

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.01.025

李坤由, 杨志军, 潘樊. 一种新型行列布置立筒仓的结构力学设计要点[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(1): 196-202.

LI K Y, YANG Z J, PAN F. Key concepts of structural mechanics design for a new type of vertical silo arranged in rows and columns[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(1): 196-202.

一种新型行列布置立筒仓的结构力学设计要点

李坤由, 杨志军, 潘 樊✉

(郑州中粮科研设计院有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 立筒仓以容量大、占地面积小、力学性能好等优势成为大仓容储粮的首选, 但仓群中星仓积粮和容积小的问题一直以来没有得到很好解决。基于 midas Gen2019 软件, 针对某港区综合码头工程项目立筒仓进行拉大排仓的间距, 以短墙连接排仓形成了一种新型筒仓布置方式, 通过对 7 种粮食荷载工况的整体有限元模拟分析, 获得了短墙及相邻仓壁的内力分布规律, 找出了设计控制工况, 为该布置形式的筒仓设计应用提供了参考。

关键词: 立筒仓; 星仓; 短墙; 有限元分析; 配筋计算

中图分类号: TU375.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2022)01-0196-07

Key Concepts of Structural Mechanics Design for a New Type of Vertical Silo Arranged in Rows and Columns

LI Kun-you, YANG Zhi-jun, PAN Fan✉

(COFCO Engineering & Technology (Zhengzhou) Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Vertical silos have become the first choice for large silos to store grain due to their large capacity and small footprint. However, the problem of grain accumulation and small volume in star silos has not been well resolved. Based on the midas Gen2019 software, this paper expands the capacity of the silos for a comprehensive terminal project in a port area, and connects the silos with short walls to form a new silo layout. Through the overall finite element simulation analysis of 7 kinds of grain load conditions, the internal force distribution law of the short wall and the adjacent warehouse wall is studied. and the design control conditions are found, which provides a reference for the silo design of similar type of layout.

Key words: group silos; star silos; short wall; finite element analysis; reinforcement calculation

近年来, 立筒仓仓群以其力学性能优异、占地面积较少、存储模式多样化等优势成为粮食、化工、煤炭等行业大型仓储建设的首选^[1]。随着

设计、施工技术不断更新, 对筒仓的研究也越来越深入, 涉及筒仓仓壁的压力研究^[2-4], 施工形式优化^[5-6], 工艺设施优化^[7-8]等, 筒仓之间形成的星仓也成为扩大仓容的存储空间。但由于立筒仓的常见平面布置方式为多排行列式或斜交式, 它们的缺点是星仓仓容较小且因内夹角小而易积粮, 而目前对于星仓的研究多集中于对仓壁荷载^[9-11]的

收稿日期: 2021-09-17

作者简介: 李坤由, 男, 1975 年出生, 高级工程师, 研究方向为建筑工程专业。E-mail: 1259806098@qq.com.

通讯作者: 潘樊, 女, 1996 年出生, 在读研究生, 研究方向为土木工程专业。E-mail: 1343691745@qq.com.

研究。为改善星仓使用性能,拉大了排仓间距,形成一种新型筒仓排列方式,将排仓采用短墙相连,这样既增加星仓仓容,同时也增大星仓内夹角,从而改善了星仓的出粮功能。由于排仓之间通过短墙相连,因此造成短墙及相邻筒仓仓壁受力复杂,成为结构设计的薄弱点和难点。

鉴于该筒仓的布置方式比较新颖,暂无相关设计案例,为了对该布置形式筒仓受力有一个较为全面的了解,本文主要以短墙及相邻筒仓仓壁作为研究重点,采用 midas Gen2019 进行模拟。通过分析短墙及相邻筒仓仓壁的内力分布规律和配筋结果,找出了设计控制工况,为该类布置形式的筒仓设计提供了参考。

1 工程概况

某港区综合码头工程项目立筒仓子项,仓群组合为 2×5 排列,排仓间距为 2.0 m ,排仓之间相连的短墙厚 300 mm 。圆仓外径为 13.50 m ,仓壁厚 250 mm 。筒仓锥斗顶标高 8.70 m ,星仓底板标高 10.20 m ,檐口标高 36.5 m 。圆仓单仓仓容约 $2\,800\text{ t}$,星仓单仓仓容 $1\,000\text{ t}$,总仓容 3.4 万 t 。这个主要跟货种,货量和船型有关系。像这种内河码头,一般船型在 $1\,000 \sim 3\,000\text{ t}$ 左右,筒仓大小 $3\,000\text{ t}$,如果不拉开,星仓也就是 750 t 左右,拉开之后,星仓仓容可以做到 $1\,000\text{ t}$,正好一个小船可以装满,增加仓的利用率。图1和图2给出了仓群的平面布置形式,图3给出了仓群的剖面。

