

# 地铁车站基坑“先浅后深”施工的影响分析

王成<sup>1</sup>, 王广涛<sup>1</sup>, 衣书磊<sup>1</sup>, 曲艺<sup>1</sup>, 臧其军<sup>1</sup>, 宋大伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中建八局浙江建设有限公司, 浙江 杭州

<sup>2</sup>江苏先行建设有限公司, 江苏 常州

收稿日期: 2023年1月15日; 录用日期: 2023年2月5日; 发布日期: 2023年2月17日

## 摘要

以地铁六号线某车站端头井基坑(B2区)为例, 该B2基坑采取“先浅后深”施工工序, 存在一定的施工风险。为此, 通过有限元软件建立二维模型模拟基坑施工过程, 获得了基坑施工过程中附属结构(B3区)的位移、应变、应力情况, 进一步评估附属结构的安全性。研究表明, 车站附属结构在施工过程中最大水平和竖向发生在靠近东端头井的位置, 分别为3.01 mm和7.20 mm, 越远离端头井观测点的位移越小; 施工过程中附属结构的最大倾斜率为0.046%, 小于规范规定的0.2%限制; 深基坑施工后附属结构底板最大拉应力约为0.27 MPa, 小于混凝土的设计抗拉强度, 满足抗裂要求。建议: 为了确保底板不开裂, 必须在浇筑底板期间, 停止邻近深基坑开挖, 即只有B3整体结构达到设计强度后才能进行深基坑施工。

## 关键词

地铁车站, 附属结构, “先浅后深”开挖, 深基坑, 有限元法

# Analysis of the Influence of the Excavation of the Working Shaft on Adjacent Structure by Shallow-First-and-Then-Deep Sequence

Cheng Wang<sup>1</sup>, Guangtao Wang<sup>1</sup>, Shulei Yi<sup>1</sup>, Yi Qu<sup>1</sup>, Qijun Zang<sup>1</sup>, Dawei Song<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Zhejiang Construction Co. Ltd of China Construction Eighth Engineering Division Co. Ltd., Hangzhou Zhejiang

<sup>2</sup>Jiangsu Xianxing Construction Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

Received: Jan. 15<sup>th</sup>, 2023; accepted: Feb. 5<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 17<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Taking the excavation of the working shaft of a station of the Metro Line No.6 for the case study,

文章引用: 王成, 王广涛, 衣书磊, 曲艺, 臧其军, 宋大伟. 地铁车站基坑“先浅后深”施工的影响分析[J]. 土木工程, 2023, 12(2): 92-99. DOI: 10.12677/hjce.2023.122011

the construction of the shaft adopts a shallow-first-and-then-deep sequence, *i.e.* first constructing the auxiliary structure (AS), the structure buried shallowly and then the working shaft, the one buried deep, but this sequence risks damaging the AS. Therefore, a two-dimension model is established by finite element method to simulate the excavation process, and the displacement, strain and stress of the AS due to the excavation are then obtained to evaluate the safety of the AS. The result shows that the maximum horizontal and vertical displacement of the AS during construction is 3.01mm and 7.20mm respectively, all located near the shaft. The farther away from the shaft, the smaller the displacements are. The maximum inclination rate of AS during construction is 0.046%, which is much less than 0.2%, the allowance specified in the National Building Code (GB50007-2011); When the shaft is completed, the maximum tensile stress of the mat of the AS is about 0.27 MPa, which is less than the concrete design tensile strength and meets the requirements against cracking. It is hence suggested that the excavation of the shaft only be carried out after the completion of AS lest at the early phase after placement the concrete tensile strength should be lower than the stress induced by excavation, and lead to cracking of the components of the AS.

