

吴强, 张强, 周洋, 等. 上覆堆载作用下砂性地层埋入式筒仓浮力分析 [J]. 华南地震, 2024, 44(1): 126-132. [WU Qiang, ZHANG Qiang, ZHOU Yang, et al. Buoyancy Analysis for Buried Silo in Sandy Stratum Under Overlying Surcharge Load[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(1): 126-132]

## 上覆堆载作用下砂性地层埋入式筒仓浮力分析

吴强<sup>1</sup>, 张强<sup>2</sup>, 周洋<sup>1</sup>, 宋铭<sup>1</sup>, 王楷<sup>3</sup>

(1. 河南工业大学, 郑州 450001; 2. 河南工大设计研究院, 郑州 450001; 3. 中建八局一公司中原公司, 郑州 450003)

**摘要:** 河南是国家粮食三大主产区之一, 实现粮食大规模的绿色储粮利国利民, 地下/半地下粮仓具有储量大、低温等优点是绿色储粮的理想仓型之一, 但地下大体积结构抗浮设计问题突出。以入地式筒仓为研究对象, 考虑仓周上覆堆载开展模型试验和理论研究, 理论反演分析筒仓上浮时的临界状态对应的浮力折减系数。研究表明: 随着筒仓周边施加的均布荷载不断增加, 仓壁受土体侧摩阻力也逐渐增加, 抑制仓体上浮; 浮力在土体中存在着一定的折减。在饱和粗砂土质中, 浮力折减系数估算为0.945; 增加上覆荷载可以提升筒体埋深的设计潜力, 为低温、绿色储粮提供更大可能。

**关键词:** 模型试验; 埋入式粮仓; 浮力; 折减系数; 上覆堆载

中图分类号: U231

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)01-0126-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.01.15

## Buoyancy Analysis for Buried Silo in Sandy Stratum Under Overlying Surcharge Load

WU Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>, ZHOU Yang<sup>1</sup>, SONG Ming<sup>1</sup>, WANG Kai<sup>3</sup>

(1. Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan University of Technology Design and Research Academy, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhongyuan Company of The First Company of China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** Henan is one of the three major grain producing areas in China, and the realization of large-scale green grain storage is beneficial to the country and the people. The underground or semi-underground grain storage has the advantages of large reserves and low temperature, which is one of the ideal types of green grain storage, but the anti-floating design of underground massive structure is prominent. This study focuses on the buried cylindrical silo as the research object, conducts model experiments and theoretical research with considering the overlying load around the silo, and analyze the buoyancy reduction coefficient corresponding to the critical state of the silo floating by theoretical inversion. The research indicates that as the uniformly distributed load around the silo continues to increase, the lateral friction resistance of the silo wall to the soil also gradually increases, which inhibits the upward flotation of the silo. Additionally, there is a certain reduction of buoyancy in soil. In saturated coarse sand, the estimated buoyancy reduction coefficient is 0.945. Increasing the overlying load can enhance the design potential of the buried depth of silo and provide greater possibilities for low-temperature and green grain storage.

收稿日期: 2023-12-21

基金项目: 住房和城乡建设部科技计划资助项目(2017-k10-006)

作者简介: 吴强(1970-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为储粮结构设计、筒仓基础加固。

通信作者: 周洋(1988-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为结构工程、岩土工程、地下仓储等。

