

# 基于HSS模型的 排涝泵站深基坑施工过程受力变形分析

鹿梅<sup>1</sup>, 孙运存<sup>2</sup>

(1. 徐州市水利工程运行管理中心, 江苏 徐州 2210001;  
2. 南京市水利规划设计院股份有限公司连云港分公司, 江苏 连云港 222000)

**摘要:**深基坑开挖实为卸荷过程, 会破坏原有土体平衡状态, 导致基坑产生较大的变形。依托江苏某大型排涝泵站工程背景, 通过固结试验、三轴试验、弯曲元试验、共振柱试验等一系列室内试验, 获取了基坑范围内各土层HSS本构模型的重要参数。基于此, 利用有限元软件建立三维数值模型, 模拟动态开挖过程, 分析基坑开挖过程中围护桩水平位移、地表沉降的时空效应, 以及内支撑的轴力变化规律。研究表明, HSS本构模型能有效模拟软土基坑的变形响应; 随着基坑的逐步开挖, 桩身水平变形持续增大, 基坑拆除内支撑并施工主体结构期间, 桩身水平变形增幅最大; 基坑开挖过程中地表沉降总体呈增大趋势, 但每道内支撑架设完成后, 地表沉降均会出现不同程度的减小; 距离基坑拐角越近, 地表沉降越小, 内支撑轴力越小, 说明基坑变形和内支撑轴力呈现明显的空间效应。

**关键词:**排涝泵站; 深基坑; HSS模型; 数值模拟; 受力变形

**中图分类号:**TV551.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)03-0040-0007

## Analysis of stress and deformation of deep foundation pit construction for drainage pump station based on HSS model

LU Mei<sup>1</sup>, SUN Yuncun<sup>2</sup>

(1. Xuzhou Water Conservancy Engineering Operation Management Center, Xuzhou 221001, China;  
2. Lianyungang Branch of Nanjing Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd.,  
Lianyungang 222000, China)

**Abstract:** Deep foundation pit excavation is essentially an unloading process that breaks the original soil equilibrium and leads to considerable deformation of the foundation pit. Relying on a large drainage pump station project in Jiangsu, a series of laboratory tests including consolidation, triaxial, bending element, and resonant column tests were carried out to obtain key parameters of the HSS constitutive model for each soil layer within the foundation pit. On this basis, a 3D numerical model is established using finite element software to simulate the dynamic excavation process. The spatiotemporal characteristics of horizontal displacement of retaining piles and surface settlement, as well as the variation of axial force in internal supports, are analyzed during foundation pit excavation. The results show that the HSS constitutive model can effectively simulate the deformation response of

收稿日期: 2025-12-03

作者简介: 鹿梅(1989—), 女, 工程师, 本科, 主要从事水利水电工程工作。E-mail: 1203529214@qq.com

soft soil foundation pits. With gradual excavation, the horizontal deformation of piles increases continuously. The horizontal deformation increases most significantly during removal of internal supports and construction of the main structure. Surface settlement generally increases during excavation, but it is reduced to different degrees after each internal support is installed. The closer to the foundation pit corner, the smaller the surface settlement and axial force of internal supports, indicating that foundation pit deformation and internal support axial force exhibit significant spatial effects.

**Key words:** drainage pumping station; deep foundation pit; HSS model; numerical simulation; stress and deformation

随着我国城市化进程的加快,尤其在复杂地质环境和极端天气下,水利基础设施的安全稳定性面临着新的挑战。排涝泵站作为保障区域防洪排涝安全的重要水利工程,其深基坑工程的支护设计和施工直接决定了泵站结构的长期服役性能<sup>[1]</sup>。深基坑工程具有荷载复杂、时空效应显著、环境影响敏感等特点,尤其在长江中下游等广泛分布的深厚软土地区,其开挖过程中的围护结构受力与周边土体变形控制,成为工程设计与施工中的核心难题<sup>[2]</sup>。

传统的本构模型在模拟软土力学相应时,往往难以精准模拟出土体在小应变条件下的高刚度特性及其随剪应变增加而衰减的非线性过程,导致对基坑变形,尤其是对邻近敏感构筑物影响的预测存在较大偏差<sup>[3]</sup>。为此,探寻一种能描述土体小应变硬化特性的本构模型成为重中之重<sup>[4]</sup>。

