

基于 FEM 的足尺落地式浅圆钢筒仓 静态贮料作用分析

段留省^{1, 2}, 陈向荣^{1, 2}

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘 要:准确计算贮料对仓壁的作用,是大直径浅圆钢筒仓安全设计的前提。为此,采用有限单元法(FEM)对足尺落地式浅圆钢筒仓的静态贮料作用进行了数值模拟分析,包括小麦、铁矿石散粒、石英砂和水泥散料,其本构关系服从 Drucker-Prager 屈服非关联流动准则。采用 3-D 模型同时模拟了贮料和筒仓,建立考虑变形的面-面接触对,以更好地反映贮料对仓壁的静态作用。将 FEM 模拟值与国内外筒仓规范的计算结果进行了对比分析,并讨论了贮料力学参数的影响,表明 FEM 可作为一种准确、可靠的钢筒仓静态贮料作用计算工具。

关键词:钢筒仓;落地式;静态侧压力;贮料;接触;FEM

中图分类号:TU22

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2012)01-0055-05

筒仓作为一种散料贮存构筑物,常见于农业、化工、冶金等诸多领域。近年来,钢板筒仓的数量和容量都随着散料贮存的需求不断增长。大直径落地式浅圆钢筒仓因用钢量少、建造简易而应用广泛。此类旋转薄壳结构设计中有两个亟待解决的问题:一是确定贮料的力学特性,并以此为基础计算出其对筒仓侧壁的静态、动态作用;二是基于侧壁的应力状态——竖向摩擦力和水平压力下的强度和稳定性设计^[1]。

目前,关于贮料对侧壁作用的分析方法主要有试验分析、理论计算和数值模拟。试验分析耗费很大,存在尺缩效应,结果离散,且不具有代表性;理论计算碍于贮料自身力学性能的复杂性而难以得出科学实用的计算公式;数值模拟包括离散单元法(DEM)和有限单元法(FEM),其中 FEM 以计算资源需求低,能较合理准确地反映贮料的主要力学特性及其与仓壁的相互作用而成为一种常用分析手段,为本文所用。

许多学者采用 FEM 对筒仓贮料与侧壁的相互作用进行了研究,关于锥底仓的较为集中,包括对不同贮料力学参数下筒仓的动静力荷载分析^[2],中心、偏心卸料时仓壁压力的变化情况^[3-5],漏斗偏心对圆形筒仓(刚性仓壁)整体流卸料的影响^[6],偏心漏斗圆形钢筒仓在不同支撑条件下仓壁压力的分布^[7];关于落地式筒仓的相对较少,主要有激励作用下筒仓的响应^[8],平底深仓卸料动压力的研究^[9],静态贮料作用下圆形钢筒仓的应力状态分析^[10]。

为研究大直径浅圆钢筒仓的静态贮料作用,在已有研究成果的基础上,对一系列不同贮料的筒仓进行了非线性有限元分析,贮料包括小麦、铁矿石散粒、石英砂和水泥散料。通过数值模拟结果与现行钢筒仓设计规范贮料荷载计算值的对比分析,找到一种准确计算静态作用的方法,为此类筒仓的设计提供荷载计算依据,亦有利于研究筒仓的屈曲和破坏。

1 工程背景及分析方法

根据实际工程背景,选取一落地式浅圆钢筒仓作为 FEM 模型,筒仓高 $H=30$ m,直径 $D=28$ m,仓

收稿日期:2011-05-24 修改稿日期:2011-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878182)

作者简介:段留省(1985-),男,河南周口人,博士生,主要从事钢结构稳定、抗震与新型钢结构体系的研究。

壁沿高度厚度均为 20 mm. 仓壁采用 Q235B 级钢, 为简化分析未计入加劲肋, 该筒仓的高径比 (H/D) = 1.07, 根据欧洲钢筒仓设计规范 (EN1991-4)^[11] 规定为半深仓, 根据我国粮食钢板筒仓 (GB50322-2001)^[12] 为浅仓. 筒仓的几何尺寸、所受荷载及约束情况详见图 1.

