

超大类矩形复合管节使用阶段受力状态研究

张海波

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125]

摘要: 钢混凝土复合管节在超大断面类矩形顶管工程中越来越多地得以推广应用。因受钢混凝土界面性能的影响,复合管节受力状态复杂,因此对于钢混凝土复合管节在使用阶段的受力性能进行分析具有非常重要的意义。结合上海市轨道交通某车站工程顶管法施工项目,采用有限元软件模拟分析复合管节在使用阶段受载状态下的受力性能。通过完全连接模型和栓钉连接模型这2种不同计算模型的对比,对复合管节应力、变形和界面滑移等方面进行分析。分析结果表明:采用栓钉连接模型更符合实际情况,钢结构及栓钉的最大应力出现在腰部,混凝土部分最大应力出现在顶部,管节变形主要为竖向变形,钢结构与混凝土结构界面存在局部滑移,采用横纵向肋板设计、界面设置栓钉等措施,可有效增强界面连接性能。

关键词: 顶管法;复合管节;栓钉;数值计算

中图分类号: U452.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0252-05

Research on Stress State of Ultra-large Rectangular Composite Pipe Segment in Service Stage

ZHANG Haibo

[Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China]

Abstract: Steel-concrete composite pipe segments are increasingly being promoted and applied in super-large section rectangular pipe jacking projects. Influenced by the steel-concrete interfacial properties, the stress state of composite pipe segments is complex. Therefore, it is of great significance to analyze the stress performance of steel-concrete composite pipe segments during the service stage. Based on a pipe-jacking constructed metro station project in Shanghai, the finite element software is used to simulate and analyze the stress performance of composite pipe segments under load condition during the service stage. By analyzing and comparing two different calculation models such as full connection and stud connection, the stress, deformation and interface slip of the composite pipe segments are analyzed. The analysis results show that the use of stud connection model is more in line with the actual situation. The maximum stress of the steel structure and the studs occurs at the waist, and the maximum stress of the concrete part occurs at the top. The main deformation of the pipe segment is vertical. There is local slippage at the interface between steel structures and concrete structures. The taken measures such as designing transverse and longitudinal rib plates and setting stud bolts at the interface can effectively enhance the interface connection performance.

Keywords: pipe jacking; composite pipe segment; stud; numerical calculation

0 引言

随着城市化建设的推进,在中心城区城市轨道交通新线的建设,主要受复杂的周边环境、严苛的保护要求以及深埋轨道交通面临的承压水影响等条件限制,其建设难度日益增大^[1]。期间也涌现出了轨

道交通建设新工艺、新技术,如上海轨道交通14号线静安寺站,受延安路高架、人行天桥以及众多市政管线的影响,采用顶管法暗挖施工^[2],施工期间为钢管节,顶管施工完成后浇筑钢筋混凝土结构形成钢筋混凝土复合管节^[3]。

钢混凝土复合结构将钢与混凝土结构结合,通过材料性能互补和协同受力,兼具高强度、高刚度和优良延性,目前广泛应用于高层建筑、桥梁、隧道等领域。钢混凝土复合结构受力性能重点在于界面连接性能、承载能力以及温度效应。赵杰豪^[4]通过模型试验,研究分析了钢管-钢筋混凝土复合构件界面

收稿日期: 2025-05-08

基金项目:上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司项目,软土地下空间新型暗挖建造与改扩建关键技术研究(科JK2023204A)

作者简介:张海波(1981—),男,硕士,高级工程师,从事城市轨道交通、地下空间和隧道工程的设计和咨询工作。

力学特性;王劲丰等^[5]通过试验研究钢混凝土复合结构中栓钉的连接件抗剪性能,并提出栓钉的抗剪承载力计算公式;王园园等^[6]通过理论分析,研究了组合与叠合双重作用钢-混凝土连续梁负弯矩区界面滑移性能;王鹏飞等^[7]对部分填充式钢混组合结构构件、节点及框架结构受力性能研究成果进行了梳理和归纳;刘明明^[8]通过有限元计算,分析复合管片的承载能力;邓高林等^[9]通过试验分析钢混凝土复合管片结合处的抗剪性能;廖若倩等^[10]建立热-力耦合有限元模型,分析了在火灾高温作用下钢混凝土复合管片的力学性能。可见,虽然从业者对于钢混凝土复合结构受力性能已做一定的研究,但对于复合管节的研究较少。

