

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2022.05.058

# 不同截面形式的波纹钢综合管廊结构受力性能分析

张琪<sup>1</sup>, 姬永红<sup>1</sup>, 周剑敏<sup>1</sup>, 张稳军<sup>2,3</sup>, 张高乐<sup>2,3</sup>

[1.上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市200092;2.天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室,天津市300354;3.天津大学建筑工程学院,天津市300354]

**摘要:**依托平遥古城基础设施提升改造项目中综合管廊建设工程,针对波纹钢综合管廊结构,利用有限元软件构建不同截面形式的三维土层-结构数值模型,探究不同截面形式对波纹钢管廊结构受力特点和变形规律的影响。同时揭示了不同断面形式的波纹钢管廊结构最不利受力位置,分析了超载作用对波纹钢管廊结构受力性能的影响。研究表明:矩形断面波纹钢综合管廊结构受力性能良好。圆形断面和马鞍形断面结构腰部位置横向变形和内力最大,矩形断面结构4个角处节点的变形和受力最大。不同断面形式的管廊结构底部均向内收缩变形,且管廊结构竖向变形量比横向变形量大。因此,在实际工程中,应关注波纹钢管廊结构变形量,尤其是结构竖向变形。

**关键词:**波纹钢综合管廊;数值模型;受力特点;变形规律

**中图分类号:** TU99

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2022)05-0228-04

## 0 引言

城市地下空间合理开发与利用对推动城市的可持续发展具有促进作用。为了有效地提升城市化水平、实现城市现代化建设,具有环保、长期使用和结构简单等诸多优点的城市地下综合管廊应运而生。目前,地下综合管廊多采用钢筋混凝土结构。然而,混凝土结构综合管廊存在一定缺陷<sup>[1]</sup>:一方面,混凝土对不同环境的适应性较差,抵抗地层不均匀变形能力较差;另一方面,混凝土预制管节运输不便,现浇管廊施工工期较长,同时也会产生建筑垃圾等。

近年来,波纹钢结构逐渐广泛地应用于排水系统、桥隧、涵洞和地下综合管廊等工程中。波纹钢结构不仅具有轻质、施工快捷、绿色环保、节约地下空间、强度高优势,还具有较强的适应变形的能力,因此能够有效地解决由于地层不均匀沉降对综合管廊结构造成的破坏。该结构断面线型丰富,可较好地适用于不同的地质条件<sup>[2]</sup>,主要断面形式包括马蹄形、圆形、矩形、椭圆形、半圆形、簸箕形等<sup>[3]</sup>。

目前,波纹钢结构受力性能研究已逐渐受到诸多学者关注。梁养辉等<sup>[4]</sup>基于试验工程,针对波纹钢管廊结构管内应变与填土压力变化规律展开了详细分析。孙海波等<sup>[5]</sup>针对管拱形和圆形截面管涵在不

同填土高度条件下的力学性能展开了对比分析,研究结果显示圆管截面应力峰值比管拱截面应力峰值大。詹蓉<sup>[6]</sup>以波纹钢电力隧道为研究对象,探究结构受力变形,并得出波纹钢隧道中下部变形较大的结论。刘刚<sup>[7]</sup>利用有限元分析软件揭示了波纹钢管涵结构的受力与变形分布规律。周剑敏<sup>[8]</sup>系统地探究了埋深、地层条件和超载对矩形断面波纹钢管廊结构受力和变形特征的影响。但对于不同断面形式的波纹钢管廊结构受力变形特征对比分析相对较少。

本文结合有限元分析软件建立三维数值模型,分别以圆形断面、矩形断面和马鞍形断面的波纹钢综合管廊结构为研究对象,揭示不同截面形式的波纹钢管廊结构受力性能和变形特点。研究成果可为今后波纹钢综合管廊结构设计提供理论参考。同时,在具体工程中,还应结合工程实际情况选择综合管廊最优断面形式。

