

# 基于渗流应力耦合模型的深基坑支护稳定性数值模拟

Numerical Simulation of Retaining Stability of Deep Foundation Pit Based on Seepage Stress Coupling Model

钱源兵, 刘 亮

(江苏省地质环境勘查院, 江苏 南京 210018)

**摘 要:** 本研究旨在探究不同开挖深度及支护参数对建筑深基坑支护稳定性的影响, 以某建筑为研究对象, 该建筑采用双排桩加 3 排预应力锚索复合支护结构。基于地质条件, 构建了渗流应力耦合的有限元模型。利用 PLAXIS 有限元软件, 对不同开挖深度及支护参数下的基坑支护稳定性进行了数值模拟分析。结果表明, 随着开挖深度的增加, 支护结构的水平位移和弯矩逐渐增大, 稳定性降低但仍具有良好的稳定性; 增加支护桩的嵌固深度和桩径均可有效减小水平位移和弯矩, 该工程的最佳嵌固深度为 10m, 最佳桩径为 1.1m, 控制排距不超过 4.0m。

**关键词:** 渗流应力; 耦合模型; 深基坑; 支护; 稳定性

**中图分类号:** TU473.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 02-0075-06

**DOI:** 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.02.014

QIAN Yuanbing, LIU Liang

(Geological Environment Exploration Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

**Abstract:** This study aims to explore the influence of different excavation depths and support parameters on the stability of deep foundation pit support in buildings, taking a building as the research object, the building adopts a composite support structure of double row piles and 3 rows of prestressed anchor cables. Based on the geological conditions, a finite element model coupled with seepage stress was constructed. Numerical simulation analysis was conducted on the stability of foundation pit support under different excavation depths and support parameters using PLAXIS finite element software. The results indicate that as the excavation depth increases, the horizontal displacement and bending moment of the support structure gradually increase, and the stability decreases. but still has good stability; increasing the embedding depth and pile diameter of the support pile can effectively reduce horizontal displacement and bending moment. the optimal embedding depth of the project is determined to be 10m, the optimal pile diameter is 1.1m, and the control row spacing does not exceed 4.0m.

**Keywords:** seepage stress; coupling model; deep foundation pit; support; stability

## 0 引言

开发地下空间, 可提升土地使用率, 解决土地资源缺乏问题<sup>[1-2]</sup>。若深基坑支护不规范, 无法满足

地下建筑安全性, 则会导致重大安全事故发生<sup>[3-5]</sup>, 为此, 深基坑支护稳定性与建筑安全性密不可分。为确保建筑结构的安全性, 需分析深基坑支护的稳定性, 设计最佳的支护方案。

吴刚等<sup>[6]</sup>通过 FLAC 3D 数值模拟深基坑支护稳定性, 试验证明: 护坡桩+混凝土挡土墙支护方案最优, 支护变形幅度最小; 但该方法并未分析支护参数对其稳定性的影响; 罗正东等<sup>[7]</sup>通过 ABAQUS 软

**作者简介:** 钱源兵 (1980—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 水文地质, 工程地质。

**收稿日期:** 2023-11-14

岩土力学

件数值模拟深基坑支护稳定性，试验证明：横向支撑结构，可提升支护稳定性，支护嵌入深度需控制在3~7m之间，为深基坑施工安全提供帮助，但该方法仅分析了嵌入深度支护参数对其稳定性的影响。

比奥固结理论以固结机制为出发点，精准呈现孔隙水压力消失和土体变形间的关系，通过该理论可有效融合渗流场与应力场，获取渗流应力耦合模型，精准数值模拟深基坑支护稳定性。以开挖深度与支护参数为影响因素，研究基于渗流应力耦合模型的建筑深基坑支护稳定性数值模拟。

