

大跨度水池底板及池壁受力分析

文 / 黄 强 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

吴启豪 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

肖照阳 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

摘要: 大跨度水池底板受静水压力、结构自重及地基反力耦合作用, 池壁主要受静水压力及土压力双向作用, 其结构受力看似简单, 但底板壁板互为影响, 地基反力呈非线性分布, 因此深入分析其受力特点对结构设计具有重要价值。为此建立了典型大跨度水池的有限元整体模型, 通过计算分析获得了其底板应力分布规律和池壁变形特征。

计算结果表明: 底板受力基本呈圆形对称分布, 最大弯矩出现在跨中位置; 池壁底部产生最大弯矩。

关键词: 大跨度水池; 底板受力; 池壁变形; 有限元分析

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.07.042

引言

大跨度水池作为重要的水工构筑物, 其结构看似简单, 底板受静水压力、结构自重及地基反力作用, 池壁主要受静水压力及土压力作用, 但底板壁板受力互为影响, 地基反力也应随底板跨度的增加而逐渐呈非线性分布, 简单的简化线性计算无法准确得到其实际的受力分布, 因此需要对底板和池壁进行整体分析。目前对水池结构的研究主要集中在抗震性能和防渗漏方面, 对于大跨度水池底板及池壁的受力特征研究相对不足。为研究大跨度水池的整体应力分布状态, 通过建立有限元计算模型, 分析得到其结构内力分布规律, 为大跨度水池的结构优化设计提供依据。

一、大跨度水池结构特点

大跨度水池结构主要由底板、池壁、支撑梁及顶板等构件组成, 整体呈封闭箱型结构, 其中底板作为承重构件, 厚度较大, 采用钢筋混凝土结构, 配筋要求高, 通常设置双层双向钢筋。底板四周与池壁形成刚性连接, 共同承担荷载, 池壁为钢筋混凝土薄壁结构, 墙体一般垂直布置, 部分特殊情况下也采用斜墙设计以增强结构稳定性, 为增强结构整体性, 在池壁顶部设置环向拉结梁同时在池壁适当位置布置加劲肋。大跨度水池顶部通常采用现浇混凝土板, 并设置检修孔和透气孔, 部分大跨度水池还设置中间支撑柱以减小跨度, 提高结构承载能力, 在满足结构受力要求基础上构件截面尺寸力求经济合理, 池壁及底板厚度应适中, 避免过大或过小。为保证结构整体性能, 施工缝位置宜设置在受力较小部位, 且应采取可靠的防水措施, 大跨度水池结构设计需考虑温度变形影响, 必要时设置伸缩缝并在结构薄弱部位增设构造钢筋, 混凝土强度等级及钢筋型号选择应满足结构承载力及耐久性要求, 确保水池结构长期安全运行。

二、大跨度水池受力特点

(一) 荷载作用

大跨度水池结构承受多种荷载作用, 竖向荷载主要包括结构自重、水重力以及顶板恒活荷载。水池蓄水时, 底板及池壁内侧受静水压力作用, 压强大小随深度增加

而增大, 一般采用液体静压力公式 $p = \rho gh$ 并考虑水位变化影响; 池壁外侧受土压力作用, 土压力大小与土层性质、埋深及地下水位高度相关。土压力计算可采用朗肯土压力理论, 主动土压力系数需结合地勘资料确定, 通常粘性土时取 0.35-0.45, 砂性土时取 0.25-0.35。此外, 水池整体还需考虑温、湿度变化引起的附加应力。同时混凝土的收缩及地基不均匀沉降也会对水池产生附加应力, 当水池外壁侧回填土不对称时, 将产生不平衡侧压力, 这种情况在山地或坡地建设水池时尤为常见^[1], 以上荷载作用在实际分析中均需予以考虑。

在水池计算时, 应根据可能出现的状态考虑不同荷载组合工况, 包括施工期、试水期和使用期等。施工期主要考虑结构自重及施工荷载, 荷载效应相对较小; 试水期需考虑满水压力及水重力作用, 此时结构变形达到最大值; 使用期除考虑正常使用荷载外, 还需考虑地震作用及意外荷载。针对各种工况进行荷载组合, 分析最不利组合工况。在实际工程中根据规范采用系数法确定荷载组合, 永久荷载分项系数取 1.3, 可变荷载分项系数取 1.5, 并根据工程重要性取 0.9 ~ 1.1 的整体调整系数, 以保证结构具有足够的安全储备。

