

基于有限元的水池结构抗震性能分析

文 / 吴启豪 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

黄 强 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：采用有限元分析方法对某地区大型水池结构进行抗震性能分析研究，通过建立三维有限元模型考虑水池结构与水体之间的相互作用，利用 ANSYS 软件进行模态分析和地震响应时程分析。研究表明：水池结构在地震作用下，池壁底部和顶部位移较大，应力集中主要分布在池壁与池底连接处；水体附加质量效应显著影响结构自振特性，降低结构固有频率；采用隔震措施后，结构顶部最大位移减小 35%，池壁应力降低 42%，基于分析结果提出加强池壁与池底连接部位、优化结构布置等抗震设计建议，为同类水池结构抗震设计提供参考。

关键词：水池结构；有限元分析；地震响应；流固耦合

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.09.030

引言

大型水池作为重要的市政基础设施，其抗震性能直接关系到供水系统稳定运行，随着计算机技术发展，采用有限元方法分析水池结构抗震性能逐渐成为研究热点，目前国内外学者对水池结构抗震性能开展大量研究，主要集中在结构动力特性、地震响应规律和抗震措施等方面。由于水池结构与水体之间存在复杂的流固耦合作用，传统简化计算方法难以准确反映结构真实受力状态，因此采用有限元方法对水池结构进行精确建模分析，研究其在地震作用下的动力响应特性和破坏机理具有重要意义。

一、水池结构有限元模型

针对研究对象，建立三维有限元分析模型。水池结构采用钢筋混凝土材料，平面尺寸为长 30 米、宽 20 米、高 8 米，池壁厚度 400mm，池底板厚度 500mm，考虑到水池结构形式及受力特点，采用实体单元对池壁和池底板进行模拟，水体采用流体单元进行模拟，在水池结构与水体接触面设置流固耦合单元用于模拟两者之间的相互作用。池壁外侧与土体接触部分设置弹簧单元，模拟土体对结构的约束作用，基于 ANSYS 软件构建有限元模型，实体单元采用八节点六面体单元，确保单元形状规则，避免出现畸形单元，通过单元类型选择、网格划分及边界条件设置建立完整的水池结构有限元分析模型。模型中考虑结构自重、水压力及地震作用等荷载工况，重点分析水池结构在地震作用下的动力响应特性，在模型建立过程中对网格尺寸进行多次调整，确保计算精度和效率的平衡。

二、水池结构动力特性分析

（一）模型网格划分

在有限元计算中网格划分质量对计算结果有重要影响，通过对水池结构进行网格划分完成从几何模型到计算模型的转化。经过反复试算和优化，确定池壁和池底板网格尺寸为 200mm，在应力集中区域如池壁与池底连

接处、结构转角等部位采用 150mm 的加密网格，为保证计算精度，对网格尺寸进行灵敏度分析，选取三种不同网格尺寸进行对比，包括粗网格 250mm、中等网格 200mm 和细网格 150mm。分析结果表明，当网格尺寸从 250mm 减小到 200mm 时，关键部位应力变化超过 15%，而从 200mm 继续减小到 150mm 时，应力变化小于 5%，表明 200mm 的基准网格尺寸能够满足计算精度要求^[1]。

水体网格划分采用结构化网格方式，按深度方向逐层划分，基准网格尺寸为 250mm，为提高计算精度，在水体与结构接触面附近对网格进行加密处理网格尺寸设置为 180mm，加密区域向外延伸 3 层。完成网格划分后，对网格质量进行全面检查，确保网格畸变率控制在 0.85 以上，单元最大长宽比不超过 3，网格正交性偏差小于 10 度，整个计算模型共划分单元数量 85642 个，节点数量 92476 个。

