

崩坡积体浅埋偏压隧道超前支护体系受力变形特征研究

委珍业¹, 郭亚鹏¹, 严艳峰¹, 单高飞¹, 鲁正元¹, 郭鸿雁^{2*}

¹中交三公局第六工程(河北)有限公司, 河北 石家庄

²招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆

收稿日期: 2026年8月18日; 录用日期: 2026年9月10日; 发布日期: 2026年9月21日

摘要

以黄河岸索同坡崩坡积体浅埋偏压隧道为背景,为探究在崩坡积体松散、偏压及浅埋等复杂地质条件下,超前支护体系在动态开挖过程中的受力变形特征,采用ABAQUS有限元软件建立三维精细化数值模型,模拟了单侧壁导坑法施工全过程,对超前管棚和超前小导管进行了受力及变形分析。结果表明:(1)管棚轴力在空间上呈“左凹右凸”分布,随开挖深度增加,受力趋势由拉力逐渐转变为压力,下导坑开挖是管棚轴力变化的主要控制因素;(2)小导管轴力同样呈“左凹右凸”形态,其轴力受施工阶段和断面位置控制,轴力响应表现为“激增-阶梯递减-稳定”三阶段演化规律,且对上导坑开挖敏感性较强;(3)在量值上,小导管所受轴力较管棚小一个数量级,支护效果远不及管棚。研究揭示了浅埋偏压崩坡积体隧道超前支护体系的受力演化机制,可为同类工程设计与施工提供参考。

关键词

浅埋偏压, 崩坡积体, 超前支护体系, ABAQUS模型

Study on Stress and Deformation Characteristics of Advanced Support System in Shallow-Buried Bias Tunnel under Colluvial Deposit

Zhenye Wei¹, Yapeng Guo¹, Yanfeng Yan¹, Gaofei Shan¹, Zhengyuan Lu¹, Hongyan Guo^{2*}

¹CCCC Third Highway Engineering Bureau Sixth Engineering (Hebei) Co., Ltd., Shijiazhuang Hebei

²China Merchants Chongqing Communications Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing

Received: August 18, 2026; accepted: September 10, 2026; published: September 21, 2026

*通讯作者。

文章引用: 委珍业, 郭亚鹏, 严艳峰, 单高飞, 鲁正元, 郭鸿雁. 崩坡积体浅埋偏压隧道超前支护体系受力变形特征研究[J]. 土木工程, 2026, 15(9): 117-127. DOI: 10.12677/hjce.2026.159229

Abstract

Taking the Suotongpo Tunnel, a shallow-buried bias tunnel located in a colluvial deposit on the bank of the Yellow River, as the engineering background, this study aims to investigate the stress and deformation characteristics of the advanced support system during dynamic excavation under complex geological conditions, including loose colluvial deposit, bias pressure, and shallow overburden. A three dimensional refined numerical model was established using the ABAQUS finite element software to simulate the entire construction process using the single side heading method, and the stress and deformation of the advanced pipe roofs and advanced small pipes were analyzed. The results show that: (1) The axial force of the pipe roofs exhibits a spatial distribution of “concave left and convex right” (*i.e.*, compression on the left and tension on the right). As excavation depth increases, the axial force gradually transitions from tension to compression, with the lower side heading excavation being the dominant controlling factor of the axial force variation. (2) The axial force of the small pipes also exhibits a “concave left and convex right” pattern; it is governed by the construction stage and cross section location, and its evolution follows a three stage trend of “sharp increase-stepwise decrease-stabilization”, with strong sensitivity to upper side heading excavation. (3) In terms of magnitude, the axial force of the small pipes is one order of magnitude smaller than that of the pipe roofs, indicating that the support effectiveness of the small pipes is far inferior to that of the pipe roofs. This study reveals the mechanical evolution mechanism of the advanced support system in shallow-buried bias tunnels under colluvial deposits, which can provide a reference for the design and construction of similar projects.

Keywords

Shallow-Buried Bias, Colluvial Deposit, Advanced Support System, ABAQUS Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

崩坡积体力学性质介于土石之间，其结构松散、内部组成复杂、稳定性差，易受到外界条件所影响导致失稳崩塌[1][2]。近年来，随着我国交通建设需求与日俱增，在隧道建设过程中，不可避免地会穿越此类复杂的松散堆积体[3][4]。为确保隧道施工的安全性，因此施工过程中超前支护结构起着举足轻重的作用。

冯冀蒙等[5]针对浅埋黄土隧道提出了超长管棚 + 临时仰拱组成的“纵横支撑”支护体系。邓祥辉等[6]在浅埋偏压隧道的基础上提出地表注浆 + 超前小导管注浆联合支护能有效控制围岩变形。姬云鹏等[7]对隧道全过程开挖管棚受力进行研究，得出土层荷载对管棚受力影响突出，轴力主要受环向间距影响。张小波等[8]在考虑管棚微拱效应基础之上提出了管棚间距与拱顶荷载、土体粘聚力和内摩擦角之间的相关性。赵金鹏等[9]在超浅埋大跨隧道开挖的研究中发现在超浅埋段长管棚能够控制围岩的变形。阳超[10]、方华昌等[11]、戴志仁[12]、张霄等[13]凭借砂卵石地层对隧道开挖管棚支护效果、加固方式展开了系列研究。王明年[14]针对目前隧道超前支护设计方法不完善且多依赖于工程经验的现状，提出隧道超前支护体系定量化设计方法。杨礼铠[15]将支护施工与监控量测数据动态结合，建立基于实时反馈的调整机制，有效控制围岩变形，保障隧道施工安全。

尽管以上学者在超前支护结构的施工、加固技术等方面做出大量的研究。但遗憾的是在浅埋偏压与崩坡积体同时存在的特殊地形条件下隧道开挖动态变形趋势以及三维模型中管棚、小导管的模拟过程尚不明确。因此，本文依托索同坡隧道工程，对崩坡浅埋偏压复杂地质条件下隧道开挖进行精细化、动态化数值模拟，针对支护结构分析动态施工过程中其变形趋势。

