

Three-Dimensional Finite Element Simulation Analysis of Slowly Bonded Prestressed Concrete Sedimentation Tank

Yujie Zhang, Weikang Jia, Xiaoke Li

North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan
Email: allthebestz@163.com, jiawk@vip.qq.com, lixiaoke@ncwu.edu.cn

Received: Mar. 1st, 2019; accepted: Mar. 15th, 2019; published: Mar. 22nd, 2019

Abstract

The slow bonding prestressing technology is applied to the municipal facility sedimentation tank structure, which realizes the organic combination of the advantages of unbonded prestressing construction and the excellent combined force performance of bonded prestressing. In this paper, combined with a slow-bonded prestressed concrete sedimentation tank structure in a city of Gansu Province, ANSYS software is used to construct the prestressed steel bar tensile construction, normal water storage operation, full pool check water level verification and empty pool maintenance. The system simulation analysis of the typical stress state is carried out, and the force mechanism of the slow-bonded prestressed concrete sedimentation tank under various working conditions is clarified. The prestressed steel reinforcement layout scheme is proposed to verify the slow-bonding pre-stressing technology in concrete sedimentation. The feasibility and applicability of the application of the pool structure have certain reference value for the design and construction of similar projects.

Keywords

Sedimentation Tank, Slow-Bonding Prestress, Prestressed Concrete, Three-Dimensional Finite Element

缓粘结预应力混凝土沉淀池 三维有限元仿真分析

张玉洁, 贾维康, 李晓克

华北水利水电大学, 河南 郑州
Email: allthebestz@163.com, jiawk@vip.qq.com, lixiaoke@ncwu.edu.cn

收稿日期：2019年3月1日；录用日期：2019年3月15日；发布日期：2019年3月22日

摘要

将缓粘结预应力技术应用于市政设施沉淀池结构，实现了无粘结预应力施工优势和有粘结预应力优良协同受力性能的有机结合。本文结合甘肃省某市某缓粘结预应力混凝土沉淀池结构，采用ANSYS软件对沉淀池缓粘结预应力钢筋张拉施工、正常储水运营、满池校核水位验证和空池检修四种典型受力状态进行了系统仿真分析，明确了缓粘结预应力混凝土沉淀池在各种工况下的受力机理，提出了预应力钢筋布设方案，验证了缓粘结预应力技术在混凝土沉淀池结构应用的可行性和适用性，对同类工程的设计和施工有一定的参考价值。

关键词

沉淀池，缓粘结预应力，预应力混凝土，三维有限元

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

缓粘结预应力技术是伴随着缓粘结预应力钢绞线的研制成功而逐渐形成的一种特种技术。缓粘结预应力筋同时具备了有粘结和无粘结预应力筋的优良特性：钢绞线周围包裹了一层缓粘结材料，前期预应力筋与缓粘结材料间几乎没有粘结力，与无粘结体系相同；后期缓粘结材料固化，达到与有粘结体系类似的效果。缓粘结预应力混凝土体系既具有无粘结体系施工方便、布筋灵活的优点，又具备有粘结体系混凝土强度高且更耐腐蚀的特点。我国缓粘结预应力研究始于20世纪90年代初，近30年来在缓粘结预应力体系的材料、力学性能和施工工艺等各个方面均有了一些研究成果[1]，但工程应用仍然面临考验。由于缓粘结预应力混凝土体系所具有的优点，在水工预应力混凝土压力隧洞及污水处理池等环境条件较差、防腐要求较高的结构中，存在着先天优势，应用发展空间广阔。

无粘结预应力技术在薄壁、大直径和深槽沉淀池的应用中占主导地位，在郑州市新王庄污水处理厂[2]、宁夏石咀山市大武口区污水处理厂[3]、河北承德污水处理厂[4]等地已经获得成功应用，工程运营良好；缓粘结预应力混凝土技术虽在一些青少年宫展览馆、艺术中心等工程中得到了应用[5]，但是在大直径环形市政结构中的运用相对较少，本文将结合甘肃省某市缓粘结预应力沉淀池结构，进一步分析缓粘结预应力在沉淀池结构中的内力分布规律，进一步明确缓粘结预应力体系在沉淀池结构应用的合理性和优势所在。

2. 工程概况

甘肃省某市某大型缓粘结预应力混凝土沉淀池是一座半地下圆形水池，内径60 m，外径60.3 m。水池池壁结构形式为现浇缓粘结预应力钢筋混凝土，中心筒、构造底板及池壁环形基础均为普通钢筋混凝土结构(图1、图2)。预应力池壁混凝土强度等级为C40，预应力池底板、池壁环形基础、以及中心筒混凝土强度等级为C30，预应力池混凝土垫层采用混凝土强度等级C10，裂缝控制等级为二级。预应力池壁

厚 0.3 m，高 3.3 m，设有 8 个锚固肋，锚固肋宽度为 0.3 m (图 3)。根据地勘资料地基基础有三种类别的岩土构成，地上人工回填土，池底基础为砂砾石，厚度为 1.5 m，砂砾石以下 1.6 m 厚度范围内为强风化砂岩。刮泥机采用 GZG 周边传动刮泥机，考虑刮泥机作用在预应力池壁上的集中荷载。

