

# 基于智能监测深基坑对邻近管廊影响评估与沉降控制优化

李何杰<sup>1,2</sup>, 李平<sup>1,2</sup>, 李伯涵<sup>1,2</sup>, 胡晓军<sup>2</sup>

(1. 河海大学 精细爆破全国重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098)

**摘要:** 为研究在深大基坑施工条件下邻近既有管廊变形的量化评估方法、控制体系及优化措施。建立了“智能监测—数值模拟—理论分析”的研究体系, 依托智能化监测与预警系统实时获取管廊在开挖全过程的变形数据, 并构建三维数值模型, 模拟多工况对比计算, 识别影响管廊变形的主要因素和变形响应规律。结果表明: 邻近深基坑的既有管廊沉降呈“中间大、两端小”空间分布特征; “先远后近”开挖策略可使管廊最大沉降量减少10%~15%, 更利于邻近结构的稳定控制; 智能监测系统引入“变形响应三分区”理论, 量化了沉降控制阈值和实现自动预警的一体化管控; 通过优化开挖顺序、控制管廊与基坑相对位置及设置隔离桩, 可有效减小管廊沉降, 提升结构安全性。研究成果旨在为类似工程的设计与管理提供理论依据与实践参考。

**关键词:** 基坑工程; 管廊变形; 智能监测; 数值模拟; 优化措施

中图分类号: TU470 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 01-0112-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.020

## Intelligent Monitoring and Early Warning for Settlement of Utility Tunnels Adjacent to Deep Excavations with Control Optimization

LI Hejie<sup>1,2</sup>, LI Ping<sup>1,2</sup>, LI Bohan<sup>1,2</sup>, HU Xiaojun<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Precision Blasting, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To quantify and control the deformation of existing utility tunnels adjacent to deep foundation pits, a research framework integrating intelligent monitoring, numerical simulation, and theoretical analysis is established. Full-process deformation data of the utility tunnel are collected through an intelligent monitoring and early-warning system, and a three-dimensional numerical model is developed to simulate multiple excavation scenarios and to identify key influencing factors and deformation-response characteristics. Results indicate that the tunnel settlement exhibits a distinct spatial pattern, with greater deformation in the mid-span and smaller deformation toward both ends. Implementing a "far-to-near" excavation sequence reduces the maximum tunnel settlement by approximately 10%~15%, contributing to improved stability of nearby structures. Incorporation of the "three-zone deformation response" theory into the monitoring system enables quantitative determination of settlement control thresholds and supports automated early warning. Moreover, optimizing excavation sequencing, adjusting the relative position between the tunnel and the excavation, and installing isolation piles effectively mitigate settlement and enhance

作者简介: 李何杰 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 地基处理。

通信作者: 李平 (1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 软土地基处理。

收稿日期: 2025-09-20

structural safety. The findings provide theoretical guidance and practical reference for the design and management of deep excavation projects involving adjacent utility tunnels.

**Key words:** deep foundation pit engineering; utility tunnel deformation; intelligent monitoring; numerical simulation; optimization measures

## 0 引言

深大基坑工程是地下空间开发的重要环节。随着城市基础设施的不断扩展,软土地区的深大基坑开挖面临着日益严峻的技术与安全挑战。基坑施工过程中的土体沉降,往往对邻近地下结构带来威胁。支护结构失稳、地下水位波动及土体流失均可能引发管廊位移或变形<sup>[1]</sup>。

