

半地下双层浅圆仓施工过程中力学性能数值分析

金立兵*, 张为博, 吴强, 王振清, 李闯, 董天云

(河南工业大学混凝土结构长期性能研究所, 河南郑州 450001)

摘要: 作为一种新仓型, 半地下双层浅圆仓具有节约用地、节约能源、机械化程度高的优势, 并可保证储粮品质。论文采用实体单元建立数值模型, 根据场地地质条件与实际状态设置边界条件, 构建了半地下双层浅圆仓的数值分析方法; 经与地下粮仓的足尺试验结果进行对比, 验证了数值模拟方法的可行性。通过对半地下双层浅圆仓施工过程中回填前后的受力性能进行分析, 研究表明: 仓底在回填前距锥底 2/3 处径向、环向应力达到峰值; 首层仓壁在回填后距锥底 1/3 处径向、环向应力达到峰值。该研究可为半地下双层浅圆仓工程设计与施工提供理论支持。

关键词: 双层浅圆仓; 半地下; 力学分析; 数值模拟; 施工过程

文章编号: 1673-9078(2023)04-180-186

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.4.0574

Numerical Simulation of Mechanical Properties during Construction of Semi-underground Double-layer Squat Silo

JIN Libing*, ZHANG Weibo, WU Qiang, WANG Zhenqing, LI Chuang, DONG Tianyun

(Institute of Long-term Performance on Concrete Structures, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: As a new type of granary, the semi-underground double-layer squat silo has the advantages of saving space and energy, a high degree of mechanization, and ensuring the quality of grain storage. Herein, solid elements were used to establish numerical models, set boundary conditions according to the geological conditions and actual state of the site, and construct a numerical-analysis method for semi-underground double-layer squat silos. The feasibility of the numerical simulation method was verified by comparison with physical test results of the underground granary. Analysis of the mechanical performance before and after backfilling during the construction of the semi-underground double-layer squat silo showed that the radial and hoop stresses of the bottom of the silo reached a peak at two-thirds of the conical base before backfilling, and the maximum radial and hoop stresses of the first layer of the silo wall reached a peak at one-third of the conical base after backfilling. This study provides theoretical support for the engineering design and construction of semi-underground double-layer squat silos.

Key words: double-layer squat silo; semi-underground; mechanical analysis; numerical simulation; construction process

引文格式:

金立兵,张为博,吴强,等.半地下双层浅圆仓施工过程中力学性能数值分析[J].现代食品科技,2023,39(4):180-186.

JIN Libing, ZHANG Weibo, WU Qiang, et al. Numerical simulation of mechanical properties during construction of semi-underground double-layer squat silo [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 180-186.

粮食事关国运民生, 保障粮食安全是一个永恒的课题。目前我国已将高标准绿色仓储建设列为推动粮食仓储设施建设高质量发展的落脚点。为了进一步提高用地效能, 降低吨粮占地指标, 在浅圆仓的基础上开发了半地下双层浅圆仓新仓型, 半地下双层浅圆仓兼有浅圆仓与地下仓的优势, 可以利用浅圆仓储粮量大、机械化程度高^[1]和地下仓利用浅层地能、保障储

收稿日期: 2022-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51509084); 河南省省重点研发与推广专项 (212102110191)

作者简介: 金立兵 (1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 混凝土结构与新型仓储结构基本理论和长期性能, E-mail: jinlb@haut.edu.cn

粮品质^[2]的双重优势。同时, 半地下双层浅圆仓具有临时储备兼中转、低温长期存储等多重功能, 满足当前高标准绿色粮仓建设的基本要求。

半地下双层浅圆仓作为一种新仓型, 目前国内外尚未发现相关的研究成果。国内外学者对浅圆仓进行了较为系统的研究。在数值模拟^[3-5]方面, 目前国外学者对浅圆仓力学性能进行了一系列研究, 得到了浅圆仓仓壁受力机理; 在现场试验^[6,7]方面, 相关学者研究表明力学性能与经典 Janssen 定律较为吻合同时也验证了有限元模拟的正确性。河南工业大学对地下储粮仓包括从整体力学结构到仓体的优化进行了较为系统的研究, 通过有限元软件基于柱壳理论提出了一种有

效计算仓壁位移和内力的方法；通过理论公式推导^[8-10]分析对浅圆仓侧压力有了深入的研究理解；通过对地下粮仓足尺试验与数值模拟相结合^[11,12]的方法提出一种研究地下混凝土筒仓受力模型，对地下仓在最不利荷载工况下展开有限元分析，利用遗传算法对仓壁进行了优化。