## Keywords

Subway Station, Ancillary Structure, Shallow-First-and-Then-Deep Sequence of Excavation, Deep Excavation, Finite Element Method

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着城市化进程的加速，城市拥堵现象愈加严重。为解决这一问题，各大城市大力修建城市轨道交通——地铁。地铁车站基坑也朝着更大、更深的趋势发展。地铁车站深基坑施工往往伴随着一定的施工风险，因此，地铁车站深基坑施工问题已日益成为业界研究的热点之一。

针对该问题，越来越多的学者通过现场监测、室内试验、有限元分析等手段开展一系列的研究，其中有限元数值模拟方法以其灵活、全面和经济等优点，成为工程技术人员和科研人员的首选方法。张志铨等[1]以某地铁车站深基坑工程为研究对象，通过 PLAXIS 3D 有限元软件建立三维模型，模拟了基坑施工全过程，获得了基坑施工过程中支护结构受力变形规律，并深入分析了基坑施工对周边环境变形的影响。郭伟[2]基于某地铁深基坑过程背景，针对工程特点和难点，提出了基坑支护结构，他结合已有类似工程，提出了支护结构施工过程中的若干关键技术，以确保基坑施工的安全性。霍润科等[3]通过现场监测获得了某地铁车站深基坑施工过程中基坑本身及支护结构的受力及变形，并通过 ABAQUS 数值软件模拟基坑施工全过程；他对比分析了现场监测结果与数值模拟结果，并深入探讨了基坑施工过程中基坑的稳定性，并针对薄弱位置制定出有效的处理措施。周勇等[4]以兰州地铁车站深基坑为背景，现场监测了基坑施工过程中降水对邻近地下管道变形的影响。陈永才等[5]利用数值手段与现场监测相结合的方法，分析了基坑降水对周边环境的影响，并提出了有效的处理措施。

江苏常州地铁六号线某车站基坑因施工工期要求，采取“先浅后深”施工工序，这是和常规的“先深后浅”原则相逆的，存在一定的施工风险，需要在施工前对其影响进行计算分析，并在此基础上提出因应对策，以规避风险，确保安全。为此，本文采用有限元软件建立三维模型，对基坑施工全过程进行模拟，计算获得了基坑施工过程中附属结构的位移、应变、应力的变化情况；在此基础上，对照国家现

行规范，文章最后评估了附属结构的安全性。

## 2. 工程概况及数值模型建立

### 2.1. 工程概况

地铁六号线东端头井(B2区)和附属结构(B3)区基坑开挖深度分别为 28.9 m 和 16.2 m。此两基坑开挖前，地铁车站六号线西段结构和北侧枢纽结构已竣工，如图 1 所示。本工程附属结构(B3)为浅基础结构，紧贴东端头井(B2)，两者基坑深度差约 12.8 m。基坑剖面如图 2 所示。

原设计此相邻基坑的施工顺序为先 B2 后 B3。对于相邻基坑的施工，为了减小基坑施工对邻近建筑物或构筑物的不利影响，要求按“先深后浅”顺序开挖相邻基坑，此可见于现行的基坑工程规范(如上海市规范《基坑工程技术标准》(DQ/TJ08-61-2010))之规定。“先浅后深”施工顺序为常规施工顺序。如果逆常规施工顺序，即“先浅后深”施工顺序，需要分析“先浅后深”施工时，浅基坑所在区域结构的不利影响，评估其风险大小。

### 2.2. 数值模型

根据现场勘察资料，建立尺寸为 233.2 m (宽) × 100 m (高)二维有限元模型，如图 3 所示。模型的边界条件：模型顶部为自由边界，模型两边为法向约束边界，模型底部为固定约束边界。在地下工程研究中，为了得到对位移的可靠预测，必须适当考虑小应变刚度和该刚度对于应变幅度的非线性依赖性。Benz [6] [7]提出的 HS-Small 模型，具有可考虑小应变条件下土体初始弹性模量以及开挖回弹模量的优点，可有效地解决开挖引起的回弹过大问题，本模型土体本构为小应变硬化土模型，根据岩土勘察报告，现场土层参数取值见表 1。用实体单元模拟地连墙结构，用直线梁单元模拟内支撑梁。

