 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i6.10640

# Force Characteristics and Design Optimization of Asymmetric Support Structure for Shallow-Buried, Under-Burdened, and Close-Interval Tunnels

**Shan Zhang**

China Railway Sixth Survey & Design Institute Group Co., Ltd., Tianjin, 300308, China

**Abstract**

In response to the problems of uneven force distribution and high risk of local damage often encountered in traditional symmetrical support structures for shallow-buried, under-burdened tunnels, the force characteristics of asymmetric support structures and their design optimization methods were studied. Based on the load differences caused by terrain under-burdening, the asymmetric deformation characteristics of the surrounding rock under the mutual disturbance of the two tunnels were analyzed, and the internal force distribution laws of the primary support and secondary lining were clarified. Through numerical simulation and on-site testing, the regulating mechanisms of the non-symmetric settings of anchor rods, steel frames, and spray layers on the bending moment and axial force of the structure were revealed. A design process of determining support parameters according to load zones was proposed, and a construction dynamic feedback adjustment strategy was introduced. The results show that by strengthening the support on the deep-buried side and moderately weakening it on the shallow-buried side, the internal forces of the structure can be effectively balanced, the peak bending moment caused by under-burdening can be reduced, the overall stability of the tunnel and the material utilization efficiency can be improved, and safety and economy can be achieved in a balanced manner.

**Keywords**

shallow-buried under-burdened; close-interval tunnel; asymmetric support; force characteristics; design optimization

# 浅埋偏压小净距隧道非对称支护结构受力特性与设计优化

张杉

中铁第六勘察设计院集团有限公司，中国 · 天津 300308

**摘　要**

针对浅埋偏压小净距隧道传统对称支护常出现受力不均、局部破坏风险偏高的问题，研究了非对称支护结构的受力特性及其设计优化方法。基于地形偏压导致的荷载差异，分析了双洞相互扰动下围岩变形不对称特征，明确了初期支护与二次衬砌的内力分布规律。通过数值模拟和现场测试，揭示了锚杆、钢架、喷层等参数非对称设置对结构弯矩和轴力的调节机制，提出了按荷载分区确定支护参数的设计流程，并引入施工动态反馈调整策略。结果表明，在深埋侧针对性加强支护、浅埋侧适度减弱，可有效均衡结构内力，减小偏压引起的弯矩峰值，提升隧道整体稳定性和材料利用效率，兼顾了安全与经济性。

**关键词**

浅埋偏压；小净距隧道；非对称支护；受力特性；设计优化

## 1 引言

浅埋偏压小净距隧道常见于山岭区公路和铁路的进出口段，受地形切割影响，洞身横断面两侧埋深差异明显，地面横坡较陡，产生显著的偏压荷载 [1]。同时，左右线隧道间距很小，中间岩柱厚度常常不足一倍洞径，围岩应力场反复叠加，施工多次扰动使力学行为趋于复杂。若直接沿用对称支护设计，深埋侧支护常发生开裂、变形过大等问题，浅埋侧却安全储备富余，材料性能未被充分利用。对此，设计人员引入非对称支护概念，并根据各部分受力需求调整其支护参数。揭示非对称支护结构的受力特性并形成可操作的设计优化方法，对保障施工安全和长期稳定具有直接意义。本研究从偏压荷载形成与围岩变形规律出发，分析支护结构在不对称荷载作用下的内力响应特征，讨论锚杆长度、钢架型号、喷层厚度差异化设置带来的效果，进而总结基于荷载分区的支护参数确定流程，并提出了适用于实际施工的一些动态化优化意见。全文以数值计算与现场量测相结合的方式展开说明，避免过于理论化的推导，侧重于工程适用的分析。