本文利用大型有限元软件采用实体单元建模，根据半地下双层浅圆仓建设施工过程中土层回填前后两个特定的施工阶段分别对仓底、仓壁进行力学性能分析，得到仓体受力变化规律，为半地下双层浅圆仓工程实践和安全施工提供理论指导。

1 半地下双层浅圆仓数值分析方法

1.1 模型单元

本文利用 ABAQUS 有限元软件采用实体单元建模对半地下双层浅圆仓进行数值分析。目前粮仓相关模拟多采用壳单元^[13,14]建模。采用壳单元建模在后处理分析虽然可以节省计算时间，但在对模型赋予厚度时连接处易出现单元侵入的现象从而导致连接处分析不精准甚至出现不收敛的情况；而实体单元可与其他任何表面与其他单元连接起来。为了准确得到半地下双层浅圆仓模型，在建模过程中采用更加符合实际工程情况的整体建模。对半地下双层浅圆仓进行简化，不考虑钢筋对混凝土的影响，模型整体采用实体单元建模。

1.2 材料本构关系

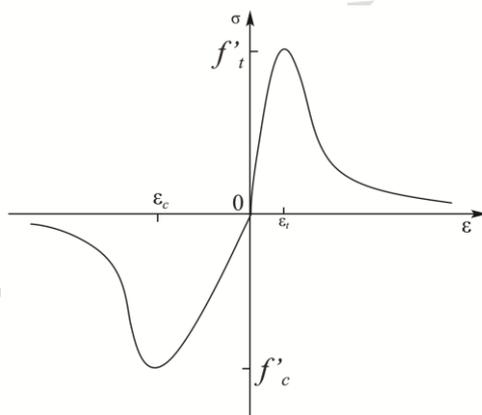


图 1 混凝土应力-应变曲线图

Fig.1 Concrete stress-strain curve

混凝土的本构模型是描述混凝土的应力-应变关系（图 1）。混凝土单轴受拉、压的应力应变曲线方程按下式计算：

$$\sigma = (1-d_t) E_c \varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma = (1-d_c) E_c \varepsilon \quad (2)$$

式中：

σ 、 ε ——混凝土应力、应变；

d_t 、 d_c ——单轴受拉、压损伤演化参数；

E_c ——弹性模量。

1.3 施加荷载

半地下双层浅圆仓在施工过程中土层回填前后均有以下荷载：

(1) 全仓仓体自重；

(2) 首层仓底荷载。由于半地下双层浅圆仓全仓自重远大于地下水的浮力，因此仓底只受到水的浮力，取 $\sigma = -9.8z$ (z 为从地下水水位线起往地下的深度)；

(3) 半地下双层浅圆仓仅二层在地上会受到风荷载的作用，将仓顶简化为平屋顶受到风荷载作用。将风荷载转化为集中力以线性荷载的形式施加到半地下双层浅圆仓二层仓壁上；

(4) 半地下双层浅圆仓施工过程中分为回填前后两个特殊阶段。在回填前需一直做降水处理，把水降到仓底环梁附近处；在回填后停止降水，水位恢复到自然水位。因此，半地下双层浅圆仓在土层回填后仓壁会受到土压力和水压力，此时应力与回填前具有显著差异，根据选址计算水土复合压力。

1.4 网格划分

半地下双层浅圆仓分析网格中完全使用楔形单元，网格划分采用自由网格划分因为其几乎可以用于任意的几何形状，网格划分算法采用中性轴算法。

1.5 后处理

后处理分析采用 Mises 屈服准则，即当某一点应力应变状态的等效应力始终是一不变的定值，屈服准则的值也即等效应力。后处理可以得到半地下双层浅圆仓应力、应变云图。

2 模拟的验证

2.1 工程概况

本文的工程实例以河南某地下粮仓（图 2）为研究背景。该仓仓深 18.36 m，仓顶埋深-1.5 m，全仓仓体最深埋深为-19.56 m。

地下仓所在地的地下水位保持在-0.6~-6.6 m，当地地质表见表 1。

根据现有地下仓研究^[15,16]采用被动作用计算水土复合压力，熊晓莉等^[17]对河南某地下粮仓进行现场实验得到仓壁侧压力数据，通过 Rankine 土压力理论计算得到的主动、被动土压力，再与理论计算结果与实

