



超前支护精准快速施工及高效注浆技术研究

闫腾飞^{1,2}, 刘 星^{1,2}, 郭志光^{1,2}, 张嘉轩², 刘永福²

(1. 中国建筑土木建设有限公司, 北京 100070;

2. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200122)

摘要:为解决当前管棚支护存在的角度把控难度大与注浆加固技术不成熟引发的掉块与溜塌问题,基于某铁路项目采用现场试验的方法,研发应用了包含导向架管棚角度控制技术、隧道超前导管施工定位装置、隧道管棚送入时前端保护装置、三通孔口混合器高效双液注浆泵、隧道注浆加固可重复使用的快速注浆接头等多项技术综合的角度控制及注浆创新关键技术。经过现场试验,本成套技术将风险隧道累计最大沉降值控制为 12.1 mm,累计最大收敛值控制为 9.3 mm,线性超挖值 0.161 m。研究表明,本套技术可有效化解隧道软弱破碎段存在的掉块与溜塌风险,可为同类问题解决提供借鉴。

关键词:隧道; 超前支护; 快速施工; 角度控制; 高效注浆; 施工技术

中图分类号: U455.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)11-0060-07

doi: 10.13402/j.gejs.2025.11.139

Research on precision and rapid construction of advanced support and efficient grouting technology

YAN Tengfei^{1,2}, LIU Xing^{1,2}, GUO Zhiguang^{1,2}, ZHANG Jiaxuan², LIU Yongfu²

(1. China Construction Civil Engineering Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. China Construction Eighth Engineering Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: In order to solve the problems of angle control and collapse caused by immature grouting reinforcement technology in current pipe shed support, a comprehensive angle control and grouting innovation key technology was developed and applied based on a railway project using on-site testing methods, including guide frame pipe shed angle control technology, tunnel advanced conduit construction positioning device, front-end protection device for tunnel pipe shed feeding, high-efficiency double liquid grouting pump with three-way orifice mixer, and reusable quick grouting joint for tunnel grouting reinforcement. After on-site testing, this complete set of technology controls the cumulative maximum settlement value of the risk tunnel to 12.1 mm, the cumulative maximum convergence value to 9.3 mm, and the linear overexcavation value to 0.161 m. Research has shown that this technology can effectively resolve the risks of falling blocks and landslides in weak and fractured sections of tunnels, and can provide reference for solving similar problems.

Key words: tunnel; advance support; rapid construction; angle control; efficient grouting; construction technique

管棚一般是在地质软弱破碎段的条件下,按照开挖线,在破碎层中插入多根无缝钢管的方法形成悬挑式的支护结构^[1-4]。围岩呈碎块状,岩块之间黏结不良,开挖后在自重作用下塌落。如

果地质条件极差且裂隙水比较发育,则采用向管内注浆后向岩层扩散的方法,使该段软弱地层经水泥固化形成一个完整性高的整体,可以有效地稳定开挖面。超前管棚支护结合快速注浆措施可

收稿日期: 2024-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108434);中建股份重点研发课题(CSCEC-2022-Z-2)

作者简介: 闫腾飞(1995—),男,工程师/业务经理,从事隧道工程施工方面的研究与管理工。

避免围岩掉块、溜塌等风险, 同时进一步控制了超挖量, 因此超前管棚支护是实现隧道安全快速施工与超欠挖控制的关键环节^[5-6]。管棚支护主要用于软弱破碎围岩^[7-9]。

当前超前支护施作及注浆主要存在以下问题:

1) 传统超前支护施作效率低, 与软弱破碎围岩的“快挖快支”理念不匹配, 易因长时间临空面暴露引发劣化, 造成掉块溜塌; 2) 现有管棚(或小导管)外插脚过大, 无法对开挖范围内围岩掉块进行有效防护; 3) 现有的管棚安装方式极易对管棚端口的注浆孔封头造成损坏, 影响进浆量与注浆压力, 导致注浆效果差; 4) 现有注浆泵双液混合质量不足且注浆压力不足, 影响双液浆的快速固化, 影响双液浆的扩散范围, 进而全面影响围岩整体性加固的效果; 5) 超前支护的快速注浆接头无法真正实现可重复使用, 焊接闸阀极大延长工序用时, 与“快挖快支”理念不符。

