

· 地基与基础 ·



某深厚软土层基坑双排桩位移影响因素分析

周胜宗¹, 张金峰², 杨锐², 陈亮¹, 刘海祥¹, 鲁文妍¹

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 安徽省港航建设投资集团有限公司, 安徽合肥 230051)

摘要: 基坑支护结构变形过大会严重影响基坑和周边建筑物安全。探明影响基坑支护变形因素对基坑设计和施工安全具有重要指导意义。以某深厚软土船闸基坑工程为例, 采用有限元软件建立三维模型模拟基坑开挖过程, 研究土体参数、临边荷载、桩间土加固强度以及桩体刚度因素对支护结构变形的影响规律, 运用灰色关联度理论分析各影响因素敏感程度。结果表明: 当土体内摩擦角下降或临边荷载增加, 桩顶水平位移增加明显; 桩顶水平位移对各因素敏感程度依次为土体参数、临边荷载、桩间土加固强度和桩身刚度。在深厚软土基坑设计与施工中, 应重视软土触变、流变问题, 提高土体强度并减少支护桩外临边荷载, 以保障基坑工程和周围建筑物安全。

关键词: 深厚软土; 基坑开挖; 双排桩; 灰色关联度分析

中图分类号: U641.5; TU47

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0202-07

Displacement influencing factor of double-row piles in deep soft soil pit

ZHOU Shengzong¹, ZHANG Jinfeng², YANG Rui², CHEN Liang¹, LIU Haixiang¹, LU Wenyuan¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Anhui Provincial Port & Shipping Construction Investment Group Co., Ltd., Hefei 230051, China)

Abstract: The excessive deformation of the foundation pit supporting structure seriously affects the safety of the foundation pit and the surrounding buildings. The proved influencing deformation factors have important guiding significance for design and construction safety. Taking the foundation pit project of a deep soft soil lock as an example, we use the finite element software to build a three-dimensional model to simulate the excavation process, study the influence law of the soil parameters, edge load, the reinforcement strength of soil between piles and pile stiffness factors on the deformation of the supporting structure, and use the grey relational analysis(GRA) to analyze the sensitivity degree of each influencing factor. The results show that when the friction angle in the soil drops or the load increases, the horizontal displacement of the pile top increases significantly. The horizontal displacement of pile top to various factors is soil parameters, edge load, soil reinforcement strength and pile stiffness. In the design and construction of deep soft soil foundation pit, attention should be paid to deformation and rheology of soft soil, improve soil strength and to reduce the external load of supporting pile, so as to ensure the safety of foundation pit engineering and surrounding buildings.

Keywords: deep soft soil; excavation of foundation pit; double-row piles; GRA

软土基坑开挖常伴随着支护结构和周围环境的关联变形^[1], 支护结构变形控制对基坑工程和周边建筑物安全至关重要。郑刚^[2]提出基于支护

结构与保护对象的变形控制思想; 徐中华等^[3]、万星等^[4]对各地区及不同支护形式的变形作出统计归纳; 高亿文等^[5]通过研究临边超载对非对称

收稿日期: 2023-05-08

作者简介: 周胜宗 (1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为船闸基坑支护。

围护结构狭窄基坑的影响, 提出狭窄基坑应进行整体设计的思想。部分学者结合已建工程, 探寻关键设计要素对围护结构变形的作用^[6]; 通过设计正交试验, 采用极差与方差等方法可以分析各因素对稳定性与变形的敏感程度^[7], 倪小东等^[8]分析各因素的敏感性, 建立弱化模型并预测基坑的变形趋势。当前对基坑支护结构设计要素的研究较多, 该类因素在工程设计时就已确定。本文以某船闸深厚软土基坑工程为例, 分析影响基坑支护结构发生较大位移的内、外因素, 为软土基坑支护方案设计和施工安全提供参考。

1 工程概况

某船闸位于河床滩地, 地形稍有起伏, 基坑初始高程为 5.0~6.0 m。根据地勘资料, 基坑工程范围土层可划分为 6 层, 分别为杂填土、淤泥质粉质黏土、黏土、圆砾、强风化砂岩和中风化砂岩; 其中淤泥质粉质黏土层厚约 18 m, 灰黑色, 流塑状态, 局部为软塑状态黏性土, 含有机质、贝壳, 夹粉土、粉细砂薄层, 贯穿整个基坑, 是典型的软弱土层, 强度低、压缩性高、灵敏度大, 工程特性差^[9]。

