

污水处理池异形深基坑偏压荷载下的变形特性分析

张超¹ 王震²

1. 中冶生态环保集团有限公司 北京 100000; 2. 如东水务集团有限公司 江苏南通 2246400

DOI:10.12238/ems.v7i12.16417

[摘要] 污水处理厂中重要组成部分污水处理池,更多的基坑属于异形深基坑,而异形深基坑在复杂工况下的安全性问题尤为突出,异性深基坑的处理方式对污水处理厂中各类辅助建筑及整体规划都会有所影响。其中偏压荷载作为典型的不均布作用,对基坑结构与周围土体的影响不容忽视,城市进程的加快,各类型建筑形式的出现,不同的基坑处理形式将提出各类不同的课题。本文以某污水处理池异形深基坑为研究对象,基于工程实际条件建立有限元模型,利用 PLAXIS 软件系统分析了不同荷载工况下的侧向变形单应,重点探讨荷载大小与作用位置对变形特征的影响,荷载大小与荷载作用于基坑边缘或远处的影响。结果表明:在偏压荷载作用下,基坑侧向位移呈现显著非对称性,荷载侧最大水平位移约为非荷载侧的 2 倍,位移等值线分布密集,土体变形集中性明显增强;荷载效应随距离呈衰减规律,基坑边界 2.0 m 范围内为高敏感区,超过 3.0 m 后位移趋于稳定;在高荷载条件下,基坑变形与荷载强度呈非线性关系,边界处加载导致响应最为剧烈。总体而言,偏压荷载显著改变了污水处理池异形深基坑的受力与变形模式,实际设计中应避免在基坑边界布置大荷载,以确保整体稳定性与施工安全。这不仅是对各类异性基坑处理有量化参考,更是对未来污水处理厂在规划建设以及运营中起着重要的作用,

[关键词] 异形基坑; 偏压荷载; 变形差异; 数值模拟; 稳定性; 安全

引言

随着城市化进程的加快,污水处理厂、城市地下综合管廊、轨道交通等设施建设是城市建设中不可或缺的一部分,建设过程中,由于各种工艺技术的方式不同使得异形基坑工程频繁出现,在相邻基坑的施工过程中,会出现有的开挖,有的打桩等各种各样的情况,不同的地基处理就会引起不同程度的挤土作用,使临近基坑的支护发生各种不同的情况。建筑物稠密的城市中心,深基坑的开挖成为岩土工程的一个重要课题。荷载大小与荷载作用于基坑边缘或远处的水平距离,是决定变形幅值和变形异质性强弱的两项关键变量^[1-3]。污水处理厂中,各类型基坑是建筑中的重要组成,异性基坑是随时会在建筑过程中出现的问题,具体处理方式会对整个污水处理厂的规划起着关键性的作用。

近年研究显示,随着偏压荷载强度增大,围护墙的最大水平位移、弯矩及坑外沉降幅度近似单调放大。Zhao 等^[4]通过对不同偏压工况发现,不对称荷载区的墙体位移随着荷载强度上升显著增大,荷载较小时变形相对集中;荷载达到一定水平后,变形增长速率减缓但仍持续增加。朱湘旭等^[5]通过 ABAQUS 模型研究发现:偏压荷载从 0 增至 200 kPa 时,靠荷载侧围护桩的最大水平位移随荷载大小显著增加;同时,当荷载作用起始点与基坑边缘的距离 L 与开挖深度 H

的比率 L/H 小于约 1 时,靠荷载侧变形尤为敏感;随着距离增大,变形量迅速衰减。关于荷载作用的水平距离效应,多个研究明确体现:当偏载荷载近墙作用(即距离较小)时,墙体与土体变形最严重;随着距离增大,变形幅值迅速衰减,并趋于对称或负载影响区减弱^[6-8]。Debnath 等^[9]对条形堆载位置与基坑边缘距离进行数值/物理模型分析,发现当堆载位置距离墙顶非常接近时,墙顶水平位移最大;当该距离为数倍墙深或数倍墙高时,其对变形的贡献显著降低。Tu 等^[10]研究也指出,荷载大小与距离是控制不对称开挖变形的主要变量。

