

超前支护对隧道围岩应力影响的模型试验研究

孟浩然¹, 李尧^{1*}, 陈厚先², 李林¹, 杜旭超¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 四川久马高速公路有限责任公司, 四川 成都 610041)

摘要:针对浅埋大断面黄土隧道施工中围岩应力重分布问题,结合模型试验与数值模拟,对比无支护、超前小导管及超前管棚3种工况下围岩应力重分布规律。试验创新应用3D打印滑动连接件实现三台阶分步开挖模拟,建立内部应力监测体系。结果表明,超前管棚能在掌子面前方形成纵向长-高度高的强三维土拱,显著降低围岩应力释放率(由54.9%降至14.3%),有效将上方土体自重转移至隧道两侧;同时,大幅抑制塑性区扩展(塑性区面积减少49.1%)并减小松弛区范围(高度由17.5 m降至14.1 m,面积由138 m²降至110 m²),增强了围岩自承能力并改变围岩压力特性。本研究揭示了超前支护通过强化三维土拱效应以调控应力重分布的作用机制,为浅埋黄土隧道围岩压力计算与超前支护设计等提供理论依据。

关键词:浅埋黄土隧道;模型试验;超前管棚;超前小导管;围岩内部应力

中图分类号:TU443;U451.2 **文献标志码:**A

引用格式:孟浩然,李尧,陈厚先,等.超前支护对隧道围岩应力影响的模型试验研究[J].山东大学学报(工学版),2026,56(2):60-75.

MENG Haoran, LI Yao, CHEN Houxian, et al. Model test study on the influence of advance support on tunnel surrounding rock stress[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(2):60-75.

Model test study on the influence of advance support on tunnel surrounding rock stress

MENG Haoran¹, LI Yao^{1*}, CHEN Houxian², LI Lin¹, DU Xuchao¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Sichuan Juma Expressway Group Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: To address the issue of stress redistribution in the surrounding rock during the construction of shallow, large-section loess tunnels, the stress redistribution patterns under three conditions—no advance support, advance small pipes, and advance pipe umbrella—were investigated through model testing and numerical simulation. In the experiments, 3D-printed sliding connectors were innovatively employed to simulate three-stage step excavation, and an internal stress monitoring system was established. The results showed that the advance pipe umbrella formed a strong three-dimensional soil arch with considerable longitudinal length and height ahead of the tunnel face. This significantly reduced the stress release rate of the surrounding soil (from 54.9% to 14.3%) and effectively transferred the overburden weight to both sides of the tunnel. At the same time, the expansion of the plastic zone was substantially suppressed (the plastic zone area was reduced by 49.1%), and the extent of the relaxation zone was diminished (the height decreased from 17.5 m to 14.1 m, and the area was reduced from 138 m² to 110 m²). Consequently, the self-supporting capacity of the surrounding rock was enhanced, and its pressure characteristics were altered. This study revealed the mechanism by which advance support regulates stress redistribution through the reinforcement of the 3D soil arch effect, providing a theoretical basis for calculating surrounding rock pressure and designing advance support in shallow-buried loess tunnels.

Keywords: shallow loess tunnel; model test; advanced pipe roof; advanced small pipe; soil internal stress

收稿日期:2025-09-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078045)

第一作者简介:孟浩然(1999—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为黄土隧道工程。E-mail:2023221150@chd.edu.cn

*通信作者简介:李尧(1989—),男,山西晋中人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为黄土隧道变形破坏机理。

E-mail:yao.li@chd.edu.cn

0 引言

黄土隧道施工时,易发生拱顶大幅沉降、初期支护大变形、洞内塌方、掌子面失稳和“冒顶”等工程问题,严重威胁施工人员的生命安全。以上现象主要源于隧道开挖引发的围岩应力重分布。施工时使用的超前支护措施可有效保障施工安全,但超前支护深入围岩内部,难以直接量测其与围岩相互作用的应力状态及围岩应力重分布过程,导致缺乏相关监控量测数据以评估支护效果。现有研究多采用模型试验,可监测开挖过程中围岩应力变化特征及地表沉降规律^[1-9]。如文献[1]通过模型试验研究了不同含水率和埋深下黄土盾构隧道开挖对围岩的扰动特征,得出隧道开挖对地层的扰动与含水率呈正相关。文献[2-4]通过模型试验研究了黄土隧道在开挖过程中的土拱效应。

模型试验中,可通过加入简化后的超前支护措施,模拟其超前支护作用,分析其作用机理。文献[10]通过模型试验研究了浅埋软岩隧道超前管棚支护机制,管棚和围岩沿隧道横向形成一定厚度的环向承载结构,沿隧道轴向形成梁支撑系统,有效控制拱顶围岩的松弛变形和应力释放。文献[11]以大断面黄土隧道穿越冲沟地貌背景研究了管棚支护的支护机制,研究发现管棚可以抑制围岩塑性区的向上发展。此外还有其他模型试验研究对比了不同超前支护措施^[12-13]、超前支护布设角度^[14]的支护效果。已有学者对不同超前支护在隧道开挖过程中的支护作用进行对比研究,但多集中在宏观变形的范围,对二者在诱发围岩应力重分布路径、范围、应力集中等方面的系统性差异研究较少,导致工程实践中超前支护选型多依赖经验,缺乏基于应力重分布的系统分析。

本研究通过模型试验与数值模拟相结合的方法,对比在无超前支护、超前小导管支护和超前管棚支护下大断面黄土隧道开挖引起的围岩应力重分布规律,揭示不同超前支护方式对围岩应力路径、应力场调整的关键影响机理。模型试验可为研究围岩应力重分布提供可靠的试验数据;数值模拟可在模型试验基础上,突破试验传感器布设的限制,实现对全域应力场、三维土拱形态、塑性区等参量的精细化与可视化分析。同时,创新隧道模型试验的分部开挖与支护、超前支护模拟、围岩内部应力监测技术,建立研究黄土隧道分部开挖与支护的模型试验技术,为不同超前支护形式

的选取提供依据。

1 工程背景

洛川隧道位于陕西省延安市洛川县后子头乡,为单洞双线高速铁路隧道。隧道最大埋深 64 m,开挖跨度为 15.6 m,断面面积为 167.3 m²,属大断面铁路黄土隧道。隧道下穿黄土梁塬,塬面地形平坦,塬周冲沟发育,围岩级别主要以 V 级为主。隧道所通过的地层主要为第四系全新上、中更新统风积层,主要为 Q₂、Q₃ 黄土。洛川隧道进口段 DK194+825 断面埋深 24 m,采用新奥法原理组织施工,开挖方式为三台阶开挖,实际工程中采用长度为 30 m、壁厚 6 mm 的 $\Phi 108$ 超前长管棚,布置范围为拱部 140°,环向间距 40 cm,以及长度 3.5 m、壁厚 3.5 mm 的 $\Phi 42$ 超前小导管,外插角度 10°,布置范围为拱部 140°,且纵向搭接长度不小于 1 m。衬砌断面如图 1 所示。

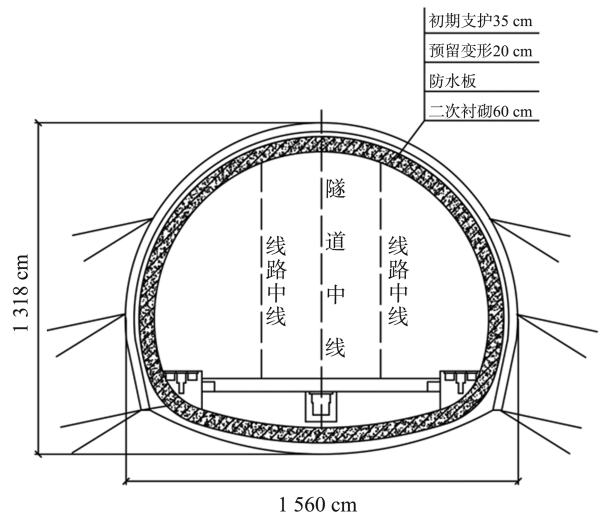


图 1 衬砌断面设计图

Fig.1 Lining cross-section design diagram

2 模型试验设计

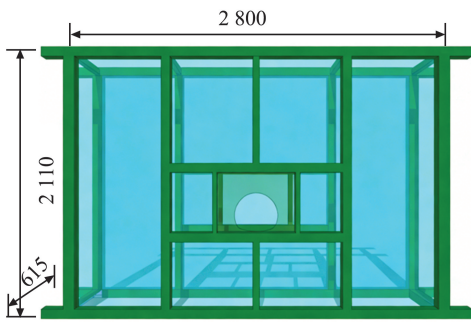
2.1 模型试验方案

本研究通过对比无超前支护、超前管棚支护、单排超前小导管支护 3 种工况,研究不同超前支护下特大跨度黄土隧道分部开挖后围岩内部应力重分布规律。模型中只考虑初期支护作用,将二次衬砌的支护作用看作安全储备。初期支护使用由钢架、喷射混凝土组成的复合结构模拟。

2.2 模型试验相似关系

模型试验中,小相似比^[15-16]多用于衬砌结构

内力分布与破坏机理研究,较大相似比^[17]多用于模拟隧道开挖对围岩的时序性扰动。涉及围岩位移及应力监测的模型试验多采用40:1~60:1相似比^[18-21]。本研究模型箱长宽高分别为2 800、615、2 110 mm,如图2所示。模型箱前后边界为10 mm厚钢化玻璃,中间为带有预留开挖孔的10 mm厚亚克力板,模型箱两侧边界为木制挡板。根据模型箱尺寸,几何相似比 C_L 确定为40:1,则模型中隧道开挖宽度为390 mm,隧道开挖高度为330 mm,覆土厚度为600 mm。为减少边界效应,隧道离两侧边界为3倍洞径,并在模型箱内侧张贴聚对苯二甲酸乙二酯透明塑料膜以降低边界摩擦力。将相似比换算后的模型试验地表沉降值与现场监测数据对比可知,其发展趋势和最终值均与实测结果高度吻合,有效验证了模型试验的可靠性。