2. 隧道概况及崩坡积体特征

工程概况

索同坡隧道位于循化县黄河左岸低中山山麓斜坡区，隧道进口位于索同坡村西侧黄河左岸斜坡中下部沟谷右岸岸坡区，出口位于专堂村东侧微冲沟沟谷左岸斜坡中下部与Ⅱ级阶地后缘结合地带。隧道左右洞长度均为 1114 m。隧道出口段 ZK13 + 810~ZK14 + 060 段处于崩坡积体浅埋偏压段，现场地质条件如图 1 所示。

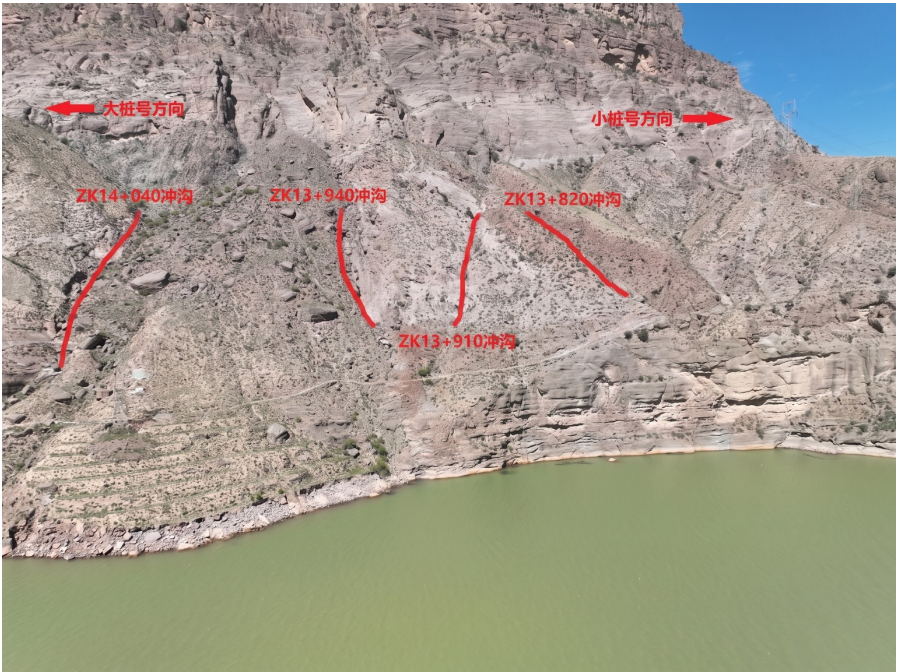


Figure 1. The shallow-buried unsymmetrically loaded section at the exit portal of the Suotongpo Tunnel
图 1. 索同坡隧道出口浅埋偏压段

隧道洞口段崩坡积体整体分布于山前冲沟内，沿沟口呈扇形展布，沿坡面方向具有坡积体锥形发育的特点。通过钻孔结合现场地质调查，坡积体发育厚度最厚处约为 19 m，坡脚处相对较薄，厚度 0~5 m 不等，局部有基岩出露。横断面上整体形态近似三角形分布，具有常见坡积体发育的一般特征。ZK13 + 940~ZK14 + 040 段为崩坡积体浅埋偏压段，本标段内隧道断面为 XS5a(t)型，衬砌参数如图 2 所示。坡积体穿越隧道左洞洞顶，隧道采用单侧壁导坑法非爆开挖。同时对 ZK13 + 910~ZK14 + 010 段采用开挖后全断面径向注浆，超前支护为 T76 自进式中管棚 + $\phi 42$ 超前小导管，支护参数见表 1 所示。

3. 浅埋偏压隧道三维数值模拟

为分析浅埋偏压崩坡积体条件下隧道施工活动围岩及隧道变形特征，选取 ZK14 + 00~ZK14 + 024 浅埋偏压崩坡积体区段复杂地层建立三维精细化数值仿真模型。考虑到边界效应的影响，模型断面向左、

