

隧道偏压控制的数学模型与优化处理措施

陶焱^{1,2} 黄海^{1,2} 余翼^{1,2} 刘谦^{1,2}

1. 湖南交通国际经济工程合作有限公司, 湖南长沙 410004

2. 湖南省道路与轨道交通绿色建造与数智运维工程技术研究中心, 湖南长沙 410004

摘要: 隧道偏压源于初始地应力与开挖扰动叠加的周向非对称分配, 易致衬砌偏心受压及局部拉应力集中。依托某高陡边坡隧道工程, 研究从机制识别、模型构建与措施优化展开, 基于弹性力学建立非对称初始地应力模型, 引入偏压系数表征两侧水平应力差异, 采用莫尔-库仑理论分析塑性区偏心外扩特征, 在FLAC3D中实现数值模拟并评估优化措施。优化前临空侧拱腰应力3.8MPa、背山侧1.9MPa, 衬砌变形18.6mm, 采取综合措施后应力降至2.3MPa, 变形收敛至8.2mm, 降幅达39.5%与55.9%, 类似案例验证策略有效性。

关键词: 隧道偏压; 初始地应力非对称; 莫尔-库仑; 塑性区; FLAC3D

DOI: 10.64649/zh.shfzykcx.issn3078-8994.202605003

0 引言

山区高速隧道常穿越高陡边坡等地段, 围岩侧向约束不均易形成偏压环境, 偏压与开挖卸荷、支护时序及软弱带叠加时, 结构受力偏离对称设计, 诱发拉应力放大、反力不均等问题, 威胁运营安全^[1]。现有偏压治理多为局部加强或经验调整, 缺乏从初始地应力到支护耦合的统一框架, 措施针对性不足。因此需在典型隧道背景下构建初始应力模型, 揭示塑性区扩展机理, 嵌入数值模拟以支撑工法与支护优化, 为设计施工提供依据^[2]。

1 隧道偏压的形成机制研究

隧道偏压是指围岩荷载及支护受力在断面周向呈现非对称分配的状态, 其本质来源于初始地应力场与开挖扰动场的叠加失衡, 时间维度上分为初始偏压(与开挖前非对称应力环境相关)和长期偏压(由蠕变变形、地下水演化及支护刚度时变导致); 空间与成因维度中, 顺坡偏压见于高陡边坡或半山地地形(坡体自重侧向分量推挤围岩), 侧向偏压受软硬岩互层、断层偏置等地质不均影响, 不均匀沉降偏压则因地表堆载、洞口回填不均及软弱夹层压缩导致拱部位移与内力偏向, 某高速隧道穿越高陡山坡时, 洞身一侧临陡坡自由面、另一侧受完整山体约束, 初始应力释放路径与围岩松弛范围差异明显, 若台阶法开挖长度控制不当, 易放大偏压, 引发衬砌偏心受压、局部拉应力增大及拱脚反力不均等风险, 影响结构耐久性与运营安全。

2 隧道偏压控制的数学模型构建

2.1 基于弹性力学的初始地应力分布模型

为明确隧道偏压的力学根源并提供可计算初始条件, 本节将初始地应力场视为自重应力

与地形约束共同作用的弹性应力状态, 围岩假设为连续、均质小变形弹性介质, 结合高速公路隧道穿越高陡山坡场景, 隧道一侧临坡面自由边界、另一侧受山体约束, 导致同一埋深水平约束差异, 使洞身两侧水平应力不对称, 偏压以初始应力非对称形式存在于开挖前边界条件中。围绕该思路, 先把埋深方向的自重效应写成垂直地应力, 并把侧向约束效应折算为与垂直应力成比例的水平地应力, 再引入偏压系数来描述临空侧与背山侧水平应力幅值的不均衡程度, 相关非对称分配关系见图1。

