

# 明挖隧道支护结构选型与参数优化研究

温倚嘉<sup>1</sup>, 乔慧婷<sup>2</sup>, 张强<sup>3</sup>, 甘斌<sup>3</sup>

(1. 深圳供电局有限公司, 深圳 518000; 2. 中国南方电网有限责任公司电力建设定额站, 广州 510000;  
3. 深圳供电规划设计院有限公司, 深圳 518054)

**摘要:** 明挖隧道支护结构选型与参数优化常面临安全、经济、技术与环境多目标协同的难题, 传统决策方法在IV~V级围岩、埋深8~15 m的复杂工程条件下适用性不足。为此, 以某地下交通联络隧道为背景, 构建涵盖上述四维目标的多目标决策体系, 系统对比土钉墙+喷射混凝土、排桩+内支撑及地下连续墙三类支护方案的应力与变形性能。结果表明: 地下连续墙方案综合性能最优, 稳定阶段拱顶应力为6.2 MPa、拱腰收敛5.9 mm、地表沉降8.3 mm, 较土钉墙方案分别降低50.8%、68.4%与65.8%; 进一步优化其参数, 将墙厚增至650 mm、混凝土强度提高至C35后, 拱顶沉降为7.3 mm、拱腰应力为6.6 MPa, 较优化前分别下降12.0%与8.3%。形成“选型—监测—优化”闭环技术体系, 为复杂地质条件下明挖隧道支护结构设计提供可靠依据, 推动工程建造向精细化与科学化发展。

**关键词:** 明挖隧道; 支护结构选型; 多目标决策; 参数优化; 变形控制

**中图分类号:** TU398 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0128-07

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.020

## Research on Selection and Parameter Optimization of Support Structures for Cut and Cover Tunnels

WEN Yijia<sup>1</sup>, QIAO Huiting<sup>2</sup>, ZHANG Qiang<sup>3</sup>, GAN Bin<sup>3</sup>

(1. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. China Southern Power Grid Co., Ltd., Power Construction Quota Station, Guangzhou 510000, China;

3. Shenzhen Power Supply Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenzhen 518054, China)

**Abstract:** The selection and parameter optimization of support structures for open cut tunnels often face the challenge of multi-objective coordination between safety, economy, technology, and environment. Traditional decision-making methods are not suitable for complex engineering conditions with IV-V surrounding rock and burial depths of 8-15 meters. Therefore, this article takes a underground transportation connection tunnel as the background, constructs a multi-objective decision-making system covering the above four-dimensional objectives, and systematically compares the stress and deformation performance of three types of support schemes: soil nail wall + shotcrete, row pile + internal support, and underground continuous wall. The results showed that the underground continuous wall scheme had the best comprehensive performance, with a stable stage arch crown stress of 6.2 MPa, arch waist convergence of 5.9 mm, and surface settlement of 8.3 mm, which were reduced by 50.8%, 68.4%, and 65.8% respectively compared to the soil nail wall scheme; Further optimizing its parameters, increasing the wall thickness to 650 mm and the concrete strength to C35, the arch crown settlement was 7.3 mm and the arch

**作者简介:** 温倚嘉 (1990—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 电力工程建设管理。

**通信作者:** 张强 (1983—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 电力工程设计。

**收稿日期:** 2025-11-27

waist stress was 6.6 MPa, which decreased by 12.0% and 8.3% respectively compared to before optimization. This study forms a closed-loop technical system of "selection monitoring optimization", providing reliable basis for the design of support structures for open cut tunnels under complex geological conditions, and promoting the development of engineering construction towards refinement and scientificity.