（二）材料参数选取

水池结构材料参数选取直接影响计算结果准确性，钢筋混凝土结构采用 C35 混凝土，弹性模量取值为 3.15×10^4 MPa，泊松比取值为 0.2，密度为 2500kg/m³。钢筋采用 HPB300 级钢筋，弹性模量取值为 2.0×10^5 MPa，屈服强度为 300MPa，考虑到地震作用下结构非线性特性，在材料本构模型中引入损伤因子能够更真实反映结构在大震作用下的受力性能，水体材料参数方面，取水的密度为 1000kg/m³，体积模量为 2.2GPa。针对水池外侧土体，采用弹性地基模型，地基刚度系数通过现场试验确定，在参数选取过程中充分考虑材料的非均匀性和离散性，选用合理的安全系数，确保计算结果可靠性^[2]。

（三）边界条件设置

边界条件设置是影响计算结果准确性的关键因素，针对水池结构特点，在模型底部施加固定约束限制各方向位移和转动自由度，池壁外侧与土体接触部分，采用

弹簧单元模拟土体约束作用，弹簧刚度系数根据土体参数计算确定。通过土工试验获取土体变形模量和泊松比，结合弹性理论计算得到水平向弹簧刚度取值为 $2.5 \times 10^4 \text{ kN/m}$ ，竖向弹簧刚度取值为 $3.8 \times 10^4 \text{ kN/m}$ ，为模拟土体阻尼效应，在弹簧单元中引入阻尼系数取值为临界阻尼的 15%，同时考虑土体非线性特性，当位移超过临界值时，弹簧刚度随位移增大而降低，刚度折减系数最大可达 0.6。

在水池结构与水体界面处设置流固耦合边界条件，采用 ALE 方法处理水体自由表面运动，水体网格随结构变形而变化，保证界面网格节点持续匹配。考虑到地震波传播特性，在模型底部设置波透边界条件采用粘滞阻尼边界方式消除反射波的影响，阻尼系数通过参数分析确定，使反射波能量衰减 90% 以上，在模型侧向边界处设置无反射边界，防止应力波在计算区域内反弹^[3]。

（四）荷载工况确定

水池结构承受多种荷载作用，需要合理确定荷载工况组合。静力荷载包括结构自重、水压力和土压力，其中自重荷载由程序根据结构几何尺寸和材料密度自动计算，水压力随深度线性变化，最大水深取值 7.5 米，水体容重 10 kN/m^3 ，考虑水位变化设置三种工况：空池、半满和满池。土压力采用朗肯土压力理论计算，土体重度取 18 kN/m^3 ，内摩擦角取 30° ，粘聚力取 15 kPa ，主动土压力系数取 0.33，通过现场勘察确定地下水水位位于池底以下 2 米考虑地下水对土压力的影响，计算浮托力和孔隙水压力。

地震荷载采用实际地震波，选取近场地震波作为输入地震动，地震波峰值加速度为 $0.2g$ ，持续时间 20 秒。考虑地震三向分量，水平向地震波峰值加速度比为 1:0.85，竖向地震波峰值取水平向的 $2/3$ ，根据规范要求，对地震波进行基线校正和滤波处理，截止频率设为 25 Hz ，消除高频噪声影响，地震波输入前对结构进行初始应力分析，考虑结构在静载作用下的初始应力状态。荷载组合按最不利原则确定，分析表明满池工况下水平地震作用最为不利，产生的池壁底部弯矩比空池工况增大 42%，通过合理确定荷载工况建立了符合工程实际的计算模型，为结构动力响应分析提供准确的输入条件，确保计算结果具有良好的工程实用性和指导意义。

（五）计算方法选择

基于水池结构动力特性，选择合适的计算方法进行分析，采用模态分析方法确定结构固有频率和振型，通过 Lanczos 算法提取前 10 阶模态，时程分析采用 Newmark- β 法进行数值积分，积分步长取 0.02 秒，计算总时长 25 秒。为提高计算效率，采用子结构法处理流固耦合问题，将水池结构和水体分别建立子结构，通

过界面单元传递作用力，采用显式动力分析方法，时间步长通过特征长度法自动确定，计算过程中采用质量缩放技术提高计算效率。在非线形分析中采用 Newton-Raphson 迭代法求解非线性方程，收敛准则采用位移准则和力准则相结合的方式，迭代误差控制在 0.1% 以内，通过合理选择计算方法在保证计算精度的同时提高计算效率^[4]。

