码头升级改造中土压力计算模式分析

邹建强，徐明磊
（中交第四航务工程勘察设计院有限公司，广东 广州 510290）

摘要：方块码头升级改造对原方块前新增回填土压力计算提出新的挑战。以尼日利亚某港口方块码头升级改造工程为例，探究将原方块码头前方回填砂土压力作为贮仓压力的计算模式，并对比分析国标、欧标和 OCDI 规范在贮仓压力计算模式及国标土压力计算模式上的异同。结果表明，贮仓压力计算模式的结果大于土压力计算模式，国标和欧标的贮仓压力模式类似，结果基本一致，OCDI 规范计算模式虽简单，但计算结果较大；基于 Plaxis 2D 有限元计算软件的结果介于 OCDI 规范与国标、欧标之间，但与国标、欧标差异更小，因此认为国标、欧标计算模式更加合理。

关键词：码头升级改造；贮仓压力；规范计算对比
中图分类号：U656.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2024)08-0117-05

Calculation mode of soil pressure in upgradation and reconstruction of wharf

ZOU Jianqiang, XU Minglei
(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: In upgradation and reconstruction of the block wharf, new challenges are proposed in calculating the pressure of the newly added backfill soil in front of the original block. Taking the upgradation and reconstruction project of a block wharf in Nigeria as an example, we explore the calculation mode of using the backfill sand soil pressure in front of the original block wharf as silo pressure, and compare and analyze the calculation mode of silo pressure in Chinese standard, European standard, and OCDI specification, and the calculation mode of soil pressure in Chinese standard. The results show that the results of silo pressure calculation model are greater than those of the soil pressure calculation model. Silo pressure modes in the Chinese and European standards are similar, and the results are basically consistent. The calculation model of OCDI specification is simple, and the calculation results are larger. Based on Plaxis 2D finite element calculation software, the results are between OCDI specification, the Chinese and European standards, but there is less difference with the Chinese and European standards. It is believed that the calculation modes in Chinese and European standards are more reasonable.

Keywords: upgradation and reconstruction of wharf; silo pressure; comparison of standard calculation

码头升级改造过程中由于原有结构需要拆除或者改造等原因，规范中部分结构荷载计算模式需要考虑其适用性。方块码头在港口发展初期特别是在海外港口具有广泛适用性，目前已有一部分老旧码头达到使用寿命，成为码头升级改造的重点对象。

本文以尼日利亚某港口方块码头升级改造工程为例，码头前沿线由于向海侧拓宽，且沿用方块重力式结构，但方块后方土压力计算由于受原有结构影响，不能直接采用规范中土压力计算模式，经过研究分析，贮仓压力的计算模式更适用。目前 JTS 167—2018《码头结构设计规范》[1]（简称“国标”）对于贮仓压力计算，考虑到码头应用情况，国标只介绍非黏性填料、深仓情况下的计算；

收稿日期：2024-03-20
作者简介：邹建强（1993—），男，硕士，工程师，从事港口与航道工程设计。

水运工程

Eurocode 1-*Actions on Structures-Part* 4:*Silos and Tanks*:*BS EN* 1991-4:2006 [2](简称“欧标”)的贮仓压力主要应用于建筑筒仓;*Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japan*[3](简称“OCDI 规范”)贮仓压力的计算模式主要用于港口码头。现有研究多集中于探讨贮仓压力计算机理,拓展港口规范中关于贮仓压力计算的适用条件,推导出各种边界条件下的贮仓压力分布公式。如毛开[4]根据原有假设推导出浅仓以及位于可压缩基础上的无底仓计算公式;赵越等[5]推导出疏浚料等黏性填料的贮仓压力计算公式;张政生[6]推导出非单一填料时贮仓压力计算公式。在数值模拟方面,白志刚等[7]根据三维数值模型分析贮仓压力计算公式与模型结果相差较小;李予忱等[8]通过有限元分析软件对圆沉箱弧形仓格、扇形仓格在填料为块石或中砂时进行数值分析,并对比数值模拟结果与现行规范矩形仓格的计算结果。

1 不同规范贮仓压力计算

目前港口规范中贮仓压力计算公式主要应用于沉箱内填料对侧壁的压力计算。假设沉箱为刚性结构体,基于力平衡原理推导填料对侧壁的竖向压力和侧向压力。码头升级改造过程中原码头为重力式或板桩式等前方的填料土,由于前后都为不透空结构,且长边为码头长度,因此从受力模式考虑,填料对前壁的竖向和侧向压力计算更适合采用贮仓压力的矩形仓计算模式。码头升级改造典型断面见图 1,将管板结构后方回填砂土压力作为贮仓压力计算。因此,探究中国和国际规范关于贮仓压力的计算模式对码头升级改造具有重大参考意义。