**Key words:** open-cut tunnel; support structure selection; multi-objective decision making; parameter optimization; deformation control

## 0 引言

传统支护结构选型多依赖经验判断或单一目标决策,易出现安全冗余与成本浪费并存、技术适配性不足等问题,难以满足复杂地质条件与多元工程目标的协同要求<sup>[1-2]</sup>。因此,构建科学的选型体系与优化路径,实现支护结构安全性、经济性与施工可行性,已成为明挖隧道工程领域亟待解决的关键问题,具有重要的工程实践价值与理论研究意义。

目前学界围绕隧道支护结构的受力特征、优化方法等开展了系列研究。陈家征等<sup>[3]</sup>依托彝良隧道洞口浅埋偏压段,运用 FLAC 3D 软件对比四种支护方案,得出管棚支护控制围岩变形效果最优,管棚与超前小导管联合支护更具经济合理性的结论;黄尹臣<sup>[4]</sup>以 G4216 线王屋岩隧道施工支洞为对象,采用数值模拟与现场实测结合的手段,分析钢架、喷砼等构件承载特性,确定了 IV~V 级围岩下最优喷射混凝土厚度及全环封闭支护的必要性;施泽等<sup>[5]</sup>结合光荣新村 3 号隧道软岩大变形特征,通过围岩宏观分析、试验段监测与方案对比,提出外层护拱预支护与内层工字钢闭合环思路,证实其可有效控制软岩变形并减少中下台阶沉降占比;刘灿阳<sup>[6]</sup>以厦门市芦澳路公路工程为依托,采用施工分析与监控量测结合的方法,研究围护桩与高压旋喷桩、砼支撑与钢支撑等支护体系的质量控制要点,验证了该类组合支护在复杂地质深基坑中的稳定保障效果;梁庆国等<sup>[7]</sup>以偏压黄土连拱掘进隧道为依托,通过现场监测系统分析初支钢拱架应力、二衬钢筋轴力及混凝土应变的时空分布规律,验证了二衬晚施工的可行性,为类似工程设计施工提供参考;杨文民<sup>[8]</sup>针对高应力软岩隧道,基于逆可靠度分析,结合贝叶斯更新与蒙特卡罗-有限元法构建可靠性优化模型,优化得到喷射混凝土、钢拱架及锚杆配

套参数,满足规范要求;田四明等<sup>[9]</sup>从能量守恒视角出发,提出“围岩能量释放-支护能量吸收”匹配的主动支护设计方法,设计长短锚索组合方案,经数值模拟与现场实测验证了其对大变形的控制效果;陈丽俊等<sup>[10]</sup>总结软岩隧道初期支护大变形破坏模式,提出小孔径预应力补强锚索主动加固技术,分析预紧力作用效应,通过工程实践证明其在关键部位补强的快速高效性;靳挺杰等<sup>[11]</sup>通过建立考虑地层非均质特性的二维与三维力学模型,结合极限平衡理论与虚功率原理,系统探究了邻近既有结构条件下隧道开挖的土体破坏机制与支护压力需求。研究推导出隧道支护压力与基础临界基底压力的解析公式,并经由数值模拟验证,理论解与模拟结果误差仅为 2.9%~4.2%,破坏区形态高度一致。研究成果完善了隧道支护设计理论,为实际工程提供了可靠的设计依据与技术指导。马凯蒙等<sup>[12]</sup>针对深埋高铁隧道在 IV 级围岩中的挤压大变形问题,通过数值模拟与现场测试,系统分析了围岩压力、变形与松弛区的演化规律。研究建立了围岩压力-承载区特征曲线,并依托中老铁路会排山隧道验证了其可靠性。王峰等<sup>[13]</sup>以黄角坪隧道为背景,通过数值模拟研究了初支厚度、钢拱架间距及二衬厚度对结构受力的影响;蒋坪临等<sup>[14]</sup>通过解析与数值模拟对比了三种填充方案。研究表明:超挖会使围岩塑性区形状不均,并显著增大支护结构受力,结构对偏压荷载敏感。不同填充方案各具优势,应结合实际工程情况,选择合理的超挖空隙处支护参数以控制不利影响。王子琪等<sup>[15]</sup>研究通过实测与数值模拟,分析了内支撑滞后架设对明挖隧道基坑的影响。

基于此,研究针对 IV~V 级围岩、埋深 8~15 m 的明挖隧道,开展支护结构选型与参数优化研究。通过建立多目标决策指标体系,结合监测验证选型合理性,并对关键参数进行优化,形成“选型-监

