

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.173

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 地下混凝土筒仓仓壁力学性能工程试验与数值分析

金立兵, 梁新亚, 霍承鼎, 王振清, 王珍

(河南工业大学 土木建筑学院, 郑州 450001)

**摘要:**地下粮仓可充分利用地下空间, 具有较好的防火、防毒、防爆等性能, 并能利用浅层地能实现准低温储粮, 具有节能、低损、保证粮食品质的优点, 对保障粮食安全及可持续发展意义重大。采用工程足尺试验与数值分析相结合的研究方法, 对大型地下混凝土筒仓竣工验收前仓壁的力学性能进行研究, 通过对比试验结果与数值模拟结果, 验证数值分析方法的合理性与有效性, 进而对仓壁在最不利荷载工况下的力学性能进行数值分析。结果表明: 地下混凝土筒仓仓壁内力的数值模拟结果与试验结果吻合较好; 由于仓壁较厚且与仓底和仓顶间接触部位刚度较大, 导致仓壁内外侧径向应力表现出相反的变化规律; 仓壁径向应力在仓壁底部位置处最高, 环向应力在距仓壁顶部约 2/3 位置处最高; 在最不利荷载工况下, 仓壁径向应力和环向应力随深度表现出与实际工况下相似的变化规律, 且相同深度下应力较大。

**关键词:**地下筒仓; 足尺试验; 数值分析; 仓壁; 力学性能

**中图分类号:** TU926      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2020)03-0040-06

## Engineering test and numerical analysis of underground concrete silo

Jin Libing, Liang Xinya, Huo Chengding, Wang Zhenqing, Wang Zhen

(School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, P. R. China)

**Abstract:** The underground silos can take full advantages of the underground space, which is of better fireproof, anti-toxicity, explosion-proof and other merits. In the meantime, the underground silos can use the shallow geothermal energy to realize quasi-low temperature storage. With the advantages of energy-saving, low-consumption and grain quality-ensuring, it plays a significant role in ensuring the grain safety and sustainable development of China. The mechanical properties of the silo wall before completion acceptance of large underground concrete silos were studied by the combination of engineering full-scale test and numerical analysis. By comparing the test results with the engineering-scale testing results, the rationality and effectiveness of the numerical analysis method were verified. Furthermore, the mechanical properties of the silo wall under the most unfavorable load conditions were numerically analyzed. The results show that the internal forces of the numerical simulation results of the silo wall were in good agreement with that of experimental results. Due to the relatively large thickness of the silo wall, and the

**收稿日期:** 2019-07-19

**基金项目:** 国家自然科学基金(51509084); 粮食公益性行业科研专项(201413007-01)

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

**Received:** 2019-07-19

**Foundation items:** National Nature Science Foundation of China (No. 51509084); Special Scientific Research Projects in Food Public Welfare Industry (No. 201413007-01)

**Author brief:** Jin Libing (1976-), associate professor, PhD, main research interests: basic theory and long-term performance of concrete structure and new storage structure, E-mail: jinlb@haut.edu.cn.

rigidity of the contact part between the silo wall and the silo bottom and the silo roof, the radial stress on the inside and outside of the silo wall shows the opposite law. The radial stress of the silo wall is highest at the bottom of the silo wall, and the hoop stress is highest at about 2/3 of the position from the top of the silo wall. Under the most unfavorable load conditions, the radial stress and hoop stress of the silo wall show similar changes with the burial depth as in the actual working condition, and the stress is greater at the same depth.

**Keywords:** underground silo; full scale test; numerical analysis; silo wall; mechanical properties

粮食安全是关系国民经济发展、社会稳定和国家自立的全局性重大战略问题。地下粮仓可以利用浅层地能实现粮食准低温储藏,具有保证粮食品质、节地、节能、无污染、全寿命周期成本低等突出优点<sup>[1-2]</sup>。中国从仰韶文化的原始社会就已经开始应用地下粮仓(窖)进行粮食储存,在汉、隋、唐、明、清等朝代也均有地下仓窖的遗迹被发现<sup>[3]</sup>。至今,中国多数的省(直辖市、自治区)都建有地下粮仓。但是,已建成的地下粮仓存在仓容较小、机械化程度较低、交通不便、建设受地域限制等缺点,不便于日常生产管理<sup>[4]</sup>。