测数据对比验证了取被动作用下复合压力的正确性。按照上表计算水土分算复合压力如图3。

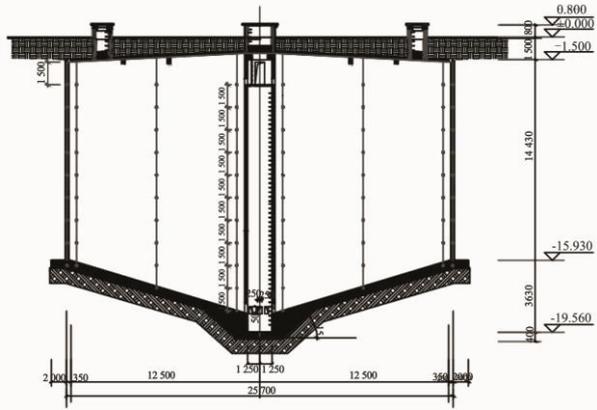


图2 地下仓模型

Fig.2 Underground silo model

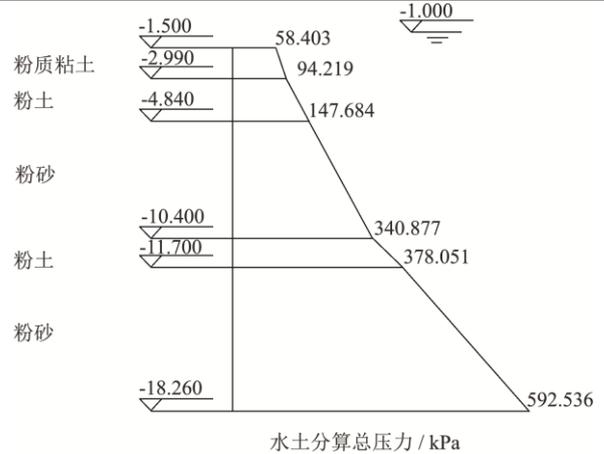


图3 被动作用下首层水土复合压力分布

Fig.3 Composite pressure distribution of the first layer of water and soil under passive action

表1 各土层地质统计表

Table 1 Geological statistical tables of soil layers

层号	岩土名称	平均厚度/m	含水率 w/%	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	孔隙比 e_0	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
1	粉砂	1.23	21.4	20	0.540	18.0
2	粉质黏土	1.76	22.6	20.4	0.835	12.0
3	粉土	1.85	22.1	20.8	0.682	18.0
4	粉砂	5.56	21.4	20.0	0.540	22.0
5	粉土	1.30	24.4	21.3	0.688	25.0
6	粉砂	6.58	21.4	20.0	0.540	22.0
7	粉土	1.29	23.7	20.6	0.678	25.0

2.2 模型的验证

根据地下仓模拟结果与地下仓实测数据对比得到图4。通过对比分析可以得到模拟的结果整体大于实验结果，在地面以下近端处即地下仓仓顶模拟值较大大于实验值，这可能与上部覆土及机械荷载；在-15 m左右处即约为地下仓3/4处 Mises 应力最大与受地下水浮力增大有关，除此之外两者整体变化趋势相近，而且除了个别数据，数值模拟结果与实验结果的误差较小验证了地下仓有限元模型的正确性可行性。

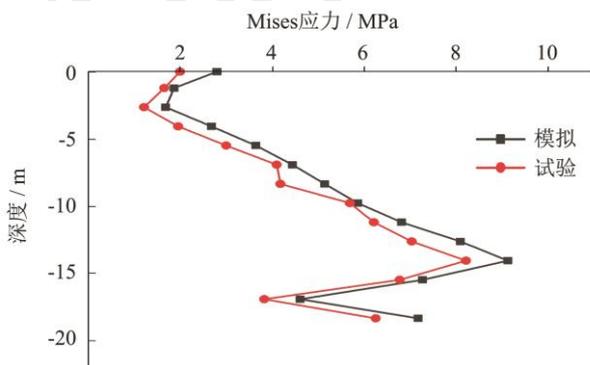


图4 仓壁试验模拟对比

Fig.4 Comparison of silo wall test and simulation

3 半地下双层浅圆仓施工阶段的受力分析

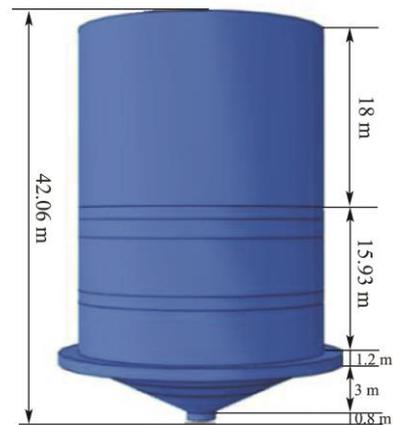


图5 半地下双层浅圆仓尺寸

Fig.5 Semi-underground double-storey squat silo size

半地下双层浅圆仓(图5、6)首层仓壁高15.93 m，锥底高3 m，中心支撑筒高42.06 m，中心筒半径1.25 m，二层仓壁高18 m，仓壁内径25 m；其中首层与二层连接处隔板厚500 mm，仓顶与水平面夹角为5°；仓底与水平面夹角为15°。

