

盾构隧道通缝拼装管片错台的理论分析

张强¹, 阳定涛²

(1.成都市市政工程设计研究院有限公司, 四川 成都 610000; 2.成都天府新区投资集团有限公司, 四川 成都 610000)

摘要: 随着盾构法隧道施工技术的发展和众多问题的解决, 管片错台引起的管片开裂、拼装困难和防水隐患等问题对施工和运营的影响日益凸显, 对工程质量有直接的影响。盾构隧道管片的错台主要归因于隧道管片间的差异位移。分析以上海轨道交通二号线西延段盾构隧道工程为背景, 在对隧道的不同类型的管片详细的受力分析的基础上, 运用达朗贝尔原理对管片的位移进行了理论分析。最后, 分析得出了不同类型管片的位移计算公式, 并推导得出了管片之间的错台公式。该公式描述了管片错台与管片受力、弹性密封垫性质等因素的一个定量关系, 为消除盾构隧道管片在推进过程中的错台, 确保施工精度, 提高工程质量提供了理论依据。

关键词: 盾构隧道; 管片; 错台; 达朗贝尔原理; 通缝拼装

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)08-0235-04

0 引言

盾构隧道拼装管片的错台一直是困扰盾构隧道施工和维护的技术问题, 且在较长一段时间内没有得到足够的重视。随着盾构法隧道施工技术的发展和技術标准的提高, 错台引起的管片开裂、拼装困难和防水隐患等问题对施工和运营的影响开始凸显出来。盾构隧道管片发生错台的因素很多, 如管片的顶力不均匀、制造尺寸有误、拼装不当、注浆不均及盾构姿态控制等^[1-3]。其中主要是在管片拼装后直接受到盾构千斤顶顶力的作用迫使其向后压缩弹性密封垫, 而由于全环的不均匀的顶力作用, 造成了密封垫的差异性压缩变形, 从而进一步造成了管片间的有差异的纵向位移, 即错台的发生。随着顶力的持续作用, 密封垫将继续被压缩直至压缩性能完全的发挥^[4], 在此过程中管片错台将继续发展累积下来, 最终造成了错台总量的增大。图1显示了施工现场的一个明显的管片错台情况。

本文紧密结合上海轨道交通二号线西延段盾构隧道工程, 在对隧道的不同类型的管片详细的受力分析的基础上, 运用达朗贝尔原理^[5]对管片的位移进行了理论分析。最后, 本文得出了不同类型管片的位移计算公式, 并进而推导得出了管片之间的错台公式。该公式描述了管片错台与管片受力、弹性密封垫性质等因素的一个定量关系, 为消除盾构隧道管片



图1 盾构施工中产生的错台

在推进过程中的错台, 确保施工精度, 提高工程质量提供依据。

1 工程概况及地质条件分析

1.1 工程概况

上海轨道交通2号线西延伸工程(VI标)包括出入段线区间盾构隧道(含一个旁通道和一个盾构工作井)、暗埋段和敞开段。本标段虹桥临空园站-北翟路工作井区间隧道工程, 入段线全长1 257.937 m, 出段线全长1 241.55 m。隧道最大覆土厚度约为15.5 m, 隧道水平曲线最小转弯半径为399.851 m, 最大纵坡为37‰。隧道外径为6 200 mm, 内径为5 500 mm, 衬砌为环宽1 200 mm的通缝管片, 环纵向均设有凹凸槽。管片采用通缝拼装, M30双头直螺栓联接; 环缝及纵缝间防水材料采用三元乙丙弹性密封垫。在施工过程中, 管片受到盾构机千斤顶的顶力作用向后压缩弹性密封垫并产生一定纵向位移。具有差异性的顶力

收稿日期: 2022-11-22

作者简介: 张强(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程设计研究工作。

势必造成弹性密封垫的压缩变形的不均匀,使得同环的管片产生的位移也不相同,它们之间发生相对的错动,从而形成了错台。错台同时也与其它诸如管片尺寸、拼装等因素有关,但是施工过程中的不均匀顶力因素占主导地位。

1.2 工程及水文地质条件

本区段隧道埋深中间深,两端浅,隧道顶板标高 $-1.361 \sim -11.129$ m。隧道所在场地地层分布较稳定,分层界限明显,土层起伏变化不大。整个区间隧道穿越土层主要为软土层,包括③₁层灰色淤泥质粉质黏土、③₂层灰色黏质粉土、④层灰色淤泥质黏土、⑤₁₋₁层灰色黏土层,除③₂层透水性好外,其余土层呈流塑状态,尚均匀。第4层灰色淤泥质黏土是盾构施工的主要土层,但由于其压缩性高、含水量高、孔隙比大、强度低、稳定时间长,在动力作用下极易产生流变、触变现象。