本文以某排涝泵站深基坑为研究对象,通过一系列室内试验获取了HSS本构模型的参数。基于此,利用有限元手段分析泵站深基坑施工过程中支护桩变形、地表沉降以及内支撑轴力等指标的变化规律,旨在为工程的顺利实施提供一定的理论支撑。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

江苏某新建大型排涝泵站项目是提升区域防洪排涝能力、保障城市汛期安全的关键性基础设施。泵站基坑为矩形,设计开挖尺寸约为长60 m,宽30 m,开挖深度为16.6 m,属于一级深基坑工程。基坑采用“桩+内支撑”的联合支护体系。支护桩直径0.8 m,桩长24 m,桩间距1.0 m,采用C30混凝土,桩顶用一圈冠梁连接,冠梁截面尺寸为800 mm×600 mm。第一道采用混凝土支撑,其余3道采用钢支撑。

### 1.2 工程地质条件

在钻探揭露深度范围内,研究区岩土层按

时代成因、地层岩性、沉积层位及岩土物理力学性质等可划分为18个工程地质层,基坑范围主要土层内自上而下描述如下:

①<sub>2</sub>素填土:灰褐色,以黏性土为主,局部混少量碎石。平均厚1.00 m。

②黏土:黄色~黄灰色,可塑~软塑,饱和。土质较均匀,局部混少量砂粒。平均厚0.60 m。

③粉质黏土夹粉土:黄灰色,软塑~可塑,饱和。土质欠均匀,混少量粉土,切面粗糙、摇震反应无、干强度一般、韧性一般、土层结构为蜂窝结构。厚度1.60~6.40 m,平均厚3.03 m。

④淤泥:灰黄色~灰黑色,流塑,顶部局部软塑,饱和。矿物成分均匀细腻,底部混少量砂粒。有光泽、摇震反应无、干强度高、韧性高、土层结构为絮状结构。平均厚5.39 m。

⑤粉质黏土:黄灰色,可塑,饱和。土质较均匀,切面粗糙、摇震反应无、干强度中等、韧性中等、土层结构为蜂窝结构。厚度1.10~2.70 m,平均厚1.73 m。

⑥含砂粉质黏土:灰褐色,可塑,饱和。混较多砂粒,土质不均匀、切面粗糙、摇震反应无、干强度一般、韧性一般、土层结构为蜂窝结构。厚度1.50~4.50 m,平均厚3.16 m。

⑦<sub>1</sub>粉质黏土:灰褐色,可塑,饱和。土质较均匀、切面粗糙、摇震反应无、干强度一般、韧性一般、土层结构为蜂窝结构。厚度5.20~9.00 m,平均厚6.85 m。

## 2 HSS本构模型

### 2.1 HSS模型介绍

传统的软土力学行为模拟时,常采用Schanz等人提出的Hardening Soil模型,即硬化土模型(HS模型)。但已有研究<sup>[5]</sup>表明,软土剪切刚度随剪应变的变化呈“S”形变化:先缓慢减小,随后快速减小,最

终逐渐趋于稳定。当剪应变增大至 $10^{-3}$ 时,剪切刚度已小于初始剪切刚度的一半。而基坑、隧道工程中,软土的剪应变通常在 $10^{-4}$ ~ $10^{-2}$ 之间,这导致HS模型在小应变阶段的刚度被严重低估;此外,HS模型还假定刚度与应力路径无关。因此,HS模型在模拟时存在精度不足的问题。Benz等在HS模型的基础上,引入了2个小应变刚度特性参数:初始剪切模量和剪应变水平,创新的提出了Hardening Soil Small-strain模型,即硬化土小应变模型(HSS模型)。HSS模型可以精确模拟小应变下的高弹性刚度及其衰减趋势,能更真实地反映土体在不同加载方式下的响应差异。表1给出了HSS模型参数含义。