本研究将提出: 1) 导向架管棚角度控制技术, 创新在于钢拱架在腹部中间位置开定位孔, 超前支护从距掌子面最近一榀钢拱架腹部穿过, 并紧贴后一榀钢拱架。2) 隧道超前导管施工定位装置创新点在于在导向架管棚角度控制技术技术上进一步精准了定位方向。3) 隧道管棚送入时前端保护装置创新点在于通过套管顶送, 进一步避免了注浆口损坏。4) 三通孔口混合器高效双液注浆泵, 创新点: 1) 克服双液浆混合不充分的问题; 2) 通过三通, 进浆管压力值为两台单液泵各自压力之和, 因此进一步提高了注浆压力; 3) 注浆泵具有远程遥控操作、注浆压力监测、注浆量实时记录、可视化配合比调整等功能; 4) 隧道注浆加固可重复使用的快速注浆接头, 创新点在于通过插拔式连接方式改变, 进一步节省闸阀焊接时间。此外, 应用 DWS90 单臂锚杆凿岩台车开设管棚孔, 经实践, 施作效率提高 60% 左右, 可极大地节省工序。

1 超前支护工艺及控制要点

1.1 管棚施工工艺及控制要点

工艺流程: 地质调查、测量放线、劳材机准备→钻机就位→钻孔→清孔→顶进管棚→注浆管

路检查→注浆→压力流量达到要求→结束。

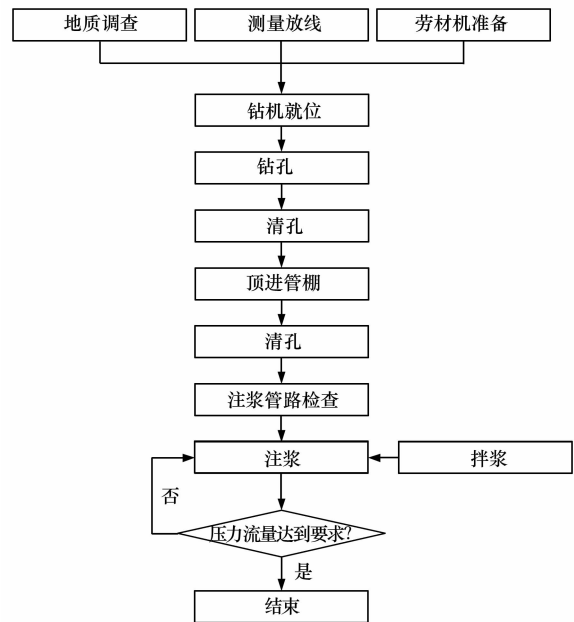


图 1 管棚施工工艺流程

管棚安设一般采用钻孔打入法, 用锤击或钻机顶入; 安装完成后用高压风将钢管内的砂石吹出; 小导管顶入孔内长度不小于 8.7 m, 尾部外露长度大于 30 cm。

管棚尾部须安装止浆阀; 孔口处管棚与岩面的缝隙使用塑胶泥塞紧。

1.2 小导管施工工艺及控制要点

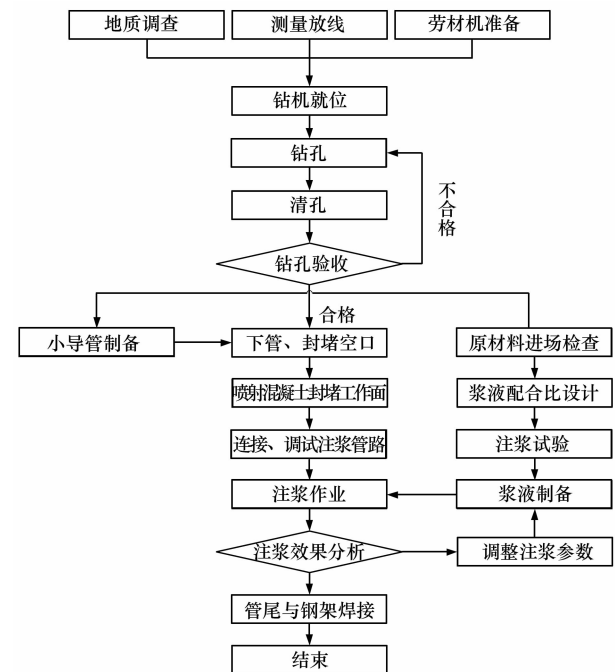


图 2 超前小导管施工工艺流程

1.2.1 注浆

注浆采用注浆泵,为加速注浆,可使用分浆器同时多管注浆。配置好的浆液应在规定时间内注入完毕,随配随用。注浆顺序为由下至上,浆液先稀后浓。注浆压力应符合设计要求,使浆液充满钢管及其周围的孔隙。注浆施工时,应先做试验段,从注浆量和注浆压力上进行同时把控,确定最佳注浆参数。

采用注浆泵压注水泥浆或水泥砂浆。注浆前先喷射混凝土 5 ~ 10 cm 厚封闭掌子面,形成止浆盘。

