

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240827

不同土抗力分布模式下沉井后背土体稳定性计算方法研究

卢辰^{1,2}, 郑建建^{1,2}

[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. 上海水业设计工程有限公司, 上海市 200092]

摘要: 顶管工程中, 顶管工作井后背土体的稳定性是十分重要的控制指标。以矩形沉井顶管工作井为例, 对比分析了顶力作用下不同土抗力分布模式后背土体稳定性计算方法, 基于土抗力梯形分布模式, 提出了一种新的沉井顶管工作井后背土体稳定性计算方法。通过计算分析, 认为线形分布模式计算方法相对偏保守, 对于深度较浅或土质较差的沉井, 当顶力较大时, 按照梯形分布模式计算沉井顶管工作井后背土体稳定性, 在保证安全性的前提下, 更具有经济性。以上结果可为类似工程提供参考。

关键词: 顶管; 土抗力; 沉井; 稳定性

中图分类号: TU473.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0313-04

Research on Calculation Methods for Stability of Open Caisson Backward Soil under Different Soil Resistance Distribution Patterns

LU Chen^{1,2}, ZHENG Jianjian^{1,2}

[1. Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Water Design Engineering Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: In pipe jacking engineering, the stability of the soil behind the pipe jacking working shaft is a very important control index. Taking the rectangular open caisson pipe jacking working shaft as an example, the calculation methods for backward soil stability of different soil resistance distribution patterns under the jacking role are compared and analyzed. Based on the trapezoidal distribution pattern of soil resistance, a new method for calculating the stability of the backward soil of open caisson pipe jacking working shaft is proposed. Through the calculation and analysis, it is considered that the calculation method of linear distribution patterns is relatively conservative. For the shallow depth or poor soil quality of the open caisson, when the jacking force is high, the stability of backward soil of open caisson pipe jacking working shaft is calculated according to the trapezoidal distribution pattern, which is more economical under the premise of ensuring safety. The above results can provide reference for similar projects.

Keywords: pipe jacking; soil resistance; open caisson; stability

0 引言

顶管工程中, 顶管井经常采用沉井形式并利用沉井井壁作为顶管后背, 当顶管力较大时, 后背土体的稳定是十分重要的控制指标^[1]。在顶力作用下, 沉井的水平方向受力状态比较复杂。以矩形沉井顶管工作井为例, 井体受到的作用力有: 顶力 P 、后座井壁土抗力 F_p 、井侧壁摩阻力 $f_{侧壁}$ 、井底摩阻力 $f_{底}$ 和

前壁主动土压力 F_a , 如图1所示。当顶力增大到临界值时, 最大土抗力将由主动土压力达到被动土压力, 此时工作井后背土体稳定性达到临界状态, 顶力继续增大, 后座井壁后部土体将发生破坏, 沉井发生倾覆^[2]。

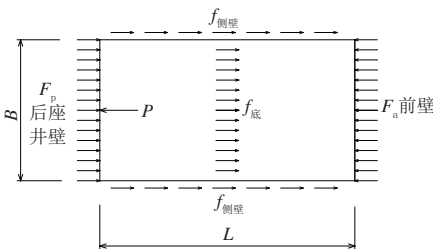


图1 矩形沉井受力分析图

沉井后背土体稳定性验算是基于工作井达到临界状态时水平方向受力平衡来考虑的, 即:

收稿日期: 2024-07-29

作者简介: 卢辰(1976—), 男, 工学硕士, 正高级工程师, 从事给排水厂站、管线等结构设计工作。

通信作者: 郑建建(1987—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事给排水厂站、管线等结构设计工作。电子信箱: zhentju@126.com

$$P = F_p + f_{\text{侧壁}} + f_{\text{底}} - F_a \quad (1)$$

《给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程》(CECS 137:2015)^[3](以下简称沉井规程)为了安全起见,不考虑井壁的侧摩阻力和井底的摩阻力,并考虑了顶力与土压力合力作用点可能不一致的折减系数。顶管井土压力计算与其竖向分布形式有很大关系,前壁主动土压力按照朗肯土压力理论呈线性分布,而后壁被动土压力受到顶力的影响,分布形式比较复杂,根据目前研究有多种分布模式。本文以矩形沉井为例,对比分析了顶力作用下不同土抗力分布模式后背土体稳定计算方法,并基于土抗力梯形分布模式,提出了一种新的沉井顶管工作井后背土体稳定性计算方法。