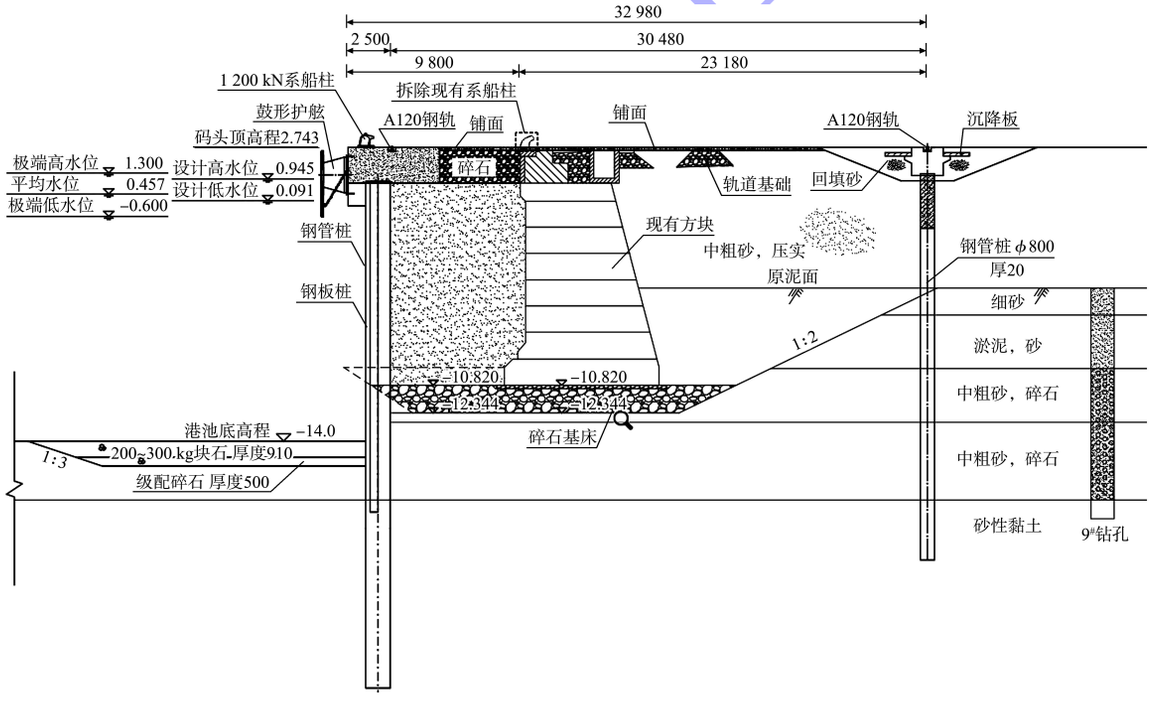


图 1 摩洛哥某港口升级改造工程断面(尺寸:mm;高程:m)

1.1 国标

国标附录 S 介绍了贮仓压力计算。当矩形仓、填料为非黏性填料、填料高度与仓横截面内缘的最大边长之比大于或等于 1.5 的深仓时,其计算公式见(1)~(3),计算图示见图 2。

$$\sigma_z=\frac{\rho g}{A}(1-e^{-Az})+qe^{-Az} \tag{1}$$

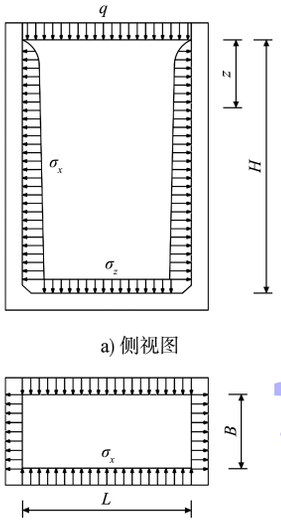
$$\sigma_x=\sigma_z K \tag{2}$$

$$A=\frac{KU\tan\delta}{S} \tag{3}$$

式中:σ_z 为垂直压力标准值,kPa;ρ 为仓内填料

密度标准值，t/m^3；A 为系数，1/m；z 为计算点距填料顶面的深度，m，计算仓底板上的垂直压力时取仓内填料高度；q 为作用在舱内填料顶面上的均布荷载标准值，kPa；σ_x 为侧压力标准值，kPa；K 为舱内填料侧压力系数，可取 $K=1-\sin\varphi$，其中 φ 为填料内摩擦角标准值，(°)；U 为筒仓的横截面内周长，m；δ 为填料与仓壁的外摩擦标准值，(°)，可取 $\delta=2\varphi/3$；S 为空腔横截面面积，m^2。