E-mail: robertzhouy@haut.edu.cn

**Keywords:** Model test; Buried silo; Buoyancy; Reduction factor; Overlying load

## 0 引言

当前阶段我国迫切需要增强粮食储备能力,逐步建立起粮食储备体系,做到手中有粮,心中不慌,切实保证国家粮食安全。我国的粮食自给率为82.3%,仍有17.7%的粮食缺口,自2014年起我国已成为第一大粮食进口国。近年来,美国大搞经济胁迫,将粮食作为武器威胁我国粮食安全,扰乱我国粮食经济发展。新冠疫情(2020-2022)和乌克兰危机(2022-)使得全球粮食供应链严重混乱,供应能力下降,联合国粮食计划署宣布“全球可能面临二战后最大的粮食危机”,联合国粮食及农业组织(FAO)文件报道世界各主要粮食进口国(中国、日本和欧洲多数国家)近年在不断增加粮食进口总量。因此,需要加强粮食储备调控,打造现代粮食仓储物流体系,推进全链条节约减损,健全常态化、长效化工作机制。综上所述,将粮食进行长期、安全、是、绿色储藏对国家安全、经济民生和国际局势均尤为重要。保证粮食在储藏过程中的安全和品质的常规做法是进行低温储粮,使用空调系统和机械(或自然)通风降低堆粮温度,将仓内温度严格控制在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内,使粮食不受虫霉和微生物的损害<sup>[1]</sup>。其次,需要提高粮仓气密性并改变仓内气体成分比例或化学熏蒸等方式来控制虫霉生长<sup>[1]</sup>。地下/半地下粮仓具有储量大、隐蔽、密闭、低温等优点,是绿色储粮的理想仓型之一,近年来更多专家学者开始关注地下粮仓发展<sup>[2-5]</sup>。

根据阿基米德定律,结构受到的浮力与其处于水位以下的深度有关。很多案例显示,工程降水措施停止或突降暴雨诱发水位抬升和结构上浮,最终诱发构件开裂,因此在饱和土层中埋入式地下粮仓的抗浮问题十分严峻<sup>[6]</sup>。刘海燕等<sup>[7-8]</sup>发现抗浮设计中,静摩擦力现阶段无法直接计算,而采用动摩擦力计算方法是安全可靠的。金立兵等指出地下结构的全仓和空仓为最不利工况,且目前的抗浮措施偏于保守,造成一定的资源浪费<sup>[9-10]</sup>。李冲和梅国熊等通过试验证明实际的水浮力比理论值小,并提出水浮力的大小受到水位回升的高度和时间的影响<sup>[11-12]</sup>。熊欢等指出地下结构的抗浮设防水位应该取基础埋置范围内起主导作用的含水层的最高水位<sup>[13]</sup>。Chang研究发现岩土防护材料可用于深基础的抗浮,而抗浮效果取决于材料的物理参数,其可

可以降低基础的水压力<sup>[14]</sup>。Xu等研究发现随着地下水浮力的增加,承受被动的水土压力,从而形成向上隆起的趋势<sup>[15]</sup>。然而,现有阶段粮仓抗浮研究较少考虑到粮仓上部周边堆载问题。实际工况中,埋入式粮仓周边需要考虑上覆堆载问题,堆载来源于厂房、机房、车库等附属结构物,考虑仓周上覆堆载影响进行浮力分析更能代表工程实际。

本文以半入地式钢筋混凝土筒仓为对象,考虑浮力、仓重、摩阻力和上覆荷载等作用进行浮力分析计算。首先,设置两种不同堆载,进行粮仓不同埋置深度下仓体起浮起浮试验;其次,通过力学平衡分析建立考虑浮力折减系数的筒仓浮力计算公式<sup>[16]</sup>。最后,比较分析理论计算与模型试验结果,验证浮力计算公式的有效性并反演分析浮力折减系数,为其他学者在涉及半地下结构尤其是半入地粮仓抗浮设计时提供一定的借鉴与思考。

## 1 试验装置

试验装置主要由一个模型箱、一个模型筒仓、水位观测管和位移计构成。模型箱采用厚度为8 mm的亚克力板拼装而成,尺寸为 $500\times 500\times 500\text{ cm}^3$ ,连接处做加固和密封处理,最后做闭水试验。在模型箱一侧距底部1 cm处打设直径2 cm排水孔和阀门,在另外一侧打设直径1 cm小孔并连接带有刻度的水位观测管,利用连通器原理测量土体内实时水位。

模型筒仓高35 cm,内径25 cm,外径27 cm,容积3600 ml;采用细钢筋骨架并浇筑混凝土而成,骨架布置如图1。混凝土浇筑模具选择亚克力材料,内涂有脱模剂,将骨架放入其中进行浇筑,混凝土使用固定配比的细石混凝土,自重12.27 kg;按要求静置养护,养护后抗压强度达40 MPa。模型筒仓脱模成功后,在正式试验前将模型仓内外壁均匀涂抹防水材料。

