

浅埋黄土隧道管棚加固支护效果数值模拟分析

王强¹, 庄前兵¹, 霍耀东², 王继伟¹, 师凯强³

(1. 中交一公局集团有限公司, 北京市 100000; 2. 中交中南工程局有限公司, 湖南 长沙 410000;

3. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 基于通定高速公路某浅埋黄土隧道工程, 采取三维数值模拟和现场监测等手段, 对浅埋段渗流黄土隧道的加固支护方案进行研究, 分析对黄土隧道浅埋段施行超前管棚加固支护的可行性。针对不同的加固支护措施进行数值模拟分析, 结果发现: 超前管棚支护下拱顶沉降量减小 16.2%, 初期支护的轴力最大值减小 19.8%。监测结果表明: 超前管棚支护与超前管棚 + 超前小导管支护两种工法并用所能减小的竖向位移的百分比 (27.8%、28.1%) 非常接近, 但超前管棚支护能大大节省额外施作超前小导管的费用和时间, 有效地控制了拱顶范围内的围岩变形, 验证了超前管棚加固支护工法的有效性和经济性。

关键词: 浅埋黄土隧道; 管棚加固; 工法对比; 数值模拟; 现场监测

中图分类号: U458

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)05-0279-06

0 引言

黄土作为一种特殊土, 工程特性异常复杂, 最大特点是遇水会出现结构崩解、强度下降和变形剧增的现象。如若地下水比较充沛, 隧道施工区域内的地下水渗流场会因开挖工序而发生改变, 洞室围岩的应力状态将受到影响, 继而给隧道围岩的稳定性带来极大干扰。对此, 业界常用的辅助工法有使用超前小导管、超前管棚、高压旋喷桩等方法, 以有效地加固软弱围岩、限制围岩过度变形, 这是目前解决软弱围岩洞室大变形和塌方问题的主要途径。

杨东升^[1]依托具体工程, 通过室内三轴试验, 研究了降雨强度和时长对超浅埋黄土隧道开挖后稳定性的影响, 得出黄土含水率升高对围岩变形和支护结构受力的影响较大, 应提前进行超前加固和排水措施, 以保证围岩的稳定性。宋战平^[2]等基于监测和数值模拟的结果表明: 洞口段施作超前管棚支护可以加速应力平衡拱的形成, 约束洞室周边的塑性区发展, 避免围岩塑性区扩展至地表, 从而避免洞口段土体坍塌。张建^[3]等通过现场试验分析了不

同类型管棚对于溶洞发育地层的适应性, 结果表明: 潜孔钻杆管棚在岩性差异较大、软硬分布不均的岩层适应性较好。张隽^[4]等采用有限元差分软件研究了迈式管棚超前支护技术在粉砂质黄土隧道坍塌体中的应用, 结果表明迈式径向锚杆配合管棚超前支护可以有效控制粉砂质围岩及支护结构的变形。

本文基于通定高速浅埋黄土隧道的工程实例, 在选定的隧道断面处, 分别施作了不同的超前支护加固措施, 监测并分析不同超前支护加固结构的应力、变形时态曲线的变化规律, 分别建立了超前管棚支护、超前小导管支护、超前管棚 + 超前小导管支护的计算模型, 并在对比分析后发现: 超前管棚措施可明显提高浅埋段围岩的自稳能力, 对于浅埋渗流黄土隧道的围岩变形可起到明显控制效果。

1 工程概况

本文所依托的工程为通定高速的团结隧道, 起点位于定西市安定区团结镇南侧黄土山梁, 路线总体走向自东向西, 总里程达 2 080 m。隧址区位于祁 - 吕贺兰山字型构造体系的西翼内侧地段, 以新近系内陆红色山麓相成岩和第四纪中上更新统黄土的分布为主。隧址区地层主要为第四系黄土层, 包括全新统坡积黄土 (Q_4^{c+dl})、冲洪积粉质黏土 (Q_4^{al+pl})、上更新统风积黄土 (Q_3^{col}) 等。研究范围内的隧道围岩级别为 V ~ VI 级^[5]。

收稿日期: 2023-06-03

基金项目: 甘肃省重点研发计划 - 工业类 (21YF1GA381)

作者简介: 王强 (1975—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事岩土与地下工程方向的施工与管理工作。

通信作者: 庄前兵 (1977—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事桥梁与隧道工程方向的施工与管理工作。电子信箱: 195780793@qq.com