表1 HSS模型参数

	参数名称	符号	单位
基本参数	重度	$\gamma$	$\text{kN/m}^3$
	有效黏聚力	$c'$	kPa
强度参数	有效内摩擦角	$\varphi'$	( $^\circ$ )
	剪胀角	$\Psi$	( $^\circ$ )
基本刚度参数	刚度应力水平相关幂指数	$m$	
	固结试验的参考切线刚度	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	MPa
	三轴排水试验的参考割线刚度	$E_{50}^{\text{ref}}$	MPa
	破坏比	$R_f$	
	参考应力	$p^{\text{ref}}$	kPa
高级参数	正常固结条件下的侧压力系数	$K_0$	
	卸载再加载泊松比	$\nu_{ur}$	
	卸荷再加荷模量	$E_{ur}^{\text{ref}}$	MPa
小应变特性参数	初始剪切模量	$G_0^{\text{ref}}$	MPa
	剪应变水平	$\gamma_{0.7}$	

## 2.2 基于室内试验的参数确定

为获取基坑范围内土体HSS模型参数,对土体进行了包含土工试验、三轴试验、共振柱试验、固结试验等一系列室内试验。本文以④<sub>1</sub>淤泥为例,对相关重要参数的获取开展如下分析。

通过淤泥制成的试样开展三轴固结不排水剪试验(CIU),可测得其有效黏聚力、有效内摩擦角: $c'=3.6\text{ kPa}$ 、 $\varphi'=13.2^\circ$ 。

通过固结试验可获得淤泥的轴向应力与轴向应变的结果,利用绘图软件对试验结果进行双曲线函数拟合,拟合的函数为 $\sigma_v = 20.1e^{0.182\epsilon_a} - 30.8$ ,曲线如图1所示。轴向应力为100 kPa时对应的应力应变

曲线的斜率,即为参考切线刚度 $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 。对拟合函数求导,即可获得该土体的参考切线刚度为2.4 MPa。

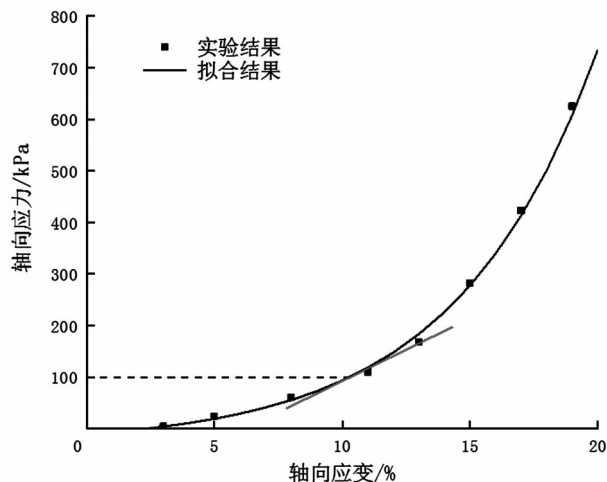


图1 轴向应力与轴向应变的结果

对淤泥开展三轴固结排水剪切试验,围压设定为100 kPa,图2为试样偏应力随轴向应变的变化曲线。根据《土工试验方法标准》中规定,轴向应变为15%时的偏应力即为试样的破坏值。0.5倍破坏值对应的曲线上的点与零点的连线的斜率即为三轴排水试验的参考割线刚度 $E_{50}^{\text{ref}}$ ,经过作图可获得该土体的参考割线刚度为3.1 MPa。

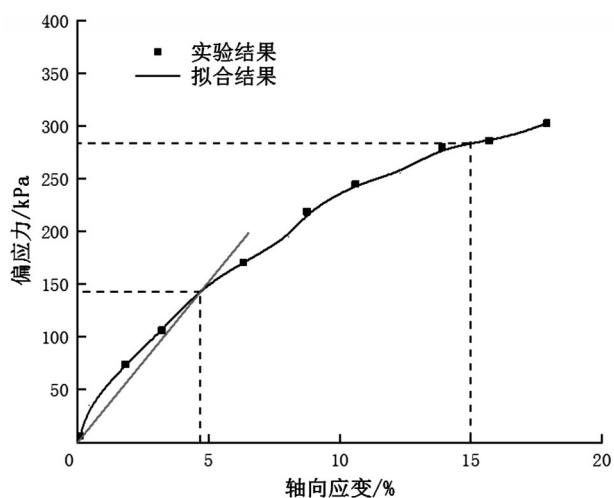


图2 偏应力随轴向应变的变化曲线

同样对淤泥开展三轴固结排水剪切试验,但加载方式为加载-卸载-再加载,围压设定为100 kPa,图3为该工况下试样偏应力随轴向应变的变化曲线,图中滞回圈2个端点连接线的斜率即为卸荷再加荷模量 $E_{ur}^{\text{ref}}$ 。通过作图可知该土体的卸荷再加荷