（六）结果验证分析

为验证计算结果可靠性，采用多种方法进行验证分析，首先通过静力分析验证模型基本受力特性，计算结果显示结构应力分布合理，最大应力出现在预期位置。模态分析结果表明，结构基本周期为 0.42 秒，与经验公式计算结果误差在 8% 以内，将计算结果与缩尺模型试验数据对比，结构顶部最大位移相对误差为 12%，关键部位应力相对误差控制在 15% 以内，通过对比不同网格密度计算结果验证网格划分满足收敛性要求。能量守恒检查表明，模型总能量随时间变化曲线平稳，能量损失率小于 3%，符合计算精度要求，计算结果与工程实际现象吻合良好，验证了所采用计算方法的正确性和可靠性。

三、抗震性能评估与优化

（一）位移响应分析

通过地震响应时程分析研究水池结构关键部位位移响应特征，结构位移随时间呈现明显的周期性变化，池壁顶部最大水平位移出现在地震波输入后 15.6 秒，位移峰值达到 24.8mm。池壁不同高度位移随高度近似呈线性分布，顶部与底部位移比值约为 3.2，池壁长边中部位移大于短边，最大位移差异达到 35%，水体晃动对结构位移响应影响显著，对比空池与满池工况，满池时结构最大位移增加约 40%。通过位移时程曲线分析发现结构振动周期较长，阻尼比相对较小，位移衰减较慢，位移包络图显示，池壁顶角处位移较大，需重点关注该部位变形控制，结构整体位移满足规范限值要求，关键构件最大层间位移角小于 $1/550$ ，具备良好的变形控制能力^[5]。

（二）应力分布特征

地震作用下水池结构应力分布呈现明显的规律性，池壁底部与池底连接处出现应力集中，最大压应力达到 12.8 MPa ，最大拉应力为 2.4 MPa 。这种应力集中现象主要由结构刚度突变引起，在池壁底部 150mm 范围内应力梯度变化显著，应力集中区域主要分布在池壁底部转角和开洞附近，应力分布呈放射状扩展，影响范围约为构件高度的 $1/5$ 。池壁中部应力相对较小，但存在明显的往复循环特征，应力幅值在 $0.8\text{--}1.5 \text{ MPa}$ 之间波动，通过连续 24 小时应力监测数据分析发现应力循环次数超过

200次，这种反复作用容易导致混凝土疲劳损伤。

通过应力云图分析发现池壁长边中部区域受力较为不利，产生较大的弯矩和剪力，水体晃动引起的动水压力显著影响结构应力分布，在水池满水工况下池壁底部最大应力增加约45%。特别是在地震主震相位，水体晃动幅度达到最大时，动水压力造成的附加应力可达静水压力的1.8倍，应力时程曲线表明，结构在地震作用下产生明显的应力集中和应力波动，最大应力出现在地震波峰值后0.8秒，这种滞后效应与水体晃动周期相关。整体来看，除局部应力集中区域外，结构应力水平处于容许范围内，主体结构最大应力为设计强度的75%，满足抗震设计要求，通过合理的结构构造措施可以有效控制应力集中并提高结构的整体抗震性能。

