

地震作用下筒仓结构贮料侧压力计算方法

周长东[†], 张泳, 邱意坤, 梁立灿, 阿斯哈
(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要:为了对筒仓结构进行合理的抗震设计,得到实际工程中实用的贮料侧压力,引入“施卫星”地震作用下贮料侧压力计算方法,以工程设计中能够获得的材料参数为基础,确定贮料侧压力计算中所需要的修正参数;然后利用 ABAQUS 建立筒仓结构数值模型进行计算分析,根据获得的贮料侧压力变化曲线拟合得出相应参数的修正值;综合不同参数,归纳出考虑筒仓-贮料相互作用的贮料侧压力修正公式;最后,将贮料侧压力修正公式所得的计算值与既有试验数据及规范设计值进行对比分析.结果表明,采用本文公式得到的计算值与试验值吻合较好,能够真实合理地反映实际地震作用下贮料侧压力分布;考虑强震作用下贮料侧压力按照规范设计值设计偏于危险,而按照本文计算公式设计更加经济可靠.

关键词:钢筋混凝土筒仓;地震作用;贮料侧压力;计算方法;抗震设计
中图分类号: TU279.7 **文献标志码:** A

Calculating Method on Storage Side Pressure of Silo Structures under Earthquake

ZHOU Changdong[†], ZHANG Yong, QIU Yikun, LIANG Lican, A Siha
(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to get reasonable seismic design for silo structures and obtain the practical calculated value of storage side pressure, the “Shi Weixing” calculation method of storage side pressure under the earthquake is introduced at first. Based on the material parameters which can be obtained in engineering design, the revised parameters needed in the calculation of storage side pressure are determined. Then, the numerical model of silo structure is established with ABAQUS to calculate the side pressure variation curve and the correction values of the corresponding parameters are obtained by curve fitting. Modified formulas of side pressure considering silo-storage interaction are summarized by synthesizing different parameters. Finally, the calculated values obtained from the modified formula of storage side pressure are compared with the existing test data and the design values of the code. The results show that the calculated values are in good agreement with the experimental values and can reflect the real and reasonable storage side pressure. Compared with the results, the storage side pressure under the action of strong earthquake is dangerous according to the design value of the code, which means that the proposed calculation formula in this paper is more economical and reliable.

Key words: reinforced concrete silo; seismic action; storage side pressure; calculation method; seismic design

* 收稿日期:2019-11-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678039), National Natural Science Foundation of China(51678039)

作者简介:周长东(1971—),男,山东聊城人,北京交通大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: zhouchangdong@163.com

在钢筋混凝土筒仓的抗震设计中,通常将筒仓当作悬臂结构来计算整个结构根部的内力,并采用截面强度设计,忽略了贮料侧压力对筒仓壁的影响。实际上,该侧压力变化将在仓壁的圆周方向上引起弯曲应力,这对于筒仓这类薄壁结构是不利的。

近年来国内外学者对于筒仓贮料侧压力进行了广泛的研究。施卫星等^[1-2]对 2 个 1:10 钢筋混凝土圆筒仓结构模型进行了振动台试验,研究了地震作用下筒仓的动力响应和破坏形式,根据试验结果提出了储煤对仓壁侧压力计算方法;Holler 等^[3]对动态激发下的存储颗粒材料的筒仓进行了有限元数值模拟,并将采用该模型获得的数值模拟结果与在法国 Saclay 的振动台试验结果进行了比较分析;张翀等^[4-5]分析了各种卸料工况下仓壁应变的变化规律;赵松^[6]进行了钢筒仓侧压力模型试验,得到了筒仓结构静止及卸料状态下的贮料侧压力分布曲线;周长东等^[7]针对筒仓静力作用提出了一种散粒体的亚塑性本构模型,分析了贮料对仓壁的静止侧压力;庞照昆等^[8]通过模型试验方法,研究了筒仓在侧壁卸料与中心卸料的动态超压现象。

目前的研究大多集中于静力状态以及卸料状态下贮料侧压力的变化^[9-13],主要通过理论分析法、有限单元法以及离散元法进行分析,而少有对于地震作用下贮料侧压力分布的研究。考虑地震作用时,离散元法虽然可以较好地模拟颗粒之间的相互作用,但输入地震波的困难让该方法难以应用;有限元法数值计算的精度及稳定性高,但是由于其对特定结构进行数值分析,并不能得出一个普遍的贮料侧压力计算方法;理论分析法在地震作用下受多种因素的限制,并不能单独通过公式推导得出所需的计算参数^[14]。

本文首先对地震作用下考虑筒仓-贮料相互作用的贮料侧压力计算方法进行理论分析,确定贮料侧压力计算中所需要的修正参数;然后利用 ABAQUS 建立筒仓结构数值模型进行计算,获取与影响参数相应的贮料侧压力变化曲线;随后对贮料侧压力变化曲线进行拟合,得到相应参数在贮料侧压力计算中的修正值;之后综合不同参数拟合结果,归纳出考虑筒仓-贮料相互作用的贮料侧压力修正公式;最后,将根据贮料侧压力修正公式所得的计算值与既有试验数据及规范设计值进行对比分析,验证计算公式的合理性。

1 地震作用下贮料侧压力计算

目前针对地震作用下贮料侧压力计算方法的研究中,仅有施卫星等通过试验与理论相结合的形式,推导出符合相应试验模型的地震作用下贮料侧压力计算方法^[2]。因此,本文结合数值模拟的方法,在“施卫星”计算方法的基础上进行修正,得到可在实际工程应用的地震作用下贮料侧压力计算方法。

1.1 “施卫星”计算方法

施卫星等^[2]提出以计算筒仓贮料质心处的煤侧压力为主,再通过各种修正系数去计算贮料上层及底层的侧压力的计算方法。

当地震作用于筒仓时,在其贮料质心处的绝对加速度为 S_a , 对称压力 P_{ce} 不可能使贮料产生加速度,而偏心压力 $P_{ce}(\theta)$ 使贮料产生了 S_a 加速度,假设 $P_{ce}(\theta)$ 的分布满足:

$$P_{ce}(\theta) = \left| 1 - \frac{\theta}{\pi} \right| P_c, 0 \leq \theta \leq 2\pi. \quad (1)$$

式中: $P_c = P_{\min} + P_{\max}$ 为地震作用下贮料侧压力变化值。

$P_{ce}(\theta)$ 在 x 方向上的合力为

$$F = \int_0^{2\pi} \left| 1 - \frac{\theta}{\pi} \right| P_c \cos\theta \cdot R d\theta = 4RP_c/\pi. \quad (2)$$

