

DOI: 10.11779/CJGE202211004

深基坑内钢支撑轴向压力变化规律研究

曹雪山¹, 陆新宇², 顾祎鸣³

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210024; 2. 上海隧道工程有限公司, 上海 200032; 3. 中路交科科技股份有限公司, 江苏 南京 210032)

摘要: 钢支撑轴力实测数据离散、变化规律性不清是钢支撑设计的重要问题, 严重影响着深基坑工程安全和工程经济合理性。以南京地铁某车站软土基坑工程为例, 通过建立三维有限元模型, 研究了钢支撑轴力变化规律。结合基坑开挖过程中的监测数据, 提出了钢支撑轴力与围护墙体位移双元组合的方法, 验证了模型合理性, 同时揭示了深基坑开挖过程中围护墙体位移和支撑轴力变化的相关性规律。然后研究了单道、双道预加轴力对钢支撑轴力、墙体位移和弯矩的影响, 提出了采用预加轴力技术控制变形的基本要求, 研究了支撑架设条件的影响, 阐明了支撑轴力实测值离散的原因和超挖对基坑安全的重要影响, 进而明确了悬挂架设钢支撑的研究意义。研究成果对厚层软土深基坑的变形控制技术发展提供了新方向。

关键词: 深基坑; 钢支撑; 轴力变化; 预加轴力; 支撑架设条件

中图分类号: TU476

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)11-1988-10

作者简介: 曹雪山(1970—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 从事非饱和土固结、土石坝数值计算、泥质岩崩解特性及地基与基础工程、地基处理等教学与研究工作。E-mail: x.s.cao@163.com。

Variation of axial force of steel struts in deep excavations

CAO Xue-shan¹, LU Xin-yu², GU Yi-ming³

(1. College of Civil Engineering and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 3. Sinoroad Traffic Science & Technology Co., Ltd., Nanjing 210032, China)

Abstract: The discrete data and unclear variation trend of axial force of steel struts are the important design problems, which seriously affect the safety and economic rationality of deep excavations. A three-dimensional finite element model for a deep soft excavation in Nanjing Metro station is established to study the variation of axial force of steel struts. Based on the monitoring data in the process of excavation, the dual-combination method for the axial forces of steel struts and wall deflection is put forward to validate the rationality of the model and parameters. The correlation between the wall deflection and the axial force of steel struts during excavation is revealed. Then, the influences of single- and double-axial preloading on the axial forces of steel struts, wall deflection and moment are studied to propose the basic requirements of using the preloading axial force technology to control deformation. The influences of strut erection conditions are studied to expound the reason of the discrete measured values of axial force of steel struts and the important influences of over-excavation on the safety of engineering, and to reveal the research significance of hanging steel strut erection. The research results may provide a new direction for the development of deformation control technology of deep excavations in thick soft soils.

Key words: deep excavation; steel strut; variation of axial force; preloading axial force; strut erection condition

0 引言

随着大城市地铁工程建设发展, 呈现大量深基坑开挖问题, 主要表现为基坑周边建筑物沉降及沉降差加大, 进而出现墙面开裂, 管道漏水, 结构承载能力下降等现象, 影响了建(构)筑物的正常使用性能。为合理控制坑周地层位移以及保护环境, 蒋洪胜等^[1]提出的“时空效应法”的基本思想是设计过程中应考虑现场实际的基坑施工方法与工艺, 进而提高设计和施工配合程度。

软土地区深基坑工程的变形、轴力特点显著。Goldberg 等^[2]分析了多个基坑工程的实测数据, 发现有 65% 的软土地层深基坑围护墙体位移大于 1% 的基坑深度。曹雪山等^[3]对南京某深基坑工程进行变形监测, 发现围护墙体位移达 137 mm, 约 0.86% 的基坑深度。蒋洪胜等^[1]提出了软土地区深基坑开挖过程中支

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (SYS19092); 国家重点研发计划重点专项 (2017YFC0404801, 2017YFC0404804)
收稿日期: 2021-08-09

