

冻胀状态下盾构隧道匝道非开挖连接最优曲线探究

韩 林

[上海城投公路投资(集团)有限公司,上海市 200335]

摘 要: 基于采用主线与匝道盾构间设置横向管幕与冻结法相结合,构筑新的结构来建造两者间分合流段。为了寻求较为合理的曲线连接,首先假定在无弯矩的理想状态下推导出相应的平衡方程,并考察在冻胀情况下判断出最优曲线的轨迹应为圆弧。最后依托上海市北横通道工程实际,选择上下匝道出主线的方案建立最优曲线方程,为结构整体受力分析打下基础。

关键词: 盾构隧道;非开挖;连接;管幕;冻结;最优曲线

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)04-0164-03

0 引言

为有效缓解地面道路交通拥堵的现状,建设地下道路工程已成为解决城市交通问题的必由之路。同时,必须按需设置符合区域交通需求和路网交通流向的出入口匝道,以沟通地面、地下交通,形成一个有机、高效的立体道路交通模式。但在繁华、拥挤的城市中,若采用全明挖法施工长距离或较长距离地下道路的困难将非常大,故而往往推荐采用盾构法来修建地下道路。

通过明挖工作井实现出入口匝道与主线的连接是目前工程中较常采用的方法,但其将对周边环境产生较大的影响。故而在盾构主线与盾构匝道之间设置横向管幕并冻结的方法,构筑新的曲线结构建造两者间的分合流段,为成功解决上述问题提供了全新的思路。

国内对于盾构隧道匝道非开挖连接管幕与冻结相结合的方法研究的不多,本文首先从采用何种方式的连接最优这一问题入手,因为其决定着钢管的布置数量与间距^[1-3]。这一问题得不到妥善解决,将无法实现匝道非开挖技术,故而本文将在这方面做些研究与探讨,并依托上海市北横通道工程,推导出适用于单管双层隧道出入口连接曲线方程。

1 盾构隧道匝道非开挖连接

首先在主线的盾构掘进完成之后,匝道盾构施工至分合流位置,利用顶管设备将钢管管节顶入土体

中。由于顶管所产生的沉降槽随后顶管的顶进由先偏向顶管的上方向两管中间偏移,两顶管间的土体出现较大的屈服,后顶顶管会在先顶顶管上产生一定的附加作用力,故而采用间隔顶进的方法减少后顶对先顶产生的影响。当管幕形成后安装冷冻装置,各单管间的空隙采用冻结的方法进行封闭止水,使土层降温并冻结成圈,当冻结壁达到设计厚度和温度后进行土体开挖和施作主体结构,最后解冻并进行跟踪融沉注浆。

该工法以顶进的钢管作为强大的支护体系,一方面确保地面不出现不可接受的沉降,保证支护体系下的土体安全开挖;另一方面通过施作一定厚度的冻土层保证管间的水土不流失,从而保证地面不出现大的沉降及开挖的安全^[4-6]。非开挖连接示意图1。

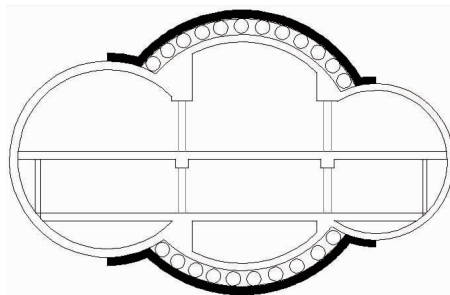


图1 非开挖连接示意图

2 冻胀状态下最优连接曲线

2.1 一般荷载作用

结构在一般荷载作用下,为了寻求相应合理的轴曲线,选取微段 d_s 作为研究对象进行分析。假定微段处于无弯矩状态并推导出相应的平衡方程。令曲率半径为 γ , N 为法向荷载, T 为切向荷载,见图2。

微段沿法向和切向的平衡方程分别为:

$$\sum F_n = 0 \quad Fd_\theta + Nd_s = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2022-10-21

作者简介: 韩林(1993—),男,博士,工程师,从事隧道及地下建筑工程施工管理工作。

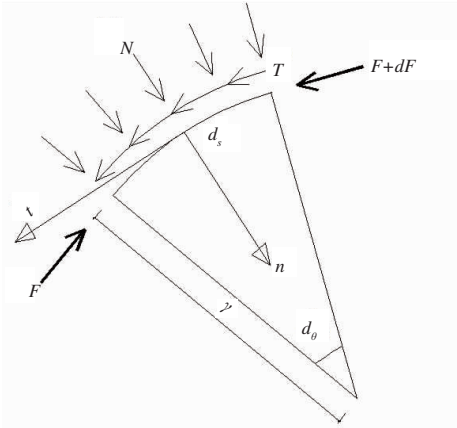


图 2 一般荷载作用下微段受力图

$$\sum F_t = 0 \quad dF + Td_s = 0 \tag{2}$$

由式(1)可得:

$$\frac{d\theta}{d_s} = \frac{N}{F} \tag{3}$$

根据曲率的定义:

$$\frac{d\theta}{d_s} = \frac{1}{\gamma} \tag{4}$$

结合式(3)和(4),可得:

$$\frac{F}{\gamma} = -N \tag{5}$$

由式(2)可得:

$$\frac{dF}{d_s} = -T \tag{6}$$

2.2 冻胀作用

冻胀是由于土温度降至冰点以下,土体原孔隙中的部分水结冰体积膨胀,以及更主要的是在土壤水势梯度作用下未冻区的水分向冻结缘迁移、聚集,并冻结膨胀所致^[7]。土体冻结将会给冻土圈周边的构筑物产生冻胀力的作用(见图 3)。冻胀力包括法向冻胀力(见图 4)、切向冻胀力。由于冻胀的过程实为孔隙水的运动、膨胀直至稳定,故而本文仅分析法向冻胀力对结构的影响。

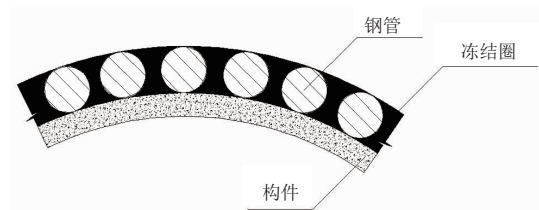


图 3 一般荷载作用下微段受力图

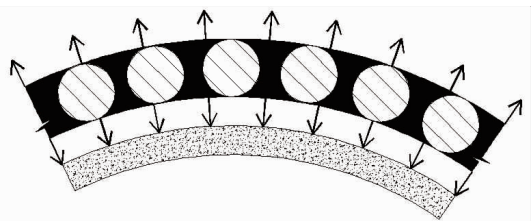


图 4 法向冻胀力

2.3 最优连接曲线

由于连接段结构上层土体自重所引起的切向分力与法向分力相比较小,而且冻结壁是在原状土中土体开挖前冻结形成,土体冻结产生冻胀力,使冻结壁内部产生预加应力。当内部土体开挖时,内部冻胀力释放,冻结壁与周围土体共同变形,土体开挖实质是冻结壁的卸载过程。本身该过程极为复杂,因此本文假定式(6)中 T 很小,主要考虑法向力的影响,基于该假定进一步认为 F 为常数。

由式(5)可得:

$$\gamma(s) = -\frac{F}{N(s)} \tag{7}$$

其中, $N(s)$ 主要包含两部分上部覆重法向的分力以及法向冻胀力,即为

$$N(s) = G_{\text{覆重}} \cos d_\theta + N_{dz}(s) \tag{8}$$

根据童长江^[8]等人的研究,得出法向冻胀力与作用面之间的关系为:

$$N_{dz}(s) = \beta A^{-\alpha} \tag{9}$$

式中: A 为作用面面积; α 、 β 为与土质、水分等有关的系数。

试验结果^[8]表明,作用面受冻结作用的法向冻胀应力随着作用面积的增大而减小,最终趋于一个有边界条件限制的稳定值,测得法向冻胀应力急剧转折点的的作用面积为 $400 \sim 1\,600 \text{ cm}^2$ 。而盾构隧道匝道拓宽段的面积至少有 100 m^2 , 远超试验所提供的转折面积,故而可认为 N_{dz} 为常数。

单就结构上部覆重而言,曲线顶部位置所承受的荷载最大,往两侧所承受的荷载逐渐减小,由于 d_θ 较小,认为作用面上的 $G_{\text{覆重}}$ 变化不大。

结合上述分析,可认为的曲率半径 $\gamma(s)$ 为一常数,即最优曲线为圆弧。

3 单管双层非开挖连接曲线推导

上海北横通道工程西起北虹路,东至内江路,贯穿上海中心城区北部区域,其中盾构段隧道主线采用直径为 15.56 m 的泥水气平衡盾构进行掘进施工,见图 5。隧道衬砌为单层通用环楔形管片错缝拼装,管片外径 15.0 m ,环宽 2.0 m ,厚度 0.65 m 。

根据北横通道作为背景,选择上下匝道出主线的方案见图 6,拟采用上述非开挖连接的方法,主线盾构管片外径 15.0 m ,匝道盾构管片外径 12.0 m 。为方便连接曲线方程的推导,将主线盾构圆心坐标定义为 $(0,0)$,建立直角坐标系。