其他国家对于地下空间的开发多用于储备石油、天然气等战略物资以及解决城区不断扩张、人口不断增加所造成的土地使用竞争激烈的问题<sup>[5-8]</sup>。同时,对地下工程用高强度混凝土材料、既有地下工程耐久性性能评估与维护改造等方面进行了大量的研究<sup>[9-12]</sup>。中国对地下粮仓的研究主要集中在新仓型的探究、仓壁的受力性能分析与结构优化以及维护结构传热规律等方面<sup>[13-17]</sup>。研究多通过模型试验与

数值分析完成,结果缺少相应工程足尺试验以及其他理论方法和实践经验支持。由于数值分析结果受人为因素影响较大,故取得结果的有效性有待验证。

笔者基于工程足尺试验,采用试验研究与数值分析相结合的方法,对地下大型混凝土筒仓在竣工验收前仓壁的受力情况进行分析研究,从而提出一种能有效分析地下混凝土筒仓受力的数值分析模型。

## 1 工程试验

### 1.1 工程概况

试验仓位于河南省郑州市中牟县万三路与万洪路交叉口的金地集团粮食物流园区内。工程场地的地质情况如表 1 所示。结构选用强度等级为 C40 的自防水混凝土,抗渗等级为 P12,仓底部选用 C20 的素混凝土垫层,仓壁厚度为 300 mm。钢筋选用 HRB400E 级钢筋。仓体外径 25.6 m,仓底深 19.56 m,仓容 3 500 t,仓顶覆土深度 1.5 m,所处场地的地下水类型为潜水,历史最高水位-1.0 m<sup>[18]</sup>。

表 1 地质情况表

Table 1 Statement of geology

层号	岩土名称	平均厚度 $t_s/m$	累计深度 $z/m$	含水率 $\omega/\%$	比重 $G_s$	重度 $\gamma/$ $(kN \cdot m^{-3})$	干重度 $\gamma_d/$ $(kN \cdot m^{-3})$	孔隙 比 $e$	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$
1	粉砂	1.23	1.23	21.40	2.67	20.00	17.50	0.540	18.00
2	粉质黏土	1.76	2.99	22.60	2.71	20.40	16.10	0.835	12.00
3	粉土	1.85	4.84	22.10	2.70	20.80	16.70	0.682	18.00
4	粉砂	5.56	10.40	21.40	2.69	20.00	18.10	0.540	22.00
5	粉土	1.30	11.70	24.40	2.70	21.30	16.90	0.688	25.00
6	粉砂	6.58	18.28	21.40	2.67	20.00	17.10	0.540	22.00

### 1.2 仓壁内力检测

1.2.1 测点布置 在试验仓仓壁内部钢筋上沿深度方向每隔 2 m 位置对称安装钢筋计,用于测量壁

内钢筋的径向应力和环向应力;在仓壁外部沿深度方向每隔 2 m 位置安装压力计,用于测量仓壁所受到的来自外部的水土复合压力。钢筋计和压力计分

布如图1所示。

1.2.2 试验数据采集及结果 试验选用基康仪器股份有限公司和金土木工程仪器股份有限公司生产的钢筋计和压力计,型号、量程以及精度见表2。

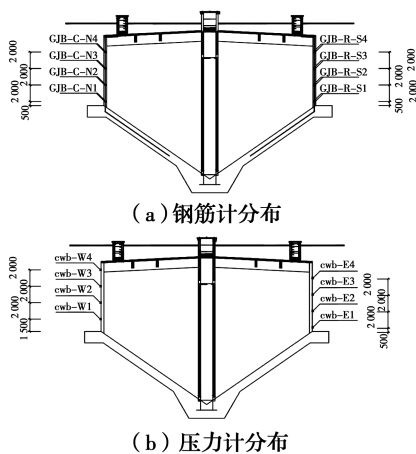


图1 钢筋计和压力计分布

Fig. 1 Distribution of rebar meter and pressure gauge

表2 钢筋计和压力计相关参数

Table 2 Rebar meter and pressure gauge related parameters

型号	量程	精度
BGK4911-18 (钢筋计)	10~50 kN	0.15 kN
BGK4911-14 (钢筋计)	6~30 kN	0.10 kN
JTM-V1000H (钢筋计)	-32~48 kN	0.20 kN
BGK4800-350kPa (压力计)	0~350 kPa	1 kPa