2 隧道渗流浅埋段超前管棚工法研究

2.1 超前管棚的作用机理

超前管棚是通过沿隧道开挖轮廓线外侧、以一定倾角打入设计根数的大刚度钢管、并进行注浆加固、最终在隧道拱部形成一圈棚状支护结构。将其作为增强围岩承载力和稳定性的超前支护,可显著提高围岩的稳定性与开挖面的安全性。

管棚的作用机理主要有以下三种。

(1)梁效应。管棚前端插入深层岩体,后端焊接在初支结构外缘,形成简支梁或超静定梁结构^[6],如图1所示。

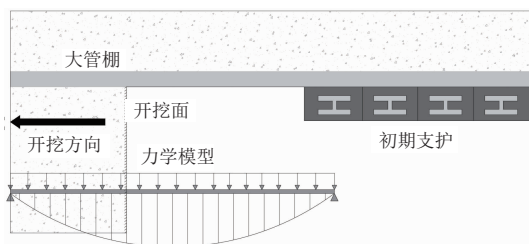


图1 超前管棚梁效应的力学模型

(2)拱效应。在注浆饱满连续的情况下,管棚能够在开挖面上方形成一道完整的拱形壳体结构,如图2所示。

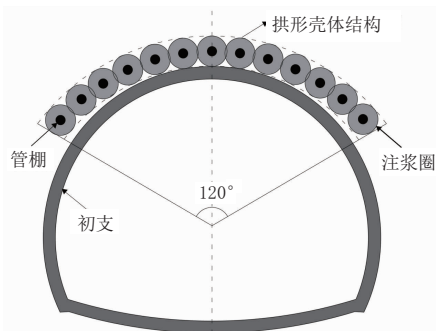


图2 管棚注浆后拱形壳体效应示意图

(3)加固岩体效应。管棚的中空钢管在注浆以后,能对围岩起到粘结加固和封闭裂隙的作用,截断围岩渗流途径,实现对前方复杂软弱富水地层的岩性改良^[7]。

2.2 超前管棚施工参数取值

本隧道工程中,管棚长度视地形、地质情况确定,可设置为10、15、20 m。管棚钢管采用 $\Phi 108\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ 热轧无缝钢管,环向间距为40 cm,每环37~40根。管棚外插角为 3° ,拱部预加固范围取为钢管设置于衬砌拱部,平行路面中线布置。钢管偏离设计位置的施工误差应小于20 cm,编号为奇数的第一节管棚采用3 m长钢管、编号为偶数的第一节管棚采用6 m长钢管;浆液扩散半径不小于0.5 m;浆液采

用纯水泥浆浆液,水灰比为1:1,注浆压力初压为0.5~1.0 MPa、终压为2.0 MPa^[5]。管棚构造图及I-I剖面图如图3、图4所示。

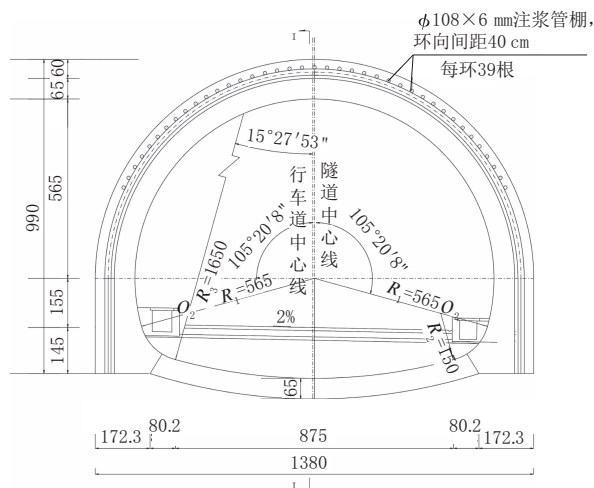


图3 管棚构造图(单位:mm)

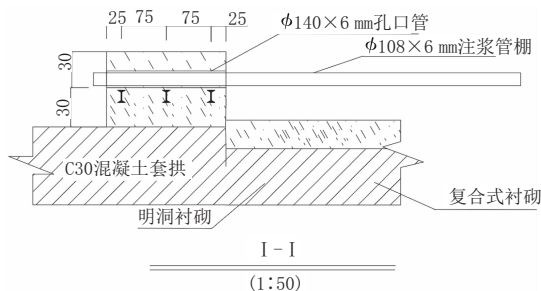


图4 管棚构造 I-I 剖面图(单位:mm)