1 材料与方

1.1 工程概况

以某商办综合楼为试验对象，该建筑地上18层，裙楼4层，地下1层，共19层，高度72.5m，长度35.5m，宽度33m，结构为钢筋混凝土框架-剪力墙，深基坑开挖深度为13m，深基坑附近是建筑物与道路，深基坑南面为道路，其余三个方向均为建筑，地下管线较多，深基坑安全等级属于一级。地下岩层属于单斜产出，产状260°∠45°，地震基本烈度低于VI度，无较为严重的不良地质情况。地层内主要包含杂填土、红黏土、基岩三种地层。地下水为上层滞水与基岩裂隙水两种：第一种集中在杂填土地层内，水流较少，利于排泄，对建筑深基坑支护稳定性影响较小；第二种地下水埋深是14.62m，深基坑开挖深度是13m，为此无需考虑第二种地下水对建筑深基坑支护稳定性的影响。该建筑区域主要地层物理参数见表1。

表1 主要地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the major strata

Table with 7 columns: 地层名称, 厚度/m, 重度 kN/m³, 渗透系数 m/d, 黏聚力 /kPa, 内摩擦角/°, 泊松比. Rows include 杂填土, 红黏土, 基岩.

1.2 深基坑支护方案设计

根据地质情况，深基坑选择分区分段双排桩加3排预应力锚索复合支护方案，以连梁的方式连接前后排桩，连梁选择C35强度等级的混凝土，其截面尺寸是800mm×800mm；以混凝土等级C40的灌注桩为支护桩，桩径为0.9~1.2m，支护桩左右间距是1.6m，

排距是1.0~5.0m，嵌固深度8~12m，施加初始预应力200kN，深基坑的坡顶施工荷载低于25kPa，3排预应力锚索的参数见表2。

表2 预应力锚索参数 Table 2 Prestressed anchor cable parameters

Table with 8 columns: 层数, 支锚类型, 水平间距/m, 竖向间距/m, 孔径 /mm, 入射角/°, 总长度/m, 锚固段长度/m. Rows include 1, 2, 3.

1.3 渗流应力耦合模型

依据该建筑的地质情况，构建渗流应力耦合的有限元模型，利用PLAXIS有限元软件展开建筑深基坑支护稳定性数值模拟。

建筑深基坑非饱和土的有效应力原理为σ' = σ - χu[8]，其中，初始应力是σ；渗透压力是u；面积系数是χ。建筑深基坑的土体变形可通过三维比奥固结方程来描述，该方程实质上反映了支护结构的位移平衡关系：

Mathematical equation (1) showing partial derivatives of displacement components (dx, dy, dz) and stress/strain terms, including parameters like G, v, and γw.

式中：dx、dy、dz为支护结构在x、y、z方向上的位移；G为剪切模量；Sr、rd分别为建筑深基坑土地饱和度、干重度；v为泊松比；n孔隙率；γw为地下水的重度。

渗透系数是kx、ky、kz，依据建筑深基坑单元体中地下水增减速率，获取非饱和土渗流方程[9]：

Mathematical equation (2) showing the flow equation with terms for permeability (kx, ky, kz), storage coefficient (Ss), and other parameters.

式中：θ为体积含水量；Ss为储水率。

通过 Galerkin 加权余量法离散式 (1) 与式 (2)，获取渗流应力耦合的有限元模型：

Mathematical equation (3) showing the discretized finite element model with matrices K-bar, C, and U, and a term for initial stress/strain.

式中： $\bar{K}$  为劲度矩阵； $C$  为耦合矩阵； $\tilde{K}$  为渗透矩阵； $\Delta D_i$ 、 $\Delta U_i$ 、 $\Delta F_i$  分别为深基坑支护监测点  $i$  的位移、渗透水压力、力的增量； $Q_i$  为流量矩阵； $\Delta t_i$  为时间增量； $\rho$  为基坑土体密度； $k_0$  为初始渗透系数； $\alpha$  为常数。

渗流应力耦合模型的初始条件包含地应力、位移与渗透水压力初始条件  $(\sigma'_z, \sigma'_x)$ 、 $d(x, y, z, t)$ 、 $u(x, y, z)$ ，公式如下：

$$\begin{cases} \sigma'_z = \gamma_w z \\ \sigma'_x = K_0 \gamma_w z \\ d(x, y, z, t) |_{t=0} = 0 \\ u(x, y, z) |_{t=0} = u_0(x, y, z) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $z$  为监测点深度； $K_0$  为静止侧压力系数； $u_0(x, y, z)$  为初始渗透水压力。