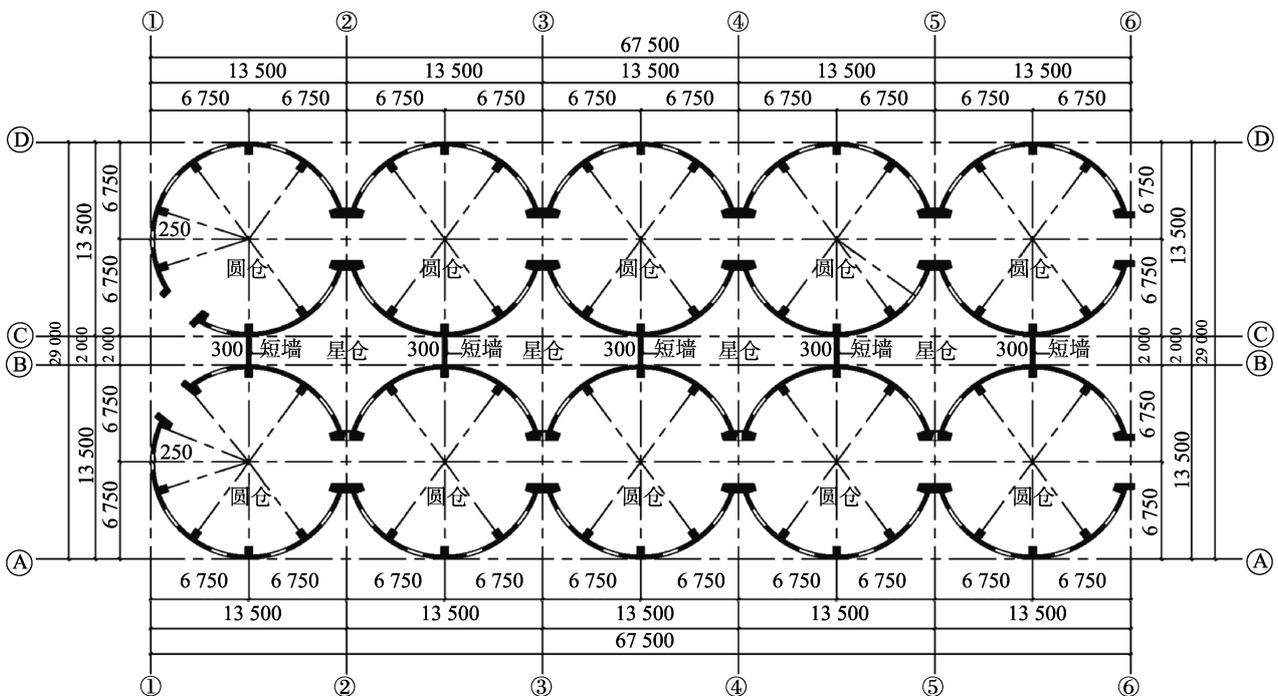


图1 筒下层结构布置图

Fig.1 Layout of the bottom structure of the silos

2 荷载计算及工况组合

2.1 设计基本条件

根据 GB 50011—2010《结构设计抗震规范》^[12]及 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[13]确定相关参数:

(1) 基本风压: 0.30 kN/m^2 (50年一遇), 地面粗糙度类别为 B 类。

(2) 基本雪压: 0.40 kN/m^2 (50年一遇)。

(3) 仓顶活荷载标准值: 4 kN/m^2 。

(4) 粮食容重: 8.00 kN/m^3 , 内摩擦角: 25° , 粮食对仓壁的摩擦系数: 0.4 。

(5) 抗震设防烈度 6 度, 地震分组: 第一组, 场地类别: II 类。

2.2 粮食荷载计算

根据 GB 50077—2017《钢筋混凝土筒仓设计标准》^[14]规定, 深仓贮料顶面、贮料顶部锥形体重心以下, 距离 s (m) 处的水平截面上, 贮料作用于仓壁单位面积上的水平压力 P_h (KPa)、作用在仓