假定半地下双层浅圆仓选址与地下仓地址条件一样。通过参考地下仓的实际施工过程，根据半地下双层浅圆仓在施工阶段的进度，选取半地下双层浅圆仓建造过程中地下土层回填前后来进行分析。



图6 半地下双层浅圆仓有限元模型

Fig.6 Semi-underground double-storey squat silo finite element model

3.1 回填前

半地下双层浅圆仓施工完毕后，首层土体处于未回填状态，仓壁周围由挡土墙支撑，在环梁上砌水泥砖防水墙，墙内进行注水闭水试验后将水抽去，仓体处于一直降水状态，水位线降到仓底及环梁以下，最后浇筑压实混凝土。

3.1.1 抗浮验算

由于半地下双层浅圆仓仓体最深处低于地下水位，所以在基坑开挖前要进行降水工程。此时半地下双层浅圆仓仓体重力远大于地下水浮力（仓体不会浮起）。经抗浮验算发现半地下双层浅圆仓全仓总重大于地下水浮力，差值 27 000 kN，也为对仓底的基底反力。

3.1.2 边界条件

由于半地下双层浅圆仓首层位于地下，参考地下仓未回填施工时的情况。对与未回填土层施工期半地下双层浅圆仓首层的仓底处设置竖向约束，避免因重力及上部传递的荷载导致竖向位移，同时在抗浮板表面设置位移转角约束来限制各方向的转动。

3.1.3 有限元模拟及分析

回填前半地下双层浅圆仓的受力为：①全仓自重及机械荷载；②二层风荷载；③首层仓底受到 58.47 kN/m² 的水土复合作用。由于此时未回填土层，仓壁受力较为简单故分析仓底各项位移、应力及应变云图见图 7~11。

