

回填工况下地下粮仓的摩擦力分析

刘海燕, 徐向楠, 张昊, 王振清, 杨金平, 马天鹤

(河南工业大学土木工程学院, 河南郑州 450001)

摘要: 为了分析回填工况下地下粮仓在地下水作用时的摩擦力变化情况, 设计了3个材质为2 mm厚钢板、仓底倾角为35°, 直径分别为400 mm、500 mm、600 mm的模型筒仓A、B、C, 进行了两种工况的6组注水试验。试验结果表明, 模型筒仓顶部位移数据发生突变时, 工况a中, 模型筒仓A、B、C水位分别为41.40 mm、39.80 mm、35.00 mm; 工况b中, 模型筒仓A、B、C水位分别为40.60 mm、39.00 mm、33.10 mm ($p<0.05$)。静止阶段, 模型筒仓A、B、C顶部支反力不变。上浮阶段, 模型筒仓顶部支反力发生突变, 工况a时, 模型筒仓A、B、C水位-支反力曲线拐点水位分别为37.10 mm、27.00 mm、21.00 mm; 工况b时, 模型筒仓A、B、C水位分别为37.10 mm、30.05 mm、24.00 mm。由于静摩擦力的影响, 模型筒仓的位移计变化滞后于支反力。静止阶段, 工况a中的最大静摩擦力分别为206.17 N、316.81 N、364.16 N, 均大于工况b的静摩擦力197.61 N、310.82 N、352.96 N。但其随水位的增加速度基本一致 ($p<0.05$)。上浮阶段, 工况a、b的摩擦力均迅速下降, 并趋于稳定。实际工程中, 考虑有利因素的地下粮仓抗浮设计, 可采用上浮阶段的摩擦力设计。

关键词: 摩擦力; 静摩擦力; 动摩擦力; 回填工况; 地下粮仓; 注水试验

文章编号: 1673-9078(2021)06-175-183

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.6.1094

Friction Analysis of Underground Silos during Backfilling

LIU Hai-yan, XU Xiang-nan, ZHANG Hao, WANG Zhen-qing, YANG Jin-ping, MA Tian-he

(College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To investigate the variations in friction in underground silos due to groundwater during backfilling, three silo models, namely, A, B, and C, with three different diameters of 400 mm, 500 mm, and 600 mm were designed. All these models were composed of 2 mm thick steel plates with a bottom inclination angle of 35°. Six water injection tests were conducted under two different backfilling conditions. The experimental results demonstrate that when there are sudden displacement changes at the top of the silos, the water levels of models A, B, and C are 41.40 mm, 39.80 mm, and 35.00 mm, respectively, under backfilling condition a. Meanwhile, the water levels become 40.60 mm, 39.00 mm, and 33.10 mm under backfilling condition b ($p<0.05$). In the stationary phase, the reaction forces at the top of the models A, B, and C remain unchanged. In the floating phase, the reaction force at the top of the silos abruptly changes. Under backfilling condition a, the water level-reaction force curves of models A, B, and C result in inflection points at water levels of 37.10 mm, 27.00 mm, and 21.00 mm, respectively. Under condition b, the inflection points are observed at water levels of 37.10 mm, 30.05 mm, and 24.00 mm, respectively ($p<0.05$). Because of the static frictional force, the displacement changes measured by the gauge lag behind the variation in reaction forces. In the stationary phase, under condition a, the maximum static frictional force of the models is 206.17 N, 316.81 N, and 364.16 N, respectively. These values are all greater than those under condition b, which are 197.61 N, 310.82 N, and 352.96 N, respectively; yet, the water levels of the models under two different conditions increase at nearly the same rate ($p<0.05$). In the floating phase, frictional force reduces rapidly under both conditions and then levels off gradually. In actual engineering projects, favorable anti-floating underground silo designs can be adopted by integrating the frictional force variations in the floating phase.

Key words: frictional force, static frictional force, kinetic frictional force, backfilling condition, underground silo, water injection test

引文格式:

刘海燕,徐向楠,张昊,等.回填工况下地下粮仓的摩擦力分析[J].现代食品科技,2021,37(6):175-183

LIU Hai-yan, XU Xiang-nan, ZHANG Hao, et al. Friction analysis of underground silos during backfilling [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(6): 175-183

收稿日期: 2020-11-26

基金项目: 河南省科技攻关项目(202102110122); 粮食公益性行业科研专项(201413007-01)

作者简介: 刘海燕(1979-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 粮油仓储结构

自古以来中国的粮食问题都是影响社会发展的重要因素,如今确保粮食安全也是中国的农业政策之一^[1,2],中国粮食库存量达 0.4 亿 t,其中高大平房仓仓容占总仓容的 87.5%^[3]。但其需要环流熏蒸灭虫菌^[4]、空调降温^[5]等处理使得高大平房仓高有耗能、高成本、易污染、等缺点。而地下粮仓作为拥有悠久历史^[6,7]且具有高隐蔽性^[8]、自然低温、恒温、环保绿色、节能节地、机械化操作、可长期储存^[9,10]等优良特点。在地下粮仓向高水位地区推广时必然面临地下水浮力这一不同于地上粮仓的新因素的影响^[11]。当前地下结构的抗浮设计多以阿基米德定律为基础,再辅以配重法、支护锚杆法、抗拔桩法等方法进行建筑结构抗浮设计,但地下粮仓所属环境并非纯水环境,而阿基米德定律适用于部分或全部浸入密度一致流体的物体,如何考虑地下粮仓在周围土体或者在地下粮仓开挖后回填工况下产生的摩擦力的影响具有一定工程意义。

