

某工业筒仓开裂原因分析及加固方法研究*

王炯文¹, 胡晓锋¹, 刘小光², 冯智¹, 张彬¹, 仲辉³, 黎春晖¹

(1. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082;

2. 陕西建工集团股份有限公司, 陕西 西安 710003;

3. 陕西有色建设有限公司, 陕西 西安 710082)

[摘要] 某工业砖砌圆筒仓结构投入使用后外仓壁出现多处竖向裂缝, 现场对该结构开裂情况和材料强度进行检测, 计算不同高度仓壁承受的环向拉力和仓壁的环向承载力, 综合分析可知, 该筒仓结构设计存在显著缺陷, 仓壁环向承载力不足是其开裂的主要原因。基于上述结果, 提出一种加固处理方法, 在原砖仓壁内表面浇筑钢筋混凝土形成剪力墙结构, 代替砖仓壁承受储料引起的环向拉力, 经过分析计算, 确保了环向承载力满足要求。

[关键词] 工业筒仓; 开裂; 加固; 承载力; 方案

[中图分类号] TU362

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)24-0104-05

Cracking Cause Analysis and Reinforcement Method of an Industrial Silo

WANG Jiongwen¹, HU Xiaofeng¹, LIU Xiaoguang², FENG Zhi¹, ZHANG Bin¹,
ZHONG Hui³, LI Chunhui¹

(1. Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710082, China;

2. Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710003, China;

3. Shaanxi Non-ferrous Construction Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710082, China)

Abstract: After an industrial brick cylindrical silo structure was put into use, multiple vertical cracks appeared on the outer silo wall. On-site detection was carried out on the cracking condition of the structure and the material strength. The circumferential tension borne by the silo wall at different heights and the circumferential bearing capacity of the silo wall were calculated. Comprehensive analysis shows that: The silo structure design has significant defects, and the insufficient circumferential bearing capacity of the silo wall is the main cracking cause. Based on the above results, this paper proposes a reinforcement treatment method, which involves casting a reinforced concrete shear wall structure on the inner surface of the original brick silo wall to replace the brick silo wall in bearing the circumferential tension caused by stored materials. Through analysis and calculation, it is ensured that the circumferential bearing capacity meets the requirements.

Keywords: industrial silo; cracking; reinforcement; bearing capacity; schemes

0 引言

筒仓结构是一种重要的储藏构筑物, 在工农业生产及物资储运中发挥着关键作用。工业筒仓结构不仅能高效利用空间, 还能显著缩短物料的装卸流程, 降低运维成本, 减少繁重的袋装作业, 为实现

机械化、自动化作业创造有利条件。

砖砌筒仓结构造价低廉、施工简便, 在过去被广泛应用。然而, 砖砌筒仓结构存在一定的局限性, 为提升承载力, 砖砌筒仓常需配置环向钢筋或设置钢筋混凝土圈梁。与之不同, 钢筋混凝土筒仓凭借其高强度、大容量特性, 在现代工业建筑中被广泛应用^[1]。

近年来, 部分工程筒仓结构的仓壁、筒壁等在使用过程中存在不同程度的开裂现象, 为探究工业

* 陕西省重点研发计划(2025YS-01); 陕西省建筑科学研究院科研项目(2023-11-458, 2025-1-545); 陕西省省级国有资本经营预算科技创新专项资金项目(ZXZJ-2024-015)

