

# 非均匀地层中节段式综合管廊 受力变形规律研究

张园园<sup>1</sup>, 丁选明<sup>1\*</sup>, 张意<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆建工住宅建设有限公司, 重庆 400015)

**摘要:** 城市综合管廊能合理利用地下空间, 扩大公共区域, 提高城市的综合承载及运作能力, 在打造海绵城市、发展新型城镇化建设和智慧管理等方面有巨大的潜力和优势。本文依托重庆市巴南区综合管廊试点工程, 通过建立 Plaxis 3D 三维数值模型探究非均匀地层中节段式综合管廊的受力变形规律。研究表明: 纵向的地层不均匀对节段式综合管廊有明显的负向影响, 地基发生不均匀沉降并导致管廊管节之间的竖向剪应力变大, 造成管节错动甚至连接破坏; 管廊整体发生弯曲变形, 管节之间会产生较大的轴向应力, 易发生张拉破坏; 管廊管节之间的错动及轴向应力会随着时间增长而增大, 出现破损、漏水等情况的可能性增加, 实际工程中管廊连接处的处理面临着较大的挑战。

**关键词:** 节段式综合管廊; 有限元模拟分析; 管廊受力规律; 非均匀地层; 结构沉降变形

中图分类号: TU990.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)04-0388-08

## Study on stress and deformation of segmental utility tunnel in inhomogeneous strata

ZHANG Yuanyuan<sup>1</sup>, DING Xuanming<sup>1\*</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Chongqing Construction Residential Engineering Co., Ltd., Chongqing 400015, China)

**Abstract:** Urban utility tunnel can make rational use of underground space, expand public areas, improve the comprehensive carrying and operational capacity of cities, and have great potential and advantages in building sponge cities, developing new urbanization construction, and intelligent management. In this paper, a three-dimensional numerical model of Plaxis 3D was established to explore the stress and deformation of segmental utility tunnel in inhomogeneous strata. The results show that the longitudinal inhomogeneity of the strata has a significant negative impact on the segmental utility tunnel, and the uneven settlement of the foundation leads to the increase of the vertical shear stress between the pipe sections of the utility tunnel, resulting in the dislocation of the pipe sections and even the connection failure. The overall bending deformation of the utility tunnel will produce large axial stress between the pipe joints, which is prone to tensile failure. The dislocation and axial stress between pipe joints will increase with time, increasing the possibility of damage and water leakage. The treatment of pipe joints in practical projects is facing great challenges.

**Key words:** segmental utility tunnel; finite element simulation analysis; stress of the utility tunnel; inhomogeneous strata; settlement deformation of structure

## 0 引言

城市综合管廊能够合理开发和利用地下空间、拓展公共区域、提高城市承载力, 从而提升新型城

市化发展质量, 创造新的经济增长动能, 因此越来越受到国家重视<sup>[1-2]</sup>。由于预制管廊具有柔性好、施工方便、低耗环保的特点, 在我国多地得到了广泛的应用。预制装配式混凝土综合管廊有多种预制形

收稿日期: 2023-06-01

作者简介: 张园园 (2000—), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事地基处理方面的研究。E-mail: zhangyy.cqu@foxmail.com。

\*通信作者: 丁选明 (1980—), 男, 湖南宁乡人, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程、土力学与地基基础工程、土动力学与工程振动等方面的研究。E-mail: dxmhu@163.com。

式, 其中预制节段式综合管廊应用比较广泛<sup>[3]</sup>。然而, 作为一种浅埋式结构, 节段式综合管廊易受到地基不均匀沉降等影响产生开裂、渗水进砂等病害, 严重影响管廊的使用寿命。作为一种重要的地下生命线设施, 地下综合管廊的变形和损坏将引起更多的城市地质灾害及次生灾害, 因此开展节段式综合管廊结构的理论研究非常有必要。

由于节段式综合管廊的构造特性, 其接头受力变形是目前研究的重点。冯立等<sup>[4]</sup>通过振动台模型试验展开地震激励下管廊接缝研究, 结果表明, 接缝构造对于管廊减震是有利的。但由于接头处受力变形特性的复杂性, 多用数值模拟的方法进行研究。薛伟辰等<sup>[5]</sup>进行足尺实验, 发现在加载过程中试件接头始终满足平截面假定, 为之后预制管廊的建模计算等提供了依据。尚武孝<sup>[6]</sup>通过 Plaxis 数值模拟, 认为等效界面能模拟剪力键的抗剪性能, 且计算量大大减少, 对节段式管廊的建模计算进行了优化。王鹏宇等<sup>[7]</sup>通过建立数值模型, 对现浇混凝土接头的变形量和应力值进行计算分析, 为解决不均匀沉降和防水问题提供参考。白旭峰等<sup>[8]</sup>基于上海、南京管廊实际沉降数据, 通过 ANSYS 软件建立软土地区下的有限元模型并进行计算分析, 发现长期不均匀沉降有可能造成节段式综合管廊的连接破坏并造成防水节点失效。针对土方回填以及接头对管廊沉降的影响, 赵文昊等<sup>[9]</sup>对平口和企口两种接头类型的预制拼装管廊进行有限元数值建模分析, 发现企口型接头的承口端容易失效, 最后提出了管理差异沉降的等级标准。