本文以静安寺站顶管段超大型矩形钢筋混凝土复合结构为研究对象,通过建立三维实体模型进行计算,分析超大型矩形复合管节在使用阶段的受力状态,重点对复合管节中钢板与混凝土之间的相互作用以及共同承载能力进行研究,为类似工程应用提供借鉴。

1 工程概况

上海轨道交通 14 号线静安寺站位于华山路与延安中路交叉路口的华山路下方,其中过延安中路段采用顶管法施工。站台层顶管段断面为类矩形,断面外包尺寸为 $9.9\text{ m}\times 8.7\text{ m}$,环宽为 2 m 。站台层顶管覆土厚约 14.95 m ,位于④层、⑤_上层土中。车站平、剖面分别如图 1、图 2 所示。

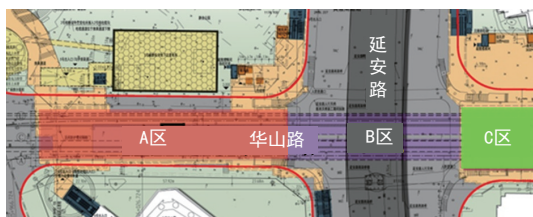


图1 车站总平面图

站台层顶管施工期间为钢管节,顶管施工贯通后,于钢管节内部现浇钢筋混凝土,形成钢混凝土复合管节。钢管节由背板、纵向肋板、横向肋板等构件组成,管节环宽为2 m,钢管节厚度为400 mm,纵向肋板间距约480 mm,横向加劲肋板间距约500 mm。钢混凝土复合管节的截面高度为525 mm,后浇混凝土标号为C35,抗渗等级为P10。钢管节背板表面与混凝土接触面设置栓钉,栓钉直径为20 mm,长度为100 mm,栓钉的间距为300 mm×300 mm,梅花形布置。管节横断面如图3所示。

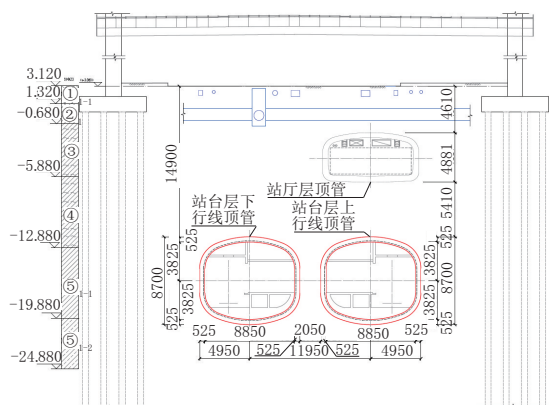


图2 站台层顶管横剖面图(单位:mm)

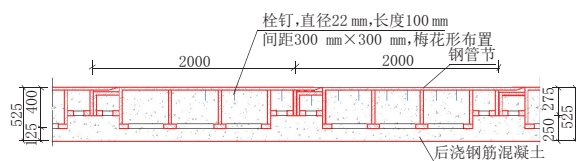


图3 钢混凝土复合管节横断面图

2 计算模型

复合管节模型采用三维实体单元建立,材料假定为线弹性,钢构件的泊松比为 0.3、弹性模量取 200 GPa;混凝土的泊松比为 0.2、弹性模量取 30 GPa;后浇筑混凝土中配置的钢筋泊松比为 0.3、弹性模量取 200 GPa。

计算模型的整体坐标系设置为顶进方向为 Z 向, 竖直向为 Y 向, 横向为 X 向。管节模型的边界位移约束条件设置为: 管节前部端面设置 Z 向位移约束, 下部弧形区域采用竖向地基弹簧, 基床系数为 $1.32 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$, 管节的顶、底部中心线设置 X 向位移约束。

