

基于收敛-约束法的隧道支护结构安全性分析

彭 举^{1,2}, 高新强^{1,2,3}, 赵静波⁴, 孔 超⁵, 关岳卓尔^{1,2}, 樊浩博², 朱正国²

- (1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043;
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 3. 河北省交通工程结构力学行为演变与
控制重点实验室, 石家庄 050043; 4. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222;
5. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 绵阳 621000)

摘 要: 针对极高地应力铁路隧道, 采用有限元软件构建二维与三维模型, 通过软化模量法模拟开挖应力释放, 确定最佳支护时机。结合收敛-约束法, 建立应力释放率与开挖面距离的关系, 评估初期支护最佳时机及其对围岩稳定性的影响。对比既有经验公式与数值结果, 验证了模型可靠性。结果表明: 极高地应力工况下, 当应力释放率达 70% 时, 滞后开挖面 0.8 m 为最佳支护时机。支护结构安全性评估表明, 合理参数下结构安全有保障。研究为隧道初期支护优化设计与安全评价提供了依据, 具有工程应用价值。

关键词: 收敛-约束法; 应力释放; 支护时机; 极限位移; 安全评价; 数值模拟

中图分类号: U45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0119-09

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.019

Safety Analysis of Tunnel Supporting Structure Based on Convergence - Confinement Method

PENG Ju^{1,2}, GAO Xinqiang^{1,2,3}, ZHAO Jingbo⁴, KONG Chao⁵, GUAN Yuezhuoer^{1,2},
FAN Haobo², ZHU Zhengguo²

- (1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 3. Hebei Key Laboratory of Mechanics Behavior Evolution and Control of Transport Engineering Structures, Shijiazhuang 050043, China; 4. China Railway 18th Bureau Group Corporation Limited, Tianjin 300222, China; 5. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China)

Abstract: For extremely high stress railroad tunnels, two-dimensional and three-dimensional models are constructed using finite element software, and the excavation stress release is simulated by the softening modulus method to determine the optimal timing of support. Combined with the convergence-constraint method, the relationship between the stress release rate and the

项目来源: 河北省自然科学基金项目 (E202310057); 中国铁建股份有限公司 2019 年度科技重大专项 (2019-A05); 河北省省级科技计划资助 (225676162GH)。

作者简介: 彭 举 (1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 隧道围岩稳定性。

通信作者: 高新强 (1970—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 隧道围岩稳定机理。

收稿日期: 2024-07-03

道桥技术

distance from the excavation surface is established to evaluate the optimal timing of the initial support and its influence on the stability of the surrounding rock. The reliability of the model is verified by comparing the established empirical formulas with the numerical results. The results show that when the stress release rate reaches 70% under the extremely high stress condition, the lagging excavation surface of 0.8 m is the best time for support. The safety assessment of the support structure shows that the structural safety is guaranteed under reasonable parameters. The study provides a basis for the optimal design and safety evaluation of the initial tunnel support, and has engineering application value.

Key words: convergence - confinement method; stress relief; support timing; limit displacement; safety assessment; numerical simulation

0 引言

在高地应力的恶劣环境下进行隧道施工,围岩的稳定性和安全性难以保证,极易出现大变形和塌方等工程问题^[1]。这些问题不仅影响施工安全,还可能引发重大人员伤亡和社会影响。此外,不合理的设计和支护也可能导致围岩失稳,给施工带来更大的困难。隧道施工中的大变形和塌方等工程问题不仅影响工程进展,还可能增加投资成本,或造成重大经济损失。初期支护结构可有效控制大变形,使围岩达到稳定状态;如果过早施加支护,围岩初始应力无法充分的释放,支护结构将承担大部分地应力,则需要更大的支护刚度;如果过晚施加支护,重分布应力可能超过围岩强度,将引起隧道塌方,危及隧道的稳定性。因此,研究初期支护时机和安全性显得尤为重要。

学者们借助理论分析、数值模拟、模型试验和现场试验等手段,对高地应力隧道支护时机与支护参数进行了相关研究。An 等^[2]基于收敛约束法和岩石的整体破坏准则,构建破坏倾向系数与工作面距离的关系式;Li 等^[3]采用分阶段安装支护的方法,通过调整支护结构的初始安装位置,利用围岩的承载能力减轻对支护荷载要求,与传统方法相比,发现分阶段安装支护结构可节约成本;蒋长伟等^[4]通过对比分析安全系数法、位移增量法和塑性区法三种确定支护时机的方法,结果表明采用安全系数法求解支护时机对于深埋高地应力硬岩隧道初期支护更为合理;苏凯等^[5]基于 Mohr - Coulomb 屈服准则的安全系数计算方法,建立围岩变形与开挖面距离的数学关系式,确定支护时机;邵珠山等^[6]分析不同边墙曲率、支护参数及高地应力软岩隧道变形控制的效果,通过围岩 - 支护特征曲线优化支护方案;

