

隧道新增采空区破碎围岩变形规律与结构受力特征研究

权循亮

中铁九局集团第七工程有限公司

摘要：隧道下伏新采空区，地应力复杂、岩石极破碎、开挖扰动强、地质条件复杂，在开挖过程中易出现支护结构失稳、失效，严重威胁施工人员人身和设备财产安全。为了更准确地了解现场支护结构的安全状态，依托太原西北二环辛庄上隧道工程，根据围岩破坏特征，探讨围岩破坏机理。分析结果表明：此类型隧道围岩变形分为3个阶段，分别为急速变化期、相对平稳期和稳定变化期，其中急速变化阶段主要集中在开挖72h内，其变形量约占总变形量的40%左右；初期支护钢拱架应力、应变情况较为复杂，钢拱架不对称受力，总体为不均匀沉降，建立理论模型后可结合拱架轴力、弯矩分析，能够有效判断拱架的安全状态。

关键词：隧道；复杂应力场；破碎围岩；现场监测；变形；结构受力

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.17.020

引言

在隧道工程中，围岩的稳定性对隧道的施工安全和长期运营至关重要。本研究旨在深入探讨蠕变特性下新采空区复杂应力场下破碎围岩隧道围岩变形规律与结构受力特征。通过这一研究，我们期望能够揭示围岩变形的内在机制，为隧道工程实践提供重要的理论支持和实践指导。具体而言，本研究将运用先进的实验设备和

数据分析方法，系统地研究围岩变形与时间、空间的关系，以及结构受力与围岩变形的相互影响关系。同时，我们将提出结构优化设计和加固措施的建议，以提升隧道工程的安全性和稳定性。本研究不仅对隧道工程实践具有重要的指导意义，也将为相关领域的科学研究提供有益的参考和借鉴。

一、工程概况

辛庄上隧道全长1947m，洞体穿越黄土覆盖基岩低中山区地貌单元，位于大南坪煤矿和矾石沟煤矿矿界内，大南坪煤矿东侧8#、9#煤层埋深较浅，为小窑私挖乱采区。大南坪煤矿通过采空区专项调查，大南坪煤矿2+3#、4#、7#、8#、9#煤层均有开采，回采率84%，后续施工过程中，9#煤层开采范围进一步扩大，造成隧道地表变形、裂缝纵横，出口仰坡岩体破碎，还导致新采空区上部已经处治过的2+3#、4#、7#及8#采空区重新活化，第一次采空区处治失效，地表最大累计沉降2.49m，最大变化速率达到1.07mm/d。

二、新采空区复杂应力场分析

（一）应力探测

为探明新采空区影响下的应力场情况，采用TYZ7钻孔，在埋深50m以下选择了5个测段（51.58m、60.52m、71.17m、97.76m、136.60m）进行水压致裂法地应力测试工作，现场测试工作自下而上依次进行，测量结果如下。

表1 TYZ7钻孔地应力测量结果统计表

序号	中心深度 (m)	压裂参数 (MPa)					主应力值 (MPa)			SH/Sv	SH方向 (°)
		PH	Pb	Pr	Ps	T	SH	Sh	Sv		
1	51.58	0.52	1.87	0.8	0.84	1.07	1.72	0.84	1.37	1.26	
2	60.52	0.61	2.71	2.06	1.41	0.65	2.17	1.41	1.60	1.35	NE60°
3	71.17	0.71	1.32	1.24	1.01	0.08	1.79	1.01	1.89	0.95	
4	97.76	0.98		1.15	1.19		2.42	1.19	2.59	0.93	
5	136.6	1.37		1.69	1.56		2.99	1.56	3.62	0.83	

通过对上述表1分析，在TYZ7钻孔中主应力值随地层深度增加而增加，51.58~136.60m测试深度范围内，最大水平主应力值在1.72~2.99MPa之间，最小水平主应力值在0.84~1.56MPa之间。最大水平主应力与垂向应力之比范围为0.83~1.35。

