

非牛顿流体滩涂钢板桩围堰泄漏量分析

袁淑霞,裴龙瑶,张宇鹏,段育轩

(西安石油大学机械工程学院,陕西 西安 710065)

摘要:以非牛顿流体淤泥为介质,采用 ANSYS Fluent 软件,对滩涂埋地管道抢修围堰不同位置的泄漏量进行研究,得到稠度系数、幂律指数、缝隙尺寸对围堰泄漏量的影响规律,并对围堰内部淤泥每小时上升高度进行了计算。结果表明:幂律指数小于 1 时,发生剪切稀化,淤泥表观黏度随剪切应变率的增加而降低;随着幂律指数的增大,泄漏量逐渐增加,淤泥表观黏度随幂律指数的增大而降低,尤其是幂律指数大于 1 时,泄漏量进一步增加,说明流体流动过程中剪切应变率小于 1。稠度系数增大时,围堰的泄漏量逐渐降低;缝隙尺寸增加时,围堰的泄漏量显著增大。当幂律指数为 0.3~0.5、稠度系数为 3~9 kPa·s、缝隙尺寸为 5~10 mm 时,围堰内部淤泥上升的总高度对围堰内部施工影响很小。

关键词:泄漏量;围堰;非牛顿流体;幂律指数;稠度系数;表观黏度

中图分类号: TB126 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2023)04-0067-06

Analysis on leakage of steel sheet cofferdam in mud flat of non-Newtonian flow//YUAN Shuxia, PEI Longyao, ZHANG Yupeng, DUAN Yuxuan(*School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China*)

Abstract: Taking the mud as non-Newtonian fluid, the leakage of the cofferdam in different positions for emergency repair of buried pipeline in mud flat was studied using ANSYS Fluent software. The influence of non-Newtonian consistency coefficient, power law index, and gap size on leakage was discussed, and the hourly rise of mud in the cofferdam was calculated. The results indicate that when the power law index is less than 1, shear thinning occurs, and the apparent viscosity of mud decreases with the increase in shear strain rate. With the increase in power law index, the leakage increases gradually, indicating that the apparent viscosity decreases with the increase in power law index. Moreover, when the power law index is greater than 1, the leakage increases further, indicating that the shear strain rate is less than 1 during flow process. The leakage of the cofferdam decreases gradually with the increase in consistency coefficient, but increases significantly with the increase in gap size. When the power law index is in the range of 0.3 to 0.5, the consistency coefficient is in the range of 3 to 9 kPa·s, and the gap size is in the range of 5 to 10 mm, the total height of the mud rising inside the cofferdam has little effect on the construction inside the cofferdam.

Key words: leakage; cofferdam; non-Newtonian fluid; power law index; consistency coefficient; apparent viscosity

石油和天然气被誉为“工业的血液”,长输管道如血管一样将油气输送到四面八方。经济发达的东部沿海地区对管道输送能源有巨大的需求量。这些地区河流、水田、鱼塘、沼泽密布,导致油气长输管道在敷设过程中不可避免地穿越滩涂地带,这些地带的腐蚀性介质在水和环境因素的作用下会对金属管道产生腐蚀,造成管道泄漏^[1-2]。一旦发生管道腐蚀泄漏,快速抢修至关重要,否则容易导致原油凝管、燃气溢出,引发次生灾害。可拆卸、可重复利用的钢板桩围堰为管道快速抢修提供了解决方案。周新亚等^[3-6]对钢板桩围堰进行选型和结构设计,提高了围

堰施工效率。冯明锋等^[7-9]对围堰的定位、安装、清基、堵漏、封底和内部支撑等施工工艺进行了研究。张成瑞等^[10]对围堰施工中相邻钢板桩发生的泄漏现象进行分析,研究出新型围堰快捷堵漏方法。杜闯等^[11-12]采用 ANSYS 和 Midas/Civil 软件进行仿真模拟,对钢板桩围堰进行了强度和刚度分析,发现钢板桩的角部较为脆弱,需加强角部的连接。汤劲松等^[13-14]建立钢板桩有限元模型,通过对应力状况的分析确保其安全性满足要求。曾庆敦等^[15-16]对钢板桩围堰的稳定性和可靠性进行分析,确保其围堰设计满足要求。以上针对钢板桩围堰的研究主要集

中于结构设计及强度、刚度、稳定性等结构分析,这些研究确保了围堰的强度安全。但围堰的主要功能是防止泥水渗入,创造近似于陆地的管道修复环境,现有研究未对围堰的密封性能进行研究。淤泥属于非牛顿流体,其剪应力和剪切应变率之间的关系较为复杂,导致淤泥泄漏量与普通牛顿流体的泄漏量有很大差别。本文采用 ANSYS Fluent 软件对非牛顿流体淤泥在钢板桩围堰不同位置的泄漏量进行数值模拟,分析淤泥的稠度系数、幂律指数和围堰缝隙尺寸对淤泥泄漏量的影响,并计算了修复总时长内的泄漏量,对围堰的密封性进行了评估。

