

帷幕注浆加固法在高含水率黄土隧道中的应用*

刘鹏飞, 梁树文, 郑亮亮

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 西安 710043)

摘要:隧道穿越高含水率黄土地层极易引发掌子面涌泥失稳、支护沉降变形大等风险, 施工掘进难度大, 进度极为缓慢。为解决高速铁路隧道穿越富水黄土地层时出现的各种病害, 依托在建宝兰客专上庄隧道施工中的实际情况, 采用帷幕注浆加固技术对高含水率黄土地层进行治理, 通过超前地质预报地质雷达法及数值模拟等方法对注浆加固效果进行详细评价。结果表明: 注浆加固体能够有效阻断地下水的涌渗流, 浆液结石体固结强度高, 围岩整体稳定性好, 未发生涌水、涌泥、掉块、坍塌等现象; 注浆后断面初期支护受力状况得到有效改善, 隧道围岩塑性应变值得到有效控制。可见, 帷幕注浆技术加固效果良好, 对于快速、高效地通过高含水率黄土地层具有显著的工程价值。

关键词:帷幕注浆; 高含水率黄土隧道; 超前地质预报; 数值模拟; 效果评价

中图分类号: U25

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)04-1137-08

Application of Curtain Grouting Reinforcement Technique in Tunnel with High Water Content Loess Stratum

Liu Pengfei, Liang Shuwen, Zheng Liangliang

(China Railway First Survey & Design Institute Group Co. Ltd., Xi'an 710043, P.R. China)

Abstract: Due to the tunnel passing through the loess stratum with high water content can easily increase the risk of the tunnel face instability characterized by the phenomenon of water inrush and burst mud, and large settlement deformation of supporting structure, such tunneling construction always has high difficulty with extremely slow excavation progress. In order to solve the various diseases of high-speed railway tunnel which across the watery loess strata, the paper selected the actual engineering background of Shangzhuang tunnel in Baolan passenger line under construction, the paper mainly uses the reinforcement methods of purdah infusion for the high water content loess stratum. And the grouting reinforcing effect has been also evaluated by the means of numerical simulation and advanced geological prediction using of geological radar. The results show that through the curtain grouting reinforcement technology, the groundwater seepage flow and water inrush can be effectively prevented, the grout solidification blocks have high consolidation strength, the tunnel surrounding rock is also with good stability, and no significant failure phenomena occur such as water burst, burst mud, slabbing of rock and collapsing. Through grouting, the strength performance of primary support has been improved, and the plastic strain value has been controlled. Therefore, the curtain grouting method has a good effect in reinforcement application, which is of significant engineering application value for the tunnel construction passing through the loess stratum with high water content rapidly and highly efficiently.

Keywords: curtain grouting; tunnel with high water content loess stratum; advanced geological prediction; numerical simulation; effect evaluation

* 收稿日期: 2017-12-03 (修改稿)

作者简介: 刘鹏飞 (1986-), 男, 陕西西安人, 学士, 工程师, 主要从事岩土工程、隧道与地下工程等领域的勘察设计工作。E-mail: 530251622@qq.com

0 引言

黄土遇水饱和后易失去结构胶结强度,出现“泥化”现象,土体结构强度及稳定性显著下降,隧道开挖后自稳能力极差,容易发生坍塌事故。笔者在工程实践中采用帷幕注浆,通过调整合理的注浆压力、浆液配比、注浆范围等,在宝兰客运专线上庄隧道高含水率黄土地层成功地进行了隧道帷幕注浆预加固,取得了良好的效果。

1 工程背景

1.1 工程概况

宝兰客运专线上庄隧道位于兰州市榆中县甘草店镇,隧道起讫里程 DK979+425~DK983+440,全长 4 015 m,为单洞双线隧道,洞身纵坡为 0.4% 及 0.3% 的单面下坡。隧道地处黄土梁峁沟壑区,地面高程 1 885~2 120 m,相对高差 200~250 m,在水流切割侵蚀作用下阶地冲沟发育,沟深坡陡,最大埋深 203 m。隧道洞身通过的地层主要为第四系全新统冲积砂质黄土,上更新统风积、冲积砂质黄土,第四系中更新统黏质黄土,第三系上新统泥岩^[1]。由于上庄隧道穿越黄土、砂层与泥岩接触带,地质条件复杂,施工难度大,为宝兰客专全线高风险隧道之一。