现场施工时的洞口套拱管棚构造施工现场图片如图5所示。



图5 洞口套拱管棚施工现场图

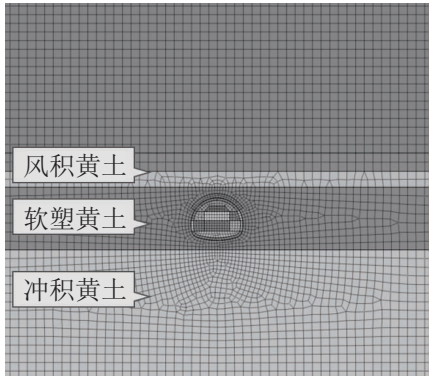
管棚施工的主要工序为:测量放样→施作导墙→制作钢花管及钢筋笼→搭钻孔平台→安装钻机→冲击钻孔、套管跟进→排渣清孔→水位测量、数据记录→钢管循环顶进→加管焊接→放置钢筋笼→注浆→封孔^[8]。

3 浅埋黄土隧道超前管棚加固数值模拟

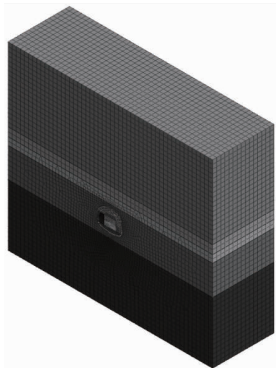
3.1 隧道及支护结构模型的建立

模型的建立以隧道地勘报告为基础,选择出口浅埋段 ZK82+900 断面作为数值模拟的研究对象。

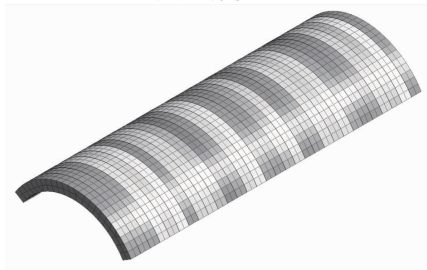
研究段隧道埋深为 20~50 m, 地下水位分布在隧道上方 10 m 范围内。模型上部尺寸取值为实际埋深 46.5 m, 下边界距离隧道拱底 32.5 m, 左右边界距隧道中心轴线各 50 m。隧道纵向长度的选择主要取决于监测断面的初期支护是否形成闭环, 按照施工步距, 在模型中设置纵向距离为 30 m。则整个模型的尺寸为 100 m × 30 m × 62.5 m 的箱形实体, 如图 6 所示。



(a)模型正视图



(b)整体模型



(c)管棚加固区单元

图 6 数值模拟计算单元模型图

超前管棚在模拟计算中的实现可使用提高围岩岩性参数的办法, 对于超前小导管采用植入式桁架进行模拟。地层均采用实体单元进行模拟, 围岩则采用摩尔-库伦本构模型。其他边界条件相同, 不同支护结构的模型如图 7、图 8 所示。

3.1.1 模型计算参数的确定

(1)地层参数

根据《公路隧道设计规范-第一册-土建工程》(JTG 3370.1-2018)^[9]中有关地质勘测的要求, 综合确定了模型地层的相关物理力学参数。隧道位于软

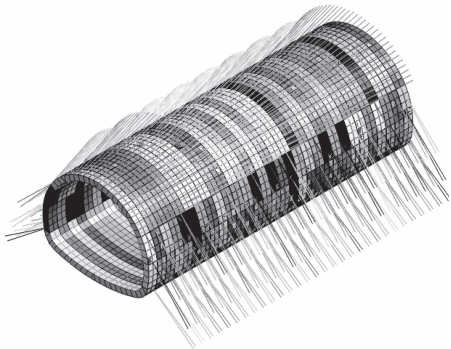


图 7 超前小导管支护模型

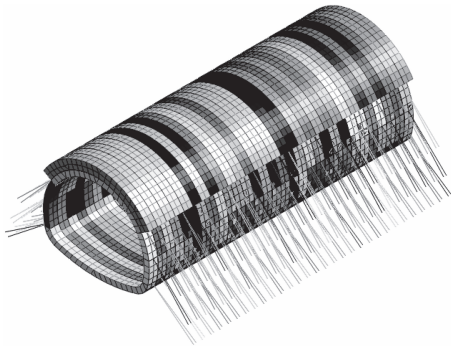


图 8 超前管棚支护模型

塑、风积黄土夹层中, 具体各材料的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 隧道区域围岩物理力学参数