# 道桥技术

测-优化”闭环体系, 为该类隧道工程提供理论支撑与参考, 促进精准高效建设。

## 1 工程概况

研究以某核心区地下交通联络明挖隧道工程为例。该隧道全长 2 570 m, 采用拱形断面设计, 净宽 12 m, 净高 6.5 m, 埋深 8~15 m, 主要承担区域交通分流功能。沿线地层以第四系全新统粉质黏土、中粗砂及碎石土为主, 下伏强风化砂岩, 围岩级别为 IV~V 级, 承载力特征值 120~180 kPa, 局部存在软土夹层, 易引发不均匀沉降。隧道周边 50 m 范围内分布 3 栋高层建筑物及多条地下燃气、给排水管线, 施工需严格控制地表沉降 (≤30 mm)、围岩收敛 (≤20 mm)。工程设计执行城-A 级荷载标准, 抗渗等级 P8, 抗震设防烈度 VII 度。原初步设计拟采用土钉墙结合喷射混凝土支护体系, 但受地质复杂性、环境约束及多元目标要求, 需通过系统选型与参

数优化完善设计, 为研究提供真实工程依托与核心约束条件。

## 2 基于多目标决策的支护结构选型分析

### 2.1 隧道支护结构选型与多目标决策方案分析

#### 2.1.1 隧道支护结构选型

结合研究依托工程的地质条件、环境约束及设计要求, 筛选出 3 类明挖隧道常用支护结构作为候选方案: 方案一为土钉墙+喷射混凝土支护; 方案二为排桩+内支撑支护; 方案三为地下连续墙支护, 具体参数见表 1。为探究三种方案对隧道的支护效果, 选取依托工程中 3 个具有代表性的隧道断面, 分别采用上述三种支护方案开展支护设计与现场应力-变形监测, 为后续多目标评估与最优方案筛选构建实测数据基础。分别对应不同的地质与环境特征, 并在各区段中选取一个代表性断面, 分别采用上述三种支护方案进行现场施工与监测。

表 1 各支护方案数据

Table 1 Data of various support schemes

对比指标	土钉墙+喷射混凝土	排桩+内支撑	地下连续墙
核心构造参数	喷射混凝土强度 C25、厚度 8~10 cm; 土钉采用 Φ22 螺纹钢, 长度 6~8 m, 间距 1.5 m×1.5 m; 钢筋网 Φ6@200×200。	排桩采用 Φ800 mm 钢筋混凝土桩, 桩距 1.2 m, 桩长 15~18 m; 内支撑为 Φ609 mm 钢支撑, 竖向间距 3 m。	墙厚 600 mm, 混凝土强度 C30, 墙长 18~22 m; 接头采用锁口管连接, 配 Φ25 主筋@200。
环境影响指标	施工噪声≤78 dB, 土体扰动范围≤2.5 m, 无泥浆污染。	施工噪声≤82 dB, 土体扰动范围≤2 m, 泥浆需专项处理。	施工噪声≤85 dB, 土体扰动范围≤1.5 m, 泥浆处理成本高。

#### 2.1.2 多目标评估方案

多目标评估方案聚焦支护结构关键力学响应与变形特征, 明确以拱顶、拱腰、拱底的应力值及拱顶沉降、拱腰水平收敛、拱底沉降为核心监测指标。应力监测在三类候选方案的对应部位均埋设振弦式应变计, 实时采集施工全过程各截面的压应力与拉应力数据, 精准捕捉支护结构受力峰值与分布规律; 变形监测通过在隧道关键断面布设沉降观测点与收敛测线, 采用水准仪测量拱顶及拱底沉降量, 利用收敛计监测拱腰水平收敛值, 按开挖工序分阶段记录数据。监测数据经异常值剔除与趋势分析后, 结合各方案设计控制标准, 从应力达标率、变形控制效果两方面量化评估安全性能, 具体流程如图 1 所示。