（二）初始应力场模拟

隧道走向与围岩均可看作一字坡，利用有限元软件进行建模分析，将主要的6层地层和5层煤层按照空间关系建立三维和二维模型，同时添加新采空区、11道地勘报告中显示的地裂缝，在仅受自重影响下，模拟整个新采空区段落的初始应力场。

表2 主要岩层物理力学参数

序号	地层岩性	变形模量 E (GPa)	泊松比 μ	内摩擦角 ψ (°)	BQ	[BQ]
1	泥岩、泥岩夹灰岩	1.2	0.41	21	183	153
2	泥岩、煤层	1.5	0.40	24	243	223
3	泥岩、泥岩夹煤层	1.2	0.41	21	183	153

辛庄上隧道无偏压，因此其边坡段受力为水平对称状态，其垂直压力可表示为：

$$q = \lambda h \left(1 - \frac{\lambda h \tan \theta}{B} \right)$$

$$\gamma = \frac{\tan \beta - \tan \varphi_c}{\tan \beta [1 + \tan \beta (\tan \varphi_c - \tan \theta) + \tan \varphi_c \tan \theta]}$$

$$\tan \beta = \tan \varphi_c + \sqrt{\frac{(\tan^2 \varphi_c + 1) \tan \varphi_c}{\tan \varphi_c - \tan \theta}}$$

式中： γ —围岩重度 (kN/m^3)；
 h —洞顶离地面的高度 (m)；

θ —顶板土柱两侧摩擦角 ($^\circ$)；
 B —隧道跨度 (m)；
 λ —侧压力系数；
 Φ_c —围岩计算摩擦角 ($^\circ$)；
 β —产生最大推力时的破裂角 ($^\circ$)。

其水平压力可表示为： $e_i = \gamma h_i \lambda$
 式中： h_i —内外侧任意点至地面的距离 (m)。

三、围岩变形规律研究

在分析蠕变特性下新采空区复杂应力场下破碎围岩的变形特征时，为了深入了解蠕变特性和围岩变形的关系，我们采用了先进的数值分析方法，构建了围岩蠕变模型，并进行了大量的数值模拟和实验验证。