下闸首与下游导航墙一期基坑呈非对称喇叭形, 一期开挖深度约 7 m。基坑采取 T 形分布双排桩支护, 前排桩间距 1.7 m, 后排桩间距 3.4 m, 排距 6.0 m, 桩径 1.2 m, 桩长约 36 m; 两排支护桩之间采用 3 排 $\phi 600$ mm 水泥土双向搅拌桩加固及堵漏, 桩前采用两排水泥土双向搅拌桩咬合进行加固处理。典型支护结构剖面如图 1 所示。

在下游导航墙和下闸首基坑支护及地基处理完成后, 开始基坑开挖, 开挖至高程 -1.0 m 后连降暴雨, 且基坑一直处于暴露状态, 边坡防护和坡面排水均未实施。基坑两处观测点变形见表 1, 左岸侧 5#冠梁水平位移趋势如图 2 所示, 观测点布置位置如图 3 所示。

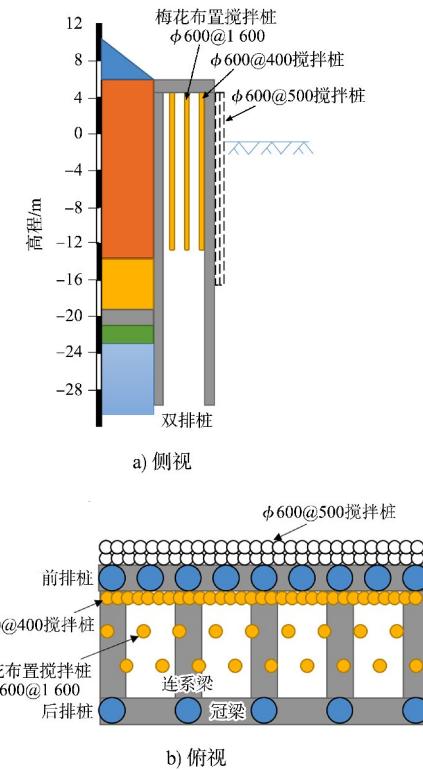


图 1 典型基坑支护结构剖面 (单位: mm)

表 1 基坑左右岸监测点位移随时间变化

右岸侧 4#冠梁 水平位移/mm	时间/d	左岸侧 5#冠梁 水平位移/mm	节点
55.0	1	65.0	3 d 开挖至 -1 m
64.8	3	97.0	暴雨连降
-	4	101.0	回填至 3 m
75.0	10	130.0	左岸侧民房开裂
-	13	134.0	回填至 3.5 m
-	29	158.0	
133.0	82	167.2	变形趋稳
137.8	88	169.2	
139.8	98	169.9	

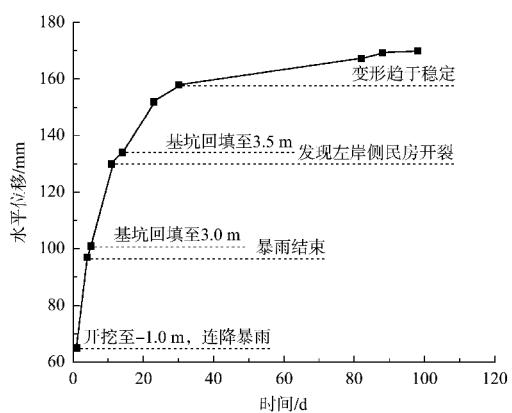


图 2 左岸侧 5#冠梁顶部水平位移过程线

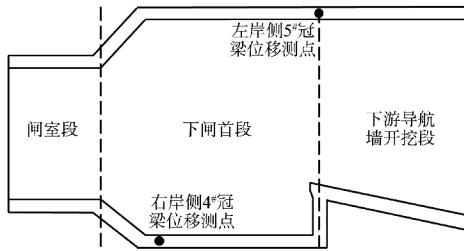


图 3 左岸 5# 和右岸 4# 冠梁顶部水平位移测点位置

2 有限元数值模型

选取下闸首与下游导航墙段，采用 Midas GTS 软件建立有限元模型，模型尺寸为 $167 \text{ m} \times 160 \text{ m} \times 53 \text{ m}$ (长×宽×高)。网格单元数量为 157 483 个，节点数量为 98 940 个，网格边长为 $2\sim 5 \text{ m}$ 。土体采用实体单元，双排桩、连系梁和冠梁均采用梁单元。三维有限元模型如图 4 所示。