仇文革等^[7]对优化后锚喷支护下的新庄岭隧道进行数值模拟,从塑性区、支护应力、支护位移等方面对隧道安全储备进行评价;李树忱等^[8]采用弹性薄壳理论对初期支护力学结构进行分析,引入膨胀力建立黄土隧道围岩特征曲线方程,通过等效截面法得到联合支护特征曲线,针对膨胀性黄土隧道提出了“格栅拱架 + 型钢拱架 + 喷射混凝土”的联合支护结构;于富才等^[9]对高强钢筋格栅混凝土构件进行室内加载试验,研究其力学特性,提出了基于荷载和挠度相关的组合支护特性曲线;孙闯等^[10]通过室内试验和数值模拟,系统研究软弱围岩岩性,建立峰后力学模型,评价围岩及支护结构安全性;扈世民等^[11]采用数值模拟和现场监测试验相结合的方法,针对大断面黄土隧道初期支护适用性进行了分析,结果表明钢拱架 + 喷锚联合支护保证了隧道和支护结构安全;谭忠盛等^[12]通过现场对比试验,测试型钢拱架和格栅拱架的性能指标,对大断面黄土隧道中的型钢拱架和格栅拱架进行深入研究,以明确它们各自的适用条件,结果表明采用格栅拱架替代型钢拱架更具优越性。

综上所述,国内外学者对隧道支护结构进行了大量研究,但是针对极高地应力条件下隧道支护结构安全性分析较少。因此,依托某在建隧道工程,采用 Abaqus 有限元软件构建隧道二维与三维数值模型,得到围岩特征曲线,根据地下工程开挖扰动响应原理和围岩纵向变形曲线,确定最佳支护时机。基于收敛 - 约束法和并联基本原理,推导锚喷 + 钢拱架组合支护结构的特征函数,结合有限元计算结果绘制围岩与支护特征曲线,得到对应的安全系数,实现对在建隧道工程初期支护结构安全性的评价。

1 工程概况

该隧道最大埋深达 2 080 m，穿越砂岩、板岩、灰岩、花岗岩、片麻岩、大理岩等地层。已有铁路现场地勘资料表明，隧道穿越地层的最大水平地应力达 64 MPa，最小水平地应力达 38 MPa，围岩以花岗岩为主，其饱和单轴抗压强度为 148.55 MPa，属于极高地应力隧道。

隧道工程处于 IV 级围岩地段，设计采用台阶法施工，上台阶、下台阶、仰拱高度分别为 7.60、3.00、2.04 m。初期支护参数为：拱墙、仰拱喷射 C30 混凝土厚度 27 cm；锚杆长度 4.5 m，环向纵向间距 1.2 m × 1.2 m；拱墙挂设 φ8 钢筋网，网格尺寸 20 cm × 20 cm；全环 I 20a 钢架 1.0 m/榀。超前支护措施为：拱部 φ42 小导管，环向间距 0.4 m，纵向间距 3 m，每根长 4 m。二次衬砌为喷射 C30 钢筋混凝土，厚度 50 cm。主要开挖顺序和支护设计如图 1 所示，图中数字为隧道开挖顺序。

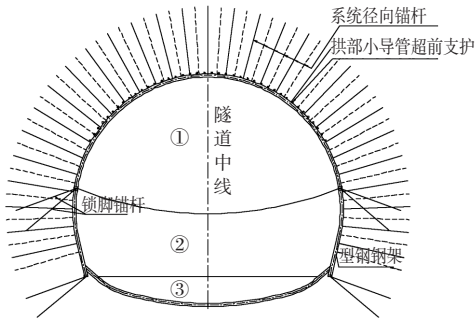


图 1 隧道初期支护设计图

Fig. 1 Design drawing of primary support for tunnel

2 收敛 - 约束法理论解

2.1 收敛 - 约束法基本原理

收敛 - 约束法描述了隧道支护与围岩的相互作用机理，为隧道工程的初期支护优化设计及安全性评价提供一种有效的方法，基本原理如图 2 所示。

图中 u_0 为为支护结构施作时围岩的初始径向位移； u_{eq} 为支护结构与围岩平衡时的径向位移； u_{el} 为支护结构最大弹性变形量； u_{max} 为支护结构最大变形量； P_{eq} 为支护结构与围岩平衡时的支护抗力； P_{max} 为支护结构的极限承载力； P_0 为初始地应力。

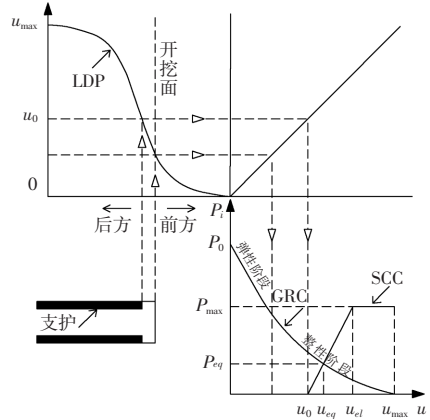


图 2 收敛 - 约束法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the convergence-confinement method

