

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.20.003

城市综合管廊供水管道弯管及其支墩体系力学分析

胡群芳^{1,2}, 孙 葵¹, 肖 瑞², 崔万丽², 陈建华³

(1. 同济大学上海防灾救灾研究所, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 芜湖新兴铸管有限责任公司, 安徽 芜湖 241000)

摘 要: 近年来随着我国城市市政管网建设、更新与改造, 国家大力推动城市综合管廊建设。相比于传统的直埋式市政管线, 管廊内主要采取吊架或支墩方式架空敷设各种管线, 因此, 管廊内大口径有压管道弯管连接区域, 因输送介质压力方向改变会对管道产生附加的不平衡推力, 从而影响其接头与支墩受力状态与安全。针对综合管廊内敷设 DN800 大口径球墨铸铁供水管道弯管及支墩受力问题, 考虑 2 组 9 种不同角度连接工况下管道输送水体—管体结构—支墩约束整体作用体系, 利用流—固耦合分析方法, 研究了弯管管道、支墩在不平衡推力作用下的结构内力分布与影响, 并得到了综合管廊弯管设计中管道与支墩设计内力控制截面。该研究工作可为城市综合管道建设设计提供指导, 并为管廊安全运营提供重要的技术支持。

关键词: 城市综合管廊; 供水管道; 流—固耦合分析

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)20-0019-08

Mechanical Analysis of Bends and Supports of Water Supply Pipeline in Urban Utility Tunnel

HU Qun-fang^{1,2}, SUN Yan¹, XIAO Rui², CUI Wan-li², CHEN Jian-hua³

(1. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Wuhu Xinxing Ductile Pipes Co. Ltd., Wuhu 241000, China)

Abstract: In recent years, the construction of the urban utility tunnel has been vigorously promoted with the construction, renewal and reconstruction of municipal pipeline network in China. The water supply pipeline, as the most important part of the urban pipe network, has gradually changed from underground to overhead laying with supports or hangers in utility tunnels. Because water supply pipe is a pressure pipe with different angle connection, its water pressure will produce additional thrust force on the pipes bend. This paper analyzes the mechanical problems of DN800 ductile iron pipe bend, and the bearing capacity of buttresses is also investigated in urban utility tunnel. The thrust force of 2 groups with 9 working conditions of DN800 ductile iron pipe is stimulated by the fluid-solid coupling FEM method. The internal force control section for the pipe and buttress in the designed bend is obtained. The research work can provide a technical reference for the design and safe operation of the urban utility tunnel.

Key words: urban utility tunnel; water supply pipeline; fluid-solid coupling analysis

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0802400、2017YFC0803300); 国家自然科学基金资助项目(51878510)
通信作者: 孙葵 E-mail:sunyansy1@126.com

为统筹各类管线规划、建设和管理工作,解决反复开挖路面、架空线网密集、管线事故频发等问题,国家支持各地推进城市地下综合管廊的建设^[1-2]。根据我国城市地下管廊发展形势,地下管廊建设发展面临两个主要需求:①各类管线进入管廊的功能需求;②多种管线密集布置下管廊运行的安全需求。城市管廊作为城市新建或改建、更新中主干管线的敷设环境,易受外部环境和管廊内管道敷设条件影响,尤其是大口径管道因其复杂的连接和支撑方式,管网系统受力和变形与传统直埋管道有较大变化,因此,管廊内各类压力管道弯管连接及其支墩受力安全是确保管道设施安全的关键问题之一。

城市管廊内敷设各种类型管道,需要采用吊架或支墩方式来架设管线。为此,针对大口径管道尤其是城市主干供水管道,与直埋式管道采取土体承担管道荷载的支撑体系明显不同,对于供水管道等压力管道,管廊内支撑体系除了需要承担管道与传输物的自重压力以外,因管道敷设线路和方向发生变化,管道内输送的有压介质如水流压力方向改变所产生的附加荷载是另一个需要重点分析的问题。对比传统直埋式管道^[3],这些荷载主要由管道周围土体及止推装置来消除各类弯管及其接头作用,而城市综合管廊中这些荷载则需要通过管道支撑体系传递给管廊结构,尤其是对于弯管区域这一荷载更

为显著,因此,采用支撑支墩方式架设大口径管道是管廊内管道结构力学分析的重点。目前,针对该问题的研究分析并不深入^[4-5],对管廊内供水压力管道重要组成部分——弯管区域支撑体系及其支墩部位的受力问题进行研究,考虑大口径 DN800 供水管道承插接头的不同连接角度,利用数值分析方法分析其受力状态,以期后续城市管廊供水管道设计提供指导和参考。

1 管廊内管道连接方式及其数值计算模型

根据我国现有城市管廊内 DN800 输水管道敷设方案,为系统分析不同管道连接角度对其管道接头及支墩受力影响,研究中选取两种连接方式包括两段管连接(5种角度)、三段管连接(3种角度和三通)9种连接形式,采用 ABAQUS 有限元分析软件,考虑管道内水体、管道结构及其耦合作用,采用 Co-execution 方法对结构内力进行分析计算。

