

深基坑开挖变形规律及周边环境影响

孟 瑜, 张玉彬, 金 蕾, 严鹏华

(南京医科大学第一附属医院, 南京 210029)

摘 要: 为研究复杂条件下基坑开挖过程中基坑变形规律及周边环境影响, 以江苏省南京市某医院深基坑为工程背景, 采用数值模拟基坑全过程开挖, 对基坑周围地表及地下管线、建筑物变形规律进行分析, 并运用现场实测结果对数值模拟结果进行检验。结果表明: 基坑开挖后, 基坑外围地表沉降形成不对称沉降槽, 坑底出现底鼓, 坑底及邻近裸露表面呈典型“山”字形变形轮廓; 地表最大沉降位于距坑壁约 12.1 m 处, 最大下沉量达 30.05 mm; 侧向位移曲线呈“弓形”, 表现为“两端小、中段大”, 峰值随开挖加深向下迁移, 最大水平位移位于距坑壁约 5 m 处, 中部最大水平位移量为 6.24 mm, 两端小于 3 mm, 距壁面 20 m 处土体侧向位移小于 1 mm, 远离坑壁建筑物沉降与随距离增加呈现出衰减特征, 基于监测结果拟合得到地表影响半径与开挖深度的经验公式。基于地表沉降与土体水平位移曲线发现, 远处管线对地表下沉仍具有抑制作用, 但对土体侧向位移未产生影响。

关键词: 基坑开挖; 地表变形; 数值模拟; 变形规律

中图分类号: TU457 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 01-0149-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.026

Deformation Laws of Deep Foundation Pit Excavation and Its Influence on the Surrounding Environment

MENG Yu, ZHANG Yubin, JIN Lei, YAN Penghua

(The First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China)

Abstract: To study the deformation law of foundation pits and the influence on the surrounding environment under complex conditions during the excavation process, taking a deep foundation pit of a hospital in Nanjing, Jiangsu Province as the engineering background, numerical simulation was adopted to simulate the entire excavation process of the foundation pit. The deformation laws of the ground surface and underground pipelines and buildings around the foundation pit were analyzed, and the numerical simulation results were verified by the field measurement results. The research results show that after the foundation pit excavation, the ground surface settlement around the foundation pit forms an asymmetrical settlement trough, and the bottom of the foundation pit shows a bottom bulge. The deformation contour of the foundation pit bottom and the adjacent exposed surface is in a typical "mountain" shape. The maximum ground surface settlement is located about 12.1 m away from the pit wall, with a maximum settlement of 30.05 mm. The lateral displacement curve is in a "bow" shape, showing "small at both ends and large in the middle". The peak value migrates downward with the deepening of the excavation. The maximum horizontal displacement is located about 5 m away from the pit wall, with a maximum horizontal displacement of 6.24 mm in the

作者简介: 孟 瑜 (1987—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 工程管理、结构工程。

通信作者: 严鹏华 (1987—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 工程管理、电气工程及其自动化。

收稿日期: 2025-11-10

岩土力学

middle, less than 3 mm at both ends, and less than 1 mm at 20 m away from the wall. The settlement of buildings far from the foundation pit shows a decay characteristic with the increase of distance. Based on the monitoring results, the empirical formula of the influence radius of the ground surface and the excavation depth was fitted. Based on the ground surface settlement and soil horizontal displacement curves, it is found that the pipelines far away still have an inhibitory effect on the ground surface settlement, but have no effect on the soil lateral displacement.