【作者简介】张杉（1990–），男，中国山西沁县人，本科，工程师，从事隧道及地下工程研究。

## 2 浅埋偏压小净距隧道围岩压力与变形特征

### 2.1 偏压荷载的形成与分布规律

浅埋隧道地表倾斜导致同一横断面内左右侧拱顶埋深差异显著。深埋侧上覆土柱高度大，按照规范推荐的偏压计算方法，该侧垂直压力和水平侧压力均高于浅埋侧，荷载分布不再对称，而是向深埋侧偏移，形成偏心力矩。这一力矩直接作用于衬砌结构，使深埋侧拱腰和边墙部位的轴力与弯矩明显加大，浅埋侧受力水平相对较低。地形偏压程度受地面坡度、围岩等级和埋深比值控制，坡度越陡、岩土体越破碎，荷载不对称现象越突出。

除垂直压力差异外，水平侧压力的不对称同样不可忽视。深埋侧因地应力水平较高，侧压系数可能随深度发生改变；浅埋侧围岩稳定性差，侧限小。两侧压力差异将造成支护结构承受较大的水平非对称荷载作用。准确地确定偏心荷载分布是不对称支护设计的基础，通常是采用现场实测围岩压力结合数值反演的方法得到沿隧道轮廓的荷载形式，并以此作为选取支护参数的标准。

### 2.2 小净距隧道开挖的相互扰动效应

双洞小净距布置使中夹岩柱成为应力传递和叠加的关键区域。在先行洞开挖后，围岩应力得到了释放，成为松弛区，并由中夹岩柱承受左右两洞掘进产生的应力集度；再进行后开挖隧洞掘进，这样又会对邻近岩体造成扰动并产生新的应力，而新产生的应力将通过围岩柱传递给已支护的相邻支护体系。尤其在斜坡地形条件下，这种相互影响呈现出明显的方向性特点，后掘隧道对处于中夹岩柱一侧先掘隧道支护体系的影响远大于另一侧。实际上测得的结果表明，在后期开挖的隧道会使先前开挖隧道的深部边缘岩体应变及钢架内力发生二次增长，幅度可达 20% 以上。

多次扰动效应还导致中夹岩柱塑性区不断扩展甚至贯通。当中夹岩柱厚度较薄、抗剪强度不足，在偏压作用下可能发生剪切滑移，连带两侧隧道支护承受额外的不均衡荷载。考虑开挖面空间约束和施工过程对相互作用的影响进行分析：一般采用三维数值模型对掘进掌子面推进过程进行模拟分析，结果表明：后方掘进掌子面不断靠近前方监测点位置时，支护体应力迅速增大而后趋于稳定，该时空效应为确定加强支护时机提供了直接依据。

### 2.3 围岩位移与塑性区的不对称发展

偏压荷载与双洞扰动共同作用下，隧道围岩变形呈不对称状态：拱顶下沉向深方发展；深方拱腰处竖向收敛明显大于浅方，可能造成仰拱上鼓量差异较大 [2]。现场多点沉降监测结果表明，深部侧壁最大变形可达浅部位相同位置处的 1.5 倍以上，并呈不对称式变形特征，导致支护承受不同变形量，初期支护喷射混凝土在深埋侧拱腰部位易产生弯曲变形而出现拉裂现象，造成渗漏耐久等问题。

围岩塑性区分布同样偏态发展。深埋侧因荷载集中，塑性区从拱腰向围岩深处扩展范围较大，并斜向中夹岩柱方向延伸。浅埋侧塑性区相对较小，但可能因中夹岩柱的塑性连通而在拱脚附近出现屈服。这种不对称发展对支护提出不同要求，深埋侧需要更强的围岩加固以控制松动圈扩展，浅埋侧则需防止塑性区连通导致的整体失稳。掌握变形与塑性区的不对称规律，有助于准确确定非对称支护的重点加固区域与合理施作时机。