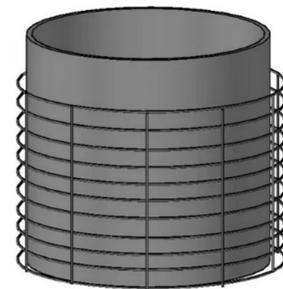


图1 混凝土模型筒仓示意图

Fig.1 Schematic diagram of concrete model silo

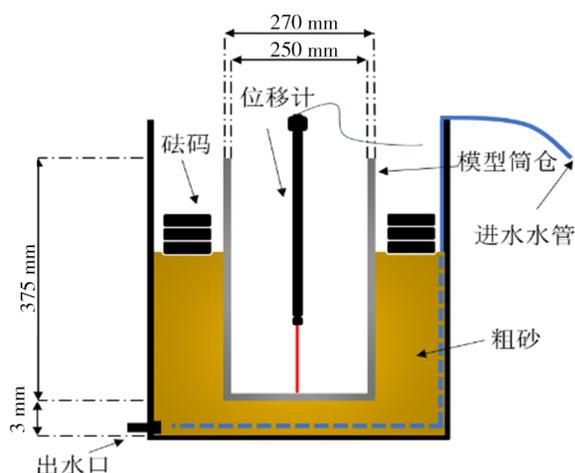


图2 模型试验装置示意图

Fig.2 Model test device

试验分为3组进行，第一组将模型筒仓放置于箱体中间，通过加水不断调整水位并监测仓体上浮位移情况，称为浮力试验。第一组试验的目的是检查试验系统的可靠性以及筒体的密封性。第二组试验，在模型箱中放入3 cm厚的砂土，用水浸没砂土并保持48小时；将模型筒仓放置于箱体中间，并逐层铺设砂土至不同高度，即筒体埋深；通过方形砝码施加荷载 $1.05 \text{ kN/m}^2$ 模拟上覆堆载，试验时通过加水不断调整水位并监测仓体上浮位移情况，称为覆载试验。在第二组覆载试验中，共进行4个

试验，混凝土筒仓埋深分别设置为13 cm、16 cm、19 cm、22 cm。第三组试验与第二组试验完全相同，但是上部堆载调整至 $2.11 \text{ kN/m}^2$ 。需要特别指出，每两次加水间隔不小于5分钟，位移计采用精度为0.01 mm的拉杆式位移传感器，通过电子表读出示数。

## 2 试验结果

### 2.1 筒体浮力

第一组浮力试验中，仓体在水位增加时的上浮位移如图3所示。首先，水位在21 cm前，筒体基本不动或者微动，21 cm后出现明显上浮，位移从0.05 mm迅速增加至1.57 mm，22 cm后筒体极速上浮。通过试验数据可知，临界上浮水位应在21 ~ 22 cm。另一方面，通过对阿基米德定律进行理论推算(水的密度取 $1 \text{ g/ml}$ )，可得筒体可平衡自重的临界水位应为21.43 cm。理论值和试验值吻合性较好，二者间的微小差异可能来源于温度和人为读数误差等因素。另外，位移计拉杆在仓体起浮时可能产生阻尼，影响筒体起浮。最后，试验结束观察混凝土筒仓内无水渍渗出，混凝土筒仓密封性完好。总之，通过比较仓体实际与理论起浮水位，可知本试验装置是可行的，可开展进一步模型仓试验。

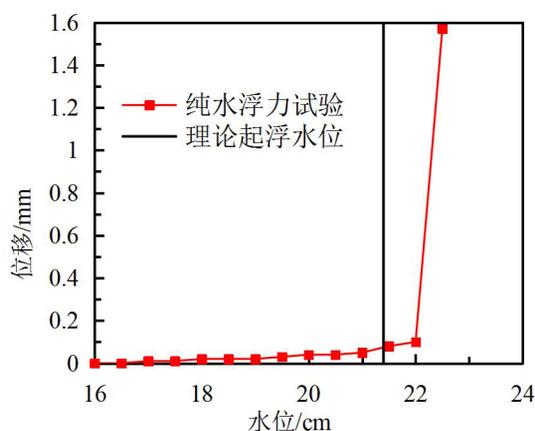


图3 纯水浮力试验位移变化曲线

Fig.3 Displacement variation curve of pure water buoyancy test

### 2.2 筒体位移随水位变化特征

在覆载试验中，筒体位移随水位变化过程如图4所示。图4a展示了在砝码施加约为 $1.05 \text{ kN/m}^2$ 的均布荷载作用下不同埋深筒体的上浮位移变化。13 cm埋深的仓体在32.5 cm左右水位(从模型箱底

