

文章编号:1673-9469(2022)02-0080-06

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.02.012

微桩锁脚台阶法在浅埋大跨小净距隧道中的应用研究

刘立宏,赵晓勇*

(中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043)

摘要: 针对浅埋大跨小净距隧道施工步骤复杂,施工进度慢的问题,提出采用微桩锁脚台阶法进行浅埋大跨小净距隧道施工。分析了微桩锁脚台阶法力学作用机制,微桩模型可较好地进行台阶强锁脚,有效地发挥锁脚的支撑潜力,扩大台阶法的应用范围,结合龙池东路隧道对比分析了CD法和“微桩锁脚台阶法”的应用效果,表明微桩锁脚台阶法可达到等同于CD法的施工效果,采用理论分析和工程现场监控量测进一步对结果进行对比分析,表明微桩锁脚台阶法实际应用效果良好。结果可为浅埋大跨小净距隧道施工提供新思路。

关键词: 浅埋隧道;锁脚微桩;力学机制;净距隧道

中图分类号: TU444

文献标识码: A

Application of Step Method of Micro-pile Locking Foot in Shallow Buried Large Span and Small Clear Distance Tunnel

LIU Lihong, ZHAO Xiaoyong*

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an, Shanxi 710043, China)

Abstract: The construction process of shallow buried large span and small clear distance tunnel is complex and the construction progress is slow. The step method of micro-pile locking foot was proposed for the construction of shallow buried large-span and small clear distance tunnels, and the mechanical action mechanism of the step method of micro-pile locking foot was analyzed. The micro pile model can be better applied to the mechanical analysis of the strong lock foot, effectively play the support potential of the foot lock, and expand the application scope of the bench method. The step method of micro-pile locking foot can achieve the construction effect equivalent to CD method. The results of theoretical analysis and engineering field monitoring measurement were further compared and analyzed, which showed that the practical application effect of step method of micro-pile locking foot was good. The results can provide a new idea for the construction of shallow buried large span and small clear distance tunnels.

Key words: shallow tunnel; micro-pile locking foot; mechanical mechanism; closely spaced tunnels

随着隧道建设技术的发展和交通运行需求的提高,单洞三车道乃至四车道隧道逐渐增多,隧道开挖断面的跨度不断增大,在场地条件限制下,有时还会面临隧道埋深浅和小净距等不利情况,为隧道安全施工带来新的挑战。随着开挖断面跨度增大,矢跨比减小,围岩的应力情况将变得更加复杂,结构受力也更加不利,直接影响到支护结构的安全稳定。因此针对浅埋大跨度隧道,选择合适

的开挖方式尤为重要^[1-2]。隧道分部开挖法(CRD法、CD法、双侧壁导坑法)可通过化大为小,减小每次开挖跨度,保证结构安全,但该类工法施工工序多、施工作业面小、临时支护措施多,施工进度较为缓慢。台阶法可克服上述缺点,但对浅埋大断面小净距隧道施工一般难以单独使用,需要采取必要的辅助措施。目前已开展了相关研究,朱苦竹等针对浅埋软岩大跨度隧道开挖的几种工法

收稿日期:2021-11-01

基金项目:陕西省重点研发计划(2022SF-198)

作者简介:刘立宏(1990-),男,陕西西安人,硕士,工程师,从事隧道与地下工程设计研究工作。

* 通讯作者:赵晓勇(1982-),男,陕西西安人,硕士,正高级工程师,从事隧道与地下工程设计研究工作。

进行了数值模拟分析^[3],推荐应用双侧壁导坑法;张聚文、傅鹤林对浅埋偏压小净距大跨度隧道开挖工法进行了数值分析^[4],探究了不同围岩条件下的工法适用性。胡志强对软弱围岩隧道应用中管棚锁脚施工技术进行了介绍^[5];陶虎、于品清对黄土地区隧道锁脚锚管的长度及角度选取进行了数值模拟分析^[6];杨志刚等通过数值模拟进行了锁脚锚管的倾角优化研究^[7];伍毅敏等通过数值模拟对锁脚钢管在不同围岩、长度、直径等方面的特性进行了建模分析,研究主要针对钢管的受力特性进行分析^[8]。既有的工程研究及应用,主要针对于锁脚锚管的长度、角度等方面的探讨优化^[9-13],受力分析也仅侧重于针对钢管本身通过杆体模型进行分析,有一定局限性,未能完全发掘出强锁脚的支撑潜力。