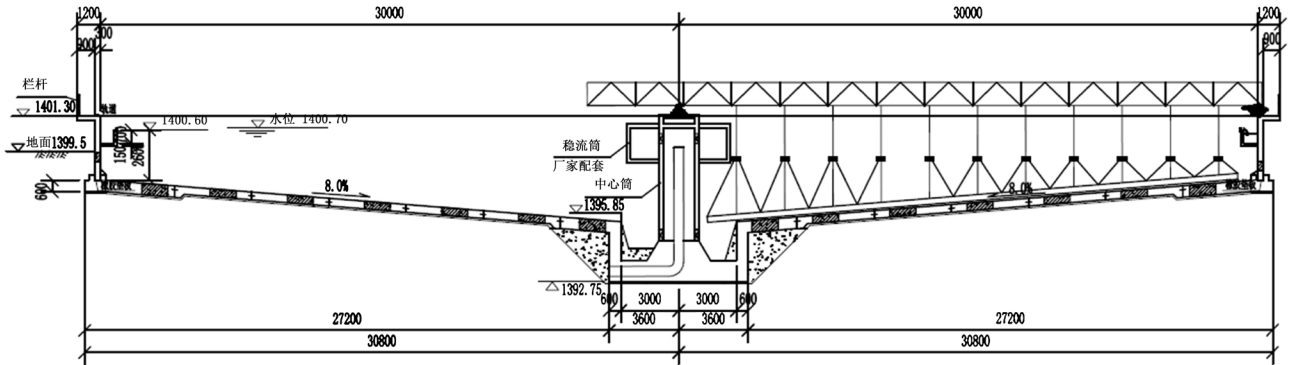


Figure 1. Section of the sedimentation tank structure
图 1. 沉淀池结构剖面图

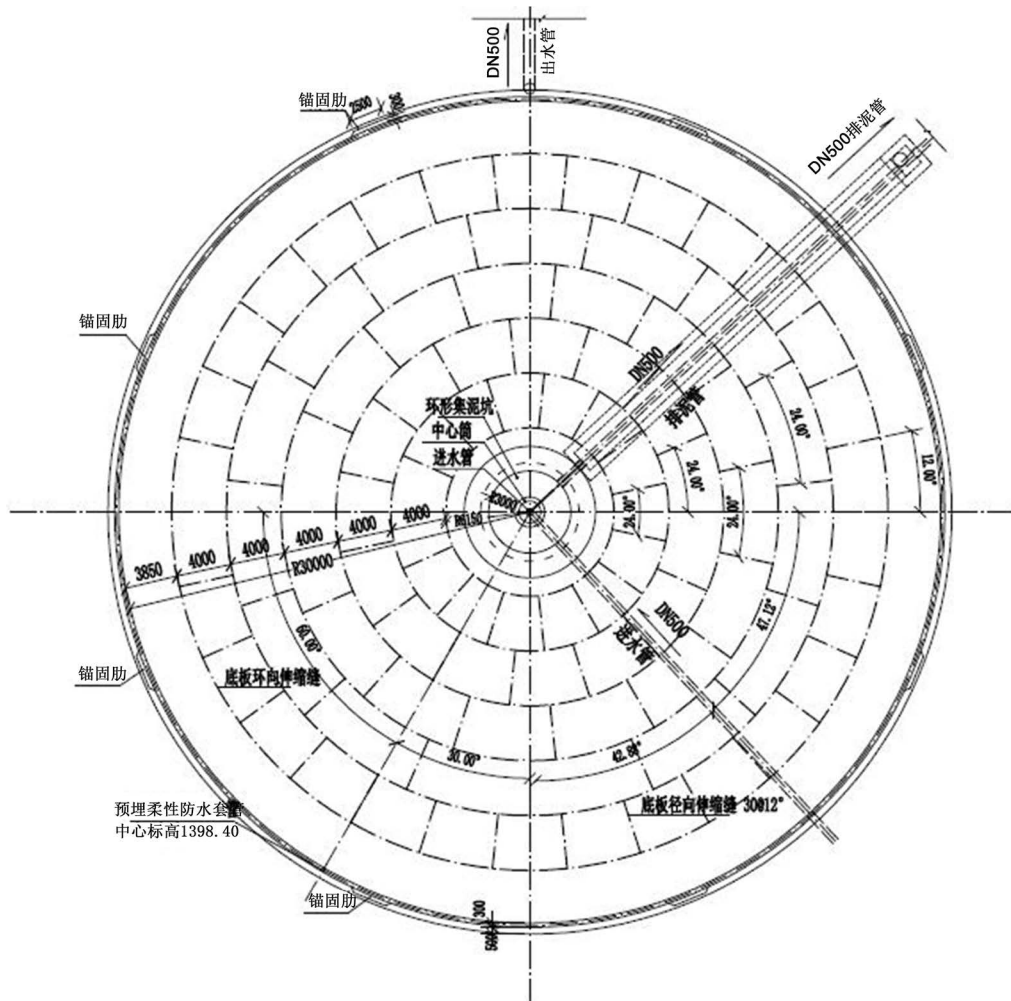


Figure 2. Schematic diagram of sedimentation tank structure
图 2. 沉淀池结构平面图

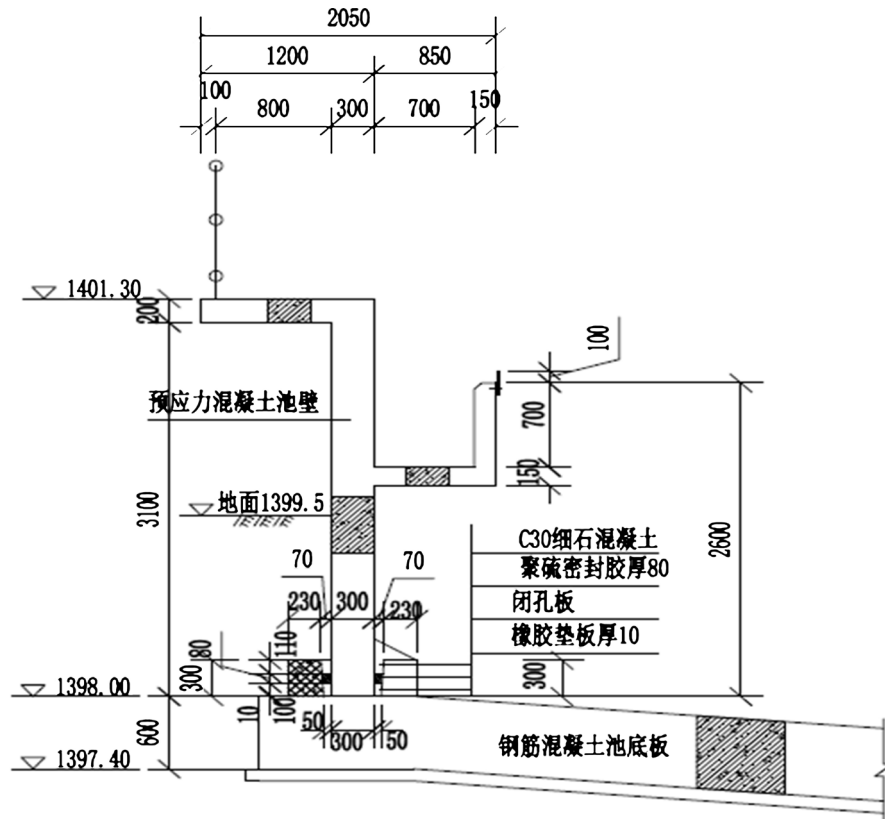


Figure 3. Schematic diagram of the prestressed pool wall
图3. 预应力池壁示意图

赵顺波、李晓克等[6]研究表明：环形高效预应力混凝土污水沉淀池主要荷载均是长期作用的情况，其预应力混凝土池壁的抗裂验算应该满足公式(1-1)

$$\sigma_{ck} - \sigma_{pc} \leq 0.7\gamma f_{tk} \quad (1-1)$$

式中， σ_{ck} ——标准组合作用下，构件抗裂验算边缘的混凝土法向应力(N/mm²)；
 σ_{pc} ——扣除全部预应力损失后在抗裂验算边缘的混凝土预压应力(N/mm²)；
 f_{tk} ——混凝土轴心抗拉强度标准值(N/mm²)；
 γ ——受拉区混凝土塑性影响系数。

在预应力施工阶段，池壁截面边缘的混凝土法向应力[7]应符合

$$\alpha_{ct} \leq 2f'_{tk} \quad (1-2)$$

$$\alpha_{cc} \leq 0.8f'_{ck} \quad (1-3)$$

式中， α_{ct} 、 α_{cc} ——相应施工阶段计算截面边缘纤维的混凝土拉应力、压应力(N/mm²)，
 f'_{tk} 、 f'_{ck} ——与各施工阶段混凝土立方体抗压强度 f'_{cu} 相应的抗拉、抗压强度标准值(N/mm²)。

