

文章编号: 1000-4750(2013)05-0244-06

基于统一强度理论的大型浅圆筒仓侧压力计算

孙珊珊, 赵均海, 张常光, 崔莹

(长安大学建筑工程学院, 陕西, 西安 710061)

摘 要: 为合理计算大型浅仓贮料的侧压力, 该文基于统一强度理论, 采用静力平衡分析法, 综合考虑了中间主应力、仓壁与贮料间的摩擦力以及由于锥堆产生的超压等影响, 推导出大型浅仓侧压力计算公式, 并与试验实测、Rankine 公式和 Coulomb 公式进行了对比验证, 探讨了统一强度理论参数、内摩擦角和贮料与仓壁间摩擦系数等影响特性。结果表明: 该文计算值与试验实测值吻合较好, 且计算简练; 锥堆时 Coulomb 公式结果偏大, Rankine 公式结果偏小, 平堆时 Coulomb 公式和 Rankine 公式的结果均偏保守; 统一强度理论参数、内摩擦角对侧压力的影响显著, 贮料与仓壁间摩擦系数的影响较小。

关键词: 浅圆仓; 统一强度理论; 侧压力; 静力平衡; 中间主应力

中图分类号: TU312 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.08.0575

LATERAL PRESSURE OF LARGE SQUAT SILOS BASED ON THE UNIFIED STRENGTH THEORY

SUN Shan-shan, ZHAO Jun-hai, ZHANG Chang-guang, CUI Ying

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710061, China)

Abstract: In order to reasonably compute the lateral pressure of a bulk-solid, the formula for the lateral pressure acting on the wall of a large squat silo was established based on the unified strength theory and the static equilibrium method, which considered the integrated effects of the friction between a silo and its granular material, the intermediate principal stress and overpressure caused by the conical pile top. The pressures predicted by Rankine formula, Coulomb formula and the solution obtained in this paper were compared with the available test results from published literatures. A parametric study is undertaken to investigate the influence of the unified strength theory parameter, internal friction angle and friction coefficient. The computational results by the proposed solution coincide quite well with test results. For the conical pile top of the stored bulk material, the pressures predicted by Coulomb formula are larger than the actual values, while those by Rankine formula are smaller. For the horizontal plane top, the pressures predicted by Rankine and Coulomb formulae are both in conservation. The effects of the unified strength theory parameter and internal friction angle are obvious, while the friction-coefficient effect is less significant.

Key words: squat silos; unified strength theory; lateral pressure; static equilibrium; intermediate principal stress

筒仓结构作为贮存散料的构筑物, 广泛应用于粮食、煤炭、化工、建材等行业, 随着各行业生产需求不断提高, 筒仓结构朝着大型化的趋势发展,

大型浅仓的直径通常为 23m~30m, 装料高度为 12m~20m, 仓容超过 6000t, 其在贮料重力作用下的受力状态十分复杂^[1-3]。因此, 仓体结构设计的

收稿日期: 2012-08-06; 修改日期: 2012-10-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41202191); 中国博士后科学基金面上项目(2012M520079); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011ZY012); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110205130001); 陕西省自然科学基金项目(2011JM7002)

通讯作者: 孙珊珊(1986—), 女, 河南三门峡人, 博士生, 从事强度理论及组合结构研究(E-mail: sunjin1986123@163.com).

作者简介: 赵均海(1960—), 男, 陕西西安人, 教授, 博士, 博导, 从事固体力学及结构工程等研究(E-mail: zhaojh@chd.edu.cn);

张常光(1982—), 男, 山东菏泽人, 讲师, 博士, 从事非饱和土及隧道强度理论等研究(E-mail: zcg1016@163.com);

崔莹(1979—), 男, 陕西西安人, 博士生, 从事结构工程及岩土力学等研究(E-mail: cuiying126@163.com).