2.2 围岩特征曲线 (GRC)

对于静水压力作用下深埋圆形隧道，根据弹性力学据厚壁圆筒理论求解，弹性收敛线方程为：

$$u = \frac{1 + \mu}{E} R_0 (P_0 - P_i) \quad (1)$$

式中： u 为洞周径向位移； μ 为围岩（岩体）的泊松比； E 为围岩（岩体）的弹性模量； R_0 为隧道开挖半径； P_i 为支护反力。

采用 Mohr - Coulomb 屈服准则，塑性收敛线方程为：

$$u = \frac{1 + \mu}{E} \left\{ P_0 - c g \cot \varphi \left[\left(\frac{R_p}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - 1 \right] - P_i \left(\frac{R_p}{R_0} \right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \right\} \left\{ \frac{R_p^2}{R_0} \right. \quad (2)$$

其中 R_p 的计算式为：

$$R_p = \left[\frac{(P_0 + c \cdot \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{P_i + c \cdot \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \times R_0 \quad (3)$$

式中： c 为岩体黏聚力； φ 为岩体内摩擦角； R_p 为塑性区半径。

2.3 支护特征曲线 (SCC)

支护特征曲线由半无限体薄壁圆筒弹性力学原理推导得出：

$$P_i = K_i u_i \quad (4)$$

道桥技术

式中: P_i 为地层对支护结构的压力; K_i 为支护结构刚度系数; u_i 为相应的结构径向变形。

(1) 喷射混凝土支护

根据厚壁圆筒理论, 喷射混凝土刚度系数 K_c 的表达式为:

$$K_c = \frac{E_c [R_0^2 - (R_0 - t_c)^2]}{R_0(1 + u_c) [(1 - 2\mu_c)R_0^2 + (R_0 - t_c)^2]} \quad (5)$$

$$R_{c,\max} = \frac{1}{2}\sigma_{cc} \left[1 - \frac{(R_0 - t_c)^2}{R_0^2} \right] \quad (6)$$

式中: E_c 为混凝土弹性模量; μ_c 为混凝土泊松比; t_c 为混凝土厚度; $P_{c,\max}$ 为混凝土最大支护力; σ_{cc} 为喷射混凝土材料的单轴抗压强度。

(2) 锚杆支护

锚杆刚度系数 K_b 的表达式为:

$$K_b = \frac{1}{s_c s_1 \left[\frac{4l_b}{\pi d_b^2 E_b} + Q \right]} \quad (7)$$

$$P_{b,\max} = \frac{T_{bf}}{s_c s_1} \quad (8)$$

式中: s_c 为锚杆的环向间距; s_1 为锚杆的纵向间距; l_b 为锚杆长度; d_b 为锚杆直径; E_b 为锚杆弹性模量; Q 为与锚杆体、垫板、锚头的受力变形特征有关的常数; $P_{b,\max}$ 为锚杆最大支护力; T_{bf} 为锚杆极限强度。

(3) 钢拱架支护

在不考虑木垫块的情况下, 根据 Oreste^[13] 提出的公式, 钢拱架刚度系数 K_s 的表达式为:

$$K_s = \frac{E_s A_s}{s \left(r_0 - \frac{h}{2} \right)^2} \quad (9)$$

$$P_{s,\max} = \frac{\sigma_{st,y} A_s}{s \left(r_0 - \frac{h}{2} \right)} \quad (10)$$

式中: E_s 为钢材弹性模量; A_s 为钢拱架横截面面积; s 为钢拱架的纵向间距; $P_{s,\max}$ 为钢拱架最大支护力; h 为钢拱架横截面高度; $\sigma_{st,y}$ 为钢材的抗压强度。

(4) 组合式支护

组合式支护结构的总刚度等于各支护构件刚度之和:

$$K = \sum_i K_i \quad (11)$$

式中: K_i 为各支护的刚度系数。

当采用上述 3 种支护形式构成组合支护时, 刚度系数的计算公式为:

$$K = K_c + K_b + K_s \quad (12)$$

组合支护结构变形量 $u_{\max,tot}$ 的计算公式为:

$$u_{\max,tot} = \min \{ u_{c,\max}, u_{b,\max}, u_{s,\max} \} \quad (13)$$

组合支护结构承载力 $P_{\max,tot}$ 的计算公式为:

$$P_{\max,tot} = K u_{\max,tot} \quad (14)$$

2.4 纵向变形曲线 (LDP)

Hoek 等^[14] 在 J. C. Chern 等^[15] 的基础上, 采用最佳拟合方法处理 Mingtam 地下水电站现场实测数据, 得到位移释放系数 u^* 关系式:

$$u^* = \frac{u_0}{u_{\max}} = \left[1 + \exp \left(- \frac{x}{1.1 R_0} \right)^{-1.7} \right] \quad (15)$$