$$\sigma_v = \gamma \cdot H$$

其中, σ_v 表示垂直地应力(单位: MPa), γ 为围岩重度(单位: kN/m^3), H 为隧道埋深(单位: m)。

$$\sigma_h = K_0 \cdot \gamma \cdot H$$

其中, σ_h 表示水平地应力(单位: MPa), K_0 为侧压力系数(无量纲), γ 为围岩重度(单位: kN/m^3), H 为隧道埋深(单位: m)。

在图1所示的非对称架构中, 把背山侧水平应力记为 $\sigma_{h,b}$ 、临空侧水平应力记为 $\sigma_{h,f}$, 并把偏压系数 λ 定义为 $\lambda = \sigma_{h,b} / \sigma_{h,f}$, 其物理含义是地形导致的侧向约束差异被等效为水平应力幅值之比; 当 λ 偏离1时, 洞周初始应力的主压方向会向约束更强的一侧偏转, 衬砌受力也更可能表现为偏心受压。结合该高速公路隧道的实际埋深剖面, 可把各里程处的 H 代入上述公式得到沿纵向变化 σ_v 的与基准 σ_h , 再凭借坡面自由边界的影响对临空侧取较小的等效侧压力系数并据此反算 λ 的空间分布, 从而为后续偏压数值计算提供与地形条件一致的初始地应力输入。

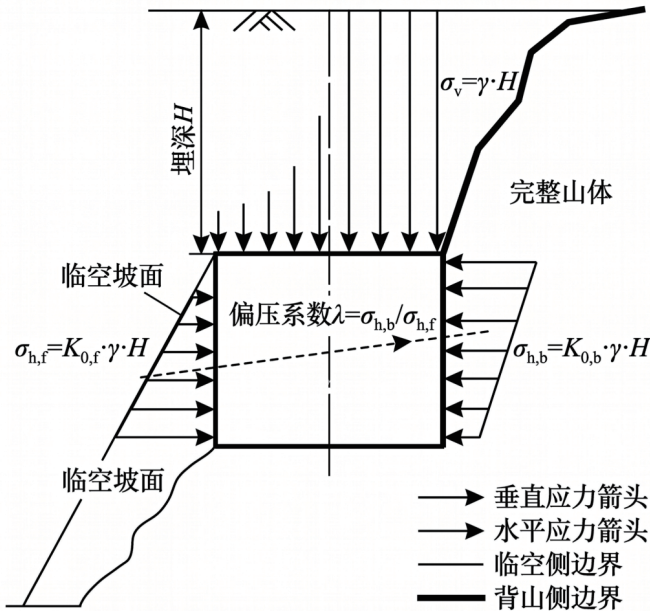


图1 初始地应力非对称分布架构图

2.2 基于弹塑性理论的围岩塑性区分析模型

围岩在偏压工况下的非对称松弛与局部剪切破坏难以用纯弹性假定刻画，因此本节将开挖后洞周应力重分布视为弹塑性演化过程，采用莫尔-库仑屈服准则判别围岩塑性状态，结合2.1节水平应力非对称输入，临空侧因侧向约束衰减易出现拉张诱发的剪切屈服，背山侧主压方向偏转形成集中剪应力带，使塑性区呈偏心外扩形态，塑性区半径不再用轴对称解单一取值，而是将洞周分方位等效侧压折算为控制参数，让塑性边界随方位角连续变化，临空侧取更大外扩修正幅度以反映自由面卸荷强化与强度折减效应。