根据上述公式确定池壁环向预应力钢筋采用 $\phi 15.2$ 缓粘结预应力钢绞线(共 52 束)，沿环向均匀分布，每匝分 4 段，上下层错肋布置，预应力筋束的包角为 90°，两端张拉，拉控制应力 $\sigma_{con1} = 1302$ MPa (图 4)。

预应力筋束采用两阶段张拉：池壁混凝土强度达到设计强度 30%，采用初应力 $\sigma_0 = 390$ MPa 张拉预紧，以预防早起池壁收缩裂缝；待混凝土达到设计强度，采用张拉控制应力 $\sigma_{con} = 1302$ MPa，自上而下逐层张拉，张拉完毕统一锚固。

施工阶段为缓粘结预应力筋张拉完成，浇筑后浇带和填筑回填土工作还未开展；正常储水运营为沉淀池正常运营，池内水位线达到设计水位，池外填土达到地平线高度；满水校核水位为池内水位达到预应力池壁顶端；空池检修为沉淀池内无水池外填土达到地平线高度。

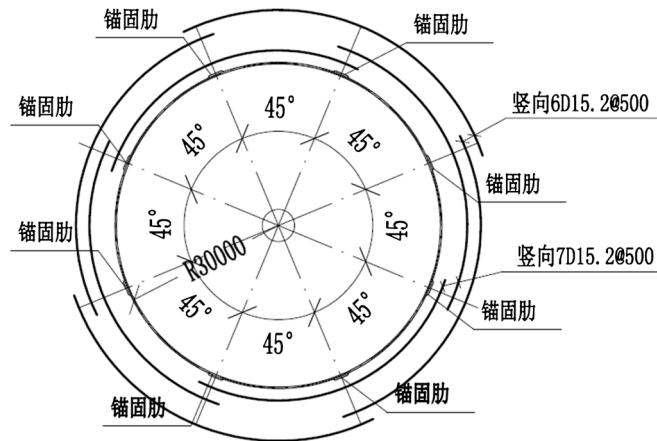


Figure 4. Schematic diagram of prestressing ribs in sedimentation tank
图 4. 沉淀池预应力筋示意图

3. ANSYS 有限元模拟

3.1. 数值模型建立

采用通用有限元分析软件 ANSYS 开展仿真分析。本结构采用分离式模型建模，把钢筋和混凝土作为不同的单元来处理。沉淀池池壁、池底和基础均采用 Solid45 单元模拟；粘结钢绞线采用 Link180 单元模拟。通过 ansys 节点耦合技术建立缓粘结预应力筋和池壁混凝土间的变形协调关系。地基土体取池体结构直径 2 倍，并按照实际土体分层建模。

3.2. 预应力的施加

预应力钢筋张拉采用降温法。考虑包括预应力钢筋钢筋束锚具回缩、预应力钢筋与孔道壁之间摩擦引起、预应力钢筋的应力松弛、混凝土的收缩徐变等因素引起的预应力损失，对钢筋单元每个节点施加不同的温度荷载以模拟沿程损失。

本文将从预应力钢筋张拉施工、正常储水运营、满池校核水位验证和空池检修四种典型工况分析缓粘结预应力池壁的受力机理(后三种工况均考虑了刮泥机影响)。

4. 仿真分析

4.1. 施工阶段

选取两锚固肋之间 2/3 处截面作为研究对象，分析预应力池壁在各种工况下的受力变形情况。

从图 5 预应力池壁断面环向应力分布和图 6 池壁环向应力分布图可以得出，在预应力筋张拉完成后预应力池壁都处于受压状态。池内壁压应力在 0~0.64 m 范围内先减小后增加，在 0.64 m 处压应力达到最大为 0.094 Mpa，之后池内壁压应力整体趋势随着高度的增加逐渐减小，在池壁顶部压应力最小为 0.077 Mpa；池外壁压应力在池底根部达到最大为 0.118 Mpa，在 0~0.98 m 范围内，压应力随高度增加逐渐减少，在 0.98 m 处达到 0.088 Mpa，在 0.98~1.65 m 范围内基本稳定在 0.088 Mpa 附近，随后快速降低并基本稳定在 0.078 Mpa 附近。

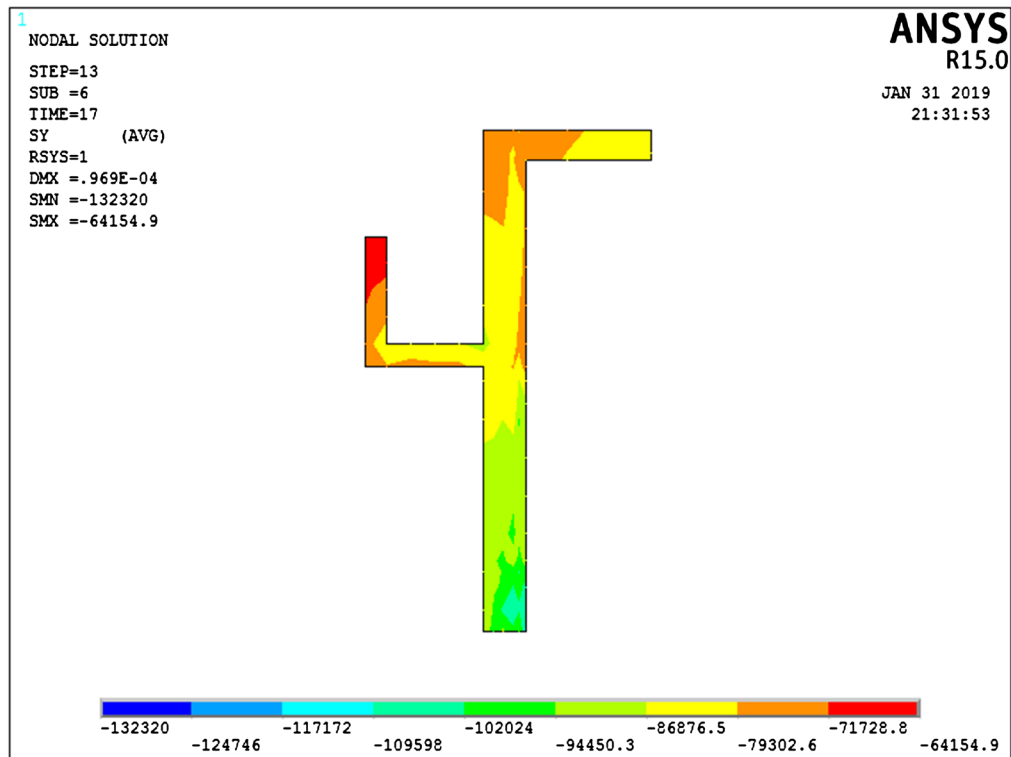


Figure 5. Circumferential stress distribution of the wall section of the construction stage (Unit: Pa)

图 5. 施工阶段池壁断面环向应力分布(单位: Pa)

