

# 背向沉管下沟管道应力计算解析模型及验证

山丽洁<sup>1</sup>,张立松<sup>1\*</sup>,杨清纯<sup>2</sup>,李龙生<sup>1</sup>,赵新波<sup>2</sup>

(1.中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,山东 青岛 266580; 2.青岛理工大学理学院,山东 青岛 266520)

**摘要:**考虑沉管下沟过程中的管土耦合作用,基于弹性地基梁理论,通过运用挠曲线方程与变形协调条件,构建背向沉管下沟管道应力解析模型。为验证解析模型的准确性,利用 ABAQUS 建立考虑土体塑性本构关系的有限元模型进行对比分析。对比规范模型、解析模型及有限元模型关于拱起管段长度、悬空管段长度、管道最大应力及最大弯矩等参数的结果可知,解析模型与有限元模型的误差分别为 3.58%、3.50%、4.89% 和 3.52%,而规范模型与有限元模拟的误差最大可达 13.40%。结果表明,管道下沟过程中,最大应力首先出现在沉管中间位置处,开挖 80 m 后出现在管沟开挖端部;在接触沟底前,管道出现 3 个应力集中点,在接触沟底后,管道出现 4 个应力集中点。这种基于相互作用机理的建模方法能够更准确地表征管道-土体系统的力学响应特性,从工程实践角度而言,该模型的建立显著提升了管道系统力学分析的精度,对保障长输管道的结构完整性和运行安全性具有重要的工程应用价值。

**关键词:**背向沉管;应力分析;解析模型;数值验证

**中图分类号:**TU991.05;TE973 **文献标志码:**A

**引用格式:**山丽洁,张立松,杨清纯,等.背向沉管下沟管道应力计算解析模型及验证[J].山东大学学报(工学版),2026,56(2):112-120.

SHAN Lijie, ZHANG Lisong, YANG Qingchun, et al. Analytical model and verification of stress calculation for backward immersed pipe in ditch[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(2):112-120.

## Analytical model and verification of stress calculation for backward immersed pipe in ditch

SHAN Lijie<sup>1</sup>, ZHANG Lisong<sup>1\*</sup>, YANG Qingchun<sup>2</sup>, LI Longsheng<sup>1</sup>, ZHAO Xinbo<sup>2</sup>

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China; 2. College of Science, Qingdao Technology University, Qingdao 266520, Shandong, China)

**Abstract:** The coupling effect between the pipe and soil was considered during the process of sinking the pipe into the trench. Based on the theory of elastic foundation beams, a stress analysis model for the pipeline under the back sinking pipe into the trench was constructed using the deflection curve equation and deformation coordination conditions. To verify the accuracy of the analytical model, a finite element model considering the plastic constitutive relationship of soil was established with Abaqus for comparative analysis. When the results of the standard model, analytical model, and finite element model were compared on parameters (length of the arch section, length of the suspended section, maximum stress, and bending moment of the pipeline), the errors between the analytical model and the finite element model were found to be 3.58%, 3.50%, 4.89%, and 3.52%, respectively. Meanwhile, the maximum error between the standard model and the finite element model was observed to reach 13.40%. The results showed that during the lowering of the pipeline into the trench, the maximum stress first occurred at the middle position of the immersed tube. After 80 m of excavation, it appeared at the end of the trench excavation. Before contact with the trench bottom was made, three stress concentration points were identified in the pipeline. After contact with the trench bottom was established, four stress concentration points were observed in the pipeline. This modeling method, based on the interaction mechanism, was demonstrated to more accurately characterize the mechanical response characteristics of the pipeline-soil system. From an engineering practice

收稿日期:2025-06-04

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME024);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(19CX02034A)

第一作者简介:山丽洁(2001—),女,山东淄博人,硕士研究生,主要研究方向为管道安全。E-mail:15610512973@163.com

\* 通信作者简介:张立松(1982—),男,山东临朐人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为 CO<sub>2</sub> 封存与管道安全。

E-mail:lisongzhang1982@163.com

perspective, the model was confirmed to significantly improve the accuracy of pipeline system mechanical analysis. It is considered to hold important engineering application value for ensuring the structural integrity and operational safety of long-distance pipelines.

**Keywords:** reverse immersed tube; stress analysis; analytical model; numerical validation

## 0 引言

背向沉管下沟是一种在天然气或油气管道施工中常用的施工方法,特别是在地质条件复杂、水位较高或需要减少对环境影响的情况下更为常见。相比于传统的开挖施工法,背向沉管下沟所需的土地面积更小,对周边环境的破坏也更少,有利于资源的最大化利用和环境保护<sup>[1-4]</sup>。在背向沉管下沟过程中,受土壤、水压以及自重等多种载荷作用,管道将处于复杂的应力状态和较高的应力水平,极易引起过大的管道变形甚至破裂。为此,开展背向沉管下沟过程中的管道应力分析研究至关重要。

目前,国内外学术界在沉管下沟管道应力分析领域已进行了广泛而深入的研究,并积累了丰富的学术成果。文献[5]建立了管径为 1 219 mm 的纵向连续冷弯管管段双侧单向沉管下沟有限元模型,论证了纵向连续冷弯管管段沉管下沟的可行性。计算分析了下沟过程中管道应力的变化规律,得到管道在不同影响因素作用下最大应力的变化趋势,给出了应力控制措施。文献[6]创新性地采用土弹簧模型来模拟管道与土壤间的相互作用,并借助 ANSYS 软件,分别针对水平直管段与水平弯管段建立了沉管下沟管道应力分析模型,有效预测了管沟开挖的极限长度。文献[7]则将管道沉管下沟的力学行为简化为超静定梁模型,推导了不同管沟深度下管道最大应力的数学表达式,并通过有限元模拟进一步验证了不同深度下管道应力的变化规律。文献[8]利用面面接触有限元模拟技术,成功构建了单向及背向沉管下沟管道应力的数值分析模型,揭示了不同工况下管道应力的分布特征。文献[9]针对沉管下沟作业的具体方式和受力特性,选取  $D 1\ 219\ \text{mm} \times 21.4\ \text{mm}$  的 X80 管道作为案例,利用有限元方法分别对管段端部与管段中间沉管下沟两种工况下的管道应力进行数值模拟,提供了详实的数据支持。文献[10-11]则聚焦于中俄东线管道项目,通过构建有限元模型深入分析沉管下沟过程中管道的应力分布规律,结合应力-强度理论对管道的安全性进行综合评估,并提出管道沉管下沟的可行性评估标准,为实际工程提供了重要的参考依

