

延深基坑桩锚加固支护结构力学特性分析

郭力群, 陈亚军, 徐芳超

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 运用 Zsoil 有限元软件建立桩锚支护延深开挖基坑数值模型,对加固支护结构连梁的节点连接形式、截面尺寸、支护平台宽度、二级支护桩的桩径和桩间距以及嵌入比等影响因数进行分析. 结果表明:连梁节点连接形式,支护平台宽度对控制延深开挖基坑支护结构的受力和变形有明显影响.

关键词: 延深开挖; 加固支护结构; 力学特性; 数值模拟

中图分类号: TU 473 文献标志码: A

由于设计方案调整等种种原因,在基坑支护结构施工后,工程项目需增加开挖深度,出现基坑的二次开挖.既有基坑的二次开挖支护技术属于基坑工程的加固技术,目前已有不少基坑工程在已有支护结构基础上进行延深加固的成功案例<sup>[1-4]</sup>.不少学者采用有限元数值分析对二次开挖的加固效果进行了研究<sup>[5-10]</sup>,但基坑二次开挖支护对基坑的影响因素或受力机理方面的研究相对较少.本文以某基坑工程为背景,运用 Zsoil 有限元软件,对二次支护结构加固的影响因素进行分析,分析其受力变形规律,以得到指导类似工程的有益结论.

1 有限元模型的建立

1.1 工程背景

长沙某广场基坑原建筑结构是按照两层地下室设计的,原支护方案采用桩锚支护结构.由于建筑设计变更,将原有的两层地下室改为 3 层地下室,必须采用相应的支护加固措施.以 PQ 断面为例,原 2 层地下室基坑开挖深度为 9.7 m,设计变更后的基坑总开挖深度为 15 m,开挖深度产生较大的改变.

基坑工程延深开挖的支护结构加固形式采用人工挖孔桩结合预应力锚杆,并设置钢筋混凝土连梁与原有的支护桩连接形成的整体支护体系,基坑支护剖面图如图 1 所示.一、二级支护桩桩径  $d=1\ 000\text{ mm}$ ,桩间距  $s=2\ 000\text{ mm}$ ;支护桩的桩顶设置冠梁,其截面尺寸为  $1\ 200\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ ;腰梁尺寸为  $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ ;连梁尺寸为  $800\text{ mm}\times 700\text{ mm}$ ,各个构件的砼强度均为 C30.

1.2 有限元模型

基坑模型采用平面应变模型,如图 2 所示,模型的二维尺寸为  $70\text{ m}\times 30\text{ m}$ .土体采用小应变土体硬化模型 HSS(hardening soil model with small strain stiffness).HSS 模型能够反映土体的小应变硬化特性,能够合理地模拟基坑开挖变形.锚杆、连梁、支护桩视为线弹性材料,基本模型中连梁与一级支护桩的节点连接方式考虑为铰接形式.

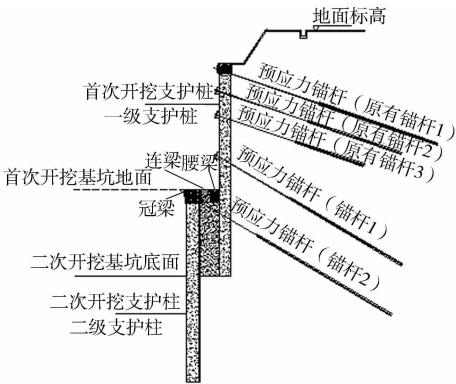


图 1 支护结构剖面图

Fig. 1 Cross-section of supporting structure

表 1 土体 HSS 模型计算参数  
Tab. 1 Calculation parameters of HSS model

土层	地层名称	$\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(\text{^\circ})$	$E_{\text{sed}}/\text{GPa}$	$E_{50}/\text{GPa}$	$E_{\text{u,r}}/\text{GPa}$	$E_0/\text{GPa}$
1	素填土	16.0	12	10	3.0	4.5	13.5	67.5
2	粉质粘土	19.5	25	16	6.5	6.5	19.5	97.5
3	粉砂	19.5	0	20	12.3	12.3	36.9	184.5
4	圆砾	21.0	0	30	13.5	13.5	40.5	202.5
5	粉土	19.5	32	16	6.3	6.3	18.9	94.5
6	强风化泥质粉砂岩	22.0	45	22	36.0	36.0	108.0	540.0
7	中风化泥质粉砂岩	22.0	45	35	45.0	45.0	135.0	675.0