Key words: foundation pit excavation; ground surface deformation; numerical simulation; deformation law

0 引言

深基坑开挖过程中的卸载效应诱发应力重分布与土体结构扰动,从而引发地层整体与局部位移,并可能导致相邻既有设施产生变形乃至损伤^[1-2]。在我国大城市的高密度建成区,基坑与周边建(构)筑物及地下管线的空间位置关系复杂多样,大多数基坑工程都集中在市区,人口密集、场地狭小、周边环境复杂、地下管线密集的区域,边界约束与荷载传递路径相互耦合,使基坑周围环境呈现更为显著且非均匀的空间变形特征。鉴于此,在城市密集区深基坑工程中,对基坑外围地表与土体变形规律的研究可以进一步优化基坑设计方案,进而提高基坑附近管线与建筑物保护效果。

基坑开挖对周边环境的影响一直都是岩土工程领域研究的重点。国内研究人员在基坑开挖对周边环境影响的变形计算理论、工程施工引起地表沉降、建筑物与管线的影响等方面都进行了大量的研究并取得了丰富的研究成果。王卫东等^[3]利用多个深基坑工程监测数据,综合分析了各因素对深基坑周围地表沉降的影响;张巧慧等^[4]利用 FLAC 3D 数值计算分析了软土地区双基坑开挖过程中的地表沉降和桩体水平位移,发现桩体变形均表现为“中间大,两端小”的鼓肚形,并且在双基坑开挖影响下,主体结构发生了横向弯曲和横向漂移;林之航^[5]以上软下硬的深基坑工程为地表沉降研究对象,发现基坑周围管线与建筑物的沉降变形表现出显著的空间分布特性;吕松梅等^[6]研究了富水砂卵石层地区桩锚支护深基坑变形特性,得到基坑周边地表沉降曲线近似呈凹形分布;张茜^[7]利用数值模拟分析了涉水基坑开挖过程中地表沉降规律,发现基坑开挖过程中,距离基坑边缘越近最终沉降量和前期沉降速率均越大;毛颖斌^[8]通过数值模拟与现场监测对基坑变形进行了研究,结果表明地表沉降为槽形沉降,

最大沉降位于基坑边约 0.6 倍基坑深度,通过数值计算可以准确预测整体的变形趋势;罗鹏^[9]采用 ABAQUS 软件分析了基坑开挖过程对周边地表变形的影响,结果表明基坑在开挖过程对邻近地表产生的影响较小,地表位移与沉降值均符合相关规范标准;高兆涛等^[10]分析了考虑孔隙水压力影响的基坑开挖变形规律,发现安全系数随着开挖深度的增加不断降低并逐渐趋于平缓;李程等^[11]以镇江市软土区深基坑工程为研究对象,探讨了阶梯式支护结构的变形规律,发现阶梯式支护可以有效地控制支护桩和周围土体的变形;陈俊伟等^[12]土岩组合基坑的变形影响因素及变形规律进行了系统研究,研究结果表明坑底预留岩体对于控制基坑变形作用十分显著;詹文兵等^[13]分析了软土区基坑围护结构的变形规律,发现不同端头形式对管廊基坑的变形规律影响显著。

以南京市某医院深基坑工程为研究背景,在系统整理与归纳工程地质条件及施工设计资料的基础上,建立三维数值计算模型,并按分层分段工序模拟基坑开挖全过程,对基坑及坑外土体变形进行监测。通过将数值计算结果与现场实测监测数据进行对比校核,验证模型参数取值及计算方案的合理性与有效性,据此研究基坑外部地表沉降的时空演化规律及其对周边环境的影响特征。

1 工程概况

1.1 基本信息

以江苏省南京市某医院深基坑工程为对象,为降低建设成本并提高用地集约度,经充分论证与方案比选,确定采用“多级放坡—土钉支护”的组合围护体系。基坑为三级放坡,其中第一级与第二级为斜坡,第三级为直立坡面。第一级、第二级斜坡沿竖向各布置一排土钉,第三级直立坡面沿竖向布置两排土钉。基坑平面尺寸约为 40 m × 20 m (面积约 800 m²),深度为 10 m,分三层开挖,单层开挖

深度为 3.3 m，支护体系以土钉支护为主体。距离基坑右侧约 56 m 处设有一条与基坑东侧坑壁平行的市政管线，沿同向延伸且长度较大。

1.2 工程地质条件

基坑开挖深度范围内的典型地层特征见表 1。场地自上而下共分五层，开挖影响深度内以粉质黏土与粉细砂为主，依次为：①杂填土；②粉质黏土；③粉细砂；④粉质黏土；⑤中细砂。由于上土层土体较软，受扰动后自稳能力较差，造成该地质条件下基坑开挖条件更为复杂。