因为 $F = \pi R^2 \gamma S_a / g$, 所以 $P_c = \pi^2 R \gamma S_a / 4g$ 。

考虑到贮料质心加速度是贮料侧压力及贮料层间摩擦力共同作用的结果,因此使得计算所得侧压力与实际值有所差别,施卫星对该公式进行了修正:

$$P_c = C_e \pi^2 R \gamma S_a / 4g. \quad (3)$$

式中: C_e 由试验结果确定,与测点位置、台面加速度、贮料内摩擦角和湿度等因素有关。

为求解出工程设计时考虑的最大贮料侧压力 P_{\max} , 需先计算最小贮料侧压力 P_{\min} :

$$P_{\min} = (1 - e^{-a}) C_p P_h. \quad (4)$$

$$C_p = \begin{cases} 4.0, & \text{上部 } h/3; \\ 2.0, & \text{中部 } h/3; \\ 4.0, & \text{下部 } h/3. \end{cases} \quad (5)$$

$$a = P_c / 2C_p P_h. \quad (6)$$

式中: h 为贮料高度; C_p 为超压系数; P_h 为 Janssen 静压力。

综上,考虑筒仓-贮料相互作用的贮料侧压力计算方法需要确定 6 个参数:筒仓半径、贮料质心处加速度、计算截面位置、贮料容重、内摩擦角、贮料与仓壁摩擦因数。

1.2 简化计算方法

应用公式(3)进行地震作用下贮料侧压力计算时,需要输入贮料质心处加速度.而工程设计时,无法直接得到贮料质心加速度,可通过综合考虑测点位置、贮料内摩擦角及摩擦因数等因素,对台面加速度进行相应修正后^[2],得到:

$$C_e = C_g C_h C_\phi C_\mu. \quad (7)$$

式中: C_g 为考虑地震强度的修正系数; C_h 为考虑贮料高度的修正系数; C_ϕ 为考虑贮料内摩擦角的修正系数; C_μ 为考虑摩擦因数的修正系数.

在求解出地震作用下贮料侧压力变化值 P_e 后,需要确定地震作用下最小贮料侧压力 P_{\min} 来确定最大贮料侧压力 P_{\max} .根据文献[15]中提供的筒仓在静力状态以及地震作用下的贮料侧压力数值模拟分析结果可看出,筒仓结构在地震作用下的最小贮料侧压力 $P_{\min} <$ 静力状态下贮料侧压力,与施卫星定义下的 P_{\min} 计算公式相悖.在工程设计时通常将最大贮料侧压力 P_{\max} 作为主要设计影响因素,因此对地震作用下最大贮料侧压力 P_{\max} 进行简化计算,综合考虑式(3)与式(7)对最大贮料侧压力 P_{\max} 进行修正,即:

$$P_{\max} = C_{\max} \pi^2 R \gamma S_a / 4g, \quad (8)$$

$$C_{\max} = C_{g,\max} C_{h,\max} C_{\phi,\max} C_{\mu,\max}. \quad (9)$$

式中: $C_{g,\max}$ 为考虑地震强度的最大贮料侧压力修正系数; $C_{h,\max}$ 为考虑贮料高度的最大贮料侧压力修正系数; $C_{\phi,\max}$ 为考虑贮料内摩擦角的最大贮料侧压力修正系数; $C_{\mu,\max}$ 为考虑摩擦因数的最大贮料侧压力修正系数.

筒仓结构设计时,根据结构所在地区的环境参数和设定的材料参数,建立有限元分析模型,选取合理的地震波进行筒仓结构的地震响应分析,获取公式(9)中的修正系数,即可计算得到设计所需的最大贮料侧压力.

2 筒仓结构有限元分析模型

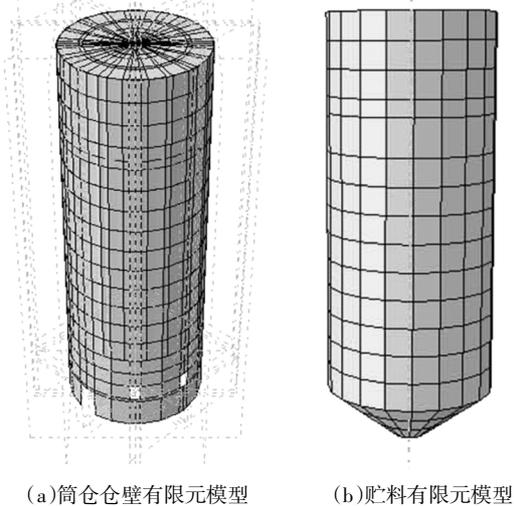
2.1 工程概况

以浙江某粮库的筒仓结构为工程背景,将钢筋混凝土筒仓群中的单一筒仓作为设计模拟的原型(如图1所示).建筑物总高度35.0 m,粮食装载高度27.0 m,筒仓单仓内径12.0 m,筒仓壁厚0.22 m;环梁尺寸为0.4 m × 0.8 m,门洞尺寸为1.8 m × 2.7 m,窗洞尺寸为0.9 m × 1.5 m.抗震设防烈度为7度,设计地震组为第一组.抗震设防类别为乙类,框架抗震设

防等级为二级,场地类别为Ⅲ类^[16].

2.2 ABAQUS 有限元模型

采用ABAQUS软件对所选取的单仓结构建立分析模型(见图1).选用混凝土损伤塑性本构模拟仓壁的混凝土材料(见表1),混凝土的单轴本构曲线采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)附表C.2中的推荐公式;选用理想弹塑性本构模拟钢筋(见表2);选用摩尔库伦本构模拟贮料(见表3).



(a)筒仓仓壁有限元模型 (b)贮料有限元模型

图1 筒仓结构有限元模型

Fig.1 Finite element model of silo structure

表1 混凝土损伤塑性本构参数取值

Tab.1 Parameters of concrete damaged plasticity model

膨胀角/(°)	偏心率	双轴与单轴极限抗压强度比	不变应力比
38	0.1	1.16	0.667
黏聚系数	弹性模量/GPa	泊松比	
0.000 2	30	0.2	

表2 钢筋理想弹塑性本构参数取值

Tab.2 Parameters of elastic plastic model for steel bars

屈服应力/MPa	极限拉应力/MPa	弹性模量/GPa	极限拉应变
400	600	210	0.14

表3 贮料摩尔库伦本构参数取值

Tab.3 Parameters of Mohr-Coulomb model

内摩擦角/(°)	膨胀角/(°)	弹性模量/MPa	泊松比
28	0	20	0.2

利用ABAQUS中S4单元模拟筒仓仓壁,利用C3D8R单元模拟贮料;利用ABAQUS自带的“接触

对”来模拟仓壁与贮料的接触关系,其中选取仓壁内表面为主接触面,两者之间的摩擦因数为 0.4.

