

文章编号:1673-2049(2011)01-0011-05

黄土公路隧道浅埋段管棚注浆 支护机理及监测分析

朱彦鹏¹,何江飞^{1,2},李 军³

(1. 兰州理工大学 土木工程学院,甘肃 兰州 730050; 2. 陕西工程勘察研究院,陕西 西安 710068;
3. 中交第二公路工程局有限公司,陕西 西安 710065)

摘要:为了探讨管棚注浆法在黄土公路隧道浅埋段中的支护机理和实际应用效果,对某黄土公路隧道右线出口段进行了地表沉降、拱顶下沉和水平收敛等的施工监测;在对现场监测数据进行分析的基础上,得出黄土公路隧道洞口浅埋段在管棚支护作用下拱顶下沉、水平收敛、地表沉降等的变化规律。研究表明:管棚注浆法能够显著抑制浅埋黄土地层的变形和拱顶下沉,减少隧道初始支护结构的变形和受力,避免浅埋黄土地层开挖中塌方现象的产生,保证了施工安全,为进一步分析黄土地区管棚注浆法的支护机理提供了参考依据,同时也为今后西北地区黄土公路隧道管棚注浆法的设计和施工提供了优化数据。

关键词:隧道工程;长管棚;黄土隧道;变形规律;支护机理;浅埋黄土地层

中图分类号:U45 **文献标志码:**A

Support Mechanism and Monitoring Analysis of Pipe Roof Grouting for Loess Highway Tunnel in Shallow-buried Section

ZHU Yan-peng¹, HE Jiang-fei^{1,2}, LI Jun³

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
2. Shaanxi Geotechnical Investigation Institute, Xi'an 710068, Shaanxi, China; 3. CCCC Second
Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: To discuss the support mechanism and practical application effect of pipe roof grouting method for loess highway tunnel in shallow-buried section, the dynamics measures, such as ground settlement, vault crown settlement and level convergence were made in outlet section of right line of one loess highway tunnel. Based on studying the field monitoring data, the change regulations of shallow-buried section of loess highway tunnel entrance, such as vault crown settlement, level convergence and ground settlement were obtained. Research results show that the method of pipe roof grouting can clearly restrain the deformation and vault crown settlement for shallow-buried layer of loess, and reduce the deformation and stress of tunnel initial support structure, avoid caving in excavating of shallow-buried layer of loess and provide the security reference for the construction work. It provides the reference basis for further analysis of the support mechanism of pipe roof grouting method in loess area, meanwhile, it provides optimized data for the design and construction of pipe roof grouting method for loess highway tunnel in the

收稿日期:2010-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(50978129);甘肃省科技攻关项目(2GS064-A52-040)

作者简介:朱彦鹏(1960-),男,甘肃庆阳人,教授,博士研究生导师,工学硕士,E-mail:zhuyp@lut.cn.

loess region of North-western China in the future.

Key words: tunnel engineering; long pipe roof; loess tunnel; deformation law; support mechanism; shallow-buried layer of loess

0 引言

管棚注浆法是地下结构工程浅埋暗挖时通常采用的一种超前支护技术,其实质是在拟开挖的地下隧道或结构的衬砌拱圈隐埋弧线上,预先设置惯性力矩较大的厚壁钢管,起临时超前支护作用,防止土层坍塌和地表下沉,以保证掘进和后续支护工艺安全运作^[1]。在特殊地质地段,如破碎的岩体、塌方体、砂土质地层、裂隙发育岩体、强膨胀地层、断裂破碎带、浅埋大偏压等围岩和城市地铁暗挖段,管棚注浆法是克服上述情况最有效的辅助施工方法之一^[2-3]。目前,管棚设计参数主要依靠经验进行取值,所以对于合理或最优设计参数的选取,管棚实际应用效果的监测分析显得尤为重要。但是,目前针对大跨度黄土公路隧道管棚的超前支护机理、相关设计参数和应用效果的讨论几乎没有,因此,本文中笔者通过介绍 40 m 长管棚注浆法在甘肃某黄土公路隧道工程中的应用,探讨了黄土公路隧道管棚的支护机理、设计参数及监控量测等方面的问题,为该支护方法在西北黄土地区地下工程中的设计和施工提供有效的参考。