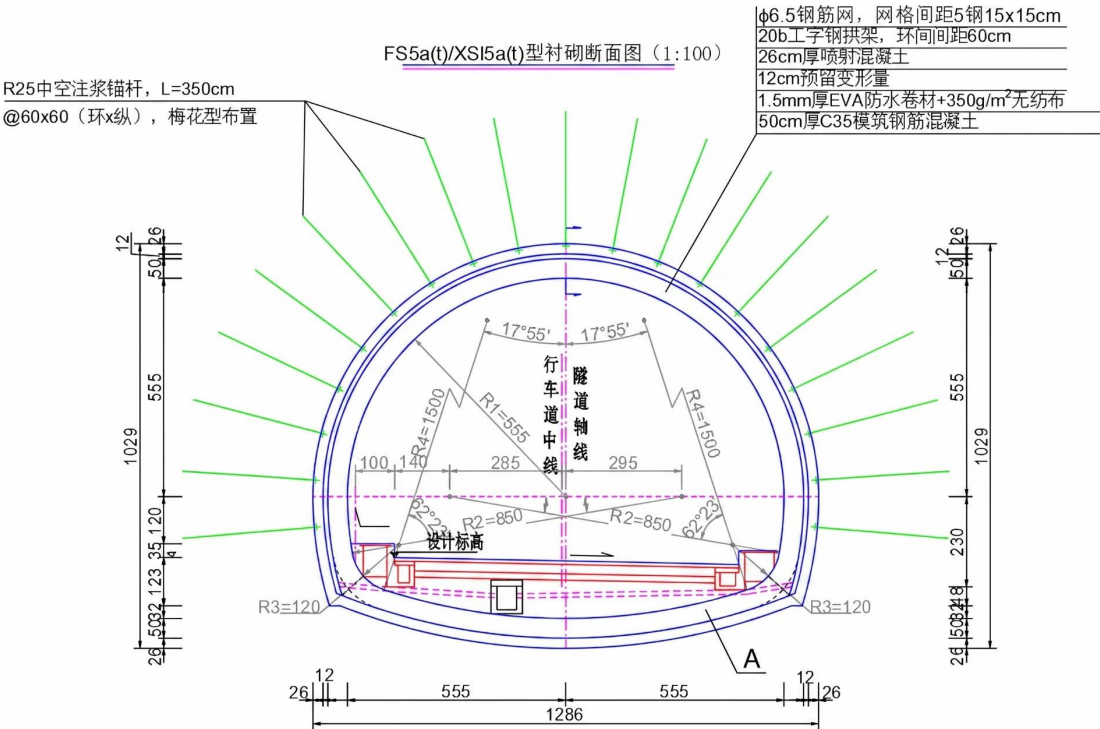


Figure 2. Tunnel cross-section
图 2. 隧道横截面

Table 1. Lining parameter table
表 1. 衬砌参数表

衬砌类型	XS5a(t)型复合式衬砌
超前支护	T76 中管棚 9 m, 拱部 120°布置 φ42 超前注浆小导管, 排距 2.4 m
锚杆布置	φ25 中空注浆锚杆, L = 3.5 m, 梅花形布置 环纵间距 0.6 × 0.6 m
初期支护	C25 喷射混凝土厚 0.26 m φ6.5 钢筋网间距 0.15 × 0.15 m 20b 工字钢拱架间距 0.6 m
二次衬砌	C35 模筑钢筋混凝土厚 0.5 m

上下距离尺寸取洞跨的 3 倍以上, 水平方向和竖向均取 72 m。本模型设定边界条件为左右侧面限制 X 方向, 前、后两面限制 Z 方向, 底面限制 X、Y 和 Z 方向, 顶面作为自由边界。模型主要由围岩和崩坡积体组成, 共计 536,643 个网格, 累计 558,217 个节点, 多数单元为 C3D8R 实体单元, 部分 C3D6 单元和梁单元 B31。三维数值计算模型如图 3 所示。

4. 结果分析

4.1. 围岩非对称应力释放与偏压成因机制

隧道在崩坡积体浅埋偏压条件下的开挖过程, 本质上是围岩应力场动态演化与重分布的过程。如图 4 所示的围岩 Mises 应力场分布云图表明, 在浅埋偏压地形下, 隧道初始地应力场呈显著的非对称性。

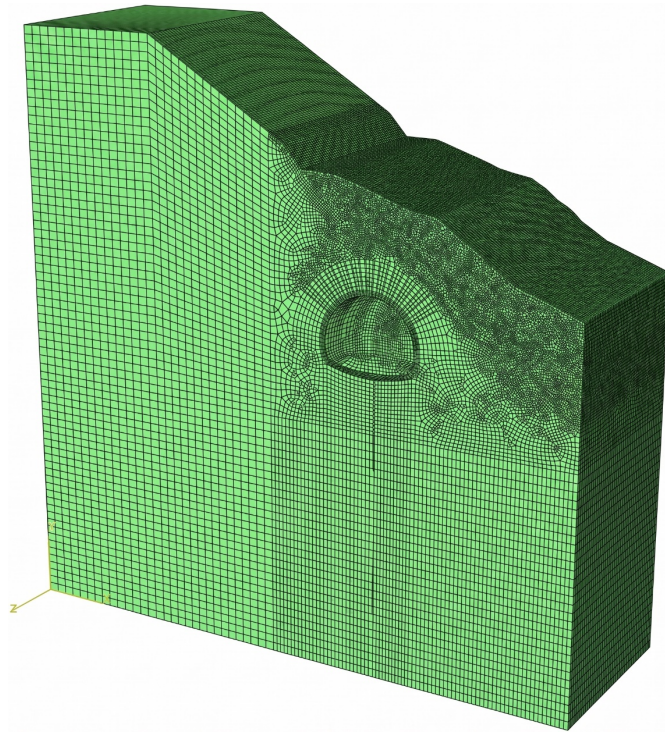


Figure 3. 3D computational model

图 3. 三维计算模型

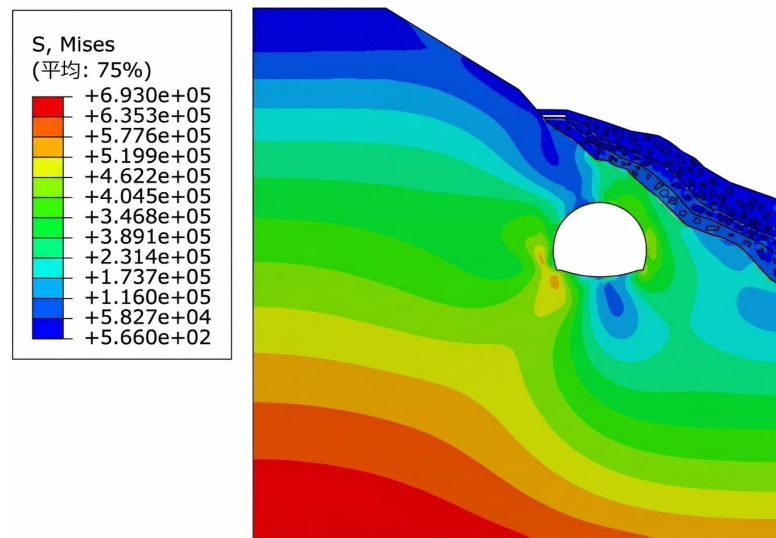


Figure 4. Cloud diagram of Mises stress field distribution in surrounding rock

图 4. 围岩 Mises 应力场分布云图

结合弹塑性力学理论,单侧壁导坑开挖打破了原有地层应力平衡,引发了非对称的应力释放与集中。左侧因埋深较大,初始地应力水平高,开挖后应力释放剧烈,围岩向洞内挤压变形导致支护结构左侧承受极大的压应力集中;右侧埋深较浅,上覆崩坡积体因下部开挖产生松动卸荷,使得支护结构右侧主要受到向外的形变拉拽力。这种非对称的应力场重分布,直接主导了超前支护体系在空间上呈现出左侧受压、右侧受拉的“左凹右凸”受力模式。