地下结构受地下水作用的浮力影响方面,国内外学者进行了大量研究。刘海燕^[12]等通过模型筒试验认为回填工况地下粮仓在预警水位时实际抵抗浮力为理论抵抗浮力的 1.5 倍,实际起浮水位时抵抗浮力为理论抵抗浮力的 2 倍。梅国雄^[13,14]试验得出在黏土中地下水的浮力折减系数可达 0.7,同时还提出了在抗浮原则上提出了以均布抗拔力平衡均布水浮力的观点。倪伟杰^[15]通过试验反映了在强度很低的回填软土中实测浮力明显大于水浮力这是事实并提出了相应的浮力计算公式。金立兵^[16]通过现场试验研究与理论分析相结合的方法认为给出了仓体所受实际浮力与理论浮力有差距并给出了线性表达式。梁妍妍^[17]概述了地下水的赋存状态、渗流、地下筒壁摩阻力、抗浮设防水位对浮力计算的影响。D. A. Dixon^[18]通过压实伊利石、钠基膨润土和砂的低梯度试验认为密度高的土体具有较高的水体梯度承受能力。Boonchai Ukritchon^[19]研究地下洞室的不排水稳定性平面应变下的二维有限元极限,提出了不排水地下洞室,线性改变其黏土强度时的稳定性计算方程。Eimar Sandoval^[20]认为对于在饱和土壤中的柔性隧道,在地震时随着其周围土体超空隙水压的增大,会发生绝对变形从而增加其抗震性。D. J. RICHARDS^[21]通过长期的现场监测证实,透水挡土墙的孔隙水压力远低于类似土壤中不透水挡土墙的预期压力。Jikai Zhou^[22]等人通过试验表明水位一只时改变地下室的埋置深度,其所受的浮力不一致,同时给出了通过阿基米德原理计算的浮力与实际测量浮力之间的折减系数在 0.25~0.52 之间。

由上可知地下结构受到的地下水的浮力并不等于由阿基米德原理计算的浮力,摩擦力也是造成该结果

的原因之一。关于摩擦力,国内外相关学者进行了大量研究。15 世纪,摩擦力出现在了达芬奇的笔记本上,18 世纪,库伦定律诞生了,它描述了简单的机械摩擦的基本规律,17 世纪牛顿提出了内摩擦定律,指出了液体之间也存在摩擦力。今天,摩擦消耗掉全世界 1/3 的一次性能源,在中国,每年因摩擦磨损造成的损失占中国国民生产总值的 4.5%^[23]。当然摩擦力带来的不只有坏处,在地下结构的抗浮设计中,其就是有利因素。按照《给水排水工程构筑物结构设计规范》^[24],结构侧壁摩擦力作为抗浮的有利因素可以更好地保证地下结构的安全性,故不考虑在抗浮设计的荷载计算中。李帅^[25]等人通过工程实例验证认为大中直径桩的负摩阻力计算依据《建筑桩基技术规范》^[26]取值是合理的。王永璐^[27]等人发现,土体黏聚力与土体内摩擦角随含水率的增大表现出相反的变化规律。孙文^[28]等人通过试验发现湿陷性黄土与混凝土接触面存在滑移破坏和弹塑性破坏,接触面粗糙度不同时,接触面的抗剪强度峰值也不同,接触面越粗糙,其黏聚力也越大,内摩擦角越小。柳涛^[29]认为在应变一定时,土体的动剪切模量随着纤维掺入量以及含水率的增大先增大后减小。龙昊鹏^[30]从桩—土相对位移出发分析了桩基负摩阻力产生的机理同时结合《建筑桩基技术规范》提出了检测标准。刘明^[31]基于荷载传递理论,选取佐藤悟双折线函数作为桩侧土与桩端土的荷载传递模型,建立了桩侧桩端阻力双折线式能量法。对新近深厚填土桩基负摩阻力进行了定量计算和特性分析。Hong-quan Li^[32]等通过 ABAQUS 软件,将桩土界面的弹性-粘塑性界面本构模型开发到 FRIC 子程序中,对桩侧摩阻力和桩土相对位移进行了较贴合实际的模拟计算。



图 1 模型筒仓建设图

Fig.1 Underground silo construction drawing

该文以二八灰土回填工况的地下粮仓(图 1)为背景,设计了 3 个材质、仓底倾角相同,直径分别为 400 mm、500 mm、600 mm 的模型筒仓 A、B、C,按照仓底、仓壁均回填二八灰土的工况 a 和仓壁回填二八灰土、仓底采用砂土的工况 b 两种回填工况,对模型筒仓进行了 6 组注水试验,探讨回填工况下地下

粮仓在地下水作用时的摩擦力变化情况。通过该文，提出在地下水作用下，地下粮仓抗浮设计中摩擦力的计算方法，为今后地下粮仓及其它地下结构的抗浮设计提供参考。

1 地下粮仓理论力学模型

在地下水的作用下，地下粮仓不仅受到地下水的浮力作用，同时也受到周围回填土的作用力。在地下粮仓起浮之前即静止阶段，将地下粮仓受到的由土体产生的阻碍地下粮仓上浮的力（如粘滞力、孔隙水压力等）均视为地下粮仓受到的静摩擦力 $F_{摩擦静}$ ；上浮阶段受到的摩擦力记为 $F_{摩擦动}$ 。考虑实际回填工况，静止阶段地下粮仓的力学模型见图 2，上浮阶段地下粮仓的力学模型见图 3。