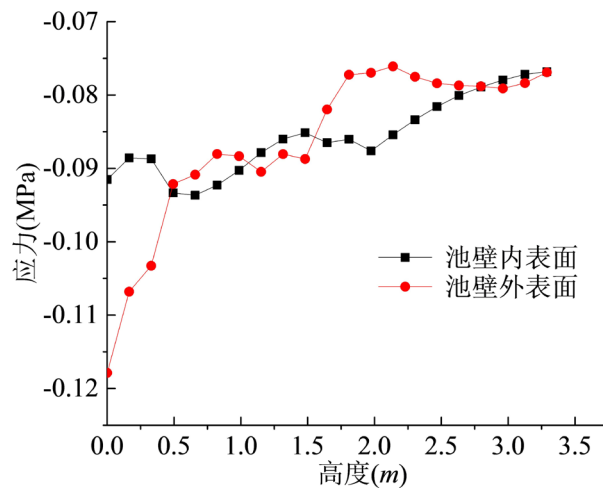


Figure 6. Circumferential stress on the wall surface of the construction stage

图 6. 施工阶段池壁表面环向应力

从图 7 预应力池壁断面径向应力分布和图 8 池壁径向应力分布图可以得出, 池壁内表面在 0~0.33 m 范围内处于受压状态, 且随高度增加压应力逐渐减小, 在池底处压应力最大为 0.0046 Mpa, 随后在 0.33~0.98 m 之间基本处于受拉状态, 在 0.66 m 处拉应力最大为 0.0012 Mpa, 随后应力值逐渐降低并基本处于 0 Mpa 附近, 但在 1.97 m 位置处压应力突变增大到 0.009 Mpa, 随后应力值基本处于 0 Mpa 附近; 池壁外表面径向应力上下波动较大, 在 0~2 m 范围内大多处于受压状态, 最大值达到 0.0048 Mpa, 在 2~3.5 之间基本处于受拉状态, 在 3.12 m 拉应力最大为 0.003 Mpa。因此池壁径向应力虽然有波动但数值较小,

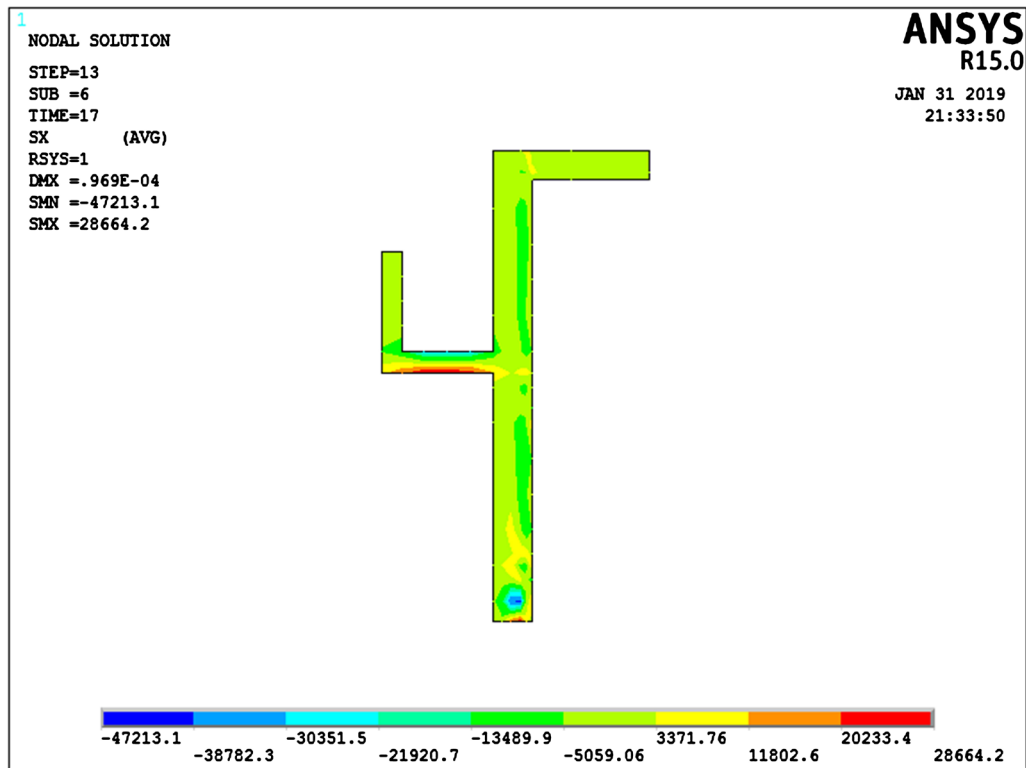


Figure 7. Radial stress distribution of the wall section of the construction stage (Unit: Pa)

图 7. 施工阶段池壁断面径向应力分布(单位: Pa)

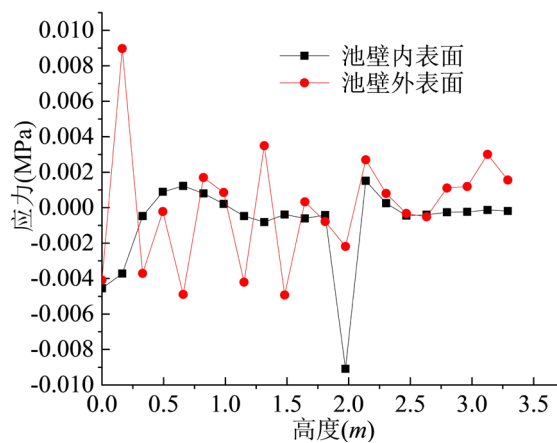


Figure 8. Radial stress on the wall surface of the construction stage

图 8. 施工阶段池壁表面径向应力

基本处于 0 Mpa 附近。

4.2. 正常储水运营状态结果分析

正常储水运营状态下, 图 9 和图 10 预应力沉淀池池壁环向应力分布看出, 池壁整体基本处于受拉状态, 池内壁 0 m 处拉应力值为 0.26 MPa, 随着高度的增加拉应力逐渐减小, 在 0.49 m 处达到最小值 0.15 MPa, 随后随着高度增加拉应力逐渐增大, 当高度达到 1.97 m 时, 拉应力最大为 0.38 Mpa, 随后逐步逐步缓慢增长至池顶; 池壁外表面 0 m 处拉应力值为 0.19 MPa, 随着高度的增加拉应力逐渐增大, 在 0.49 m