1.2 施工情况

2014 年 1 月 9 日,上庄隧道出口掌子面开挖至 DK983+054,施工图洞身为第四系中更新统黏质黄土,拱顶以上为第四系上更新统砂质黄土(V 级围岩),采用三台阶临时仰拱法开挖。开挖揭示的掌子面地层为第四系中更新统黏质黄土,拱顶附近为第四系上更新统砂质黄土,实测土体含水率为 25.9%,现场变更为 CRD 法并加强初期支护。在工法转换过程中,掌子面高含水率土体在长期浸润作用下,上台阶核心土两侧出现涌泥,取样实测含水率高达 32.1%。为进一步探明掌子面前方地质情况,在 DK983+034~DK982+715 段于地表布设了 10 个钻孔。2014 年 2 月初完成 7 个钻孔,2014 年 11 月~12 月间完成了剩余 3 个钻孔。根据补充钻探取样土工试验结果,出口端洞身范围内黏质黄土含水率为 22%~32%,较原勘察土体含水率增大。根据开挖揭示的围岩情况和补堪情况,经会勘将 DK983+064~DK982+948 围岩级别由 V 级调整为 VI 级。隧道出口段高含水率黄土地层自稳能力差,地基承载力较低。开挖支护过程中多次出现变

形大,掌子面涌泥失稳,地表出现裂缝。具体情况如图 1、图 2。



图 1 DK983+054 掌子面涌泥失稳

Fig. 1 Mud instability of tunnel face at DK983+054

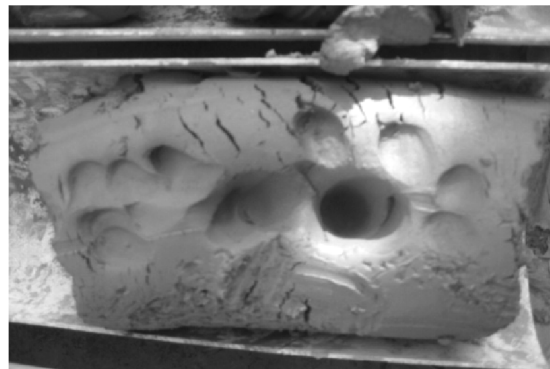


图 2 地表补充钻探软塑状黏质黄土岩芯

Fig. 2 Surface supplementary drilling of soft plastic loess

2 帷幕注浆加固方案

2.1 注浆加固机理

注浆是利用液压、气压或其他方法,通过注浆钻孔或插入其中的注浆管将具有胶凝能力的浆液注入土层中的裂隙、空隙和空洞中,将其中的水分和空气赶走,将原来松散的土粒或裂隙胶结成整体,形成一个结构新、强度大、防水性能强和化学稳定性良好的结石体,以达到加固地层和防渗堵漏的目的。

黄土具有如下主要工程性质:成分以粉粒为主,结构均匀无层理,土体较疏松,具有中等偏高压缩性;黄土中垂直节理裂隙发育,粉粒吸水性较差,具较好渗透性。在干燥状态下黄土骨架颗粒是构成黄土空间结构体系的支柱,骨架颗粒集合于接触点处的各种胶结物质形成了胶结性的联结,具良好的力学强度。随黄土含水率增加,水将软化和部分溶解颗粒接触部位的胶结物,使结构联结削弱,土体力学强度显著降低^[2]。

由黄土的工程性质可知,黄土遇水饱和后易失去结构胶结强度,出现“泥化”现象,土体结构强度及稳定性显著下降,继而发生坍塌事故。通过注浆使黄土中一定量的孔隙水排除,增强土体的内聚力及内摩擦角,减小土体渗透系数。浆脉自身固结后与土体构成一种复合结石体,改善地层的性质,以确保隧道开挖时不坍塌,不发生涌水、涌泥现象。

2.2 注浆参数设计

2.2.1 注浆范围及注浆段划分

注浆区范围结合施工环境条件、力学计算及工程经验,确定为开挖轮廓线外 5 m,以确保施工安全,防止掌子面因涌水涌泥而失稳坍塌。注浆分段长度综合考虑工程地质水文地质情况、钻机设备、止浆墙厚度等因素,确定为每循环注浆长度 25 m,开挖 20 m,预留 5 m 作为下一循环的止浆岩盘。

2.2.2 注浆材料及浆液配比

结合本工程特点,按注浆材料具备快速堵水、来源丰富、价格便宜、稳定性好、配制方便、结石体强度高原则^[3],选用水泥-水玻璃双液浆作为注浆材料。采用普通硅酸盐水泥(42.5),水泥浆水灰比 $W:C$ 为 0.8:1,水玻璃波美度为 30~40 Bé,水玻璃模数为 2.4~3.4,水泥与水玻璃混合配比为 1:1。且在保证注浆加固结石体强度的情况下,尽量加大水玻璃所占的比例,以缩短浆液凝固时间,压缩帷幕注浆施工周期。