式(1)~(3)的推导是基于刚性仓且仓底为不可压缩的假设，基于力的平衡对深度 z 处进行积分得到。



a) 侧视图　　b) 俯视图

图 2　国标矩形仓贮仓压力计算

1.2　欧标

欧标中有详细介绍作用在垂直墙壁上的贮仓压力计算模式，主要应用于筒仓内填料压力计算，公式见式(4)~(9)，计算图示见图 3。

$$p_{hf}(z)=p_{ho}Y_J(z) \tag{4}$$

$$p_{wf}(z)=\mu p_{ho}Y_J(z) \tag{5}$$

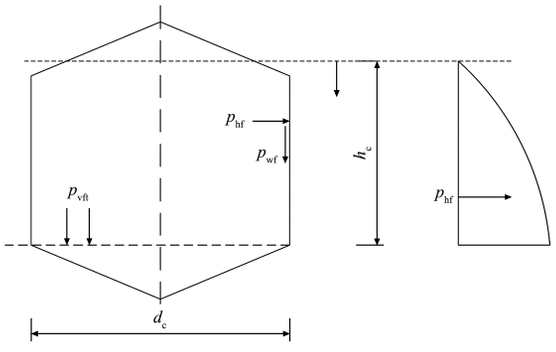
$$p_{vft}(z)=\frac{p_{ho}}{K}Y_J(z) \tag{6}$$

$$p_{ho}=\rho g K z_o \tag{7}$$

$$z_o=\frac{1}{K\mu}\frac{A}{U} \tag{8}$$

$$Y_J(z)=1-e^{-z/z_o} \tag{9}$$

式中：p_{hf} 为侧向土压力，kPa；p_{wf} 为土体对单位面积筒仓的摩擦力，kN/m^2；p_{vft} 为土体垂直土压力，kPa；ρ 为仓内填料密度标准值，t/m^3；μ 为土体作用在垂直墙壁上的摩擦系数；K 为侧向土压力系数；z 为填料深度，m；A 为筒仓的横截面面积，m^2；U 为筒仓的横截面的周长，m。



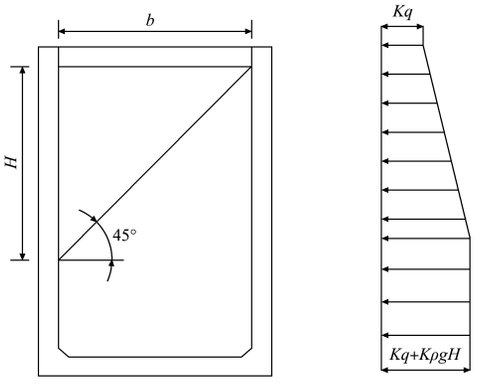
a) 受力模式侧视图　　b) p_{hf}沿仓壁分布

图 3　欧标贮仓压力计算

欧标的公式推导原理和假设与国标一致，区别在于相关参数取值范围不同，导致结果略有差异。

1.3　OCDI 规范

OCDI 规范与国标、欧标不同，它尽可能地简化了沉箱等空腔内填料土压力计算，基于以下 3 条假设给出一个相对保守的计算公式，见式(10)~(11)。计算图示见图 4(b 为空腔的宽度，$b=H$)。