表 1 地层物理参数
Table 1 Formation physical parameters

序号	地层名称	厚度 /m	重度 /(kN/m^3)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / ($^\circ$)
①	填土	1	18.2	15.0	10.0
②	粉质黏土	3	18.0	12.0	10.0
③	粉细砂	6	19.5	6.5	35.0
④	粉质黏土	10	18.6	19.0	14.5
⑤	中细砂	20	19.3	6.5	34.5

2 深基坑工程数值模拟

2.1 数值模型构建

根据江苏省南京市某医院项目现场的实际地质情况，构建相应的三维数值分析模型，进行详细的数值模拟计算。模型区域的长、宽、高分别为 $200\text{ m} \times 100\text{ m} \times 40\text{ m}$ ，模型共有 856 919 个节点与 852 695 个单元。场地地层划分为 5 层，并在模型中铺设原有管线；各土层的初始参数依据真实的物理力学参数对模型逐层赋值，以确保地层特性的合理表征与计算稳定性。计算重点为基坑开挖过程中土体与管线的水平位移响应以及地表沉降特征，模型土钉支护体系与管线相对位置如图 1 所示。

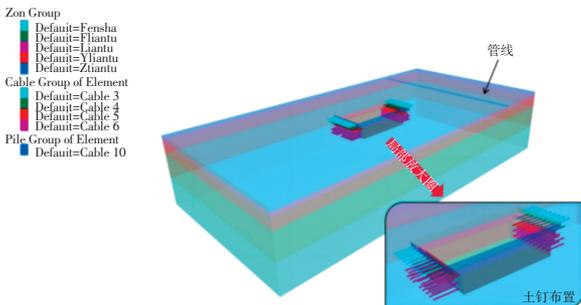


图 1 基坑与土钉相对位置图

Fig. 1 Relative position of foundation pit and soil nails

土钉规格为 $\phi 20$ II 级钢筋，1~2 排土钉长 6 m，第 3 排土钉长 9 m，钻孔直径为 80 mm，孔内注浆采用压力为 0.5 MPa，水灰比为 0.5 的水泥净浆。支护具体参数见表 2。

表 2 支护具体参数
Table 2 Specific parameters of support

弹性模量 /GPa	抗拉强度 /GPa	注浆体黏聚力/kPa	注浆体摩擦角/ ($^\circ$)	注浆体剪切刚度/MPa
200	10	0.1	25	7

2.2 模型边界条件与初始参数

模型边界与初始条件^[14]设定如下：将 (0, 0), (200, 1 000) 设置为位移边界，侧面施加水平位移约束以抑制横向刚体运动；模型底部 $z=0$ 设置竖向位移约束，该边界与侧界面共同构成刚性支承边界；模型顶部取自由边界，不施加位移或附加应力约束，以反映自由地表条件。

始地应力场采用自重应力状态，通过重力加载与静力平衡迭代获得，初始地应力平衡条件下的位移等势分布如图 2 所示。基坑开挖采用“空单元”法模拟，即对基坑开挖区域内的相关单元按分层分段顺序依次置空，以表征土体卸载效应与响应演化；土钉支护与原有管线的空间位置与边界约束在整个计算过程中保持一致。

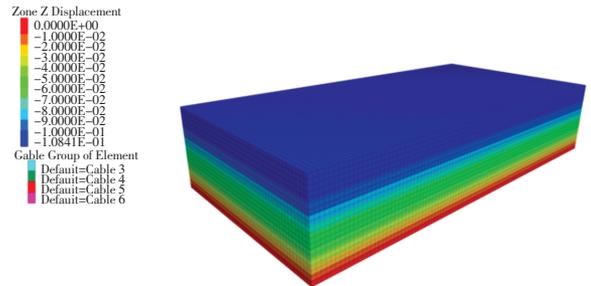


图 2 初始地应力平衡位移等势图

Fig. 2 Initial ground stress equilibrium displacement equipotential diagram

3 结果与分析

3.1 基坑外围地表沉降

3.1.1 基坑外围地表沉降

在深基坑分层分段开挖过程中，因卸载引发的应力重分布与结构扰动共同作用，导致土体产生位移与潜在破坏；随着开挖深度的持续增加，周边土体逐渐向基坑周缘产生变形，进而导致基坑外围地表产生沉降，而坑底土体则表现为隆起响应。由图 3