撑轴力数据离散性大、规律性不清, 认为具有显著的时空效应; 陈保国等^[4]通过模型试验研究了内支撑体系、地连墙和墙后土体之间的协调变形特性; 金亚兵等^[5]研究了内支撑-支护桩-土相互作用且变形协调过程中的温度应力的影响。2004 年新加坡 Nicoll Highway 地铁基坑失事过程中监测到第九道支撑因失效而轴力下降, 第八道支撑轴力急剧上升, 增加 1 倍多, 第七道略有下降, 变化量约 10%, 而第九道支撑失效是基坑坍塌的直接原因^[6]。综上, 目前研究成果显示深基坑的变形与内支撑轴力之间存在内支撑-支护桩-土的相互作用; 要解决深基坑变形问题, 必须掌握支撑轴力变化规律; 支撑轴力、围护墙位移及弯矩等直接关联着基坑安全, 由此研究钢支撑设计问题具有重要的工程意义。

为探索钢支撑轴力变化规律, 本文以南京某车站基坑开挖过程为研究对象, 结合监测数据开展了数值模拟, 研究了深基坑内支撑轴力变化规律及影响因素, 为进一步提高深基坑工程设计与施工水平提供技术支撑。

1 钢支撑的设置与功能

围护墙与内支撑共同组成支护系统, 其中内支撑的设置与功能较为特殊。基坑围护墙是挡土的主体结构, 而内支撑是辅助挡土的附属结构。对于重力式挡墙、悬臂式挡土墙, 没有内支撑, 围护墙也能确保基坑开挖稳定。但深基坑的内支撑结构, 通过承受由围护墙传递的荷载, 调整围护墙的弯矩和变形, 进而改善围护墙的挡土功能。《建筑基坑支护技术规程》^[7]定义了内支撑的轴向压力设计值, 是由围护墙荷载组合后计算所得, 属于荷载效应的设计值。设计时, 因 $\Phi 609 \text{ mm}$ 、壁厚 $t=16 \text{ mm}$ 的钢支撑构件承载力不低于 3200 kN ^[8], 所以支撑轴力设计值小于 3200 kN 时, 设计文件通常选用该型号的钢支撑。国家监测规范^[9]规定轴力控制值取“构件承载能力设计值”的 60%~80%, 江苏省地方规程^[10]则将轴力控制值取“支撑轴力设计值”的 60%~80%, 条文说明注释了“支撑轴力设计值”即为支撑荷载效应设计值。虽然构件承载力设计值与荷载效应设计值不是一个概念, 但基于构件承载力设计值不小于荷载效应设计值, 这两部规范所表达的意图相同, 执行时取小值。这表明工程界重视了支撑受力后的安全性能, 而未提及支撑对围护墙的设置效果要求, 进而可能导致支撑辅助作用的削弱, 进而形成“钢支撑轴力实测值小于设计值就表示工程安全”的片面性理念, 忽略钢支撑轴力与围护墙位移、弯矩的关联性。

钢支撑结构组成及施工工艺是特殊的。钢支撑由钢管杆件、活络头以及钢围檩组成, 虽然各组成部分对承载力均有影响, 但施工工艺的预加轴力工序是特有的, 文献^[7]规定内支撑预加轴力宜取 $(0.5 \sim 0.8)$ 倍的轴力标准值, 但基坑开挖过程中的钢支撑预加轴力实测值多数小于设计值。李书银等^[11]报道了昆明地铁#4 线大唐子站基坑扩大段的设计预加力的 5%~69%, 小于 30% 的居多; 标准段为 22%~56%, 其中以小于 40% 的居多。曹雪山等^[8]报道的南京地铁某车站施工段 15 个钢支撑预加轴力仅 1 个达到设计要求。产生这种现象的主要原因是多方面的, 例如出现钢围檩、钢樨截面变形, 围护墙面不平整等, 这些均属于施工质量问题^[11]。设计文件仅给出一个轴力预加值, 而未考虑预加轴力衰减现象的存在, 没有规定预加轴力目标值与施加值, 导致缺乏相应预加轴力值的质量评定标准。再者较大的预加轴力对应的支撑轴力也略大^[12], 相对于固定的预警值而言, 更易产生轴力预警问题。然而轴力增大对变形控制有效。Clough 等^[13]通过有限元研究发现当预加力为 $(0.2 \sim 0.4)$ 倍的静土压力时, 围护墙位移量可比无预加力时减小 50% 以上; 2020 年 6 月后监测国家标准^[14]新增了支撑预加轴力的最小轴力预警。综上, 目前的钢支撑施工技术水平与设计成果很不匹配。引发这一问题的关键是对钢支撑轴力变化规律认识不清。因此需要深入研究钢支撑轴力变化规律, 以充分发挥钢支撑的功能, 进一步提高内支撑设计水平。

