表明,数值模拟计算结果与实测结果 随深度变化趋势总体一致,两种方法的应力水平也 较为接近,表明应力场模拟结果总体较为可靠。在 此基础上,进一步详细分析了工程区地应力场特征, 并绘制隧道轨面最大主应力分布图(图 7b)。结果显 示,除研究区西北角及隧道出口(勐省)方向个别部 位应力水平较高,存在应力集中外,研究区最大主应 力总体分布在 7.6~31.3 MPa 之间。结合隧址区地质

条件分析认为,模型西北角应力集中可能是受到了 西北部河谷和F₁断层发育的影响,而隧道出口(勐省 方向)部位的局部应力集中可是受山脚地形和F₄断 层影响的结果;研究区内其他几条断裂没有表现出 明显的扰动应力场作用,地应力值变化较为连续和 平滑。同时,根据模拟结果发现,研究区东部区域, 即隊道入口(双江方向)最大主应力明显小于隊道出 口(勐省方向),揭示了研究区应力场整体上表现出 西高东低的特征。模拟结果还显示,研究区南北两 侧应力水平没有显著的差别,表明小黑江断裂对研 究区地应力值影响较小,没有造成应力值在断裂附 件急剧突变。在此基础上,根据数值模拟计算结 果生成了隧道沿线最大主应力、中间主应力以及最 小主应力剖面图(图 7c),结果表明隧道沿线最大 主应力值在 7.47~27.23 MPa 之间, 隧道西段(勐省方 向)高于隧道东段;隧道沿线中间主应力在1.59~ 15.12 MPa之间, 变化规律与最大主应力类似; 最小 主应力值变化范围在 0.01~6.71 MPa 之间, 基本呈现 东西两侧较小,中间较高的趋势,与最大和中间主应 力变化规律略有差别。三维数值模拟同时也获得了 研究区主应力矢量图(图 7b 灰色短线),结果表明, 研究区最大主应力方向分布特征相对较复杂,模型 中北部区域的最大主应力方向整体呈近南北向,与 该范围内实测最大水平主应力方向基本一致。但是, 模型南部地区(以隧道线划分)最大主应力出现了偏 转特征,总体表现为由近 S-N 向 NNW 或 NNE 小幅



图 7 研究区隧道沿线地应力特征图

图中(a)为钻孔实测数据与模拟数据对比图(b)为研究区隧道轨面平均深度最大主应力图,灰色短线表示最大主应力矢量方向(c)为隧道沿线主压应力分布 图(d)为隧道沿线岩爆指数分布图



(a) Comparison of the measured stress data and the simulated stress data (b) Diagram of the maximum principal stresses at the average depth of the tunnel rail surface (The short gray line represents the direction of the maximum principal stresses.) (c) Distribution of the main compressive stress along the tunnel (d) Distribution of the rockburst index along the tunnel

度波动。但是,研究区东南部区域,最大主应力方向 有明显的向近东西向偏转的趋势,分析认为,最大主 应力方向南北方向的小幅度变化和差异,可能主要 是受研究区近东西向的小黑江断裂影响;而东南部 区域应力场的较显著偏转,可以与研究区 F₄断层以 及东南部地形整体趋势有关系。综上所述,基于三 维地质模型的应力场数值模拟总体上较为准确地揭 示了研究区地应力场精细特征;汉母坝断裂由于其 在研究区内的规模较小,其对地应力场的影响主要 表现为形成局部应力集中;小黑江断裂对区域应力 场的影响主要表现为造成研究区内最大主应力方向 小幅度波动,对应力值为变现出强烈的影响作用;其 他次级断裂对应力场的影响微弱且仅限于局部较小 范围。总体来讲,研究区内断裂和地形对地应力测 量影响较为有限且主要显现在局部小范围内,研究 区现今地应力场总体上还是以区域构造应力场控制 为主,断裂和地形影响作用相对较弱。数值模拟结 果也显示沿隧道轴线没有显著的应力场异常变化情 况,由此获得的隧道轴线方向详细地应力数据可以 用于分析隧道围岩稳定性。