根据实际施工工况, 基坑开挖支护模拟工况如下: 施作一级支护桩→降水→开挖第 1 层土→施作第一层锚杆→开挖第 2 层土→施作第 2 层锚杆→开挖第 3 层土→施作第 3 层锚杆→开挖第 4 层土→施作第 4 层锚杆→开挖到原基坑坑底标高→施作连梁+二级支护桩+第 5 层锚杆→开挖基坑到新的坑底标高处。

2 加固体影响参数

2.1 连梁的影响

2.1.1 连梁节点连接形式 通过连梁连接新增支护桩与原支护桩, 以确保支护结构的整体性. 但在实际工程中, 前、后排桩之间的连接构造方式比较复杂, 连梁与支护桩之间的节点连接形式将影响加固后支护结构的受力变形特性. 连梁与一级、二级支护桩之间有 4 种不同的连接形式: 1) 连梁与一、二级支护桩刚接; 2) 连梁与一、二级支护桩铰接; 3) 连梁与二级支护桩刚接, 与一级支护桩铰接; 4) 连梁与一级支护桩刚接, 与二级支护桩铰接. 当连梁与支护桩之间的连接节点形式为刚接节点时, 刚节点限制了节点处的转动自由度, 支护桩的弯矩能够通过连梁与支护桩的刚节点进行合理的传递分配; 当连梁与支护桩之间的连接节点形式为铰接节点时, 铰接节点只限制了节点处的平动自由度, 则连梁只能承受轴向力, 不传递弯矩.

水平位移和弯矩如图 3 所示. 由图 3 可知: 当连梁两端与支护桩的节点连接形式为刚性连接时, 较好地控制一级支护桩的整体水平变形和二级支护桩的桩顶位移, 一级支护桩的最大位移为 43.2 mm, 二级支护桩的最大位移为 25.8 mm; 当连梁两端与支护桩的节点连接形式都为铰接时, 一、二级支护桩的桩体变形都有较大增加, 一级支护桩的最大位移为 47.5 mm, 二级支护桩最大位移为 27.8 mm.

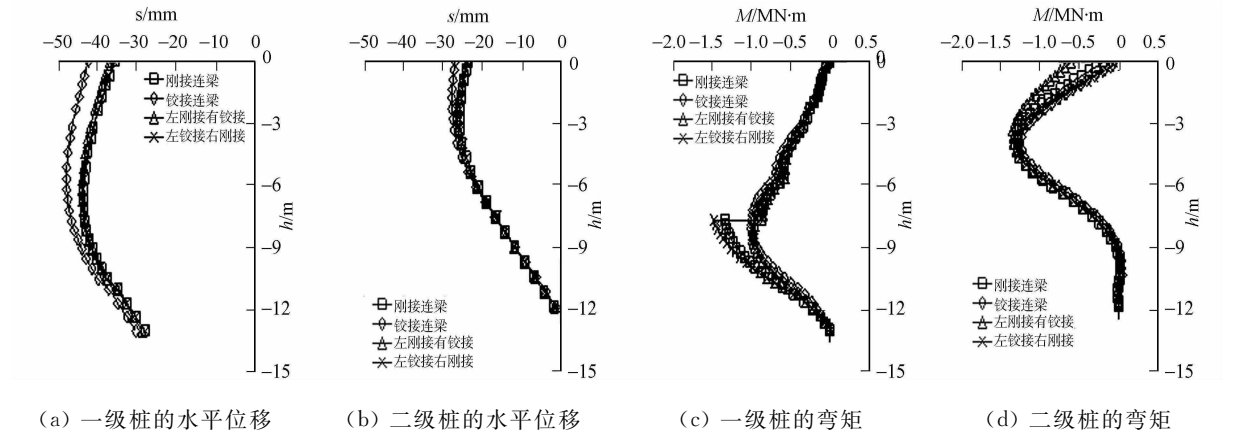


Fig. 3 Horizontal displacement and bending moment of piles under various coupling types

对于一级支护桩, 4 种连接形式对其桩体在连梁以上部分的弯矩值非常接近, 而当连梁与一级支护桩的节点连接形式为刚性连接时, 会使一级支护桩的弯矩在连梁处发生较大突变, 连梁以上部分的最大弯矩为 870.2 kN·m, 连梁以下部分的最大弯矩为 1 336 kN·m, 使得连梁以下部分产生过大的受力,