1 工程概况

码头隧道位于甘肃省天水市麦积区境内,为上、下线分离的四车道高速公路短隧道,是连霍国道主干线宝天高速公路甘肃过境段内施工难度较大的黄土公路隧道之一,隧道左线全长 390 m,右线全长 361 m。隧道设计净宽为 10.5 m,净高为 5.0 m。隧道出口段地形坡角约 20°,隧道轴线与坡面呈现 25°小角度相交,分布第四系粘质黄土,属 V 级围岩,该洞口段埋深 15~30 m,为浅埋段,土体较松散,成洞困难;为确保隧道开挖后进洞安全,特在出口段采用 40 m 超长管棚注浆辅助施工措施。

2 支护机理与设计参数

2.1 支护机理

2.1.1 梁支撑效应

管棚注浆法中用作长管棚的钢管是沿隧道开挖轮廓周边时,间隔一定的间距,前端以一定的角度插入开挖断面外深部围岩,后端支撑在钢拱架上,并

且与钢拱架焊接在一起。因此,管棚钢管可以看作是一端为铰支、一端为滚轴支座的简支梁支撑结构,隧道开挖后可有效承受卸荷产生的部分松动压力,使二次应力场的重分布向着有利于围岩稳定的方向发展^[4-6]。

2.1.2 土体加固效应

无缝钢管在钻取注浆孔后就起着注浆管的作用,通过导管向周边围岩注浆,在压力作用下化学浆液渗透到土层间的空隙中,挤出其中的空气和水分并胶结凝固,使隧道开挖轮廓线以外一定范围的松散土层形成整体,提高了围岩的地层刚度和整体稳定性,减小了隧道周边塑性区的范围。

2.1.3 承载拱效应

普氏理论适合于埋深较浅的隧道。普氏理论认为:隧道开挖后拱顶部分岩土体将失去稳定,产生坍塌并形成自然拱;隧洞两侧由于应力集中而逐渐破坏,导致顶部坍塌并进一步扩大形成塌落拱^[7]。根据普氏理论,对于上覆围岩为黄土等松散地层的情况,隧道开挖后,拱部如果不进行超前支护,隧道拱部极易坍塌,因此应加强对隧道拱顶的支护。采用管棚注浆法进行超前预加固时,理论上以注浆管为中心形成一个稳定的圆形加固体,单排或多排注浆管的联合注浆就形成了以管棚钢管为骨架的承载拱。承载拱承受上部岩体质量,拱内部围岩与支护系统受到的力仅是由拱向隧洞方向变形引起的形变压力。当管棚为惯性力矩较大的厚壁钢管,且沿隧道开挖轮廓周边密布时,加固圈形成一个断面封闭的壳,其变形较小,隧道支护结构所承受的上部荷载将大大减小^[8-13]。

2.2 设计参数

长管棚布置如图 1 所示,其中, r_1 、 r_2 分别为隧道断面的内、外半径; L 为管棚长度; $1:m$ 为隧道洞口边坡坡率。管棚采用 $\Phi 108 \times 6$ 热轧无缝钢管,节长为 4 m 和 6 m,管距为环向间距 40 cm,倾角为仰角 1°(不包括线路纵坡),方向为与路线中线平行。钢管施工定位误差不大于 4 cm,端头不大于 20 cm。同一横断面内的接头数不大于 50%,相邻钢管的接头至少错开 1 m。水泥水灰比为 1:1;水泥浆水玻璃体积比为 1:0.5;水玻璃质量浓度为 35 波美度;水玻璃模数 2.4。注浆初压为 0.5~1.0 MPa,终压