针对基坑开挖对邻近结构影响的规律,国内外学者已开展了大量研究,主要通过数值模拟、现场监测和加固措施等手段展开分析。已有研究表明,林鼎宗等<sup>[2]</sup>采用有限元模型,模拟了厦门某基坑开挖对邻近双舱综合管廊的影响,发现开挖后管廊与基坑间距虽不影响平移转动区、相对扭转区和位移约束区的分布,但距离越近,管廊结构的变形程度越大;杨友彬等<sup>[3]</sup>通过对昆明软土地区综合管廊近接地铁隧道开挖实际工程的数值仿真分析,验证了基坑底预加固和隔离桩加固对抑制隧道变形的显著效果;徐中华等<sup>[4]</sup>通过对上海某风貌区内分三区顺作施工的深基坑进行实测分析,发现基坑开挖前的活动已引起建筑约 50% 的总沉降,且与基坑距离大致呈线性相关;曹思威等<sup>[5]</sup>通过分析了不同地基条件下,基坑与邻近建筑的水平距离及相对埋深对建筑变形的影响,发现了基坑邻近效应中距离、开挖深度与地层条件的定量影响规律;冯国辉等<sup>[6]</sup>通过采用差分法研究隔离桩对盾构掘进引起邻近高铁桩基水平位移的影响,发现增大隔离桩桩径或减小其与隧道的水平距离,均可有效减小高铁桩基的水平位移;姚爱军等<sup>[7]</sup>、Jia 等<sup>[8]</sup>通过相似物理模型试验与数值模拟相结合的方法,研究发现隔离桩能够在基坑开挖过程中切断或削弱土体应力的侧向传递,可有效减小结构的最大沉降及不均匀沉降;刘念武等<sup>[9]</sup>通过对深厚软黏土地区某地铁站深基坑的系统监测数据的分析,发现邻近建筑受到明显的空间效应影响,在距离基坑端部一定范围内变形更为显

著;韩健勇等<sup>[10]</sup>通过现场实测结合有限元分析,发现建筑基础形式和基坑距离是控制沉降响应的关键因素;Han 等<sup>[11]</sup>等通过现场实测与考虑结构-地层相互作用的三维有限元模型分析,研究发现基坑施工阶段和空间分布特征对周边建筑变形影响显著;Luo 等<sup>[12]</sup>通过建立基于最小势能原理和线弹性理论的简化空间变形模型,发现可通过地层损失法有效关联围护结构变形与地表沉降,实现了对深基坑开挖引起的围护结构侧移及地表沉降的可靠预测;谭鑫等<sup>[13]</sup>通过研究桩锚支护基坑开挖对近邻建筑的影响,发现锚索预应力的传递可能导致地表局部隆起,而开挖引起的地表差异沉降会使建筑物发生轻微偏转,并引起基础下地基附加应力重分布,进而加剧差异沉降;Pan 等<sup>[14]</sup>通过融合模糊层次分析、图神经网络因果挖掘与云模型等方法,研究提出融合时间-空间维度的风险评估模型;Zhang 等<sup>[15]</sup>、Ye 等<sup>[16]</sup>通过三维数值模拟,验证了支护结构位移和隧道变形的演化规律,发现了地质条件、开挖深度和距离的关键影响参数。

综上所述,尽管已有大量文献针对深大基坑对邻近地下结构的影响进行了深入研究,但从现场实测角度针对既有综合管廊变形的系统分析仍相对较少。目前已有研究多集中于地铁隧道、盾构隧道或建筑基础结构,而对大型综合管廊的关注不足。以某市医院二期软土基坑工程为依托,结合现场监测与三维数值模拟,系统分析不同工况下既有管廊的沉降与变形规律,旨在为类似工程的设计与管理提供理论依据与实践参考。

## 1 工程概况

### 1.1 项目概况

某市医院二期软土基坑工程,占地面积 2.2 万 m<sup>2</sup>,地下共 4 层,深度近 20 m。采用“地连墙+内支撑”的支护设计方案。既有地下管廊采用双舱箱式结构,管廊埋深约 10 m,管廊监测段左侧距基坑最近距离

研究与应用

为 5 m，右侧最远距离为 18 m。管廊与基坑三维示意图如图 1 所示。

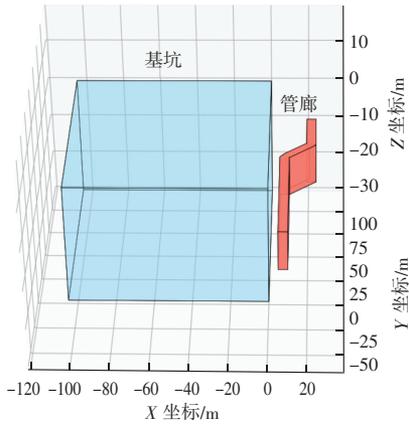


图 1 管廊与基坑三维示意图  
Fig. 1 Three-dimensional schematic diagram of the utility tunnel and the foundation pit