在试验仓竣工验收前,通过配套的读数仪对仓壁钢筋所受应力进行采集。根据钢筋与混凝土共同工作,从而换算出仓壁内、外侧所受径向以及环向应力,换算结果如图2所示。

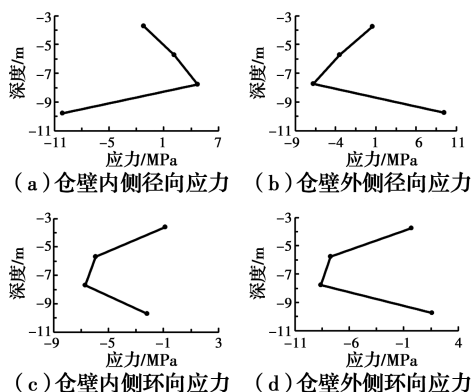


图2 仓壁的径向应力和环向应力

Fig. 2 Radial stress and hoop stress on the silo wall

通过仓壁上安装的压力计对仓壁所受侧压力进行检测,受力情况如图3所示,图中 $\sigma_e$ 、 $\sigma_e'$ 为两次对

仓壁侧压力进行检测的结果。

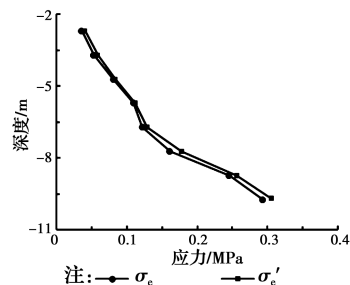


图3 仓壁实测侧压力

Fig. 3 Silo wall measured lateral pressure

## 2 基于实际工况的仓壁数值分析

### 2.1 模型建立与边界条件

利用有限元软件 ABAQUS 对地下混凝土筒仓结构建模,由于仓壁的厚高比远小于 1/10,符合壳单元的构造要求。所以,模型的仓顶盖、仓壁、仓底、仓内核心支撑筒均选用 S4R 壳单元建模,仓顶群梁选用梁单元建模。由于仓体的施工采用滑模形式,因此,建立模型时将仓底与仓壁之间、仓壁与仓顶盖之间、仓顶盖与中间支撑筒之间、仓底与中间支撑筒之间均设置为刚接。并对地下混凝土筒仓抗浮悬臂部位设置  $z$  向约束,模型如图4所示。

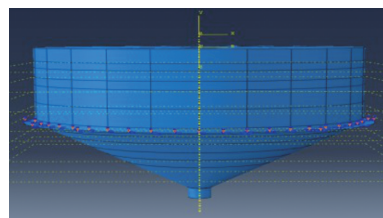


图4 地下仓模型

Fig. 4 Underground silo model

### 2.2 参数选择与施加荷载

混凝土强度等级 C40,密度取 2 400 kg/m<sup>3</sup>,根据《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2015),轴心抗压强度设计值取 19.1 N/mm<sup>2</sup>,混凝土抗拉强度设计值取 1.71 N/mm<sup>2</sup>,钢筋混凝土弹性模量取 3.25×10<sup>4</sup> N/mm<sup>2</sup>,泊松比取 0.2。

根据现场测试结果显示的地下水位约位于 -5.88 m,因此,造成了以地下水位为分界点,仓壁所受侧压力随深度变化曲线的斜率发生较大变化。为方便对地下仓模型施加荷载,取深度为 -5.76 m 设置的测点为分界点,对仓壁压力计实测侧压力的

数据分两段进行线性拟合,拟合公式为

$$\sigma = \begin{cases} -23.73z - 24.19 & 5.76 \leq z \leq -2.76 \\ -48.5z - 166.86 & -10.26 \leq z \leq -5.76 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $z$ 为仓壁上某点至回填土表面的高度,m; $\sigma$ 为不同高度对应的仓壁侧压力,kPa。