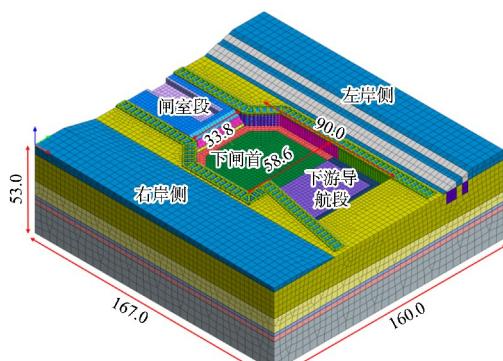


图 4 三维模型(单位: m)

本文土体采用摩尔库仑本构，各土层的物理力学参数见表 2。梁与桩为 C30 混凝土，密度为 2.50 t/m^3 、弹性模量为 30 GPa 、泊松比为 0.2 。

表 2 土体参数

层号	名称	密度 $\rho / (\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	压缩模量 E_s / MPa	黏聚力 c / kPa	摩擦角 $\varphi / (\text{°})$
①	杂填土	1.75	3.5	12.0	5.0
③	淤泥质粉质黏土	1.79	3.4	17.2	10.6
④ ₁	黏土	1.86	4.6	9.9	24.6
⑦	圆砾	2.10	21.0	0.0	40.0
⑧ ₁	强风化砂岩	2.13	-	10.0	42.0
⑧ ₂	中风化砂岩	2.20	-	8.0	48.0

3 基坑支护结构变形影响因素分析

按照设计阶段地质勘察资料进行三维有限元仿真计算，两侧桩顶水平位移结果如图 5 所示。基坑开挖过程中，左岸侧桩顶水平位移始终高于右岸侧，这与实际基坑开挖空间效应有关；左岸侧沿长度方向呈直线开挖，所以随着直线段桩号的增加，桩与坑角的距离先增大后减小，桩顶位移也呈此趋势；该基坑坑角多为阳角与大角度阴角，由于土压力的作用，支护结构在坑角处的位移变化较大。从原有地勘数据下的有限元分析结果可以看出，开挖后的支护桩位移明显小于实际监测值，应该从土体、环境与支护等因素，分析影响基坑开挖变形。

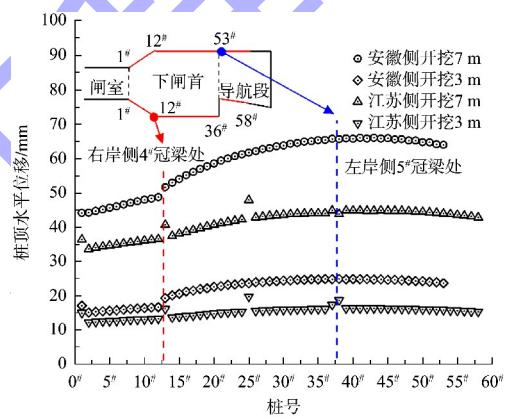
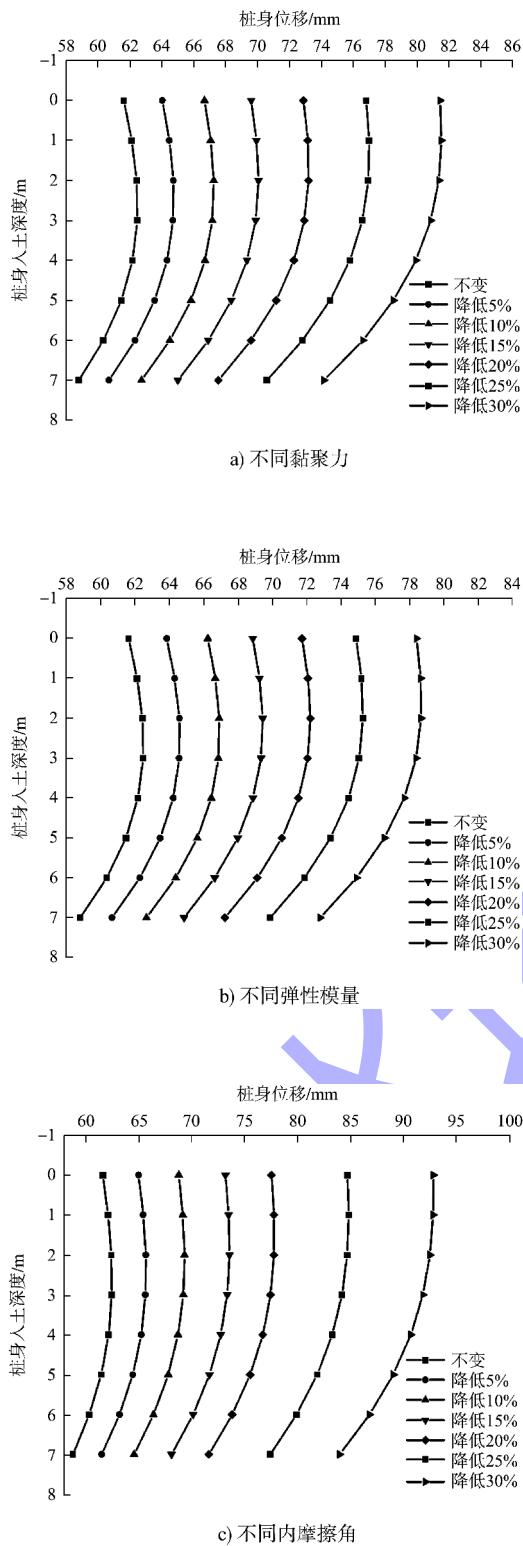