安全可靠、经济合理成为工程界十分关心的问题。目前关于筒仓的研究，多数集中在动态压力、偏心卸料、筒仓抗震等方面，但是贮料静态压力的计算仍是根本^[4-8]。

深仓(高径比大于等于 1.5)静止侧压力有比较成熟的 Janssen 公式，各国规范均采用了 Janssen 理论，不同之处是侧压力系数计算方法不同。对于浅仓(高径比小于 1.5)的贮料侧压力计算不同的学者存在较大的分歧，国际上 Lambert 建议用 Rankine 理论，Stewart 提倡用 Coulomb 理论。Rankine 公式和 Coulomb 公式是在直线形挡墙的情况下得到的，对于大直径($D \geq 25\text{m}$)且贮料堆高较高的浅圆仓误差很大。Reimbert 公式在进行侧压力计算时，将贮料的外摩擦角用贮料内摩擦角来代替，这种替代导致计算压力偏小。美国规范不区分深浅仓，只是将浅仓看作深仓的上部，这种近似处理与浅仓实际边界条件和受力状况明显不符。

我国规范采用 Rankine 公式计算侧压力^[9-10]，当贮料为锥堆时，规范公式通过取贮料锥体重心以下的距离代替 Rankine 公式中的填土深度，这样的简化经过与试验实测数据的对比^[1-3]，误差很大，同时 Rankine 方法不考虑浅仓的边界条件，并且忽略了贮料与仓壁之间的摩擦力。

本文采用静力平衡法将筒仓侧压力视为平面应变问题，充分考虑中间主应力 σ_2 的影响，同时兼顾仓侧壁与贮料的摩擦力和贮料锥堆的超压，推导了基于统一强度理论的浅圆筒仓侧压力统一解，经比较验证了所得结果的正确性，并讨论了各因素对侧压力的影响特性。

1 基于统一强度理论的侧压力系数

统一强度理论^[11]是一种全新的考虑中间主应力 σ_2 影响的适用于各种不同材料的强度理论，其用主应力表示的数学表达式为(以压应力为正)：

当 $\sigma_2 \leq \frac{\sigma_3 + \alpha\sigma_1}{1 + \alpha}$ 时，

$$F = \alpha\sigma_1 - \frac{1}{1+b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t \quad (1a)$$

当 $\sigma_2 \geq \frac{\sigma_3 + \alpha\sigma_1}{1 + \alpha}$ 时，

$$F' = \frac{\alpha}{1+b}(\sigma_1 + b\sigma_2) - \sigma_3 = \sigma_t \quad (1b)$$

式中： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为 3 个主应力； $\alpha = \sigma_t / \sigma_c$ ，

为材料的拉压比； σ_t 为材料的单轴拉伸强度。 b 反映中间主切应力以及相应面上正应力对材料破坏影响程度的系数，可作为选取不同强度理论的参数，亦可作为材料强度的特性参数，取值范围为 $0 \leq b \leq 1$ ，具体值可由公式计算，也可将统一强度理论的极限线和材料的真三轴试验对比，找出对应的 b 值。

采用材料的内摩擦角 φ_0 和内聚力 c_0 表示的统一强度理论表达式为^[12]：

当 $\sigma_2 \leq \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{\sin \varphi_0}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 时，

$$F = \frac{1 - \sin \varphi_0}{1 + \sin \varphi_0} \sigma_1 - \frac{b\sigma_2 + \sigma_3}{1 + b} = \frac{2c_0 \cos \varphi_0}{1 + \sin \varphi_0} \quad (2a)$$

当 $\sigma_2 \geq \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{\sin \varphi_0}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 时，

$$F' = \frac{1 - \sin \varphi_0}{(1+b)(1 + \sin \varphi_0)} (\sigma_1 + b\sigma_2) - \sigma_3 = \frac{2c_0 \cos \varphi_0}{1 + \sin \varphi_0} \quad (2b)$$