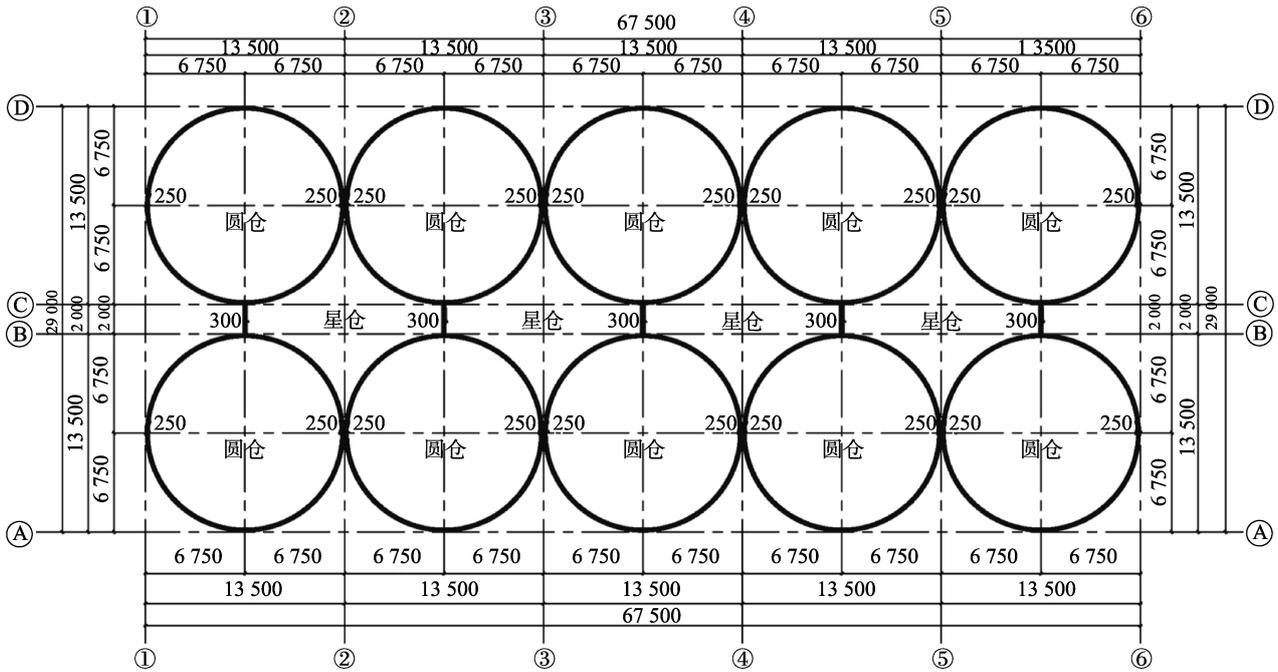


图 2 筒上层结构布置图

Fig.2 Layout of the top structure of the silos

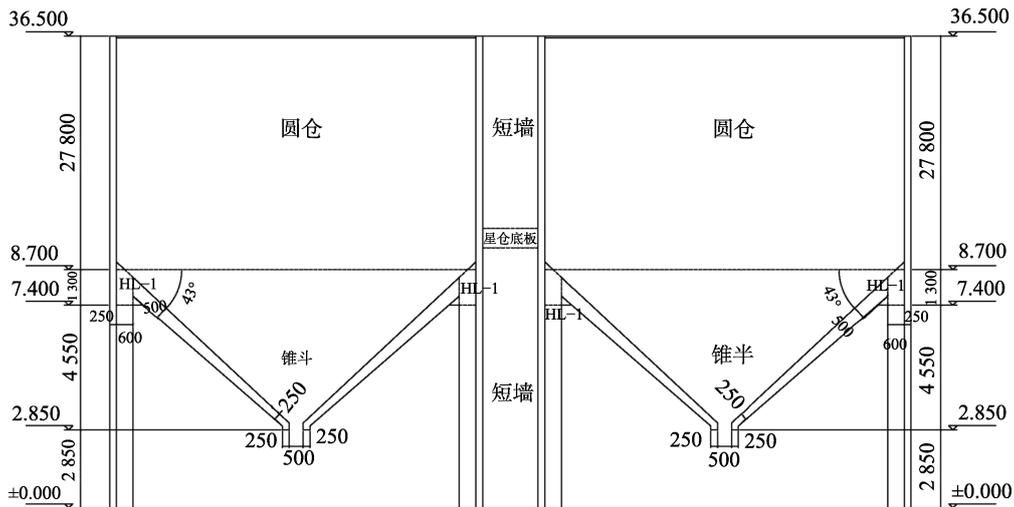


图 3 筒仓剖面图

Fig.3 Sectional view of the silos

底或漏斗顶面处单位面积上的竖向压力 P_v (KPa) 和仓壁单位长度竖向摩擦力 P_f (KN/m) 分别为:

$$P_h = C_h \cdot \gamma \cdot \rho (1 - e^{-\frac{\mu \cdot k \cdot s_i}{\rho}}) / \mu \quad (1)$$

$$P_v = C_v \cdot \gamma \cdot \rho (1 - e^{-\frac{\mu \cdot k \cdot h_n}{\rho}}) / \mu \cdot k \quad (2)$$

$$P_f = \rho [\gamma \cdot s - \gamma \cdot \rho (1 - e^{-\frac{\mu \cdot k \cdot s}{\rho}}) / \mu \cdot k] \quad (3)$$