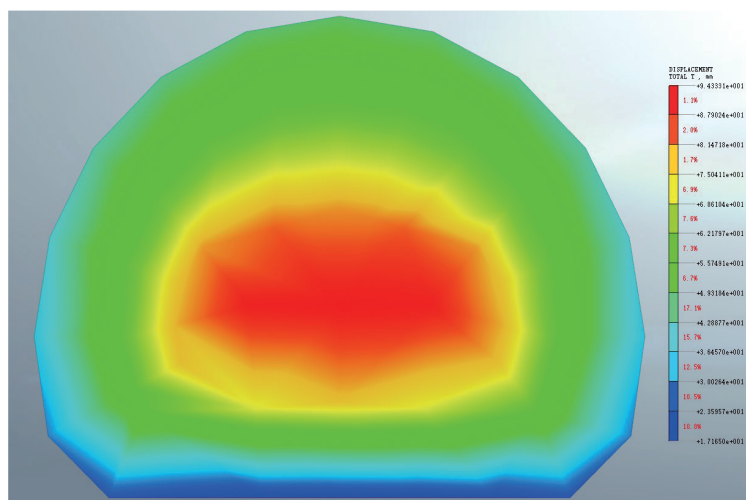


图1 隧道位移分析

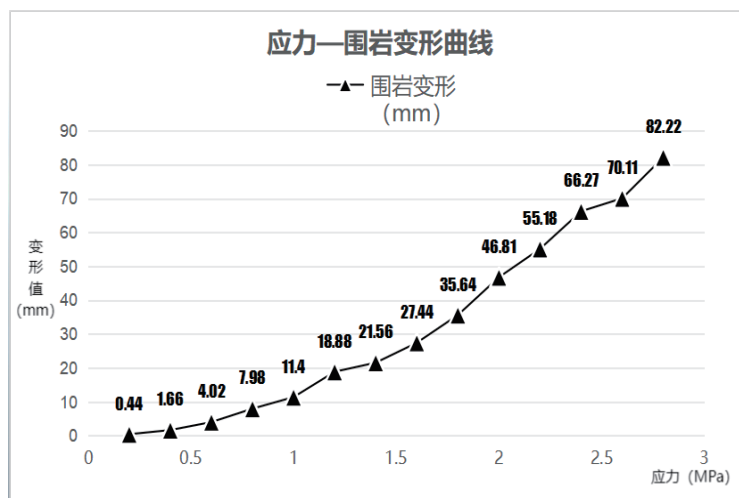


图2 应力—围岩变形规律图

通过分析模型，我们发现破碎围岩的蠕变速率、应力水平和变形量之间存在显著的相关性。具体而言，在低应力水平下，蠕变速率较低，变形量较小；而在高应力水平下，蠕变速率显著增加，变形量也相应增大，整体呈现指数函数趋势。

四、结构受力特征研究

(一) 不同应力场与结构受力的相互关系

在蠕变特性下新采空区复杂应力场下破碎围岩隧道中，结构受力与围岩变形的相互影响关系是一个复杂的问题。为了更好地理解这一关系，我们首先需要了解围岩变形的特征。围岩变形受到多种因素的影响，包括应力场、围岩性质、采空区尺寸等。在蠕变条件下，围岩变形会随着时间的推移而逐渐增大，这会对结构受力产生显著影响。

结构受力与围岩变形的相互影响关系可以通过数值模拟和物理实验进行研究。例如，通过有限元分析（FEA）和离散元分析（DEM）等方法，可以模拟隧道开挖和蠕变过程中结构的受力状态和围岩变形行为。这些分析方法可以提供详细的数据，帮助我们更好地理解结构受力与围岩变形的关系。

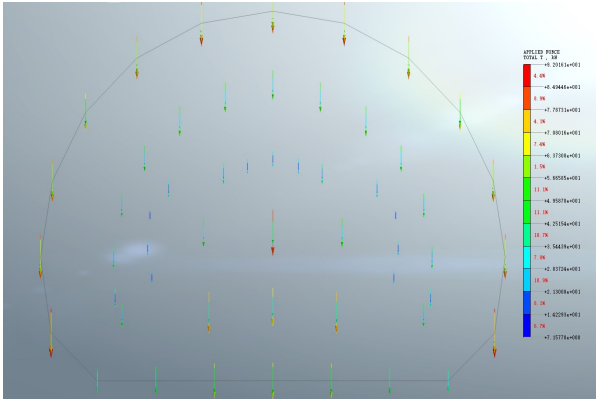


图 3 隧道结构受力变化图

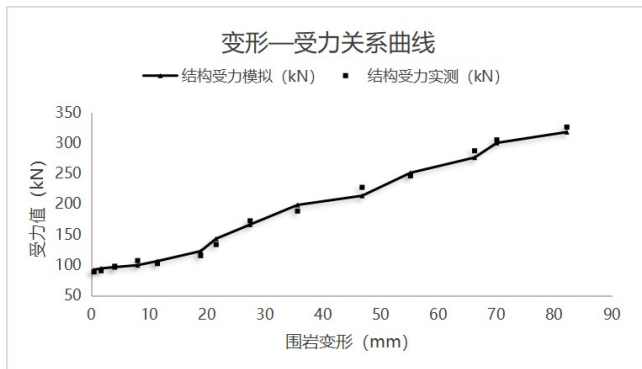


图 4 隧道结构受力变化曲线图

在实际工程中，这种相互影响关系也得到了广泛的应用。例如，在设计和施工过程中，通常需要对隧道支护结构进行优化，以适应围岩变形的需求。同时，为了减小围岩变形对结构的影响，可以采用一些加固措施，如注浆、锚杆等。

