

地上输料通道对浅圆仓仓壁和通道受力的影响

孙巍巍¹, 冯 君^{2*}, 朱建平³, 张栩东¹, 易建荣³, 王 磊³

(1. 南京理工大学土木工程系, 南京 210094; 2. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094; 3. 中国中材国际工程股份有限公司(南京), 南京 211100)

摘 要: 为揭示地上输料通道对浅圆仓仓壁和通道受力的影响, 开展了不同高径比、不同偏心率的缩尺筒仓模型装卸料试验, 并将测试结果与筒仓标准 GB 50077—2017 有关规定进行对比分析。装料试验结果表明, 通道的存在影响了仓壁底部的侧压力分布, 仓壁侧压力在通道高度范围内明显小于筒仓标准预测值。整个卸料过程可以归纳为一个倒锥不断下切的过程, 倒锥的顶点位于卸料口的正上方。卸料试验中没有观测到超压系数随着卸料偏心率增大而增大的现象。高径比在 0.69 以下时, 仓壁和通道上超压系数普遍较小; 高径比接近 1.0 时, 仓壁和通道上超压系数迅速上升。当通道依据标准 GB 50077—2017 判定为深埋时, 通道压力预测值明显小于测试值, 偏于不安全。主次通道顶壁及侧壁的静载压力依据本文提出的浅埋公式计算更加合理, 其中贮料高度应取为通道计算点的实际贮料高度。建议浅圆仓设计时适当考虑通道的顶壁和侧壁超压系数, 可取 1.2~1.3。

关键词: 筒仓; 试验; 压力; 通道; 超压系数; 高径比; 偏心率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.031

中图分类号: TU317⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0259-08

孙巍巍, 冯君, 朱建平, 等. 地上输料通道对浅圆仓仓壁和通道受力的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 259-266.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.031 <http://www.tcsae.org>

Sun Weiwei, Feng Jun, Zhu Jianping, et al. Influences of the ground conveying corridors on the pressure of the wall and corridor in squat silos[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 259-266. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.031 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

浅圆仓作为一种储存散装物料的构筑物, 广泛用于粮食、化工、制药等农业和工业工程领域^[1-3]。地下通道作为浅圆仓内贮料运出的重要设施, 内安装有卸料输送机及配套的强电、弱电电缆^[4]。当地下通道防水材料出现老化, 输送设备容易受到腐蚀, 将影响筒仓的正常运行, 甚至威胁工作人员的安全^[5]。为方便后期维护, 将原本位于地下的输料通道上移, 出现地上输料通道工艺。地上输料通道进入了浅圆仓内部, 势必对仓壁和通道的受力产生影响^[6-9]。地上输料通道筒仓多应用于高径比介于 0.4~1.0 的浅圆仓, 即欧洲筒仓规范 EN 1991—4: 2006 中定义的 Squat Silo, 国内外筒仓规范中未发现针对地上输料通道的设计条文^[10-14]。国内筒仓标准 GB 50077—2017^[10]提出的地下输料通道设计方法主要基于“隧道理论”^[15], 虽然在岩土中开挖形成的隧道与埋入贮料和回填材料中的通道在形式上较为类似, 但二者的受力环境存在很大差别, 隧道土拱效应^[16]是否同样适用于输料通道的压力预测仍需要进一步研究。

缩尺模型筒仓装卸料试验^[17-18]作为一种研究手段, 近年来被众多研究人员所采用。张大英等^[19]利用有机玻璃筒仓模型研究了立筒仓卸料过程中的侧压力变化, 发现筒仓内存在超压现象, 但各测点超压系数不同。张翀等^[20]开展了落地式钢筒仓模型的卸料试验, 证实了偏心卸料对仓壁受力性能产生了巨大影响。韩阳等^[21]基于仓体的微缝分离设计研制了缩尺模型筒仓试验装置, 并开展了静态储粮下仓壁摩擦力试验研究。目前尚未发现地上通道筒仓缩尺模型装卸料试验数据和报道。

为准确研究地上输料通道对浅圆仓仓壁和通道受力的影响, 本文拟开展地上输料通道浅圆仓缩尺模型装卸料试验研究, 重点考察不同偏心率、不同高径比下仓壁和通道上压力分布及超压演化规律, 并与筒仓标准 GB 50077—2017 有关规定开展对比分析, 拟为浅圆仓仓壁和通道结构设计提供一定的参考和借鉴。

1 设备与方法

1.1 试验设备

以地上通道筒仓结构(图 1a)为工程原型, 制作了如图 1b 所示的地上通道筒仓缩尺模型。采用流动性较好的标准石英砂作为贮料和回填材料, 经前期直剪测试^[22]其内摩擦角 φ_i 和休止角 φ_r 均为 33° , 容重 γ 为 14.4 kN/m^3 。为方便观察筒仓内贮料流动通道变化, 以 3 种不同高度的透明有机玻璃圆筒用来模拟仓壁, 圆筒外径为 1 000 mm, 壁厚为 10 mm, 高度 h_1 分别为 392、642、

收稿日期: 2020-02-20 修订日期: 2020-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(51308297, 11902161); 南京市建设系统科研项目(Ks1717)

作者简介: 孙巍巍, 博士, 副教授。研究方向为特种结构。

Email: sww717@163.com

*通信作者: 冯君, 博士, 讲师。研究方向为特种结构。

Email: jun.feng@njjust.edu.cn

892 mm。3 条不同长度的地上输料通道采用厚度 10 mm 钢板制作, 分别为 1 条主通道和 2 条次通道。其中主通道条带偏心率为 0, 2 条次通道条带偏心率 e_s/d_n 均为 0.31 (条带偏心距 $e_s=300$ mm, 筒仓内径 $d_n=980$ mm, 图 2)。通道高度 h_c 为 70 mm、宽度 b_c 为 90 mm, 在其顶壁每隔 100 mm 对称开设直径 35 mm 卸料洞口。有机玻璃圆筒和地上通道均安置在试验钢支架上。