## 3 非对称支护结构受力特性分析

### 3.1 支护结构内力不对称分布规律

在偏压荷载和不对称变形作用下，初期支护钢拱架和喷射混凝土的内力分布与对称隧道明显不同。计算显示，深埋侧拱腰和边墙部位的弯矩绝对值远大于浅埋侧对应位置，最大弯矩常出现在深埋侧拱腰内侧受拉区，轴力分布也是深埋侧大于浅埋侧。仰拱承受的不对称弯矩会导致其靠近深埋侧部位受拉，严重时引起仰拱开裂。内力不对称程度与偏压比及中夹岩柱性状密切相关，偏压比越大，两侧内力差异越显著。

二次衬砌作为长期安全储备，在设计时常不直接承担全部围岩压力，但偏压条件下其受力同样不对称。荷载结构模型分析表明，二次衬砌在深埋侧拱腰位置承受较大的内侧受拉弯矩，若采用对称配筋，将导致该部位裂缝宽度超出限值。因此，二次衬砌也需要依据内力分布差异进行非对称配筋，在深埋侧受拉区增加钢筋面积。认清初期支护与二次衬砌内力不对称分布规律，是合理提出非对称参数设计的前提。

### 3.2 支护参数非对称设置的影响机制

调整支护参数以适应不对称受力，如系统的锚杆长度和间隔、钢结构类型及其间隔、喷射混凝土的厚度等等。通过独立地更改某个特定参数，可以清晰地了解它们的效果。比如，如果只增加了深埋侧系统锚杆的长度，能有效抑制一侧的围岩移变动载作用，降低了松动圈半径及初期支护受力形态荷载值。模拟结果表明：深埋侧锚杆长度由 3m 增加至 4.5m 后，该侧拱顶弯矩大幅下降约 25%；钢架应力相应降低。浅埋侧维持原设计锚杆参数，并不造成偏于安全的问题。

钢架型号和间距的非对称调整也会改变支护刚度分布。在深埋侧采用较高规格的型钢钢架或加密间距，提高了该侧承载和抗弯能力，可分担更多的围岩压力，相对减轻浅埋侧的负荷。非对称喷层厚度，如深埋侧混凝土增厚五厘米，同样能起到类似效果。不过，刚度的突然变化易引发局部应力集中，参数过渡需在拱顶附近平顺渐变 [3]。综合多个参数的非对称设置效果，可以在满足变形控制要求的前提下，找到经济性更优的方案。

## 4 浅埋偏压小净距隧道非对称支护设计优化

### 4.1 基于差异荷载的支护参数分区确定方法

面对偏压造成的荷载差异，将隧道横断面按受力特征划分为不同参数分区，是实施非对称设计的基本途径。通常

将断面划分为深埋侧拱部、深埋侧边墙、浅埋侧拱部、浅埋侧边墙、仰拱及中夹岩柱侧拱脚等区域，各区域独立设定锚杆长度、环向间距、钢架型号与间距以及喷层厚度。参数确定流程为：先依据地形地质资料计算偏压荷载分布，建立地层结构模型；再以围岩位移和支护内力为控制目标，通过正交试验或响应面法分析各分区参数敏感度；最后在满足位移和强度限值的约束下，以材料用量最小为目标进行优化搜索，得出分区参数组合。

优化目标可设定为深埋侧拱腰最大弯矩降低至允许范围内，同时令左右侧内力差最小。经反复试算，典型最优解为：深埋侧拱部和边墙锚杆长度比浅埋侧长 20% ~ 30%；深埋侧钢结构间距减小 1 档。喷涂层的厚度应增加 3 到 5cm；对于浅埋部位的拱壁锚杆可略微缩短一点，钢架型号维持原状。一般而言，仰拱参数是按对称的方式进行布置的，在存在严重偏压的情况下也可适当提高深埋位置的仰拱强度。这种分区方法能显著提高资源利用率。