1.1 静止阶段地下粮仓力学模型

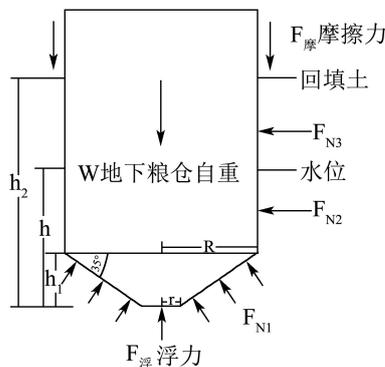


图 2 静止阶段地下粮仓浮力力学模型

Fig.2 Mechanical model of buoyancy of underground granary in static friction stage

静止阶段，竖直方向上，地下粮仓受到自重 W 、静摩擦力 $F_{摩擦静}$ 、土体支承载力 $F_{土}$ 、浮力 $F_{浮}$ 的共同作用。

$$W + F_{摩擦静} = F_{土} + F_{浮} \quad (1)$$

$$F_{浮} = \begin{cases} \rho g V, & 0 \leq h < h_1 \\ \rho g (V_1 + V_2), & h_1 \leq h \leq h_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{土} = \cos 35^\circ F_{N1} S = \cos 35^\circ F_{N1} \frac{h}{\sin 35^\circ} \left(2r + \frac{h}{\tan 35^\circ} \right) \quad (3)$$

式中： W 为地下粮仓自重，N； $F_{浮}$ 为模型筒仓受到的浮力，N； ρ 为水的密度取 (10^3 kg/m^3) ； g 为重力加速度 (9.8 N/kg) ； V 为模型筒排开水的体积， m^3 ； h 为水位高度，m； h_1 为仓底高度，m； V_1 为仓底体积， m^3 ； V_2 为随水位升高地下粮仓仓壁部分排开水的体积， m^3 ； F_{N1} 为仓底周围土体产生的垂直于仓底侧面的均布土压力，N； S 为仓底与土体接触面在竖直方向上的投影面积， m^2 ； r 为仓底底部圆半径。

1.2 上浮阶段地下粮仓力学模型

上浮阶段，地下粮仓所受的动摩擦力 $F_{摩擦动}$ 为

$$F_{摩擦动} = F_{N2} \zeta_1 S_1 + F_{N3} \zeta_2 S_2 \quad (4)$$

$$S_1 = 2\pi R (h - h_1) \quad (5)$$

$$S_2 = 2\pi R (h_2 - h) \quad (6)$$

式中： $F_{摩擦动}$ 为上浮阶段地下粮仓受到的动摩擦力，N； F_{N2} 为地下粮仓水位以下部分土产生的垂直于地下粮仓仓壁的均布侧压力，N； F_{N3} 为水位以上回填土面以下部分土产生的垂直于地下粮仓的均布侧压力，N； S_1 为仓壁部分水面以下面积， m^2 ； S_2 为仓壁部分水面以上，覆土高度以下面积， m^2 ； ζ_1 、 ζ_2 为摩阻力系数，参考《建筑桩基技术规范》取值， ζ_1 取 0.25、 ζ_2 取 0.4。

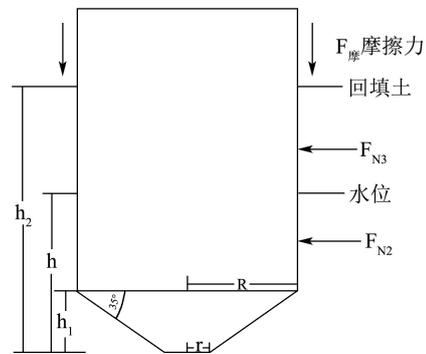


图 3 上浮阶段地下粮仓浮力力学模型

Fig.3 The buoyancy mechanics model of underground granary in sliding friction stage

2 模型试验

该文以二八灰土回填工况的地下粮仓为背景，设计了 3 个材质、仓底倾角相同，直径分别为 400 mm、500 mm、600 mm 的模型筒仓 A、B、C，按照仓底、仓壁均回填二八灰土的工况 a 和仓壁回填二八灰土、仓底采用砂土的工况 b 两种回填工况，对模型筒仓进行了 6 组注水（普通自来水）试验，探讨回填工况下地下粮仓在地下水作用时的摩擦力变化情况。

2.1 试验设备

该试验用到的试验设备主要有四部分组成，试验装置见图 4。尺寸为 2000 mm×2000 mm×1000 mm 的模型池、固定横梁、固定平台等固定装置。直径分别为 400 mm、500 mm、600 mm 的模型筒仓 A、B、C，其外表面涂刷水泥浆，参数见表 1。长度为 3 m，精度为 1 mm 的直尺，用以测量水位的变化情况；2 组量程为 ±100 mm，精度为 1 mm 的位移计，固定于模型池顶部横梁上，用于监测模型筒仓的位移；4 组 8

个量程为 0.3 MPa, 精度 $\leq 0.05\%$ 的压力传感器, 其中 2 组 4 个对称粘贴于仓底圆台母线三等分点处, 另外 2 组 4 个在仓壁周围自下而上对称粘贴于 1000 mm、

3000 mm 处 (见图 5), 用以仓底、仓壁周围的水土压力; 量程为 200 kg, 精度为 0.25% 的压力盒, 测量仓顶所受支反力。水管、木板等辅助设备。

表 1 模型筒仓参数表

Table 1 Table of model silo parameters

模型筒仓	直径/mm	重量/kg	筒壁高度/mm	仓底高度/mm	仓底直径/mm	工况 a		工况 b	
						覆土高度/mm	仓底距池底高度/mm	覆土高度/mm	仓底距池底高度/mm
A	400	9.93	710	116	60	450	104	460	34
B	500	14.12	710	150	60	410	70	420	70
C	600	14.58	710	200	60	410	50	360	70