单位: mm

图2 模型箱示意图

Fig.2 Schematic diagram for model test chamber

以几何相似比 C_L 与密度相似比 C_ρ 为基础,根据相似原理^[22]确定各项物理量相似比:

$$C_L = 40:1, \quad (1)$$

$$C_\rho = 1:1, \quad (2)$$

$$C_\mu = C_\varphi = 1:1, \quad (3)$$

$$C_E = C_\sigma = C_c = 40:1, \quad (4)$$

式中, C_μ 为泊松比的相似比, C_φ 为摩擦角的相似比, C_E 为弹性模量的相似比, C_σ 为应力相似比, C_c 为黏聚力相似比。

2.3 模型试验相似材料

2.3.1 围岩相似材料

试验选用石英砂、重晶石粉、滑石粉及液压油为原料配制围岩相似材料,经多轮配比试验,综合考虑原料物理力学特性及其级配接近原型黄土的影响,最终确定相似材料配比为石英砂:重晶石粉:滑石粉:液压油=8:4:3:0.15^[23],围岩相似材料配比如表1所示,围岩相似材料各项物理力学参数如表2所示。表中 ρ 为密度, E_s 为压缩模量, φ 为内摩擦角, c 为黏聚力。

表1 围岩相似材料配比

Table 1 Similar material mixing ratios for surrounding soil

材料	规格	质量比
石英砂	70~110目	8.00
重晶石粉	325目	4.00
滑石粉	1 250目	3.00
液压油	32#(黏度)	0.15

表2 围岩及相似材料物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters for surrounding soil and similar material

类型	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E_s/MPa	$\varphi/(\text{°})$	c/kPa	μ
原型	1 650	24.00	27.5	47.50	0.35
模型	1 640	0.62	27.4	1.32	0.35

2.3.2 喷射混凝土相似材料

隧道初期支护喷射混凝土采用C25混凝土,厚度为35 cm,弹性模量为28 GPa,泊松比为0.3。喷射混凝土模拟应满足等效抗弯刚度原则^[24],主要控制参数为弹性模量 E ,喷射混凝土厚度 d 和泊松比 μ 。国内外大量模型试验表明^[18,25-26],石膏混合物的物理力学特性比较接近喷射混凝土,故用其模拟喷射混凝土。石膏混合物弹性模量受水膏比影响较大,通过不同水膏比下石膏混合物试样测试,确定水膏比为1:1.3。喷射混凝土与相似材料各项物理力学参数如表3所示。

表3 喷射混凝土相似材料物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters for shotcrete

类型	E/GPa	d/cm	μ
原型	28.0	35.00	0.30
模型	0.7	8.75	0.28

钢架、管棚及超前小导管的模拟均需满足等效抗弯刚度相似原则^[27],抗弯刚度计算公式为

$$K = EI, \quad (5)$$

式中, E 为弹性模量, I 为被弯构件横截面绕其受弯方向中性轴的惯性矩。抗弯刚度应满足相似比 $C_K = K_p/K_m = 40^5$ (K_p 为原型抗弯刚度, K_m 为模型抗弯刚度)。

2.3.3 钢架相似材料

隧道钢架采用普通热轧I25a工字钢,弹性模量为210 GPa,间距为0.6 m。计算得模拟钢架的截面尺寸为:宽×高=5.0 mm×1.5 mm。

2.3.4 超前管棚相似材料

隧道采用 $\Phi 108$ 超前管棚,弹性模量为210 GPa,长度为30 m,壁厚6 mm,环向间距40 cm,外插角度 1° ,打设范围为拱部 140° ,管棚内布置4根 $\Phi 18$ 主筋,导向墙截面尺寸为1 m×1 m,如图3

所示。

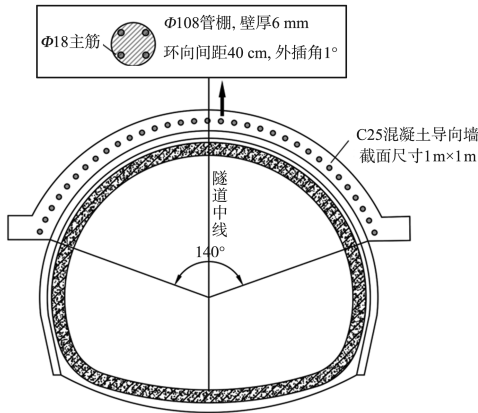


图 3 超前管棚示意图

Fig.3 Schematic diagram for advanced pipe roof

根据相似材料原理,试验采用楠竹条作为超前管棚相似材料,弹性模量为 13 GPa,拱顶上方共有 40 根管棚,管棚环向间距为 1 cm。因试验操作困难,采用 1 根楠竹条模拟 4 根管棚的支护效果。根据抗弯刚度相似原则^[28],由式(5)可计算得出 $K_p = EI = 7.84 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $K_m = 7.658 \times 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。当楠竹条的宽、高分别为 6、2 mm 时,其支护效果等同于 4 根管棚。10 根楠竹条均匀布置在套拱(相似材料为石膏,高×宽=2.5 cm×2.5 cm)140°范围内,如图 4 所示。

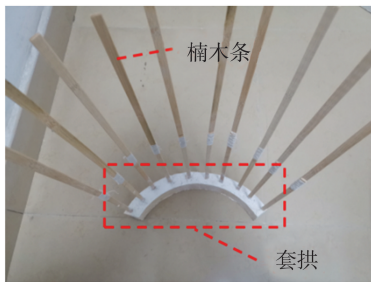


图 4 预制超前管棚模型

Fig.4 Prefabricated advanced pipe roof model

2.3.5 超前小导管相似材料

为模拟超前小导管的支护效果,在模型试验中原计划采用弹性模量为 210 GPa 的钢丝代替小导管,由相似比计算得出其直径为 0.32 mm。但其过于柔软导致支护效果不佳。根据抗弯刚度相似原则^[29],最后采用楠竹棒模拟超前小导管。由式(5)计算得 $K_p = EI = 1.033 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $K_m = 1.01 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。均匀布置在拱顶上方 140°范围内。为了保证加固效果,楠竹棒的抗压刚度与钢丝保持一致(楠竹棒抗压刚度为 $E_b \cdot A_b$,钢丝抗压刚度为 $E_i \cdot A_i$, E 为弹性模量, A 为构件截面面积)。由 $E_i \cdot A_i = E_b \cdot A_b$ 计算可得楠竹棒直径为 2.6 mm,长度

为 8.75 cm。

超前小导管与钢架用 3D 打印的连接件连接,控制小导管外插角为 15°,整体效果如图 5 所示。

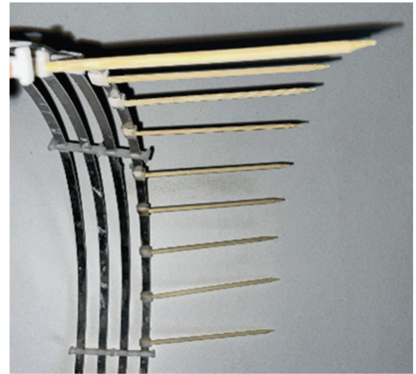


图 5 超前小导管模型

Fig.5 Prefabricated advanced small pipe model

2.4 监测点布置及开挖方案

试验中,沿隧道纵向布置了 3 个监测断面。断面 II 位于隧道中间;断面 I 位于其后方 100 mm 处;断面 III 位于其前方 100 mm 处。在 3 个断面(I、II、III)的围岩相似材料中共布设 22 个土压力盒,其中,横向放置 11 个,用于监测竖向围岩内部应力;垂直放置 11 个,用于监测水平围岩内部应力。测点位置集中于断面 II(绿色)的拱顶上方(6 个)和最大开挖线外侧(8 个),如图 6 所示。

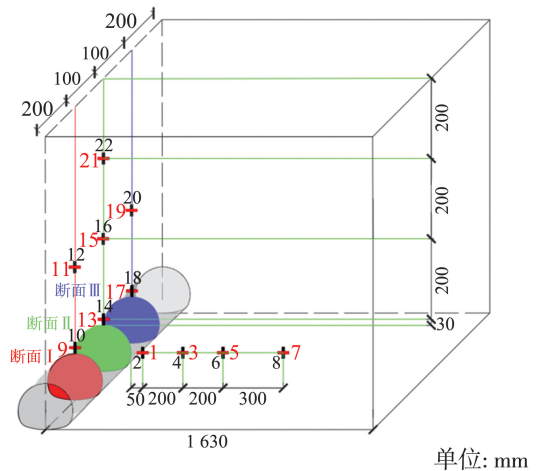


图 6 围岩内部应力测点位置

Fig.6 Location of soil internal stress measurement

本研究采用微型土压力盒(直径 2.8 cm,量程 0~30 kPa)监测土压力,数据经静态应变仪采集,如图 7 所示。为确保测量可靠性,在模拟试验条件下对土压力盒进行了系统校准:土压力盒埋设于相似材料中心(受力面朝上),静态应变仪(见图 8)调零后,分层压实 4 cm 等效材料并施加已知重量加载板记录初始基准值。随后分级加载至目标土层自重应力水平,继而分级卸载并记录读数,最终建立传

传感器测量应力与施加应力的校准关系^[30]。



图7 微型土压力盒
Fig.7 Micro-soil pressure sensor

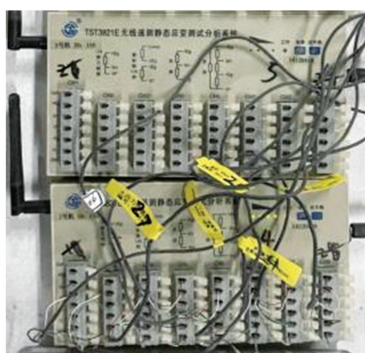


图8 静态应变仪
Fig.8 Static strain indicator

2.5 试验流程

隧道开挖方法为三台阶法,上台阶高 3.8 m,中台阶高 3.8 m,下台阶高 3.6 m,仰拱高 1.96 m,开挖进尺 2.4 m,如图 9 所示。开挖进尺为一榀钢架间距 0.6 m。模型隧道开挖采用三台阶法。根据模型几何相似比,试验开挖进尺为 6 cm,对应实际四榀钢架间距,图 9 中①、②、③、④为各开挖区域,Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ为相应初期支护。