图 5 设计阶段基坑一期开挖后桩顶水平位移分布

3.1 土体参数敏感性分析

分别将弹性模量 E 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 降低 5% 、 10% 、 15% 、 20% 、 25% 和 30% 作为系统特征参数，以开挖段桩顶水平位移为系统特征；单一土体参数变化时，桩顶位移变化率越大，表明支护结构位移对该土体参数的敏感性越大^[10]。

不同 c 、 E 、 φ 下的前排桩桩身水平位移见图 6。可以看出， c 、 E 、 φ 逐步降低 30% ，桩身侧移均增大；随着变化量的增加，桩身侧移水平增加程度按大小分别是 φ 、 c 、 E ；桩身侧移最大值逐渐由开挖中部向桩顶过渡，依然以 φ 变化最为明显， c 次之，但 E 变化达 30% 时，最大侧移位仅过渡到三分之一开挖深度处。

图 6 不同 c 、 E 、 φ 下的前排桩桩身水平位移

桩顶水平位移与土体参数变化率曲线见图 7。可以看出, 桩身变形对参数的敏感程度由大到小依次为 φ 、 c 、 E 。

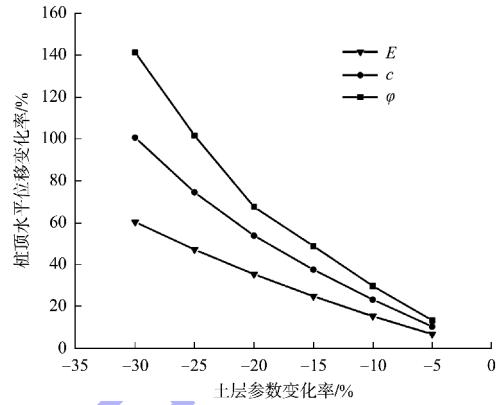
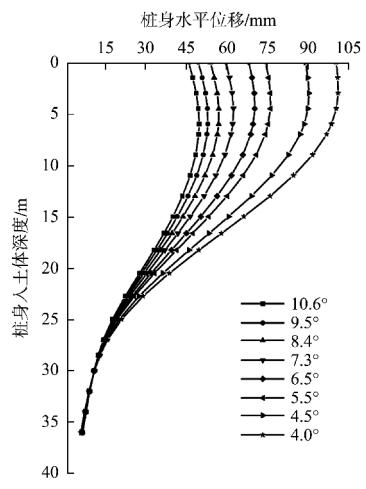