2.2.3 注浆扩散半径

根据地层特点、注浆材料及堵水要求,采用工程类比法选取扩散半径为 1.2 m。根据注浆试验段效果分析,浆液的扩散距离与注浆压力、黄土裂隙率、土层含水率、浆液黏度等因素相关,扩散半径一般可达到 1.5 m,满足设计要求。

2.2.4 注浆终孔间距

按照注浆帷幕终孔断面不出现“注浆盲区”的要求,注浆孔间应搭接紧凑,注浆终孔间距应取 $1.5R$ (R 为注浆扩散半径),计算得出注浆终孔间距约为 1.8 m。

2.2.5 注浆压力

根据黄土中节理裂隙发育程度与连通程度的

不同,及土体渗透性的不同,分别选取不同压力的注浆方法。在贯通性裂隙发育且土体渗透性较高的条件下主要采用压密注浆法;在裂隙开度较小、连通性较差且土体渗透性较低的条件下主要采用劈裂注浆法^[4]。根据注浆试验段效果分析,注浆压力 4~6 MPa 是较为合适的。

2.2.6 止浆墙厚度

在第一循环帷幕注浆前需设置一定厚度的混凝土止浆墙以固定孔口管,后续注浆循环可预留 5 m 的止浆岩盘作为止浆墙。止浆墙厚度过小不能抵挡注浆压力,厚度过大造成浪费,所以止浆墙厚度的确定非常重要。对于大面积的止浆墙,采用平板理论进行抗压、抗剪计算得出的厚度一般大于现场实际情况,故一般采用经验取值。国内煤矿部门采用的经验数值为:当注浆压力 $P < 2$ MPa 时,取厚度 $D = 1$ m;当 $P = 2 \sim 5$ MPa 时,取厚度 $D = 1.5 \sim 2.0$ m;当 $P = 5 \sim 7.5$ MPa 时,取厚度 $D = 2.5 \sim 3.0$ m^[5]。结合上庄隧道开挖断面、注浆压力及现场施工条件等因素,确定采用 3 m 厚的 C30 混凝土止浆墙。

2.3 注浆孔布设

为防止钻孔过程中出现塌孔,采用分段式前进注浆法,循环进尺 25 m,搭接 5 m。应用动态信息化注浆理念,在确保注浆效果的前提下,摒弃“消除注浆盲区”带来的束缚,最大限度优化注浆孔数,压缩单循环帷幕注浆施工周期。第二循环在第一循环动态分区帷幕注浆的基础上优化掉 17 孔 A 序孔及 34 孔 G 序孔,形成 44 孔注浆方案。帷幕注浆孔布设如图 3~图 5。

