

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.075>



挤压性隧道大变形危险性评价的未确知测度评价法研究

周航^{1,2}, 赵晓彦^{2*}, 蒋晖光³, 陈明浩^{1,2}, 陈仕阔², 喻炳鑫⁴

1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川成都 610031
2. 西南交通大学地球科学与工程学院, 四川成都 611756
3. 川藏铁路有限公司, 四川成都 610045
4. 西南交通大学土木工程学院, 四川成都 610031

摘要: 为解决复杂艰险山区深埋隧道软岩大变形风险评价中的不确定性难题, 提出了基于组合赋权法和未确知测度理论的挤压性隧道大变形评价方法. 通过系统研究高地应力深埋隧道大变形特征, 建立了由 7 个核心指标组成的评价体系, 包括岩石抗压强度、弹性模量、最大主应力、围强度应力比、地质构造、围岩级别、地下水. 通过采用距离函数耦合层次分析法(AHP)与熵权法, 构建了主客观组合赋权模型, 实现了挤压性隧道大变形风险评价指标的科学权重分配. 基于未确知测度理论, 建立了挤压性隧道大变形危险性评价模型, 通过构建线性单指标测度函数, 生成测度评价矩阵, 并采用置信度准则实现大变形危险性等级判定. 将该模型用于成兰铁路杨家坪隧道, 雅鲁藏布江某铁路令达拿、朗镇二号、江木拉隧道等 4 座典型软岩大变形隧道, 并与实际大变形结果进行对比. 研究结果表明: 该模型的评价结果与现场实际结果总体吻合, 证实了该模型用于复杂山区深埋隧道大变形风险评价的有效性及准确度, 为复杂山区深埋隧道大变形风险评价开辟了新途径.

关键词: 隧道大变形; 未确知测度理论; 危险性评价; 组合赋权模型; 置信度识别准则; 工程地质学.

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2026)04-1325-20

收稿日期: 2025-06-30

Unascertained Measure Evaluation Method for Large Deformation Hazard Analysis of Squeezing Tunnel

Zhou Hang^{1,2}, Zhao Xiaoyan^{2*}, Jiang Huiguang³, Chen Minghao^{1,2}, Chen Shikuo², Yu Bingxin⁴

1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China
2. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China
3. Sichuan-Tibet Railway Co. Ltd., Chengdu 610045, China
4. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: Aiming at the many uncertain factors in the large deformation risk assessment of deep lying tunnel in complex mountainous area, this study proposes a novel evaluation methodology for squeezing tunnel large deformations based on combined weighting method and unascertained measure theory. Through systematic investigation of large deformation characteristics in high-

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 42572379); 西藏自治区重点自然科学基金项目(No. XZ202401ZR0083); 中铁二院科研项目(Nos. KSNQ232025, KDNQ224006).

作者简介: 周航(1995-), 男, 博士研究生, 工程师, 主要从事隧道重大地质灾害危险性评价与控制方面的研究. ORCID: 0000-0002-9205-8634. E-mail: zhouhangcreec@163.com

* **通讯作者:** 赵晓彦(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事隧道重大地质灾害危险性评价与控制方面的研究. E-mail: xyzhao2@swjtu.edu.cn

引用格式: 周航, 赵晓彦, 蒋晖光, 陈明浩, 陈仕阔, 喻炳鑫, 2026. 挤压性隧道大变形危险性评价的未确知测度评价法研究. 地球科学, 51(4): 1325-1344.

Citation: Zhou Hang, Zhao Xiaoyan, Jiang Huiguang, Chen Minghao, Chen Shikuo, Yu Bingxin, 2026. Unascertained Measure Evaluation Method for Large Deformation Hazard Analysis of Squeezing Tunnel. *Earth Science*, 51(4): 1325-1344.

stress deep-buried tunnels, an evaluation system comprising seven core indicators was established, including the rock compressive strength, elastic modulus, maximum principal stress, surrounding strength-stress ratio, geological structure, surrounding rock grade, and groundwater. By employing a distance function to integrate the analytic hierarchy process (AHP) with entropy weighting method, it developed a combined subjective-objective weighting model that achieves scientifically validated weight allocation for risk assessment indicators of squeezing tunnel large deformations. Based on unascertained measure theory, this study establishes a risk assessment model for large deformations in squeezing tunnels. The model employs linear single-index measure functions to construct a measurement evaluation matrix, and utilizes confidence criterion for determining deformation risk levels. The model was applied to four representative soft-rock tunnels with large deformations: Yangjiaping Tunnel on the Chengdu-Lanzhou Railway, and Lingdana, Langzhen No. 2, and Jiangmula Tunnels on the Southeastern Tibet Railway. Comparative analysis with actual deformation data demonstrated strong agreement between model predictions and field measurements. These results validate the model's effectiveness and accuracy for risk assessment of large deformations in complex mountainous deep-buried tunnels, establishing a novel approach for such geotechnical evaluations.

Key words: large deformation tunnel; unascertained measure theory; risk assessment; combination weight model; credible degree recognition criteria; engineering geology.

挤压性隧道大变形是指高地应力围岩由于工程开挖或外界扰动导致其内部储存的应变能逐渐释放,临空面围岩发生柔性破坏并最终导致结构失稳的时效变形行为,是一种具有明显时间效应和累积性的塑性破坏(刘志春等,2008;张旭珍,2011;宋章等,2016;张广泽等,2021).隧道大变形灾害显著劣化施工条件,削弱安全裕度,并大幅抬升工期与造价.我国西部山区铁路、公路、水利工程等交通隧道工程呈现深埋化、特长化、大跨化趋势(李天斌等,2016;严孝海等,2022;董家兴等,2024;李海波等,2024;孟陆波等,2024;Zhang *et al.*, 2025),在强烈构造运动与软弱围岩力学特性耦合作用下,此类灾害尤为突出,常引发支护结构变形、开裂、甚至坍塌等渐进性失稳灾害.因此,如何更准确、有效地评估隧道围岩大变形风险,并识别关键影响因子具有重要的现实意义.

在隧道大变形机理研究中, Terzaghi *et al.* (1946)首次科学界定挤压性与膨胀性岩石:挤压性岩石指侵入隧道时体积无明显增加的岩体,其形成需满足高云母矿物或低黏土矿物含量条件;膨胀性岩石则指因吸水膨胀而侵入隧道开挖空间的岩体.该分类揭示了矿物成分对变形机制的控制作用,为后续机理研究奠定理论基础.受 Terzaghi 思想的影响,一般从宏观成因机制将大变形分为挤压性和膨胀性大变形,然而在实际隧道工程中,挤压性和膨胀性大变形往往很难分开.在结合工程实践及科学研究,大多数学者认为单纯的膨胀性大变形在隧道中很少见且危害性较小,挤压性大变形是隧道大变形的主要变形机制(李天斌等,2016).继奠基性工作后,围岩大变形成因机制研究历经多维度深化.陈宗基(1982)研究发现工程扰动前围岩处于应变能

蓄积平衡态,隧道开挖触发应力释放与回弹变形,其回弹幅度与地应力水平呈正相关. Anagnostou (1993)提出强度-应力控制论,指出岩石强度与地应力主导了挤压大变形发生.周航等(2022a)基于杨家坪隧道案例,阐明高地应力环境、千枚岩高倾薄层特性及水-岩相互作用构成大变形关键地质诱因.何满潮等(2022)则强调其为高地应力条件下围岩塑性变形的极端表现形式.谭忠盛等(2024)针对滇藏铁路丽香段哈巴雪山隧道大变形灾害,通过理论分析、室内试验等方法,认为岩石碎胀扩容、高地应力环境等是影响隧道围岩大变形的重要原因.众多国内外学者研究共识表明,高地应力是围岩大变形的共性基础,而岩体结构、矿物成分、地下水等要素通过不同机制触发能量释放或强度劣化,为隧道大变形风险量化评估及精准防控提供了完备的理论基础与技术路径.

在隧道大变形危险性等级评价方面,主要有围岩强度应力比(Wood, 1972)、隧道围岩相对变形量(Saari, 1982)、岩体质量分级(Singh *et al.*, 1992)等判据.此外, Hoek and Marinos(2000)进一步创新性构建地质强度指标体系,通过引入挤压因子修正项,结合相对变形量将大变形划分为5个等级,显著提升了地质适应性.王开洋等(2015)依托西南地区某公路隧道工程,通过耦合围岩强度应力比判据与FLAC3D三维数值模拟,实现变形等级与位置的协同预测,验证了多方法互验的可靠性.上述各种研究方法和判据均有其自身的特点和优势,但是由于地质条件复杂性、评价系统多源变量及施工扰动干扰,现行大变形危险性评价方法尚无法适配深部隧道勘察-设计-施工全周期管控要求.

针对单因素大变形判据的局限性,学术界和工

程界逐步发展多大变形指标耦合的智能评价体系。Feng and Jimenez(2015)基于二分类 Logistic 回归构建概率预测模型,量化隧道大变形风险;易震宇等(2012)提出灰色变权聚类模型,结合经验定权系数,在吉茶路隧道大变形风险评估中得到较好的验证;范建海等(2013)建立 AHP—模糊综合评判框架,综合考虑岩体强度、地应力等主要大变形影响因素,将隧道大变形的危险性等级分为5个等级;李天斌等(2016)首创综合集成方法体系,集成地质勘察、超前预报与施工监测等数据,在某隧道达成 $\leq 15\%$ 的大变形预测误差。周航等(2021)基于理想点法的计算规则及理论,构建了一种挤压性围岩大变形预测模型,采用欧氏距离函数进行大变形危险性评价的准确率达到90.9%。陈兴海等(2022)构建了基于熵权法、层次分析法和功效系数法的山岭隧道大变形危险评价模型,从地应力环境、围岩性质和岩性条件对隧道大变形进行综合评价。上述研究取得了进一步的研究成果,其关键问题是既有研究仍面临权重分配机制缺失、定量评价体系不完善、主观决策偏差及指标相关性未解等瓶颈,加之部分方法计算较复杂,制约工程推广。因此,如何精准评价并防治大变形已成为隧道勘察设计选线、安全施工最关键的难题之一。

未确知测度理论(王光远,1990)能集成多因素实现风险量化评价,已在车辆基地选址(王卫东等,2020)、崩塌(Dong *et al.*, 2008)及岩爆(周航等,2022b)等领域应用,但尚未拓展至隧道大变形评价。本研究创新性地将其重构为分类问题,建立隧道大变形风险测度模型,填补该理论在挤压性变形风险量化领域的应用空白。通过系统研究挤压性隧道大变形灾害特征,提炼关键影响因子,基于“变形量大—变形速率快—持续性久—破坏性强”的学术思路出发,通过整合多源参数建立大变形评估体系,确保指标有效性与系统性。提出熵权—层次分析耦合赋权模型,实现权重动态优化。基于未确知测度理论,建立线性测度函数并构建测度矩阵,采用置信度准则对4座软岩隧道进行风险分级验证,以证实评价模型的工程适用性和准确性。