4 隧道围岩稳定性预测

由于地下隧道的开挖,原地应力状态将受到一 定程度的扰动,在洞壁及其一定深度范围形成应力 的二次分布和应力集中,使得洞壁附近的切向应力 有可能超过其临界值,从而产生岩爆。根据隧道沿 线岩体抗压强度估算结果和地应力反演得到的隧道 轴线地应力参数,采用岩石应力强度比方法^[28]对隧 道岩爆风险进行量化预测,该准则考虑了隧道开挖 过程和初始应力场重分布的影响,可以较好的为施 工阶段围岩稳定性评价和工程灾害防治提供参考^[22]。

岩石应力强度比方法将隧道的横截面抽象为受 两向正应力作用的平面应变模型。两向正应力其中 之一为上覆岩石自重作用引起的垂向应力(S_v);其二 为水平向正应力(σ_n),它是根据实测的原地应力状态 (S_H、S_h以及隧道轴线方向与 S_H方向夹角)利用线弹 性理论公式计算得出,其计算公式如下:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(S_H + S_h) + \frac{1}{2}(S_H - S_h)\cos 2\theta$$
(1)

其中, σ_n是作用于隧洞横截面方向的水平正应力, S_H、 S_h分别为原最大、最小水平主应力, θ为水平隧道轴 向法线方向与最大水平主应力方向的夹角。

此时,隧道横截面上的最大切向应力(σ_{\thetamax})可由 下式计算的到:

$$\sigma_{\theta \max} = \begin{cases} 3\sigma_n - S_v(\sigma_n \ge S_v) \\ 3S_v - \sigma_n(\sigma_n < S_v) \end{cases}$$
(2)

根据 $\sigma_{\theta max} / R_c$ 可计算隧道沿线岩爆指数,并进行

岩爆分级, 一般条件下, σ_{θmax} / R_c 值在 [0.3, 0.5)、[0.5, 0.7)、[0.7, 0.9)、≥0.9 时分别对应轻微岩爆、中等岩 爆、强烈岩爆、极强岩爆。基于前述数值模拟获得 精细应力场的双江至沧源高速深埋隧道岩爆分析结 果如图 7d 所示,结果表明,姜染山隧道沿线的岩爆 指数在 0.20~0.48 之间, 表明隧道围岩整体处在无岩 爆和轻微岩爆区间,隧道围岩稳定性整体较好;岩爆 指数大于 0.3 段落占比约为 86.42%; 隧道西段(勐省 方向)岩爆指数略大于东侧(双江方向),尤其是在西 侧隧道埋深最大位置岩爆指最高,该区段地层以灰 岩和砂岩等硬脆性岩石为主,在现今地应力条件下, 具有岩爆发生的可能性。岩爆的孕育及发生受地应 力、地质条件、开挖方式等多种因素的影响,其特征、 分类和孕育机制十分复杂[31],上述认识需要在施工 阶段不断的深化。姜染山隧道地处滇西南复杂构造 区,其实测主应力变化梯度略大于青藏高原地区主 应力变化梯度[32],数值模拟显示,断裂和地形对工程 区地应力场影响有限,主要是构造应力场作用为主。 勘察资料表明,隧道最大埋深约 566 m, 围岩多为和 砂岩等硬质岩为主,且以Ⅲ、Ⅳ级围岩为主,因此,其 较低岩爆风险更多是受到了围岩条件的影响,建议 施工阶段重点关注围岩条件变化,尤其是断裂传切 部位围岩条件的变化。

5 结 论

针对复杂地质条件下深埋隧道精细应力场反演 及主要地质条件影响问题,以滇西南姜染山深埋隧 道为例,尝试利用精细 DEM、实际断层资料,建立三 维地质模型,采用小尺度 GPS 速度场数据和实测地 应力数据做约束条件,研究深埋隧道精细应力场特 征。得到如下结论:

(1)模拟结果表明,姜染山隧道工程区北侧变形 速度场在 5.4~5.6 mm·a⁻¹之间,南侧变形速度场在 5.4~5.5 mm·a⁻¹之间,与区域变形场特征基本吻合,能 够较好反映研究区的现今构造环境。

(2) 隧址区地应力场存在应力水平西高东低、主 应力方向局部偏转的特征。 隧址区近 E-W 向小黑江 断裂对地应力场的影响主要表现为造成主应力方向 小幅偏转,未造成应力量值急剧变化,局部次级断裂 和地形叠加影响造成了小范围应力集中或者应力方 向偏转。 (3)隧道沿线最大主应力值在 7.47~27.23 MPa 之间,隧道西段(出口段)高于隧道东段(人口段),中 间主应力在 1.59~15.12 MPa之间,最小主应力在 0.01~6.71 MPa之间,隧道沿线应力水平总体上未表 现出明显异常特征。

(4)利用应力场精细模拟结果,采用岩石应力强 度比方法获得的隧道沿线岩爆指数在 0.20~0.48 之 间,表明隧道围岩整体处在无岩爆和轻微岩爆情况, 隧道西段岩爆指数大于东段,尤其是在西侧隧道埋 深最大位置岩爆指数最高,具备岩爆发生的可能。

(5)研究实例表明,复杂地质条件下,利用精细 DEM、实际断层资料,建立适合工程区尺度的精细 地质模型,能够有效揭示工程区应力场特征和主要 地质条件对工程区应力场影响,服务工程建设。

参考文献

- [1] Scholz C H. The mechanics of earthquake and faulting[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2002.
- [2] Diederichs M S, Kaiser P K, Eberhardt E. Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 785-812.
- [3] 秦向辉,张鹏,丰成君,孙炜锋,谭成轩,陈群策,彭有如.北京 地区地应力测量与主要断裂稳定性分析[J].地球物理学报, 2014,57(7):2165-2180.

QIN Xianghui, ZHANG Peng, FENG Chengjun, SUN Weifeng, TAN Chengxuan, CHEN Qunce, PENG Youru. In-situ stress measurements and slip stability of major faults in Beijing region[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(7): 2165-2180.

- [4] Hettema M. Analysis of mechanics of fault reactivation in depleting reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 129: 104290.
- [5] 谭成轩, 孙炜锋, 孙叶, 王连捷. 地应力测量及其地下工程应用的思考[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1627-1632.
 TAN Chengxuan, SUN Weifeng, SUN Ye, WANG Lianjie. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(10): 1627-1632.
- [6] 王成虎,刘立鹏,郭啓良,侯砚和.地应力测量数据分析对工程 稳定性控制设计的意义[J].工程地质学报,2008,16(Suppl.1): 377-383.

WANG Chenghu, LIU Lipeng, GUO Qiliang, HOU Yanhe. One method to analyze the measured in-situ stress data and its significance to the project stability design[J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16(Suppl.1): 377-383.

[7] 黄艺丹,潘前,姚令侃,陈诺. 川藏铁路拉林段地应力特征及高

地应力风险调控选线策略[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 375-382.

HUANG Yidan, PAN Qian, YAO Lingkan, CHEN Nuo. Characteristics of measured stress and route selection strategy under high in-situ stress risk control along Lalin section of Sichuan-Tibet Railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(2): 375-382.

 [8] 黄小龙,吴忠海,吴坤罡.滇西北弥渡地区主要断裂晚新生代 发育特征及其动力学机制[J].地质力学学报,2021,27(6): 913-927.

> HUANG Xiaolong, WU Zhonghai, WU Kungang. Late Cenozoic development characteristics and dynamic mechanism of the main faults in the Midu area, northwestern Yunnan[J]. Journal of Geomechanics, 2021, 27(6): 913-927.

- [9] Zang A, Stephansson O. Stress field of the earth's crust[M]. New York, USA: Springer, 2010.
- [10] 陈群策, 毛吉震, 侯砚和. 利用地应力实测数据谈论地形对地 应力的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 3990-3995.