式中: C_h —深仓贮料水平压力修正系数; C_v —深仓贮料竖向压力修正系数; γ —贮料的重力密度 (kN/m^3); ρ —筒仓水平净截面的水力半径; s —贮料顶面或贮料锥体重心至计算截面的距离

(m); μ —贮料对仓壁的摩擦系数; k —侧压力系数; φ —贮料的内摩擦角 ($^\circ$); h_n —贮料计算高度 (m)。

现将星仓、立筒仓的仓壁分为 9 个计算区段, 表 1 和表 2 分别列出了星仓、立筒仓距装粮面不同深度 s (m) 处的 P_h 、 P_v 和 P_f 。

2.3 工况组合

2.3.1 粮食荷载工况

在进行粮食荷载受力分析时, 主要分析以下 7 种工况。图 4 粮食荷载加载示意图中阴影部分表示满仓, 其余部分表示空仓。

表 1 星仓仓壁计算

Table 1 Calculation of star warehouse wall

区段编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S/m	2.55	5.73	8.60	11.47	14.33	17.20	20.07	22.93	25.8
$P_h/(N/m^2)$	7 485	14 936	20 200	24 388	27 719	30 369	32 477	34 154	35 488
$P_v/(N/m^2)$	18 446	36 805	49 777	60 096	68 304	74 834	80 028	84 160	87 447
$P_f/(N/m)$	3 944	18 429	38 690	64 346	94 294	127 656	163 735	201 974	241 932

表 2 立筒仓仓壁计算

Table 2 Calculation of vertical silo wall

区段编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S/m	2.47	5.56	8.33	11.11	13.89	16.67	19.44	22.22	25.00
$P_h/(N/m^2)$	10 753	28 876	48 687	60 905	71 541	80 798	88 856	95 871	101 976
$P_v/(N/m^2)$	24 159	50 454	70 892	88 682	104 168	117 647	129 381	139 594	148 484
$P_f/(N/m)$	3 801	18 309	39 436	67 183	100 691	139 215	182 104	228 794	278 791

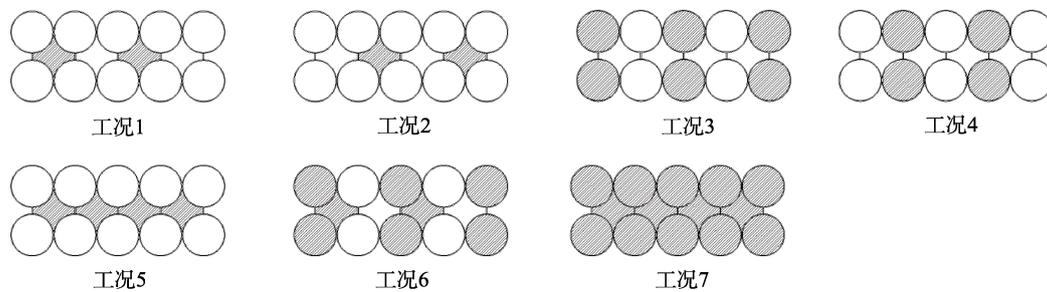


图 4 粮食荷载加载示意图

Fig.4 Schematic diagram of grain load loading

2.3.2 荷载组合

将以上 7 种粮食荷载工况与恒载、仓顶活载、雪载、风载、地震作用按照规范要求进行了荷载组合，共得到 67 种基本组合，67 种标准组合。荷载分项系数和荷载组合值系数采用 GB50077—2017《钢筋混凝土筒仓设计标准》^[14]中规定的数值。

3 有限元模拟计算

3.1 计算模型

本项目采用 midas Gen2019 软件进行有限元模拟计算。仓壁、锥斗、短墙、扶壁柱、仓顶板以及筏板基础均采用软件中的板单元来模拟其受力状态，软件中的板单元具有真实的面内面外刚度；环梁与仓顶混凝土梁则可以采用梁单元进行模拟；圆仓之间的连接部分采用节点刚性连接来模拟连接部分的刚体属性，其参数符合 GB50010—2010《混凝土结构设计规范》^[15]取值。图 5 给出了整个模型的 1/4 轴测图。