式中: u^* 为应力释放率系数; x 为支护结构距开挖面距离。

3 开挖面空间效应理论与初期支护时机判据选择

3.1 开挖面空间效应分析

隧道开挖可以看作是一个由空间和时间组成的四维变化问题。开挖面周围的岩体主要受到两个方向的空间约束效应影响, 纵断面方向上的“半圆穹”约束和横断面方向上的“环形”约束^[16]。围岩的压力释放不是瞬间完成的, 而是一个逐渐进行的过程。两种约束方式相互作用, 使开挖面附近的无支护围岩能够在较长时间内保持相对稳定。

由图 3 可知, 在开挖面前方, 由于隧道的开挖, 扰动了开挖面附近的围岩, 造成一定的位移, 释放了一部分应力; 在开挖面位置, 围岩压力迅速释放, 产生较大变形, 受到空间效应影响, 围岩变形未能达到最大值; 在开挖面后方较远处, 空间效应基本消失, 围岩压力由围岩与支护结构共同承受, 变形最终趋于稳定并达到最大值。

总的来说, 随着开挖面的推进, 围岩受到开挖

扰动和应力重新分布的作用，导致径向位移的发生，径向位移值与距开挖面距离密切相关，形成开挖面空间效应。

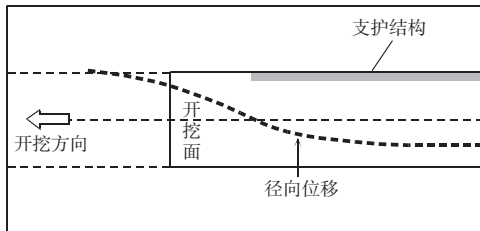


图3 隧道开挖支护空间效应示意图
Fig.3 Schematic diagram of spatial effect in tunnel excavation support

3.2 最佳支护时机判别

通过分析不同应力释放率下的围岩稳定性，基于应力释放率确定最佳支护时机。建立二维数值模型，模拟隧道开挖过程，计算不同应力释放率（ $\lambda = 0 \sim 100\%$ ）下围岩的应力和位移状态，绘制 GRC 曲线。通过数值模拟得到围岩位移增量变化曲线，当位移增量曲线出现陡增点时，表明围岩的位移已经接近极限状态，此时需要及时地进行初支来控制围岩变形和防止围岩失稳。

将应力释放率与空间效应相结合，建立三维隧道数值模型，得到监测断面和开挖面之间距离与围岩位移之间的关系，绘制 LDP 曲线。LDP 曲线和 GRC 曲线之间存在共同的变量即围岩位移，建立 LDP 曲线和 GRC 曲线之间的对应关系，利用这种关系将二维空间中的应力释放率映射到三维空间中的支护与开挖面的控制距离。当围岩位移出现陡增点时，所对应的应力释放率可作为最佳支护时机判定依据^[17]。

4 支护结构安全性评价方法

在隧道施工中，应避免支护结构出现塑性屈服，因为支护结构发生屈服后其力学性能下降。为保证施工安全，支护需具备足够的安全储备和变形控制能力。支护结构安全性可从其承载力和隧道洞周极限位移值两个指标进行综合评价。

(1) 支护结构承载力定义安全系数：

$$F_s = \frac{P_{\max}}{P_{eq}} \quad (16)$$

式中： F_s 为安全系数。

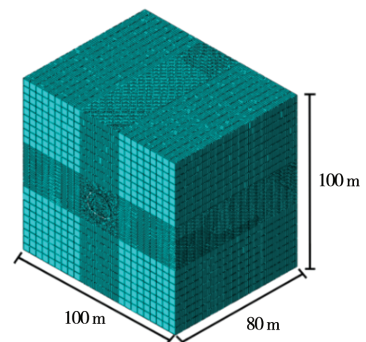
(2) 洞周变形量定义安全系数：

$$F_s = \frac{u_{el} - u_0}{u_{eq} - u_0} \quad (17)$$

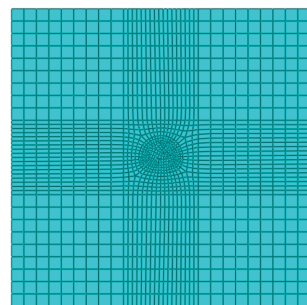
5 施工三维数值仿真力学响应分析

5.1 计算模型建立和参数选取

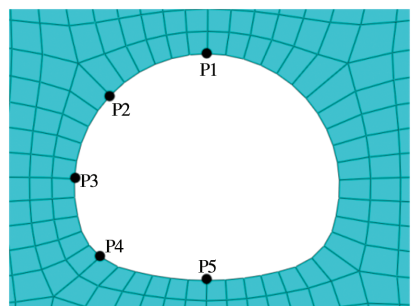
结合试验段工程背景，采用通用有限元分析软件 Abaqus 建立三维数值模型，对台阶法开挖过程进行动态模拟。模型底部设置固定约束，四周设置法向位移约束，顶部为自由面。模型尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ ，在模型顶部施加 15 MPa 竖向均布荷载模拟上覆岩层自重应力，如图 4 所示。