岩土力学

可知,地表变化影响区以基坑为中心,形成椭圆状区域,土钉支护位于模型 x 方向,影响区长轴位于模型 y 方向。

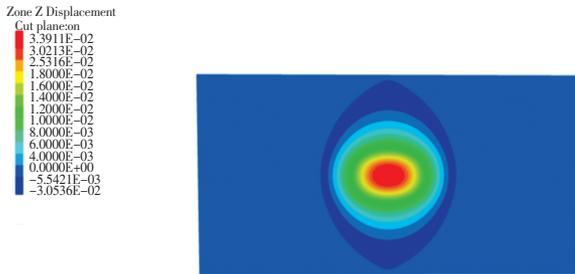


图3 基坑外围地表沉降

Fig. 3 Surface settlement around foundation pit

3.1.2 基坑土体运移剖面位移

由图4可知,土体整体的运动特征:坑底及邻近裸露表面呈典型“山”字形变形轮廓,坑底在侧向约束与围压释放的叠加影响下出现明显底鼓现象,最大隆起量为34 mm;基坑边缘10 m范围内,地表在土钉支护的约束与反拱效应作用下出现向上拱起,最大突起量为6 mm;而在距基坑边缘10 m之外的区域,地表沉降表现出非均匀性分布特征,随距离先增大后减小,在开挖完成后随时间逐渐趋定。

综合监测与计算结果可将基坑周围地表沉降演化划分为三个阶段:第一为初始开挖阶段,开挖主要作用于浅层土体,坑外地表沉降变形幅值较小且增长速率较缓;第二为沉降快速发展阶段,对应深层土体开挖时段,卸载与侧向位移耦合作用加强,基坑周缘地表沉降量迅速增加、沉降槽加深并外扩;第三为稳定阶段,随开挖作业结束与支护一围土体系受力重新分配趋平稳,基坑深度不再变化,周边地表沉降量的增长逐步减缓并趋于稳定。



图4 基坑土体运移剖面云图

Fig. 4 Cloud diagram of soil migration profile in foundation pit

3.1.3 地表竖向位移

通常在地层条件与边界约束近似一致的情形下,基坑开挖两侧地表竖向位移场具有近似对称性;由图5可知,整个开挖期间,距基坑边缘20 m区域内

的地表表现出较为显著的变形梯度变化,单侧沉降分布呈典型“勺形”剖面特征;靠近坑壁部位在土钉支护的约束与反拱效应作用下可出现局部地表拱起(隆起)。随着距基坑边缘距离的增加,沉降值先行增加,最大沉降点位于离基坑边缘约12.10 m处,最大下沉量达30.05 mm;当距边缘距离超过约12.10 m后,沉降量逐步减小,直至超过基坑影响半径后地表变形趋近未受扰动的水平。

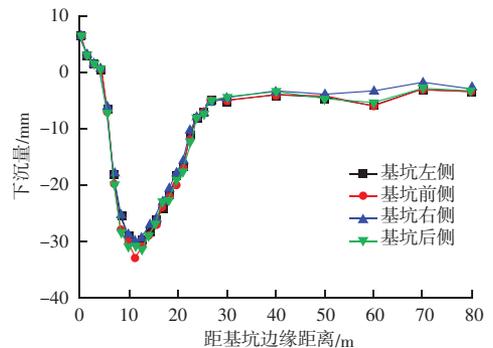


图5 基坑单侧不同距离地表竖向位移图

Fig. 5 Vertical displacement map of the ground surface at different distances on one side of the foundation pit