相比于其他隧道结构, 地下综合管廊的主要特征是埋深较浅, 因此在某些地段, 比如跨地裂缝地段、软弱土层地带等, 管廊及土层受力变形特性是不同的, 而这些差异是设计建造地下管廊工程要考虑的特殊点。《城市综合管廊工程技术规范》(GB 50838—2015)<sup>[10]</sup>中, 明确强调了建设场地地基土有显著变化时, 综合管廊安装施工前, 应充分了解地基非均匀沉降带来的影响并采取应对措施。根据重庆市巴南区地下综合管廊试点工程中 YK217—YK223(标段 1)的地基情况, 发现该段岩层呈“凹”形且岩层坡度较大, 其上覆素填土呈现出极大的不均匀性。而目前关于不均匀地层中的节段式综合管廊受力变形规律的相关研究较少, 因此本文基于巴南综合管廊项目出现的地基不均匀问题展开数值模拟研究, 旨在探究在这种非均匀地层中管廊的受力变形情况。

### 1 工程概况

本研究依托重庆市巴南区综合管廊试点工程标段 1, 该标段节段式综合管廊标准断面结构图如图 1 所示。每节均有 8 个腋角预留孔用以张拉  $\Phi 15.2$ PC 钢绞线, 并采用单孔锚具进行锚固, 实现预制管廊纵向连接。

标段 1 的工程地质剖面图如图 2 所示, 主要地层为素填土、粉质黏土及砂岩中风化带, 地下水水位埋深为 8~24 m, 所呈现的不均匀地层特征易造成结构不均匀沉降。

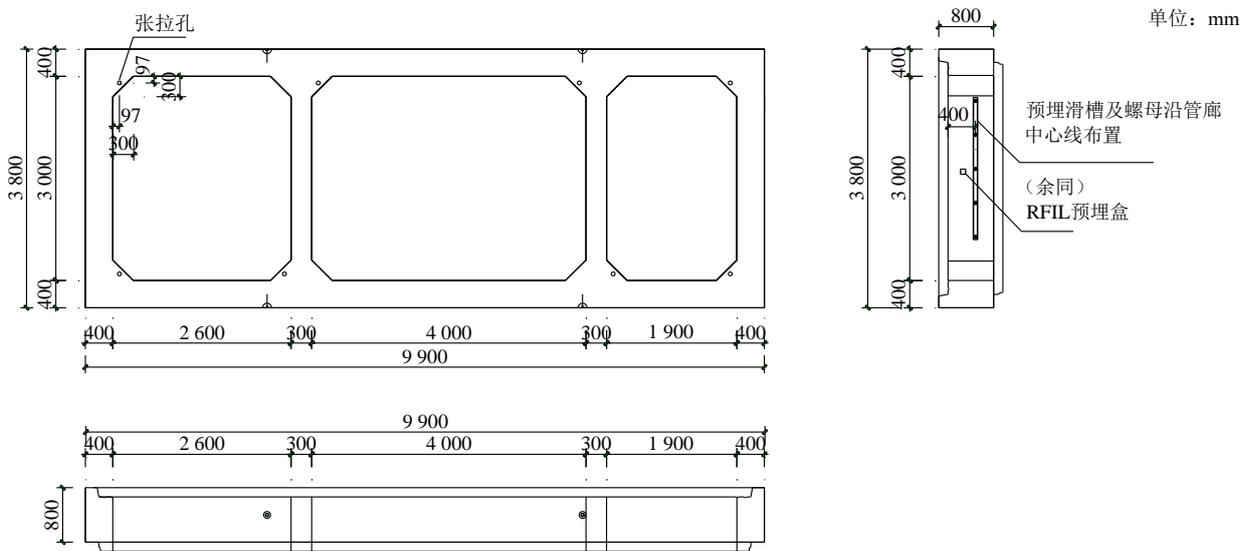


图 1 节段式综合管廊标准断面结构图  
Fig. 1 Standard section of segmental utility tunnel

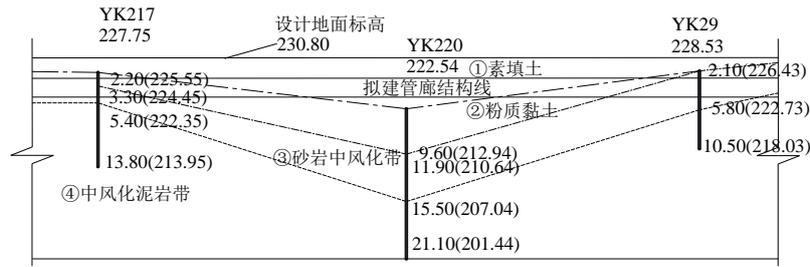


图2 工程地质剖面图

Fig. 2 Geological profile

## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立

#### (1) 模拟假定及边界条件

本文计算模型采用位移边界条件：设定模型上表面自由，下表面固定，位移为0，其他各方向表面只限制法向位移。为方便研究，下部设置坡度 $i=1/6$ 的砂岩地层，考虑到实际工程中采用分层填土，将上部设置为换填土层，岩土物理力学参数见表1，管廊位于换填土层。

