

# 无支撑两级基坑支护结构变形影响因素分析

庄铃强<sup>1</sup>, 吴能森<sup>1</sup>, 黄志波<sup>2</sup>, 许旭堂<sup>1</sup>, 乐生煊<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建农林大学 金山学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 为探究无支撑多级支护结构的不同设计参数对基坑变形的影响, 以一个无支撑两级支护的粉质黏土深基坑为例, 利用 FLAC3D 软件建立数值模型, 并基于正交试验通过极差、方差分析, 就两级支护间距、开挖比以及两级支护结构长度对支护结构位移的影响进行研究。主要结论如下: 采用无支撑两级支护结构的粉质黏土深基坑, 两级支护结构的顶部最大位移受两级支护间距和开挖比影响的敏感度较高; 两级支护结构位移之间存在“叠加作用”、“牵引作用”的相互影响, 但当两级支护间距不小于总开挖深度的 0.5 倍时, 相互影响不显著; 当两级支护间距不小于总开挖深度的 0.5 倍, 且开挖比为 0.8~1.3 时, 两级支护结构的顶部最大位移比较接近, 且不超过规范的一级基坑下限控制值, 处于最合理的工作状态。

**关键词:** 基坑开挖; 无支撑支护结构; 影响因素; 支护间距; 开挖比

**中图分类号:** TU753

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-4348(2022)01-0061-07

## Analysis of influencing factors on deformation of retaining structures of unsupported two-stage foundation pits

ZHUANG Lingqiang<sup>1</sup>, WU Nengsen<sup>1</sup>, HUANG Zhibo<sup>2</sup>, XU Xutang<sup>1</sup>, LE Shengxuan<sup>1</sup>

(1. College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, China;

2. Jinshan College of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** This study aims to explore the influence of different design parameters of the unsupported and multi-stage retaining structure on the deformation of the foundation pit. With an unsupported two-stage silty clay deep foundation pit as an example, a numerical model was established by using FLAC3D software. Based on the orthogonal experiment, the influence of the distance between the two-stage support, the excavation ratio and the length of the two stages of retaining structure on the displacement of the support structure is studied through the range and variance analysis. Results show that the maximum displacement of the top of the two stages of retaining structure is highly sensitive to the influence of the distance between the two stages of retaining and the excavation ratio for the silty clay deep foundation pit with unsupported two-stage retaining structure. There are mutual influences between the displacements of the two stages of retaining structure, such as “overlay effect” and “drag effect”, but when the distance between the two stages of retaining is not less than 0.5 times the total excavation depth, the mutual influence is not significant. When the distance between the two stages of retaining is not less than 0.5 times the total excavation depth and the excavation ratio is 0.8 ~ 1.3, the maximum displacement at the top of the two stages of retaining structure is close and does not exceed the lower limit control value of the primary foundation pit in the specification, so it is in the most reasonable working condition.

收稿日期: 2021-12-22

基金项目: 福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(XJQ202014)

第一作者简介: 庄铃强(1995—), 男, 福建福清人, 硕士研究生, 研究方向: 岩土与地下工程。

通信作者: 吴能森(1964—), 男, 福建福清人, 教授, 博士, 研究方向: 岩土与地下工程。

**Keywords:** foundation excavation; unsupported retaining structure; influencing factors; support distance; excavation ratio

无支撑多级支护技术是近年来新出现的支护形式,依靠逐级卸载与各级支护分级受荷,并利用反压土的作用,可达到较强的支护能力且位移较小,从而取得良好的技术经济效果。该支护技术已在武汉梦时代广场基坑工程<sup>[1]</sup>、天津中铁国际城基坑工程<sup>[2]</sup>、上海虹桥综合交通枢纽基坑工程<sup>[3]</sup>等多地项目中成功运用。