模量为22.3 MPa。

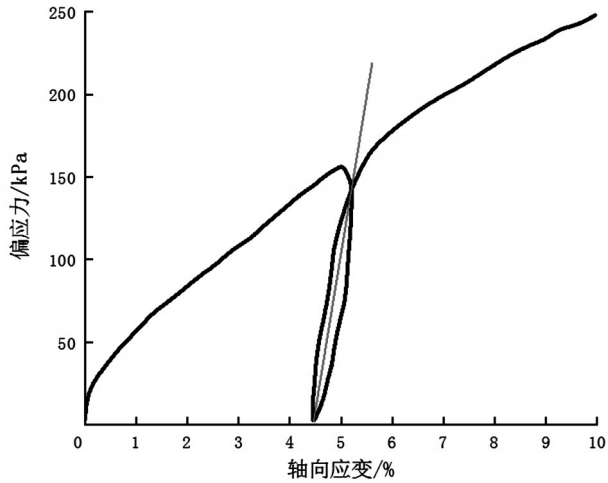


图3 加载-卸载-再加载下偏应力-轴向应变关系曲线

对淤泥开展弯曲元试验,围压设定为100 kPa,图4给出了弯曲元试验结果。如图所示,接收波和发射波分别在0.018 ms和0.467 ms处观察到信号显著偏离基线噪声,依据初达法测得剪切波传播时间为0.449 ms。接收波和发射波分别在0.053 ms和0.521 ms处观察到首个信号峰值,依据峰值法测得剪切波传播时间为0.468 ms。以初达法和峰值法的平均值0.4585 ms作为剪切波传播时间,试样高度8 mm作为剪切波传播路径,则剪切波速为174.4 m/s。由剪切模量计算公式  $G = \rho v_s^2$ ,可计算出围压100 kPa条件下的剪切模量,即为初始剪切模量  $G_0^{ref}$ 。因此,该土体的初始剪切模量为52.6 MPa。

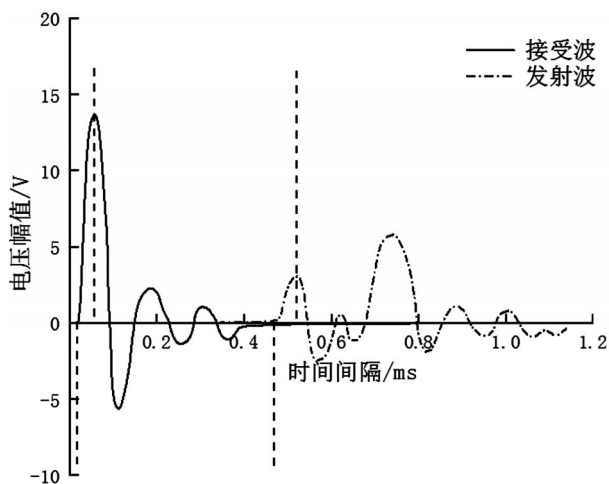


图4 弯曲元试验结果

对淤泥质粉质黏土开展共振柱试验,并对剪切模量进行无量纲化,绘制出剪切模量无量纲化值的变化曲线,如图5所示。依据剪切应变水平的定义,

取剪切模量无量纲化值为0.7时对应的剪应变值作为剪切应变水平  $\gamma_{0.7}$ 。从图5可以看出,该土体的剪切应变水平为  $3 \times 10^{-4}$ 。