与此同时,右侧基壁外20~80 m范围内的地表沉降量整体略小于左侧,主要因右侧地下管线及其加固-支撑构造所引入的额外刚度与约束效应,对土体表层沉降形成抑制,靠近管线位置的沉降幅值显著降低。同时对比基坑前后侧与左右侧的下沉曲线,可发现基坑前后侧最大下沉量大于左右侧,因基坑施工仅左右两侧进行土钉支护,对左右侧上方土体下沉起到阻碍作用。期间对单侧地表沉降开展布点监测与数据采集,结果显示数值模拟预测值略高于实测值;造成该偏差的主要原因在于数值计算中未考虑周边建筑物附加荷载以及钢筋加工区临时支撑与加固的共同作用,导致模型对整体刚度与约束程度的表征不足,从而导致模拟沉降结果与实测结果相差3%。

3.1.4 地表影响范围

为了明确该地质条件下基坑开挖深度与地表影响半径之间的定量关系,对不同开挖深度所对应的地表影响半径数据进行了拟合分析,如图6所示。

经过拟合处理,得到地表影响半径与基坑开采深度的函数关系式为:

$$r = 4.517H^{0.732} \quad (1)$$

式中: r 为地表影响半径; H 为基坑开挖深度。

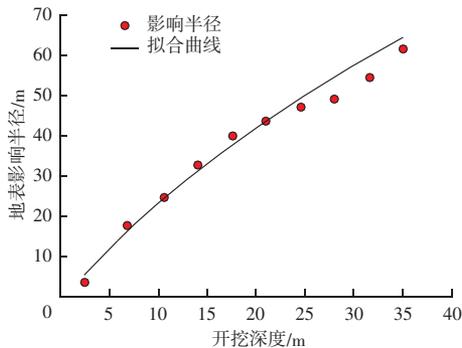


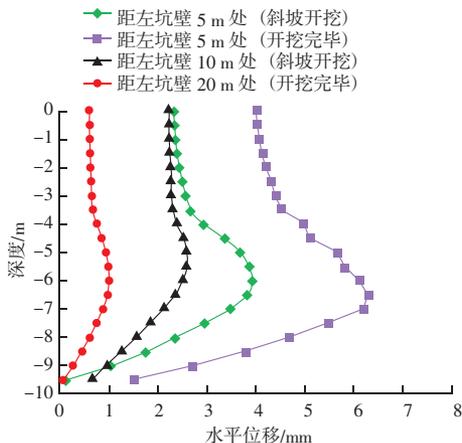
图6 地表影响范围与基坑开挖深度拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve between the surface influence range and the excavation depth of the foundation pit

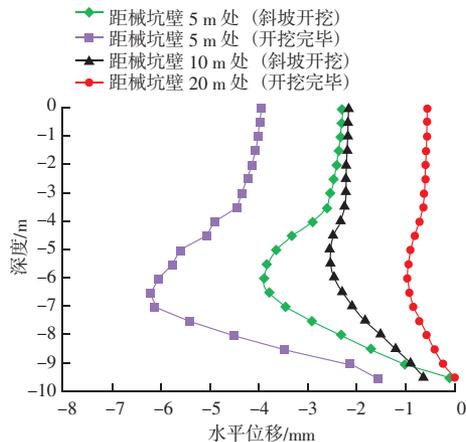
拟合结果证实, 所得曲线的决定系数 R^2 高达 0.998 2, 拟合的置信度很高, 该公式可对基坑外围地表沉降量进行有效预测, 从而为分析深基坑开挖引发的地表沉降问题提供可靠依据。

3.2 土体水平位移分析

由图7可知, 随着深基坑的逐级开挖, 围护体系两侧土体因卸载与侧向土压力重分布所致的荷载不平衡逐步加剧, 导致土体深部水平位移向坑内持续累积增长。对比分步开挖后基坑两侧土体水平位移曲线可知, 水平位移最大值与基坑开挖深度一定程度上呈正比, 随之不断增大, 且最大位移发生位置呈现向下迁移的趋势。坑壁两侧邻近区域的土体水平(侧向)位移演化规律基本一致, 曲线均呈“弓形”特征, 表现为“两端小、中段大”; 其中坑顶与坑底位移指向坑外, 而中间深度处土体位移指向坑内, 距坑壁 5 m 处出现最大水平位移, 幅值约为 6.24 mm。分别提取距离坑壁 5、10、20 m 处的土体水平位移可进一步发现, 越靠近基壁的土体侧向变