1.1 几何模型与物理参数

不考虑管道间连接接头的受力,假定直接采用管道连续模型,管道建模的基本单位为米,管道建模依据 DN800 球墨铸铁管道类型,其中,直管段单节管道长为 6 m,弯管间单节管段长为 3 m,管道外径 842 mm,壁厚 11.7 mm。根据弯管区域角度及形式不同,共建立 9 种不同管道数值计算模型,详细的几何模型尺寸见表 1。

表 1 DN800 球墨铸铁管道计算工况与几何尺寸

Tab. 1 Dimension and conditions of DN800 ductile iron pipe

| 工况 | 管径 | 外径/mm | 壁厚/mm | 接头及连接角度 | 直管段长度/m |
|----|-------|-------|-------|----------------|---------|
| 1 | DN800 | 842 | 11.7 | 0°水平直管 | 6 |
| 2 | DN800 | 842 | 11.7 | 90°水平弯管 | 6+6 |
| 3 | DN800 | 842 | 11.7 | 45°水平弯管 | 6+6 |
| 4 | DN800 | 842 | 11.7 | 22.5°水平弯管 | 6+6 |
| 5 | DN800 | 842 | 11.7 | 11.25°水平弯管 | 6+6 |
| 6 | DN800 | 842 | 11.7 | 水平三通(90°) | 6+6+6 |
| 7 | DN800 | 842 | 11.7 | 45°垂直向上向下弯管 | 6+3+6 |
| 8 | DN800 | 842 | 11.7 | 22.5°垂直向上向下弯管 | 6+3+6 |
| 9 | DN800 | 842 | 11.7 | 11.25°垂直向上向下弯管 | 6+3+6 |

结合 DN800 供水管道敷设方式,配套支墩模型根据支墩位置分为直管支墩、水平弯管支墩、A 类垂直向上向下弯管支墩及 B 类垂直向上向下弯管支墩,建立的数值计算模型如图 1 所示。考虑计算效率及研究目的,支墩模型采用连续等效模型,管卡与支墩以圆环形式等效模拟,同时水平弯管支墩对受力区域进行加厚。有限元模型中管道及支墩采用 4

节点线性四面体单元(C3D4),液体采用 4 节点线性流体四面体单元(FC3D4)。

DN800 球墨铸铁管道及支墩材料均为球墨铸铁材料,设计分析中采用线弹性各向同性本构模型,密度为 7 050 kg/m³,弹性模量 E 取 169 GPa,泊松比取 0.275。管道内液体采用 ABAQUS/CFD 计算,选用牛顿流体模型,流体中的剪应力与剪应变不成线