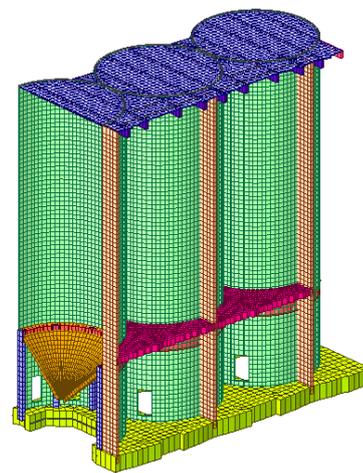


图 5 1/4 模型轴测图

Fig.5 Axonometric drawing of 1/4 model

3.2 计算结果

3.2.1 短墙受力控制工况

通过对比上述 7 种工况下短墙的轴力和弯矩，发现短墙内力在工况 1 或者工况 2 作用下达到最大值。也就是说当星仓满仓，相邻星仓空仓时，短墙内力达到最大。比如最左侧的短墙内力

最大控制组合是 1.2 恒+1.3 工况 1+1.4 活-0.84X 向风荷载。

3.2.2 短墙受力分析

通过分析发现, 5 片短墙内力分布规律一致, 现以 1 片短墙为例进行分析。星仓底板下的短墙主要以受压为主, 所以接下来主要分析星仓底板以上短墙。

星仓底板以上短墙底部标高为 10.2 m, 短墙顶部标高为 36.5 m, 短墙高为 26.3 m。图 6 给出了短墙水平方向弯矩云图。可以看出, 在同一标高处, 短墙弯矩边缘大中间小, 呈现马鞍形。在竖向上, 短墙弯矩呈现中间大两边小的抛物线规律。短墙弯矩最大值在短墙中部靠下墙体边缘附近, 弯矩为 163.2 kN·m/m。

图 7 给出了短墙水平方向轴力云图。可以看

出, 短墙轴力在墙体底部附近达到最大值, 轴向拉力为 157.0 kN/m。然后往上轴力迅速变小, 在竖向上超过 2 m 后大小基本不变。

通过上述分析, 可以得到短墙受力特点为: 短墙同时受拉力与弯矩共同作用, 但是拉力与弯矩不是同时达到最大值。在短墙中部, 弯矩最大, 拉力较小; 在距短墙底 2 米左右拉力最大, 轴力较小。

图 7 给出了短墙弯矩最大截面处 (21.2 m 标高) 仓壁弯矩图。可以看出, 星仓满仓时, 在粮食水平荷载作用下, 星仓的筒仓仓壁内存在较大弯矩。同时筒仓仓壁向筒仓中心的变形使得与之连接的短墙在星仓内侧受拉, 在星仓外侧受压。

3.2.2.1 短墙配筋、裂缝情况 图 8 给出了短墙水平方向单侧配筋量云图。可以看出, 短墙水平方向配筋量变化规律与图 6 短墙水平弯矩变化规律一致。短墙配筋量在短墙中部边缘处最大, 达到 1 346 mm²/m。

图 9 给出了短墙裂缝宽度云图, 根据图 8 配

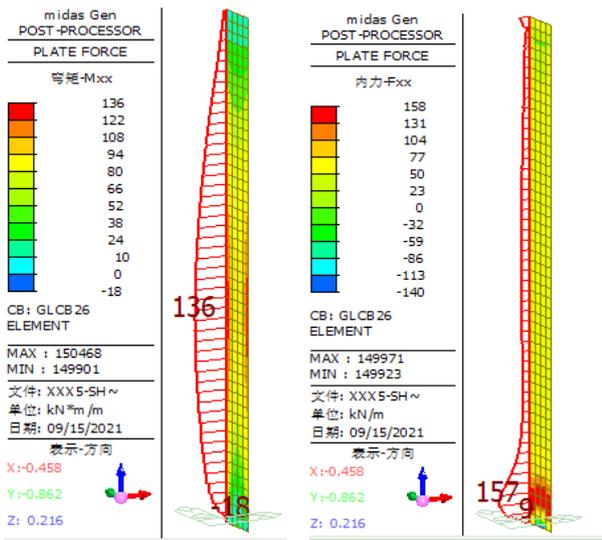


图 6 短墙水平方向弯矩、轴力云图

Fig.6 Cloud diagram of bending moment and axial force of short wall in horizontal direction