(a) 隧道三维模型图



(b) 隧道二维模型图



(c) 监测点布置

图4 数值计算模型

Fig.4 Numoral calculation model

道桥技术

根据 TB10003—2016《铁路隧道设计规范》确定计算模型围岩及支护结构材料参数,见表1。

表1 数值计算围岩及支护力学参数

Table 1 Numerical determination of mechanical parameters for the surrounding rock and support

材料	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	E/GPa	μ	c/MPa	$\varphi/(\text{°})$
IV级围岩	23.0	6	0.35	0.7	39
C30 喷混	23.6	28	0.20		
$\phi 22$ mm 锚杆	78.0	210	0.30		
I20a 型钢	78.0	210	0.30		

5.2 围岩特征曲线分析

对于围岩特征曲线,采用反向荷载释放法在 Abaqus 有限元软件中建立二维平面模型实现,如图4(b)所示。隧道开挖后立即对洞壁施加虚拟支护力,随后减小虚拟支护力,同时监测隧道的径向位移。每次减小一定量值的支护力,直到虚拟支护力完全消失,此时径向位移达到最大值。在这个过程中,每一次调整都可以得到一个新的围岩特征点,将这些特征点连接起来就可以得到围岩特征曲线。建立二维平面模型,单元类型为 CPE4,自重应力场作为初始应力场,设定侧压力系数 K 为 1,采用表1的围岩力学参数。

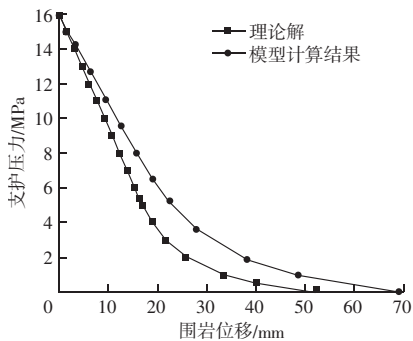


图5 数值计算与理论公式围岩特征曲线对比图

Fig. 5 Comparison chart for of ground response curves from numerical calculation and theoretical formula

以拱顶为特征点绘制围岩特征曲线,如图5所示。数值解与理论解之间存在一定的差异,可能是由模型大小的限制、边界条件的设定以及计算方法的精度等因素影响到数值解的准确性。数值模拟结果与理论预测结果接近,两者之间的差异在可接受的范围内,进一步证明了数值模型的准确性。

5.3 围岩纵剖面变形曲线分析

选取隧道纵向中间断面为研究对象,以拱顶处为关键点提取数据,绘制纵断面变形曲线,通过分析该曲线研究开挖面空间约束效应。将数值计算结

果与 Hoek 关系式进行对比,并对纵向先期位移进行预测。以位移释放系数为纵坐标,距开挖面距离为横坐标,如图6所示。

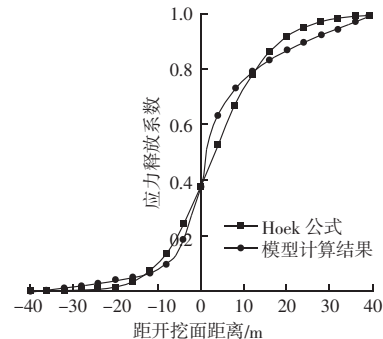


图6 数值计算与 Hoek 公式围岩纵向变形曲线对比图

Fig. 6 Comparison of longitudinal deformation profiles of surrounding rock from numerical calculation and Hoek's formula

Hoek 曲线与隧道三维计算模型进行了对比,数值计算结果与 Hoek 曲线总体呈“S”形分布,但两者之间存在一定的差异,特别是与开挖面相距 $2R$ 处,这可能是由于实际工程条件的复杂性所引起的。在开挖面前方一定范围内,围岩变形受到空间约束效应的影响较大。随着仰拱的封闭,围岩变形逐渐趋于稳定。对于纵向先期位移预测,计算结果表明 Hoek 经验公式的预测结果为 38.00%,而数值计算结果为 37.60%,两者吻合较好。

5.4 不同应力释放率下围岩位移增量分析

建立隧道二维数值模型,将开挖部分的围岩一次性移除,通过施加虚拟支护力来模拟应力释放的过程,计算得到应力与围岩位移之间的关系,绘制 GRC 曲线。每次将虚拟支护力释放 10%,记录监测点的位移值,并计算相邻状态间的位移差值,得到围岩应力释放率与位移增量的关系曲线。当位移增量曲线出现陡增点时,表明围岩位移已经发生了显著变化。以围岩位移变化速率作为稳定性评价指标,对围岩在不同应力释放率下的稳定性进行评价。