性关系,物理模型按照 20 ℃ 水参数进行设置,密度 取 1 000 kg/m³,动力黏度为 0.001 Pa · s。

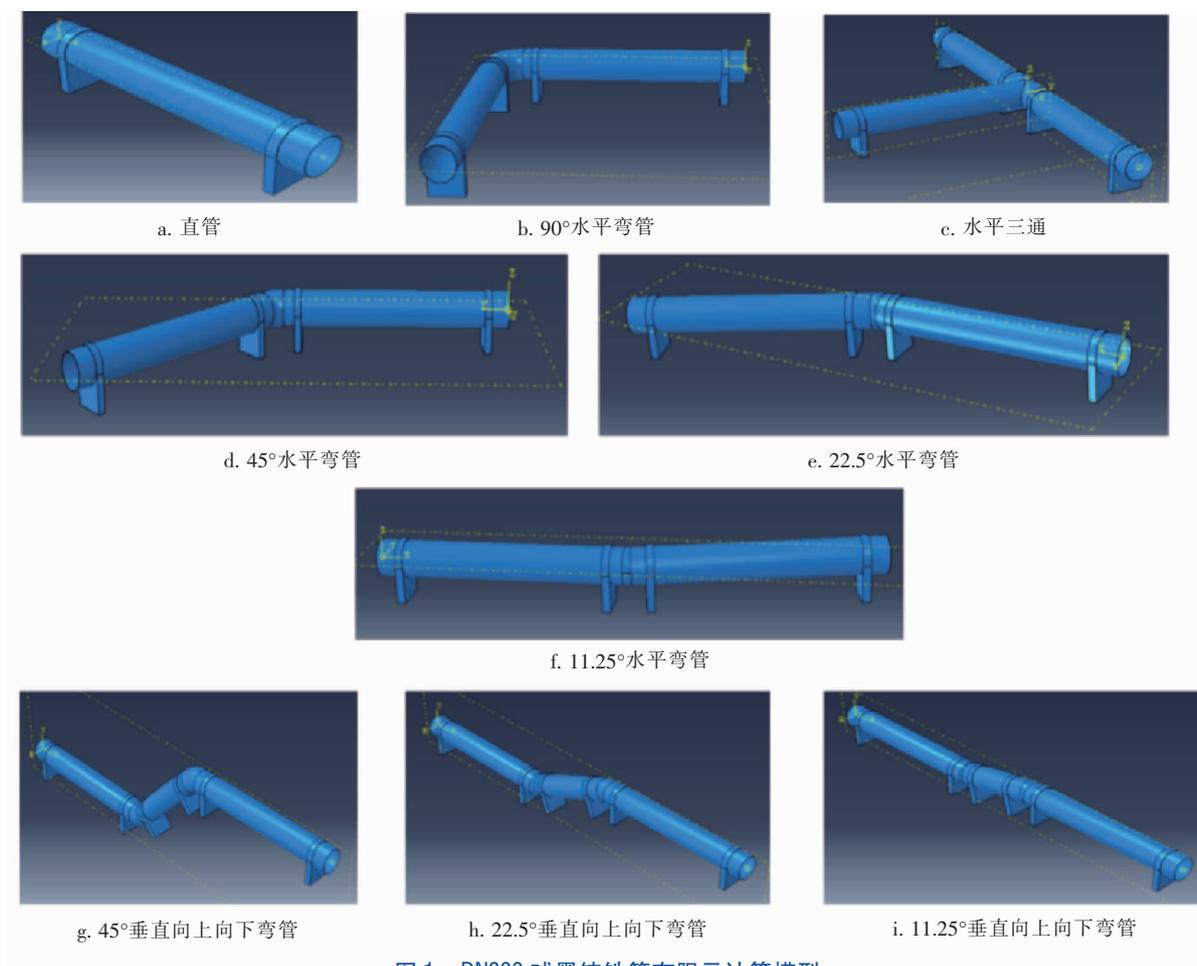


图1 DN800 球墨铸铁管有限元计算模型

Fig. 1 FEM model of DN800 ductile iron pipe

1.2 数值模型边界条件

DN800 球墨铸铁管数值计算模型的边界条件主要由荷载边界条件、几何边界条件以及接触面 3 部分组成。荷载边界条件主要由重力荷载及流体边界条件组成,其中流体边界条件中设置流速为 1.5 m/s 和设计水压为 1.1 MPa^[6],流体壁设置垂直于流体壁面的速度为 0,其余方向速度不加约束。几何边界条件主要涉及支墩底座,考虑其固定于城市综合管廊不可移动,因此下底面采用固支边界形式,约束 6 个方向位移,如图 2 所示。计算模型中共有两组主要接触面,其一为流体与管道间的流-固界面,其二为管道与支墩间的固体界面。流体与管道之间的流-固耦合界面采用 ABAQUS 软件中的流-固耦合边界。该边界将管道与流体耦合,使管道对流体施加约束作用,是实现流-固耦合计算中必不可少的界面定义。管道与支墩之间接触界面采

用的连接方式为绑定接触,并约束其相对转动。

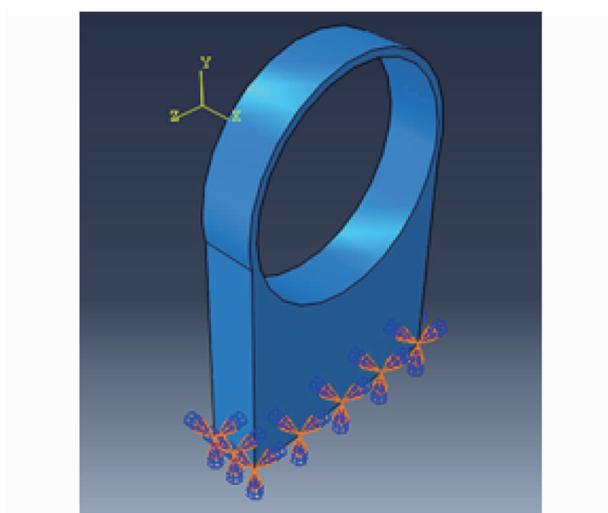


图2 DN800 球墨铸铁管支墩模型及其边界约束条件

Fig. 2 FEM model and its boundaries of DN800 ductile iron pipe support

2 管廊内弯管及支墩受力分析

结合建立的数值计算模型,计算中分为管道内流体计算、管道内水体-管道结构、管道与支墩体系 3 个计算分析步:首先采用 ABAQUS 流体计算不同角度管道水压力及流体惯性引起的荷载,然后将上