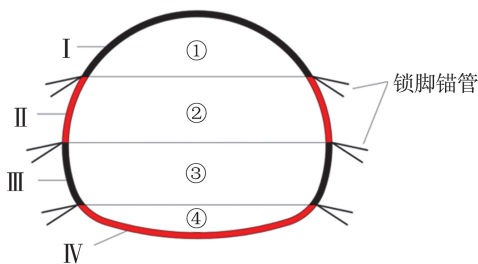


图9 三台阶开挖与支护示意图
Fig.9 Schematic diagram for three-bench excavation and supporting

模型试验操作流程为:制作模型土和支护结构模型→模型箱填土并埋设监测元件→施作超前支护→三台阶法开挖及支护。

2.5.1 初期支护及超前支护预制

模型试验采用三台阶分部开挖法,将钢架和

初期支护按每环开挖进尺(6 cm)分上、中、下台阶分部开挖和支护。每环衬砌由 4 榀钢架相似材料、喷射混凝土相似材料、超前支护相似材料组成,制作过程相同。首先,按上、中、下台阶钢架尺寸及形状定型并切割铝条,如图 10 所示;用 3D 打印横向连接件链接钢架并形成闭环,如图 11 所示;将 4 环钢架用 3D 打印纵向连接件链接并形成骨架结构;将超前支护用 3D 打印纵向连接件固定在铝条钢架上,并用热熔胶固定,连接件的外插角为 15°;再整体放入定制的初期支护模具中浇筑石膏,如图 12 所示;最后待石膏凝固后取出复合模型,在上、中、下台阶分界处切割石膏,如图 13 所示。

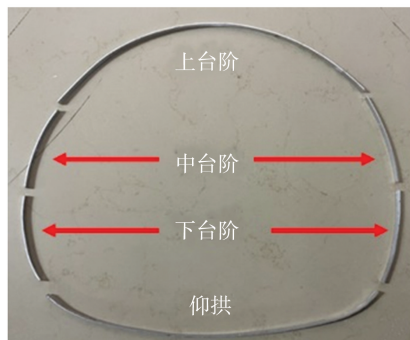


图10 钢架相似材料定型与切割
Fig.10 Molding and cutting of steel rib similarity material

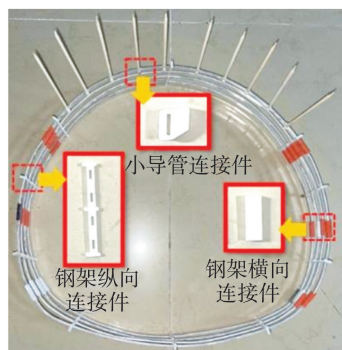


图11 复合模型骨架
Fig.11 Main ribs for the combined model



图12 石膏浇筑
Fig.12 Plaster casting

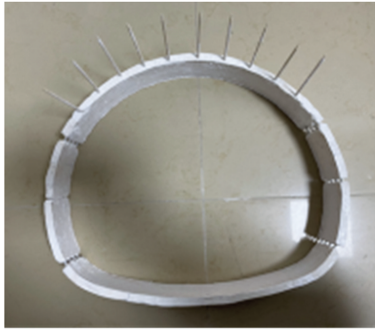


图 13 切割后的复合模型
Fig.13 Cutted combined model

现有模型试验中,多采用现场浇筑石膏模拟衬砌^[31-34],但难以保证石膏成型几何精度,且需静置凝固 30 min 以上^[31],耗时较长。为此,本研究创新使用基于 3D 打印滑动连接件与预制支护单元相结合的支护系统,实现非规则断面支护构件的快速定位与拼装。该方法克服了传统固定式和插销式连接的操作难题,可在有限空间内操作,且更易于对准并有效防止堵孔,可将支护安装时间缩短至 5 s。上、中、下台阶滑动连接件构造如图 14 所示,通过热熔胶将其与对应衬砌相连,上、中、下台阶初期支护的快速安装方式如图 15 所示。

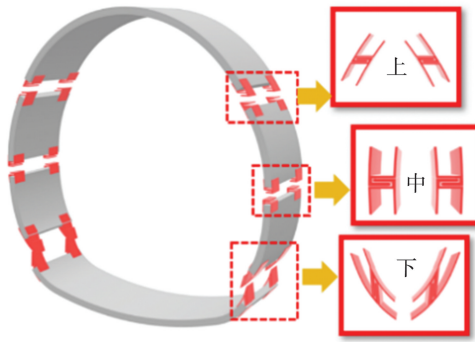
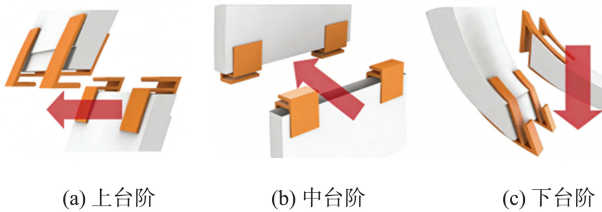


图 14 3D 打印滑动连接件位置及构造
Fig.14 Position and structure of 3D printing sliding connectors



(a) 上台阶 (b) 中台阶 (c) 下台阶

图 15 上-中-下台阶初期支护滑动连接示意图
Fig.15 Schematic diagram of initial support sliding connection of upper, middle, and lower benches

无超前支护开挖工况中不加入超前支护,如图 16(a)所示;超前小导管采用和每环上台阶衬砌同步施工模拟,如图 16(b)所示;超前管棚采用第一环预埋方法模拟,如图 16(c)所示。

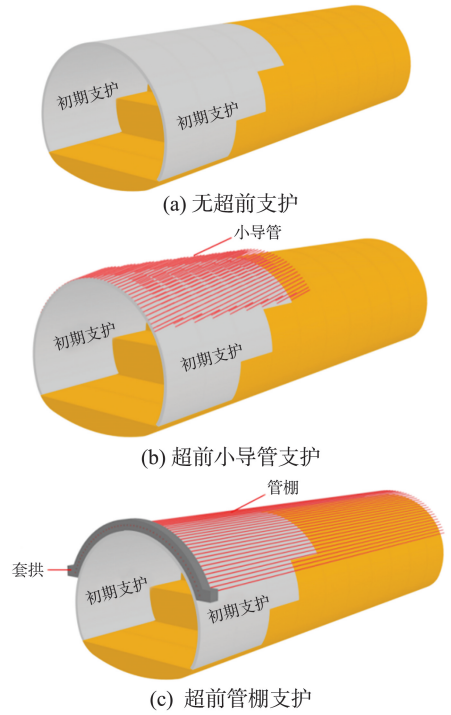


图 16 不同超前支护下分部开挖支护示意图
Fig.16 Schematic diagram of sequential excavation with different advanced supports

2.5.2 填土

采用分层欠压法填土。称取固定质量的相似土在 0 降落高度下填入模型箱底部,找平后压到指定位置,如第一层压实至 10.7 cm 处,往上依次递减至 10 cm 间距。重复填土流程至目标高度,填土后装置如图 17 所示。填土过程中,将监测元件埋设在设计位置,如图 18 所示。



图 17 填土后模型架
Fig.17 Model test chamber after soil filling

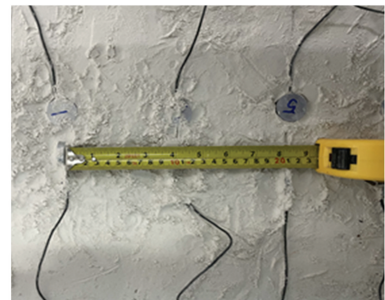


图 18 土压力盒埋设
Fig.18 Buried soil pressure sensors

2.5.3 分部开挖与支护

模型试验开挖按每循环 6 cm 推进。先开挖上台阶并安装支护与锁脚锚管;随后依次拓展至中、下台阶及仰拱,每阶段开挖后立即施加相应支护段,其通过滑动连接件逐级嵌合。即中台阶段嵌入上台阶滑动连接件,下台阶段嵌入中台阶滑动连接件,仰拱段则与下台阶滑动连接件对接。模型试验具体过程如图 19 所示。

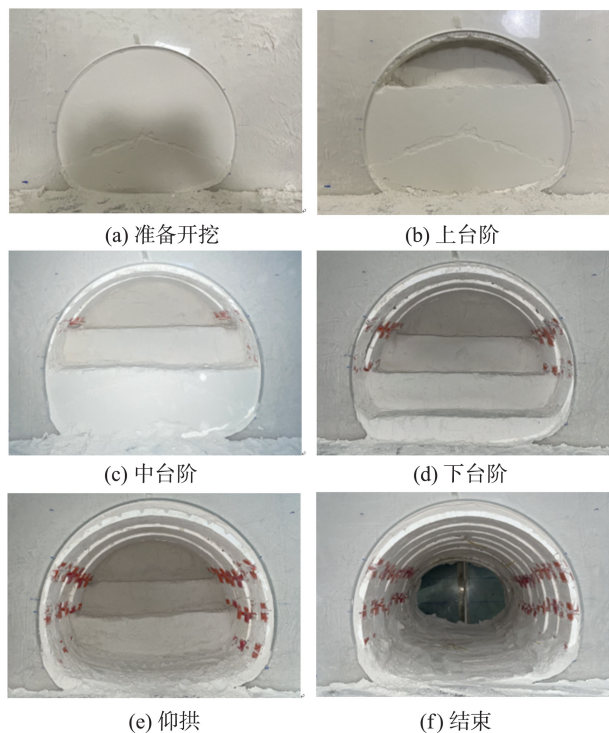


图 19 分部开挖与支护试验流程

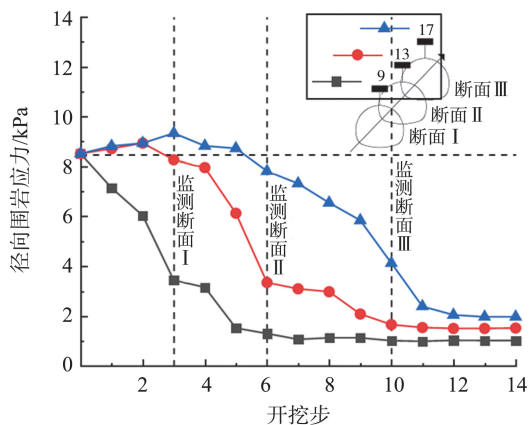
Fig.19 Model test sequences for sequential excavation and supporting