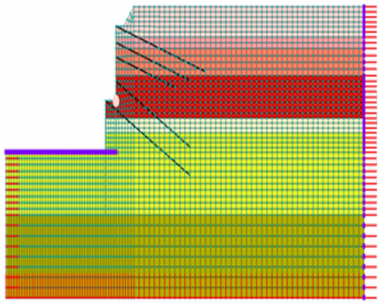


图 2 有限元模型  
Fig. 2 Finite element model

若桩身配筋不足时容易产生断桩破坏. 综合以上考虑, 连梁两端与支护桩的连接形式宜采用与一级支护桩铰接, 二级支护桩刚接的连接形式, 既能控制变形, 还能改善桩体的受力情况.

2.1.2 连梁截面尺寸 连梁截面按  $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$ ,  $600\text{ mm}\times 600\text{ mm}$ ,  $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}$  变化, 改变连梁的刚度进行分析, 如图 4 所示. 由图 4 可知: 连梁截面变化对一、二级支护桩的水平位移和弯矩的影响较小. 因此, 连梁刚度对基坑的变形和受力影响较小, 但连梁截面的设置需要满足梁构造配筋要求.

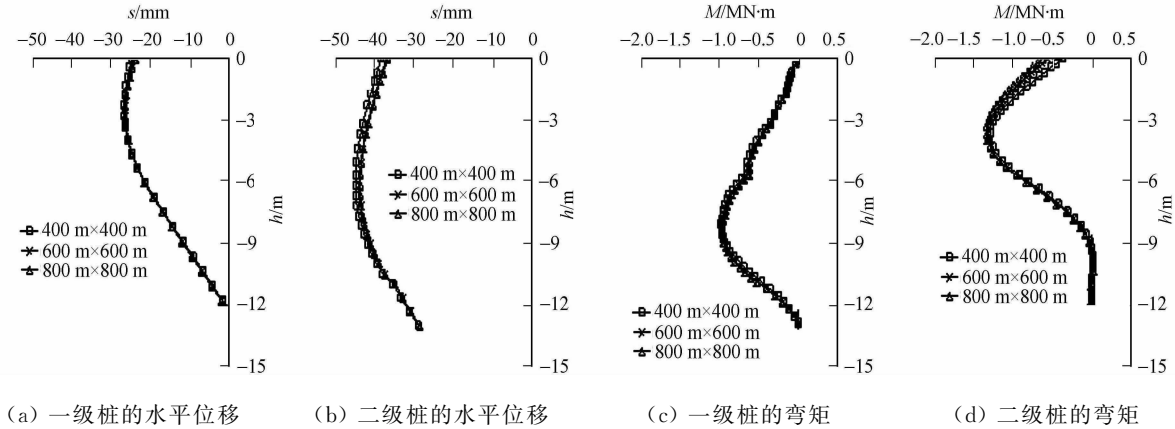


图 4 不同连梁截面支护桩的水平位移和弯矩图

Fig. 4 Horizontal displacement and bending moment of piles under various size of coupling beams

2.2 平台宽度的影响

一、二级支护桩之间土的宽度(平台宽度)取值为 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 m, 水平位移和弯矩如图 5 所示. 随着平台宽度的增长, 一级支护桩的最大位移由 2.0 m 时的 43.6 mm 减少为 4.0 m 时的 36.6 mm, 二级支护桩的最大位移由 2.0 m 时的 26.4 mm 减少为 4.0 m 时的 17.5 mm, 平台宽度的增加能够较大幅度地减小支护桩的整体水平位移. 因此, 平台宽度的变化对一级支护桩的弯矩的影响不大. 二级支护桩的弯矩随着平台宽度的增长, 其最大弯矩由 2.0 m 时的 1 341.4 kN·m 减少为 4.0 m 时的 980 kN·m, 影响较大. 因此, 当场地存在足够空间时, 增加平台宽度, 可显著的减少支护桩的整体变形和改善二级支护桩的受力情况.