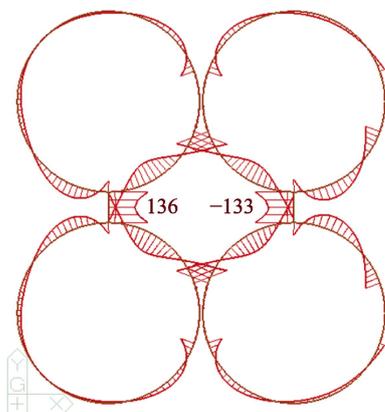


图 7 21.2 m 标高墙体水平弯矩图

Fig.7 Horizontal bending moment diagram of the wall with an elevation of 21.2 m

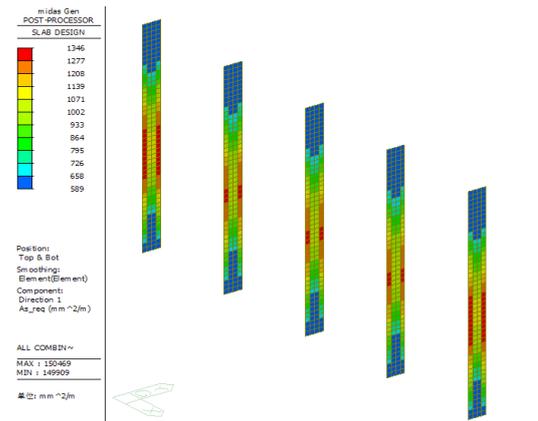


图 8 短墙单侧配筋量云图

Fig.8 Cloud diagram of single-sided reinforcement of short wall

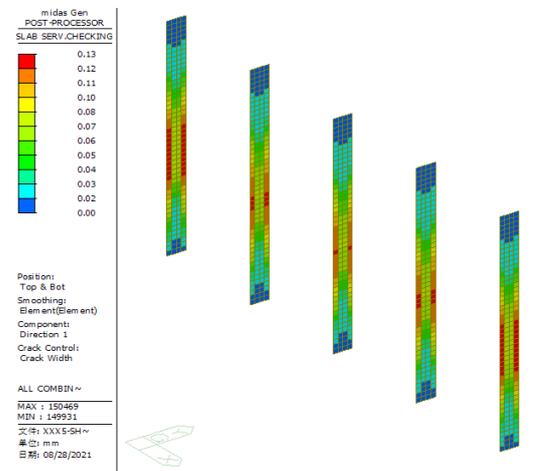


图 9 短墙裂缝宽度云图

Fig.9 Cloud diagram of crack width of short wall

筋量计算裂缝宽度。可以看出裂缝宽度最大值为 0.13 mm，满足规范限值。

3.2.2.2 星仓的筒仓壁受力分析 与短墙相邻筒仓壁存在两种受力状态：1. 当筒仓满仓，星仓空仓时，筒仓壁是轴心受拉状态；2. 当筒仓空仓，星仓满仓时，筒仓壁是压弯受力状态。筒仓壁设计时应按照上述两种情况包络设计。图 10 和图 11 分别给出了筒仓仓壁内侧和外侧在不同受力状态下的配筋量云图。

从图 12 给出筒仓仓壁内、外侧配筋对比情况，可以看出筒仓仓壁内侧配筋在星仓底板顶

10.0 m 范围内，是轴心受拉状态控制；在星仓底板顶 10.0 m 以上范围是压弯状态控制；筒仓仓壁外侧配筋在星仓底板顶 5.0 m 范围内，是轴心受拉状态控制；在星仓底板顶 5.0 m 以上范围是压弯状态控制。