1.2 地质水文条件

拟建项目属长江冲积地貌单元，综合野外调查、原位测试及室内岩土参数测定结果，土层信息见表 1，根据勘探数据 displays 的地层结构，地下水主要为潜水、弱承压水和基岩裂隙水。勘探期间的潜水初见水位埋深在地面以下 0.90 ~ 4.10 m 之间，稳定水位埋深在地面以下 0.70 ~ 3.90 m；承压水含水层水头埋深在地面以下 3.30 ~ 5.90 m

表 1 基坑土层物理参数

Table 1 Physical parameters of soil layers in foundation pits

序号	土层名称	容重 $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	黏聚力 $c / \text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$
①-1a	杂填土	18.0	4.3	5.0
①-1	杂填土	18.5	4.5	5.0
①-2	素填土	19.1	4.9	12.5
①-2a	淤泥、淤泥质填土	17.2	2.3	8.0
②-1	粉质黏土	19.2	4.9	19.6
②-2	淤泥质粉质黏土	17.7	3.3	10.1
②-2a	粉砂	18.9	8.3	8.0
②-3	淤泥质粉质黏土、粉质黏土	17.7	3.8	9.3
②-3a	淤泥质粉质黏土、粉质黏土夹粉土、粉砂	17.9	4.7	9.0
②-4	粉细砂	18.8	9.7	7.1

1.3 现场管廊监测点布置

管廊结构竖向位移采用磁致伸缩式静力水准仪进行监测，每隔 12 m 布置监测断面，布置两条线（侧墙一侧为 A 线，放置电缆一侧为 B 线），根据管廊结构，两条测线呈折线，A 线临近基坑，B 线与 A 线平行布置间隔 3 m，共计 30 个监测点，编号  $A_i$ 、 $B_i$  ( $i=1 \sim 15$ )。管廊监测点的具体布置如图 2

所示。

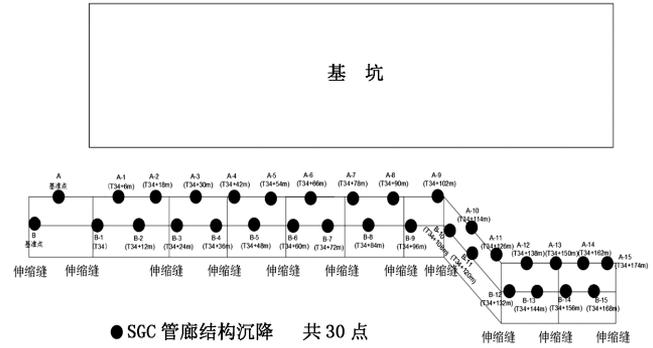


图 2 现场监测点布置平面示意图  
Fig. 2 Plan view of the on-site monitoring point layout

1.4 智能监测设备及平台

磁致伸缩式静力水准仪基于磁致伸缩原理，采用非接触式高精度测量方式，具备标准 RS485 - MODBUS 通信接口，可接入智能监测平台，实现沉降数据的实时在线采集、远程查看及自动报表导出功能。系统支持线上智能监测与预警联动机制，可根据设定变化速率、累计沉降、差异沉降等进行实时判断，并在累计沉降达到预警阈值时自动触发预警，辅助工程运维决策，实现对结构沉降的智能化全过程监控管理。

2 管廊变形响应分析

2.1 现场监测数据分析

由图 3 可知，监测点沉降位移 A 线均大于 B 线。通过对 A、B 线共 15 个监测点沉降数据进行统计分析，发现其沉降规律均呈现出“中间大、两端小”的分布特征，最大沉降均出现在管廊中部区域。