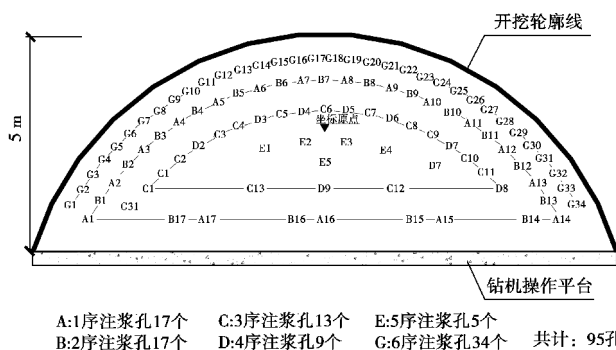


图3 注浆开孔布设图

Fig. 3 Layout of grouting hole

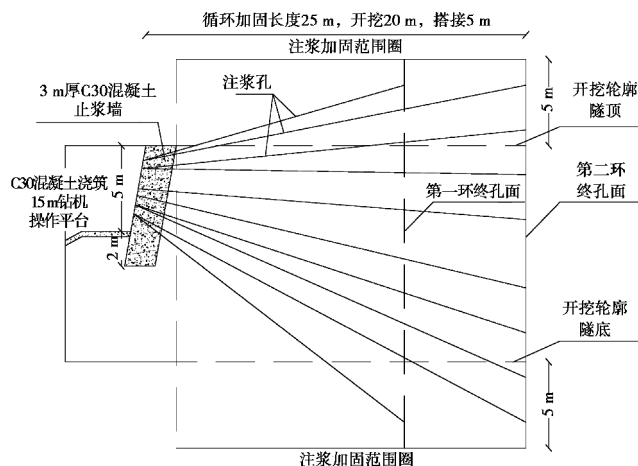


图4 注浆纵断面图

Fig. 4 Vertical section of grouting

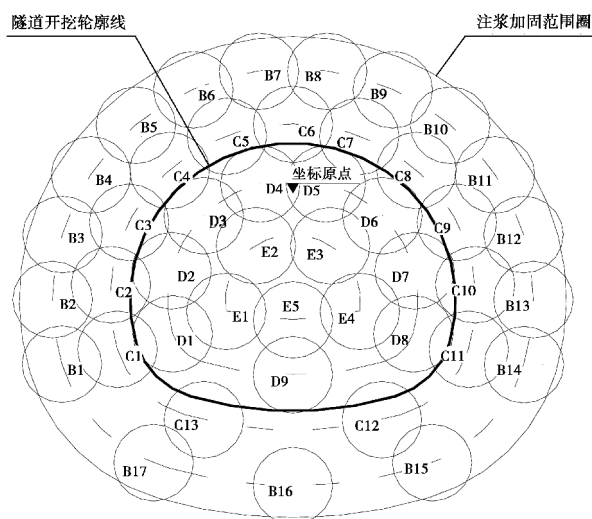


图5 终孔交圈图

Fig. 5 Diagram of final hole cross-circle

2.4 注浆顺序

按序孔由外圈向里圈、自上而下进行钻孔注浆。

采用间隔跳跃式钻孔,尽量避免浆液不串孔,先注奇数编号孔,再注偶数编号孔,且偶数编号孔可作为注浆检查孔。帷幕注浆施工见图6。



图6 帷幕注浆现场施工

Fig. 6 Construction site of curtain grouting

3 注浆加固效果超前地质预报分析

利用超前地质预报中地质雷达法进行注浆效果评定,尤其是对帷幕注浆的纵向连续性监测具有较为可靠的作用。地质雷达法对注浆效果分析无需开挖土体,通过利用介质间的电导率、介电常数等电性差异分界面对高频电磁波的反射来探测前方地质体的工程性质^[6-7]。

上庄隧道出口 DK983+010~DK982+985 段采用帷幕注浆进行围岩加固后,超前地质预报项目部物探组采用 SIR3000 型地质雷达仪对注浆加固效果进行检测。根据地质雷达超前地质预报报表结果分析,DK983+010~DK982+992 段雷达信号反射波能量较强,局部存在明显物性异常,推断该段异常由注浆结石体所致,在 DK982+992 附近注浆段结束,探测成果曲线如图7。可判定此次帷幕注浆在 DK983+010~DK982+992 段 18 m 范围内注浆加固效果良好。

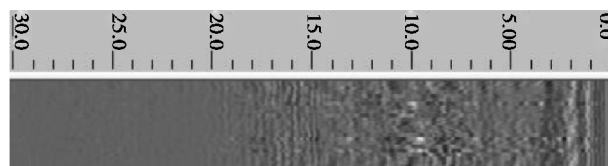


图7 地质雷达法注浆效果曲线(单位:m)

Fig. 7 Grouting effect curve by ground penetrating radar (unit: m)

4 注浆加固效果数值模拟分析

4.1 建模及参数选取

结合隧道超前地质预报地质雷达法探测结果,利用 GEO5 软件中的岩土工程有限元分析模块分析注浆加固效果。通过建立典型断面 DK983+010 在注浆加固前后两种工况,对比围岩等效塑性应变、竖向位移,初期支护弯矩、轴向压力、法向变形等数值来进一步分析注浆加固效果。有限元分析假设隧道围岩为连续、均匀、各向同性材料,考虑黄土湿陷性特征影响,本构模型土体通过采用 Drucker-Prager(D-P)强度准则扩展为真三维应力条件^[8],衬砌本构关系采用线弹性模型,地应力场的计算采用自重应力法,不考虑构造应力的影响^[9]。一般隧道有限元计算边界范围按照 3~5 倍隧道高或宽取值,为减小模型边界范围约束的影响,水平方向左右两侧自开挖轮廓线外采用 5 倍隧道宽度,为 70 m;竖直方向下部自开挖轮廓线仰拱

底向下采用 5 倍隧道高度,为 64 m。顶部取至地面线作为上部边界计算范围,为 25 m。边界条件下部为固定铰约束,上部为自由边界,左右两侧为水平约束^[10]。注浆加固后模型中,注浆加固区范围为开挖轮廓线外 5 m,初期支护喷射混凝土厚度为 25 cm。有限元网格生成结果为:节点数12 204,单元总数 6 582(网格单元数 5 418,梁单元数 291,多段线单元数 873)。根据工程地质勘察报告,并结合《铁路隧道设计规范》^[11]和《隧道工程岩体分级》^[12]确定的模型材料的物理力学参数如表 1。

