

DOI: 10.11779/CJGE202203013

# 大直径埋地钢管管顶土压力及其设计模型研究

于金弘, 石长征, 伍鹤皋\*, 徐文韬

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 以往埋地钢管的管顶土压力研究结果多基于小直径管道, 对大直径管道并不完全适用。建立了埋地钢管有限元计算模型, 分析了不同管径、径厚比和埋深下的管顶土压力, 并与传统设计模型进行比较, 探讨了相关参数对土压力的影响。提出了一种新型的土压力设计模型——盆式模型, 采用“直线+抛物线”形式描述土压力分布, 根据管径和埋深情况采用“Marston+胸腔”荷载计算土压力数值, 并深入研究了盆式模型对大直径埋地钢管的适用性。结果表明: 对于大直径埋地钢管, 管顶土压力分布的基本形式为“倒盆形”, 径厚比及埋深均会显著影响土压力, 但径厚比大于200后, 土压力变化很小; 管径小时, 土压力大体呈抛物线分布。增加回填土变形模量和泊松比、沟槽接触面粗糙程度, 减小沟槽宽度, 均可降低土压力, 但影响有限。高埋深时, 棱柱荷载过大; 低埋深时, Marston荷载偏小, 这两种模型的计算精度及适应性较差; 盆式模型与有限元分析的计算结果吻合度较好, 计算精度高, 适应性强, 可为大直径埋地钢管的结构设计及规范制定提供借鉴和参考。

**关键词:** 埋地钢管; 大直径; 管顶土压力; 设计模型; 有限元法

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)03-0514-09

作者简介: 于金弘(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事水利水电工程压力管道研究。E-mail: yujinhong@whu.edu.cn。

## Soil pressures at top of large-diameter buried steel pipes and their design model

YU Jin-hong, SHI Chang-zheng, WU He-gao, XU Wen-tao

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The previous research results of soil pressures at the top of buried steel pipes are mostly based on the small-diameter pipes, which are not fully suitable for large-diameter pipes. Here a numerical investigation is conducted on the soil pressures from the aspects of pipe diameter, diameter-thickness ratio and cover depth, and it is furtherly compared with the traditional design models. The influence parameters on the soil pressure are discussed. A new design model for soil pressures, basin model, is proposed. Wherein, the distribution of the soil pressures is described as "straight line + parabola", and the load calculation adopts the "Marston + pleura" according to the pipe diameter and cover depth. Furthermore, the applicability of the basin model is studied. The results show that the basic form of the soil pressures is the "inverted basin" distribution for large-diameter pipes, while the soil pressures are a parabolic distribution for small-diameter pipes. The diameter-thickness ratio and cover depth have significant influences on the soil pressures, but the soil pressures change very little after the diameter-thickness ratio is greater than 200. The increase of the elastic modulus and Poisson's ratio of backfill and roughness of trench interface, and the decrease of trench width can slightly reduce the soil pressures. The prism and Marston load are too large at high cover depth and small at low cover depth, respectively, which have poor accuracy and adaptability. The basin model is in good agreement with the finite element results, with high calculation accuracy and strong adaptability. It can provide a reference for the structural design of large-diameter buried steel pipes.

**Key words:** buried steel pipe; large diameter; soil pressure at the top of the pipe; design model; finite element method

## 0 引言

中国水资源时空分布与社会经济发展不协调问题日益突出<sup>[1]</sup>, 为此“十四五”规划中重点强调:“要加  
强水利基础设施建设, 提升水资源优化配置和水旱灾  
害防御能力”<sup>[2]</sup>。水资源配置工程中, 引调水管线的  
应用较为普遍, 通常具有流量大、线路长、跨越的地

形地质条件复杂等特点, 管线的长期安全稳定运行, 对整个工程至关重要。埋地钢管(也称回填钢管)特别适用于大直径、高内压和复杂外部环境的管线工程, 在引调水及水电工程中得到了极大的关注, 其未来发

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409194)

收稿日期: 2021-05-29

\*通信作者(E-mail: hgwu@whu.edu.cn)

展潜力巨大。鉴于目前工程中的需求, 新修编的《水利水电工程压力钢管设计规范》SL/T 281 规范在参考国内外相关规范的基础上, 着重增补了埋地钢管的相关设计内容<sup>[3-4]</sup>。

埋地钢管为柔性管道, 管土间存在复杂的相互作用, 由钢管和土体共同承担外部荷载。覆土产生的土压力是钢管主要的外部荷载, 故管顶土压力(以下简称土压力)的确定是埋地钢管结构设计的基础。土压力计算公式最早由 Marston 于 1913 年提出, 假定沟槽内土体沿着沟槽侧壁滑移, 管道承担全部回填土荷载, 但对柔性管道适用性差<sup>[5]</sup>。Spangler 修正了该理论, 假定沟槽内的土压力在管道和回填土上均匀分布, 使其适用于柔性管道<sup>[6]</sup>。由于 Marston 荷载仅考虑了直壁沟槽, Li 等<sup>[7]</sup>对其进行了改进, 提出了梯形槽下的土压力计算公式。Shmulevich 等<sup>[8]</sup>对管径 0.87~1.3 m 的柔性管道的试验结果表明, 土压力并非均匀分布, 径向和切向土压力近似呈抛物线分布。周正峰等<sup>[9-10]</sup>对管径 0.61 m 的埋地钢管开展有限元研究、李永刚<sup>[11]</sup>对管径 0.1 m 和 0.2 m 钢管开展土箱试验, 均得出土压力在管中心位置最大, 从管中心向管侧大致呈抛物线分布。Tian 等<sup>[12]</sup>认为土压力在管中心存在波谷, 将管中心到两侧土压力简化为抛物线分布, 并对 0.5 m 及 1 m 管径的埋地钢管进行数值验证。Kawabata 等<sup>[13-14]</sup>分析了高埋深下管径 0.9 m 的柔性管道土压力情况, 土压力呈“凹”形分布。伍鹤皋等<sup>[15-16]</sup>以管径 3 m 的埋地钢管为研究对象, 发现土压力分布与管径大小有关, 并随着管道运行工况的变化而改变。周敏等<sup>[17]</sup>采用室内试验, 研究了地层沉陷下埋地柔性管道变形及土压力变化情况。