本场地浅部地下水属潜水类型,补给来源主要为大气降水与地表径流,水位动态为气象型,地下水埋深取 $0.5 \sim 0.7$ m。本标段施工区域微承压含水层分布于⑤₂粉细砂层中。

2 管片位移推理

2.1 管片受力分析

图2为作用于邻接块上的外力图示。邻接块自身受到重力 G 、顶力 F_q 和弹性密封垫施加的反力 F_m 的作用,邻接块的外表面还受到土体的压力 N_t 以及外表面和土体之间产生的摩擦力 F_t 。除此之外,因为邻接块分别与封顶块和标准块螺栓连接,所以之间还存在压力以及摩擦。如图2所示,邻接块的上下端分别存在与其他管片接触产生的压力及摩擦力,且螺栓的预拉力未在图中表示。根据现场的实际情况,标准块和拱底块的受力与邻接块较为类似,见图3和图4。

2.2 假设条件

(1)由于本次错台研究仅限于接缝的纵向相对位移,故不考虑竖直方向的位移;(2)管片所受到的面积和体积力都向重心简化;(3)将隧道的坡度简化为平坡;(4)把接头面看作是一个纯平面,不考虑接头面处的弹性密封槽、嵌缝槽以及用于定位的凹凸榫;(5)不考虑螺栓孔;(6)将弹性密封垫简化为弹性的材料考虑,且不考虑其阻尼作用;(7)不考虑地下水对管片的作用;(8)将管片视为刚体;(9)忽略封顶块和邻接块之间的错台。

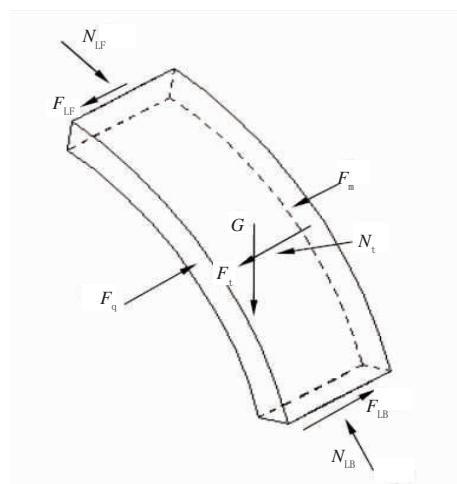


图2 邻接块受力图示

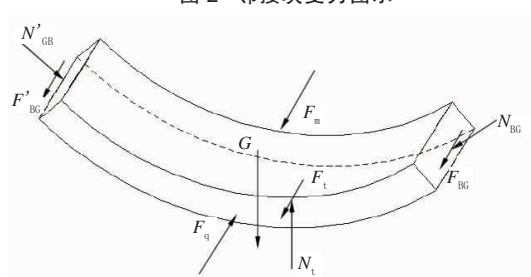


图3 拱底块受力图示

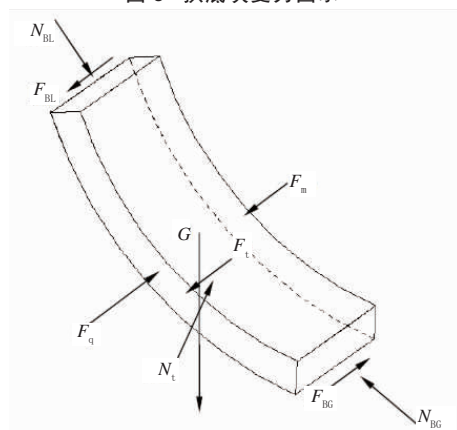


图4 标准块受力图示

2.3 管片的位移

在隧道开挖的过程中,密封垫不断的被压缩,而密封垫的被压缩量就是管片的位移量。由于管片的质量容易得到,那么将动力学系统的二阶运动量表示为惯性力,从而可应用静力学中研究平衡问题的方法来研究动力学问题,即达朗贝尔原理^[5,6]。

$$F + F_N + F_I = 0 \quad (1)$$

式(1)是达朗贝尔原理的数学表达式,其中粗斜体表示矢量。式中: F 为主动动力; F_N 为约束力; F_I 为惯性力, $F_I = -ma$ 。

先以邻接块为研究对象,根据达朗贝尔原理列出方程得:

$$F_{顶} - F_{LF} + F_{LB} - F_{土} - F_{垫} = m \cdot \ddot{s} \quad (2)$$

$$\text{因为 } F_{垫} = A_{垫} \sigma = A_{垫} \cdot E \varepsilon = A_{垫} \cdot E \cdot \frac{s}{L}$$

所以 $F_{顶} - F_{LF} + F_{LB} - F_{土} - A_{垫} \cdot E \cdot \frac{s}{L} = m\ddot{s}$