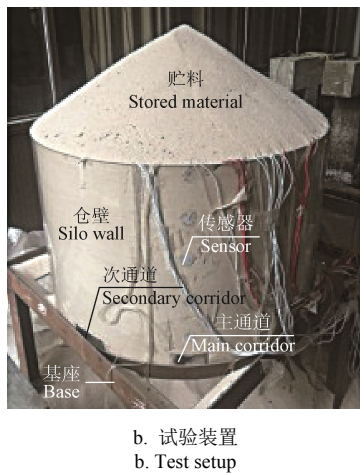
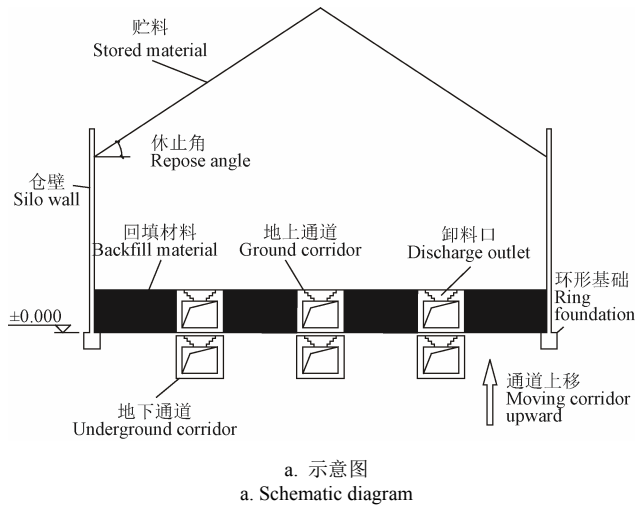
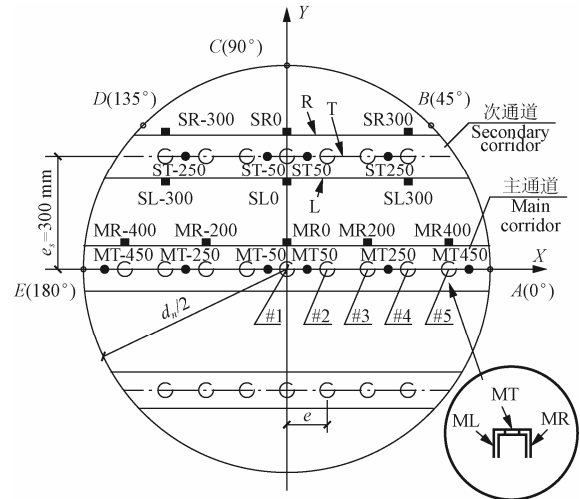


图 1 地上通道筒仓示意图及缩尺试验布置

Fig.1 Schematic diagram of ground corridor silo and reduced-scale test setup

如图 2 所示, 仓壁和通道上均布置了经标定的溧阳市超源仪器厂 BW45-0.02 型电阻应变式压力计, 仓壁压力计沿环向 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内每 45° 布置一列, 共 5 列; 压力计沿仓壁高度自下而上间距为 120 mm, 但因主通道的阻挡, 0° 和 180° 方向上最下端未设置压力计。通道侧壁的压力计位于通道高度中点处, 与卸料洞口位置保持一致, 顶壁的压力计则分布于通道轴线上。沿通道方向定为 X 轴, 垂直通道方向定为 Y 轴, 坐标原点位于筒仓底面的圆心处。为准确定位压力计, 每个压力计均有相应的编号。仓壁压力计编号由 3 个数值组成, 第一个数值代表高径比; 第二个数值代表压力计所在的环向角度, $(^\circ)$; 第三个数值表示压力计距离筒仓底部的垂直距离, mm。DH3816N 应变测试仪结合配套软件用于压力数值的采集^[23]。



注: $A(0^\circ)$ 、 $B(45^\circ)$ 、 $C(90^\circ)$ 、 $D(135^\circ)$ 、 $E(180^\circ)$ 分别表示仓壁 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ 方向上的压力计。通道压力计编号则由 2 个字母加上 1 个数值组成, 2 个字母表示压力计所在的通道表面, 1 个数值则代表 X 轴坐标。其中 M、S、L、R、T 分别代表主通道、次通道、通道的左侧壁、通道的右侧壁和通道的顶壁。例如, MT-450 表示主通道顶壁 X 轴坐标为 -450 mm 的压力计。 d_n 表示筒仓内径, mm; e 和 e_s 分别表示卸料偏心距和卸料条带偏心距, mm; #1~#5 表示 1 到 5 号卸料口。下同。
Note: $A(0^\circ)$, $B(45^\circ)$, $C(90^\circ)$, $D(135^\circ)$, $E(180^\circ)$ represent the pressure gauges in the direction of $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ of the wall respectively. The corridor pressure gauge number consists of two letters and one value. The two letters indicate the corridor surface where the pressure gauge is located, and the value represents the X -axis coordinate. M, S, L, R, T represent the main corridor, the secondary corridor, the left side wall of the corridor, the right side wall of the corridor and the top wall of the corridor respectively. For example, MT-450 refers to the pressure gauge with X -axis coordinate of -450 mm on the top wall of the main corridor. d_n refers to the inner diameter of the silo; e and e_s indicate the discharge eccentricity and the discharge strip eccentricity respectively. #1~#5 indicate the discharge openings 1 to 5. The same below.