渗流应力耦合模型的边界条件包含渗透水压力、流量与自由面边界条件  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ ，公式如下：

$$\begin{cases} u(x, y, z, t) |_{H_1} = u_s \\ K_0 \frac{\partial Q}{\partial n} |_{H_2} = q_L \\ \mu = 0, q = -\mu \frac{\partial u}{\partial t} \cos \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中： $u_s$  为  $H_1$  内已知的渗透水压力； $q_L$  为  $H_2$  内已知的单位面积流量； $Q$  为基坑土体整体流量； $\mu$  为土体给水度； $\varepsilon$  为深基坑支护自由面和垂线的夹角； $q$  为经过  $H_3$  的单位面积流量。

利用 PLAXIS 软件结合深基坑支护渗流应力耦合有限元模型，数值模拟分析深基坑支护的稳定性。深基坑土体选择理想的弹塑性模型，通过点对点锚杆单元呈现锚杆承受拉力与受压情况；通过界面单元处理土体和支护结构间的界面。模型底部属于固定约束，上面属于自由边界。网格疏密程度对深基坑支护稳定性数值模拟效率与精度均有影响，为此

将深基坑支护结果作部分网格加密，深基坑支护三维模型尺寸是 200 m×140 m×40 m，深基坑开挖前后三维模型如图 1 所示。

按照深基坑支护方案，共设置三种工况，分别是开挖 2.5 m，距地面 2.0 m 处安装第一层锚索，记作 A 工况；开挖 5.5 m，距地面 5.0 m 处安装第二层锚索，记作 B 工况；开挖 8.5 m，距地面 8.0 m 处安装第三层锚索，记作 C 工况。

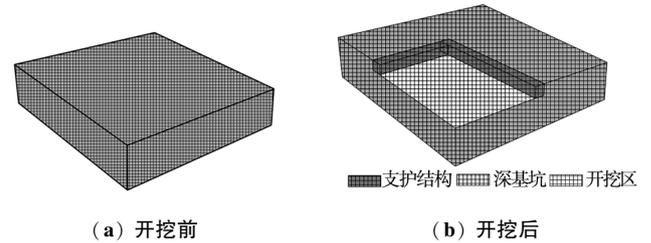


图 1 深基坑开挖前后三维模型  
Fig. 1 3D model before and after deep foundation pit excavation

## 2 试验结果

### 2.1 基坑不同开挖深度

以深基坑支护桩嵌固深度为 8 m，桩径为 0.9 m，排距为 1.0 m 为例，利用渗流应力耦合有限元模型数值模拟不同开挖深度，分析深基坑支护的稳定性。深基坑支护水平位移云图如图 2 所示，深基坑支护结构前后排桩的弯矩如图 3 所示，为确保深基坑支护的稳定性，其最大弯矩上限值是 ±1000 kN·m，最大水平位移是 40 mm。

由图 2 与图 3 可知，随着深基坑开挖深度的增加，支护的水平位移也逐渐增大；三种工况下，距离开挖区域越远，土体的水平位移均越小；三种工况下，支护的弯矩均大概呈“S”形，在桩长为 6~7m 之间时，支护前排桩弯矩由负变正；三种工况下，