注浆施工中认真填写注浆记录,随时分析和改进作业,并注意观察施工支护工作面的状态。注浆参数应根据注浆试验结果及现场情况调整。

注浆参数可参照以下数据进行选择:注浆压力: 0.5 ~ 1.0 MPa;浆液初凝时间: 1 ~ 2 min;水泥: P·O42.5 普通硅酸盐水泥;砂: 中细砂。

1.2.2 注浆异常现象处理

(1) 串浆时及时堵塞串浆孔。

(2) 泵压突然升高时,可能发生堵管,应停机检查。

(3) 进浆量很大,压力长时间不升高,应重新调整砂浓度及配合比,缩短胶凝时间。

2 角度控制及注浆创新关键技术

2.1 利用单臂锚杆凿岩台车打设管棚(小导管)孔

在管棚施工设备选择方面,推荐 DWS90 单臂锚杆凿岩台车开设管棚孔,本台车钻孔范围 43 ~ 102 mm,钻孔深度为 5.2 m。经实践总结,本设备具有施工高效的特点。在 37 根管棚施工背景下,采用传统管棚机打孔需要 8 ~ 9 h,而采用单臂锚杆凿岩台车时打设时间将缩减至 3 h 内,提高效率 60% 左右。



图 3 DWS90 单臂凿岩台车

2.2 导向架管棚角度控制技术

目前超前支护施工中,存在管棚(或小导管)外插角过大的问题,小导管从定位钢架的顶部穿过,或小导管从定位钢架的中上部穿过,二者外插角均偏大,易导致管棚打设角度不可控的问题。

改进后,距掌子面最近一榀的管棚定位钢架在腹部中间位置开定位孔,并紧贴钢拱架从孔内穿过,控制小导管外插角。

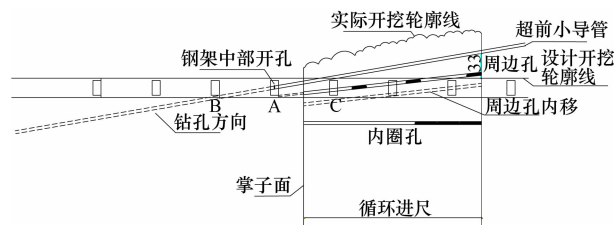


图 4 改进示意



图 5 管棚定位钢架及施工效果

2.3 隧道超前导管施工定位装置

对现有超前导管施工角度难以控制问题进行改进。现场拱架安装后,由于钢拱架所施作的孔无法保证超前导管施工角度,无法保证施工质量,改进施作孔,在孔前位置加工制作定位装置,利用钢板制作超前导管定位装置。通过两块面板固定超前导管角度(角度为 10°),使其满足设计要求 10° ~ 15°。使用时将定位装置通过预留挂钩安装在拱架上,定位装置预留孔与拱架开口位置对齐。钻孔时沿导向孔打入。确保导向管角度满足设计要求,保证施工质量。