以往工程大多是在每一层台阶拱脚处施做锁脚锚杆,以控制初期支护变形,但在大跨度破碎围岩浅埋隧道中,锁脚锚杆并不能有效地发挥锁固效应。鉴于此,本文依托龙池东路隧道,提出采用微桩锁脚台阶法进行施工,以大角度微型桩的理念进行台阶锁脚,最大化发挥强锁脚的能力,限制支护结构的变形,使得台阶法可有效的扩大应用范围,提高施工机械化水平,对于浅埋大跨小净距隧道设计及施工具有积极意义。

1 微桩锁脚台阶法

1.1 支护型式

台阶法有效实施的关键在于控制围岩及支护结构变形。以往台阶法与锁脚锚杆相结合来控制变形,该工法多应用于IV级以下围岩,且开挖断面跨度相对较小,在大跨度浅埋破碎围岩中应用效果一般。而导致该工法无法有效应用的关键制约因素是台阶法施工时无法有效地稳固拱脚,导致整体变形太大,进而危及到结构安全。跨度的增大,围岩的弱化,使得锁脚锚杆的效力已经无法满足设计使用要求。

微桩锁脚台阶法是在每个台阶拱脚处斜向外侧施打钢管并注浆形成钢管桩,通过与钢架有效连接从而保证初支结构稳定。通过螺栓将钢板牢固连接在钢架内外侧翼缘上,钢板中部开孔并焊接内侧车丝的较大直径钢套筒,钻机通过钢套筒导向,进行锁脚微桩打孔,清孔后,将钢管通过钢套筒置入钻孔,钢管须全身设置注浆孔,钢管端部外侧车丝,并与钢套筒有效焊接,然后加压注浆充

满钻孔及钢管,充填密实周边岩体,形成钢管桩。注浆时应保证有效的扩散半径和砂浆强度,待形成强度后再进行开挖下部。当初支结构将荷载传递到锁脚微桩时,桩身发生变形,桩端与钢套筒发生相对变形,端头范围的内外部车丝相互咬合,变形越发展,连接越紧密,微桩的自锁效应越显著,以保证初支结构与锁脚微桩的有效连接,见图1。

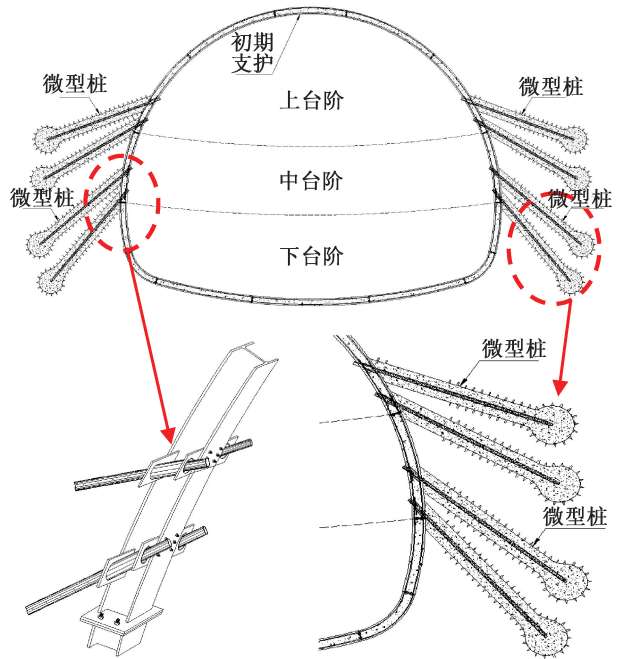


图1 微桩锁脚台阶法示意图

Fig. 1 The diagram of step method of micro-pile locking foot

1.2 力学作用机制

针对稳固拱脚的加强,以往工程采用锁脚锚管(杆)来增加锁脚强度,使得结构变形得以有效控制。以往锁脚锚管(杆)直径较小,钻孔孔径比锚管稍大,主要靠自身钢管结构来承受荷载,其长细比较大,整体受力模式为纯杆体式受力,较为单薄,受压、受弯、受剪承载力相对较小,不强调注浆扩散半径要求,对周边围岩加固效果相对较弱。当锚管长度较短,围岩塑性区较大时,将整体发生位移变形,不能有效锁脚。这种锁脚形式未能完全发掘出强锁脚的支撑潜力,进而制约了台阶法的进一步发展。

锁脚微桩整体直径更大,长细比较小,自身刚度更强,受力模式为钢管桩的形式,相当于在钻孔内插入钢管,辅以注浆,形成钢管混凝土桩效应。微桩承载力由钢管及注浆桩体共同发挥,其受压受弯受剪承载能力可得到极大地提高。同时对注浆扩散半径提出了控制要求,确保注浆后的围岩达到一定强度,对周边围岩的加固效果更加显著。