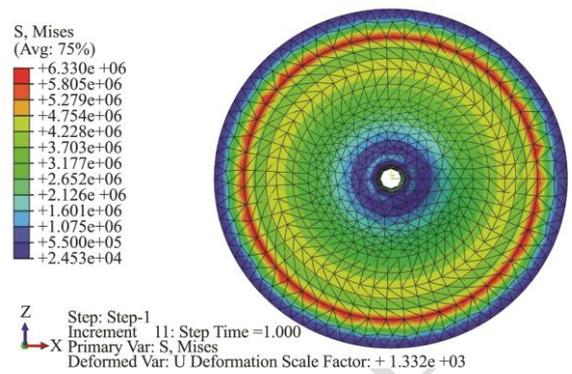


图7 回填前仓底应力云图

Fig.7 Stress at the bottom of silo before backfilling

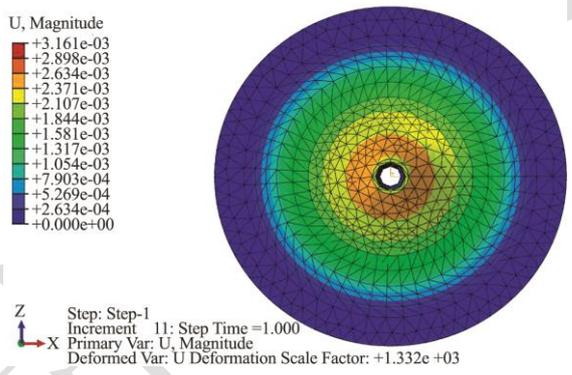


图8 回填前仓底位移云图

Fig.8 Silo bottom displacement before backfilling

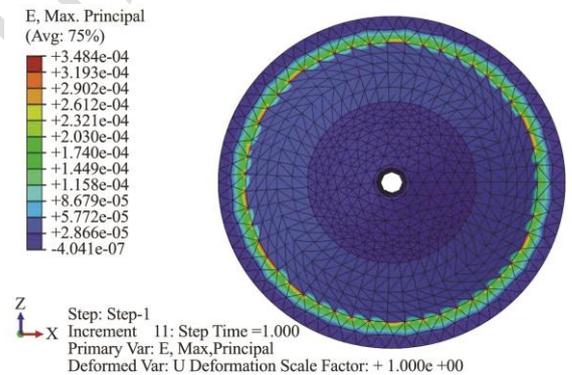


图9 回填前仓底应变云图

Fig.9 Strain of silo bottom before backfilling

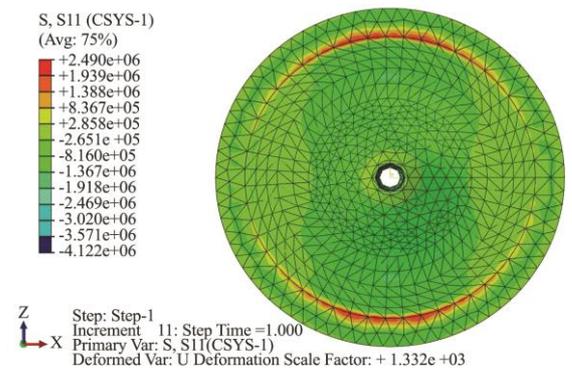


图10 回填前仓底径向应力云图

Fig.10 Radial stress at the bottom of silo before backfilling

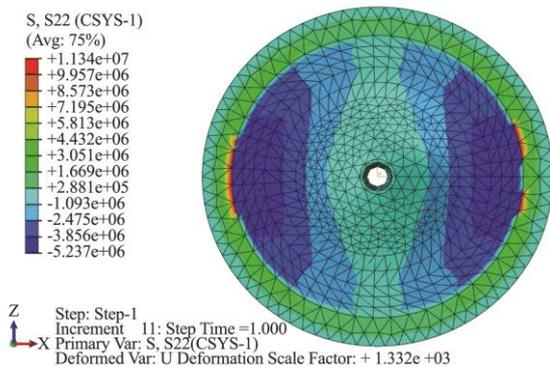


图 11 回填前仓底环向应力云图

Fig.11 Circumferential stress at silo bottom before backfilling

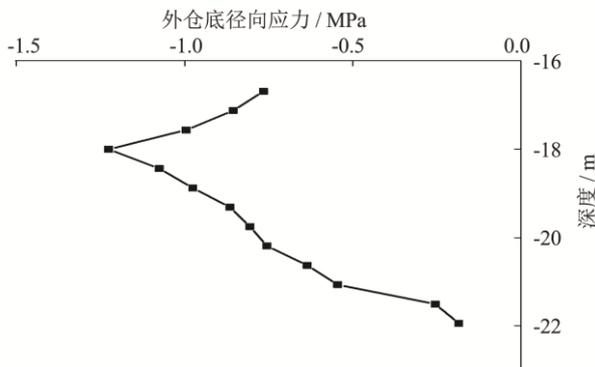


图 12 回填前仓底径向应力随深度变化图

Fig.12 Radial stress at the bottom of silo varies with depth before backfilling

将有限元模拟结果提取输出数据并整理，得到了半地下双层浅圆仓在回填前仓底径向应力和环向应力随深度变化如图 12、13。

分析仓底径向应力和环向应力随深度的变化可以得到：半地下双层浅圆仓在回填前仓底径向应力和环向应力都为负即为压应力，径向应力随深度表现为先

表 2 半地下双层浅圆仓抗浮计算

Table 2 Semi-underground double-storey squat silo anti-float calculation

半地下双层浅圆仓全仓体部件	计算	重力/kN
主梁	$25 \times 11 \times 0.4 \times 1.3 \times 8$	1 144
次梁	$25 \times 6.4 \times 0.25 \times 0.6 \times 16$	384
内环梁	$25 \times 3.14 \times (6.125^2 - 5.875^2) \times 0.6$	141
外环梁	$25 \times 3.14 \times (9.425^2 - 9.175^2) \times 0.7$	255
首层仓壁	$25 \times 3.14 \times (12.8^2 - 12.5^2) \times 15.92$	9 485
首层仓底	$25 \times 3.14 \times (12.5^2 - 1.25^2) \times 0.8 \times 1.035$	10 054
中间层	$25 \times 3.14 \times (12.5^2 - 1.25^2) \times 0.3$	178
二层仓壁	$25 \times 3.14 \times (12.8^2 - 12.5^2) \times 18$	10 724
二层仓顶	$25 \times 3.14 \times (12.5^2 - 1.25^2) \times 0.3$	3 642
中心支撑筒	$25 \times 3.14 \times (1.5^2 - 1.25^2) \times 42.06$	2 269
抗浮板	$25 \times 3.14 \times (14.8^2 - 12.8^2) \times 1.2$	5 199
全仓总重		43 475
地下水浮力	$9.8 \times 3.14 \times (4.7 \times 12.8^2 + 14.8^2 \times 1.2 + 12.8^2 \times 0.26/3)$	32 221
差值		11 254