为明确三种支护方案在明挖隧道中的力学响应与变形特征, 制定如下监测方案: 选取依托工程 3 个代表性断面, 每个断面分别对应一种支护方案并布

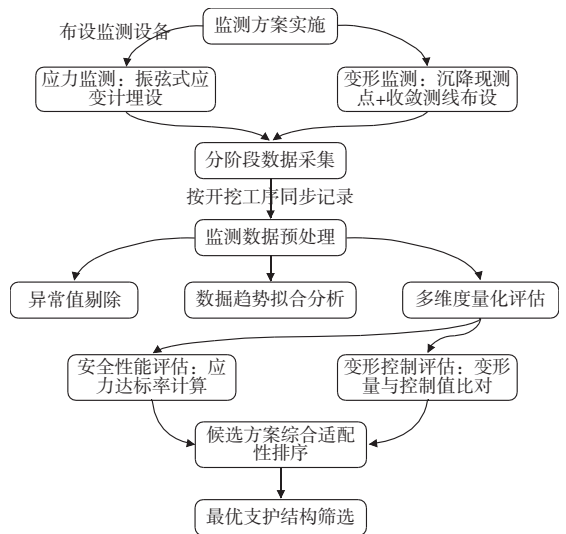


图 1 多目标评估方案流程

Fig. 1 Multi-objective evaluation scheme process

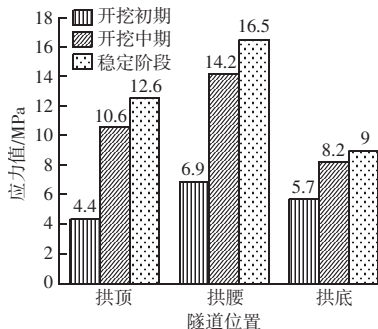
设监测设备。应力监测在拱顶、拱腰、拱底埋设精度≤1% F.S. 的振弦式应变计; 变形监测方面, 布设

3 个沉降观测点与 2 条收敛测线，采用每公里往返中误差  $\leq 0.5 \text{ mm}$  的 DS05 级水准仪及精度  $\leq 0.01 \text{ mm}$  的数显收敛计测量。监测频率按施工阶段动态调整：开挖期每 12 h 一次，掘进 5 m 加密至每 6 h 一次；支护成型后每 24 h 一次，数据稳定后每周一次；异常时每 2 h 一次。监测数据采用  $3\sigma$  准则剔除异常值，结合趋势分析与跨断面比对规范处理，形成完整数据集，满足 GB/T 50308—2017《城市轨道交通工程测量规范》要求，为多目标评估提供可靠支撑。

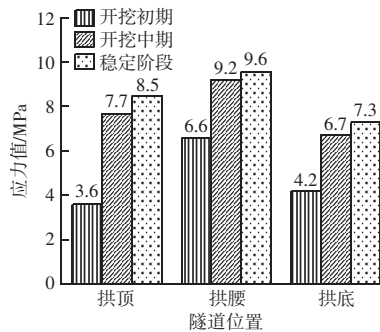
## 2.2 各支护条件下的监测结果分析

### 2.2.1 应力监测结果分析

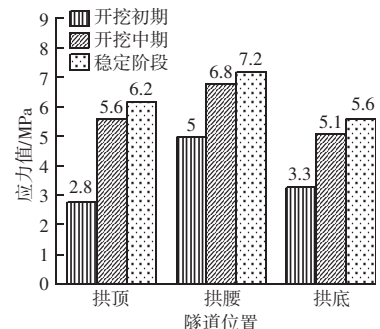
由图 2 可知，土钉墙 + 喷射混凝土支护方案应力监测覆盖了从基坑开挖至支护结构成型稳定的全过程。监测数据显示，各部位应力演化呈现“初期缓慢增长 - 中期快速上升 - 稳定阶段趋于平缓”的特征。拱顶作为主要承载部位，开挖初期（开挖深度  $\leq 5 \text{ m}$ ）因围岩浅部卸荷，平均压应力为 4.4 MPa；随着开挖深度增加，围岩压力持续施加，中期（开挖至设计深度且支护未闭合阶段）平均应力增至 10.6 MPa；支护闭合后的稳定阶段，平均应力进一步发展至 12.6 MPa。该值低于 C25 混凝土的轴心抗压强度设计值 20.1 MPa，处于安全可控范围。拱腰受水平围岩压力集中作用，应力增长最为显著：初期为 6.9 MPa，中期受基坑侧向位移影响骤升至 14.2 MPa，稳定后峰值达 16.5 MPa，接近材料抗压极限，表现出明显的受力集中现象。拱底应力受基底反力作用，初期为 5.7 MPa，中期增至 8.2 MPa，稳定后维持在 9.0 MPa，受力状态相对稳定。综合来看，该方案应力分布不均衡，拱腰为关键控制部位，需关注并考虑局部加强措施。