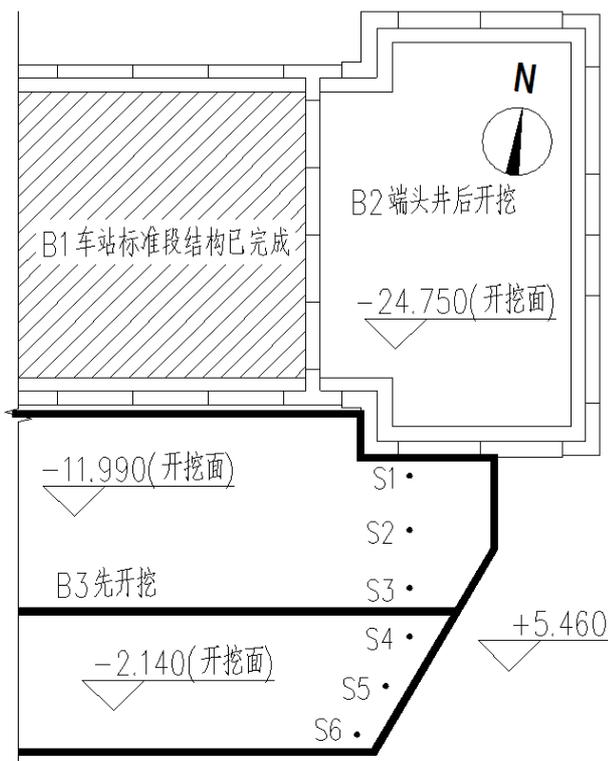


Figure 1. Layout of foundation pit and monitoring points  
图 1. 基坑平面及测点示意图

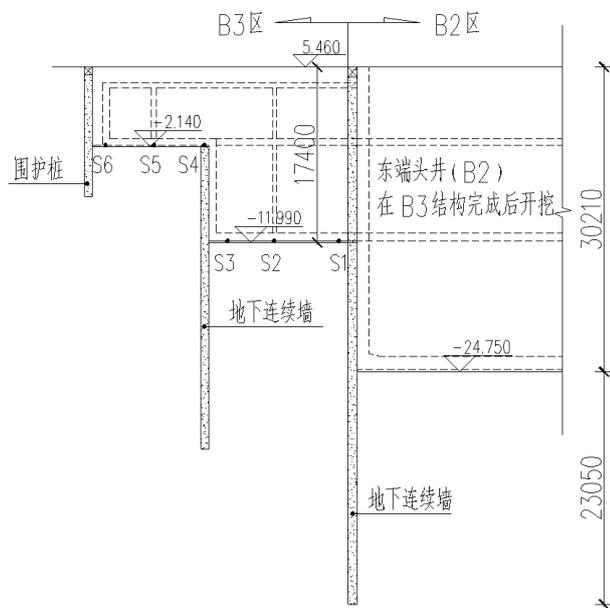


Figure 2. Section and measuring point diagram of adjacent foundation pit (unit: mm)

图 2. 相邻基坑剖面及测点图(单位: mm)