为研究钢管片与混凝土之间相互作用,分别建立了2种不同连接方式的三维实体精细有限元模型,即完全连接模型与栓钉连接模型。完全连接模型中混凝土与钢板之间直接采用绑定(tie)连接,即认为混凝土与钢管节的交界面处于理想的完全共同作用;栓钉连接模型中,采用link单元建立钢管节表面的栓钉模型,钢管节表面的钢板与栓钉绑定(tie)连接,栓钉与混凝土之间嵌入(embed)连接,同时混凝土与钢板交界面之间使用接触(contact)及摩擦来模拟两者之间的直接相互作用,切向摩擦系数取0.65,法向采用硬接触。栓钉连接模型如图4所示。

计算工况为模拟类矩形复合管节在使用阶段时所承受的荷载,分为永久荷载和可变荷载,其中永久荷载包括管节自重、顶部及侧向土压力、水压力,可变荷载包括局部注浆压力及地面超载。

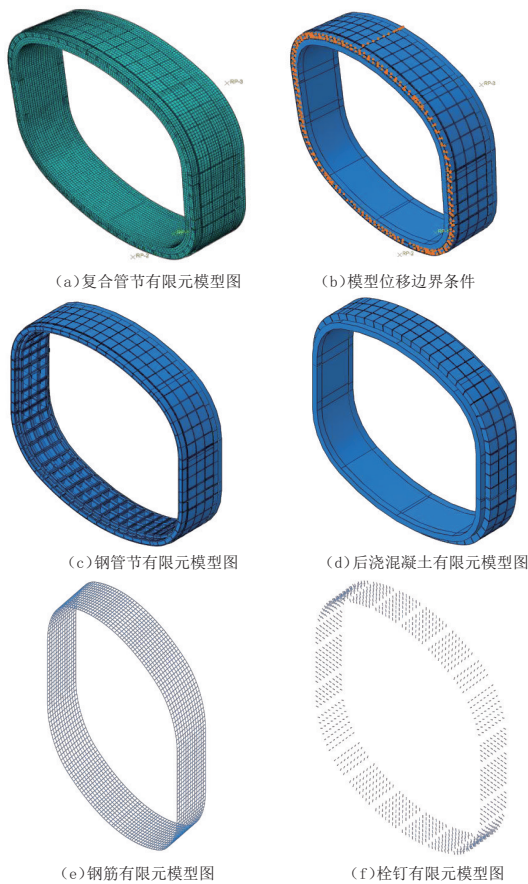


图4 计算模型图

3 计算结果及分析

3.1 完全连接模型计算结果

当采用完全连接模型时,计算单环复合管节在外部荷载作用下的应力及应变情况。通过计算可知,单环复合管节沿 X 方向最大变形约为2.3 mm,其最大变形位置为管节两肩部;单环复合管节沿 Y 方向最大变形约为6.7 mm,其最大变形位置为上顶部。单环复合顶管钢结构部分的最大 Mises 应力约为122 MPa,出现在管节腰部的钢管节肋板上;混凝土部分的最大 Mises 应力值约9.6 MPa,出现在管节顶部。

完全连接模型复合管节及其各部件应力云图如图5至图6所示,复合管节变形云图如图7至图8所示。

3.2 栓钉连接模型

当采用栓钉连接模型时,单环复合顶管结构中钢管节与混凝土之间的相互作用产生于钢管节表面的栓钉、钢管节与混凝土交界面的摩擦与接触。

通过计算可知,复合顶管单环顶管沿 X 方向最大变形约为2.8 mm,其最大变形位置为管节两肩部;

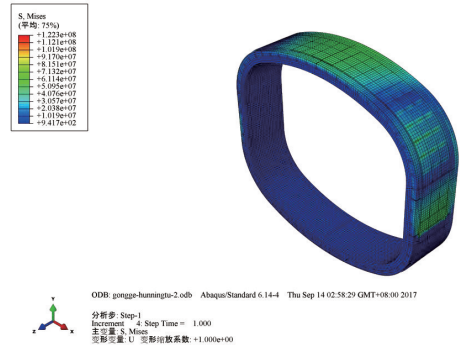


图5 复合管节整体应力云图(单位:Pa)