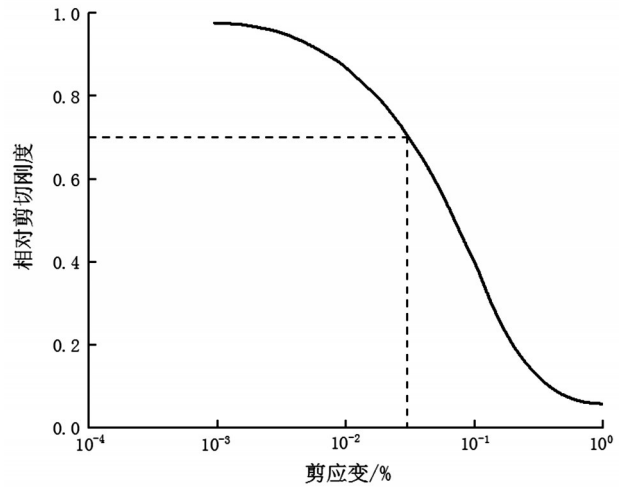


图5 剪切模量无量纲化值的变化曲线

### 3 有限元分析

#### 3.1 三维数值模型

根据基坑设计,利用有限元软件建立三维基坑模型(图6),为消除边界条件对模型计算的影响,模型尺寸为180 m×90 m×50 m(长×宽×高),基坑尺寸为60 m×30 m×16 m。模型中采用实体单元模拟土体和支护桩,采用梁单元模拟内支撑、圈梁和冠梁,采用板单元模拟地下室结构板,各结构接触部位设置接触界面。为保证模型的计算效率,采用中等密度的六面体单元对模型进行网格划分,同时对局部进行网格加密以提升计算精度,共计划分出98 613个单元和89 477个节点。模型边界条件设置为:模型表面为自由边界;模型四周为水平向位移约束;模型底部为水平和竖直方向位移约束。

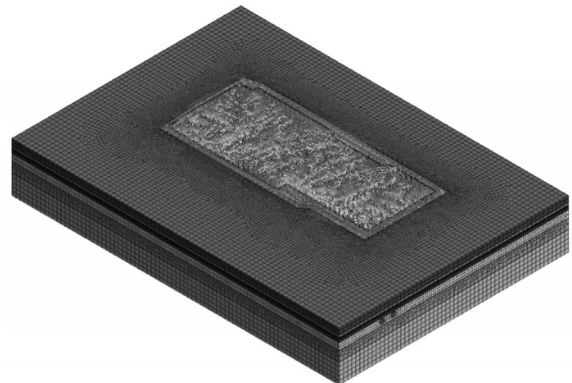


图6 三维数值模型

### 3.2 参数设置

根据现场勘察报告及试验结果,表2给出了基坑范围内土体的HSS模型参数。除上述参数外<sup>[6]</sup>,卸载再加载泊松比统一取0.2,参考应力按照围压100 kPa取值,破坏比统一取0.9,江苏省黏性土的刚度应力水平相关幂指数统一取0.8,静止侧压力系数由Jaky公式统一计算得出。

基坑支护体系各结构采用弹性本构模型,模型参数如表3所示。

### 3.3 模拟工况及监测点

表4给出了模拟工况及内容。

图7给出了监测点布置图。

### 3.4 有限元结果分析

#### 3.4.1 围护桩水平位移

基坑内部土体开挖会导致周边土体发生向基坑内移动的趋势,周边土体作用在围护桩上的土压力导致围护桩发生变形。因此,有必要分析围护桩的水平变形。图8给出了基坑中部ZQ3桩体沿深度

表2 土体HS和HSS模型参数

土层	$\gamma /$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c' /$ kPa	$\varphi' /$ (°)	$\Psi /$ (°)	$E_{s0}^{ref} /$ MPa	$E_{ocd}^{ref} /$ MPa	$m$	$E_{ur}^{ref} /$ MPa	$\nu_{ur}$	$p^{ref} /$ kPa	$K_0$	$R_f$	$G_0^{ref} /$ MPa	$\gamma_{0.7} /$ $\times 10^4$
① <sub>2</sub>	18.2	7.3	12.5	0	4.4	3.4	0.5	28.3	0.2	100	0.78	0.9	42.3	2.0
②	17.6	26.5	13.6	0	6.9	5.3	0.8	46.7	0.2	100	0.76	0.9	66.8	1.0
③	18.5	19.5	21.4	0	10.2	7.6	0.8	63.4	0.2	100	0.63	0.9	82.3	2.0
④ <sub>1</sub>	17.1	3.6	13.2	0	3.1	2.4	0.8	22.3	0.2	100	0.77	0.9	52.6	3.0
⑤	19.1	18.3	17.6	0	8.3	6.3	0.8	43.2	0.2	100	0.69	0.9	55.8	2.0
⑥	19.6	14.3	24.8	0	8.3	9.2	0.8	54.1	0.2	100	0.58	0.9	101.2	3.0
⑦ <sub>1</sub>	18.7	16.7	18.5	0	5.8	6.5	0.8	42.3	0.2	100	0.68	0.9	74.3	2.0