图 7 桩顶水平位移变化率

基坑开挖范围在软弱的淤泥质粉质黏土层, 该层厚度约 18 m, 其承载力低, 呈流变性、易蠕变, 在桩后边坡及主动区土压力作用下, 桩前被动土体难以提供有效的水平抗力以抵抗桩身变形。设计采用的原有地勘参数与实际存在偏差。从图 8a) 可知, 土体内摩擦角 φ 由 10.6° 减少到 4° , 桩身侧移呈非线性增长, 桩身最大水平位移增长了 1 倍。因此, 基坑变形范围很大, 在实际施工中应提前对土体充分加固, 提高其强度。



a) 不同内摩擦角

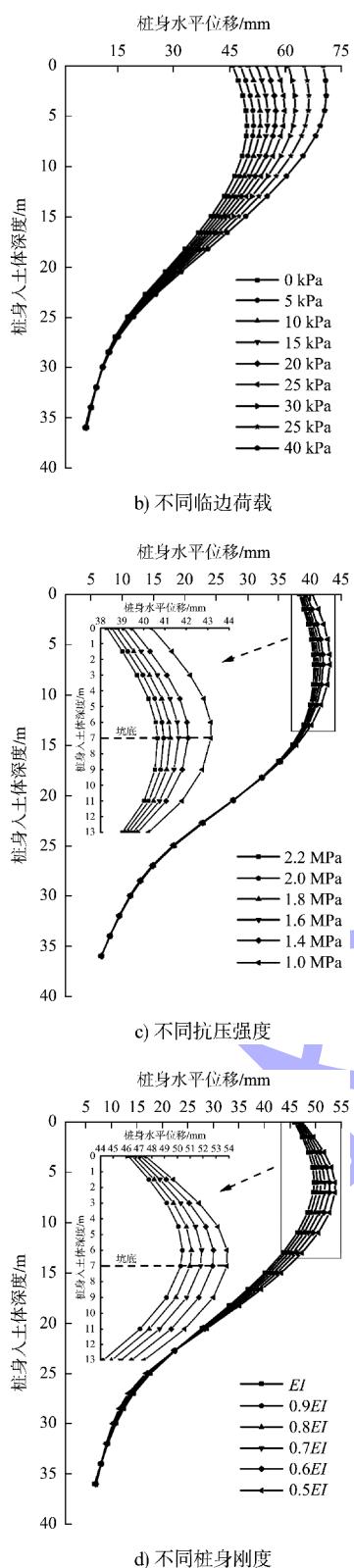


图 8 不同内摩擦角、临边荷载、抗压强度、
桩身刚度下的桩身水平位移

3.2 临边荷载敏感性分析

左岸侧居民住房分布在原有河道边坡侧；原有的大堤通道交通拥挤，遂将冠梁外侧平台改作

为施工车辆临时通道，支护结构承受着由车辆移动产生静载与动载，加大了支护结构沿车辆前进方向及坑内侧向位移。由图 8b) 可知，地面荷载从 10 kPa 变化到 40 kPa，最大水平位移变化了近 20 mm，且最大水平位移点由坑底向桩顶过渡，所以需要严格控制临边荷载。

3.3 桩间土加固强度敏感性分析

根据检测结果，水泥土搅拌桩在淤泥质粉质黏土中强度增长较为缓慢，成桩 28 d 后桩身强度仅达到设计强度的 60%，加固效果未充分发挥；由图 8c) 分析可得，桩间土的加固对桩身位移的影响仍然较小，与未加固下进行比较时，对桩顶位移的约束在 6~8 mm，但其对淤泥质土流塑性的加固作用不可忽视。

本文采用的桩间土加固参数为^[11]：水泥土的无侧限抗压强度 q_u 与黏聚力 c 之间的关系为 $c = 3.2q_u^{0.6}$ ；淤泥水泥土内摩擦角 φ 取 $25^\circ \sim 30^\circ$ ，按抗压强度大小取值；水泥土无侧限抗压强度 q_u 与变形模量 E_{50} 之间的关系为 $E_{50} = 140q_u$ 。

3.4 桩间土加固强度敏感性分析

桩体施工过程中，桩身可能存在缺陷，桩身强度未能达到原有设计强度，桩头破除施工过程中也可能存在损伤桩身情况，因此对桩身刚度弱化处理。由图 8d) 可得，桩身水平侧移受桩身刚度 EI 影响较小，在完整刚度与 50% 刚度下的桩顶位移差别仅在 2 mm；位移差异主要体现在基坑开挖坑底附近的最大桩身水平位移。

3.5 支护结构变形影响因素关联度分析

灰色关联度分析是一种多因素统计分析方法^[12]；在该分析中，即研究参考因素（支护结构变形）受比较因素（土体参数、临边荷载、桩间土加固、桩身刚度）影响的相对强弱；关联度越大，表明比较因素与参考因素的相关性越强。

考虑到桩顶位移值与土体摩擦角、加固土强度及桩身刚度呈反比关系，而临边荷载与之呈正比关系，可不做调整；因此将前 3 种成因参数倒数化处理，上述 4 种成因在不同参数下的桩顶位移结果见表 3。