短边对比长边显著、角部形状、曲线边界等异形基坑在三维应力—变形单应中体现较强空间效应。Yang 等^[11]对宁波某长宽比较大不对称盾构始发井进行数值分析,研究发现其短边和角部的墙体水平变形与角部效应明显,数值模型在考虑墙体接缝后与实测的误差显著减小。Zhao 等^[12]针对异形基坑的研究发现,基坑开挖面虽然为圆形或近圆形,但引入不对称荷载、开口或非均匀地层后,其内部力与变形云图显示了明显的空间偏差,非对称边界与荷载导致内力-变形“偏置”。

基于现有研究现状,污水处理池异形基坑常面临复杂的平面形态和临近附加荷载,污水处理池与临近建筑的基坑不

同的处理方式, 异形基坑也是在污水处理厂建筑中经常会遇到的重要问题之一。本文针对荷载大小与距离两个因素, 通过三维数值模拟与敏感性分析, 探讨这两者对异形基坑在偏压荷载作用下的变形特性, 从而为类似工程设计中提供关于荷载布置与场地规划、荷载布置与各类辅助建筑, 基坑的处理与各类基坑不同处理形式等的量化参考, 也对后续污水处理厂的顺利达产运营起着更加深远的意义。

1 数值模型建立

1.1 工程概况

本文研究内容依托青州市某污水处理池深基坑工程, 由于基坑临近周边建筑物, 场内空间较小导致施工设备、建筑材料、辅助建筑、各类辅助空间等在基坑周围形成非对称荷载, 因此必须要充分考虑开挖过程中偏压荷载诱发的基坑支护结构受力特性。该污水处理池深基坑为异形基坑, 异形基坑的处理方式以及荷载, 都会对其附近基坑处理形式有所影响, 基坑尺寸如图一所示, 其中 ABCD 段基坑开挖深度 17.5m, DEFGA 段基坑开挖深度 15.5m, 采用直径 0.8m 的排桩支护。基坑开挖过程中共设 2 层内支撑, 第一层混凝土支撑设置于开挖面以下 5m, 支撑梁高度为 1.0m, 宽度为 0.8m; 第二层钢管内支撑设置于开挖面以下 11m, 采用直径 0.6m 壁厚 16mm 的钢支撑。由于基坑开挖深度分别为 15.5m 和 17.5m, 均属于深基坑范畴, 采用边开挖边支护的方式进行施工, 基坑底部混凝土垫层厚度为 0.1m。在深基坑施工过程中, 阳角区域往往是应力集中最为显著的部位, 对整体稳定性影响突出。因此, 本文针对 DE 段布置偏压荷载作用下基坑的力学响应特征展开研究, 以期揭示其受力与变形规律。

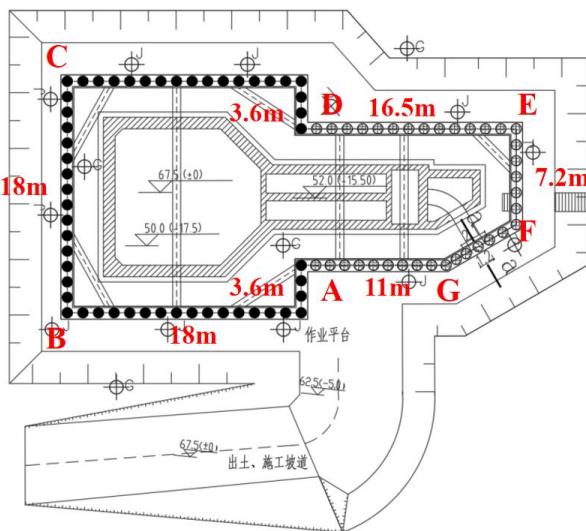


图 1 污水处理池基坑施工平面图

1.2 模型参数

为精确模拟试验区域内异形基坑结构与土体相互作用过程, 本研究基于地质剖面与钻孔柱状图资料建立三维数值模型, 考虑模型范围内厚弱地层与代表性地层的力学差异。地层自上而下布设五层土体, 各土层的厚度、天然重度、承载力特征值、压缩模量以及抗剪强度标准值(包括自然快剪条件下的凝聚力与内摩擦角)如表 1 所示。为更好地考虑土体在初始加载和卸载-重加载过程中刚度的不同, 数值模型地层选取土体硬化模型为本构模型。如图 2 所示, 在支持结构布局方面, 数值模型中将基坑支护桩等效替换为板桩墙。在开挖较深侧, 支护深度设置为 29m, 在较浅侧支护深度为 23m。在 AD 段中, 为增强基坑底部稳定性, 设置板桩墙插入深度 7m 的加强构造。在内支撑方面, 分别采用矩形混凝土梁与圆形钢管梁, 以模拟不同支撑刚度对结构-土体相互作用的影响。本节所列模型参数既体现了现实地层的异质性, 也为后续偏压荷载作用下变形、支护墙变形与沉降响应的敏感性分析提供了合理的基础参数。模型中土体的压缩模量与抗剪强度参数尤其关键, 这些参数控制荷载作用下土体的弹性变形与塑性屈服过程, 进而影响基坑支护系统在不对称荷载与距离变化条件下的响应。