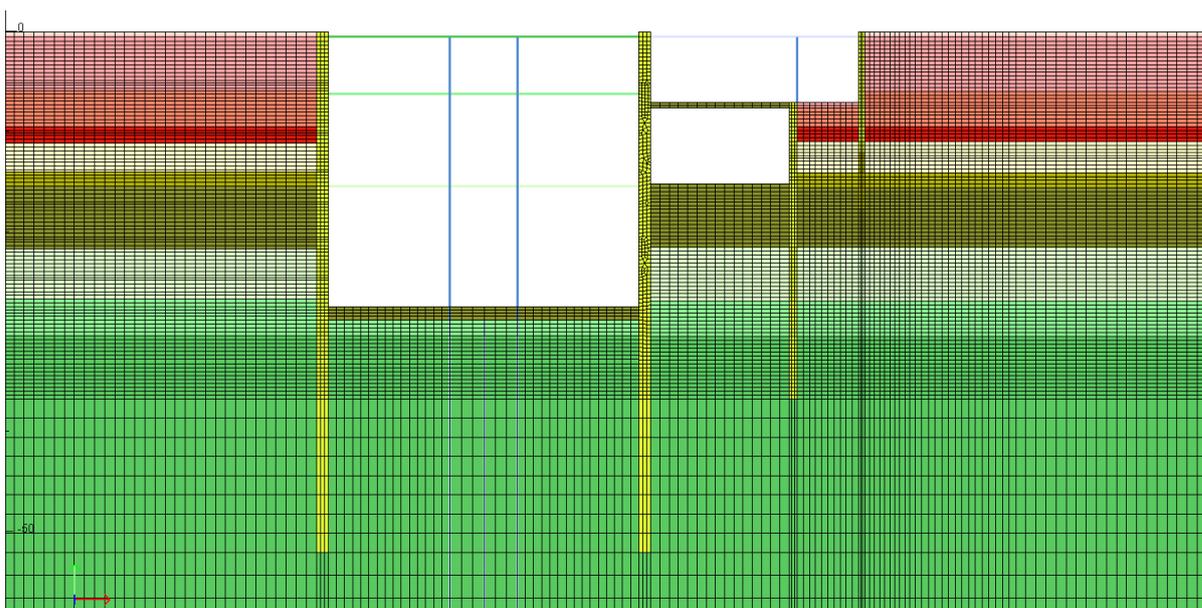


Figure 3. 2D finite element model

图 3. 二维有限元模型

Table 1. Physical and mechanical parameters of soil layers

表 1. 土层物理力学参数

层号	土层名称	天然 重度 kN/m <sup>3</sup>	天然 含水量 %	初始 孔隙比 -	渗透系数		内摩擦角 °	粘聚力 kPa	压缩模量 Es <sub>0.1-0.2</sub> MPa	回弹指数 -
					垂直 cm/s	水平 Cm/s				
③ <sub>1</sub>	黏土	19.7	28.1	0.79	4.2 × 10 <sup>-8</sup>	5.5 × 10 <sup>-8</sup>	47.1	16.4	7.5	-

Continued

④ <sub>1</sub>	粉质黏土夹粉土	19.1	30.1	0.843	$7.2 \times 10^{-6}$	$8.4 \times 10^{-6}$	21.2	17.1	5.65	0.040
④ <sub>2</sub>	粉土夹粉质黏土	19.0	31.1	0.863	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-5}$	14.5	23.2	5.57	0.035
⑤ <sub>1</sub>	黏质粉土	19.0	30.7	0.860	$2.4 \times 10^{-5}$	$3.0 \times 10^{-5}$	13.0	28.2	7.65	0.022
⑥ <sub>2</sub>	粉质黏土	19.5	26.4	0.767	$2.4 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-7}$	51.8	16.4	8.51	0.021
⑥ <sub>3</sub>	黏土	20.0	25.2	0.724	$2.5 \times 10^{-8}$	$3.1 \times 10^{-8}$	63.8	18.9	9.45	0.021
⑥ <sub>4</sub>	粉质黏土	19.3	28.9	0.81	$5.6 \times 10^{-7}$	$6.7 \times 10^{-7}$	36.3	17.0	6.93	0.030
⑦ <sub>1</sub>	粉质黏土	19.0	32.6	0.891	-	-	-	-	5.44	
⑦ <sub>2</sub>	粉质黏土	19.3	29.1	0.819	$1.0 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	35.8	16.1	7.13	0.024
⑧ <sub>1</sub>	粉质黏土夹粉土	19.1	30.6	0.854	$1.3 \times 10^{-5}$	$1.7 \times 10^{-5}$	18.3	17.1	5.57	0.021
⑧ <sub>2</sub>	粉砂夹粉土	18.9	30.5	0.857	$2.2 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^{-4}$	9.1	25.5	8.87	0.016
⑧ <sub>21</sub>	粉土夹粉质黏土	18.9	30.5	0.858	$6.7 \times 10^{-5}$	$8.0 \times 10^{-5}$	9.5	27.0	7.80	0.021
⑨ <sub>1</sub>	粉质黏土	18.9	31.9	0.889	$1.3 \times 10^{-7}$	$1.6 \times 10^{-7}$	18.2	11.4	4.57	0.028
⑨ <sub>2</sub>	粉质黏土	19.3	28.6	0.805	$6.2 \times 10^{-8}$	$7.2 \times 10^{-8}$	37.0	16.3	6.86	0.025
⑨ <sub>21</sub>	粉砂夹粉土	1.88	30.1	0.855	-	-	-	-	8.48	
⑨ <sub>22</sub>	粉质黏土	1.90	32.0	0.884	$1.3 \times 10^{-8}$	$1.5 \times 10^{-8}$	23.5	17.1	4.76	0.026
⑨ <sub>3</sub>	粉质黏土	1.94	27.6	0.784	$3.6 \times 10^{-8}$	$3.7 \times 10^{-8}$	43.6	17.1	8.32	
⑨ <sub>6</sub>	黏土	20.1	24.9	0.711	$3.9 \times 10^{-8}$	$4.9 \times 10^{-8}$	65.9	17.5	9.79	