	弹性模量 /MPa	重度 / (kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	渗透系数 / (10 ⁻⁷ m·s ⁻¹)	单元类型
风积黄土	52.3	17.1	0.35	26.7	25.8	6.60	实体单元
软塑黄土	40.3	20	0.36	16	24	1.127	
冲积黄土	48.8	20	0.35	25.4	23.8	1.95	

(2)支护参数

根据《公路隧道设计细则》(TG/TD70—2010)^[10]的规定对隧道初期支护与二次衬砌的力学参数进行合理折算, 得到如表 2 所示的数据。相关设计参数依据Ⅵ级围岩衬砌断面图设计值来取, 其中管棚注浆区的岩性参数如表 2 所示。

表 2 支护结构物理力学参数

支护结构	弹性模量 /GPa	重度 / (kN·m ⁻³)	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	渗透系数 / (m·s ⁻¹)
管棚加固区	1.34	23	0.25	200	45	1.32 × 10 ⁻⁸
初期支护 (喷混 C25)	26	22	0.2	—	—	—
二次衬砌 (筑模 C30)	30	25	0.2	—	—	—
钢拱架 (I25a)	210	78.5	0.2	—	—	—
超前管棚 (108 × 6 mm)	210	50.6	0.25	—	—	—

3.1.2 边界条件及基本假定

整个地层模型的位移边界条件为:底面竖向位移为零;两侧水平向位移为零,竖向自由;地表面为自由边界条件。渗流边界条件为:整个模型只考虑重力下的渗流问题,在自重应力平衡时,所有边界均不透水;随着隧道的开挖,工作面随开挖里程逐渐外露,此时设置衬砌内边界及开挖面各单元为孔隙水压力为零的边界,其余边界均不排水。

模型计算时的基本假设为:初始应力场仅考虑自重应力,土体模型为摩尔-库伦本构模型,衬砌采用弹性本构模型,渗流遵循达西定律,各结构均质、连续、各向同性,隧道未开挖时孔隙水压恒定^[11]。

3.2 浅埋黄土隧道围岩加固支护效果分析

对于软弱围岩渗流地段的浅埋黄土隧道,为了避免过大的沉降变形,通常会依据不同的地质条件进行不同形式的加固措施。下文将通过采用不同的加固措施来研究这些措施对围岩变形的控制效果,分别建立了超前管棚支护、超前小导管支护、超前管棚+超前小导管支护的计算模型,进行对比分析,最后得出不同支护结构对于围岩变形的控制效果,继而确定最佳的加固支护工法。

