

## 壁面温差对钢筋混凝土圆形水池池壁结构的影响

王 萱<sup>1</sup>,赵星明<sup>1</sup>,刘玉海<sup>2</sup>

1. 山东农业大学水利土木工程学院, 山东 泰安 271018
2. 东营市河口区水利局, 山东 东营 257200

**摘 要:** 采用圆柱壳体理论和有限元分析的方法,对贮存高温水的圆形沉淀池壁进行了结构分析。在壁面温差影响下,两种方法求得的池壁结构应力基本一致,验证了用Solsh190单元模拟钢筋混凝土薄壳结构是可行的。利用有限元软件ANSYS的三维热单元和三维结构壳单元对池壁应力状态进行了热-结构耦合数值模拟,研究了在冬季壁面温差最大的情况下池壁应力的分布规律,为池壁结构加固提供了依据。

**关键词:** 圆形水池; 池壁; 壁面温差; 钢筋混凝土结构; ANSYS

**中图分类号:** TU311.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2015)05-0740-04

## Effect of the Wall Temperature Difference on Reinforced Concrete Cylindrical Tank's Wall

WANG Xuan<sup>1</sup>, ZHAO Xing-ming<sup>1</sup>, LIU Yu-hai<sup>2</sup>

1. College of Hydraulic and Civil Engineering/Shandong Agricultural University, Taian 27100, China

2. Water Bureau of Hekou District Dongying City, Dongying 257200, China

**Abstract:** According to the theory of cylindrical shell and the method of finite element analysis, this article completed the structural analysis on the wall of the tank storing hot water. With the effect of the wall temperature difference, the stresses of wall structure solved by two methods were basic consistent. It verified that using Solsh190 to simulate reinforced concrete shell structure is feasible. By using 3D thermal element and 3D shell element of the finite element software ANSYS, the stress state of the wall structure was completed with the heat-structure coupling simulation. This article discussed the wall stress distribution in maximum wall temperature difference in winter and provided a reference for the reinforcement of wall structure.

**Keywords:** Cylindrical tank; tank's wall; wall temperature difference; reinforced concrete structure; ANSYS

在大中型钢筋混凝土水池结构设计和使用中,有时对温度效应影响水池结构的程度重视不够,造成某些水池池壁因温度变化产生温度应力而开裂的现象时有发生<sup>[1]</sup>。如某钢厂高炉煤气洗涤沉淀池,建成使用后,在池壁外表面出现许多裂缝,局部裂纹已经贯通整个池壁,渗漏现象严重。该圆形水池位于室外自然地面上,池体采用C25混凝土、HPB235钢筋,外径为28 m,高为3.9 m,壁厚0.3 m,池内常年盛有47℃的循环水,冬季室外空气最低温度-16℃。该水池结构的主要受力特点是冬季使用时池壁受到较大的壁面温差影响。为明确裂缝出现的根本原因、确定可行的池壁结构加固方案,有必要对池壁结构进行应力分析。

本文采用圆柱壳体理论和有限元分析两种方法,对该圆形沉淀池壁在考虑壁面温差影响下进行结构分析,探究利用ANSYS对钢筋混凝土圆形水池结构模拟分析的方法和技术,并检验选用结构单元模拟钢筋混凝土池壁作为薄壳结构的合理性。研究在冬季壁面温差最大的情况下池壁内环向正应力、径向正应力及竖向正应力沿池壁高度的分布规律,分析壁面温差对池壁结构的影响程度,为池壁结构加固提供依据。

### 1 圆柱壳体理论的池壁结构分析

#### 1.1 温度变化对池壁结构影响

温度变化对池壁结构的影响分为壁面温差和中面温差两种,一般情况下,中面温差引起的内力在最不利内力组合中不起控制作用,因此圆形水池可只考虑壁面温差对结构的不利影响<sup>[2]</sup>。

壁面温差造成池壁温度高的一侧膨胀、温度低的一侧可能收缩,导致池壁圆环曲率将做改变,但封闭环形池壁自身阻碍了这种曲率的改变,从而使温度低侧不能自由收缩而产生拉力,温度高侧