1 大变形影响因素及评价指标体系

1.1 挤压性大变形影响因素

表1归纳分析了滇藏铁路中义隧道、青藏铁路

新关角隧道、成兰铁路杨家坪隧道等典型大变形隧道数据,揭示挤压性隧道大变形的共性规律:

(1) 千枚岩、页岩、泥岩等典型软弱围岩构成大变形主控岩组,岩石强度多小于15 MPa,其显著结构异性导致开挖卸荷后产生强时效变形。

(2) 隧址区普遍处于高到极高地应力环境,隧道掘进过程中往往因为开挖卸荷,导致构造应力逐渐释放,松动圈缓慢扩大,诱发隧道产生轻微—中等甚至强烈挤压大变形。

(3) 构造发育区大变形风险倍增。节理密集带、褶皱核部及断层带(尤以破碎带为甚)导致围岩完整性劣化,叠加地下水活动与风化作用,显著提升大变形发生概率及灾害强度。

(4) 高地应力场、软弱围岩和层状结构构成大变形主控三要素,初期多呈现高变形速率、大位移量和持续时间长,易引发衬砌混凝土剪切开裂、钢拱架屈曲失稳、边墙挤压侵入、局部坍塌等支护结构挤压性损伤。

1.2 挤压性变形评价指标体系

本文通过归纳统计分析65座大变形隧道及其等级相关的数据资料(李国良和朱永全,2008;刘志春等,2008;李春林等,2009;何磊等,2011;张旭珍,2011;田四明,2013;赵福善,2014;叶少敏,2014;戴永浩等,2015;李天斌等,2016;宋章等,2016;李贵民,2018;王永刚等,2020;张广泽等,2021;周航等,2021;陈兴海等,2022;郭小龙等,2022;李国良等,2022;刘伟等,2024),并结合高地应力隧道变形机制研究及前人研究成果(Terzaghi *et al.*, 1946;陈宗基,1982;Anagnostou, 1993;刘志春等,2008;张旭珍,2011;宋章等,2016;李天斌等,2016;张广泽等,2021;陈兴海等,2022;周航等,2024),揭示了挤压性隧道大变形受控于“岩性—地应力场—地质构造—地下水”的四维系统,因此聚焦于“强度参数—应力环境—构造与水环境”三核心,重点研究地质勘察阶段可量化大变形评价指标参数,暂先不考虑施工因素(洞室尺寸、开挖方式、支护时机及质量等)对大变形影响,选取七指标(岩石抗压强度 σ_c 、岩石弹性模量 E 、围岩洞壁最大主应力 σ_{max} 、围岩强度应力比 σ_b/σ_{max} 、地质构造 S 、围岩级别 K 、地下水 W)构建大变形评价指标体系。根据铁路隧道设计规范(TB10003-2016),建立变形量驱动的四级模型(无—轻微大—中等—强烈大变形)。

基于未确知测度模型要求,结合隧道大变形分

表 1 典型挤压性隧道大变形案例关键参数统计

Table 1 Statistical analysis of key parameters in typical squeezing tunnel large deformation cases

隧道名称	隧道长度 (m)	最大埋深 (m)	地层岩性	地质构造	围岩/岩石强度 (MPa)	最大主应力 (MPa)	最大水平收敛 (mm)	最大拱顶沉降 (mm)	大变形破坏特征	参考文献
青藏铁路新关角隧道	32 645	1 100	泥质片岩、灰岩等	隧址区断裂构造发育, 穿越 11 条大断裂层	5	25.3	460	505	隧道底部隆起和两侧边墙挤出, 且变形持续时间长	张旭珍 (2011)
滇藏铁路云南段中义隧道	14 745	1 240	凝灰岩、玄武岩	隧址区位于青藏高原东南缘之川滇断块的西部边界断裂带	片理化玄武岩: 0.573	25.1	868	100	轻微—中等—强烈大变形, 初期支护严重损坏, 多个地段需换拱	李贵民 (2018)
成兰铁路茂县隧道	9 913	1 650	千枚岩等	穿越龙门山后山活动断裂带核心部位	3.4	44.7	950.5	462.4	轻微—中等—强烈大变形	郭小龙等 (2022)
成兰铁路杨家坪隧道	10 010	1 656	千枚岩等	位于龙门山后山断裂带, 区域性大断裂、活动断裂发育, 地震活动较为频繁	1.95	27.5	810	510	轻微—中等大变形, 变形增长持续时间长, 时间效应显著, 岩层陡倾导致隧道水平收敛大于拱顶沉降	周航等 (2022a)
藏东南铁路朗镇二号隧道	2 640	305	千枚岩、板岩、砂岩、砾岩等	隧址区左侧穿越雅鲁藏布江断裂带 (F1-5-3) 和堆巴断层, 节理和褶皱发育	千枚岩: 3.3~3.9	10.6	—	—	轻微大变形, 拱部、拱腰和掌子面等易坍塌、掉块, 围岩稳定性很差	张广泽等 (2021)
藏东南铁路江木拉隧道	8 697	1 493	千枚岩夹板岩、石英砂岩等	受区域雅鲁藏布江断裂带 (F1-5-3) 等地质构造影响极严重, 节理发育	岩石原地抗拉强度: 9.2~11.4	33.6	—	—	轻微—中等大变形, 混凝土开裂掉块、初期支护变形侵限等	张广泽等 (2021)
藏东南铁路令达拿隧道	2 510	322	炭质千枚岩、砂岩等	受区域雅鲁藏布江断裂带 (F1-5-3) 影响严重, 节理发育	千枚岩: 3.3~3.9	10.2	—	—	轻微—中等—强烈大变形, 围岩与支护结构破坏特征明显	张广泽等 (2021)
兰新铁路乌鞘岭隧道	20 050	1 100	千枚岩夹板岩、砂岩、泥岩等	穿越 4 条大断层构成的“挤压构造带”, 沿线褶皱、断裂带发育	0.75~2.0	33.0	1 034	1 053	受挤压性断层影响, 围岩稳定性差, 变形量大, 初期变形量快	李国良和朱永全 (2008)
兰新铁路大梁隧道	6 550	780	板岩、砂岩、灰岩	板理发育, 多呈薄层状, 且褶曲发育, 穿越 100 m 断层带	岩石强度: 14~20	25.1	552	632	轻微—中等大变形, 底板隆起、初支开裂, 辅助正洞出口方向开裂	戴永浩等 (2015)
兰渝铁路木寨岭隧道	19 060	600	板岩、泥岩、断层压碎岩	节理裂隙及揉皱等地质构造现象发育	5.92	27.2	1 081	1 712	轻微—中等—强烈大变形, 初期支护喷射混凝土开裂严重, 拱部钢架部分折断, 钢架连接板处张开	王永刚等 (2020)

续表 1

隧道名称	隧道长度 (m)	最大埋深 (m)	地层岩性	地质构造	围岩/岩石强度 (MPa)	最大主应力 (MPa)	最大水平收敛 (mm)	最大拱顶沉降 (mm)	大变形破坏特征	参考文献
兰渝铁路两水隧道	4 922	346	炭质千枚岩、千枚岩等	隧址区穿越武都断裂带、白龙江复背斜等	2.9	6.5~11.3	543	762	拱顶严重下沉, 边墙内挤严重, 喷混凝土长段落的开裂、压碎、剥落, 钢拱架严重扭曲变形	赵福善 (2014)
兰渝铁路毛羽山隧道	8 503	700	板岩、板岩夹灰岩、局部夹炭质板岩	受构造作用影响, 褶皱断裂和地质构造发育	泥质板岩强度: 5.6~17.7	21.3	1 200	540	围岩变形量大, 变形速率快, 变形持续时间长, 围岩变形在空间分布不均匀、不对称, 具有显著的流变效应	何磊等 (2011)
兰渝铁路新城子隧道	9 164	769	薄层状炭质板岩、千枚岩等	隧址区靠近断裂带, 构造发育, 地震活动强烈	15.0	33.8	900	356	围岩变形量大, 变形持续时间长, 导致二衬受到强烈挤压产生不同程度的开裂、剥落	李国良等 (2022)
云桂铁路对门山隧道	9 578	680	泥岩、砂质泥岩、钙质粉砂岩	以新裂构造为主, 褶曲构造较为发育	钙质粉砂岩强度: 19.6	13.8	533	427	喷射的混凝土出现龟裂及斜裂缝等现象, 支护呈现向明显的膨胀变形, 同时隧底有隆起迹象	张广泽等 (2021)
宜万铁路堡镇隧道	11 600	630	炭质页岩	穿越仙女山断层	2.9	16.0	1 250	640	隧道变形量大、变形发展快、持续时间长, 且时空效应明显	田四明 (2013)
北同蒲铁路雁门关隧道	14 085	820	斜长片麻岩、花岗片麻岩	隧址区位于吕梁—太行断块至宁武—静乐块拗的北东部边缘	4.1	16.0	—	731	初期支护开裂、脱落, 钢架扭曲变形等	叶少敏 (2014)
奥地利阿尔贝格公路隧道	13 980	740	千枚岩、片麻岩、绿泥石片岩等	—	1.2~1.9	实测地应力: 13.0	700	600	隧道围岩变形量大, 变形速率快, 变形持续时间长	李天斌等 (2016); 周航等 (2021)
奥地利陶恩隧道	6 400	1 000	千枚岩、片麻岩、绿泥石片岩	—	1.7	27.0	500	1 200	隧道围岩变形量大, 变形速率快, 变形持续时间长	李天斌等 (2016); 周航等 (2021)
都汶公路龙溪隧道	3 691	840	泥岩、砂岩、花岗闪长岩等	隧址区穿越龙门山构造带中段	岩石强度: 9.5~26.0	25.0~27.0	432	1 471	轻微—中等大变形, 喷射混凝土开裂、剥落, 钢拱架扭曲变形, 局部出现鼓出、塌方等强烈大变形现象	李春林等 (2009)

级标准(刘志春等, 2008;李天斌等, 2016;周航等, 2021;陈兴海等, 2022),将地质构造、围岩级别、地

下水的定性指标转化为可量化的数值区间,地质构造按照无构造(<4),断层影响带、节理密集带、褶

表 2 各指标与大变形等级的映射关系

Table 2 Mapping relationship between indicators and large deformation grades

大变形级别	最大主应力 σ_{\max} (MPa)	岩石抗压强度 σ_c (MPa)	围强度应力比 σ_b/σ_{\max}	弹性模量 E (GPa)	围岩级别 K	地质构造 S	地下水 W
无大变形	<20	>30	>0.50	>2.0	<4	<4	<2
轻微大变形(I级)	20~30	15~30	0.25~0.50	1.5~2.0	4~5	4~5	2~3
中等大变形(II级)	30~45	5~15	0.15~0.25	1.0~1.5	5~6	5~6	3~6
强烈大变形(III级)	>45	<5	<0.15	<1.0	>6	>6	>6

皱核部(4~5),断层破碎带(5~6),断层(>6)分级;围岩级别按照 I~III 级(<4),IV 级(4~5),V 级(5~6),VI 级(>6)分级;地下水按照干燥(<2),干燥至渗水(2~3),渗水至滴水(3~6),滴水至线状流水(>6)分级.根据铁路隧道设计规范(TB10003-2016)建立四级风险等级,即无变形,I 级(轻微),II 级(中等),III 级(强烈),各指标与大变形等级的映射关系详见表 2.