3.2.1 不同支护措施下的位移分析

如图9所示为数值模拟中无支护与管棚支护方式下的围岩位移云图,其他两种支护方式的下围岩位移分布规律与无支护类似,故未给出图片。

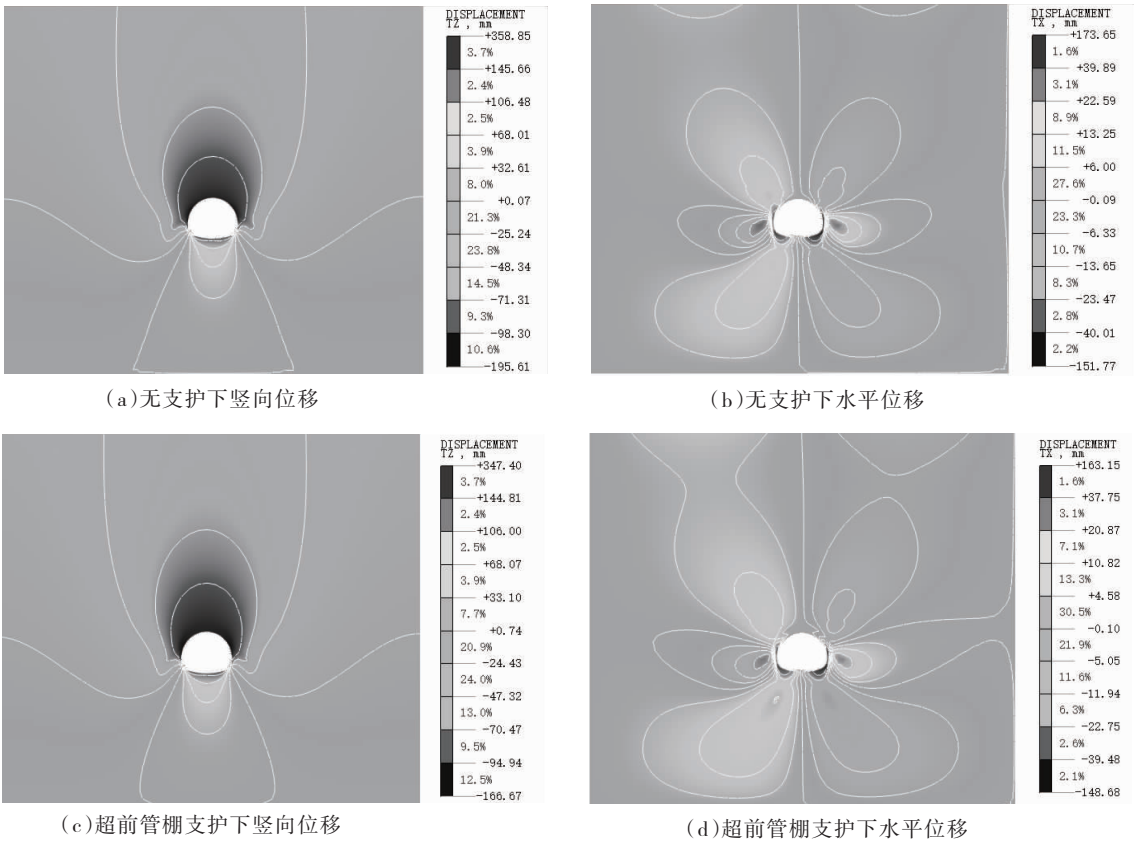


图9 不同支护结构下的围岩水平及竖向位移云图(单位:mm)

表3所示为数值模拟结果中不同支护结构下的竖向及水平收敛量值列表。

表3 不同支护结构下的竖向、水平收敛值

工况	拱顶竖向位移/mm	拱腰水平收敛/mm
未加固	-164.4	50.7
超前小导管支护	-162.1	50.2
超前管棚支护	-120.3	46.4
超前管棚+超前小导管支护	-118.2	46.8

结合表3中的数据可知:在Y=10 m断面处,未进行加固时拱顶最大竖向位移为164.4 mm;采用超前小导管支护的拱顶最大竖向位移为162.1 mm,相比未加固减小了1.4%;采用超前管棚支护的拱顶最大竖向位移为120.3 mm,减小了27.8%;采用超前管棚+超前小导管支护的拱顶最大竖向位移为118.2 mm,减小了28.1%。水平收敛值相比于未施作加固措施时,采用其它三种加固措施分别减小了0.9%、8.5%、8.7%。相比之下,超前小导管支护能减小位移的百分比最小(1.4%),这是因为超前小导管

本身管径较小($\psi=42\text{ mm}$),注浆压力较小,注浆扩散半径有限,加固土体范围也有限,且小导管的管体长度也远远不及超前管棚支护,拱效应、梁效应均不明显,故在单独使用的情况下加固效果不明显。超前管棚支护与超前管棚+超前小导管支护能减小的位移百分比(27.8%、28.1%)非常接近,但超前管棚支护能大大节省额外施作超前小导管的费用和时间,也能尽快地完成早封闭、早成环,有效地控制拱顶范围内的围岩变形,故可作为最佳加固支护工法。

3.2.2 超前管棚加固结构受力分析

对开挖完成后的管棚加固区以及支护结构的受力,对未加固时与超前管棚支护条件下的模拟结果进行比较分析,得出有加固措施下支护结构内力的变化。

(1) 加固区

由于管棚加固仅针对隧道拱部附近的围岩,故下文侧重对该区域围岩的受力情况进行分析。管棚加固区在无支护和有管棚支护的竖向应力云图(拉正压负)如图 10 所示,由图可知:在超前管棚支护下,加固区的竖向应力增大,且在加固区上方出现拉应力,量值仅 52.4 kPa。分析原因为超前管棚支护的作用使得加固区围岩的力学性能得到提升,塑性区的扩展得以抑制。隧道开挖后,应力重分布得到了控制,开挖区范围内的围岩强度和稳定性均较好,围岩自身能承载大部分的初始地应力^[12]。