4 结论

本文通过有限元对仓群的短墙以及星仓仓壁进行内力与配筋设计分析，可以得出以下主要结论：

(1) 短墙设计的控制工况是此短墙组成的星仓满仓，其他圆仓和星仓空仓。

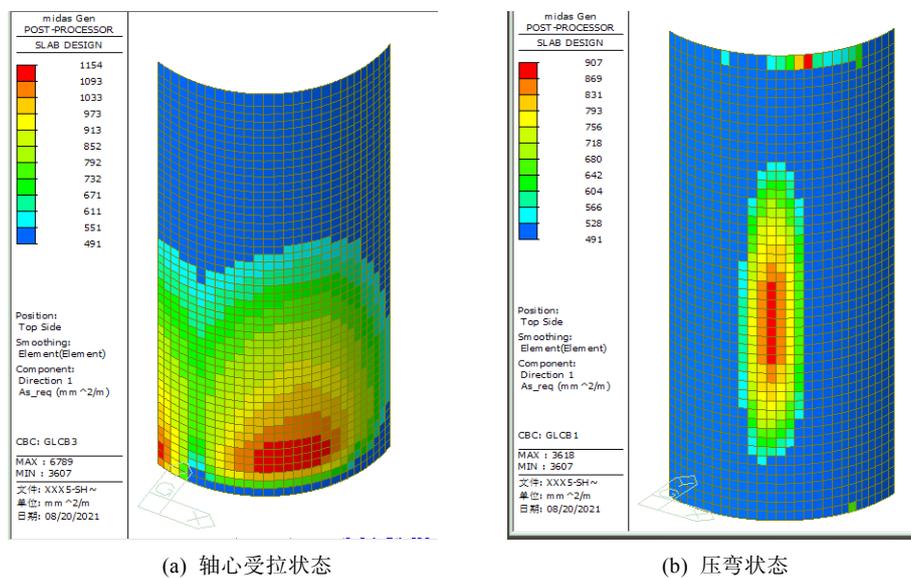


图 10 筒仓仓壁内侧配筋量云图
Fig.10 Cloud diagram of the reinforcement amount on the inner side of the silo wall.
(a) Axis tension state; (b) Bending state

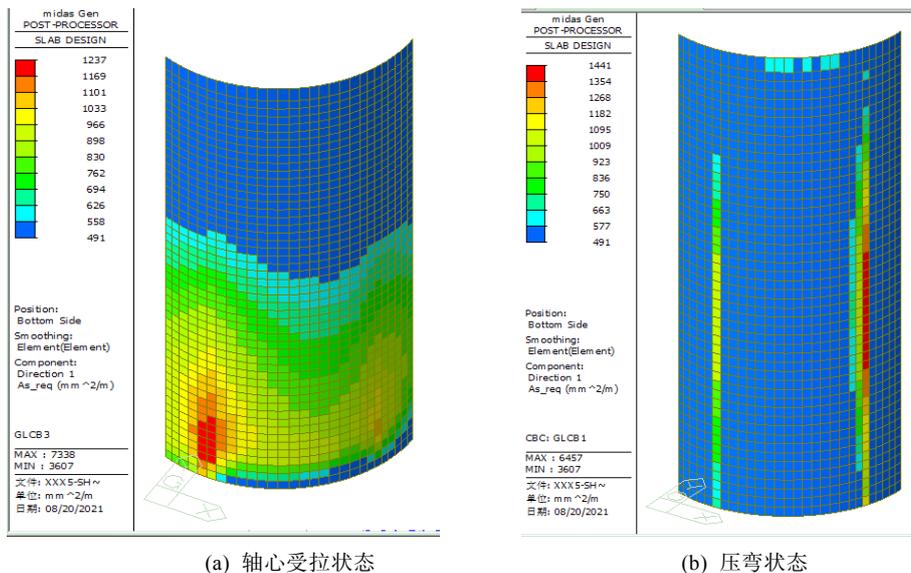


图 11 筒仓仓壁外侧配筋量云图
Fig.11 Cloud diagram of the reinforcement amount on the outer side of the silo wall.
(a) Axis tension state; (b) Bending state

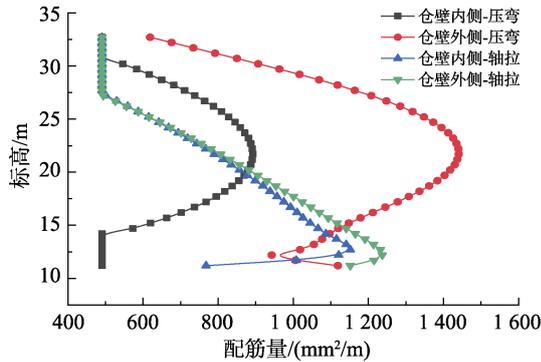


图 12 筒仓仓壁内、外侧配筋对比图

Fig.12 Comparison of internal and external reinforcement of silo wall

(2) 当星仓满仓, 圆仓空仓时, 短墙处于拉弯状态, 星仓内侧受拉, 外侧受压。

(3) 通过短墙相连的圆形群仓设计时, 应考虑群仓实际刚度的影响, 采用有限元计算短墙的实际受力。

(4) 当星仓满仓时, 在粮食水平荷载作用下, 星仓的筒仓仓壁内存在较大弯矩。

(5) 圆仓仓壁设计时, 仓壁的配筋及裂缝计算不能仅考虑单仓的轴心受拉状态。应按照圆仓满仓、星仓空仓及圆仓空仓、星仓满仓两种工况进行包络设计。

(6) 星仓仓壁配筋设计时, 仓内侧配筋在底部 2/5 高度范围内由圆仓满仓、星仓空仓工况控制, 其他范围仓内侧配筋由圆仓空仓、星仓满仓工况控制; 仓外侧配筋在底部 1/5 高度范围内由圆仓满仓、星仓空仓工况控制, 其他范围仓内侧配筋由圆仓空仓、星仓满仓工况控制。