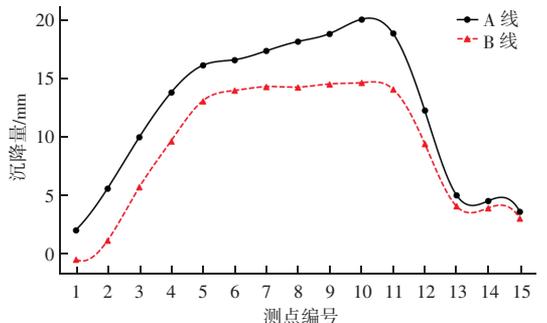


图 3 开挖结束沉降位移曲线  
Fig. 3 Settlement curves after excavation

由图 4 可知，随着开挖深度增加，管廊沉降呈先增大后减小的趋势；第三层开挖占总沉降量的

50.1%，是影响最显著的阶段；前两层开挖约占 18.7%，后两层开挖占 81.3%。

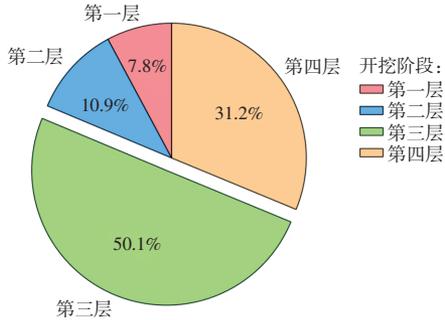


图4 各开挖阶段对管廊沉降比例

Fig. 4 Settlement contribution ratios by excavation stage

## 2.2 数值模拟与实测值对比分析

采用 PLAXIS 3D 有限元模拟软件，建立 Mohr - Coulomb 弹塑性本构模型；地下连续墙与内支撑选用各向同性线弹性模型，反映结构在小变形阶段的应力 - 应变关系。开挖影响范围遵循水平方向为 3~4 倍开挖深度，竖向为 2~4 倍开挖深度。综合考虑几何特征与影响范围，确定模型计算域为 250 m（长）× 250 m（宽）× 60 m（高）。有限元模拟基坑开挖的变形云图如图 5 所示。

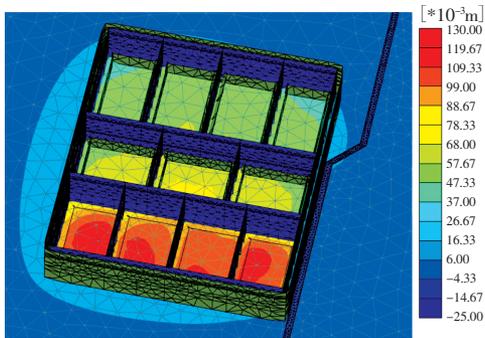


图5 基坑与管廊变形云图

Fig. 5 Deformation cloud map of foundation pit and utility tunnel

由图 6 可知，A 线的模拟值与实测值趋势基本一致，呈“中间大、两端小”的空间分布特征；模拟值与实测值的平均相对误差为 6.3%，最大误差不超过 10%，验证了模型的可靠性，为后续影响因素分析提供支撑。

## 3 影响因素分析

### 3.1 变形响应空间分区

为定量划分管廊在基坑影响下的沉降响应区间，基于结构附加应力理论，结合数值模拟趋势与现场监测数据变化，将沉降值  $s$  作为主要判据。根据下式

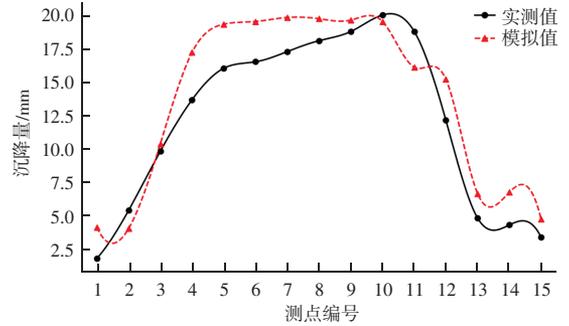


图6 A线实测值与模拟值沉降位移曲线

Fig. 6 Comparison of simulated and measured settlement curves for Line A

可得结构附加应力：

$$\sigma_z \approx 0.27 \cdot \frac{E_c \cdot I \cdot s}{L^5}$$

式中： $E_c$ 为管廊混凝土弹性模量，MPa； $I$ 为管廊截面惯性矩， $m^4$ ； $L$ 为沉降变化区段长度，m； $s$ 为该测点沉降值，mm。

依据 T/CECS 772—2020《城市地下空间工程技术标准》，并结合现场实测数据，研究发现当  $\sigma_z > 0.3$  MPa 时结构可能出现初始裂缝或变形异常。据此，提出如下“变形响应三分区”划分标准：

