文章编号：1671－8496－(2026)－04－0056－07

软弱破碎围岩隧道施工力学响应与支护参数优化分析

周建波
（中铁十八局集团第二工程有限公司，河北 唐山 064000）

摘　要：随着我国交通设施向复杂山岭地区延伸，隧道施工常面临断层破碎带、软弱围岩、浅埋偏压等不良地质条件，围岩变形控制难度大，直接影响工程安全。以新晋高速柳园隧道为背景，采用现场监测、数值模拟与参数分析相结合的方法，系统研究复杂环境下隧道施工变形规律与控制技术。监测表明，变形主要集中于核心土开挖后的应力调整阶段，仰拱及时封闭对控制变形至关重要。通过建立三维数值模型，分析初期支护厚度、超前注浆范围和开挖进尺等参数对围岩变形的影响，提出初期支护厚度宜为200～250 mm、拱部注浆范围130°～140°、开挖进尺不大于1.0 m的优化建议，可在保障安全的同时兼顾经济性。研究成果可为类似地质条件下隧道施工提供参考。

关键词：隧道施工；复杂环境；变形规律；参数优化；数值模拟；控制技术
中图分类号：U455　　**文献标识码**：A

Mechanical Response of Soft and Broken Rock Tunnel Construction and Optimization of Support Parameters

ZHOU Jianbo
(China Railway 18th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Tangshan 064000, Hebei, China)

Abstract: With the extension of China's transportation infrastructure into complex mountainous areas, tunnel construction frequently encounters adverse geological conditions such as fault fracture zones, weak surrounding rock, and shallow buried bias pressure. Controlling deformation of the surrounding rock is challenging and directly affects project safety. This study takes the Liuyuan Tunnel on the Xinjin Expressway as a case study. By integrating field monitoring, numerical simulation, and parameter analysis, it systematically investigates the deformation laws and control techniques for tunnel construction under complex environments. Monitoring results indicate that deformation primarily concentrates during the stress adjustment stage following core soil excavation, and the timely closure of the inverted arch is crucial for deformation control. By establishing a three-dimensional numerical model, the influence of parameters such as initial support thickness, advanced grouting range, and excavation advance length on surrounding rock deformation is analyzed. Optimization recommendations are proposed: an initial support thickness of 200～250 mm, an arch grouting range of 130°～140°, and an excavation advance length not exceeding 1.0 m. These measures can ensure safety while maintaining cost-effectiveness. The research findings provide a reference for tunnel construction under similar geological conditions.

Key words: tunnel construction; complex environment; deformation law; parameter optimization; numerical simulation; control technique

随着我国交通基础设施建设向山区纵深延伸，隧道工程频繁穿越断层破碎带、软弱围岩、浅埋偏压等复杂地质段。此类条件下，围岩自稳能力差、变形敏感性强，施工期变形控制不仅关乎隧道结构

收稿日期：2026-01-22
作者简介：周建波，工程师，本科，研究方向为工程技术管理

自身安全，还直接影响地表环境稳定与工程进度[1-2]。因此，深入揭示复杂地质隧道施工过程中的变形演化规律，并据此形成科学有效的变形控制技术，具有重要的理论意义与工程价值[3-4]。

围绕隧道施工变形问题，国内外学者已开展大量研究。在理论层面，基于弹塑性力学与岩土本构关系的解析方法为理解围岩－支护相互作用奠定了基础[5-6]；数值模拟技术则被广泛用于模拟不同工法与支护条件下的围岩力学响应，显著提升了对施工过程力学行为的预测能力[7-9]；现场监测通过位移、应力等数据的实时采集，为围岩稳定性判别与支护效果评价提供了直接依据[10-11]。近年来，将监测数据与数值模型相结合进行动态反馈分析的研究逐渐增多，并在部分工程中取得良好效果[12]。然而，现有研究针对软弱破碎围岩条件下隧道施工变形的阶段性演化特征，尤其是各开挖工序对变形贡献的定量刻画尚不充分；关于初期支护厚度、超前加固范围、开挖进尺等关键施工参数的综合影响机制缺乏系统对比，参数取值多依赖工程经验，难以实现安全与经济的平衡[13]。上述问题在浅埋、破碎、大断面隧道中尤为突出，亟需通过典型案例的系统研究加以解决。