在静态贮料作用下仓壁的侧压力及竖向摩擦力可由规范计算和有限元模拟两种方法确定, 前者计算公式如下:

欧洲钢筒仓设计规范 (EN1991-4) 装料后任意深度水平压力 p_{hf}

$$p_{hf} = p_{ho} Y_R \quad (1)$$

其中 $p_{ho} = \gamma K z_0$, γ 为重度特征值, K 为侧压力系数特征值, z_0 为 Janssen 深度特征值, Y_R 为浅仓压力深度变化函数.

仓壁竖向摩擦力的计算公式

$$p_{wf} = \mu p_{hf} \quad (2)$$

其中, μ 为贮料与仓壁摩擦系数特征值.

根据工程条件和求解问题的特点, 采用有限元软件 ANSYS 建立 3-D 有限元模型, 同时模拟贮料与钢筒仓壁. 通过建立考虑变形效应的面-面接触对表征贮料与仓壁之间的相互作用, 经接触分析计算, 可得贮料对仓壁的侧向压力和竖向摩擦力.

2 FEM 模型

2.1 参数选取与网格划分

FEM 模型中, 钢筒仓壁采用壳单元 Shell63 模拟, 映射划分网格. 材料为理想弹塑性模型^[13], 各向同性, 具体参数见表 1.

表 1 钢筒仓 FEM 模型参数

Tab. 1 Parameters of steel silo in FEM models

Element type	Steel grade	Modulus of elasticity E/MPa	Poisson's ratio	Density $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Yield stress $/\text{MPa}$	Tangent modulus E_s/MPa
壳单元	Q235B	206 000	0.30	7 850	235	0.01E

贮料采用实体单元 Solid45 模拟, 扫略划分网格, 材料本构关系采用 Drucker-Prager 塑性模型, 包含粘聚力、内摩擦角和剪胀角三个参数. 值得注意的是, 实际工程当中贮料的力学性能参数随环境不同而有所变化, 设计时应以实测为准. 本文依照欧洲钢筒仓设计规范 (EN1991-4) 及相关文献, 给出了各贮料参数, 见表 2.

表 2 各贮料 FEM 模型参数

Tab. 2 Parameters of stored materials in FEM models

Stored materials	Young's modulus $/\text{MPa}$	Poisson's ratio	Density $/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Angle of repose $/^\circ$	Cohesion $/\text{kPa}$	Internal friction angle $/^\circ$	Dilation angle $/^\circ$	Friction coefficient
小麦 ^[14]	5.1	0.30	840	25	3.00	25	17.6	0.20
铁矿石 ^[15]	10.0	0.40	2300	36	0.25	31	0.0	0.49
石英砂 ^[16]	4.0	0.32	1619	39	0.10	36	0.0	0.45
水泥 ^[17]	0.008	0.33	1500	36	0.50	33	0.0	0.40

2.2 接触设置及约束

FEM 模型中同时模拟了贮料与钢筒仓, 采用计入贮料与仓壁的摩擦力并考虑变形效应的面-面接触对——TARGE170 和 CONTA173, 以更真实合理地反映贮料对仓壁的静态作用. FEM 分析过程中, 借助接触对向导建立接触可以减少出错率, 设置接触刚度时不宜过大以免收敛困难. 为提高计算效率同

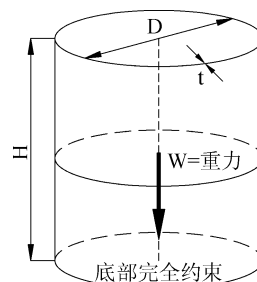


图 1 筒仓尺寸及约束情况

Fig. 1 Geometric, load and constrain in the silo

时保证结果的精度,采用六面体单元划分实体部分,并使壳单元和实体单元的网格尺寸保持一致,在应力变化剧烈区域适当加密网格,见图 2。筒仓底部节点自由度完全约束,重力作为唯一外荷载,重力加速度取 9.8 m/s^2 。采用考虑大变形的静态分析,为减少收敛难度,可关闭自适应下降(Adaptive descent)选项。