1 围堰建模

1.1 围堰总体结构

钢板桩围堰由钢管桩、钢桩、L 形钢桩等结构通过榫槽拼接而成,榫槽尺寸参考 HB 5964—2002《燕尾形榫头、榫槽尺寸标注与技术要求》。其内部总体布置包括施工平台、人梯、支撑围檩等,如图 1 所示。围堰内部尺寸假设为 $6.3\text{ m}\times 2.7\text{ m}$ 。

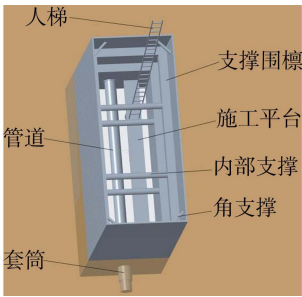


图 1 围堰总体结构

1.2 围堰泄漏量分析建模

当围堰建造完成后,排出内部水分和淤泥,在围堰内部进行管道修复。介质是否渗入围堰内部是评价围堰密封性的重要依据。淤泥由于存在压力和黏滞力,其剪切力与剪切应变率之间关系复杂,不满足线性关系,属于非牛顿流体,将剪切应力和剪切应变率之比定义为非牛顿流体的表观黏度。为研究非牛顿流体的流动问题,已提出了许多方程,但均不能适用于任意剪切范围。在常见的剪切应变率范围内,幂律方程应用最为广泛,工业上 80% 以上的非牛顿流体均采用幂律模型进行计算^[17]。因此本文采用非牛顿幂律流体模型进行计算。围堰榫槽处可放置密封条进行密封,因此可能存在的泄漏包括围堰底部以及管道穿过围堰处的缝隙。分别对两处建立流体域模型,采用 ICEM CFD 软件建立钢板桩围堰有限元模型^[18],采用 ANSYS Fluent 软件^[19]进行围堰底部及管道缝隙泄漏量模拟,对影响流体介质的因素包括稠度系数、幂律指数、围堰底部缝隙尺寸及管道缝隙尺寸进行分析,得出满足泄漏要求的稠度系

数、幂律指数和缝隙尺寸范围。

在滩涂地带中,存在水和淤泥两种介质,水层位于上部,淤泥层位于下部,钢板桩围堰固定于淤泥层中^[20],由于围堰周围受到压强的作用,围堰底部仍可能有一定淤泥渗入,其荷载主要有水压和淤泥的压力^[21]。围堰底部泄漏模拟过程中去掉围堰,将其等效成墙壁,围堰底部假设存在一条很窄的缝隙,流体可以通过该缝隙深入围堰;围堰外部淤泥为无限大区域,建模时选取一定区域进行计算,当围堰外部淤泥宽度大于等于内部宽度时,淤泥边界对计算结果无影响。建立的 1/4 模型如图 2 所示。

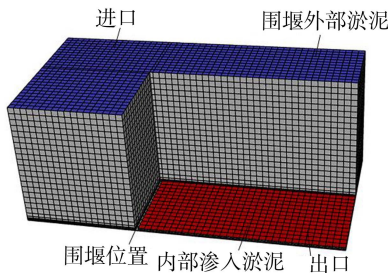


图 2 围堰底部模型及网格划分

本文通过流量对泄漏量进行间接模拟,考虑图 2 中出口的流量,流量与时间的乘积代表泄漏进围堰的淤泥体积,淤泥在围堰内部的升高高度通过间接计算得到。该方法没有考虑淤泥动态升高过程(不考虑网格的移动),不考虑该动态升高过程围堰内外压差的变化,所得泄漏量为该工况下的最大泄漏量,偏于安全。事实上淤泥升高高度与围堰外部淤泥高度相比很小,忽略网格移动对计算精度的影响很小。

模拟围堰钢板桩凹槽与管道交界处(图 3)的泄漏量时将钢板桩和管道等效为墙壁,仅在钢板桩和管道之间的缝隙内有流体存在,钢板桩外部淤泥为无限大区域,选取边界不影响计算精度为宜,根据简化结果,采用 ICEM CFD 建模并划分网格如图 4 所示,该模型中间空置部分为管道,其凸起部分为管道与凹槽之间的缝隙。图 2 和图 4 没有对水建模,模拟过程中将水考虑成静水压强施加于淤泥上表面。