鉴于此，本文以新晋高速公路柳园隧道为工程背景，综合运用现场监测、数值模拟与参数分析等方法，明确施工过程中围岩的变形响应规律，通过建立并验证三维数值模型，系统分析初期支护厚度、超前注浆范围及开挖进尺等参数对围岩变形的定量影响，确定其经济合理的取值区间，以期为类似复杂地质条件下的隧道安全建造提供理论依据与实践参考。

1 工程与地质概况

1.1 工程概况

柳园隧道为双线分离式隧道，左、右线长度均为 2 183 m，属于长隧道。隧道起讫里程为 K57 + 620 ~ K63 + 185，线路全长 5.565 km。隧道设计为单向坡，最大埋深为 35 ~ 46 m，进出口段属于浅埋段。隧道开挖跨度 12.5 m，开挖高度 9.8 m，开挖断面面积 120 m^2，属于大断面隧道。该隧道不仅是线路的重要组成部分，后期还需作为 T 梁运梁通道，因此对施工期变形控制及结构稳定性提出了极高要求。

1.2 地质及水文条件

隧道区域位于华北平原向太行山急剧抬升的过渡地带，属大起伏高山地貌。由于新生代构造运动活跃，山体持续上升，河流下切强烈，形成峰峦叠嶂、沟壑纵横的复杂地形，地面高程变化剧烈。隧道轴线穿越一近东西向的山脊，进出口位于陡峭斜坡，自然坡度达 25 °～30 °，施工场地极为狭窄，交通不便。

根据地勘资料及设计文件，隧道穿越区围岩条件复杂，工程地质属复杂类型。洞身主要为石灰岩，受多期构造运动影响，岩体中发育断裂与节理密集带，围岩整体性受到严重破坏，局部形成破碎带及软弱夹层；场地地层由上而下依次为素填土、粉质黏土、石灰岩，见图 1。

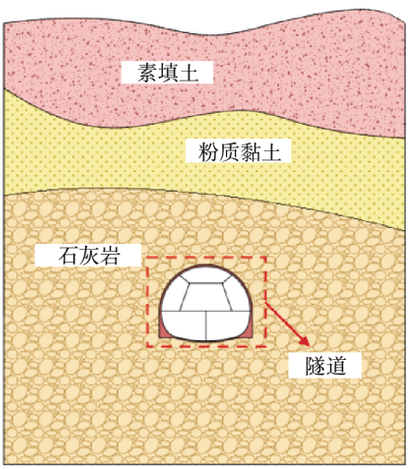

图 1　地质剖面图

1.3 工程难点

本工程隧道施工面临多重复杂挑战，主要重难点：①隧道穿越断层破碎带及节理密集带，围岩自稳能力极差，开挖过程中极易引发坍塌、掉块。同时，存在岩溶裂隙水，存在突水、涌泥风险。②隧道进出口段埋深浅，且位于陡峭山坡，同时施工场地狭窄，材料运输、弃渣困难，大型设备布置受限。

1.4 设计施工方法概况

针对隧道穿越的复杂地质条件，工程采用环形开挖预留核心土法作为开挖工法，如图 2 所示。具体步骤为在隧道拱部进行环形导坑即进行Ⅰ、Ⅱ部分开挖施工，保留核心土，开挖完成即施作初期支护，待拱部支护稳定后，开挖预留核心土部分。随后，跳槽开挖下断面Ⅳ、Ⅴ部分，施工完成后尽快施作仰拱初期支护及仰拱回填，使初期支护体系尽早闭合成环。待围岩变形基本稳定后，施作整体式二次模筑衬砌。在隧道开挖过程中，开挖循环进尺严格控制在 1 m；钢架间距为 0.6 m；系统锚杆采用长 3.5 m 的中空注浆

锚杆；喷射混凝土初期支护厚度为25 cm。

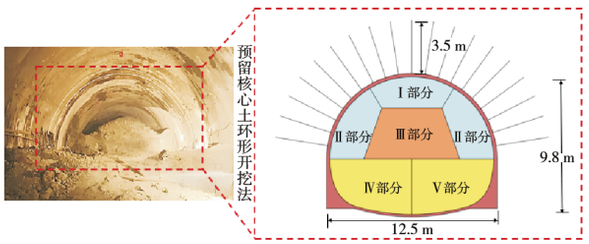

图2 隧道开挖方法示意图

2 现场监测分析

2.1 测点布置

考虑到隧道施工周期长、监测数据总量庞大，为明确复杂地质环境下围岩的变形特性，将地质条件最不利、施工风险最集中的隧道进口浅埋段确定为重点监测与分析区段。该区段全长200 m，最大埋深不足50 m，围岩以Ⅴ级为主，岩体破碎，自稳能力差，且受地表水文变化影响显著，是全线的安全控制与变形研究的重中之重。