**收稿日期:** 2013-12-24

**修回日期:** 2014-04-11

**作者简介:** 王 萱(1965-),女,山东龙口,主要从事土木工程学科的教研工作. E-mail:wxsda@163.com

不能自由伸长而产生压力, 温度变形受到阻碍而产生了温度应力。另外, 圆形水池池壁的变形不但受到自约束的限制, 同时受到边界约束条件的限制, 由此也会产生温度应力, 当温度应力较大时可能导致混凝土结构池壁开裂。

### 1.2 池壁内力计算分析

圆形水池属曲面空间结构, 当池壁厚度相对池壁半径较小, 其结构各点的位移远小于池壁厚度, 若忽略垂直于池壁中曲面方向的法向应力, 可近似按各向同性、均质、连续的弹性体, 依照圆柱壳体理论计算池壁内力。

池壁微分体受力情况见图 1, 池壁截面内力包括在垂直截面上的环向力  $N_\theta$ 、环向弯矩  $M_\theta$  和水平截面上的竖向弯矩  $M_x$  和剪力  $V_x$ 。

根据微分体的静力平衡条件、变形和位移之间的几何条件及应力和应变之间的物理条件, 可得池壁内力计算一般公式。顶端自由、底端固定的圆形水池在水压力作用下计算简图见图 2, 内力计算公式为<sup>[3]</sup>:

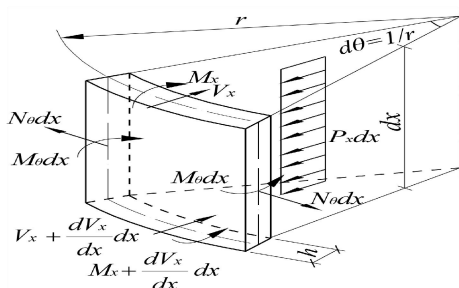


图 1 池壁微分体受力分析

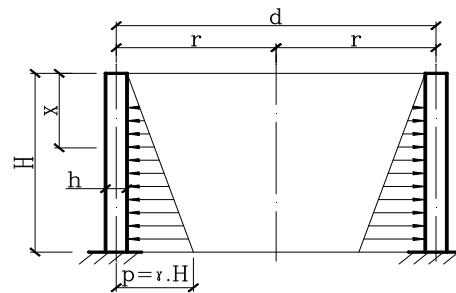


图 2 池壁计算简图

Fig.1 The analysis of forces in differential body of tank's wall Fig.2 The calculation diagram of the tank's wall

$M_x = k_{M_x} PH^2$ ,  $V_x = k_{V_x} PH$ ,  $N_\theta = k_{N_\theta} Pr$ ,  $M_\theta = \mu M_x$ , 其中  $k_{M_x}$ 、 $k_{V_x}$ 、 $k_{N_\theta}$  为系数,  $\mu$  为混凝土泊松比。

对于顶端自由、底端固定的圆形水池在壁面温差影响下内力计算公式为<sup>[4]</sup>:

$$M_T = 0.1Eh^2\alpha\Delta t, M_x = k_{M_x,2}M_T, M_\theta = \mu(k_{M_x,2} - \frac{1}{\mu})M_T, N_\theta = k_{N_\theta,2} \frac{M_T}{h}, V_x = k_{V_x} \frac{M_T}{H},$$

其中  $k_{M_x,2}$ 、 $k_{V_x,2}$ 、 $k_{N_\theta,2}$  为系数,  $E$  为混凝土弹性模量,  $h$  为池壁厚度,  $\alpha$  为混凝土线膨胀系数,  $\Delta t$  为壁面温差。

### 1.3 壁面温差计算

壁面温差与池壁厚度、池壁导热系数和池壁内外温差等有关, 计算公式<sup>[5]</sup>为:

$$\Delta t = \frac{\frac{h}{\lambda_i}}{\frac{1}{\beta_i} + \frac{h}{\lambda_i}} (T_n - T_w),$$