表1 岩土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil strata

名称	排水类型	$\gamma_{\text{unsat}}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$c_{\text{ref}}/(\text{kN}/\text{m}^2)$	$E'/(\text{kN}/\text{m}^2)$	$\mu$	$\varphi/(\text{°})$
换填土	排水	18.80	21.00	3.0	6 160	0.20	28
砂岩中风化带	排水	23.15	23.45	25.5	$9.99 \times 10^5$	0.35	28

同时，为研究地层不均匀程度对节段式综合管廊受力变形的影响，设置不同坡度的砂岩地层，包括 $i=0$ 、 $i=1/12$ 、 $i=1/4$ 、 $i=1/3$ ，上部为换填土。

考虑到管廊的可能影响范围，且该管廊为不对称结构，最终确定三维数值模型尺寸为宽( $x$ ) $\times$ 长( $y$ ) $\times$ 高( $z$ )=70m $\times$ 240m $\times$ 30m，考虑到本文的研究目的是地基土起伏对管廊纵向受力特性的影响，而管节刚度比较大，为了使观察到的结果更加明显，将管节长度设为8m，整体模型长度取240m，共30节。

根据所研究的内容并结合工程地质剖面图进行简化建模，三维数值模型如图3所示。

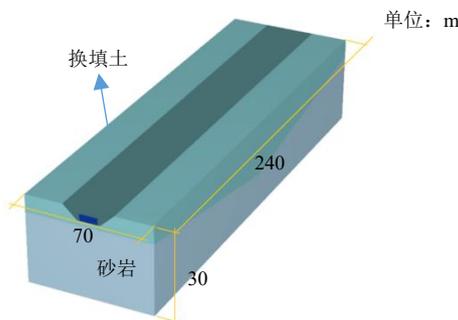


图3 三维数值模型

Fig. 3 Three-dimensional numerical model

#### (2) 单元选择

土体和管廊结构均采用十节点四面体实体单元进行有限元离散。管节-土接触面及管节-管节的接触面设置界面单元。根据尚武孝<sup>[6]</sup>对于综合管廊

接头抗剪行为的研究，通过对比按界面单元模拟和按实体单元建模导致的结果差异，验证了可以通过等效界面模拟剪力键接头的力学行为，且采用等效模拟的计算效率较高。由于该节段式综合管廊的管节之间是承插接头，故本文通过设置界面强度折减因子 $R_{\text{inter}}$ 等效模拟承插接口的抗剪行为，这里取经验值 $R_{\text{inter}}=0.666$ 。基于Plaxis线单元的适用范围，选择点对点锚杆模拟钢绞线，点对点锚杆与管节连接图如图4所示，近似地将钢绞线两端分别连在相邻两管廊的中点，其参数为 $EA=4 \times 10^4 \text{ kN}$ ，其预应力可以在施工过程中添加。

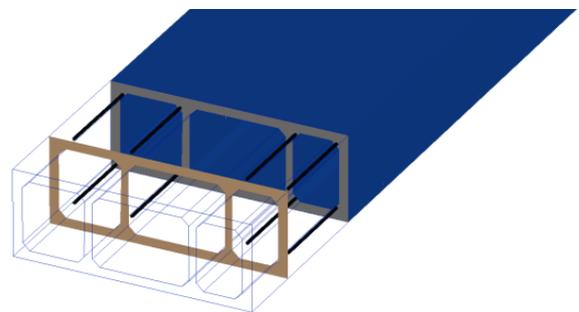


图4 点对点锚杆与管节连接图

Fig. 4 Point-to-point anchor rod and pipe section connection

#### (3) 材料本构模型及参数设置

根据勘察报告和重庆市土壤数据，结合不同土质的力学行为特点及土体参数资料，岩土体采用摩尔-库伦模型模拟，所用参数如表1所示。

管廊结构采用线弹性模型模拟，其参数包括：

$\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ 、 $E = 3.15 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ 、 $\nu = 0.15$ , 采用摩尔-库伦模型描述界面单元的行为。