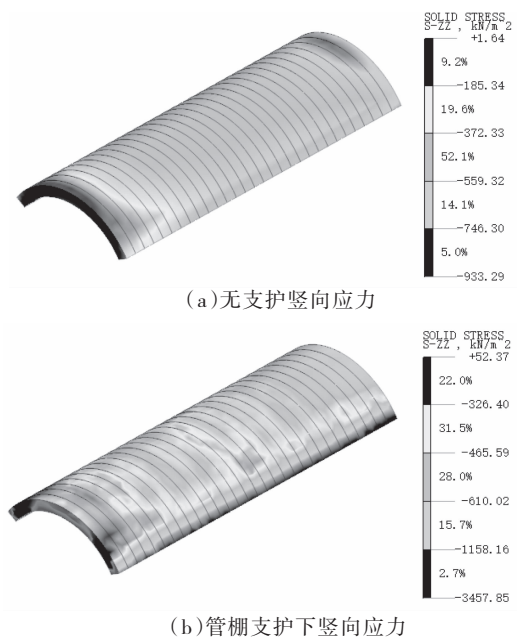


图 10 加固区应力云图(单位: kN/m²)

(2) 支护结构受力

在隧道开挖完成后,通过对管棚支护结构下初期支护与二次衬砌的模拟结果与无支护的结果进行对比

分析,得到不同支护措施下的内力云图如图 11 所示。

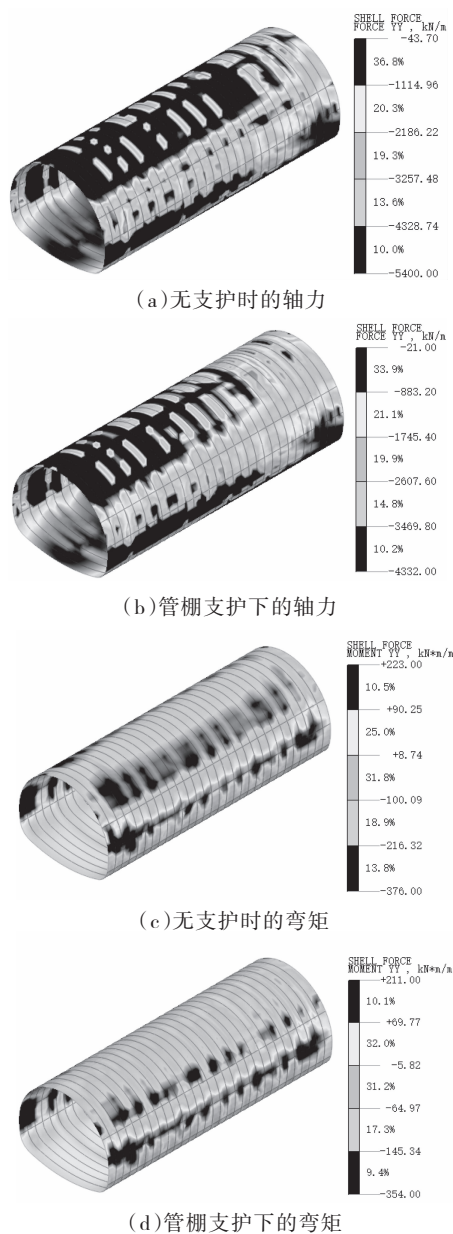


图 11 不同支护措施下的初期支护内力云图(单位: kN·m)

由图 11 可知:初期支护的内力在未采用加固措施时与采用超前管棚加固措施下的分布范围基本一致,轴力主要分布在边墙两侧,量值较大,拱顶、拱腰的则较小。弯矩在拱肩与拱腰处最大。经比较发现,在超前管棚加固作用下支护结构的受力明显减小,其中轴力最大值减小了 19.8%,拱肩处弯矩减小了 5.9%,拱腰处弯矩减小了 5.4%。由此可见,管棚加固区的存在,大大提高了围岩的自稳能力,使得传递到支护结构的围岩压力减小,提高了初期支护的安全性^[13]。