图7给出了IV级围岩在高地应力条件下,洞周各监测点的位移增量与应力释放率之间的变化情况。在应力释放率小于 70% 时,围岩位移增量近似水平直线;而在应力释放率大于 70% 之后围岩位移增量迅速增大,表明围岩已经进入明显的塑性屈服阶段,此时应采取支护措施。

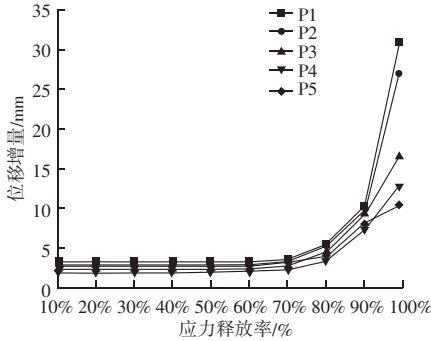
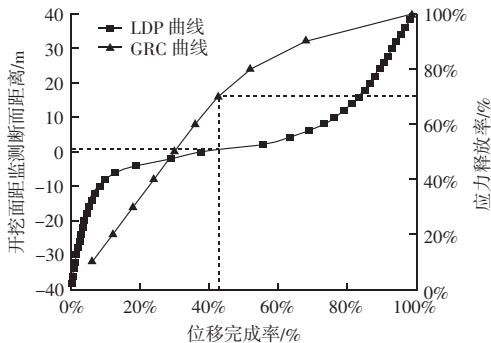


图7 监测点位移增量

Fig. 7 Displacement increment at monitoring points

5.5 基于 LDP 和 GRC 曲线的支护时机确定

根据 LDP 曲线和 GRC 曲线的对应关系，建立起应力释放率、监测断面与开挖面距离以及位移完成率三者之间的联系，可以确定隧道的最佳支护时机。定义位移完成率作为评价开挖面空间效应的参数，位移完成率是指距开挖面一定距离处某点围岩变形与最大变形之比，以位移完成率为同一因变量。将 LDP 曲线和 GRC 曲线绘制在同一坐标系中，找到应力释放率相同的对应点进行分析。由图 8 可知，最佳支护时机所对应的的应力释放率为 70% 时，相应的位移完成率为 43%，即最佳支护时机为滞后开挖面 0.8 m。

图8 LDP 与 GRC 耦合曲线
Fig. 8 Combined LDP and GRC

5.6 支护结构安全性分析

隧道宽度为 14.76 m、高度为 12.64 m，采用等代圆半径计算方法^[18]求得等价圆半径 $R_0 = 6.85$ m。根据图 6 和式 (15) 得到隧道拱顶的最终位移 $u_{R,max} = 69.17$ mm，开挖面处位移释放系数 $u^* = 0.376$ ，拱顶处初始位移 $u_0 = 26.01$ mm。选用 C30 喷射混凝土，喷射厚度 t_c 为 27 cm，单轴抗压强度 $\sigma_{cc} = 28$ MPa，锚杆极限强度 $T_{lf} = 0.196$ MN，型钢钢

架截面面积 $A_s = 3.5578 \times 10^{-3}$ m²；钢拱架高度 $h = 0.20$ m；钢材的抗压强度 $\sigma_{st,y} = 300$ MPa。根据式 (4) ~ (14)，各支护单元支护刚度和支护压力结果见表 2。

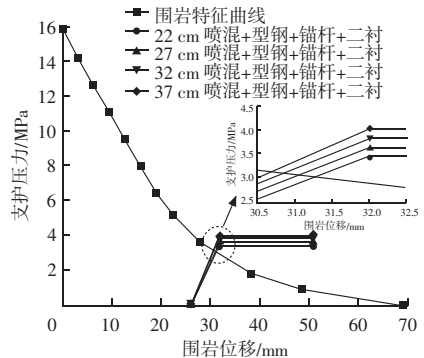
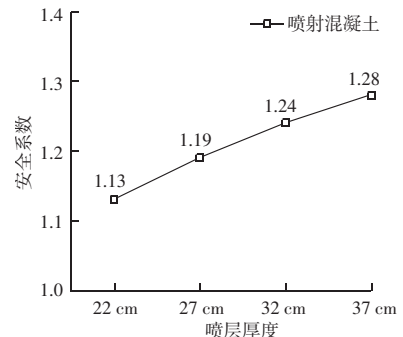
表2 支护特征曲线计算结果

Table 2 Calculation results of the support characteristic curve

支护类型	$K/(MPa/m)$	P_{max}/MPa	$(u_{el} - u_0)/mm$	u_{max}/mm
喷射混凝土	172.87	1.08	6.26	25.86
锚杆	7.06	0.14	19.28	41.78
型钢钢架	16.40	0.16	9.64	43.39
二衬钢筋混凝土	410.40	2.46	6.00	24.91
组合支护	606.73	3.64	6.00	24.91