(a) 土钉墙 + 喷射混凝土支护



(b) 排桩 + 内支撑支护



(c) 地下连续墙

图 2 各种支护形式下隧道各部位的应力值数据图  
Fig. 2 Stress value data chart for various tunnel sections under different support types

排桩 + 内支撑支护方案依托排桩与内支撑的协同承载体系，应力演化规律与土钉墙方案（方案一）存在显著差异，整体呈现“平缓增长 - 稳定收敛”的特征，无明显应力突变。拱顶压应力开挖初期为 3.6 MPa；受排桩竖向约束作用，中期应力增长速率放缓，仅增至 7.7 MPa；支护结构成型稳定后，最终应力为 8.5 MPa，较方案一稳定阶段降低 32.6%。拱腰因内支撑有效分担水平荷载，应力增长较为平缓：初期为 6.6 MPa，中期升至 9.2 MPa，稳定后峰值 9.6 MPa，较方案一降低 41.8%，应力集中现象显著缓解。拱底应力受排桩群桩效应影响，分布更均匀：初期为 4.2 MPa，中期缓慢增至 6.7 MPa，稳定后为 7.3 MPa。监测结果表明，排桩与内支撑的协同作用优化了应力传递路径，使支护结构整体受力更均衡，安全储备较方案一明显提升。

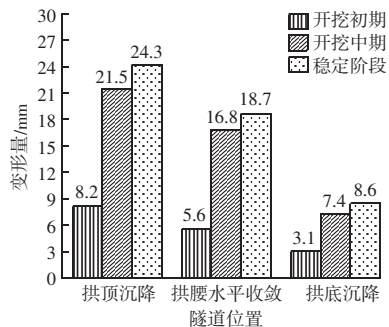
地下连续墙凭借整体性强、刚度大的结构优势，应力监测结果呈现“低峰值、匀分布、缓增长”的显著特征，各部位应力演化均处于平稳可控状态。拱顶应力开挖初期为 2.8 MPa；受连续墙整体承载效应影响，中期应力仅增至 5.6 MPa，稳定后最终为

## 道桥技术

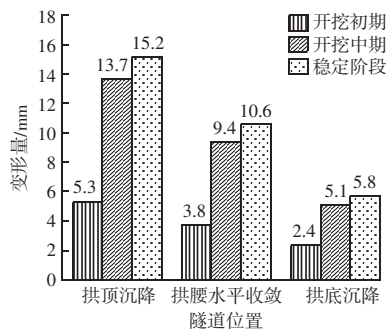
6.2 MPa, 仅为方案一稳定阶段应力值的 49.2%, 远低于 C30 混凝土的轴心抗压强度设计值 23.1 MPa。拱腰应力分布最均匀: 初期为 5.0 MPa, 中期缓慢升至 6.8 MPa, 稳定后峰值 7.2 MPa, 无任何受力集中现象, 体现了连续墙对水平荷载的高效分散能力。拱底应力受墙体整体约束作用, 初期为 3.3 MPa, 中期增至 5.1 MPa, 稳定后为 5.6 MPa; 各阶段应力增长速率  $\leq 0.1$  MPa/开挖步, 应力波动可忽略不计。综合分析表明, 该方案支护结构应力状态最优, 安全储备充足, 完全满足复杂地质条件下的受力要求。

### 2.2.2 变形监测结果分析

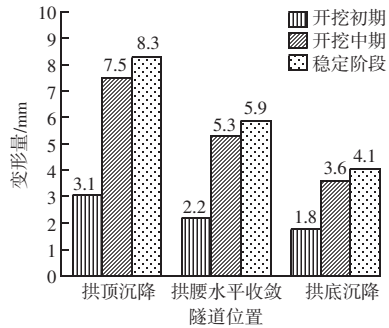
由图3可知, 土钉墙+喷射混凝土支护方案变形监测数据显示, 各监测指标演化呈现“初期缓慢发展-中期快速变形-稳定阶段趋于收敛”的特征, 整体变形量相对较大。拱顶沉降作为核心控制指标, 开挖初期受浅部围岩扰动影响沉降量为 8.2 mm; 随着开挖深度增加, 土钉墙水平约束不足导致中期沉降快速增至 21.5 mm; 支护闭合后沉降速率放缓, 稳定后最终沉降量为 24.3 mm, 未超出 30 mm 的设计控制值。拱腰水平收敛变形最为显著: 初期收敛值为 5.6 mm, 中期受侧向围岩压力作用骤增至 16.8 mm, 稳定后达 18.7 mm, 接近 20 mm 的控制上