图 6 隧道超前导管施工定位装置示意

(1) 本装置由两块面板、两个耳朵固定钢筋组成。面板采用国标 5 mm 原材 25 cm × 20 cm, 中间预留椭圆型的空洞, 保证锚杆仅仅可以上下移动。

(2) 首先利用采用气焊对钢板进行切割, 中间位置切割成椭圆形, 然后利用剩余钢板料切割成两个半圆耳朵焊接于钢板两侧, 以便于固定装置于工字钢上, 而后钢板背侧焊一块平板坐于工字钢底板翼缘板上拖住装置, 便于更好的固定装置。装置坐于翼缘板后锚杆通过椭圆孔传入到工字钢内部预留孔形成的角度为 10°。

(3) 当需调整该装置位置时, 在施工完成一根锚杆后, 将装置后面挂钩取掉重新安装于另一孔进行施工, 保证前后孔对其固定装置即可继续进行锚杆的施工。

2.4 隧道管棚送入时前端保护装置

现有的管棚安装方式极易对管棚端口的注浆孔封头造成损坏; 因此设计了一种隧道管棚送入时前端保护装置来解决上述问题。

该装置由 1 个长 300 mm, 厚度 5 mm 的 Q235 钢材组合而成的圆形套筒简易装置。

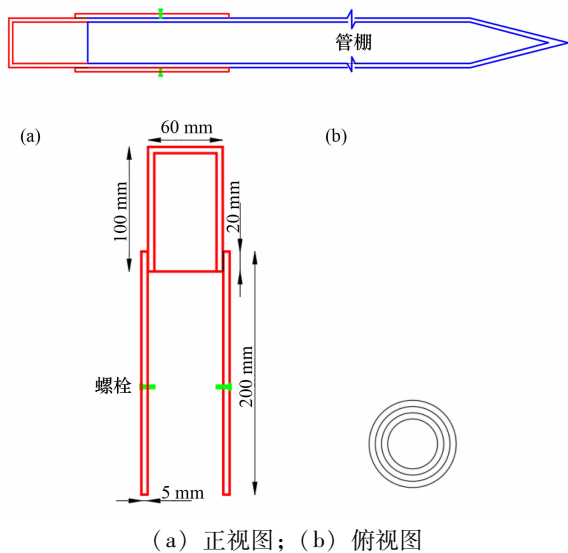


图 7 结构尺寸

mm

本装置为一个与管棚相匹配的套管, 根据管棚直径和厚度来定制, 套在管棚端头, 管棚端头已提前焊好带有注浆孔的封头, 送套管时, 起到保护注浆封头的目的, 同时提高工效。管棚带有注浆孔封头的保护套管分为两节管, 内管与管棚的型号一致, 外管的内径是内管外径, 通过丝扣

连接, 内外管错开连接, 通过内管与已经焊接封头的管棚端头连接, 外管套着管棚, 同时用两根螺丝固定防止滑落。

2.5 三通孔口混合器高效双液注浆泵

部分在建隧道由于软弱破碎围岩本身强度低, 易呈碎块状崩落, 叠加地下水将产生劣化影响, 掉块风险极大, 同时引发的超欠挖风险极大。为降低施工安全风险, 提高施工质量, 管棚应进行注浆, 对围岩圈进行水泥浆液等扩散加固。若存在富水或围岩较差的情况, 还需进行双液浆进注。

现阶段市面双液泵为活塞泵, 由于结构原因, 管道内双液浆将呈现一前一后非混合流动状态, 导致双液浆在泵送及注入岩石的整个过程中无法实现高效混合, 导致无法快速初凝, 绝大多数双液注浆料将由于无法初凝而被水流冲出, 导致注浆效果差。

整合两台单液注浆泵(BW-320: 60 缸径 + 80 缸径), 每台设备泵送一种单液浆(水玻璃或水泥浆), 两条进浆管路将通过三通孔口混合器汇合整合为 1 条, 且重点通过三通混合器将双液浆充分拌合, 后双液浆快速进注至管棚内, 进行双液浆扩散。避免双液注浆料因混合不均无法快速初凝而被水流冲出。同时, 进浆管压力值为两台单液泵各自压力之和, 因此进一步提高了注浆压力, 提高了注浆泵的稳定性的。