述荷载与管道结构共同作用进行流-固耦合分析,最后考虑管道和支墩体系分析支墩受力。

2.1 弯管受力分析

利用建立的数值计算模型,得到不同弯管角度在水流作用下的弯管受力,其受力云图如图 3 所示。

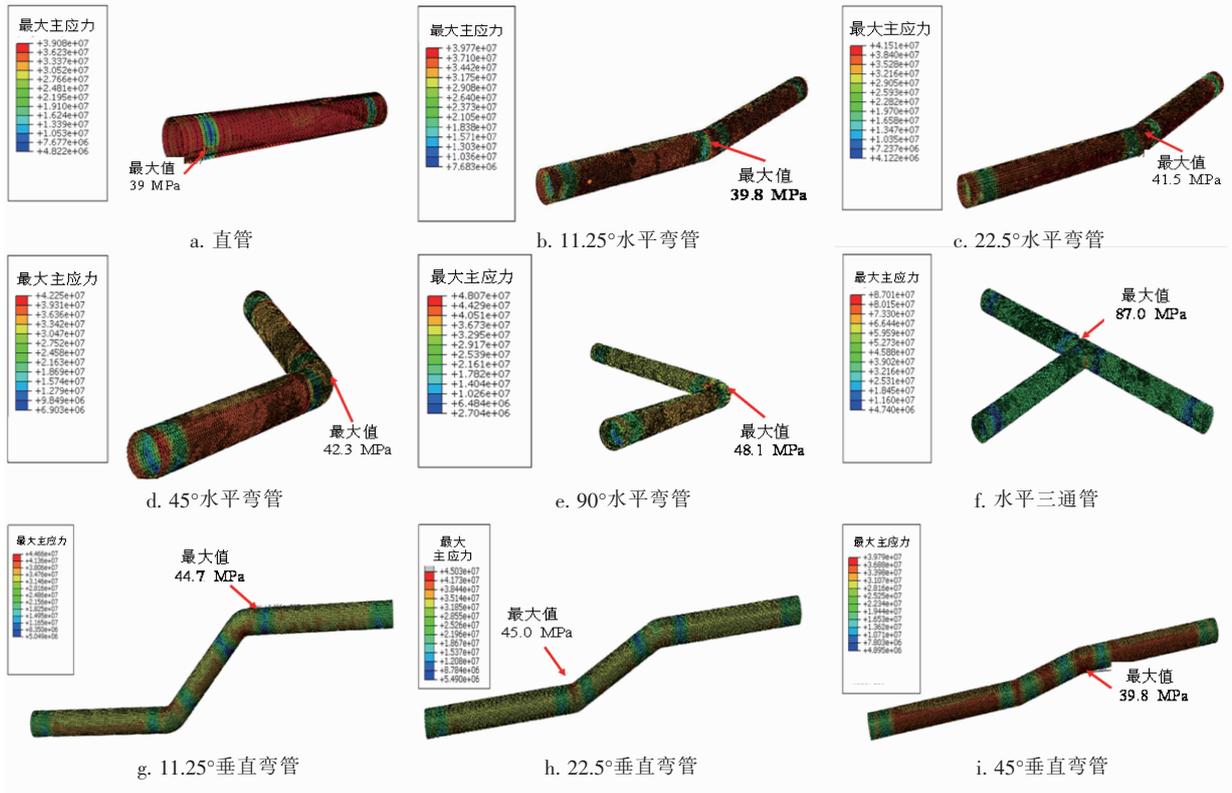


图 3 DN800 球墨铸铁管道数值计算最大主应力云图

Fig. 3 Maximum principal stress of DN800 ductile iron pipe

其中直管依据工况设置,为确保管道内流速及出口压力,流体在水流入口附近管壁产生的最大应力为 39.08 MPa。当管道中存在弯管区域时,管道中应力分布发生明显变化,最大主应力值从直管中的 39.08 MPa 增加到水平三通管中的 87.01 MPa,最大主应力位置由直管中入口区域变为弯管区域。同时,管道内应力集中并不明显,这主要是因为本身输入水压为 1.1 MPa,相较于本身水压弯管区引起的压力并不显著。此外可以清晰看到支墩区域由于有支墩协助管道承担水压,因此其管道压力相较周围区域较小。这主要是由于支墩上部以圆环形式(管卡与支墩下部连接)固定管道位置,同时弯管支墩在设计中对受力区域进行局部加厚,该形式支墩可以约束管道传递的水压荷载及变形,从而实现支墩协助管道承担管内水压的作用。结合表 1 中的管

道形式,将其分为直管、水平弯管、水平三通管、垂直弯管,对这 4 组不同弯管形式中管道最大主应力进行对比,发现不论水平弯管还是垂直弯管,其管道最大主应力均随弯管角度的增加而增大,且水平三通的管道主应力值远大于其他工况,可见该工况中水流角度改变导致压力对弯管产生的影响最显著。

2.2 支墩受力分析

考虑管道和支墩体系进行数值计算,图 4 给出了不同弯管形式下支墩的应力云图,其中直管工况中支墩为直管段支墩,其余弯管工况中应力图只放置弯管段支墩进行展示。根据支墩位置可以分为直管段支墩、水平弯管区支墩及垂直弯管区支墩 3 个类别。其中,直管支墩由于基本不承担由水流带来的附加推力,因此,不论在何种工况下其在 3 组支墩中最大主应力都较小,最大值仅为 17.12 MPa;当弯

管存在时,支墩除了需要协助管道抵抗水流压力外还需要承受由弯管带来的水流方向改变所产生的推力,支墩的主应力普遍增大。在弯管两侧支墩上产生的应力集中,出现在与管道相接圆环区域及支墩底部边界约束区域。支墩最大主应力随着弯管角度变化的对比发现,支墩最大主应力随着弯管角度的