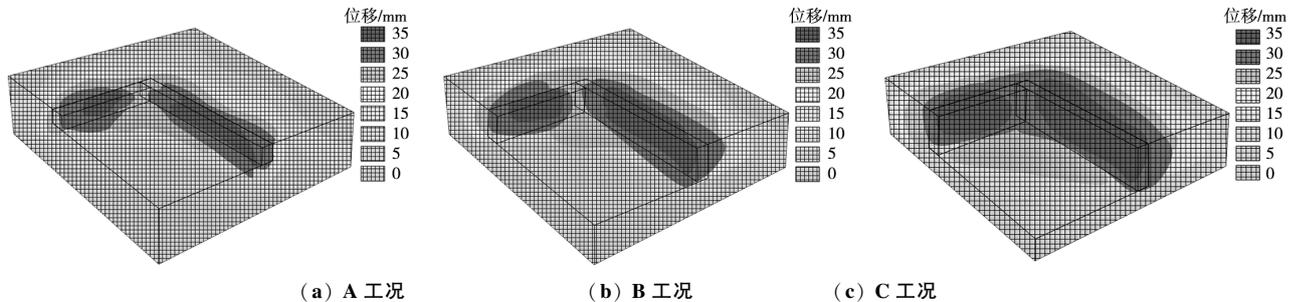


图 2 不同工况下深基坑支护水平位移云图  
Fig. 2 Horizontal cloud displacement map of deep foundation pit support under different working conditions

岩土力学

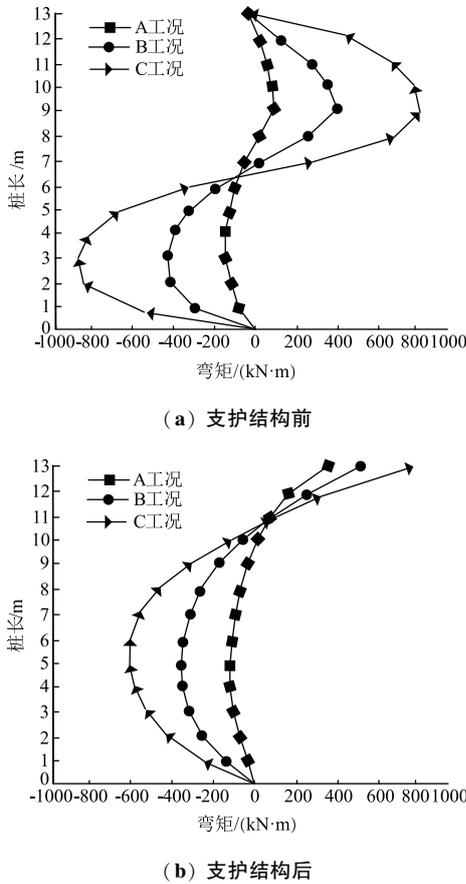


图3 深基坑支护结构前后排桩的弯矩  
Fig. 3 Bending moment of the front and rear row piles of the deep foundation pit supporting structure

支护后排桩的最大弯矩出现在桩的末端，且开挖深度越深，支护后排桩最大弯矩越大。试验证明，开挖深度越深，支护的水平位移越大，承受的弯矩越大，稳定性越差。三种工况下，支护的最大水平位移与最大弯矩，均未超过对应的上限值，说明双排桩加3排预应力锚索复合支护结构稳定性较优。

2.2 不同桩长嵌固深度

以C工况桩径0.9 m，排距1.0 m为例，不同桩长嵌固深度基坑支护稳定性数值模拟结果如图4所示。嵌固深度逐渐变深，支护的水平位移逐渐变小，承受的弯矩也逐渐变小。当嵌固深度由8 m增长至10 m时，支护水平位移与弯矩的缩减幅度均逐渐变大；当嵌固深度超过11 m（包含11 m）时，深基坑支护的水平位移与弯矩的缩减幅度逐渐变小，对比嵌固深度为10 m时，水平位移与弯矩仅有非常小的下降幅度，对控制深基坑支护变形的效果并不明显。试验证明，增加深基坑支护桩嵌固深度，可减少深