2.3 模型验证

由模型试验^[14]知,满仓状态下,在地震烈度为 7 度多遇和 7 度基本时,上海人工波 SHW2 对单仓 y 方向影响较大,因此在筒仓数值模型底部施加 SHW2 波进行动力时程分析.为验证单仓模型的合理性,提取单仓模型 y 方向单元最大加速度以及最大相对位移、自振频率值,与相应的筒仓结构模型试验结果进行对比,对比结果详见图 2 和图 3.

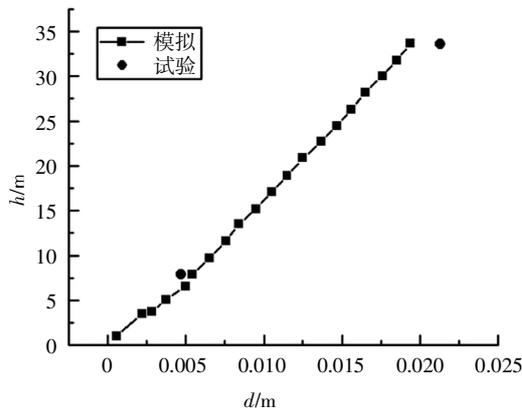


图 2 数值模拟与振动台试验对比(位移)
Fig.2 Comparison of experimental data and FEM results (displacement)

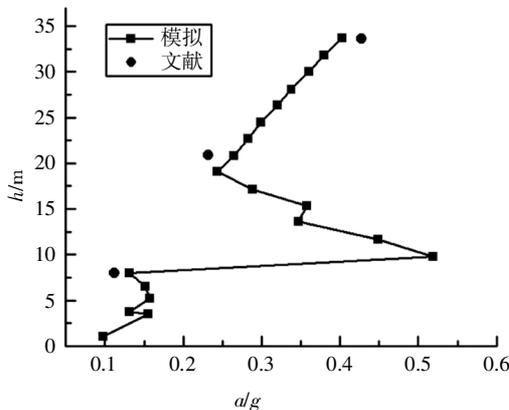


图 3 数值模拟与振动台试验对比(加速度)
Fig.3 Comparison of experimental data and FEM results(acceleration)

通过有限元模拟分析,得到满仓状态下数值模型的自振频率为 2.617 Hz. 振动台试验获取单仓一阶频率后,通过相似系数返回原型结构得到的原型结构自振频率为 2.631 Hz. 如图 2 和图 3 所示,将有限元模拟提取的最大加速度和最大相对位移值与单仓试验数据进行比较,偏差均在 5%之内. 因此,本文

建立的单仓数值模型与振动台试验模型吻合较好,证明了数值模型的合理性.

3 最大贮料侧压力计算参数分析

采用增量动力分析(Incremental Dynamic Analysis, IDA)方法,针对不同地震波的峰值地面加速度(Peak Ground Acceleration, PGA)进行调幅并在数值模型底部输入,得到时程分析结果.为获取式(9)中的相应参数,需要拟合不同工况下贮料侧压力求解修正参数.在进行数值模拟计算时,单一模型输入的参数包括了地震动强度、贮料高度、内摩擦角以及摩擦因数,因此获得的贮料侧压力分布曲线不能直接通过拟合得到单一的修正参数.本文假定当 $PGA = 0.1g, \phi = 28^\circ, \mu = 0.40$ 条件下的筒仓贮料侧压力修正系数为 1,即 $C_{g=0.1, \max} = 1, C_{\phi=28^\circ, \max} = 1, C_{\mu=0.4, \max} = 1$,在此条件下,通过变换不同参数进行数值模拟,将所得贮料侧压力分布曲线进行拟合.

3.1 地震波的选取

根据原型筒仓的工程概况,按《建筑抗震设计规范》^[17]的要求选取两条天然波和一条人工波进行时程分析,分别选用 El-Centro 波、NGA#178 号地震波以及上海人工地震波 SHW2 波输入数值模型底部进行研究.图 4 所示为所选地震波的平均反应谱,与建筑抗震设计规范中的设计反应谱吻合较好.

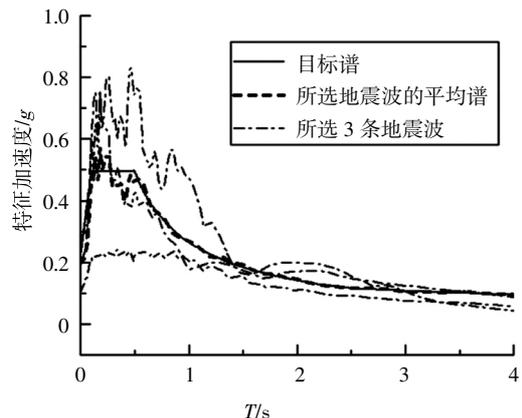


图 4 所选地震反应谱

Fig.4 Response spectra of the selected input ground motions

图 5、图 6、图 7 分别为考虑地震动强度、内摩擦角以及摩擦因数影响下的最大贮料侧压力分布曲线,可发现贮料高度在不同参数中对最大贮料侧压力的影响最为明显.因此,首先考虑以 $PGA = 0.1g$ 时筒仓最大贮料侧压力曲线为基准,对考虑贮料高度

的最大贮料侧压力参数 $C_{h,max}$ 进行拟合;随后对不同参数影响下最大贮料侧压力分布曲线进行拟合,确定不同参数影响下的最大贮料侧压力修正系数。

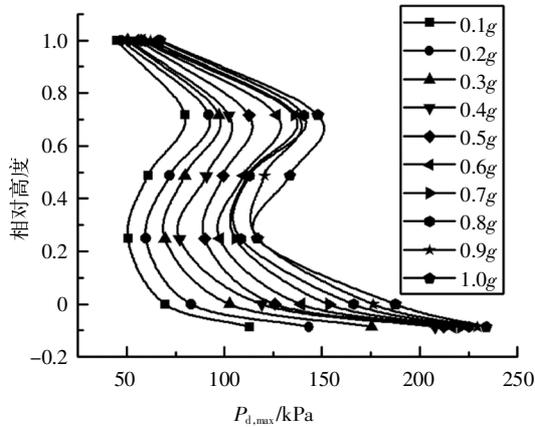


图5 不同地震强度的最大贮料侧压力分布曲线
Fig.5 Maximum storage side pressure distributions of silo under different PGA

