

大型双层生料搅拌贮存库的设计与施工

杨国安

摘要 本文介绍了直径为 22m, 高近 80m 的双层生料搅拌贮存库的结构布置、计算及滑模施工概况。该库是我国目前已建成投产使用的最大预应力双层库, 可供有关科研、设计、施工单位参考。

关键词 筒仓 预应力 滑模

一、前言

该双层库工艺从罗马尼亚引进, 是一个以内径 22m 的筒仓为主体的构筑物, 总高约 80m, 是我国目前建成使用的最大双层库。土建由我院设计, 滑模机具设计由国家建材局建设公司上饶滑模管理处承担, 中国建筑第八工程局施工。设计于 1981 年上半年完成, 1985 年开始装料使用, 达到满载状态。建完后已经受了 6.5 度的地震考验, 至今为止, 使用情况良好。

二、概况

库体建于完好的微风化基岩上。底层贮存库内径 22m、高 43m、装料 12500t (其间 8m 标高处是库底板, 4.5m 标高处是操作平台, 39m 标高处为技术夹层)。上置 4 个内径为 9m 的搅拌库, 每库装料 630t, 库顶标高 61m。其上为 4 层钢筋混凝土框架, 每层标高分别为 64m、69m、73m 和 75.9m。在 61m 标高处悬挑有面积约 60m² 的钢平台三个, 库侧设有楼梯、电梯间直通 69m 标高平台。61m 标高以下的库体部分均用液压滑动模板施工。整个构筑物重 35000t (见图 1、2、3、6)。

三、结构布置及结构选型

(一) 图 5 所示 61m 标高库顶板 (板厚 800mm) 的 11 根框架柱子是根据工艺布置的可能而布置的, 均锚固在库壁上, 在四周外柱间都布置了抗震墙, 从而改善了框架和顶部库壁的受力性能。三个悬挑钢平台采用型钢锚拉杆, 拉杆固定在 69m 标高的框架上 (见图 1)。

(二) 43m 标高平板 (板厚 1000mm) 既是储存库的库顶板又是搅拌库的库底板。内径 22m 的圆板要承受四个直径 9m、高 18m 的搅拌库, 故在储存库内设置了一个不妨碍工艺的内径为 9m、厚 350mm 的承重空心柱。空心柱隔开生料流通孔共三排 (见图 1)。空心柱由底部的 12 根钢筋混凝土承重柱支承 (见图 2)。柱顶设置环梁 (见图 1), 柱间净空为物料流入压力帽的通道。柱子锚固在支承库底板的内环墙上, 库底板板厚 750~1500mm, 成为加腋变断面板 (见图 1)。

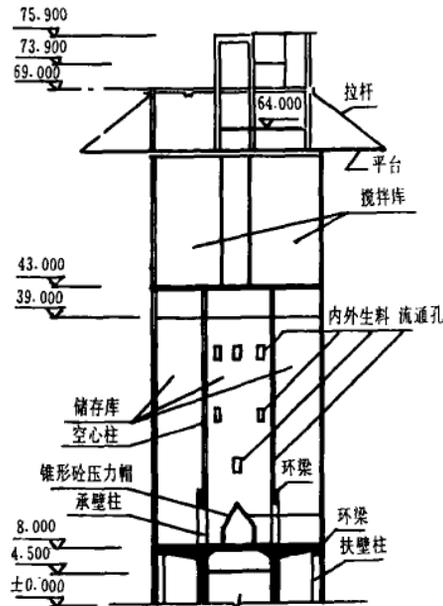


图 1 库纵剖面

(三) 内环墙基础采用圆板悬挑方案, 外环墙采用环形基础。

(四)楼梯间采用钢梁,预制钢筋混凝土平板及预制三角形混凝土踏步板方案。

四、考虑滑模施工的要求

将 $\Phi 22\text{m}$ 储存库库底板(8m标高)以上的库壁做成等断面,库底板下库壁根据支承强度需要采用扶壁柱补强。8.0m标高库底板在12个承重柱处的做法见图2。A-A剖面所示39m标高楼板(厚300mm)做法见图6,做楼板应能承受43m标高板自重加施工荷载。4.5m标高楼板与内环支承墙连接见图3B-B剖面。