2 挤压性大变形危险性评价模型

本文基于挤压性隧道大变形案例,揭示了其破坏特征及受控于“应力环境—强度参数—构造与水岩作用”的基本规律,研究构建了一套适用于勘察选线阶段的大变形灾害评价指标体系及分级标准.在实际工程应用中,依托勘察资料,结合地质分析、岩体力学分析、地应力测试、数值模拟与工程类比等方法,获取各隧道里程段的评价指标数据.通过层次分析法与熵权法分别确定主、客观权重,并引入距离函数进行组合赋权,从而综合确定各指标权重.在此基础上,基于未确知测度理论构建直线型单指标测度函数,形成单指标测度评价矩阵与多指标测度向量,并依据置信度准则进行危险性等级判定,最终建立隧道大变形危险性评价的未确知测度模型.利用该模型,输入待评隧道各段指标数据,即可实现对大变形灾害的危险性评价.

2.1 未确知测度理论

未确知测度理论是处理一类不同于灰色、随机与模糊信息的不确定性信息的数学方法,其测度函数需满足非负、归一和可加的公理化要求,常见形式包括直线型、指数型与二次函数型等(王光远, 1990; Dong *et al.*, 2008; 王卫东等, 2020).本文采用计算简便、应用广泛的直线型测度函数,通过计算各指标的单指标测度评价矩阵与多指标测度向量,并依据置信度识别准则,实现对大变形危险性的综合评价.设大变形样本集 $L = \{L_1, L_2, L_3, \dots, L_n\}$,

各样本 L_j 对应指标向量 $V_j = \{V_{1j}, V_{2j}, V_{3j}, \dots, V_{nj}\}$,其中 V_{ij} 为第 j 样本第 i 指标实测值.设各指标 V_{ij} 对应 k 个大变形风险等级,构成评价空间 $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_k\}$,满足严格全序关系.

2.1.1 单指标测度 未确知测度理论根据单指标测度函数 d 计算样本 L_j 的测量值 o_{ij} 的测度值 $u_{ijp} = u(o_{ij} \in C_k)$,其中 u_{ijp} 表示测度值 o_{ij} 属于第 p (1, 2, 3, ..., k) 等级的隶属度.若 u 满足 $0 \leq u(V_{ij} \in C_p) \leq 1$,且同时满足归一性和可加性准则,则构成未确知测度空间,称 u 为未确知测度,简称测度(王光远, 1990).单指标测度评价矩阵的核心作用是建立一个“翻译”规则,将一个具体指标的实测值,转化为该指标隶属于各个危险等级的可信度.

对于某一样本 L_j ,各指标测度值 u_{ijp} 构成的矩阵称之为单指标测度评价矩阵:

$$(u_{ijp})_{l^*s} = \begin{bmatrix} u_{1j1} & u_{1j2} & \cdots & u_{1js} \\ u_{2j1} & u_{2j2} & \cdots & u_{2js} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{nj1} & u_{nj2} & \cdots & u_{njs} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

2.1.2 多指标综合测度 多指标测度向量的计算是指在得到每个指标的可信度(单指标测度评价矩阵)和指标的组合同权重后,计算出样本(隧道段落)综合考虑所有指标后,其整体危险性隶属于各等级的可信度分布,即多指标测度向量,完成从“分项评价”到“综合评价”的飞跃.在本文评价模型中, $u_{ijk} = u(o_{ij} \in C_p)$ 表示样本 L_j 属于第 p (1, 2, 3, ..., k) 等级的程度,则

$$u_{ijk} = \sum_{i=1}^7 u_{ijp} \omega (j = 1, 2, 3, \dots, n; p = 1, 2, 3, \dots, k). \quad (2)$$

式中: ω 为组合权重系数.则多指标综合测度评价矩阵为:

$$(u_{ijp})_{l^*s} = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1s} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2s} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{ns} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

2.1.3 置信度识别准则分析 置信度识别准则是一个决策规则.当得到1个样本的综合可信度分布向量后,需要据此做出“它到底是几级”的判定.置信度准则(如取 $\lambda=0.6$)就是从最可能的一级开始累加可信度,直至超过阈值 λ ,从而确定最终危险性等级,解决了如何从连续的“可信度”得出离散的“等级”结论的问题.本文基于有序评价空间 $C_k > C_{k-1} > \dots > C_2 > C_1$,设置信阈值 $\lambda \geq 0.5$ (常规取 $0.6 \sim 0.7$),则风险等级判定为(Dong *et al.*, 2008; 史秀志等, 2010):

$$p_j = \min \left\{ p: \sum_{i=1}^p u_i \geq \lambda, p = 1, 2, 3, \dots, k \right\}, \quad (4)$$

当 p 值直至满足公式(4),认为样本 L_j 属于第 p_j 个评价等级.

2.2 组合赋权法

2.2.1 熵权法(EWM) 基于指标变异度计算客观权重(Zhou *et al.*, 2021).本模型区分两类指标:效益型指标(越大越优)和成本型指标(越小越优).为消除量纲影响,采用极差归一化:

效益型指标(越大越优):

$$q_i = \frac{r_i - \min_i(r_i)}{\max_i(r_i) - \min_i(r_i)}. \quad (5)$$

成本型指标(越小越优):

$$q_i = \frac{\max_i(r_i) - r_i}{\max_i(r_i) - \min_i(r_i)}, \quad (6)$$

公式(5)和公式(6)中: r_i 为第 i 个指标的标准化值; $\max_i(r_i)$ 和 $\min_i(r_i)$ 分别为表2中第 i 个指标中的最大值和最小值.

结合表2、公式(5)和公式(6),岩石抗压强度 σ_c 、岩石弹性模量 E 为越大效益型指标,围岩洞壁最大主应力 σ_{\max} 、围岩强度应力比 σ_b/σ_{\max} 、围岩级别 K 、地质构造 S 、地下水 W 为成本型指标.

第 i 个指标的信息熵 u_i 可按照公式(7)计算:

$$u_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n (q_i / \sum_{j=1}^n q_i) \ln (q_i / \sum_{j=1}^n q_i), \quad (7)$$

式中: n 为大变形危险性评价的样本数, j 为 n 个大变形待评价样本中第 j 个大变形样本.

根据熵大权小的原则确定岩爆评价指标的客观权重,则7项大变形评价客观指标的权重系数 w_i 为:

$$w_i = (1 - u_i) / \sum_{i=1}^7 (1 - u_i). \quad (8)$$

确定各指标客观权重系数 w_i 需遵循归一化约

束条件,具体如公式(9)所示:

$$\sum_{i=1}^7 w_i = 1. \quad (9)$$

2.2.2 层次分析法(AHP) 采用1-9标度法(Saaty, 1979)构建大变形判断矩阵,通过特征向量法求解各评价指标的主客观权重系数,并采用一致性指标 $CR < 0.1$ 的标准验证判断逻辑的合理性.一致性指标 CI 公式如下:

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1), \quad (10)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根; n 为判断矩阵的阶数.

权重系数的有效性判定以 $CR < 0.1$ 为基准,不满足该条件时应迭代修正判断矩阵.随机一致性比例 CR 的数学表达式为:

$$CR = CI / RI, \quad (11)$$

式中: RI 为一致性指标, RI 取值根据查表确定.

2.2.3 组合赋权法 基于距离函数计算规则(张晨等, 2011),集成熵权法(客观权重)和层次分析法(主观权重).确保既能反映大变形数据的统计规律,继承熵权特性;又能融合研究人员或工程技术人员对隧道地质条件的经验认知,保留层次分析法的优势.熵权法和层次分析法之间的距离函数 R 如下:

$$R(w_i, w_j) = \left[\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^7 (w_i - w_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

假设大变形评价指标的组合权重为 w ,熵权法和层次分析法的权重分配系数分别为 a 和 b ,则 w 为:

$$w = \alpha w_i + \beta w_j. \quad (13)$$

为确保熵权法与层次分析法的权重差异协调,引入距离一致性约束和和归一化条件(张晨等, 2011):

$$\begin{cases} R(w_i, w_j) = (a - b)^2 \\ a + b = 1 \end{cases}. \quad (14)$$

2.3 研究思路及计算流程

本文围绕深埋隧道工程面临的高地应力致灾问题,重点研究围岩大变形的破坏形态、发展过程及其控制要素,基于组合赋权-未确知测度理论,构建挤压性隧道大变形危险性评价体系(图1).

(1)基于大变形案例统计分析,揭示软岩隧道大变形“应力环境-强度参数-构造与水岩作用”三要素控制机制,选择7项关键影响因子构建大变形评价指标体系.

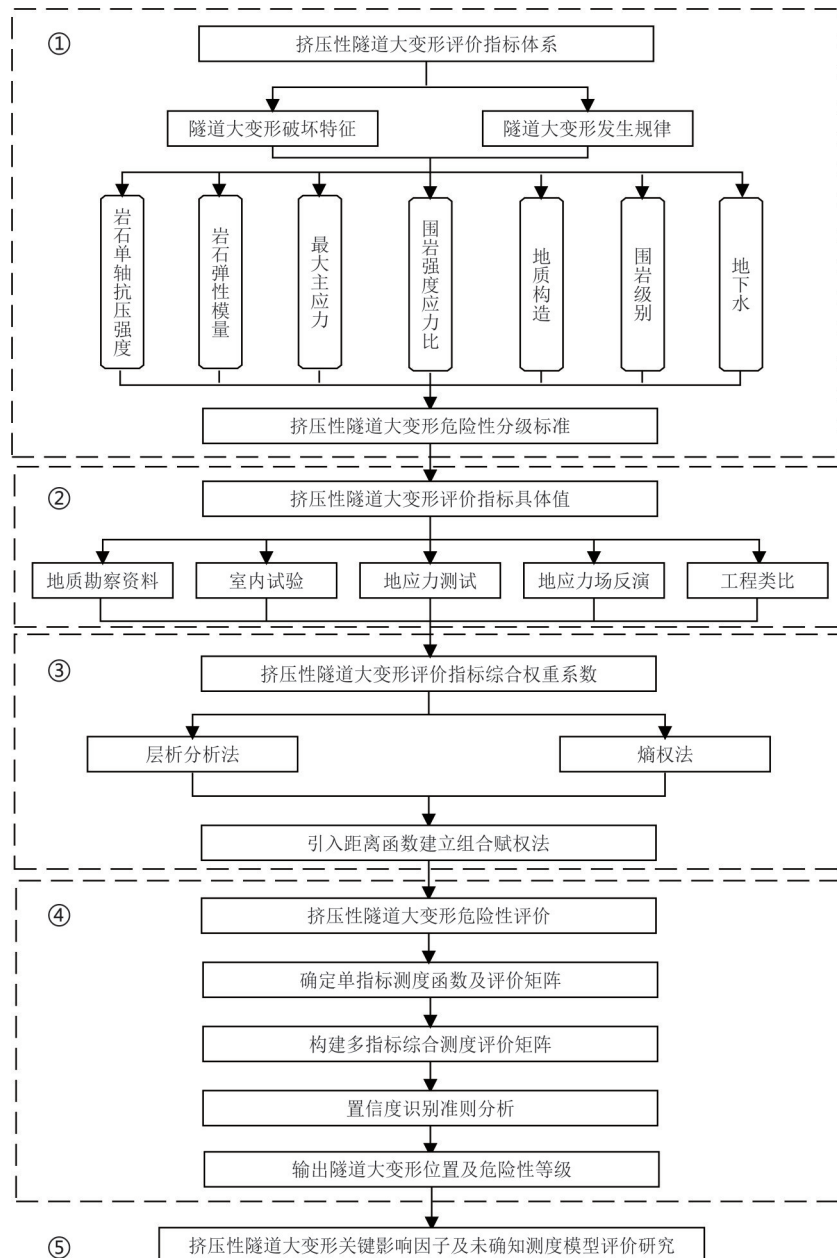


图 1 挤压性隧道大变形危险性评价的技术路线

Fig.1 Technical approach for risk assessment of squeezing tunnel large deformations