图 2 筒仓模型压力计布置俯视图

Fig.2 Top view of silo model pressure gauge layout

1.2 试验方法

整个装卸料试验以圆筒高度 h_1 等于 642 mm 的筒仓模型为主, 其实际高径比 h_n/d_n 等于 0.69 (贮料计算高度 $h_n=678$ mm, 计算至通道顶壁), 并对其他 2 个高径比 ($h_n/d_n=0.44, 0.95$; h_n 分别取 428 mm, 928 mm 时) 的筒仓开展了对比分析。卸料过程中, 当压力计获得的卸料压力大于初始装料静态压力时, 则认为筒仓内存在超压现象^[24], 并将卸料过程中的压力最大值与初始静态压力的比值定义为超压系数 C_d 。当卸料过程中, 无超压现象, 则超压系数 C_d 等于 1.0。

1.2.1 装料试验

在浅圆仓模型中共放入 3 条主次通道, 采用人工加料方式, 加料时首先堵上所有通道顶壁洞口, 从模型顶部加料至满仓状态, 待贮料完全稳定且压力计数值平稳, 读取相关压力数据。

1.2.2 卸料试验

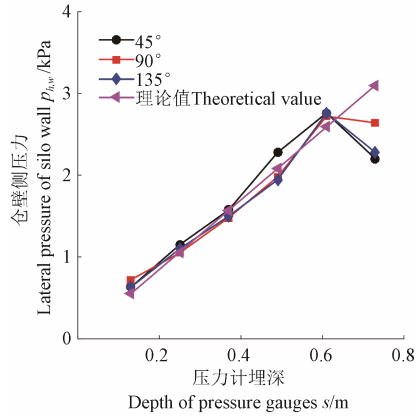
为考虑偏心率的影响, 在主通道顶壁设置了 #1~#5 卸料口 (图 2) 用于模拟从中心卸料 (卸料偏心距 $e=0$) 到偏心卸料 ($e=100$ mm、200 mm、300 mm、400 mm) 的变化过程。装料试验完成后, 单独打开主通道上某一卸料口完成卸料试验, 并采集压力数据。

2 结果与分析

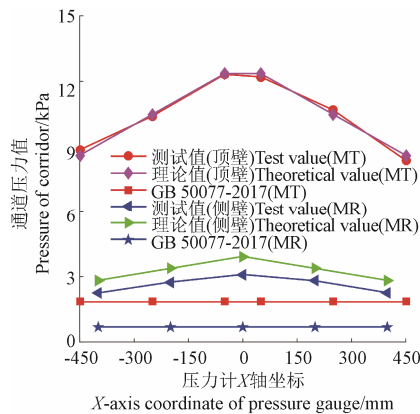
2.1 装料试验

图 3a 表明满仓状态下仓壁侧压力 ($p_{h,w}$) 随着压力计

埋深的增加基本上保持线性增长, 但通道高度以下仓壁侧压力曲线出现了明显的弯折。相对而言, 垂直于通道的 90° 方向仓壁侧压力受到通道的影响稍小于 45° 方向和 135° 方向。这些现象在其他 2 个高径比 ($h_n/d_n=0.44, 0.95$) 的浅圆仓装料试验中同样可以观察到, 显然通道的存在影响了仓壁底部的静载侧压力分布。



a. 仓壁
a. Silo wall



b. 主通道
b. Main corridor

注: $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 分别表示仓壁 $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 方向上的压力计。下同。
Note: $45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ represent the pressure gauges in the direction of $45^\circ, 90^\circ$ and 135° of the wall respectively. The same below.

图 3 装料测试结果 ($h_n/d_n=0.69$)

Fig.3 Loading test results ($h_n/d_n=0.69$)

如图 3b 所示, 主通道的顶壁和侧壁压力沿通道轴线不断变化, 越接近筒仓边缘 (仓壁) 压力值越小, 越接近筒仓中心位置压力值越大。这一现象可以解释为贮料顶部锥体的存在, 造成了通道各点实际贮料高度 H (计算点竖直向上投射到贮料锥形顶的距离, 从通道顶壁算起) 不同^[12]。次通道的顶壁和侧壁压力的分布规律和主通道类似。



a. 满仓状态
a. Full state



b. 卸料状态 1
b. Discharge state 1



c. 卸料状态 2
c. Discharge state 2



d. 卸料状态 3
d. Discharge state 3



e. 卸料结束
e. Discharge end

图 4 偏心卸料过程 ($e/d_n=0.31$)

Fig.4 Eccentric discharge process ($e/d_n=0.31$)

2.2 卸料试验

2.2.1 不同偏心率

以偏心率 e/d_n 为 0.31 ($e=300$ mm) 的筒仓偏心卸料试验为代表, 进行详细阐述。如图 4 所示, 装料完成后, 单独打开主通道#4 卸料口 ($e=300$ mm), 在卸料口的正上方逐渐形成一个倒锥面, 倒锥面和水平面的角度约等于贮料内摩擦角 φ_i , 不断下切倒锥的顶点始终位于#4 卸料口的正上方。整个卸料过程可以归纳为一个倒锥不断下切的过程^[25-27]。因为偏心效应, 偏置下切倒锥不是一个完整的锥体, 贮料和仓壁的交线沿圆周方向高度存在明显差异, 卸料口近端 (0° 方向) 仓壁的贮料高度明显小于卸料口远端 (180° 方向) 仓壁的贮料高度。

为清晰的标识和观察卸料开始后的超压现象, 卸料开始前的装料稳定状态以时间负值的方式记录在压力图中。如图 5 所示, 偏心卸料开始后随着偏置倒锥的不断下切, 中上部贮料不断排出筒仓, 仓壁中上部的部分压力计逐渐归零, 例如压力计 0.69-0°-620 在约 50 s 归零。仓壁与贮料交线的不断变化, 仓壁各方向上的侧压力变化各异, 卸料口近端 (0° 方向) 侧压力迅速下降, 而远离卸料口一侧 (180° 方向) 侧压力缓慢下降, 其他角度介于二者之间。由此可见, 越接近卸料口的仓壁侧压力下降越迅速, 越远离卸料口的仓壁下降越缓慢。偏心卸料结束后筒仓模型中存在“死料”区域, 从而部分仓壁和通道上的最终压力值并不为零。