1 顶力作用下后背土抗力分布模式

顶管施工前,沉井前后壁土压力为静止土压力;顶管施工时,在顶力作用下,沉井开始产生位移,随着井位移变大,前壁土压力变为主动土压力,后背土体产生抗力;当顶力继续增大达到临界状态时,后背土体抗力变为被动土压力。文献[4]中总结了5种竖向土抗力分布模式,见图2。

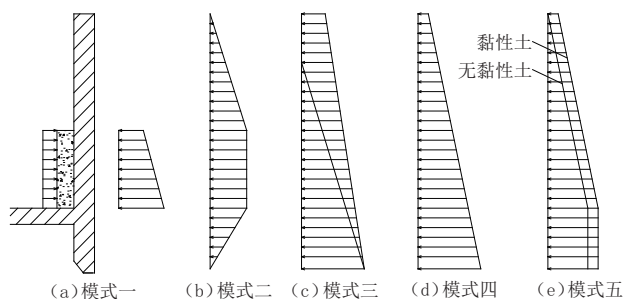


图2 矩形沉井顶管工作井后背土体竖向土抗力分布模式图

由于沉井壁板刚度较大,图2中(a)、(b)的分布模式相对欠合理,图2中(c)、(d)的线形模式基于朗肯土压力理论,是较为常用的分布形式,魏纲等^[2]考虑井壁会产生一定的弹性变形,通过计算提出了图2中(e)的梯形分布模式,折点约位于沉井内底处。本文基于线形模式、梯形模式两种土抗力分布模式,对比分析沉井后背土体稳定性计算方法。

2 不同土抗力模式下沉井稳定计算

2.1 线形模式

土抗力呈线性分布时,相应被动土压力也呈线性分布,沉井规程中采用的分布形式也是此种形式(见图3),计算可参照沉井规程方法写成下列形式。

$$P_{tk} = \xi (0.8E_{pk} - E_{ep,k}) \quad (2)$$

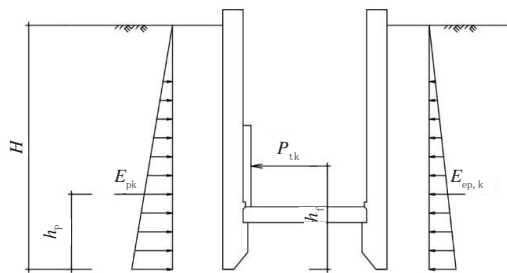


图3 矩形沉井顶管工作井后背土体稳定性计算简图(线形模式)

$$E_{pk} = \frac{1}{2} B H F_{pk} \quad (3)$$

$$E_{ep,k} = \frac{1}{2} B H F_{ep,k} \quad (4)$$

式中: P_{tk} 为顶管力标准值,kN; ξ 为考虑顶管力与土压力合力作用点可能不一致的折减系数, $(h_f - h_p)/h_f$; E_{pk} 为沉井后方被动土压力合力标准值,kN; F_{pk} 为刃脚底部被动土压力标准值,kN/m²; $E_{ep,k}$ 为沉井前方主动土压力合力标准值,kN; $F_{ep,k}$ 为刃脚底部被动土压力标准值,kN/m²; H 为沉井入土深度,m; B 为沉井外壁宽度,m; h_p 为土压力合力至刃脚底的距离 $h_p = H/3$,m; h_f 为顶管力至刃脚底的距离,m。

2.2 梯形模式

对于土抗力呈梯性分布,被动土压力在沉井内底以下不会是理想的矩形分布(见图4),为简化计算,本文提出了如下计算模式:沉井内底以上部分为线性分布,沉井内底以下部分为矩形分布,矩形部分被动土压力取矩形中间位置计算,由此后背土稳定计算公式可写成下列形式。

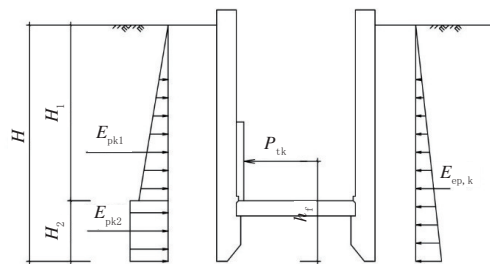


图4 矩形沉井后背稳定计算图(梯形模式)

$$P_{tk} = \xi [0.8(E_{pk1} + E_{pk2}) - E_{ep,k}] \quad (5)$$

$$E_{pk1} = \frac{1}{2} B H_1 F_{pk1} \quad (6)$$

$$E_{pk2} = B H_2 F_{pk2} \quad (7)$$

式中: E_{pk1} 为沉井后方内底以上被动土压力合力标准值,kN; F_{pk1} 为内底位置被动土压力标准值,kN/m²; E_{pk2} 为沉井后方内底以下被动土压力合力标准值,kN; F_{pk2} 为内底至刃脚底部1/2高度处被动土压力标准值,kN/m²; H_1 为沉井内底以上高度,m; H_2 为沉井内底以下高度,m。