(2)综合地质分析、力学测试、数值反演分析、工程类比等多方法,综合确定大变形评价指标具体值。

(3)基于熵权法通过极差归一化处理得到客观权重,融合层次分析法确定的主客观权重,通过距离函数耦合主客观权重,最终生成综合权重系数。

(4)基于未确知测度理论构建大变形评价模型,建立直线型单指标测度函数,计算测度评价矩阵及综合测度向量,采用置信度准则进行风险分级,实现地质参数到测度值再到风险等级的量化

评价。

(5)输入各里程段指标数据至未确知测度模型,基于置信度阈值 λ 与综合测度值 μ ,根据置信度准则和综合未确知测度的大小来判别工程样本所处危险性等级,自动输出大变形风险等级。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

成兰铁路从成都平原(海拔 500~700 m)向青藏高原东缘(海拔 3 000~5 600 m)延伸,沿线穿越

高山峡谷和强烈构造复合带,经茂县、松潘至九寨沟县后接入兰渝铁路哈达铺站,最终抵达兰州.该铁路全长 457 km,其中隧道总长 332 km,占比 72.5%.作为全线控制性工程,杨家坪隧道位于羊记沟大桥与茂县车站之间.该隧道穿越区域地质条件复杂,具有典型的高地应力软岩大变形特征,是研究挤压性隧道大变形的理想工程案例.

杨家坪隧道纵断面如图 2 所示,隧道穿越龙门山断裂带复合构造区(主中央断裂与后山断裂间),全长 12 815 m,最大埋深约 745 m,地面高程 1 275~2 237 m,地形高差达 962 m.隧道岩性以千枚岩、绿泥千枚岩等为主,其受构造影响显著,前段 10 km 与千佛山逆冲断裂平行,发育密集褶曲带,岩体揉皱明显,岩体较破碎—破碎.在隧道施工过程中,遭遇典型挤压大变形(图 3),初期支护变形速率峰值 35 mm/d,累计收敛变形 >600 mm,钢架扭曲变形角最大 23°,引发混凝土剥落(厚度损失 >50%)及局

部坍塌(单次最大方量 1 200 m³).

3.2 工程区岩石试验研究及膨胀性评价

选取成兰铁路杨家坪隧道岩样,根据《工程岩体试验方法标准》(GB/T50266-2013),制作为高径比 2:1 的标准圆柱体绿泥石千枚岩和炭质千枚岩试件,分为两组开展岩石试验.针对绿泥石千枚岩和炭质千枚岩试件,第 1 组岩样采用 RSM-SY6 声波仪测定纵波波速后,通过 RMT-150C 电液伺服试验机进行单轴抗压强度测试,获得的基本力学参数如表 3 所示.第 2 组岩样开展膨胀性测试试验,绿泥石千枚岩与炭质千枚岩的自由膨胀率测试值分别为 8.5% 和 7.6%,依据膨胀岩分级标准(何满潮等, 1999),均低于弱膨胀岩阈值(10%),故判定该隧道千枚岩属非膨胀性岩类.

3.3 地应力测试及初始地应力场反演分析

通过水压致裂法地应力测试在杨家坪隧道 1 号横洞工区 YD2K112+020 附近布置 CLTL-YJP-

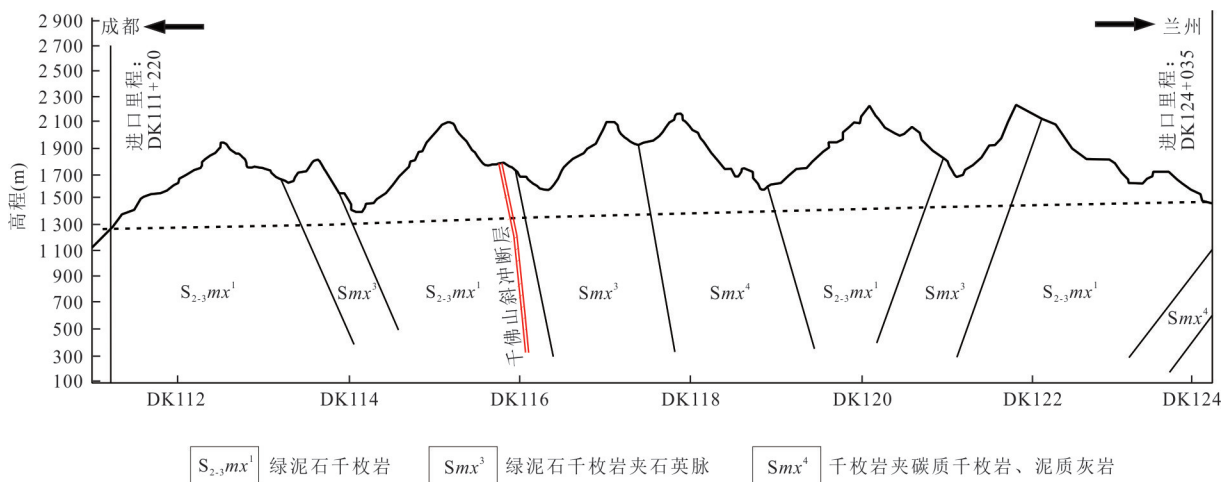


图 2 杨家坪隧道纵断面

Fig.2 Geological profile of Yangjiaping tunnel



a 混凝土开裂 b 边墙挤压变形 c 钢架扭曲 d 隧道内坍塌

图 3 杨家坪隧道施工期大变形灾变特征分析

Fig. 3 Analysis of large deformation catastrophe characteristics during Yangjiaping tunnel excavation

01#钻孔,地应力测试结果如表 4 所示.在测试深度范围内,最大水平主应力方向 $N32^{\circ}\sim 61^{\circ}E$,与杨家坪隧道轴线呈 $9^{\circ}\sim 38^{\circ}$ 夹角相交.在 CLTL-YJP-01# 钻孔埋深 349.8 m 处,实测最大水平主应力值达到 23.37 MPa,应力状态为 $S_H>S_h>S_v$,且侧压力系数为 1.71~2.48,符合隧址区的构造应力场特征.该结果印证了龙门山断裂带区域以水平构造应力为主导的力学环境.

基于杨家坪隧道纵断面及地质资料,采用 Zhou *et al.* (2021) 提出的建模方法构建地质力学模型并进行网格划分.岩体与断层力学参数通过室内试验和工程类比法综合确定(表 5).

通过边界荷载反演分析,确定杨家坪隧道轴线三向主应力云图(图 4).基于杨家坪隧道轴线(起点 DK111+220,采样间距 250 m)的埋深与三向主应

力数据集(图 5),隧道三向主应力分量(S_H, S_h, S_v)均表现出随埋深增加的正相关性,其主要源于上覆岩体自重与构造挤压的耦合作用,最大水平主应力 S_H 、最小水平主应力 S_h 和竖向主应力 S_v 的量值范围分别为 8.9~32.6 MPa、5.3~19.1 MPa、6.3~21.6 MPa.隧址区侧压力系数为 1.41~1.51,证实水平构造应力占据主导地位.该结果与现场水压致裂测试结果相互验证,进一步印证了龙门山断裂带存在水平构造应力主导型应力场.

基于杨家坪隧道 1 号横洞工区 YD2K112+020 钻孔实测数据与三维反演结果(图 6),最大水平主应力 S_H 、最小水平主应力 S_h 和垂直主应力 S_v 的钻孔实测值和模拟值均随埋深增加呈线性增长,符合 $S_H>S_h>S_v$,三向主应力的平均相对误差分别为 6.63%、10.21% 和 6.59%.

表 3 杨家坪隧道岩石力学基本参数

Table 3 Basic parameters of rock mechanics of Yangjiaping tunnel

岩性	密度 ρ (g/cm ³)	纵波速度 v_p (m/s)	饱和单轴抗压强度 σ_c (MPa)	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν
绿泥石千枚岩	2.71	3 781	12.25	2.01	0.28
	2.74	4 021	16.32	1.30	0.25
	2.77	3 802	20.61	2.19	0.22
平均值	2.74	3 868	16.39	1.83	0.25
炭质千枚岩	2.72	3 869	13.22	1.82	0.25
	2.74	4 117	21.37	2.05	0.21
	2.73	4 225	33.62	1.59	0.26
平均值	2.73	4 070	22.73	1.82	0.24

表 4 杨家坪隧道 CLTL-YJP-01# 钻孔地应力测试结果

Table 4 In-situ stress measurement results of borehole CLTL-YJP-01# in Yangjiaping tunnel

埋深(m)	最大水平主应力 S_H (MPa)	垂直主应力 S_v (MPa)	最小水平主应力 S_h (MPa)	最大水平主应力方向
340.6	15.73	9.20	8.52	
343.6	17.22	9.28	9.57	NE32°
345.3	20.42	9.32	11.10	
347.4	21.31	9.38	11.42	NE44°
349.8	23.37	9.44	11.99	NE61°
350.6	22.35	9.47	11.53	NE55°

表 5 杨家坪隧道岩体与断层力学参数

Table 5 Mechanical parameters of rock mass and faults in Yangjiaping tunnel

岩体类型	弹性模量 E (GPa)	泊松比 ν	密度 ρ (kg/m ³)
绿泥石千枚岩	1.83	0.24	2 770
千佛山斜冲断层	1.10	0.31	2 300
绿泥石千枚岩夹石英脉	2.25	0.23	2 750
千枚岩夹灰质千枚岩、泥质灰岩	2.53	0.22	2 750