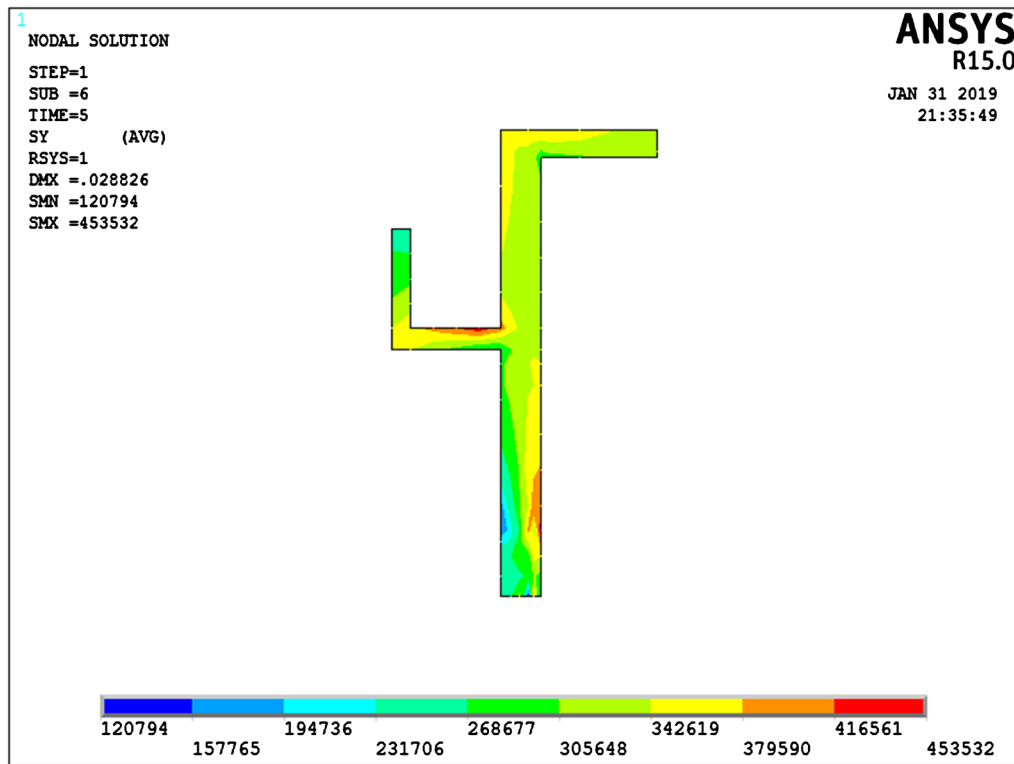


Figure 9. Circumferential stress distribution of the wall section of the normal water storage operation (Unit: Pa)
 图 9. 正常储水运营池壁断面环向应力分布(单位: Pa)

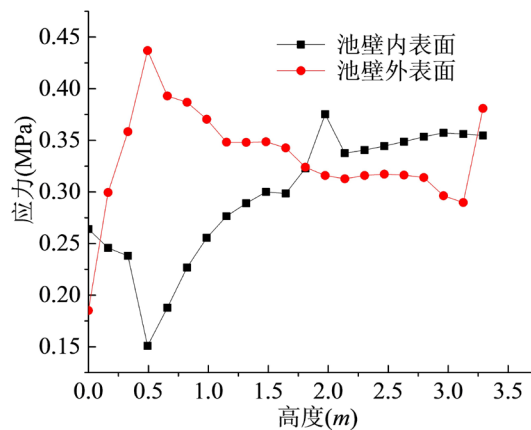


Figure 10. Circumferential stress on the wall surface of normal water storage operation
 图 10. 正常储水运营池壁表面环向应力

处拉应力达到最大值, 最大值为 0.44 MPa, 随后拉应力随着高度的增加逐渐降低, 在距池顶 0.15 m 范围内, 拉应力略微增大, 在池顶处达到 0.38 MPa。

图 11 和图 12 预应力沉淀池池壁径向应力分布看出, 池壁内表面在 0 m 处的径向应力接近 0 Mpa, 随后整体呈下降状态, 并在高度为 0.49 m 时, 压应力达到最大值, 大小为 0.13 Mpa, 在 0.49~1.8 m 之间, 应力基本稳定在 0 Mpa 且为压应力, 在 1.97 m 处应力突变, 压应力转变成拉应力, 数值为 0.17 Mpa, 随后基本稳定在 0 Mpa 左右; 池壁外表面在 0 m 处的径向应力为最大压应力, 大小为 0.31 Mpa, 随着高度的增加径向应力的大小基本保持不变, 在 2.79~3.12 m 范围内略微下降, 降至 0.13 MPa, 之后应力增大,

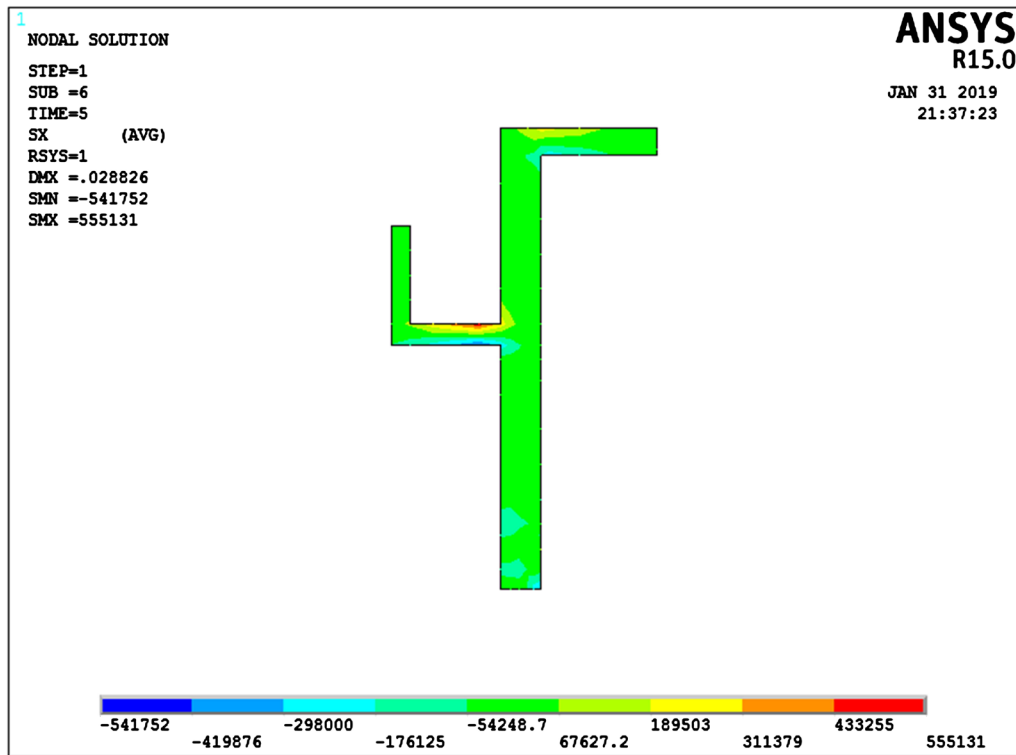


Figure 11. Radial stress distribution of the wall section of the normal water storage operation (Unit: Pa)
图 11. 正常储水运营池壁断面径向应力分布(单位: Pa)

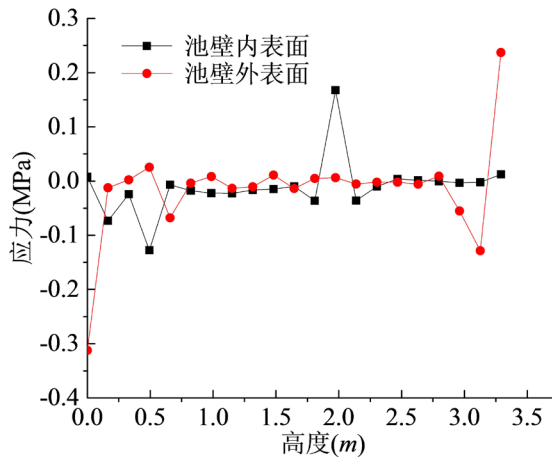


Figure 12. Radial stress on the surface of the pool wall in normal water storage operation
图 12. 正常储水运营状态池壁表面径向应力