对于平面应变问题，根据文献[13]得：

$$\sigma_2 = \frac{m}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3)$$

式中， m 为中间主应力系数， $0 < m \leq 1$ ，可以通过理论和实验确定。根据经验，在弹性区可取 $m = 2\nu$ (ν 为泊松比，可以用广义胡克定律确定)，在塑性区可取 $m \rightarrow 1$ ，假定 $m = 1$ 。由于 $\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 > (\sigma_1 + \sigma_3)/2 - (\sigma_1 - \sigma_3)\sin \varphi_0/2$ ，因此在平面应变问题中，塑性区应力满足式(2b)，将式(3)($m=1$)代入式(2b)，整理得：

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \varphi_t + c_t \cos \varphi_t \quad (4)$$

$$c_t = \frac{2(b+1)c_0 \cos \varphi_0}{2+b(1+\sin \varphi_0)} \frac{1}{\cos \varphi_t}, \quad \sin \varphi_t = \frac{2(b+1)\sin \varphi_0}{2+b(1+\sin \varphi_0)}$$

式中， c_t 、 φ_t 为岩土类材料的统一粘聚力和统一内摩擦角，即统一抗剪强度参数。

式(4)与主应力表达的 Mohr-Coulomb 强度准则形式完全一致，筒仓内贮料的内聚力较小，可忽略，及将 $c_0 = 0$ 代入式(4)，式(4)变形为：

$$\sigma_3 = \sigma_1 \frac{1 - \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t} \quad (5)$$

仓内贮料处于极限平衡状态时的最大主应力为 $\sigma_1 = \gamma \cdot z$ ，而最小主应力 σ_3 即为贮料对仓壁的侧压力，因此基于统一强度理论的侧压力系数 k 为：

$$k = \frac{1 - \sin \varphi_t}{1 + \sin \varphi_t} \quad (6)$$

2 侧压力计算公式及验证

2.1 公式推导

贮料顶面为平顶和锥顶的浅圆仓，深度 z 以上的贮料的竖向力平衡分析如图 1 所示^[14]：

平衡方程：

$$-G_1 - G_2 + AP_k + P_f = 0 \quad (7)$$

其中， $G_1 = \frac{1}{3}\gamma\pi R^3 \tan\beta$ ， $G_2 = \pi R^2 z \gamma$ ， $P_f = k\mu AP_k$ 。

整理得贮料竖向压力 P_k 为：

$$P_k = \frac{\gamma \left(\frac{R}{3} \tan\beta + z \right)}{1 + k\mu} \quad (8)$$

式中： z 为距离锥体贮料顶面与仓壁相交处的深度； γ 为贮料重力密度； A 为筒仓横截面面积； R 为筒仓内半径； φ_0 为贮料内摩擦角； β 为锥体贮料表面与水平面的夹角； μ 为仓壁摩擦系数； k 为侧压力系数； G_1 为上部锥体贮料的重力(平堆时 $G_1=0$)； G_2 为锥体底面以下深度为 z 部分的重力； P_f 为锥体底面以下深度为 z 部分仓壁摩擦力总和。

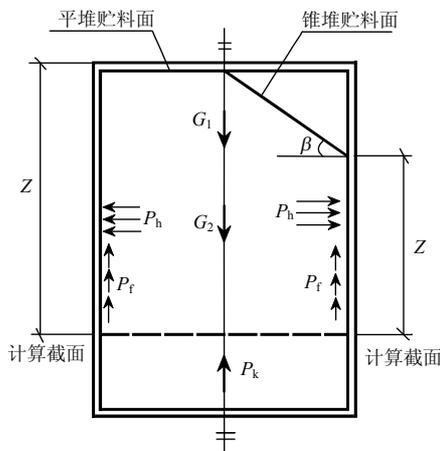


图 1 贮料顶面为平顶和锥顶的浅仓计算示意图

Fig.1 Mechanical model for a squat silo (conical pile top and horizontal plane top)

则贮料的水平侧压力为：

$$P_h = kP_k = k \frac{\gamma \left(\frac{R}{3} \tan\beta + z \right)}{1 + k\mu} \quad (9)$$