(4) 模型建立

本模型模拟的是管廊的基坑开挖和结构回筑全过程, 因此按照每阶段管廊回填的厚度设置几何表面, 方便划分网格后形成类组。基坑采用放坡开挖, 坡面需设置护坡。

(5) 网格划分

由于本次数值模拟所用的模型较大, 根据计算研究需求, 仅对管廊及周边土体进行网格加密, 以此原则设置网格全局疏密度和局部疏密度。图 5 为网格生成器自动生成的结果, 模型生成的土单元数为 272 612, 节点数为 398 889。

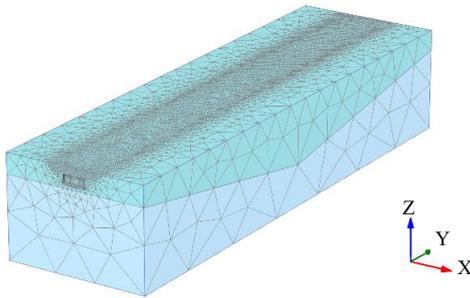


图 5 划分网格结果图  
Fig. 5 Grid division result

2.2 施工过程模拟

按照实际施工过程进行模拟, 分阶段施工流程按表 2 设置。

表 2 分阶段施工流程

Table 2 Phased construction process

分阶段施工	对应工况
Initial phase	初始地应力平衡
W1-W2	基坑分层开挖
D	铺垫层
T1	位移重置为 0, 安装管廊并在点对点锚杆施加预应力 70 kN, 模拟实际张拉
T1-T8	回填至设计标高, 每阶段激活 0.5 m 的土层

3 结果分析

3.1 非均匀土层下节段式综合管廊节点断面(管节连接处) 受力变形特性

(1) 节点断面受力分析

基于 Plaxis 软件特性, 对于管廊节点断面的受力特性主要通过分析管节之间的界面计算结果进行研究。

最终节点竖向剪应力沿管廊长度变化情况如图 6 所示。从图 6 中可以看到, 由于模型沿  $Y=120\text{m}$  对称, 因此节点竖向剪应力也沿  $Y=120\text{m}$  对称。管廊两端的界面剪应力较大, 最大值为  $101.9 \text{ kN/m}^2$ 。

(2) 节点断面相对位移分析

a) 竖向相对位移

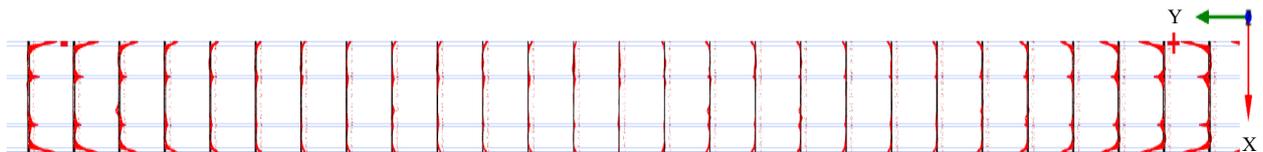
相对位移是指界面节点对之间的位移差值。Z 向的界面相对位移就是管节之间的竖向错动, 本模型计算结果中的相对位移是左侧管节相对于右侧管节的位移。

沿管廊长度的管廊界面竖向相对位移如图 7 所示。由于模型沿  $Y=120\text{m}$  对称, 因此界面竖向相对位移也呈对称分布, 两端的管节之间相对竖向错动最大, 约为  $0.033 \text{ mm}$ , 竖向错动沿着管廊纵向向中部逐渐减小, 中部管节之间的竖向错动最小。

b) 管节轴向变形

根据 Plaxis 设置, Y 向的界面相对位移就是管节之间的轴向变形。

$Y=8\text{m}$  处界面轴向变形云图如图 8 所示, 为第一节与第二节管节之间的相对轴向位移。由于管廊自身的刚度较大, 轴向变形沿着管廊高度的中轴对称, 下部轴向变形为正, 即管节之间下部相对挤压; 而上部轴向变形为负, 即管廊上部管节之间将出现拉力, 此时管节之间即为上拉下压。



剪应力  $T_2$  (放大 0.05 倍)  
最大值= $101.9 \text{ kN/m}^2$   
最小值= $-101.5 \text{ kN/m}^2$

图 6 最终节点竖向剪应力沿管廊长度变化情况

Fig. 6 Vertical shear stress of the final node changes with the length of the utility tunnel

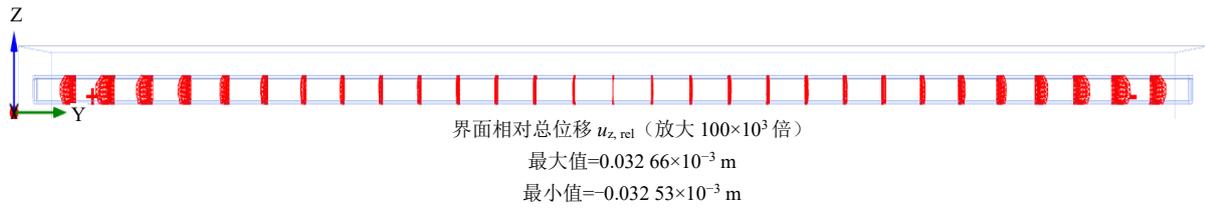


图7 沿管廊长度的管廊界面竖向相对位移

Fig. 7 Vertical relative displacement of the interface along the length of the utility tunnel