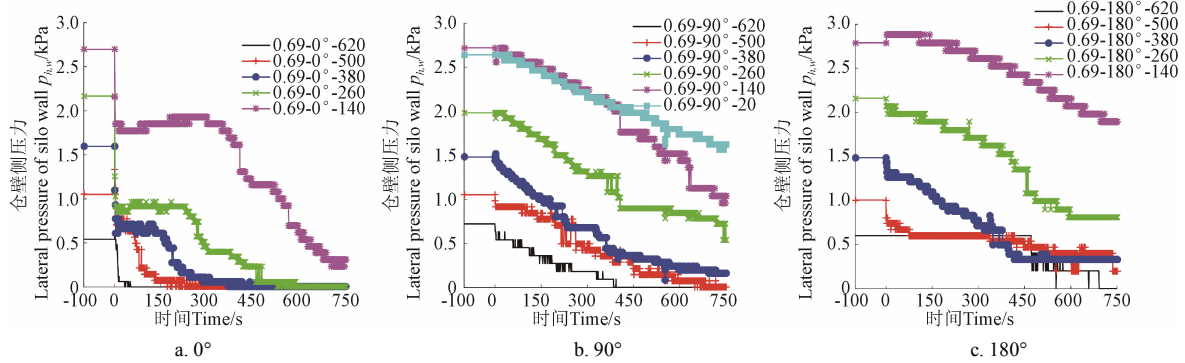
整个卸料过程中仓壁超压现象不明显, 且普遍超压持续时间很短。例如压力计 0.69-0°-380 测试值在卸料初始瞬时增加后, 仅仅维持了 2 s 后, 急速下降转入欠压状态 (卸料压力小于初始静态压力)。只有极少数压力计 (例如 0.69-180°-140) 维持了较长时间的超压现象, 且超压系数 C_d (最大卸料压力/初始静态压力) 只有 1.032。

偏心卸料开始后, 主通道顶壁 (MT) 靠近#4 卸料口的 MT250 和 MT450 压力值迅速减少, 其他顶壁部位出现小幅超压。主通道的侧壁 (MR)、次通道顶壁 (ST) 和右侧壁 (SR) 压力值变化较小, 只出现了微小的超压, 保持缓慢的阶梯状压力下降, 但靠近#4 卸料口的次通道左侧壁 (SL) 超压仍然明显, 超压系数 C_d 可达 1.154, 详见图 6。相较于仓壁, 通道顶壁和侧壁的超压现象更加明显, 且普遍超压持续时间较长。

其他卸料偏心率 e/d_n 下的试验现象整体类似, 只是仓壁和通道上的超压系数 C_d 有所变化。表 1 给出了 4 个不同偏心率 e/d_n 偏心卸料和中心卸料下仓壁各方向上超压系数

C_d 的对比。总的来说, 偏心卸料下仓壁存在不同程度的超压现象, C_d 整体规律性不强, 并没有观测到 C_d 随着偏心率 e/d_n 增大而增大的现象, 超压系数最大值 ($C_d=1.19$) 出现在偏心

率 e/d_n 等于 0.1。仓壁的超压部位主要集中在仓壁中下部, 当偏心率 e/d_n 较小时, 超压部位主要出现在 0° 和 180° 方向上, 偏心率 e/d_n 较大时, 超压部位则主要出现在 90° 方向。



注: 0.69-90°-620 为仓壁压力计编号, 0.69 表示筒仓的高径比, 90° 表示压力计所在的环向角度, ($^\circ$); 620 表示压力计距离筒仓底部的垂直距离, mm。
Note: 0.69-90°-620 is the number of the wall pressure gauge, 0.69 represents the aspect ratio, 90 $^\circ$ indicates the circumferential angle of the pressure gauge, ($^\circ$), and 620 illustrates the vertical distance between the pressure gauge and the bottom of the silo, mm.

图 5 偏心卸料下不同角度的仓壁侧压力 ($e/d_n=0.31$)

Fig.5 Lateral pressure of silo wall with different angles under eccentric discharge ($e/d_n=0.31$)