表3 不同参数下支护桩顶侧移值

土体弱化			临边荷载		桩间土加固			桩身刚度		
内摩擦角/(°)	倒数	桩顶侧移/mm	荷载/kPa	桩顶侧移/mm	抗压强度/MPa	倒数	桩顶侧移/mm	桩身刚度EI	倒数	桩顶侧移/mm
10.6	0.094	45.892	0	45.892	2.2	0.455	38.286	EI	1.000	45.892
9.5	0.105	49.489	5	47.959	2.0	0.500	38.515	0.9EI	1.111	46.161
8.4	0.119	53.951	10	50.106	1.8	0.556	38.762	0.8EI	1.250	46.451
7.3	0.137	59.720	15	52.420	1.6	0.625	39.074	0.7EI	1.429	46.764
6.1	0.164	68.177	20	54.878	1.4	0.714	39.443	0.6EI	1.667	47.101
5.5	0.182	74.360	25	57.590	1.0	1.000	40.368	0.5EI	2.000	47.460

考虑到内摩擦角、临边荷载、桩身刚度、加固土强度及桩身侧移量纲不一致, 因此在进行灰色关联度分析时, 需要去量纲处理, 本文采用如下方法:

$$X'_i = [X'_i(1) \quad X'_i(2) \quad X'_i(3) \quad \cdots \quad X'_i(j)] \quad (1)$$

$$X'_i(j) = \frac{X_i(j) - \min X_i(j)}{\max X_i(j) - \min X_i(j)} \quad (2)$$

式中: $X'_i(j)$ 为去量纲后的数值; $X_i(j)$ 为 X_i 第 j 个元素; $\min X_i(j)$ 为 X_i 中 j 个元素中最小值; $\max X_i(j)$ 为 X_i 中 j 个元素中最大值。

确定影响因素参考矩阵 X 与位移比较矩阵 Y 并归一化, 其中:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $X_1 \sim X_4$ 分别为土体弱化、桩间土加固、桩身刚度、临边荷载折减对应的参数归一化结果; $Y_1 \sim Y_4$ 分别为各因素变化下的桩顶侧移值归一化结果。得出:

$$X = \begin{bmatrix} 0 & 0.125 & 0.282 & 0.488 & 0.796 & 1 \\ 0 & 0.083 & 0.185 & 0.313 & 0.476 & 1 \\ 0 & 0.111 & 0.250 & 0.429 & 0.667 & 1 \\ 0 & 0.200 & 0.400 & 0.600 & 0.800 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0.126 & 0.283 & 0.486 & 0.783 & 1 \\ 0 & 0.110 & 0.229 & 0.378 & 0.556 & 1 \\ 0 & 0.172 & 0.357 & 0.556 & 0.771 & 1 \\ 0 & 0.177 & 0.360 & 0.558 & 0.768 & 1 \end{bmatrix}^T$$

求解 X 与 Y 的灰色关联系数, 先计算差异系数矩阵 Δ , 公式为:

$$\Delta = [|X_i(j) - Y_i(j)|] \quad (5)$$

可得:

$$\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0.001 & 0.001 & 0.002 & 0.013 & 0 \\ 0 & 0.027 & 0.043 & 0.066 & 0.079 & 0 \\ 0 & 0.060 & 0.107 & 0.128 & 0.104 & 0 \\ 0 & 0.023 & 0.040 & 0.042 & 0.032 & 0 \end{bmatrix}^T$$

关联系数矩阵 A 中元素的公式为:

$$A_{ij} = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{ij} + \xi \Delta_{\max}} \quad (6)$$

式中: Δ_{\min} 为差异系数最小值; Δ_{\max} 为差异系数最大值; Δ_{ij} 为差异系数矩阵中的元素; ξ 为分辨系数, 取 0.5。可得:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0.997 & 0.999 & 0.996 & 0.975 & 1 \\ 1 & 0.949 & 0.920 & 0.883 & 0.863 & 1 \\ 1 & 0.892 & 0.754 & 0.797 & 0.827 & 1 \\ 1 & 0.955 & 0.715 & 0.923 & 0.940 & 1 \end{bmatrix}^T$$

关联系数平均值向量 r 公式为:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n A_i(j) \quad (7)$$