对于该新型支护方式,已有不少学者对其机理展开了研究。任望东等<sup>[2,4]</sup>基于实际工程利用有限元软件对多级支护结构的工作机制与破坏机理进行了初步研究。郑刚等<sup>[5-7]</sup>通过室内试验与理论分析,将多级支护结构的破坏模式分为整体式、分离式、关联式 3 种。李松等<sup>[3]</sup>通过研究区分了整体式、关联式、分离式 3 种破坏形式对应的两桩间距范围。聂东清<sup>[8]</sup>采用室内模型试验与数值模拟对两排单排桩组成的多级悬臂支护破坏模式及规律进行研究总结,并分析了结构参数与土体强度对支护破坏模式的影响。程雪松<sup>[9]</sup>基于大变形物质点法,对多级悬臂支护基坑进行剪切滑裂面的开展与破坏规律进行研究。韩业龙<sup>[10]</sup>、刘杰等<sup>[11]</sup>基于实际工程与数值模型计算,分析了无支撑两级支护结构的两级支护间距、开挖比等参数对基坑稳定性影响,并对直斜排桩组合、两级支护间设置斜撑等结构形式进行了研究。上述研究结果表明:无支撑多级支护结构的稳定性和变形受多个因素的影响;增大各级支护结构的间距,对提高基坑稳定性、减小支护结构变形作用明显。但目前对其影响因素的研究多采用单变量分析,缺少考虑多因素间的交互影响。此外,通常深基坑的施工场地范围有限,各级支护结构的间距受限,单一增大间距不可行。因此全面综合分析包括各级支护结构间距在内的各因素的作用,必将有助于无支撑多级支护结构参数的设计优化,进而获得整体性、协调性与稳定性良好的设计方案,

具有重要的理论与实践意义。

本研究以无支撑两级基坑支护结构为研究对象,结合算例,首先运用 FLAC3D 软件建立数值模型,针对不同间距和开挖比的计算结果,分析两级支护最大位移的变化特点及相互关系,然后利用正交试验法具有处理多因素多水平综合影响的特点<sup>[12-14]</sup>,分析包括间距、开挖比、支护结构长度等影响因素的极差和方差,进一步明晰各影响因素的敏感度,并寻求两级支护结构的最合理工作状态,供工程设计及优化参考。

1 数值模型建立

图 1 为无支撑两级支护计算模型示意图,其两级支护结构长度分别为  $L_1$ 、 $L_2$ ,第一级支护结构长度  $L_1$  大于第二级支护结构长度  $L_2$ ,两级支护结构的间距为  $B$ ,基坑总开挖深度为  $H$ 。施工工况为先进行第一级支护结构施工,随后第一阶段开挖  $H_1$  至第二级支护结构顶面;再进行第二级支护结构施工,之后第二阶段开挖  $H_2$  至基坑底。

为简化计算,按照平面应变问题进行建模,并根据规范<sup>[15]</sup>确定模型宽度为 1 m,总长度为 100 m,其中基坑外长度为 45 m,高 40 m,两级支护结构均采用厚度为 1 m 的地连墙,土体为单一均质的粉质黏土,由 FLAC3D 软件建立的数值模型如图 2 所示,模型四周均为法向位移边界约束,底部设三向位移固定约束。

土体物理力学参数选自福建泉州某工程的粉质黏土,采用 CYsoil 本构模型<sup>[11,16,17]</sup>,各项性质指标见表 1。支护结构单元按软件内置衬砌(Liner)结构单元进行模拟<sup>[7,11]</sup>,赋予线弹性本构,弹性模量 30 GPa,重度 25 kN/m<sup>3</sup>,泊松比 0.2。支护结构单元通过法向和剪切耦合弹簧将嵌入的衬垫与区域连接起来并形成摩擦接触,结构单元的法向及切向刚度取周边土体最大等效刚度的 10 倍<sup>[18]</sup>。

表 1 粉质黏土物理力学参数  
Tab.1 Physical and mechanical parameters of the silty clay

| 重度 $\gamma$ /<br>(kN · m <sup>-3</sup> ) | 压缩模量 $E_{s1-2}$ /<br>MPa | 黏聚力<br>$c$ /kPa | 摩擦角<br>$\varphi$ /(°) | 泊松比<br>$\mu$ | 破坏比<br>$R_f$ | 参考割线刚度<br>$E_{50\text{rel}}$ /MPa | 参考切线刚度<br>$E_{\text{oedrel}}$ /MPa | 卸载弹性模量<br>$E_{\text{urrel}}$ /MPa |
|--|--------------------------|-----------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| 19.50                                    | 5.68                     | 34.20           | 15.37                 | 0.3          | 0.9          | 5.68                              | 5.68                               | 17.04                             |