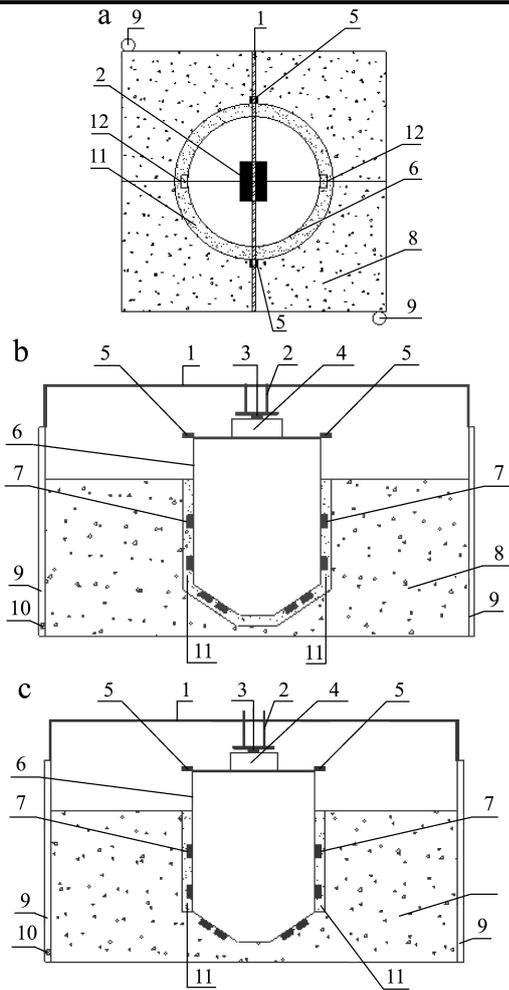


图 4 试验装置图

Fig.4 Test device diagram

注: 1.固定横梁; 2.固定平台; 3.压力盒; 4.泡沫板; 5.位移计; 6.模型筒仓; 7.压力传感器; 8.粗砂; 9.水位管; 10.排水口; 11.二八灰土; 12.铁质把手。图 a: 平面图; 图 b: 剖面图 1; 图 c: 剖面图 2。

2.2 试验步骤

第一步, 制作一个尺寸为 2000 mm×2000 mm×1000 mm 的模型池, 在距池底 20 mm 处设置一排水口, 在池内对角设置两根水位管以测量水位, 玻

璃池上端置一固定横梁以便安置试验仪器。第二步, 底部铺设一定厚度的粗砂, 在粗砂内埋设一每隔 50 mm 扎一对小孔的塑料管。第三步, 放置模型筒仓, 工况 a 情况下, 在模型筒仓仓壁周边及仓底 200 mm 范围内回填二八灰土, 其余位置均填入粗砂; 工况 b 情况下, 在模型筒仓仓壁周边 200 mm 范围内回填二八灰土, 仓底及其余位置均回填粗砂。第四步, 安放模型筒仓仓顶 2 组位移计及压力盒。第五步, 连接模型筒仓仓底、仓壁压力传感器, 仓顶压力盒, 位移计至 DH3821 应变测试仪和计算机, 调试归零各试验设备。第六步, 缓慢注水, 2 min 测量一次水位, 至模型筒仓上浮至模型筒仓倾覆, 见图 6, 试验结束。

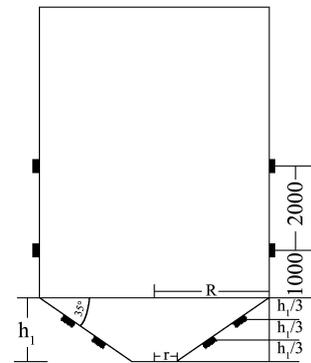


图 5 压力传感器布置图

Fig.5 Pressure sensor layout



图 6 注水试验结束图

Fig.6 End drawing of water injection test

2.3 试验受力分析模型

由于固定横梁的存在，模型筒仓受到了竖直向下的支反力 $F_{支反}$ ，模型筒仓力学模型见图 7。

静止阶段，模型筒仓的摩擦力为

$$F_{摩擦静} = F_{土} + F_{浮} - W - F_{支反} \quad (7)$$

式中， $F_{支反}$ 是模型筒仓上浮时受到的上部横梁提供的支反力， N 。上浮阶段，模型筒仓受到的动摩擦力计算公式同公式(4)。

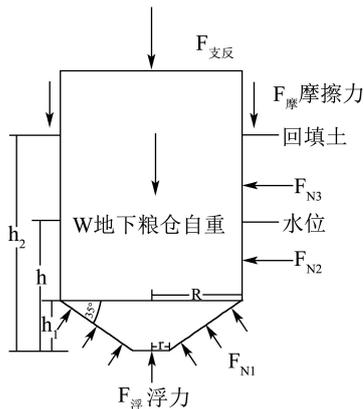


图 7 模型筒仓力学模型
Fig.7 Model silo mechanics mode

3 结果与分析

3.1 水位与位移计读数关系分析

根据测量水位与位移计读数，绘制模型筒仓 A、B、C 的水位-位移曲线见图 8，并由图 8 将模型筒仓初始采集水位、位移突变点水位、注水结束水位及其各自对应的位移绘制水位-位移表 2。

经表 2 分析可知：

(1) 图 8 中，模型筒仓位移先减小后基本稳定，原因是注水后土体产生固结所致。

(2) 图 8 中，模型筒仓固结稳定后分为静止、上浮两个阶段。在静止阶段，模型筒仓 A、B、C 顶部位移计读数稳定于初始值；在上浮阶段，模型筒仓顶部位移计数据发生突变，工况 a 时，模型筒仓 A、B、