5.6.1 喷混凝土厚度对支护结构承载力影响分析

在保持型钢钢架和锚杆参数不变的条件下，逐渐增加喷射混凝土厚度，结合围岩 - 支护曲线，研究喷射混凝土厚度对组合支护结构承载力和安全系数的影响规律。如图 9、10 所示，随着喷射混凝土厚度的增加，其组合支护结构的支护力和安全系数也随之提高。

图9 不同喷层厚度组合支护与围岩特征曲线
Fig. 9 Support characteristic curves with different shotcrete thickness图10 不同喷层厚度组合支护结构安全系数图
Fig. 10 Plot of safety factor for support structures with different shotcrete lining thickness

道桥技术

以喷混厚度 $t_c = 27$ cm 为例, $u_0 = 26.01$ mm, $u_{eq} = 31.06$ mm, $u_{el} = 32.01$ mm, $P_{eq} = 3.03$ MPa, $P_{max} = 3.64$ MPa, 拱顶位置安全系数计算如下:

$$F_s = \frac{3.64}{3.03} = 1.20 \quad (18)$$

$$F_s = \frac{32.01 - 26.01}{31.06 - 26.01} = 1.19 \quad (19)$$

采用有限元方法绘制围岩不同位置的围岩特征曲线与支护特征曲线, 以 $t_c = 27$ cm 为例绘制如图 11 所示的支护结构安全系数分布图。总体来看, 支护结构满足承载力要求, 最小安全系数 1.19 位于拱顶处, 施工时予以关注。

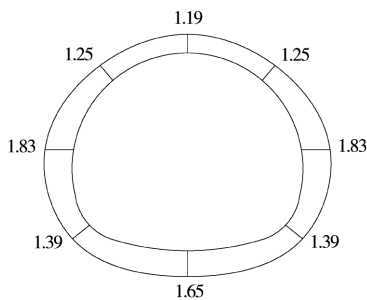


图 11 喷混厚度 27 cm 组合支护安全系数分布

Fig. 11 Distribution of safety factor for the composite support with a 27 cm-thick shotcrete lining

5.6.2 型钢间距对支护结构承载力影响分析

在保持喷射混凝土和锚杆参数不变的情况下, 逐渐增加钢架间距, 结合围岩-支护曲线, 研究钢架间距对组合支护结构承载力和安全系数的影响规律。

如图 12、13 可知, 随着钢架间距的增加, 其组合支护结构的支护力和安全系数反而降低, 并且钢架间距对支护结构承载力影响不大。

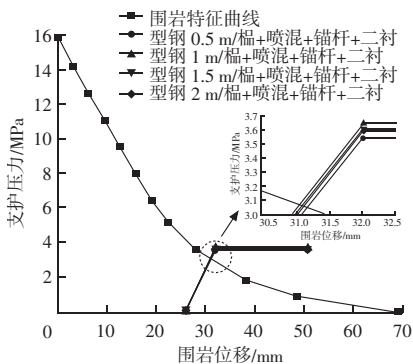


图 12 不同钢架间距组合支护与围岩特征曲线

Fig. 12 Characteristic curve of support with different steel set spacing combinations and the surrounding rock

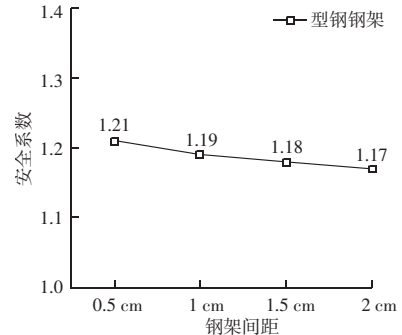


图 13 不同钢架间距组合支护结构安全系数图
Fig. 13 Plot of safety factor for support structure with different steel set spacing combinations

当钢架间距为 2 m 时, $u_0 = 26.01$ mm, $u_{eq} = 31.13$ mm, $u_{el} = 32.01$ mm, $R_{eq} = 3.04$ MPa, $P_{max} = 3.59$ MPa, 拱顶位置安全系数计算如式 (20)~(21) 所示。

$$F_s = \frac{3.59}{3.04} = 1.18 \quad (20)$$

$$F_s = \frac{32.01 - 26.01}{31.13 - 26.01} = 1.17 \quad (21)$$

同理采用有限元方法绘制围岩不同位置的围岩特征曲线与支护特征曲线, 以钢架间距 2 m 为例绘制如图 14 所示的支护结构安全系数分布图, 支护结构最小安全系数为 1.17 位于拱顶处。钢架间距较小时, 有利于支护压力的提高及对隧道围岩变形的有效控制, 可避免隧道开挖卸荷而导致冒顶或大变形破坏。在相同型钢强度条件下, 不同间距的钢支架的最大变形量及弹性变形量保持不变。