部算起)处上浮位移发生突变；16 cm埋深仓体在33.5 cm左右水位上浮位移发生突变；19 cm埋深仓体在34.5 cm左右水位上浮位移发生突变；22 cm埋深仓体在35.5 cm左右水位处上浮位移发生突变。图4b展示了在砝码施加为 $2.11 \text{ kN/m}^2$ 的均布荷载作用下不同埋深筒体的上浮位移变化。其中，19 cm

埋深时, 试验由于注水失误导致拐点不明确, 但不影响试验的整体趋势。13 cm, 16 cm, 19 cm, 22 cm埋深仓体上浮位移突变对应的水位高度分别为34.5 cm, 35.5 cm, 36.5 cm, 38.5 cm左右。整体上, 对于空载筒仓随着土体深度的增加, 上浮位移突变是对应水位增加, 即埋深增加, 土体的侧摩阻力也增加, 需要的上浮力也就愈大。因此, 埋深的增加有利于筒仓的抗浮。需要注意的是, 虽增大埋深有利抗浮, 但是大埋深工况下沿筒体高度侧摩阻力分布不均, 筒壁的抗拉问题凸显, 应采取对应措施。

### 2.3 不同堆载下土体起浮水位

在覆载试验中, 相同埋深、不同堆载下筒体

位移随水位变化过程如图5所示。图5a~d分别为不同埋深(13~22 cm)时2.11 kN/m<sup>2</sup>堆载和1.05 kN/m<sup>2</sup>堆载作用下上浮位移与水位关系图。对比数据发现, 大荷载下的起浮水位较小荷载平均高出2 cm。图6是仓周上部有无荷载是的土压力分布曲线, A部分为直角三角形, 代表无上部荷载作用; B部分为直角梯形, 代表有上部荷载作用。可知, 在相同埋深下仓体周围堆载越大, 对仓周土体施加的附加应力越大, 仓外壁的侧压力 and 对应摩阻力越大, 对浮力的抵抗作用越强, 因此土体的起浮水位就越高。工程中可通过合理设计地表构筑物与筒仓位置关系, 增加仓周土体附加应力和抗浮能力, 减少抗浮桩和抗浮锚杆使用量, 消减施工节点和可能的裂缝。