此外，上下导坑开挖对支护体系影响的差异性，主要由应力影响范围与支护结构的尺寸效应决定。上导坑开挖引起的应力扰动主要集中在拱部浅层围岩，超前小导管因其截面尺寸小(尺寸效应弱)、锚固深度浅，对这种局部的应力集中与塑性区发育极为敏感，因此在受到上导坑开挖扰动时轴力表现出强烈的激增响应。相反，下导坑开挖卸除了上部结构的承载基底，导致围岩应力场在更深的广度上发生整体性转移。管棚因其长度大、截面尺寸大(尺寸效应显著)及刚度高，能够跨越局部塑性区，承担大范围应力重分布带来的宏观结构沉降荷载，故下导坑开挖成为了管棚轴力变化的主要控制因素。

4.2. 超前管棚变形及受力特征

根据单侧壁导坑开挖法施工步骤对 ABAQUS 软件所建 3D 模型进行开挖模拟，分析其变形及受力结果，对隧道中第一排及第三排管棚的相关数据进行提取。

图 5 展示了 ZK14+024 断面处管棚对应模型第一排管棚的受力状态，其轴力分布总体上受到围岩施加的压力，其中管棚底部端头呈现拉力，沿着管棚长度而逐渐呈现压力。管棚随隧道掌子面不断推进时，各施工状态下轴力大致分布趋势，其中单根最大压力为 20.60 kN，单根最大拉力为 38.42 kN，同时左右拱管棚在视觉空间上大致呈现出“左凹右凸”的趋势。

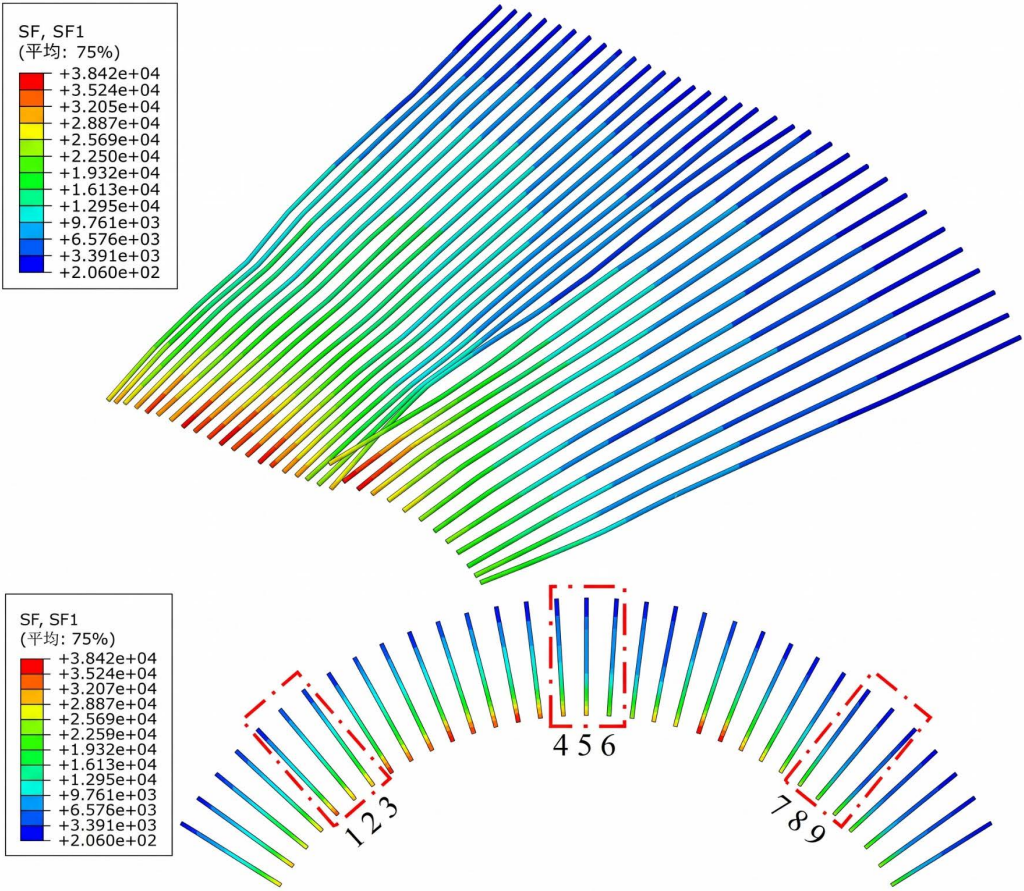


Figure 5. Cloud diagram of axial force distribution for the first row of pipe racks
图 5. 第 1 排管棚轴力分布云图

图 6 展示了第 1 排管棚在动态施工过程中的轴力变化规律，其中 1~3 号管棚位于左拱腰，4~6 号管棚位于拱顶，7~9 号管棚位于右拱腰。从图 6 中可以看出管棚轴力对隧道施工过程响应敏感，ZK14+024

断面右下导坑开挖时造成围岩原始位移场、应力场改变，该断面已开挖导洞与围岩在空间上构成“围岩-空腔-围岩”的结构，而第一排右拱腰管棚(7、8和9号管棚)轴力迅速增加则是围岩达到新平衡的表现，围岩向管棚施加了拉力，管棚产生的拉力又直接作用于围岩，即管棚为掌子面提供了额外的稳定性。所以左拱腰、拱顶(1~6号管棚)对 ZK14 + 024 断面左下导坑开挖较为敏感，这两处管棚轴力与右拱腰变化一致，但由于左拱腰与拱顶处于埋深较大侧，围岩施加的应力大于埋深较小侧，因此在 ZK14 + 024 断面左下导坑开挖后管棚产生的拉力大于右导坑开挖，最大拉力为 38.42 KN，而右侧最大拉力为 28.56 KN。