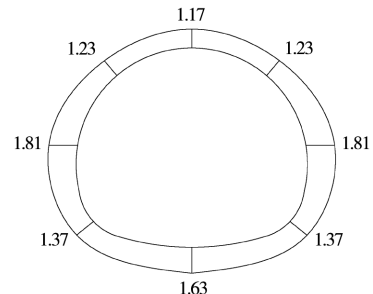


图 14 型钢间距 2 m 组合支护安全系数分布
Fig. 14 Distribution of safety factor of combined support with 2 m steel section spacing

6 结论

以极高地应力隧道为工程背景, 借助有限元软件 Abaqus, 进行隧道开挖过程中支护结构对于稳定性影响的数值模拟, 得出支护结构安全系数, 在此

基础上结合收敛 - 约束法评价支护结构的安全性, 得到以下主要结论:

(1) 得到极高地应力状态下隧道纵剖面变形曲线、围岩特征曲线, 数值模拟结果与理论解结果基本吻合, 误差在可接受范围内。

(2) 位移增量随着应力释放率的增大而增加; 当应力释放率达到一定的程度时, 位移的增量陡增, 陡增点是施加支护的最佳时机。当应力释放率达到 70% 时, 拱顶的位移增量会明显提升, 此时对应断面位于开挖面后方 0.8 m 的位置, 应在滞后于开挖面 0.8 m 开始施作支护。

(3) 随着喷射混凝土厚度的增加, 支护刚度和支护压力逐渐增大; 随着型钢拱架间距的增加, 其提供的支护刚度和支护压力逐渐减小。

(4) 施工与运营期间应防止支护结构出现塑性屈服, 从支护结构承载能力与围岩洞周变形两个方面对支护结构进行安全性评价。两种方法获得的安全系数较为接近, 均可用于支护结构优化设计中。

(5) 采用极限承载力和极限位移对围岩和初支进行安全性评价, 得到喷混厚度 27 cm 和型钢间距 2 m/榀两种工况所对应的拱顶处安全系数分别为 1.19、1.17, 支护系统安全储备高, 但仍需在薄弱部位加强。

参 考 文 献

- [1] 田四明, 王伟, 杨昌宇, 等. 中国铁路隧道 40 年发展与展望 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (11): 1903 - 1930.
- [2] AN X X, HU Z P, SU Y, et al. Initial support distance of a non-circular tunnel based on convergence constraint method and integral failure criteria of rock [J]. Journal of Central South University, 2022, 29 (11): 3732 - 3744.
- [3] LI Z, XU H Y, WANG Z J. Analytical solution for interaction between tunnel surrounding rock and supports in red sandstone stratum [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023: 3732 - 3744.
- [4] 蒋长伟, 陈子全, 汪波, 等. 深埋高地应力隧道不同支护时机求解方法对比研究 [J]. 隧道建设 (中英文), 2023, 43 (1):

119 - 130.

- [5] 苏凯, 张妍珺, 伍鹤皋, 等. 隧洞开挖过程中围岩安全系数演化特征与支护时机选择方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (增刊 1): 2964 - 2975.
- [6] 邵珠山, 李希, 赵南南, 等. 高地应力软岩隧道初期支护优化研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17 (5): 99 - 105.
- [7] 仇文革, 孙克国, 王立川, 等. 基于围岩稳定性的大断面隧道初期支护优化 [J]. 土木工程学报, 2017, 50 (增刊 2): 8 - 13.
- [8] 李树忱, 晏勤, 谢璨, 等. 膨胀性黄土隧道钢拱架 - 格栅联合支护力学特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (2): 446 - 456.
- [9] 于富才, 张顶立, 房倩, 等. 高强钢筋格栅混凝土组合支护特性的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2015, 48 (9): 104 - 111.
- [10] 孙闯, 惠心敏, 贾宝新, 等. 大断面隧道软弱围岩 - 支护系统稳定性分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35 (3): 359 - 364, 424.
- [11] 扈世民, 张顶立, 李鹏飞, 等. 大断面黄土隧道初期支护适应性研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (增刊 2): 660 - 665.
- [12] 谭忠盛, 喻渝, 王明年, 等. 大断面黄土隧道中型钢与格栅适应性的对比试验 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31 (4): 628 - 633.
- [13] ORESTE P P. Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence - confinement approach [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18 (4): 347 - 363.
- [14] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34 (8): 1165 - 1186.
- [15] CHERN J C, SHIAO F Y, YU C W. An empirical safety criterion for tunnel construction [C] // Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering. Taipei: [s. n.], 1998: 222 - 227.
- [16] 孙钧, 朱合华. 软弱围岩隧洞施工性态的力学模拟与分析 [J]. 岩土力学, 1994, 15 (4): 20 - 23.
- [17] 张子龙, 姜谟男, 吴洪涛, 等. 基于收敛 - 约束法和 ZSI 的隧道初期支护时机研究 [J]. 公路工程, 2020, 45 (4): 41 - 47, 73.
- [18] 苏永华, 刘少峰, 王凯旋, 等. 基于收敛 - 约束原理的地下结构稳定性分析 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36 (11): 2002 - 2009.