3 结果与分析

3.1 计算结果对比

各贮料与钢筒仓壁相互作用的 FEM 模拟值和规范计算结果见图 3~6。钢筒仓壁的上部静态侧向压力的 FEM 模拟值与我国粮食钢筒仓设计规范计算结果在基本吻合;中下部较为接近;底部相差较大,主要是由于 FEM 模型在底部采用了完全约束,与实际工程情况有差别,而且规范计算时候未考虑底部边界约束效应的影响。

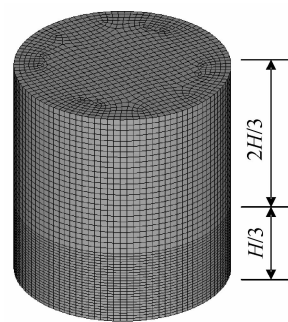


图 2 FEM 模型网格划分示意

Fig. 2 D finite element model (representation)

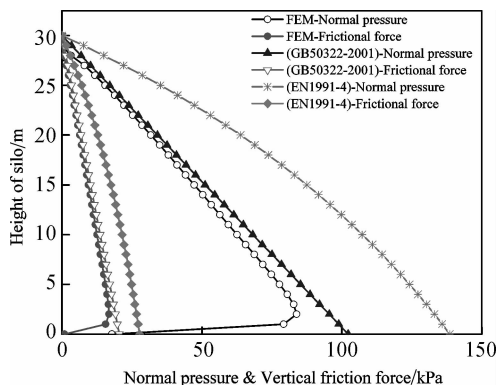


图 3 小麦-钢筒仓计算结果对比

Fig. 3 FEM vs. Codes(Wheat in steel silo)

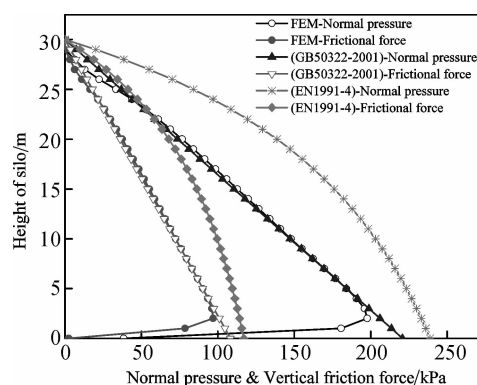


图 4 铁矿石颗粒-钢筒仓计算结果对比

Fig. 4 FEM vs. Codes(Iron ore pellet in steel silo)

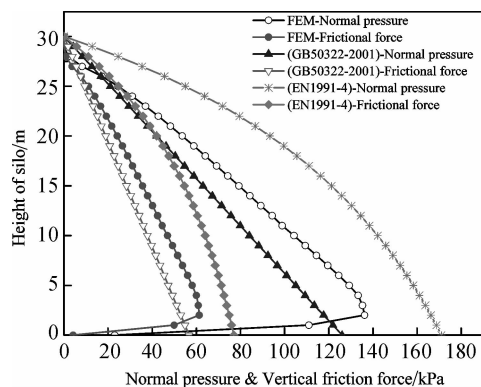


图 5 石英砂-钢筒仓计算结果对比

Fig. 5 FEM vs. Codes(Sand in steel silo)

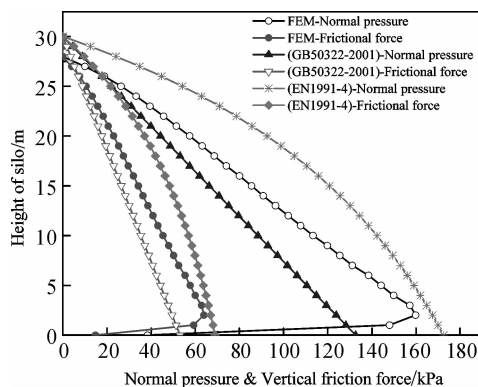


图 6 水泥散料-钢筒仓计算结果对比

Fig. 6 FEM vs. Codes(Cement in steel silo)