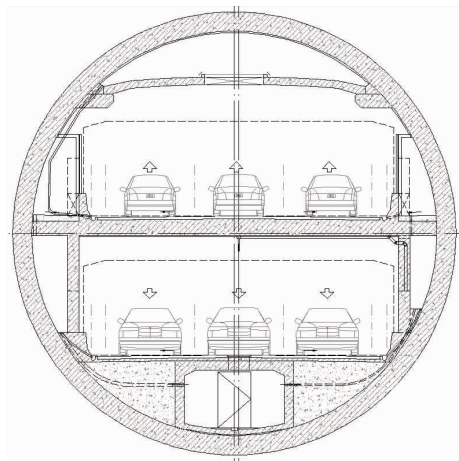


图5 盾构段标准横断面

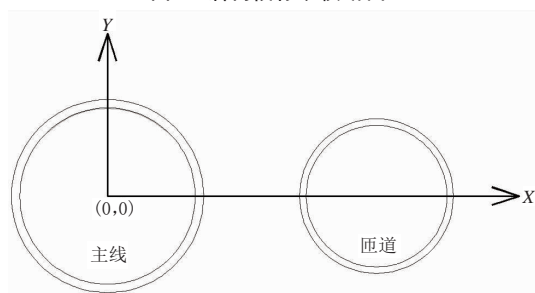


图6 建立直角坐标系

根据相关经验,如人民路隧道,盾构隧道区间段净距接近 $0.5D$ 时,两线之间的相互影响较为明显。因此,建议两者间距控制在 6 m 。上层匝道连接段考虑预留排烟风道、设备的空间,同时考虑下层匝道连接段空间预留,确定出 6 个关键控制点坐标,见图 7。

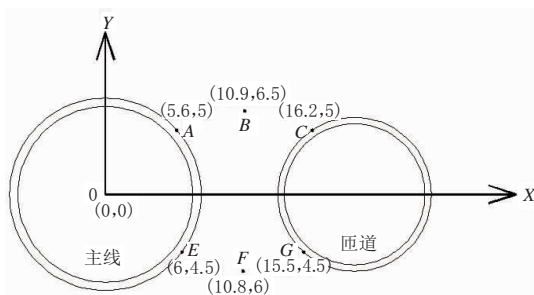


图7 关键控制点坐标(单位:m)

假设上层连接圆弧的圆心坐标为 $O_1(x, y)$, 根据距离 $O_1A=O_1B=O_1C$, 解得 O_1 坐标为 $x=10.9\text{ m}$, $y=-3.6\text{ m}$, 半径 $r=10.1\text{ m}$ 。故而上层圆弧方程为:

$$(x-10.9)^2+(y+3.6)^2=10.1^2(5.6\leq x\leq 16.2, y>0)$$

同理可得下层圆弧方程为:

$$(x-10.8)^2+(y-2.3)^2=8.3^2(6\leq x\leq 15.5, y<0)$$

4 结 论

本文通过采用主线盾构与匝道盾构间设置横向管幕与冻结法相结合的方法建造两者间分合流段。基于已有的冻结研究成果,本文详细分析了冻胀过程,假定理想状态下推导出相应的平衡方程,考察结构在冻胀状态下最优的曲线应为圆弧,并将这一结论应用于上海市北横通道实际工程中,进而推导出上、下匝道出主线连接最优方程。

本文研究成果可为建立大跨度地下空间连接结构模型,分析匝道口非开挖工法结构的受力,以及工程应用提供思路和方法。

参考文献:

- [1] 姚大钧,吴志宏,张郁慧.软弱粘土中管幕工法之设计与分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(S2):4999-5005.
- [2] 孙钧,虞兴福,孙昊,等.超大型“管幕-箱涵”顶进施工土体变形的分析与预测[J].岩土力学,2006,27(7):1021-1027.
- [3] 马保松,张雅春.曲线顶管技术及顶进力分析计算[J].岩土工程技术,2006(5):229-232.
- [4] 陈湘生,等.地层冻结工法理论与实践[M].北京:煤炭工业出版社,2007.
- [5] 周晓敏,苏立凡,贺长俊,等.北京地铁隧道水平冻结法施工[J].岩土工程学报,1999,21(3):63-66.
- [6] 杨平,余才高,董朝文,等.人工冻结法在南京地铁张府园车站的应用[J].岩土力学,2003,24(增2):388-391.
- [7] 齐吉琳,马巍.冻土的力学性质及研究现状[J].岩土力学,2010,31(1):133-143.
- [8] 童长江,俞崇云.论法向冻胀力与压板面积的关系[J].冰川冻土,1982,4(4):49-54.

(上接第 154 页)

间土挤密系数较大,基本消除了地基工后沉降且地基承载力提升效果显著。因此,灰土挤密桩在处理大厚度素填土地基时具有适用性强、处理效果明显、工期短等优点,可为今后大厚度素填土地基的处理提供借鉴。

参考文献:

- [1] 刘秋燕,吴道祥,蓝天鹏,等.灰土桩处理厚层淤泥质新填土地基的

效果分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2010,33(11):1694-1697,1706.

- [2] 胡建雄.湿陷性黄土路基灰土挤密桩的应用研究[J].节能,2019,38(10):53-54.
- [3] 陆召松,赵光红,万其伟,等.平凉湿陷性黄土地区灰土挤密桩的应用效果评价[J].土工基础,2019,33(4):407-410.
- [4] JGJ 79—2012,建筑地基处理技术规范[S].
- [5] GB 50202—2018,建筑地基基础工程施工质量验收标准[S].