C 水位-位移曲线拐点处斜率分别由 0 变为 0.01、0.12、0.01，工况 b 时，模型筒仓 A、B、C 水位-位移曲线拐点处斜率分别由 0 变为 0.01、0.04、0.04，说明模型筒仓在水位达到起浮点时，迅速浮起。

(3) 在静止阶段，工况 a 时，模型筒仓 A、B、C 的起浮水位分别为 41.40 cm、39.80 cm、35.00 cm，工况 b 时，模型筒仓 A、B、C 在工况 b 中的起浮水位分别为 40.60 cm、39.00 cm、33.10 cm；结合表 1 中模型筒仓周围填土高度（覆土高度，与表 1 中描述一致），分析可知仓底回填二八灰土的工况 a 比仓底采用粗砂的工况 b 具有更好的抗浮能力。

(4) 在上浮阶段，工况 a、工况 b 中，模型筒仓 A、B、C 位移-水位曲线随水位上升的曲线趋势一致。

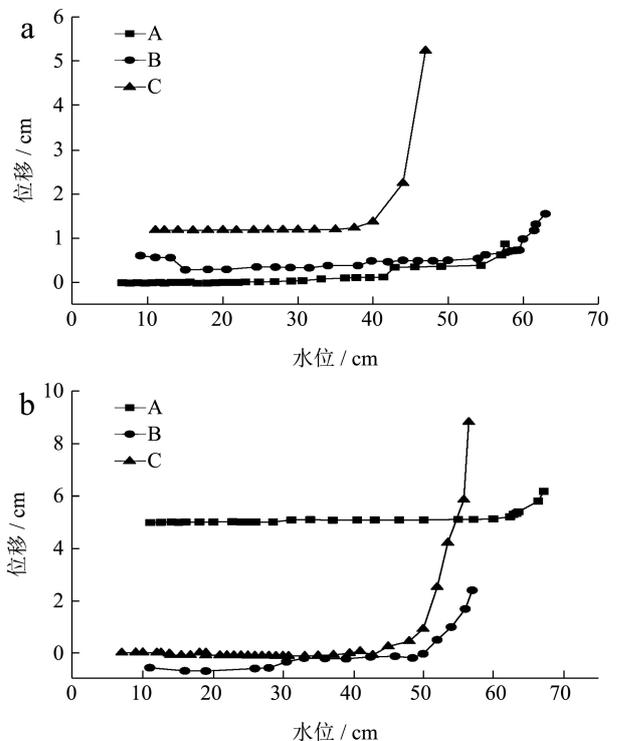


图 8 模型筒仓 A、B、C 的水位-位移曲线图

Fig.8 Water level-displacement curve of model cylinder A, B, C

注：图 a：工况 a；图 b：工况 b。

表 2 水位-位移表

Table 2 Water level-displacement table

工况	模型筒仓	初始水位/cm	拐点水位/cm	结束水位/cm	初始位移/cm	拐点位移/cm	结束位移/cm
a	A	6.60	41.40	57.60	0.01	0.14	0.89
	B	0.90	39.80	63.00	0.62	0.50	1.57
	C	11.00	35.00	47.00	1.20	1.21	5.26
b	A	11.10	40.60	67.20	4.98	5.01	6.17
	B	11.00	39.00	57.00	-0.58	-0.23	2.39
	C	7.00	33.10	56.50	0.00	0.13	8.82

注：水位均从仓底开始计算。

3.2 水位与支反力关系分析

跟据测量水位与顶部压力盒测得的支反力，绘制模型筒仓 A、B、C 的水位-支反力曲线见图 9，并由图 9 将模型筒仓初始采集水位、支反力突变点水位、注水结束水位及其各自对应的支反力绘制水位-支反力表 3。

经表 3 分析可知：

(1) 由图 9 可知，模型筒仓支反力先减小后基本稳定，原因是注水后土体产生固结所致，与位移变化规律一致。

(2) 由图 9 可知，模型筒仓固结稳定后分为静止、上浮两个阶段。在静止阶段，模型筒仓 A、B、C 顶部位压力盒监测的支反力读数基本不变，在上浮阶段，模型筒仓顶部压力盒监测的支反力数据发生突变，工况 a 时，模型筒仓 A、B、C 水位-支反力曲线拐点处斜率分别由 0 变为 0.11、0.27、0.53，工况 b 时，模型筒仓 A、B、C 水位-支反力曲线拐点处斜率分别由 0 变为 0.49、0.12、0.25，说明模型筒仓在水位达到起浮点时，迅速浮起。

(3) 在静止阶段，支反力基本保持不变。模型筒仓 A、B、C 在工况 a 中的支反力拐点对应的水位分别为 37.10 cm、27.00 cm、21.00 cm，模型筒仓 A、B、C 在工况 b 中的支反力拐点对应的水位分别为 37.10 cm、30.50 cm、24.00 cm，水位-支反力曲线的拐点水