BW-320 型泥浆泵是一种多用途卧式三缸往复单作用柱塞泵, 具有两种缸径和四档齿轮变速共八档流量, 该泵采用了国内外泵的先进结构和新材料, 性能可靠, 易损件寿命长, 体积小、质量轻, 分解性好, 便于搬迁。

主要工艺: 泵机吊装就位→安装三通混合器→出浆口连接注浆闸阀→工艺性试验→正式出浆。控制要点: 1) 由于两台单液泵同时连接三通, 进浆管压力值为两台单液泵各自压力之和。本双液泵注浆压力可稳定在 1 ~ 10 MPa, 可满足超前帷幕注浆、轻量化帷幕注浆、径向注浆等快速注浆需求。2) 本注浆泵应具有远程遥控操作、注浆压力监测、注浆量实时记录、可视化配合比调整等功能。3) 注浆时, 首先采用水泥浆高压(低流量)档位将注浆孔岩石裂隙冲开, 在出现浆液顺利进



图 8 三通孔口混合器高效双液注浆泵

注的情况后, 开始进注双液浆, 并慢慢缩小进注压力, 增大流量。

2.6 隧道注浆加固可重复使用的快速注浆接头

目前常用的注浆头有两种, 一种是直接与插入孔洞中的钢管进行焊接连接, 后续注浆头永久留在钢管上, 或者切割掉, 只能一次性使用; 另一种是通过螺纹将注浆头与钢管进行连接, 此类注浆头理论上可以重复利用, 但是由于拆除注浆头必须要等浆液凝固, 经常由于丝头被浆液污染造成注浆头无法拧出而报废, 难以真正做到重复使用。

本技术对传统的一次性注浆头如球阀进行改进, 再球阀上焊接两段直径不同的圆钢管, 并外套一层软橡胶圈, 在需要注浆的钢管前端开口, 便于注浆头插入开口的钢管, 最后通过外部套箍拧紧, 从而保证了注浆头和钢管连接的稳定性。具体装置如图 9~12 所示。

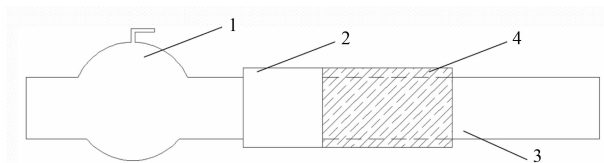


图 9 注浆头纵断面

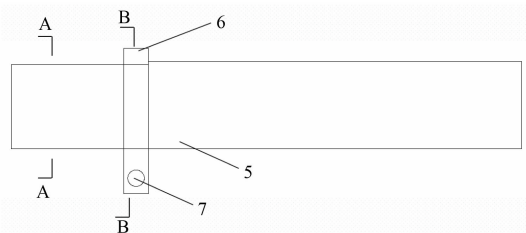


图 10 需注浆钢管纵断面

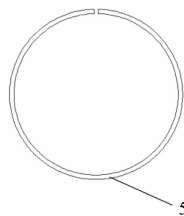


图 11 A-A 横断面

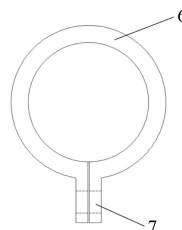


图 12 B-B 横断面

上图中: 1: 球阀; 2: 钢管 A (外径与需注浆钢管 5 的内径一致, 焊接在球阀 1 上); 3: 钢管 B (外径比钢管 A 小 1 cm 左右, 便于插入需注浆钢管 5 中, 焊接在钢管 A 上); 4: 软橡胶圈 (外径比需注浆钢管 5 的内径大 2 mm 左右, 套于钢管 B 上); 5: 需注浆钢管 (前端沿纵向开口, 如 A-A 横断面所示); 6: 套箍 (套于需注浆钢管 5 的前部开口段); 7: 螺栓孔 (用于传入螺栓紧固套箍)。