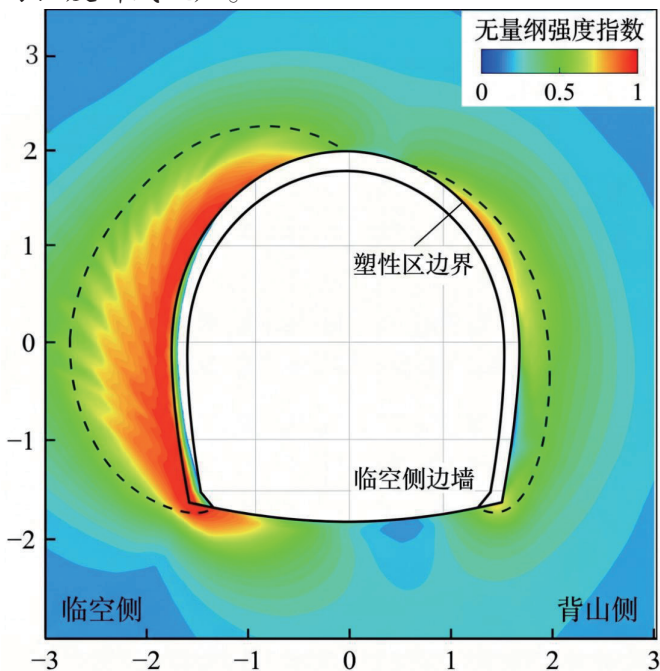


图2 围岩塑性区分布热力

围岩参数依托该高速隧道岩性组合，泥岩与砂岩赋予差异化黏聚力、内摩擦角及弹塑性模量，泥岩段偏压叠加时更早触及屈服面，砂

岩段塑性区受限且边界梯度更陡，泥岩与砂岩侧向分带时塑性区沿软弱侧贯通，形成拱肩至拱脚连续潜在剪切通道，塑性区空间形态用热力图表达强弱分区，图2高值区集中在临空侧拱肩与边墙，向背山侧过渡热度衰减边界平顺，为后续支护刚度分配与偏压控制参数化设计提供力学指向。

2.3 基于有限元的偏压数值模拟模型

为将初始地应力非对称输入与围岩弹塑性松弛过程融入可复现计算流程，本节用FLAC3D构建隧道偏压数值模型，将围岩与支护体系离散为单元与节点组成的连续体，通过整体刚度矩阵方程求解节点位移，回算单元应力与塑性状态，转化偏压下变形偏向与受力重分布为可对比空间响应；模型几何以高速隧道典型断面为核心外扩至足够边界距离，降低边界反力干扰，坡面侧自由边界，背山侧施加侧向位移约束等效山体围束效应，竖向边界约束水平位移、底部约束竖向位移，与2.1节约束差异一致。

初始应力场通过重力加载生成竖向应力，将不同侧压力系数映射到左右单元区域，嵌入偏压系数的非对称性；围岩采用莫尔-库仑弹塑性模型，泥岩与砂岩分区赋值黏聚力、内摩擦角等参数，衬砌与初期支护以壳单元或等效结构单元表达刚度，锚杆以结构单元体现拉拔约束；开挖按台阶法分部卸荷，支护施作时机分步激活纳入计算，反映支护时序对偏压的影响；对比工况中，优化前保持原参数与步距，优化后调整临空侧支护刚度与封闭速度，背山侧保留变形空间，观察结构偏心受压与拱脚反力差异的响应路径，为后续控制措施参数化选取提供依据^[3]。

3 隧道偏压的综合优化处理措施

3.1 隧道偏压的工程设计与施工优化措施

隧道偏压的综合优化宜将结构非对称承载与工法非对称卸荷协同纳入同一控制链条，针对高速公路隧道临空侧自由面、背山侧围束强的地形约束，设计阶段将二次衬砌由对称配筋调整为非对称衬砌，临空侧厚度增加50mm，以受拉控制为主配置HRB400 φ25mm钢筋网，提高抗裂储备并抑制拉应力集中；同时加密临空侧初支与二衬的环向连接，使附加弯矩连续扩散，结合陡坡段轴线布设，适度偏移隧道轴线并优化纵坡与超高衔接，增加临空侧覆土厚度，缓和应力松弛效应，控制偏压系数波动。

施工阶段为减少临空侧二次扰动，将台阶法改为双侧壁导坑法，通过临时承载细化卸荷路径，减弱内力突变；配置8m长预应力锚杆并前移张拉时机，让围岩在塑性扩展前获得约束，考虑破碎带与渗水影响，采用水灰比0.5:1的超细水泥在临空侧拱肩至边墙分段注浆，形