据。文献[12]则基于有限元方法,系统探讨了土壤性质、管道壁厚、支墩配置、下沟深度等多个因素对管道悬空长度及最大应力的影响机制。

国外学者在沉管下沟管道应力分析领域的直接研究相对较少,但在吊装下沟管道应力分析方面却取得了显著成就。文献[13]利用 PIPLIN 程序对加拿大安大略省的 TransCanada 管道项目进行了有限元模拟,详细展示了该管道在下沟过程中的应力状态。文献[14]基于梁模型理论,推导出管道下沟时的应力方程,指出通过精准调控一个或两个吊点的提升高度,即可有效管理管道应力水平。文献[15]则结合弹性地基梁与欧拉梁模型,构建了管道分段模型,深入分析了下沟流程中管道的内力变化与应力状态。文献[16]识别了影响管道下沟应力水平的关键因素,包括吊点数量、各吊点间的相对高度以及管沟深度,并指出吊点数量的选择需紧密依据管道直径与壁厚。文献[17]通过整合弯曲正应力与扭转切应力方程,构建了弯扭组合条件下的管道下沟应力分析框架,特别探讨了不同约束条件对应力水平的影响。文献[18]在国际管道研究委员会的支持下,成功建立了水平面内弯曲应力的解析模型与竖直面内弯曲应力的有限元模型,并提供了管道组合应力的计算方法。

目前,无论是国内还是国外学术界,在沉管下沟的管道应力分析领域已取得了众多成果,这些成果主要集中在采用有限元方法对管道应力进行分析,在沉管下沟的管道应力解析模型研究相对较少,主要依赖于现有规范模型<sup>[19]</sup>。然而,现有规范模型在构建过程中采用了过度的简化假设,未能充分考虑实际工况中的非线性因素,致使计算结果的精度不够,无法满足工程应用中对计算可靠性与预测准确性的严格要求。由于上述问题,现有规范模型的计算精度一直是工程设计人员关注的焦点之一。基于上述研究背景,本研究通过引入管道与土体间的弹性约束作用,依据弹性地基梁理论,结合挠曲线微分方程及变形协调条件,建立了背向沉管下沟工况下的管道力学解析模型。在此基础上,推导了管道应力分布的解析计算方法。为验证所提模型的准确性,采用有限元数值模拟方法进行对比分析,结果表明该解析模型的计算结果与数值模拟

结果具有良好的-致性,从而验证了所提理论模型的合理性与可靠性。

## 1 模型描述

### 1.1 物理模型

背向沉管下沟,是一种将预制好的管道段沉入预先挖好的沟槽中的施工方法。这一过程中,管道段往往是通过浮运设备运送到施工现场,并利用重力将其沉入沟槽底部,实现管道的铺设。管沟开挖

时,首先在管段的一端用2台单斗挖掘机在管道两侧对称地进行管沟开挖,当管段较长时,可用4台单斗挖掘机从管段两端同时开挖,以加快开挖进度。开挖时为了保护防腐层,挖掘机的斗铲在距管道200 mm处缓慢入土开挖,也可在管道上加自制的防腐层保护器<sup>[20]</sup>。当管沟开挖达到一定长度后,管端在重力的作用下开始下沉;继续开挖,管段靠自身的挠度贴附于管沟底部,这样就可完成整段管线下沟作业,如图1所示。

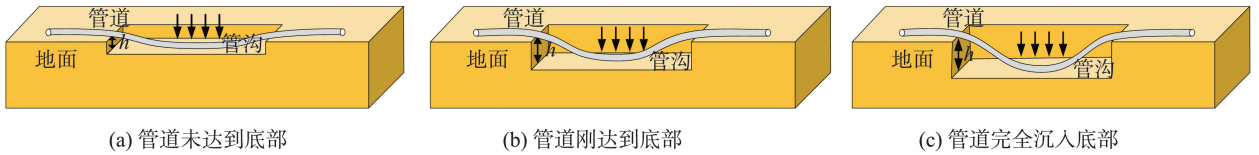


图1 背向沉管下沟物理模型

Fig.1 Physical model of sinking the pipe into the ditch from the back

### 1.2 力学模型

假设下沟段BC的反弯点位于BC段中点,根据背向沉管下沟对称性,截取1/2的管道模型分析,背向沉管下沟的1/2力学模型如图2所示,其中下沟管段BC采用梁的挠曲线微分方程求解,对于滑移管段AB和CD的小变形采用弹性地基梁方法求解。

根据边界条件  $y_1|_{x_1=0} = 0, y_1|_{x_1=\infty} = 0$  得到  $C_1 = C_2 = C_3 = 0$ , 即此时  $y_1 = C_4 e^{-\lambda x_1} \sin \lambda x_1$ 。

对  $y_1 = C_4 e^{-\lambda x_1} \sin \lambda x_1$  在  $x_1 = 0$  时求导, 可得  $y_1'|_{x_1=0} = C_4 \lambda, y_1''|_{x_1=0} = -2C_4 \lambda^2, y_1'''|_{x_1=0} = 2C_4 \lambda^3$ 。