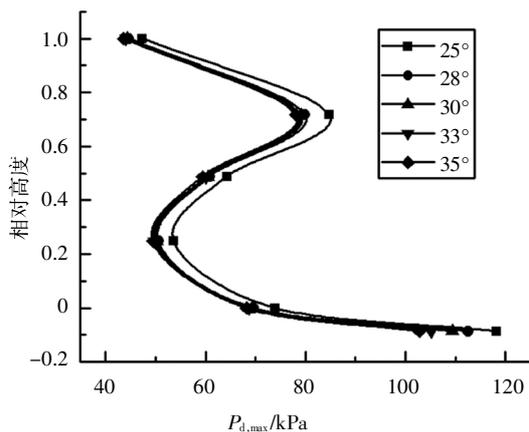


图6 不同内摩擦角的最大贮料侧压力分布曲线
Fig.6 Maximum storage side pressure distributions of silo under different internal friction angles

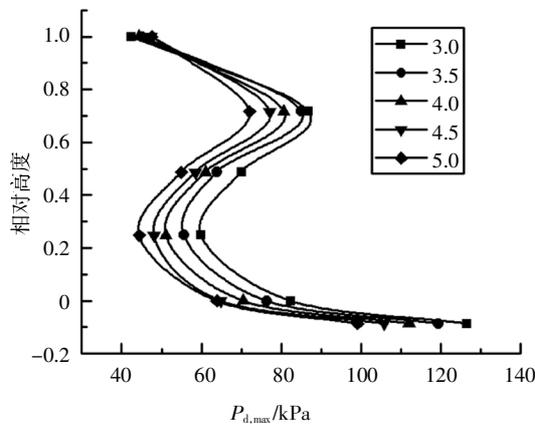


图7 不同摩擦因数的最大贮料侧压力分布曲线
Fig.7 Maximum storage side pressure distributions of silo under different friction coefficients

3.2 考虑贮料高度的最大贮料侧压力参数

采用 $PGA = 0.1g$ 、贮料参数为 $\phi = 28^\circ$ 、 $\mu = 0.40$ 的筒仓模型进行数值模拟计算,选用此参数可排除地震动强度、内摩擦角及贮料与仓壁的摩擦因数的影响.为求解考虑高度的最大贮料侧压力参数,将式(8)、式(9)进行变形,得:

$$C_{h,max} = \frac{P_{d,max}}{C_{g,max} C_{\phi,max} C_{\mu,max} \pi^2 R \gamma S_a / 4g} \quad (10)$$

式中: $P_{d,max}$ 是仓壁受到的最大动压力。

图8所示为筒仓结构在 $PGA = 0.1g$ 地震作用下沿高度方向修正系数分布曲线.可以看出,筒仓沿高度方向的修正系数曲线可分为四段,分别为漏斗处、筒仓仓壁相对高度 $0 \sim 0.25$ 、相对高度 $0.25 \sim 0.75$ 、相对高度 $0.75 \sim 1.0$.选取筒仓仓壁相对高度为 0 、 0.25 、 0.5 、 0.75 、 1 处的修正系数进行分段拟合,如图9所示。

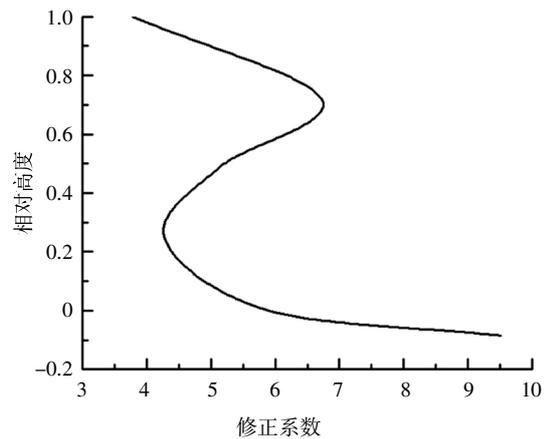


图8 $PGA = 0.1g$ 地震作用下的 $C_{h,max}$
Fig.8 $C_{h,max}$ under $0.1g$ PGA

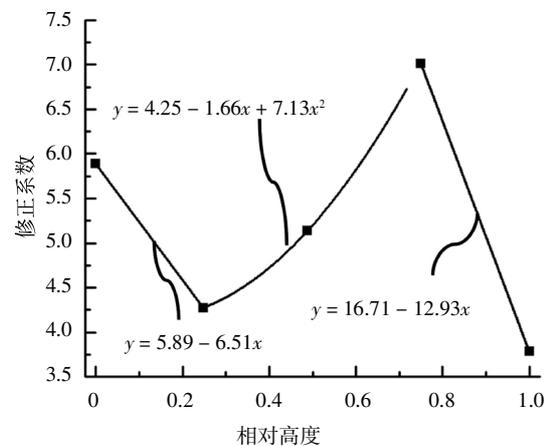


图9 考虑贮料高度的贮料侧压力修正系数拟合
Fig.9 Fittings of storage side pressure's correction coefficient considering storage height

根据图 9 所示拟合结果,筒仓侧压力高度修正参数公式为:

$$C_{h,max} = \begin{cases} 9.51, & \text{漏斗 } 1/2 \text{ 处;} \\ 5.89 - 6.51h_m, & 0 \leq h_m \leq 0.25; \\ 4.25 - 1.66h_m + 7.13h_m^2, & 0.25 < h_m < 0.75; \\ 16.71 - 12.93h_m, & 0.75 \leq h_m \leq 1. \end{cases} \quad (11)$$

$$h_m = h'_{料} / h'_{总} \quad (12)$$

式中: $h'_{料}$ = 贮料侧压力高度-漏斗高度; $h'_{总}$ = 贮料总高度-漏斗高度.

3.3 考虑地震动强度的最大贮料侧压力参数

考虑贮料高度对筒仓侧压力计算的影响后,采用贮料参数为 $\phi = 28^\circ$ 、 $\mu = 0.40$ 的筒仓模型进行数值模拟计算,选用此参数可以排除内摩擦角、贮料与仓壁的摩擦因数的影响.为求解考虑地震动强度的最大贮料侧压力参数,将式(8)(9)进行变形,得:

$$C_{g,max} = \frac{P_{d,max}}{C_{h,max} C_{\phi,max} C_{\mu,max} \pi^2 R \gamma S_a / 4g} \quad (13)$$

图 10 所示是筒仓结构在不同地震动强度下的 $C_{g,max}$ 分布曲线.由图 10 可知,筒仓结构在不同高度处 $C_{g,max}$ 的变化规律不同.图 11 分别对位于筒仓漏

斗处、筒仓仓壁相对高度为 0、0.25、0.5、0.72、1 处不同地震动强度的 $C_{g,max}$ 进行拟合,可以发现:在相对高度 >0 的筒仓仓壁部位,PGA = 0.1g ~ 0.5g 时筒仓地震强度修正系数呈线性分布,PGA = 0.6g ~ 1.0g 时筒仓地震强度修正系数的分布形式为二次函数;在筒仓结构漏斗处,PGA = 0.1g ~ 0.4g 时筒仓结构地震强度修正系数呈线性分布,PGA = 0.5g ~ 1.0g 时修正系数分布形式为斜率不同的直线.因此,分段讨论分布函数公式.