表 1 模型材料的物理力学参数表

Table 1 Physico-mechanical parameters of model material

类别	天然 重度 /(kN·m ⁻³)	弹性 模量 /MPa	粘聚力 /MPa	内摩 擦角 /(°)	泊松比
砂质黄土	15.0	28	24	17	0.30
黏质黄土	16.8	37	32	22	0.28
初期支护	27.0	29 500	—	—	0.21
注浆体	24.0	150	80	35	0.27

4.2 数值模拟结果分析

4.2.1 围岩等效塑性应变分析

对上述两种工况进行弹塑性计算分析与对比,其围岩等效塑性应变如图 8 和图 9。注浆前围岩塑性变形最大值位于左右两侧拱脚及边墙处,围岩最大等效塑性应变为 5.03%。注浆后围岩塑性区分布变化不大,最大等效塑性应变为 2.43%,较注浆前减小了 51.7%。可见,帷幕注浆加固土体后,阻止围岩大面积的屈服破坏,围岩的塑性松动变形量显著减小,有效提高了掌子面的稳定性。

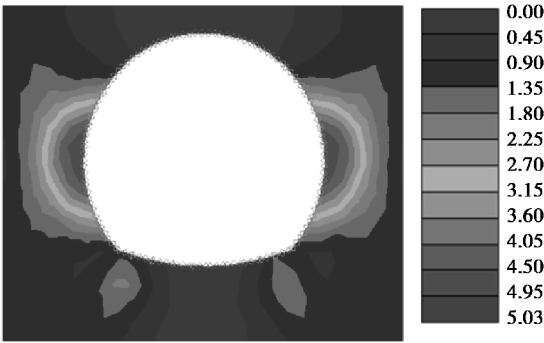


图 8 注浆前围岩等效塑性应变(单位:%)
Fig. 8 Equivalent plastic strain of surrounding rock before grouting (unit:%)

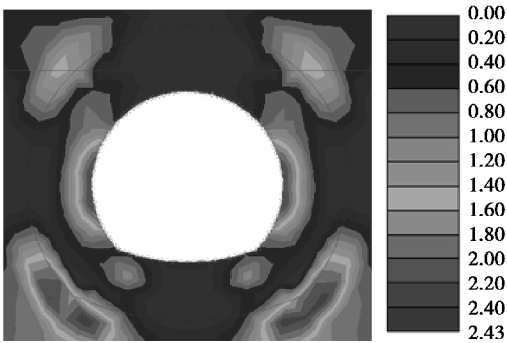


图 9 注浆后围岩等效塑性应变(单位:%)
Fig. 9 Equivalent plastic strain of surrounding rock after grouting (unit:%)

4.2.2 围岩竖向位移分析

对上述两种工况进行竖向位移计算分析与对比,其围岩竖向位移如图 10 和图 11。注浆前拱顶和仰拱处围岩最大竖向位移分别为 159.1 mm、214.8 mm。注浆后拱顶和仰拱处围岩最大竖向位移分别为 46.3 mm、135.7 mm,较注浆前减小了 70.9%。可见,注浆后隧道的开挖和支护引起围岩位移场的变化量显著减小,对于限制隧道拱顶和仰拱的变形起到很大作用,有效地避免了拱顶围岩坍塌掉块、仰拱围岩底鼓现象,保证了施工安全。

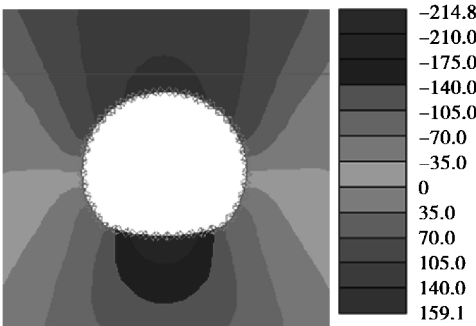


图 10 注浆前围岩竖向位移(单位:mm)
Fig. 10 Vertical displacement of surrounding rock before grouting (unit:mm)

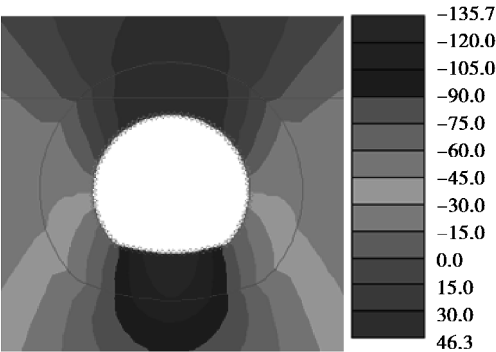


图 11 注浆后围岩竖向位移(单位:mm)
Fig. 11 Vertical displacement of surrounding rock after grouting (unit:mm)