(二) 底板受力特征

底板作为水池重要承重构件, 合理的结构设计和施工工艺至关重要^[2]。其在竖向荷载作用下主要承受弯矩和剪力, 底板弯矩分布呈抛物线形, 跨中正弯矩最大, 支座处负弯矩较大, 底板与池壁连接处产生较大负弯矩, 同时还承受剪力作用, 在水池蓄水过程中底板应力逐渐增大, 蓄满水后达到最大值。由于荷载分布均匀, 产生对称变形, 水池底板跨中挠度最大, 并随跨度增大而增加。同时整体受变形约束, 会产生轴向拉应力, 当拉应力超过混凝土抗拉强度时将导致开裂, 底板厚度不宜过小, 一般不小于跨度的 1/50 以控制变形。为增强底板整体性, 底板通常布置双层双向钢筋, 钢筋面积需同时满足承载力和变形要求。此外, 由于混凝土收缩及温度变化影响, 大跨度水池底板易产生裂缝, 在实际工程中尚需采取合理的构造措施。

(三) 池壁受力特征

池壁在水池使用过程中承受内外两侧不同性质荷载作用，受力状态随水位变化而改变。壁板内侧水压力随深度线性增加；外侧土压力分布与土体性质、回填密实度密切相关；池壁底部与底板连接处由于刚度突变，产生最大弯矩，随高度增加弯矩呈抛物线形式逐渐减小，至顶部弯矩接近于零。由于池壁为薄壁结构，易出现挠曲变形，在蓄水过程中池壁产生水平位移，位移量随水位升高而增大，这种变形特征要求池壁必须具有足够的侧向刚度。因此，除增加壁板厚度以外，可在池壁顶部通常设置加强环梁或设置加强肋，对变形起到有效约束作用，同时也改善了池壁的整体性。

在温度荷载作用下池壁易产生竖向裂缝，为防止裂缝扩展，池壁钢筋配置需满足最小配筋率 0.25% 的要求并采用合理的构造措施，如设置温度钢筋和分布钢筋。池壁底部与底板连接处应重点考虑抗剪承载力，必要时可设置暗梁形式并加密箍筋布置，或增设腋角和受剪钢筋。在实际工程中尚应注意控制混凝土浇筑质量，确保池壁厚度均匀，避免产生离心偏差，同时预留合适的沉降缝和变形缝，以提高结构的整体受力性能^[3]。

(四) 应力分布规律

水池结构在多种荷载组合作用下呈现出特定的应力分布规律，即底板应力分布整体呈圆形对称，跨中区域弯矩最大，并向支座方向逐渐减小，底板与池壁连接处由于刚度突变，产生应力集中，局部峰值明显。池壁竖向弯矩沿高度方向呈抛物线形变化，底部应力最大，向上逐渐减小，顶部应力较小；水平弯矩在转角处最大。在温度变化作用下结构产生附加应力，底板中部区域产

生拉应力，池壁中部易形成贯通裂缝，水池转角处应力较为复杂，三向应力相互叠加，需采取加强措施，应力分布规律分析结果表明，结构主要受弯构件应力水平相对较高，但整体应力分布合理，满足规范要求。

(五) 变形特征分析

水池结构在荷载作用下产生不同形式的变形，变形特征与结构尺寸、荷载大小及约束条件密切相关，底板在竖向荷载作用下产生挠度变形，变形曲线呈碗状，跨中最大挠度随跨度增大而增加。通过分析发现，随着跨度增加，挠度呈非线性增长，这种变形规律表明，大跨度水池底板刚度是控制结构变形的关键因素，底板变形过程中，支座处产生负弯矩，导致上表面产生拉应力，容易引起裂缝，因此需要在此处适当增加配筋量^[4]。

池壁变形受多个因素影响，包括壁厚、高度以及约束条件等，其在水压力作用下向外产生水平位移，位移量沿高度方向呈抛物线分布。温度变化引起结构整体膨胀或收缩，这种温度变形若受到约束，将产生较大的温度应力。混凝土收缩和徐变也会导致结构产生长期变形，一般在 90 天后变形量趋于稳定，最终收缩应变约为 0.3%。