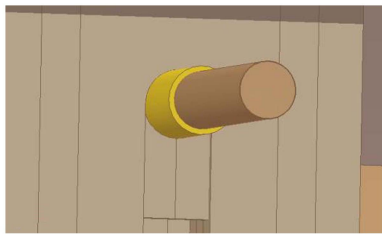


图 3 管道缝隙结构示意图

1.3 参数及边界条件设置

围堰泄漏量模拟是针对小缝隙进行的模拟,流动速度低,且介质为淤泥,黏度较大,因此选择层流模型。淤泥存在压力和黏滞力,其剪切应力与剪切

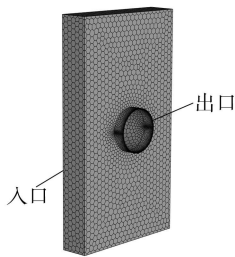


图4 管道缝隙泄漏模拟网格模型

应变率之间关系复杂,属于非牛顿流体,也属于幂律流体范围^[22-23],符合以下公式:

$$\tau = K\gamma^n \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力; K 为稠度系数; γ 为剪切应变率; n 为幂律指数。

幂律指数是非牛顿流体黏度的衡量标准,影响着剪切应变率与黏度关系曲线趋势。幂律指数越高或越低,曲线越弯曲,非牛顿性越强。当 $n < 1$ 时,流体为假塑性流体,在稳定的剪切运动下,其黏性随剪切应变率的增大而减小, n 越大,非牛顿性越弱,体现了假塑性流体的剪切稀化特性;当 $n = 1$ 时,流体为牛顿流体,其黏度不随剪切应变率变化;当 $n > 1$ 时,流体为膨胀流体,在稳定的剪切运动下,其黏性随剪切应变率的增大而增大, n 越大,非牛顿性越强^[24]。图5为不同幂律指数下剪切应变率与黏度关系图。

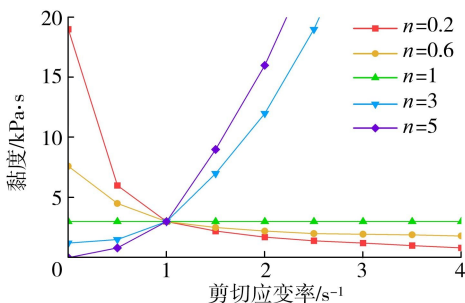


图5 不同幂律指数下剪切应变率与黏度关系

正常情况下淤泥介质为假塑性流体,幂律指数在0.5以下;淤泥的主要成分为土壤和水以及一些有机质,含水量一般大于40%,其中土壤的密度为 $2.6 \sim 2.7 \text{ t/m}^3$,水的密度为 1 t/m^3 ,通过计算得到淤泥密度约为 2 t/m^3 。黏度按照非牛顿幂律流体模型计算,非牛顿幂律流体模型选定的淤泥的稠度系数与蜂蜜的稠度系数近似,取 $3 \text{ kPa} \cdot \text{s}$,最小黏度取0,最大黏度取足够大的值。进行数值模拟时,为研究幂律指数、稠度系数等的影响规律,扩大其取值范围,选取稠度系数分别为0.1、1、3、5、9 $\text{kPa} \cdot \text{s}$;幂律指数分别为0.3、0.4、0.5、0.8、1.0、2.0;因为非牛顿流体黏性大,可以允许大的缝隙,选择5、10、15和20 mm的缝隙尺寸。

围堰泄漏量主要由压强引起,因此选择压力进

口、压力出口模型。由于淤泥处于水下,水的压力不能忽略。在边界条件设置时将水的压力作为初始压力施加于模型入口,假设水深3 m,可知其进口压强为29.4 kPa。在管道缝隙模拟中,由于选取入口在侧面,进口压强还包括部分淤泥的压力,假设管道上部淤泥高度1 m,计算得到其进口压强为49 kPa。

1.4 网格无关性验证

为验证网格密度对模拟计算结果的影响,划分不同密度网格进行数值模拟分析,对关键点数值进行分析,当模拟结果基本保持不变时认为结果与网格密度无关^[25-26]。

假设幂律指数为0.4、流体介质淤泥密度为 2 t/m^3 、稠度系数为 $3 \text{ kPa} \cdot \text{s}$ 、泄漏缝隙采用5 mm,针对不同尺寸的网格,计算得到出口流量对比见表1。可见,当其他条件不变时,随着网格尺寸的增大,网格数量减少,在缝隙处的出口流量略有变化,但变化量非常小,可以认为该尺度下结果与网格数量无关。综上,在围堰底部缝隙泄漏量模型中选取网格尺寸25 mm,在管道缝隙泄漏量模型中选取网格尺寸5 mm。

表1 不同网格尺寸出口流量对比

模型	网格尺寸/mm	网格数量	质量流量/(g/s)
围堰底部缝隙 泄漏量模型	20	2 129 155	0.16
	25	1 105 983	0.16
	30	651 658	0.16
管道缝隙泄 漏量模型	5	1 371 396	0.71
	8	1 319 243	0.71
	10	649 165	0.70