2 深基坑开挖过程的模拟分析

2.1 基坑设计与监测概况

南京某地铁车站设计情况如图 1 所示。场地地层从上至下为人工填土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土夹粉砂等。其中淤泥质粉质黏土 (②-2b₄), 全场区分布, 厚度为 24.80~32.40 m, 平均 26.90 m。车站主体大部分位于该层中。基坑围护墙为厚度 0.8 m 的地下连续墙, 标准段宽度 20.0 m, 开挖深度 16.0 m, 竖向设四道支撑 (第一道为砼支撑, 其余为 $\Phi 609 \text{ mm}$ 、 $t=16 \text{ mm}$ 钢支撑)。坑底采用三轴搅拌桩抽条基底加固, 抽条宽度 3 m, 间距 3 m。

如图 1 (a) 所示, 研究区位于标准段, 距离端部盾构井段约 8 m; 研究区的监测点为墙体测斜 CX02、CX03 及对面墙内的 CX16, 对应的轴力为 ZL03; 如图 1 (b), 第二—第四道支撑均为钢管支撑, 对应的轴力测点分别为 ZL03-2, ZL03-3, ZL03-4。图 2 为基坑开挖过程中的墙体变形与轴力监测结果。图 2 (a)~2 (c) 显示随着开挖深度加大, 向坑内的墙体变形量

相应增大, 最大值位置深度下移; 且 3 个测点测量值相近, 变化趋势相同。图 2 (d) 显示 3 个测点轴力测试值虽然波动, 但共同规律是前期的快速增大、后期的逐渐平缓的发展过程。