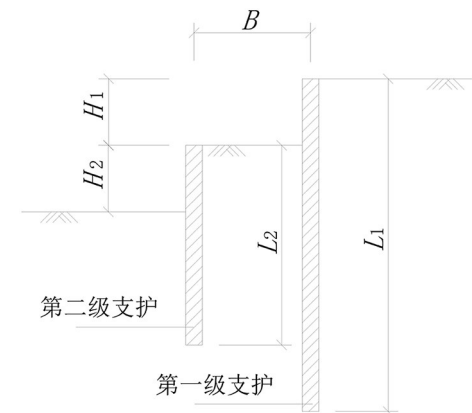


图 1 计算模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of calculation model

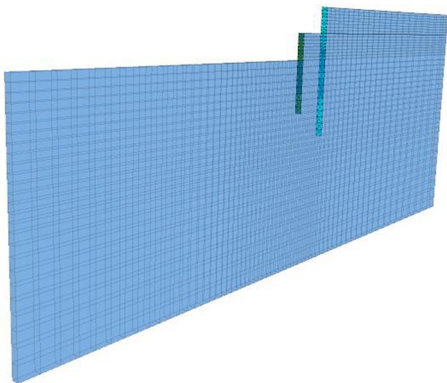


图 2 计算模型

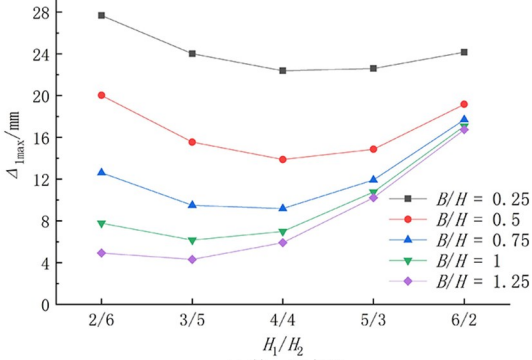
Fig.2 Calculation model

2 算例分析

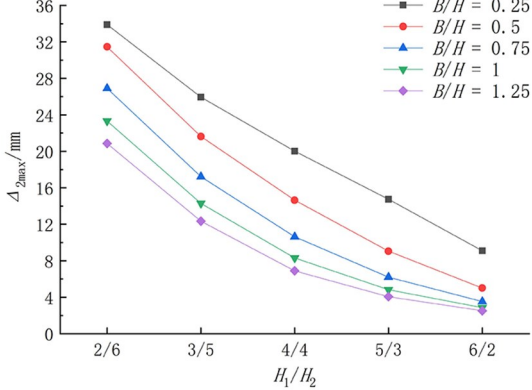
取  $L_1 = 20\text{ m}$ 、 $L_2 = 12\text{ m}$ 、 $H = 8\text{ m}$ ，设置不同的  $B/H$ 、 $H_1/H_2$  进行计算，可得到两级支护结构顶部最大水平位移及其比值与  $B/H$ 、 $H_1/H_2$  之间的关系，见图 3，其中图 3(a) 为第一级支护最大水平位移  $\Delta_{1\max}$  随  $H_1/H_2$  和  $B/H$  的变化情况，图 3(b) 为第二级支护最大水平位移  $\Delta_{2\max}$  随  $H_1/H_2$  和  $B/H$  的变化情况，图 3(c) 为  $\Delta_{1\max}$  与  $\Delta_{2\max}$  之比  $k$  随  $H_1/H_2$  和  $B/H$  的变化情况。

根据工程力学原理，独立的悬臂式支护结构，其顶端最大位移随基坑深度的加大呈高次幂函数增长。从图 3(a) 可见： $\Delta_{1\max}$  并未随  $H_1$  的增大而单调增大，而是随  $H_1/H_2$  的增大呈先降后升变化，说明第二级支护位移对第一级支护位移具有“牵引作用”，当  $H_1$  较小而  $H_2$  较大时，第一级支护本身位移较小、第二级支护位移较大，此时“牵引作用”显著，故第一级位移较大；随着  $H_1$  逐渐增大而