在选定区段内沿隧道轴向布设了3个代表性监测主断面JC－1、JC－2、JC－3，分别位于浅埋段起点、区段中部和尾部，测点布置见图3。依据《公路隧道施工技术规范》（JTG/T 3660—2020），并结合本项目施工监控量测专项方案，每个监测断面均布设了地表沉降、拱顶沉降及净空收敛测点，见表1。

表1 监测项及限值

监测项目	监测频率/（次/天）	累计变形限值/mm
地表沉降	1	35
拱顶沉降	2	35
净空收敛	2	30

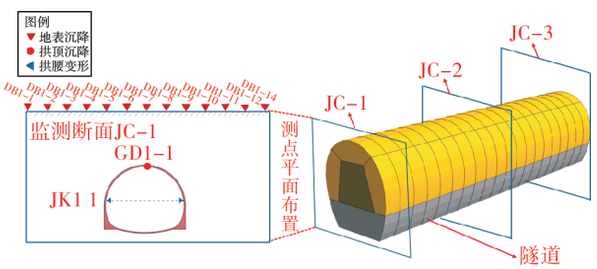

图3 沉降监测断面

2.2 监测结果分析

2.2.1 地表沉降

为明确隧道施工对地表环境的影响规律，对浅埋段三个监测断面的地表沉降数据进行了分析。各断面沿隧道轴线横向布设的沉降测点绘制出地表沉降横向分布曲线，如图4所示。

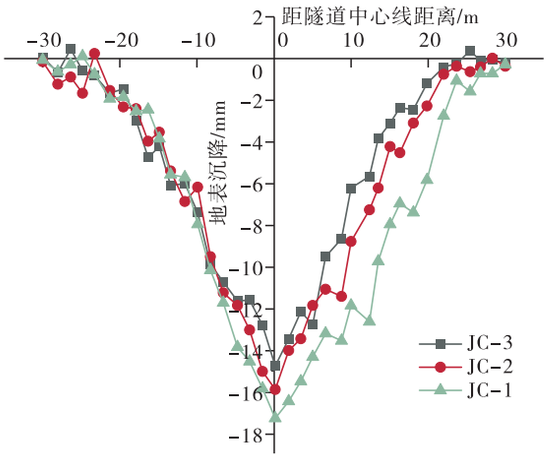

图4 实际监测地表沉降值

由图可知，3个断面均呈现典型沉降槽形态，最大沉降集中于隧道轴线附近，并随测点远离轴线逐渐衰减，主要影响范围为轴线两侧30 m。JC－1断面位于进口浅埋起始段，受偏压地形及初始开挖扰动影响较大，轴线处最大沉降为－17.29 mm；JC－2断面最大沉降为－15.90 mm，沉降槽形态较为规整；JC－3断面最大沉降为－14.77 mm，曲线相对平缓。总体来看，地表最大沉降由洞口向洞内逐渐减小，说明随着埋深增加和施工工序趋于稳定，地表变形得到有效控制。各断面沉降值均低于控制限值，表明既定施工方案能够满足地表沉降控制要求。

2.2.2 拱顶沉降

拱顶沉降是评价隧道开挖过程中围岩竖向变形与支护结构受力状态的关键指标。各监测断面拱顶沉降汇总如图5所示。

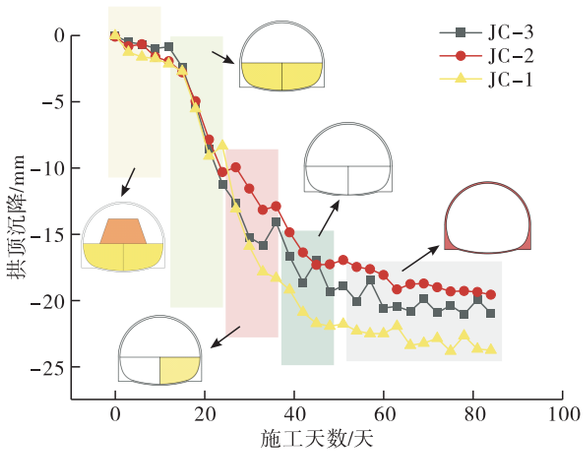

图5 实际监测拱顶沉降值

由图可知，拱顶沉降随施工推进呈阶段性发展特征。Ⅰ、Ⅱ导洞开挖阶段，围岩应力初步释放，沉降增长较缓，中心点沉降约为－2.4 mm，表明分步开挖对围岩扰动相对有限。核心土开挖