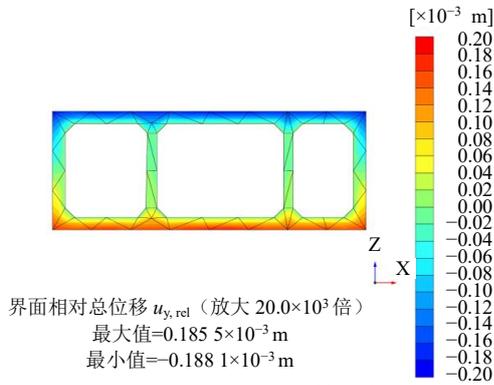


图8 Y=8m处界面轴向变形云图

Fig. 8 Axial deformation nephogram of the interface at Y=8m

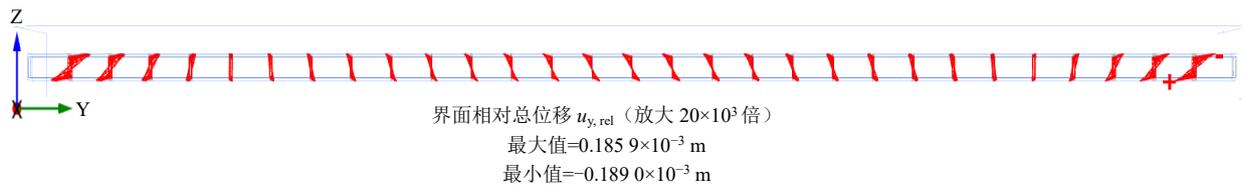


图9 沿管廊长度的管廊界面轴向变形

Fig. 9 Axial deformation of the interface along the length of the utility tunnel

### 3.2 非均匀土层下节段式综合管廊纵向受力特性

#### (1) 管廊结构应力分析

不同基岩坡度下管廊轴向应力云图如图 10 所示。对于基岩坡度为 0 的情况，管廊所受轴向应力在 500 kPa 以内，且沿长度方向变化不大。而对于坡度  $i=1/6$  的地层，应力最大处在管廊两端的顶板及底板，最大值为 7460 kPa。轴向应力沿着管廊长度方向变化较大，顶板轴向应力由受拉变为受压，底板轴向应力由受压变为受拉，可见地层起伏对管廊轴向应力影响非常显著。随着地基压缩性增大，地基沉降变大，进而导致管廊纵向的弯曲变形，使轴向产生拉压应力。

#### (2) 管廊结构沉降位移分析

基岩坡度  $i=1/6$  的模型中，管廊回筑及地基回填过程中管廊的沉降情况如图 11 所示，可以看出，从管廊两端到中部，沉降由小变大，在管廊的中部，管廊沉降最大，且随着回填高度  $h$  的增大，管廊各部位沉降值也不同，总体来说，就是两端增幅小，中间段沉降增幅大，且随着回填高度的增加，阶段增量位

沿管廊长度的管廊界面轴向变形如图 9 所示，同竖向相对位移类似，轴向变形整体关于  $Y=120$  m 对称分布，两端变形较大（方向上拉下压），沿着管廊纵向向中部逐渐减小。当轴向变形减小为 0 后，反向（方向变为上压下拉）继续沿管廊纵向增大直至管廊的中点。由此看来，管廊如同受荷的梁结构，上下都会出现拉力，出现拉力的位置为管廊两端的顶板以及管廊中部的下板，因此在设置钢绞线时，可以通过考虑上下部可能的受拉情况进行对应设置，以此达到节省材料的目的。

移也在增大。回填完毕时，管廊中部沉降为 0.27 m，而两端沉降只有 0.09 m，即存在近 20 cm 的不均匀沉降，且在管廊两端，这种不均匀沉降更加明显。在这种情况下，管廊纵向可能因拉应力过大而较容易出现裂缝，或者因受剪错节而出现漏水、漏砂的情况，危害管廊里埋设的水管、天然气管道等设施。对于这种地层起伏的情况，应考虑对地基土进行换填，或者对两端节段的连接接头进行特殊处理。

不同基岩坡度下管廊最终的沉降情况如图 12 所示。坡度为 0 时，地基呈整体下沉，管廊最终沉降以及节段之间的错动随坡度的增大而增大，坡度变化对管廊整体沉降影响较局部影响显著。