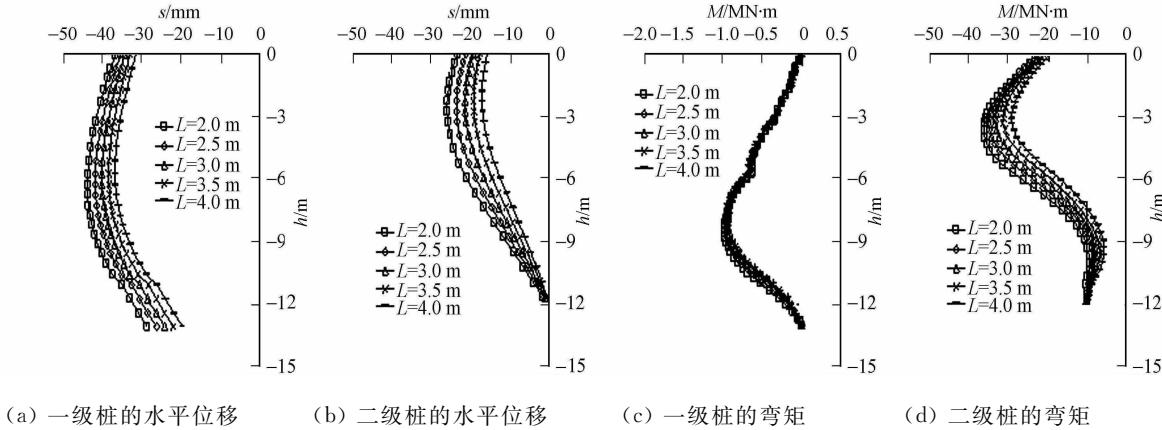


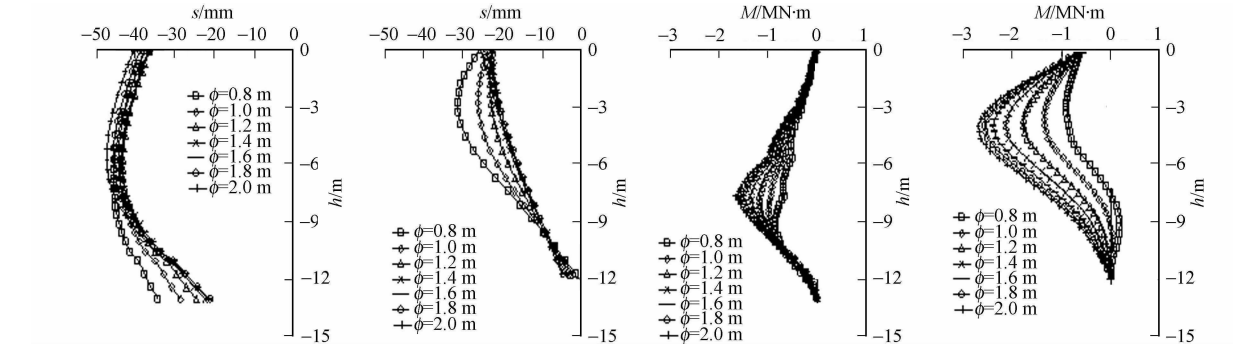
图 5 不同平台宽度支护桩的水平位移和弯矩图

Fig. 5 Horizontal displacement and bending moment of piles under various platform width

2.3 二级支护桩的影响

2.3.1 二级支护桩的桩径 选取桩径为 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 m 的常用的排桩, 水平位移和弯矩如图 6 所示. 由图 6 可知: 随着二级支护桩桩径的增加, 桩身刚度增加, 一、二级支护桩的最大水平位移呈先减小后增大的变化趋势, 且二级支护桩的最大位移不断向桩顶移动, 在桩径达到 1.4 m 后, 最大位移出现在桩顶处, 随后桩径的增加对二级支护桩最大位移的变化较小. 因此桩径的增加能减小二级支护桩的位移, 但对一级支护桩效果不理想, 且桩径达到某一临界点对二级支护桩的位移影响较小. 与此同时, 桩身弯矩的变化较大, 且二级支护桩弯矩的增长速度大于一级支护桩. 综上所述, 桩径的增加