桩体可有效地抵抗围岩塑性区的扩展,保证初支结构的稳定。

在上台阶开挖后,初支结构坐落在基岩上,结构整体保持稳定,随着下台阶的开挖,两侧拱脚逐渐临空,初支结构不再稳定,而在拱脚部位施做锁脚微桩,将上台阶初支结构牢牢固定,初支结构就承担了上台阶开挖后的全部围岩松弛荷载,形成一个稳定的两铰拱结构^[10],如图2(a),荷载通过拱形结构传递到拱脚的锁脚微桩,使得上台阶初支结构在下台阶开挖时依然保持稳定。假设均布荷载为 q ,拱的跨度为 l ,高度为 f 。建立如图2(b)坐标系,设拱轴上任一点与水平夹角为 θ ,初支拱对应的弧度角为 $2\varphi_0$,半径为 r ,拱轴上任一点切线倾角为 φ ,则初支拱轴上任一点的坐标为 $(r\cos\theta, r\sin\theta)$ 。

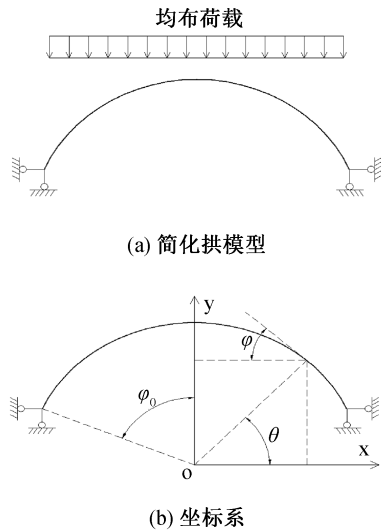


图2 拱形结构

Fig. 2 The diagram of arch construction

可得拱轴上各点的弯矩 M 、轴力 N 、剪力 Q 值:

$$\begin{cases} M = M^0 - x_1 y \\ N = Q^0 \sin\varphi + x_1 \cos\varphi \\ Q = Q^0 \cos\varphi - x_1 \sin\varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中: M^0 、 Q^0 为相应简支梁的弯矩与剪力, x_1 为水平力, y 为截面竖坐标值。下断面开挖后,上部荷载通过初支结构传递到拱脚,进而传递到锁脚微桩处。可得拱脚的弯矩 M_j 、轴力 N_j 、剪力 Q_j 值:

$$\begin{cases} M_j = 0 \\ N_j = -qr\cos(\pi/2 - \varphi_0)\sin\varphi_0 + x_1\cos\varphi_0 \\ Q_j = -qr\cos(\pi/2 - \varphi_0)\cos\varphi_0 - x_1\sin\varphi_0 \end{cases} \quad (2)$$

设锁脚微桩与水平夹角为 α ,轴力 N_j 与水平夹角为 β 。锁脚微桩端头处荷载即为拱脚处荷载,

通过坐标转换,将拱脚处荷载 N_j 、 Q_j 转换为沿着桩身方向 N^1 的和垂直向 Q^1 ,可得:

$$\begin{cases} N^1 = Q_j \sin(\beta - \alpha) - N_j \cos(\beta - \alpha) \\ Q^1 = N_j \sin(\beta - \alpha) + Q_j \cos(\beta - \alpha) \end{cases} \quad (3)$$

然后对锁脚按照微桩进行受力情况分析。微桩受到剪力 Q^1 和弯矩 M_j 作用时,可按照桩的受弯承载力进行分析;微桩受到轴力 N^1 作用时,可按照桩的轴向极限承载力进行分析。为保证锁脚微桩可以有效地发挥强锁脚效应,桩体强度应足够大,在受到轴力及剪力的情况下,按照《建筑桩基技术规范》《混凝土结构设计规范》中关于承载力的规定判断,单根桩的极限承载力 N_{\max} 主要由轴向极限承载力控制:

$$N_{\max} = \pi DLq_{\text{sik}} + q_{\text{pk}} \pi (D/2)^2 \quad (4)$$

式中: D 为微桩钻孔直径, L 为微桩长度, q_{sik} 为桩侧极限侧阻力, q_{pk} 为桩端极限阻力。

实际施工后,微桩根部因为注浆而形成一个直径超过桩径的不规则体,其端承效应将更加明显,桩身为不规则凹凸体,侧摩阻力更大。

那么,锁脚微桩受力即为 N^1 与总 N_{\max} 的比较。当 $N^1 < \text{总} N_{\max}$ 时,桩体稳定,侧摩阻力及端承阻力共同抵抗初支结构传递来的荷载,从而保证整个初支结构的整体稳定性。当 $N^1 > \text{总} N_{\max}$ 时,桩体失稳破坏,即锁脚构造无法提供足够的抗力来抵抗初支结构传递的荷载,从而导致初支结构的整体失稳变形,这种情况的发生主要有三种情况:一种是荷载足够大,超过了微桩的极限承载力;一种是微桩自身结构较弱;另一种是桩身在围岩塑性区内,随着围岩共同变形。这些情况均需要加强微桩强度,增大桩径或桩长,保证承载力要求。