### 3. “先浅后深”施工对附属结构的影响分析

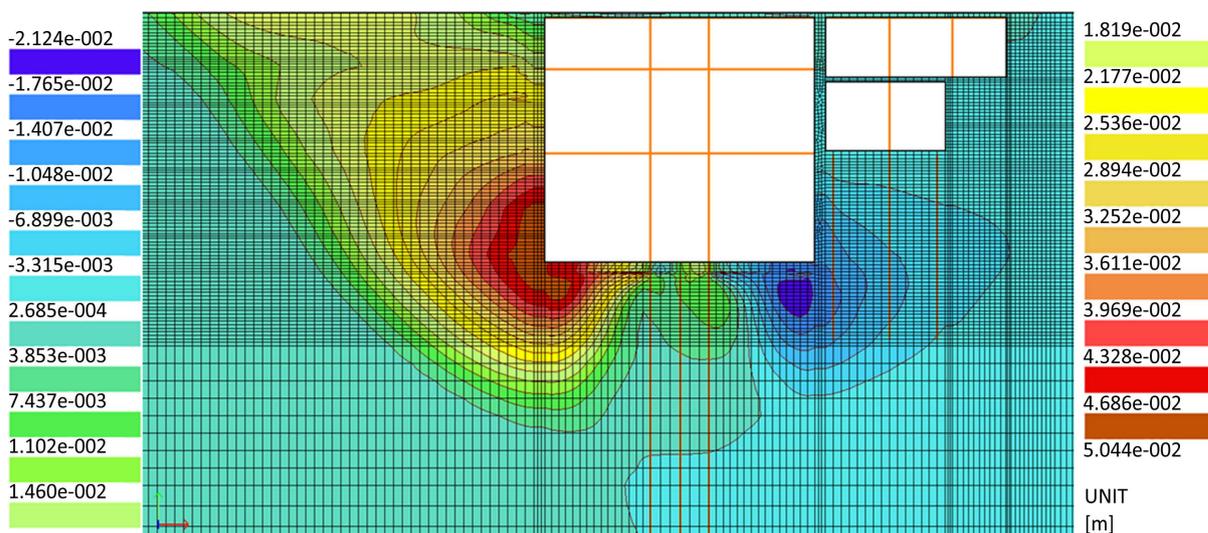
“先浅后深”施工时,各种技术问题的根源在于,深基坑开挖时,浅基坑土体会受到扰动,出现土体位移,包括土体出现水平侧移和垂直位移(沉降)。由于浅基坑土体各点位移不相同,于是导致开挖面出现水平开裂和不均匀沉降。当位移变化未稳定时开始浇筑浅基坑底板混凝土,由于新浇混凝土强度不足(初期甚至无抗拉强度)则会出现底板开裂。在底板混凝土达到设计强度后开挖深基坑,当不均匀沉降过大时,底板混凝土也可能因为不均匀沉降导致的拉应力过大,导致底板开裂,这种情况,对于浅基础结构尤其突出。针对本工程先浅后深施工工况,且为了阐明深基坑开挖对附属结构的不利影响,选取了若干观测点进行分析。测点位置如图1和图2所示。