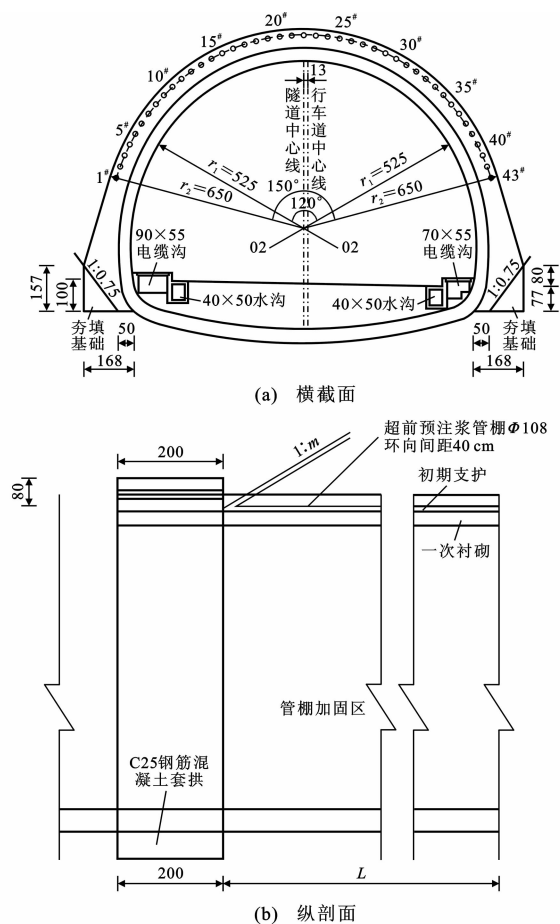


图1 长管棚布置(单位:cm)

Fig. 1 Arrangements of Long Pipe Roof (Unit:cm)

为2.0 MPa。注浆结束后及时清除管内浆液,并用M30水泥砂浆填充,以增强管棚的刚度和强度。

3 监测结果与分析

根据洞口段黄土地质特征,充分考虑长管棚超前支护作用,采用短台阶留核心土法施工进洞,先开挖拱部环形土,进行拱部初支,再开挖核心土。根据新奥法原理,在隧道出口段施工中按照《公路隧道施工技术规范》(JTJ 042—94)^[14]的要求,布置了地表沉降、拱顶下沉和断面周边收敛测点并进行了监测。出口段地表沉降、拱顶下沉和断面周边收敛测点布置在同一个断面,布置间距3~10 m。

3.1 地表沉降

为了掌握隧道出口浅埋段因隧道开挖引起的地表沉降情况,在该隧道右线出口段的地表监测中,共设6个量测断面;本文中选取隧道右线出口段YK4+990处的断面进行分析。图2为隧道地表各测点 $D_0 \sim D_5$ 、 $D'_1 \sim D'_5$ 的位置。图3为隧道地表各测点沉降时态曲线,图4为对应图2中的各测点下沉量。

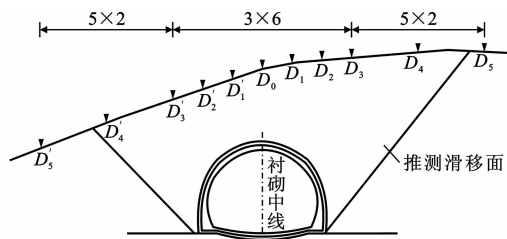


图2 地表沉降测点布置(单位:m)

Fig. 2 Arrangements of Measuring Points for Ground Settlement (Unit:m)

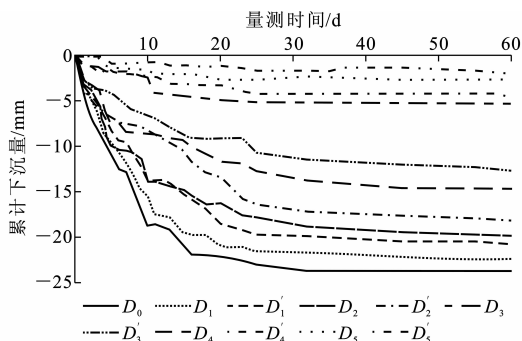


图3 YK4+990处地表各测点沉降时态曲线

Fig. 3 Curves of Ground Settlement of Different Measuring Points vs Time at YK4+990