1.3 应用范围

对于中小跨度隧道,围岩为裂隙较发育的破碎硬质岩体时,通过锁脚锚杆(管)可以起到较好的支护效果。

对于极破碎围岩、软质岩体、土体中的浅埋大跨隧道,由于支护结构整体承受荷载较大,拱脚围岩受力后塑性区范围较广,整体变形随之扩展,对支护结构的稳定性要求更高,采用微桩的支护效果更加显著。

2 微桩锁脚台阶法数值分析

2.1 工程概况

结合苏州何山路西延工程项目龙池东路隧道

进行分析。龙池东路隧道横断面为双向六车道,隧道Ⅳ级围岩占比 74%,Ⅴ级围岩占比 26%,周边受到制约因素较多,左右线净距 6 m,隧道长约 130 m,洞顶最大埋深约 16 m。隧道进出口段洞身表层围岩以黏土、粉质黏土为主,纵向长度约为 20~50 m;向洞内延伸至全强风化花岗岩为主,节理裂隙发育,岩质较硬。隧道属于超浅埋超小净距大跨度破碎围岩短隧道。

龙池东路隧道开挖宽度 15.7 m,开挖高度 11.5 m。原设计采用 CD 法,中隔壁临时支撑采用 I22b 工字钢,挂网喷砼 25 cm,并在中隔壁拱顶处设置 7 根 4 m 长 \varnothing 42 超前注浆小导管,每侧分台阶开挖,每台阶拱脚设置 2 根 3.5 m 长 \varnothing 42 锁脚锚管。调整为三台阶开挖后,在上台阶、中台阶每处拱脚设置 4 根 4.5 m 长 \varnothing 76@5 管桩,水泥浆水灰比 $W/C=1:1$,水泥采用 42.5 级普通硅酸盐水泥,建议注浆压力不小于 1.5 MPa。要求注浆扩散半径不小于 15 cm,管桩水泥砂浆抗压强度不小于 M15。套筒为 \varnothing 108@6 钢管,钻孔直径采用 90 mm。微桩与竖直线夹角采用 $30^\circ\sim 60^\circ$,方便机械打设。

2.2 数值模型

采用 Midas GTS NX 软件通过地层结构法分别对 CD 法与微桩锁脚台阶法进行数值模拟分析。岩土体采用修正的摩尔库伦弹塑性本构模型,隧道初期支护、临时支护采用梁单元,系统锚杆采用植入式桁架,锁脚微桩采用梁单元。

大多情况下,数值建模分析时采用植入式桁架来模拟锚杆(管),模拟杆体受力,其受力特性以抗拉压为主;而锁脚微桩的桩效应较为明显,采用梁单元进行模拟分析,可有效反映出桩体效应,较好地模拟出微桩良好的抗压、抗剪、抗弯特性。

边界条件:模型两侧施加水平位移约束;模型底部施加竖向位移约束。根据工程经验及圣维南原理,模型竖向顶部取至地面,底部取至隧道以下 3~5 倍隧道高度处,隧道水平两侧各取 3~5 倍隧道宽度。选取 NK2+110 附近断面,最终建立的有限元模型如图 3 所示。

2.3 参数选取

由地质纵断面知,Ⅳ级围岩所对应的地表全强风化的花岗岩厚度约为 1 m,下部为中风化的花岗岩,岩体节理裂隙发育,较为破碎,为简化计算,可全部看作是Ⅳ级围岩。结合地勘报告,同时参