CHEN Qunce, MAO Jizhen, HOU Yanhe. Study on influence of topography on in-situ stress by interpretation of measurement data of in-situ stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 3990-3995.

 [11] 谭成轩, 孙炜锋, 张春山, 吴树仁, 彭华, 孙叶. 深切峡谷地壳浅 表层地应力状态变化分析[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1353-1359.

> TAN Chengxuan, SUN Weifeng, ZHANG Chunshan, WU Shuren, PENG Hua, SUN Ye. An analysis on variation of crustal stress at the shallow part of upper crust in deep cut valley region[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(4): 1353-1359.

- [12] 苏生瑞,黄润秋,王士天.断裂构造对地应力场的影响及工程 应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [13] 苏生瑞,朱合华,王士天, STEPHANSSON O. 岩石物理力学性 质对断裂附近地应力场的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 370-377.
 SU Shengrui, ZHU Hehua, WANG Shitian, STEPHASSON O. Effect of physical and mechanical properties of rocks on stress field in the vicinity of fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 370-377.
 [14] Heidbach O, Rajabi M, Cui Xiaofeng, Fuchs K, Müller B, Rei-
- [14] Heidbach O, Rajabi M, Cui Xiaoreng, Fuchs K, Muller B, Reinecker J, Reiter K, Tingay M, Wenzel F, Xie Furen, Ziegler M O, Zoback M L, Zoback M. The word stress map database release 2016: Crustal stress pattern across scales[J]. Tectonophysics, 2020, 74: 484-498.
- [15] 杨文采, 侯遵泽, 于常青. 滇西地壳三维密度结构及其大地构造含义[J]. 地球物理学报, 2015, 58(11): 3902-3916.
 YANG Wencai, HOU Zunze, YU Changqing. 3D crustal density of west Yunnan and its tectonic implications[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(11): 3902-3916.
- [16] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between Indian and Asia[J]. Geological Society of Lon-

367-372

don Special Publications, 1986, 19(1): 113-157.

[17] 武永彩, 李昂, 唐红涛. 滇西北地区近年来应力场的数值模拟 研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(12): 1238-1240, 1279.

> WU Yongcai, LI Ang, TANG Hongtao. The numerical simulation of stress field in northwest Yunnan in recent years[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(12): 1238-1240, 1279.

- [18] 洪敏,张勇,邵德盛,王伶俐,王岩.云南地区近期地壳活动特征[J].地震研究,2014,37(10):367-372.
 HONG Min, ZHANG Yong, SHAO Desheng, WANG Lingli, WANG Yan. Recent tectonic activity features of Yunnan region[J]. Journal of Seismological Research, 2014, 37(10):
- [19] 谢富仁,陈群策,崔效锋.中国大陆地壳应力环境研究[M].北京:地质出版社,2003.
 XIE Furen, CHEN Qunce, CUI Xiaofeng. Crustal stress in China[M]. Beijing: Geology Press, 2003.
- [20] Herger T, Heidbach O, Reiter K, Giger S B, Marschall P. Stress field sensitivity analysis in a sedimentary sequence of the Alpine foreland, Northern Switzerland [J]. Solid Earth, 2015, 6(2): 533-552.
- [21] 张重远, 杜世回, 何满朝, 秦向辉, 李彬, 陈兴强, 陈群策, 孟文, 黄勇. 喜马拉雅东构造节西缘地应力特征及其对隧道围岩稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 954-968.
 ZHANG Chongyuan, DU Shihui, HE Manchao, QIN Xianghui, LI Bin, CHEN Xingqiang, CHEN Qunce, MENG Weng, HUANG Yong. Characteristics of in-situ stresses on the western margin of the eastern Himalayan syntaxis and its influence on stability of tunnel surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(5): 954-968.
- [22] 徐正宣, 孟文, 郭长宝, 张鹏, 张广泽, 孙明乾, 陈群策, 陈宇. 川 西折多山某深埋隧道地应力测量及其应用研究[J]. 现代地质, 2021, 36(1): 114-125.