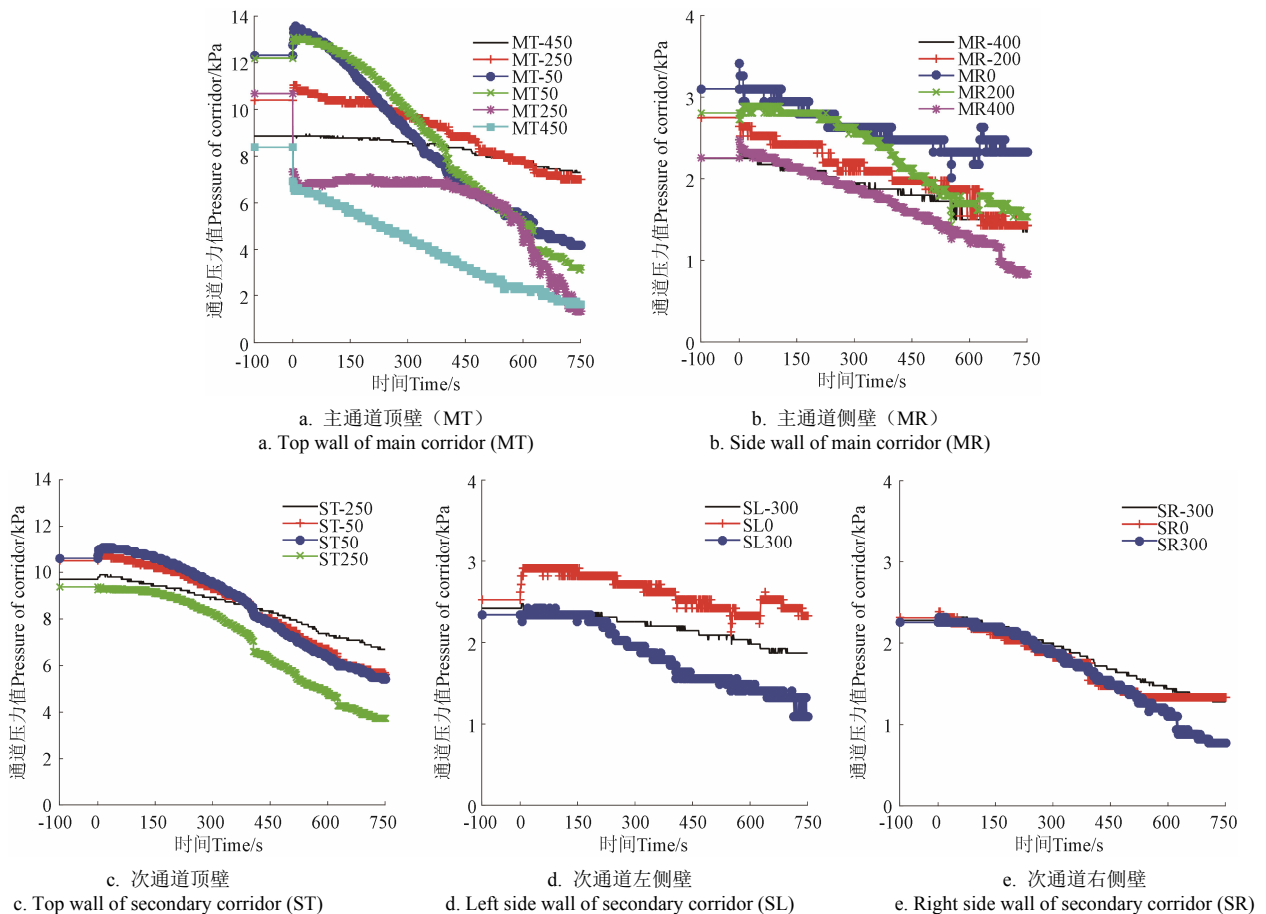


图 6 偏心卸料下通道压力 ($e/d_n=0.31$)

Fig.6 Corridor pressure under eccentric discharge ($e/d_n=0.31$)

如表 1 所示, 不同偏心率下的试验结果均表明卸料通道更为直接的受到贮料的动态冲击, 通道的超压系数普遍大于仓壁超压系数。主通道顶壁 (MT) 紧邻卸料口部位一般不会出现超压现象, 相反离卸料口稍远距离的通道顶壁呈现明显的超压现象, 距离更远处超压现象开始衰减; 主通道侧壁 (MR) 的超压现象在卸料口附近最为严重; 次通道顶壁 (ST) 和右侧壁 (SR) 超压现象基

本可以忽略; 次通道左侧壁 (SL) 因直接面对卸料口, 出现了明显超压, 超压系数最大值集中在通道中部。

2.2.2 不同高径比

试验结果表明 3 个不同高径比 ($h_n/d_n=0.44$ 、0.69、0.95) 筒仓的贮料偏心卸料 ($e/d_n=0.31$) 流动过程类似, 只是筒仓的容量大小决定了卸料时间的长短。如表 2 所示, 不同高径比对于超压系数 C_d 影响较大, 高径比 h_n/d_n

在 0.69 以下时，超压系数 C_d 较小，均在 1.2 以下，且在各个方向上无明显规律；但高径比 h_n/d_n 接近 1.0 时，超压系数 C_d 迅速上升，特别在靠近卸料口的 45° 方向上达到了 1.40。

表 1 不同偏心率下仓壁和通道超压系数

Table 1 Overpressure coefficients of the wall and corridor under different eccentricity ratios

压力计位置 Position of the pressure gauges	不同偏心率下的超压系数 Overpressure coefficients under different eccentricity ratios C_d				
	$e/d_n=0.0$	$e/d_n=0.10$	$e/d_n=0.20$	$e/d_n=0.31$	$e/d_n=0.41$
A(0°)	1.107	1.091	1.000	1.110	1.000
B(45°)	1.065	1.062	1.055	1.040	1.047
C(90°)	1.027	1.053	1.058	1.027	1.108
D(135°)	1.129	1.087	1.021	1.021	1.023
E(180°)	1.035	1.190	1.087	1.032	1.000
MT-450	1.069	1.050	1.018	1.000	1.000
MT-250	1.000	1.010	1.014	1.050	1.010
MT-50	1.000	1.022	1.273	1.091	1.086
MT50	1.000	1.000	1.300	1.073	1.138
MT250	1.048	1.016	1.000	1.000	1.052
MT450	1.027	1.015	1.000	1.000	1.000
MR-400	1.035	1.038	1.000	1.033	1.040
MR-200	1.115	1.136	1.000	1.000	1.034
MR0	1.333	1.136	1.064	1.100	1.063
MR200	1.136	1.143	1.059	1.030	1.087
MR400	1.151	1.000	1.031	1.097	1.070
ST-250	1.010	1.010	1.034	1.000	1.032
ST-50	1.039	1.019	1.000	1.047	1.017
ST0	1.000	1.012	1.000	1.028	1.020
ST50	1.000	1.016	1.007	1.020	1.024
ST250	1.010	1.010	1.034	1.000	1.032
SL-300	1.090	1.000	1.097	1.033	1.048
SL0	1.260	1.250	1.220	1.154	1.143
SL300	1.200	1.074	1.129	1.023	1.200
SR-300	1.000	1.000	1.055	1.024	1.079
SR0	1.026	1.000	1.034	1.030	1.000
SR300	1.000	1.000	1.028	1.035	1.026

如表 2 所示，通道超压系数 C_d 随着高径比 h_n/d_n 的变化规律与仓壁类似，当高径比 h_n/d_n 在 0.69 以下，主通道的顶壁（MT）和侧壁（MR）及次通道的顶壁（ST）和左侧壁（SL）的超压系数小幅增长，但高径比 h_n/d_n 接近 1.0 时，超压系数 C_d 迅速增加。但次通道的右侧壁（SR）超压系数 C_d 随着高径比 h_n/d_n 的增加呈下降趋势。