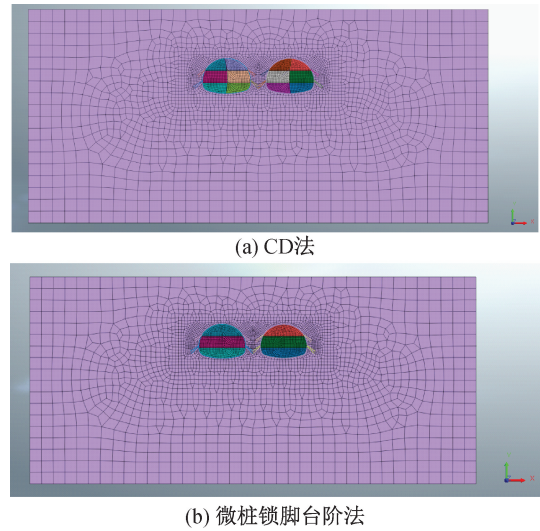


图 3 数值模型

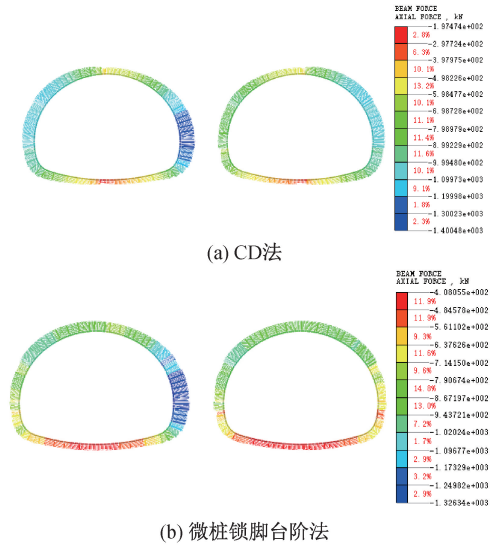


图 4 初期支护轴力图(单位:kN)

Fig. 4 The axial diagram of initial support

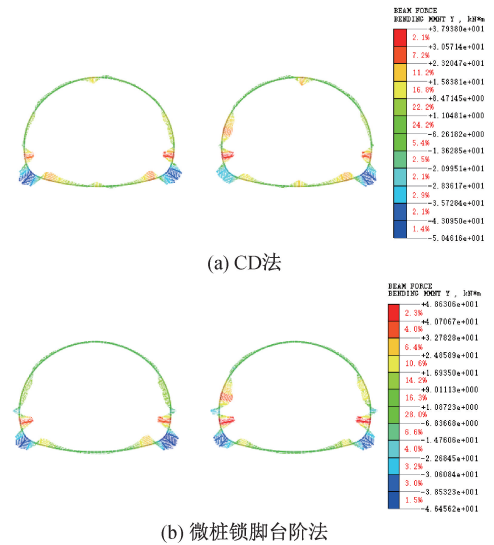


图 5 初期支护弯矩图(单位:kN·m)

Fig. 5 The moment diagram of initial support

考《公路隧道设计规范第一册 土建工程》和《公路隧道设计细则》,围岩的计算参数及衬砌结构参数见表1和表2所示。

表1 围岩计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of surrounding rock

岩性	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	粘聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν
强风化花岗岩	23.0	0.05	25	1.0	0.35
中等风化花岗岩	24.0	0.10	30	2.0	0.30

表2 结构计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of structure

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	抗压强度 R_a/MPa	抗弯强度 R_w/MPa	抗拉强度 R_l/MPa
C25	23.0	0.2	23	19.0	23.8	2.0

2.4 数值结果

通过数值模拟计算,可以得到CD法和微桩锁脚台阶法施工时的初期支护轴力图、初期支护弯矩图、隧道围岩竖向位移图、锁脚轴力图、锁脚微桩弯矩图,见图4—图8。

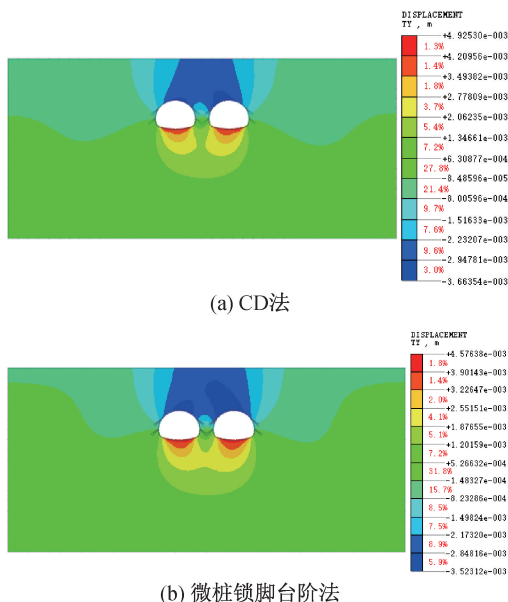


图6 隧道围岩竖向位移(单位:mm)