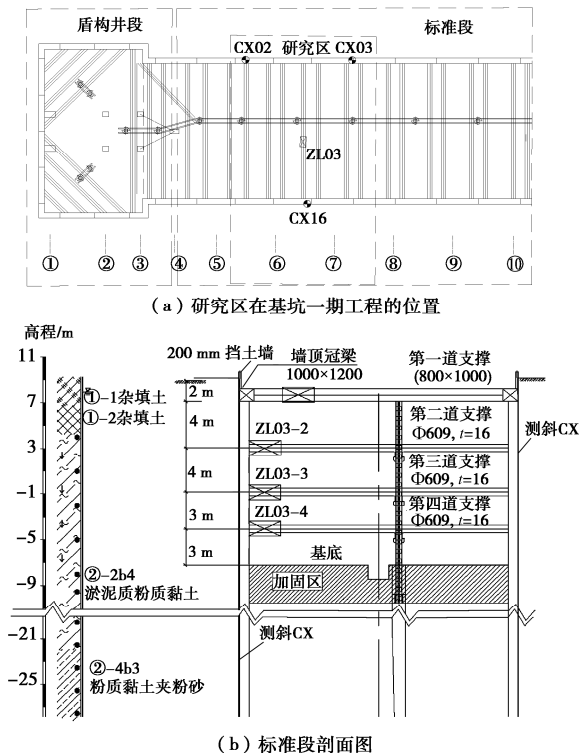


图 1 基坑研究区监测布置图

Fig. 1 Arrangement plan of monitoring in excavation

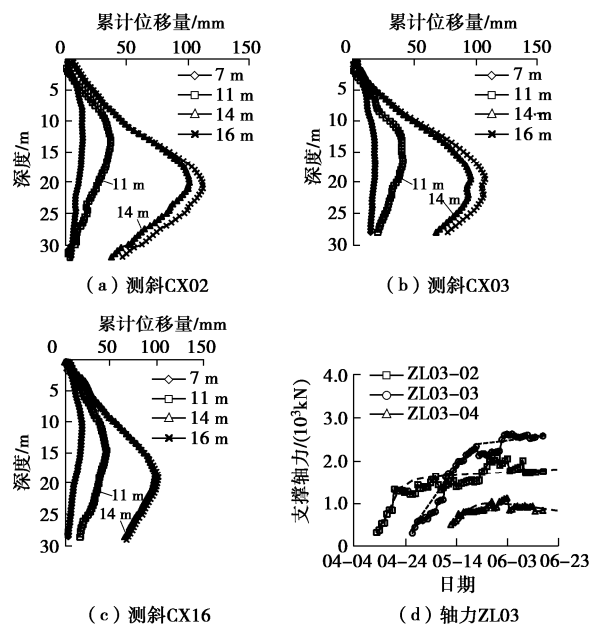


图 2 基坑研究区监测结果

Fig. 2 Monitoring results in excavation

2.2 模型建立与施工阶段的模拟计算

地铁站深基坑呈现狭长型, 这是典型的平面应变问题, 而支撑与围护墙之间的作用状态具有显著的三维特性, 于是本文以轴力 ZL03 为中心取纵向长度

25.5 m 的标准施工段建立基坑开挖模型。模型总宽度 80 m, 即坑内宽度 20 m, 坑外向两侧各延伸 30 m。地连墙深度 38 m, 模型深度 80 m。为了展示土层开挖对轴力的影响, 土层开挖时计算厚度为 1 m。计算模型如图 3 所示。

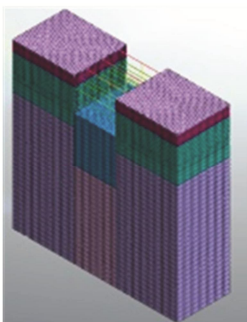


图 3 基坑开挖模型
Fig. 3 Excavation model

基坑开挖模拟计算采用 Midas GTS NX 软件的总应力法进行。土体本构为修正莫尔库仑模型。考虑地铁基坑开挖速度较快, 参数选用场地的地质勘察报告及设计图纸中的快剪强度指标, 具体岩土参数详见表 1。基坑支护结构参数详见表 2。商业程序的非线性模量参数: E_{50}^{ref} 为标准三轴实验的割线模量, E_{oed}^{ref} 为固结试验的切线模量, E_{ur}^{ref} 为卸载/重新加载模量。弹性模量的取值按地区软土比例系数经验确定。

结合现场实际的施工开挖与支护顺序, 模型计算时按 16 层土, 22 步, 11 个施工阶段模拟基坑开挖全过程, 具体步骤如表 3 所示。钢支撑初始预加轴力根据实测值施加。

表 1 土层模型计算参数

Table 1 Parameters for soil model

土层	弹性模量/MPa			泊松比	饱和重度 (kN·m ⁻³)	初始孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
	E_{50}^{ref}	E_{oed}^{ref}	E_{ur}^{ref}					
杂填土	4.1	4.1	16.4	0.34	19.0	0.9	10	9.0
素填土	4.1	4.1	16.4	0.34	18.8	0.9	15	5.4
淤泥质粉质黏土	3.3	3.3	13.2	0.41	18.2	1.1	12	5.7
粉质黏土夹粉砂	3.7	3.7	16	0.34	18.7	1.0	14	8.4

表 2 支护结构材料参数

Table 2 Parameters for support structures

结构名称	单元类型	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)	尺寸
地下连续墙	板	31.5	0.2	26.0	厚度 $t=800$ mm
钻孔灌注桩	梁	31.5	0.2	26.0	桩径 1000 mm
格构柱	梁	200.0	0.3	78.5	方箱 $a=480$ mm, $t=20$ mm
钢筋混凝土支撑	梁	31.5	0.2	26.0	矩形 100 mm×800 mm
钢支撑	梁	200.0	0.3	78.5	$\Phi 609$ mm, $t=16$ mm

表 3 基坑开挖模拟步骤
Table 3 Simulation steps of excavation

序号	施工阶段	单元处理
1	初始应力分析	激活所有土体、自重、边界约束; 位移清零
2	围护墙施工	激活围护墙、围护墙旋转约束
3—4	开挖第 1—第 2 层土	逐步钝化第 1—第 2 层土
5	架设第一道支撑	激活第一道钢筋混凝土支撑
6—10	开挖第 3—第 7 层土	逐步钝化第 3—第 7 层土
11	架设第二道支撑	激活第二道钢支撑
12—15	开挖第 8—第 11 层土	逐步钝化第 8—第 11 层土
16	架设第三道支撑	激活第三道钢支撑
17—19	开挖第 12—第 14 层土	逐步钝化第 12—第 14 层土
20	架设第四道支撑	激活第四道钢支撑
21—22	开挖第 15—第 16 层土	逐步钝化第 15—第 16 层土