由于被动土压力与主动土压力不在一条直线

上,折减系数中高度 h_p 取被动土压力、主动土压力至刃脚底距离的平均值,其它参数的含义同线形模式。

3 算例对比分析

为了对两种模式的后背土体稳定计算方法,结合陕西省西安市某实际顶管工作井工程进行分析比较。顶管井为矩形沉井形式,外轮廓尺寸为6 m×12 m,沉井深度范围内为均匀土层,土层重度 $\gamma=18\text{ kN/m}^3$ 、浮重度 $\gamma'=10\text{ kN/m}^3$,地下水位在地面以下-1.50 m,顶管中心标高位于底板以上1.5 m。

3.1 不同井体总高度最大允许顶力计算分析

沉井内底至刃脚底高度3.5 m,井体总高度分别为12、15、18 m,土体等效内摩擦角 20° ,最大允许顶力计算结果如表1和图5。可以看出,在3种不同井体总高度的情况下,梯形模式最大允许顶力计算值均比线形模式计算值大,且井体总高度越小两者相差越大,井体总高度越大,两种计算模式结果越趋于接近。

表1 不同井体总高度最大允许顶力计算结果

计算模式	井体总高度/m		
	12	15	18
线形模式/kN	4 339	8 320	9 467
梯形模式/kN	4 545	8 484	9 590
相差百分比/%	4.75	1.97	1.3

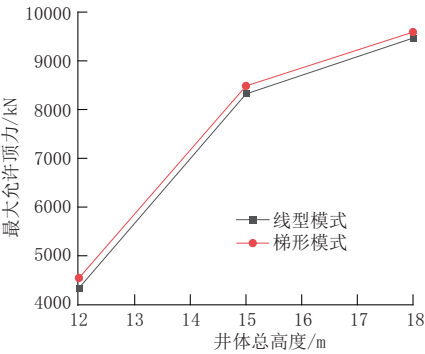


图5 不同井体总高度最大允许顶力计算结果(单位:kN)

3.2 不同井内底至刃脚底高度最大允许顶力计算分析

沉井井体总高度为15 m,井内底至刃脚底长度分别为2.5、3.5、4.5 m,土体等效内摩擦角 20° ,允许顶力计算结果见表2和图6。可以看出,在3种不同的井内底至刃脚底长度的情况下,梯形模式最大允许顶力计算值均比线形模式计算值大,且井内底至刃脚底高度越大两者的差距越大。

3.3 不同土体内摩擦角最大允许顶力计算分析

沉井井体总高度为15 m,内底至刃脚底高度为

表2 不同井内底至刃脚底高度最大允许顶力计算结果

计算模式	井内底至刃脚底长度/m		
	25	35	45
线形模式/kN	6 240	8 320	6 933
梯形模式/kN	6 328	8 484	7 221
相差百分比/%	1.41	1.97	4.15

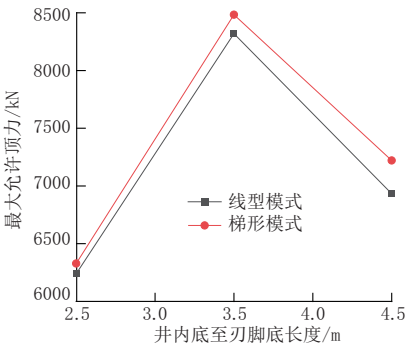


图6 不同井内底至刃脚底高度最大允许顶力计算结果(单位:kN)

3.5 m,土体等效内摩擦角分别取 20° 、 25° 、 30° ,允许顶力计算结果见表3和图7。可以看出,在3种不同的土体等效内摩擦角下,梯形模式最大允许顶力计算值比线形模式计算值大,而随着内摩擦角变化,计算值相差百度比变化不大。

表3 不同土体内摩擦角最大允许顶力计算结果

计算模式	土体等效内摩擦角/($^\circ$)		
	20	25	30
线形模式/kN	8 320	11 410	15 066
梯形模式/kN	8 484	11 602	15 293
相差百分比/%	1.97	1.68	1.51