基坑支护水平位移与弯矩，提升支护稳定性；当嵌固深度超过11 m（包含11 m）时，对深基坑支护水平位移与弯矩的影响较小，为此最佳深基坑支护桩嵌固深度为10 m。

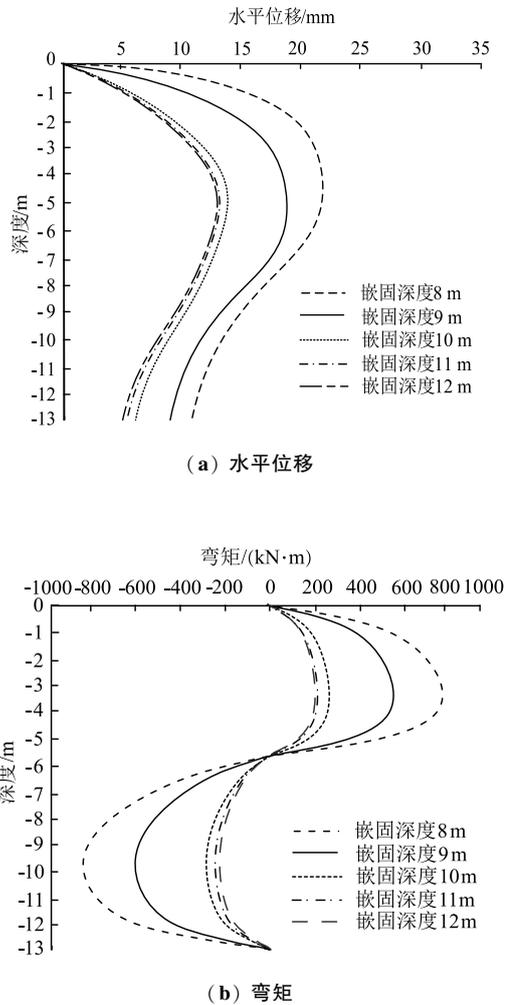


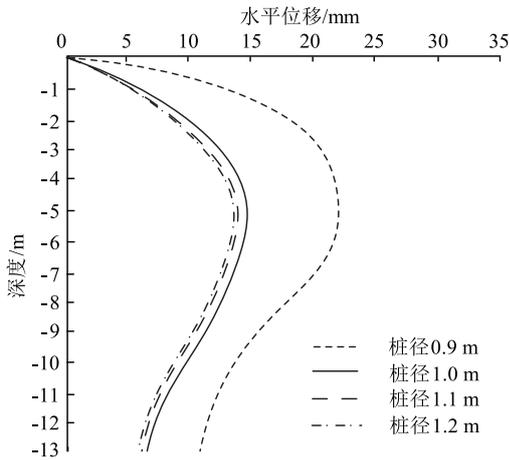
图4 不同嵌固深度时深基坑支护稳定性数值模拟结果  
Fig. 4 Numerical simulation results of supporting stability of deep foundation pit at different setting depths

2.3 不同桩径

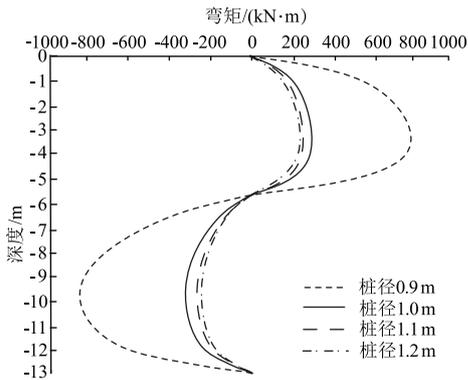
以C工况嵌固深度是8 m，排距是1.0 m为例，不同桩径支护稳定性数值模拟结果如图5所示。桩径越大，支护的水平位移越小，承受的弯矩也越小。当桩径由0.9 m增长至1.0 m时，支护水平位移与弯矩的缩减幅度最大；当桩径超过1.1 m（包含1.1 m）时，支护水平位移与弯矩缩减幅度逐渐变小，对维持支护稳定性的效果并不明显。试验证明，增加支护桩的桩径，可减少深基坑支护水平位移与弯矩，提升支护稳定性，当桩径超过1.1 m（包含1.1 m）时，