## 1 波纹钢综合管廊工程背景

依托平遥古城基础设施提升改造项目,其地下综合管廊工程位于平遥古城内北大街,道路狭窄,仅有3.8~7 m,且要敷设10 kV和0.4 kV电力电缆、通信线缆、燃气、给水、雨水和污水等多种管线。

本项目工程范围内建筑物密集,道路狭窄、线型曲折,需敷设管线种类较多。且地下空间局促,与常规设计方式存在矛盾,难以满足现行规范的要求。因此,为了在需满足国家文物保护单位的保护要求前提下

收稿日期:2021-07-30

作者简介:张琪(1994—),女,硕士,助理工程师,从事地下结构设计工作。

实现狭小道路下方建设综合管廊,本工程提出管廊小型化设计方案,其标准断面为净尺寸1.6 m×2.7 m的矩形断面(见图1)。

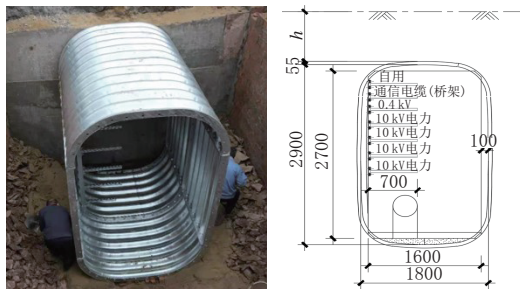


图1 平遥古城北大街综合管廊结构标准断面(单位:mm)

基于此,建立相同材质、波形和净高的管廊断面开展不同截面形式的波纹钢综合管廊结构受力和变形特征分析。其中,圆形断面内径2.7 m,马鞍形断面净尺寸为3.16 m×2.7 m。

## 2 土层-结构有限元数值模型

结构计算参数:综合管廊结构采用Q355波纹钢板,质量密度 $\rho=7850\text{ kg/m}^3$ ,弹性模量为206000 MPa,泊松比为0.3,采用线性弹性本构模型。三维数值计算中,波纹钢板选用壳单元结构模拟,其波纹钢板波形为200×55 mm(见图2),壁厚6.5 mm,钢板纵向宽度取1.2 m为一个管节。

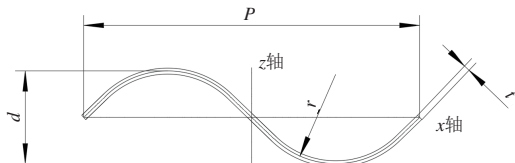


图2 有限元模型波纹钢板断面图

土层计算参数见表1。

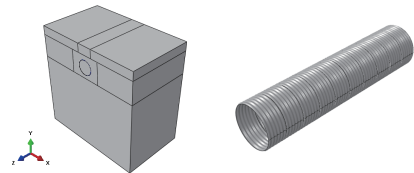
表1 地层物理参数

序号	岩性	湿密度 / (g·cm <sup>-3</sup> )	内摩擦角 / (°)	黏聚力 / kPa
②	粉土	1.93	25.7	10.3
④	粉土	1.71	25.4	12.3
⑤	粉土	1.90	25.9	11.1

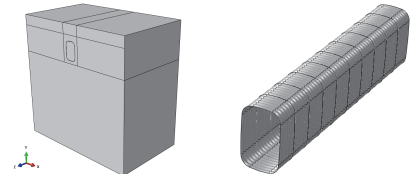
## 3 数值计算结果

### 3.1 不同截面形式的结构应力

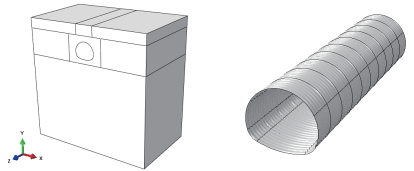
图3为利用有限元分析软件建立的圆形、矩形和马鞍形断面土体的结构模型。图4为3种截面形式的波纹钢管廊结构应力云图。由此可知,圆形断面和马鞍形断面腰部处应力值相对较大,矩形断面结构下方关键节点应力集中较为明显,管廊结构两侧应力相对较小。此外,纵向接缝位置易发生应力集中现象。矩形断面结构应力峰值相对较小,其应力值为