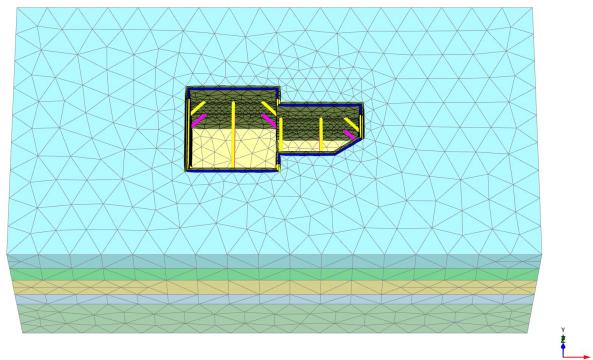


图 2 三维有限元模型网格划分云图

2 模拟结果分析

2.1 偏压荷载基坑变形特性分析

如图 3 (a) 所示, 在偏压荷载作用下, 基坑变形呈现显著的空间非对称性。荷载侧位移等值线分布密集且梯度陡峭, 高值区紧邻坑壁并向深部延伸, 反映出明显的集中变形特征; 而非荷载侧等值线分布相对平缓, 最大位移远小于荷载侧, 呈现渐进型的衰减趋势。这表明偏压荷载不仅增加了位移幅值, 还强化了土体-结构相互作用的非均匀性。为进一步探索偏压荷载下基坑周围土体内部变形机理, 由图 3 (a) 沿 AB

线段垂直荷载方向截取剖面图 3 (b), 由图 3 (b) 可见, 当上部施加 100 kPa 偏压荷载时, 荷载侧基坑最大水平位移达 47.4 mm, 显著高于非荷载侧的 24.5 mm。这一差异说明偏压荷载导致围护结构受力分布失衡, 荷载侧土体附加应力集中, 进而引起更大的侧向位移和弯曲响应。偏压条件下土拱效应减弱, 土压力传递加剧不均, 从而使基坑整体变形模式由对称转变为非对称。