表3 基坑支护结构参数

结构名称	容重/(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
围护桩	25	31.5	0.20
圈梁/冠梁	25	31.5	0.20
内支撑	25	31.5	0.20
地下室结构板	25	31.5	0.20

表4 模拟工况及内容

工序	内容
工序1	土层开挖至-0.8 m,并激活第1道内支撑
工序2	土层开挖至-4.6 m,并激活第2道内支撑
工序3	土层开挖至-8.4 m,并激活第3道内支撑
工序4	土层开挖至-12.0 m,并激活第4道内支撑
工序5	土层开挖至坑底,并激活结构底板
工序6	拆除内支撑

方向的水平位移曲线,并给出了基坑不同开挖工况的对比结果。如图8所示,整个施工过程中围护桩的水平位移呈不同程度的增大趋势。基坑开挖至-0.8 m再到-4.6 m时,桩体水平位移沿深度方向呈递减趋势,桩体最大水平位移发生在桩顶。这两个阶段土

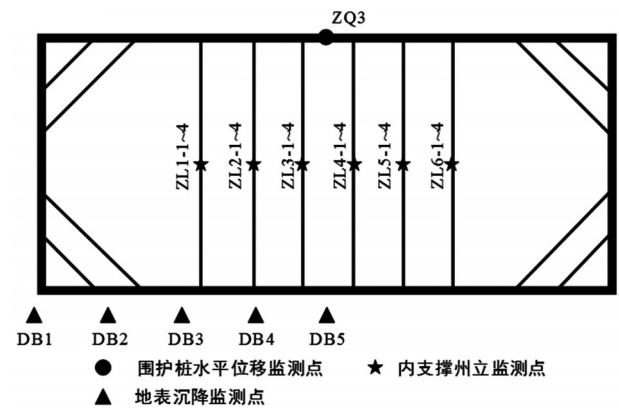


图7 监测点布置

体开挖较少,作用在围护桩上的侧向土压力较大,桩体刚度能抵御侧向土压力引起的变形,因而桩身总体水平位移较大。基坑从-4.6 m开挖至坑底的过程中,随观测深度增加,桩身水平变形先增大后减小。同时,基坑开挖越深,桩身水平变形越大,且最大变形发生的位置逐步下移。基坑拆除内支撑并施工主体结构时,桩体水平位移进一步加大,该阶段的桩体最大水平位移较前一阶段增加了约9 mm,为所有阶段中的最大增幅。可见,底板浇筑完成后,不能过早地拆除内支撑,需待每步浇筑的主体

结构达到设计强度后再拆除对应的内支撑。

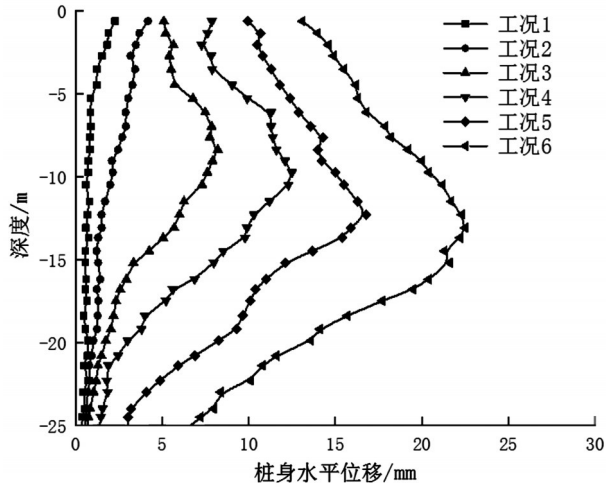


图8 ZQ3桩体沿深度方向的水平位移曲线

图9为围护桩ZQ3桩顶水平随施工时间的变化曲线。如图9所示,整个基坑施工过程中,桩顶水平位移首先缓慢增大,随后迅速增大,最终增速放缓并趋于稳定。由于内支撑提供的水平支撑力会抵御侧向土压力,因而每道内支撑架设后桩顶水平位移会有一定的减小。但随着土体的开挖,侧向土压力显著增大,内支撑的抑制作用急剧衰减。因此,最后一道支撑架设后,桩顶变形依旧有所增幅。同样,由于内支撑的拆除,在主体结构逐步施工过程中,桩顶水平位移显著增大,直至主体结构浇筑完成。