Fig. 6 The vertical displacement of tunnel surrounding rock

对计算结果进行整理分析,汇总结果如表3所示。

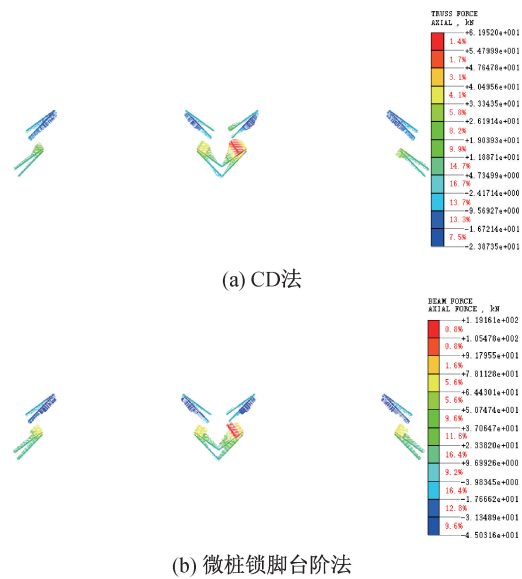


图7 锁脚轴力图(单位:kN)

Fig. 7 The axis diagram of locking foot

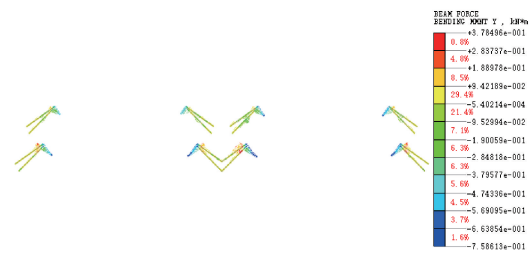


图8 微桩锁脚台阶法锁脚微桩弯矩图(单位:kN·m)

Fig. 8 The moment diagram of step method of micro-pile locking foot

表3 模拟分析结果汇总表

Tab. 3 Summary of simulation results

工法	初支轴力/kN	初支弯矩/(kN·m)	初支剪力/kN	水平收敛/mm	拱顶沉降/mm	仰拱隆起/mm
CD法	1 378.17	50.30	99.66	4.25	3.66	4.92
台阶法	1 326.34	48.63	123.69	3.28	3.52	4.57

由建模分析计算结果可知,初期支护最大轴力位于拱腰及中夹岩侧墙处,最大弯矩分布在拱脚处,最大剪力位于侧墙处,两种工法计算的应力分布趋势及数值大小均比较接近。两种工法的结构变形趋势及量值也基本接近,采用微桩的台阶法变形整体较CD法稍小。初期支护强度安全系数及变形量均满足要求。建模计算的锁脚微桩弯矩极小,主要集中在微桩端部范围,可忽略不计,微桩轴力最大为119.16 kN,小于计算承载力,微桩受力整体较小。

3 工程应用对比分析

3.1 理论分析

模拟断面位于 IV 级浅埋破碎围岩段落,隧道断面全部开挖跨度约 15.7 m,开挖高度 11.5 m,围岩重度取 $\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$,上台阶开挖跨度约 13.7 m,开挖高度约 3.9 m,拱部半径 8.13 m,断面覆土厚度约 16 m,锁脚微桩长度 4.5 m,钻孔直径 90 mm,其余相关计算参数取自地勘报告及《建筑桩基技术规范》。根据《公路隧道设计规范》中松散荷载理论计算出断面的均布荷载 $q = 250.8 \text{ kN/m}^2$,拱脚水平荷载 $e = 196.8 \text{ kN/m}^2$ 。根据本文公式(2),则拱脚处荷载 $N_j = 997.4 \text{ kN}$, $Q_j = 322.7 \text{ kN}$ 。根据本文公式(3),将拱脚处荷载 N_j 、 Q_j 转换为沿着桩身方向 $N^1 = -814 \text{ kN}$,垂直向 $Q^1 = 660 \text{ kN}$ 。根据本文公式(4),则单根桩的极限承载力 $N_{\max} = 216.1 \text{ kN}$,一处拱脚布设 4 根微桩,则拱脚微桩总的承载力 $N = 864.4 \text{ kN} > N^1 = -814 \text{ kN}$,微桩侧摩阻力及端承阻力可承受初支结构传递来的荷载,初支结构整体稳定。