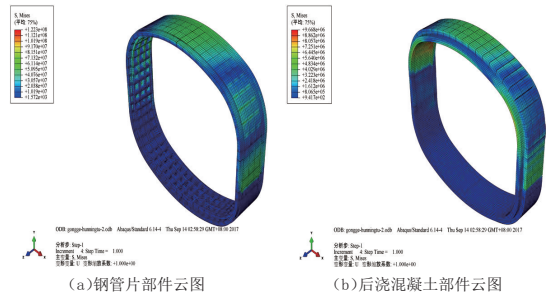


图6 复合管节各部件应力云图(单位:Pa)

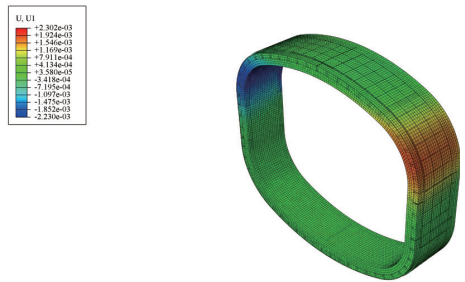


图7 复合管节 X 方向变形云图(单位:m)

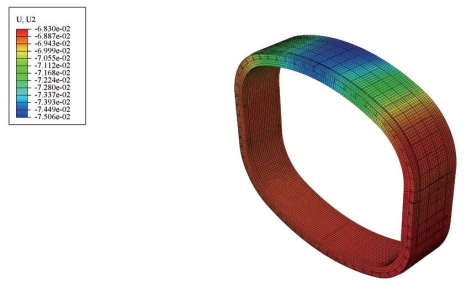


图8 复合管节 Y 方向变形云图(单位:m)

沿 Y 方向最大变形约为8.6 mm,其最大变形位置为上顶部,变形数值较完全连接模型略有增大。

应力最大值出现在管节腰部的栓钉上,最大 Mises 应力为265 MPa;钢结构部分最大 Mises 应力为250 MPa,同样出现在管节腰部位置。混凝土部分最大 Mises 应力值约为21 MPa,嵌入在混凝土中的钢筋最大应力约139 MPa。

在本栓钉连接模型中混凝土与钢板之间设置为

法向刚性接触,切向摩擦,复合管节受载后,钢管节与混凝土之间出现滑移,沿 x 、 y 方向的最大滑移量分别为0.39 mm和0.3 mm,但是滑移仅出现在局部较小的区域,钢管节与混凝土之间整体并未出现滑移,充分说明了2者之间有较好的共同作用。复合结构可用抗剪刚度来评判不同材料的结合程度,蔺钊飞等^[11]研究了栓钉直径、高度及混凝土弹性模量等对于抗剪刚度的影响,抗剪刚度随着直径加大、高度加长、混凝土弹性模量加大均呈增大趋势,因此当采取栓钉构造措施时可进一步提高结构共同作用的能力。

栓钉连接模型中复合管节及其各部件应力云图如图9至图10所示,复合管节变形云图如图11和图12所示,钢管节与混凝土交界面的滑移变形云图如图13和图14所示。

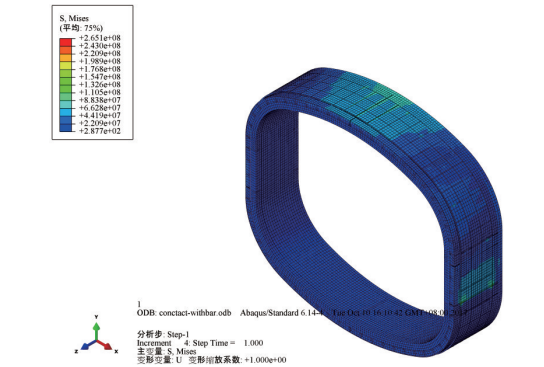


图9 复合管节整体应力云图(单位:Pa)