对深基坑支护水平位移与弯矩的影响较小，为此最佳支护桩桩径为 1.1 m，可有效节省施工成本，减少施工时间。

可减少深基坑支护水平位移与弯矩，提升支护稳定性。



(a) 不同桩径时支护水平位移数值模拟结果

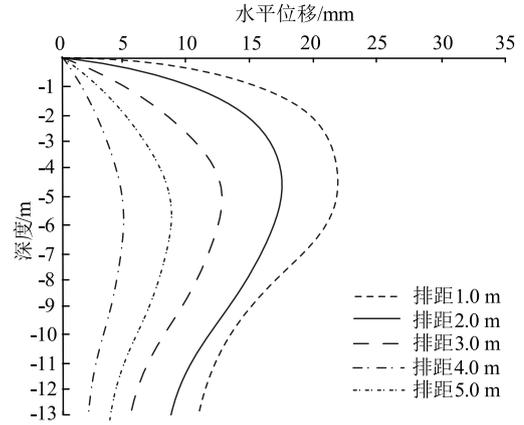


(b) 不同桩径时支护弯矩数值模拟结果

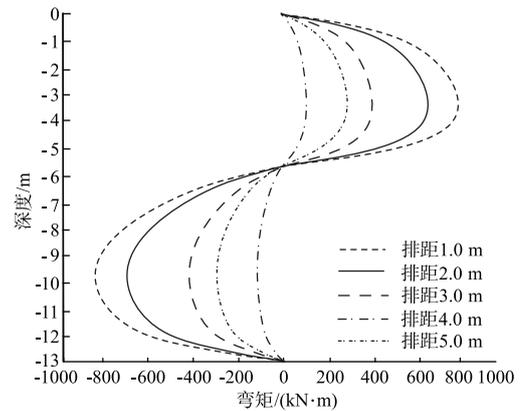
图 5 不同桩径时深基坑支护稳定性数值模拟结果  
Fig. 5 Numerical simulation results of deep foundation pit support stability at different pile diameter

### 2.4 不同双排桩排距

以 C 工况嵌固深度 8 m，桩径 0.9 m 为例，不同双排桩排距时，深基坑支护稳定性数值模拟结果如图 6 所示。排距越大，支护水平位移就越小，承受的弯矩也越小。当排距由 1.0 m 增长至 4.0 m 时，支护水平位移与弯矩的缩减幅度逐渐增大；当排距为 5.0 m 时，深基坑支护水平位移与弯矩出现反弹，开始增长。原因是排距太大，前后排桩的连接性变差，降低支护的整体性能，影响其稳定性。试验证明，增加支护双排桩的排距，最大排距不宜超过 4.0 m，



(a) 水平位移



(b) 弯矩

图 6 不同排距时深基坑支护稳定性数值模拟结果  
Fig. 6 Numerical simulation results of the stability of deep foundation pit support at different row distances

### 3 结论

基于渗流应力耦合模型的建筑深基坑支护稳定性数值模拟，分析不同支护参数对其稳定性的影响，得到以下结论：深基坑开挖深度越深，支护的水平位移越大，承受的弯矩越大，稳定性越差。增加支护桩嵌固深度，可减少支护的水平位移与弯矩，提升支护的稳定性，最佳嵌固深度为 10 m。排距太大，会导致前后排桩的连接性变差，降低支护的整体性能，影响其稳定性，为此最大排距不超过 4.0 m，可有效缩减支护水平位移，减少支护承受的弯矩，提升其稳定性，确保上层建筑的安全性。

(下转第 86 页)

## 岩土力学

的主要因素, 电缆隧道最容易发生破坏的截面位置为基坑端头处, 电缆隧道二衬纵向压应力最大位置始终位于靠近基坑侧墙脚处, 纵向拉应力最大位置始终位于远离基坑侧墙脚位置。

(4) 由于坑外电缆隧道不同位置受基坑开挖扰动影响程度不同, 沿电缆隧道轴线方向出现了水平向不均匀变形, 基坑开挖深度相同时, 基坑与既有电缆隧道间距越大, 隧道被扰动竖向位移越明显, 隧道水平位移相较于竖向位移变化较小, 间距越大, 邻近电缆隧道被扰动安全性影响越小。