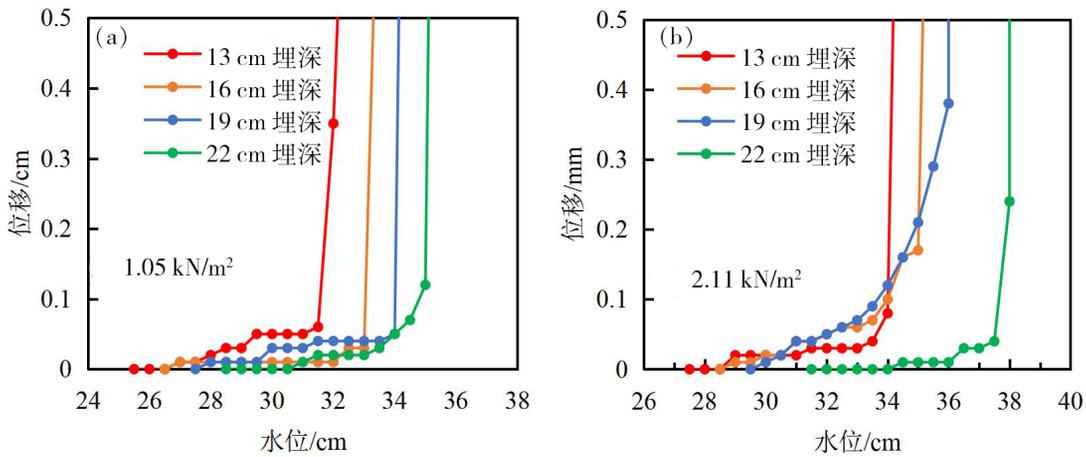


图4 不同埋深位移随水位变化曲线

Fig.4 Curves of displacement with water level at different buried depth

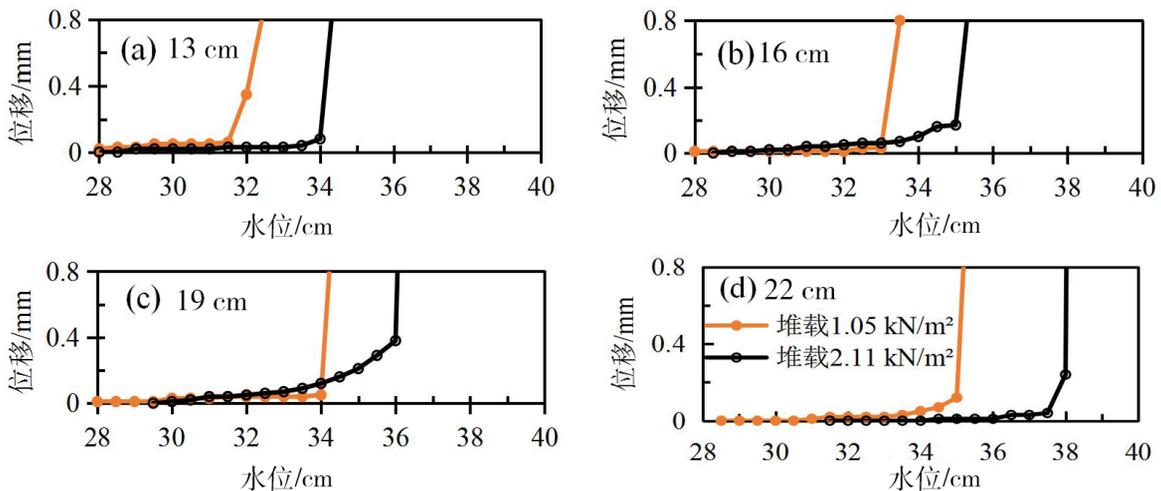


图5 不同堆载下位移随水位变化曲线

Fig.5 Curves of displacement with water level under different load

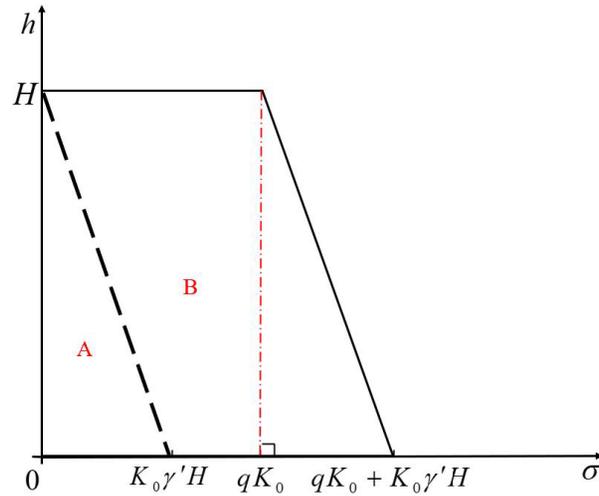


图6 有无上部荷载土压力分布曲线

Fig.6 Soil pressure distribution curve with or without upper load

### 3 理论分析

#### 3.1 计算原理

混凝土筒仓在纯水中因为水位上升而发生起浮，可采用阿基米德定律分析极限平衡状态：

$$F_{\text{浮}} = G \quad (1)$$

式中  $F_{\text{浮}}$  为筒仓所受浮力， $G$  为筒仓重力。其中浮力应等于重力，即：

$$F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g S H_{\text{水}} \quad (2)$$

$\rho_{\text{液}}$  为水的密度， $S$  为筒仓底面积， $H_{\text{水}}$  为水位高度与仓体底部高度差值，即筒体埋深。筒体自重为：

$$G = mg \quad (3)$$

$m$  为筒仓质量， $g$  为重力加速度。联立等式(2)、(3)，得：

$$H_{\text{水}} = \frac{m}{\rho_{\text{液}} S} \quad (4)$$

混凝土筒仓在实际建造中会由于土体对仓壁产生的侧向摩阻力而阻碍其起浮，因此在公式(1)中需考虑仓体所受摩擦力  $f_{\text{摩}}$ ，则：

$$F'_{\text{浮}} = G + f_{\text{摩}} \quad (5)$$

式中  $f_{\text{摩}}$  可通过公式(6)计算：

$$f_{\text{摩}} = \mu F_N = \mu \frac{HD}{2} [qK_0 + qK_0 + K_0 \gamma' H] \quad (6)$$