a) 受力模式侧视图　　b) 仓壁受力分布

图 4　填料侧向压力计算图示

1）复合荷载的分布通常为不规则形状，将不规则分布修正为等效的均匀分布或三角形分布。

2）侧向土压力系数取 0.6，当填料中为混凝土块或者新拌混凝土时，侧向土压力可不计。

3）合理假设侧向土压力均匀增加的深度等于

空腔的宽度，超过后取恒定值。

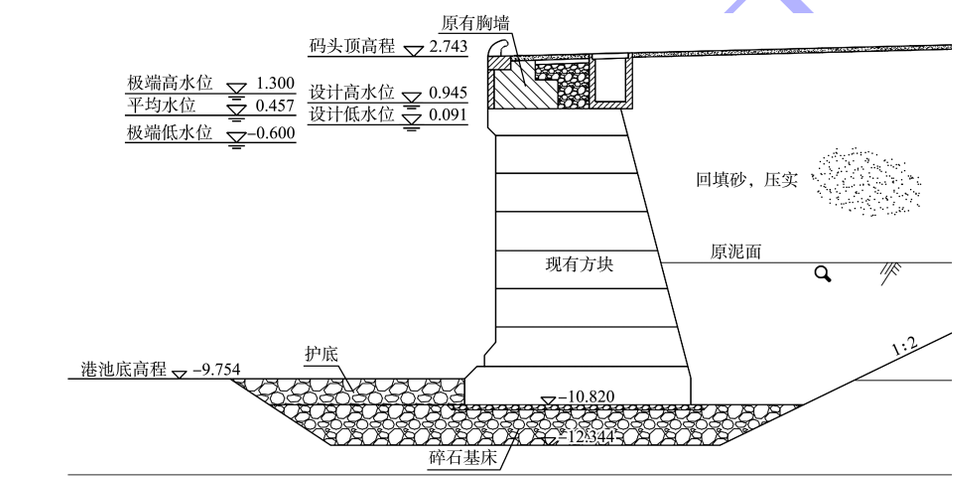
$$\sigma_x = Kq + Kz\rho g \qquad (z \leqslant H) \qquad (10)$$

$$\sigma_x = Kq + KH\rho g \qquad (z > H) \qquad (11)$$

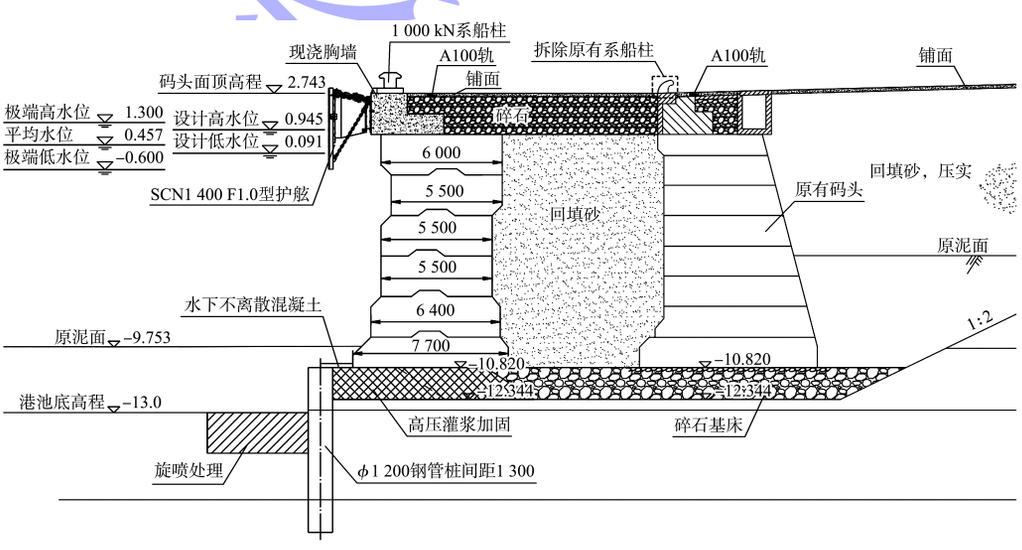
式中：σ_x 为侧压力标准值，kPa；K 为土压力系数，取 0.6；q 为附加的均布荷载标准值，kPa；ρ 为仓内填料密度标准值，t/m^3，淹没时取浮密度；z 为填料深度，m。

2　工程算例

尼日利亚某港口为方块重力式泊位，岸线长 1.2 km，位于泻湖区域，波浪较小，地质表层为中粗砂，底层为砾石混砂。码头拥堵严重，卡车直接停在码头前沿岸线进行装卸作业，其货种主要为散货和集装箱，至今已使用超过 60 年，码头存在不同程度的破损并伴随局部不均匀沉降，迫切需要升级改造，原码头结构形式见图 5a)。考虑到业主需求和当地船机设备调遣，继续沿用方块重力式结构，新的结构断面见图 5b)。升级改造后码头装卸效率将显著提高，码头前沿车辆拥堵情况得到缓解，通过能力将极大提升，且码头能兼靠更大集装箱船，以适应未来船舶大型化需求。



a) 升级改造前



b) 升级改造后

图 5　尼日利亚某港口码头升级改造前后断面（尺寸：mm；高程：m）

方块码头结构稳定计算中，计算方块抗倾、抗滑时，须计算其后方回填料对方块的侧向压力。考虑到整个回填料受力机理，与贮仓压力基本一致，因此采用贮仓压力计算模式。同时为了对比