考虑方程的边界条件并解微分方程, 化简得邻接块的位移:

$$s = s_L = \frac{L(F_{顶} - F_{LF} + F_{LB} - F_{土})}{A_{垫} E} \left[1 - \cos \left(\sqrt{\frac{A_{垫} E}{mL}} \cdot t \right) \right] \quad (3)$$

式中: $F_{顶}$ 为顶力, 由现场的监测数据确定; $F_{土}$ 为邻接块上的土压力; $F_{垫}$ 为密封垫的反力; F_{LF} , F_{LB} 分别为封顶块与邻接块, 标准块与邻接块之间的摩擦力; $A_{垫}$ 为密封垫的截面积; E 为密封垫的弹性模量; L 为密封垫的厚度; t 为时间; m, s 为管片的质量和位移。

根据图 3 和图 4 中显示的拱底块和标准块的受力图示, 同理可以利用达朗贝尔原理分别推导出两种类型管片的位移公式, 式(4)和式(5)分别为拱底块和标准块的位移表达式。从式(3)~式(5)中可以看出, 不同管片的位移分别与其受力情况、弹性密封垫的特点以及管片质量等因素呈某种的定量关系。

$$s_G = \frac{L(F_{顶} - F_{GB} + F_{GB} - F_{土})}{A_{垫} E} \left[1 - \cos \left(\sqrt{\frac{A_{垫} E}{mL}} \cdot t \right) \right] \quad (4)$$

$$s_B = \frac{L(F_{顶} - F_{BG} + F_{BL} - F_{土})}{A_{垫} E} \left[1 - \cos \left(\sqrt{\frac{A_{垫} E}{mL}} \cdot t \right) \right] \quad (5)$$

错台的发生即管片之间产生了差异性的位移, 那么管片位移之间的差值就是错台, 邻接块与标准块之间的错台为:

$$s_{LB} = s_B - s_L \quad (6)$$

标准块与拱底块之间的错台为:

$$s_{GB} = s_G - s_B \quad (7)$$

邻接块与拱底块之间的错台为:

$$s_{LG} = s_B - s_L \quad (8)$$

3 实例计算与实测数据对比

由于理论分析的假设条件有关, 理论分析中将管片和密封垫简化为一个弹簧振子模型, 而实际上在压缩过程中是有阻尼作用存在的。在有阻尼作用存在的情况下, 振动的振幅会逐步衰减而最终稳定在平衡位置。所以管片的位移即初始位置和平衡位置的差值, 在邻接块的位移公式中表示出来就是该周期振动函数的振幅。随着盾构的不断顶进, 该环管片到盾尾千斤顶的距离会逐渐增大。但是千斤顶的部分顶力在一定范围内还将由其间的管片传递到该管片上, 使该环管片继续发生错台, 从而该管片的错台值不断的累积。随着该管片到千斤顶的距离逐渐增大, 被传递到该管片上的顶力也在不断的减小, 直

到在某个位置, 当被传递的顶力不再使管片继续发生错台时, 该环管片的错台也就停止了。

从图 2~图 4 的分析中可以看出, 作用在各个块体上的千斤顶顶力将会受到土体摩擦以及与该块体相连的块体的摩擦影响, 并通过管片间的弹性密封垫和抗压衬垫将顶力传递到下一环管片的块体上。通过对三个管片的受力分析, 可以得到顶力在不同块体上的传递关系以及管片位移。

对于邻接块而言, 管片纵向受到土体摩擦力、封顶块和标准块对它的摩擦力以及和下一环之间的密封垫反力。因为管片在发生一段位移之后处于相对静止的状态, 所以图中作用在管片上的力系是平衡力系。其中, 密封垫不仅在受到邻接块的压缩后施加给该块体一个反力, 并且该密封垫还同时对下一环管片的邻接块施加了一个与该反力大小相等方向相反的力。千斤顶的顶力就是这样从与之距离最近的一环管片传递到其它较远的管片上的。表 1 中列出了到盾尾不同距离的管片的顶力变化和引起的错台累积。从表中可以看出管片在距离盾尾 6 m 以后就停止了错台的发展, 错台达到 13.68 mm 左右。

表 1 顶力和错台计算表

管片到盾尾的距离 / m	邻接块上的顶力 / kN	标准块上的顶力 / kN	拱底块上的顶力 / kN	该工况下的错台 / mm	管片的累积错台 / mm
0	1 420	1 520	4 400	4.8	0
1.2	1 243.1	1 359.46	3 720.5	3.74	4.799 881
2.4	1 066.2	1 198.92	3 041	2.73	8.544 16
3.6	889.3	1 038.38	2 361.5	1.71	11.272 88
4.8	712.4	877.84	1 682	0.7	12.986 03
6	535.5	717.3	1 002.5	-0.3	13.683 63
7.2	358.6	556.76	323	-1.3	13.365 6