增大后减小，在 1/3 处取得极值；环向应力随深度表现为先增大后减小再增大，在 1/3 处取得极小值，在 2/3 处取得极大值。由于仓底与仓壁为刚接且该位置刚度较大，导致了外仓底径向应力和环向应力线随深度增加而增大，随后随着深度的增加外仓底径向应力和环向应力又减小这与越往深处底部浮力越大使仓底支反力反而减小有关；回填前半地下双层浅圆仓位移及应变很小可忽略不计算。

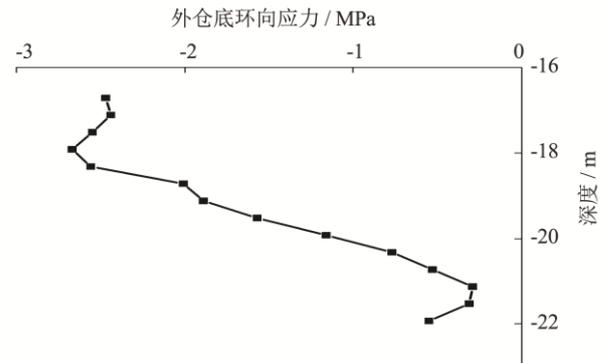


图 13 回填前仓底环向应力随深度变化图

Fig.13 Circumferential stress at the bottom of silo varies with depth before backfilling

3.2 回填后

半地下双层浅圆仓整体施工完毕，进行地下外墙防水验算及回填，分层回填土层至原地面并压实，在连接处做混凝土面层硬化后半地下双层浅圆仓基本建筑完毕。

3.2.1 抗浮验算

抗浮验算计算半地下双层浅圆仓仓底受力状态见表 2。

通过抗浮验算可得出半地下双层浅圆仓全仓总重大于于地下水浮力（仓体不会浮起），其差值为112 544 kN 也为对仓底的基底反力，经计算将基底反力简化为 15.98 kN/m² 的均布荷载。

3.2.2 边界条件

由于半地下双层浅圆仓首层位于地下，参考地下仓回填后施工情况，土体回填后半地下双层浅圆仓仓底与抗浮板处和未回填边界条件相同。回填后半地下双层浅圆仓首层完全位于地下且被周围土体包围，在水平方向能达到相对平衡。但由于水土复合压力可能导致下层仓产生小位移变形，故对下层设置限制三个方向的转动、可以发生三个方向位移的边界条件。

3.2.3 有限元模拟及分析

回填后半地下双层浅圆仓的受力为：①全仓自重及机械荷载；②二层风荷载；③首层仓底受到水压力的合力作用；④仓壁受力依据实测数据通过线性拟合加载。土层回填后仓壁受力较复杂，针对仓壁展开分析，根据有限元模拟得到半地下双层浅圆仓仓壁各项位移、应力及应变云图见图 14~18。