#### 3.1. 基坑结构开挖面的水平位移

图4为附属结构完成后,深基坑开挖及其结构完成时的水平位移云图。根据数值模拟结果,汇总了观测点S1~S6的水平位移值,见表2。从水平位移云图可以看出,由于东端头井(B2)的基坑深度达到28.9m,因而水平变形主要集中在端头井两端基坑。而附属结构由于基坑深度较浅,其整体水平位移较端头井的水平位移小很多。附属结构的水平位移峰值为3.01mm,发生在最靠近东端头井(B2)的观测点S1处。随着观测点远离端头井,观测点S2~S6的水平位移总体呈减小的趋势。

#### 3.2. 基坑结构开挖面的垂直位移

图5为附属结构完成后,深基坑开挖及其结构完成时的垂直位移云图。根据数值模拟结果,汇总了观测点S1~S6的垂直位移值,见表3。从垂直位移云图可以看出,附属结构的垂直位移主要发生在靠近端头井的观测点S1~S3范围,其中最大垂直位移发生在观测点S1处,达到7.20mm。同样,随着观测点远离端头井,观测点的垂直位移总体呈减小的趋势。

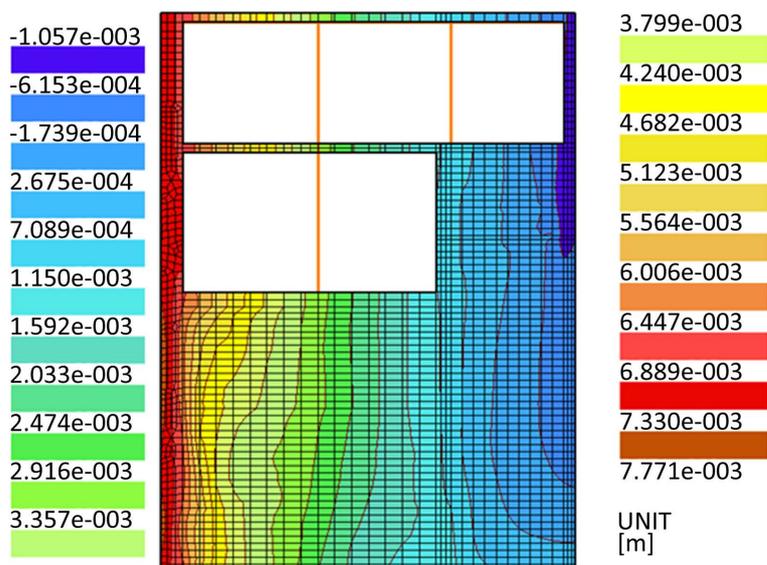


**Figure 4.** Cloud diagram of horizontal displacement  
**图 4.** 水平位移云图

**Table 2.** Base plate horizontal displacement of auxiliary structure  
**表 2.** 附属结构底板水平位移表

观测点	S1	S2	S3	S4	S5	S6
水平位移/mm	-3.01	-1.98	-1.01	-0.36	-0.42	-0.46

注：负值表示向左侧深基坑方向变形。



**Figure 5.** Vertical displacement of auxiliary structure  
**图 5.** 附属结构垂直位移云图

**Table 3.** Base plate vertical displacement of auxiliary structure  
**表 3.** 附属结构底板垂直位移表

观测点	S1	S2	S3	S4	S5	S6
垂直位移/mm	7.20	3.10	1.41	0.85	0.21	-0.55

### 3.3. 附属结构底板平面的不均匀沉降

针对附属结构完成后,深基坑施工各工况下,附属结构的沉降情况和倾斜率进行了分析(其中观测点 1、2 间距 6.4 m,观测点 2、3 间距 5.5 m)。图 6、图 7 分别给出了附属结构底板各点在不同工况下的沉降值和对应倾斜率。从图 6 可以看出,在深基坑施工过程中,观测点 S1~S3 的沉降呈先增大后减小趋势,观测点 S1、S2、S3 在深基坑施工过程中最大沉降分别为 7.20 mm、4.29 mm、1.89 mm。另一方面,随着深基坑的逐步施工,观测点 S1~S2、观测点 S2~S3 的倾斜率逐渐增大并趋于稳定。由于靠近深基坑的原因,观测点 S1~S2 倾斜率总体更大,附属结构底板的最大倾斜率为 0.046%。