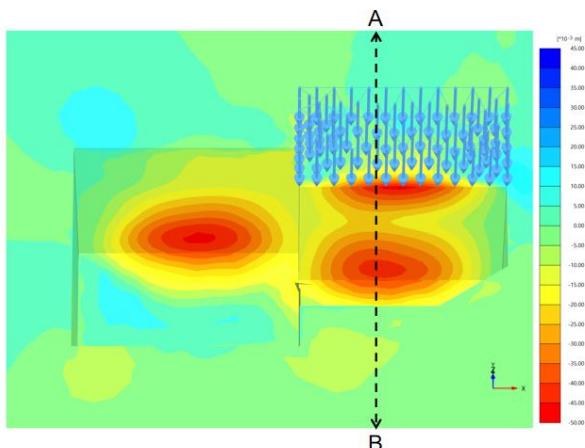


图 3 (a) 偏压荷载基坑水平位移云图

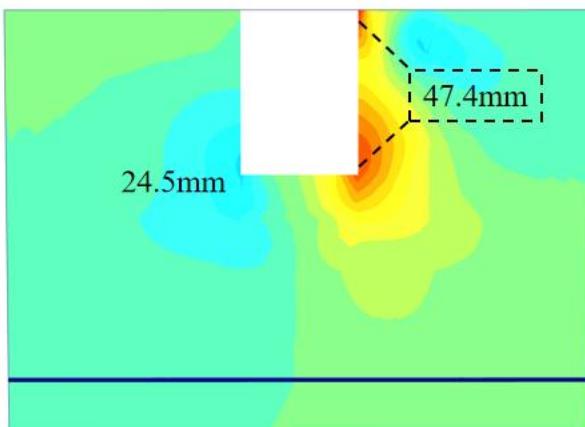


图 3 (b) 污水池基坑位移 AB 方向剖面图

图 3 污水池异形深基坑偏压荷载作用下水平变形特征

2.2 荷载大小和距离对基坑变形影响分析

由图 4 可见, 在偏压荷载作用下, 污水处理池异形深基坑的水平变形规律表现出典型的荷载强度效应与空间衰减特征。总体上, 荷载越大、越靠近边界, 基坑侧向位移越显著, 而随距离增加, 位移幅值呈快速衰减并逐渐趋于稳定。荷载紧邻边界时, 基坑最大侧向位移与荷载呈现出非线性递减特征, 这表明边界荷载强度是控制基坑变形的关键因素。由图可以看出单一曲线的减幅超过 50%, 不同荷载工况间的差异

也缩小至不足 10 mm, 说明附加荷载的边界效应具有明显的空间衰减特征。偏压荷载作用下基坑水平位移规律表现为高强度荷载显著放大变形, 而其影响范围主要集中在 2.0 m 以内。进一步分析可知, 当荷载直接作用于边界时, 高荷载工况下的位移可达到低荷载的 1.7 倍以上, 体现了强度放大效应。当荷载距离超过 3.0 m 时, 所有工况下的位移均接近无荷载水平, 表明偏压效应在远距条件下几乎消失。综上研究发现, 偏压荷载作用下基坑水平位移具有“高强度放大、近距敏感、远距衰减”的显著规律, 对实际工程设计和施工提出了严格要求, 应优先控制基坑边界附近的大荷载布置, 以确保结构与环境安全。

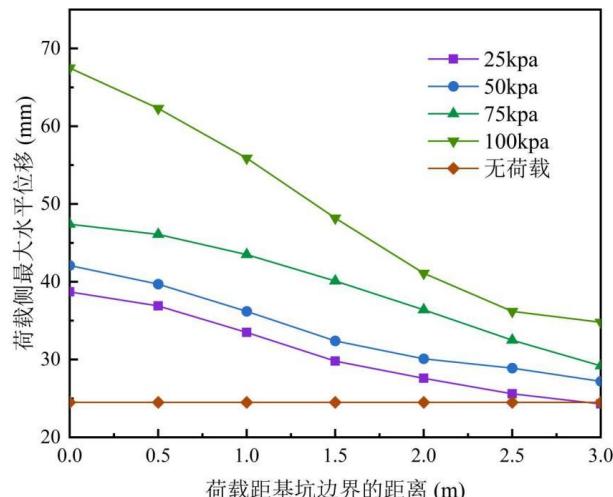


图 4 偏压荷载基坑位移变化图

2.3 偏压基坑侧向位移敏感性分析

如图 5 所示, 基于偏压荷载作用下基坑侧向位移的热力图结果, 本文进一步采用 Sobol 全局敏感度分析方法对不同控制变量的作用规律进行了系统评估。Saltelli 等^[13]提出 Sobol 全局敏感度分析方法是一种基于方差分解的灵敏度分析工具, 它能够将输出结果的不确定性归因于输入变量的主效应及其交互效应, 并通过一阶指数和总效应指数定量刻画变量的重要性。在本研究中, 输入变量包括荷载强度 q 与荷载距基坑边界距离 s , 输出变量为最大侧向位移 u_{\max} 。由热力图趋势可知, 在坑边位置, 当荷载强度逐渐增大时, 最大侧向位移由 24.5 mm 急剧上升至 67.5 mm, 增幅接近 175%, 显示出位移对荷载强度的高度敏感性。而在相同荷载强度下, 随着作用位置逐渐远离基坑边界, 位移呈现明显衰减, 在 100 kPa 工况下, 位移从坑边的 67.5 mm 降至 $s=3.0$ m 时的 34.8 mm, 减幅接近 50%。这表明 q 的方差贡献率明

显著于 s , 荷载强度在控制基坑变形中占据主导地位。然而, 距离参数在不同荷载水平下对响应的调制作用不容忽视, 特别是在高荷载区间, 侧向位移对应力集中与塑性区发展的敏感性增强, 使得距离效应对差分解的贡献上升, 表现为二阶交互敏感度指数 $S_{q,s}$ 的非零值。等值线在 $q \geq 75 \text{ kpa}$ 且 $s \leq 1.5 \text{ m}$ 区域尤为密集, 揭示了荷载强度与作用距离之间存在明显的非线性交互效应。因此, 全局敏感度分析结果不仅揭示了荷载强度对基坑变形响应的决定性作用, 同时强调了作用距离在控制变形模式中的关键意义。对于工程设计与施工而言, 这一结论提示需要在控制荷载峰值的同时, 合理规划荷载与基坑边界的相对布置, 以降低整体位移风险并提升深基坑结构的安全性与稳定性。