$\mu$  为仓土之间摩擦系数， $K_0$  为静止土压力系数， $\gamma'$  为砂土的有效重度， $H$  为筒仓埋置深度， $D$  为筒仓外围周长。 $F_N$  为考虑上部堆载的筒体外壁侧压力，可由图6计算而来。

规范规定，地下水对地下结构物的上浮作用，原则上应按照设计水位来计算浮力，对节理不发育的岩石和黏土，如果有地方经验和实测的数据，可以根据经验来确定<sup>[17]</sup>。考虑到在土体中浮力存在一定的折减<sup>[18]</sup>，因此需要设定浮力折减系数  $k$ ，筒仓的实际浮力可表达为：

$$F'_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g S H_{\text{水}} k \quad (7)$$

联立等式(3)、(6)、(7)，得到：

$$H_{\text{水}} = \frac{m}{\rho_{\text{液}} S K} + \frac{\mu H D}{2 \rho_{\text{液}} g S K} [qK_0 + qK_0 K_0 \gamma' H] \quad (8)$$

则仓体起浮时水位为：

$$H_{\text{起浮}} = H_{\text{水}} + H_{\text{垫层}} \quad (9)$$

$H_{\text{垫层}}$  为底部土体垫层厚度，本文为 3 cm。

#### 3.2 折减系数反分析

为了比较起浮水位的理论结果和试验结果，需要确定公式(7)的浮力折减系数( $k$ )。在理论计算中，参数  $\rho_{\text{液}} = 1000 \text{ kg/m}^3$ ， $\mu = 0.14$ ， $K_0 = 0.5$ ， $\gamma' = 9.8 \text{ kN/m}^2$ ， $g = 9.8 \text{ N/kg}$ 。不断试算  $k$ ，当  $k = 0.945$  时，依据两组试验计算的理论值和试验值均能吻合，比较结果见图7。刘海燕等<sup>[19]</sup>发现，饱和砂土的浮力折减系数为 0.94，与本文结果一致。

#### 3.3 参数分析

基于上述公式(8)、(9)，改变仓周边上部均布荷载  $q$  进行起浮水位计算，其中取  $q = 4 \text{ kN/m}^2$ 、 $6 \text{ kN/m}^2$ 、 $8 \text{ kN/m}^2$ ，结果见图8。分析表明，相同埋深下仓体周围堆载越大，土体的起浮水位就越高。此结果进一步验证了上覆荷载在增加仓体的

抗浮能力方面的作用。当埋深为22 cm时,堆载为  $kN/m^2$ 对应的起浮水位可达55 cm,起浮水位远大于

筒体埋深说明筒体还有增加设计埋深的潜力,为低温、绿色储粮提供更大可能。

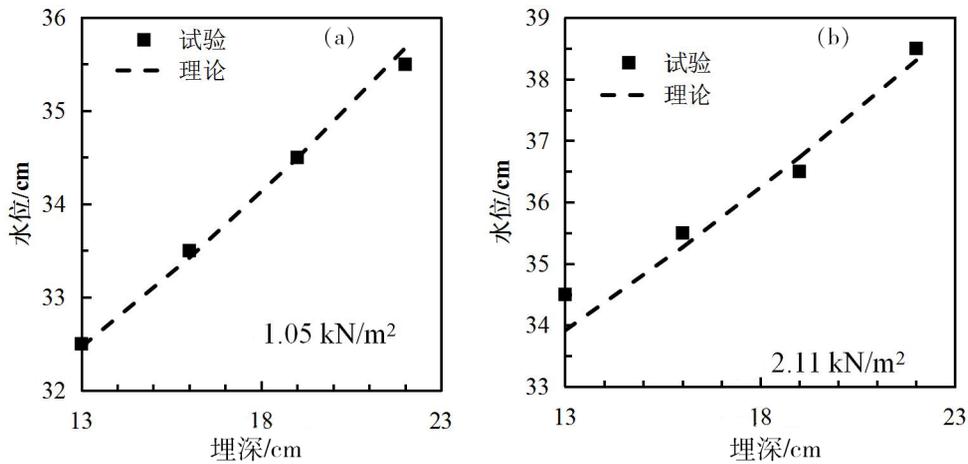


图7 起浮水位理论值与试验值比较

Fig.7 Comparison between theoretical value and experimental value of floating water level