在池顶处池壁外表面应力达到最大值 0.24 MPa。

刮泥机作用在预应力池壁上产生的集中荷载只在作用点附近对池壁产生略微影响，应力变化小且作用范围小。

4.3. 满水校核水位状态结果分析

在图 13 和图 14 预应力池壁环向应力分布可以看出，池壁整体处于受拉状态，池内壁底部拉应力最小为 0.27 MPa，池内壁在 0~0.33 m 范围内，受力均匀且拉应力在 0.27 Mpa 左右，随后应力逐渐减

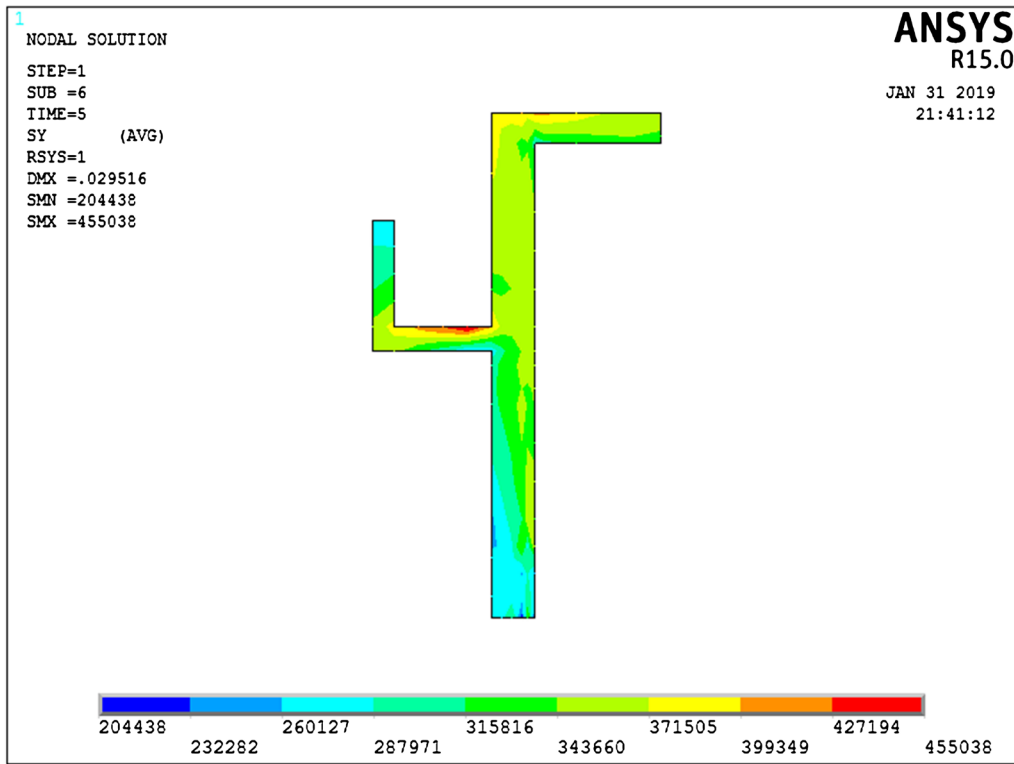


Figure 13. Circumferential stress distribution of the wall section of the water level of the water level (Unit: Pa)
图 13. 满水校核水位池壁断面环向应力分布(单位: Pa)

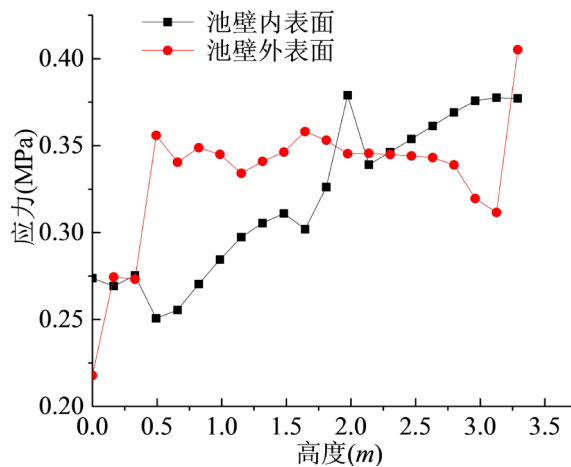


Figure 14. Circumferential stress on the surface of the wall of the water level
图 14. 满水校核水位池壁表面环向应力

少后增大为 0.38 Mpa, 随后拉应力骤减为 0.33 Mpa, 随后随着高度增加拉应力逐渐增大, 并在 3.29 m 达到最大值为 0.38 Mpa; 池外壁底部拉应力最小为 0.22 MPa, 随着高度的增加拉应力逐渐增大, 并在 0.49 m 处拉应力达到 0.36 Mpa, 在 0.33~2.79 m 范围内, 池外壁受力均匀, 拉应力在 0.34 Mpa 左右, 随后拉应力有所降低并在 3.12 m 处达到 0.31 Mpa, 在 3.29 m 拉应力突变达到最大值为 0.41 Mpa。

在图 15 和图 16 预应力池壁径向应力分布可以看出, 池内壁径向应力在池壁底部处于受压状态, 大小为 0.018 Mpa, 在 0.16~1.8 m 范围内, 池外壁受力均匀且压应力基本处于 0.02 Mpa 左右, 在 1.97 m 处

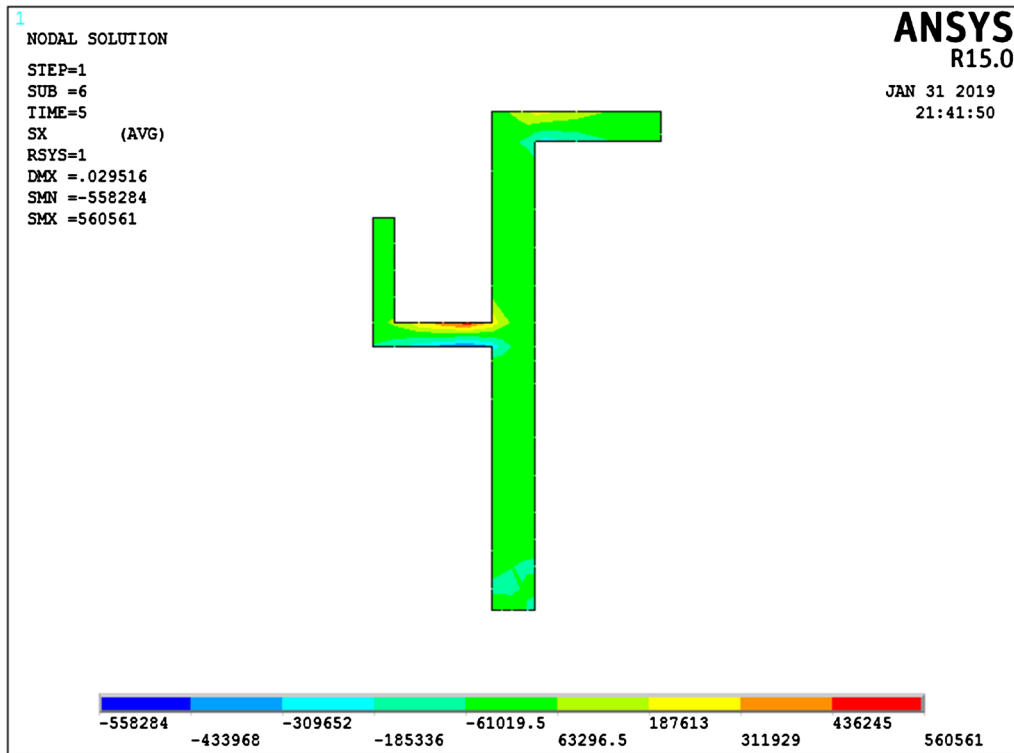


Figure 15. Radial stress distribution of the wall section of the water level of the water level (Unit: Pa)
图 15. 满水校核水位池壁断面径向应力分布(单位: Pa)