针对埋地钢管的研究, 以往主要集中在给排水及油气行业, 研究对象多为小直径管道, 对于大直径管道(管径不小于 1.2 m)的研究相对较少。随着国内引调水工程及水电工程的发展, 水利行业大直径埋地钢管的应用逐渐增多, 传统的土压力计算方法不能完全适用。为此, 本文采用有限元法, 分析了埋地钢管在不同管径、径厚比及埋深下的土压力情况, 考虑到土压力的影响因素较为复杂, 探讨了回填土参数、沟槽侧壁土-土摩擦系数及沟槽宽度的影响, 对比分析了传统的棱柱荷载及 Marston 荷载的优劣, 进而提出了较为适用于大直径埋地钢管的土压力模型。

## 1 计算模型

### 1.1 模型介绍

埋地钢管 ANSYS 有限元计算模型如图 1 所示。采用直壁沟槽, 假定管径为  $D$ , 管顶覆土为  $H$ , 沟槽

宽度  $B$  为  $2D$ , 沟槽深为  $H_1$ , 管底垫层厚度 0.3 m, 垫层包角  $90^\circ$ 。模型底部、前后及左右端面施加沿法向的位移约束, 顶面自由, 整个模型宽为  $7B$ , 高为  $4H_1$ , 以消除边界条件的影响。钢管采用 4 节点壳单元 SHELL 181 模拟, 土体采用 8 节点实体单元 SOLID 45 模拟。钢管采用的弹性模量、泊松比和密度分别为  $2.06 \times 10^5$  MPa, 0.3 和  $7850$  kg/m<sup>3</sup>。计算采用典型的土体参数进行分析见表 1。根据规范 SL/T 281 或 CECS 141<sup>[18]</sup>以及 GB 50268<sup>[19]</sup>, 可确定典型土体种类及变形模量; 根据规范及工程经验, 土的密度通常为  $1600\sim 2200$  kg/m<sup>3</sup>; 黏性土的泊松比为  $0.25\sim 0.42$ , 黏聚力为  $2\sim 65$  kPa, 内摩擦角为  $15^\circ\sim 30^\circ$ ; 砂土的泊松比为  $0.25\sim 0.3$ , 内摩擦角为  $28^\circ\sim 42^\circ$ <sup>[20-21]</sup>。

为满足美国土木工程师协会手册 ASCE No.119<sup>[22]</sup>对埋地钢管有限元模型可靠性的要求, 土体本构关系采用经典的 Drucker-Prager 屈服准则<sup>[23]</sup>; 钢管与土体及沟槽侧壁土-土间设置面-面接触单元 (TARGE 170 和 CONTA 174), 并采用库仑摩擦模型模拟接触面间的相互关系, 管-土及土-土间摩擦系数分别取 0.25 和  $0.577(\tan 30^\circ)$ <sup>[9, 18]</sup>。鉴于大直径埋地钢管施工时通常内部设置支撑, 变形主要发生在施工完毕、撤去支撑阶段。为简化分析, 模拟时通过直接调整土体模量及施加重力荷载的方式来实现土体碾压密实后管道所受土压力的效果。

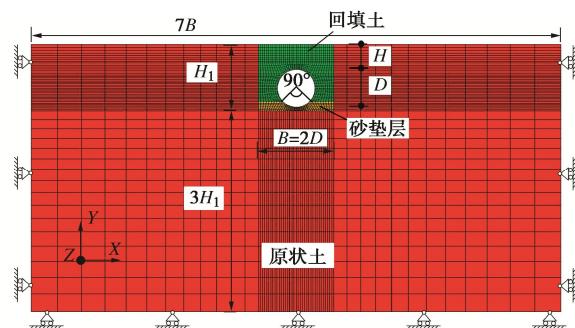


图 1 有限元计算模型

Fig. 1 Finite element model

表 1 土体种类及其材料参数

Table 1 Soil types and material parameters

名称	土体种类	变形模量 /MPa	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角/(°)	密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )
原状土	黏性土; 标准锤击数 $N_{63.5} > 50$	10	0.35	10	30	1800
回填土	黏性土; 压实系数 95%	5	0.35	10	30	1800
砂垫层	砂砾, 细粒土含量 不大于 12%; 压 实系数 95%	7	0.25	0	30	1800

## 1.2 模型验证

为进一步说明本文有限元模拟技术的可靠性,结合试验结果,进行对比验证。文献[24]对埋地聚氯乙烯(PVC)塑料管道(管径 150 mm, 壁厚 10 mm)进行土箱试验,获取了管周接触压力数据。建立相应的有限元模型,管材的弹性模量、泊松比和密度分别取 3000 MPa, 0.4, 1400 kg/m<sup>3</sup>[25], 土体参数采用试验给出的实测值。试验时土体上方施加 50 kPa 的均布压力。

图 2 给出了有限元与试验的接触压力比较结果。可以看到,两种方法得出的管周接触压力从管顶到管底的分布趋势均为先减少、后增大,存在管顶/底大、管腰小特征;接触压力大小虽然有细微差别,但总体上较为接近。考虑到试验误差及模型简化等情况,故认为本文采用的有限元模拟技术具有较高的可靠性,可用于后续分析。

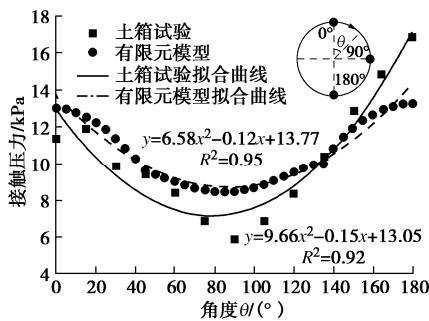


图 2 有限元与试验结果的管周接触压力比较

Fig. 2 Comparison of contact pressures around pipes between finite element and test results