图 7 则为处于 ZK14 + 00 断面的第三排管棚，其中左侧(埋深较大一侧)出现较大压力，其余部分压力

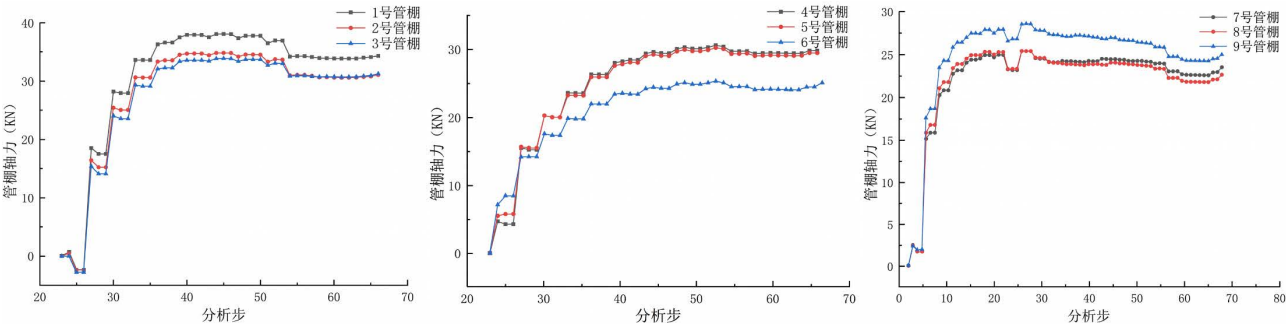


Figure 6. Axial force variation curve diagram of the first row pipe shed construction process
图 6. 第 1 排管棚施工过程轴力变化曲线图

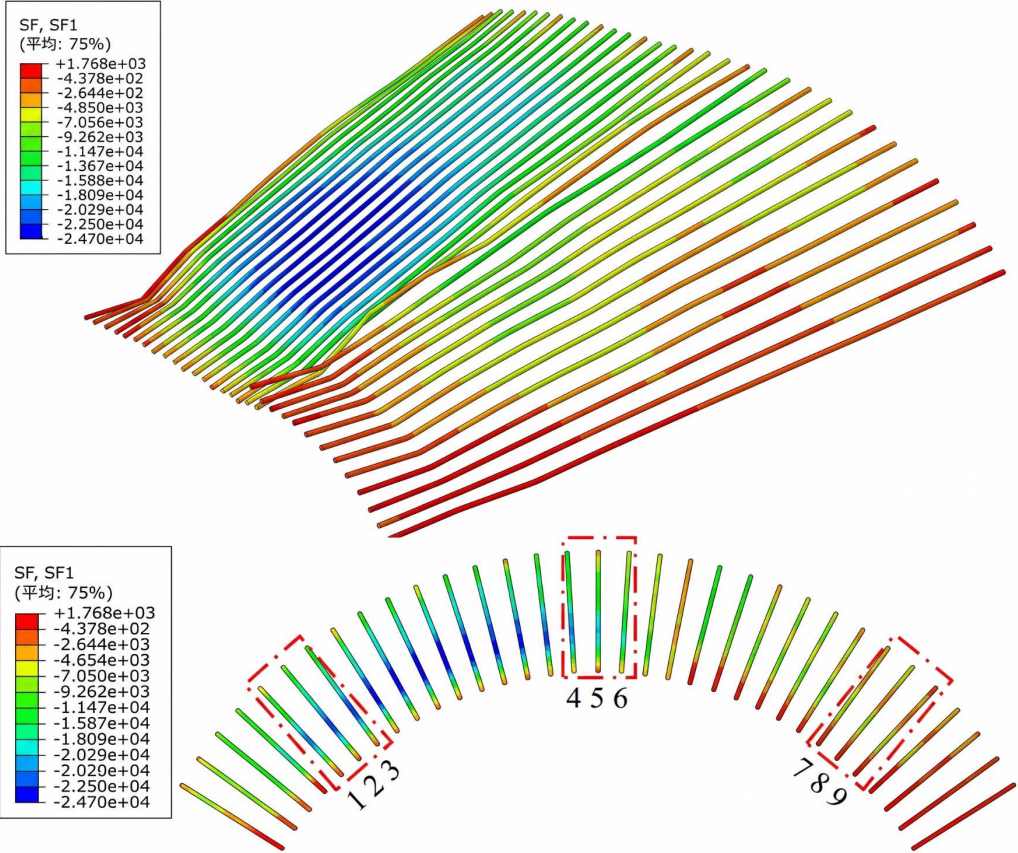


Figure 7. Axial force distribution cloud map of the 3rd row pipe rack
图 7. 第 3 排管棚轴力分布云图

较小, 相比于左侧轴力在数值上小一个数量级。这种受力趋势充分体现了偏压隧道的受力特点, 同时管棚底部受拉说明对于控制隧道拱顶沉降有利, 同时更好地保护开挖掌子面。

掌子面向前推进, 由于围岩自重向隧洞轮廓施加外部压力, 导致管棚整体受压下沉, 所以第三排管棚轴力变化表形式与第一排轴力截然相反。图 8 所示第三排管棚轴力出现了明显的增大阶段, 增大段恰好对应该管棚所处断面下导洞开挖, 说明在单侧壁导坑开挖隧道时, 下导坑开挖对管棚轴力影响显著。又因左洞埋深较大, 而右洞埋深浅, 隧道两侧受压不均造成左洞管棚(1~6 号管棚)轴力在数值上大于右洞(7、8 和 9 号管棚)管棚轴力。后续管棚为很好地发挥其受拉性能, 这种受压的表现对于施工来说是不利的, 但压力基本上保持相对稳定且数值较小, 同时管棚端头处仍然表现为受拉, 为掌子面提高稳定性, 同时注浆之后形成的注浆加固区进一步提高了围岩稳定性。