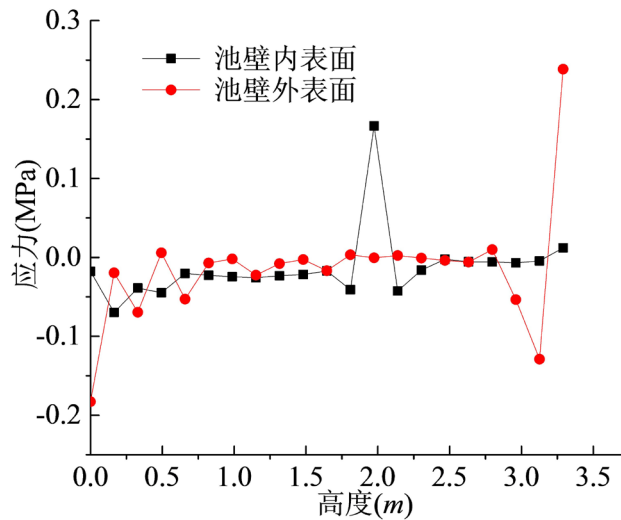


Figure 16. Radial stress on the surface of the wall of the water level
图 16. 满水校核水位池壁表面径向应力

应力突变, 拉应力达到最大值为 0.17 Mpa, 随后池内壁受力均匀, 基本稳定在 0 Mpa 左右; 池外壁径向应力在池壁底部处于受压状态, 且压应力最大为 0.18 Mpa, 在 0.16~2.8 m 范围内, 池外壁受力均匀, 基本稳定在 0 Mpa 左右, 在 2.8~3.12 m 范围内, 压应力随高度增加逐渐增大到 0.12 Mpa, 但当高度达到 3.29 m 时, 应力突变, 达到拉应力最大值为 0.24 Mpa。

刮泥机只在作用点附近对预应力池壁产生略微影响, 应力变化小且作用范围小。

4.4. 检修工况结果分析

检修工况时, 图 17 和图 18 预应力沉淀池池壁环向应力分布看出, 池壁内表面基本处于受拉状态, 0 m 处拉应力值为 0.44 MPa, 随着高度的增加拉应力逐渐减小, 并在 0.49 m 处出现压应力, 大小为 0.16 MPa, 随后整体处于受拉状态, 且随着高度增加拉应力逐渐增大, 当高度达到 1.97 m 时, 拉应力最大为 0.74 Mpa, 随后逐步稳定在 0.67 MPa; 池壁外表面整体处于受拉状态, 0 m 处拉应力值为 0.14 MPa, 随着高度的增加拉应力逐渐增大, 当高度达到 0.49 m 时拉应力最大, 最大值为 1.26 MPa, 随后拉应力随着高度的增加逐渐降低, 并逐步稳定再 0.6 Mpa 附近。

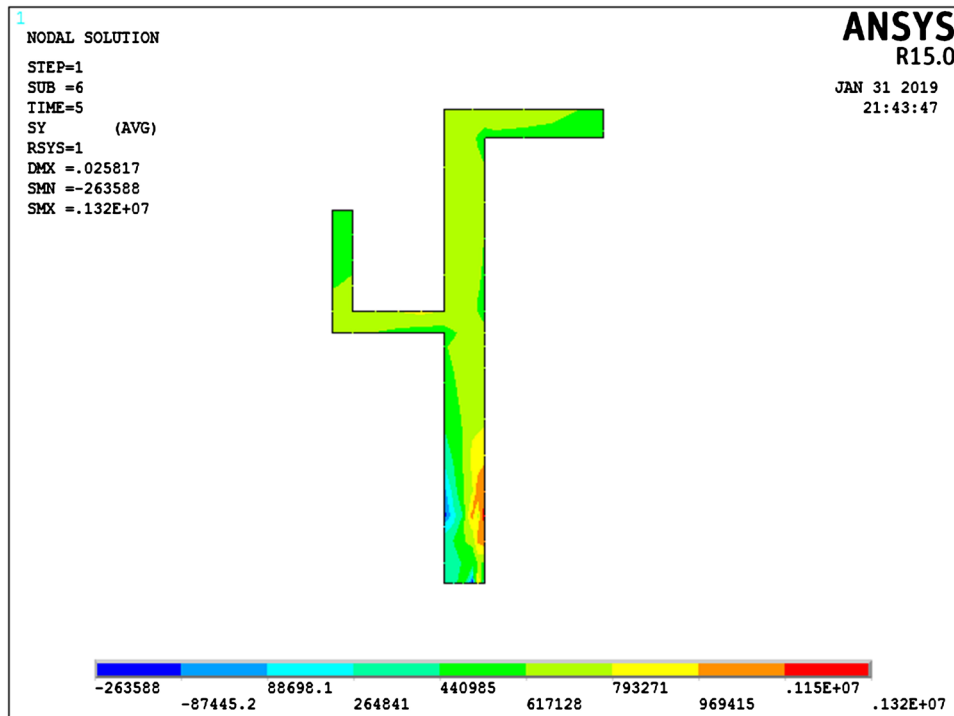


Figure 17. Circumferential stress distribution of the wall section of the service condition (Unit: Pa)
图 17. 检修工况池壁断面环向应力分布(单位: Pa)

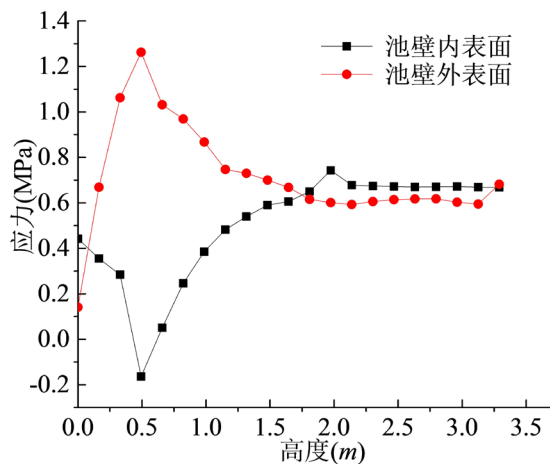


Figure 18. Circumferential stress on the surface of the prestressed pool wall under maintenance conditions
图 18. 检修工况预应力池壁表面环向应力