3.2 监测分析

在龙池东路隧道采用微桩锁脚台阶法施工段落,选取计算断面附近的两个监测断面,NK2+095 与 NK2+115,监控量测测点布置情况如图 9 所示。将其变形监测数据做出时态曲线,如图 10—图 11 所示。通过监测数据的分析,施工开挖后,初支结构沉降及收敛均经过快速变形-缓慢变形-趋于稳定这三个阶段,NK2+095 断面拱顶沉降基本维持在 4 mm 左右,水平收敛基本维持在 3 mm 左右;NK2+115 断面拱顶沉降基本维持在 4.5 mm 左右,水平收敛基本维持在 3 mm 左右,均满足要求。

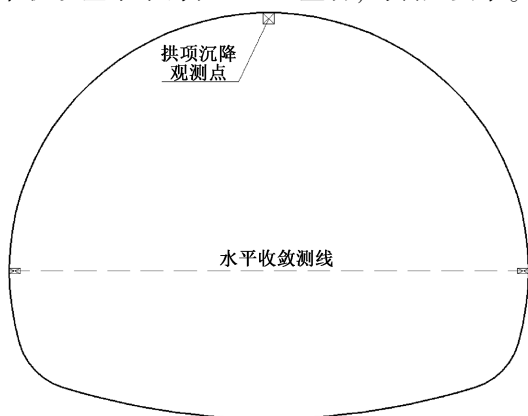


图 9 监控量测测点布置图

Fig. 9 Layout diagram of monitoring measuring points

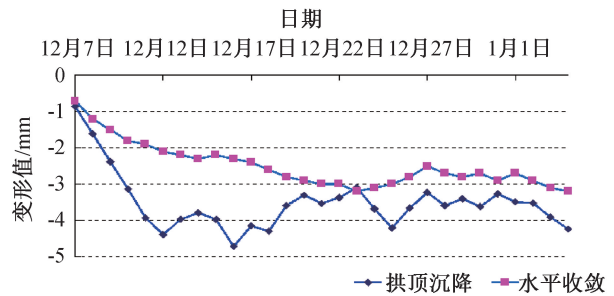


图 10 NK2+095 监控量测时态曲线

Fig. 10 NK2+095 monitoring measurement temporal curve

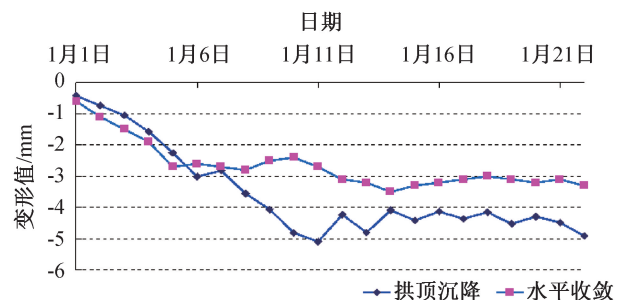


图 11 NK2+115 监控量测时态曲线

Fig. 11 NK2+115 monitoring measurement temporal curve

在开挖过程中,由于爆破的扰动,节理裂隙的存在,施工机械影响,地下水等影响因素,实测的数据偏大一点;而在数值模拟过程中,对于这些因素都无法准确地模拟表达,只是简单的将围岩视为理想的弹塑性体,忽略掉了其他的影响因素,因而模拟结果偏小于实测数值。实际监控变形值与模拟计算结果比较吻合,数量级相同,两者趋势一致,现场微桩锁脚台阶法施工效果良好。

4 结论

1) 简述了微桩锁脚台阶法的设计原理,在大跨度小净距超浅埋破碎围岩隧道中应用,可以减少临时支护措施,减少对围岩扰动次数,增大作业空间,提高施工机械化效率,缩短工期。

2) 在极破碎围岩、软质岩体、土体中的浅埋大跨度隧道,采用微桩锁脚的支护效果更为显著。

3) 对锁脚微桩受力机理进行理论分析,桩体受力较以往杆体受力,承载力得到大幅提升,保证了初支结构稳定。

4) 通过数值模拟、理论分析和现场监控量测对工程应用进行了对比分析,结果表明微桩锁脚台阶法应用效果良好,效益明显。

(下转第 99 页)

为精准、圈定范围更为可靠。

3 结论

1)通过河北省平原区内两类(工业固废填埋物、生活垃圾填埋场渗漏)不同场地的实际探测效果,总结出“高密度电阻率法+激电测深+时谱激电参数”的组合方法,该组合方法探测结果是切实有效的,多方法、多参数之间得到了相互印证。

2)利用电阻率、极化率以及时谱激电参数 τ 和 c ,有效圈定了污染物的范围及埋深,揭示了不同污染物/填埋物的电性识别特征;与电阻率和极化率参数相比发现:时谱激电参数所推断的埋深更为精准、所圈定的范围更为可靠。