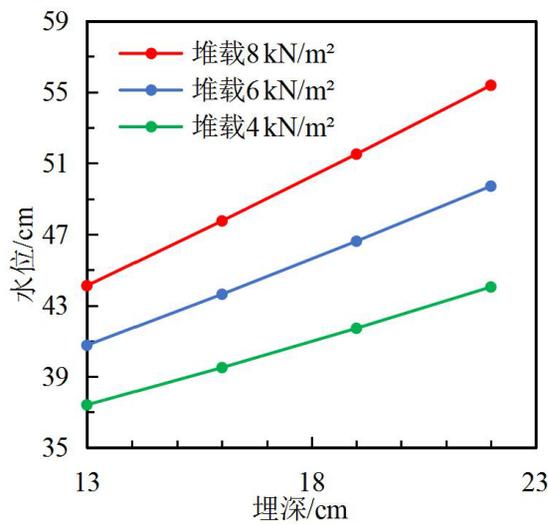


图8 不同堆载下理论起浮水位比较

Fig.8 Comparison of theoretical floating water level under different overlying loads

### 4 结论

本文采用理论模型及室内模型试验分析了半地下筒仓抗浮力学特征,记录了在不同埋深分别施加不同上部荷载的仓体起浮情况。初步得到以下结论:

(1)空载筒仓随着埋深增加,仓壁受土体侧摩阻力逐渐增加,则需要的上浮力也就愈大。因此,埋深的增加有利于筒仓的抗浮。但在大埋深工况下,沿筒体高度侧摩阻力分布不均,筒壁的抗拉问题凸显,还需要进一步研究。

(2)随着筒仓周边施加的均布荷载不断增加,

仓壁受土体侧摩阻力也逐渐增加,抑制仓体上浮。因此,仓体周边施加一定的堆载有利于筒仓的抗浮。

(3)浮力在土体中存在着一定的折减。在饱和粗砂土质中,浮力折减系数估算为0.945。为其它学者对半地下仓的抗浮研究提供一定的借鉴与思考。

### 参考文献

[1] 刘瑞丽. 地下储粮新仓型及其构造措施研究[D]. 郑州:河南工业大学,2018.

[2] 熊晓莉,金立兵,史笑珂,等. 钢筋混凝土圆形地下粮仓仓壁承载力计算方法研究[J]. 河南工业大学学报:自然科学版,2015,36(1):5.

- [3] 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, 2019, 40(05): 132-138.
- [4] 徐向楠. 基于 Terzaghi 有效应力的地下粮仓浮力折减研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2022.
- [5] 王振清, 侯支龙, 揣君, 等. 装配式钢板混凝土地下粮仓结构方案研究[J]. 安阳工学院学报, 2020, 19(06): 80-83.
- [6] 孟伟新. 考虑侧摩阻力与土体支承力的地下粮仓浮力试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
- [7] 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): 7.
- [8] 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(06): 175-183.
- [9] 金立兵, 张为博, 吴强, 等. 新型半地下双层浅圆仓静态储粮的力学性能[J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 142-147.
- [10] 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(02): 105-108+128.
- [11] 李冲. 单一土质中地下钢筋砼粮食圆形筒仓抗浮模拟试验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- [12] 梅国雄, 宋林辉, 周峰, 等. 地下空间开发中的岩土工程关键技术[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2008, (04): 98-104.
- [13] 熊欢. 地下结构抗浮设计中浮力的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [14] Chang D, Wu J Y, Nieh Y C. Use of geosynthetics in the uplift pressure relief system for a raft foundation[J]. Journal of Engineering and Applied Science, 1996, 1281(5): 196-210.
- [15] Xu Z, Yu H. Non-contact experiment investigation of the interaction between the soil and underground granary subjected to water buoyancy[J / OL]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 8988[2023-12-01]. <https://doi.org/10.3390/app11198988>
- [16] 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究[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(2): 99-104.
- [17] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB50021-2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [18] 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(09): 1476-1480.
- [19] 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(06): 175-183.