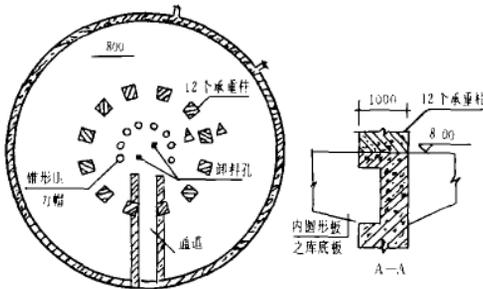


图2 8.000标高平面

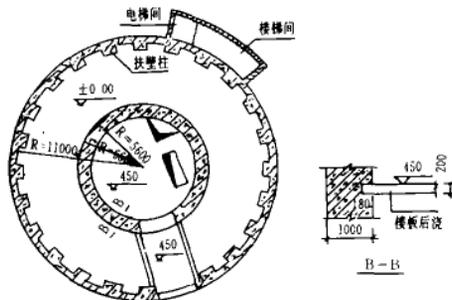


图3 ±0.000平面及4.500标高平面

五、结构计算

(一)地震力计算。本工程按地震烈度7度设计。

1. 基本周期计算:

按结构动力学,一般筒仓可接单质点进行基本周期计算,地震影响系数 α_1 取 α_{max} ,并假定整个构筑物的重心分别在76m(W_1)、69m(W_2)、61m(W_3)、43m(W_4)、8m(W_5)标高处, W_1 、 W_2 、 W_3 、 W_4 、 W_5 分别计算得:140t,706t,3475t,10206t、11365t,如图4所示。

变位计算公式用:

$$\Delta_1 = \frac{\sum Ph_1^3}{3EJ} + \frac{\alpha \sum Ph_1}{GF} + \frac{Mh_1^2}{2EJ}$$

求得: $\Delta'_1 = 0.0058\text{m}$ $\Delta'_2 = 0.00204\text{m}$

$\Delta'_3 = 0.0072\text{m}$ $\Delta'_4 = 0.0583\text{m}$

$\Delta'_5 = \Delta'_5 = 0.0059\text{m}$

$\Delta_1 = \Delta'_5 + \Delta'_4 = 0.0642\text{m}$

$\Delta_3 = \Delta'_5 + \Delta'_1 + \Delta'_3 = 0.0714\text{m}$

$\Delta_2 = \Delta'_5 + \Delta'_1 + \Delta'_2 + \Delta'_2 = 0.0734\text{m}$

$\Delta_1 = \Delta'_5 + \Delta'_1 + \Delta'_3 + \Delta'_2 + \Delta'_1 = 0.0792\text{m}$

$\sum W_i \Delta_i^2 = 64.62$ $g \sum W_i \Delta_i = 10131.9$

基本周期:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum W_i \Delta_i^2}{g \sum W_i \Delta_i}} = 2\pi \sqrt{\frac{64.62}{10131.9}} = 0.5 \text{ 秒}$$

说明自振周期仍很小,可只作第一振型计算

2. 结构总地震力计算及地基强度复核:

按刚性结构考虑。

(1)61m标高以上荷载均作用在61m标高处

$P_1 = 18847\text{kN}$

(2)4个 $\Phi 9\text{m}$ 库料重及自重作用于其重心处

$P_2 = 47481\text{kN}$

(3) $\Phi 22\text{m}$ 储存库之自重,料重及库底板亦作用其重心处

$P_3 = 170765\text{kN}$

(4)取结构影响系数 $C = 0.35$,地震影响系数

$\alpha = 0.23$,计算简图见图5。

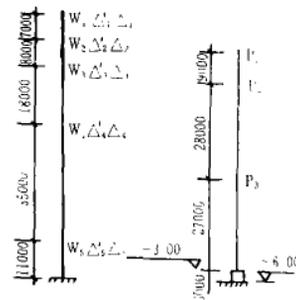


图4

图5

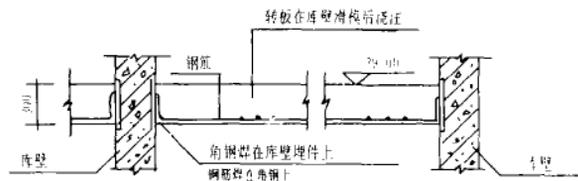


图6 39.000标高楼板与库壁连接图

总地震力为:

$$Q_e = C_\alpha \sum P = 19081 \text{ kN}$$

按勘察报告地基属 I 类土; $[R] = 1470 \text{ kPa}$
取调整系数 $\psi = 1.25$, 算出的基底平均应力为
 $1362 \text{ kPa} < 1.25 < 1470 \text{ kPa}$

(二) $\Phi 9 \text{ m}$ 搅拌库计算:

经比较, 搅拌库环向配筋由充气搅拌过程起控制作用。根据工艺所提的生料容重 $\gamma = 11.76 \text{ kN/m}^3$ 搅拌成流态时稀释系数为 0.8, 故充气搅拌时流态生料粉容重取 $11.76 \times 0.8 = 9.4 \text{ kN/m}^3$, 作用于库壁侧压力和库底垂直压力为 γH 。