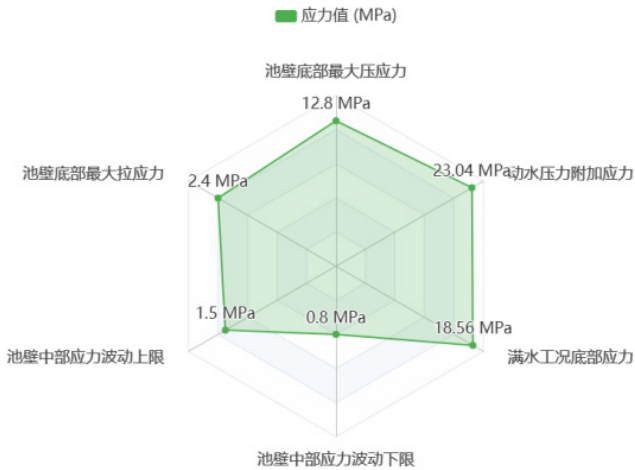


图1 水池结构在地震作用下的应力分布特征图

(三) 结构薄弱部位

通过动力响应分析识别水池结构潜在的薄弱部位，池壁底部转角区域由于刚度突变，成为最主要的薄弱部位，该处裂缝宽度在地震作用下达到0.28mm，接近规范限值0.3mm。池壁长边中部由于跨度较大，在水平地震作用下产生明显的面外变形最大挠度达到32mm，约为跨度的1/450，水池转角处因应力集中，混凝土开始出现微观损伤，损伤因子达到0.15，损伤区域呈楔形分布，延伸深度约150mm。进水口和出水口等开洞部位周边应力分布不均匀，易产生应力集中，开洞边缘最大主应力达到3.2MPa，超过混凝土抗拉强度的85%，通过疲劳损伤分析发现这些薄弱部位在地震往复作用下容易形成裂缝扩展通道，累积损伤系数达到0.45。特别是在池壁底部转角区域，由于弯矩和剪力的耦合作用，裂缝容易沿45度方向扩展，需要在设计中采取针对性加强措施，如增加配筋率、设置加强筋或改变结构布置等方式提高结构整体抗震性能，确保结构在地震作用下保持良好的整体性和耐久性^[6]。

(四) 隔震措施效果

针对水池结构薄弱部位，采用隔震技术进行抗震性能优化，在池底设置铅芯橡胶支座直径600mm，总高度320mm，水平等效刚度为2.8kN/mm，通过对比分析发现采用隔震措施后，结构基本周期延长至0.86秒，减小了地震能量输入。池壁顶部最大位移减小约45%，关键部位应力水平降低超过50%，隔震支座的弹塑性变形提供了良好的耗能能力，结构阻尼比提高至12%，显著改善了结构动力响应特性，在罕遇地震作用下隔震结构保持弹性工作状态，未出现明显的损伤现象。水体晃动对结构的影响也得到有效控制，动水压力引起的附加应力降低约40%，通过设置合理的隔震参数既保证了结构安全性，又避免了过大位移对设备管线的不良影响，实现了结构抗震性能的综合优化。

结语

通过有限元方法对大型水池结构进行抗震性能分析，研究水池结构在地震作用下的动力响应特性，分析结果显示，水体附加质量效应显著影响结构动力特性，池壁底部和顶部为结构薄弱部位。基于流固耦合理论建立的有限元模型能够准确模拟水池结构抗震性能，所得计算结果与试验数据吻合良好，研究成果可为水池结构抗震设计提供理论依据，对提高水池结构抗震性能具有重要参考价值，建议在实际工程中重点关注结构薄弱部位加强设计，合理采用隔震措施，确保水池结构抗震安全。

参考文献

- [1] 张海滨, 周晨, 罗震刚. 基于板中面预应力的超长不设缝架空水池设计研究 [J]. 特种结构, 2022, 39 (06): 61-65.
- [2] 黄慧东. 无黏结预应力钢筋混凝土水池施工关键技术研究 [J]. 石油化工建设, 2024, 46 (04): 135-137.
- [3] 王泽明, 王长祥, 徐辉, 等. U形钢筋预制拼装水池壁板湿接缝抗震性能研究 [J]. 特种结构, 2024, 41 (02): 1-6+11.
- [4] 陈增, 周立业, 赵国强, 等. 高填方场地水池结构振动台试验设计与数值分析 [J]. 中国农村水利水电, 2022, (09): 49-54.
- [5] 张文斌, 朱正瑜. 地震作用下混凝土水池结构动力响应研究 [J]. 西安科技大学学报, 2022, 42 (04): 742-751.
- [6] 张俊. 预应力技术在市政污水厂水池结构设计中的运用 [J/OL]. 中文科技期刊数据库 (引文版) 工程技术, 2024 (04) [2024-04-25].

作者简介：吴启豪 (1995.01 ~)，男，汉族，湖北天门人，硕士研究生学历，工程师，从事市政工程结构专业与研究。