安全区： $s < 5$  mm，结构响应可忽略；控制区： $5 \leq s \leq 15$  mm，结构处于弹性响应边界；风险区： $s > 15$  mm，附加应力显著，存在结构损伤风险。

智能监测系统引入“变形响应三分区”理论，在监测预警界面中以颜色区块形式直观呈现变形分布，一旦监测点进入控制区或风险区，系统自动触发预警机制并生成日报和推送，可实现管廊沉降变形状态的自动识别与动态预警。

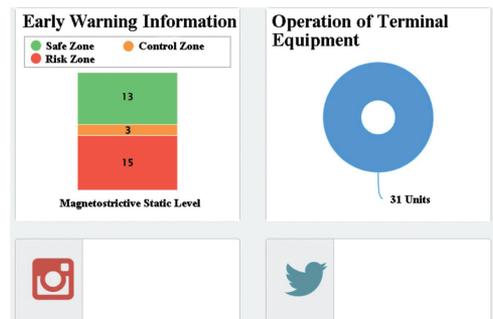


图7 预警系统

Fig. 7 Early warning system interface

## 研究与应用

### 3.2 空间效应分析

基坑开挖顺序的不同会导致土体应力释放的方式和变形路径发生变化,从而影响邻近地下管廊的沉降变形特征。模拟两种典型工况进行对比:工况1为“先近后远”开挖,即先开挖靠近管廊一侧的基坑区域。此工况为现场实际开挖顺序,顺序为2→1→3→5→4;工况2为“先远后近”开挖,顺序为1→2→3→4→5。具体分区情况如图8所示。

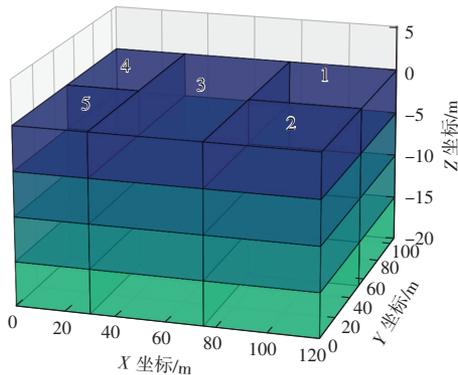


图8 基坑场地开挖分区图

Fig. 8 Excavation zoning diagram

由图9可知,两种工况下管廊沉降曲线规律相似。“先远后近”开挖方案使管廊最大沉降量减少10%~15%,同时使66.7%测点的最终沉降量控制在15.0 mm的风险控制临界值以下。该现象可归因于土体应力重分布机制的差异,当采用传统近侧优先开挖时,根据 Terzaghi 土拱效应理论,开挖面卸荷会立即破坏管廊侧向土压力平衡,导致有效应力在24 h内骤降;而远侧优先开挖通过保留关键支撑土体,形成渐进式应力释放路径。这种时空递进的应力调整机制有效抑制了塑性区的扩展,从而控制了管廊的沉降。

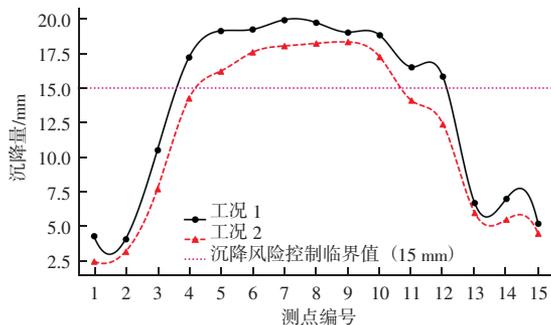


图9 工况1、2沉降位移曲线(A线)

Fig. 9 Settlement curves for Scenarios 1 & 2 (Line A)