2 围堰泄漏量影响因素

2.1 稠度系数对围堰泄漏量的影响

假定幂律指数为0.4,分析不同稠度系数对围堰泄漏量的影响。

2.1.1 围堰底部缝隙泄漏量

当幂律指数为0.4、稠度系数为 $3 \text{ kPa} \cdot \text{s}$ 、缝隙尺寸为5 mm时,围堰四周流体的压强分布如图6所示。可见压强梯度主要体现于围堰底部缝隙,压强从围堰外部的29.4 kPa减小后降至围堰内部的0 Pa,而在围堰内部压强基本不变。

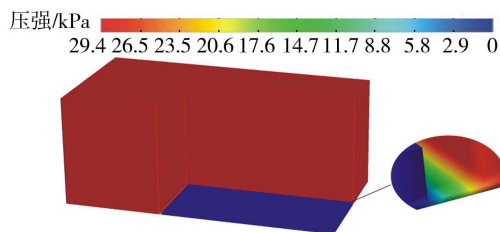


图6 围堰底部压强分布

通过数值模拟得到出口质量流量,不同缝隙尺寸 L 在不同稠度系数 K 下的泄漏量见表2。由表可

见,随着稠度系数的增加,泄漏量逐渐减小。泄漏量与密度之比为围堰体积泄漏量,由于只建立了 1/4 模型,围堰底部缝隙处实际流入围堰内部淤泥的体积为体积流量的 4 倍,体积流量与面积之比为围堰内部淤泥上升速率。不同稠度系数下不同缝隙尺寸围堰内部淤泥每小时上升高度见表 2。当稠度系数为 $0.1\text{ kPa}\cdot\text{s}$ 、缝隙尺寸为 5 mm 时,淤泥每小时上升高度已达 0.113 m 。而稠度系数大于 $3\text{ kPa}\cdot\text{s}$ 时,其每小时上升高度变化不大。因此,对于本文研究的围堰泄漏量分析,其淤泥的稠度系数应为 $3\text{ kPa}\cdot\text{s}$ 以上,能够满足管道修复要求。

2.1.2 管道缝隙泄漏量

当幂律指数为 0.4 、稠度系数为 $3\text{ kPa}\cdot\text{s}$ 、缝隙尺寸为 5 mm 时,管道四周流体的压强分布如图 7 所示。可见压强梯度主要存在于缝隙处,压强从外部的 49 kPa 减小后降至内部的 0 Pa ,外部压强基本不变。

不同缝隙尺寸下泄漏量随稠度系数的变化见表 3。其质量流量与密度之比为体积流量,由于围堰为对称结构,管道缝隙处实际流入围堰内部淤泥的体积为体积流量的 2 倍,体积流量除以围堰面积即可得到围堰内部流体升高速率。计算得到围堰内部淤泥每小时上升高度见表 3。当稠度系数为 $0.1\text{ kPa}\cdot\text{s}$ 时,其围堰内部淤泥每小时上升高度相比于其他稠度系数下变化较大。稠度系数小于 $1\text{ kPa}\cdot\text{s}$ 的淤泥泄漏量较大,会影响管道修复工作的进行。

表 2 不同稠度系数下围堰底部泄漏量和围堰内部淤泥每小时上升高度

$K/(\text{kPa}\cdot\text{s})$	泄漏量/(g/s)				淤泥每小时上升高度/mm			
	$L=5\text{ mm}$	$L=10\text{ mm}$	$L=15\text{ mm}$	$L=20\text{ mm}$	$L=5\text{ mm}$	$L=10\text{ mm}$	$L=15\text{ mm}$	$L=20\text{ mm}$
0.1	268.00	13 459.99	104 080.04	365 620.26	113.44	5 697.35	44 055.03	154 759.79
1.0	0.88	42.01	308.14	1 500.25	0.37	17.78	130.37	634.92
3.0	0.16	2.66	20.01	96.94	0.07	1.13	8.47	41.06
5.0	0.14	1.29	5.72	28.05	0.06	0.55	2.42	11.85
9.0	0.13	1.04	3.56	8.98	0.06	0.44	1.51	3.80

表 3 不同稠度系数下管道缝隙泄漏量和围堰内部淤泥每小时上升高度

$K/(\text{kPa}\cdot\text{s})$	泄漏量/(g/s)				淤泥每小时上升高度/mm			
	$L=5\text{ mm}$	$L=10\text{ mm}$	$L=15\text{ mm}$	$L=20\text{ mm}$	$L=5\text{ mm}$	$L=10\text{ mm}$	$L=15\text{ mm}$	$L=20\text{ mm}$
0.1	4 236.34	47 920.27	119 030.16	193 950.44	896.51	10 140.40	25 190.43	41 049.62
1.0	14.21	222.89	1 139.04	3 533.89	2.96	47.20	241.06	747.94
3.0	0.88	14.12	72.79	226.88	0.19	2.96	15.45	48.04
5.0	0.25	4.02	20.05	62.89	0.05	0.85	4.23	13.33
9.0	0.06	0.95	4.80	15.10	0.01	0.20	1.02	3.17