[作者简介] 王炯文, 工程师, E-mail: 840628203@qq.com

[收稿日期] 2025-05-26

筒仓结构开裂原因、提高筒仓结构的安全性和可靠性,国内学者对其受力原理展开大量理论计算和数值模拟分析,李彦辉等^[2]通过荷载试验和计算分析提出温度变化是引起某筒仓开裂的主要原因;车颖文^[3]对不同筒仓物料对仓壁压力和稳定性的影响展开系统研究;陈晓等^[4]对配筋砖砌筒仓和设置钢筋混凝土圈梁的砖砌筒仓分别进行理论计算,提出了砖砌圆筒仓仓壁的结构设计方法;卢亦焱等^[5]通过有限元计算筒仓底板环向力发现,底板环向配筋满足要求,而温度应力累积造成底板开裂;李刚等^[6]通过现场调查和有限元分析得出结论,即仓壁所受环向拉力远超设计要求和内外温差荷载效应导致某筒仓竖向开裂;潘立^[7]指出,环向钢筋搭接和混凝土强度低是造成仓壁竖向开裂的重要原因。

本文针对某既有工业筒仓建筑,根据现场检测和调查结果,对仓壁进行受力分析,探究其开裂原因,并提出后续加固方法。

1 工程概况

某既有工业建筑为砖砌筒仓结构,建于 2015 年,平面呈圆形,使用用途为水泥熟料库,共 2 个筒仓,仓壁外圆相切,筒仓外立面如图 1 所示。筒仓直径 18.0m,标高 27.000m,总建筑面积约为 972.0m²,基础形式为条形基础,仓壁采用烧结普通砖和水泥砂浆砌筑,0~18.000m 标高时墙厚 490mm,18.000~27.000m 标高时墙厚 370mm。各筒仓沿仓壁均匀设置 16 根构造柱,每 2.25m 高设置 1 道圈梁,圈梁高 350mm(4.500m 标高处圈梁高 500mm,27.000m 标高处圈梁高 850mm)。顶部设有 350mm×1 200mm 井字梁,梁两端与主构造柱连接,2 个筒仓间设 2 道 350mm×700mm 附加梁,梁两端与圈梁连接,屋面为 150mm 厚钢筋混凝土现浇板。出料门为钢筋混凝土剪力墙结构,墙体厚度为 600mm。井字梁混凝土设计强度等级为 C40,剪力墙和屋面板混凝土设计强度等级为 C30,圈梁、构造柱混凝土设计强度等级为 C25。屋面结构平面布置如图 2 所示。

在使用过程中,该筒仓结构 2 个筒仓的外仓壁均出现多处裂缝,为分析开裂原因从而为后续加固设计和施工提供依据,对该建筑进行现场检测,并提出合理的加固方法。

2 开裂原因分析

2.1 开裂情况调查

经现场调查,该筒仓仓壁出现不同程度的裂缝,裂缝形态主要表现为竖向裂缝,仓壁上部裂缝宽度较小,中下部相较于上部开裂现象更为严重,



图 1 筒仓外立面
Fig. 1 Facade of the silo

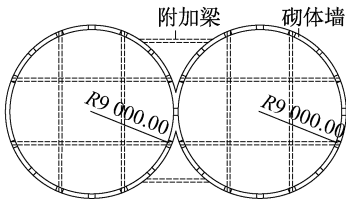


图 2 屋面结构平面布置
Fig. 2 Plan layout of roof structure

出现贯穿砖砌体、水泥砂浆及圈梁的通长竖向裂缝,表现出明显的环向受力破坏特征,开裂情况如图 3 所示。



图 3 墙体竖向裂缝
Fig. 3 Vertical cracks in the wall

2.2 现场检测

根据 GB/T 50344—2019《建筑结构检测技术标准》^[8],现场采用贯入法检测砌筑水泥砂浆的抗压强度,采用回弹法分别检测烧结砖和混凝土的抗压强度,并用钻芯修正法对混凝土抗压强度进行修正,采用电磁感应法和直接法对混凝土构件钢筋配置进行检测,对受力构件的截面尺寸进行复核。根据检测结果,该房屋砌筑水泥砂浆强度值取 10.4MPa,烧结砖抗压强度等级推定值为 MU10,圈梁和构造柱混凝土抗压强度推定值为 C25,圈梁主筋配置为 8φ16 或 10φ16,构造柱主筋配置为 8φ20,材料强度、钢筋配置情况、截面尺寸等均符合原设计要求。