又由弯矩与曲率的关系  $M = -EIy''$  及弯矩与剪力的关系  $V = M'$  可得

$$V_c = -2C_4 EI \lambda^3. \tag{3}$$

又由BC段平衡方程可知:

$$V_c = -\frac{qL}{2}, \tag{4}$$

式中,  $V_c$  为C点处管道的剪力,  $L$  为管道悬空段长度。

联立式(3)式(4)可得:  $C_4 = \frac{qL}{4EI\lambda^3}$ , 式中  $q$  为悬空段单位长度的管道重力。

#### 1.2.2 管道下沉段BC

下沉段在  $x, y$  坐标系下的挠曲线微分方程可表示为

$$EIy'''' + Py'' + q = 0, \tag{5}$$

式中  $P$  为竖直方向上土弹簧对滑移段管道单位长度上的支撑力。

求解上述微分方程可得

$$y = B_1 \cos x + B_2 \sin x + B_3 x + B_4 - \frac{q}{2P} x^2. \tag{6}$$

由边界条件  $y|_{x=0} = H, y|_{x=L} = 0, y|_{x=L/2} = \frac{H}{2}$ , 以及连续性条件  $y'|_{x=L} = -C_4 \lambda, y''|_{x=L} = 2C_4 \lambda^2$ , 则有

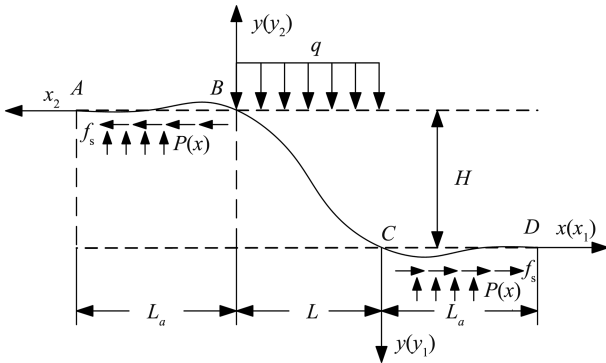


图2 沉管下沟模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of immersed tube trench model

#### 1.2.1 管道滑移段CD

基于弹性地基梁理论,在  $x_1, y_1$  坐标系下的微分方程可表示为

$$EIy_1'''' + Ky_1 = 0, \tag{1}$$

式中,  $E$  为弹性模量,  $I$  为惯性矩,  $K$  为土弹簧刚度系数。

该方程通解为

$$y_1 = e^{\lambda x_1} (C_1 \cos \lambda x_1 + C_2 \sin \lambda x_1) + e^{-\lambda x_1} (C_3 \cos \lambda x_1 + C_4 \sin \lambda x_1), \tag{2}$$

式中,  $\lambda = \sqrt[4]{\frac{K}{4EI}}$ ,  $C_1, C_2, C_3, C_4$  为常数。

$$\begin{cases} B_1+B_4=H \\ B_1 \cos L+B_2 \sin L+B_3L+B_4-\frac{q}{2P}L^2=0 \\ -B_1 \sin L+B_2 \cos L+B_3-\frac{q}{P}L=-C_4\lambda \\ -B_1 \cos L-B_2 \sin L-\frac{q}{P}=2C_4\lambda^2 \end{cases} \quad (7)$$

解得

$$\begin{cases} B_2=\frac{q}{P \cos L}\left(1+\frac{PL}{2EI\lambda}\right) \\ B_3=\frac{qL^2}{8P}+\frac{q}{P}\left(1+\frac{PL}{2EI\lambda}\right) \end{cases} \quad (8)$$

联立两式得

$$\tan L\left(1+\frac{PL}{2EI\lambda}\right)=L\left(1-\frac{P}{4EI\lambda^2}\right) \quad (9)$$

### 1.2.3 管道滑移段 AB

基于弹性地基梁理论,在  $x_2, y_2$  坐标系下的微分方程可表示为  $EIy_2'''' + Ky_2 = 0$ , 式中,  $E$  为弹性模量,  $I$  为惯性矩。

该方程通解为

$$y_2 = e^{\lambda x_2}(D_1 \cos \lambda x_2 + D_2 \sin \lambda x_2) + e^{-\lambda x_2}(D_3 \cos \lambda x_2 + D_4 \sin \lambda x_2),$$

式中,  $\lambda = \sqrt{\frac{K}{4EI}}$ ,  $K$  为土弹簧刚度系数,  $D_1, D_2, D_3, D_4$  为常数。

根据边界条件  $y_2|_{x_2=0} = 0, y_2|_{x_2=\infty} = 0$ , 得到  $D_1 = D_2 = D_3 = 0$ , 即此时  $y_2 = D_4 e^{-\lambda x_2} \sin \lambda x_2$ 。

对  $y_2 = D_4 e^{-\lambda x_2} \sin \lambda x_2$  在  $x_2 = 0$  时求导, 可得  $y_2'|_{x_2=0} = D_4 \lambda, y_2''|_{x_2=0} = -2D_4 \lambda^2, y_2'''|_{x_2=0} = 2D_4 \lambda^3$ 。

又由弯矩与曲率的关系  $M = -EIy''$  及弯矩与剪力的关系  $V = M'$  可得

$$V_B = -2D_4 EI \lambda^3, \quad (10)$$

式中  $V_B$  为  $B$  点处管道剪力。

又由  $BC$  段平衡方程可知

$$V_B = -\frac{qL}{2} \quad (11)$$

联立式(10)式(11)可得  $D_4 = \frac{qL}{4EI\lambda^3}$ 。

### 1.2.4 变形协调条件

在管道滑移段内, 由于摩擦力作用, 其物理伸长量可表示为

$$\Delta L_{CD} = \Delta L_{AB} = \frac{f_s L_a^2}{2AE}, \quad (12)$$

式中,  $\Delta L_{CD}$  为  $CD$  段管道物理伸长量,  $\Delta L_{AB}$  为  $AB$  段管道物理伸长量,  $f_s$  为滑移段管道与土体之间单位长度的摩擦力,  $L_a$  为管道滑移段长度,  $A$  为管道横截面积。