试验过程中发现当初期支护若被放置在模型土上,复合结构会整体下沉。下沉虽与实际工程相符,但由于模型土的强度更弱,整体下沉更为显著,会显著降低支护效果并导致掌子面围岩坍塌。本研究采用锁脚锚管固定方案,在初期支护安装完成后于其底部中心区域插入锁脚锚管相似材料,考虑等效刚度原则采用 $\Phi 2 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 钢圆棒模拟锁脚锚管作用,按施工阶段插入衬砌连接件预留孔洞,注石膏模拟注浆,与相似材料黏结成整体,确保开挖时衬砌片通过锚管结构形成自承体系。

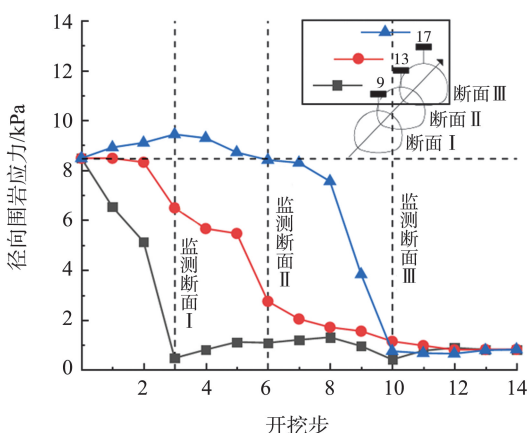
3 试验结果

3.1 不同超前支护工况下拱顶竖向围岩应力

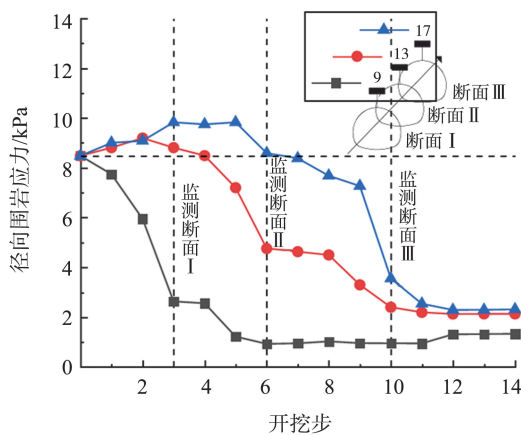
不同超前支护工况下,3 个监测断面拱顶竖向应力随开挖步变化情况如图 20 所示。



(a) 无超前支护工况下拱顶竖向围岩应力



(b) 超前小导管支护下拱顶竖向围岩应力



(c) 超前管棚支护下拱顶竖向围岩应力

图 20 不同超前支护下拱顶竖向围岩应力
Fig.20 Vertical soil stress at the crown under different advanced support conditions

在黄土隧道模型试验中,对比无超前支护、超前小导管及超前管棚 3 种工况可知,开挖至监测断面前,3 种工况的拱顶围岩竖向应力急剧释放、后续衰减趋稳。土拱强度与形成的位置在不同超前支护下表现出不同的演变规律。无支护时仅断面 III 出现应力先增后减,表明土拱作用范围有限且形成位置滞后。超前小导管支护下断面 II、III 均产生先

增后减的现象,证明超前支护促使土拱前移,增强了围岩的自承能力。超前管棚支护则进一步强化土体,断面Ⅱ、Ⅲ应力增幅显著高于小导管工况,表明其对土拱强度的进一步提升作用。

在掌子面开挖至监测断面前时,不同超前支护对拱顶竖向围岩应力释放的影响分析如表 4 所示。 D 为隧道直径,围岩应力释放率=(初始应力-当前应力)/初始应力 $\times 100\%$ 。

表 4 不同超前支护下围岩应力释放率(0D)

Table 4 Stress release rate of surrounding rock under different advanced support(0D)

测点	围岩应力释放率/%		
	无支护	超前小导管	超前管棚
9 号点	39.5	30.2	29.8
13 号点	35.5	28.1	15.1
17 号点	54.9	31.4	14.3

由表 4 数据可知,在隧道在开挖至每个监测断面前时,超前支护显著抑制了围岩应力释放。无支护工况下,测点应力释放率达 35.5%~54.9%,说明黄土围岩自稳能力较差;采用超前小导管后,释放率减小至 28.1%~31.4%;而超前管棚效果更优,释放率降至 14.3%~29.8%。

在隧道贯通之后,不同超前支护对拱顶竖向围岩应力释放的影响分析如表 5 所示。

表 5 不同超前支护下围岩应力释放率(贯通后)

Table 5 Stress release rate of surrounding rock under different advanced support(constructed)

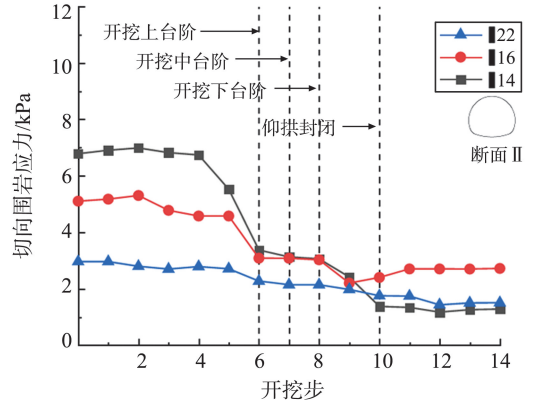
测点	围岩应力释放率/%		
	无支护	超前小导管	超前管棚
9 号点	90.6	86.3	84.3
13 号点	90.4	82.1	72.5
17 号点	90.6	77.6	71.6

隧道贯通后所有测点应力释放率均超 70%,说明隧道成洞后必然伴随应力重分布,但超前支护仍在发挥作用。无支护时各测点释放率达 90% 以上,黄土应力充分释放;超前支护释放率较无超前支护降低 4%~18%。

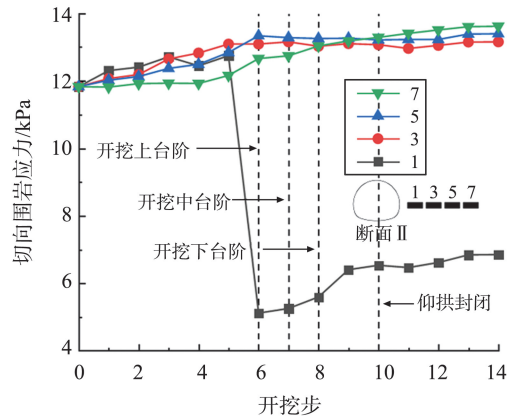
3.2 不同超前支护下拱顶、边墙切向围岩应力分析

无超前支护工况下,监测断面Ⅱ的拱顶与边墙处围岩应力随开挖步变化情况如图 21 所示。在无超前支护工况下,监测断面Ⅱ处的应力重分布揭示了纵向土拱动态抬升并逐步外扩的特征。在开挖临近监测断面时,拱顶 14 号点处的应力增大而 16、22 号点的应力减小,这表明此时隧道土拱的高度较低,荷载集中在 14 号点附近。随着开挖的进行,14 号点的应力逐渐降低,形成松弛区,而 16 号点的应力增加,表明此时土拱的顶点已经抬升至

16~22 号点之间。边墙区域同步显现土拱外移的趋势,近洞壁的 1 号点由应力集中区变为应力卸载区,而 5、7 号测点应力持续增大,表明荷载向外转移,土拱随之向外扩展。直至仰拱封闭后,应力场才趋于稳定。



(a) 无超前支护下拱顶水平围岩应力

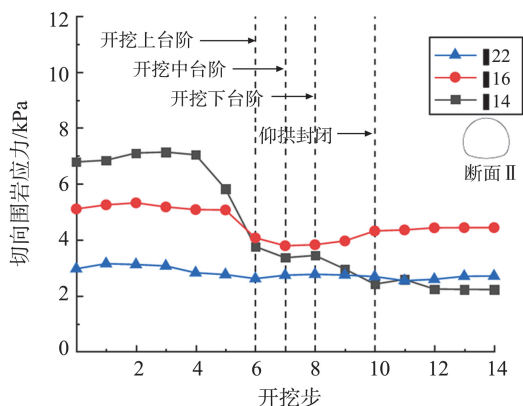


(b) 无超前支护下边墙竖向围岩应力

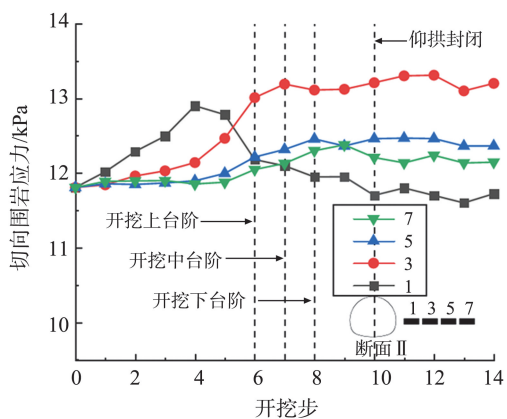
图 21 无超前支护下隧道周围围岩应力
Fig.21 Stress in the surrounding rock around a tunnel without advance support

