

盾构管片接头三维数值模拟与研究

张 龙

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 盾构管片接头作为管片分块的连接部分,是盾构管片结构中的重要且薄弱的局部结构,其力学性能直接影响盾构管片正常运营的安全性。利用三维有限元方法建立了精细化的三维数值模型,采用实体单元模拟了铸铁件管片接头、螺栓、垫片等结构,计算了螺栓表面荷载下管片接头的力学性能和锚筋支座反力,通过3组螺栓位置情况讨论分析了锚筋位置对管片接头结构力学性能以及锚筋支座反力的影响。数值计算结果说明三维有限元法能有效的计算和分析盾构管片接头的力学性能,锚筋位置的改变能明显的影响锚筋支座反力。

关键词: 盾构管片接头;有限元方法;三维结构分析

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)07-0289-03

0 引 言

随着我国经济的高速发展,地下盾构管片工程的需求日益增多,这使得盾构管片结构形式越来越多样,管片接头的数量和结构越来越多样,管片接头的受力也越来越复杂。管片接头作为管片分块的连接部分,是盾构管片结构中最为薄弱的局部结构,其在荷载工况下的力学性能直接影响着盾构管片结构整体受力和正常工作的安全性。因此非常有必要对盾构管片接头的受力性能进行精细的计算和分析。

基于文献调研^[1-4],目前已有一些学者和工程设计人员对管片接头结构进行了试验研究和数值模拟。试验研究是目前管片结构抗弯性能研究中最常用的手段,而且管片接头试验手段也较为成熟。在具体的工程项目中,设计研究人员对工程中使用的管片接头构件开展力学试验,检验接头结构的力学性能。但由于时间、人力、物力的限制,往往只能进行有限组的试验,只能考虑有限的工况情况,同时试验测量手段也是有限的,可采集的试验数据也非常有限,因此寻求有效的数值模拟研究也是非常重要的^[5-7]。张力^[8]等采用实体单元建立了精细化接头数值模型并用足尺试验验证了数值模型计算结果的准确性,研究了螺栓连接状态对接头抗弯性能的影响。葛世平^[9]等基于管片接头结构的受力和构造特点对管片接头及其附近区域进行了刚度修正,提出

了局部刚度修正的简化管片接头结构模型。FENG K等^[10]用梁单元模拟螺栓和忽略螺栓与管片混凝土之间的接触建立了管片接头的三维有限元模型,开展了管片接头的抗弯试验,并对有限元模拟结果和试验结果进行了对比验证,研究结果说明三维有限元模型对管片接头力学性能的计算模拟有足够的精度。庄晓莹等^[11]对盾构管片接缝面细部构造进行简化建立了盾构管片接头三维有限元模型,并利用模型模拟了正负弯矩作用下管片接头结构压弯破坏全过程。综上所述,管片接头的三维数值模型能有效的计算管片接头的力学性能,既有研究往往为了计算简便而不同程度的对接头结构进行了简化,因此难以准确反应管片接头局部构造的受力特征和局部结构对接头受力性能的影响。

因此,本论文针对上海某两污水厂连通管工程的盾构管片项目,采用实体建模软件 Solidworks 结合有限元分析软件 ANSYS-workbench 建立了管片接头三维精细化模型,采用实体单元模拟了管片接头的铸铁件接头、螺栓、锚筋以及垫片等,进而精细的计算和研究了盾构管片接头的力学性能。

1 工程概况

本论文项目是上海某两污水厂连通管工程。本工程管径约为 3.5 m,管顶覆土埋深约为 11~16 m,管内水压力可达 0.35 MPa。盾构管片结构采用叠合式双衬砌结构。管片厚度为 300 mm,内衬厚度取 250 mm。