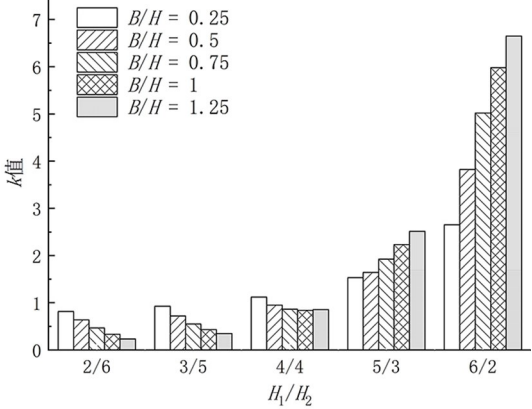
$H_2$  相应较小，“牵引作用”减弱，第一级支护本身位移的“主导作用”增强，“牵引作用”和“主导作用”的转换必然有一个拐点，故  $\Delta_{1\max}$  呈先降后升变化。同时可见， $\Delta_{1\max}$  随两级支护相对距离 ( $B/H$ ) 增大逐渐减小，且减幅随  $B/H$  增大快速地减小，当  $B/H \geq 0.5$  后，减幅随  $H_1/H_2$  的增大而减小，尤其当  $H_1/H_2 > 1.0$  后，减幅很微小，说明此时“牵引作用”很弱，第一级支护位移取决于“主导作用”，即  $\Delta_{1\max}$  主要受控于第一阶段开挖深度，此现象与刘杰等<sup>[9]</sup>的研究结果基本一致。



(a) 第一级支护



(b) 第二级支护



(c) 第三级支护

图 3 支护结构最大水平位移变化  
Fig.3 Maximum horizontal displacement change of the retaining structure

从图 3(b) 可见:  $\Delta_{2\max}$  随  $H_1/H_2$  增大而单调递减, 总体变化趋势与独立悬臂式支护结构基本一致, 但并未呈高次幂函数变化, 说明第一级支护位移对第二级支护位移具有“叠加作用”, 但其影响显然不如后者对前者的“牵引作用”显著。同时可见,  $\Delta_{2\max}$  同样随  $B/H$  的增大逐渐减小, 但减幅变化相对  $\Delta_{1\max}$  小得多, 且衰减曲线的幂次逐渐增大, 说明“叠加作用”随  $B/H$  增大逐渐减弱; 当  $B/H \geq 0.5$  后, 第二级支护的位移也主要取决于其本身作为悬臂式支护结构的变形。

从图 3(c) 可见: 当开挖比  $H_1/H_2 \leq 4/4$  时,  $\Delta_{1\max}$  与  $\Delta_{2\max}$  的比值  $k$  随  $B/H$  的增大而减小, 再次说明此时“牵引作用”随两级之间的相对距离的增大而减弱; 而当开挖比  $H_1/H_2 > 4/4$  后,  $k$  值随  $B/H$  的增大而明显增大, 也再次说明此时  $\Delta_{2\max}$  随“叠加作用”减弱而减小, 而  $\Delta_{1\max}$  随“主导作用”相对增强而增大, 此消彼长所致。显然,  $k$  值过大或过小均不合理,  $k$  值过大, 说明当  $\Delta_{1\max}$  达到临界值时,  $\Delta_{2\max}$  还很小, 第二级支护未充分发挥其作用, 反之亦然。根据规范<sup>[19]</sup>, 本模型基坑为一级基坑, 支护结构的顶部位移控制值 $[\Delta]$  为 16~24 mm。结合图 3(a)、3(b) 可知, 当  $B/H \geq 0.5$  时, 若  $H_1/H_2 = 3/5 \sim 5/3$ ,  $k$  值比较适中,  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$  不超过 24 mm (0.3%H), 尤其当  $H_1/H_2 = 1.0$  时,  $k$  值在 1.0 左右,  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$  均不超过 16 mm (0.2%H), 此时基坑开挖对周边环境的不利影响较小, 且两级支护结构的作用均得到较充分发挥。