4 现场监测数据分析

对在 ZK82+900 监测断面处采用不同支护措施

下拱顶和拱腰的监测数据进行整理,得到各支护措施下围岩的变形随时间变化的竖向位移时态曲线,如图12所示。

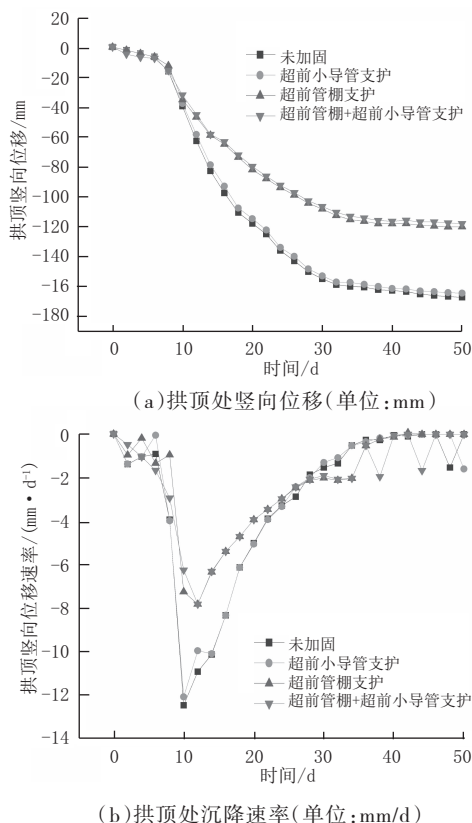


图12 不同支护措施下拱顶竖向位移与变化速率

从图12可知:不同支护措施下围岩变形的总体趋势均与无支护时的相似,但在采用加固支护措施下,开挖后围岩拱顶的沉降变形得到了有效控制。当监测断面采用了超前管棚加固措施时,拱顶处沉降变形量减小了28.1%,拱腰处水平收敛量减小了7.6%。而仅施作超前小导管加固措施时,对围岩变形的控制效果则不太明显。另外,就超前管棚+超前小导管加固措施而言,相对于未加固时围岩的变形虽得到了明显控制,但与仅施作超前管棚支护的情况相比,其对围岩变形的控制优势不够明显,反而提高了施工成本和作业时间。结合上文的数值模拟结果,发现针对浅埋段黄土隧道,仅施作超前管棚支护就能够有效地控制拱顶范围内的沉降变形。

5 结 语

经过在通定高速公路某浅埋黄土隧道工程实例中对不同的加固支护方案进行对比分析,可得到超前管棚支护工法的优势如下。

(1)超前管棚加固作用下支护结构的受力明显减小。轴力最大值减小了19.8%,拱肩处弯矩减小了5.9%,拱腰处弯矩减小了5.4%。超前管棚加固区的存在,使得传递到支护结构上的围岩压力减小,提高了初期支护的安全性。

(2)超前管棚支护与超前管棚+超前小导管支护能减小的竖向位移百分比(27.8%、28.1%)非常接近,但能大大节省额外施作超前小导管的费用和时间,也能尽快地完成早封闭、早成环,有效地控制拱顶范围内的围岩变形。

(3)结合监控量测结果,发现超前管棚在渗流黄土地层中加固了洞室前方围岩,有效地控制了围岩的变形,拱顶处沉降变形量值减小了28.1%。可见超前管棚支护加固区的存在,明显提高了围岩的自承能力,故可作为最佳加固支护工法。

参考文献:

- [1] 杨东升.地表水入渗对浅埋大断面黄土隧道稳定性影响分析[D].陕西:西安工业大学,2018.
- [2] 宋战平.浅埋偏压隧道洞口段超超前大管棚支护效果分析[J].现代隧道技术,2022,59(6):86-95.
- [3] 张建.湿陷性黄土地区超小净距隧道超前支护研究[J].城市道桥与防洪,2020(6):308-310.
- [4] 张隽.砂质黄土隧道支护侵限段迈式管棚超前支护技术有效性分析[J].铁道建筑技术,2013(12):65-68.
- [5] 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司.通渭至定西高速公路工程两阶段施工图设计[Z].兰州:甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司,2018.
- [6] 蒋洪胜,侯学渊.软土地层中的圆形隧道载荷模式研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(4):651-658.
- [7] 钱文斐.某超大断面隧道结构设计关键技术[J].城市道桥与防洪,2019(8):295-298,34.
- [8] 黄继新.兰州市北环路九安隧道大跨径隧道的设计与实践[J].城市道桥与防洪,2019(12):192-194.
- [9] JTG 3370.1—2018,公路隧道设计规范—第一册—土建工程[S].
- [10] JTG/T D70—2010,公路隧道设计细则[S].
- [11] 师凯强.水分运移下黄土隧道浅埋段围岩及支护结构力学效应研究[D].兰州:兰州交通大学,2022.
- [12] 徐新芳,金成.大管棚在黄土隧道塌方处理中的应用及效果分析[J].公路,2016(12):284-290.