2.3 测试结果与规范预测值对比

2.3.1 仓壁结果对比

由图 3a 可知，仓壁侧压力测试值与标准 GB 50077—2017 预测值（式（1）、（2））在通道高度以上符合较好，而在通道高度范围内的仓壁侧压力测试值明显小于规范预测值，这一结论也同样适用于其他两个高径比（ $h_n/d_n=0.44, 0.95$ ）的浅圆仓。

$$p_{h,w1} = k\gamma_s s_1 \tag{1}$$

$$p_{h,w2} = k(\gamma_s h_n + \gamma_b s_2) \tag{2}$$

$$k = \tan^2(45^\circ - \varphi_i / 2) \tag{3}$$

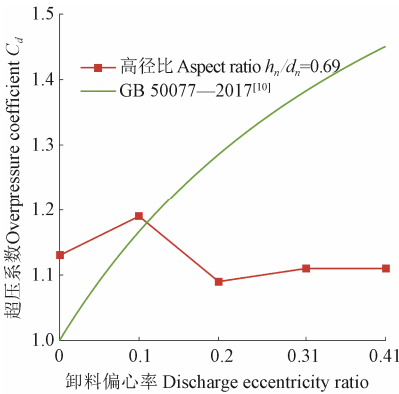
式中： $p_{h,w1}$ 为通道顶壁以上贮料产生的仓壁侧压力，kPa； $p_{h,w2}$ 为通道顶壁以下回填材料产生的仓壁侧压力，kPa； k 为侧压力系数； φ_i 为贮料或回填材料的内摩擦角， $(^\circ)$ ； γ_s 为贮料的容重， kN/m^3 ； γ_b 为回填材料的容重， kN/m^3 ，缩尺试验中回填材料采用了贮料石英砂； h_n 为贮料计算高度，m； s_1 为贮料锥体重心至计算截面的垂直距离，m。 s_2 为通道顶壁至计算截面的垂直距离，m。

表 2 不同高径比下仓壁和通道超压系数

Table 2 Overpressure coefficients of the wall and corridor under different aspect ratios

高径比 Aspect ratio	超压系数 Overpressure coefficients C_d									
	0°	45°	90°	135°	180°	MT	MR	ST	SL	SR
0.44	1.110	1.020	1.045	1.045	1.050	1.080	1.000	1.020	1.110	1.045
0.69	1.110	1.040	1.027	1.021	1.032	1.091	1.100	1.047	1.154	1.035
0.95	1.250	1.400	1.170	1.090	1.120	1.340	1.180	1.140	1.290	1.024

标准 GB 50077—2017 中对于高径比 h_n/d_n 介于 0.4~1.0 的浅圆仓中心卸料时，仓壁不考虑水平压力修正系数 C_h ，可以看作 1.0。对于偏心效应，设计人员常用标准 GB 50077—2017 中的偏心卸料压力系数 $E_{cc}=(d_n+4e)/(d_n+2e)$ 修正静态压力。图 7 给出了考虑偏心效应后的浅圆仓仓壁超压系数（ $C_d=E_{cc}$ ）的预测值与缩尺试验的测试值对比，可以发现，卸料偏心率较小时（ $e/d_n<0.2$ ），缩尺试验超压系数测试值稍大于标准 GB 50077—2017 的预测值；卸料偏心率较大时（ $e/d_n\geq 0.2$ ），标准 GB 50077—2017 的超压系数预测值基本偏于安全。



注： h_n, d_n 分别表示贮料计算高度和筒仓内径。
Note: h_n, d_n represent the calculation height of the stored material and the inner diameter of the silo respectively.

图 7 仓壁超压系数测试值与预测值的对比

Fig.7 Comparison between the test value and the predicted value of the overpressure coefficient of silo wall

2.3.2 通道结果对比

标准 GB 50077—2017 借鉴“隧道理论”^[28-30]将输料通道分为浅埋和深埋两类。判断依据：1) 贮料高度 H 与通道截面宽度 b_c 之比小于 1.5 为浅埋，大于等于 1.5 为深

埋; 2) 贮料高度 H 与地道卸料拱高度 h_g 之比小于等于 5 为浅埋, 大于 5 为深埋。其中第 2 条依据为通道深埋的必要条件。贮料高度 H 在标准 GB 50077—2017 通道静荷载示意图中定义为贮料锥形顶重心到通道顶壁。根据以上判断原则, 以主通道为例, 筒仓 ($h_n/d_n=0.44$) 的主通道为浅埋, 筒仓 ($h_n/d_n=0.69, 0.95$) 的主通道为深埋。

依据标准 GB 50077—2017, 深埋条件下通道顶壁压力 $p_{v,c1}$ 按照式 (4) 计算; 浅埋条件下通道顶壁压力 $p_{v,c2}$ 按照式 (5) 计算, 通道侧壁压力 $p_{h,c}$ 按照式 (6) 计算。

$$p_{v,c1} = \gamma_s h_g \quad (4)$$

$$p_{v,c2} = \gamma_s H \quad (5)$$

$$p_{h,c} = k \times (p_{v,c} + \gamma_b s_2) \quad (6)$$

式中 h_g 为卸料拱高度, m, $h_g=0.5l_g/f$; l_g 为卸料拱的跨度, m, $l_g=b_c+2h_c \tan(45^\circ-\varphi_{i,b}/2)$; h_c 为通道高度, m; b_c 为通道宽度, m; f 为贮料的内摩擦系数, $f=\tan(\varphi_{i,s})$; $\varphi_{i,s}$ 为贮料的内摩擦角 ($^\circ$); $\varphi_{i,b}$ 为回填材料的内摩擦角 ($^\circ$); $p_{v,c}$ 为深埋或浅埋条件下的通道顶壁压力, kPa。