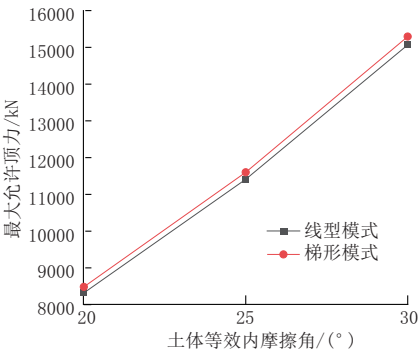


图7 不同土体内摩擦角最大允许顶力计算结果(单位:kN)

3.4 总体分析

以上对比了不同井体总高度、不同井内底至刃脚底高度、不同土体内摩擦角等三种情况下线形模式和梯形模式的最大允许顶力计算结果,均表现出梯形模式最大允许顶力计算值比线形模式计算值大。这可以通过对比两种模式土压力与朗肯理论土压力进行说明,如图8(a)、(b),当地下水位高、按朗肯理论计算的土压力沿沉井竖向非直线分布时,梯

形模式计算的土压力相对更贴近朗肯土压力线,因此比线形模式计算值大,合力作用点的位置也相对合理;当地下水位低、土压力沿沉井竖向是直线分布时,线形模式与梯形模式计算结果一致。

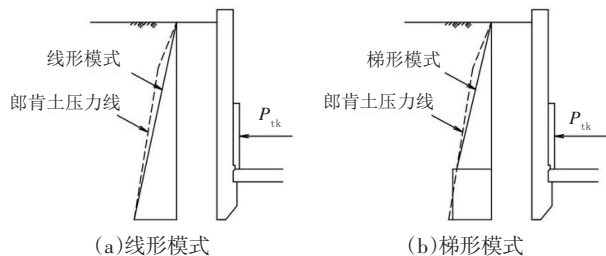


图8 不同土抗力模式与朗肯土压力对比图

4 结 语

(1)针对作为顶管井的矩形沉井,基于土抗力梯形分布形式,本文提出了一种新的沉井后背土体稳

定计算方法。

(2)通过计算分析可以看出,线形模式计算相对偏安全,对于地下水位高、深度较浅或土质较差的沉井,如果顶力较大,按梯形模式计算,具有一定合理性。

(3)目前缺乏对顶管井后背土抗力分布的实测数据,沉井后背土体稳定计算方法尚需通过积累工程实践数据进行验证和完善。

参考文献:

- [1] 龚慈,魏纲,徐日庆.顶管施工中矩形沉井工作井允许反力的计算[J].岩土力学,2005,26(7):1127-1131.
- [2] 魏纲,徐日庆,龚慈,等.顶管工程中矩形沉井土抗力计算方法探讨[J].中国市政工程,2005(1):50-52.
- [3] CECS137:2015,给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程[S].
- [4] 绳结斌,魏纲,郭志威.顶管工作井后背土抗力计算方法研究综述[J].市政技术,2009,27(6):581-584.

(上接第308页)

渗漏水的源头病害进行治理,现场实测效果较好。结合分析研究结果主要形成了以下结论:

(1)地下隧道结构变形缝处渗漏水最为严重,且路面病害的主要原因为变形缝水压力较大而导致沿路面结构层发生横向窜水;

(2)隧道结构健康监测数据表明,浅埋段受温差影响,变形缝伸缩明显,对防水功能影响较大;

(3)针对变形缝防水功能恢复应综合考虑,制定多层次系统性的解决方案,材料选择时应结合隧道结构监测变形结果共同拟定,材料的延伸性应满足变形缝的变形要求。

参考文献:

- [1] 龚晓南,郭盼盼.隧道及地下工程渗漏水诱发原因与防治对策[J].

中国公路学报.2021,34(7):1-30.

- [2] 路建军.运营期隧道渗漏水现状研究综述[J].隧道与轨道交通,2023(增刊1):21-24.
- [3] 马伟斌,柴金飞.运营铁路隧道病害检测、监测、评估及整治技术发展现状[J].隧道建设(中英文),2019,39(10):1553-1562.
- [4] 董飞,房倩,张顶立,等.北京地铁运营隧道病害状态分析[J].土木工程学报,2017,50(6):104-113.
- [5] 黄俊,杨奎,董飞,等.城市地下立交隧道运营期渗漏水病害研究[J].隧道与轨道交通,2023(增刊1):119-123.
- [6] 黄立维,赵卫全,张金接,等.大孔隙地层防堵漏灌浆新技术及工程应用[J].中国水利水电科学研究院学报,2018,16(5):510-519.
- [7] 李鹏飞.地铁车站侧墙防渗漏施工技术研究[J].现代交通技术,2022,19(5):81-85.
- [8] 丁鸿志,邹鸿浩,赵光,等.城市地下道路隧道结构健康监测研究[J].城市道桥与防洪,2023(1):49.