验证各个规范关于贮仓压力计算结果差异合理性，基于 Plaxis 2D 软件计算的结果进行对比分析。回填砂参数为：湿密度 1.80 t/m^3，浮密度 0.95 t/m^3，内摩擦角 33°，附加荷载 30 kPa。各规范及 Plaxis 2D 有限元软件的计算结果对比见图 6，侧向压力的合力及作用点见表 1。

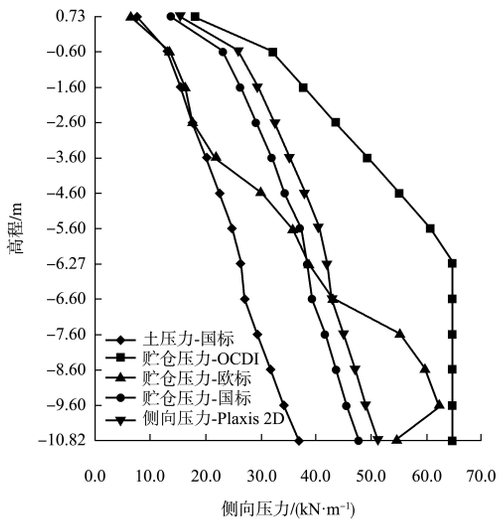


图 6　计算结果对比

表 1　计算结果合力及作用点

类型	合力 F/kN	作用点与顶端距离/m
国标-土压力	268.80	6.90
国标-贮仓压力	395.74	6.63
欧标-贮仓压力	429.11	6.60
OCDI 规范-贮仓压力	566.68	6.67
Plaxis 2D-侧向压力	393.53	7.51

由图 6 可以看出，基于 OCDI 规范计算的回填料侧向压力比其他规范大，基于国标和欧标贮仓压力计算模式的结果差异很小，但大于土压力模式下计算的侧向压力；基于 Plaxis 2D 有限元软件计算回填料侧壁压力在高程(−3.60～0.73 m)范围内，基本和土压力模式计算的侧向压力一致，但之后便迅速增加超过基于国标和欧标贮仓压力计算模式的结果；以土压力为基准，国标贮仓压力超过其 47.2%，欧标贮仓压力超过其 59.6%，OCDI 侧向压力超过其 110.8%，Plaxis 2D 计算结果超过其 46.4%。

由表 1 的结果合力和作用点可以得出，基于 Plaxis 2D 软件计算的结果与基于国标和欧标的贮仓压力计算模式差异很小。

3　结论

1）通过结果对比，方块后方土压力计算模式从小到大依次为：国标-土压力＜Plaxis 2D 结果＜国标-贮仓压力≈欧标-贮仓压力＜OCDI 规范-贮仓压力。因此不可用国标中土压力计算模式，会造成工程风险。

2）以 Plaxis 2D 有限元计算软件的结果为基准，国标-土压力较小，偏差 23%；国标-贮仓压力基本一致，偏差 0.6%，欧标-贮仓压力基本接近，偏差 9.0%，OCDI 规范计算结果较大，偏差达到 83%，过于保守。因此本文认为国标和欧标计算方式更加贴合实际。

3）基于目前码头升级改造趋势，规范中现有计算模式的适用问题将极大考验设计人员的能力，本文的研究成果可为贮仓压力适用于重力式或板桩式等不透水岸壁式结构后方土压力计算提供借鉴。

参考文献：

[1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范 JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[2] BSI. Eurocode 1-actions on structures-part 4: silos and tanks: BS EN 1991-4: 2006 [S]. London: BSI Standards Limited, 2006.

[3] The overseas coastal area development institute of Japan. Technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan[S]. Tokyo: OCDI, 2002.

[4] 毛开. “贮仓”压力计算分析[J]. 水运工程, 1992(1): 50-55.

[5] 赵越, 刘晓曦. 黏性回填料贮仓压力计算[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(S1): 88-90.

[6] 张政生. 仓顶均载及非单一填料贮仓压力计算方法[J]. 水运工程, 2007(3): 53-55.

[7] 白志刚, 杨文昌. 超大型沉箱贮仓压力的数值模拟计算[J]. 港工技术, 2012, 49(2): 24-26, 67.

[8] 李予忱, 胡珅榕. 有隔墙的圆沉箱贮仓压力数值模拟计算[J]. 港工技术, 2021, 58(1): 47-50.

(本文编辑　王璁)