3 正交试验设计及结果

基于算例分析中对不同  $B/H$ 、 $H_1/H_2$  的分析总结, 并参考其他学者的研究成果<sup>[9-11]</sup>, 确定基坑开挖至坑底时, 以  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$ 、 $k$  为分析指标, 以第一级支护长  $L_1$ 、第二级支护长  $L_2$ 、两级支护间距  $B$ 、两阶段开挖深度比  $H_1/H_2$  为影响因素, 在总开挖深度  $H$  为 8 m 时, 设定  $B$  的上限为 8 m, 将以上 4 个因素设置 5 个水平, 其中  $B$  在 (0.5 ~ 1.0) $H$  取水平值,  $H_1/H_2$  在 5/3 ~ 3/5 取水平值, 见表 2。为使分析结果更可靠设置一个空列为误差列, 为此采用 6 因素 5 水平的标准正交表  $L_{25}(5^6)$  进行试验方案的设计(表 3)<sup>[20]</sup>。

根据表 3 设计的 25 个算例, 分别进行 FLAC 3D 建模分析, 得到 25 个算例的  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$  及  $k$  的计算结果, 详见表 3。

| 表 2 正交试验因素及水平                                  |                    |                        |                        |                  |
|--|--------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| Tab.2 Orthogonal experiment factors and levels |                    |                        |                        |                  |
| 研究因素   | 间距<br>$B/\text{m}$ | 第一排桩<br>$L_1/\text{m}$ | 第二排桩<br>$L_2/\text{m}$ | 开挖比<br>$H_1/H_2$ |
| 水平 1   | 4                  | 16                     | 8                      | 5/3              |
| 水平 2   | 5                  | 18                     | 10                     | 4.5/3.5          |
| 水平 3   | 6                  | 20                     | 12                     | 4/4              |
| 水平 4   | 7                  | 22                     | 14                     | 3.5/4.5          |
| 水平 5   | 8                  | 24                     | 16                     | 3/5              |

表 3 正交试验设计方案及模拟结果  
Tab.3 Orthogonal schemes and simulated results

| 试验编号 | 研究因素 |       |       |           |    | 分析指标                       |                            |      |
|------|------|-------|-------|-----------|----|----------------------------|----------------------------|------|
|      | $B$  | $L_1$ | $L_2$ | $H_1/H_2$ | 空列 | $\Delta_{1\max}/\text{mm}$ | $\Delta_{2\max}/\text{mm}$ | $k$  |
| 1    | 1    | 1     | 1     | 1         | 1  | 17.16                      | 12.31                      | 1.39 |
| 2    | 1    | 2     | 3     | 4         | 5  | 14.10                      | 17.09                      | 0.83 |
| 3    | 1    | 3     | 5     | 2         | 4  | 13.38                      | 10.47                      | 1.28 |
| 4    | 1    | 4     | 2     | 5         | 3  | 16.50                      | 25.55                      | 0.65 |
| 5    | 1    | 5     | 4     | 3         | 2  | 12.86                      | 13.26                      | 0.97 |
| 6    | 2    | 1     | 5     | 4         | 3  | 9.85                       | 12.18                      | 0.81 |
| 7    | 2    | 2     | 2     | 2         | 2  | 14.17                      | 10.07                      | 1.41 |
| 8    | 2    | 3     | 4     | 5         | 1  | 10.85                      | 16.68                      | 0.65 |
| 9    | 2    | 4     | 1     | 3         | 5  | 12.26                      | 18.93                      | 0.65 |