4.2.3 初期支护弯矩分析

对上述两种工况进行初期支护弯矩计算分析与对比,其弯矩如图12和图13。注浆前断面初期支护最大负弯矩位于仰拱右侧,为 $-382.4 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。注浆后初期支护最大负弯矩位于仰拱左侧,为 $-238.2 \text{ kN} \cdot \text{m}$,较注浆前减小了37.7%。可见,注浆加固使得围岩强度大幅提升,从而使“土拱效应”更加明显,荷载更多的被注浆加固区土体承担,初期支护承受的弯矩有效减小,对掌子面围岩稳定性提高作用显著^[13]。

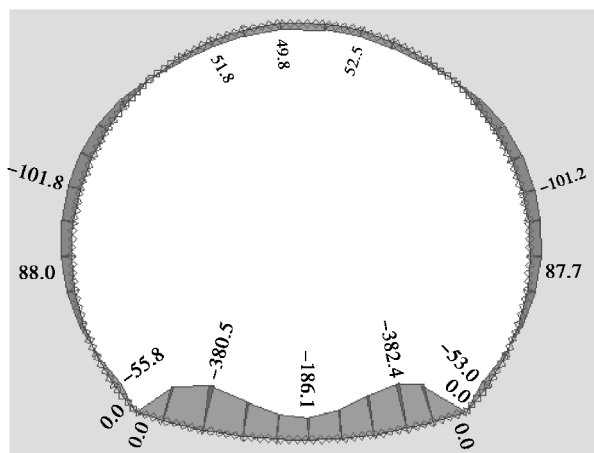


图12 注浆前初期支护弯矩(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

Fig. 12 Initial support bending moment before grouting (unit: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

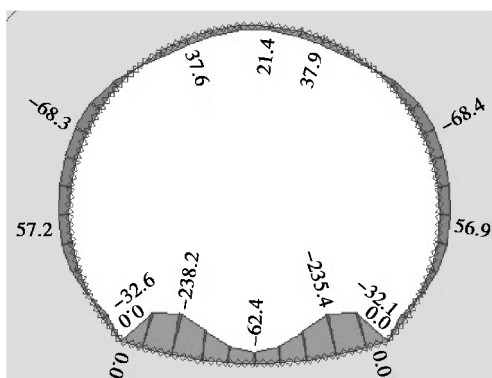


图13 注浆后初期支护弯矩(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

Fig. 13 Initial support bending moment after grouting (unit: $\text{kN} \cdot \text{m}$)

4.2.4 初期支护轴向压力分析

对上述两种工况进行初期支护轴向压力计算分析与对比,其轴力见图14和图15。注浆前断面初支轴向压力最大值主要位于左右两侧边墙处,为 1803.8 kN 。注浆后左右两侧边墙处最大值减小为 1466 kN ,较注浆前减小了18.7%。可见,随着初

支周围土体的注浆加固,达到了围岩稳定和减小初支外荷载的目的。

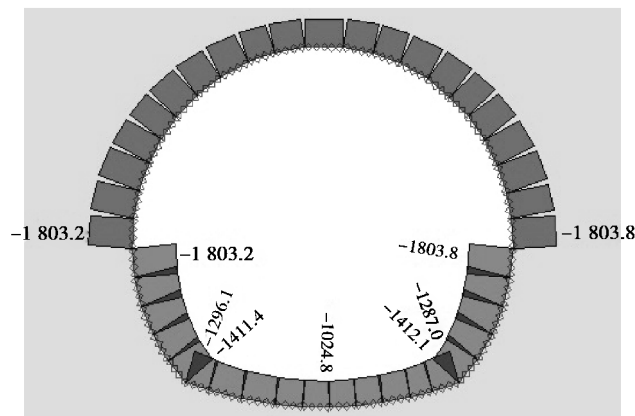


图14 注浆前初期支护轴向压力(单位: kN)

Fig. 14 Initial support axial pressure before grouting (unit: kN)

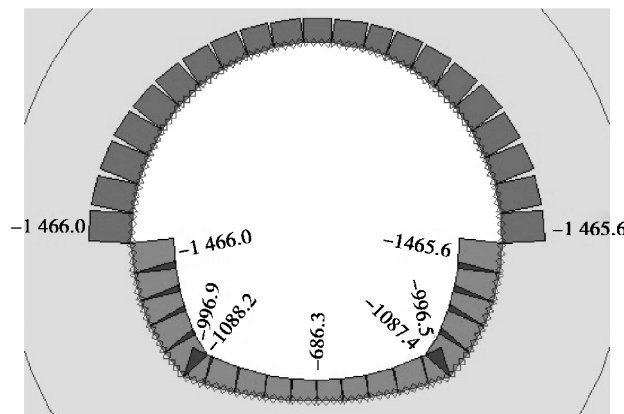


图15 注浆后初期支护轴向压力(单位: kN)