超前小导管支护工况下,监测断面Ⅱ的拱顶与边墙处围岩应力随开挖步变化情况如图 22 所示。采用超前小导管支护后,围岩应力的重分布表明超前支护可以有效调控隧道的土拱与松弛区的演化过程。在隧道开挖的初期阶段,拱顶上方测点的应力均呈增大的趋势,表明纵向土拱初步形成。当开挖至监测断面时,14、16 号测点应力加速卸载,标志着松弛区形成。在开挖前期,边墙区域靠近隧道边界处的围岩应力增幅最大。断面Ⅱ上台阶开挖完成以后 1 号点应力减少,但 3、5、7 号点应力递增,表明土拱的外边界向外部迁移。对比无超前支护工况,小导管支护将拱顶水平应力释放率从 50.3% 降至 44.7%,抑制了松弛区的扩展,降低了围岩应力释放速率,并推动土拱稳定外移,优化了围岩自承体系。

超前管棚支护下,监测断面Ⅱ的拱顶与边墙处围岩应力随开挖步变化情况如图 23 所示。



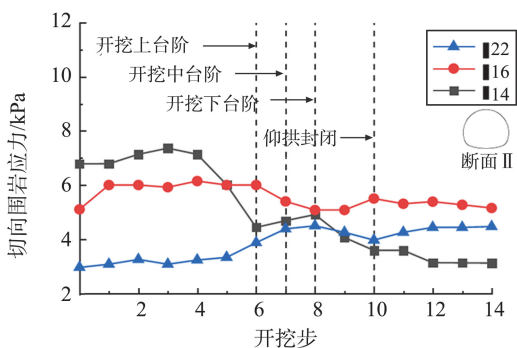
(a) 超前小导管支护工况下拱顶水平围岩应力



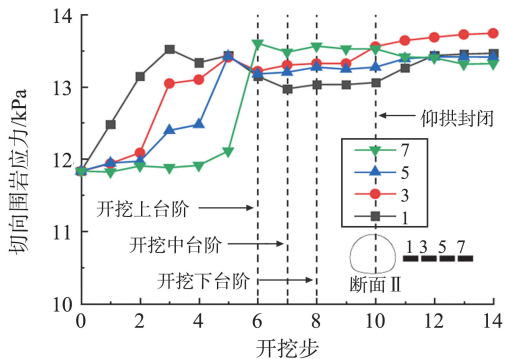
(b) 超前小导管支护工况下边墙竖向围岩应力

图 22 超前小导管支护下隧道周围围岩应力

Fig.22 Stress in the surrounding rock around a tunnel under advance small pipe support



(a) 超前管棚支护下拱顶水平围岩应力



(b) 超前管棚支护下边墙竖向围岩应力

图 23 超前管棚支护下隧道周围围岩应力

Fig.23 Stress in the surrounding rock around tunnels supported by advance pipe arches

而在超前管棚支护工况下,围岩应力的重分布展现出最强的土拱效应与整体稳定性。拱顶开挖过程中,22号点水平应力持续上升,表明土拱作用范围已经发展至22号点以上。尽管拱顶上方14、16号点加速卸载,形成松弛区,但其最终水平应力释放率仅为34.6%,较无支护和小导管工况分别降低15.7%与10.1%。断面开挖完成以后各点的应力保持在稳定状态,证实围岩整体处于稳定土拱承载状态,突显了管棚支护在形成大范围稳定承载拱方面的显著优势。

综上所述,超前支护通过调控围岩的应力释放与土拱空间演化提升稳定性。相较于无支护,超前小导管和管棚在掌子面开挖至监测断面前分别使应力释放率降低7.4%~23.5%和10.1%~40.6%,表明超前支护可显著抑制黄土隧道掌子面应力释放。贯通后抑制幅度降低为4.3%~12.4%和6.3%~19%,因此其核心机制在于延缓而非阻止应力释放。此外,增加支护刚度可推动纵向土拱前移并促进边墙土拱外扩,实现土拱三维扩展形成稳定承载拱,有效控制隧道局部失稳风险。

4 数值模拟分析

4.1 模型及参数

本研究以洛川隧道工程为原型构建三维数值计算模型,如图24所示。围岩采用Mohr-Coulomb本构模型,其能较好地反映黄土在剪切作用下的弹塑性力学特性与破坏行为^[2,19]。通过对现场取得的Q₂黄土试样进行室内试验,得到相应围岩物理力学参数,如表6所示。

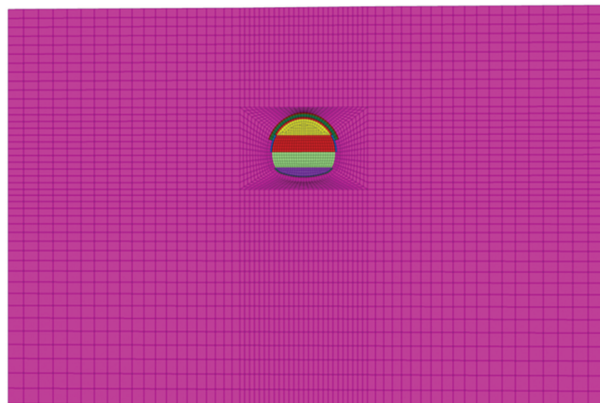


图 24 隧道模型

Fig.24 Tunnel model

表6 洛川隧道监测段 Q₂ 黄土物理力学参数

Table 6 Table of physical and mechanical properties of Q₂ loess in the monitoring section of luochuan tunnel

含水率/%	密度/(kg·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	泊松比	弹性模量/MPa
14.5	1 650	27.5	47.5	0.3	45

隧道断面采用三心圆加仰拱复合形式,开挖断面几何参数为:高度 13.18 m、宽度 15.6 m、埋深 24 m。模型空间域设置为长 140 m(沿隧道轴向)×宽 24.6 m(横向)×高 87.18 m(竖向),基于六面体实体单元进行精细化网格划分。依据圣维南原理,模型边界条件设定为:前、后、左、右四向施加法向位移约束,底部采用固定端约束,顶部设为自由地表边界,其中侧向边界距隧道中心 70 m(约 4.5 倍洞径),底部边界距隧道中心 56 m(约 3.6 倍洞径),满足边界效应控制要求。

4.2 数值模拟验证

为验证数值模型的合理性,对比 DK194+825 断面的地表沉降监测数据、室内模型箱试验与数值模拟结果如图 25 所示。

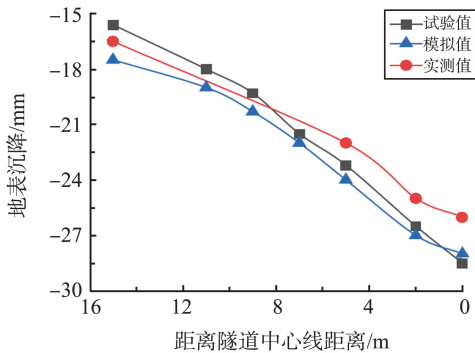


图 25 模拟合理性验证

Fig.25 Simulation rationality verification

结果表明,实测值、试验值与模拟值三者的变化规律高度一致,且最大误差不超过 10%。证实了数值模拟所采用的本构模型与参数能够有效反映隧道围岩的力学行为,同时验证了模型试验的合理性。

4.3 围岩应力分布

为探究在不同开挖进尺与不同超前支护工况下应力重分布情况,在隧道断面处每隔 15°布置一处测线,每条测线上的测点间隔为 4 m,监测点布置如图 26 所示。

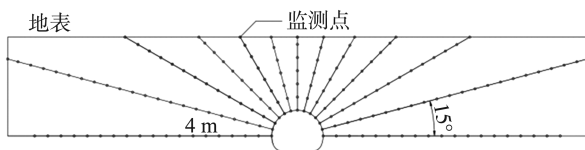


图 26 测点布置图

Fig.26 Layout of measurement points

4.3.1 无超前支护工况

在无超前支护工况下隧道土拱与松弛区的变

化情况如图 27 所示。将应力变化幅度超过 10% 的区域定义为土拱效应区(下文简称土拱),由图 27 可知,在无超前支护工况下,隧道土拱与松弛区演化呈现显著非线性特征。监测数据显示,土拱面积由初始 541 m² 增至 1 092 m²,增幅为 101.8%,其中开挖至监测断面时突增 19%,松弛区面积扩展至 138 m²。

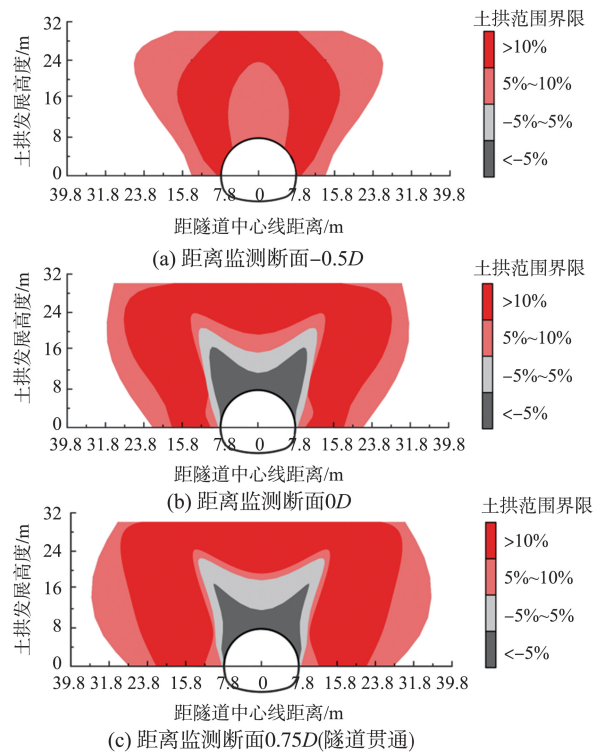


图 27 无超前支护工况土拱形态

Fig.27 Shape of soil arch under the condition without advanced support

4.3.2 超前小导管支护工况

在超前小导管支护工况下隧道土拱与松弛区的变化情况如图 28 所示。由图 28 可知,超前小导管支护工况下土拱的面积呈非线性增长,总增幅为 97%,较无支护工况降低了 8.2%,在 0D 阶段增速为 8.4%,较无支护降低 32%。松弛区的面积较无超前支护缩减了 19.6%,且扩展速率更趋近于稳定,降低了无超前支护的突变特征。