| 试验编号 | 研究因素     |                       |                       |   |    | 分析指标                  |                       |          |
|------|----------|-----------------------|-----------------------|---|----|-----------------------|-----------------------|----------|
|      | <i>B</i> | <i>L</i> <sub>1</sub> | <i>L</i> <sub>2</sub> | <i>H</i> <sub>1</sub> / <i>H</i> <sub>2</sub> | 空列 | $\Delta_{1\max}$ / mm | $\Delta_{2\max}$ / mm | <i>k</i> |
|      |          |                       |                       |   |    |                       |                       |          |
| 10   | 2        | 5                     | 3                     | 1   | 4  | 12.80                 | 7.59                  | 1.69     |
| 11   | 3        | 1                     | 4                     | 2   | 5  | 10.82                 | 7.29                  | 1.48     |
| 12   | 3        | 2                     | 1                     | 5   | 4  | 11.06                 | 28.84                 | 0.38     |
| 13   | 3        | 3                     | 3                     | 3   | 3  | 9.21                  | 10.69                 | 0.86     |
| 14   | 3        | 4                     | 5                     | 1   | 2  | 12.39                 | 6.38                  | 1.94     |
| 15   | 3        | 5                     | 2                     | 4   | 1  | 9.26                  | 15.56                 | 0.60     |
| 16   | 4        | 1                     | 3                     | 5   | 2  | 7.34                  | 14.64                 | 0.50     |
| 17   | 4        | 2                     | 5                     | 3   | 1  | 8.33                  | 8.40                  | 0.99     |
| 18   | 4        | 3                     | 2                     | 1   | 5  | 10.89                 | 5.87                  | 1.86     |
| 19   | 4        | 4                     | 4                     | 4   | 4  | 7.26                  | 10.84                 | 0.67     |
| 20   | 4        | 5                     | 1                     | 2   | 3  | 8.97                  | 10.08                 | 0.89     |
| 21   | 5        | 1                     | 2                     | 3   | 4  | 7.09                  | 9.08                  | 0.78     |
| 22   | 5        | 2                     | 4                     | 1   | 3  | 11.45                 | 4.71                  | 2.43     |
| 23   | 5        | 3                     | 1                     | 4   | 2  | 6.39                  | 16.43                 | 0.39     |
| 24   | 5        | 4                     | 3                     | 2   | 1  | 8.53                  | 6.41                  | 1.33     |
| 25   | 5        | 5                     | 5                     | 5   | 5  | 5.92                  | 12.02                 | 0.49     |

4 正交试验分析

4.1 极差分析

极差分析是通过计算各因素对分析指标产生的极差 *R* 大小,进而确定各因素对分析指标的影响程度, *R* 值越大影响程度也相对越大。上述 4 个因素对 3 个分析指标在各水平 *i* 的计算结果平均值 *m<sub>i</sub>* 的极差 *R* 见图 4,可见  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$ 、*k* 三个指标对应的各因素影响程度由大到小的排序分别为:*B* > *H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub> > *L*<sub>1</sub> > *L*<sub>2</sub>、*H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub> > *L*<sub>2</sub> > *B* > *L*<sub>1</sub>、*H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub> > *L*<sub>2</sub> > *L*<sub>1</sub> > *B*、*H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub> 对于 3 个分析指标的影响都属于相对主要因素,其中  $\Delta_{1\max}$  的最大影响因素是间距 *B*,其次是开挖比 *H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub>,而  $\Delta_{2\max}$ 、*k* 的最大影响因素均为开挖比 *H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub>,为此绘制  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$  的平均值随 *H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub> 各水平的变化情况,见图 5。

由图 5 可见,开挖比 *H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub> 为 5/3 ~ 3/5 时,  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$  均值随 *H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub> 的变化趋势相反,  $\Delta_{1\max}$  均值基本上随 *H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub> 减小而减小,变化幅度不太显著,而  $\Delta_{2\max}$  均值随 *H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub> 减小而增大,变化幅度比较显著;  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$  均值在 *H*<sub>1</sub>/*H*<sub>2</sub> 为 4.5/3.5 ~

3.5/4.5 时比较接近,且位移值适中,此时基坑两级支护结构处于最合理的工作状态。

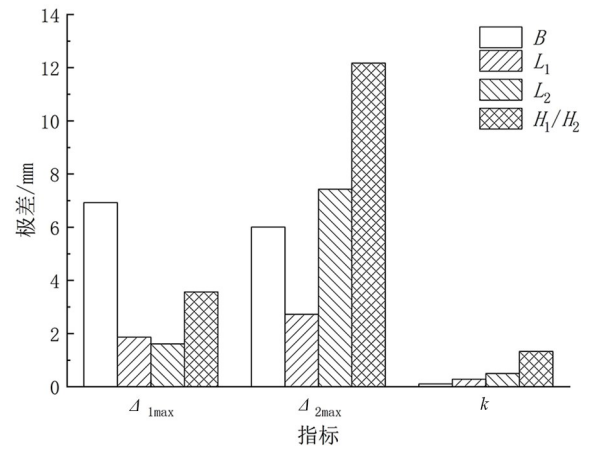


图 4 各因素极差  
Fig.4 Extreme difference of each factor

4.2 方差分析

为进一步检验各因素对分析指标影响的显著性水平,采用 SPASS 软件对表 3 试验结果进行方差分析。方差分析基于各总体均为正态变量且方差相等的假设,能够弥补各因素纲量的不同与各