罗方提出生料库允许裂缝宽度为 0.2mm, 考虑温度应力组合时为 0.3mm。

$\Phi 9 \text{ m}$ 搅拌库底部环筋, 由外配 $\Phi 16 @ 120$; $A_g = 40.22 \text{ cm}^2$ (壁厚 220mm), 算得

T_i 平均 = 771.75kN, $\sigma_0 = 19.11 \text{ KPa}$; $d = 1.6 \text{ cm}$, C28 混凝土

$\mu = 0.02$; $R_i = 21$; $\psi = 0.7$; $l_i = 13.86 \text{ cm}$; $\delta_{i \max} = 0.2 \text{ mm}$ 。

满足要求。

(三) $\Phi 22 \text{ mm}$ 贮存库计算:

1. 计算假定: 贮存库中 $\Phi 9 \text{ m}$ 空心柱只用于支承 43m 标高库顶板, 忽略其对 $\Phi 22 \text{ m}$ 库壁压力减少的影响。

2. 由于该库竖壁高度与直径之比为 $H/D = 31/22 = 1.4$, 故按浅仓进行设计。

钢筋按裂缝控制在 0.2mm 时配置。

(四) 43m 标高双层库库底板计算:

该板系由内外径分别为 9m 及 22m 的两个圆环支承 (见图 7a), 板上荷重的组合较复杂, 四个 $\Phi 9 \text{ m}$ 圆库范围内的荷重很大, 且有时一库卸空, 另三库满载, 形成不对称状态, 而其它部分板荷重极小。在计算时只假定板上作用均布荷重。为了安全, 除加强局部构造外, 在计算中采用两种组合方法并择其大者。方法①: 中间圆板与外环板分开计算, 中间 $\Phi 9 \text{ m}$ 圆板按筒支板计算, 外部环板分别按两端筒支和两端固定进行计算。方法②: 按外环筒支的连续板计算, 简图如图 8、图 9。

(五) 8m 标高库底板计算:

1. 在地震时底板上物料荷重按 γH 考虑。
2. 因中间圆板及环形板部分受力极不均匀,

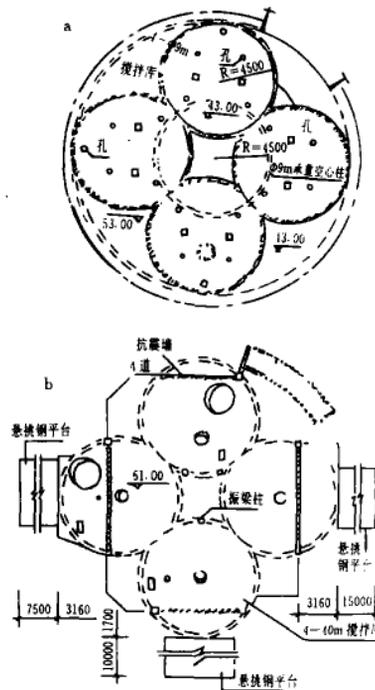


图 7 a. 43.000 标高平面 b. 61.000 标高平面

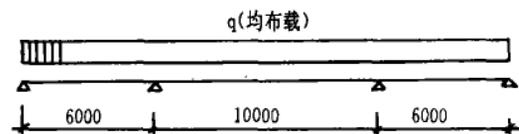


图 8

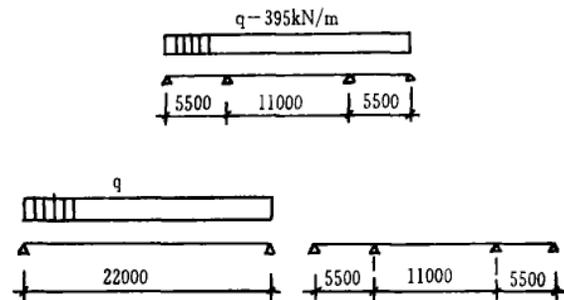


图 9

故亦按两种方法计算,取其大者。方法①

a. 先求出半径 $R=11\text{m}$ 圆板在均布荷载作用下 $r=5.5\text{m}$ 处之挠度 $f_1=238R^2/BC$

b. 再求出在环形荷载 P 作用下 $r=5.5\text{m}$ 处挠度

$$f_2 = \frac{PrR^2}{8(1+u)BC} \{ (1-\beta^2) [(3+u) - (1-u)P^2] + 2(1+u)(\beta^2 - P^2) \} \ln\beta = 0.826PR^2/BC$$