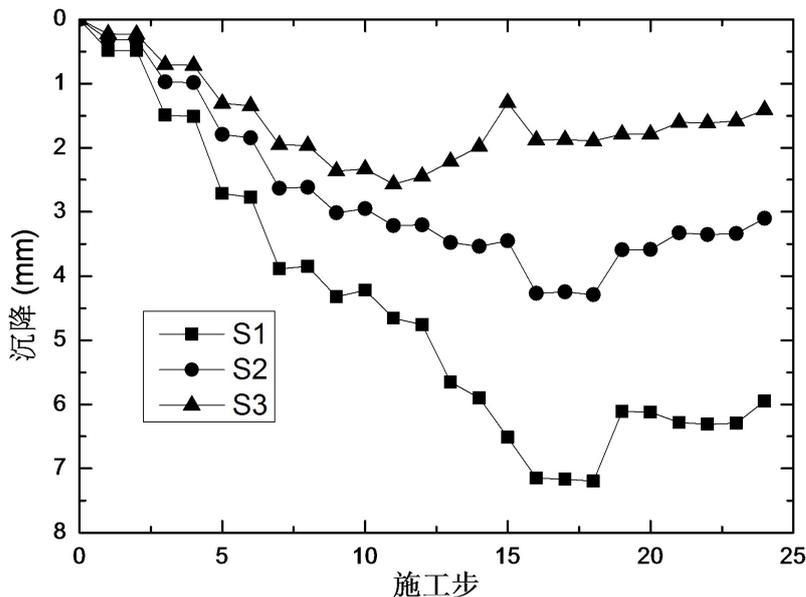


Figure 6. Vertical displacement curve of auxiliary structure base plate  
图 6. 附属结构底板垂直位移曲线

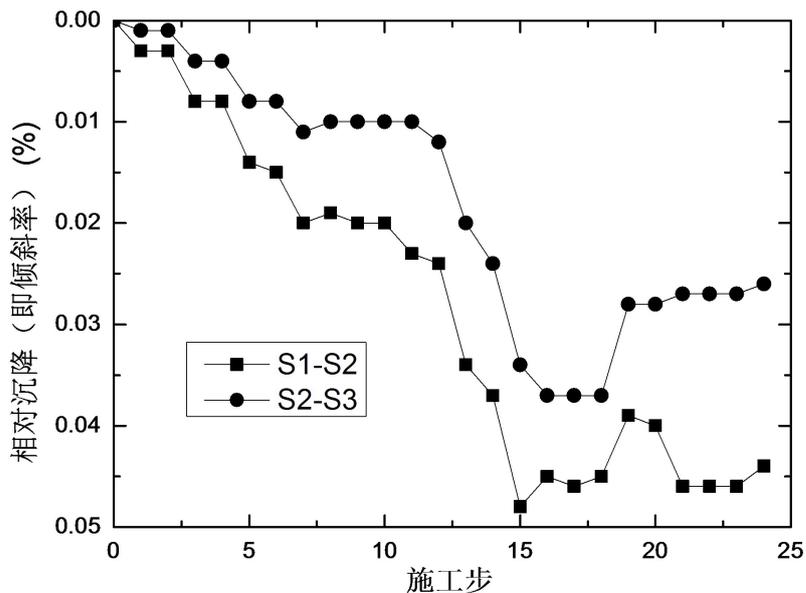


Figure 7. Relative settlement curve of auxiliary structure base plate  
图 7. 附属结构底板相对沉降曲线