## 2 计算结果及分析

传统的土压力计算通常采用棱柱荷载  $\sigma_p$  或 Marston 荷载  $\sigma_M$ , 均假定为均匀分布, 但大小不同, 计算见式(1)、(2)。水利行业规范 SL/T 281 及给排水行业 CECS 系列规程均采用棱柱荷载。日本规范以 2 m 埋深为界, 两种方法都有采用<sup>[26]</sup>; 美国水工协会手册 AWWA M11 中说明 Marston 荷载可用于窄槽下, 棱柱荷载可作为保守设计<sup>[6]</sup>。

$$\sigma_M = (1 - e^{-\frac{2/K \cdot H}{B}}) \gamma B / (2fK) = C_d \gamma B, \quad (1)$$

$$\sigma_p = \gamma H. \quad (2)$$

式中  $\gamma$  为回填土的重度;  $B$  为沟槽宽度;  $f$  为沟槽侧壁土-土滑动摩擦系数;  $K$  为朗肯主动土压力系数;  $H$  为管顶埋深。

以管径  $D=3$  m 的埋地钢管为例, 深入分析径厚比(管径  $D$  与壁厚  $t$  之比)及埋深对土压力的影响。土压力可从有限元计算获取的管周接触压力、切向力沿

竖向方向分解得出。大直径埋地钢管的径厚比  $D/t$  通常在 100~300 范围内; 为考虑埋深影响, 在 2~8 m 范围内间隔 2 m 取值。

### 2.1 土压力分析

图 3 为不同径厚比及埋深下的土压力分布。可以看出, 埋深 2 m、径厚比 100 时, 土压力近似呈“倒盆形”分布, 即土压力在管中心区域分布平坦, 在距离管中心约 (0.25~0.4)  $D$  处开始呈抛物线式急剧降低。随着径厚比的增加, 土压力峰值逐步降低并从管中心区域移向管侧胸腔。这是由于径厚比增大后, 管道竖向收缩变形加剧, 胸腔管壁趋向平坦, 承担了更多的土压力。此外, 径厚比在 100~150 范围变动时, 土压力降幅明显, 大于 200 后, 变化很小。埋深增加后, 可明显加大土压力, 对管道受力变形不利。埋深越深, 土压力分布在管中心区域内凹越严重、管侧胸腔越突出, 越易趋向“M 形”。埋深越深, 不同径厚比下, 土压力峰值差也相应增加, 如径厚比 100 与 200 下的峰值差, 埋深 4 m 为埋深 2 m 的 2.62 倍。

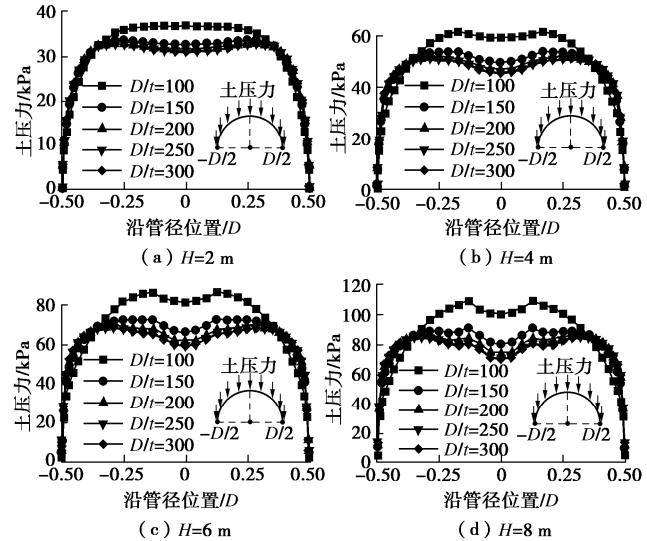


图 3 不同径厚比  $D/t$  及埋深  $H$  下的土压力

Fig. 3 Soil pressures under different diameter-thickness ratios  $D/t$  and cover depths  $H$

### 2.2 大小比较

将棱柱荷载  $\sigma_p$ 、Marston 荷载  $\sigma_M$  分别与数值计算得出的峰值土压力  $\sigma_{\max}$ 、均值土压力  $\sigma_{\text{avg}}$ (土压力沿管径积分后除以管径)进行比较如图 4 所示。可以看出, 埋深 2 m 时, 两种荷载与峰值土压力吻合良好, 偏差均在 10% 以内, 且径厚比越小, 比较结果越低, 甚至会低于 1。由于土压力并不是均匀分布, 其均值较峰值会有所降低, 相较于均值土压力, 两种荷载显著偏大, 增幅在 20% 以内。埋深增加后, 棱柱荷载和 Marston 荷载的准确性均显著降低, 如埋深 6 m 时, 较峰值土压力最大增幅分别为 58% 和 31%, 与均值土

压力的相差则更大。

可见, 棱柱荷载和 Marston 荷载存在两处问题, 首先其假定的土压力均匀分布虽计算简便, 但与实际差别较大; 其次是当管道埋深高、径厚比大时, 其大小偏差较大。此外, 相较于棱柱荷载, Marston 荷载在高埋深时, 误差相对较小, 但低埋深时, 其结果偏小。

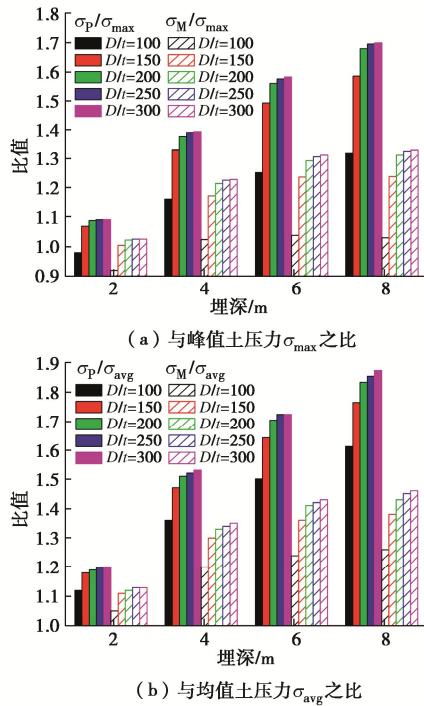


图 4 棱柱荷载  $\sigma_p$ 、Marston 荷载  $\sigma_M$  与有限元结果的比较

Fig. 4 Comparison of prism load  $\sigma_p$  and Marston load  $\sigma_M$  with finite element results