### 2.3 结果对比分析

通过有限元软件模拟计算得到仓壁的内力云图,结果如图5所示。提取仓壁沿 $z$ 向对应钢筋计位置的环向和径向应力与试验数据进行对比分析,结果如图6所示。

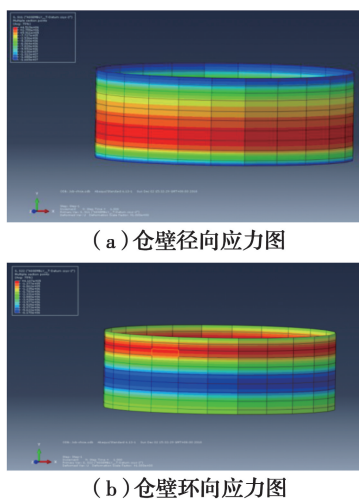


图5 仓壁应力云图

Fig. 5 Stress map of medial silo wall

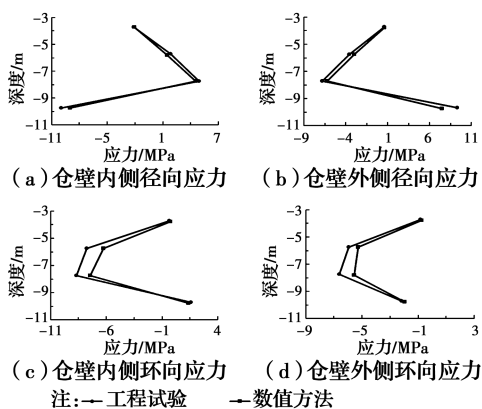


图6 模拟与试验结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation and test results

采用拟合侧压力作为荷载进行仓壁内力计算,由于拟合压力值与实测值在 $-7.760$  m测点处偏差相对其他测点较大,因此,该位置处的环向应力实测值与计算值存在相对较大的偏差,其余3个测点的实测值与理论值都吻合较好,验证了模型的有效性。

根据仓体结构和受力形式,仓底与仓壁、仓壁与仓顶接触部位可视为刚接,同时,在这两个连接部位设有环梁,刚度较大。而且仓壁厚度相对较大,造成仓壁径向应力呈现出外侧与内侧规律相反的情况;而环向则由于不受弯矩影响或影响较小,两侧的环向应力总体呈现出变化规律基本一致的状态。

通过分析得到,径向应力在仓壁外侧的顶部位置最先表现为压应力,随着深度的增加,压应力逐渐减小,约在距仓壁顶部 $1/6$ 位置处转变为拉应力,并在距仓壁顶部 $2/3$ 处拉应力达到最大,后随深度增加,再次转变为压应力,且随深度增加而增大;径向应力在仓壁内侧顶部至底部所显现的规律与外侧呈相反规律。径向应力在仓壁底部位置最高。

环向应力在仓壁外侧的顶部位置最先表现为较小的压应力,随着深度的增加,压应力逐渐变大,大约在距仓顶 $2/3$ 位置处,压应力达到最大,后随深度增大持续减小;环向应力在仓壁内侧顶部至底部应力变化规律同外侧基本一致,不同点为仓壁内侧的顶部以及底部应力表现为拉应力。环向应力在距仓顶 $2/3$ 位置最高。

## 3 最不利荷载工况下仓壁数值分析

### 3.1 施加荷载

以未装粮的试验仓在场地地下水达到历史最高水位下所受到水土复合压力作为最不利荷载工况<sup>[19]</sup>。在此荷载工况下对仓壁内力进行研究。根据地质情况,对仓壁所受到水土复合压力进行计算。根据仓壁侧压力取值的相关研究,静止土压力与主动土压力大小相差不大,而被动土压力与二者相差较大<sup>[11]</sup>。因此,对静止土压力和被动土压力进行计算,其中, $\sigma_1$ 为静止土压力, $\sigma_2$ 为被动土压力,如图7所示。