(a) 土钉墙 + 喷射混凝土支护



(b) 排桩 + 内支撑支护



(c) 地下连续墙

图3 各种支护形式下隧道各部位的变形数据图  
Fig. 3 Deformation data chart for various tunnel sections under different support types

限。拱底沉降受基底土体压缩影响, 初期为 3.1 mm, 中期增至 7.4 mm, 稳定后维持在 8.6 mm, 变形波动幅度较小。综合来看, 该方案变形控制效果一般, 拱腰水平收敛为关键控制指标, 主要受土钉墙整体刚度不足影响。

排桩+内支撑支护方案依托排桩与内支撑的协同约束作用, 变形演化呈现“平缓增长-稳定收敛”的特征, 无明显变形突变, 整体控制效果优于方案一。拱顶沉降开挖初期为 5.3 mm; 受排桩竖向承载与内支撑水平约束共同作用, 中期沉降增长速率放缓, 仅增至 13.7 mm; 稳定后最终沉降量为 15.2 mm, 较方案一降低 37.4%。拱腰水平收敛因内支撑有效限制侧向位移, 初期收敛值为 3.8 mm, 中期平缓增至 9.4 mm, 稳定后达 10.6 mm, 较方案一降低 43.3%, 变形集中现象显著缓解。拱底沉降受排桩群桩效应与基底加固作用影响, 初期为 2.4 mm, 中期增至 5.1 mm, 稳定后为 5.8 mm, 各阶段变形增长速率仅 0.08 mm/开挖步。监测结果表明, 排桩与内支撑的协同作用优化了变形传递路径, 显著提升了支护结构的变形控制能力, 整体变形处于较低水平。

地下连续墙凭借整体性强、刚度大的优势, 变形监测结果呈现“低变形量、匀分布、缓增长”的显著特征, 各变形指标均处于最优控制状态。拱顶沉降开挖初期为 3.1 mm; 受连续墙整体承载及防渗特性影响下, 中期沉降仅增至 7.5 mm; 稳定后最终沉降量为 8.3 mm, 仅为方案一稳定阶段变形量的 34.2%, 远低于设计控制值。拱腰水平收敛因墙体整

体抗侧移能力突出，初期为 2.2 mm，中期平缓增至 5.3 mm，稳定后达 5.9 mm，无任何变形集中现象，体现了连续墙对侧向位移的高效约束能力。拱底沉降受墙体整体刚度约束及基底应力均匀分布影响下，初期为 1.8 mm，中期增至 3.6 mm，稳定后为 4.1 mm，各阶段变形增长速率  $\leq 0.05$  mm/开挖步，变形波动可忽略不计。综合分析表明，该方案变形控制效果最优，完全满足复杂环境下严格的变形约束要求，安全储备充足。

### 3 支护结构参数优化设计

#### 3.1 参数优化方案

基于试验段的监测结果分析，地下连续墙支护方案虽应力分布均匀、变形控制效果最优，并能适应配工程复杂地质与环境约束，但结合监测数据可

知拱腰为相对受力集中区域。为进一步提升支护结构承载能力，增强安全储备，以适应 IV~V 级围岩的复杂受力特征，需开展针对性参数优化。优化思路为“强化关键部位刚度、提升应力分散能力”，制定如下优化措施：将墙厚增至 650 mm，以增大截面惯性矩，提升抗侧移刚度；混凝土强度等级提升至 C35，增强材料抗压强度以应应力集中；主筋规格保持  $\Phi 25$  不变，间距加密至 180 mm，增强结构抗拉性能与应力传递效率；墙长根据不同埋深优化为 19~23 m，确保锚固端嵌入稳定岩层深度增加，提升整体抗倾覆稳定性。通过上述参数强化，旨在进一步降低各部位应力峰值、抑制变形发展，使支护结构更好地适应围岩压力作用。优化前后关键参数对比详见表 2。