2.3 砖砌筒仓结构仓壁受力分析

根据 CECS 08:89《砖砌圆筒仓技术规范》^[9],

水泥筒仓直径宜 $\leq 8\text{m}$,高度宜 $\leq 12\text{m}$ 。该筒仓结构直径和高度均不满足规范要求。

由于该筒仓结构高度 h 与直径 d_n 之比 ≥ 1.5 ,因此该筒仓为深仓^[1],深仓储料压力如图 4 所示, h_n 为筒仓仓壁计算高度。

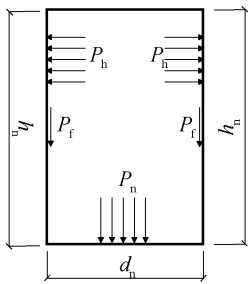


图 4 深仓储料压力示意

Fig. 4 Deep silo storage pressure

储料作用于仓壁单位面积上的水平压力 P_h 和作用于仓壁单位周长的总竖向摩擦力 P_f 分别由下式计算:

$$P_h = C_h \frac{\gamma \rho}{\mu} (1 - e^{-\mu k s / \rho}) \tag{1}$$

$$P_f = \rho \left[\gamma s - \frac{\gamma \rho}{\mu k} (1 - e^{-\mu k s / \rho}) \right] \tag{2}$$

$$k = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) \tag{3}$$

$$\rho = \frac{d_n}{4} \tag{4}$$

式中: C_h 为水平压力修正系数; γ 为储料重度; ρ 为水平净截面的水力半径; μ 为储料与仓壁摩擦系数; k 为侧压力系数; s 为储料顶面至计算截面距离; φ 为内摩擦角。

水平压力 P_h 引起仓壁产生环向拉力,筒仓仓壁有竖向开裂趋势;总竖向摩擦力 P_f 引起仓壁产生轴向力,仓壁有环向开裂趋势。现场调查中未发现该筒仓结构出现环向裂缝,因此后续计算环向拉力对该筒仓结构的影响。

仓壁沿壁高方向计算高度内环向拉力 N_t 为:

$$N_t = \frac{P_h d_n l}{2} \tag{5}$$

式中: l 为圈梁上、下各半段砖仓壁高度。

对于有钢筋混凝土圈梁的砖砌筒仓的仓壁,仓壁环向拉力由环筋、混凝土和砖砌体承受,每道圈梁和上、下各半段砖仓壁共同承受环向拉力,因此圈梁环筋、混凝土和砖砌体的环向承载力分别为:

$$F_{t0} = A_s f_y \tag{6}$$

$$F_{t1} = f_{t1} A_1 \tag{7}$$

$$F_{t2} = f_{t2} A_2 \tag{8}$$

$$F_t = F_{t0} + F_{t1} + F_{t2} \tag{9}$$

式中: F_{t0}, F_{t1}, F_{t2} 分别为圈梁环筋、混凝土和砖砌体的环向承载力; F_t 为计算高度内总环向承载力; f_y 为圈梁环向钢筋抗拉强度设计值; A_1, A_2 分别为混凝土和砖砌体在计算高度内的截面面积; f_{t1}, f_{t2} 分别为混凝土和砖砌体的抗拉强度。

该筒仓结构重度 γ 取 16.0kN/m^3 ,内摩擦角 φ 取 33° ,摩擦系数 μ 取 0.50 ,环向钢筋为 HRB335。计算出料口上部不同高度仓壁的环向承载力和仓壁实际承受的环向拉力,计算结果如表 1 所示。

由计算结果可知,该砖砌圆筒仓结构仓壁环向拉力 N_t 随仓壁高度增大而减小,仓壁高度在 $4.50 \sim 18.00\text{m}$ 时环向承载力 F_t 均小于环向拉力 N_t ,仓壁高度 $>20.25\text{m}$ 时环向承载力 F_t 大于环向拉力 N_t ,故该筒仓结构环向承载力不满足实际使用要求。