使用时, 在需注浆钢管 5 的前端头提前开好口, 将制作好的注浆头内部以及钢管 B 外侧刷一层隔离剂, 插入到需注浆钢管 5 内, 要将软橡胶圈 4 全部插入到需注浆钢管 5 的非开口段, 并将套箍 6 上的螺栓拧紧。打开球阀, 接上注浆机, 即可进行注浆, 注浆完成后, 关闭球阀, 待浆液凝固后, 即可将套箍 6 上的螺栓拧松, 拔出注浆头, 用于下一

次注浆。若因意外情况导致注浆头被污染难以正常无损取出, 可从需注浆钢管 5 前端开口处将外套的钢管 5 撕开取出注浆头, 不会对注浆头造成损伤。

2.7 应用案例

某隧道掌子面(图 13)围岩以含碳板岩与变质砂岩互层为主, 围岩软弱破碎, 遇水劣化迹象显著, 存在极大的溜塌风险。

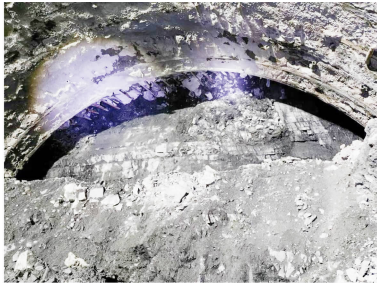


图 13 现场掌子面情况

现场技术人员紧急制定施工方案: 每次开挖一榫(0.8 m), 每两次循环打设 1 次管棚, 并注浆加固。基于上述创新技术, 现场管棚严格按照标准执行, 采用上述高效双液泵进注双液浆, 后遵照“短进尺、快支护”原则进行开挖, 成功化解溜塌风险, 并进一步控制了超欠挖, 累计最大沉降值为 12.1 mm, 累计最大收敛值 9.3 mm, 线性超挖值 0.161 m, 满足施工要求。最大沉降值变化、收敛值变化、线性超挖值分别如图 14~16 所示。

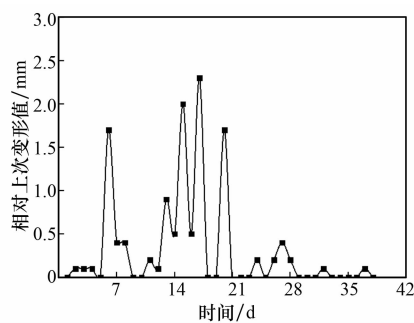
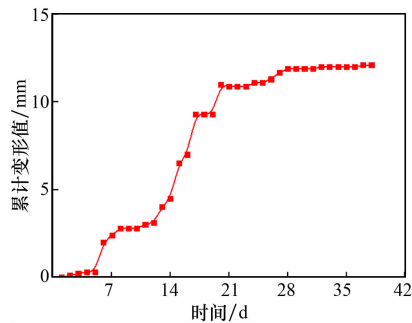


图 14 最大沉降值变化情况

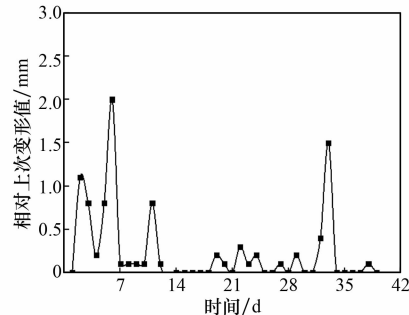
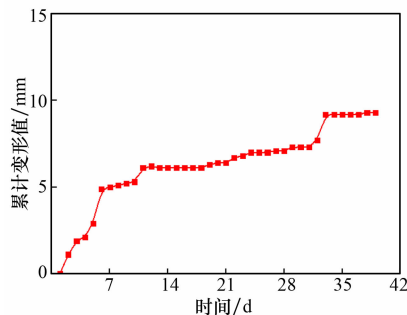