### 3 敏感性分析

#### 3.1 管径的影响

以管径  $D=1.5\text{ m}$  和  $0.5\text{ m}$  的钢管为研究对象, 分别按照径厚比  $D/t=100\sim 300$  和  $50\sim 250$  (小直径管道的径厚比通常较小), 埋深  $H=2\text{ m}$  和  $4\text{ m}$  进行参数分析, 对比分析管顶土压力的分布情况及大小。

##### (1) 土压力分析

各管径、径厚比及埋深下的土压力计算结果如图 5 所示。可以看出, 管径为  $1.5\text{ m}$  时, 随着径厚比的增加, 土压力分布逐步由抛物线向“倒盆形”过渡。当埋深较深、径厚比大即管道变形大时, 管侧胸腔出现峰值, 这与管径  $3\text{ m}$  的变化规律较为类似, 不同之处在于, 管径越小, 土压力越倾向抛物线分布。与大直径管道不同, 管径为  $0.5\text{ m}$  时, 土压力均呈抛物线分布, 这与以往小直径管道的研究结论基本相同。径厚比增加后, 土压力峰值有所降低, 特别是当径厚比

从 50 变为 100 时, 降幅最为显著, 这是由于当径厚比为 50 时, 钢管为刚性管道, 承受了更多的覆土重, 与柔性管道存在明显不同。

基于上述分析可知, 大/小直径管道土压力分布基本形式分别为“倒盆形”和抛物线。这是由于管径大后, 土拱效应减弱, 胸腔管壁分担的土压力增加, 且胸腔土体体积会明显变大, 加深了其影响程度。

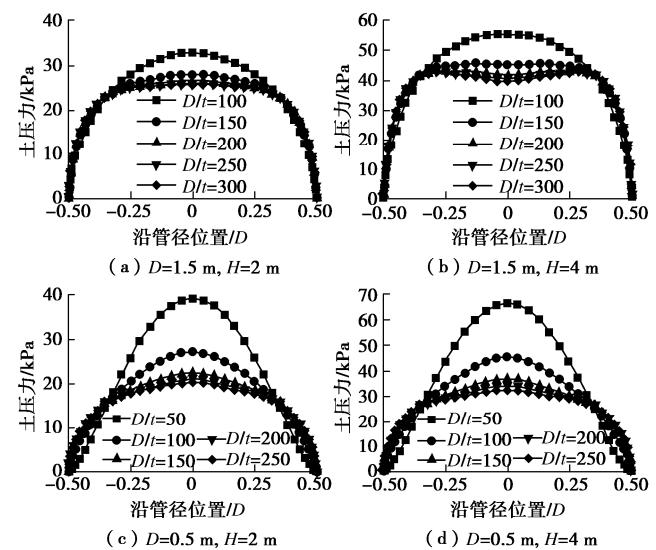


图 5 不同管径  $D$ 、径厚比  $D/t$  及埋深  $H$  下的土压力

Fig. 5 Soil pressures under different pipe diameters  $D$ , diameter-thickness ratios  $D/t$  and cover depths  $H$

##### (2) 大小比较

图 6 为不同管径下棱柱荷载、Marston 荷载与有限元结果的比较。管径  $1.5\text{ m}$  与  $3\text{ m}$  的管道, 土压力大小比较规律总体较为类似, 但  $1.5\text{ m}$  管径下的偏差显著扩大, 如埋深  $2\text{ m}$  时, 棱柱荷载和 Marston 荷载分别最大为峰值/均值土压力的  $1.4/1.59$  和  $1.24/1.4$  倍。管径  $0.5\text{ m}$  的小直径管道, 由于其土压力分布变化幅度较大, 使得峰值与均值土压力存在较大差异。棱柱荷载除在埋深浅、径厚比特别小时, 可能稍低于峰值土压力, 其余情况下均远大于峰值/均值土压力, 且埋深越深, 径厚比越大, 越显著。而 Marston 荷载在径厚比小时, 远低于峰值土压力, 但与均值土压力较为接近。

国内外研究多以小直径管道为研究对象, 其径厚比及埋深通常较小, 此时 Marston 荷载结果远小于土压力峰值, 而棱柱荷载的安全性较高且计算简便, 故多推荐采用棱柱荷载进行埋地钢管的结构设计。但对大直径管道而言, 高埋深下 Marston 荷载大小与实际较为接近且总体偏大, 而棱柱荷载明显过大, 故对大直径、高埋深的管道, 土压力计算可考虑采用 Marston

荷载。

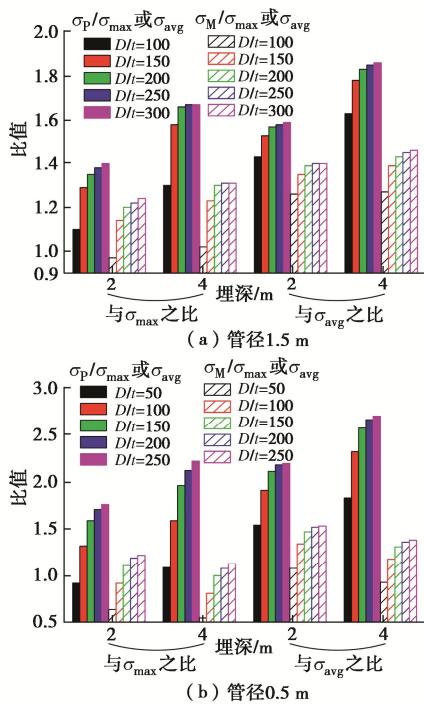


图 6 棱柱荷载  $\sigma_p$ 、Marston 荷载  $\sigma_M$  与有限元结果的比较

Fig. 6 Comparison of prism load  $\sigma_p$  and Marston load  $\sigma_M$  with finite element results