3 加固处理方案

相较于砖砌筒仓结构,钢筋混凝土筒仓结构承载力和延性更为优秀,在工业建筑中被广泛应用。因此,采用钢筋混凝土筒仓结构可显著解决该筒仓结构环向承载力不满足要求的问题。针对该筒仓结构现状,采用在原砖砌筒仓内仓壁表面浇筑剪力墙的方法,将砖仓壁和圈梁混合承力方式转变为钢筋混凝土仓壁承力方式,以此来减小环向拉力对仓壁的影响,减少仓壁裂缝发展。

3.1 基础加固

该筒仓结构原基础为钢筋混凝土条形基础,由于上部结构荷载增大,在原环状条形基础内部布置筏板基础,筏板厚度为 1.0m ,板顶标高为 -1.500m ,筏板钢筋和剪力墙钢筋植入原钢筋混凝土条形基

表 1 仓壁环向拉力计算结果

Table 1 Calculation results of circumferential tensile force of silo wall

项目	仓壁高度/m							
	4.50	6.75	9.00	11.25	13.50	15.75	18.00	20.25
$P_h / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$	150.25	139.70	128.35	116.13	102.98	88.82	69.82	37.05
F_t / kN	1 077.26	877.24	877.24	877.24	877.24	877.24	877.24	877.24
N_t / kN	3 042.51	2 829.01	2 599.16	2 351.73	2 085.36	1 798.60	1 413.77	750.22
$F_t - N_t / \text{kN}$	-1 965.25	-1 951.76	-1 721.92	-1 474.49	-1 208.11	-921.36	-536.53	127.02
承载力是否满足要求	不满足	不满足	不满足	不满足	不满足	不满足	不满足	满足

础,筏板植筋如图 5 所示。筏板基础混凝土强度等级为 C40,筏板基础底板为 100mm 厚素混凝土垫层,强度等级为 C15,垫层出筏板边缘 100mm。钢筋混凝土筒仓内部布置 500mm 宽环形和通长地梁。筏板布置平面如图 6 所示。

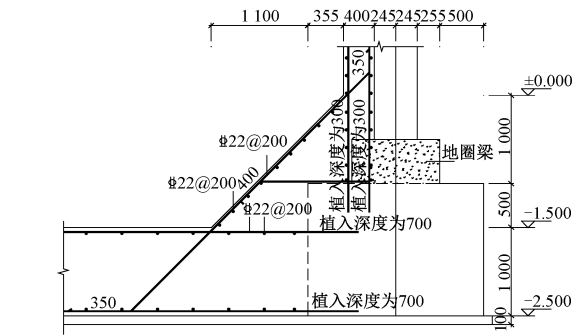


图 5 筏板植筋做法

Fig. 5 Construction method of planting rebar in raft slab

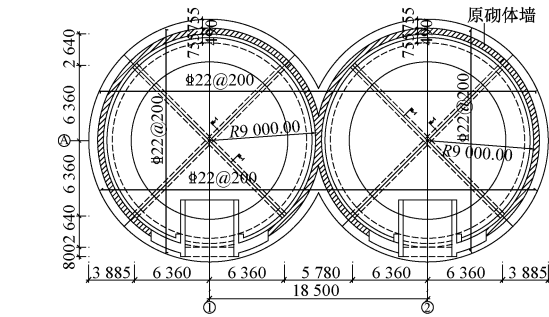


图 6 筏板布置平面

Fig. 6 Layout plan of raft slab

3.2 上部结构加固

在原砖砌筒仓仓壁内表面浇筑钢筋混凝土剪力墙结构,墙体厚度为 400mm,筒仓沿仓壁均匀设置 1 000mm×400mm 暗柱,出料口两边设置 400mm×750mm 暗柱,剪力墙钢筋植入原圈梁和构造柱内,剪力墙与构造柱和剪力墙与圈梁植筋如图 7 所示,基础顶至出料口顶面和出料口顶面至屋面墙体布置平面如图 8,9 所示。