(a) 基坑左壁面土体水平位移



(b) 基坑右壁面土体水平位移

图7 基坑两侧面土体水平位移

形越显著, 5 m 处的最大水平位移值约为 10 m 处的两倍, 20 m 处的土体侧向变形小于 1 mm, 体现出明显的距离效应与位移梯度。

由图8可知, 近壁区形成较大的水平应力带, 从而驱动壁后土体逐渐向坑内变形以释放应力与能量; 上述现象与位移曲线最大值随深度下移的规律相互印证。综合对比结果显示, 基坑两侧土体水平位移曲线总体一致, 说明右侧未受到既有地下管线的显著干扰, 其对局部侧向变形的影响可近似忽略。

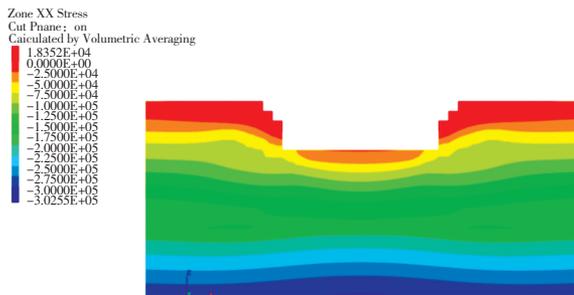


图8 基坑周围水平应力分布云图

Fig. 8 Cloud chart of horizontal stress distribution around the foundation pit

3.3 管线变形

基坑施工往往诱发周边既有管线的沉降与变形, 若变形幅值超限则可能导致管道开裂乃至失稳, 因此基坑周缘管线变形监测属于施工期必设的关键监测项目^[15]。基于管线与基坑的实际空间关系, 在数值模型中于距基坑右侧边缘 56 m 处布设原有管线, 并在管线轴线处设置监测点, 随基坑分层开挖同步提取管线的竖向与水平位移量。

由图9可知, 管线中部区段出现最大竖向与水

岩土力学

平位移, 向两端逐步衰减并趋近于 0, 整体呈“帽形”分布, 近似表现为正态分布特征。与直立开挖相比, 斜坡开挖后管线变形量相对较小。位于正对基坑开挖的对应区段, 管线竖向沉降曲线较为陡峭, 两端区段相对平缓; 最大沉降量约为 4.6 mm。管线竖向最大沉降量与其上覆地表的最大沉降值近似一致, 表明本次数值模拟表征具有较好的合理性与可信度。由于管线距基坑壁面相对较远, 水平位移整体不显著, 且水平位移方向一致指向管线左侧(面向基坑一侧), 最大水平位移约为 1.1 mm。

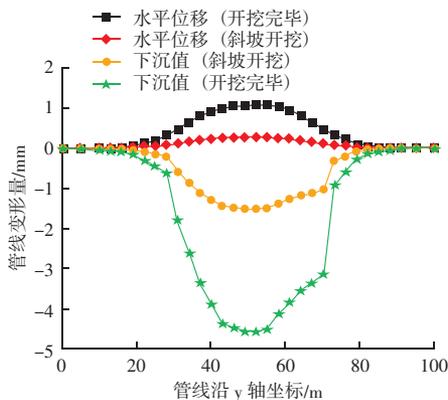


图9 地下管线水平与竖向位移量

Fig. 9 Horizontal and vertical displacement of underground pipelines

由图 10 可知, 基坑对应的中部区段形成较高应力带, 而端部区段应力水平较低, 该分布格局与管线整体变形模态相一致并相互印证。据此可知, 当管线位于基坑较远位置时, 基坑开挖对其主要影响集中于竖向沉降, 且本工况下管线变形量未超过变形警戒阈值(15 mm); 尽管如此, 施工过程中仍需强化对竖向沉降的连续监测与预警, 以确保运行安全。