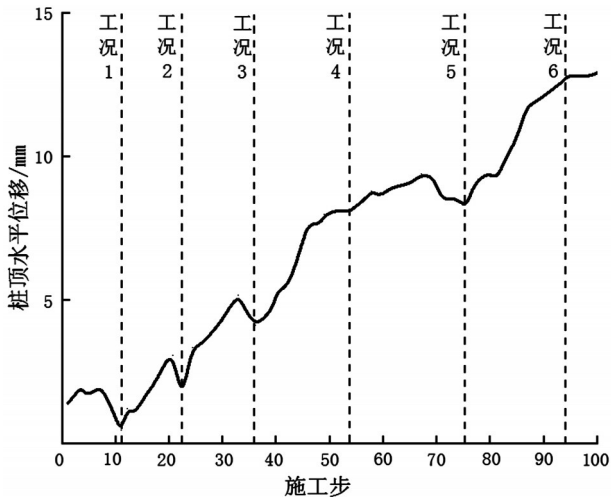


图9 桩顶水平位移随施工时间的变化曲线

### 3.4.2 地表沉降

图10给出了监测点DB1~DB5地表沉降的时程曲线。从图10中可以看出,整个施工过程中,地表

沉降变化仍分为3个阶段:缓慢增长、快速增长、逐步稳定。同样的,每道内支撑架设完成后,地表沉降均会出现不同程度的减小,这是由于内支撑抑制了土体发生变形。基坑角部DB1测点的地表沉降远小于基坑长边DB5测点的地表沉降。这是因为基坑角部受双向围护桩的约束作用,而基坑长边的临空面又大于基坑短边的临空面。

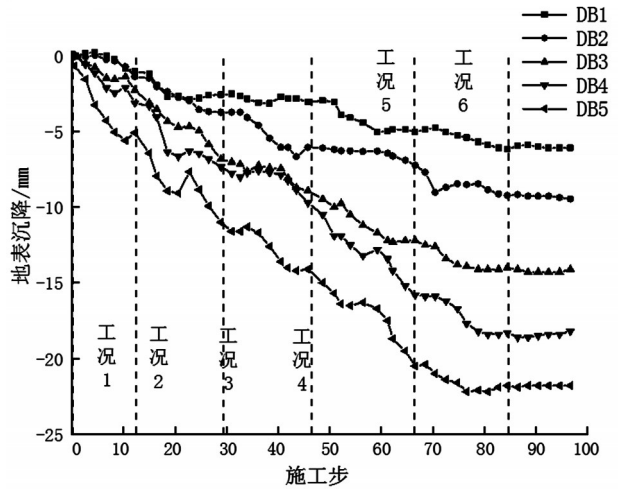


图10 监测点DB01-05~DB06-05地表沉降的时程曲线

为进一步分析基坑开挖的空间效应,图11给出了距基坑坑角不同距离的监测点的地表沉降和桩顶水平位移。从图11可以看出,随着距基坑坑角距离的增大,监测点地表沉降和桩顶水平位移均先快速增大,随后缓慢增大,最后区域稳定。按照距基坑坑角距离的不同,总体上可以划分为3个区域:快速增长区(1~1/4L)、缓慢增长区(1/4L~3/8L)、稳定区(3/8L~1/2L),其中L为基坑长度。