本工程圆形盾构管片模型见图 1,管片设计成由 5 块管片块拼接而成,每块管片之间通过管片接头连

收稿日期: 2021-02-23

作者简介: 张龙(1988—),男,博士,工程师,从事结构设计工作。

接。管片接头结构见图1。管片设计考虑施工阶段工况和运营阶段工况。施工阶段工况包括管片自重、施工荷载、全部外水土;运营阶段工况主要包括内水压力。

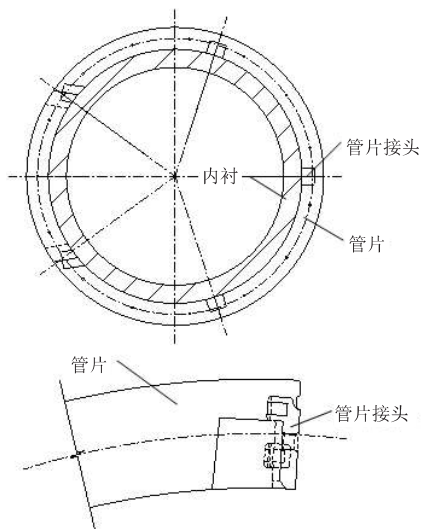


图1 盾构管片结构示意图

2 计算与设计

2.1 计算模型

(1) 模型信息

根据管片设计计算结果,最不利控制工况下接头位置处的管片内力为:弯矩 $M=115 \text{ kN}\cdot\text{m}$,轴力 $N=405 \text{ kN}$ (拉力),根据内力结果管片接头螺栓可采用10.9级M39螺栓,管片接头材料采用铸铁件。取如图2所示的管片接头结构为例进行计算,结构模型主要由铸铁件接头、连接螺栓、连接锚筋、以及螺栓垫片组成。铸铁件接头上留有3个锚筋接孔,位于铸铁件3边;连接螺栓采用10.9级M39螺栓,位于铸铁件中间位置,直径为60 mm;螺栓垫片采用M42垫片。铸铁件接头材料采用QT500-7球墨铸铁,弹性模量为169 GPa,泊松比为0.275,密度为7 100 kg/m^3 。计算时螺栓垫片采用钢垫片进行模拟。螺栓和垫片材料的弹性模量为206 GPa,密度为7 850 kg/m^3 。

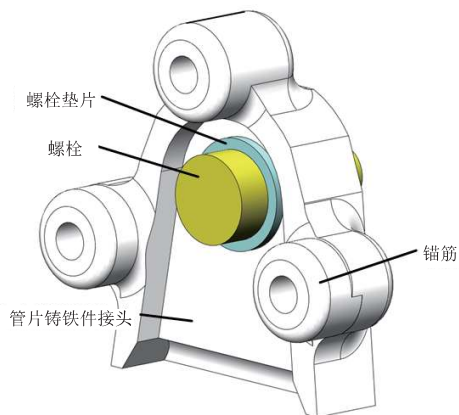


图2 铸铁件管片接头模型

(2) 有限元模型

如图3所示,模型采用Solidworks三维建模和ANSYS-workbench进行有限元分析。铸铁件的破坏不先于螺栓破坏,铸铁件接头承受最大的荷载工况是:螺栓应力达到最大抗拉强度500 MPa而同时铸铁件不发生屈服,所以在螺栓头表面处施加500 MPa拉力荷载,锚筋位置处模拟为固定约束。螺栓与垫片之间的连接模拟为刚性面连接,垫片与铸铁件之间的连接考虑为刚性连接。

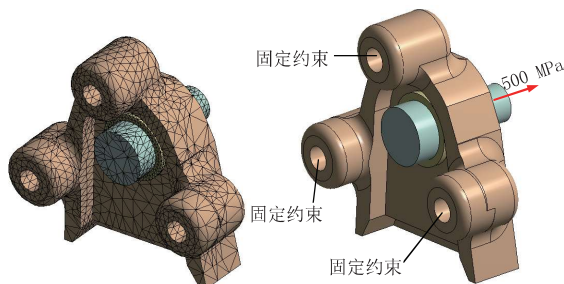


图3 有限元模型

2.2 计算结果

基于有限元模型,铸铁件计算结果见图4和图5。

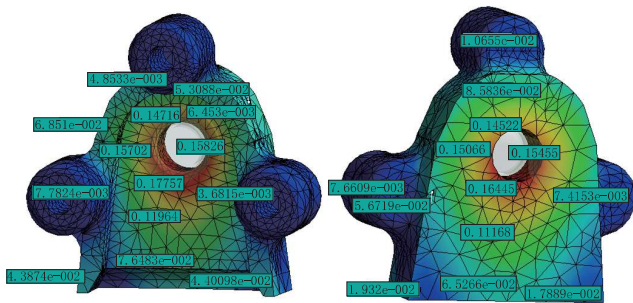


图4 铸铁件变形分布

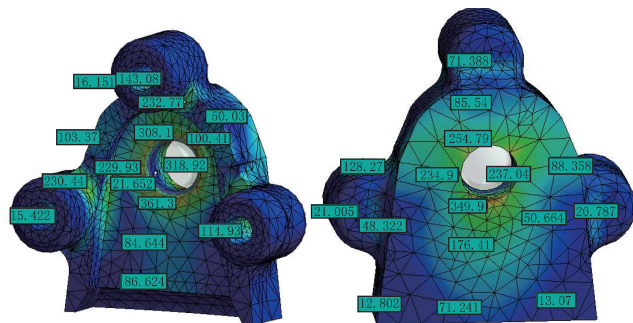


图5 铸铁件应力分布

从图4和图5中可以看出:

(1) 结构变形

铸铁件接头变形主要集中在中部螺栓洞口位置,结构变形从中部螺栓位置到锚筋位置逐步变小,锚筋位置变形最小。铸铁件结构最大变形为0.19 mm。

(2) 结构应力分布

铸铁件接头应力主要集中在中部螺栓洞口位置、锚筋中部及边缘位置处。最大应力位置发生在中部螺栓与垫片的连接处,连接处的应力集中现象可以

通过橡胶螺栓垫片来缓解,而且边缘位置处的圆角也可以减缓应力集中现象。最大应力大小为 370 MPa。

(3) 支座反力

锚筋位置处支座反力的大小影响着锚筋的尺寸设计。铸铁件三处锚筋位置的支座反力见表 1。

表 1 锚筋支座反力

锚筋位置	支座反力			
	X 向 /kN	Y 向 /kN	Z 向 /kN	合力 /kN
头部	0.4	88.9	218.4	239.7
左侧	125.7	44.4	231.7	231.8
右侧	125.7	44.4	231.7	231.8

从表 1 和图 6 可以看出,3 个锚筋的合力大小相当,这有利于锚筋的统一设计;3 个锚筋合力都与平面有夹角,铸铁件的锚筋位置设计应考虑这个角度;锚筋受力以 Z 向受力为主,合力大小与螺栓上施加的荷载总和相等。锚筋合力大小约为 240 kN,通过计算可采用直径为 32 mm 的锚筋。

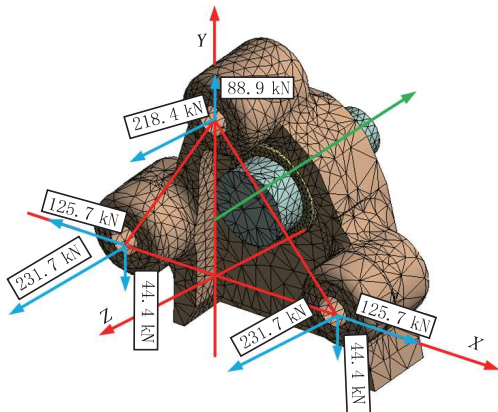


图 6 锚筋支座反力

3 锚筋位置的影响

在盾构管片接头结构设计中,锚筋位置的确定对管片接头的设计尤为重要,它直接影响了锚筋的直径尺寸以及锚筋的锚固长度等情况,从而影响了管片接头的结构形式和工程造价。

如图 7 所示,设计了三组锚筋位置模型:(a) 31.9°、(b) 23.3°、(c) 13.4°,变量是两侧锚筋圆心螺栓圆心连线与水平线的夹角,夹角大小的变化使得锚筋高度位置发生改变。

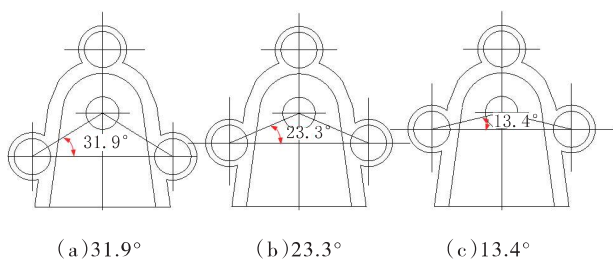


图 7 三组锚筋位置

表 2 展示了锚筋位置对铸铁件力学性能的影响,锚筋位置会影响管片接头结构应力场和变形场,但对最大变形和最大应力影响不大。

表 2 锚筋位置对铸铁件最大变形和最大应力的影响

锚筋位置	铸铁件最大变形 /mm	铸铁件最大应力 /MPa
(a)31.9°	0.15	360
(b)23.3°	0.19	370
(c)13.4°	0.22	375

表 3 展示了锚筋位置对支座反力的影响。从表 3 中看出,(b)组上端和左右端锚筋合力相当,而(a)、(c)组上端和左右端锚筋合力相差较大;当锚筋位置从 31.9°变化到 13.4°,上端锚筋支座反力从大逐渐变小,左右端锚筋支座反力从小逐渐变大。因此,存在一个锚筋位置使得上端锚筋支座反力和左右端相等,经过计算这个锚筋位置靠近于 23.3°。在这个锚筋位置时,各锚筋可以采用相同的锚筋设计。

表 3 锚筋位置对锚筋支座反力的影响

锚筋位置	锚筋支座反力合力	
	上端锚筋 /kN	左右侧锚筋 /kN
(a) 31.9°	248	190
(b) 23.3°	239.7	231.8
(c) 13.4°	200	253