(5) 基坑与电缆暗挖隧道不同间距对电缆隧道安全系数为非线性曲线关系。随着间距的增大, 安全系数增加的斜率变大。

考虑到隧道埋深也是造成既有隧道位移和衬砌结构内力的改变的主要因素, 后续研究中会补充对此问题的分析。

### 参 考 文 献

- [1] 邓旭. 深基坑开挖对抗外深层土体及邻近隧道的影响研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [2] 朱逢斌, 杨平, 林水仙. 盾构隧道施工对邻近承载桩基影响研究 [J]. 岩土力学, 2010, 31 ( 12 ): 3894 - 3900.
- [3] 李大勇, 张土乔, 龚晓南. 深基坑开挖引起临近地下管线的位移分析 [J]. 工业建筑, 1999, 29 ( 11 ): 36-40.
- [4] 贺雷, 张亚楠, 曹明洋, 等. 软土区基坑开挖对邻近电缆隧道的影响研究 [J]. 建筑结构, 2020, 50 ( 增刊 1 ): 1032-1037.
- [5] 田海洋. 深基坑施工对既有变形运营隧道影响实测分析 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10 ( 3 ): 663-667.
- [6] 杨平, 周志良, 黄晓东, 等. 钻孔灌注桩施工对邻近既有隧道影响数值分析 [J]. 沈阳建筑大学学报, 2020.
- [7] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38 ( 4 ): 599-612.
- [8] 冯龙飞. 基坑开挖对邻近地铁盾构隧道的变形影响及控制措施研究 [S]. 铁道标准设计, 2014.
- [9] 朱姣利, 潘健. 某基坑开挖对临近地下隧道影响的有限元分析 [J]. 广东土木与建筑, 2007 ( 5 ): 13-14.
- [10] 李连祥, 张强, 石锦江, 等. 基坑开挖邻近隧道水平形变位移规律 [J]. 山东大学学报 ( 工学版 ), 2021, 51 ( 1 ): 46-52, 59.
- [11] 沈国政, 赵宏华, 赵凯, 等. 深基坑开挖引起隧道纵向位移的 Hermite 差分法 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 ( 增刊 2 ): 841-848.
- [12] 丁智, 张霄, 梁发云, 等. 软土基坑开挖对邻近既有隧道影响研究及展望 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 ( 3 ): 50-70.
- [13] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证 [J]. 岩土力学, 2021, 42 ( 3 ): 833-845.
- [14] 庞晋. 基坑开挖对邻近既有地铁隧道影响的研究 [D]. 杭州: 浙江科技学院, 2017.
- [15] 徐则民, 黄润秋, 王士天. 隧道的埋深划分 [D]. 成都: 成都理工学院工程地质研究所, 2000.
- [16] 姚长春, 于海龙, 张洋. 基于 FLAC 3D 软件求解衬砌强度安全系数的方法 [J]. 四川建筑, 2007, 27 ( 2 ): 115-116.

(上接第 79 页)

### 参 考 文 献

- [1] 路林海, 王国富, 徐前卫, 等. 复合立柱桩支承下深基坑围护结构变形性状 [J]. 铁道工程学报, 2019, 36 ( 1 ): 93-98.
- [2] 储晓芳, 李大华, 孟源, 等. 临河区域深基坑工程变形监测与模拟研究 [J]. 建筑技术, 2020, 51 ( 11 ): 1319-1322.
- [3] 齐朋, 张宇奇, 王宁. 深基坑围护结构横向位移监测和数值模拟分析 [J]. 中外公路, 2022, 42 ( 1 ): 38-42.
- [4] 赵斌. 混合支护下深基坑开挖引起的近接建筑物稳定性分析 [J]. 人民长江, 2021, 52 ( 增刊 1 ): 281-286, 308.
- [5] 胡静. 深基坑支护结构稳定性计算及数值模拟研究 [J]. 建筑结构, 2021, 51 ( 增刊 2 ): 1523-1527.
- [6] 吴刚, 李军委, 同飞, 等. 荣民金融中心深基坑支护设计及数值模拟分析 [J]. 建筑结构, 2019, 49 ( 增刊 2 ): 906-909.
- [7] 罗正东, 吴鹏, 黄河, 等. 富水砂卵石地层深基坑开挖变形监测与数值分析 [J]. 建筑结构, 2020, 50 ( 23 ): 128-133.
- [8] 董建华, 庄超. 深基坑框架预应力锚杆微型钢管桩联合支护结构力学特性分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 ( 3 ): 619-633.
- [9] 张超, 宋卫东, 李腾, 等. 破碎岩体应力-渗流耦合模型及数值模拟研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2021, 38 ( 6 ): 1220-1230.