水平取值范围不同的影响,通过计算假设条件下各正态总体均值检验值  $F$ ,来判断各因素对分析指标影响的显著性。检验值  $F$  可以反映其影响的显著性水平, $F$  值越大表示影响的显著性水平越高,也表示该因素对指标影响的敏感度越大。 $F$  值的计算结果见表 5。

由表 5 显见,  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$ 、 $k$  三个指标对应的各因素敏感性由大到小的排序分别为: $B > H_1/H_2 > L_1 > L_2$ 、 $H_1/H_2 > L_2 > B > L_1$ 、 $H_1/H_2 > L_2 > L_1 > B$ ,该结果与上述极差分析的结果完全一致。

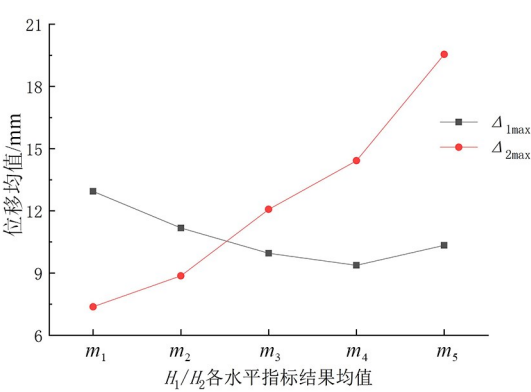


图 5  $H_1/H_2$ 各水平下的位移均值变化

Fig.5 Changes in the mean value of displacement at each level of  $H_1/H_2$  factors

表 5 方差分析结果  
Tab.5 Variance analysis results

| 因素        | $\Delta_{1\max}$ |         |     | $\Delta_{2\max}$ |        |     | $k$   |        |     |
|-----------|------------------|---------|-----|------------------|--------|-----|-------|--------|-----|
|           | 均方差              | $F$     | 显著性 | 均方差              | $F$    | 显著性 | 均方差   | $F$    | 显著性 |
| B         | 0.388            | 131.574 | *** | 0.331            | 11.63  | *** | 0.007 | 0.445  | 不显著 |
| $L_1$     | 0.033            | 11.188  | *** | 0.073            | 2.558  | 不显著 | 0.055 | 3.373  | *   |
| $L_2$     | 0.02             | 6.803   | **  | 0.447            | 15.733 | *** | 0.168 | 10.231 | *** |
| $H_1/H_2$ | 0.096            | 32.587  | *** | 1.163            | 40.904 | *** | 1.462 | 89.244 | *** |

注: \*、\*\*、\*\*\*、\*\*\*\* 分别表示 10%、5%、1%、0.1% 的条件下显著,“\*”越多显著性越高。

5 结语

本研究以无支撑两级基坑支护结构为研究对象,运用 FLAC3D 软件建立数值模型,并结合正交试验及极差、方差分析,探讨了两级支护间距、开挖比以及两级支护结构长度等因素对支护结构位移的影响,得出以下结论。

1) 采用无支撑两级支护结构的粉质黏土深基坑,两级支护结构的顶部最大位移  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$  及其比值  $k$  对间距  $B$ 、开挖比  $H_1/H_2$ 、第一级支护结构长度  $L_1$ 、第二级支护结构长度  $L_2$  的影响敏感度由大到小的排序分别为: $B > H_1/H_2 > L_1 > L_2$ 、 $H_1/H_2 > L_2 > B > L_1$ 、 $H_1/H_2 > L_2 > L_1 > B$ 。

2) 无支撑两级支护结构的位移存在相互影响,第一级支护结构位移对第二级支护结构位移具有“叠加作用”,第二级支护结构位移对第一级支护结构位移具有“牵引作用”,总体上“牵引作