式中， $k = \frac{1 - \sin\varphi_t}{1 + \sin\varphi_t}$ 。

对于贮料顶面为平顶的浅圆仓，可视为式(9)的特殊情况，即 $\beta=0$ ，即得到平顶的浅圆仓侧压力计算公式。当不考虑中间主应力以及散料与仓壁之间的摩擦，即 $b=0$ ， $\mu=0$ ， $\beta=0$ 时，式(9)就是 Rankine 公式。

2.2 公式验证

原方^[2]采用直接测量法对江苏徐州国家粮食储备库的仓容近万吨的储粮浅圆仓进行了实仓试验研究：测试对象为第 4 号、第 7 号和第 8 号仓，梁高分别为 $h=6.35\text{m}$ 、 $h=8\text{m}$ 、 $h=11.4\text{m}$ ，仓直径 $D=30\text{m}$ ，仓高 $H=15\text{m}$ ，贮料为小麦，小麦重力密度 $\gamma=7.88\text{kN/m}^3$ ，内摩擦角 $\varphi=25^\circ$ ，外摩擦角 $\varphi'=21.8^\circ$ ，顶部锥堆时， $\beta=23.5^\circ$ 。试验采用 TYJ20 系列钢弦式土压力传感器，4 号仓沿仓壁布置两排、夹角呈 30° ，每排 9 个土压力计。7 号、8 号仓均仅布置一排 9 个压力计。

陈长冰^[3]选取郑州市河南省国家粮食储备库的 4 号仓作为试验仓：梁高分别为 $h=6.3\text{m}$ 、 $h=13.5\text{m}$ 、 $h=22.3\text{m}$ ，仓直径 $D=28\text{m}$ ，仓高 $H=26\text{m}$ ，贮料为小麦，内摩擦角 $\varphi=25^\circ$ ，外摩擦角 $\varphi'=21.8^\circ$ ，顶部锥堆时， $\beta=23.5^\circ$ 。试验选用钢弦式 GJM 型土压力传感器进行直接测量，共布置 27 个测试点。由于原方 8 号仓的第 1 次、第 2 次试验均为平堆，陈长冰 4 号仓的第 1 次、第 2 次试验均为锥堆，并且这两组试验是为了考察粮食固结对仓壁压力的影响，因此本文选取原方 4 号、7 号仓的第 1 次、第 2 次试验，原方 8 号仓第 1 次试验和陈长冰 4 号仓第 1 次试验的实测值作为验证依据。

将原方^[2]、陈长冰^[3]的试验实测值与式(9)的计算值进行比较，由图 2~图 7 可知，本文理论解答与试验实测值吻合良好，从而验证了理论公式的正确性。试验结果表明浅圆仓侧压力沿仓壁竖向接近于线性分布，本文式(9)所得结果能很好的接近实测值。进一步对比表明：原方 4 号仓第 1 次、第 2 次试验结果与式(9)结果比值的平均值分别为 1.004 和 1.048；原方 7 号仓第 1 次、第 2 次试验结果与式(9)结果比值的平均值分别为 0.961 和 1.079；原方 8 号仓第 1 次、陈长冰第 1 次试验结果与式(9)结果比值的平均值分别为 1.087 和 0.990；比较 4 号、7 号仓第 1 次试验结果与第 2 次试验结果，即锥堆和平堆两种工况，本文式(9)能很好的反映超压对侧压力的影响。

同时将试验实测结果与 Rankine 公式结果、Coulomb 公式结果进行比较：对于贮料为锥堆的情况，原方 4 号仓第 1 次、7 号仓第 1 次以及陈长冰第 1 次试验中，试验实测值与 Coulomb 公式结果比值的平均值分别为：1.086、1.278、1.808，试验实测值与 Rankine 公式结果比值的平均值分别为：