增加而增大;其中水平弯管的最大主应力随角度增加更快,在水平弯管为 90° 的情况下,支墩最大主应力最大,达到了 26.64 MPa ,且水平弯管支墩中非增强区应力某些情况下会大于增强区,这主要是由于管道与支墩的约束连接形式会将管道带来的推力分配给整个支墩,而非主要由支墩增强区承担。

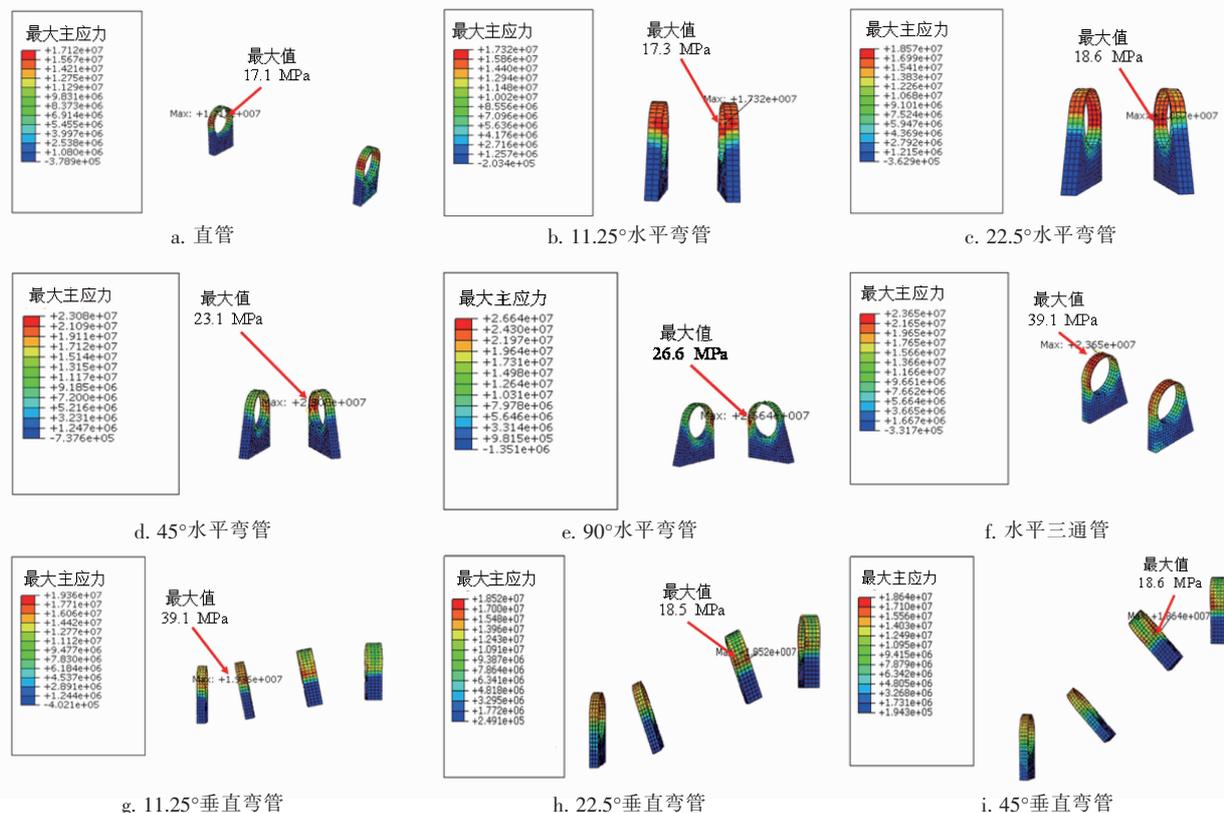


图4 DN800球墨铸铁管支墩主应力云图

Fig.4 Maximum principal stress of DN800 ductile iron pipe support

3 管廊内弯管和支墩设计控制截面

为了进一步分析 DN800 球墨铸铁管道结构水流作用下的弯管支墩体系中弯管及支墩受力控制截面,采用管道和水体流-固耦合分析进行计算。由于球墨铸铁管本身是均匀物质,其作为输水管道主体,主要由流体压力施加给管道内壁各方向水流压力,因此理解管道所受内部集中力,就可以更好地确定其控制截面及区域。据此选取数值结果中节点集中力作为水压分析参数,需注意该集中力为管道模型中某节点承受最大集中力,并非弯管区水流带来总推力。由于直管中水流压力较小,则相应直管中管道承受集中力也较小,在进口处取得最大值,最大值为 3.3 kN 。当管道形式为各种弯管时,均在弯管

处产生最大值,其中,垂直向上向下管中上部垂直弯曲点承受集中力更大,节点最大值为 24.3 kN 。图5给出了管道内部集中力矢量图,可以看出对于所有的弯管来说,在弯管处集中力的方向几乎是垂直于弯管外表面指向弯管外拱侧。同时,由于各工况中管道直管区域各方向承受集中力较均匀,这一压力是由水流压力带来,相较于水流压力带来的均匀集中力在弯管区域弯管外拱侧受到的集中力会有所增加,而对应弯管内拱侧受到集中力会有所降低,这一集中力差异也就表现为水流在弯管区域水流方向改变后水流压力给管道施加了额外的水流推力即不平衡推力,该推力方向垂直于弯管外表面指向弯管外拱侧。