位均小于水位-位移曲线的拐点水位，说明静摩擦力的存在造成了位移的变化滞后于支反力的变化。

(4) 在上浮阶段，工况 a、工况 b 中，模型筒仓 A、B、C 支反力-水位曲线随水位上升的曲线趋势一致。

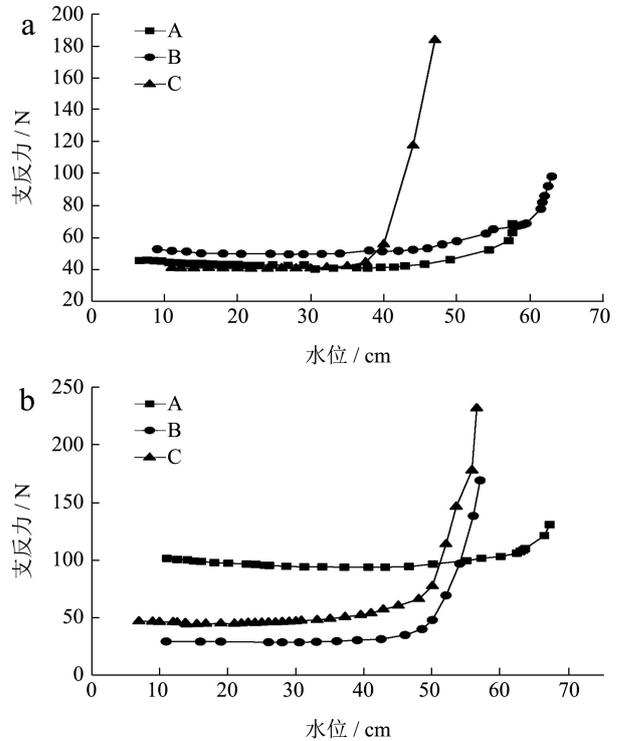


图 9 模型筒仓 A、B、C 的水位-支反力曲线图

Fig.9 Water level-branch reaction curve of model silo A, B, C

注：图 a：工况 a；图 b：工况 b。

表 3 水位-支反力表

Table 3 Water level-side reaction table

工况	模型筒仓	初始水位/cm	拐点水位/cm	结束水位/cm	初始支反力/N	初始/起浮/ 终止支反力/N	结束支反力/N
a	A	6.60	37.10	57.60	45.92	41.78	68.88
	B	0.90	27.00	63.00	52.98	51.68	98.34
	C	11.00	21.00	47.00	41.38	42.45	183.53
b	A	11.10	37.10	67.20	101.84	94.44	131.14
	B	11.00	30.50	57.00	30.21	31.33	169.37
	C	7.00	24.00	56.50	47.67	48.8	231.69

表 4 摩擦力分析表

Table 4 Friction analysis table

工况	模型筒仓	初始水位/cm	起浮水位/cm	结束水位/cm	静摩擦力 最大值/N	滑动摩擦力 平均值/N	仓底接触面积 /m ²	仓壁接触面积 /m ²
a	A	6.60	41.40	57.60	206.17	67.51	0.15	0.29
	B	0.90	39.80	63.00	316.81	47.72	0.24	0.24
	C	11.00	35.00	47.00	364.16	26.33	0.35	0.20
b	A	11.10	40.60	67.20	197.61	94.15	0.15	0.39
	B	11.00	39.00	57.00	310.82	113.09	0.24	0.25
	C	7.00	33.10	56.50	352.96	88.41	0.35	0.11

3.3 水位与摩擦力关系分析

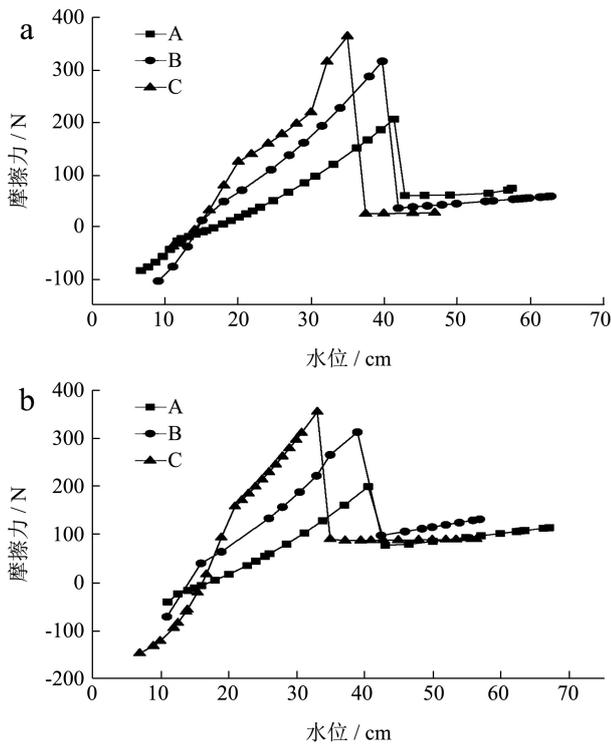


图 10 模型筒仓 A、B、C 的水位-摩擦力曲线图

Fig.10 Model silo water level- friction curves of model silos A, B, C

注: 图 a: 工况 a; 图 b: 工况 b。

根据测量水位与试验采集的仓底、仓壁压力传感器的读数,利用公式(7)计算静摩擦力,利用公式(4)计算滑动摩擦力,绘制模型筒 A、B、C 的水位-静摩擦力曲线,根据图 10,结合模型筒仓的试验参数,绘制摩擦力分析表 4。

经表 4 分析可知,

(1) 模型筒仓 A、B、C 在工况 a、b 中均存在静止和上浮两个阶段。

(2) 在静止阶段,模型筒仓所受的摩擦力为静摩擦力,工况 a、工况 b 的静摩擦力均随水位上升而逐渐增大;工况 a 时,模型筒仓 A、B、C 所受的静摩擦力随水位上升 1 cm 的增大幅度分别为 4.98 N、7.96 N 和 10.40 N,工况 b 时,模型筒仓 A、B、C 所受的静摩擦力随水位上升 1 cm 的增大幅度分别为 4.88 N、7.97 N 和 10.66 N。说明工况对静摩擦阶段摩擦力随水位的上升幅度无影响。