c. 使 $f_1=f_2$, 得 $P=2822\text{kN/m}$

d. 分别求出 $D=22\text{m}$ 圆板在 q 及 P 作用下的内力并迭加。

方法②同五·(四)节

(六) $\Phi 9\text{m}$ 承重空心柱计算

空心柱主要承受 39m 标高以上的物料及构筑物设备自重,空心柱内外壁分别承受粉料对壁的摩擦力,按开孔的环形截面作强度计算。

(七) $\Phi 9\text{m}$ 搅拌壁顶上的框架柱为不对称集中荷载,应对其进行强度、局部承压强度及稳定性计算。

经复核该部分的强度、局部承压及整体稳定都能满足,但应对其局部集中荷载作用下的局部稳定进行核算。计算时将其作为偏心受压构件按 $S \cdot \text{Timo Shenko}$: *Theory of Elastic Stability* 书 $W \cdot \text{Flugge}$ 的解答,经推导得偏心荷载下局部压屈临界压强为:

$$\sigma_{cr} = (N_0 + N_{01})_{cr} / h = \frac{Eh}{\delta \sqrt{3(1-\nu^2)}}$$

得局部压屈临界荷载公式为:

$$P_{cr} = \frac{2\pi Eh^2}{\sqrt{3(1-\nu^2)}}$$

以库壁上受力最大的一个 $\Phi 9\text{m}$ 搅拌库为例,作用在库顶上的最大一组外荷载为 $P_{\text{外}} = 6341\text{kN}$,库壁厚 22cm , $E = 29.4 \times 10^4 \text{kPa}$, ν 取 $1/6$,得:

$$P_{cr} = \frac{2\pi \times 3 \times 10^5 \times 0.20^2}{\sqrt{3[1 - (\frac{1}{6})^2]}} = 4346486\text{kN}$$

安全系数 $K = P_{cr}/P_{\text{外}} = 685$

见关于大型生料库的压屈问题的讨论〔1〕

六、施工情况介绍

从 ± 0.000 至 61.000m 标高采用涂压滑升模板施工,楼、电梯间滑升与筒壁一起进行并滑升至 71.5m 标高。它兼有框架、筒仓滑模的一些特点,增加了滑模的施工难度。工程全部混凝土量达 7000m^3 ,滑升部分混凝土达 2500m^3 。全部钢筋为 428t ,型钢及金属构件达 160t 。

当 $\Phi 22\text{m}$ 库滑模至标高 6.5m ,库壁由轮齿形(有扶壁柱部分)变成环形截面时,采用插堵板的措施来改变截面形状,临时加固库壁竖向承重筋,使之继续滑升(空滑)到模板下口标高为 9.5m 处停止。中间 $\Phi 9\text{m}$ 空心柱滑至标高 $6.5 \sim 13\text{m}$ 时,因库壁由环形截面变为 12 根独立承重柱(见图 2),采用插木门子板和钢堵板的措施。当模板上口滑升到标高 6.5m 时,按结构施工图在库壁上弹出柱轮廓线,按图 2 及 A-A 剖面要求安插木门子和定型钢模,使中间空心柱空滑时有足够刚度以减少纵筋临时加固工作量。此时整个滑模设备已提升到 9.5m 标高位置,然后从 ± 0.000 支模浇 4.5m 标高楼板混凝土,继续支模捣 8m 标高库底板混凝土。

当模板滑升到 42m 标高时,将操作平台板拆除,用手动葫芦(3t)2只,上栓吊在滑模支承杆上,下钩在平台钢桁架上弦,再拆除桁架两端托架,将桁架逐一吊至标高 39m 以下,水平仪抄平,调整标高,最终将钢桁架两端支承固定在预先埋好的库壁预埋件上(见图 10)。支模捣 39m 标高楼面混凝土。为使浇捣的混凝土楼板尽快支承标高 43m 处 1m 厚的混凝土平板荷重,故在混凝土中掺入了早强剂。

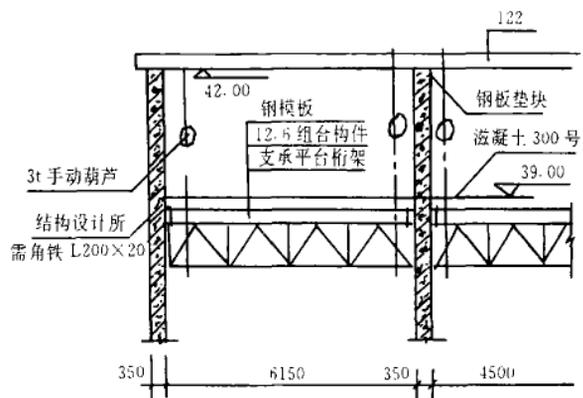


图 10

筒仓结构

当模板滑升到 60.20m, 库壁强度达到设计强度的 70% 时, 将 4 个 $\Phi 9\text{m}$ 库操作平台整体逐个下降, 每库用 3t 手动葫芦 4 只, 上栓吊在专设的角钢支架上, 下栓在平台桁架下弦专设的横担上, 向上提升 5cm 左右, 先后拆除桁架两端托架、固圈、模板和提升架, 整体下降平台, 使之支承在库壁专设的钢牛腿上(见图 11)。