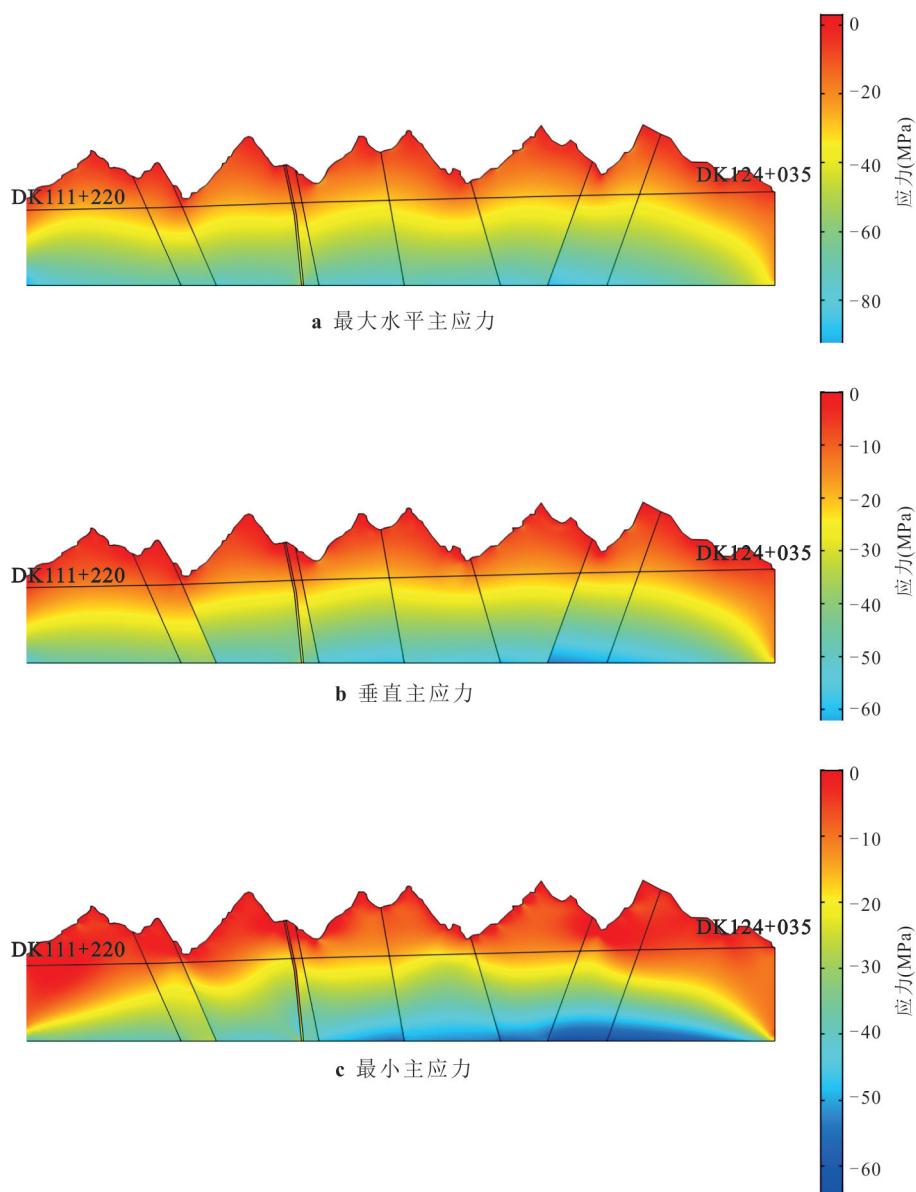


图 4 杨家坪隧道轴线三向主应力云图

Fig. 4 Three-dimensional principal stress contour map along the Yangjiaping tunnel

3.4 确定各评价指标值

综合采用地质勘察、现场测试、室内试验、地应力反演及工程类比,获取全隧道各里程段 7 项评价指标数据.受篇幅限制,表 6 精选杨家坪隧道 11 个典型区段展示大变形参数.

3.5 计算评价指标权重

基于 1.1.2 节研究成果,从“应力环境—强度参数—构造与水岩作用”三大主控机制出发,综合考虑影响隧道大变形的“岩性条件—应力条件—围岩

性质”,建立多准则评估框架(图 7),采用组合赋权法耦合熵权法(权重 0.384)与 AHP 法(权重 0.616),通过距离函数优化权重分配.表 7 显示围岩级别 K (0.219)、地下水 W (0.192) 占据主导因素,围岩强度应力比 σ_b/σ_{max} (0.154) 和围岩洞壁最大主应力 σ_{max} (0.151) 占据次要因素,岩石抗压强度 σ_c (0.106)、岩石弹性模量 E (0.123) 和地质构造 S (0.055) 占据弱相关因素.其中,各评价指标权重的确定依赖于大变形样本的统计特征,权重误差与样本量呈负相关.

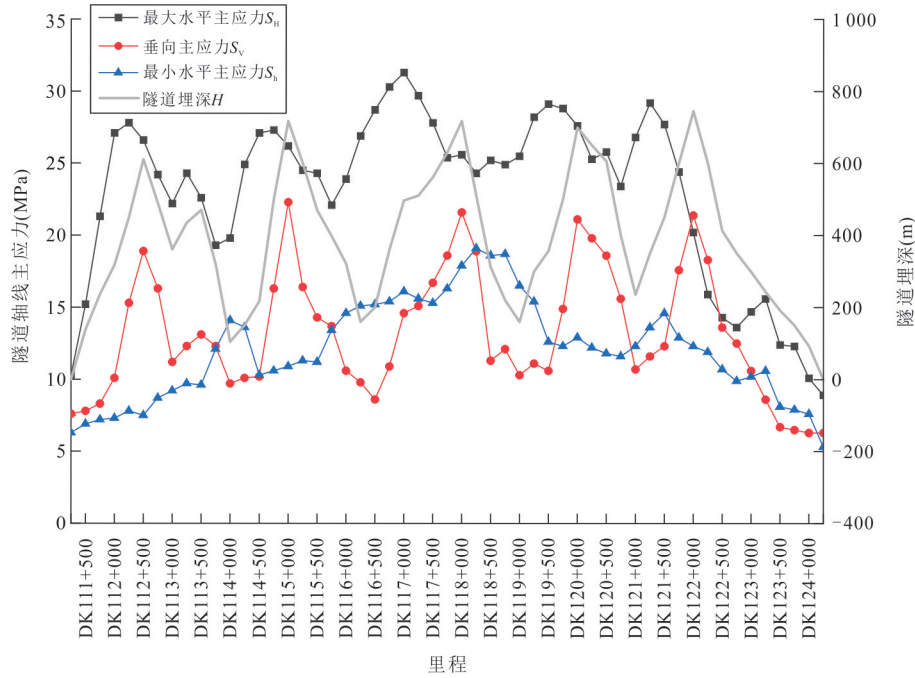


图5 杨家坪隧道轴向地应力场特征

Fig. 5 Characteristics of axial in-situ stress field in Yangjiaping tunnel

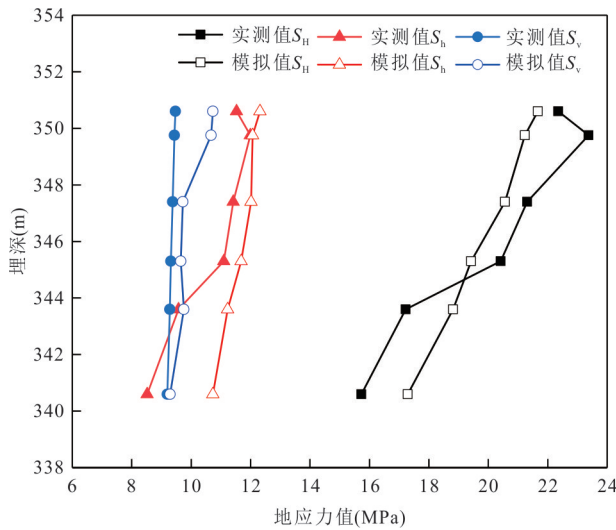


图6 杨家坪隧道实测与模拟应力对比

Fig.6 Comparison between the measured and simulated results of Yangjiaping tunnel

3.6 隧道大变形危险性评价

3.6.1 构建单指标测度函数 基于挤压性隧道大变形评价空间 $C = \{C_1(\text{无}), C_2(\text{轻微}), C_3(\text{中等}), C_4(\text{强烈})\}$, 构建直线型单指标测度函数(图8).

基于表2和表6, 计算可得杨家坪隧道典型区段的单指标测度矩阵. 针对DK111+770~DK112+282区段, 输入7项大变形评价指标实测值(表6),

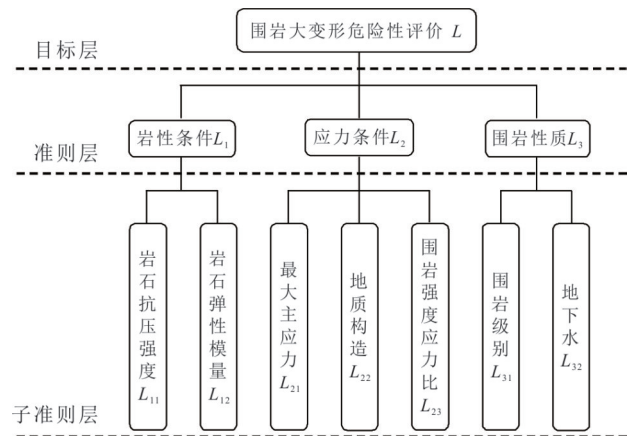


图7 隧道大变形多准则评估框架

Fig. 7 Multicriteria assessment system for large deformation of tunnel

通过图9直线型单指标测度函数映射, 输出4级隶属度, 计算可得单指标测度矩阵为:

$$(u_{ijp})_{7 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.897 & 0.103 \\ 0.040 & 0.960 & 0 & 0 \\ 0 & 0.511 & 0.488 & 0 \\ 0.320 & 0.680 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.500 & 0.500 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.6.2 计算多指标综合未知测度评价向量 基于表6和公式(15), 以DK111+770~DK112+