特别的,  $L_a = \frac{P_0 - P - 0.5qL}{f_s}$ , 式中  $P_0$  为滑移段内

管道的轴向力, 其值为  $P_0 = 2\sqrt{EIK}$ , 式中  $K$  为土弹簧刚度系数。

管道下沉段  $BC$  物理伸长量同样可表示为

$$\Delta L_{BC} = \frac{f_s L_a L}{AE} + \frac{qL^2}{2AE} \quad (13)$$

又  $BC$  段几何伸长量可表示为

$$\Delta L = \int_0^L (\sqrt{1+y'^2} + 1) dx, \quad (14)$$

且有  $y' = \frac{q}{P} \left( \frac{\sin x}{\cos L} \left( 1 + \frac{PL}{2EI\lambda} \right) + x \right)$ , 则有

$$\Delta L = \int_0^L \left( \sqrt{1 + \frac{q^2}{P^2} \left( \frac{\sin x}{\cos L} \left( 1 + \frac{PL}{2EI\lambda} \right) + x \right)^2} + 1 \right) dx = \frac{f_s L_a^2}{AE} + \frac{f_s L_a L}{AE} + \frac{qL^2}{AE} \quad (15)$$

联立式(9)式(15), 并利用 Matlab 求解, 可求得  $P$  和  $L$ 。

### 1.2.5 应力求解

已知  $P$  和  $L$ , 即可求得内力, 进而可得出应力。  $BC$  管段弯曲应力公式为

$$\sigma_x = \frac{DV_B}{2I} x - \frac{Dq}{4I} x^2 + \frac{M_B D}{2I},$$

式中,  $D$  为管道外径,  $M_B$  为管道  $B$  点处的弯矩。

轴向应力公式为  $\sigma_x = \frac{qL}{2I} \cdot \frac{D}{2}$ 。

管段  $AB$  和  $CD$  弯曲应力公式应用为

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{f_s x}{A}$$

轴向应力  $\sigma = \frac{f_s x}{A}$ 。

进而求得管道等效应力

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (16)$$

## 2 有限元模型

### 2.1 基本参数

有限元模型材料基本参数如表 1、2 所示。

表1 材料力学参数  
Table 1 Material mechanics parameters

名称	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/( $^\circ$ )	膨胀角/( $^\circ$ )	内聚力/kPa	屈服位移/m
管道	7 850	$210\times 10^3$	0.3				
土体	1 780	20	0.3	25	4	5	0.005 08

表2 模型几何参数  
Table 2 Geometric parameters of the model

管道/( $\text{m}\times\text{m}\times\text{m}$ )	土体/( $\text{m}\times\text{m}\times\text{m}$ )	管沟长度/m	管沟深度/m
$460\times 1.016\times 0.026\ 2$ (管长 $\times$ 外径 $\times$ 壁厚)	$460\times 7\times 6$ (长 $\times$ 高 $\times$ 宽)	200	2.0

### 2.2 载荷及约束

单元类型与材料本构关系:在模拟过程中,管道与土体均采用了 C3D8R(三维六面体八结点线性缩减积分)单元进行离散化表示。管道选择三折线弹塑性模型,而对于土体的材料本构关系,选用了弹塑性 Mohr-Coulomb 准则进行模拟。

约束条件设定:土体底面及 4 个侧面施加法向位移约束<sup>[21-22]</sup>;管道右端设定全位移约束,这一设置旨在考虑远端管道可能受到的约束作用;管道的左端则被设定为自由端,以模拟管道在施工或运营过程中可能发生的自由变形情况。

载荷条件设定:仅对管道施加重力,以模拟沉管过程中管道靠自重下沉的过程。

接触设定:管道与土体之间的相互作用通过设定有限滑移的面面接触来模拟,这种接触设置能够有效地反映两者之间的相互作用力及可能产生的滑动现象。利用生死单元法来模拟土壤挖掘过程中的动态变化。

根据上述参数及条件,基于 ABAQUS 建立的背向沉管下沟管道应力分析有限元模型如图 3 所示。

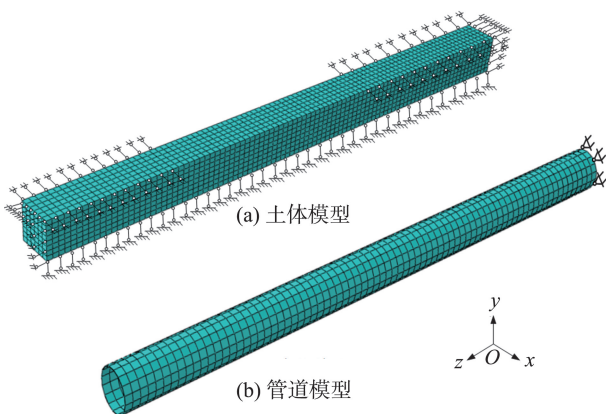


图3 沉管下沟管道应力分析有限元模型

Fig.3 Finite element model of stress analysis during pipeline lowering-in

为保证有限元模型的计算精度,首先进行网格无关性分析,结果如图 4 所示。

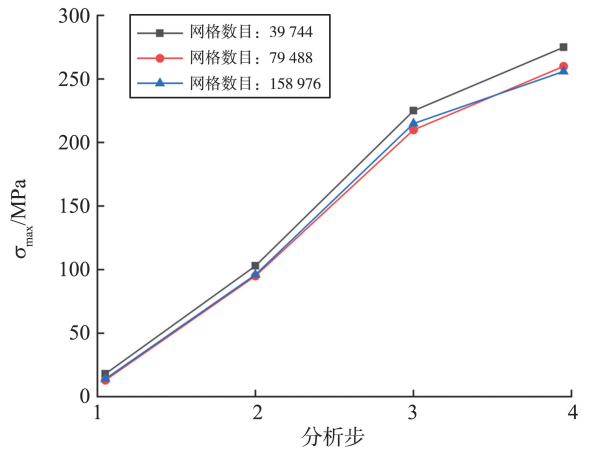


图4 网格无关性分析

Fig.4 Validation of numbers of grids on calculation accuracy of numerical model

结果显示:在网格数目分别为 79 488 和 158 976 的两个有限元模型中,管道最大应力的计算结果接近一致。相比之下,网格数目减少至 39 744 的有限元模型在模拟精度上稍显不足。基于此,本次采用网格划分数目为 79 488 的密集度进行模拟,既可以满足精度要求又可以提高计算速度。