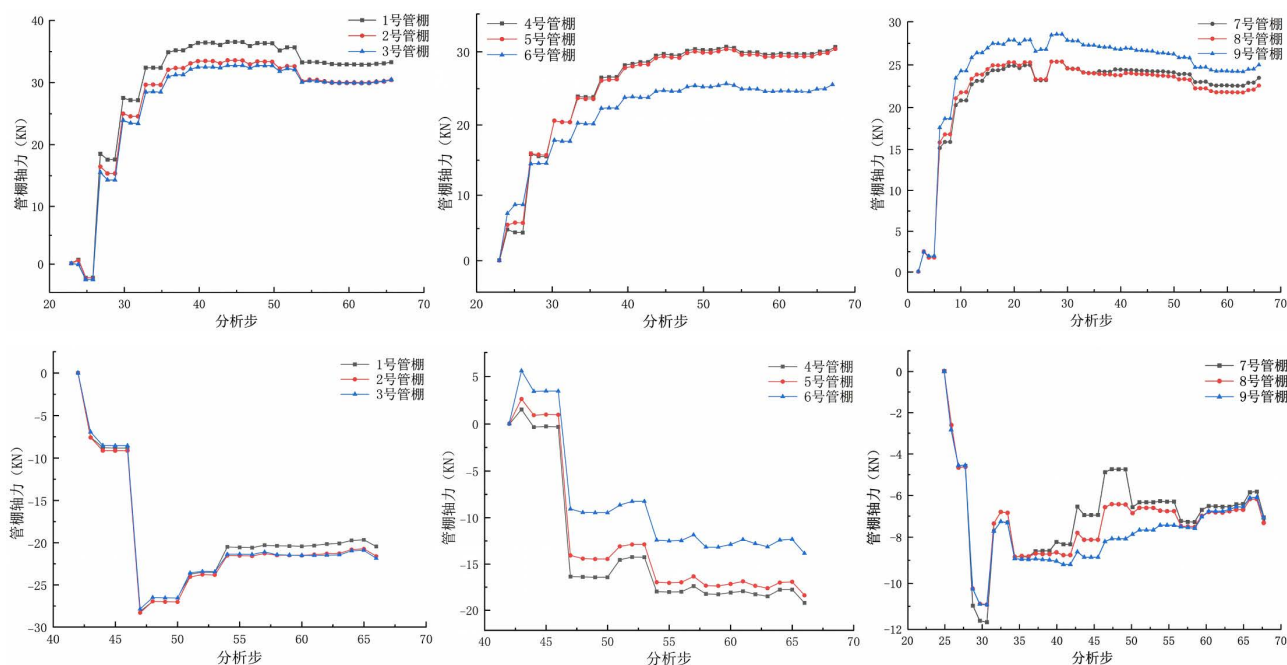


Figure 8. Axial force variation curve diagram of the construction process for the third row pipe shed

图 8. 第 3 排管棚施工过程轴力变化曲线图

总体来看, 这两排管棚轴力呈现出明显的趋势: 即第一排管棚除左拱腰(1、2 和 3 号管棚)出现小幅受压后突变为受拉外, 其余位置均受拉; 最后一排除左拱腰(1、2 和 3 号管棚)全程受压外, 其余位置轴力均出现小幅拉力, 后突变为压力; 但总体上呈阶梯型递增的趋势, 后续保持相对稳定; 拱腰拱顶管棚轴力变化趋势均保持高度的一致性; 对比图 4、图 5 与图 6、图 7, 可以看出, 在典型的浅埋偏压地形进行隧道开挖, 管棚轴力随着开挖深度增加, 其受力趋势逐渐由拉力演变为压力。

4.3. 超前小导管变形及受力特征

小导管在左右上导坑开挖之前施作, 所以选取模型开挖深度 9.6 m 处小导管(第三排)、12 m 处小导管(第四排)为研究对象。

如图 9 所示为第三排小导管受力状态, 小导管轴力分布与管棚轴力大致相似, 在空间上同样为“左凹右凸”的形式, 均为左侧大部分区域受压, 而端头部分受拉。最大拉力为 2.80 kN, 最大压力为 6.56 kN。