(a)圆形断面土体结构模型

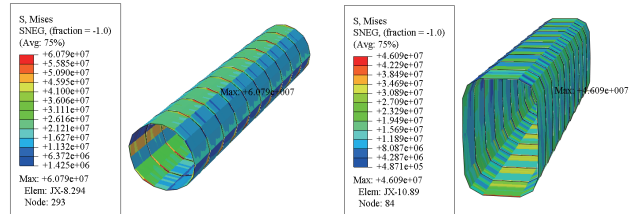


(b)矩形断面土体结构模型



(c)马鞍形断面土体结构模型

图3 波纹钢综合管廊结构计算模型



(a)圆形断面结构应力云图

(b)矩形断面结构应力云图

(c)马鞍形断面结构应力云图

图4 结构应力云图(单位:Pa)

46.09 MPa,与矩形断面结构应力峰值相比,圆形断面结构应力峰值增加了31.9%,应力值为60.79 MPa。马鞍形断面结构应力峰值增加近1倍,应力值为91.45 MPa。

### 3.2 不同截面形式的结构变形

图5为3种断面形式的波纹钢综合管廊结构开挖完成后土体结构变形云图。由此可知,圆形断面和马鞍形断面的管廊结构受土压力作用下结构两侧分别向外扩张,呈“横鸭蛋”形状。其中,马鞍形断面横向变形相对较大,横向变形峰值为4.24 mm。

矩形断面管廊结构变形峰值主要位于结构关键节点位置,横向变形量为1.84 mm左右,而结构两侧变形相对较小。

不同断面形式的管廊结构底部均向内发生隆起变形。马鞍形断面变形相对较大,变形值为15.26 mm。

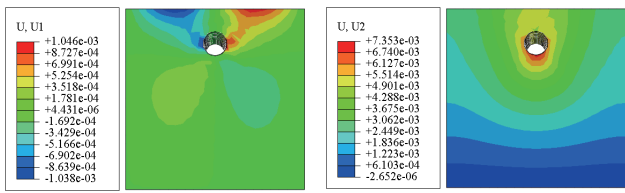


图5(a)圆形断面土体结构变形云图

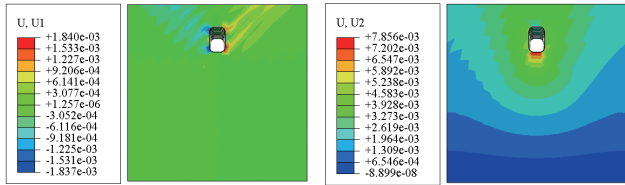


图5(b)矩形断面土体结构变形云图

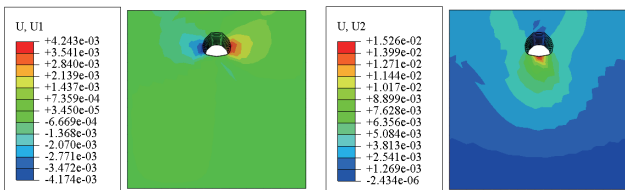


图5(c)马鞍形断面土体结构变形云图

图5 结构变形云图(单位:m)

圆形断面变形相对较小,变形值为7.35 mm。

### 3.3 不同截面形式的结构内力

提取中间管环各部位轴力汇总见表2。

表2 结构轴力汇总表 单位:kN

部位	圆形断面轴力	矩形断面轴力	马鞍形断面轴力
结构顶部	80.08	22.81	34.8
结构底部	82.77	54.05	40.03
拱肩	132.5	62.32	94.53
腰部位置	180.3	57.94	109.6
拱脚	145.1	73.36	99.81

由表2可知,圆形断面波纹钢综合管廊轴力值相对较大,马鞍形断面波纹钢综合管廊轴力值次之。且两种形式断面结构腰部位置轴力最大,拱肩和拱脚处结构受力次之,其轴力值相差不大。矩形断面波纹钢综合管廊轴力值相对较小,该断面结构关键节点位置受力最大。