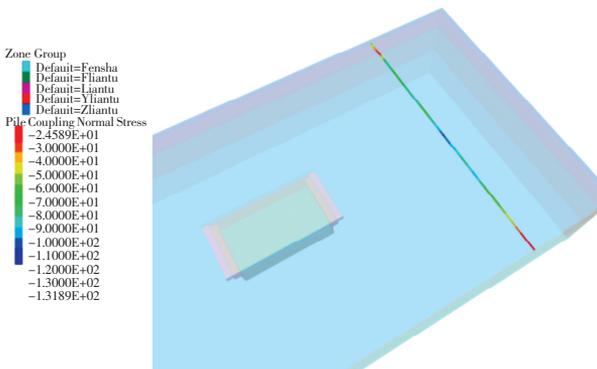


图10 管线应力云图

Fig. 10 Stress contour plot of pipeline

3.4 周边建筑变形影响分析

随着深基坑的开挖, 导致周边地层产生侧向位移与竖向沉降。若沉降呈现空间差异沉降, 则将对毗邻建筑物基础及上部结构产生不利效应, 表现为开裂、差异倾斜乃至整体失稳等工程风险。因此, 研究基坑诱发的土体变形对邻近建筑沉降行为与稳定性的影响, 同样成为了主要的关注内容。随着开挖深度的逐步增加, 基坑邻近建筑物的沉降量同步增长; 至开挖完成时, 靠近基坑的两栋建筑的最大沉降量分别为 2.5、4.7 mm。

进一步考察沉降—距离关系可见, 随着建筑物距基坑边缘距离的增大, 远距观测点的沉降值呈减小趋势, 导致建筑两端监测点之间的沉降差逐步缩小, 即不均匀沉降幅度减弱, 表明基坑开挖作用随距离产生显著衰减效应, 对远离坑缘的建筑影响逐渐减弱。纵观整个开挖过程, 无论建筑与基坑的相对位置如何变化, 建筑物整体侧向位移的指向保持一致, 始终沿朝向基坑一侧的方向发展, 体现出由开挖卸载与侧向土压力重分布主导的稳定位移趋势。

与管线沉降响应相比, 建筑物沉降演化亦可划分为三个阶段, 但出现明显的时序滞后, 其产生机理在于, 建筑物变形不仅受基坑开挖诱发的地层卸载与水平位移影响, 还受到开挖对建筑地基土结构扰动的综合作用, 进而触发建筑—地基的相互作用过程, 导致基础反力重新分配与上部结构内力调整, 从而使沉降发展相对滞后并呈阶段性特征。

4 结论

以江苏省南京市某医院深基坑为研究对象, 基于构建三维数值模型, 系统解析基坑开挖全过程外围地表沉降、侧向位移及应力重分布的时空演化规律。主要得到以下结论:

(1) 基坑外围形成不对称沉降槽, 坑内出现典型底鼓与局部反拱; 坑内最大隆起量为 34 mm; 基坑边缘 10 m 范围内地表在土钉支护的约束与反拱效应作用下出现向上拱起, 最大突起量为 6 mm。

(2) 基坑周围土体侧向位移曲线呈“弓”字型, 最大侧移位置随开挖加深向坑壁下方迁移, 越靠近基壁的土体侧向变形越显著, 体现出明显的距离效应与位移梯度。

(3) 远处管线对地表沉陷具有一定抑制与分散效应, 管线最大下沉点约 4.6 mm, 并且基坑周边建筑物的位移和沉降计算值均能控制在规范允许的 15 mm 范围内。