后，掌子面前方纵向支撑作用明显削弱，围岩卸荷加剧，拱顶沉降快速发展，中心点沉降增至 -15.2 mm，该阶段为竖向变形的主要增长期。随后进行Ⅳ、Ⅴ导洞跳槽开挖，沉降继续增加但增速放缓，中心点沉降约为 -19.4 mm。仰拱施作并封闭成环后，支护体系整体刚度提高，沉降曲线逐渐趋稳，监测期末中心点沉降约为 -21.0 mm。可见，核心土开挖是拱顶沉降控制的关键阶段，仰拱及时封闭对抑制后续沉降具有重要作用。

2.2.3 净空收敛

净空收敛是表征隧道开挖后围岩向洞内收缩变形、反映支护结构承受荷载情况的重要指标。各监测断面拱腰收敛值见图 6。

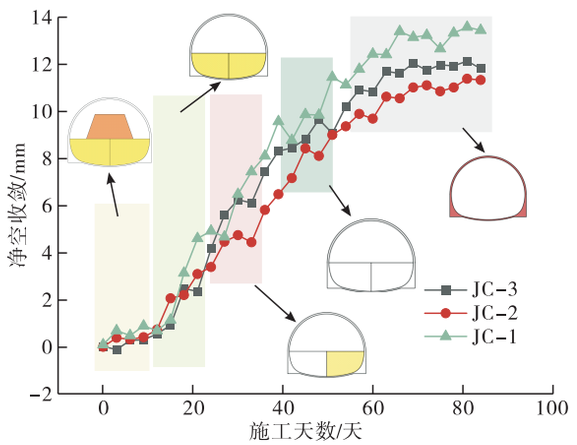

图 6　实际监测净空收敛值

监测结果表明，净空收敛与拱顶沉降具有相似的阶段性规律。上部环形开挖阶段，累计收敛值普遍小于 2 mm，围岩横向扰动较小；核心土开挖后，侧向约束减弱，净空收敛速率明显增大。以 JC-1 断面为例，收敛值由 2.1 mm 增至 6.5 mm，该阶段变形增量占最终收敛量的 40 % 以上，是水平变形控制的关键时期。Ⅳ、Ⅴ导洞跳槽开挖后，隧道断面逐步形成，收敛继续发展但增速减缓，收敛值约为 12.5 mm。仰拱封闭后，支护体系形成整体受力结构，净空收敛趋于稳定，关键测线最终收敛值约为 13.5 mm。各测线收敛值及发展速率均处于设计允许范围内，说明环形开挖预留核心土法及配套支护措施能够有效控制浅埋软弱破碎围岩隧道的施工变形。

3 数值模型建立与合理性验证

3.1 模型建立

基于隧道设计断面并充分考虑边界效应，本模型水平方向取隧道跨度的 5 倍；竖直方向自实际地表向下延伸至 2.5 倍洞深，因此模型尺寸为 80 m × 55 m × 62 m（长 × 宽 × 高）。模型底部施加固定约束，四周侧面施加法向位移约束，模型顶面为自由地表边界。围岩体视为均质、连续的弹塑性介质，采用莫尔 - 库仑本构；初期支护采用线弹性本构模型进行模拟，其等效厚度与弹性模量依据结构设计配合比与配筋率经理论等效折算确定；锚杆采用线弹性本构；超前注浆加固区视为对原始围岩力学性质的改良，通过提高其黏聚力与内摩擦角予以表征，具体地层及结构材料参数如表 2 所示。在网格划分时，为平衡计算精度与效率，在隧道开挖影响区域进行网格加密，采用六面体主导的网格，单元尺寸控制在 0.8 ~ 1.2 m，在远离隧道的区域，网格逐渐过渡变疏，单元尺寸增大至 3 ~ 5 m。整个模型共计生成约 312 000 个单元和 338 000 个节点，如图 7 所示。

表 2　地层及结构材料参数

土层及材料	重度/（kN · m^{-3}）	泊松比	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/（°）	单元类型
素填土	16.5	0.26	12.8	14.6	19	实体单元
粉质黏土	18.5	0.30	14.3	16.3	18	实体单元
石灰岩	24.5	0.25	1 200	860	48	实体单元
超前注浆加固区	19.3	0.28	2 000	73	45	实体单元
初期支护	23.5	0.2	25 000	—	—	板单元
锚杆	73.5	0.3	210 000	—	—	植入式桁架单元
二衬	25.5	0.2	35 000	—	—	实体单元