在图 5 中分别显示了现场监测、数值模拟和理论分析得到的管片总体错台的曲线。图中理论分析的结果稍大于前两种分析方法得到的错台结果。从图中可以看出管片的总体错台从零开始, 并且随着到盾尾千斤顶的距离增大而不断的被累积, 从而管片的错台也随着该距离的增大而逐渐增大。最终在管片距离盾尾约 6 m 的位置时, 错台停止了增长, 稳定在 13 mm 左右。还可以看出的就是由于理论和数值模拟分析不受现场施工的影响, 错台曲线较走势平滑。并且管片在距离盾尾较近的位置发生的错台明显高于其它位置, 表现为该处的曲线斜率较大, 也说明了在距离盾尾较近的位置, 由于管片受到的顶力差较大, 对错台的发生有显著的影响。

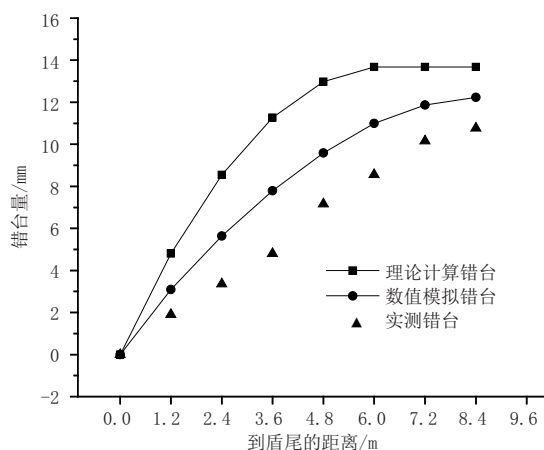


图5 总体错台的比较

4 结 语

把达朗贝尔原理运用到通缝拼装的盾构管片错台的计算中,将原来的动力学系统的二阶运动量表示为惯性力,从而可应用静力学中研究平衡问题的方法来研究管片错台这类动力学问题。算例分析表明,文中提到的不考虑管片竖向位移等假设条件的前提下,理论推导公式的计算结果和实测结果无论

是在错台的发展规律和最终的错台量上都具有较好的一致性。说明采用该方法推导得出的理论公式在计算和预测通缝拼装盾构法隧道在施工过程中的管片错台方面具有一定的实用价值。特别是得出的结果还给出了错台与管片受力、弹性密封垫特征和管片质量等因素的定量关系,为进一步在工程中消除错台,确保施工精度,提高工程质量提供了理论依据。

参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊.盾构法隧道[M].北京:中国铁道出版社,1991.
- [2] 王毅才.隧道工程[M].北京:人民交通出版社,1987.
- [3] 秦建设,朱伟,陈剑.盾构姿态控制引起管片错台及开裂问题研究[J].施工技术,2004,33(10):25-27.
- [4] 王民.隧道盾构施工管片橡胶密封垫的材料和结构及产品性能特性[J].特种橡胶制品,2005,26(1):43-46.
- [5] 范钦珊.理论力学[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [6] 谷超豪,李大潜,陈恕行,等.数学物理方程[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [7] 张强.盾构隧道通缝拼装管片的上浮和错台研究[D].上海:上海交通大学,2007.

（上接第234页）

4 结 语

近年来,新建市政桥梁无可避免的会遇到在城市建成区施工时遇到数量繁多地下管线。地下管线种类多,施工保护措施及迁改要求各不相同,保护及迁改的成本有时远高于改变桥梁结构带来的成本增加。因此,如何通过改变桥梁结构设计来巧妙的避让开地下管线已经成为桥梁设计、施工过程中重要的一环。

监理工程师在这个过程中,应当发挥主观能动性,通过个人、公司及行业中积累的经验,积极思考并提供解决思路,与业主、设计、勘察、施工等参建单位共同探讨,最终确定一个在结构安全、可行性、经济性、施工难度、工期等方面取得平衡后的最优处理方案。

本文通过工程实例,介绍了几种通过调整结构形式来避让地下管线的方式,说明监理工程师在此类问题中能够起到解决现场问题,推动项目实施,保证施工质量、进度、投资和安全的作用,为类似项目提供一定参考。

参考文献:

- [1] 许慧峰.桥梁建设时与地下管线关系的处理[J].城市建设理论研究(电子版),2013(2).
- [2] 胡锐.城市人行天桥基础与市政管线冲突的几种解决方式[J].城市建设理论研究(电子版),2013(8).
- [3] 张欣禹.桥梁桩基础遇到地下管线时的设计调整[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2012(1):9-12,16.
- [4] 彭宪辉.在地下管线复杂区域桥梁施工时管线保护的相关措施[C]//上海市市政公路行业协会.2013城市道桥与防洪第八届全国技术论坛论文集,2013.