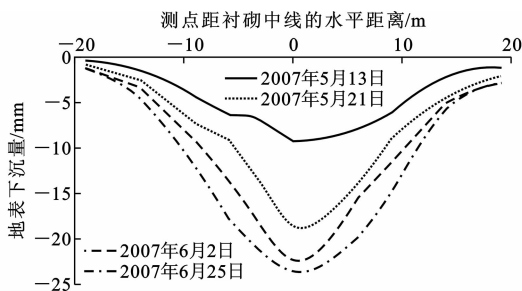


图4 YK4+990处地表沉降槽时态曲线

Fig. 4 Curves of Ground Settlement Troughs vs Time at YK4+990

从监测的数据可以看出:隧道地表下沉量最大值小于25 mm,并且最大值出现在隧道衬砌中线对应的地表测点,地表的横向沉降曲线为一近似抛物线,距隧道横向距离越大,沉降越小,基本上形成一比较有规律的沉降槽(图4)。由于隧道偏压作用的影响,右侧测点沉降比左侧相应的测点大1~3 mm。当隧道掌子面未开挖到该断面时,沿隧道开挖方向的地表各测点已产生了沉降,从测点至洞内掌子面再到地表测点断面这段时间内,一般下沉量为2~8 mm。当掌子面开挖到该断面时,地表沉降有明显加快趋势,地表下沉速率大约为2~3 mm·d⁻¹,下台阶和仰拱的开挖也会增大地表沉降速率,沉降速率为2~4 mm·d⁻¹,地表沉降也会受到雨水的影

响,地表雨水会加速地表的沉降,地表沉降在仰拱充填 20 d 后逐渐趋于稳定。

3.2 拱顶下沉

洞内纵向布置的测点与地表位于同一里程断面,本文中分别选取 YK4+990、YK4+985、YK4+975 处量测断面 GD1、GD2、GD3 为主要分析对象。从图 5 可以看出:拱顶下沉最大值小于 23.0 mm,符合规范 JTJ 042—94 的规定。其下沉特征表现为隧道开挖初期拱顶下沉速率较大,随着时间的增加,下沉速率逐渐减小。从上台阶开挖到下台阶初支期间,下沉量比较显著,平均下沉速率为 $3\sim 7\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,之后下沉量逐渐减小,平均下沉速率为 $1\sim 2\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。仰拱开挖期间,下沉量比较明显,平均下沉速率为 $2\sim 4\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。仰拱施作完成后,整个初支形成了封闭的受力结构,拱顶下沉趋于稳定,平均下沉速率为 $0\sim 1\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,断面封闭后 10 d 左右沉降基本稳定。

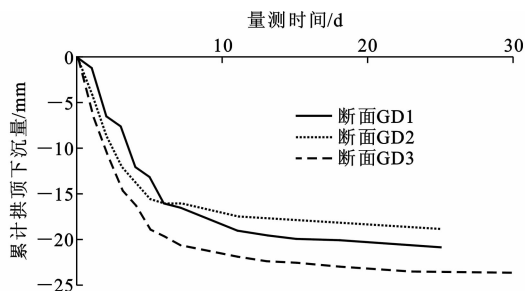


图 5 拱顶下沉时态曲线

Fig. 5 Curves of Vault Crown Settlement vs Time

3.3 隧道周边位移

隧道周边收敛值是指隧道周边相对方向 2 个固定点连线上的相对位移值,它是隧道开挖所引起的围岩变形最直观的表现。图 6 中的隧道周边位移收敛时态曲线与图 5 中的拱顶下沉时态曲线相对应,其中 YK4+990、YK4+985、YK4+975 处量测断面分别为 SL1、SL2、SL3。从图 6 可以看出:隧道累计收敛值为 $13\sim 18\text{ mm}$;开挖初期 $3\sim 5\text{ d}$ 收敛值较为明显,随后每天的变化几乎都在 1 mm 以内。施作初支仰拱期间,收敛值最大,平均变形速率为 $2\sim 3\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,其后逐渐趋于稳定;断面封闭后 10 d 左右周边收敛趋于稳定。将图 6 与图 5 进行对比分析可知,隧道周边收敛位移值均小于对应的拱顶下沉值,差值在 $2\sim 5\text{ mm}$ 之间。