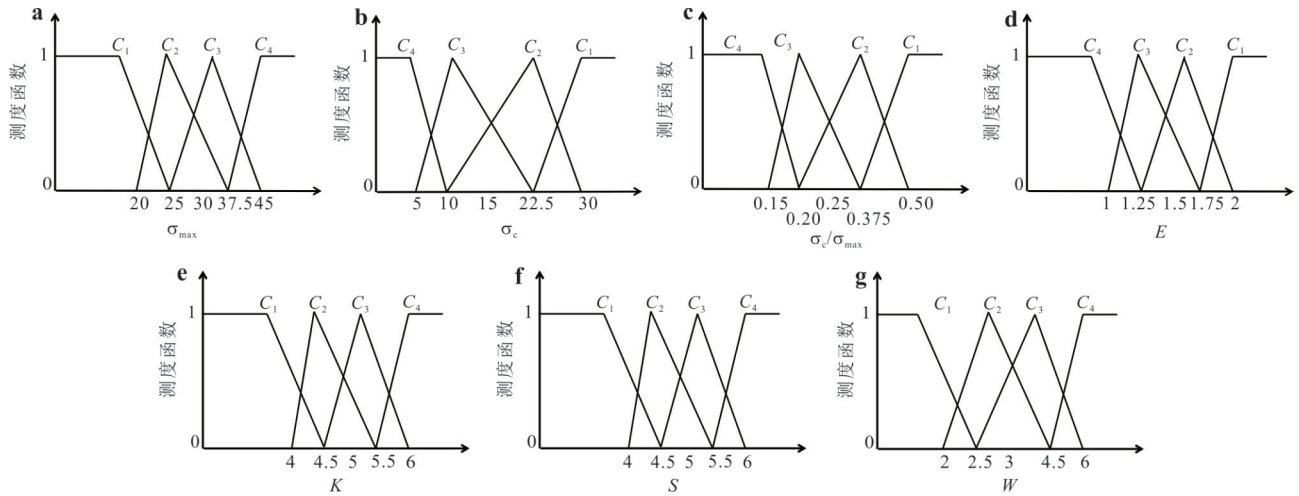


图 8 直线型单指标测度函数

Fig.8 Linear single-index measure function

表 6 杨家坪隧道典型区段各评价指标取值

Table 6 Values of evaluation indices for typical sections in Yangjiaping tunnel

样本序号	隧道里程	岩性	围岩级别	评价指标						
				σ_{max}	σ_c	σ_b/σ_{max}	E	K	S	W
1	DK111+770~DK112+282	绿泥石千枚岩	IV	24.80	16.39	0.22	1.83	4.5	5.0	2.5
2	DK113+150~DK113+360	绿泥石千枚岩	IV	14.85	16.39	0.36	1.83	4.5	5.5	5.5
3	DK113+360~DK113+690	绿泥石千枚岩	IV	19.84	16.39	0.27	1.83	4.5	5.5	5.5
4	DK115+092~DK115+302	绿泥石千枚岩	IV	29.82	16.39	0.30	1.83	4.5	3.5	1.5
5	DK115+450~DK115+650	绿泥石千枚岩	V	19.65	16.39	0.28	1.83	5.5	5.5	5.5
6	DK116+356~DK116+506	绿泥石千枚岩夹石英脉	IV	14.40	20.35	0.47	2.25	4.5	5.0	5.5
7	DK116+506~DK116+783	绿泥石千枚岩夹石英脉	IV	20.16	20.35	0.33	2.25	4.5	5.0	1.5
8	DK116+783~DK117+250	千枚岩	IV	28.40	15.53	0.18	1.31	4.5	5.5	4.5
9	DK117+346~DK117+401	绿泥石千枚岩夹石英脉	V	26.12	15.92	0.33	2.01	5.5	4.5	4.5
10	DK119+910~DK119+970	绿泥石千枚岩夹石英脉	IV	26.37	18.35	0.23	2.25	4.5	5.0	2.5
11	DK123+060~DK123+600	绢云千枚岩夹灰岩、砂岩	IV	16.45	21.78	0.44	2.53	4.5	5.0	2.5

表 7 挤压性隧道大变形各评价指标权重

Table 7 Weight distribution of evaluation indicators for squeezing tunnel large deformations

评价指标	σ_{max}	σ_c	σ_b/σ_{max}	E	K	S	W
主观权重 w_j (AHP)	0.052	0.164	0.157	0.164	0.274	0.052	0.137
客观权重 w_j (EW)	0.309	0.013	0.149	0.057	0.131	0.059	0.282
组合赋权权重 w	0.151	0.106	0.154	0.123	0.219	0.055	0.192

282 段为例,计算可得测度向量为: {0.045, 0.721, 0.217, 0.016}。根据置信度识别原则(王光远, 1990),置信度 λ 取 0.6, 对大变形样本进行危险性评价, $C_1 + C_2 = 0.045 + 0.721 = 0.766 > \lambda = 0.6$, 可得 $p_j = 2$, 故该样本为 C_2 级(轻微大变形), 与现场观测一致。同理, 计算可得其余 10 组样本计算结果, 如表 8 所示。

基于杨家坪隧道 11 组大变形样本的未确知测

度评价结果(表 8), 模型准确率达 90.9%, 仅第 8 组大变形样本误判为 C_3 级(中等大变形, 实际为轻微大变形), 该模型在实际工程中应用效果良好, 操作简便, 为山区深埋隧道大变形风险评估提供了创新性解决方案。第 8 组大变形样本评价与实际等级有一定出入, 可能源于勘察期间岩石参数偏高, 导致评价结果偏危险。因此, 隧道施工中须结合地质实况及时取样测试围岩力学参数。当条件受限时, 采

表 8 杨家坪隧道典型区段大变形危险性评价结果

Table 8 Risk assessment of large deformations in typical sections of Yangjiaping tunnel

序号	隧道里程	综合未确知测度				评价结果	实际大变形等级
		C_1	C_2	C_3	C_4		
1	DK111+770~DK112+282	0.045	0.721	0.217	0.016	轻微	轻微
2	DK113+150~DK113+360	0.190	0.501	0.180	0.128	轻微	轻微
3	DK113+360~DK113+690	0.190	0.418	0.263	0.128	轻微	轻微
4	DK115+092~DK115+302	0.286	0.535	0.179	0.000	轻微	轻微
5	DK115+450~DK115+650	0.190	0.204	0.478	0.128	中等	中等
6	DK116+356~DK116+506	0.386	0.376	0.110	0.128	轻微	轻微
7	DK116+506~DK116+783	0.461	0.456	0.083	0.000	轻微	轻微
8	DK116+783~DK117+250	0.000	0.334	0.606	0.060	中等	轻微
9	DK117+346~DK117+401	0.123	0.353	0.524	0.000	中等	中等
10	DK119+910~DK119+970	0.123	0.670	0.207	0.000	轻微	轻微
11	DK123+060~DK123+600	0.350	0.616	0.034	0.000	轻微	轻微

用点荷载试验快速测定岩石强度,同步系统记录开挖过程岩体变形破坏特征(如收敛速率、剥落厚度),据此动态修正地应力场参数,结合最新地质数据、围岩力学特性及地应力环境,可优化隧道大变形风险位置的预测,并动态调整大变形危险性等级。这一方法有助于更准确地预判后续开挖段的大变形风险,为施工安全提供科学依据。

3.7 大变形的工程支护对策原则

基于未确知测度评价模型的大变形危险性评价结果,结合成兰铁路杨家坪等挤压性大变形隧道工程实践,主要围绕重视超前、严防掉块溜塌,及时喷砼、封闭支撑围岩,加强钢架、约束前期变形,强化锚固、抑制变形发展,优化衬砌、保证结构安全等加强各项工程措施控制隧道围岩大变形,单线和双线隧道不同大变形等级的工程支护对策原则分别如表 9 和表 10。隧道大变形工程措施施作后,针对初支出水或滞后性出水等局部薄弱环节和初支变形开裂问题,还可通过锁脚补强、连接板加劲、腹板帮焊、双层网片、纵连强化以及径向注浆等辅助措施,补强短板、消除表征,提高支护措施的整体受力作用。

4 更多隧道工程验证

雅鲁藏布江某铁路穿越青藏高原核心地带,处于印度板块与欧亚板块强烈碰撞的构造活跃区。该区域断裂带发育密集,地震频发,地质构造运动剧烈。受雅鲁藏布江水系长期侵蚀切割影响,沿线地形起伏显著,形成连绵高耸的山地地貌。雅鲁藏布

江某铁路沿线隧道(如令达拿、朗镇二号、江木拉等)在施工过程中频繁遭遇围岩大变形问题。该区域地层以千枚岩为主,局部夹有板岩和砂岩,受强烈构造作用影响,岩体节理裂隙发育,掌子面普遍存在褶皱变形现象。由于岩体破碎、强度较低且易风化,叠加高一极高地应力环境,隧道开挖后应力释放显著,导致围岩产生不同程度的挤压变形。这种地质条件与应力环境的特殊组合,使得该区域隧道工程面临严峻的大变形灾害风险,严重影响施工安全与进度。

为了进一步验证挤压性隧道大变形危险性评价的未确知测度模型的可行性、实用性和准确性,本文通过地质勘察、现场监测、室内试验、文献调研及工程类比等方法收集了雅鲁藏布江某铁路令达拿、朗镇二号、江木拉等 3 座典型软岩隧道中围岩大变形数据,如表 11 所示。

按照层次分析法、熵权法和组合赋权法的基本理论和计算规则,根据公式(1)~(10),计算可得岩石抗压强度、弹性模量、最大主应力、围强度应力比、地质构造、围岩级别、地下水的综合权重系数依次为 0.257、0.033、0.200、0.104、0.197、0.078、0.131。基于未确知测度理论及计算规则,根据公式(11)~(14),对令达拿、朗镇二号、江木拉等 3 座典型软岩隧道开展大变形危险性评价。评价结果显示(表 12),3 座隧道的大变形危险性等级判定结果与现场实际变形情况完全吻合,验证了该评价方法的可靠性。通过对 4 座典型软岩隧道的工程验证表明,本研究建立的未确知测度评价模型能够有效实现隧道围岩大变形风险的量化评估。该模型可为隧道工程大

表 9 单线隧道不同大变形等级的工程支护对策原则
Table 9 Principles of engineering support countermeasures for different large deformation grades of single-line tunnels

大变形等级	断面形式	超前支护	喷射	钢架形式	锚杆形式	二次衬砌
轻微	椭圆形轮廓	拱部中管棚或插小导管为主,可设置D60或D76中管棚超前支护,环向间距0.3~0.4 m,必要时可在中管棚间设置D42超前小导管	喷C30早高强度纤维,27 cm厚	全环工.20b型钢钢架,1.0 m/幅	拱端低预应力树脂卷锚杆(4.0 m)	间距1.2×0.8 (环x纵) 45 cm厚 钢筋砼
			喷C30早高强度纤维,25 cm厚	全环HW175型钢,0.8 m/幅	拱端低预应力树脂卷锚杆(4.0 m)	间距1.2×0.8 (环x纵) 50 cm厚 钢筋砼
强烈	圆形轮廓	拱部大管棚或中管棚为主,可设置D89或D108大管棚,D60或D76中管棚超前支护,环向间距0.3~0.4 m,必要时可在大管棚或中管棚间设置D42超前小导管	喷C30早高强度纤维,27 cm+21 cm厚	双层全环HW200/HW175型钢分次施作,0.6 m/幅	拱部长短结合,短锚杆为树脂(药包)锚杆(4 m)+长锚杆为让压式锚杆(10 m);隧道φ32中空锚杆(10 m—潜孔钻) 必要时增加边端预应力锚索(15 m)	间距1.2×0.6 (环x纵) 55~60 cm 厚钢筋砼 间距1.5×1.5 (环x纵)