表 4 不同幂律指数下围堰底部泄漏量和围堰内部淤泥每小时上升高度

n	泄漏量/(g/s)				淤泥每小时上升高度/mm			
	$L=5\text{ mm}$	$L=10\text{ mm}$	$L=15\text{ mm}$	$L=20\text{ mm}$	$L=5\text{ mm}$	$L=10\text{ mm}$	$L=15\text{ mm}$	$L=20\text{ mm}$
0.3	0.13	1.17	5.14	18.80	0.06	0.50	2.18	7.96
0.4	0.16	2.66	20.12	96.80	0.07	1.13	8.47	40.97
0.5	0.46	12.30	73.50	287.94	0.20	5.21	31.11	121.90
0.8	14.91	143.05	536.24	1 326.11	6.18	60.53	226.88	561.27
1.0	43.23	320.75	971.69	2 051.02	18.20	135.87	411.43	868.15
2.0	148.97	674.12	1 867.43	3 895.89	63.07	285.29	790.26	1 649.10

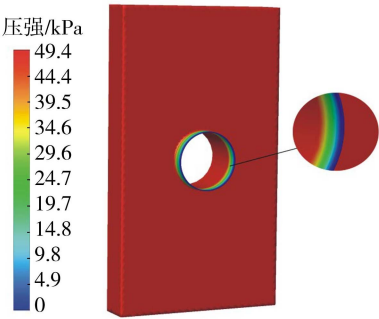


图 7 管道缝隙压强分布

2.2 幂律指数对围堰泄漏量的影响

假定稠度系数为 $3\text{ kPa}\cdot\text{s}$, 分析不同幂律指数对围堰泄漏量的影响。

2.2.1 围堰底部缝隙泄漏量

不同幂律指数、不同缝隙尺寸下的围堰底部泄漏量和围堰内部淤泥每小时上升高度见表 4。当幂律指数大于 0.5 时,缝隙较大时围堰内部淤泥每小时上升高度较高,对管道修复有影响。当幂律指数为 1 时,介质为牛顿流体,其对围堰的安全性影响颇高。当幂律指数大于 1 时,介质为膨胀流体,但由于剪切率较低,其表观黏度低于牛顿流体,并未达到增稠效果,泄漏量进一步增加。

2.2.2 管道缝隙泄漏量

不同缝隙下泄漏量随幂律指数的变化以及围堰内部淤泥每小时上升高度见表 5。随着幂律指数的

表 5 不同幂律指数下管道缝隙泄漏量和围堰内部淤泥每小时上升高度

n	泄漏量/(g/s)				淤泥每小时上升高度/mm			
	$L=5\text{ mm}$	$L=10\text{ mm}$	$L=15\text{ mm}$	$L=20\text{ mm}$	$L=5\text{ mm}$	$L=10\text{ mm}$	$L=15\text{ mm}$	$L=20\text{ mm}$
0.3	0.20	6.71	43.98	160.05	0.04	1.42	9.31	33.86
0.4	0.88	14.12	73.05	227.11	0.19	2.96	15.45	48.04
0.5	1.80	22.87	98.24	276.34	0.38	4.87	20.74	58.41
0.8	5.19	43.02	149.42	354.86	1.10	9.10	31.53	75.13
1.0	7.35	53.08	168.17	380.20	1.56	11.22	35.56	80.42
2.0	14.00	74.13	206.79	415.41	2.96	15.66	43.81	87.83

增大,围堰泄漏量逐渐增加,当流体变为牛顿流体和膨胀流体后,泄漏量进一步增加。对比表 4 和表 5 可知,当幂律指数小于 0.8 时,管道缝隙泄漏量反而大于围堰底部泄漏量,其原因在于此时淤泥的非牛顿性较强。由图 5 可知,幂律指数越小,其表观黏度曲线较陡。由于围堰底部泄漏面积大,淤泥上升速率缓慢,剪切应变率较小,导致黏度高,所以泄漏量小。而管道缝隙处泄漏面积小,且距离围堰内部淤泥表面有一段距离,其剪切应变率大,导致黏度低,所以泄漏量大。当幂律指数大于 0.8 时,其性质接近牛顿流体,表观黏度曲线变化较为缓慢,剪切应变率影响不明显,此时需要考虑泄漏面积的影响。

2.3 缝隙尺寸对围堰泄漏量的影响

2.3.1 围堰底部缝隙泄漏量

由表 2 可知,稠度系数较大时,即使在缝隙尺寸为 20 mm 时泄漏量仍很低,而稠度系数为 0.1 kPa·s 时,泄漏量随围堰底部缝隙尺寸的增加而显著增加,此时必须保证非常好的密封性才能进行施工。由表 4 可知,稠度系数一定时,随着幂律指数和缝隙尺寸的增加,泄漏量也相应增加。在剪切应变较小时幂律指数的影响程度较稠度系数小;然而在剪切应变较大时幂律指数的影响程度大大增加。