### 4.2 动态施工反馈与支护调整流程

地质条件存在不确定性，仅靠前期设计难以完全把握实际受力，必须建立动态反馈机制。基本流程为：先行洞施工时，在典型断面埋设围岩压力盒、混凝土应变计和钢架应变计，监测初期支护内力，同时开展拱顶下沉和周边收敛量测。当监测数据显示深埋侧某部位弯矩或位移发展速率超出预警值时，立即启动调整程序，措施包括增加该侧径向锚杆、增设锁脚锚杆、施作临时仰拱或调整开挖进尺。

在后行洞开挖过程中，监测断面数据能反馈先行洞支护受扰动的响应。如果先行洞中夹岩柱侧支护压力增长过快，可在后行洞对应部位采取加强预支护、缩短掌子面距监测断面的掘进步距，或对中夹岩柱进行对拉锚杆加固。动态调整的核心是形成监测、分析、判断和调整的闭合循环，这需要可靠的快速分析方法，如基于量测位移反演岩体参数，再正算预测后续施工步的支护受力，从而提前决策 [4]。该方法已在多个偏压小净距隧道中应用，成功规避了支护破坏风险。

### 4.3 现场监测验证与长期性能评价

非对称支护设计的效果需依靠现场实测来验证。常规做法为比较非对称支护断面与对称支护断面的围岩压力分布、钢拱架受力及喷层变形量值大小及其位移量。测试结果表明，非对称支护后深埋侧钢拱架最大受力较参照支护方案可降低 15% 至 30%，同时拱顶下沉量也将降低约 20%，两侧拱腰收敛差明显变小；中夹岩柱内的压力趋于均匀化，未出现单侧应力集中高值区域，表明围岩自承能力得到充分发挥。

长期性能评价侧重于二次衬砌的裂缝开展和渗漏水情况。长期观测发现，非对称支护段二次衬砌在深埋侧拱腰位置未出现明显纵向裂缝，原因是初期支护有效降低了传递到二次衬砌上的偏压弯矩，经过一段时间后，建筑物轮廓趋于稳定状态，且收敛速率急剧减小至可忽略不计的状态。验证结果说明，实施参数分区非对称支护可大幅增强浅埋偏压、短距离隧道的稳定性及安全性，同时也可为同类型工程提供一定的设计依据及相关数据支持。

## 5 结语

浅埋偏压小净距隧道的非对称支护，是针对荷载和地形不对称特性提出的合理设计思路。从围岩压力分布和变形特征出发，明确了荷载差异是结构受力不均的根源，小净距相互扰动加剧了这种不均匀 [5]。在分析锚杆、钢架和喷层等参数非对称设置影响规律的基础上，证实有针对性地加强深埋侧、适度弱化浅埋侧，能够均衡结构内力、降低破坏风险。并归纳形成以断面分区和参数差异化设置为核心、施工监控量测及动态调整为保障的设计优化流程图。工程经验表明，该方法可有效控制变形、减小弯矩峰值，提升长期稳定性。通过持续积累实测数据和优化分析方法，非对称支护有望发展为浅埋偏压小净距隧道的标准化设计手段。

## 参考文献

[1] 马杲宇,陈子全,杨文波,方若全,李永林.浅埋偏压隧道穿越松散堆积体支护结构受力特性分析[J].路基工程,2019(4):20-26.

[2] 李宏利.浅埋偏压隧道支护结构受力特性及施工优化方案研究[J].山西交通科技,2018(1):51-54.

[3] 潘文韬,吴枋胤,何川,刘洋,谢金池,寇昊,杨文波,曾杰,杨松.浅埋偏压隧道施工工法研究与非对称设计优化[J].隧道建设（中英文）,2021,41(S1):352-361.

[4] 闫向君,陈泽盟.浅埋偏压小净距隧道超前支护施工技术研究[J].低温建筑技术,2024,46(11):109-113.

[5] 孙雅珍,袁立凡,王金昌,何放,王龙岩.浅埋偏压公路隧道初期支护非对称优化研究[J].沈阳建筑大学学报（自然科学版）,2026,42(1):47-57.