### 3.2 相关参数的敏感性分析

以管径 3 m 的埋地钢管为例, 埋深取 2 m、径厚比取 200, 对回填土变形模量、泊松比、沟槽侧壁土-土摩擦系数及沟槽宽度进行敏感性分析。基于规范及工程经验, 计算时回填土变形模量取 3~9 MPa; 回填土泊松比取 0.25~0.42; 土-土摩擦系数取 0.2~0.8<sup>[18, 20]</sup>。基于 ASCE No.119 的建议, 上述分析采用的沟槽宽度  $B$  均为 2 倍管径, 但工程中沟槽宽度的确定多基于施工条件, 如按 GB50268 确定的最小沟槽宽度  $B/D$  约为 1.5, 分析时适当扩大  $B/D$  范围取 1.5~3。

各参数下的土压力分布如图 7 所示。可以看出, 回填土模量的增加使得土压力减小, 这是由于土体模量越大, 填土越紧密, 从而更易形成整体, 起到一定的拱效应。泊松比、土-土摩擦系数与变形模量的土压力变化规律较为类似, 在此不再赘述。对比第 2 节模型结果, 回填土变形模量、泊松比和土-土摩擦系数的改变, 分别使峰值土压力在原模型的基础上变化 -7.6%~5.5%、-5.2%~6.1%、-6.1%~10%, 均在 10% 以内。沟槽越宽, 沟槽侧壁的影响越小, 管道所受的土压力逐渐增大, 但峰值土压力波动范围仅为 -12.1%~14.2%。此外, 对于埋深 4 m 的情况同样进行了参数敏感性分析, 结果与上述分析类似。因此, 工程实践中, 为改善管道受力条件, 应尽可能的提高

回填土的材料性能、增加回填土与原状土的接触面粗糙程度及采用较窄的沟槽, 以减轻土压力。

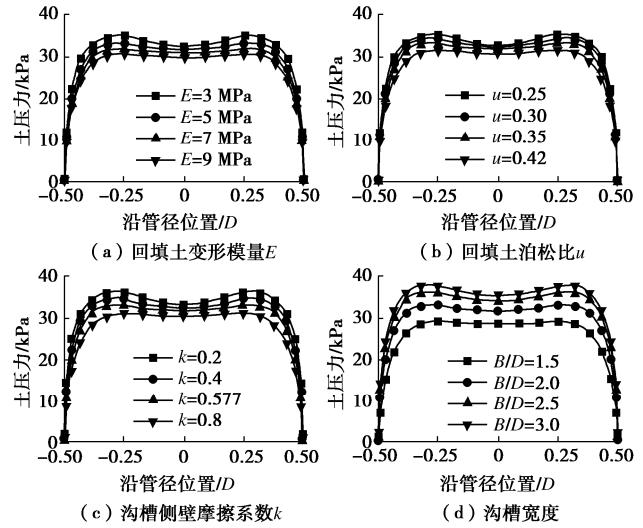


图 7 相关参数的敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of related parameters

## 4 盆式土压力模型

以往的土压力分布多假定为均匀或抛物线形式, 而大直径管道的基本形式为“倒盆形”, 与传统假定存在较大区别。为此, 本文提出一种新型的土压力计算模型-盆式模型, 来模拟大直径管道的土压力分布, 计算图式如图 8 所示。

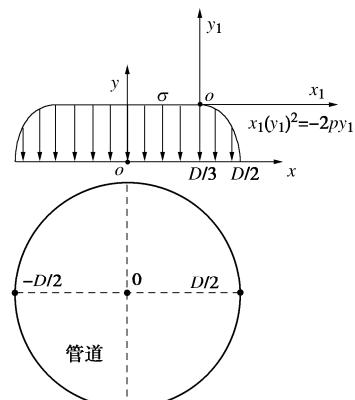


图 8 盆式模型计算图式

Fig. 8 Calculation diagram of basin model

### 4.1 “直线+抛物线” 土压力分布形式

上述分析中土压力分布的界限大体在距离管中心  $(0.25 \sim 0.4)D$  处, 后经多次试算并考虑计算方便性, 在盆式模型中假定以距离管中心  $D/3$  为界限, 在  $[0, D/3]$  范围内为均匀分布即土压力  $\sigma$  为一定值,  $[D/3, D/2]$  为抛物线分布, 即采用“直线+抛物线”的盆形来描述大直径管道顶部的土压力分布形式。由于盆式土压力分布关于轴线对称, 以图 8 的右半侧为例进行土

压力分布公式推导, 过程如下。

当  $0 \leq x \leq D/3$  时,

$$y(x) = \sigma \quad , \quad (3)$$

当  $D/3 \leq x \leq D/2$  时, 在  $x_1-y_1$  坐标系内, 假定抛物线方程为

$$x_1^2 = -2p y_1 \quad , \quad (4)$$

代入边界条件:  $x_1 = D/6$ ,  $y_1 = -\sigma$ , 得  $p = D^2/72\sigma$ , 故在  $x_1-y_1$  坐标系内, 抛物线方程为

$$x_1^2 = -\frac{D^2}{36\sigma} y_1 \quad , \quad (5)$$

经坐标变换,

$$\left( x - \frac{D}{3} \right)^2 = -\frac{D^2}{36\sigma} (y - \sigma) \quad , \quad (6)$$

在  $x-y$  坐标系内, 抛物线方程变为

$$y(x) = -\frac{36\sigma}{D^2} \left( x - \frac{D}{3} \right)^2 + \sigma = -\frac{36\sigma}{D^2} x^2 + \frac{24\sigma}{D} x - 3\sigma \quad , \quad (7)$$

故“直线+抛物线”土压力分布形式的公式表达为

$$y(x) = \begin{cases} \sigma & (0 \leq x \leq D/3) \\ -\frac{36\sigma}{D^2} x^2 + \frac{24\sigma}{D} x - 3\sigma & (D/3 \leq x \leq D/2) \end{cases} \quad (8)$$