参 考 文 献

- [1] 雷振. 繁华城区深厚淤泥质地层地铁明挖区间变形规律研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15 (4): 228-232.
- [2] 黄明华, 钟煜轩, 陆锦斌, 等. 基于非连续地基梁模型的基坑开挖诱发下卧盾构隧道变形分析 [J]. 岩土力学, 2025, 46 (2): 492-504.
- [3] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (11): 1659-1666.
- [4] 张巧慧, 姜小磊. 软土地区双基坑开挖变形分析及其对既有地铁车站结构的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (6): 51-57.
- [5] 林之航. 上软下硬深基坑变形规律与空间效应分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 (6): 1792-1800.
- [6] 吕松梅, 夏敏, 任光明, 等. 富水砂卵石层地区桩锚支护深基坑变形特性 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2022, 49 (3): 347-357.
- [7] 张茜. 涉水基坑开挖过程中地表沉降分析 [J]. 黑龙江水利科技, 2022, 50 (7): 110-112.
- [8] 毛颖斌. 桥梁基坑施工关键技术及变形控制研究 [J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2022, 21 (4): 16-21.
- [9] 罗鹏. 地铁站基坑开挖施工对临近地层影响的数值模拟分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (4): 15-19.
- [10] 商兆涛, 姚家李, 夏琴, 等. 基于强度折减理论的深基坑稳定性分析 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2022, 45 (9): 1209-1215.
- [11] 李程, 贾战磊, 徐成皓. 软土地区某阶梯式深基坑变形监测与数值模拟 [J]. 石家庄铁道大学学报 (自然科学版), 2023, 36 (4): 61-68.
- [12] 陈俊伟, 陈树义. 土岩组合地层深基坑变形特性及优化设计研究 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2023, 56 (增刊): 325-331.
- [13] 詹文兵, 王硕, 汤景林, 等. 典型软土地层不同端头形式管廊基坑的变形规律 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2024, 43 (4): 434-442.
- [14] 许明杨, 王海涛, 郭涛, 等. 地铁车站深基坑工程降水开挖数值分析 [J]. 建筑结构, 2022, 52 (增刊): 2256-2261.
- [15] 刘安, 杨清华, 邢一鸣, 等. 基坑开挖影响下临近地下管线的力学行为分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (3): 78-83.
- [6] 唐浩然, 胡垚, 雷华阳, 等. 基于深度学习的基坑开挖引起地表位移时序预测 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (增刊 2): 236-241.
- [7] 方庆, 陈胜, 刘雪珠, 等. 基于变分模态分解的 CNN-LSTM 模型在基坑变形预测中的应用 [J]. 力学与实践, 2024, 46 (5): 1015-1022.
- [8] 张文松, 贾磊, 姚荣涵, 等. 基于 Self-CGRU 模型的地铁基坑周边地表沉降预测 [J]. 岩土力学, 2024, 45 (8): 2474-2482, 2491.
- [9] 刘锦, 李峰辉, 刘秀秀. 优化 GA-BP 神经网络模型及基坑变形预测 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (10): 1733-1739.
- [10] CHEN B, HU T, HUANG Z, et al. 2019. A spatio-temporal clustering and diagnosis method for concrete arch dams using deformation monitoring data. Struct. Health Monit. 18 (5 6), 1355-1371.
- [11] SHEN Y M, ZHANG D M, WANG R L, et al. SBD-K-medoids-based long-term settlement analysis of shield tunnel [J]. Transportation Geotechnics, 2023, 42: 101053.
- [12] 王楚鑫, 王迎超, 董传新, 等. 基于时间序列聚类和粒模型的地面沉降模式分析 [J]. 岩土力学, 2024, 45 (增刊 1): 631-644.
- [13] 贾磊, 贾世济, 高帅. 基于 IAO-LSSVM 模型的基坑周围建筑物沉降预测: 以深圳华强南站地铁基坑为例 [J]. 科学技术与工程, 2024, 24 (7): 2885-2892.
- [14] 刘灿峰, 孙浩, 东辉. 结合 Transformer 与 Kolmogorov Arnold 网络的分子扩增时序预测研究 [J]. 图学学报, 2024, 45 (6): 1256-1265.
- [15] 洪宇超, 钱建固, 叶源新, 等. 基于时空关联特征的 CNN-LSTM 模型在基坑工程变形预测中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (增刊 2): 108-111.

(上接第 126 页)