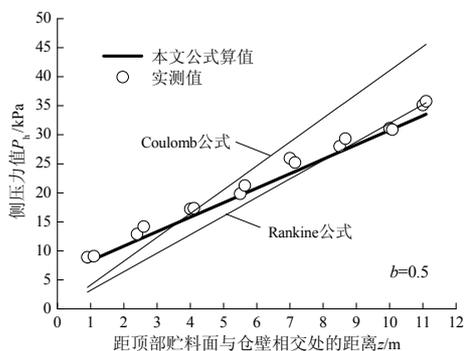


图2 原方4号仓第1次试验结果(锥堆)
Fig.2 Yuan Fang No.4 silo, 1st trial (conical pile top)

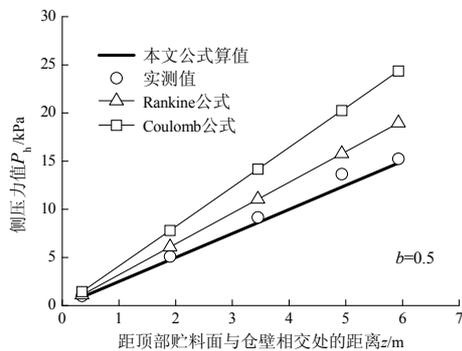


图6 原方8号仓第1次试验结果(平堆)
Fig.6 Yuan Fang No.8 silo, 1st trial (horizontal plane top)

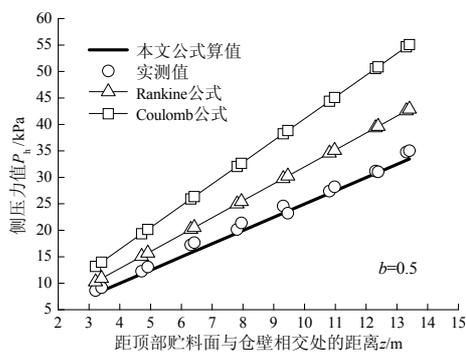


图3 原方4号仓第2次试验结果(平堆)
Fig.3 Yuan Fang No.4 silo, 2nd trial (horizontal plane top)

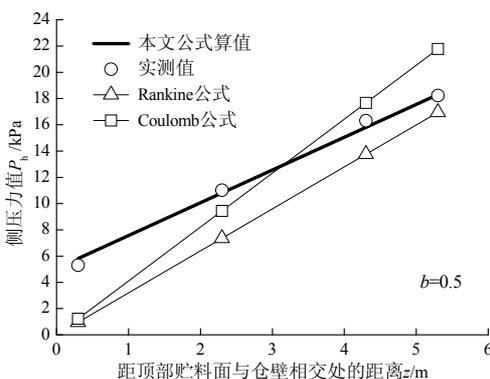


图7 陈长冰第1次试验结果(锥堆)
Fig.7 Chen Changbing silo, 1st trial (conical pile top)

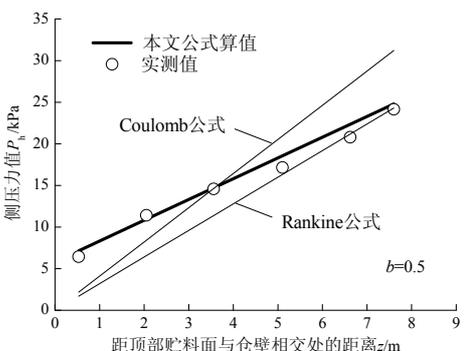


图4 原方7号仓第1次试验结果(锥堆)
Fig.4 Yuan Fang No.7 silo, 1st trial (conical pile top)

1.395、1.642、2.322，如图2、图4和图7所示。随着筒仓深度的增大，Coulomb公式结果偏大，而Rankine公式结果则偏小，本文式(9)计算结果相比Rankine公式和Coulomb公式更接近实测值。

对于贮料为平堆的情况，原方4号仓第2次、7号仓第2次以及8号仓第1次试验中，试验实测值与Coulomb公式结果比值的平均值分别为：0.637、0.656、0.661，试验实测值与Rankine公式结果比值的平均值分别为：0.819、0.842、0.849，如图3、图5和图6所示。随着筒仓深度的增大，Coulomb公式和Rankine公式计算结果均偏大。综上所述，锥堆情况下Rankine公式和Coulomb公式的结果较平锥时要好，本文式(9)计算结果与所有情况的实测值均吻合较好。