为探究管廊不同截面随岩体坡度变化的沉降情况，提取  $Y=0$  m、 $Y=60$  m 以及  $Y=120$  m 处的管廊沉降值，如图 13 所示。可以看到管廊的沉降并不是随着坡度的增大线性增大的，而是在地基压缩性大的地方沉降得较快，在地基压缩性小的地方沉降得较慢。

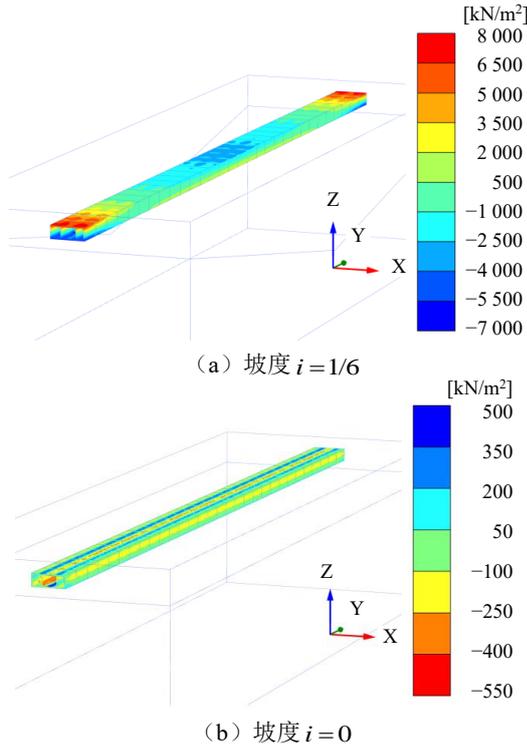


图 10 不同基岩坡度下管廊轴向应力云图

Fig. 10 Axial stress nephogram of the utility tunnel under different slopes of bedrock

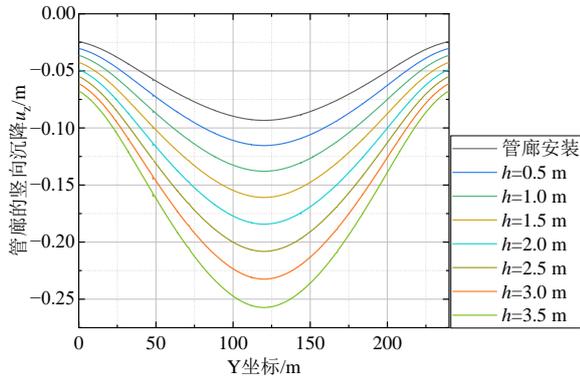


图 11 基岩坡度  $i=1/6$  时管廊回筑及地基回筑过程中管廊的沉降情况

Fig. 11 Settlement of the utility tunnel during installation and foundation backfilling with a bedrock slope of  $i=1/6$

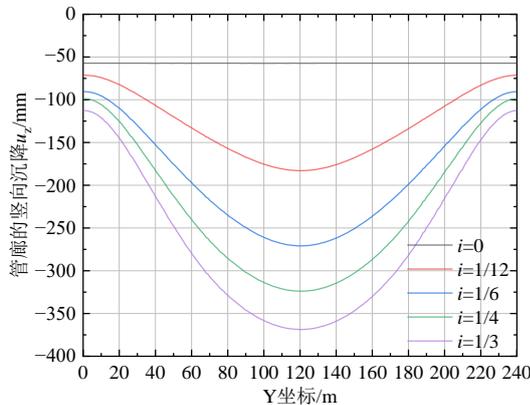


图 12 不同基岩坡度下管廊最终的沉降情况

Fig. 12 Final settlement of the utility tunnel under different slopes of bedrock

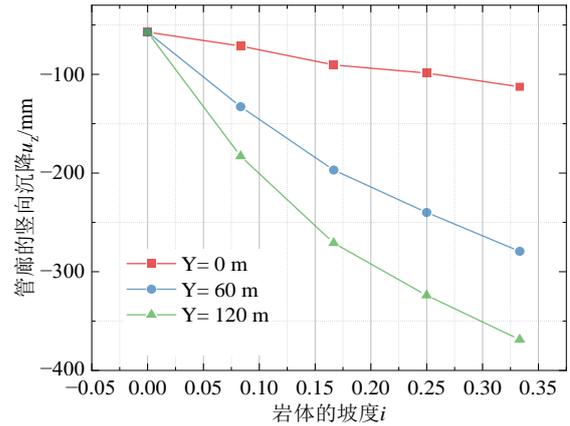


图 13 管廊不同截面随岩体坡度变化的沉降图

Fig. 13 Settlement of different sections of the utility tunnel with the changes of bedrock slope