经比较,为了充分保证结构的安全性、可靠性,模拟时以被动土压力作为仓壁所受最不利荷载。为方便施加荷载,对计算出的被动土压力 $\sigma_2$ 分3段进行线性拟合,拟合公式为

$$\sigma = \begin{cases} -23.98z + 22.51 & -2.99 \leq z \leq -1.5 \\ -28.9z + 7.81 & -4.84 \leq z \leq -2.99 \\ -34.75z - 20.52 & -10.26 \leq z \leq -4.84 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $z$ 为仓壁上某点至回填土表面的高度,m; $\sigma$ 为不同高度对应的仓壁侧压力,kPa。

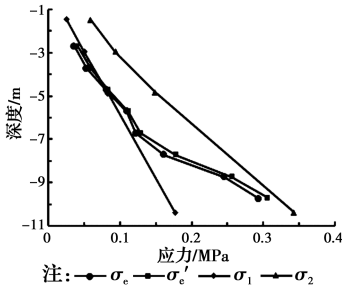
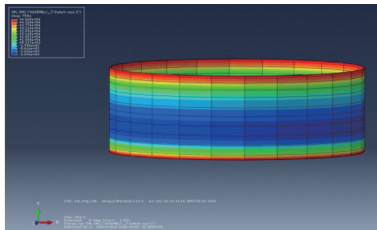


图7 不同侧压力对比

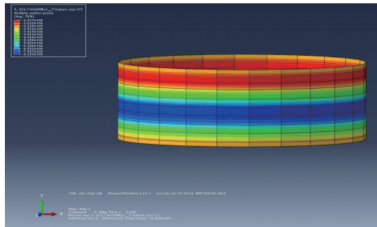
Fig. 7 Different lateral pressure comparison

### 3.2 模拟结果

通过有限元模拟得到工况二仓壁的内力云图如图8所示。仓壁沿 $z$ 向对应钢筋计位置的环向应力与径向应力结果如图9所示。



(a) 仓壁径向应力图



(b) 仓壁环向应力图

图8 仓壁应力云图

Fig. 8 Stress map of medial silo wall

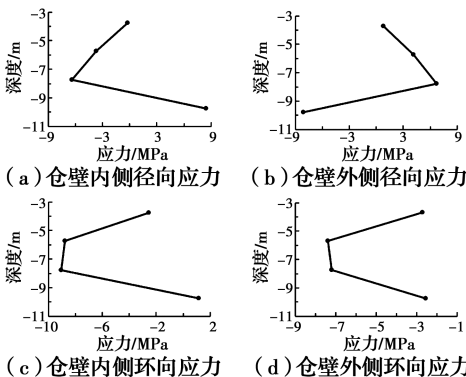


图9 仓壁所受到的径向应力以及环向应力

Fig. 9 Radial stress and hoop stress on the silo wall

载工况下,仓壁径向应力和环向应力随深度表现出与实际工况下基本一致的变化规律,且相同深度下应力较大。仓壁径向应力最大值在仓壁底部位置,环向应力最大位置在距仓壁顶部约2/3处。

## 4 结论

通过工程足尺试验与数值分析结合的方法对地下混凝土筒仓竣工验收前仓壁力学性能进行研究,并对最不利荷载工况下仓壁的受力进行数值分析,得到以下结论:

1)通过分析对比模拟结果与工程试验结果,二者能够较好吻合,验证了所建立模型的合理性。

2)分别对不同工况下仓壁的力学性能进行数值分析,结果表明,仓壁的径向应力在仓壁底部位置最高,环向应力在距仓壁顶部约2/3位置处最高。

3)考虑到大型地下混凝土筒仓在施工以及使用过程中容易受到各施工、运输机械等荷载作用造成地面超载,从而对地下粮仓结构安全性能造成不利影响,建议在设计时采用被动土压力作为设计用土压力。