### 2.3 模拟结果

本次背向沉管模拟过程包含 4 个分析步,每个分析步均通过生死单元法来实现管沟开挖长度的逐步增加。在不同分析步下,管道应力的模拟结果以及土体塑性应变的模拟结果如图 5、6 所示,不同分析步下沿管道长度上的管道应力以及管道位移曲线图如图 7 所示。

由图 5 和图 6 可知,随着分析步的逐步施加,管道所承受的应力与土体塑性应变均呈现了一个上升的趋势。特别地,当管沟开挖至约 170 m 时,管道与管沟底部首次接触,此刻管道最大应力为 223.63 MPa,随着开挖长度继续增大,管道在下沟过程中的最大应力以及土体的塑性应变也继续增大,到开挖长度 200 m 时管道最大应力达到 259.32 MPa,土体塑性应变达到 0.445。

由图 7 分析可知,随着开挖长度的增加,管道总位移以及管道应力极值逐渐增大,应力极值向管道两端逐渐靠近,进一步说明管道应力最大值发生在管沟开挖端部。此外,对应力曲线的进一步分析可知,在背向沉管的过程中管道应力出现 3 个应力集中点,在开挖起始阶段(80 m 内)管道中

间位置为最大应力处,随着开挖的继续,管沟开挖端部处的应力逐渐超越中间位置处的应力,当管道完全接触到沟底后继续开挖,管道出现4个应力集中点,最大应力仍位于管沟开挖端部,另外两个应力集中点位于管沟底部管道与管沟刚接触的

位置处。这是由于管道触底后,随着开挖过程的持续进行,部分管段将逐渐平铺于沟槽底部,平铺管段轴向应力的分布均匀化,平铺管段与沟底刚发生分离的两个临界位置处管道变形较大,成为新的应力集中区。

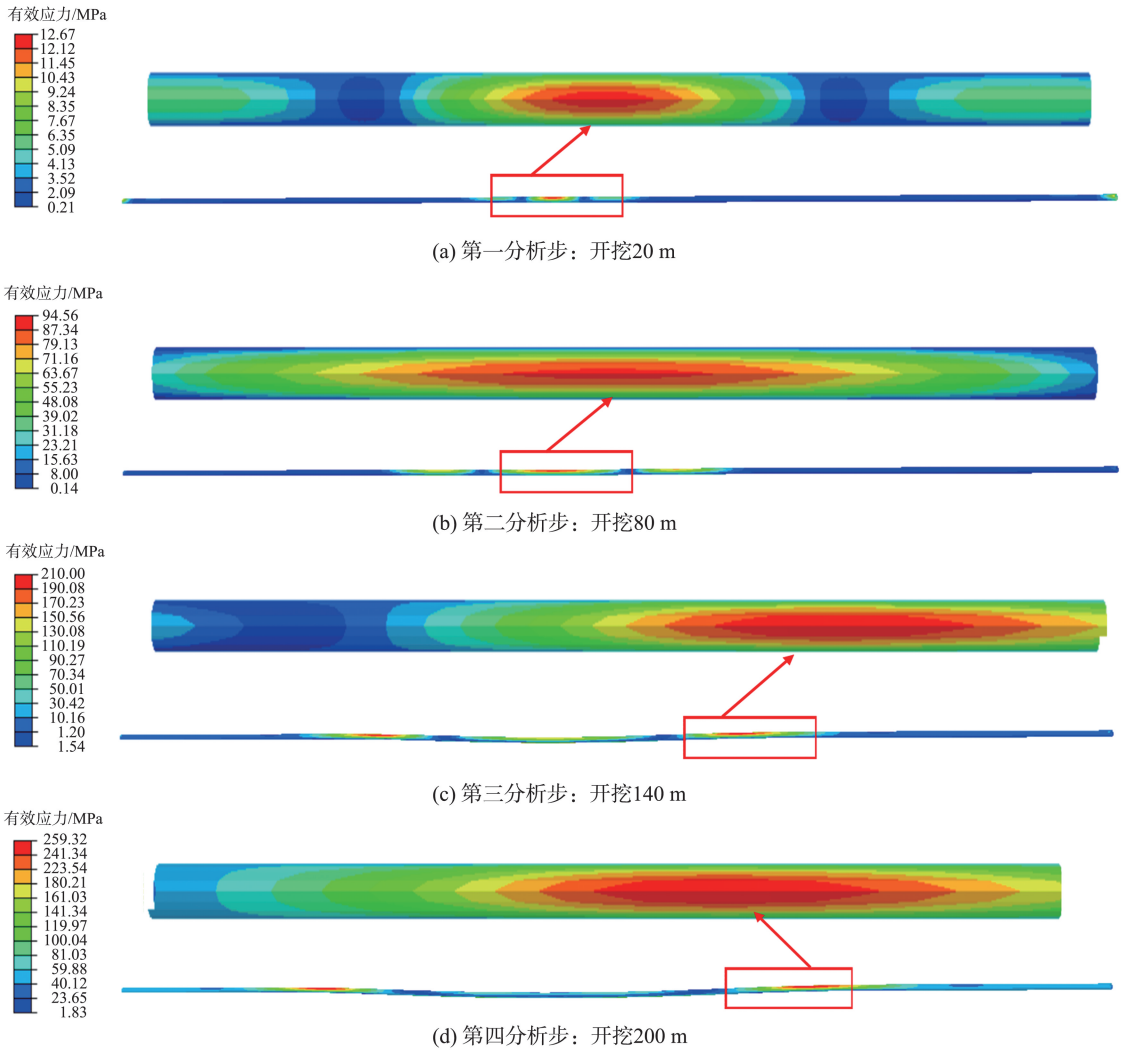
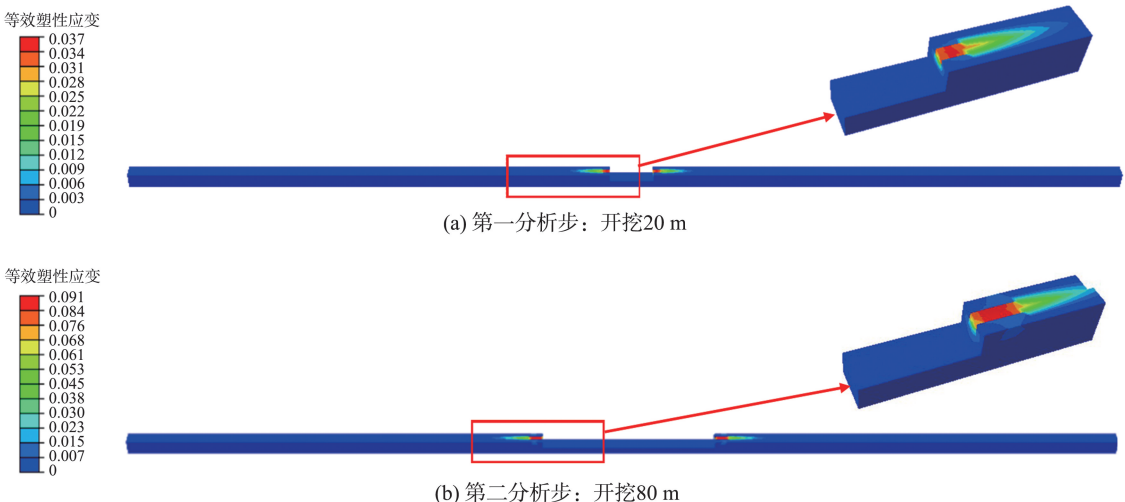