(3) 在上浮阶段,模型筒仓所受的摩擦力为动摩擦力,工况 a、工况 b 的动摩擦力均迅速下降并趋于稳定。

(4) 在静止阶段,由图 10 可知,工况 a 时,模型筒仓 A、B、C 对应的最大静摩擦力分别为 206.17 N、

316.81 N、364.16 N; 工况 b 时,模型筒仓 A、B、C 对应的最大静摩擦力分别为 197.61 N、310.82 N、352.96 N。由表 1 可知,工况 a 中模型筒仓 A、B、C 的覆土高度分别为 450 mm、410 mm、410 mm,工况 b 中模型筒仓 A、B、C 的覆土高度分别为 460 mm、420 mm、360 mm,说明仓底回填二八灰土的工况 a 比仓底采用粗砂的工况 b 具有更好的抗浮能力。

(5) 在上浮阶段,模型筒仓 A、B、C 在工况 a 中的平均动摩擦力分别为 65.71 N、47.72 N、26.33 N;模型筒仓 A、B、C 在工况 b 中的平均动摩擦力分别为 94.15 N、113.09 N、88.41 N。

(6) 模型筒仓 A、B、C 在工况 a 和工况 b 中动摩擦力均小于最大静摩擦力,在实际工程的抗浮设计中由于静摩擦无法直接计算,采用动摩擦力计算是安全可靠的。

4 结论

通过对地下粮仓模型筒仓在不同回填工况进行注水试验,分析模型筒仓在不同上浮阶段竖向位移、仓体周围压力和支反力的变化,以直径分别为 400 mm (模型筒仓 A)、500 mm (模型筒仓 B)、600 mm (模型筒仓 C) 为例,计算出模型筒仓在各种状态时的所受摩擦力和实际浮力,得出以下结论:

(1) 模型筒仓 A、B、C 在工况 a、b 中均存在静止和上浮两个阶段,静止阶段对应静摩擦力,上浮阶段对应动摩擦力。

(2) 在静止阶段,静摩擦力逐渐增大,且模型筒仓的直径越大,静摩擦力随等高水位的增加幅度越大。

(3) 由两种工况 a、b 下的位移-水位曲线、支反力-水位曲线分析可知由于静摩擦力的影响,位移发生突变滞后于支反力的变化。

(4) 在上浮阶段,两种工况 a、b 下模型筒仓 A、B、C 位移-水位、支反力-水位曲线随水位上升的曲线趋势一致。

(5) 由水位-摩擦力曲线分析可知,模型筒仓 A、B、C 的最大静摩擦力工况 a 下的最大值均均大于工况 b 下的最大值,说明工况 a 具有更好的抗浮能力。

(6) 两种工况 a、b 下模型筒仓 A、B、C 的动摩擦力均小于最大静摩擦力,在实际工程的抗浮设计中由于静摩擦无法直接计算,采用动摩擦力计算是安全可靠的。

参考文献

[1] 吕晓,牛善栋,李振波,等.中国耕地集约利用研究现状及趋

- 势分析[J].农业工程学报,2015,31(18):212-224
- LYU Xiao, NIU Shan-dong, LI Zhen-bo, et al. Present situation and trends in research on cultivated land intensive use in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(18): 212-224
- [2] 辛良杰,李鹏辉.中国居民口粮消费特征变化及安全耕地数量[J].农业工程学报,2017,33(13):1-7
- XIN Liang-jie, LI Peng-hui. Variation of grain consumption characteristics and safety cultivated land area in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(13): 1-7
- [3] 王薇.粮食仓房的保温隔热、气密性技术研究及应用[D].天津:天津大学,2009
- WANG Wei. Research and application of thermal insulation and sealing technologies for grain bins [D]. Tianjin: Tianjin University, 2009
- [4] 郑云飞,葛志文,刘慧,等.高大平房仓稻谷粮层霉菌量与优势霉菌的差异性研究[J].中国粮油学报,2019,34(11):81-86
- ZHENG Yun-fei, GE Zhi-wen, LIU Hui, et al. The difference between the amount of mold and the dominant mold in the rice grain of tall and large warehouse [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(11): 81-86
- [5] 尹君,吴子丹,张忠杰,等.不同仓型的粮堆温度场重现及对比分析[J].农业工程学报,2015,31(1):281-287
- YIN Jun, WU Zi-dan, ZHANG Zhong-jie, et al. Comparison and analysis of temperature field reappearance in stored grain of different warehouses [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 281-287
- [6] Peter Steen Henriksen, David Robinson. Early Iron Age agriculture: archaeobotanical evidence from an underground granary at Overbygård in northern Jutland Denmark [J]. Vegetation History & Archaeobotany, 1996, 5(1/2): 1-11
- [7] Peña-Chocarro, Pérez Jordà, Morales Mateos, et al. Storage in traditional farming communities of the western Mediterranean: Ethnographic, historical and archaeological data [J]. Environmental Archaeology, 2015, 20(4): 150513223830005
- [8] 伊赛.20世纪70年代军事防御型地下粮仓的遗产价值释读-以开封北门外地下粮仓为例[J].城市建筑,2019,16(6):98-103
- YIN Sai. The value interpreting of the heritage of military defensive underground granaries in the 1970s - A case study of underground granary outside the north gate of Kaifeng city [J]. Urbanism and Architecture, 2019, 16(6): 98-103
- [9] 刘海燕,王振清,陈雁.绿色生态储粮仓型-地下粮仓[J].农业机械,2012,5(24):114-118
- LIU Hai-yan, WANG Zhen-qing, CHEN Yan. Green ecological storage granary type: underground granary [J]. Agricultural Machinery, 2012, 5(24): 114-118
- [10] 王振清,揣君,刘永超,等.地下粮仓的结构设计研究现状与新进展[J].河南工业大学学报(自然科学版),2019,40(5):132-138
- WANG Zhen-qing, CHUAI Jun, LIU Yong-chao, et al. Current Situation and new progresses of structure design of underground silos [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(5): 132-138
- [11] 张会军,刘海燕,张庆章.砂土中地下粮食圆形筒仓抗浮模拟实验研[J].粮油食品科技,2017,25(2):99-104
- ZHANG Hui-jun, LIU Hai-yan, ZHANG Qing-zhang. Simulation experiment of anti-floating of Underground grain silos in sandy soil [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2017, 25(2): 99-104
- [12] 刘海燕,孟伟新,王振清,等.“二八灰土”回填地下粮仓浮力预警试验研究[J].农业工程学报,2019,35(11):299-305
- LIU Hai-yan, MENG Wei-xin, WANG Zhen-qing, et al. Buoyancy early warning of underground granary with “2:8 lime soil” backfilling [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(11): 299-305
- [13] 梅国雄,宋林辉,宰金珉.地下水浮力折减试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(9):1476-1480
- MEI Guo-xiong, SONG Lin-hui ZAI Jin-min. Experimental study on reduction of groundwater buoyancy [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1476-1480
- [14] 梅国雄,宋林辉,周峰,等.关于基础抗浮的若干问题探讨[J].岩土工程学报,2008,30(S1):238-242
- MEI Guo-xiong, SONG Lin-hui, ZHOU Feng, et al. Discussions on several problems about anti-uplift of foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S1): 238-242
- [15] 倪伟杰,朱斌,陈仁朋,等.回填软土中管道上浮力测试及计算方法[J].岩土工程学报,2014,36(3):569-573
- NI Wei-jie, ZHU Bin, CHEN Ren-peng, et al. Tests and methods for buoyancy of pipelines in backfill soft clay [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 569-573
- [16] 金立兵,刘斐骁,田栋杰.地下钢筋砼筒仓施工与闭水试验过程的抗浮试验研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2017,38(2):105-108,128
- JIN Li-bing, LIU Fei-xiao, TIAN Dong-jie. Anti-floating test in construction and closed-water test process of underground