#### 4.2 “Marston+胸腔”荷载计算方法

相较于棱柱荷载, Marston 荷载大小总体上较为接近实际土压力, 高埋深时优势明显, 但低埋深时结果偏小, 这是由于以往埋地管道的管径较小, 胸腔土体的影响很小, 故传统的计算方法并未考虑其影响, 但对大直径管道而言, 浅埋时胸腔土体的影响很大。假定胸腔土体完全作用于管道, 其产生的土压力沿管径均匀分布, 计算公式为

$$\sigma = \gamma \left( \frac{D^2}{2} - \frac{1}{2} \pi \frac{D^2}{4} \right) / D = 0.107\gamma D \quad . \quad (9)$$

为探究胸腔土体的影响程度, 将胸腔土体产生的土压力与棱柱荷载进行比较, 定义胸腔土压力影响因子  $\lambda$  为

$$\lambda = 0.107\gamma D / (\gamma H) \times 100\% = 0.107D / H \times 100\% \quad . \quad (10)$$

可见,  $D/H$  越大, 胸腔土体的影响越显著, 如管径 3 m、埋深 2 m 时, 胸腔土体可在原有棱柱荷载的基础上增加 16.1% 的土压力; 但当  $D/H < 1$  即管径小于埋深时, 其影响低于 10.7%。

工程实践中, 小直径管道的管径通常远小于埋深, 基本可以忽略胸腔土体的影响, 但大直径管道的管径大于埋深的情况较为常见, 胸腔土体应予以考虑。因此, 针对大直径埋地钢管的特点, 以 Marston 荷载为基础, 考虑胸腔土体的影响, 提出了“Marston+胸腔”

荷载计算方法见图 9, 计算公式为

$$\sigma = \begin{cases} C_d \gamma B + 0.107\gamma D & (D > H) \\ C_d \gamma B & (D \leq H) \end{cases} \quad . \quad (11)$$

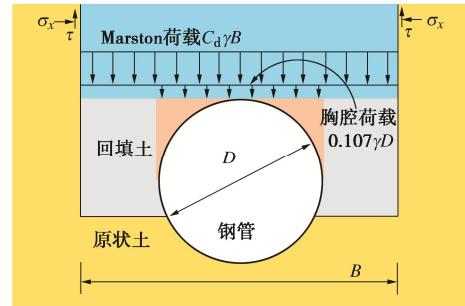


图 9 “Marston+胸腔”荷载计算示意

Fig. 9 Calculation diagram of "Marston + pleura" load

#### 4.3 盆式模型适用性研究

为了研究本文提出的盆式模型的适用性, 从管径、埋深及径厚比等方面, 将盆式土压力模型的结果与有限元分析计算结果的土压力分布进行对比, 比较结果如图 10 所示。可以看出, 当径厚比为 100 时, 管道承受的土压力最大, 受力最为不利, 此时模型的吻合程度最高。直线段分布形式能够反应管中心区域土压力平缓变化特性, 抛物线段分布形式可体现管腰附近土压力急剧变化情况。总体来看, 该模型土压力分布范围基本上能够覆盖管道浅埋、深埋及各种径厚比情况, 与有限元结果有较好的贴合度。径厚比越低, 贴合程度越好, 且对径厚比高、安全风险大的管道, 存有较高的安全裕度。

表 2 为各土压力模型与有限元结果 (径厚比为 100) 的比较。从峰值比较来看, 盆式模型为有限元结果的 0.93~1.11 倍, 相应的棱柱荷载及 Marston 荷载分别为有限元结果的 0.66~1.57 倍和 0.64~1.04 倍。3 种模型比较而言, 传统的棱柱和 Marston 荷载模型在管道埋深很浅时, 土压力计算结果明显偏小, 而盆式模型精确度有了显著的提升, 尤其是在管径特别大的情况下。从均值比较来看, 盆式模型为有限元结果的 0.97~1.18 倍, 相应的棱柱荷载及 Marston 荷载分别为 0.78~1.94 倍和 0.76~1.31 倍, 可见传统模型的土压力均匀分布形式有利有弊, 虽能缩小浅埋时计算结果过小的误差, 但同时也显著放大了高埋深下计算结果过大的缺陷, 相较而言, 盆式模型的分布形式更为优越。故无论是峰值比较还是均值比较, 盆式模型的总体精确度均远高于传统模型, 且适用范围更广。

总体而言, 对于管径不小于 1.2 m, 径厚比在 100~300 范围内常见的大直径埋地钢管, 该模型土压力分布形式较传统模型有了明显的提升, 其计算方法较传统模型精确程度更高, 适应性更强。其中对于径厚比