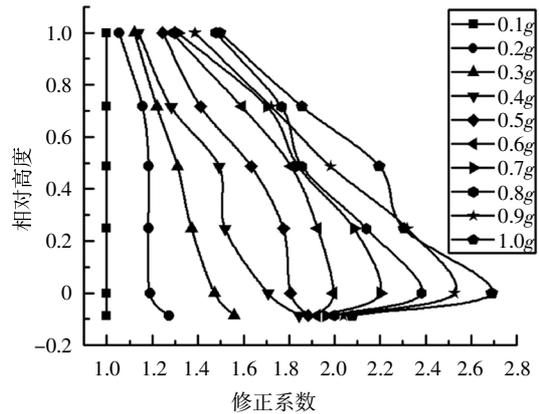


图 10 地震作用下的 $C_{g,max}$
Fig.10 $C_{g,max}$ under earthquake

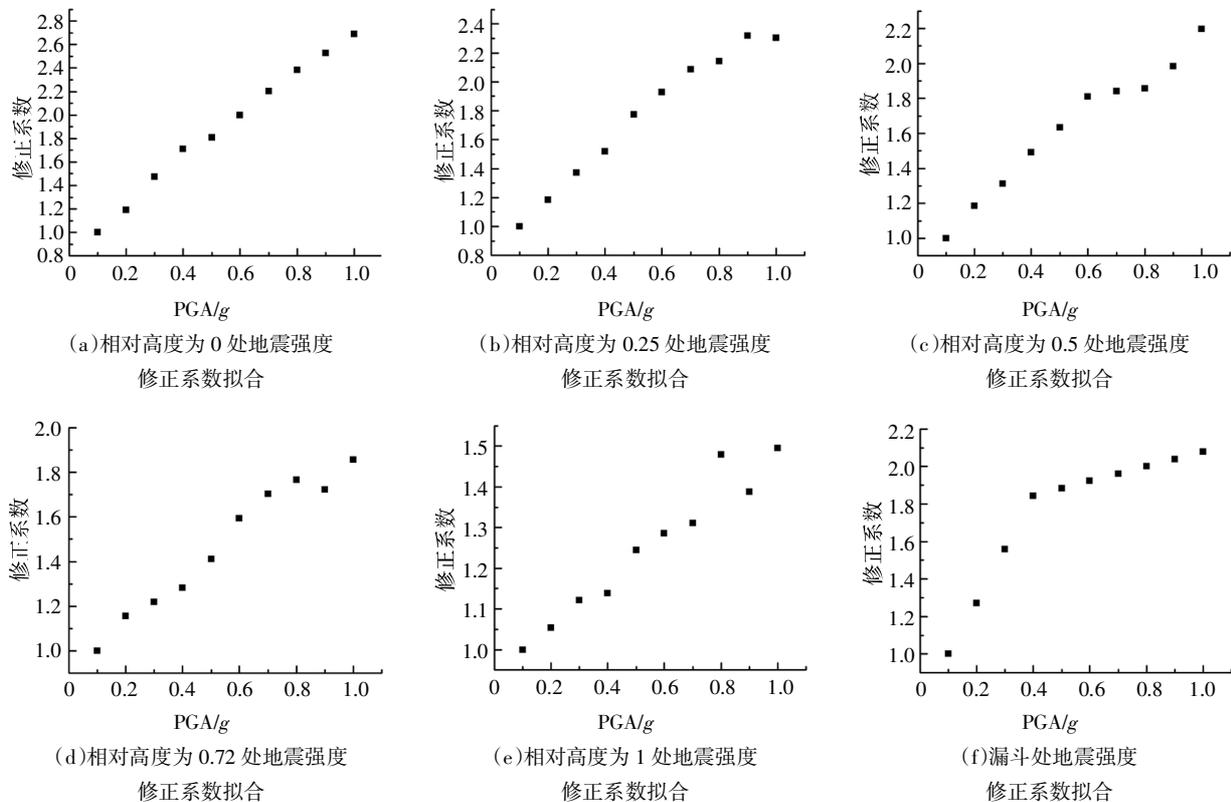


图 11 考虑地震动强度的贮料侧压力修正系数拟合

Fig.11 Fittings of storage side pressure's correction coefficient considering ground motion intensity

拟合分析后得出地震强度修正系数如下。

位于漏斗处时,

$$C_{g,\max} = \begin{cases} 0.71 + 2.82x, & x \leq 0.4g; \\ 1.69 + 0.39x, & x > 0.5g. \end{cases} \quad (14)$$

位于筒仓结构仓壁处时,

$$C_{g,\max} = \begin{cases} a + bx, & x \leq 0.5g; \\ c + dx + ex^2, & x \geq 0.6g. \end{cases} \quad (15)$$

式中: $a = 0.80 + 0.14h_m$; $b = 2.12 - 1.52h_m$; $c = 0.45$; $d = 3.04$; $e = 1.2$.

3.4 考虑内摩擦角的最大贮料侧压力参数

为研究贮料之间的不同摩擦因数对贮料侧压力的影响, 考虑选用 $\phi = 25^\circ, 28^\circ, 30^\circ, 33^\circ, 35^\circ$ 五种内摩擦角进行计算. 本节采用贮料参数为 $PGA = 0.1g$ 、 $\mu = 0.40$ 的筒仓模型进行数值模拟计算, 选用此参数可以排除地震动强度、贮料与仓壁的摩擦因数的影响. 为求解考虑内摩擦角的最大贮料侧压力参数, 将式(8)、式(9)进行变形, 得:

$$C_{\phi,\max} = \frac{P_{d,\max}}{C_{g,\max} C_{h,\max} C_{\mu,\max} \pi^2 R \gamma S_a / 4g}. \quad (16)$$

图 12 是筒仓结构在 $PGA = 0.1g$ 的地震作用下不同摩擦角修正系数分布曲线. 由图 12 可知, 随着贮料内摩擦角的增大, 考虑内摩擦角的最大贮料侧压力参数逐渐减小; 当位于筒仓结构漏斗处时, 随着内摩擦角的变化, 考虑内摩擦角的最大贮料侧压力参数变化量基本相同; 当位于筒仓结构中上部时, 相同高度处随着内摩擦角的变化, 考虑内摩擦角的最大贮料侧压力参数变化量有较大差异. 因此, 对该参数进行分段考虑, 分别选取不同内摩擦角的漏斗处修正系数及筒仓仓壁相对高度为 0、0.25、0.5、0.72、1 处修正系数平均值进行拟合, 如图 13 所示.