参考文献:

[1] 刘抚英, 王旭彤, 贺晨浩, 等. 立筒仓保护与再利用对策研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(2): 192-199.
LIU F Y, WANG X T, HE C H, et al. Strategy study on conservation and reuse of silos[J]. Industrial Construction, 2018, 48(2): 192-199.

[2] 丁永刚, 周秀, 许启铿, 等. 钢筋混凝土立筒仓卸料过程侧压力模拟[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 103-107.
DING Y G, ZHOU X, XU Q K, et al. Simulation of lateral pressure of reinforced concrete silo during unloading[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 103-107.

[3] 赵霖. 防城港粮食中转库大直径群仓三维有限元分析[J]. 中国粮油学报, 1996(4): 50-54.
ZHAO L. The Three-demensenal finete element analysis of the grouped silos at Fangcheng Port[J]. Journal of the Chinese and

Oils Association, 1996(4): 50-54.

[4] 许启铿, 张大英, 王录民. 立筒群仓缩尺模型模态分析和测试技术研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(6): 74-78.
XU Q K, ZHANG D Y, WANG L M. Modal analysis and testing technique of group silos scale model[J]. Industrial Construction, 2016, 46(6): 74-78.

[5] 杨新峰, 刘平, 舒浙锋, 等. 立筒仓施工平台支模桁架结构形式对比计算[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 2296-2303.
YANG X F, LIU P, SHU Z F, et al. Comparative calculation of formwork truss structure forms of silo construction platform[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 2296-2303.

[6] 雷文. 港口粮食码头立筒仓群滑模施工质量控制[J]. 山西建筑, 2020, 46(15): 80-81.
LEI W. Quality control of slipforming construction of silo group in port grain wharf[J]. Shanxi Architecture, 2021, 51(S1): 2296-2303.

[7] 吴刚, 王继武, 孔令斌, 等. 立筒仓信息化系统的设计及应用[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(3): 48-49, 52.
WU G, WANG J W, KONG L C et al. Design and application of silo information system[J]. Cereal & Food Industry, 2021, 28(3): 48-49, 52.

[8] 徐鹏程, 裴骏凯, 徐玉斌. 高粮堆粮食立筒仓通风设计的探讨[J]. 粮食与食品工业, 2020, 27(3): 23-25.
XU P C, QIU J K, XU Y B. Discussion on ventilation design of vertical grain silos with high grain pile[J]. Cereal & Food Industry, 2020, 27(3): 23-25.

[9] 王煜成. 混凝土圆形筒仓群不同工况下计算分析的对比研究[J]. 建筑科技, 2021, 5(3): 85-89.
WANG Y C. Comparison of concrete circular silo group calculations under different conditions[J]. Building Technology, 2021, 5(3): 85-89.

[10] 胡亚民, 阴利, 麻峰. 浅析钢筋混凝土立筒仓星仓装粮对仓体结构的影响[J]. 粮食流通技术, 1998(4): 9-12.
HU Y M, YIN L, MA F. Simple analyse the effect of steel concrete bit silo's loading on the depository structure[J]. Grain distribution technology, 1998(4): 9-12.

[11] 王广国, 杜明芳. 星仓内力计算方法[J]. 郑州粮食学院学报, 1995(3): 60-64.
WANG G G, DU M F. The calculation method of internal forces in interstice celis[J]. Journal of Zhengzhou Grain College, 1995(3): 60-64.

[12] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 中国建筑工业出版社, 2016.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. China Architecture and Architecture Press, 2016.

[13] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 中国建筑工业出版社.
Load code for building structures: GB 50009—2012[S]. China Architecture and Architecture Press.

[14] 钢筋混凝土筒仓设计标准: GB 50077—2017[S]. 中国建筑工业出版社.
Design standard for reinforced concrete silos: GB 50077—2017[S]. China Architecture and Architecture Press.

[15] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 中国建筑工业出版社.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010[S]. China Architecture and Architecture Press. 完

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。