### 参考文献:

- [1] 郑培,王振清,余汉华.我国地下仓的简史及特点[J].粮油加工,2009(1):90-94.  
ZHENG P, WANG Z Q, YU H H. Brief history and characteristics of underground granaries in China[J]. Cereals and Oils Processing, 2009(1): 90-94. (in Chinese)
- [2] PEI Y B, FENG Y. The underground grain storage environment regionalization [J]. Advanced Materials Research, 2013, 807/808/809: 2043-2047.
- [3] 陈桂香,岳龙飞,王振清,等.钢筋混凝土地下粮仓准静态温度场数值模拟[J].中国粮油学报,2014,29(3):79-83.  
CHEN G X, YUE L F, WANG Z Q, et al. Quasistatic temperature field simulation of reinforced concrete underground warehouse grain [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(3): 79-83. (in Chinese)
- [4] 余汉华,王录民,王振清,等.我国地下粮仓应用的现状及前瞻[J].河南工业大学学报(自然科学版),2008,29(6):79-81.  
YU H H, WANG L M, WANG Z Q, et al. Present condition and outlook for underground silos [J].

通过分析数值模拟结果可以看出,在最不利荷

- Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2008, 29(6): 79-81. (in Chinese)
- [5] ZEYGOLIS I, MAVRIKOS A, KALIAMPAKOS D. Construction, storage capacity and economics of an underground warehousing - logistics center in Athens, Greece [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(2): 165-173.
- [6] GENTILE R J. Geology and utilization of underground space in metropolitan Kansas City area, USA [J]. Environmental Geology, 1997, 29(1/2): 11-16.
- [7] DELMASTRO C, LAVAGNO E, SCHRANZ L. Energy and underground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 55: 96-102.
- [8] YU KULIKOVA E. Defects of urban underground structure and their prediction [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 451(1): 012108.
- [9] MIN K H, JUNG H C, YANG J M, et al. Shrinkage characteristics of high-strength concrete for large underground space structures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 25(2): 108-113.
- [10] WINKLER B, HOFSTETTER G, LEHAR H. Application of a constitutive model for concrete to the analysis of a precast segmental tunnel lining [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2004, 28(78): 797-819.
- [11] CURIEL-ESPARZA J, CANTO-PERELLO J, CALVO M A. Establishing sustainable strategies in urban underground engineering [J]. Science and Engineering Ethics, 2004, 10(3): 523-530.
- [12] GHAFARI N. Corrosion control in underground concrete structures using double waterproofing shield system (DWS) [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(4): 603-611.
- [13] 郑培, 刘银来, 王振清. 我国地下粮仓新仓型初探及其有限元分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2009, 30(3): 91-94.
- ZHENG P, LIU Y L, WANG Z Q. Brief introduction and finite element analysis of new underground warehouse in China [J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2009, 30(3): 91-94. (in Chinese)
- [14] 王海涛, 李向前. 基于 Galerkin 法的地下粮仓围护结构传热特性数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 241-248.
- WANG H T, LI X Q. Numerical simulation of heat transfer characteristics of building envelopes of underground warehouse based on element-free Galerkin method [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(12): 241-248. (in Chinese)
- [15] 贾腾南, 王振清, 丁永刚. 施工阶段钢筋砼地下粮食筒仓仓壁受力分析[J]. 河南科学, 2014, 32(2): 216-219.
- JIA T N, WANG Z Q, DING Y G. Wall stress analysis of reinforced concrete underground grain silos in construction stage [J]. Henan Science, 2014, 32(2): 216-219. (in Chinese)
- [16] 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): 95-99.
- XIONG X L, JIN L B, SHI X K, et al. Study on wall bearing capacity calculation method of reinforced concrete underground granary [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(1): 95-99. (in Chinese)
- [17] 熊晓莉, 金立兵, 王振清. 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.
- XIONG X L, JIN L B, WANG Z Q. Earth pressure and bearing capacity analysis on the wall of reinforced concrete underground granary [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(1): 103-114. (in Chinese)
- [18] 金立兵, 胡颖, 祁继鹏. 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.
- JIN L B, HU Y, QI J P. Structural optimization of underground reinforced concrete silo wall based on genetic algorithm [J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2017, 38(3): 99-102, 122. (in Chinese)
- [19] 涂成顺. 地下大直径钢筋混凝土筒仓仓壁结构分析及比较[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011.
- TU C S. Wall structure analysis and comparison for large-diameter reinforced concrete underground silo [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011. (in Chinese)