这3种截面形式的结构顶部和底部受力均较小。

### 3.4 超载作用下波纹钢管廊结构受力与变形

#### 3.4.1 结构应力

以马鞍形断面波纹钢综合管廊为主要研究对象,在地层结构上加载20 kPa超载,其结构应力云图如图6所示。

由图6可知,超载作用下,结构应力峰值为115 MPa,与不施加超载作用的计算结果相比,应力值增大了25.75%,应力峰值仍出现在结构腰部位置。

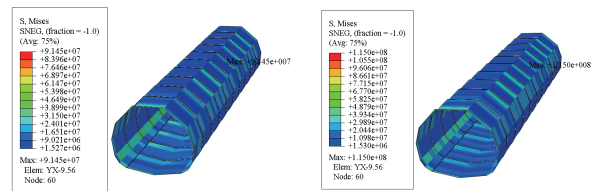


图6 马鞍形断面结构应力云图(单位:Pa)

(a)无超载作用 (b)超载作用

#### 3.4.2 结构变形

图7为超载作用下和不施加超载作用下马鞍形断面波纹钢综合管廊结构开挖完成后土体结构变形云图。从中可知,有超载作用对结构横向变形规律影响不大,超载作用下结构横向变形增大15.25%,横向变形为4.89 mm。

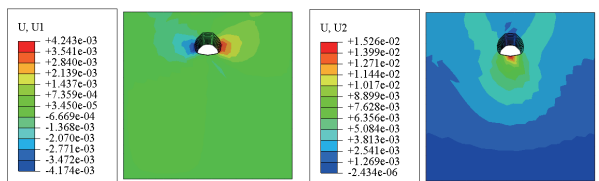


图7(a)无超载作用

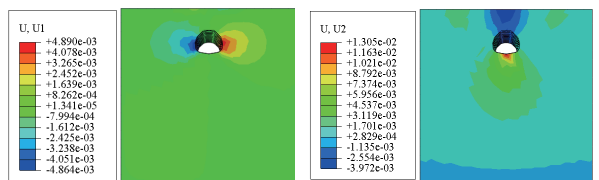


图7(b)超载作用

图7 马鞍形断面结构变形云图(单位:m)

由于超载的作用,结构呈“横鸭蛋”变形明显,且土层和管廊结构竖向变形有微小变化,结构底部隆起值略有减少,底部向内变形13.05 mm。与不施加超载作用的竖向变形结果相比,隆起值减少14.48%,结构顶部沉降量为3.97 mm。

#### 3.4.3 结构内力

表3为超载作用下和不施加超载作用下马鞍形断面波纹钢综合管廊结构轴力汇总表。由此可知,超载作用对结构轴力分布无明显影响。结构顶部和底部轴力值相对较小,结构腰部轴力值最大,结构轴力峰值增大8.48%,轴力最大值为118.9 kN。

因此,在波纹钢综合管廊结构设计时,应充分考虑超载作用对结构的影响。

## 4 结语

本文以圆形、矩形和马蹄形3种断面形式的波纹钢综合管廊结构为主要研究对象,结合有限元分析软件构建三维精细化数值模型,揭示了不同结构断面形式对波纹钢管廊结构受力与变形特征的影响

表3 马鞍形断面结构轴力汇总表 单位:kN

部位	无超载作用轴力	超载作用轴力
结构顶部	34.8	39
结构底部	40.03	43.05
拱肩	94.53	113.5
腰部位置	109.6	118.9
拱脚	99.81	110.5

规律,分析了不同断面形式的波纹管管廊结构受围岩压力作用下结构最不利受力位置,最后探讨了超载作用对波纹管管廊结构受力性能的影响。主要研究结论如下:

(1)围岩静压作用下,圆形断面和马鞍形断面的波纹管管廊结构腰部位置应力集中较为明显;矩形断面波纹管综合管廊结构两侧应力相对较小,关键节点位置应力值相对较大。

(2)围岩静压作用下,圆形断面和马鞍形断面的波纹管管廊结构变形方式为横向扩张,其中马鞍形断面横向变形相对较大。矩形断面管廊结构变形量最大值主要位于关键节点位置,即矩形4个角分别向两侧扩张,而管廊两侧横向变形相对较小。

不同断面形式的管廊结构底部均向内收缩变形,其中马鞍形断面结构变形相对较大,圆形断面结构变形最小。管廊结构竖向变形量比横向变形量大,若结构变形过大而产生渗漏水,严重则会影响到结构稳定性、丧失结构承载能力。因此,在实际工程中,应关注波纹管管廊结构变形量,尤其是结构竖向变形。

(3)围岩静压作用下,圆形断面波纹管管廊轴力

值最大,矩形断面波纹管管廊轴力值最小。圆形断面和马鞍形断面的波纹管管廊结构轴力最大值位于结构腰部位置,而矩形断面波纹管管廊结构关键节点位置受力最大。因此,在矩形断面管廊结构设计时,应重点关注结构4个角处的受力。

(4)矩形断面波纹管综合管廊结构受力性能良好,且该断面内部空间利用率相对较高,适用于道路狭窄并需敷设综合管廊的情况。

(5)超载作用对波纹管管廊结构的受力变形特征有一定程度影响,因此,在波纹管综合管廊结构设计时,应充分考虑超载作用对结构的影响。

#### 参考文献:

- [1] 刘文平.波纹管管廊受力变形特性研究[J].山西建筑,2019,45(22):62-63.
- [2] 米军,罗玉林.浅析城市综合管廊截面类型[J].江西建材,2017(21):48-52.
- [3] 赵苗.复杂荷载作用下综合管廊波纹结构的极限承载力[D].济南:山东建筑大学,2019.
- [4] 梁养辉,李祝龙,胡滨,等.波纹管结构综合管廊受力特征研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019(1):183-187.
- [5] 孙海波,刘鹏飞,刘保东,等.不同断面线形波纹管涵结构力学性能研究[J].公路交通科技,2015,32(10):75-81.
- [6] 詹蓉.装配式波纹管电缆隧道应用研究[J].四川建材,2019,45(7):152-153.
- [7] 刘刚.高填方路堤下钢波纹管涵洞受力与变形特性研究[D].西安:长安大学,2012.
- [8] 周剑敏.矩形波纹管地下综合管廊结构受力特征分析[J].城市道桥与防洪,2020(7):306-310,313.

(上接第211页)

#### 参考文献:

- [1] 王波,李成.透水性铺装与城市生态及物理环境[J].工业建筑,2002,32(12):29-31.
- [2] 舒丽琴,江秀英,孔梅晴.透水混凝土的性能及应用综述[J].科学咨询,2017(23):54-55.
- [3] 张贤超,尹健,池漪.透水混凝土性能研究综述[J].混凝土,2010(12):54-57.
- [4] 宋中南,石云兴.透水混凝土及其应用技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [5] 李彦坤,胡小波,陈清己,等.球模型包裹法设计透水混凝土配合比[J].混凝土,2008(9):29-32.
- [6] 张松涛,贾欣悦,宋卓,等.无砂再生透水混凝土配合比设计[J].混凝土与水泥制品,2016(12):6-12.
- [7] NGUYEN D H, SEBAIBI N, BOUTOUIL M, et al. A modified method for the design of pervious concrete mix [J].Construction and Build Materials,2014,73:271-282.
- [8] 张巨松,张添华.影响透水混凝土强度的因素探讨[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2006,22(5):759-763.
- [9] 吴冬,刘霞,吴小强,等.成型方式和砂率对透水混凝土性能的影响[J].混凝土,2009(5):105-107.
- [10] 张朝辉,杨江金,王沁芳,等.透水混凝土制备工艺研究[J].新型建筑材料,2008,35(9):1-4.