### 3.3 基坑与管廊相对位置分析

由图10可知,不同埋深情况下管廊的沉降呈现显著规律性差异。其中,浅埋5 m管廊的沉降值普遍低于15 mm的风险控制临界值,表明其结构安全性更高。而随着埋深增加至10、15 m,管廊沉降量呈阶梯式增长,最大沉降值分别达到18、22 mm左右。

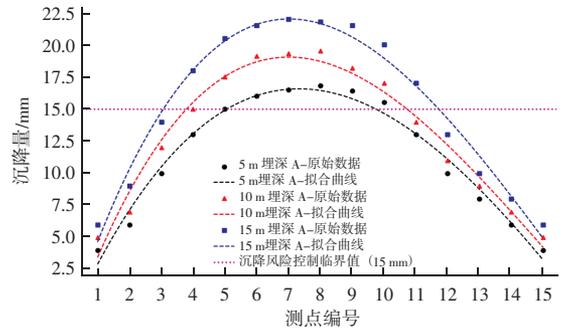


图10 三组不同埋深下管廊沉降拟合曲线

Fig. 10 Fitted settlement curves at different burial depths

进一步通过图11三维拟合曲面图量化分析表明,管廊沉降量与埋深呈显著正相关( $R^2 > 0.95$ ),其内在机理可归因于埋深增加导致覆土荷载增大及土体约束效应减弱。

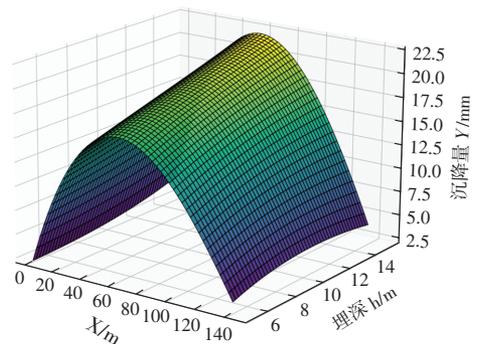


图11 不同埋深下管廊沉降三维拟合曲面图

Fig. 11 3D fitting surface of settlement vs burial depth

### 3.4 设置隔离桩分析

采用数值模拟,研究在管廊与基坑之间设置隔离桩对管廊沉降的控制作用,对比两种加固方案对沉降的控制影响。

一个整体加固方案在管廊外均布置桩径为1.2 m的单排钻孔灌注桩如图12所示。桩中心距取3倍桩径,桩长设置20 m。另一个为局部加固方案仅在预测沉降风险较高区域布置相同规格的单排钻孔灌注桩如图13所示。

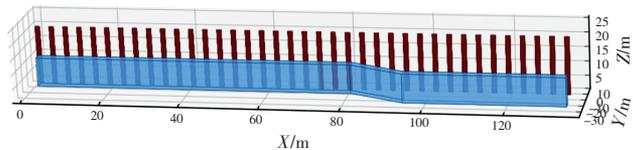


图 12 整体设置隔离桩空间示意图

Fig. 12 Spatial diagram of overall isolation piles

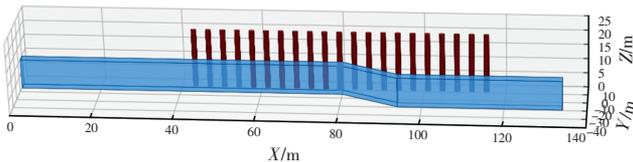


图 13 风险区设置隔离桩空间示意图

Fig. 13 Spatial diagram of local isolation piles

由图 14 可知，整体设置隔离桩后管廊沉降明显减小，曲线整体下移。多数测点沉降值低于 15 mm 的风险控制临界值，5~12 测点区域效果最显著。而局部加固方案在风险区的沉降明显减小，减少最大沉降量约 10%~20%，表明其对控制风险区变形效果显著。1~4 与 12~15 测点变化较小，表明加固对非加固区影响有限。局部加固后沉降曲线更平缓，各测点沉降差异缩小，反映地基变形协调性提升，有效降低了不均匀沉降对管廊的不利影响。