2.3.2 管道缝隙泄漏量

由表 3 和表 5 可知,稠度系数和幂律指数对管道缝隙泄漏量的影响规律与底部缝隙尺寸的影响基本相同,仅在数值上有所差别。

3 围堰内部淤泥上升总高度

当幂律指数为 0.4 时,不同稠度系数、不同缝隙尺寸下围堰内部淤泥上升总高度见表 6。由表 6 可知,当稠度系数增大,其淤泥上升总高度迅速降低;稠度系数提高 10 倍,淤泥上升高度几乎为原来的 1/150;稠度系数提高 100 倍,淤泥上升高度约为原来的 1/40 000。当稠度系数为 3 kPa·s 以上时,不会对内部施工环境产生较大影响;但在较小稠度系数下,对内部施工环境影响显著。

当稠度系数为 3 kPa·s 时,不同幂律指数、不同缝隙尺寸下的围堰内部淤泥上升总高度见表 7。由

表 6 不同稠度系数下围堰内部淤泥上升总高度

$K/(\text{kPa} \cdot \text{s})$	上升总高度/mm			
	$L=5\text{ mm}$	$L=10\text{ mm}$	$L=15\text{ mm}$	$L=20\text{ mm}$
0.1	1 009.95	15 837.75	69 245.46	195 809.41
1.0	3.33	64.98	371.43	1 382.86
3.0	0.26	4.09	23.92	89.10
5.0	0.11	1.40	6.65	25.18
9.0	0.07	0.64	2.53	6.97

表 7 可知,当缝隙尺寸较大时,围堰内部淤泥上升总高度随着幂律指数的增大而增大;在缝隙尺寸较小时不同幂律指数的淤泥上升高度变化较小,说明淤泥通过窄缝隙时黏度改变引起的剪切力变化很小,并不会对内部施工环境产生较大影响。但在较大幂律指数情况下,对内部施工环境仍有影响。一般淤泥的幂律指数为 0.4 左右,能够满足施工需求。

表 7 不同幂律指数下围堰内部淤泥上升总高度

n	上升总高度/mm			
	$L=5\text{ mm}$	$L=10\text{ mm}$	$L=15\text{ mm}$	$L=20\text{ mm}$
0.3	0.10	1.92	11.49	41.82
0.4	0.26	4.09	23.92	89.01
0.5	0.58	10.08	51.85	180.31
0.8	7.28	69.63	258.41	636.40
1.0	19.76	147.09	446.99	948.57
2.0	66.03	300.95	834.07	1 736.93

4 结 论

a. 淤泥属于非牛顿流体中的假塑性流体,其幂律指数小于 1,流体的表观黏度随幂律指数的增加而减小,具有剪切稀化特性。当幂律指数为 0.3 ~ 0.5 时,流体通过围堰底部及管道缝隙等狭窄通道时幂律指数改变引起的剪切力变化可忽略。

b. 稠度系数是流体黏度的决定性因素,对泄漏量的影响很大,随着稠度系数的降低,围堰泄漏量显著增加。

c. 缝隙尺寸是决定围堰抗泄漏质量的关键因素,缝隙尺寸增加时,对高稠度系数淤泥,其泄漏量虽然有所增加,但不影响施工;对低稠度系数淤泥,随着缝隙尺寸增加,泄漏量显著增加。稠度系数为 3 kPa·s 时,如果幂律指数小于 0.5,不同缝隙尺寸下围堰内淤泥上升速率不影响施工;当幂律指数大于 0.5 时,缝隙尺寸增加对内部管道抢修具有一定

影响;而牛顿流体的幂律指数为 1,围堰泄漏量随着缝隙尺寸的增加而明显增大,幂律指数大于 1 时,泄漏量将进一步增加,对管道抢修造成影响。

d. 在不同地带(滩涂、浅滩等)进行埋地管道维修或其他生产需要时,构筑钢板桩围堰比传统围堰更加便捷、精确。根据实际淤泥性质,结合围堰泄漏量的研究结果,可以制定合适的抢修方案,提高管道抢修效率和降低成本。

参考文献:

[1] 孔宪亮. 油田埋地管道腐蚀原因分析与措施[J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(2): 116-117. (KONG Xianliang. Cause analysis and measures for corrosion of buried pipeline in oil fields[J]. Total Corrosion Control, 2021, 35(2): 116-117. (in Chinese))

[2] 董宝山, 张全. 输油管道腐蚀机理研究[J]. 油气储运, 1998, 17(6): 21-24. (DONG Baoshan, ZHANG Quan. Study on pipeline's corrosion mechanism[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1998, 17(6): 21-24. (in Chinese))

[3] 周新亚, 刘昌箭, 钱有伟. 深水基础超长钢板桩围堰设计与施工关键技术[J]. 世界桥梁, 2020, 48(2): 20-24. (ZHOU Xinya, LIU Changjian, QIAN Youwei. Design of very long steel sheet pile cofferdam for deep water foundation and key construction techniques [J]. World Bridges, 2020, 48(2): 20-24. (in Chinese))

[4] 李莹, 张卫健. 水下软土深基坑钢板桩围堰施工设计[J]. 施工技术, 2017, 46(增刊1): 172-174. (LI Ying, ZHANG Weijian. Design for steel plate pile cofferdam construction under water soft soil [J]. Construction Technology, 2017, 46(Sup1): 172-174. (in Chinese))

[5] VERSTOV V, YUDINA A F, GAIDO A N. Improving efficiency of arranging offshore cofferdams [J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2020, 57(1): 73-76.