表 2 优化前后参数表格

Table 2 Parameter table before and after optimization

对比指标	优化前	优化后
核心构造参数	墙厚 600 mm，墙长 18~22 m， $\Phi 25$ 主筋@200，C30 混凝土	墙厚 650 mm，墙长 19~23 m， $\Phi 25$ 主筋@180，C35 混凝土
材料性能指标	C30 混凝土轴心抗压强度 23.1 MPa	C35 混凝土轴心抗压强度 26.8 MPa
安全控制目标	拱腰 $\leq 7.5$ MPa	拱腰 $\leq 6.8$ MPa
安全控制目标	拱顶沉降 $\leq 8.5$ mm，拱腰水平收敛 $\leq 6.0$ mm	拱顶沉降 $\leq 7.5$ mm，拱腰水平收敛 $\leq 5.5$ mm

#### 3.2 参数优化结果分析

根据上述优化方案进行隧道支护，并对其进行相同的监测方案，如图 4 所示，优化后地下连续墙支护结构各部位应力水平显著降低，应力分布更趋均衡，结构安全储备大幅提升。从应力变化来看：拱顶压应力开挖初期为 2.4 MPa，较优化前降低 14.3%；中期增至 4.9 MPa，降低 12.5%；稳定后为 5.5 MPa，降低 11.3%，远低于 C35 混凝土的轴心抗压强度设计值。拱腰作为原相对受力集中区域，优化效果突出，初期为 4.5 MPa，中期升至 6.1 MPa，稳定后峰值仅 6.6 MPa，较优化前分别降低 10.0%、10.3%、8.3%，受力集中现象进一步缓解。拱底压应力初期为 2.9 MPa，中期增至 4.5 MPa，稳定后为 5.0 MPa，较优化前分别降低 12.1%、11.8%、10.7%。各阶段应力增长速率均  $\leq 0.07$  MPa/开挖步。结果表明，参数强化有效提升了结构承载能力与应力分散能力，验证了优化方案的科学性。

同时，参数优化后支护结构变形控制效果进一步提升，各监测指标变形量均明显降低，变形稳定性

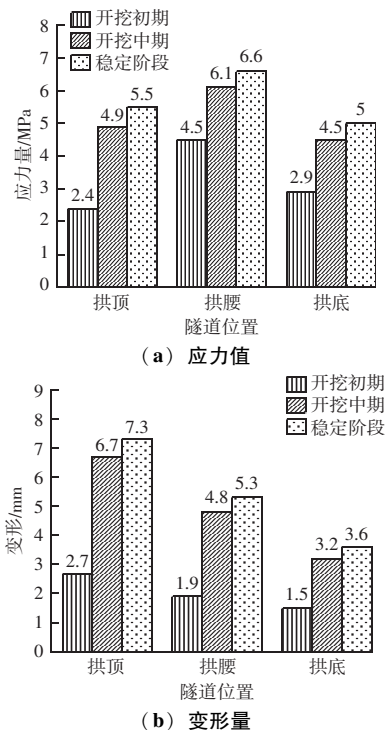


图 4 参数优化后各部位的应力值与变形变化数据图  
Fig. 4 Diagram of stress and deformation variations at different locations after parameter optimization

## 道桥技术

显著增强。具体表现为：拱顶沉降开挖初期为 2.7 mm，较优化前降低 12.9%；中期增至 6.7 mm，降低 10.7%；稳定后最终沉降量为 7.3 mm，降低 12.0%，远低于设计控制值。拱腰水平收敛因墙体刚度增强与主筋加密，约束能力大幅提升，初期收敛值为 1.9 mm，中期平缓增至 4.8 mm，稳定后达 5.3 mm，较优化前分别降低 13.6%、9.4%、9.8%，变形发展完全可控。拱底沉降受墙长增加与基底约束增强影响，初期为 1.5 mm，中期增至 3.2 mm，稳定后为 3.6 mm，较优化前分别降低 16.7%、11.1%、12.2%，各阶段变形增长速率 $\leq 0.035$  mm/开挖步，变形波动可忽略不计。