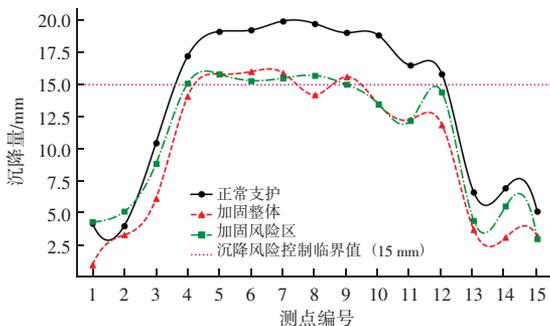


图 14 不同加固方案下沉降曲线与风险控制临界值对比

Fig. 14 Settlement comparison for different reinforcement schemes

综上所述，整体加固与局部加固均能有效减小邻近管廊的沉降量，但局部加固方案在变形控制与资源配置之间实现了更优平衡。与整体加固相比，局部加固可精准控制风险区沉降变形，减少对非风险区的无效加固，不仅降低了施工成本，亦提高了加固措施的经济性与实施效率。

## 4 结论

基于某市医院二期软土基坑工程的智能监测与数值模拟，通过分析基坑开挖的空间效应、基坑与管廊的相对位置以及设置隔离桩等影响因素，研究

了管廊沉降的变形规律，并得出了以下主要结论：

(1) 邻近深基坑的既有管廊沉降呈“中间大、两端小”空间分布特征；浅埋的管廊受开挖扰动影响较小，沉降控制更稳定；“先远后近”开挖策略可使管廊最大沉降量减少 10%~15%，更利于邻近结构的稳定控制。

(2) 基于实测与模拟结果提出“变形响应空间分区”理论，量化了管廊沉降控制阈值。通过将理论嵌入智能监测平台，提升了系统对复杂结构沉降行为的识别与管理能力，实现了“自动识别—实时预警—辅助决策”的一体化管控。

(3) 在管廊与基坑之间设置隔离桩可显著改善沉降分布；相比之下，局部即风险区设置隔离桩可实现沉降精准控制，降低不均匀沉降差异，具有精准控制和经济高效的双重优势。

## 参考文献

- [1] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制 [J]. 土木工程学报, 2016, 49 (6): 1-24.
- [2] 林鼎宗, 蔡奇鹏, 黄翀, 等. 基坑开挖对邻近双舱综合管廊影响的三维数值分析 [J]. 工程地质学报, 2023, 31 (5): 1738-1747.
- [3] 杨友彬, 裴利华, 林东. 综合管廊近接地铁线施工对既有隧道的的影响研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15 (增刊 1): 188-194.
- [4] 徐中华, 顾正瑞, 王卫东, 等. 地下空间开发对其三面围合历保建筑影响实测分析 [J]. 土木工程学报, 2024, 57 (6): 221-230.
- [5] 曹思威, 许万忠, 李四全. 具有相邻建筑结构的基坑开挖影响性分析 [J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30 (1): 68-73.
- [6] 冯国辉, 周逊泉, 何庆亮, 等. 隔离桩对盾构掘进引起邻近高铁桩基水平位移的影响分析 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2020, 42 (4): 28-35.
- [7] 姚爱军, 郭彦非, 郭海峰, 等. 盾构隧道邻域基坑施工下桩隔离效果研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15 (4): 1212-1224.
- [8] JIA M, YAN Q, ZHU W. (2023). Case study: influence of artificial mountain construction with isolation piles on underpass tunnels. International Journal of Civil Engineering, 21 (1), 193-203.
- [9] 刘念武, 陈奕天, 龚晓南, 等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究 [J]. 岩土力学, 2019, 40 (4): 1515-1525, 1576.