图 19 和图 20 预应力沉淀池池壁径向应力分布看出,池壁内表面在 0 m 处的径向应力为最大拉应力,大小为 0.27 Mpa, 随后降低, 并在高度为 0.49 m 时, 压应力达到最大, 大小为 0.58 Mpa, 在 0.49~1.8 m 之间, 应力基本稳定在 0 Mpa, 但在 1.97 m 处应力突变, 拉应力达到 0.31 Mpa, 随后基本稳定在 0 Mpa; 池壁外表面在 0 m 处的径向应力为最大压应力, 大小为 1.24 Mpa, 随着高度的增加逐渐变为拉应力, 当高度达到 0.66 m 时, 拉应力达到最大值为 0.24 Mpa, 随后应力随高度增加逐渐降低, 并基本稳定在 0 Mpa。刮泥机只在作用点附近对预应力池壁产生略微影响, 应力变化小且作用范围小。

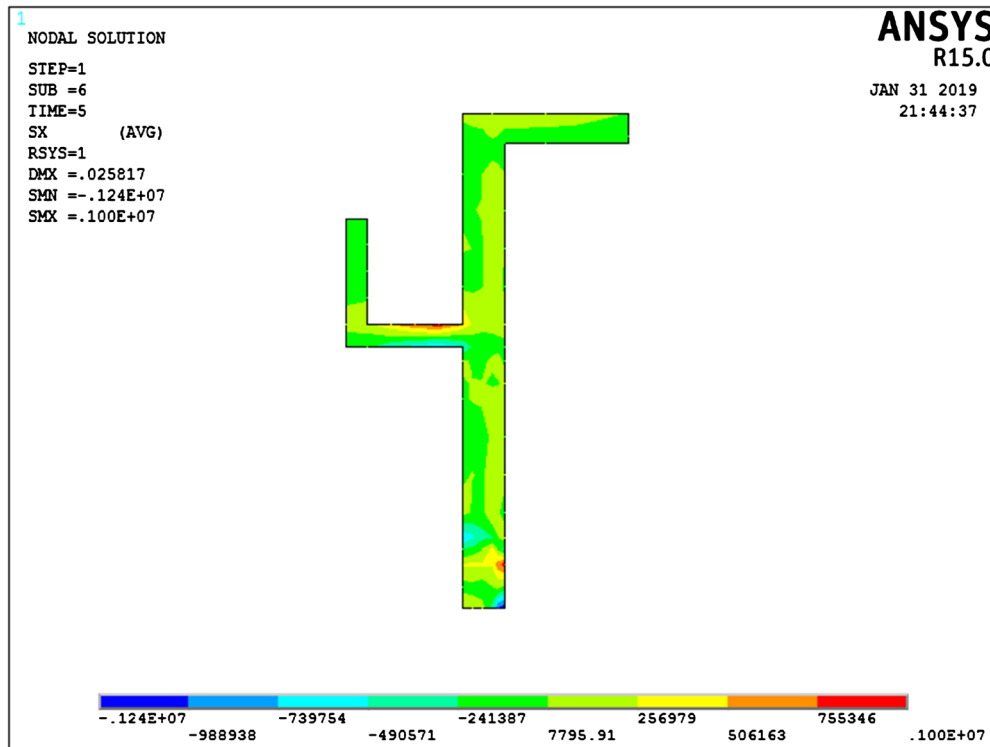


Figure 19. Radial stress distribution of the wall section of the service condition (Unit: Pa)
 图 19. 检修工况池壁断面径向应力分布(单位: Pa)

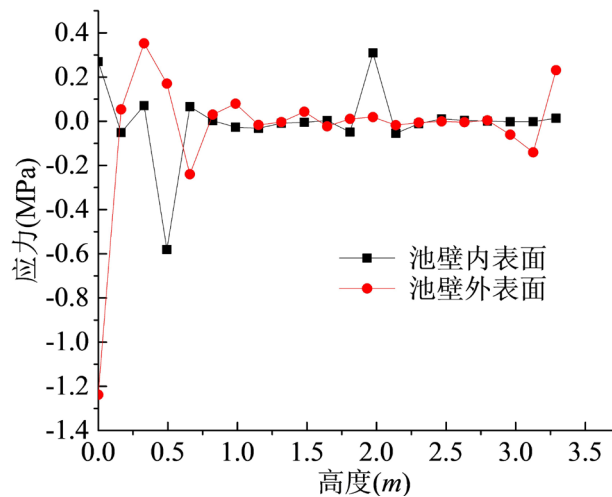


Figure 20. Radial stress on the surface of the prestressed pool wall under maintenance conditions
 图 20. 检修工况预应力池壁表面径向应力

5. 结语

通过分析缓粘结预应力钢筋张拉完成时、校核水位状态、正常使用状态和检修工况四种状态,发现

1) 施工阶段混凝土池壁环向应力整体处于受压状态,其他三种工况下环向应力全部满足抗裂验算要求,径向应力在各种工况下大多数处于受压状态且池壁整体数值变化范围较小,结构的应力和变形满足设计要求。

2) 预应力池壁内外环向应力在 0.49 m 和 1.97 m 处受外部回填土影响会出现突变,但变化在合理范围内,其他位置环向应力变化平缓且逐渐趋于某一应力值附近,池底应力普遍小于池顶。

3) 预应力池壁内外径向应力在 1.97 m 处(即“U”型蓄水口水平处)受外部回填土影响会出现突变,预应力池壁产生弯曲变形,其他部位环向应力在某一数值上下小范围浮动,池壁变形均匀稳定。

4) 刮泥机只在作用点附近对预应力池壁产生略微影响,应力变化小且作用范围小,对结构整体产生的影响不大。

因此,大直径沉淀池结构采用所提缓粘结预应力筋方案实现了将无粘结预应力施工优势和有粘结预应力优良协同受力性能有机结合,该工程已建设完成并正常运营。工程的成功实践也进一步验证了缓粘结预应力技术在混凝土沉淀池结构应用的可行性和适用性,本文研究成果将对同类工程的设计和施工有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 熊学玉. 缓粘结预应力混凝土研究综述[J]. 建筑结构, 2018, 48(8): 83-91.
- [2] 孔祥荣, 赵顺波. 无粘结预应力技术在污水沉淀池工程的应用[J]. OVM 通讯, 1999(6): 30-32.
- [3] 何德湛. 采用环锚体系施工无粘结预应力圆形沉淀池[J]. 特种结构, 2002(2): 69-73.
- [4] 焦挺, 余红英, 饶益民. 大直径无粘结预应力污水沉淀池的施工[J]. 广东土木与建筑, 2007(11): 46-47 + 35.
- [5] 何德湛. 缓粘结预应力筋在天津力神锂离子电池厂扩建工程项目中的应用[J]. 建筑结构, 2005(9): 72.
- [6] 赵顺波, 李晓克, 严振瑞, 等. 环形高效预应力混凝土技术与工程运用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [7] 水工混凝土结构设计规范(SL 191-2008) [s]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org