图5 管道应力分布云图  
Fig.5 Cloud diagram of pipeline stress distribution



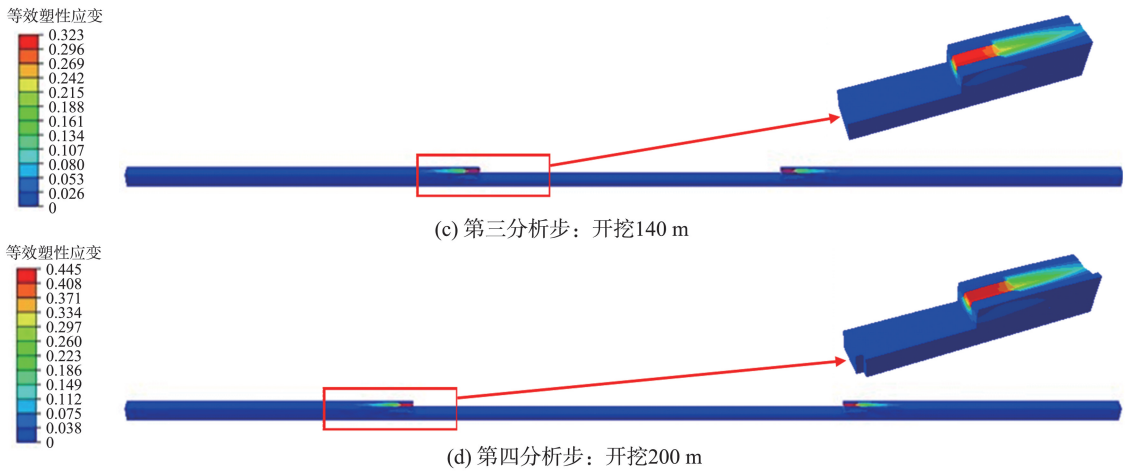
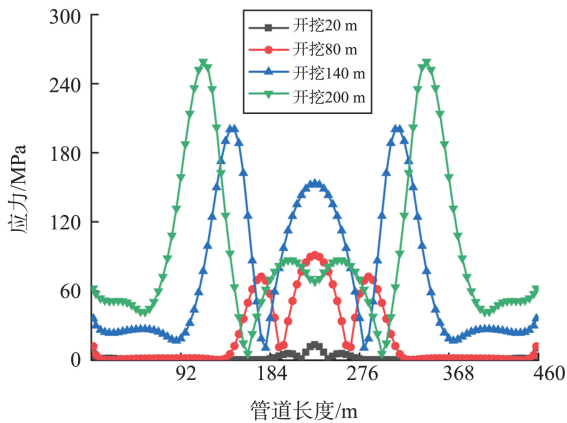
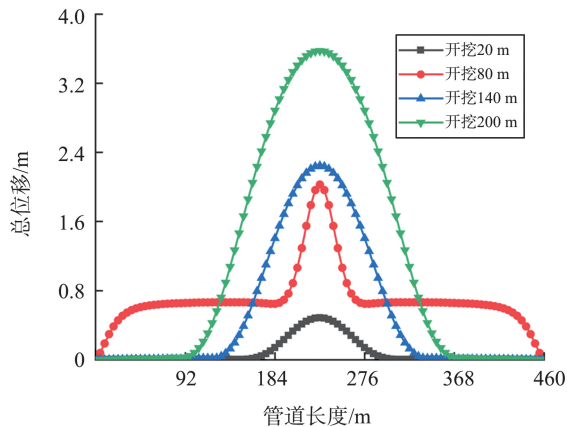


图6 土体塑性应变分布云图

Fig.6 Cloud map of soil plastic strain distribution



(a) 应力随管道长度变化曲线图



(b) 位移随管道长度变化曲线图

图7 沉管下沟管道应力及位移曲线图

Fig.7 Stress and displacement curve diagram of immersed pipe in trench

### 3 解析模型验证

由于所建的模型与规范模型均基于管道沉降至沟底的前提条件,故选取本研究所提模型、规范模型以及数值模型在管道完全沉降至沟底时的结

果进行对比。尤为关注的是,对比的核心参数聚焦于模型输出的关键指标,即拱起段的长度  $L_1$ 、悬空段的长度  $L_2$ 、管道承受的最大应力值,以及管沟开挖终端位置管道的弯矩表现,其中  $\Delta$  代表管土相互作用的强弱, $\Delta$  越大,说明管土相互作用越弱。不同管沟深度条件下的对比结果如图 8~11 所示。