3.2 结果分析

各贮料 FEM 模拟值和规范计算结果的差异情况见表 3,其原因在于两本规范的计算理论:前者对于浅仓采用 Rankine 主动土压力计算公式, $K = \tan^2(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2})$;后者采用修正的 Janssen 公式, $K = 1.1(1 - \sin\phi)$ 。二者均未考虑剪胀角和泊松比的影响,未按贮料参数差异分类考虑(如杨氏模量小而内摩擦角大的水泥散料与其它贮料宜区别对待),但欧洲规范仍能包络各侧压力曲线,故此类贮料的筒仓设计时

宜参照欧洲钢筒仓设计规范.

表3 各贮料 FEM 模拟值和规范计算结果的差异情况

Tab.3 Divergence of different evaluation methods for stored materials

贮料名称	FEM 侧向压力 /Max, kPa	中国规范侧向 压力/kPa	欧洲规范侧向 压力/kPa	FEM 与中国 规范差值比/%	FEM 与欧洲 规范差值比/%
小麦	83.84	95.46	133.04	13.86	58.68
铁矿石散粒	197.72	206.14	233.07	4.26	17.88
石英砂散粒	136.26	117.69	166.32	-13.63	22.06
水泥散料	159.86	123.82	167.48	-22.55	4.77

3.3 贮料参数分析

对于内摩擦角小的贮料,其 FEM 模拟值与我国规范符合的较好,而欧洲规范则过于保守;但对于杨氏模量小、内摩擦角大的贮料(水泥散料),FEM 模拟值(下部仓壁)与欧洲规范较接近,而我国规范计算结果偏小.

各贮料的力学参数对仓壁侧压力的影响分析如下:

1) 杨氏模量:此参数影响贮料的压缩性,贮料变形后将直接作用于仓壁,产生接触压力.各贮料中水泥散料的杨氏模量最小,其它参数与石英砂的相近,但二者的侧压力相差不大.说明其不是影响仓壁侧压力的主要因素.

2) 密度:静态侧压力与贮料密度成正比.在 FEM 模型中,唯一外力作用来自重力加速度,贮料密度增大时其所受重力也变大.当弹性模量保持不变时,竖向压缩而横向膨胀,挤压与其接触的钢筒仓壁,接触压力必然变大.这与现行理论计算结果也一致.

3) 内摩擦角:此参数变大时,仓壁侧压力有所减小.内摩擦角是 Drucker-Prager 模型的关键参数,影响贮料的塑性变形,其值越大,本构模型的屈服面也越大,散料的塑性变形就越小,则接触压力自然变小.

4) 贮料与仓壁摩擦系数:FEM 中接触摩擦力由触压力乘以摩擦系数得出,规范计算公式亦如此.其值越大,仓壁竖向摩擦力就越大,二者随深度成比例变化.

5) 剪胀角,FEM 分析中发现,此参数变化时,仓壁静态侧压力无明显变化.故在静态贮料作用分析时,可将此参数值设为零.

4 结 论

通过对一系列大直径落地式浅圆钢筒仓的 FEM 分析,并与欧洲钢筒仓规范和我国钢筒仓规范进行了对比分析.认为 FEM 能反映贮料与仓壁的相互作用状况,包括接触状态、滑移距离、摩擦等,能够较为准确地计算贮料对仓壁的静态作用.

建议规范按贮料材性分类给出相应计算公式,对于杨氏模量小、内摩擦角大的贮料,在钢筒仓设计时宜参考欧洲钢筒仓设计规范(EN1991-4)的计算结果.FEM 可作为钢筒仓静态贮料作用的计算分析工具.