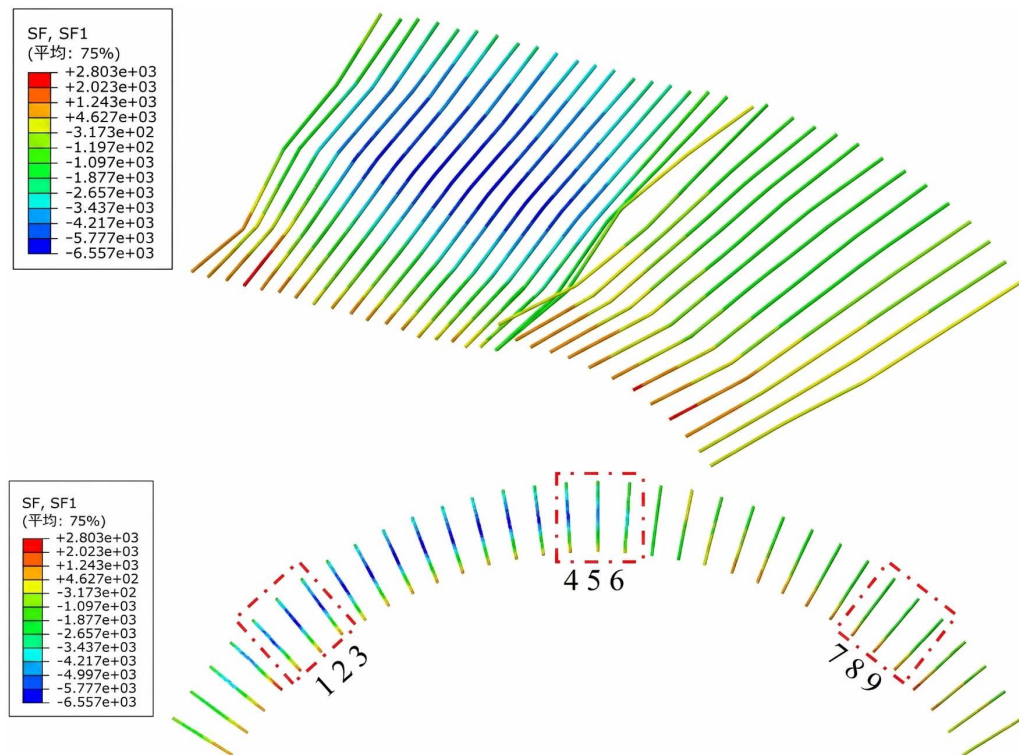


Figure 9. Axial force distribution cloud map of the third row of small conduits

图 9. 第 3 排小导管轴力分布云图

为进一步探究小导管受力响应机理, 选取第三排小导管左右拱腰和拱顶区域进一步展开分析。如下图 10 所示, 分布于不同物理位置的小导管(1~3 号位于左拱腰, 4~6 号位于拱顶, 7~9 号位于右拱腰)在动态施工过程中的轴力变化表现出高度一致性, 即先激增后呈阶梯型递减, 再逐渐趋于稳定。在轴力激增阶段, 处于左侧导坑的小导管在施作之后, 小导管轴力基本为零, 而该断面上左导坑开挖后, 小导管轴力变大, 且轴力达到最大值, 在后续施工过程中, 轴力逐渐开始减小并趋于相对稳定。处于右侧导坑的小导管在施作后, 该施作断面上右导坑开挖之后轴力出现激增。说明上导坑开挖是影响小导管轴力变化的主要因素。

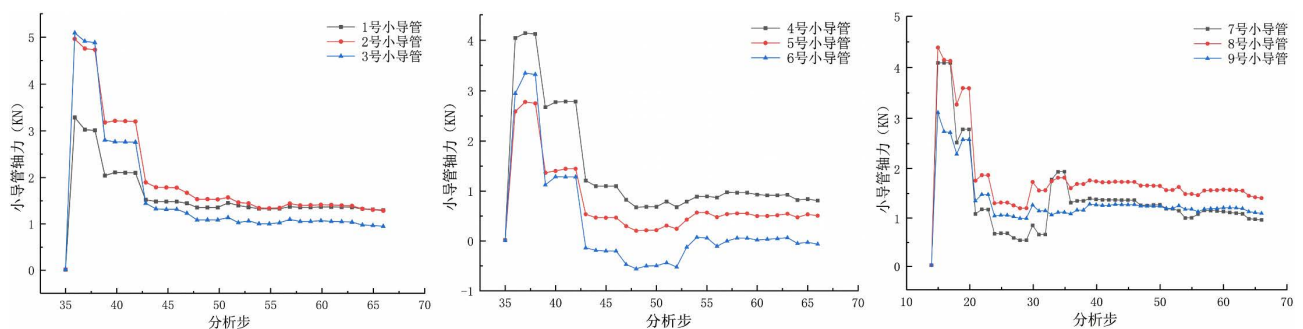


Figure 10. Axial force variation curve of the construction process for small conduits in the 3rd row

图 10. 第 3 排小导管施工过程轴力变化曲线图

图 11 则为第四排小导管受力状态示意图, 其轴力分布同样呈现“左凹右凸”的形态规律, 即左侧绝大部分区域处于受压状态, 而端头部位表现为受拉状态。这一分布形式与第三排小导管基本一致, 表明

在空间受力模式上,第四排小导管同样受隧道施工引起的围岩应力重分布影响。最大拉力为 2.16 kN,最大压力为 7.41 kN。

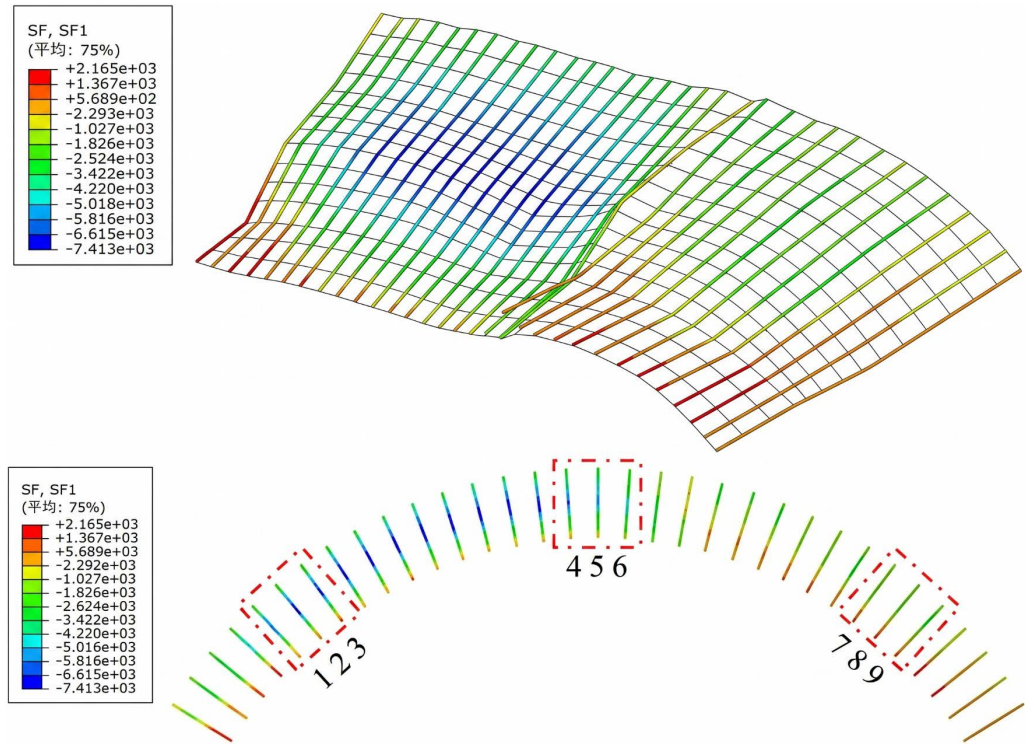


Figure 11. Axial force distribution cloud map of the no. 4 row small conduits
图 11. 第 4 排小导管轴力分布云图