XU Zhengxuan, MENG Weng, GUO Changbao, ZHANG Peng, ZHANG Guangze, SUN Mingqian, CHEN Qunce, CHEN Yu. Insitu stress measurement and its application of a deep-buried tunnel in Zheduo mountain, west Sichuan[J]. Geoscience, 2021, 36(1): 114-125.

[23] 田朝阳, 兰恒星, 张宁, 许博闻. 某交通线路色季拉山隧道高地 应力区岩爆风险定量预测研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(3):621-634.

> TIAN Chaoyang, LAN Hengxing, ZHANG Ning, XU Bowen. Quantitative prediction of rockburst risk in Sejila tunnel of one railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 621-634.

[24] 蒙伟,何川,张钧博,周子寒,汪波.高地温高地应力下岩体初始地应力场反演分析[J].岩石力学与工程学报,2020,39(4): 749-760.

> MENG Wei, HE Chuan, ZHANG Junbo, ZHOU Zihan, WANG Bo. Inverse analyses of the initial geo-stress field of rock masses under high geo-temperature and high geo-stress[J]. Chinese

Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 749-760.

- [25] Wang M, Shen Z K. Present-day crustal deformation of continental China derived from GPS and its tectonic implications[J]. Journal of Geology Research: Solid Earth, 2020, 125: 1-22.
- [26] 盛书中,胡晓辉,王晓山,万永革,李红星,李振月,田宵,王向 滕,张苏祥.云南及邻区地壳应力场研究[J].地球物理学报, 2022,65(9):3252-3267.

SHENG Shuzhong, HU Xiaohui, WANG Xiaoshan, WAN Yongge, LI Hongxing, LI Zhenyue, TIAN Xiao, WANG Xiangteng, ZHANG Suxiang. Study on the crustal stress field of Yunnan and its adjacent areas[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2022, 65(9): 3252-3267.

- [27] Liu L, Zoback M D. The effect of topography on the state of stress in the crust: Application to the site of the Cajon Pass Scientific Drilling Project[J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 5095-5100.
- [28] 蒙伟,何川,汪波,张钧博,吴枋胤,夏舞阳. 基于侧压系数的岩 爆区初始地应力场二次反演分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4191-4200.
 MENG Wei, HE Chuan, WANG Bo, ZHANG Junbo, WU

Fangyin, XIA Wuyang. Two-stage back analysis of initial geostress field in rockburst area on lateral pressure coefficient[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(11): 4191-4200.

- [29] 付玉华, 王兴明, 袁海平. 构造应力场边界荷载反演的有限元 逆逼近法[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1850-1855.
 FU Yuhua, WANG Xingming, YUAN Haiping. Finite element inverse analysis of boundary load for tectonic stress field[J].
 Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1850-1855.
- [30] 秦忠诚, 刘承论, 赵祉业, 李青海. 地形及构造应力影响下初始 应力场的3D-FSM反演分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1848-1852.

QIN Zhongcheng, LIU Chenglun, ZHAO Zhiye, LI Qinghai. Back analysis of initial ground stresses by 3D-FSM considering influence of terrain and tectonic stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1848-1852.

[31] 冯夏庭, 肖亚勋, 丰光亮, 姚志宾, 陈炳瑞, 杨成祥, 苏国韶. 岩 爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 649-673.

FENG Xiating, XIAO Yaxun, FENG Guangliang, YAO Zhibin, CHEN Bingrui, YANG Chengxiang, SU Guoshao. Study on the development process of rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 649-673.

[32] 姚瑞,杨树新,谢富仁,崔效锋,陆远忠,许兆义.青藏高原及周 缘地壳浅层构造应力场量值特征分析[J].地球物理学报, 2017,60(6):2147-2158.

> YAO Rui, YANG Shuxin, XIE Furen, CUI Xiaofeng, LU Yuanzhong, XU Zhaoyi. Analysis on magnitude characteristics of the shallow crustal tectonic stress field in Qinghai –Tibet plateau and its adjacent region based on in-situ stress data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(6): 2147-2158.