(3) 考虑土体长期沉降的管廊结构位移分析作为城市生命线工程也是百年工程, 一旦出现结构破坏, 综合管廊的修复工程量大, 对社会也有较大影响, 因此讨论管廊结构的受力变形情况一定要考虑长期作用的影响。在实际工程中, 回填料受雨水渗透等作用, 变形模量减小, 随着时间变化, 填土的超孔隙水压力消散, 填土会变得密实。杨德志等<sup>[11]</sup>分析了黄土的湿陷机理, 得出了一种用有限元软件进行刚度折减等效模拟固结的方法。参考其研究, 浸水固结过程中土的自重变大且刚度变小, 以此为基础进行 Plaxis 等效固结模拟。在回填结束后增加等效固结的阶段, 通过增大填土重度, 同时折减弹性模量来考虑固结作用对管廊结构位移的影响。

具体来说, 以上述模型为基础, 在分阶段施工 T8 后分别增加阶段 G1~G7, 每阶段只更换填土材料, 等效固结的模拟见图 14。各阶段的换填土材料重度均为  $21 \text{ kN/m}^3$ , 而弹性模量分别为  $5\ 544 \text{ kPa}$ 、 $4\ 928 \text{ kPa}$ 、 $4\ 312 \text{ kPa}$ 、 $3\ 696 \text{ kPa}$ 、 $3\ 080 \text{ kPa}$ 、 $2\ 464 \text{ kPa}$ 、 $1\ 848 \text{ kPa}$ (即折减系数分别为 90%、80%、70%、60%、50%、40%、30%)。

不同等效固结程度下基岩坡度  $i=1/6$  时管廊的变形如图 15 所示(图中的  $k$  表示折减系数), 可以看出, 由于地基中部软两边硬, 固结沉降后管廊呈凹状挠曲, 这种情况下管廊所受的地基反力大致呈凸状分布。管廊顶板的轴向应力由受拉变为受压, 管廊底板轴向应力由受压变为受拉。随着折减系数的减小, 即随着固结程度的加深, 管廊的不均匀沉降也在不断增大。当折减系数为 0.3 时, 最大差异沉降值达到了 45 cm, 即不均匀地基下管廊需要特别考虑长期固结沉降的影响。

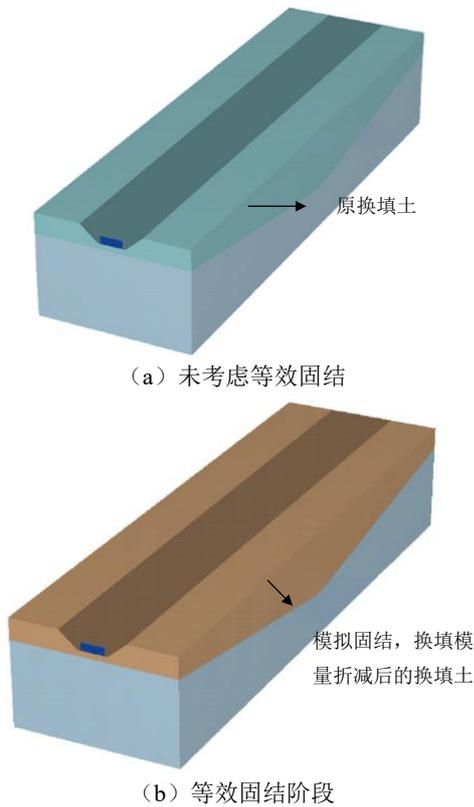


图 14 等效固结的模拟

Fig. 14 Simulation of equivalent consolidation

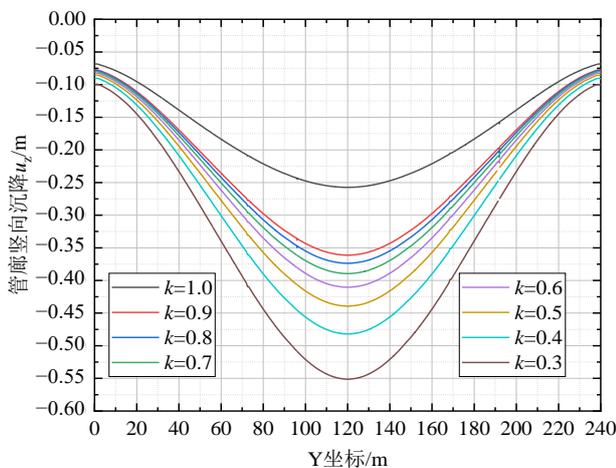


图 15 不同等效固结程度下基岩坡度  $i=1/6$  时管廊的变形  
 Fig. 15 Deformation of utility tunnel at bedrock slope  $i=1/6$  under different degrees of consolidation

## 4 结论

本文通过有限元方法模拟非均匀地层中节段式管廊从施工到使用的全过程受力情况,重点探究了非均匀地层中管廊节间和纵断面的受力变形,并且考虑了固结作用下管廊的变形情况。对位于凹形不均匀地层中的管廊,得出以下结论:

(1) 在不均匀地层的影响下,两端管节之间的竖向剪应力以及竖向错动较大,沿着管廊纵向向中

部逐渐减小,中部管节之间的剪应力以及竖向错动最小。

(2) 管廊如同上部受荷的梁,上下部在使用过程中均会出现拉力,出现拉力的位置为管廊两端的顶板以及管廊中部的底板,因此在设置钢绞线时,可以通过考虑上下部可能的受拉情况进行对应设置,以此达到节省材料的目的。

(3) 从管廊纵截面看,节段式综合管廊为柔性结构,纵向地基的改变对于节段式综合管廊轴向应力影响非常显著。随着地基压缩性增大,地基沉降变大,进而导致管廊的弯曲变形,轴向产生拉压应力,且随着上覆土压力变大,沿管廊长度的各部位沉降值也不同,两端沉降较中部小。

(4) 考虑等效固结后,管廊的沉降与增加覆土的沉降类似,管廊呈凹状挠曲,且随着地基压缩性增大,管廊结构受上覆土压力影响增大。总的来说,考虑固结后管节之间的错动加大,轴向应力也会变大,更容易出现漏水等情况,因此对于节段式综合管廊,特别要注意地基处理以及管廊的节间防水处理措施。

## 参考文献

- [1] 刘慧芬,程春香,吴朵.浅埋暗挖隧道下穿综合管廊施工技术研究[J].地基处理,2021,3(1):76-81.  
LIU Huifen, CHENG Chunxiang, WU Duo. Research on construction technology of shallow-buried excavation tunnel undercrossing utility tunnel[J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(1): 76-81.
- [2] 袁勇,朱力,禹海涛,等.综合管廊抗震分析研究进展综述[J].隧道建设(中英文),2022,42(11):1821-1831.  
YUAN Yong, ZHU Li, YU Haitao, et al. Review on seismic analysis of utility tunnels[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(11): 1821-1831.
- [3] 欧阳效勇,霁建平,朱力,等.长节段大吨位预制综合管廊施工工艺研究与应用——以雄安新区装配式综合管廊项目为例[J].隧道建设(中英文),2022,42(8):1473-1481.  
OUYANG Xiaoyong, XIAN Jianping, ZHU Li, et al. Research and application of construction technology of long-section and large-tonnage prefabricated utility tunnels: a case study of Xiong'an new area, China[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(8): 1473-1481.
- [4] 冯立,丁选明,王成龙,等.考虑接缝影响的地下综合管廊振动台模型试验[J].岩土力学,2020,41(4):1295-

1304.  
FENG Li, DING Xuanming, WANG Chenglong, et al. Shaking table model test on seismic responses of utility tunnel with joint[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(4): 1295-1304.
- [5] 薛伟辰, 胡翔, 王恒栋. 上海世博园区预制预应力综合管廊力学性能试验研究[J]. *特种结构*, 2009, 26(1): 105-108, 116.  
XUE Weichen, HU Xiang, WANG Hengdong. Experimental studies on mechanical properties of PPMT in Shanghai expo area[J]. *Special Structures*, 2009, 26(1): 105-108, 116.
- [6] 尚武孝. 预制综合管廊接头抗剪性能与等效模拟方法[J]. *铁道勘察*, 2020(3): 37-43.  
SHANG Wuxiao. Study on shear resistance and equivalent simulation method of prefabricated composite pipe gallery joint[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2020(3): 37-43.
- [7] 王鹏宇, 王述红, 阿力普江·杰如拉, 等. 现浇管廊接头力学行为数值模拟与分析研究[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(12): 1788-1793.  
WANG Pengyu, WANG Shuhong, JIERULA Alipujiang, et al. Numerical simulation and analytical study on mechanical behavior of cast-in-place utility tunnel joint[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2018, 39(12): 1788-1793.
- [8] 白旭峰, 张晶, 苏晓果. 软土地区长期不均匀沉降对预制综合管廊的影响研究[J]. *低温建筑技术*, 2018, 40(10): 86-87.  
BAI Xufeng, ZHANG Jing, SU Xiaoguo. Effects of soft soil foundation with long-term differential settlement on precast concrete utility tunnel[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2018, 40(10): 86-87.
- [9] 赵文昊, 彭斌, 王恒栋, 等. 预制拼装综合管廊接头的容许差异沉降分析[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(增刊1): 434-442.  
ZHAO Wenhao, PENG Bin, WANG Hengdong, et al. Analysis of permissible differential settlement for assembled precast utility tunnel with different joint types[J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(S1): 434-442.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 城市综合管廊工程技术规范: GB 50838—2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Code for Urban Utility Tunnel Engineering: GB 50838—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [11] 杨德志, 冯世进, 熊巨华, 等. 湿陷性黄土中桩基的数值模拟[J]. *低温建筑技术*, 2010, 32(2): 98-100.  
YANG Dezhi, FENG Shijin, XIONG Juhua, et al. Numerical simulation of pile foundation in collapsible loess[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2010, 32(2): 98-100.