4.3.3 超前管棚支护工况

在超前管棚支护工况下隧道土拱与松弛区的变化情况如图 29 所示。由图 29 可知,相较于无超前支护工况,超前管棚支护工况下土拱面积总增幅为 97%,与超前小导管一致,开挖至隧道监测断面时,土拱的增幅较超前小导管减小 3%,超前管棚支

护工况的最终松弛区面积为 105 m²,较无支护减小 23.9%,较超前小导管降低 5.5%,表明超前管棚支护对抑制塑性区的发展效果最好。

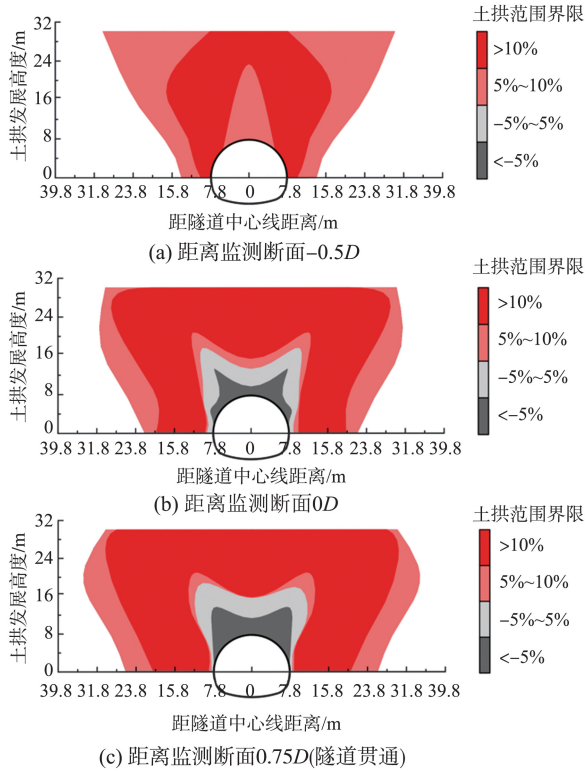


图 28 超前小导管支护工况土拱形态
Fig.28 Shape of soil arch under the condition of advanced small pipe support

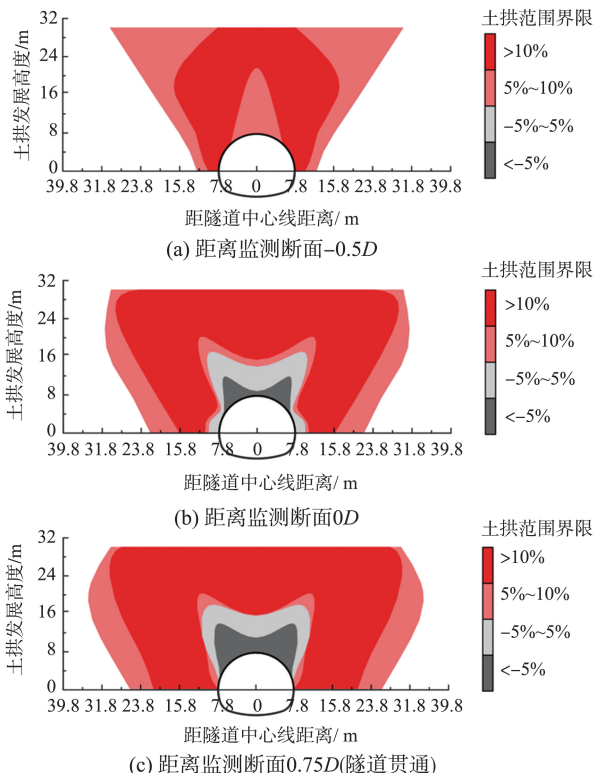


图 29 超前管棚支护工况土拱形态
Fig.29 Shape of soil arch under the condition of advanced pipe roof support

4.3.4 3种工况下三维土拱形态

当隧道开挖至一半(12.3 m)时,三维土拱形态如图 30 所示。受浅埋影响,3种工况的土拱外边界均发育至地表,但土拱内侧边界距隧道拱顶的高度显著不同。起始断面分别为 9.9、12.9、13.1 m,掌子面处土拱的厚度分别为 10.6、13.4、13.6 m,超前支护通过预支撑结构来约束围岩的变形,形成更厚实稳定的土拱。同时掌子面前方未开挖区域的土拱发育也得到显著提升,厚度分别为 3.0、3.4、3.9 m。

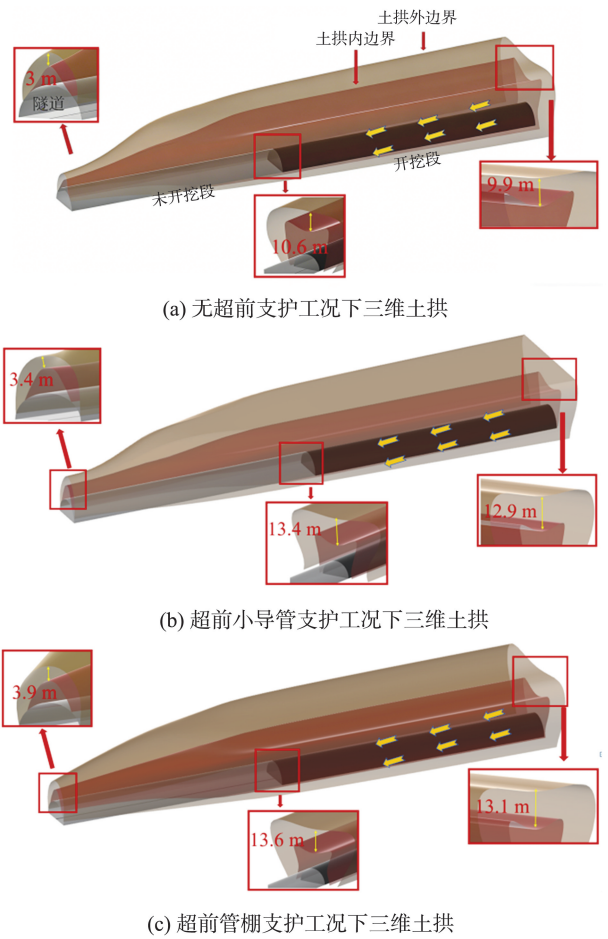


图 30 不同超前支护工况下三维土拱形态分布
Fig.30 Distribution of three-dimensional soil arch shapes under different advance support conditions

3种工况下松弛区与土拱变化规律与模型试验一致,松弛区均成“牙齿状”分布^[35]。隧道开挖过程中,超前支护通过重塑围岩应力体系,在动态开挖与长期稳定两阶段发挥关键控制作用。在动态开挖阶段,超前支护有效抑制了土拱的突变性扩展,优化其发育形态,显著提升土拱承载厚度(掌子面处厚度增加 26%~28%);开挖稳定后,超前支护对松弛区扩展产生长期抑制效应(以管棚支护效果最优)。三维形态分析进一步佐证了该双阶段作用机制,显示超前支护显著提升了土拱边界高度及前

方未开挖区土拱厚度。

4.4 塑性区

由于开挖过程中的扰动以及地应力作用,隧道周边会产生塑性区^[36]。无超前支护、超前小导管支护、超前管棚支护 3 种支护下,监测断面(0D)在开挖至 0D 与 0.75D(贯通)时的塑性区分布如图 31 所示。黄土隧道开挖至监测断面时,无支护条件下塑性区面积达 260 m²(扣除隧道断面)。超前支护显著抑制其扩展,小导管支护使总面积减少 36.4%,管棚支护则更优,总面积进一步降低 51.1%。隧道贯通后(0.75D),隧道应力重分布导致最大剪应力沿 45°方向扩展,无支护工况下形成的弱土拱效应加剧了剪切带的形成,塑性区演变为“蝴蝶形”^[37],其净面积在无支护下为 397 m²,小导管支护使其减少 40.4%,管棚支护则减少 49.1%。

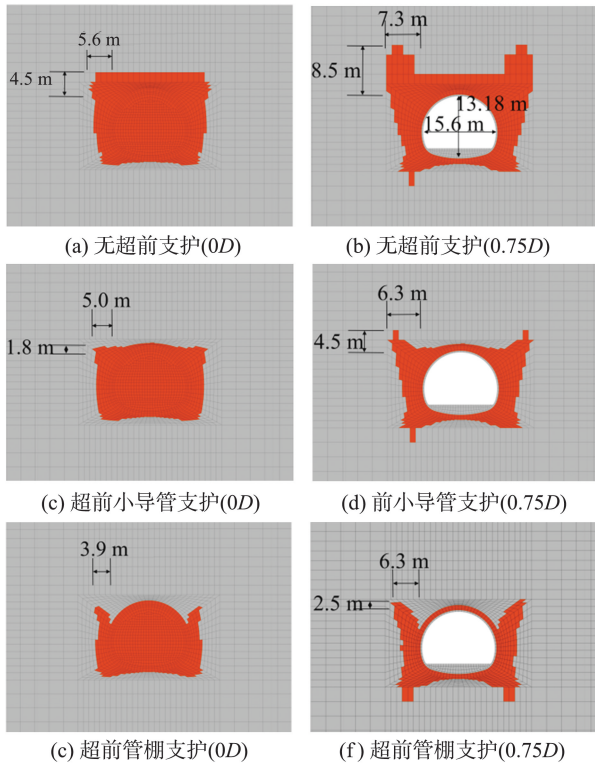


图 31 不同超前支护下监测断面处塑性区分布图
Fig.31 Distribution map of plastic zones at monitored cross sections under different advance support conditions

无超前支护、超前小导管支护、超前管棚支护 3 种支护下,隧道开挖过程中塑性区纵向分布如图 32 所示。无超前支护时,开挖面前方最大塑性区高度为 4.6 m,采用超前小导管支护后,塑性区高度降低至 2.1 m,降幅为 54.3%。而超前管棚支护效果显著,完全抑制未开挖区域竖向塑性区的发展。