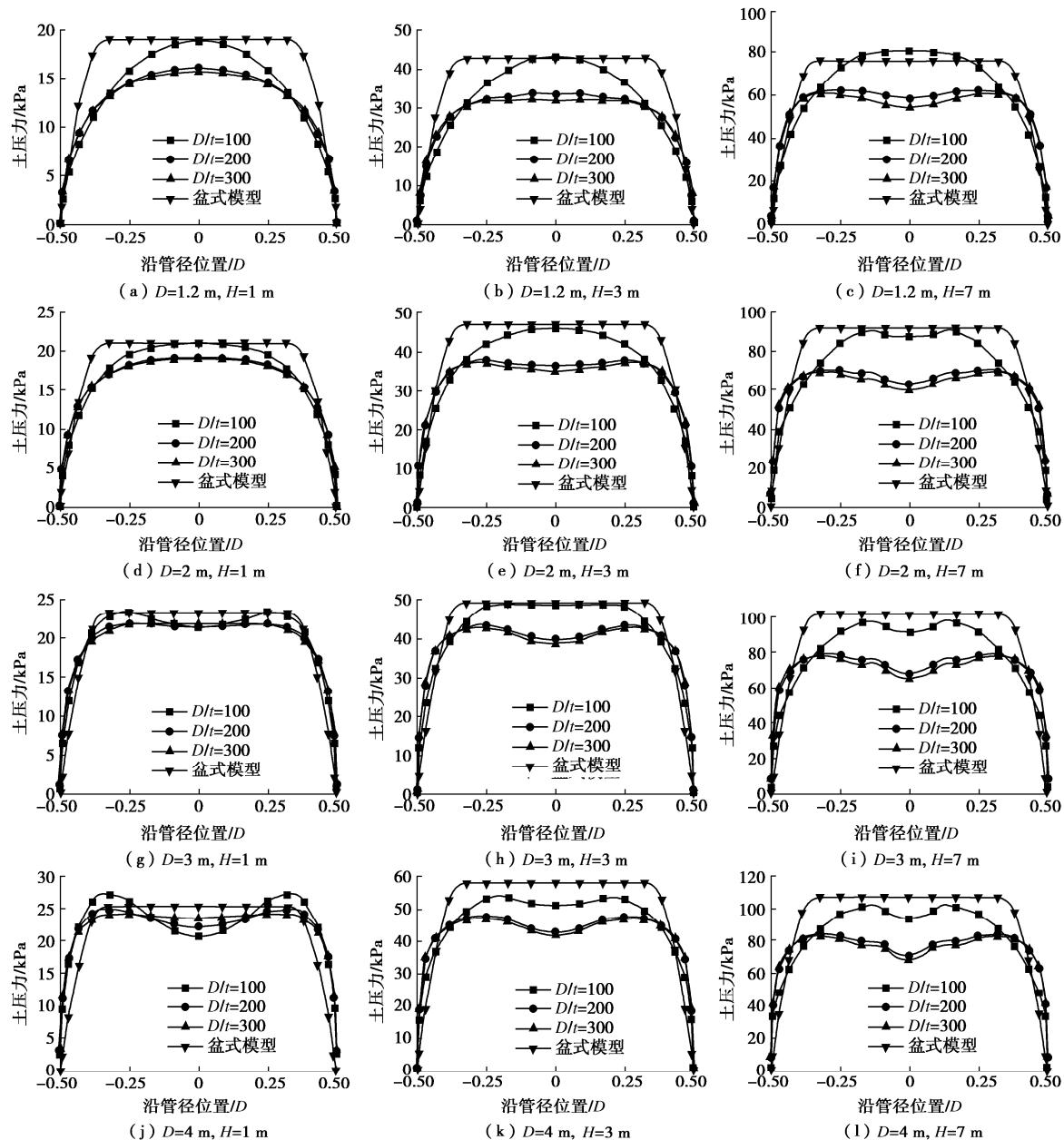
图 10 各管径  $D$ 、径厚比  $D/t$  及埋深  $H$  下的土压力Fig. 10 Soil pressures under different pipe diameters  $D$ , diameter-thickness ratios  $D/t$ , and cover depths  $H$ 

表 2 各土压力模型与有限元结果 (径厚比为 100) 的比较

Table 2 Comparison of soil pressure models and finite element results (diameter-thickness ratio of 100)

比较类型	埋深 /m	峰值土压力比较				均值土压力比较			
		管径 1.2 m	管径 2 m	管径 3 m	管径 4 m	管径 1.2 m	管径 2 m	管径 3 m	管径 4 m
盆式模型 /有限元结果	1	1.01	1.00	0.99	0.93	1.18	1.07	1.00	0.97
	3	0.99	1.11	1.01	1.08	1.16	1.11	1.02	1.09
	7	0.94	1.01	1.03	1.04	1.03	1.09	1.11	1.10
棱柱荷载 /有限元结果	1	0.96	0.86	0.77	0.66	1.26	1.03	0.87	0.78
	3	1.25	1.18	1.11	1.00	1.65	1.43	1.26	1.15
	7	1.57	1.39	1.28	1.23	1.94	1.69	1.55	1.46
Marston 荷载 /有限元结果	1	0.88	0.82	0.75	0.64	1.17	0.98	0.85	0.76
	3	0.99	1.02	1.01	0.93	1.31	1.24	1.15	1.07
	7	0.94	1.01	1.03	1.04	1.17	1.23	1.25	1.24

为 100 的管道, 误差控制在 20% 以内且总体偏大, 对于径厚比更高的管道, 该模型更为安全。此外, 该模型对于小于 1.2 m 或径厚比低于 100 的埋地钢管以及其他埋地柔性管道是否适用, 仍值得后续深入探讨。

## 5 结 论

(1) 大/小直径管道的土压力分布基本形式分别为“倒盆形”和抛物线形, 两者存在明显不同。径厚比及埋深对土压力影响显著, 随着径厚比或埋深的增加, 管道竖向收缩变形加剧, 加大了胸腔管壁分担的荷载, 土压力峰值逐步由管中心位置移向管侧胸腔, 但径厚比大于 200 后, 土压力变化很小。此外, 土压力大小随着回填土变形模量及泊松比、沟槽侧壁土-土摩擦系数的增加而降低, 影响程度均在 10% 以内; 沟槽宽度的影响也较为有限, 沟槽越宽, 土压力越大。

(2) 棱柱荷载和 Marston 荷载假定的均匀分布虽计算简便, 但与大直径管道实际明显不符。棱柱荷载在高埋深时结果过大, 而 Marston 荷载在低埋深时结果偏小, 两种荷载的计算精度及适应性较差。大直径管道浅埋时, 胸腔土体的影响需予以考虑。

(3) 对于管径不小于 1.2 m 且径厚比不小于 100 的大直径埋地钢管提出了一种新型的管顶土压力计算模型-盆式模型, 其荷载分布采用“直线+抛物线”形式, 荷载大小按照“Marston+胸腔”荷载计算。该模型能够消减传统模型的缺陷, 其土压力分布及大小基本能够覆盖管道浅埋、深埋及多种径厚比情况, 计算精度及适应性较好, 可为大直径埋地钢管的结构设计及规范制定提供借鉴和参考。