将有限元模拟结果提取输出数据并整理，得到了半地下双层浅圆仓在回填后仓壁径向应力和环向应力随深度变化如图 19。

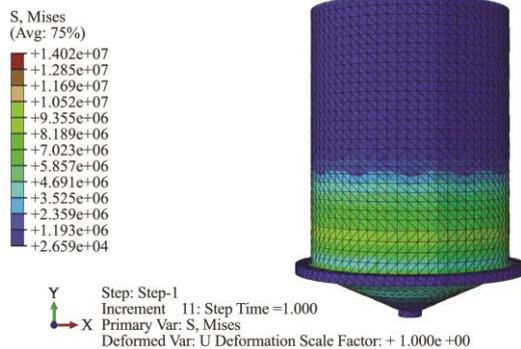


图 14 回填后仓壁应力云图

Fig.14 Silo wall stress after backfilling

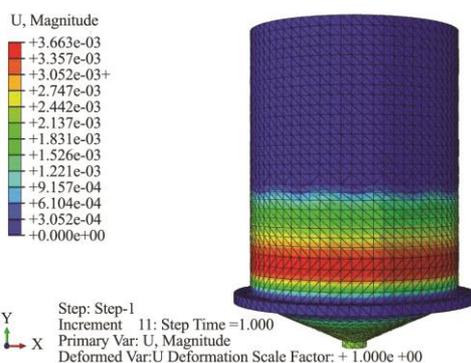


图 15 回填后仓壁位移云图

Fig.15 Silo wall displacement after backfilling

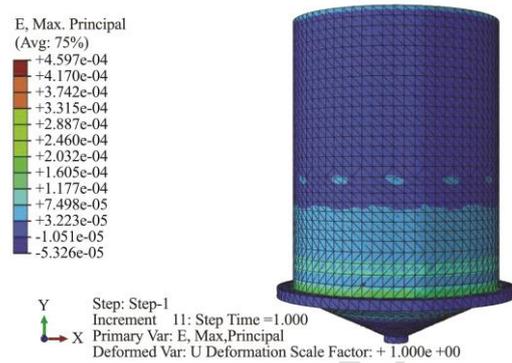


图 16 回填后仓壁应变云图

Fig.16 Silo wall strain after backfilling

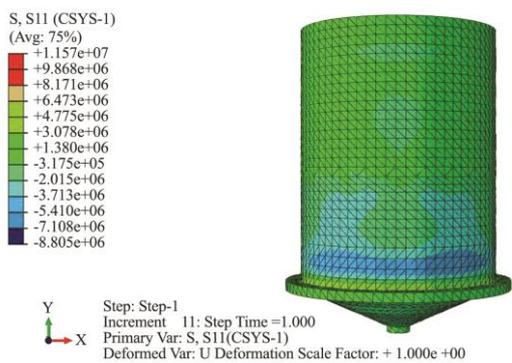


图 17 回填后仓壁径向应力云图

Fig.17 Radial stress of silo wall after backfilling

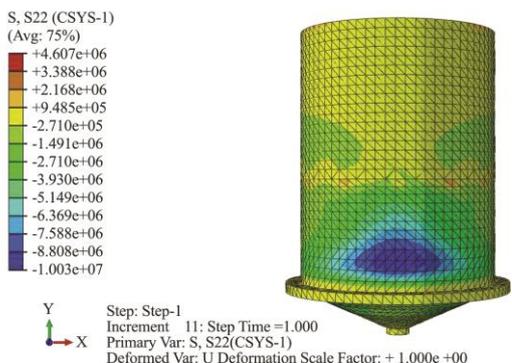


图 18 回填后仓壁环向应力云图

Fig.18 Circumferential stress of silo wall after backfilling

分析回填后时外仓壁径向应力和环向应力随深度的变化可以得到：半地下双层浅圆仓在回填后时地下层受力明显比上层复杂，径向应力在仓壁与仓顶连接处为正即为拉应力，随后往下 3 m 左右后转变为压应力，在地平面（0 m）处与中间层环梁连接处往下至地下 3 m 处再次转化为拉应力，在地下部分大部分为压应力，在仓壁最下端与抗浮板连接处再次转换为拉应力；拉应力的反复转化主要与结构本身有关，发生在结构连接处，径向应力在地下仓壁 2/3 处附近达到最大压应力，最后在仓壁最深度达到最大拉应力。环向应力在与二层仓壁上很小且变动不大，以拉应力为主在接近地平面处又转为压应力，在首层处仓壁环向应力随深度逐渐增大随后

又逐渐减小,在 2/3 处达到最大压应力。

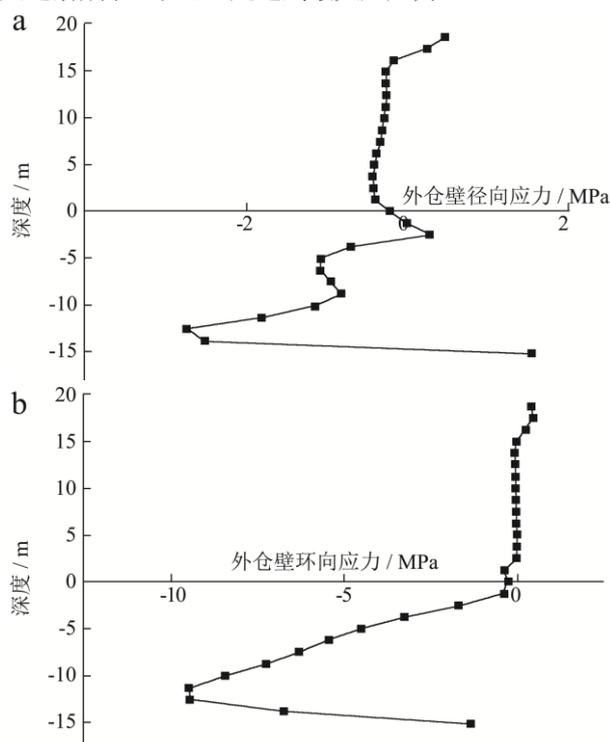


图 19 回填后仓壁径向应力(a)和环向应力(b)随深度变化图

Fig.19 Radial stress (a) and circumferential stress (b) of silo wall varies with depth after backfilling