结合数值计算可知,若水流流速较低时,管道内水体惯性力很小,几乎对管道内力不产生影响。不

同连接方式和角度管道内管道控制截面位置及其最大推力见表 2。

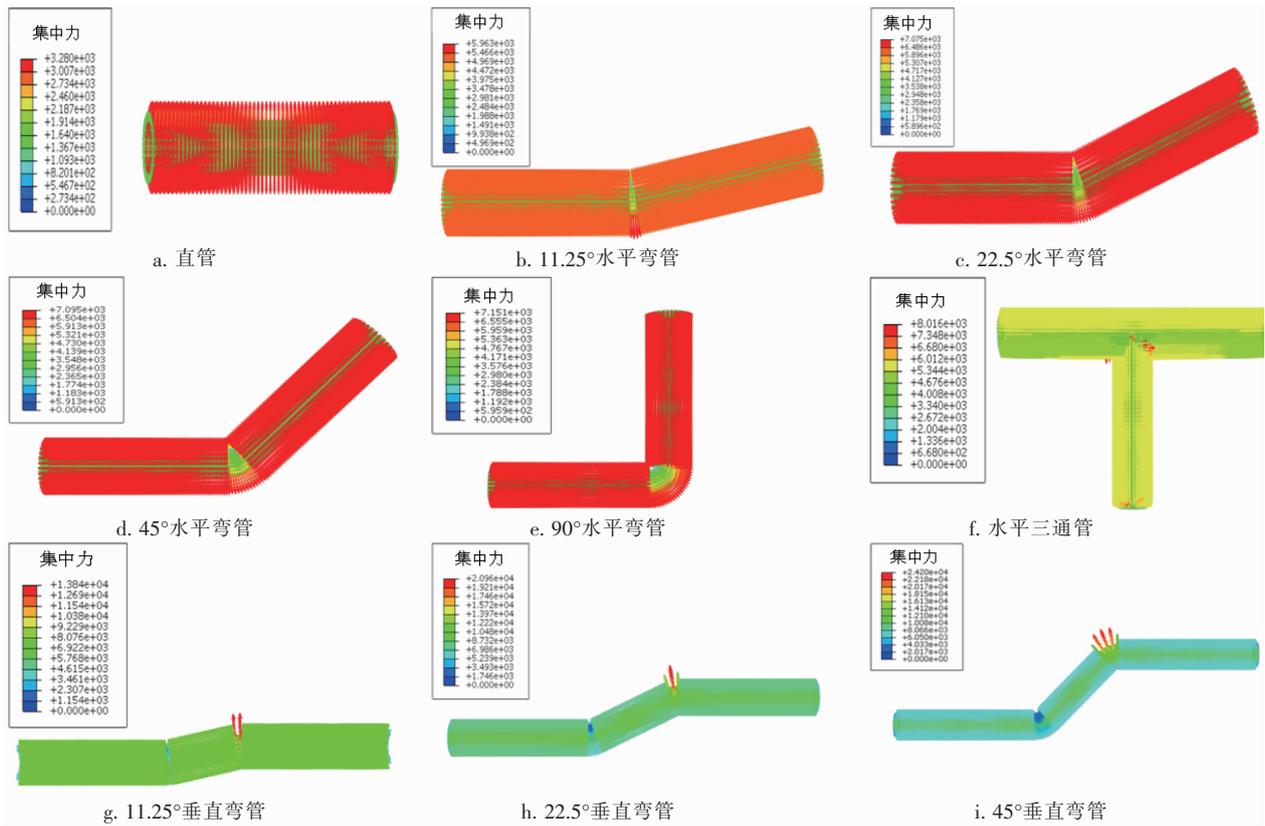


图 5 DN800 球墨铸铁管道应力集中力矢量图

Fig. 5 Concentration force of DN800 ductile iron pipe

表 2 DN800 球墨铸铁管道控制截面位置及集中力

Tab. 2 Control section location and concentration force of DN800 ductile iron pipe

| 管道类型 | 控制截面位置 | 某节点集中力最大值/N |
|----------------|--------|-------------|
| 11.25°水平弯管 | 弯管处 | 5 963 |
| 22.5°水平弯管 | 弯管处 | 7 075 |
| 45°水平弯管 | 弯管处 | 7 092 |
| 90°水平弯管 | 弯管处 | 7 152 |
| 水平三通(90°) | 弯管处 | 8 061 |
| 11.25°垂直向上向下弯管 | 向下弯管处 | 13 840 |
| 22.5°垂直向上向下弯管 | 向下弯管处 | 20 960 |
| 45°垂直向上向下弯管 | 向下弯管处 | 24 260 |