### 4 结论

针对 IV~V 级围岩、埋深 8~15 m 的明挖隧道，构建安全、经济、技术、环境多目标决策体系，对比三类支护方案并对最优方案开展参数优化，得出以下结论：

(1) 明确地下连续墙支护优势显著。其稳定后拱顶应力 6.2 MPa、拱腰水平收敛值为 5.9 mm，分别仅为土钉墙方案的 49.2%、31.6%，且地表沉降 8.3 mm 远低于 $\leq 30$  mm 的设计要求。该方案适用于 IV~V 级围岩与管线密集的复杂环境，在应力分布均匀性、变形控制效果上全面优于土钉墙+喷射混凝土及排桩+内支撑方案。

(2) 针对地下连续墙实施的参数优化效果突出，通过墙厚增至 650 mm、混凝土强度提升至 C35 等强化措施，优化后拱顶沉降 7.3 mm，较优化前降低 12.0%，拱腰应力峰值为 6.6 MPa，下降 8.3%。各部位应力增长速率 $\leq 0.07$  MPa/开挖步，变形增长速率 $\leq 0.035$  mm/开挖步，进一步增强了结构刚度与安全储备，完全满足严苛工程约束条件。

(3) 地下连续墙方案虽初期造价较高，但其在变形控制与应力分布均匀性方面具有显著优势。结合参数优化后拱顶沉降进一步降低 12.0%，拱腰应力下降 8.3%，体现出更高的安全储备与长期稳定性。在复杂地质与环境约束条件下，具备最优的全

生命周期技术经济性。

### 参 考 文 献

- [1] 余文静, 高新强, 孔超, 等. 基于粒子群算法高地应力软岩隧道支护方案优化 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 105-110.
- [2] 余化彪, 周游, 杨竹胜, 等. 软岩大变形隧道最优支护参数选择 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (1): 50-56.
- [3] 陈家征, 李忠, 韩扬. 隧道洞口浅埋偏压段超前支护方案数值模拟 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (4): 59-66.
- [4] 黄尹臣. 隧道支护结构优化研究 [J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2024, 23 (2): 39-43.
- [5] 施泽, 尹红亮, 赵仁杰, 等. 隧道软岩大变形支护技术研究 [J]. 公路, 2025, 70 (6): 460-467.
- [6] 刘灿阳. 明挖隧道深基坑支护施工及其结构稳定性分析 [J]. 中国新技术新产品, 2020, (21): 89-91.
- [7] 梁庆国, 付琪, 岳建平, 等. 偏压黄土连拱隧道支护结构受力特征研究 [J]. 自然灾害学报, 2025, 34 (4): 160-170.
- [8] 杨文民. 基于逆可靠度分析的高应力软岩隧道支护体系优化设计 [J]. 公路, 2025, 70 (9): 351-356.
- [9] 田四明, 李干, 黎旭, 等. 基于能量释放控制的高地应力软岩大变形隧道主动支护设计研究 [J]. 铁道标准设计, 2025, 69 (10): 1-8, 45.
- [10] 陈丽俊, 陈建勋, 高剑峰, 等. 软岩隧道初期支护主动补强加固原理与工程实践 [J]. 交通运输工程学报, 2025, 25 (4): 80-93.
- [11] 靳挺杰, 于潇, 任学木, 等. 考虑地层非均质性的既有基础下方隧道开挖稳定支护力 [J]. 公路交通科技, 2025, 42 (10): 313-321.
- [12] 马凯蒙, 刘勇, 樊浩博, 等. 基于围岩压力-承载区特征曲线的挤压大变形隧道支护原则研究 [J]. 中国铁道科学, 2025, 46 (3): 129-139.
- [13] 王峰, 方亚彪, 熊藤根, 等. 无导洞法连拱隧道先行洞结构安全与支护参数 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (6): 2554-2563.
- [14] 蒋坪临, 廖秋林, 胡皓, 等. 隧道超挖处充填参数对围岩及支护结构的影响研究 [J]. 工程地质学报, 2025, 33 (1): 315-326.
- [15] 王子琪, 于海, 杨萌, 等. 内支撑滞后架设对隧道深基坑及支护体系力学特性的影响 [J]. 河南大学学报 (自然科学版), 2025, 55 (1): 109-118.