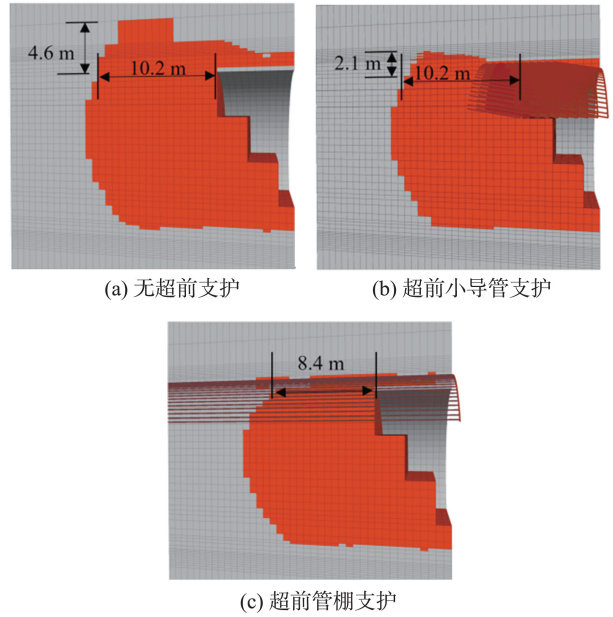


图 32 不同超前支护下塑性区纵向分布图
Fig.32 Longitudinal distribution map of plastic zone under different advance support conditions

超前支护通过主动增强土拱效应,有效抑制围岩塑性区的扩展。无支护时,土拱发育滞后且薄弱,引发围岩应力失稳释放、松弛区突变及塑性区大面积扩散。小导管通过“微型锚固”局部提升土体等效黏聚力,促使土拱进一步发育并外扩边界,降低塑性区扩展规模,但受限于低刚度与小覆盖范围,其应力传递效率较低;而管棚支护则借助“梁-拱”效应^[38-39],在开挖前预先构建三维荷载传递结构,优化土拱空间形态,实现应力重分布的提前控制,从而将拱顶塑性区扩张压制至接近零增长。然而,隧道拱肩作为轮廓曲率突变部位,是剪应力高度集中区,在垂直、水平土压力及剪应力复合作用下,抗剪强度较低的黄土易发生剪切滑移破坏^[40],当剪应力满足 $\tau \geq \sigma \cdot \tan \phi + c$ 时,土体将沿着最大剪应力面 $\theta = 45^\circ + \phi/2$ 方向发生滑移,导致塑性区呈典型的“蝴蝶形”分布,使松弛区与塑性区持续扩展。尽管超前管棚与小导管能在拱顶形成有效抵抗垂直压力的预支护结构,显著控制该处塑变区发展,但其布设范围常使拱肩处于支护边缘,且以轴向刚度为主的力学机制对抵抗该处集中剪应力效能不足,导致对此关键区域的抑制效果不佳。

4.5 拱顶上方不同深度竖向应力分布

不同超前支护工况下隧道贯通后,距隧道拱顶上方不同高度处的竖向围岩应力分布情况如图 33 所示。

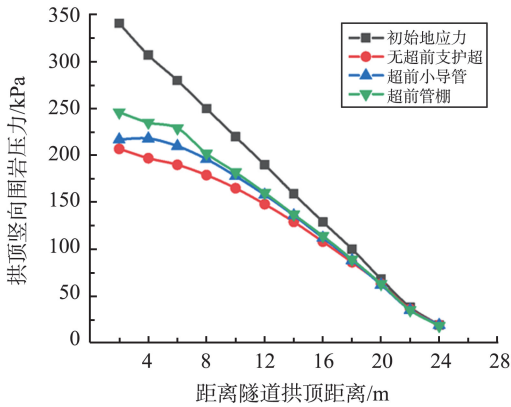


图33 不同工况下拱顶竖向围岩压力
Fig.33 Vertical rock pressure at the crown under different working conditions

超前支护通过荷载路径重构和围岩性能提升重构承载体系。无支护时,开挖导致塑性区扩展、自承能力丧失及拱顶剧烈卸荷。超前小导管通过提升局部黏聚力抑制塑性区扩展,并形成弱环向土拱,促使荷载侧移,部分缓解拱顶应力下降。超前管棚则通过其“梁效应”将拱顶荷载纵向传递至前方稳定土体,形成有效纵向土拱,显著减少应力释放;同时,密集管棚实现大范围土体整体加固,大幅提升围岩强度和形成稳定环向土拱能力,使拱顶竖向应力变化趋于平缓。管棚通过主动构建稳固的“纵向-环向”复合压力拱体系,成为优化浅埋黄土隧道围岩应力重分布的关键措施。

本研究所观测到的“纵向-环向”复合压力拱体系进一步验证了文献[38]提出管棚的“梁-拱效应”,即管棚在环向以“拱效应”承担荷载,在轴向以“梁效应”将荷载传递至初期支护。“纵向-环向”复合压力拱中,管棚在纵向形成厚度显著提升的土拱结构,管棚在环向形成整体拱壳,共同抑制围岩应力释放与塑性区扩展。此外,结果也符合文献[39]提出的管棚“分段式承载”特征,表现为在掌子面前方未开挖区,管棚显著增强了土拱的纵向延伸与空间约束效应。综上,本研究从围岩应力重分布与土拱形态演变的角度,实证了“梁-拱效应”在浅埋黄土隧道中的适用机制,为超前支护体系的设计与工程优化提供了理论支撑。

5 结论

本研究通过模型试验与数值模拟相结合的方法,探究了无支护、超前小导管支护及超前管棚支护3种工况下浅埋大断面黄土隧道的围岩应力重分

布规律。揭示了超前支护调控围岩应力的关键机制,并得出以下结论。

(1)研发基于3D打印的滑动连接件与锁脚锚管固定系统,结合“等效抗弯刚度”相似材料制备方法,实现了浅埋大断面黄土隧道三台阶分步开挖支护的精细化物理模拟,有效解决了钢架、管棚等异质支护结构的协同模拟难题。

(2)隧道开挖过程中,超前支护强化围岩三维土拱效应,提升了土拱厚度、纵向长度和围岩稳定性。相较于无超前支护,超前小导管支护将开挖面土拱高度提升26.4%;超前管棚支护形成“梁-拱复合效应”,将土拱厚度提升28.3%;超前支护减小了围岩应力释放的突变性。

(3)隧道贯通后,3种工况下土拱发育程度差异较小,但松弛区与塑性区差异显著。超前小导管将松弛区与塑性区面积分别减小19.6%和40.4%;超前管棚支护将松弛区与塑性区面积进一步降低23.9%和49.1%,有效抑制拱顶塑性区的竖向发展。超前支护显著降低最终应力释放率,降幅达4.3%~19.0%,且管棚支护使拱顶应力分布更趋均匀。然而,受拱肩复杂应力及支护自身局限影响,超前支护对拱肩局部松弛区发展的抑制效果有限。

本研究中,模型箱试验采用刚性边界,其虽与隧道两侧间距为3倍隧道洞径,仍对围岩应力重分布产生一定干扰,数值模拟中的法向位移约束与固定边界同理。此外,本研究未考虑黄土水敏性以及含水率变化,可能影响土拱的形成效率及超前支护的最终承载效果。建议在今后的研究中,充分考虑黄土围岩在节理裂隙下的雨水入渗影响,丰富极端工况下超前支护对黄土隧道围岩重分布的影响研究。

参考文献:

- [1] 韩兴博, 陈子明, 叶飞, 等. 黄土盾构隧道开挖围岩扰动特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(5): 968-977.
HAN Xingbo, CHEN Ziming, YE Fei, et al. Model tests on disturbance characteristics of surrounding rock of loess shield tunnels during excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(5): 968-977.
- [2] 潘皇宋, 杜广印, 王坤, 等. 无衬砌黄土隧道压力拱模型试验及数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(5): 949-955.
PAN Huangsong, DU Guangyin, WANG Kun, et al. Model test and numerical simulation on pressure arch of