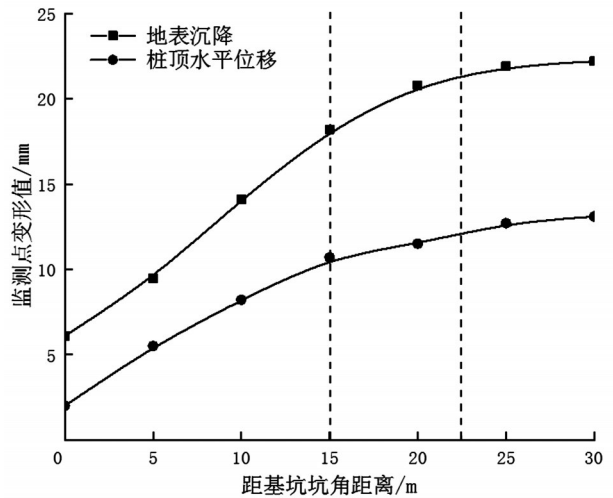


图11 沿基坑长边地表沉降和桩顶水平位移变化曲线

### 3.4.3 内支撑轴力

图12对比了3处不同部位的首道内支撑轴力的时程曲线,分别为LZ1-1、LZ2-1、LZ3-1。从图12可以看出,按内支撑轴力大小排序为LZ3-1>LZ2-1>LZ1-1。这是由于受基坑空间效应的影响,LZ3-1位于基坑长边中部,该处围护桩顶水平位移较大,而LZ1-1距基坑角部更近,桩顶水平位移较小。

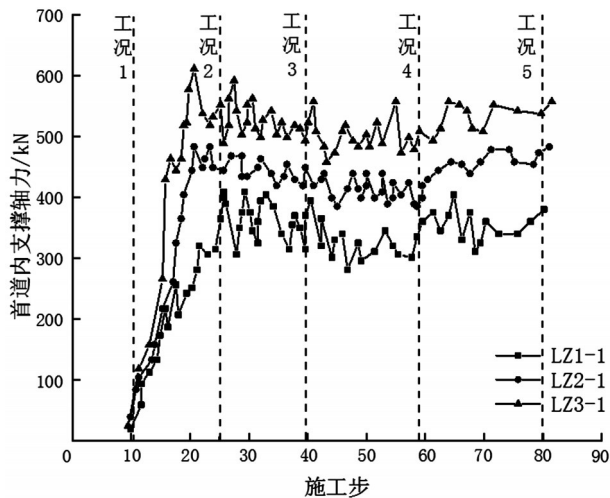


图12 首道内支撑轴力的时程曲线

## 4 结论

基于软土地基上排涝泵站深基坑工程工程,利用硬化土小应变(HSS)本构模型建立三维基坑模型,分析了基坑施工过程中受力和变形的时空效应。主要获得以下结论:

(1)桩顶水平位移的模拟值和监测值吻合较好,说明土体采用HSS本构模型能较好的反映出基坑开挖过程中土体的变形响应。

(2)基坑施工过程中,桩身水平位移总体呈增大趋势,桩身水平位移显著增长主要发生在第三、四道内支撑施工及主体结构施工阶段;随着基坑的开挖,桩身最大水平位移发生在桩身中部且逐渐下移。

(3)随着基坑的开挖,地表沉降逐渐增大随后趋于稳定,内支撑的架设会一定程度抑制地表沉降的发展。沿着基坑长边方向,桩身水平位移和地表沉降变化显著,具有明显的空间效应,按距基坑拐角的距离可分为快速增长区、缓慢增长区、稳定区。

### 参考文献:

- [1] 胡国安. 引江济淮工程蜀山泵站安全监测设计[J]. 工程与建设, 2020, 34(5): 826-829.
- [2] 刘永辉, 孔庆宇, 安彦勇. 中心渔港泵站基坑支护工程监测与安全性分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(4): 77-80.
- [3] 金旭, 苗晓鹏, 吕圣岚, 等. 北京地区某深基坑支护设计与监测数据对比分析[J]. 岩土工程技术, 2023, 37(4): 499-504.
- [4] 黄学刚, 赵伟, 马军英. 基于雨水泵站结构特征的基坑换撑优化设计[J]. 岩土工程技术, 2025, 39(4): 232-238.
- [5] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体HS-Small模型参数的研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1766-1774.
- [6] 张钦杰, 张晓燕. HSS模型在深基坑工程中的有限元分析研究[J]. 上海水务, 2015, 31(1): 29-32, 35.