图 15 最大收敛值变化情况

3 结论

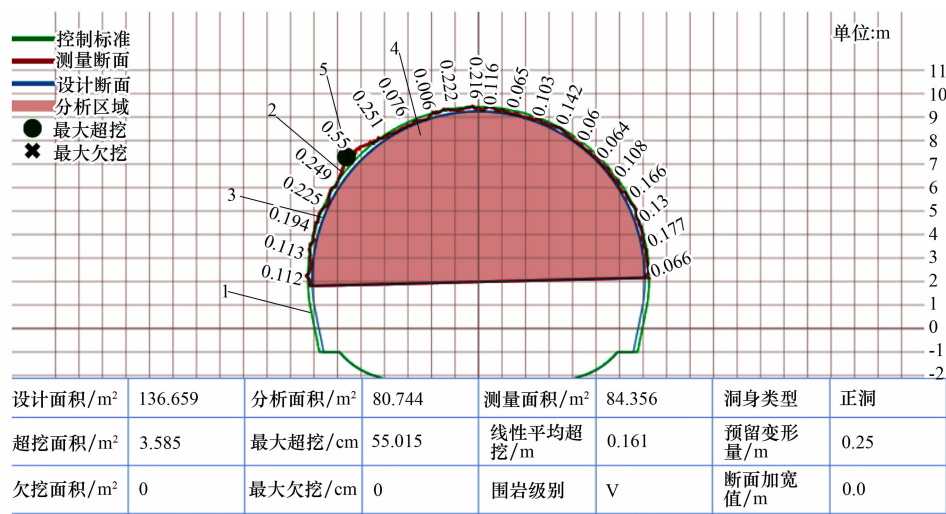
针对当前管棚支护存在的角度把控难度大, 注浆加固技术不成熟等特点, 引发掉块、溜塌等风险, 本文基于某铁路项目开展了超前支护精准快速施工及高效注浆技术研究, 得出结论如下。

(1) 研发形成角度控制及注浆创新关键技术, 包含利用单臂锚杆凿岩台车打设管棚(小导管)孔、导向架管棚角度控制技术、隧道超前导管施工定位装置、隧道管棚送入时前端保护装置、三通孔口混合器高效双液注浆泵、隧道注浆加固可重复使用的快速注浆接头等多项技术。

(2) 研究应用表明, 本成套技术应用可成功化解溜塌风险, 并进一步控制了超欠挖问题。累计最大沉降值为 12.1 mm, 累计最大收敛值 9.3 mm, 线性超挖值 0.161 m, 满足施工要求。

参考文献:

- [1] 巩军辉. 断层破碎带暗挖通道超前大管棚施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(7): 46-49.
- [2] 贺尚修, 刘达, 刘忠海, 等. 基于管棚支护技术的隧道洞内突水涌水控制方法研究[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(4): 118-122.
- [3] 张子苗, 徐才厚, 程可缘, 等. 砂卵石地层隧道不同超



1—控制标准；2—测量断面；3—设计断面；4—分析区域；5—最大超挖；6—最大欠挖。

图 16 线性超挖值

前支护对施工影响研究[C]//北京:《施工技术》编辑部,2022. 2022 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(中册).

[4] 安相镇,李建勇,汤新,等. 基于断层带监测的自进式超前管棚可行性研究[J/OL]. 施工技术(中英文): 1-7[2024-05-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1768.tu.20240516.1922.021.html>.

[5] 刘鹏. 超长管棚在砂卵石地层的施工工艺研究[J]. 建筑技术,2024,55(8):902-906.

[6] 高九华,屠洪盛. 超前注浆加固技术在掘进工作面过破碎带中的应用[J]. 江西煤炭科技,2024(2): 88-90;94.

[7] 姬东. 复合破碎工作面回撤巷道围岩注浆加固[J]. 陕西煤炭,2024,43(4):100-103.

[8] 宋帅帅,李明. 高应力破碎围岩支护—注浆协同控制技术研究与应用[J]. 能源与环保,2024,46(3):251-257.

[9] 谢义正,陈林杰. 斜穿不同倾向断层破碎带围岩变形特性分析[J]. 结构工程师,2023,39(4):151-159.