如图 3b 所示, 标准 GB 50077—2017 将顶部贮料锥体等效为圆柱体后, 贮料高度 H 恒定为贮料计算高度 h_n , 无法反应沿通道轴线贮料高度的变化^[12], 更为严重的是通道被判定为深埋时, 通道压力预测值明显小于测试值, 偏于不安全。而主通道顶壁及侧壁的压力 ($p_{v,c}$, $p_{h,c}$) 分别依据浅埋公式 (5) 和公式 (6) 的理论值和试验测试值符合较好, 其中公式 (5) 中贮料高度 H 应取为通道计算截面的实际贮料高度。其他两个高径比 ($h_n/d_n=0.44, 0.95$) 浅圆仓主次通道顶壁及侧壁的压力分析同样证实了以上结论。因此建议浅圆仓 ($h_n/d_n=0.4\sim 1.0$) 的输料通道不区分浅埋和深埋, 均按照浅埋公式 (5) 和公式 (6) 分别计算主次通道顶壁及侧壁的压力。

目前通道顶壁和侧壁设计时往往不考虑超压系数, 但试验结果表明通道顶壁和侧壁均出现了一定程度的超压现象, 建议设计时适当考虑超压系数, 可取 $1.2\sim 1.3$ ^[11-12]。

3 结 论

本文通过开展不同高径比、不同偏心率的缩尺筒仓模型装卸料试验, 探讨地上输料通道对浅圆仓仓壁和通道受力的影响, 并与筒仓标准 GB 50077—2017 相关规定进行了对比分析。获得了以下主要研究结论:

1) 装料试验结果表明浅圆仓仓壁侧压力测试值与标准 GB 50077—2017 预测值在通道高度以上符合较好, 而在通道高度范围内的仓壁侧压力测试值明显小于规范预测值, 显然通道的存在影响了仓壁底部的静载侧压力分布。

2) 整个卸料过程可以归纳为一个倒锥不断下切的过程, 倒锥的顶点位于卸料口的正上方。缩尺卸料试验中没有观测到超压系数 C_d 随着卸料偏心率 e/d_n 增大而增大的现象。高径比 h_n/d_n 在 0.69 以下时, 仓壁和通道上超压系数普遍较小; 高径比 h_n/d_n 接近 1.0 时, 仓壁和通道上超压系数 C_d 迅速上升。在卸料偏心率较小时 ($e/d_n<0.2$), 缩

尺试验超压系数 C_d 测试值稍大于 GB 50077—2017 的预测值; 卸料偏心率较大时 ($e/d_n\geq 0.2$), 标准 GB 50077—2017 的预测值基本上偏于安全。

3) 浅圆仓主次通道顶壁及侧壁的静载压力依据本文提出浅埋公式计算更加合理, 其中贮料高度 H 应取为通道计算点的实际贮料高度。标准 GB 50077—2017 中贮料高度 H 恒定为贮料计算高度 h_n , 无法反应沿通道轴线贮料高度的变化, 更为严重的是通道被判定为深埋时, 通道压力预测值明显小于测试值, 偏于不安全。

4) 主通道顶壁离卸料口稍远距离的通道顶壁呈现明显的超压现象; 主通道侧壁的超压现象在卸料口附近最为严重; 次通道顶壁和右侧壁超压现象基本可以忽略; 次通道左侧壁因直接面对卸料口, 出现明显超压现象。建议设计时适当考虑通道的顶壁和侧壁超压系数, 可取 $1.2\sim 1.3$ 。

[参 考 文 献]

- [1] 张少坤. 大直径钢筋砼筒仓温度荷载和贮料荷载作用有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
Zhang Shaokun. Temperature Load and Storage Material Load Finite Element Analysis of Large-diameter Reinforced Concrete Silo[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [2] 尹君, 吴子丹, 张忠杰, 等. 不同仓型的粮堆温度场重现及对比分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 281-287.
Yin Jun, Wu Zidan, Zhang Zhongjie, et al. Comparison and analysis of temperature field reappearance in stored grain of different warehouses[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 281-287. (in Chinese with English abstract)
- [3] 谭援强, 肖湘武, 郑军辉, 等. 锥形改流体下部孔径对筒仓卸料流态的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 82-87.
Tan Yuanqiang, Xiao Xiangwu, Zheng Junhui, et al. Effect of outlet diameter of cone-in-cone insert on silo flow pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(19): 82-87. (in Chinese with English abstract)
- [4] 朱国庆. 储备粮仓库浅圆仓地下通廊火灾危险性及消防对策[J]. 消防科学与技术, 2002(7): 31-39.
Zhu Guoqing. Fire hazard in the underground passageway of silo and the corresponding countermeasures[J]. Fire Science and Technology, 2002(7): 31-39. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张伯羽. 基于 FLUENT 的筒仓地下设施通道流场仿真分析和改造工程实践[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
Zhang Boyu. Simulation and Reconstruction Project of Bulk Grain Silo Equipment Underpass Flow Field Based on Fluent[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [6] Hammadeh H, Askifi F, Ubysz A, et al. Effect of using insert on the flow pressure in cylindrical silo. Studia Geotechnica et