- unlined loess tunnel[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2019, 49(5): 949-955.
- [3] 李盛,王起才,马莉,等.黄土地区高填土明洞土拱效应及土压力减载计算[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(5): 1055-1062.
LI Sheng, WANG Qicai, MA Li, et al. Earth pressure and soil arch effect for high fill open cut tunnel in loess area under different load reduction schemes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(5): 1055-1062.
- [4] 扈世民.黄土隧道围岩压力拱效应分析[J]. *铁道学报*, 2014, 36(3): 94-99.
HU Shimin. Analysis on pressure-arch effect of surrounding rock in loess tunnel[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(3): 94-99.
- [5] 张成平,韩凯航,张顶立,等.城市软弱围岩隧道塌方特征及演化规律试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(12): 2433-2442.
ZHANG Chengping, HAN Kaihang, ZHANG Dingli, et al. Test study of collapse characteristics of tunnels in soft ground in urban areas[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(12): 2433-2442.
- [6] 张晓清,张孟喜,李林,等.多线叠交盾构隧道近距离穿越施工扰动机制研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(4): 1133-1140.
ZHANG Xiaoqing, ZHANG Mengxi, LI Lin, et al. Mechanism of approaching construction disturbance caused by multi-line overlapped shield tunnelling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 1133-1140.
- [7] 郑刚,张扶正,张天奇,等.盾构隧道开挖及补偿注浆对地层扰动影响的室内试验及数值模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(10): 1741-1753.
ZHENG Gang, ZHANG Fuzheng, ZHANG Tianqi, et al. Disturbance of shield tunnel excavation and compensation grouting to surrounding soil: laboratory tests and numerical simulations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(10): 1741-1753.
- [8] 翁效林,王俊,张刚,等.黄土地区地铁开挖引起地表沉降试验分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增刊2): 4348-4352.
WENG Xiaolin, WANG Jun, ZHANG Gang, et al. Test study on ground subsidence caused by metro excavation in loess area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Suppl.2): 4348-4352.
- [9] 王道远,袁金秀,朱永全,等.硬塑-流塑浅埋黄土隧道变形特性及合理预留变形量模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 3813-3822.
WANG Daoyuan, YUAN Jinxiu, ZHU Yongquan, et al. Model test study of deformation characteristics and reasonable reserved deformation of shallow-buried loess tunnel with hard-flow plastic[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 3813-3822.
- [10] 武松,汤华,罗红星,等.浅埋软岩公路隧道超前管棚支护机制与工程应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(增刊1): 3080-3091.
WU Song, TANG Hua, LUO Hongxing, et al. Study on advanced pipe-shed support mechanism and engineering application of shallow-buried soft rock highway tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(Suppl.1): 3080-3091.
- [11] 赵文财,范飞飞,李子琦,等.基于大管棚支护的大断面黄土隧道穿越冲沟地貌控制效果分析[J]. *公路*, 2020, 65(8): 380-385.
ZHAO Wencai, FAN Feifei, LI Ziqi, et al. Analysis of control effect of large-section loess tunnel crossing gully based on large tubular shed support[J]. *Highway*, 2020, 65(8): 380-385.
- [12] HISATAKE M, OHNO S. Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(2): 120-127.
- [13] 李化云,张志强,王志杰,等.浅埋大跨隧道预加固措施相似模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(增刊2): 133-138.
LI Huayun, ZHANG Zhiqiang, WANG Zhijie, et al. Similarity model test study of pre-reinforcement measures of shallow tunnel with large cross-section[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Suppl.2): 133-138.
- [14] 郭璇,张鸿儒,蒙蛟,等.软弱围岩隧道管棚预支护开挖土压分布模型试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1214-1224.
GUO Xuan, ZHANG Hongru, MENG Jiao, et al. Model test to earth pressure distribution on pipe roof of tunnels as pre-supporting system in weak surrounding rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(6): 1214-1224.
- [15] 潘笑海,申玉生,王浩鰲,等.多破裂面走滑断层错动下隧道结构响应规律研究[J]. *现代隧道技术*, 2024, 61(4): 210-220.
PAN Xiaohai, SHEN Yusheng, WANG Haokang, et al. Study on response characteristics of the tunnel structure under dislocation of strike-slip faults with multiple fracture surfaces[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2024, 61(4): 210-220.
- [16] 铁明亮,常铭宇,詹胜文,等.基于地基梁理论的断层非线性错动下隧道纵向响应研究[J]. *隧道建设(中英*

- 文), 2024, 44(7): 1365-1376.
- TIE Mingliang, CHANG Mingyu, ZHAN Shengwen, et al. Longitudinal response of tunnels under nonlinear fault displacement based on foundation beam theory [J]. Tunnel Construction, 2024, 44(7): 1365-1376.
- [17] 刘新荣, 肖宇, 韩亚峰, 等. 隧道锚与下穿隧道相互影响的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(11): 1978-1987.
- LIU Xinrong, XIAO Yu, HAN Yafeng, et al. Model tests on interaction between tunnel-type anchorage and underpass tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(11): 1978-1987.
- [18] 程选生, 周欣海, 王平, 等. 黄土隧道结构的振动台模型试验研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 136-146.
- CHENG Xuansheng, ZHOU Xinhai, WANG Ping, et al. Shaking table model test of loess tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 136-146.
- [19] 来弘鹏, 赵铭坤, 刘禹阳. 浅埋黄土隧道围岩压力调控技术及效果分析[J]. 中国公路学报, 2024, 37(11): 181-193.
- LAI Hongpeng, ZHAO Mingkun, LIU Yuyang. Control technology and effect analysis of surrounding rock pressure in shallow-buried loess tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(11): 181-193.
- [20] 郭永军, 李超, 郑建国, 等. 地面堆载对西安黄土层中既有盾构管片影响研究[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(4): 61-72.
- GUO Yongjun, LI Chao, ZHENG Jianguo, et al. Influence of ground surcharge on existing shield tunnel segments in Xi'an loess strata [J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62(4): 61-72.
- [21] 李璋, 白森, 郑建国, 等. 基坑开挖对西安黄土地层中既有盾构隧道围岩压力及变形影响分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2025, 7(1): 35-47.
- LI Zhang, BAI Sen, ZHENG Jianguo, et al. The influence of foundation pit excavation on the surrounding soil pressure and deformation of existing shield tunnel in Xi'an loess stratum [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2025, 7(1): 35-47.
- [22] 林韵梅. 实验岩石力学: 模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 4-6.
- [23] LI Y, DONG X, DU X C, et al. Investigation on tunnelling-induced soil pressure changes, a modified trapdoor test study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 148: 105770.
- [24] 来弘鹏, 谢永利, 杨晓华. 公路隧道衬砌断面型式模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 740-744.
- LAI Hongpeng, XIE Yongli, YANG Xiaohua. Model test study on sectional form of highway tunnel lining [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(6): 740-744.
- [25] 李秋铃, 刘阳, 杨辉宗, 等. 深埋软岩隧道开挖应力释放机理的模型试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(增刊2): 722-731.
- LI Qiuling, LIU Yang, YANG Huizong, et al. Model test study on stress release mechanism of deep buried soft rock tunnel excavation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20(Suppl. 2): 722-731.
- [26] 张佳威, 崔臻, 张翔宇, 等. 高地应力环境下跨活断层隧道抗错断铰接设计试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3333-3344.
- ZHANG Jiawei, CUI Zhen, ZHANG Xiangyu, et al. Hinged design for resisting shear displacement of a deep-buried tunnel crossing an active fault under high in-situ stress conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(11): 3333-3344.
- [27] 林刚, 何川. 连拱公路隧道施工方法模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2003(6): 1-6.
- LIN Gang, HE Chuan. Study on the reasonable construction method for a double-arch road tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2003(6): 1-6.
- [28] 傅立磊. 超浅埋软岩大断面隧道下穿既有交通路基变形控制技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019: 75.
- FU Lilei. Research on deformation control technology of continuously passing through existing roadbed in ultra-shallow buried soft rock large-section tunnel [D]. Beijing, China Academy of Railway Sciences, 2019: 75.
- [29] 江贝. 超大断面隧道软弱围岩约束混凝土控制机理及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2016: 25.
- JIANG Bei. Control mechanism and application of confined concrete for super large section tunnel on weak surrounding rock [D]. Jinan: Shandong University, 2016: 25.
- [30] DU X C, LI Y, DONG X, et al. Replicating the sequential excavation method in tunnel model tests [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 158: 106425.
- [31] 田志宇, 林国进, 杨枫, 等. 隧道不同支护体系的支护效果模型试验研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(2): 134-139.

- TIAN Zhiyu, LIN Guojin, YANG Feng, et al. Experimental test of support effect of different tunnel support systems [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(2): 134-139.
- [32] 赵亮亮, 杨文波, 潘文韬, 等. 不同大变形等级的层状软岩隧道施工模型试验与数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(2): 454-467.
- ZHAO Liangliang, YANG Wenbo, PAN Wentao, et al. Study on model test and numerical simulation of layered soft rock tunnel construction with different large deformation grades [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(2): 454-467.
- [33] 疏梓宸, 刘阳, 张建经, 等. 深埋软岩隧道围岩力学响应及支护受力特性模型试验研究[J]. *现代隧道技术*, 2024, 61(3): 184-193.
- SHU Zichen, LIU Yang, ZHANG Jianjing, et al. Mechanical response of surrounding rock and supporting structure stress characteristics in deep-buried soft rock tunnel: a model test study [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2024, 61(3): 184-193.
- [34] 王敬勇, 王平, 杨锦, 等. 基于物理模型试验的碳质千枚岩隧道支护结构优化研究[J]. *现代隧道技术*, 2025, 62(3): 160-169.
- WANG Jingyong, WANG Ping, YANG Jin, et al. Optimization study on the support structure of a tunnel in carbonaceous phyllite using physical model tests [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2025, 62(3): 160-169.
- [35] 李尧, 董星, 陈厚先, 等. 活动门试验中土体变形及破坏规律[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2023, 53(5): 92-102.
- LI Yao, DONG Xing, CHEN Houxian, et al. The soil deformation and failure features in trapdoor tests [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2023, 53(5): 92-102.
- [36] 郝艳广, 徐建升, 明道贵, 等. 锚杆加固作用下椭圆形深埋隧洞承载力分析[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2024, 54(1): 131-140.
- HAO Yanguang, XU Jiansheng, MING Daogui, et al. Analysis of the bearing capacity of the elliptical deep tunnel under the action of the anchor rod reinforcement [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2024, 54(1): 131-140.
- [37] 裴超, 肖勇, 朱智勇, 等. 复杂应力环境中隧道大变形特征与形变控制[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2023, 5(2): 89-98.
- PEI Chao, XIAO Yong, ZHU Zhiyong, et al. Large deformation characteristics and deformation control of tunnel in complex stress environment [J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2023, 5(2): 89-98.
- [38] 李然, 王圣涛, 王静峰, 等. 考虑微拱效应的隧道管棚受力机制分析与支护效果评价[J]. *岩土工程学报*, 2023, 45(3): 561-570.
- LI Ran, WANG Shengtao, WANG Jingfeng, et al. Mechanical behaviors and supporting effect evaluation of pipe roof in tunneling engineering considering micro-arch effects [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(3): 561-570.
- [39] 姚志雄, 何嘉玮, 郑国文, 等. 超前管棚承载机理及力学特性分析和工程应用探讨[J]. *现代隧道技术*, 2025, 62(2): 60-70.
- YAO Zhixiong, HE Jiawei, ZHENG Guowen, et al. Analysis of the load bearing mechanism and mechanical properties of the advanced pipe roof and discussion on its engineering application [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2025, 62(2): 60-70.
- [40] 丁建奇, 王陈成, 朱向闪, 等. 大直径隧道施工对临近建筑的作用机制[J]. *隧道与地下工程灾害防治*, 2025, 7(1): 22-34.
- DING Jianqi, WANG Chencheng, ZHU Xiangshan, et al. Influence mechanism of large diameter tunnel construction on adjacent buildings [J]. *Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering*, 2025, 7(1): 22-34.

(编辑:宋艳)