- reinforced concrete silos [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2017, 38(2): 105-108, 128
- [17] 梁妍妍.地下结构的抗浮研究与优化分析[D].广州:广州大学,2016
- LIANG Yan-yan. Study on anti-floating of underground structure and optimum analysis [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2016
- [18] D A Dixon, J Graham, M N Gray. Hydraulic conductivity of clays in confined tests under low hydraulic gradients [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(5): 815-825
- [19] Boonchai Ukritchon, Suraparb Keawsawasvong. Design equations for undrained stability of opening in underground walls [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2017, 70: 214-220
- [20] Eimar Sandoval, Antonio Bobet. Seismic response of underground structures under undrained loading with excess pore pressures accumulation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2020, 99: 103255
- [21] D J Richards, C A Wiggan, W Powrie. Seepage and pore pressures around contiguous pile retaining walls [J]. Géotechnique, 2016, 66(7): 523-532
- [22] Jikai Zhou, Chenghuan Lin, Chen Chen, et al. Reduction of groundwater buoyancy on the basement in weak-permeable/impervious foundations [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 5: 1-11
- [23] 李津津, 雒建斌. 人类摆脱摩擦困扰的新技术-超滑技术[J]. 自然杂志, 2014, 36(4): 248-255
- LI Jin-jin, LUO Jian-bin. New technology for human getting rid of friction: superlubricity [J]. Chinese Journal of Nature, 2014, 36(4): 248-255
- [24] 中华人民共和国规范. 给水排水工程构筑物结构设计规范: GB 50069-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- [25] 李帅, 张东刚, 李涛, 等. 小直径抗拔桩桩侧摩阻力取值探讨[J]. 施工技术, 2018, 47(4): 111-114
- LI Shuai, ZHANG Dong-gang, LI Tao, et al. Discussions on the shaft resistance value of uplift pile with small diameter [J]. Construction Technology, 2018, 47(4): 111-114
- [26] 中华人民共和国规范. 建筑桩基技术规范: JGJ 94-2008[S]
- [27] 王永璐, 刘顺青, 姜朋明. 含水率及吸力对非饱和下蜀土强度特性影响试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 48-52
- WANG Yong-lu, LIU Shun-qing, JIANG Peng-ming. Experimental study on the influence of moisture content and suction on the strength characteristics of Xiashu soil [J]. J of China Three Gorges Univ. (Natural Sciences), 2020, 42(4): 48-52
- [28] 孙文, 吴亚平, 韩璞璞, 等. 湿陷性黄土-混凝土接触面剪切力学特性及破坏型式研究[J]. 兰州交通大学学报, 2020, 39(3): 7-12
- SUN Wen, WU Ya-ping, HAN Pu-pu, et al. Study on shear mechanical properties and failure mode of collapsible loess-concrete interface [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2020, 39(3): 7-12
- [29] 柳涛. 玄武岩纤维加筋粉质黏土的静动力学特性试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(7): 1734-1742
- LIU Tao. Experimental investigation on the static and dynamic characteristics of silty clay reinforced with basalt fiber [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(7): 1734-1742
- [30] 龙昊鹏. 关于带负摩阻力的桩基础探讨[J]. 建材发展导向, 2019, 17(12): 96-100
- LONG Hao-peng. Discussion on pile foundation with negative friction [J]. Development Guide to Building Materials, 2019, 17(12): 96-100
- [31] 刘明. 新近深厚填土桩基负摩阻力计算及特性研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2014
- LIU Ming. Research on the calculation and characteristic of negative friction of pile foundation in newly thick fill [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2014
- [32] Hongquan Li, Shengyang Feng, Limin Wei, et al. Time effect of pile-soil interaction and its elastic-viscoplastic constitutive model [J]. Rudarsko-geološko-naftni Zbornik, 2019, 34(1)