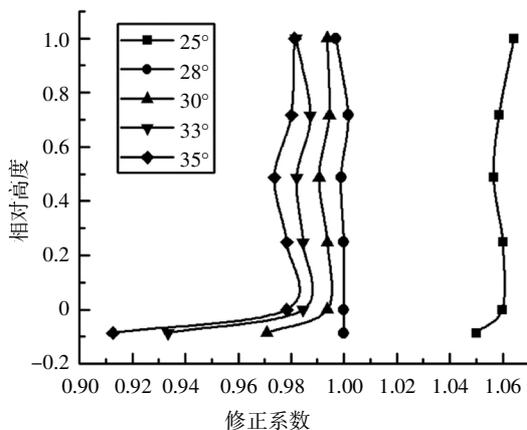


图 12 $PGA = 0.1g$ 下不同内摩擦角的 $C_{\phi,\max}$

Fig.12 $C_{\phi,\max}$ at different internal friction angles under 0.1g PGA

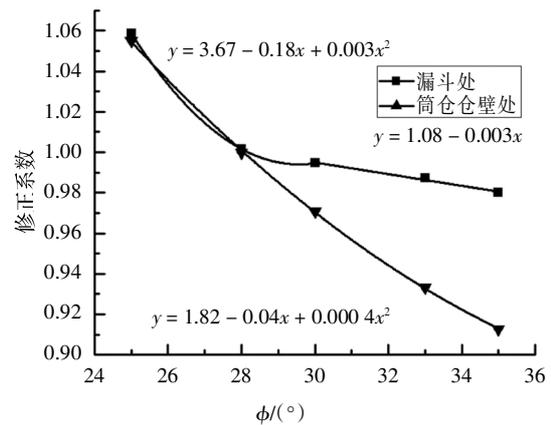


图 13 考虑内摩擦角的贮料侧压力修正系数拟合

Fig.13 Fittings of storage side pressure's correction coefficient considering internal friction angle

图 13 为漏斗处及筒仓仓壁处的 $C_{\phi,\max}$ 拟合分析, 考虑 28° 的内摩擦角修正系数为 1, 即修正系数公式如下.

位于漏斗处时,

$$C_{\phi,\max} = 1.82 - 0.04\phi + 0.0004\phi^2. \quad (17)$$

位于筒仓结构仓壁处时,

$$C_{\phi,\max} = \begin{cases} 3.67 - 0.18\phi + 0.003\phi^2, & \phi < 30^\circ; \\ 1.08 - 0.003\phi, & \phi \geq 30^\circ. \end{cases} \quad (18)$$

3.5 考虑摩擦因数的最大贮料侧压力参数

为研究贮料与仓壁之间不同摩擦因数对贮料侧压力的影响, 考虑采用 $\mu = 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50$ 五种摩擦因数进行计算. 采用贮料参数为 $PGA = 0.1g$ 、 $\phi = 28^\circ$ 的筒仓模型进行数值模拟计算, 选用此参数可以排除地震动强度、贮料内摩擦角的影响. 为求解考虑摩擦因数的最大贮料侧压力参数, 将式(8)、式(9)进行变形, 得:

$$C_{\mu,\max} = \frac{P_{d,\max}}{C_{g,\max} C_{h,\max} C_{\phi,\max} \pi^2 R \gamma S_a / 4g}. \quad (19)$$

图 14 所示是筒仓结构在 $PGA = 0.1g$ 地震作用下不同摩擦因数的修正系数分布曲线. 由图 14 可知, 随着筒仓仓壁与贮料摩擦因数的增大, $C_{\mu,\max}$ 逐渐减小; 当位于筒仓结构漏斗处时, 随着摩擦因数的变化, $C_{\mu,\max}$ 的变化量基本相同; 当位于筒仓结构中下部时, 摩擦因数引起的筒仓结构 $C_{\mu,\max}$ 的变化量随着高度的增加基本不变; 当位于筒仓结构上部时, 摩擦因数引起的筒仓结构 $C_{\mu,\max}$ 的变化量随着高度的增加而减小. 因此, 考虑将高度与摩擦因数的影响结合, 进行分段考虑.

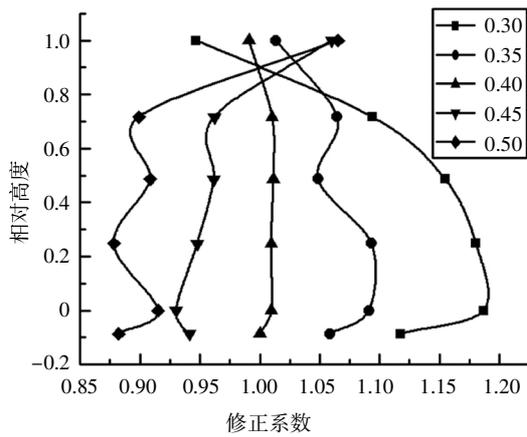


图 14 PGA = 0.1g 下不同摩擦因数的 $C_{\mu, \max}$

Fig.14 $C_{\mu, \max}$ at with different friction coefficients under 0.1g PGA

图 15 所示为漏斗处的 $C_{\mu, \max}$ 的拟合分析, 考虑摩擦因数为 0.40 时的修正系数为 1, 即修正系数公式为:

$$C_{\mu, \max} = 1.48 - 1.20\mu. \quad (20)$$

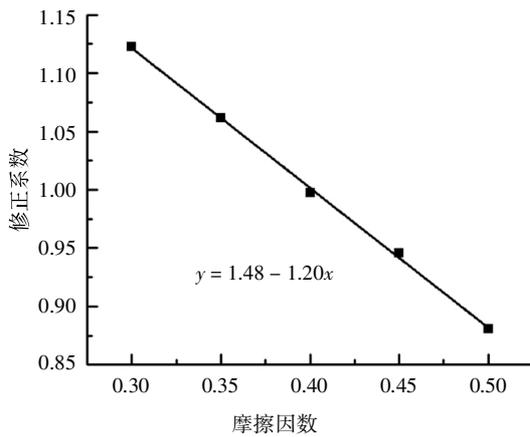


图 15 漏斗处摩擦系数修正系数拟合

Fig.15 Fittings of storage side pressure's correction coefficient at funnel

图 16 (a) 所示为筒仓中下部的 $C_{\mu, \max}$ 的拟合分析, 考虑摩擦因数为 0.40 时的修正系数为 1, 即修正系数公式为:

$$C_{\mu, \max} = 2.11 - 4.21\mu + 3.57\mu^2. \quad (21)$$

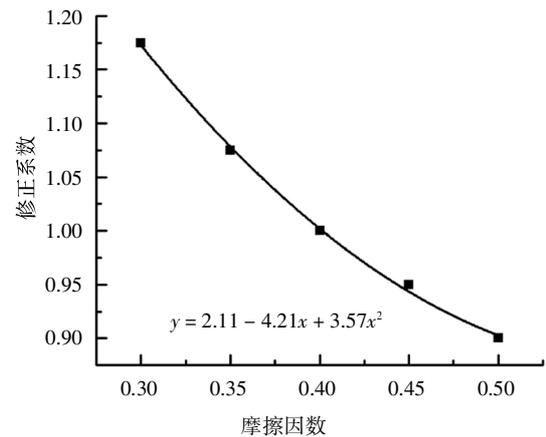
图 16(b)、图 16(c) 所示为筒仓上部的 $C_{\mu, \max}$ 拟合分析, 考虑摩擦因数为 0.40 时的修正系数为 1, 即修正系数公式为:

$$C_{\mu, \max} = b + a\mu. \quad (22)$$

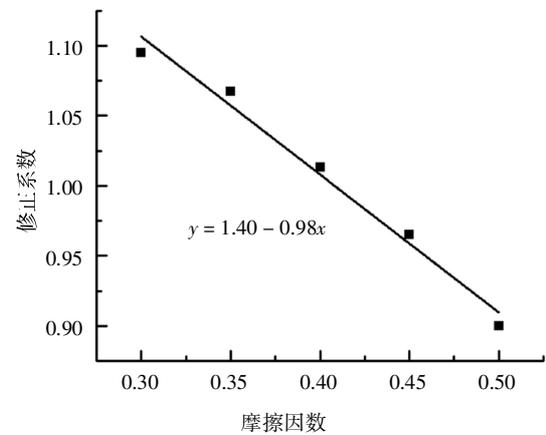
式中: a, b 为与相对高度 h_m 有关的参数.

$$a = -4.59 + 5.15h_m; \quad (23)$$

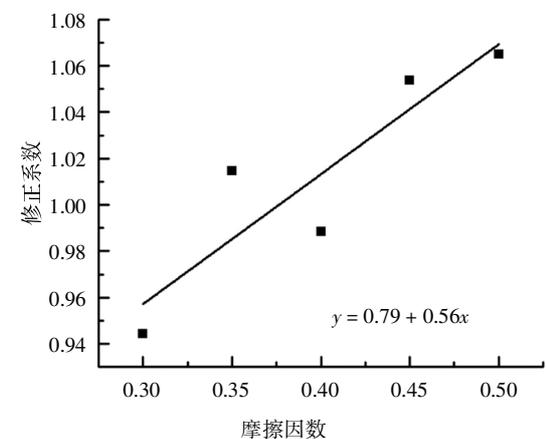
$$b = 2.83 - 2.04h_m. \quad (24)$$



(a)筒仓仓壁相对高度 0.7 以下部分摩擦系数修正系数拟合



(b)相对高度 0.7 处摩擦系数修正系数拟合



(c)相对高度 1 处摩擦系数修正系数拟合

图 16 仓壁贮料侧压力 $C_{\mu, \max}$ 拟合

Fig.16 Fittings of storage side pressure's correction coefficient at silo wall

4 计算值与试验数据对比

王录民等^[18]通过模拟地震振动台试验对钢筋混凝土单仓及群仓模型进行研究, 观察了贮料在地震作用下的侧压力变化规律. 根据第 3 节中得到的地

震作用下修正的贮料侧压力计算公式,结合试验中的数据进行对比,对比分析结果如图 17 所示。

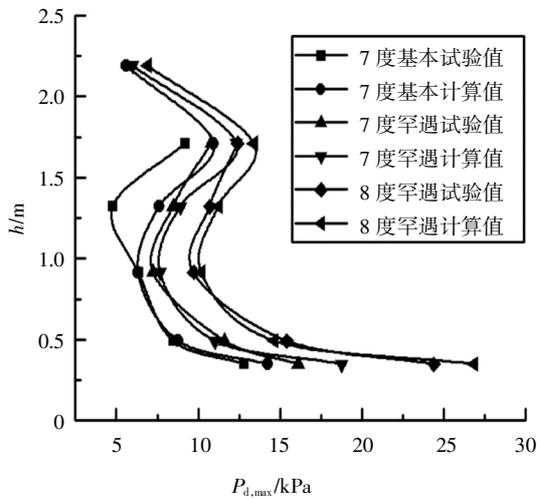


图 17 修正公式计算结果与试验数据对比曲线

Fig.17 Comparison between calculated results of modified formula and test data

如图 17 所示,7 度罕遇和 8 度罕遇地震作用下,根据简化的最大贮料侧压力计算公式得到的模型结构贮料侧压力计算值与试验数据吻合较好;7 度基本地震作用下筒仓结构中部计算值与试验值有所差异,其原因在于模型试验时,在地震强度较小时,中部贮料由于散粒体的固结作用未能充分运动,因此试验值相对于计算值偏小;在 7 度基本、7 度罕遇、8 度罕遇地震作用下贮料底部及中上部计算值相对于试验数据稍微偏大,因此使用简化的最大贮料侧压力计算公式能合理反映实际地震作用下侧压力分布,保证了采用该公式设计时结构的安全性。

5 计算值与规范设计值对比

目前,比较经典的筒仓压力分布理论主要有 Janssen 理论、Rankine 理论、Airy 理论以及修正的 Coulomb 理论等。我国在进行深仓贮料压力计算^[9]时,以 Janssen 公式为理论基础,同时在设计时考虑相应的放大系数:

$$P_h = C_h \gamma \rho (1 - e^{-khs}) / \mu, \tag{25}$$

$$k = \tan^2(45^\circ - \phi/2). \tag{26}$$

式中: P_h 为高度 h 处仓壁受到的法向侧压力; γ 为贮料的重力密度, kN/m^3 ; μ 为筒仓仓壁与贮料的摩擦因数; ρ 为筒仓结构的水力半径, m ; k 为主动侧压力系

数; C_h 为深仓贮料水平压力修正系数。

在考虑筒仓侧压力静力计算时,取 $C_h = 1$ 进行计算;在进行筒仓结构设计时,需进行深仓贮料水平侧压力修正,见表 4^[9]。

表 4 深仓贮料水平侧压力修正系数
Tab.4 Horizontal side pressure correction factor of deep storage

筒仓部位	水平侧压力修正系数 C_h	备注(参数)
	1.0	1. 当筒仓贮料高度 h_n 与仓内径 d_n 的比大于 3.0 时, C_h 应乘以 1.1;
	2.0	2. 流动性较差的贮料, C_h 宜乘以 0.9;
	2.0	3. 具有特殊促流装置的筒仓, C_h 宜乘以 1.1~1.4.