3.4 管棚支护效果综合评价

结合现场监测数据,通过对管棚注浆法的支护效果进行定量分析可知,长管棚注浆法在黄土公路

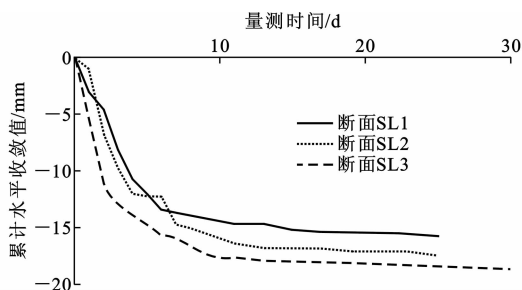


图 6 隧道周边位移收敛时态曲线

Fig. 6 Curves of Peripheral Convergences vs Time in Tunnel

隧道浅埋段进行超前预支护发挥了整体支护效果,避免了土体的坍塌及地表大幅度下沉,保证了施工人员的安全,为隧道下步工序的施工提供了安全保障。现场观察也证明,注浆浆液固结连成一片,与管棚共同形成伞形护拱,有效地加固了土体,因此,长管棚注浆法在黄土隧道浅埋段措施可行,加固效果良好。

4 结 语

(1)采用上述 40 m 长管棚注浆预加固方案解决了西北地区黄土公路隧道洞口浅埋段进洞难的问题,顺利完成了成洞施工;现场施工监测结果证明了长管棚注浆预支护方案的良好效果,也证明了在长管棚注浆加固作用下,黄土隧道浅埋段采用短台阶预留核心土法进洞方案是可行的。

(2)管棚注浆法的关键是以管棚为骨架通过注浆加固一定范围内的土层,形成管棚与固结体联合的超前支护体系,提高土体的强度和变形模量,延长围岩开挖后裸露时的自稳时间,并在隧道拟开挖轮廓外部形成具有较强承载能力的改良加固带,有效解决开挖后引起的塌土等失稳现象。由于注浆加固带的刚度较大、整体性较好,所以隧道的拱顶下沉变形、地表沉降和洞内周边收敛变形得到有效抑制,所得出的拱顶下沉、地表沉降和洞内周边收敛的变形规律可以为隧道管棚设计参数的取值提供参考依据。

(3)由于浅埋段黄土隧道地质多属于湿陷性黄土,地基承载力较弱,在仰拱封闭成环以前由于覆盖层自身质量会造成隧道的整体下沉,因此,要尽可能缩短仰拱与开挖掌子面之间的距离,改善隧道整体受力结构,减小隧道的整体下沉量。

(4)目前管棚的支护参数主要根据经验而得,是比较保守的数据,没有充分发挥管棚的超前支护效果,势必造成材料与人力等资源的浪费,如何对管棚

设计参数进行优化,建立合理的管棚支护力学模型和计算方法尚需进一步探讨。

参考文献:

References:

- [1] 雷 风. 管棚注浆法在软弱围岩开挖中的应用[J]. 探矿工程:岩土钻掘工程,1998,10(增1):178-179.
LEI Feng. Application of Shed-pipe and Grouting in Tunnel Construction in Soft Wall Rock[J]. Exploration Engineering: Drilling and Tunneling, 1998, 10 (S1):178-179.
- [2] 林希鹤,卢清国,马艳春. 超前管棚支护在隧道工程中的应用[J]. 铁道建筑,2006(8):58-60.
LIN Xi-he, LU Qing-guo, MA Yan-chun. Application of Shed-pipe and Grouting in Tunnel Construction in Tunnel[J]. Railway Engineering, 2006(8):58-60.
- [3] 张明聚,林 毅,黄明琦,等. 厦门翔安隧道洞口段管棚设计与施工[J]. 北京工业大学学报,2007,33(10):1056-1059.
ZHANG Ming-ju, LIN Yi, HUANG Ming-qi, et al. Shed-pipe Design and Construction of Xiang'an Sub-sea Tunnel Portal in Xiamen[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(10):1056-1059.
- [4] 周顺华. 软弱地层浅埋暗挖施工中管棚法的棚架原理[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(14):2565-2570.
ZHOU Shun-hua. Principles of Pipe Roof Applied to Shallow-buried Tunnels in Soft Ground[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (14):2565-2570.
- [5] 董新平,周顺华. 软弱地层管棚荷载传递作用分析[J]. 现代隧道技术,2005,42(6):24-29.
DONG Xin-ping, ZHOU Shun-hua. Mechanical Analysis of Pipe-roofing in Soft Ground[J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(6):24-29.
- [6] 向俊宇,傅鹤林,聂春龙. 浅埋大跨度隧道管棚支护进洞三维有限差分法分析[J]. 南华大学学报:自然科学版,2008,22(1):70-73,79.
XIANG Jun-yu, FU He-lin, NIE Chun-long. Three Dimensional Finite-difference Method Analysis Appli-
cance to the Pipe-shed Entrance of Large Span Tunnel [J]. Journal of University of South China: Science and Technology, 2008, 22(1):70-73,79.
- [7] 谭德怀. 长管棚在宜昌云集隧道施工中的应用[J]. 现代隧道技术,2004,41(1):59-63.
TAN De-huai. Application of Long Pipe Roofing in the Construction of Yunji Tunnel in Yichang [J]. Modern Tunnelling Technology, 2004, 41(1):59-63.
- [8] 黎 荐. 高速公路隧道浅埋段特大塌方的综合处治技术[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(3):591-594.
LI Jian. Synthetical Treatment Technique for Extra-ordinary Collapse of Highway Shallow Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(3):591-594.
- [9] 常艏东. 管棚法超前预支护作用机理的研究[D]. 成都:西南交通大学,1999.
CHANG Shao-dong. Research on Pre-brace Mechanism of Pipe Umbrella Method[D]. Chengdu: South-west Jiaotong University, 1999.
- [10] 苟德明,阳军生,张 戈. 浅埋暗挖隧道管棚变形监测及受力机制分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(6):1258-1264.
GOU De-ming, YANG Jun-sheng, ZHANG Ge. Deformation Monitoring and Mechanical Behaviors of Pipe-roof in Shallow Tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6):1258-1264.
- [11] 伍振志,傅志锋,王 静,等. 浅埋松软地层开挖中管棚注浆法的加固机理及效果分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(6):1025-1029.
WU Zhen-zhi, FU Zhi-feng, WANG Jing, et al. Study of Support Mechanism and Effect of Shed-pipe Grouting Technology for Tunneling Construction in Shallow-buried Soft Stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6):1025-1029.
- [12] 张红卫,任建喜,李振龙. 隧道管棚注浆超前支护在特殊条件下的应用[J]. 西安科技大学学报,2009,29(2):165-169.
ZHANG Hong-wei, REN Jian-xi, LI Zhen-long. Shed-pipe Grouting Technique Application in Shallow-buried and Lateral Pressure Tunneling [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29 (2):165-169.
- [13] 贾嘉陵,孙国富,邓 坤. 湿陷性黄土地层二元结构本构模型[J]. 西安科技大学学报,2009,29(2):180-184.
JIA Jia-ling, SUN Guo-fu, DENG Kun. Constitutive-model of Dualistic Structure of Collapsed Loess [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(2):180-184.
- [14] JTJ 042—94,公路隧道施工技术规范[S].
JTJ 042—94, Code for Construction Technique of Highway Tunnel[S].