## 研究与应用

Weibull 分布能更贴近试验结果,可以得到材料强度极限值。

(2) 采用 Weibull 分布和 Guass 分布,通过对试验结果的统计进行分析,建立两种统计分布的计算方法,检验方法及相关性,分别得出相应的统计概率分布函数和密度函数。

(3) 通过数据的拟合,建立生土基材料标准强度值取值方法,采用 Weibull 分布函数保证率取 95%,定义生土基材料抗压强度为 3.25 MPa。为材料标准值选择提供依据。

## 参 考 文 献

- [1] LU B R, ZHANG K, WANG Y H, et al. Research n Compressive Tests Of Iron Tailing And Cement Modified Earth Materials From Northwest China, *Advances in Civil Engineering*, 2022, 3 (21): 12-18.
- [2] 张坤, 邵鑫辉, 卫杨杨, 等. 掺油泥改性生土材料动态荷载下的损伤及裂缝形分特征 [J]. *西安石油大学学报 (自然科学版)*, 2024, 39 (3): 62-70.
- [3] Engineering design of earth buildings. (NZS 4297). [S]. Building Code Compliance Documents B1 (VM1), B2 (AS1). 2024. NEW ZEALAND.
- [4] Materials and workmanship for earth buildings. (NZS 4298). [S]. Building Code Compliance Document E2 (AS2); 2024. NEW ZEALAND.
- [5] Earth buildings not requiring specific design. (NZS 4299). [S]. Building Code Compliance Documents B1 (AS1), B2 (AS1), E2 (AS2); 2024. NEW ZEALAND.
- [6] P. J. Walker. *New Mexico Adobe and Rammed Earth Building - Code*, 1991.
- [7] 兰官奇, 王毅红, 张建雄, 等. 基于人工神经网络的生土基础体抗压强度预测 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*. 2020, 47 (8): 50-54.
- [8] STEVE B. Recommendations for the Selection, Stabilization, and Compaction of soil for Rammed Earth Wall Construction [J]. *Journal of Green Building*, 2010, 5 (1): 101-114.
- [9] 刘刚, 封孝信, 胡晨光, 等. 利用铁尾矿制备陶粒研究 [J]. *华北理工大学学报 (自然科学版)*, 2021, 43 (3): 49-54.
- [10] ROGIRS Illampas, IOANNIS Ioannou, DIMOSC. Charnpis. Adobe bricks under compression; Experimental investigation and derivation of stress - strain equation [J]. *Construction and building Materials*, 2014 (53): 83-90.
- [11] 张福鹏, 石磊, 柳思勉, 等. 国内生土建筑材料改性进展研究 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2022, 19 (10): 20-24.
- [12] LIU B, MENG H N, PAN G H, et al. Properties and microstructure of blended cement containing activated iron tailings powder [J]. *Advances in Cement Research*, 2023, 35 (6): 258-275.
- [13] LI X Y, QIAO Y J, SHAO J H, et al. Sodium - based alkali - activated foams from self - ignition coal gangue by facile microwave foaming route [J]. *Ceramics International*, 2022, 48 (22): 1-7.
- [14] 韩琳, 赵忠, 盖刘飞, 等. 结合贝叶斯优化与强化学习的序贯配方设计 [J]. *计算机工程*, 2025. 5 (19): 46-49.
- [10] 韩健勇, 赵文, 李天亮, 等. 深基坑与邻近建筑物相互影响的实测及数值分析 [J]. *工程科学与技术*, 2020, 52 (4): 149-156.
- [11] HAN Y, XU Q, CUI Y. (2024). Deformation of existing shield tunnel adjacent to deep excavations; simulation and monitoring analysis. *Applied Sciences*, 14 (10), 4153.
- [12] LUO L, ZHENG Y, WANG R, et al. Method for predicting deformation field of deep foundation pit considering spatial effect [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 2024: 1-17.
- [13] 谭鑫, 金永乐, 黄明华, 等. 桩锚支护基坑对邻近建筑影响实测及三维数值分析 [J]. *土木工程学报*, 2023, 56 (7): 126-136.
- [14] PAN Y, ZHOU X, CHEN J, et al. Temporal - spatial - fusion - based risk assessment on the adjacent building during deep excavation [J]. *Information Fusion*, 2025, 114: 102653.
- [15] ZHANG L, ZHU J. Numerical simulation and field monitoring analysis for deep foundation pit construction of subway station [J]. *Structural Durability & Health Monitoring (SDHM)*, 2022, 16 (4).
- [16] YE S, ZHAO Z, WANG D. Deformation analysis and safety assessment of existing metro tunnels affected by excavation of a foundation pit [J]. *Underground Space*, 2021, 6 (4): 421-431.

(上接第 117 页)