- Mechanica, 2019, 41(4): 177-183.
- [7] Chou C S, Lee A F, Yeh C K. Placement of a non-isosceles-triangle insert in an asymmetrical two-dimensional bin-hopper[J]. *Advanced Powder Technology*, 2009, 20(1): 80-88.
- [8] Wójcik M, Tejchman J, Enstad G G. Confined granular flow in silos with inserts full-scale experiments[J]. *Powder Technology*, 2012, 222: 15-36.
- [9] Haertl J, Ooi J Y, Rotter J M, et al. The influence of a cone-in-cone insert on flow pattern and wall pressure in a full-scale silo[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, 86(4): 370-378.
- [10] 钢筋混凝土筒仓设计标准 GB 50077—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [11] Eurocode 1-actions on structures-part 4: silos and tanks EN 1991-4: 2006[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [12] Design specification for concrete silos and stacking tubes for storing granular materials and commentary ACI 313-16[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2016.
- [13] Loads on Bulk Solids Containers AS3774-1996[S]. Sydney: Standards Australia, 1996.
- [14] 粮食钢板筒仓设计规范 GB50322—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
- [15] Tien H J. A Literature Study of the Arching Effect[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1996.
- [16] 徐超, 张兴亚, 韩杰, 等. 加载条件对土拱效应影响的 Trapdoor 模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(4): 726-732.
- Xu Chao, Zhang Xingya, Han Jie, et al. Trapdoor model tests on impact of loading conditions on soil arching effect[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(4): 726-732. (in Chinese with English abstract)
- [17] Schulze D. Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow[M]. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2007.
- [18] Ghali A. Circular Storage Tanks and Silos[M]. Third edition, Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [19] 张大英, 许启铿, 王树明, 等. 筒仓动态卸料过程侧压力模拟与验证[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 272-278, 316.
- Zhang Daying, Xu Qikeng, Wang Shuming, et al. Simulation and experimental validation of silo wall pressure during discharging[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(5): 272-278, 316. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张翀, 舒赣平. 落地式钢筒仓卸料的模型试验研究[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2009, 39(3): 531-535.
- Zhang Chong, Shu Ganping. Experimental research of ground-supported steel silo model's discharge[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2009, 39(3): 531-535. (in Chinese with English abstract)
- [21] 韩阳, 李东桥, 陈家豪, 等. 筒仓静态储粮的边界压力及仓壁摩擦力试验研究[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(13): 296-302.
- Han Yang, Li Dongqiao, Chen Jiahao, et al. Experimental study on boundary pressure and wall friction under static grain storage in silo[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(13): 296-302. (in Chinese with English abstract)
- [22] 卢赛. 大直径混凝土浅圆仓偏心卸料下仓壁侧压力试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- Lu Sai. Research on Wall Pressure in Large-diameter Concrete Squat Silos under Eccentric Discharge[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘干斌, 谢琦峰, 范高飞, 等. 饱和黏土中热交换桩承载力特性模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017(10): 199-207.
- Liu Ganbin, Xie Qifeng, Fan Gaofei, et al. Model test on bearing capacity characteristics of heat exchanger piles in saturated clays[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017(10): 199-207. (in Chinese with English abstract)
- [24] Safarian S S. Design and Construction of Silos and Bunkers[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.
- [25] 朱亚智. 大直径预应力混凝土筒仓偏心卸料研究[D]. 南京: 东南大学, 2013.
- Zhu Yazhi. Research on Large-diameter Prestressed Concrete Squat Silo under Eccentric Discharge[D]. Nanjing: Southeast University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [26] 朱亚智, 孟少平, 孙巍巍. 偏心卸料下大直径浅圆仓侧压力计算[J]. *工程力学*, 2013, 30(8): 67-77.
- Zhu Yazhi, Meng Shaoping, Sun Weiwei. Calculation of lateral pressure in squat silo with large diameter under eccentric discharge[J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(8): 67-77. (in Chinese with English abstract)
- [27] 程奇鹏, 孙巍巍, 卢赛. 基于 PFC3D 的浅圆仓偏心卸料离散元研究[J]. *土木工程与管理学报*, 2016, 33(6): 43-47.
- Cheng Qipeng, Sun Weiwei, Lu Sai. Discrete element analysis of squat silo under eccentric discharge by PFC3D[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016, 33(6): 43-47. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王长柏, 汪鹏程. 隧道工程[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2020.
- [29] 公路隧道设计规范第一册土建工程 JTG 3370. 1—2018[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [30] 铁路隧道设计规范 TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.

Influences of the ground conveying corridors on the pressure of the wall and corridor in squat silos

Sun Weiwei¹, Feng Jun^{2*}, Zhu Jianping³, Zhang Xudong¹, Yi Jianrong³, Wang Lei³

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. Sinoma International Engineering Co., Ltd. (Nanjing), Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to facilitate later maintenance, the underground conveying corridor is moved up to the inside of the squat silo. This process reform is bound to have an impact on the pressure distribution of the wall and corridor. In this study, the loading and discharge experiments of the reduced-scale silo models with different aspect ratios and eccentricity ratios were carried out. Three kinds of PMMA cylinders with different heights were used to simulate the wall. The outer diameter of the cylinder is 1 000 mm, the wall thickness is 10 mm, and the height is 392 mm, 642 mm, and 892 mm, respectively. Three different lengths of ground conveying corridors are made of 10 mm thick steel plate, which are one main corridor and two secondary corridors. The strip eccentricity of the main corridor is zero, and that of the two secondary corridors is 300 mm. In order to consider the influence of eccentricity ratios, five discharge openings are set on the top wall of the main corridor to simulate central and eccentric discharge. In order to explore the influence of aspect ratios, three silos with different aspect ratios (0.44, 0.69, 0.95) are used. The cylinder and the corridors are placed on the steel support. A total of three main and secondary corridors were placed in the silo model, and the manual loading mode was adopted. All the openings on the top wall of the corridors were blocked first, and then the stored material was loaded from the top of the model. When the stored material in the full state of the model was completely stable, the pressure data were recorded by the test system. The results of the loading tests showed that the lateral pressure at the bottom of the silo wall was affected by the corridors. The lateral pressure of the wall in the corridor height range is significantly smaller than the predicted value of the silo standard. The whole discharge process can be summed up as a process of continuous undercutting of the inverted cone, and the vertex of the inverted cone is always located directly above the discharge opening. The phenomenon that the overpressure coefficient increases with the eccentricity of discharge was not observed. The overpressure coefficients of the wall and corridor were generally small when the aspect ratio was below 0.69, and the overpressure coefficients of the wall and corridor increases rapidly when the aspect ratio was close to 1.0. If the conveying corridor was determined as a deep buried corridor according to the standard GB 50077-2017, the predicted value of corridor pressure was obviously less than the test value. It was more reasonable to calculate the static pressure on the top and side wall of the main and secondary corridors according to the shallow buried formula proposed in this study, in which the storage height should be taken as the actual storage height of the corridor. It is suggested that the coefficient of overpressure on the top and side wall of the corridor should be considered properly in the design of squat silos, which can be 1.2-1.3.

Keywords: silos; experiment; pressure; corridor; overpressure coefficient; aspect ratio; eccentricity ratio