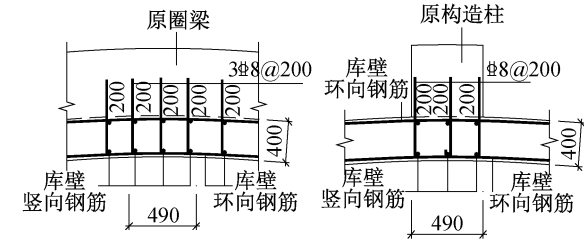


图 7 构造柱、圈梁与剪力墙植筋做法

Fig. 7 Construction method of planting rebar for construction column, ring beam and shear wall

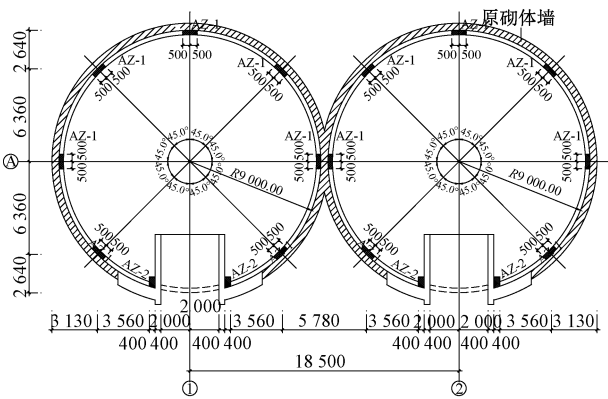


图 8 基础顶至出料口顶面墙体布置平面

Fig. 8 Layout plan of the wall body from foundation top to outlet top surface

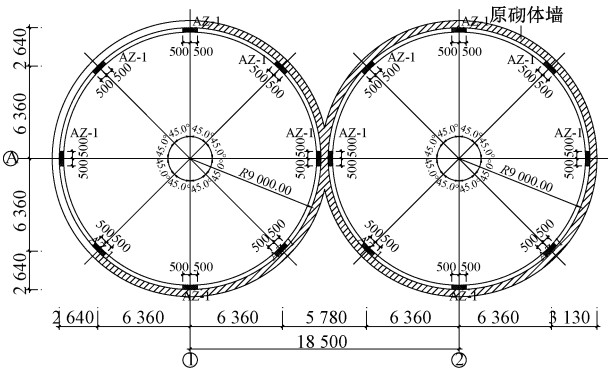


图 9 出料口顶面至屋面墙体布置平面

Fig. 9 Layout plan of the wall body from outlet top surface to roof

根据 GB 50077—2017《钢筋混凝土筒仓设计标准》^[10],计算水平压力 P_h 和仓壁环向拉力 N_t ,计算公式见 2.3 节;计算单位高度环向钢筋配筋面积:

$$A_s = \frac{kN_t}{f_y} \tag{10}$$

式中: k 为安全系数。

墙体混凝土强度等级为 C40,钢筋为 HRB400。计算配筋如图 10 所示。

4 结语

- 1) 该砖砌圆筒仓结构原设计不合理,高度、直径等构造措施均远超《砖砌圆筒仓技术规范》限值要求。
- 2) 该砖砌圆筒仓结构环向拉力由圈梁环筋、混凝土和砖砌体共同承受,其总环向承载力远小于实际承受的仓壁环向拉力,因此环向承载力不足是该筒仓结构仓壁开裂的主要原因。由于高度越小仓壁环向拉力越大,所以底部的竖向裂缝宽度显著大于顶部的竖向裂缝宽度。
- 3) 提出一种针对砖砌圆筒仓环向拉力过大的加固处理方法,即在原环状条形基础内部浇筑筏板