表 10 双线隧道不同大变形等级的工程支护对策原则
Table 10 Principles of engineering support countermeasures for different large deformation grades of double-track tunnels

大变形等级	断面形式	超前支护	喷射	钢架形式	锚杆形式	二次衬砌	注浆加固
轻微	优化仰拱曲率	拱部中管棚或插小导管为主,可设置D60或D76中管棚超前支护,环向间距0.3~0.4 m,必要时可在中管棚间设置D42超前小导管	喷C30早高强度纤维砼, 29 cm厚	全环工22a型钢钢架, 1.0 m/幅	拱部低预应力树脂卷锚杆(4.5 m)+边墙低预应力树脂卷锚杆(6 m)	间距 50 cm 厚钢筋砼,仰拱 55 cm	/
			喷C30早高强度纤维砼, 27 cm厚	全环HW200型钢, 0.8 m/幅	拱部低预应力树脂卷锚杆(6.0 m)+隧底φ32中空锚杆(6 m—潜孔钻)	间距 55 cm 厚钢筋砼,仰拱 60 cm	/
中等	近圆轮廓或圆形	拱部大管棚或中管棚为主,可设置D89或D108大管棚, D60或D76中管棚超前支护,环向间距0.3~0.4 m,必要时可在大管棚或中管棚间设置D42超前小导管	喷C30早高强度纤维砼, 27 cm+23 cm厚	双层全环HW200/HW200型钢分次施作, 0.6 m/幅	长短结合,短锚杆为树脂(药包)锚杆(4 m)+长锚杆为让压式锚杆(12 m);隧底φ32中空锚杆(10 m—潜孔钻)	间距 1.2×0.6 (环x纵)	径向注浆
强烈			必要时增加边墙预应力锚索(18 m)	间距 1.5×1.5 (环x纵)	全环65 cm	全环65 cm	径向注浆

表11 雅鲁藏布江某铁路典型软岩隧道工程大变形数据

Table 11 Large deformation monitoring data for typical soft rock tunnels of a railway in Yarlung Zangbo River area

隧道工程	里程	σ_{\max}	σ_c	σ_b/σ_{\max}	E	K	S	W	大变形等级
令达拿隧道	DK241+525~DK241+665	0.14	10.20	4.40	0.63	5.5	6.5	4.5	强烈
朗镇二号隧道	DK261+190~DK261+820	0.39	8.36	6.80	1.29	4.5	4.5	4.5	轻微
江木拉隧道	DK270+410~DK270+525	0.20	30.62	11.36	1.31	5.5	6.5	2.5	中等

表12 雅鲁藏布江某铁路典型软岩隧道大变形危险性评价结果

Table 12 Risk assessment of large deformations in typical soft rock tunnels of a railway in Yarlung Zangbo River area

隧道工程	里程	综合未确知测度				评价结果	实际大变形等级
		C_1	C_2	C_3	C_4		
令达拿隧道	DK241+525~DK241+665	0.033	0.000	0.328	0.639	强烈	强烈
朗镇二号隧道	DK261+190~DK261+820	0.033	0.640	0.199	0.128	轻微	轻微
江木拉隧道	DK270+410~DK270+525	0.000	0.183	0.739	0.078	中等	中等

变形灾害防控、施工安全保障及后期运营维护提供可靠的理论支撑和决策依据。

5 结论

本文首次将未确知测度理论引入到隧道大变形危险性评价,通过融合距离函数、层次分析法和熵权法构建了组合赋权—未确知测度评价模型.主要研究结论包括:

(1)在系统分析65座典型隧道大变形案例的基础上,综合考虑“应力环境—强度参数—构造与围岩作用”三大主控机制,建立了完善的隧道大变形评价指标体系.该体系包括岩石抗压强度 σ_c 、岩石弹性模量 E 、围岩洞壁最大主应力 σ_{\max} 、围岩强度应力比 σ_b/σ_{\max} 、地质构造 S 、围岩级别 K 、地下水 W 等7个核心指标,全面反映了大变形发生的内外控制因素.

(2)创新性地距离函数引入隧道大变形危险性评价,通过融合主、客观赋权方法建立组合权重体系,有效解决了地质参数不确定性和权重分配难题,显著提升了评价结果的可靠性.同时,基于未确知测度理论,首次建立了适用于挤压性隧道大变形的风险评估模型,为工程实践提供了新的分析方法.

(3)应用构建的未确知测度评价模型,对成兰铁路杨家坪隧道及雅鲁藏布江某铁路3座典型软岩隧道(令达拿、朗镇二号、江木拉)进行大变形危险性综合评价,评估结果与现场实测大变形结果具有良好的 consistency,验证了该模型的可行性和准确性,可为复杂山区深埋隧道大变形危险性准确评价提供新的实现途径.

(4)隧道大变形是受多因素影响的复杂力学过

程,其发生机理因地质环境差异而不同.当前基于未确知测度理论的大变形风险评估仍处于探索阶段,未来研究应着重以下方向:首先,开展不同应力路径下软岩/破碎岩体的宏细观本构关系研究,量化大变形评价指标与力学参数(如塑性应变、扩容角)的定量关系;其次,纳入隧道设计参数和施工因素,完善大变形评价指标体系;最后,结合施工监测数据,利用施工监测数据(收敛变形、支护应力)反演力学参数,动态更新和校准本评价模型中的权重与阈值,形成“勘察评价—施工验证—模型优化”的闭环.

References

- Anagnostou, G., 1993. A Model for Swelling Rock in Tunneling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 26(4): 307—331. <https://doi.org/10.1007/BF01027115>
- Chen, X. H., Zhou, H., Zhang, G. Z., et al., 2022. Efficiency Coefficient Method for Large Deformation Risk Assessment of Mountain Tunnel. *Journal of Railway Engineering Society*, 39(8): 59—65 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. J., 1982. The Mechanical Problems for the Long-Term Stability of Underground Galleries. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1(1): 1—20 (in Chinese with English abstract).
- Dai, Y. H., Chen, W. Z., Tian, H. M., et al., 2015. Study on Large Deformation of Soft Rock in Daliang Tunnel and Its Supporting Scheme. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 34(S2): 4149—4156 (in Chinese with English abstract).
- Dong, J. X., Gong, X. Y., Mi, J., et al., 2024. Structure

- and Application of SHF Classification Method for Surrounding Rock of Sandy Dolomite Tunnel. *Earth Science*, 49(8): 2813–2825 (in Chinese with English abstract).
- Dong, L. J., Peng, G. J., Fu, Y. H., et al., 2008. Unascertained Measurement Classifying Model of Goaf Collapse Prediction. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 14(2): 221–224. <https://doi.org/10.1007/s12404-008-0046-9>
- Fan, J. H., Chen, Z. C., Xia, S. G., 2013. Risk Assessment of Large Deformation in Soft Rock Tunnel Construction by Mining Method. *Railway Engineering*, 53(7): 52–56 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. D., Jimenez, R., 2015. Predicting Tunnel Squeezing with Incomplete Data Using Bayesian Networks. *Engineering Geology*, 195: 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.017>
- Guo, X. L., Tan, Z. S., Yu, Y., 2022. Study on Large Deformation Control Technology and Deformation Control Criteria for Soft Rock Tunnels of Chengdu-Lanzhou Railway. *Journal of the China Railway Society*, 44(3): 86–104 (in Chinese with English abstract).
- He, L., Yang, B., Wang, G. F., et al., 2011. Research on Construction Dynamic Control and Optimization of a Tunnel in Soft Rock under High In-Situ Stresses. *Modern Tunnelling Technology*, 48(2): 44–48 (in Chinese with English abstract).
- He, M. C., Ren, S. L., Tao, Z. G., 2022. Disaster Prevention and Control Methods for Deep Buried Tunnels. *Journal of Engineering Geology*, 30(6): 1777–1797 (in Chinese with English abstract).
- He, M. C., Yan, Y. S., Wang, T. L., et al., 1999. The Probability and Classification of Soft Rock. In: He, M. C., ed., *The Current Conditions and Prospects of the Soft Rock Engineering Technology in 21st Century*. China Coal Industry Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hoek, E., Marinos, P., 2000. Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogenous Rock Masses. *Tunnels and Tunnelling International*, 32(11):45–51.
- Li, C. L., Li, T. B., Chen, L. W., et al., 2009. Analysis on the Genetic Mechanism of the Large Deformations of Surrounding Rocks on the Test Section in Longxi Left Tunnel. *Modern Tunnelling Technology*, 46(5): 46–50 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. L., Li, N., Ding, Y. J., et al., 2022. Study on Identification and Design Method of Squeezing Surrounding Rock Tunnel. *Journal of the China Railway Society*, 44(3): 24–38 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. L., Zhu, Y. Q., 2008. Control Technology for Large Deformation of Highland Stressed Weak Rock in Wushaoling Tunnel. *Journal of Railway Engineering Society*, 25(3): 54–59 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. M., 2018. Construction Control Technology for Large Deformation Section of Basalt Tunnel on Lijiang-Shangri-La Railway. *Tunnel Construction*, 38(S1): 167–174 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. B., Li, X., Wang, S. J., et al., 2024. Cross Project Conversion Relationship of Key Parameters of TBM Rock Breaking. *Earth Science*, 49(5): 1722–1735 (in Chinese with English abstract).
- Li, T. B., Meng, L. B., Wang, L. S., 2016. High Stress Tunnel Stability and Large Deformation Disaster Prevention. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, W., Chang, X. W., Zhou, H., et al., 2024. Analysis of In-Situ Stress Characteristics and Large Deformation Risk for a Deep and Long Tunnel in the Western Mountainous Area. *High Speed Railway Technology*, 15(6): 98–103 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. C., Zhu, Y. Q., Li, W. J., et al., 2008. Mechanism and Classification Criterion for Large Deformation of Squeezing Ground Tunnels. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 30(5): 690–697 (in Chinese with English abstract).
- Meng, L. B., Li, H. Y., Li, T. B., et al., 2024. Study on Explosive Rockburst Mechanism Based on Two-Dimensional Meso-Fracture Model. *Earth Science*, 49(8): 2789–2798 (in Chinese with English abstract).
- Saari, K., 1982. Analysis of Plastic Deformation (Squeezing) of Layers Intersecting Tunnels and Shafts in Rock (Dissertation). University of California, Berkeley.
- Saaty, T. L., 1979. Applications of Analytical Hierarchies. *Mathematics and Computers in Simulation*, 21(1): 1–20. [https://doi.org/10.1016/0378-4754\(79\)90101-0](https://doi.org/10.1016/0378-4754(79)90101-0)
- Shi, X. Z., Zhou, J., Dong, L., et al., 2010. Application of Unascertained Measurement Model to Prediction of Classification of Rockburst Intensity. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(S1): 2720–2726 (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. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7(1): 59–74. [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(92\)90114-W](https://doi.org/10.1016/0886-7798(92)90114-W)
- Song, Z., Jiang, L. W., Du, Y. B., et al., 2016. Analysis on Characteristic and Formation Mechanism of Larger Deformation for the Tunnel of Chengdu-Lanzhou Railway. *Journal of Engineering Geology*, 24(S1): 11–16.