式中,  $h$  为池壁厚度, 本例为 0.3 m;  $\lambda_i$  为池壁导热系数, 混凝土导热系数为 2.03 W/(m.k) (冬季);  $\beta_i$  为池壁与空气间的交换系数, 取 23.26 W/(m<sup>2</sup>.k);  $T_n$  为池壁内水温, 本例为 47 °C;  $T_w$  为池壁外气温, 本例为 -16 °C。计算可得最大壁面温差  $\Delta t = 48.77$  (°C)。

### 1.4 池壁内力分布规律

根据上述原理, 在壁面温差和池内水压力作用下, 池壁垂直截面上的环向力  $N_\theta$ 、环向弯矩  $M_\theta$  和水平截面上的竖向弯矩  $M_x$  沿池深分布如图 3。其中, 混凝土弹性模量  $E = 2.8 \times 10^{10} N/m^2$ 、线膨胀系数  $\alpha = 1 \times 10^{-5} / ^\circ C$ 。

由计算结果看出, 环向力  $N_\theta$  在池壁上半部分是拉力, 在池壁下半部分压力较小, 在顶部拉力达到最大; 环形弯矩  $M_\theta$  使池壁外侧受拉, 自池壁顶部向底部大小变化幅度不大; 竖向弯矩  $M_x$  使池壁外侧受拉, 在池壁底部 0.8 H 较大。

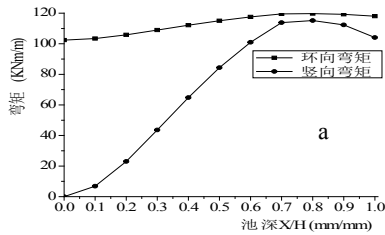


图 3 池壁内力沿壁高分布图

Fig.3 The internal force distribution along the tank's wall

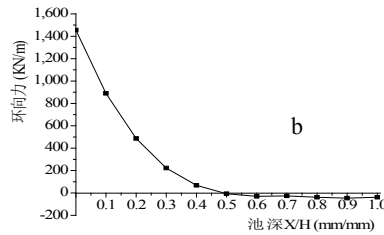


图 4 池壁正应力沿壁高分布图

Fig.4 The stress distribution along the tank's wall

根据环形弯矩  $M_\theta$  和环向拉力  $N_\theta$  求得池壁内外侧环向拉应力  $\sigma_x$  ( $\sigma_x = \frac{N_\theta}{A} \pm \frac{M_\theta}{W}$ ,  $A$ 、 $W$  分别为竖向壁截面面积、壁截面抵抗矩), 根据竖向弯矩  $M_x$  和求得池壁内外侧竖向拉应力  $\sigma_z$  ( $\sigma_z = \pm \frac{M_x}{W_z}$ ,  $W_z$  为水平壁截面抵抗矩), 沿池壁高度分布如图 4。在外侧顶端环向拉应力最大达  $11.68 \text{ kN/m}^2$ , 如此大的拉应力远超过混凝土的抗拉强度, 即便考虑混凝土的塑形性质和钢筋的作用, 池壁外侧产生裂缝也是必然的。

## 2 池壁结构有限元分析

假设池壁下端为固定约束、上端为自由端<sup>[6]</sup>, 利用有限元程序 ANSYS 对洗涤沉淀池的池壁结构做整体热-结构耦合模拟。

### 2.1 建模及选择单元类型

首先采用 ANSYS/Modeling 模块建立三维水池几何模型, 然后采用 Meshing 模块, 按照 Sweep 规则对几何模型进行网络划分, 建立有限元模型, 再施加约束边界条件<sup>[7]</sup>。

选择 ANSYS/Thermal 热分析模块, 单元类型选择热分析单元 Solid70<sup>[8]</sup>, 设置池壁的初始温度、池壁内外侧温度、导热系数等参数, 进行热分析得到池体温度分布结果。