管廊内不同角度连接的管道因水流方向变化产生的不平衡推力,在部分工况尤其是弯管角度较小时相对较小。因此,在对管道支墩进行设计时,需要综合考虑弯管承担推力方向,针对推力施加位置及方向对支墩进行设计,从而确保支墩可以提供抵抗弯管区域中水流引起的额外推力。各个工况下最大

集中力对比表明,水平弯管与垂直向上向下弯管的集中力值都随着弯管角度的增加而增大,且水平三通管中集中力相较水平弯管影响大,与管道最大应力值变化趋势相符。结合管道和支墩整体体系而言,在含有弯管的管道中,最不利位置在弯管处,且垂直向上向下弯管上部垂直弯曲位置为最不利位置,设计时应注意对该处进行重点分析。

支墩受力分析表明,弯管区域附近的支墩应力最大。各工况中支墩最大应力图如图 6 所示。对比图 6 中应力集中区域,可以更好地判断支墩内部应力分配情况,从而得到支墩内力设计控制截面。

由图 6 可知,在支墩与水平弯管管道连接界面区域,即支墩圆环段,作为传递管道带来的水流压力及不平衡推力的主要部位,同时圆环截面较小,产生较大主应力。另一方面,设计中水平弯管支墩在推力方向通过加大厚度,可以抵抗推力引起的应力增加,起到降低最大主应力的作用。当弯管处产生附加水平推力后,推力的施加会对支墩加厚区相对远

端支墩底部约束产生弯矩,从而使得支墩的垂直角底部承受较大的拉力并产生应力集中,这一现象在45°及90°水平弯管中最为明显,应为支墩设计内力控制截面。同时,综合不平衡推力方向,垂直弯管支墩中由于受到的推力为斜向上或斜向下方向,对支墩底部产生的弯矩较小。对于垂直水平向上向下弯管而言,相较下部弯曲点则上部弯曲点荷载更大。从图5矢量图中可以看到,支墩需要约束管道施加

的向上推力,这一推力表现为支墩圆环区域上部出现应力集中。在实际设计中通过螺栓连接管卡及支墩圆环,支墩底座锚固螺栓作为不平衡推力主要承担单元。因此,圆环区域在垂直向上向下弯管支墩设计中应为内力设计控制截面,需考虑对该部位进行加强,以提高抵抗荷载的能力。表3详细给出了不同角度弯管支墩设计内力控制截面的位置及相应的主应力值。