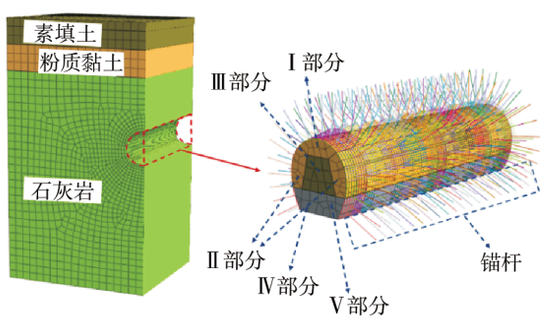

图 7　模型网格图

模型采用单元生死实现对施工过程的数值模拟。计算初始阶段，在重力场作用下生成初始地应力并进行平衡。随后，严格遵循“环形开挖预留核心土法”的施工流程逐步模拟：①激活超前支护区单元；②按序钝化单元以模拟上台阶环形导坑Ⅰ、Ⅱ部开挖，并同步激活该部分初期支护及锚杆单元；继而模拟核心土Ⅲ部开挖；③分步跳槽模拟下台阶左侧Ⅳ部与右侧Ⅴ部的开挖及即

时支护施作；④钝化仰拱区岩体并激活仰拱支护单元，实现初期支护体系闭合；⑤在计算末期激活二次衬砌单元。各开挖步进尺控制为1.0 m，台阶间纵向错距设为3.0 m，以真实反映工况。

3.2 合理性验证

为确保所建立三维数值模型的合理性，将JC－2监测断面地表沉降的现场实测数据与对应条件下的数值模拟结果进行对比分析，如图8所示。

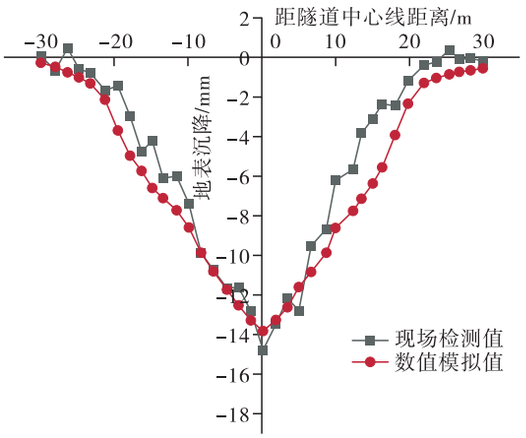

图8 数值模拟与现场监测对比

由图可知，数值模拟得到的沉降横向分布曲线与实测数据在变化趋势与主要特征上吻合良好。两者均呈现出以隧道轴线为中心对称分布的沉降槽形态，最大沉降值均出现在轴线位置，且沉降影响范围大致相当，实际监测值为14.77 mm，数值模拟值为13.82 mm，相对误差为6.5%，分析其原因主要在于模型将非均质、各向异性的围岩概化为均质连续介质，未能完全体现岩体中节理、裂隙的局部弱化效应；同时，实际施工中的动态微扰动、支护施作时机与效果的离散性等因素也难以在数值模型中完全复现。尽管如此，模拟与实测结果在变形规律上的一致性及可控的误差范围表明，所建模型能够较为合理地反映复杂环境下浅埋隧道的施工力学响应[14-15]。

4 参数影响效应分析

现场监测与分析表明，在复杂地质条件下，既定施工方案能够有效控制围岩变形，保障隧道施工安全。然而，在满足安全要求的基础上，还需进一步优化支护参数，实现工程经济性与施工效率的合理平衡。支护厚度、注浆范围、开挖进尺等关键参数的选取，不仅影响变形控制效果，也直接关系到材料成本与施工周期。因此，本章基于已验证的三维数值模型，采用控制变量法分析初期支护厚度、超前注浆加固范围和开挖进尺对围岩变形的影响，重点对比拱顶沉降、拱底隆起及净空收敛的变化规律，以明确复杂浅埋软弱破碎围岩隧道施工参数的合理取值。

4.1 不同初支厚度

为探究初期支护厚度对复杂环境下浅埋大断面隧道施工变形的影响，基于已验证的数值模型设置4种初期支护厚度工况，其中工况1～4的初期支护厚度分别为150 mm、200 mm、250 mm和300 mm，重点分析不同厚度条件下拱顶沉降、拱底隆起及拱腰水平位移的响应规律，如图9、图10所示。