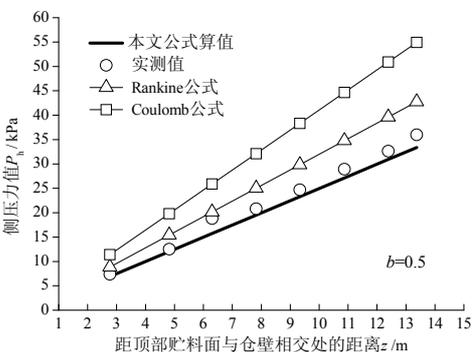


图5 原方7号仓第2次试验结果(平堆)
Fig.5 Yuan Fang No.7 silo, 2nd trial (horizontal plane top)

Coulomb理论在 π 平面上构成外凸理论极限面的下限，未考虑中间主应力的效应，计算结果偏于安全。Rankine公式的计算假设是墙背竖直且填土水平，并且计算锥堆贮料侧压力时仅通过取贮料锥体重心以下的距离代替Rankine公式中的填土深度，这样的简化并未真实反映锥堆的超压影响，因此锥堆时的Rankine公式算值比实测值小；同时由于Rankine公式忽略了贮料和仓壁之间的摩擦力，

因此平堆时比起实测值更大。

3 参数分析

3.1 统一强度理论参数 b

统一强度理论参数 b 为反映中间主切应力以及相应面上正应力对材料破坏影响程度的系数,即中间主应力效应参数。 b 取不同值可以表示或线性逼近现有的各种强度准则^[11-12], $b=0$ 时,统一强度理论退化为 Mohr-Coulomb 强度准则; $b=0.5$ 时,为能替代 Drucker-Prager 准则的新强度理论; $b=1$ 时,退化为双剪应力强度准则。本文分别选取统一强度理论参数 $b=0、0.5、1$ 来分析其对贮料压力的影响,取原方 4 号仓第 1 次、第 2 次试验的实测值进行分析,如图 8、图 9 所示。可以看出,实测值更接近于当 $b=0.5$ 时的情况,当统一强度理论参数 b 从 0 增大 1 时,锥堆仓底贮料侧压力值从 36.22kPa 减小到 31.57kPa,减小了 13%,平堆仓底贮料压力值从 36.90kPa 减小到 31.53kPa,减小了 15%。出现这种变化说明中间主应力对筒仓贮料侧压力影响显著,考虑中间主应力可以充分发挥材料的强度潜能和自承载能力。

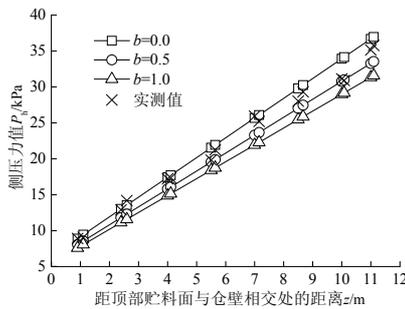


图 8 统一强度理论参数 b 的影响(锥堆)

Fig.8 Influence of the unified strength theory parameter b (conical pile top)

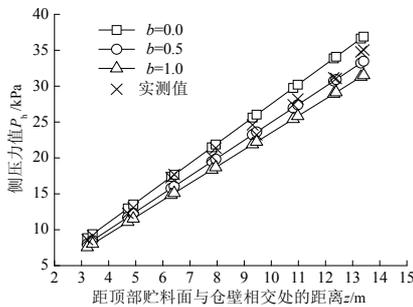


图 9 统一强度理论参数 b 的影响(平堆)

Fig.9 Influence of the unified strength theory parameter b (horizontal plane top)