## 参考文献:

- [1] 王 浩, 游进军. 中国水资源配置 30 年[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 265 - 271, 282. (WANG Hao, YOU Jin-jun. Progress of water resources allocation during the past 30 years in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 265 - 271, 282. (in Chinese))
- [2] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[ER/OL]. [2021-03-23]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202103/t20210323\\_1270124.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202103/t20210323_1270124.html).
- [3] 水利水电工程压力钢管设计规范: SL/T 281—2020[S]. 2020. (Design Specification for Steel Penstocks of Water Conservancy and Hydropower Engineering: SL/T 281—2020[S]. 2020. (in Chinese))
- [4] 伍鹤皋, 于金弘, 石长征, 等. 水利水电行业回填钢管设计若干问题探讨[J]. 人民长江, 2020, 51(8): 141 - 146. (WU He-gao, YU Jin-hong, SHI Chang-zheng, et al. Discussion on some problems in design of buried steel pipe for water conservancy and hydropower industry[J]. Yangtze River, 2020, 51(8): 141 - 146. (in Chinese))
- [5] MARSTON A, ANDERSON A O. The Theory of Loads on Pipes in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipes[R]. Bulletin 31, Iowa Engineering Experiment Station, Ames, Iowa, USA, 1913.
- [6] American Water Works Association. Steel pipe: A guide for design and installation[S]. 2017.
- [7] LI L, DUBÉ J, AUBERTIN M. An extension of Marston's solution for the stresses in backfilled trenches with inclined walls[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2013, 31(4): 1027 - 1039.
- [8] SHMULEVICH I, GALILI N, FOUX A. Soil stress distribution around buried pipes[J]. Journal of Transportation Engineering, 1986, 112(5): 481 - 494.
- [9] 周正峰, 凌建明, 梁 磐. 输油管道土压力分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011(4): 794 - 797. (ZHOU Zheng-Feng, LING Jian-ming, LIANG Bin. Analysis of earth pressure on oil pipe[J]. Journal of Chongqing Jiao Tong University: Natural Science, 2011(4): 794 - 797. (in Chinese))
- [10] 周正峰, 苗禄伟, 梁 磐. 输油管道土压力影响因素有限元分析[J]. 中外公路, 2014(5): 48 - 53. (ZHOU Zheng-Feng, MIAO Lu-wei, LIANG Bin. Finite element analysis of influencing factors of soil pressure in oil pipe[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2014(5): 48 - 53. (in Chinese))
- [11] 李永刚. 埋地管道周围土压力分布规律的试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017. (LI Yong-gang. Experimental Study on Earth Pressure Distribution around Buried Pipeline[D]. Zhengzhou: University of Technology, 2017. (in Chinese))
- [12] TIAN Y, LIU H, JIANG X, et al. Analysis of stress and deformation of a positive buried pipe using the improved Spangler model[J]. Soils and Foundations, 2015, 55(3): 485 - 492.
- [13] KAWABATA T, LING H I, MOHRI Y, et al. Behavior of buried flexible pipe under high fills and design implications[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(10): 1354 - 1362.
- [14] KAWABATA T, MOHRI Y, TAMURA H, et al. Field test for buried large steel pipes with thin wall[C]// Pipelines 2006: Service to the Owner 2006, Chicago.

- [15] 伍鹤皋, 于金弘, 石长征, 等. 大直径回填钢管管土相互作用研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, 53(10): 1053–1061. (WU He-gao, YU Jin-hong, SHI Chang-zheng, et al. Pipe-soil interaction of large-diameter buried steel pipe[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2020, 53(10): 1053–1061. (in Chinese))
- [16] WU H G, YU J H, SHI C Z, et al. Pipe-soil interaction and sensitivity study of large-diameter buried steel pipes[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 1(12): 793–804.
- [17] 周敏, 杜延军, 王非, 等. 地层沉陷中埋地 HDPE 管道力学状态及模型试验分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 253–262. (ZHOU Min, DU Yan-jun, WANG Fei, et al. Physical modeling of mechanical responses of HDPE pipes and subsurface settlement caused by land subsidence[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 253–262. (in Chinese))
- [18] 给水排水工程埋地钢管管道结构设计规程: CECS 141—2002[S]. 2002. (Specification for Structural Design of Buried Steel Pipeline of Water Supply and Sewerage Engineering: CECS 141—2002[S]. 2002. (in Chinese))
- [19] 给水排水管道工程施工及验收规范: GB 50268—2008[S]. 2008. (Code for Construction and Acceptance of Water and Sewerage Pipeline Works: GB 50268—2008[S]. 2008. (in Chinese))
- [20] 化建新, 郑建国, 王笃礼, 等. 工程地质手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. (HUA Jian-xin, ZHENG Jian-guo, WANG Du-li, et al. Engineering Geology Manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press. (in Chinese))
- [21] 袁聚云, 钱建固, 张宏鸣, 等. 土质学与土力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (YUAN Ju-yun, QIAN Jian-gu, ZHANG Hong-ming, et al. Soil Properties and Soil Mechanics[M]. Beijing: China Communications Press. (in Chinese))
- [22] WHIDDEN W R. Buried Flexible Steel Pipe: Design and Structural Analysis[S]. 2009.
- [23] 李新慧. 天然气埋地管道沉降的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 1): 259–263. (LI Xin-hui. Finite element analysis of settlement of buried natural gas pipelines[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S1): 259–263. (in Chinese))
- [24] MEGUID M A, YOUSSEF T A. Experimental investigation of the earth pressure distribution on buried pipes backfilled with tire-derived aggregate[J]. Transportation Geotechnics, 2018, 14: 117–125.
- [25] 埋地塑料给水管道工程技术规程: CJJ 101—2016[S]. 2016. (Technical Specification for Buried Plastic Pipeline of Water Supply Engineering: CJJ 101—2016[S]. 2016. (in Chinese))
- [26] 日本水門鉄管協会. 水門鉄管技術基準[S]. 2007. (Hydraulic Gate and Penstock Association. Technical Standards for Gates and Penstocks[S]. 2007. (in Japanese))