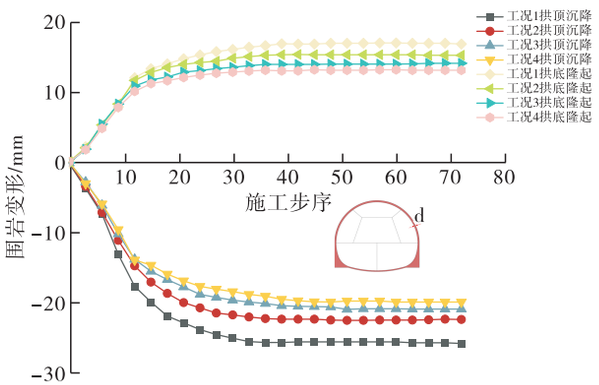

图9 不同初支厚度拱顶沉降和拱底隆起值

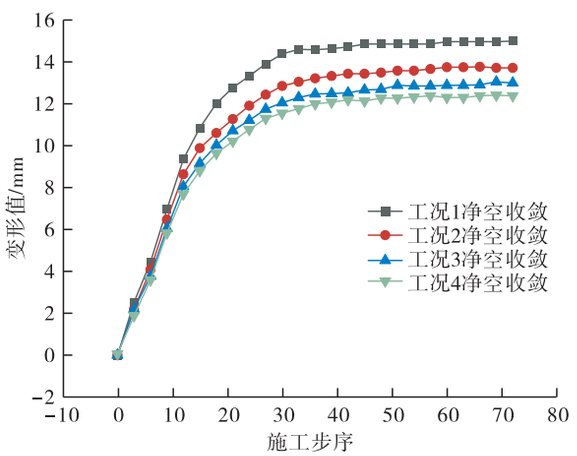

图10 不同初支厚度净空收敛

数值模拟表明，随着初期支护厚度增加，拱顶沉降、拱底隆起和净空收敛均逐渐减小。拱顶最终沉降由－25.81 mm降至－19.89 mm，拱底隆起由17.07 mm降至13.25 mm，净空收敛由14.99 mm降至12.38 mm，说明提高初期支护刚度可有效约束围岩变形。

从变形降幅看，厚度由150 mm增至200 mm时，拱顶沉降降幅最明显；增至250 mm

后，变形仍有所降低，但改善幅度减小；增至 300 mm 时，变形控制增益进一步减弱。由此可见，单纯增加初期支护厚度存在边际效应，过大厚度会增加材料消耗和施工难度。综合变形控制效果与经济性，建议本工程初期支护厚度控制在 200 ~ 250 mm。

4.2 不同超前注浆加固范围

为探究注浆加固范围对隧道施工变形的影响，设置 4 种超前注浆加固范围工况，其中工况 1 ~ 4 的加固范围分别为 120°、130°、140°和 150°。

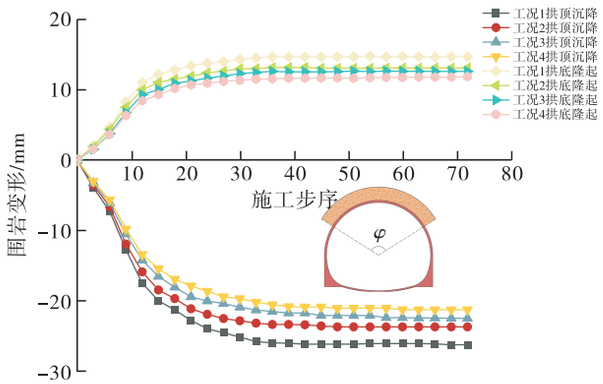

图 11　不同超前注浆加固范围拱顶沉降和拱底隆起值

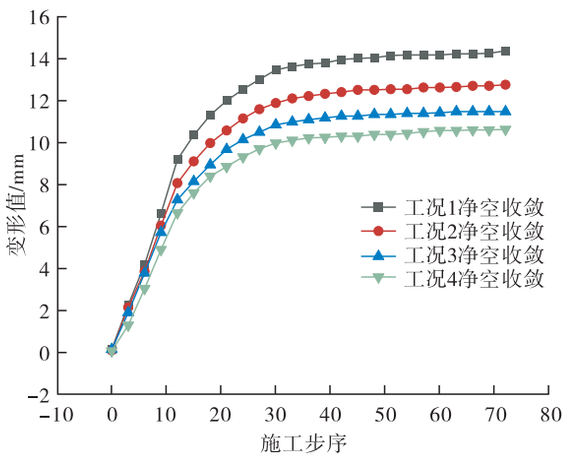

图 12　不同超前注浆加固范围净空收敛

由图 11、图 12 可知，扩大超前注浆加固范围可增强拱部围岩改良效果，减小开挖扰动引起的变形。随着加固范围由 120°增至 150°，拱顶沉降最终值由 26. 18 mm 降至 21. 21 mm，拱底隆起由 14. 62 mm 降至 11. 81 mm，净空收敛由 14. 36 mm 降至 10. 61 mm，表明注浆加固范围对隧道周边收敛控制作用较为明显。