底板与池壁连接处由于约束作用产生应变集中，因此需要特别注意这些部位的构造处理。结构各部位变形量均应满足规范规定的挠跨比限值为 1/250，且需注意变形过大可能引起开裂，特别是在荷载反复作用下，累积变形可能导致结构损伤。水池蓄水过程中，结构变形逐渐增大，一般在蓄水后 3-5 天达到稳定状态，之后变形基本保持不变，首次蓄水时应分段进行，每次蓄水高度不宜超过 2 米以便观察结构变形情况。

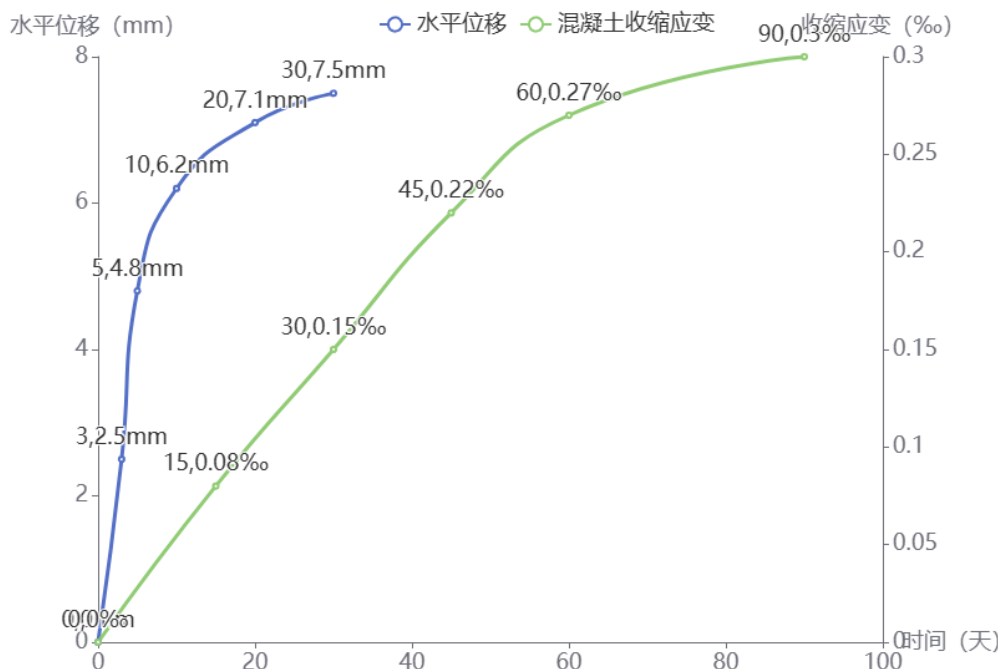


图 1 水池池壁水平位移和混凝土收缩应变随时间的变化关系

三、典型大跨度水池受力计算

(一) 有限元整体模型

大跨度水池结构有限元建模需综合考虑几何特征、材料性能及构件连接方式。建模时采用三维实体单元, 确保模型能够真实反映结构受力特征, 水池底板和池壁采用四节点四边形壳单元。通过合理的单元类型选择和网格划分既保证计算精度, 又能保持较高的计算效率, 为后续分析奠定基础^[5]。

某大跨度水池底板厚度 600mm, 池壁厚度 400mm。网格划分采用结构化网格, 单元厚度按实际尺寸设置, 计算模型单元划分适中, 转角处及应力集中区域适当加密, 底板与池壁连接节点采用刚性连接。环梁与池壁连接处的过渡区域采用四面体单元进行过渡以避免网格畸变, 支撑梁采用三维梁单元, 截面特性与实际构件一致, 梁单元与壳单元的连接采用刚性连接方式。局部构造节点如伸缩缝、施工缝等采用接触单元模拟, 摩擦系数取 0.4。

混凝土材料采用各向同性弹性本构模型, 弹性模量取 30GPa, 泊松比取 0.2, 容重 25kN/m³。

(二) 边界条件

边界条件设置直接影响计算结果的准确性, 需根据结构实际约束状态合理确定, 基础采用弹性支承边界条件, 竖向弹性地基系数取值根据地勘资料确定, 一般在 6000-10000kN/m³ 范围内, 本文取 8000kN/m³。水池底板四周与基础接触面设置竖向弹簧支撑, 限制竖向位移, 水平向设置摩擦约束, 池壁顶部环梁连接节点采用刚性约束, 确保结构整体性, 对于设置伸缩缝的节点, 释放相应自由度, 允许结构产生相对位移, 温度荷载作用下, 结构端部位移不受约束, 符合实际变形特征。