- (in Chinese with English abstract).
- Tan, Z. S., Zhao, J. P., Zhang, B. J., 2024. Mechanism and Control of Large Deformations in Super-Deep Soft Rock Tunnels: A Case Study of Haba Snow Mountain Tunnel on Lijiang-Shangri-La Line of Yunnan-Xizang Railway. *Tunnel Construction*, 44(12): 2307–2315 (in Chinese with English abstract).
- Terzaghi, K., Proctor, R. V., White, T. L., 1946. Rock Tunneling with Steel Supports with an Introduction to Tunnel Geology. Commercial Shearing and Stamping Company, Ohio.
- Tian, S. M., 2013. Deformation Mechanism of Black Batt with High Stress in Baozhen Tunnel. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 37(1): 21–26 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. Y., 1990. Unascertained Information and Its Mathematical Treatment. *Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture*, (4): 1–9 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K. Y., Shang, Y. J., He, W. T., et al., 2015. Prediction of Surrounding Rock Deformation in Deep Highway Tunnel. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 11(5): 1164–1174 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. D., Yan, W., Gao, H., 2020. Evaluation of Vehicle Base Location Planning Based on Unascertained Measure. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 51(5): 1431–1440 (in Chinese with English abstract).
- 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. *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. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 5(1–2): 111–126. <https://doi.org/10.1144/gsl.qjeg.1972.005.01.12>
- Yan, X. H., Guo, C. B., Liu, Z. B., et al., 2022. Physical Simulation Experiment of Granite Rockburst in a Deep-Buried Tunnel in Kangding County, Sichuan Province, China. *Earth Science*, 47(6): 2081–2093 (in Chinese with English abstract).
- Ye, S. M., 2014. Deformation Control Technique for the Yanmenguan Tunnel. *Journal of Railway Engineering Society*, 31(8): 68–71, 77 (in Chinese with English abstract).
- Yi, Z. Y., Long, Z. C., Jiang, S. B., 2012. Application of Grey Variable Weight Clustering Method in Large Deformation Risk Assessment of Jicha Road Tunnel. *Human Communication Science and Technology*, 38(1): 118–120 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Wang, Q., Chen, J. P., et al., 2011. Evaluation of Debris Flow Risk in Jinsha River Based on Combined Weight Process. *Rock and Soil Mechanics*, 32(3): 831–836 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. Z., Deng, J. H., Wang, D., et al., 2021. Mechanism and Classification of Tectonic-Induced Large Deformation of Soft Rock Tunnels. *Advanced Engineering Sciences*, 53(1): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Z., 2011. Large Deformation Treatment Technology of Guanjiao Tunnel. *Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science)*, 24(1): 17–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Zheng, X. S., Cao, H. Y., et al., 2025. Tunnel Collapse Risk Analysis Based on Attribute Mathematical Theory and TSP Geological Forecast Technique. *Journal of Earth Science*, 36(6): 2830–2835. <https://doi.org/10.1007/s12583-025-2045-9>
- Zhao, F. S., 2014. Technologies to Control Serious Deformation of Soft Rocks with High Ground Stress: Case Study on Liangshui Tunnel on Lanzhou-Chongqing Railway. *Tunnel Construction*, 34(6): 546–553 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., Chen, S. K., Li, H. R., et al., 2021. Rockburst Prediction for Hard Rock and Deep-Lying Long Tunnels Based on the Entropy Weight Ideal Point Method and Geostress Field Inversion: A Case Study of the Sangzhuling Tunnel. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(5): 3885–3902. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02175-9>
- Zhou, H., Chen, S. K., Liu, T., et al., 2021. Combination Weight and Ideal Point Method Model for Risk Evaluation on Squeezing Large Deformation. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 52(10): 3647–3658 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., Chen, S. K., Liu, T., et al., 2022a. Large Deformation Mechanism of Soft Rock Surrounding Tunnel Deep Buried in Complex Mountainous: A Case Study of Yangjiaping Tunnel. *Journal of Engineering Geology*, 30(3): 852–862 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., Liao, X., Chen, S. K., et al., 2022b. Rockburst Risk Assessment of Deep Lying Tunnels Based on Combination Weight and Unascertained Measure Theory: A Case Study of Sangzhuling Tunnel on Sichuan-Tibet

- Traffic Corridor. *Earth Science*, 47(6): 2130–2148 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, H., Xie, R. Q., Song, Z., et al., 2024. Large Deformation Characteristics and Genetic Analysis of High Geostress Altered Granite Tunnel. *Railway Technical Standard (Chinese & English)*, 6(1): 29–35 (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 陈兴海, 周航, 张广泽, 等, 2022. 山岭隧道大变形危险性评价的能效系数法研究. *铁道工程学报*, 39(8): 59–65.
- 陈宗基, 1982. 地下巷道长期稳定性的力学问题. *岩石力学与工程学报*, 1(1): 1–20.
- 戴永浩, 陈卫忠, 田洪铭, 等, 2015. 大梁隧道软岩大变形及其支护方案研究. *岩石力学与工程学报*, 34(S2): 4149–4156.
- 董家兴, 龚欣月, 米健, 等, 2024. 砂化白云岩隧洞围岩分类方法 SHF 构建及应用. *地球科学*, 49(8): 2813–2825.
- 范建海, 陈志超, 夏述光, 2013. 软岩隧道矿山法施工大变形风险评估. *铁道建筑*, 53(7): 52–56.
- 郭小龙, 谭忠盛, 喻渝, 2022. 成兰铁路软岩隧道大变形控制技术 & 变形控制基准研究. *铁道学报*, 44(3): 86–104.
- 何磊, 杨斌, 王更峰, 等, 2011. 高地应力软岩隧道施工动态控制与优化研究. *现代隧道技术*, 48(2): 44–48.
- 何满潮, 任树林, 陶志刚, 2022. 深埋隧道灾变防控方法. *工程地质学报*, 30(6): 1777–1797.
- 何满潮, 晏玉书, 王同良, 等, 1999. 软岩工程技术现状及展望. 见: 何满潮, 编, 世纪之交软岩工程技术现状与展望. 北京: 煤炭工业出版社.
- 李春林, 李天斌, 陈礼伟, 等, 2009. 龙溪隧道左线试验段围岩大变形成因机制分析. *现代隧道技术*, 46(5): 46–50.
- 李贵民, 2018. 丽香铁路玄武岩隧道大变形段施工控制技术. *隧道建设(中英文)*, 38(增刊1): 167–174.
- 李国良, 李宁, 丁彦杰, 等, 2022. 挤压性围岩隧道判识及设计方法研究. *铁道学报*, 44(3): 24–38.
- 李国良, 朱永全, 2008. 乌鞘岭隧道高地应力软弱围岩大变形控制技术. *铁道工程学报*, 25(3): 54–59.
- 李海波, 李旭, 王双敬, 等, 2024. TBM 破岩关键参数跨工程转换关系. *地球科学*, 49(5): 1722–1735.
- 李天斌, 孟陆波, 王兰生, 2016. 高地应力隧道稳定性及岩爆、大变形灾害防治. 北京: 科学出版社.
- 刘伟, 常兴旺, 周航, 等, 2024. 西部山区某深埋长大隧道地应力特征及大变形危险性分析. *高速铁路技术*, 15(6): 98–103.
- 刘志春, 朱永全, 李文江, 等, 2008. 挤压性围岩隧道大变形机理及分级标准研究. *岩土工程学报*, 30(5): 690–697.
- 孟陆波, 李昊禹, 李天斌, 等, 2024. 基于二维细观裂隙模型的爆喷型岩爆机制. *地球科学*, 49(8): 2789–2798.
- 史秀志, 周健, 董蕾, 等, 2010. 未确知测度模型在岩爆烈度分级预测中的应用. *岩石力学与工程学报*, 29(增刊1): 2720–2726.
- 宋章, 蒋良文, 杜宇本, 等, 2016. 成兰铁路软岩隧道大变形特征及成因机制探析. *工程地质学报*, 24(增刊1): 11–16.
- 谭忠盛, 赵金鹏, 张宝瑾, 2024. 超大埋深软岩隧道大变形机理及控制技术研究: 以滇藏铁路丽香线哈巴雪山隧道为例. *隧道建设(中英文)*, 44(12): 2307–2315.
- 田四明, 2013. 堡镇隧道高地应力炭质页岩的变形破坏机制. *北京交通大学学报*, 37(1): 21–26.
- 王光远, 1990. 未确知信息及其数学处理. *哈尔滨建筑工程学院学报* (4): 1–9.
- 王开洋, 尚彦军, 何万通, 等, 2015. 深埋公路隧道围岩大变形预测研究. *地下空间与工程学报*, 11(5): 1164–1174.
- 王卫东, 颜文, 高华, 2020. 基于未确知测度的车辆基地选址规划评价. *中南大学学报(自然科学版)*, 51(5): 1431–1440.
- 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. *地下空间与工程学报*, 16(4): 1116–1122.
- 严孝海, 郭长宝, 刘造保, 等, 2022. 四川康定某深埋隧道花岗岩岩爆物理模拟实验研究. *地球科学*, 47(6): 2081–2093.
- 叶少敏, 2014. 雁门关隧道变形控制技术. *铁道工程学报*, 31(8): 68–71, 77.
- 易震宇, 龙正聪, 蒋胜波, 2012. 灰色变权聚类法在吉茶路隧道大变形风险评估中的应用. *湖南交通科技*, 38(1): 118–120.
- 张晨, 王清, 陈剑平, 等, 2011. 金沙江流域泥石流的组合赋权法危险度评价. *岩土力学*, 32(3): 831–836.
- 张广泽, 邓建辉, 王栋, 等, 2021. 隧道围岩构造软岩大变形发生机理及分级方法. *工程科学与技术*, 53(1): 1–12.
- 张旭珍, 2011. 关角隧道大变形处理技术. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 24(1): 17–20.
- 赵福善, 2014. 兰渝铁路两水隧道高地应力软岩大变形控制技术. *隧道建设*, 34(6): 546–553.
- 周航, 陈仕阔, 刘彤, 等, 2021. 挤压性围岩大变形危险性评价的组合赋权—理想点模型. *中南大学学报(自然科学版)*, 52(10): 3647–3658.
- 周航, 陈仕阔, 刘彤, 等, 2022a. 复杂山区深埋隧道软岩大变形机理研究: 以杨家坪隧道为例. *工程地质学报*, 30(3): 852–862.
- 周航, 廖昕, 陈仕阔, 等, 2022b. 基于组合赋权和未确知测度的深埋隧道岩爆危险性评价: 以川藏交通廊道桑珠岭隧道为例. *地球科学*, 47(6): 2130–2148.
- 周航, 谢荣强, 宋章, 等, 2024. 高地应力蚀变花岗岩隧道大变形特征及成因分析. *铁道技术标准(中英文)*, 6(1): 29–35.