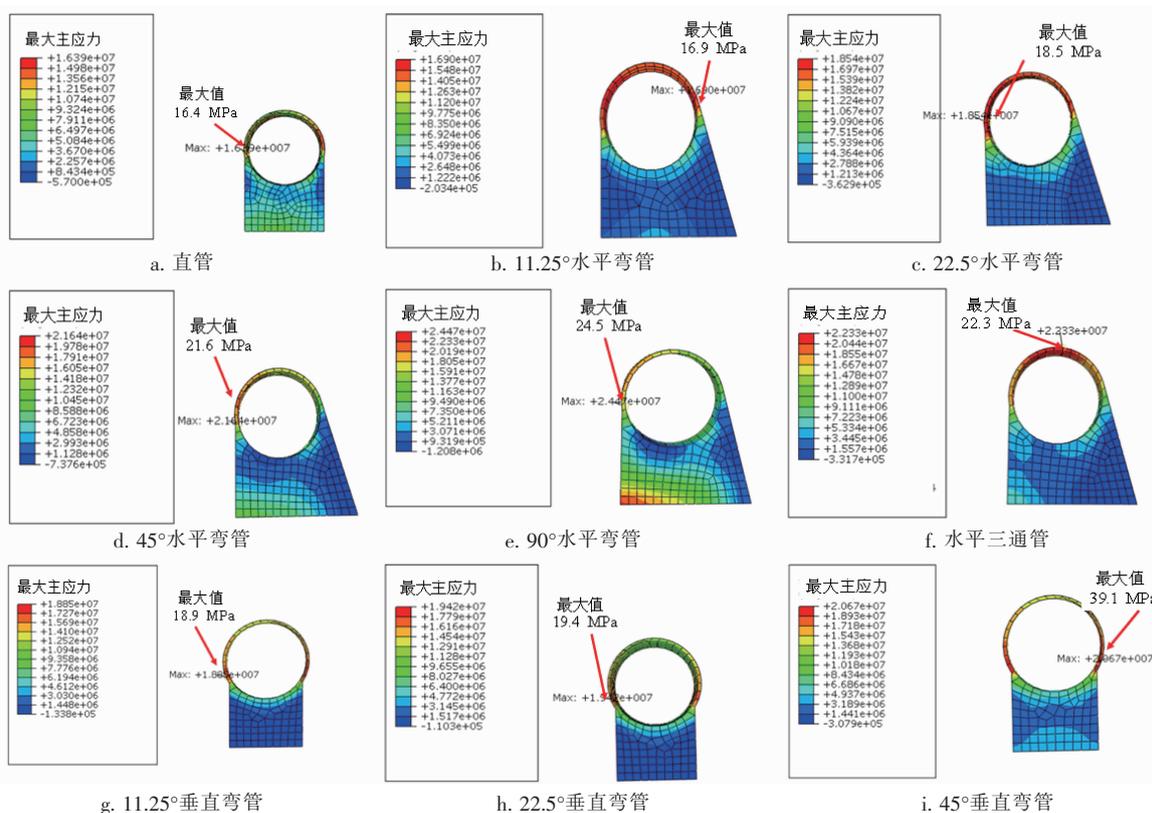


图6 DN800球墨铸铁管支墩各工况最危险应力云图

Fig.6 Dangerous stress profile of DN800 ductile iron pipe support

表3 DN800球墨铸铁管支墩控制截面及应力

Tab.3 Control section and stress of DN800 ductile iron pipe support

| 管道类型 | 控制截面 | 应力 MPa |
|----------------|-------------|--------|
| 11.25°水平弯管 | 圆环段 | 16.90 |
| 22.5°水平弯管 | 圆环段 | 18.54 |
| 45°水平弯管 | 垂直角底部、圆环段 | 21.64 |
| 90°水平弯管 | 垂直角底部、圆环段 | 24.47 |
| 水平三通(90°) | 垂直角底部、圆环段 | 22.33 |
| 11.25°垂直向上向下弯管 | 垂直向下弯管支墩圆环段 | 18.85 |
| 22.5°垂直向上向下弯管 | 垂直向下弯管支墩圆环段 | 19.42 |
| 45°垂直向上向下弯管 | 垂直向下弯管支墩圆环段 | 20.67 |

4 结论

针对城市综合管廊中大口径供水球墨铸铁弯管区域接头及支墩受力问题进行了研究,通过数值计算方法分析2组9种不同管道连接形式,计算了管廊内弯管及其支墩体系结构受力,并讨论其不同工况下的设计控制截面。该研究工作可为后续综合管廊中大口径供水压力管道设计提供指导与参考,并保障管廊运营安全。结合研究分析得到的主要结论如下:

① 管廊内球墨铸铁弯管区域因水流的方向和速度随着管道连接角度变化,从而引起管道内水流

压力方向改变,产生直接作用在弯管区域附加不平衡推力。

② 不论水平弯管或垂直弯管,管道及对应支墩主应力均随弯管角度增加而增加,其中水平三通管、90°水平弯管以及45°垂直弯管属于设计中控制工况。结合不平衡推力对管道内力作用分析,弯管处附近产生集中力最大值,且方向垂直于弯管外表面指向弯管外拱侧。

③ 水平弯管中不平衡推力对支墩垂直角产生弯矩,垂直角底部及圆环段会产生应力集中。垂直弯管中垂直向下弯管中属于危险区域,支墩圆环需承受向上的不平衡推力,设计中应注意分析该设计内力控制截面。

参考文献:

- [1] 卜令方,汪明元,金忠良,等. 我国城市综合管廊建设现状及展望[J]. 中国给水排水,2016,32(22):57-62.
Bu Lingfang, Wang Mingyuan, Jin Zhongliang, et al. State-of-the-arts and outlook of urban utility tunnel construction in China[J]. China Water & Wastewater, 2016,32(22):57-62(in Chinese).
- [2] 范翔. 城市综合管廊工程重要节点设计探讨[J]. 给水排水,2016,42(1):117-122.
Fan Xiang. Probe into the design of key nodes of urban municipal tunnel engineering[J]. Water & Wastewater Engineering,2016,42(1):117-122(in Chinese).
- [3] 吕艳彬,李皓明,李华成. 球墨铸铁管的结构设计及管道壁厚的合理选择[J]. 中国给水排水,2017,33(24):121-123.
Lü Yanbin, Li Haoming, Li Huacheng. Design of ductile iron pipe structure and selection of pipe thickness[J]. China Water & Wastewater,2017,33(24):121-123(in Chinese).
- [4] 王勖成. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社,1997.
Wang Xucheng. Principle and Numerical Method of Finite Element Method[M]. Beijing:Tsinghua University Press,1997(in Chinese).
- [5] 左熹,任艳,周恩全. 液化流动条件下隧道结构动力分布场研究[J]. 岩土力学,2016,37(增刊1):557-562.
Zuo Xi, Ren Yan, Zhou Enquan. Study of dynamic distribution field of tunnel structure under liquefied flow condition[J]. Rock and Soil Mechanics,2016,37(S1):557-562(in Chinese).
- [6] 10 S 505,柔性接口给水管道支墩[S]. 北京:中国计划出版社,2010.
10 S 505,Buttress for Flexible Interface of Water Supply Pipeline[S]. Beijing:China Planning Press,2010(in Chinese).



作者简介:胡群芳(1978-),男,湖北武穴人,博士,教授,主要从事城市市政运行安全与防灾、市政管网运行泄漏检测与监测样机工作等。

E-mail: huqunf@tongji.edu.cn

收稿日期:2020-06-10