能改善支护桩变形,但却是以桩身承受更大内力为代价的。

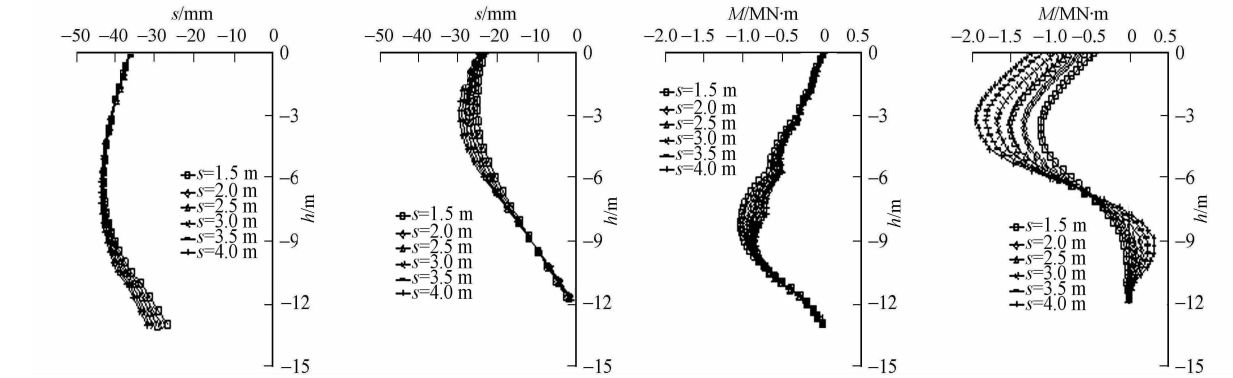


(a) 一级桩的水平位移 (b) 二级桩的水平位移 (c) 一级桩的弯矩 (d) 二级桩的弯矩

图 6 不同二级支护桩桩径下支护桩的水平位移和弯矩图

Fig. 6 Horizontal displacement and bending moment of piles under various diameters of second stage piles

2.3.2 二级支护桩的桩间距 二级支护桩桩间距按 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 m 变化, 由计算结果得出: 二级支护桩桩间距的变化对一级支护桩的受力变形影响不大, 二级支护桩的桩身最大水平位移由二级支护桩桩间距  $s=4.0$  m 时的 30.0 mm 减小为  $s=1.5$  m 时的 25.3 mm, 影响较小; 二级支护桩桩间距的减小会增加一级支护桩的弯矩(变化幅度较小), 较大程度地减小二级支护桩的桩身弯矩, 桩的最大弯矩由  $s=4.0$  m 时的 1 954 kN·m 减小为  $s=1.5$  m 时的 1 128 kN·m. 这是由于桩间距的增大, 使得单根支护桩需要承受更大的内力。

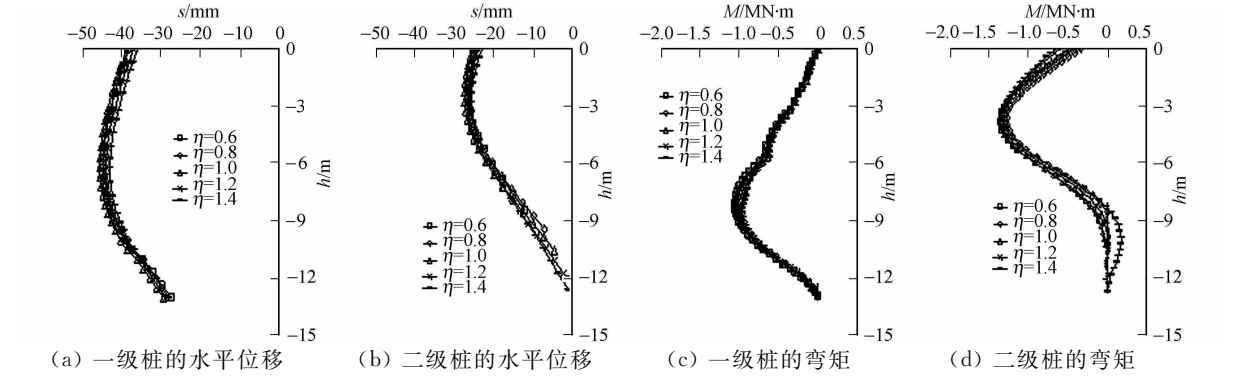


(a) 一级桩的水平位移 (b) 二级桩的水平位移 (c) 一级桩的弯矩 (d) 二级桩的弯矩

图 7 不同二级支护桩桩间距下支护桩的水平位移和弯矩图

Fig. 7 Horizontal displacement and bending moment of piles under various distance of second stage piles