### 3.4. 基坑结构底板的应力应变

深基坑完成后, 附属结构底板最大水平方向最大压应力约 1.76 MPa、最大拉应力约为 0.27 MPa。附属结构底板最大水平方向压应变约  $81.7 \times 10^{-6}$ , 最大水平方向拉应变约  $6.8 \times 10^{-6}$ 。本工程附属结构采用天然地基浅基础, 基础位于 4-2 层粉土夹粉质黏土和 5-1 层黏质粉土, 均属中等压缩性土。上述计算结果表明, 浅基坑开挖后, 深基坑施工将导致附属结构浅基坑土体发生位移, 包括水平位移和垂直位移两个方向分量。其中垂直位移导致不均匀沉降, 最大相对沉降(即倾斜率)为 0.046%。底板最大拉应力 0.27 MPa。根据国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB50007-2011), 位于中等压缩性土上的框架结构不均匀沉降必须满足相对沉降不大于 0.2%。计算表明本工程附属结构底板的不均匀沉降满足规范要求。

对于混凝土抗裂要求来说, C30 混凝土的设计抗拉强度为 1.43 MPa。本计算得到的底板最大拉应力为 0.27 MPa, 满足抗裂要求。但是, 浇筑底板期间, 混凝土初期强度(如 3 天以内强度)是小于 0.27 MPa 的。为了确保底板不开裂, 必须在此期间, 停止邻近深基坑开挖, 即只有 B3 整体结构达到设计强度后才能进行深基坑施工。

## 4. 结论

本文以某“先浅后深”施工的地铁车站基坑为研究对象, 通过有限元软件建立三维数值模型, 分析了基坑施工过程中附属结构的受力变形规律, 并且评估了基坑施工过程中附属结构的安全性, 主要获得以下结论:

1) 基坑施工过程中, 附属结构的水平和垂直位移发生在最靠近东端头井(B2)的位置, 随着观测点远离端头井, 观测点的位移总体呈减小的趋势。最大水平和垂直位移均发生在观测点 S1 处, 分别为 3.01 mm 和 7.20 mm。

2) 随着深基坑的逐步施工, 附属结构的倾斜率逐渐增大并趋于稳定, 且最大倾斜率为 0.046%, 说明附属结构底板的不均匀沉降满足规范要求。

3) 深基坑完成后, 附属结构底板最大水平方向最大压应力约 1.76 MPa, 最大拉应力约为 0.27 MPa。最大拉应力小于 C30 混凝土的设计抗拉强度 1.43 MPa, 满足抗裂要求。

4) 浇筑底板期间, 混凝土初期强度(如 3 天以内强度)是小于 0.27 MPa 的。为了确保底板不开裂, 必须在此期间, 停止邻近深基坑开挖, 即只有 B3 整体结构达到设计强度后才能进行深基坑施工。

## 致 谢

本文撰写得到同济大学土木工程学院谢东武的帮助, 特此致谢。

## 参考文献

- [1] 张志铨, 路庆保. 某地铁车站深基坑工程施工对基坑本体及周边环境影响探讨[J]. 工程建设与设计, 2018(21): 9-12.
- [2] 郭伟. 地铁深基坑支护结构设计及支护施工技术探讨[J]. 工程建设与设计, 2020(11): 219-220+223.
- [3] 霍润科, 颜月圆, 宋战平. 地铁车站深基坑开挖监测与数值分析[J]. 铁道工程学报, 2011, 28(5): 81-85.
- [4] 周勇, 魏嵩铸, 朱彦鹏. 兰州地铁车站深基坑开挖过程中降水对邻近地下管道的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 495-499.
- [5] 陈永才, 李镜培, 邸国恩, 等. 某深基坑降水对周边环境影响的分析及处理措施[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1): 319-322.
- [6] Benz, T. (2007) Small-Strain Stiffness of Soils and Its Numerical Consequences. PhD Thesis, Geotechnical Institute-Stuttgart University, Stuttgart.
- [7] Benz, T., Vermeer, P.A. and Schwab, R. (2009) A Small-Strain Overlay Model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33, 25-44. <https://doi.org/10.1002/nag.701>