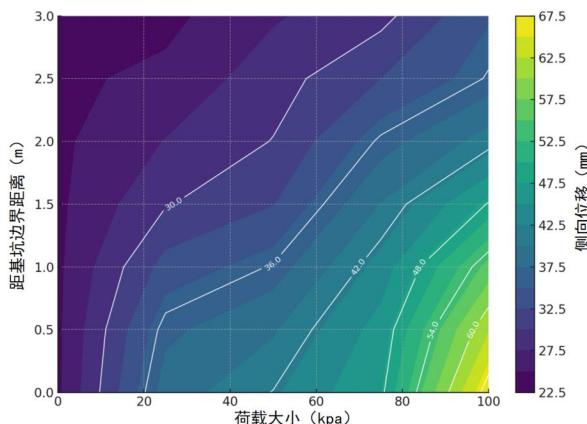


图 5 偏压基坑侧向位移敏感性热力图

3 结论

本文通过数值模拟手段系统分析了不同荷载工况下偏压荷载深基坑侧向变形响应及其空间分布特征, 研究不同荷载工况下作用于基坑边缘或远处的影响, 重点研究了偏压荷载对基坑支护结构受力及周围土体变形特征的影响。通过对模型计算结果的对比分析, 得出以下结论:

(1) 在偏压荷载作用下, 基坑侧向变形呈现显著的不对称性特征。荷载侧支护结构水平位移明显增大, 最大水平位移达到非荷载侧的近 2 倍, 且位移等值线分布密集、梯度陡峭, 表明土体变形集中性显著增强;

(2) 偏压荷载改变了基坑土体的应力分布状态, 荷载侧附加应力集中, 导致土体-结构之间的相互作用加剧, 结构受力非对称性增强, 围护结构的变形模式由原有的对称型转变

为非对称型, 呈现出“单侧主控”变形趋势;

(3) 从水平位移分布曲线可以看出, 偏压荷载的作用范围具有明显的空间衰减特征。荷载距基坑边界 2.0 m 范围内为高敏感区, 侧向位移显著受荷载影响, 呈现“放大效应”; 当荷载距边界超过 3.0 m 时, 位移曲线趋于稳定, 变化幅度显著减小, 接近无荷载工况, 说明偏压效应主要集中在近距区域, 远距影响有限;

(4) 在高荷载强度条件下, 基坑最大侧向位移与荷载大小之间呈非线性关系, 存在强度放大效应。尤其在边界位置施加荷载时, 基坑变形响应最为剧烈, 表明荷载强度和施加位置共同控制基坑的变形幅值和模式;

(5) 综合分析结果表明, 偏压荷载不仅影响基坑结构的力学响应, 还可能对周围环境引起附加变形和位移风险。在实际工程设计中, 应重点控制基坑边界附近的大荷载布置, 合理优化荷载分布形式与传递路径, 以提高基坑整体稳定性与施工安全性。

参考文献

- [1] 韩健勇, 赵文, 关永平, 贾鹏蛟. 近接浅基础建筑物深基坑变形特性及关键参数[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2018, 39 (10): 1463-1468.
- [2] 周雄, 汪磊, 张自强, 等. 非对称围护结构基坑开挖影响范围及其对既有狭长基坑的影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20 (12): 112-119.
- [3] Wang Y, Ouyang J, Guo P, et al. Performance of deep braced excavation under embankment surcharge load[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2023, 41 (6): 3575-3586.
- [4] Zhao P, Sun Y, Wang Z, et al. Mechanical characteristics of deep excavation support structure with asymmetric load on ground surface[J]. Symmetry, 2024, 16 (10): 1309.
- [5] 朱湘旭, 徐昭辰, 章定文, 等. 硬质地层中偏压基坑支护结构受力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (S2): 166-169.

作者简介: 张超 (1982.6-), 男, 汉族, 本科, 甘肃武威, 高级工程师, 研究方向: 土木工程。