参考文献:

- [1] ARISTODEMOU E, THOMAS-BETTS A. DC Resistivity and Induced Polarisation Investigations at a Waste Disposal Site and Its Environments[J]. Journal of Applied Geophysics, 2000, 44(2-3): 275-302.
- [2] 程业勋, 刘海生, 章元. 城市垃圾污染的地球物理调查[J]. 工程地球物理学报, 2004(1): 26-30.
- [3] 刘海生, 侯胜利, 马万云, 等. 土壤与地下水污染的地球物理地球化学勘查[J]. 物探与化探, 2003, 27(4): 307-311.
- [4] 能昌信, 董路, 王琪, 等. 填埋场地电模型的电学特性[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 758-760.
- [5] 闫永利, 马晓冰, 袁国平, 等. 大地电磁法在阿苏卫填埋

场地下水污染检测的应用研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(6): 1863-1868.

- [6] 牛真茹, 李飞飞, 袁霆, 等. 高密度电法与钻探法点面结合综合探查场地填埋层空间分布特征[J]. 河北工程大学学报:自然科学版, 2021, 38(2): 79-86.
- [7] 尉斌, 闫永利, 马晓冰, 等. 应用 EIS 观测技术圈定垃圾填埋区范围[J]. 物探与化探, 2012, 36(5): 861-864.
- [8] 李永涛, 金琳, 郑军, 等. 基于地球物理方法的垃圾填埋场污染物检测与监测技术[C]//2016年中国环境科学学术年会论文集(第二卷). 北京:中国环境科学出版社, 2016: 1084-1090.
- [9] 刘兆平, 杨进, 罗余水. 地球物理方法对垃圾填埋场探测的有效性试验研究[J]. 地学前缘, 2010, 17(3): 250-258.
- [10] 李金铭. 地电场与电法勘探[M]. 北京:地质出版社, 2005.
- [11] 刘崧. 谱激电法[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1998.
- [12] 孟庆鑫, 胡祥云. 时间域谱激电法地-井观测响应数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 655-663.
- [13] GUPTASARMA D. Computation of the Time-Domain Response of a Polarizable Groud[J]. Geophysics, 1982, 47(11): 1574-1576.
- [14] 程业勋, 杨进. 环境地球物理学概论[M]. 北京:地质出版社, 2005.
- [15] 程业勋, 杨进, 赵章元. 环境地球物理学的现状与发展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1364-1369.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第85页)

参考文献:

- [1] 陈洁金, 高超, 晋婉晴, 等. 软弱地层大断面隧道三台阶七步法与临时仰拱法适应性分析的对比研究[J]. 工程力学, 2020, 37(S1): 180-186.
- [2] 向海辉, 冯红耀, 赵文强, 等. 软弱围岩隧道不同施工方法数值分析研究[J]. 公路, 2020, 65(5): 334-340.
- [3] 朱苦竹, 张书强, 庄瑞鸿. 浅埋软岩大跨度隧道开挖工法研究[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2018, 34(1): 66-73.
- [4] 张聚文, 傅鹤林. 浅埋偏压小间距大跨隧道开挖工法的数值分析[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 26-30.
- [5] 胡志强. 软弱围岩隧道中管棚锁脚台阶法施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2019(8): 89-92.
- [6] 陶虎, 于品清. 黄土地区隧道锁脚锚管作用机理分析研究[J]. 人民长江, 2011, 42(17): 47-50.

- [7] 杨志刚, 肖伯强, 陈培帅, 等. 隧道三台阶开挖锁脚锚管倾角优化研究[J]. 人民长江, 2017(16): 60-62+72.
- [8] 伍毅敏, 吕康成, 徐岳. 软弱地基隧道锁脚钢管管承载特性研究[J]. 岩土工程学报, 2009(12): 71-79.
- [9] 张涛. 软弱围岩隧道锁脚锚杆(管)支护特性研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
- [10] 罗彦斌, 陈建勋. 软弱围岩隧道锁脚锚杆受力特性及其力学计算模型[J]. 岩土工程学报, 2013(8): 46-52.
- [11] 陈建勋, 乔雄, 王梦恕. 黄土隧道锚杆受力与作用机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1690-1697.
- [12] 徐晨. 软弱围岩隧道中锁脚锚杆支护效果研究[D]. 西安:长安大学, 2010.
- [13] 黄明琦. 锁脚锚杆作用机理及其在厦门翔安隧道中的应用研究[J]. 铁道建筑技术, 2009(7): 86-89.

(责任编辑 周雪梅)