Fig. 15 Initial support axial pressure after grouting (unit: kN)

4.2.5 初期支护法向变形分析

对上述两种工况进行初期支护法向变形计算分析与对比,其法向变形如图16和图17。注浆前断面初支法向变形主要位于拱顶及仰拱,最大值分别为 158.7 mm 、 214.7 mm 。注浆后拱顶及仰拱法向变形最大值分别为 46.1 mm 、 135.7 mm ,较注浆前分别减小了70.9%、36.8%。可见,注浆加固区土体有效控制了围岩应力对初支的挤压变形,明显改善了隧道围岩的应力松弛现象。

通过上述5项数值模拟结果分析的对比表如表2。分析结果显示,帷幕注浆加固技术有效减小围岩塑性松动变形量、围岩位移场、初期支护的受力及变形。

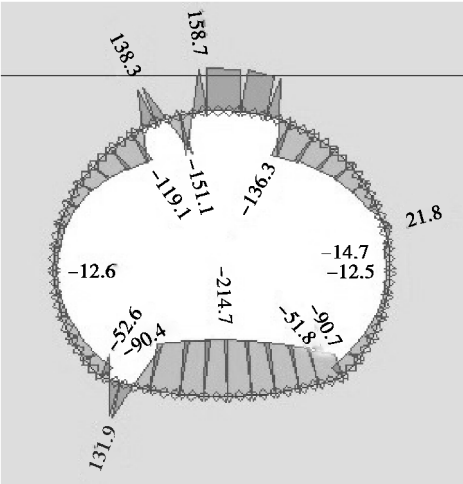


图 16 注浆前初期支护法向变形(单位:mm)
Fig. 16 Normal deformation of initial support before grouting (unit: mm)

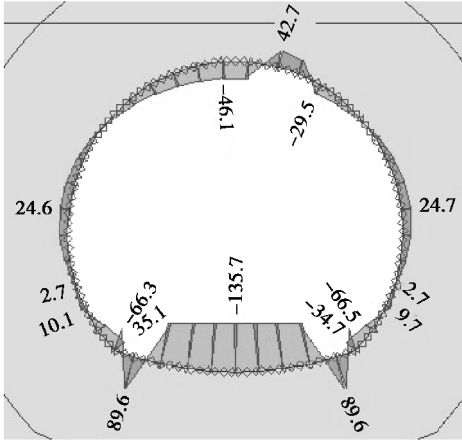


图 17 注浆后初期支护法向变形(单位:mm)
Fig. 17 Normal deformation of initial support after grouting (unit: mm)

表 2 数值模拟结果分析对比表

Table 2 Analysis and comparison of numerical simulation results			
类别	注浆前 极值	注浆后 极值	变化量 /%
等效塑性应变/%	5.03	2.43	51.7
竖向位移/mm	159.1	46.3	70.9
弯矩/(kN·m)	-382.4	-238.2	37.7
轴向压力/kN	1 803.8	1466	18.7
法向变形/mm	158.7	46.1	70.9

5 注浆加固效果现场观测分析

对帷幕注浆加固后的土体,经过施工开挖后观测掌子面浆液扩散情况、浆液固结情况、围岩渗水量变化等,从而对注浆加固效果进行有效评定,且为下一循环注浆设计与施工提供重要参考。

根据 DK983+010 开挖作业面的实际断面揭露,如图 18。可以看出,开挖后土体浆脉分布清晰,浆液扩散至整个掌子面,浆液结石体固结强度高呈硬塑状,掌子面干燥无渗水现象,围岩无坍塌、掉块现象,整体稳定性好。采用帷幕注浆技术在高含水率黄土地层加固效果良好,满足了隧道施工的要求。