1257

Inversion of the fine in-situ stress field for deep-buried tunnel: A case study on the Jiangranshan tunnel of the Shuangjiang-Cangyuan express way in southwest Yunnan

LI Hongming¹, SUN Weifeng^{2,3}, ZHANG Hongri¹, QIN Xianghui^{2,3}, FENG Jian¹, WEI Jianhai¹, LAN Sulian⁴, ZHANG Chongyuan^{2,3}, SUN Dongsheng^{2,3}

(1. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., LTD, Nanning, Guangxi 530007, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Nature Resources, Beijing 100081, China; 4. Guangxi Transport Vocational and Technical College, Nanning, Guangxi 530007, China)

Abstract Under complex geological conditions of fault system, stratum and terrain, an accurate inversion of the insitu stress field is a challenging and hot issue in the study on engineering geology. Focusing on the accurate inversion of fine in-situ stress field for deep-buried tunnel under complex geological conditions, and the influence of major geological factors on the stress state, we took the Jiangranshan tunnel of the express way from Shuangjiang to Cangyuan in southwest Yunnan as a case to perform the study. We first established the fine geological model of the Jiangranshan tunnel area by integrating the fine DEM data and the geological survey data. Then, taking the measured in-situ stress data in the tunnel site and the measured GPS data of velocity field as the integrated constraints, we carried out the inversion of fine in-situ stress field in the engineering region of Jiangranshan tunnel. On the basis of the inversion results, we analyzed the characteristics of fine in-situ stress field in the tunnel site and the influence of main geological conditions on the current in-situ stress field. Finally, we estimated the engineering geological stability of the surrounding rock mass of the Jiangranshan tunnel.

The results show that the simulated displacement velocity field in the Jiangranshan tunnel area is basically consistent with the GPS observation results, revealing that the inversion model adopted in this study can well reflect the current tectonic stress environment of the engineering region. The simulation results show that the level of the insitu stress field in the western part of the study area is relatively high, while it is low in the eastern part. The direction of the maximum principal stress shows partial deflection in the study area. The influence of the nearly E-W-striking Xiaoheijiang fault—the largest fault in the study area—on the in-situ stress is that it causes the slight deflection of the direction of the maximum principal stress; however, it does not cause abrupt change of the in-situ stress magnitude. The secondary faults and topography show little effect on the in-situ stress field, which is limited to very small area and does not cause notable disturbance of the in-situ stress field. The results reveal that the maximum, intermediate, and minimum principal stresses along the tunnel mainly distribute in 7.47-27.23 MPa, 1.59-15.12 MPa, and 0.01-6.71 MPa, respectively, and does not show obviously abnormal characteristics. The engineering geological stability of the surrounding rock mass of the Jiangranshan tunnel is estimated by the stress intensity index (i.e., the ratio of the maximum tangential stress to the uniaxial compress strength of rock). The estimation results, which are determined by integrating the stress field simulation results and the mechanical properties of the typical rocks obtained from the laboratory tests, show that the stress intensity indexes of the Jiangranshan tunnel mainly range between 0.20–0.48. It indicates that the surrounding rock masses of the Jiangranshan tunnel are mainly in a stable state or in a slight rockburst risk under the current in-situ stress conditions. The conclusion can be drawn from the case study that under the complex geological conditions, the fine geological model suitable for the scale of engineering area can be established by using the fine DEM and actual fault and strata data, which can effectively reveal the characteristics of the in-situ stress field in engineering area and the influence of the main geological conditions. This study provides not only the profound understanding of the in-situ stress field of the Jiangranshan tunnel area, but also the implications for the fine inversion of in-situ stress field under complex geological conditions in Yunnan and other similar areas. In addition, this study can directly support the stability evaluation of the surrounding rock of the deep-buried Jiangranshan tunnel.

Key words in-situ stress, deep-buried tunnel, fine stress field, FEM numerical simulation, Shuangjiang-Cangyuan express way

(编辑张玲)