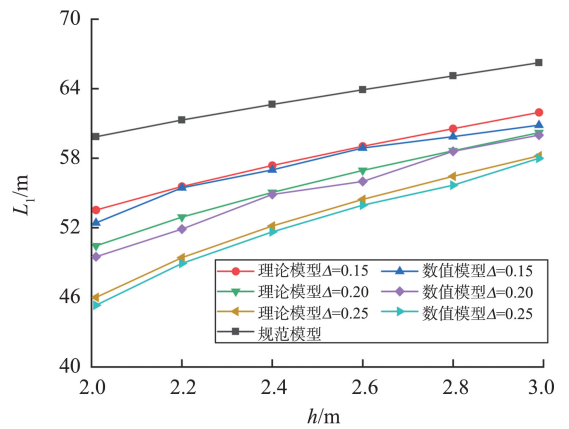


图8 不同管沟深度下管道拱起段长度对比结果  
Fig.8 Comparison of the length of arched segment under different buried depths

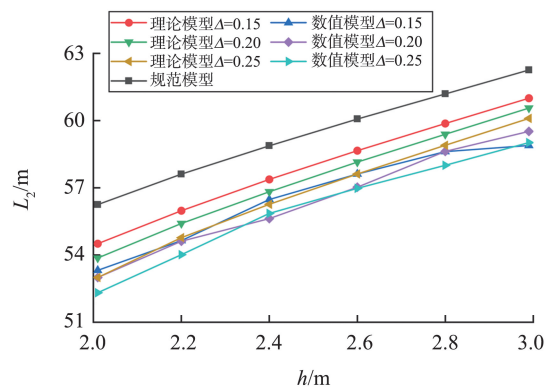


图9 不同管沟深度下管道悬空段长度对比结果  
Fig.9 Comparison of the length of suspended segment under different buried depths

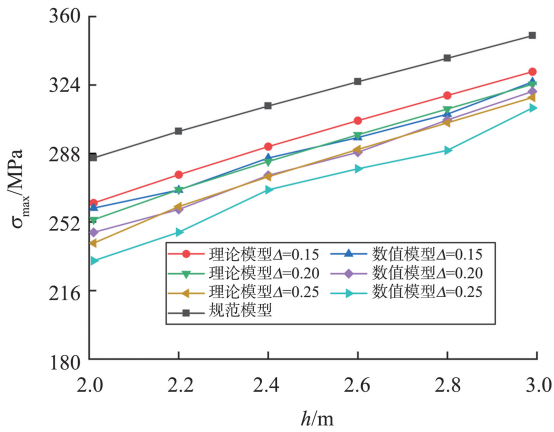


图10 不同管沟深度下管道最大应力对比结果  
Fig.10 Comparison of the maximum stress under different buried depths

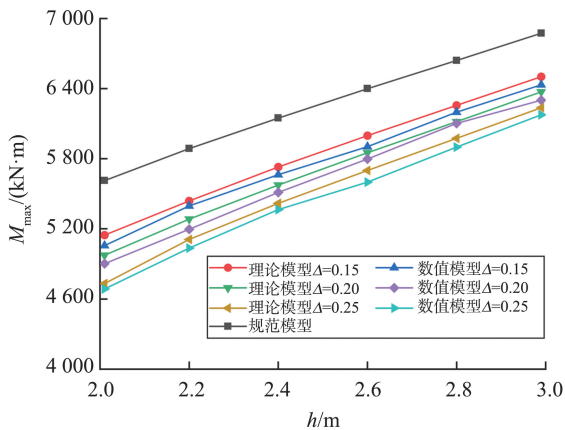


图11 不同管沟深度下管道最大弯矩对比结果  
Fig.11 Comparison of the length of the maximum bending moment under different buried depths

图8~11结果表明,所提解析模型与有限元模型在结果上吻合度更高,明显优于现有的规范法模型。这主要是因为所提出的解析模型中引入了管道-土体系统的弹性约束机制,该耦合作用机理能够有效表征管道实际下沟过程中管沟端部区域土体的压缩响应特性。通过建立这种相互作用关系,模型更准确地反映了管道在沉放工况下与周围土体之间的协同变形行为,从而显著提升了理论分析结果与工程实际工况的吻合度。相较之下,现行的规范模型在管沟端部简单地设定为竖向约束条件,未能充分反映实际开挖过程中管沟端部的土体压缩特性,从而导致了计算精度的不足。

值得注意的是,随着  $\Delta$  值的增大,管土约束作用越弱,即土体沉降位移的增加,现有规范法模型与有限元模型之间的计算结果差距也愈发明显。以  $\Delta=0.2$  m 这一具体案例为例,两者之间的误差率高达 13.4%,这一数据揭示了在水网、沙漠、沼泽等

地质条件复杂、地基承载力较弱的地段(即更易于在管沟开挖过程中产生较大土体压缩位移的区域),现有规范法在预测管道沉管下沟应力时可能产生更大的误差。

在拱起段长度  $L_1$ 、悬空段长度  $L_2$ 、管道最大应力以及管沟开挖端部处管道弯矩这4个关键参数上,所提解析模型与有限元模型间的最大误差分别为 3.58%、3.50%、4.89%和 3.52%以内。这表明所提模型在预测精度上与有限元模型高度接近。整体而言,相较于现有的规范模型,所提模型在计算精度上实现了显著提升,因此更能满足实际工程应用中的高精度需求。

### 4 结论

(1) 考虑沉管下沟过程中管道-土体相互作用机制,通过建立挠曲线微分方程并引入变形协调条件,构建了背向沉管工况下管道力学响应的解析模型,该模型通过引入弹性约束边界条件,有效模拟了管沟端部土体对管道的约束作用,从而实现了沉管下沟过程中管道应力分布的精确解析。

(2) 为验证提出的背向沉管下沟的解析模型的精度,利用 Abaqus 建立有限元模型进行对解析模型的验证。通过对比规范模型、解析模型以及有限元模型的拱起管段长度、悬空管段长度、管道最大应力以及最大弯矩获得结果。对比结果显示:解析模型与有限元模拟的最大相对误差分别仅为 3.58%、3.50%、4.89%和 3.52%,规范模型与有限元模拟的最大误差为 13.40%,从而验证了所提模型的准确性和可靠性。

(3) 模拟结果表明:管道下沟过程中,管道应力随开挖长度的增大而增大,最大应力首先出现在沉管中间位置处,开挖 80 m 后出现在管沟开挖端部;在接触沟底前,管道出现 3 个应力集中点,在接触沟底后,管道出现 4 个应力集中点。

### 参考文献:

[1] 隋永莉,王鹏宇.中俄东线天然气管道黑河—长岭段环焊缝焊接工艺[J].油气储运,2020,39(9):961-970.  
SUI Yongli, WANG Pengyu. Girth welding technology used in Heihe-Changling section of China-Russia eastern gas pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(9): 961-970.