2.3 计算模型适用性验证

软土基坑开挖的最大问题是变形大, 所以基坑变形规律的数值研究时^[8, 15]通常由围护墙体位移计算值与实测值吻合性来验证模型适用性; 但是深基坑的支护系统中的支撑结构对围护墙位移的影响显著^[13], 同时围护墙位移与支撑轴力分别属于不同范畴, 因此本文提出了围护墙体位移与支撑轴力二元参数组合的验证方法。根据基坑在不同开挖深度处的围护墙体位移及支撑轴力的实测值, 拟合模型计算参数。拟合结果如图 4, 5 所示, 拟合的相对误差如表 4 所示。

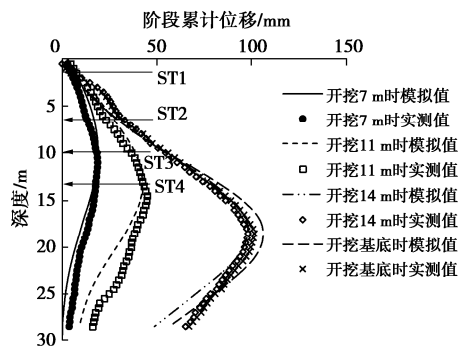


图 4 围护墙体位移模拟值和实测值对比图

Fig. 4 Comparison between simulated and measured values of wall deflection

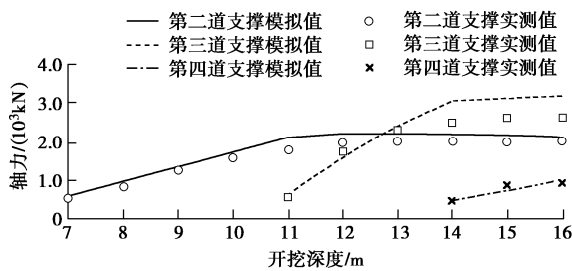


图 5 基坑开挖过程中的钢支撑轴力模拟值与实测值对比图

Fig. 5 Comparison between simulated and measured values of axial forces of steel struts during excavation

支撑抗压刚度决定于其截面积。钢支撑 $\Phi 609$ mm, 壁厚 16 mm, 截面积 0.030 m^2 , 而活络头连接部

位矩形钢棒接触面积最大 0.016 m^2 , 正反楔组合体的受力面积可能更小, 这些均可能是造成支撑刚度减小的原因。雷霆等^[16]通过模型计算, 发现钢支撑刚度仅有理论值的 38%。本文模拟的钢支撑刚度是根据实测的位移、支撑轴力拟合确定, 三道钢支撑模拟刚度分别为钢管横截面抗压刚度理论值的 34%, 34%, 30%。

表 4 模拟值与实测值相对误差汇总表

Table 4 Summary of relative errors between simulated and

测项	measured values (°)			
	模拟值与实测值相对误差			
	开挖 7 m	开挖 11 m	开挖 14 m	开挖 16 m
围护墙体位移	1	-6	-1	4
第二道轴力	12	17	9	5
第三道轴力	—	14	22	20
第四道轴力	—	—	5	8

基坑开挖深度为 7, 11, 14 m 时, 分别在深度 6, 10, 13 m 处架设第二、第三、第四道钢支撑, 开挖基底深度为 16 m。图 4 表明各开挖阶段围护墙体位移 (CX16) 计算值与模拟值的大小、分布形态、位移的最大数值及位置相近; 图 5 反映了第二道支撑架设完成后不同开挖深度时支撑轴力的计算值与模拟值对比关系, 显然, 规律吻合性好, 总体趋势一致。表 4 表明了围护墙体位移的相对误差较小, 而轴力相对误差略大, 这与支撑轴力测试精度及显著的时空效应相关^[1]。总之, 本文通过围护墙体位移与支撑轴力二元参数组合的方法验证了计算模拟值与现场实测值之间的吻合性, 这表明计算模型能合理地反映出基坑开挖过程中墙体变形和支撑轴力的变化规律。

2.4 计算成果分析

图 4 反映了随基坑开挖深度增加, 围护墙体位移不断增大的趋势。根据《建筑基坑工程监测技术标准》^[14], 本段基坑的围护墙体位移预警值为 $30 \sim 50 \text{ mm}$, 与基坑设计深度 H 的控制相对值为 $0.3\% \sim 0.4\%$, 设计文件取小值, 即分别为 30 mm 和 0.3% 。但如图 6 所示, 随着基坑开挖深度加大, 不同开挖阶段的围护墙体最大位移及相对值的不断加大是必然的。当开挖深度为