3.2 内摩擦角 φ_0

内摩擦角 φ_0 是贮料的摩擦特性,能够反映贮料抗剪强度,不同内摩擦角 φ_0 ($23^\circ、30^\circ、36^\circ$) 对贮料

侧压力的影响,如图 10、图 11 所示。可见,当内摩擦角从 23° 增大 36° 时,锥堆仓底贮料侧压力值从 38.72kPa 减小到 24.05kPa,减小了 38%,平堆仓底贮料压力值从 38.66kPa 减小到 31.08kPa,减小了 20%。说明随着距顶部贮料面与仓壁相交处距离的增加,侧压力随着内摩擦角增大而明显减小。

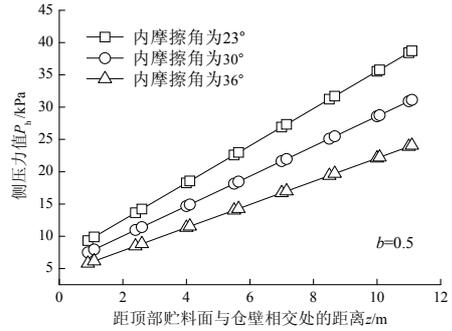


图 10 内摩擦角的影响(锥堆)

Fig.10 Influence of internal friction angle (conical pile top)

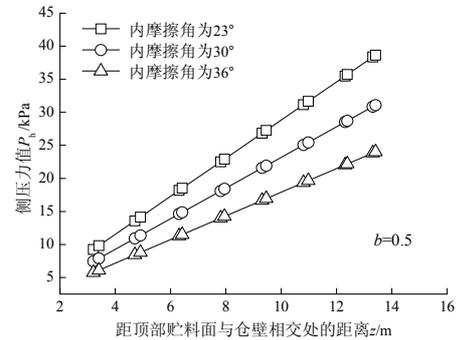


图 11 内摩擦角的影响(平堆)

Fig.11 Influence of internal friction angle (horizontal plane top)

3.3 贮料与仓壁间摩擦系数 μ

散料和仓壁的摩擦系数 μ 会明显的影响摩擦力值,为了考察不同类型贮料与不同类型筒仓间摩擦系数的影响,分别取摩擦系数 $\mu=0.3、0.4、0.5$ 这 3 种情况,对应的侧压力如图 12、图 13 所示,可见摩擦系数的变化对筒仓侧向压力影响较小。

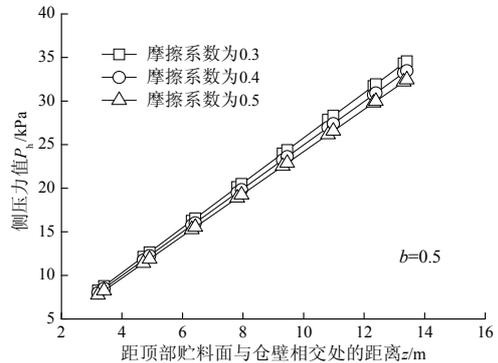


图 12 摩擦系数的影响(锥堆)

Fig.12 Influence of friction coefficient (conical pile top)

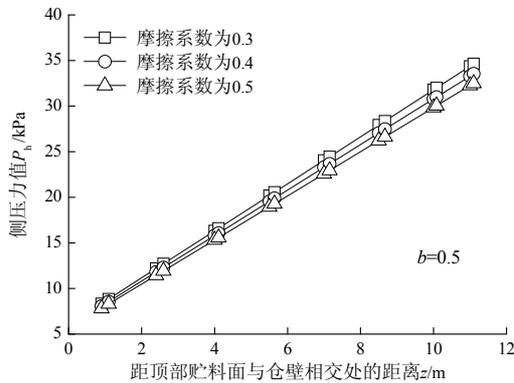


图 13 摩擦系数的影响(平堆)

Fig.13 Influence of friction coefficient (horizontal plane top)