4 结 语

本论文利用有限元方法建立了精细化的盾构管片接头三维有限元数值模型,模型中采用实体单元模拟了铸铁件管片接头、螺栓、锚筋以及垫片结构,计算了在螺栓荷载作用下的盾构管片接头结构的力学性能和锚筋支座反力,并通过 3 组情况讨论分析了锚筋位置对管片接头结构力学性能以及锚筋支座反力的影响。主要可以得到如下结论:

- (1) 利用三维有限元软件能有效的计算和分析盾构管片接头的力学性能,盾构管片结构的设计和研究中可以利用这种计算方法。
- (2) 盾构管片接头的最大变形和最大应力发生在螺栓位置附近,尤其是螺孔位置附近会有应力集中现象,在设计中应充分考虑这一情况,采用合理的手段,比如弹簧橡胶垫片,来减缓螺孔位置处的应力过大现象。
- (3) 在盾构管片接头结构中,锚筋连接位置的改变会明显的影响锚筋合力大小,从影响锚筋的设计和造价成本。当锚筋位置从下往上移动时,上端锚筋

(下转第 311 页)

修复完成后管道内径 1 840 mm。

该项目已经全部竣工顺利通水, DN 2 000 雨水管道采用 PVC 模块内衬法非开挖整体修复后, 管道内壁光滑, 内衬管片与原管道贴合紧密, 管片模块之间拼接处理完好, 管道无渗漏、破损等情况, 满足排水管道过流能力的要求。图 3 为修复完成后的管道内部效果。

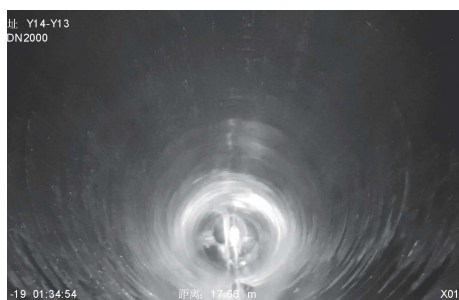


图 3 采用 PVC 模块内衬法管道修复后效果

5 结 语

随着城市排水管道长时间的服务运行, 管道老化、流沙地区管道等引起的结构性损坏现象时有发生, 影响排水安全运行, 每年都有大量的排水管道需要进行维修更新。管道非开挖修复技术相较于开挖修复而言整体优势明显, 对地面交通、周围环境以及周边地下市政管线等的负面影响小。PVC 模块内衬法修复技术在排水管道非开挖修复领域提供了一种新技术, 具有操作灵活、修复后管道强度高优点, 在国内排水管道非开挖修复领域中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 谢洋, 盛弘. 3S 模块工法造价确定分析[J]. 上海水务, 2017(3):83-84.
- [2] CJJ/T 210—2014, 城镇排水管道非开挖修复更新工程技术规程[S].
- [3] 上海市水务局. 上海市城镇排水管道非开挖修复技术实施指南[M]. 上海: 同济大学出版社, 2013.

(上接第 291 页)

支座反力逐渐变小, 左右两端锚筋支座反力逐渐变大。在实际设计中, 建议找到合适的锚筋位置使得各锚筋受力相当, 从而简化锚筋和盾构管片接头的设计。

参考文献:

- [1] 张力, 封坤, 方若全, 等. 盾构隧道原型管片接头抗弯性能试验[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2):220.
- [2] 封坤, 何川, 肖明清. 高轴压作用下盾构隧道复杂接缝面管片接头抗弯试验[J]. 土木工程学报, 2016(8):99.
- [3] 柳猷, 张晨光, 张宸. 地铁盾构隧道纵向接缝承载能力试验研究与解析分析[J]. 土木工程学报, 2016, 49(10):110.
- [4] 张厚美, 傅德明, 过迟. 盾构隧道管片接头荷载试验研究[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(6):28.
- [5] 马国民, 丁文其, 魏于量, 等. 带接头盒矩形盾构接头正向抗弯三维

有限元分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4):122.

- [6] 张厚美, 张正林, 王建华. 盾构隧道装配式管片接头三维有限元分析[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(4):566.
- [7] 陈俊生, 莫海鸿. 盾构隧道管片接头抗弯刚度的三维数值计算[J]. 铁道学报, 2009, 31(4):87.
- [8] 张力, 封坤, 何川, 等. 盾构隧道管片接头三维精细化数值模拟研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(8):1169.
- [9] 葛世平, 谢东武, 丁文其, 等. 盾构管片接头简化数值模拟方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(9):1600.
- [10] FENG K, HE C, QIU Y, etc. Full-scale tests on bending behavior of segmental joints for large underwater shield tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 75:100.
- [11] 庄晓莹, 张雪健, 朱合华. 盾构管片接头破坏的弹塑性 - 损伤三维有限元模型研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(10):1826.