2.3.3 二级支护桩的嵌入比 二级支护桩嵌入比( $\eta=(L-h)/L$ )按 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 变化, 水平位移和弯矩如图 8 所示. 由图 8 可知: 二级支护桩嵌入比  $\eta$  的变化对一级支护桩和二级支护桩的受力、



(a) 一级桩的水平位移 (b) 二级桩的水平位移 (c) 一级桩的弯矩 (d) 二级桩的弯矩

图 8 不同二级支护桩桩嵌入比支护桩的水平位移和弯矩图

Fig. 8 Horizontal displacement and bending moment of piles under various embedded ratio of second stage piles

变形影响较小,这是由于二级支护桩的嵌固土层为硬土层,嵌入深度足够时便不会影响到上部结构的受力变形.因此,当嵌固土层为硬土层时,二级支护桩嵌入比对基坑的变形和受力影响较小,二级支护桩的嵌入深度能够提供足够的嵌固力即可满足要求.

### 3 结 论

在采用 Zsoil 软件建立基本分析模型的基础上,分析和探讨了连梁的节点形式、截面尺寸、平台宽度、二级支护桩的桩径、间距、嵌入比等对支护桩的受力变形的影响,得到如下 5 个结论.

- 1) 连梁与支护桩间连接形式对支护桩的受力变形影响较大,连接形式以连梁与一级支护桩铰接,与二级支护桩刚接为宜.
- 2) 连接平台宽度的增加可显著地减少支护结构的整体变形,改善支护桩的受力.
- 3) 二级支护桩桩径的增加,并不能较好地控制一、二级支护桩的位移,桩身弯矩的却变化较大.因此,改变桩径不是控制位移的最合理方法.
- 4) 二级支护桩桩间距的变化对一级支护桩的受力和变形影响不大,而桩间距的减小能够减小二级支护桩的最大位移,并能显著改善二级支护桩的受力情况.
- 5) 二级支护桩桩端嵌固的土层为硬土时,嵌入比变化对一、二级支护桩的受力和变形影响较小.

#### 参 考 文 献:

[1] 吴铭炳,戴一鸣,林颖孜,等. 基坑加深的加固措施及其效果[J]. 岩土工程学报,2010,32(增刊 2):459-462.

[2] 李冰河. 粉砂土地基既有超大基坑加深的支护技术及效果分析[J]. 建筑结构,2011,41(5):104-107.

[3] 刘兴旺,陈卫林,李志飙,等. 某大型工程施工阶段地下室加层的基坑支护技术[J]. 建筑结构,2012,42(8):104-106.

[4] 李胜杰. 支护结构完成后基坑加深的加固技术[J]. 四川建筑,2013,33(1):69-71.

[5] 顾赞勇,胡安峰,陈博浪. 二级联合支护结构深基坑整体稳定性分析[J]. 结构工程师,2012,28(5):111-117.

[6] 刘葵,刘书波. 基坑临时加深双层围护结构破坏研究[J]. 建筑结构,2013,43(增刊 2):605-608.

[7] 陈亚军,郭力群,徐芳超. 基坑延深开挖复合支护结构有限元模拟[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2013,34(3):316-319.

[8] 孙巍,范益群,黄新刚. 外滩交通枢纽大型地下空间开发中几个关键问题研究[J]. 市政技术,2009,27(增刊 2):3-9.

[9] 郑晏华. 上海外滩通道综合改造工程中特大基坑的分幅施工技术[J]. 建筑施工,2010,32(12):1187-1188.

[10] BENZ T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequences[D]. Stuttgart:University of Stuttgart,2006:147-149.

## Analysis on Mechanical Characteristics of Deepening Excavation Foundation Pit Reinforced by Pile-Anchor Structure

GUO Li-qun, CHEN Ya-jun, XU Fang-chao

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The deepening excavation foundation pit is required to reinforce the original supporting structure. The reinforced supporting structures are designed based on experience, and are not understanding the mechanical characteristics and influencing factors. The numerical model of deepening excavation reinforced by pile-anchor structure is established by the FEM software Zsoil to study the influence of various factors on force and deformation characteristics, including the factors are as follows: the coupling form and stiffness of coupling beams; the platform width; the embedded ratio, spacing, stiffness of second-stage piles. The results show that the coupling form of coupling beams and the platform width have a significant effect on the force and deformation of deepening excavation foundation pit.

**Keywords:** deepening excavation; reinforced supporting structure; mechanical characteristics; numerical simulation