4 结论

(1) 本文建立了考虑中间主应力、贮料与仓壁间摩擦力、锥堆超压问题的大型浅仓侧压力统一解, 可以应用于计算平堆和锥堆两种工况, 公式简单且与试验实测值结果符合较好, 适用范围较广, 为工程设计提供了可靠的理论依据。

(2) 对于贮料为锥堆的情况, 随着筒仓深度的增大, Coulomb 公式结果偏大, 而 Rankine 公式结果则偏小; 对于贮料为平堆的情况, Coulomb 公式和 Rankine 公式的结果均偏于保守。当 $b=0.5$ 时, 即统一强度理论对应于能够替代 Drucker-Prager 准则的新强度理论时, 所得本文公式算值比 Coulomb 公式和 Rankine 公式的结果更接近于试验实测值。

(3) 统一强度理论参数 b 和内摩擦角 φ_0 对浅仓侧压力有显著的影响, 侧压力随 b 与 φ_0 的增大而减小; 贮料与仓壁间摩擦系数 μ 对筒仓侧向压力的影响较小。

参考文献:

- [1] 杨代恒. 钢筒仓设计研究及散料压力的数值分析[D]. 浙江: 浙江大学, 2008.
Yang Daiheng. Design research of steel silos and numerical simulation of bulk material pressure [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008. (in Chinese)
- [2] 原方. 曲线挡墙内侧散料体压力分析及工程应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
Yuan Fang. Analysis of bulk-solid pressure on curve walls and its engineering application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese)
- [3] 陈长冰. 筒仓内散料侧压力沿仓壁分布研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
Chen Changbing. Bulk-solid pressures on silos' walls [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [4] 杨鸿, 杨代恒, 赵阳. 钢筒仓散料静态压力的三维有限元模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(8):

- 1423—1429.
Yang Hong, Yang Daiheng, Zhao Yang. Three-dimensional finite element simulation of static granular material pressure for steel silos [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(8): 1423—1429. (in Chinese)
- [5] 原方, 邵兴, 王录民, 等. 一种新的浅圆仓散料侧压力计算方法[J]. 工程力学, 2004, 21(3): 96—100.
Yuan Fang, Shao Xing, Wang Lumin, et al. A method for calculating lateral pressures on squat silo walls [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(3): 96—100. (in Chinese)
- [6] Vidal P, Gallego E, Guaitac 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(3): 480—492.
- [7] 付建宝. 大直径筒仓的侧压力分析与筒仓地基三维加固分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
Fu Jianbao. Lateral wall pressure analysis and three-dimensional foundation consolidation analysis of large diameter silos [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] Couto A, Ruiz A, Aguado P J. Design and instrumentation of a mid-size test station for measuring static and dynamic pressures in silos under different conditions-Part I: Description [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 85: 164—173.
- [9] GB 50077-2003, 钢筋混凝土筒仓设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
GB 50077-2003, Code for design of reinforced concrete silos [S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese)
- [10] GB 50322-2001, 粮食钢板筒仓设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
GB 50322-2001, Code for design of grain steel silos [S]. Beijing: China Planning Press, 2001. (in Chinese)
- [11] 俞茂宏. 双剪理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 249—251.
Yu Maohong. Twin shear theory and its application [M]. Beijing: Science Press, 1998: 249—251. (in Chinese)
- [12] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度理论及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1—10.
Yu Maohong. Unified strength theory for geomaterials and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(2): 1—10. (in Chinese)
- [13] 高江平, 刘元烈, 俞茂宏. 统一强度理论在挡土墙土压力计算中的应用[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 357—364.
Gao Jiangping, Liu Yuanlie, Yu Maohong. Unified strength theory with applications to earth pressure [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(3): 357—364. (in Chinese)
- [14] 陈长冰, 良醒培, 师旭超, 等. 挡土墙土压力公式在大型筒仓侧压力计算中的应用分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 421—426.
Chen Changbing, Liang Xingpei, Shi Xuchao, et al. Application analysis of earth pressure computation formulae in large squat silos [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 421—426. (in Chinese)