将经过第 3 节相关系数修正后得到的地震作用下贮料侧压力简化计算公式所得的计算结果与我国规范对筒仓贮料压力设计值进行对比,如图 18 所示。可以发现,贮料压力设计值随高度增大,侧压力逐渐减小。当高度 h 小于 1 m 时,贮料侧压力简化计算值随高度增大而减小;当 $1 \text{ m} \leq h \leq 1.5 \text{ m}$ 时,计算值随高度增大而增大;当 $h > 1.5 \text{ m}$ 时,计算值随高度增大而减小。这是由于规范设计值是通过放大系数对静力作用下贮料侧压力进行修正;而地震作用下,由于筒仓结构中下部填充密实,贮料与筒仓仓壁相互作用较小;筒仓结构中上部贮料则由于填充密度较差,因此动力作用下与筒仓仓壁相互作用较大,造成筒仓结构中上部出现贮料侧压力增大的情况。筒仓结构顶部则由于贮料较少,因此在 $h > 1.5 \text{ m}$ 时,侧压力随高度增大而减小。

如图 18 所示,在 7 度基本烈度地震作用下,筒仓结构中下部动态侧压力均小于规范设计值,可见在 7 度抗震设防地区按照规范设计值对仓壁进行承载力计算偏于保守;而筒仓中上部动态侧压力计算值均大于规范设计值,按照规范设计筒仓中上部偏于危险;在 7 度罕遇烈度及 8 度罕遇烈度下,筒仓动态侧压力均大于规范设计值,可见在考虑强震作用下按照规范设计值偏于危险。因此采用本文修正的地震作用下贮料侧压力简化计算公式进行筒仓结构设计,能够保证筒仓结构抗震设计的安全性。

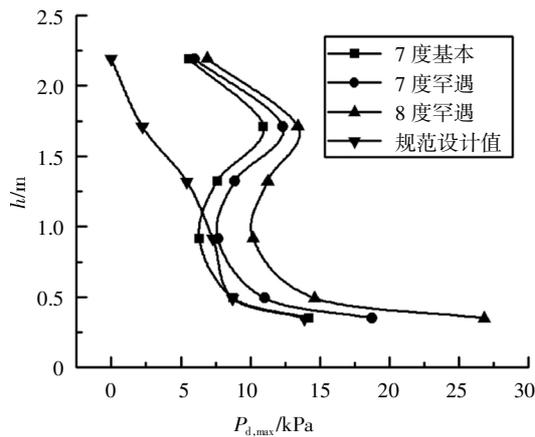


图 18 修正公式计算结果与规范设计值对比曲线

Fig.18 Comparison between calculated results of modified formula and design values

6 结论

本文首先对筒仓结构在地震作用下的贮料侧压力计算理论进行分析,在考虑工程实际后,对施卫星提出的计算方法进行了相关影响参数的修正研究,得到以下结论:

1)考虑贮料高度、地震动强度、贮料内摩擦角和贮料与仓壁之间的摩擦因数对贮料侧压力的影响,进行了相关系数的修正,给出了地震作用下贮料侧压力的简化计算公式。

2)根据本文提出的地震作用下贮料侧压力的简化公式计算得到的模型结构贮料侧压力与试验数据进行对比,计算值比试验数据稍微偏大,本文推荐公式能够真实合理地反映地震作用下贮料侧压力分布,并且也保证了根据该公式设计时的筒仓结构的安全性。

3)根据本文提出的地震作用下贮料侧压力的简化计算公式计算得到的模型结构动态侧压力与我国规范对筒仓贮料压力设计值进行对比,在 7 度抗震设防地区按照规范设计时,筒仓下部偏于保守,中上部偏于危险;在考虑强震作用时按照规范设计筒仓结构均偏于危险。采用本文推荐公式计算地震作用下的贮料侧压力更能保证筒仓结构设计的安全。

参考文献

[1] 施卫星,朱伯龙. 钢筋混凝土圆形筒仓地震反应试验研究[J]. 特种结构,1994,11(4):55—58.
SHI W X,ZHU B L. The experimental study of earthquake response of RC cylinder silos [J]. Special Structures, 1994, 11(4):55—58. (In Chinese)

[2] 施卫星,朱伯龙. 地震动下煤仓贮料侧压力研究[J]. 特种结构, 1993,10(1):16—18.
SHI W X,ZHU B L. Study on lateral pressure of coal silo under earthquake [J]. Special Structures, 1993, 10(1): 16—18. (In Chinese)

[3] HOLLER S,MESKOURIS K. Granular material silos under dynamic excitation:numerical simulation and experimental validation [J]. Journal of Structural Engineering,2006, 132(10): 1573—1579.

[4] 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 C,SHU G P. 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)

[5] 张翀,舒赣平. 颗粒形状对颗粒流模拟双轴压缩试验的影响研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(8):1281—1286.
ZHANG C,SHU G P. Effect of particle shape on biaxial tests simulated by particle flow code [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8):1281—1286. (In Chinese)

[6] 赵松. 筒仓贮料压力分析及其应用[D]. 武汉:武汉理工大学土木工程与建筑学院,2013:19—23.
ZHAO S. Analysis and application for silo storage pressure [D]. Wuhan: College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, 2013:19—23. (In Chinese)

[7] 周长东,郭坤鹏,孟令凯,等. 钢筋混凝土筒仓散料的静力相互作用分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版),2015,43(11):1656—1661.
ZHOU C D,GUO K P,MENG L K,*et al.* Static interaction analysis of RC silo structure-granular material [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11):1656—1661. (In Chinese)

[8] 庞照昆,原方,李丙涛,等. 筒仓侧壁与中心卸料的两种不同卸料方式的动态超压研究[J]. 河南科技,2018,33(22):113—114.
PANG Z K,YUAN F,LI B T,*et al.* Research on dynamic overpressure of two different unloading ways for side wall and central unloading of silos [J]. Henan Science and Technology, 2018, 33(22): 113—114. (In Chinese)

[9] 李智峰,彭政,蒋亦民. 粮仓内颗粒压力的测量:Janssen 行为及其偏差[J]. 物理学报,2014,63(10):104503—1—8.
LI Z F,PENG Z,JIANG Y M. Measurements of granular pressure in silo:Janssen behaviour and deviation [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(10):104503—1—8. (In Chinese)

[10] 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 Y,LI D Q,CHEN J H,*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, 2018, 34(13):296—302. (In Chinese)

[11] 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 Q P,SUN W W,LU S. 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)