可得: $r = [0.995 \quad 0.936 \quad 0.890 \quad 0.957]$ 。

由关联系数平均值向量可知, 桩顶侧向水平位移对土体弱化最为敏感, 其次分别是临边堆载、桩间土加固及桩身刚度。

4 结论

1) 随着基坑开挖, 桩顶水平位移增加, 呈现出明显的“弓”形分布特征, 在基坑直线段、阳角与大角度阴角处, 应增配加固措施, 提高支护结构的稳定性。

2) 在基坑开挖过程中支护结构变形的影响因素有土体弱化、基坑周围临边荷载、桩间土加固强度和桩身刚度, 灰色关联度分析得出桩顶水平位移对土体弱化最为敏感, 其次分别为临边荷载、桩间土加固强度及桩身刚度。

3) 当土体的内摩擦角下降时, 桩身侧向位移会呈非线性增长, 从 10.6° 降为 4.0° 时, 位移增长近 1 倍; 当临边荷载从 0 kPa 增加到 40 kPa 时, 桩顶侧移增加 25 mm 左右; 而桩身刚度与桩间土加固强度变化引起的桩顶水平位移变化不大。

4) 在深厚软土基坑工程设计与施工中, 淤泥质土灵敏度大且有流变性, 基坑经开挖后, 桩前土难以提供有效抗力抵抗桩身变形。因此, 应重视软土基坑设计的参数选取, 及时对土体加固处理、提高土体强度并减少支护桩外临边荷载, 以控制支护结构变形, 保障基坑工程和周围建筑物安全。

参考文献:

- [1] 黄茂松, 王卫东, 郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 146-161.
- [2] 郑刚. 软土地区基坑工程变形控制方法及工程应用 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(1): 1-36, 201.
- [3] 徐中华, 王建华, 王卫东. 上海地区深基坑工程中地下连续墙的变形性状 [J]. 土木工程学报, 2008 (8): 81-86.
- [4] 万星, 戈铭, 贺智江, 等. 南京软土地区基坑墙体变形性状研究 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S1): 85-88.
- [5] 高亿文, 李明广, 陈锦剑. 超载影响下围护结构非对称基坑的受力及变形特性分析 [J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(6): 643-651.
- [6] 秦会来, 黄俊, 李奇志, 等. 深厚淤泥地层深基坑变形影响因素分析 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 23-26.
- [7] 韦宗科, 陈健, 陈斌, 等. 软土基坑开挖对临近既有隧道变形影响研究 [J]. 人民长江, 2022, 53(6): 198-206.
- [8] 倪小东, 王琛, 唐栋华, 等. 软土地区深基坑超大变形预警及诱因分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(6): 2245-2254.
- [9] 周超. 南京滁河漫滩软土性状研究 [J]. 岩土工程技术, 2013, 27(6): 284-287.
- [10] 徐伟, 李靖祺, 段朝静. 某特殊平面形状深基坑围护结构对土层参数敏感性分析 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 173-176.
- [11] 马军庆, 王有熙, 李红梅, 等. 水泥土参数的估算 [J]. 建筑科学, 2009, 25(3): 65-67.
- [12] 陈志波, 简文彬. 边坡稳定性影响因素敏感性灰色关联分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2006(4): 473-477.

(本文编辑 王璁)

(上接第 188 页)

3) 综合锚地所处水域的自然条件、锚地性质、设计船型、当地航行条件等因素, 提出基于空间利用最大化的锚地综合布置方案, 形成了抛锚系泊、趸船系泊、顺岸系泊、丁靠系泊多式协同的锚泊方式, 实现锚泊水域及岸线的极限使用。

参考文献:

- [1] 丁本领. 浅谈九江港港口锚地的规划建设 [J]. 中国港口, 2013(12): 23-24.

- [2] 陈立, 唐晟林, 黄鹏. 长江安徽段航行锚地(三江口锚地)建设工程方案探讨 [J]. 中国水运(航道科技), 2017(4): 1-6.
- [3] 朱俊凤. 三峡大坝至庙河河段待闸锚地建设规划研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [4] 朱旺峰, 李佳恒, 陈轩, 等. 三峡枢纽航运扩能后续待闸锚地规划建设研究 [J]. 水运工程, 2023 (3): 105-108, 178.
- [5] 胡丽颖, 黄若雪, 张静燕, 等. 三峡—葛洲坝水域调度计划编制问题研究 [J]. 价值工程, 2022, 41(16): 12-14.

(本文编辑 赵娟)