成连续加固体，降低渗透连通性，将偏压控制转化为围岩与支护共同受力的复合模式。

3.2 隧道偏压控制效果的评估与验证

偏压控制效果评估需将围岩与结构响应的非对称性转化为可对比指标，并关联施工时序关键控制点，针对本高速隧道临空侧拱腰水平应力高、二衬收敛变形大的偏压特征，本节选取洞周主应力峰值、左右侧应力差及二衬最大变形为核心评价量，且对齐监测断面与数值计算的坐标基准以减少偏差；优化前临空侧拱腰应力 3.8MPa、背山侧 1.9MPa，显示偏压荷载易

向自由面侧聚集，二衬变形 18.6mm，反映初支封闭滞后与围岩松弛的叠加效应，采用双侧壁导坑法、增强临空侧支护刚度及注浆加固后，最大主应力降至 2.3MPa，变形收敛至 8.2mm，偏心受压趋势减弱。引入同类型隧道验证，优化前右侧拱肩应力 3.2MPa、左侧 1.6MPa，变形 15.7mm，经相同策略调整后应力降至 2.0MPa、变形 6.5mm，说明综合优化对降低偏压有稳定效果，且对变形控制更敏感，表 1 汇总两座隧道优化前后关键指标，可为偏压段落工法选择、支护非对称配筋及加固范围参数复核提供依据。

表1 隧道偏压控制效果对比表

工程对象	优化前控制侧与部位最大应力 /MPa	优化前对侧应力 /MPa	优化前最大变形 /mm	优化后最大应力 /MPa	应力降幅 /%	优化后最大变形 /mm	变形降幅 /%
高速公路隧道案例	3.8	1.9	18.6	2.3	39.5	8.2	55.9
类似隧道对比案例	3.2	1.6	15.7	2.0	37.5	6.5	58.6

4 结语

面向高陡边坡邻近自由面的偏压隧道工况，研究将偏压成因分解为初始应力非对称输入与开挖支护扰动放大两类驱动，形成从机理到模型再到控制策略的完整链条；引入偏压系数表征临空侧与背山侧水平应力差异，建立地形适配的初始地应力输入方式，结合莫尔-库仑弹塑性分析明确塑性区偏心外扩趋势及软弱

侧分带与渗水对剪切通道的促进作用，通过 FLAC3D 耦合模拟验证工法与支护非对称调控的必要性；工程对比显示，采用双侧壁导坑法、临空侧支护增强与注浆加固可显著降低应力峰值与衬砌变形，且相近地形案例中效果一致^[4]。偏压控制应以缩小卸荷差异、加快关键部位成环、提高临空侧受力能力为主线，保留必要变形释放避免背山侧次生集中效应^[5]。

参考文献：

- [1] 侯斐斐, 吴柄啸, 罗享寰, 王艳辉, 樊欣宇. 基于小样本学习的探地雷达隧道衬砌病害分类数学模型和计算方法 [J]. 铁道学报, 2025, 47(10): 204-211.
- [2] 韩云娜. 基于优先级的网络链路拥塞自动控制数学建模 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2025, 43(02): 296-302.
- [3] 孙晓磊, 孔德志, 张焕生, 赵男男. 基于虚拟软件的网络流量调度数学模型仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40(05): 417-421.
- [4] 崔巍, 丁志楠, 胡宏昌, 李晓晨, 穆祥鹏, 陈文学, 牛子厚, 雷毓灵. 复杂几何断面输水隧洞明满交替流水动力模拟 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2026, 24(01): 11-19.
- [5] 谢颖斌. 隧道下穿工程施工多源不确定度控制决策研究 [J]. 铁道建筑, 2025, 65(10): 116-123.

作者简介：陶焱（1974.10—），男，汉族，湖南株洲，本科，高级工程师（副研究员级）、一级建造师（公路），研究方向：公路隧道桥梁施工。