总的来说，结构受力与围岩变形的相互影响关系是一个重要的研究课题。通过深入研究和探讨这一关系，我们可以更好地解决隧道工程中的实际问题，提高隧道的安全性和稳定性。

（二）结构优化设计和加固措施

在研究结构受力特征的过程中，我们发现结构在复杂应力场下的受力状态和分布规律对于围岩变形的控制和隧道结构的稳定性至关重要。为了优化设计和加固措施，我们提出以下几点建议：首先，应充分考虑围岩的变形特征和结构受力状态，对隧道结构设计进行精细化建模和分析，以提高其承载能力和稳定性。其次，针对围岩变形的特点，可以采用注浆、锚杆等加固措施，提高围岩的整体性和稳定性，从而减小隧道结构的受力。此外，还可以采用新型材料和技术手段，如碳纤维复合

材料、预应力技术等，对隧道结构进行加固和优化。这些措施的实施将有助于提高隧道工程的安全性和可靠性，为类似工程的优化设计和加固提供有益的参考。

五、前景展望

在未来的研究中，对于蠕变特性下新采空区复杂应力场下破碎围岩隧道围岩变形规律与结构受力特征的研究，我们可以进一步深化以下几个方向：首先，利用先进的数值模拟技术和实验手段，对围岩变形的微观机制进行深入研究，以揭示其内在的力学行为和演化规律。其次，结合实际工程案例，对不同地质条件、采矿方式和支护措施下的围岩变形和结构受力进行系统的分析和比较，以提出更为有效的预测和防控方法。此外，我们还可以引入人工智能和大数据技术，构建智能监测和预警系统，实现围岩变形的实时监测和自动预警，提高隧道工程的安全性和稳定性。通过这些研究，我们有望为隧道工程实践提供更为科学和可靠的指导，推动隧道工程技术的进一步发展。

六、结论

1. 应力场大小对围岩变形的影响：在较高的应力场条件下，隧道围岩的变形量通常会增大。这是因为高应力会导致围岩的应力应变关系更加接近于线弹性，使得围岩更容易发生变形。因此，在设计和施工过程中，需要特别注意高应力场条件下隧道围岩的稳定性问题。

2. 应力场方向对围岩变形的影响：隧道围岩的应力场方向可能会影响其变形特性。例如，当隧道的走向与最大主应力方向垂直时，隧道围岩的变形量可能会最大。这是因为最大主应力方向的应力会对隧道围岩产生最大的剪切力，导致围岩更容易发生剪切变形。因此，在隧道设计和施工过程中，需要考虑围岩的应力场方向对隧道稳定性的影响。

3. 围岩地质条件对变形的影响：隧道围岩的地质条件也是影响其变形特性的重要因素。例如，软弱围岩、断层、破碎带等地质条件可能会导致隧道围岩的变形量增大，因为这些地质条件的围岩强度较低，容易发生变形。因此，在隧道设计和施工过程中，需要充分考虑围岩的地质条件对隧道稳定性的影响。

4. 支护结构对围岩变形的影响：隧道的支护结构是控制围岩变形的关键因素之一。合理的支护结构设计可以有效地减小围岩的变形量，提高隧道的稳定性。因此，在隧道设计和施工过程中，需要根据围岩的地质条件和施工方法等因素进行支护结构设计，以保证隧道的稳定性。

参考文献

[1] 赵勇, 等. 隧道设计理论与方法 [M]. 1版. 北京: 人民交通出版社, 2019.
[2] 李治. Midas/GTS在岩土工程中应用 [M]. 1版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
[3] 朱汉华, 尚岳全. 公路隧道设计与施工新法 [M]. 1版. 北京: 人民交通出版社, 2023.

作者简介：权循亮（1981—），男，汉族，安徽合肥人，本科，中铁九局集团第七工程有限公司辽宁本桓高速项目，高级职称，土木工程。