[2] 季蓓蕾,刘啸奔,江金旭,等.软土沉降位移作用下大

- 口径管道轴向应力状态研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(6): 85-90.
- JI Beilei, LIU Xiaoben, JIANG Jinxu, et al. Study on longitudinal stress state of large diameter pipeline under effect of soft soil settlement displacement[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(6): 85-90.
- [3] 郭勇. 沉管法管道下沟施工技术应用[C]//2012年10月建筑科技与管理学术交流会议论文集. 北京:《建筑科技与管理》组委会, 2012: 95, 102.
- [4] 康万平, 王宇, 李战宏. 沉管技术在长输管道河谷段的施工应用[J]. 油气储运, 2010, 29(7): 550-552.  
KANG Wanping, WANG Yu, LI Zhanhong. Application of pipe sinking technique in valley pipeline construction[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2010, 29(7): 550-552.
- [5] 王炎兵, 石彤, 刘海春, 等. 纵向连续冷弯管管段沉管下沟的可行性[J]. 油气储运, 2024, 43(8): 936-943.  
WANG Yanbing, SHI Tong, LIU Haichun, et al. Feasibility of lowering-in of longitudinally continuous cold-bends[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(8): 936-943.
- [6] 孟佳, 康凯. 管道穿越水网地段沉管下沟技术对策研究[J]. 管道技术与设备, 2017(3): 1-3.  
MENG Jia, KANG Kai. Immersed ditch technical countermeasures research of pipeline through water network area[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2017(3): 1-3.
- [7] 王付会, 练章华, 林铁军. 双侧沉管在水网地段应力分析及数值模拟[J]. 石油机械, 2015, 43(7): 116-120.  
WANG Fuhui, LIAN Zhonghua, LIN Tiejun. Theoretical analysis and numerical simulation of pipeline stress with lowering pipeline on both sides in water network areas[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(7): 116-120.
- [8] 兰旭彬, 杨雅冰, 房茂立, 等. 沉管下沟管道力学分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(6): 112-118.  
LAN Xubin, YANG Yabing, FANG Maoli, et al. Mechanical analysis on immersed ditching pipeline[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(6): 112-118.
- [9] 谷青悦, 刘纯婧, 林智敏. 长输管道沉管下沟过程应力分析[J]. 石油工程建设, 2019, 45(2): 16-19.  
GU Qingyue, LIU Chunjing, LIN Zhimin. Stress analysis of sinking pipeline into trench for long distance pipeline[J]. Petroleum Engineering Construction, 2019, 45(2): 16-19.
- [10] 刘玉卿, 武玉梁, 张振永. 中俄东线水平连续冷弯管管道沉管下沟的可行性[J]. 油气储运, 2020, 39(2): 215-221.  
LIU Yuqing, WU Yuliang, ZHANG Zhenyong. Feasibility of lowering-in of horizontal continuous cold bending pipes in China-Russia Eastern Gas Pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2020, 39(2): 215-221.
- [11] 刘玉卿, 余志峰, 齐万鹏. 中俄东线天然气管道沉管下沟数值模拟[J]. 石油机械, 2019, 47(3): 118-123.  
LIU Yuqing, YU Zhifeng, QI Wanpeng. Numerical simulation of sinking and lowering of China-Russia eastern gas pipeline[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(3): 118-123.
- [12] 石彤, 王炎兵, 金广义, 等. 大口径X80管道沉管应力响应规律与临界深度分析[J]. 石油管材与仪器, 2023, 9(5): 32-40.  
SHI Tong, WANG Yanbing, JIN Guangyi, et al. Analysis of stress response trends and critical depth of large diameter X80 pipe lowering-in[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2023, 9(5): 32-40.
- [13] SEN M, ZHOU J. Evaluation of pipeline stresses during line lowering[C]//Proceedings of the 2008 7th International Pipeline Conference, Volume 1. Calgary, Canada: ASMEDC, 2008: 213-221.
- [14] DUAN D M, JURCA T, ZHOU C. A stress check procedure for pipe lowering-in process during pipeline construction[C]//Proceedings of the 2014 10th International Pipeline Conference, Volume 1: Design and Construction; Environment; Pipeline Automation and Measurement. Calgary, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2014: V001T03A006.
- [15] HWANG W, LEE J S. Analytical model for the structural behavior of pipelines during lowering-in[J]. Applied Sciences, 2019, 9(13): 2595.
- [16] LIU M, WANG Y Y, ROGERS G. Stress analysis of pipe lowering-in process during construction[C]//Proceedings of the 2008 7th International Pipeline Conference, Volume 1. Calgary, Canada: ASMEDC, 2008: 223-228.
- [17] SCOTT C, ETHERIDGE B, VIETH P. An analysis of the stresses incurred in pipe during laying operations[C]//Proceedings of the 2008 7th International Pipeline Conference, Volume 1. Calgary, Canada: ASMEDC, 2008: 197-204.
- [18] ZHANG F, LIU M, WANG Y Y, et al. Stress analysis of lifting and lowering-in process[C]//Proceedings of 2014 10th International Pipeline Conference, Volume 1: Design and Construction; Environment; Pipeline Automation and Measurement. Calgary, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2014: V001T03A012.