[6] 罗天洋, 牛忠荣, 丁大益, 等. 浅水域钢管式无土围堰结构设计分析与监测研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(13): 61-67. (LUO Tianyang, NIU Zhongrong, DING Dayi, et al. Structural design analysis and monitoring study of soilless cofferdam made of steel pipes in shallow water [J]. Building Structure, 2016, 46(13): 61-67. (in Chinese))

[7] 冯明锋. 近海潮汐区钢板桩围堰设计与施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2021(8): 70-74. (FENG Mingfeng. Design and construction technology of steel sheet pile cofferdam in offshore tidal area [J]. Railway Construction Technology, 2021(8): 70-74. (in Chinese))

[8] 戴汕, 杨明军. 单排钢板桩围堰施工工艺[J]. 水运工程, 2007(7): 81-84. (DAI Shan, YANG Mingjun. Construction technology of single-row steel sheet pile

cofferdam [J]. Port & Waterway Engineering, 2007(7): 81-84. (in Chinese))

[9] 殷红. 钢板桩围堰在某桥桥梁病害处理中的应用[J]. 施工技术, 2015, 44(增刊2): 247-248. (YIN Hong. Application of steel sheet pile cofferdam in bridge disaster treatment [J]. Construction Technology, 2015, 44(Sup2): 247-248. (in Chinese))

[10] 张成瑞, 张威, 程元林, 等. 水中钢板桩围堰快捷止漏方法与关键技术 [J]. 北方交通, 2022(4): 18-20. (ZHANG Chengrui, ZHANG Wei, CHENG Yuanlin, et al. Quick leakage stoppage method and key technology of steel sheet pile cofferdam in water [J]. Northern Communications, 2022(4): 18-20. (in Chinese))

[11] 杜闯, 丁红岩, 张浦阳, 等. 钢板桩围堰有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊2): 159-164. (DU Chuang, DING Hongyan, ZHANG Puyang, et al. Analysis of steel sheet pile cofferdam using finite element method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(Sup2): 159-164. (in Chinese))

[12] 姜天华, 张谦, 王强, 等. 密质细砂地层钢板桩围堰结构受力分析 [J]. 铁道建筑, 2017(5): 44-47. (JIANG Tianhua, ZHANG Qian, WANG Qiang, et al. Mechanical analysis of steel sheet pile cofferdam structure in dense fine sand stratum [J]. Railway Engineering, 2017(5): 44-47. (in Chinese))

[13] 汤劲松, 熊保林. 深水基础大规模超长钢板桩围堰施工过程安全性分析 [J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 32-39. (TANG Jinsong, XIONG Baolin. Analysis on safety during construction process for large-scale and super-long steel sheet pile cofferdam of deepwater foundation [J]. China Railway Science, 2013, 34(3): 32-39. (in Chinese))

[14] 徐辉, 李吉勇. 深水单层钢板桩围堰设计与分析 [J]. 施工技术, 2013, 42(17): 78-80. (XU Hui, LI Jiyong. Design and analysis of single-layer steel sheet pile cofferdam in deep water [J]. Construction Technology, 2013, 42(17): 78-80. (in Chinese))

[15] 曾庆敦, 姚双龙. 钢板桩围堰及支撑系统的稳定安全性分析 [J]. 中外公路, 2009, 29(6): 174-177. (ZENG Qingdun, YAO Shuanglong. Analysis of stability and safety of steel sheet pile cofferdam and support system [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(6): 174-177. (in Chinese))

[16] LI Ping, SUN Xinfei, CHEN Junjun, et al. Effects of new construction technology on performance of ultralong steel sheet pile cofferdams under tidal action [J]. Geomechanics and Engineering, 2021, 27(6): 561-571.

[17] 袁世伟. 幂律非牛顿流体流动的数值计算与实验研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2014.