3.3 半地下双层浅圆仓回填前后对比分析

根据半地下双层浅圆仓首层从回填前到回填后这一过程可以得到:回填后位移及应变均较回填前有增大,回填后仓壁受压显著增大,挤压土体使首层仓壁土压力变大,由于压实的过程可能使压实后的土体重度大于原天然土层土体,从而使得仓壁侧压力变大。由于回填前各应力明显小于回填后且实际施工过程中回填后也更为复杂,通过分析可以得到,首层深度-12 m 左右应力最大,即为仓壁受力薄弱处。

4 结论

本文根据地下仓现场试验数据与地下仓有限元模型进行对比分析,并对拟选址的半地下双层浅圆仓施工过程中土层回填前后进行力学分析。

通过分析对比地下仓模拟结果与工程实验结果,二者吻合性较好,验证了模型的正确性和数值仿真方法的可行性。分别对半地下双层浅圆仓施工过程中回填前后仓底和仓壁的力学性能进行数值分析,结果表明,仓底在回填前距锥底 2/3 处径向、环向应力达到峰值;首层仓壁在回填后距锥底 1/3 处径向、环向应力达到峰值。研究可为半地下双层浅圆仓工程设计与安全施工提供理论指导。

参考文献

- [1] 汪海鹏,刘洋,金梅,等.浅圆仓安全储粮研究现状与发展趋势[J].粮食储藏,2008,37(6):27-31.
- [2] 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.
- [3] Martinez M A, Alfaro I, Doblare M. Simulation of axisymmetric discharging in metallic silos. Analysis of the induced pressure distribution and comparison with different standards [J]. Engineering Structures, 2002, 24(12): 1561-1574.
- [4] Huang H R, Wang J W, Dong R R. Academic study on wall pressure of grain silo with shallow circle shape [J]. Journal of Environmental Protection and Ecology, 2019, 20(1): 285-291.
- [5] Goodey R J, Brown C J. The influence of the base boundary condition in modelling filling of a metal silo [J]. Computers & Structures, 2004, 82(7-8): 567-579.
- [6] Yang S C, Hsiao S S. The simulation and experimental study of granular materials discharged from a silo with the placement of inserts [J]. Powder Technology, 2001, 120(3): 244-255.
- [7] Liu Y Y, Zhang D L, Dai B B, et al. Experimental study on vertical stress distribute-on underneath granular silos [J]. Powder Technology, 2021, 381: 601-610.
- [8] 原方,邵兴,王录民,等.一种新的浅圆仓散料侧压力计算方法[J].工程力学,2004,3:96-100.
- [9] 陈长冰,梁醒培,杨伯源,等.大型平底浅圆仓贮料侧压力计算方法[J].农业机械学报,2007,5:200-203.
- [10] 王振清,侯支龙,揣君,等.装配式地下粮仓钢板-混凝土组合仓壁整体结构力学性能分析[J].河南工业大学学报(自然科学版),2021,42(3):100-107.
- [11] 王振清,侯支龙,张庆章,等.装配式地下粮仓钢板-混凝土组合仓壁轴压受力性能分析[J].农业工程学报,2021,37(1):59-67.
- [12] 金立兵,梁新亚,霍承鼎,等.地下混凝土筒仓仓壁力学性能工程试验与数值分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(3):40-45.
- [13] 金立兵,胡颖,祁继鹏,等.基于遗传算法的地下钢筋混凝土筒仓仓壁的结构优化[J].河南工业大学学报(自然科学版),2017,38(3):99-102,122.
- [14] 聂建国,王宇航.ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J].工程力学,2013,30(4):59-67,82.
- [15] 付明堂.地下仓结构变形与应力分析[D].郑州:河南工业大学,2011.
- [16] 霍承鼎.基于遗传算法的地下混凝土筒仓结构优化设计[D].郑州:河南工业大学,2019.
- [17] 熊晓莉,金立兵,王振清,等.钢筋混凝土地下粮仓仓壁土压力取值方法及仓壁结构受力分析[J].应用基础与工程科学学报,2016,24(1):103-114.