进一步比较可知，加固范围由 120°增至 130°时，变形控制效果提升较明显；由 130°增至 140°时，变形继续减小但降幅收窄；当范围扩大至 150°时，继续加固带来的改善有限。说明在隧道拱部形成合理范围的改良岩体环即可发挥主要控制作用，过度扩大加固范围会增加注浆材料用量和施工周期。综合考虑围岩稳定与施工经济性，建议超前注浆加固范围取 130° ~ 140°。

4.3 不同进尺长度

为探究开挖进尺对变形控制的影响，设置 4 种开挖进尺工况，其中工况 1 ~ 4 的开挖进尺分别为 1. 8 m、1. 2 m、1. 0 m 和 0. 5 m，其隧道围岩变形如图 13、图 14 所示。

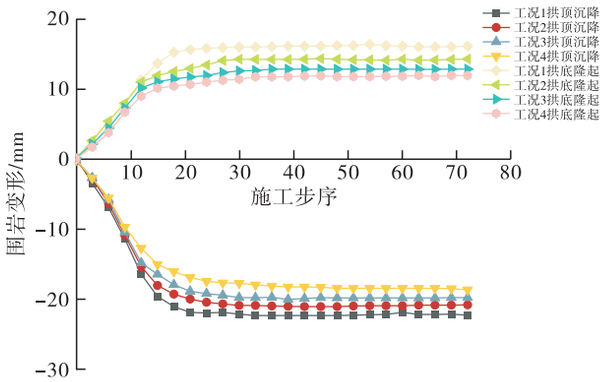

图 13　不同开挖进尺拱顶沉降和拱底隆起值

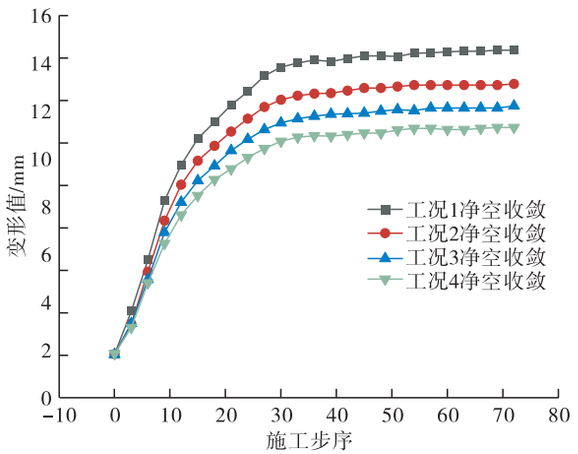

图 14　不同开挖进尺净空收敛

随着开挖进尺增大，拱顶沉降、拱底隆起和净空收敛均呈增大趋势。以拱顶沉降为例，当进尺为 0. 5 m、1. 0 m、1. 2 m 和 1. 8 m 时，最终沉降分别约为 －18. 80 mm、－20. 04 mm、－21. 20 mm 和 －22. 48 mm，说明较大进尺会增强掌子面空间效应释放，加剧围岩应力重分布和变形累积。

较小进尺可降低单次开挖扰动强度，为初期支护及时施作和发挥作用创造条件，但进尺过小会降低施工效率；进尺过大则易导致变形集中发展，不利于浅埋破碎围岩稳定。综合变形控制与施工效率，开挖进尺宜控制在 1. 0 m 左右，浅埋破碎段不宜超过 1. 0 m；围岩条件较好且监测稳

定时，可适当放宽至1.2 m。

5 施工变形控制技术

在上述研究确定的合理参数范围基础上，为确保隧道在复杂地质条件下的施工安全，现场实施了一系列针对性控制措施，如表3所示。初期支护厚度主要控制支护刚度和断面收敛，超前注浆范围主要改善掌子面前方围岩条件，开挖进尺则直接影响单次卸荷范围和空间效应释放强度。因此，现场控制应避免孤立调整单一参数，而应结合围岩等级、监测变形速率和支护闭合时效进行综合判定。