荷载采用分步加载方式, 先施加恒载, 再施加水压力、土压力、温度作用。水压力采用面荷载形式施加在池壁和底板内表面, 压强大小随深度线性变化, 土压力作用在池壁外表面, 采用梯形分布荷载模式。

(三) 计算参数

计算参数的选取应具有代表性和可靠性, 既要满足设计要求, 又要考虑施工可行性, 需综合考虑材料特性、环境条件和使用要求, 以为结构计算提供可靠的数据支撑^[6]。本文混凝土材料采用各向同性弹性本构模型。

某大跨度水池强度等级选用 C35, 其抗压强度设计值 23.2MPa, 抗拉强度设计值 1.57MPa, 钢筋采用 HRB400E 级, 屈服强度 360MPa。混凝土容重取 25kN/m³, 水容重取 10.0kN/m³, 回填土容重取 18kN/m³, 温度荷载计算取温差 ±25℃, 收缩徐变系数取 0.0002。

(四) 计算结果分析

计算结果显示, 水池结构各构件内力和变形均在合理范围内。底板最大弯矩出现在跨中位置, 正弯矩达到 360kN·m, 支座处负弯矩约为 285kN·m, 池壁底部最大弯矩为 310kN·m, 随高度增加逐渐减小, 结构最大竖向位移出现在底板跨中, 达到 28mm, 满足规范限

值要求, 池壁顶部最大水平位移为 16mm, 变形曲线平滑。温度应力分析表明, 当温差达到 25℃时, 结构产生的附加应力在 12MPa 以内, 不会导致结构开裂, 基础反力分布均匀, 最大接触压力不超过 180kPa, 地基承载力满足要求, 通过计算结果分析可以发现结构设计合理, 各项指标均满足规范要求, 具有良好的安全储备。

(五) 优化建议

基于计算结果分析, 提出以下优化建议: 底板厚度可适当增加 50mm 以减小挠度变形; 池壁顶部加劲肋间距由 4 米调整为 3 米, 提高整体刚度; 环梁截面尺寸增大到 600×800mm, 增强约束效果, 建议在池壁底部加密箍筋, 间距由 200mm 减小到 150mm, 提高抗剪承载力, 底板配筋率可提高 5%, 延缓裂缝发展, 伸缩缝间距不宜超过 25 米, 且应采用优质止水带。对于超过 30 米跨度的水池, 建议增设中间支撑柱, 截面尺寸 600mm×600mm, 施工缝位置宜调整到受力较小部位并采用优质防水材料, 优化措施在保证结构安全的前提下, 注重经济性和施工可行性, 具有较强的实用价值。

结语

通过对大跨度水池底板及池壁进行系统的受力分析, 揭示了结构受力特征和变形规律。研究发现底板受力主要表现为跨中弯矩最大, 应力呈圆形对称分布; 池壁底部产生最大弯矩, 应力随高度增加逐渐减小, 采用有限元分析方法建立三维实体模型, 考虑水压力、自重及土压力等多种荷载组合作用, 获得了结构内力分布规律, 计算结果可为大跨度水池结构设计提供参考, 同时为后续结构优化研究提供理论依据。

参考文献

- [1] 吴祖弦. 预应力技术在水池结构设计中应用 [J]. 中国住宅设施, 2024, (08): 171-173.
 - [2] 陈影, 张宇. 基于 BIM 技术的复杂水池结构整体受力分析与优化设计探索 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2024 (12) [2024-12-26].
 - [3] 孙中泽, 周广强. 某钢筋混凝土水池角隅受力优化设计 [J]. 建筑技术, 2024, 55 (11):
 - [4] 青岛金海晟环保设备有限公司. 一种用于污水池膜盖受力分析的模拟试验装置: CN212110546U [P/OL]. 2020-12-08 [2025-01-03].
 - [5] 王晨. 浅谈水池构筑物的结构设计分析 [J]. 居业, 2024, (08): 76-78.
 - [6] 韩颖, 侯锋, 邵彦青. 大跨度水池底板及池壁受力分析 [J]. 建筑技术开发, 2020, 47 (24): 1-3.
- 作者简介: 黄强 (1993.10 ~), 男, 汉族, 江西丰城人, 硕士研究生学历, 工程师, 从事市政工程结构专业与研究。