用”较“叠加作用”要显著些,但当两级支护间距  $B$  达到总开挖深度  $H$  的 0.5 倍以上时,“牵引作用”和“叠加作用”均不显著。

3) 当  $B/H \geq 0.5$ ,且  $H_1/H_2 = 3/5 \sim 5/3$  时,  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$  均不超过规范的一级基坑上限控制值  $0.3\%H$ ;当  $H_1/H_2 = 1.0$  左右时,  $\Delta_{1\max}$ 、 $\Delta_{2\max}$  均不超过规范的一级基坑下限控制值  $0.2\%H$ 。为此建议对粉质黏土深基坑,应使两级支护的间距  $B$  不小于 0.5 倍总开挖深度  $H$ ,并使基坑开挖比  $H_1/H_2$  取  $0.8 \sim 1.3$  为宜。

无支撑多级支护结构在实际基坑工程中运用时,不仅会面临施工场地范围有限的情况,同时不可避免会受基坑周边各类复杂建筑及交通的影响,本研究在建模过程中尚未将地下水的影响考虑进去。后续研究会深入就基坑外相关静动荷载及地下水的流固耦合情况对支护结构的影响进行分析,进一步寻求更为符合实际情况的支护设计方案。

## 参考文献:

- [1] 田野,宋志,张松波,等.桩顶设置斜撑在深基坑多级支护中的应用[J].地下空间与工程学报,2021,17(S1):304-311.
- [2] 任望东,李春光,田建平,等.软弱土中大面积深基坑工程快速支护施工技术[J].施工技术,2013,42(1):35-39.
- [3] 李松,马郎,郭运,等.双排桩与单排桩组合多级支护结构在深大基坑中的应用[J].长江科学院院报,2018,35(5):103-109.
- [4] 任望东,张同兴,张大明,等.深基坑多级支护破坏模式及稳定性参数分析[J].岩土工程学报,2013,35(S2):919-922.
- [5] 郑刚,程雪松,刁钰.无支撑多级支护结构稳定性与破坏机理分析[J].天津大学学报,2013,46(4):304-314.
- [6] 郑刚,郭一斌,聂东清,等.大面积基坑多级支护理论与工程应用实践[J].岩土力学,2014,35(S2):290-298.
- [7] 郑刚,聂东清,刁钰,等.基坑多级支护破坏模式研究[J].岩土力学,2017,38(S1):313-322.
- [8] 聂东清.基坑梯级支护相互作用机理及稳定性研究[D].天津:天津大学,2017.
- [9] 程雪松.地下工程中若干失稳破坏问题的机理和冗余度研究[D].天津:天津大学,2014.
- [10] 韩业龙.软土地区大面积深基坑无支撑支护技术研究[D].天津:天津大学,2014.
- [11] 刘杰,郑刚,聂东清.天津软土地区深基坑多级支护结构变形的参数分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2018,31(1):47-54.
- [12] 吴波,张子仪,黄惟.基于正交试验砂土地层基坑稳定性参数敏感性分析[J].中国安全生产科学技术,2021,17(4):128-134.
- [13] 张晋勋,赵刚,张雷,等.HSS模型在盾构模拟中的应用及参数敏感性研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(S2):618-625.
- [14] 刘旭,徐金明,刘绍峰.基于正交试验的围护结构变形影响因素[J].上海大学学报(自然科学版),2019,25(6):1003-1012.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [16] DO N A, DIAS D, ORESTE P, et al. 3d modelling for mechanized tunnelling in soft ground-influence of the constitutive model[J]. American Journal of Applied Sciences, 2013, 10(8): 863-875.
- [17] 胡偲,徐鼎平,江权,等.基于不同模型的基坑开挖过程力学响应研究[J].湖北工业大学学报,2020,35(2):78-83.
- [18] BOARD M. FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) Version 2.20[R]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1989.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑基坑工程监测技术标准:GB 50497—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [20] 王燕,蒋国平,张飞,等.于正交试验的基坑抗隆起稳定性影响因素灰色关联分析[J].青岛理工大学学报,2021,42(2):78-85.

(责任编辑:方素华)