同样选取第 4 排小导管的典型位置(1~3 号位于左拱腰, 4~6 号位于拱顶, 7~9 号位于右拱腰)进一步展开分析, 如图 12 所示。第四排小导管在动态施工过程中的轴力变化曲线显示, 其演化规律与第三排高度相似, 同样可分为激增 - 阶梯衰减 - 稳定三个阶段, 说明小导管轴力响应主要受施工阶段和断面位置控制, 而与排次本身的关联性较弱。

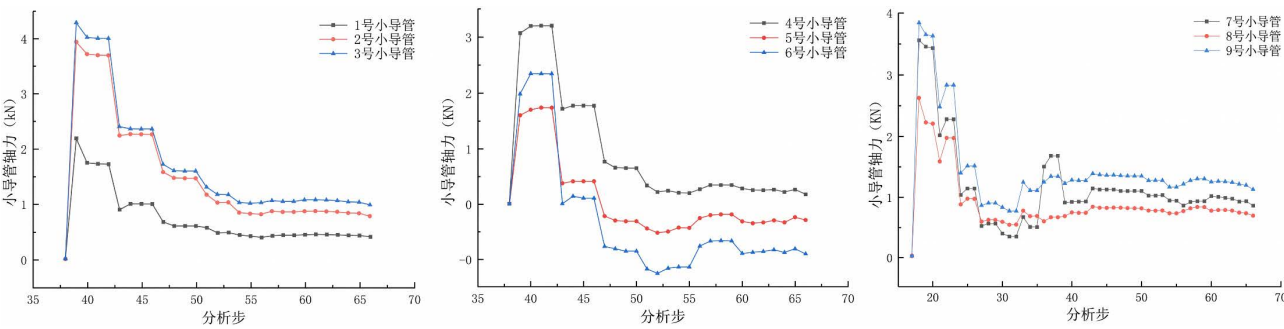


Figure 12. Axial force variation curve of the construction process for small conduits in the 4th row
图 12. 第 4 排小导管施工过程轴力变化曲线图

总的来说, 管棚和小导管在受力上共同表现出“左凹右凸”的形态规律, 与围岩存在偏压有一定联系, 但分析每一根杆件来看, 杆件的端头都受拉较为明显, 因此加长锚固长度可能会进一步提高其承载

力。因小导管锚固长度较短,深入围岩厚度较小,所产生的拉力数值小得多,但对土体扰动敏感性较强,所以小导管对上导坑开挖表现较为强烈。对比管棚和小导管的受力情况,不难发现,小导管所受轴力小管棚所受轴力一个量级,从二者截面尺寸上分析,小导管的截面尺寸不足管棚的三分之一,因此可以得出管棚因其长度、截面尺寸的优势,承受的轴力更大,小导管在为开挖掌子面提供稳定性方面是远不如管棚的。

5. 结论

本研究凭借有限元软件对索同坡隧道崩坡积体区段隧道超前支护体系受力及变形进行研究分析,得到如下结论:

- (1) 采用单侧壁导坑法施工时,下导坑开挖是影响管棚轴力变化的主要因素;而上导坑开挖是影响小导管轴力变化的主要因素。
- (2) 在典型的浅埋偏压地形进行隧道开挖,管棚轴力随着开挖深度增加,其受力趋势逐渐由拉力向压力转变。
- (3) 上导坑开挖对支护体系的扰动要大于下导坑。
- (4) 在超前支护体系支护效果上,小导管因其截面尺寸较小,所以无论是压力还是拉力都比管棚小一个数量级,小导管支护效果远不如管棚。
- (5) 小导管轴力响应主要受施工阶段和断面位置控制,而与排次本身的关联性较弱。

参考文献

- [1] 谢亦朋,杨秀竹,阳军生,等. 松散堆积体隧道围岩变形破坏细观特征研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4925-4934.
- [2] Xiao, J.Z., Dai, F.C., Wei, Y.Q., Min, H., Xu, C., Tu, X.B., et al. (2014) Cracking Mechanism of Secondary Lining for a Shallow and Asymmetrically-Loaded Tunnel in Loose Deposits. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 232-240. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.05.013>
- [3] 毛雪松,王楠,高胜雨,等. 川藏公路南线(西藏境)松散堆积体类型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(5): 8-14.
- [4] 杨建周. 穿越松散堆积体围岩加固与隧道施工技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(5): 1266-1273.
- [5] 冯冀蒙,谭玉梅,姚仕钰,等. 浅埋黏质黄土隧道变形控制机制及措施研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(10): 1712-1722.
- [6] 邓祥辉,刘锦涛,王睿. 浅埋卵石土层隧道超前支护措施研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(1): 136-143.
- [7] 姬云鹏,房灵国,唐昊天,等. 隧道开挖全过程管棚支护受力研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(3): 123-138.
- [8] 张小波,张雕,姚池,等. 考虑微拱效应的隧道洞口段管棚合理间距确定方法及参数分析[J]. 岩土力学, 2023, 44(6): 1625-1635.
- [9] 赵金鹏,谭忠盛,梁文广,等. 超浅埋大跨隧道管棚支护机理及效果分析[J]. 土木工程学报, 2021, 54(S1): 87-96+120.
- [10] 阳超,王玉锁,张雪松,等. 砂卵石地层暗挖隧道超前管棚支护技术研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 299-307.
- [11] 方华昌,赵东平,李栋,等. 砂卵石地层盾构始发下穿管线群加固方案比选研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(S1): 277-284.
- [12] 戴志仁,胡瑞青,王泽宇,等. 砂卵石地层矿山法隧道长管棚支护机理及应用[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(4): 68-74.
- [13] 张霄,王明年,王志龙,等. 大断面软弱围岩隧道超前支护体系加固机理研究[J]. 中国公路学报, 2025, 38(9): 255-267.
- [14] 王明年,张霄,赵思光,等. 软弱围岩隧道机械化全断面施工超前支护体系设计方法研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(8): 146-154.
- [15] 杨礼钊. 隧道软弱围岩大管棚小导管超前支护施工技术研究[J]. 工程技术研究, 2025, 10(23): 49-51.