选择 ANSYS/Structural 结构分析模块, 使用单元转换功能“Thermal to Struc”自动将模型中的热单元转换为对应的结构单元类型, 结构单元类型选取三维实体壳单元 Solsh190。根据池壁钢筋网在池壁中的位置和体积, 将池壁简化为具有混凝土层和钢筋层复合铺层结构, 并在 sections 中定义<sup>[9]</sup>。

通过“From Therm Analy”功能读取 ANSYS/Thermal 的分析结果文件, 作为结构分析的热载荷施加到池壁上, 池水压力按线性分布规律施加在池壁内侧, 最后 solve 进行迭代求解。

### 2.2 模拟结果分析

通过 ANSYS 热-结构耦合分析, 得到壁面温差下池壁截面内外侧环向正应力值 (见表 1), 以及环向正应力云图、径向正应力云图、竖向正应力云图 (见图 5、图 6、图 7)。

表 1 壁面温差作用下池壁环向应力  
Table 1 The hoop stress caused by wall temperature difference

池壁高度等分 Equal parts of tank's height	内侧环向应力(N/mm <sup>2</sup> ) The hoop stress on the inside			外侧环向应力(N/mm <sup>2</sup> ) The hoop stress on the outside		
	仅考虑壁面温差(S <sub>1</sub> ) Wall temperature difference only	考虑壁面温差和水压力(S <sub>2</sub> ) Wall temperature and water pressure	S <sub>1</sub> 比 S <sub>2</sub> S <sub>1</sub> to S <sub>2</sub>	仅考虑壁面温差(S <sub>3</sub> ) Wall temperature difference only	考虑壁面温差和水压力(S <sub>4</sub> ) Wall temperature and water pressure	S <sub>3</sub> 比 S <sub>4</sub> S <sub>3</sub> to S <sub>4</sub>
	1 (顶部)	-2.78	-2.36	1.18	10.80	11.23
2	-4.65	-4.22	1.10	8.98	8.92	1.01
3	-6.04	-5.60	1.08	8.55	8.70	0.98
4	-7.08	-6.65	1.07	7.97	8.29	0.96
5	-7.54	-7.15	1.06	7.62	8.05	0.95
6	-7.71	-7.39	1.04	7.35	7.84	0.94
7	-7.69	-7.44	1.03	7.21	7.72	0.93
8	-7.51	-7.33	1.03	7.75	8.23	0.94
9	-7.51	-7.35	1.02	8.62	9.07	0.95
10 (底部)	-7.29	-7.12	1.02	9.46	9.29	1.02

备注: 环向应力以拉应力为正, 以压应力为负。

Note: The value is positive when the hoop stress is tensile stress. It is negative when the hoop stress is compressive stress.

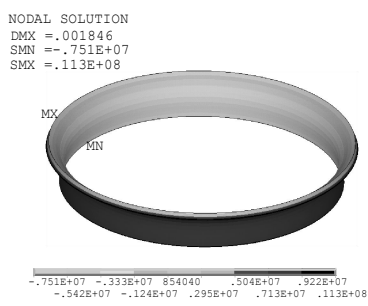


图5 池壁的环向正应力

Fig.5 The hoop stress on the tank's wall

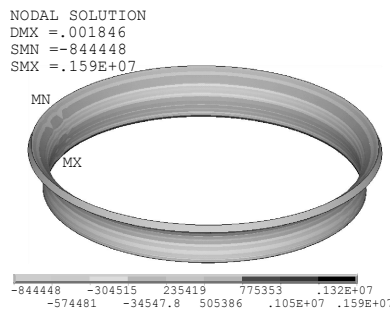


图6 池壁的径向正应力

Fig.6 The meridional stress on the tank's wall

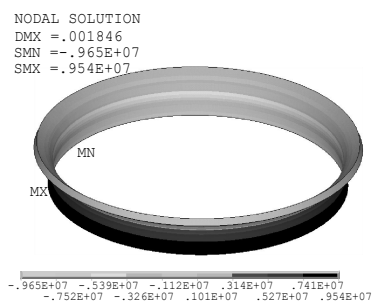


图7 池壁的竖向正应力

Fig.7 The vertical stress on the tank's wall

由表1可见,壁面温差产生的环向正应力远大于池壁内水压力的影响。池壁外侧环向正应力均为拉应力,沿池壁顶部大底部小。拉应力最小值为 $7.72 \text{ N/mm}^2$ 、最大值为 $11.23 \text{ N/mm}^2$ ,均超过了混凝土抗拉强度,能够使池壁外侧产生竖向裂缝。池壁内侧环向正应力均为压应力,中下部值较大而顶部小,且最大值为 $7.44 \text{ N/mm}^2$ ,低于混凝土抗压强度。