表3 施工变形控制技术

控制对象	现场控制取值	主要作用	现场执行措施
初期支护刚度	初期支护厚度控制在200～250 mm	提高支护刚度，控制拱顶沉降与净空收敛，同时避免材料浪费	及时喷射混凝土，局部异常段加密钢架并增强锁脚锚杆
掌子面前方围岩改良	拱部超前注浆范围取130°～140°	形成有效改良圈，降低开挖卸荷引起的围岩松弛	断层破碎带和围岩极差段实施超前注浆，并根据试验段效果调整压力和浆量
开挖扰动强度	循环进尺不大于1.0 m	减小单次开挖卸荷范围，为支护及时闭合创造条件	采用短进尺、弱爆破或机械辅助开挖、快支护的循环组织
支护闭合时效	仰拱及时施作并尽早封闭成环	提高支护体系整体刚度，抑制后续变形发展	缩短仰拱与二衬跟进距离，高风险段优先组织封闭施工
监测反馈管理	拱顶沉降、净空收敛和地表沉降连续跟踪	识别变形突增阶段，触发施工调整	建立三级预警机制，必要时暂停掘进、补强注浆或调整支护参数

6 结论

根据对柳园隧道复杂地质条件下施工变形规律的现场监测、数值模拟与参数优化研究，得出以下主要结论：①监测表明，围岩变形主要集中于核心土开挖后的应力急剧调整期，其变形增量占比超过总量50%。仰拱及时封闭是抑制变形持续发展的决定性环节。②通过参数影响效应分析可知，将初期支护厚度控制在200～250 mm、拱部超前注浆范围设定为130°～140°、开挖循环进尺严格限制在1.0 m内，可在确保安全前提下最优平衡控制效果与工程经济性。③为确保隧道在复杂地质条件下的施工安全，现场实施了一系列针对性控制措施。经工程实践验证，在变形控制、风险应对等方面具有良好效果，可供类似隧道工程借鉴。

参考文献：

[1]倪佳泽,李翔,张晋彰,等.海底隧道穿越断裂带结构安全风险分析:以胶州湾第二海底隧道为例[J].隧道建设(中英文),2025,45(12):2287-2297.

[2]朱辉,张威,孙纬宇,等.浅埋超大断面黄土隧道双层支护体系受力变形特征分析[J].兰州交通大学学报,2025,44(6):91-99.

[3]师为谱.富水砂层盾构隧道侧穿施工对铁路桩基的变形影响与控制分析:以龙海站－漳州城际站区间为例[J].福建交通科技,2025(11):120-126.

[4]杨银桂.软岩富水大断面隧道开挖施工围岩变形模拟研究[J].建筑技术开发,2025,52(11):33-35.

[5]吴森阳,李青霖,李琳,等.公路隧道施工变形监测综合预警体系的建立与效果评估[J].隧道建设(中英文),2025,45(12):2240-2256.

[6]杨克焕.高边坡隧道进口段不同开挖工法的围岩变形特征模拟研究[J].广东交通职业技术学院学报,2025,24(4):15-23.

[7]彭安琪,吴涛,周小涵,等.软弱土层浅埋偏压连拱隧道开挖稳定性及加固研究[J].公路,2025,70(11):373-383.

[8]杨俊达.盾构隧道下穿施工对既有高架桥影响数值分析[J].广东交通职业技术学院学报,2025,24(2):39-44.

[9]刘国庆.帷幕注浆技术在城市隧道软弱围岩中的应用[J].广东交通职业技术学院学报,2023,22(2):36-41.

[10]徐政.隧道围岩环境中的治理:以损伤力学模型为例[J].区域治理,2019(50):193-195.

[11]万鹏.浅埋隧道施工围岩变形分析及开挖参数优化研究[J].广东交通职业技术学院学报,2022,21(4):54-56,77.

[12]田江涛,刘迎.新建隧道施工对既有隧道的影响规律分析[J].城市建筑,2025,22(24):230-232.

[13]沈向秀.公路隧道监控量测及超前支护施工技术措施[J].散装水泥,2025(6):126-128.

[14]范勇.不同工法下隧道浅埋偏压段数值模拟与围岩稳定性分析[J].福建建材,2025(11):71-75,99.

[15]李冬生,潘元贵,郑余朝.全风化花岗岩浅埋偏压隧道进洞技术与力学特性研究:以相思山隧道为例[J].水文地质工程地质,2025,52(4):214-227.