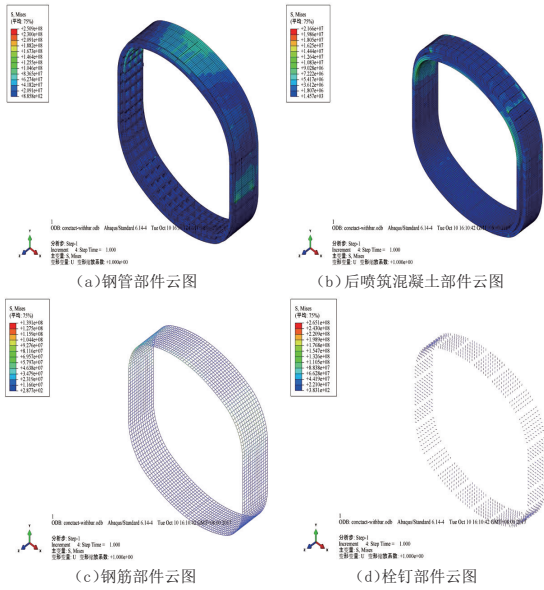


图10 复合管节各部件应力云图(单位:Pa)

3.3 计算结果汇总及分析

将完全连接模型与栓钉连接模型在使用状态下的受力计算结果进行汇总,如表1和表2所示。

完全连接模型中,由于将混凝土与钢管节之间

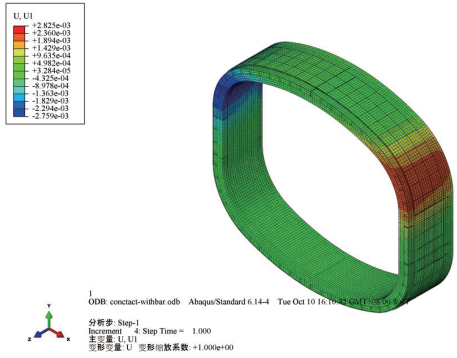


图11 复合管节整体沿X方向变形云图(单位:m)

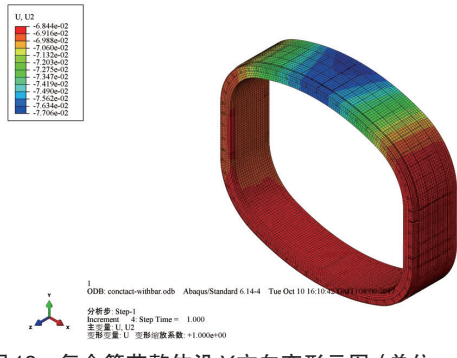


图12 复合管节整体沿Y方向变形云图(单位:m)

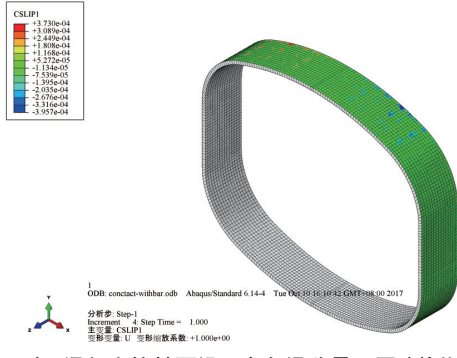


图13 钢-混凝土接触面沿X方向滑移量云图(单位:m)

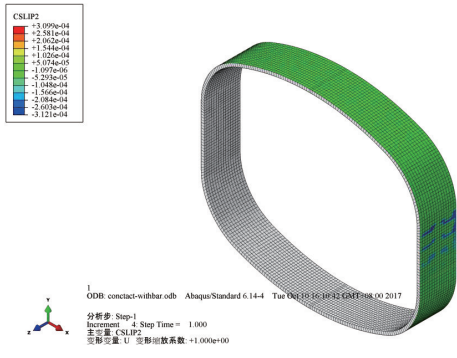


图14 钢-混凝土接触面沿Y方向滑移量云图(单位:m)

表1 完全连接模型应力与变形结果

项目	计算结果	
	钢管节	混凝土
应力最大值/MPa	122	9.6
最大竖向变形/mm		6.7
最大横向变形/mm		2.3
钢-混凝土相对滑移/mm		0

表2 栓钉连接模型应力与变形结果

项目	计算结果			
	钢管节	混凝土	栓钉	钢筋
应力最大值/MPa	250	21	265	139
最大竖向变形/mm	8.6			
最大横向变形/mm	2.8			
界面相对滑移/mm	0.39			

设置为tie连接,两者完全连接、共同受力,从而使得钢结构部分及混凝土结构部分均充分发挥了承载性能,应力及变形较小。

栓钉连接模型中,钢结构部分及混凝土结构部分的应力较完全连接模型大幅增大,经分析其主要原因是复合管节结构在栓钉及其附近区域出现了局部的应力集中。而对比栓钉以外其余部分的应力,与完全连接模型相比并未显著增加。这也说明了栓钉在复合结构中起到了较好的连接作用。