结合表1、图5中池壁环向正应力分布规律,可对该水池壁沿环向进行加固<sup>[10]</sup>,池顶部为加固重点。例如采用体外预应力环箍加固法可使池体环向正应力降低。

图6反映了池壁径向正应力值相对较小。由图7可见,池壁内侧竖向正应力为压应力,最大值为 $9.65 \text{ N/mm}^2$ 。池壁外侧竖向正应力为拉应力,最大值为 $9.54 \text{ N/mm}^2$ ,超过了混凝土抗拉强度,能够使池壁外侧产生水平向裂缝。因此,池壁也要考虑沿竖向结构加固。

由图5、7与图4对比可发现,按照圆柱壳体理论和有限元分析两种方法确定的池壁环向正应力、竖向正应力大小及分布规律十分吻合。

### 3 结论

1) 对于圆形水池在壁面温差作用下产生的正应力,ANSYS有限元分析与圆柱壳体理论计算结果基本一致,说明选择三维实体壳单元Solsh190模拟钢筋混凝土池壁,可满足结构应力分析的要求;

2) 圆形水池对温度作用是比较敏感,处于大气温度和介质温度温差较大时会形成较大的壁面温差,其产生的温度应力对池壁结构的影响远大于池内水压力的作用,当池壁拉应力超过混凝土抗拉强度时,很容易造成壁面混凝土开裂。

3) 壁面温差较大的大中型地上水池结构,若采用普通钢筋混凝土结构,无法避免池壁开裂。抑制池壁开裂或裂缝宽度过大只能采用其他结构,如预应力钢筋混凝土结构;

4) 根据结构模拟得到的池壁应力分布规律,找到了工程开裂问题的根本原因,为确定该圆形水池结构加固方案提供依据。

### 参考文献

- [1] 史志利,王 晖,夏善立.混凝土水池池壁温度裂缝的分析与防控[C]//中国土木工程学会水工业分会结构专业委员会.四届四次会论文集,2007:48-55
- [2] 廖 莎.给水排水工程结构[M].北京:中国建筑工业出版社,2007:216-268
- [3] 朱彦鹏.特种结构[M].武汉:武汉理工大学出版社,2012:91-128
- [4] 给水排水工程结构设计手册编委会.给水排水工程结构设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2007:393-430
- [5] 中华人民共和国建设部.给水排水工程构筑物结构设计规范(GB 50069-2002)[S].北京:中国建筑工业出版社,2003:12-29
- [6] 夏桂云,李传习,张建仁.圆形水池底板与池壁的相互作用[J].中南大学学报:自然科学版,2013,44(1):345-350
- [7] 王 萱,赵星明,王 慧等.基于ANSYS的钢筋混凝土结构三维实体建模技术探讨[J].山东农业大学学报:自然科学版,2004,35(1):113-117
- [8] Saeed Moaveni.有限元分析-ANSYS理论与应用[M].3版.王 崧,刘丽娟,董春敏,等译.北京:电子工业出版社,2013:512-531
- [9] 张洪才.ANSYS 14.0工程实例解析与常见问题解答[M].北京:机械工业出版社,2013:153-160
- [10] 吴东平,郭耀杰.圆柱壳温度裂缝体外预应力加固及有限元分析[J].武汉理工大学学报,2007,29(4):103-106
- [11] 何益斌.某工程水池池壁开裂原因分析及防治措施[J].四川建筑科学研究,2009,35(1):108-110