参考文献 References

- [1] 宋昌永. 平底圆形钢筒仓稳定性设计——储料荷载[J]. 空间结构, 2003, 9(3): 55-60.
SONG Chang-yong. Stability design of flat-bottom circular steel silos—silo loading[J]. Spatial Structures, 2003, 9(3): 55-60.
- [2] AYUGA F, GUAITA M, AGUADO P. Static and dynamic silo loads using finite element models[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001(78): 299-308.
- [3] AYUGA F, GUAITA M, AGUADO P J, et al. Discharge and the eccentricity of the hopper influence on the silo wall pressures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001(127): 1067-1074.
- [4] GUAITA M, COUTO A, Ayuga F. Numerical simulation of wall pressure during discharge of granular material from cylindrical silos with eccentric hoppers[J]. Biosystems Engineering, 2003(85): 101-109.
- [5] MARTMNEZ M A, ALFARO I, DOBLARI M. Simulation of axisymmetric discharging in metallic silos[J]. Engineering Structures, 2002(24): 1561-1574.

- [6] VIDAL P, COUTO A, AYUGA F, et al. Influence of hopper eccentricity on discharge of cylindrical mass flow silos with rigid walls[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2006(132):1026-1033.
- [7] VIDAL P, GALLEGO E, GUAITA M, et al. Finite element analysis under different boundary conditions of the filling of cylindrical steel silos having an eccentric hopper[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64:480-492.
- [8] HOLLER S, MESKOURIS K. Granular material silos under dynamic excitation; numerical simulation and experimental validation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006(132):1573-1579.
- [9] VIDAL P, GUAITA M, AYUGA F. Analysis of dynamic discharge pressures in cylindrical slender silos with a flat bottom or with a hopper; comparison with eurocode 1[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 91:335-348.
- [10] JUAN A, MORAN J M, GUERA M I, et al. Establishing stress state of cylindrical metal silos using finite element method; Comparison with ENV 1993[J]. *Thin-Walled Structures*, 2006, 44:1192-1200.
- [11] EN1991-4. European Committee for Standardization Eurocode1-Actions on structures-Part 4:Silos and tanks[J]. London: British Standard Institute, 2006.
- [12] 中华人民共和国建设部, GB50322—2001 粮食钢板筒仓设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2001.
Ministry of constreution of P. R. China, GB50322—2001 code for designing steel silos[S]. Beijing:China Planning Press, 2001.
- [13] 苏明周, 喻 岩. 结构钢单向拉伸时的非线性应力应变曲线[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 1999, 31(1):25-28.
SU Ming-zhou, YU Yan. Nonlinear tensile stress-strain curves of structural steel [J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.*, Natural Science Edition, 1999, 31(1):25-28.
- [14] MOYA F A, GUAITA M, AGUADO P. Mechanical properties of granular agricultural materials [J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(5):1569-1577.
- [15] CHEN J F, YU S K, OOI J Y, et al. Finite-element modeling of filling pressures in a full-scale silo[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2001(127):1058-1066.
- [16] GOODEY R J, BROWN C J, ROTTER J M. Verification of a 3-dimensional model for filling pressures in square thin-walled silos[J]. *Engineering Structures*, 2003(25):1773-1783.
- [17] 杨代恒. 钢筒仓设计研究及散料压力的数值模拟[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
YANG Dai-heng. Design reseach of steel silo and numerical simulation of bulk material pressure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.

FEM analysis of static action exerted by stored materials in a full scale squat cylindrical steel silo with flat bottom

DUAN Liu-sheng^{1, 2}, CHEN Xiang-rong^{1, 2}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: Silos design is based on accurated evaluating static action exerted by stored materials. In order to analyse the interaction between silo and stored materials in full scale squat circular steel silo with flat bottom, the finite element method (FEM) was chosen. Four kinds of stored materials are analyzed, including wheat, iron ore pellets, sand and cement. The stored materials and silo were simulated simultaneously in three-dimensional model, assigned to the Drucker-Prager criterion of plasticity of the stored materials. For evaluating the static action reasonably, the contact pairs named surface-to-surface are selected. The results obtained from FEM were compared with ones from silo codes at home and abroad, meanwhile the influences of different parameters were also discussed. It was certified that FEM is an appropriate tool for evaluating the static action exerted by stored materials in squat circular steel silos.

Key words: steel silo; flat-bottom; static pressure; stored material; contact; FEM