栓钉连接模型中,管节横向及竖向的变形均较完全连接模型计算结果大,其变形的增量分别为28.4%、21.7%。从竖向和横向变形量值来看,其主要变形形态为竖向变形。

通过计算可以发现,栓钉连接模型中,钢管节与混凝土之间局部出现滑移,根据已有的关于钢-混凝土组合梁的成熟研究成果^[12-13]表明,当完全连接组合梁在正常使用阶段,受载水平为其极限荷载的50%时,钢与混凝土交界面的滑移量为0.2~0.4 mm。由此可见,该工程复合管节中钢与混凝土的滑移量在合理范围内。值得说明的是,在复合管节中钢与混凝土相互作用中产生贡献的不仅有栓钉,钢管节中的横向及纵向加劲肋使得交界面积大大增加,同时也对混凝土提供了约束作用,对于钢管与混凝土之间的相互作用非常有利。

4 结 语

该文以超大类矩形钢混凝土复合管节结构为研究对象,通过建立三维实体模型进行计算,分析复合管节在使用阶段的受力状态,为类似工程提供借鉴。结合计算分析,得出以下结论。

(1)采用400 mm厚钢管节叠合525 mm厚C35钢筋混凝土的复合结构满足管节受力要求。管节设计

中,钢管节采用横纵向肋板设计,间距为管节厚度的1.20~1.25倍;界面设置栓钉,长径比为5,间距为300 mm×300 mm。

(2)采用完全连接模型分析复合结构受力状态,是一种理想状态下的分析,结构应力及变形均偏小,采用栓钉连接模型更符合实际情况。

(3)钢混凝土复合管节最大应力部位出现在腰部,主要为钢结构部分及栓钉应力,钢筋混凝土部分最大应力出现在顶部。类矩形复合管节在使用阶段发生的变形主要为竖向变形。

(4)复合管节中钢结构与混凝土结构存在局部滑移,设计中应重点考虑钢混凝土材料界面的连接性能,采取措施加强界面性能。后续可对复合管节钢-混凝土的抗剪刚度进行进一步的计算或试验分析。

参考文献:

[1] 毕湘利,王秀志,吴迪.上海轨道交通车站暗挖技术应用与探索[J].城市轨道交通研究,2024,27(8):1-6.

[2] 黄爱军.淤泥质软土地区非开挖轨交车站方案研究[J].上海建设科技,2016(2):36-39.

[3] 吴东鹏,王春凯.超大类矩形钢管节顶进阶段受力状态研究[J].工业建筑,2020(增刊):441-445.

[4] 赵杰豪.钢管-钢筋混凝土复合构件界面力学特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.

[5] 汪劲丰,张爱平,王文浩.栓钉高度对栓钉连接件抗剪性能的影响[J].浙江大学学报(工业版),2020(11):2076-2084.

[6] 王园园,段树金,牛润明.组合与叠合双重作用钢-混凝土连续梁负弯矩区滑移[C]//第26全国结构工程学术会议论文集.长沙:中国力学学会,2017:544-547.

[7] 王鹏飞,刘继明,谭文娅,等.部分填充式钢混组合结构研究进展[J].山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(4):676-683.

[8] 金明明.盾构隧道复合管片的等效力学模型及应用研究[D].天津:天津大学,2016.

[9] 邓高林,庄欠伟,李东,等.钢混复合管片结合处抗剪性能试验研究[J].施工技术,2018,47(19):42-45.

[10] 廖若倩,蔡永昌.矩形断面盾构隧道在火灾高温作用下的力学性能研究[J].现代隧道技术,2018,55(5):146-158.

[11] 蔺钊飞,刘玉擎,贺君.焊钉连接件抗剪刚度计算方法研究[J].工程力学,2014,31(7):85-90.

[12] JGJ 138—2016,组合结构设计规范[S].

[13] JOHNSON R P. Composite Structures of Steel and Concrete[M]. 3rd edition.Oxfordshire: Blackwell Publishing, 2004.