(下转第 110 页)

- [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2004, 21(3):285-290. (in Chinese))
- [8] ANDRIEU-RENAUD C, SUDRET B, LEMAIRE M. The PHI2 method; a way to compute time-variant reliability [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2004, 84(1):75-86.
- [9] 贡金鑫, 赵国藩. 考虑抗力随时间变化的结构可靠度分析[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(5):43-51. (GONG Jinxin, ZHAO Guofan. Reliability analysis for deteriorating structures [J]. Journal of Building Structures, 1998, 19(5):43-51. (in Chinese))
- [10] 王新刚, 张义民, 王宝艳. 机械零部件的动态可靠性分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(11):1510-1514. (WANG Xingang, ZHANG Yimin, WANG Baoyan. Dynamic reliability analysis of mechanical components [J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(11):1510-1514. (in Chinese))
- [11] JIANG C, HUANG X P, WEI X P, et al. A time-variant reliability analysis method for structural systems based on stochastic process discretization [J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2017, 13(2):173-193.
- [12] 黄新萍, 姜潮, 韩旭. 针对非线性极限状态方程的时变可靠度分析[J]. 力学学报, 2014, 46(2):264-272. (HUANG Xinping, JIANG Chao, HAN Xu. A time-variant reliability analysis method for non-linear limit-state functions [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 46(2):264-272. (in Chinese))
- [13] 严宇飞, 李方义. 基于蒙特卡洛重要抽样法的结构时变
- 可靠性分析 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(6):104-112. (YAN Yufei, LI Fangyi. Time-variant reliability analysis of structures based on important sampling Monte Carlo method [J]. Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science), 2021, 35(6):104-112. (in Chinese))
- [14] 顾培英, 王岚岚, 邓昌, 等. 我国渡槽结构典型破坏特征研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5):1-8. (GU Peiying, WANG Lanlan, DENG Chang, et al. Review of typical failure characteristics of aqueduct structures in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(5):1-8. (in Chinese))
- [15] 金伟良. 工程结构可靠度:理论、方法及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2022.
- [16] 赵文华, 陈德亮, 颜其照, 等. 渡槽[M]. 2版. 北京:水利电力出版社, 1989.
- [17] 董玉茹. 预制带肋复合墙板抗弯性能可靠度分析[D]. 济南:山东大学, 2021.
- [18] 吴剑国, 金伟良, 张爱晖, 等. 基于马氏链样本模拟的渡槽结构系统可靠度分析[J]. 水利学报, 2006, 37(8):985-990. (WU Jianguo, JIN Weiliang, ZHANG Aihui, et al. System reliability analysis of aqueduct structure based on Markov chain sample simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(8):985-990. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-24 编辑:俞云利)

(上接第72页)

- [18] 宋娃丽, 尤建, 狄方殿, 等. 钢板桩围堰结构有限元模型优化[J]. 科技通报, 2017, 33(12):208-211. (SONG Wali, YOU Jian, DI Fangdian, et al. Optimization of finite element model in the steel sheet pile cofferdam [J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(12):208-211. (in Chinese))
- [19] 李国栋, 哈岸英, 钟小彦, 等. 基于 Fluent 的渗流场数值模拟分析[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(3):317-320. (LI Guodong, HA Anying, ZHONG Xiaoyan, et al. Numerical simulation of seepage field based on Fluent [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(3):317-320. (in Chinese))
- [20] 夏颂军. 深厚软弱地质条件下钢板桩围堰设计[J]. 世界桥梁, 2016, 44(6):17-22. (XIA Songjun. Design of steel sheet pile cofferdam under deep and weak geological condition [J]. World Bridges, 2016, 44(6):17-22.)
- [21] 刘建东, 杨志木, 刘中锋. 钢板桩围堰施工关键技术[J]. 中国高新科技, 2020(11):83-84. (LIU Jiandong, YANG Zhimu, LIU Zhongfeng. Key technologies of steel sheet pile cofferdam construction [J]. China High-Tech, 2020(11):83-84. (in Chinese))
- [22] 梁瑛, 曹文豪, 季宪军, 等. 成都粘土泥浆流变模型探讨
- [J]. 山地学报, 2021, 39(2):218-225. (LIANG Ying, CAO Wenhao, JI Xianjun, et al. Discussion on the rheological model of Chengdu clay slurry [J]. Mountain Research, 2021, 39(2):218-225. (in Chinese))
- [23] JEONG S W, LEROUEIL S, LOCAT J. Applicability of power law for describing the rheology of soils of different origins and characteristics [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(9):1011-1023.
- [24] QIANG Yan, WEI Liejiang, LUO Xiaomei, et al. Heat transfer and flow structures of laminar confined slot impingement jet with power-law non-Newtonian fluid [J]. Entropy, 2018, 20(10):800.
- [25] LU Liang, LONG Shirang, ZHU Kangwu. A numerical research on vortex street flow oscillation in the double flapper nozzle servo valve [J]. Processes, 2019, 7(10):721.
- [26] LU Hao, ZHANG Lizhi, CAI Rongrong. Numerical investigation on thermophoretic deposition of particles in turbulent duct flow with conjugate heat transfer: analysis of influencing factors [J]. Building Simulation, 2020, 13(2):387-399.

(收稿日期:2022-07-28 编辑:俞云利)