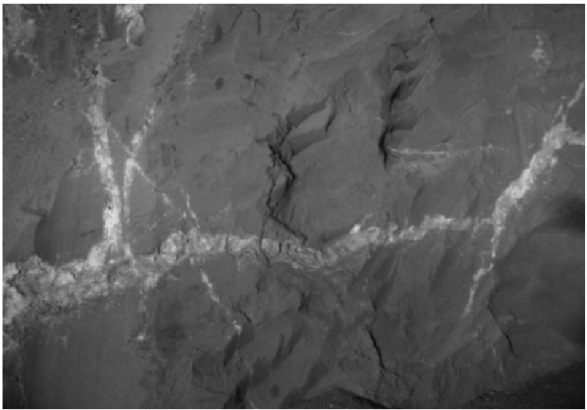


图 18 注浆浆脉
Fig. 18 Grouting pulp veins

6 结论

- (1)通过超前地质预报地质雷达法对注浆段进行分析,结果显示帷幕注浆纵向连续性好,宏观上评定注浆效果良好。
- (2)有限元分析结果显示,帷幕注浆加固技术有效减小围岩塑性松动变形量、围岩位移场、初期支护的受力及变形。
- (3)利用帷幕注浆技术对高含水率黄土地层加固后,土体含大量浆脉且分布清晰,掌子面无渗水,围岩整体稳定性好,未发生掉块、坍塌等现象。
- (4)应用动态信息化注浆理念,优化帷幕注浆方案,在保证施工安全的前提下,对于快速、高效的通过高含水率黄土地层具有显著的工程价值。

参考文献(References)

- [1] 中铁第一勘察设计院集团有限公司.上庄隧道工程地质勘察报告[R]. 西安:中铁第一勘察设计院集团有限公司,2010. (China Railway First Survey & Design Institute Group Co. Ltd. Shangzhuang tunnel engineering geological investigation report [R]. Xi'an: China Railway First Survey & Design Institute Group Co. Ltd., 2010. (in Chinese))
- [2] 黄磊,蔡玮彬.不同孔隙率下黄土粒间作用的 PFC^{2D} 模拟[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):1123-1128.(Huang Lei, Cai Weibin. Numerical simulation of loess particle effects under different porosity by PFC^{2D} [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 1123-1128. (in Chinese))
- [3] 谭立新,李玉峰,雷明锋,等.复杂条件下城市轨道交通隧道设计与施工技术[M].北京:人民交通出版社,2015. (Tan Lixin, Li Yufeng, Lei Mingfeng, et al. Design and construction technology of urban rail transit tunnels under complicated conditions[M]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [4] 丁自伟,邱华富.破碎围岩巷道新型注浆加固工艺实验研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(4):958-962.(Ding Ziwei, Qiu Huaifu. Experimental research on new grouting reinforcement technology of roadways with fractured surrounding rock [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(4): 958-962. (in Chinese))
- [5] 王星华,涂鹏,周书明,等.地下工程承压地下水的控制与防治技术研究[M].北京:中国铁道出版社,2012. (Wang Xinghua, Tu Peng, Zhou Shuming, et al. Underground confined groundwater control and prevention technology research [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012. (in Chinese))
- [6] 叶英.粉细砂地层浅埋暗挖法注浆加固技术指南[M].北京:中国建筑工业出版社,2013. (Ye Ying. Silty-fine sand stratum shallow mining method grouting reinforcement technique guide [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [7] 刘新荣,刘永权,杨忠平,等.基于地质雷达的隧道综合超前预报技术[J].岩土工程学报,2015,37(S2):51-56.(Liu Xinrong, Liu Yongquan, Yang Zhongping, et al. Synthetic advanced geological prediction technology for tunnels based on GPR [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S2): 51-56. (in Chinese))
- [8] 路德春,曹胜涛,张波,等.隧道开挖围岩土压力拱效应分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(6):1421-1430. (Lu Dechun, Cao Shengtao, Zhang Bo, et al. Soil arching effect during tunnel excavation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(6): 1421-1430. (in Chinese))
- [9] 霍润科,王艳波,宋战平,等.黄土隧道初期支护性能分析[J].岩土力学,2009,30(增2):287-290. (Huo Runke, Wang Yanbo, Song Zhanping, et al. Analysis of initial support properties for loess tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30 (Supp. 2): 287-290. (in Chinese))
- [10] 郑颖人.有限元极限分析法在隧洞工程中的应用[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(增2):1127-1137. (Zheng Yingren. The application of FEM limit analysis in tunnel engineering [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2011, 30 (Supp. 2): 1127-1137. (in Chinese))
- [11] 中华人民共和国铁道部.铁路隧道设计规范(TB 10003-2005)[S].北京:中国铁道出版社,2005. (Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for design on tunnel of railway (TB10003-2005) [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005. (in Chinese))
- [12] 王石春,何发亮,李苍松.隧道工程岩体分级[M].成都:西南交通大学出版社,2007. (Wang Shichun, He Faliang, Li Cangsong. Tunnel engineering classification of rock mass [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007. (in Chinese))
- [13] 薛晓辉,张军,宿钟鸣,等.山岭公路隧道富水黄土地层注浆加固技术[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(3):278-282. (Xue Xiaohui, Zhang Jun, Su Zhongming, et al. The grouting reinforcement technology in watery loess strata of mountain highway tunnel [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2016, 35(3): 278-282. (in Chinese))