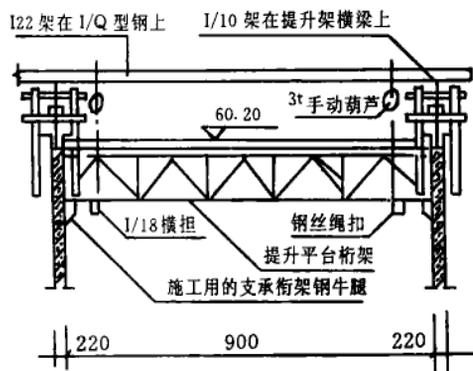


图 11

表 1

序号	部位	标高	原因
1	$\Phi 22\text{m} + \Phi 9\text{m}$ 模板上口	6.5m	柱放线、放木合
2	$\Phi 22\text{m} + \Phi 9\text{m}$ 库模板下口	6.5m	插附壁柱堵板
3	$\Phi 22\text{m} + 9\text{m}$ 库底板模板下口	9.5m	浇筑 8m 标高平板用操作平台浇砼土
4	$\Phi 9\text{m}$ 库环梁底模板上口	13m	环梁支底模(预制安装)
5	$\Phi 9\text{m}$ 库环梁上表面模板上口	15.7m	支环梁上部斜模
6	$\Phi 9\text{m}$ 库变截面处模板下口	16.4m	变截面桁架接长
7	$\Phi 22\text{m} + \Phi 9\text{m}$ 库标高 39m 模板上口	38.7m	焊预埋件
8	楼、电梯间与 43m 标高平板	43cm	空滑与板连接处理
9	楼、电梯间与 61m 标高平板	61m	空滑与板、墙、柱连接处理
10	楼、电梯间与 69m 板	69m	楼、电梯间壁与梁板连接处理

HVM 信息

柳州潭中高架桥临时通车

10月14日, 广西柳州潭中高架桥局部临时通车, 临时开通了高架桥跃进路两侧匝道。高架桥二层闭合环东西走向的匝道封闭暂不开通; 临时开通的高架桥跃进路匝道, 在高架桥桥下道路施工完成、跃进路恢复通行后即中止通行。总投资达

曾试图用楼、电梯间作为垂直运输的通道, 但作了滑模机具设计后否定了这种可能。又因库内楼层多达 5 层, 为减少因库内垂直运输需要开孔而造成后增加的补孔工作量, 故排除了库内垂直运输进料方案而改用库外垂直运输进料方案。

库中心最终施工垂直误差为 1.7cm。

施工组织设计“计划停滑的部位”见表 1。

七、值得注意和讨论的几个问题及体会

(一) 采用滑模施工这种以大型筒仓为主体的构筑物, 设计、施工及建设单位必须紧密配合才能保质保量和快速顺利地完成。

(二) 这类大型筒仓在当前我国采用预应力技术比较困难的情况下用普通钢筋混凝土, 也能保证工程质量、满足使用要求。对库壁厚度的取值看法更决定于是否允许砼出现裂缝。笔者认为做成较薄库壁还是可以的(本工程 $\Phi 22\text{m}$ 储存库壁厚 350mm)。由于筒仓环向拉力完全由环向筋承担, 只要按要求将砼裂缝宽控制在 0.2mm 以内的钢筋配够, 强度就可以保证。

(三) 本工程环向筋采用了焊接接头方案, 焊接量较大。由于库大, 又需要大直径(最大 $\Phi 25$) 钢筋承受环向拉力, 焊接接头多, 为保证接头处的抗拉强度, 在较薄库壁的条件下采用焊接接头是必要的。

(四) 库内壁耐磨层问题以往粉状物料的耐磨层多采用二次抹面, 用滑模施工内壁较光滑, 可用加厚砼保护原层厚度后一次施工完成库壁及耐磨层, 既经济又保证质量。因此本设计将内壁保护层增加到 80mm, 其中耐磨层厚达 40~50mm。

参考文献

- (1) 关于大型圆筒库的屈曲问题《结构工程师》1989年第三期。
- (2) S·Timo Shenko: Theory of Slastic stability