10 m时已经达到预警控制值,之后的变形发展均表示基坑处于危险状态。这种现象,在场地软土层厚、开挖深度大的基坑中不是个别案例,具有普遍性,如表5所示。为此,曹雪山等^[3]提出了新的基坑安全预警方法,包含预警提醒、事故警告、事故征兆及事故发生4个阶段,旨在提高预警方法与措施的设计与施工配合程度,以进一步保障基坑安全。

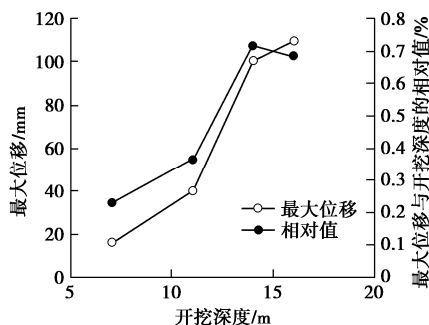


图6 开挖深度、围护墙体最大位移及其与开挖深度的比值的关系

Fig. 6 Relationship among excavation depth, maximum values of wall deflection and ratio of that with excavation depth excavation

表5 软土基坑的围护墙位移

Table 5 Wall deflections of excavation in soft soil area

地区	软土厚度 /m	地连墙厚度 /m	开挖深度 H /m	δ/H /%
南京市 I ^[17]	3.4~18.6	0.8	17.28	0.68
南京市 II ^[18]	37.0~43.0	1.0	18.50	1.58
上海市 ^[19]	5.8	1.0	18.10	0.48
	14.0	1.0	16.10	0.94
本文	24.8~32.4	0.8	16.00	0.50~0.65

图5反映的钢支撑轴力发展规律主要有3点。

(1) 钢支撑架设后,随土层开挖,该道支撑轴力有一个从线性增加至基本稳定的发展过程,轴力变化的转折点是下道支撑所形成的阻隔作用的结果。开挖深度为7 m时,第二道钢支撑预加力施加完成后,随着基坑开挖深度增大,支撑轴力线性增加,至开挖深度11 m时增速变缓;在第三道支撑预加轴力施加后,第三道支撑轴力随开挖深度线性增长,而第二道轴力不再明显增加,进入基本稳定状态,其原因是第三道支撑对第二道支撑起到了阻隔作用;同样,在第四道支撑预加轴力施加完成后,开挖深度的增加引起第四道支撑轴力的线性增加,而第二、三道支撑轴力趋向基本稳定。开挖过程中各部位支撑的不同轴力发展过程是造成支撑轴力实测值离散^[1]的重要原因,且与支撑的阻隔效果相关。

(2) 钢支撑轴力与开挖深度相关性很好。图5所示的第二—第四道钢支撑,每道支撑轴力增量均随支撑下土层开挖深度的增加呈线性增大趋势,且相关性很好。图7为第二—第四道钢支撑轴力总和与基坑开挖深度的关系,也体现为线性增长的发展规律。

(3) 支撑轴力大小分布与阶段变形量相似,均是第三道支撑及其对应变形最大,第二道其次,第四道最小。图8显示第二—第四道的钢支撑轴力总和与围护墙体位移之间的相关性很好。

因此,钢支撑轴力变化规律应考虑该支撑所在部位、基坑开挖深度位置及下道支撑的阻隔作用等影响因素,同时应包含钢支撑轴力总和的变化趋势。

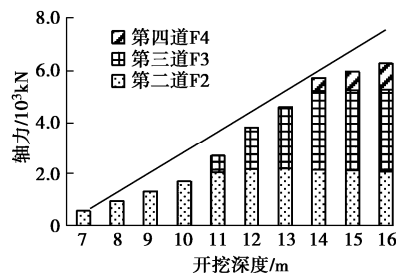


图7 钢支撑轴力及其总和与开挖深度的关系

Fig. 7 Relationship between axial forces and sum of that of steel struts and excavation depth

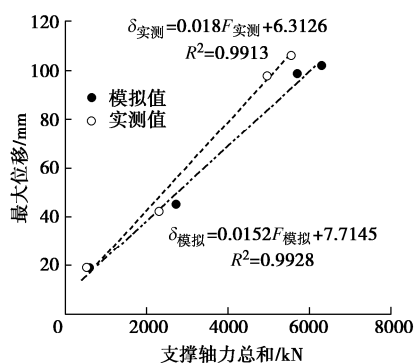


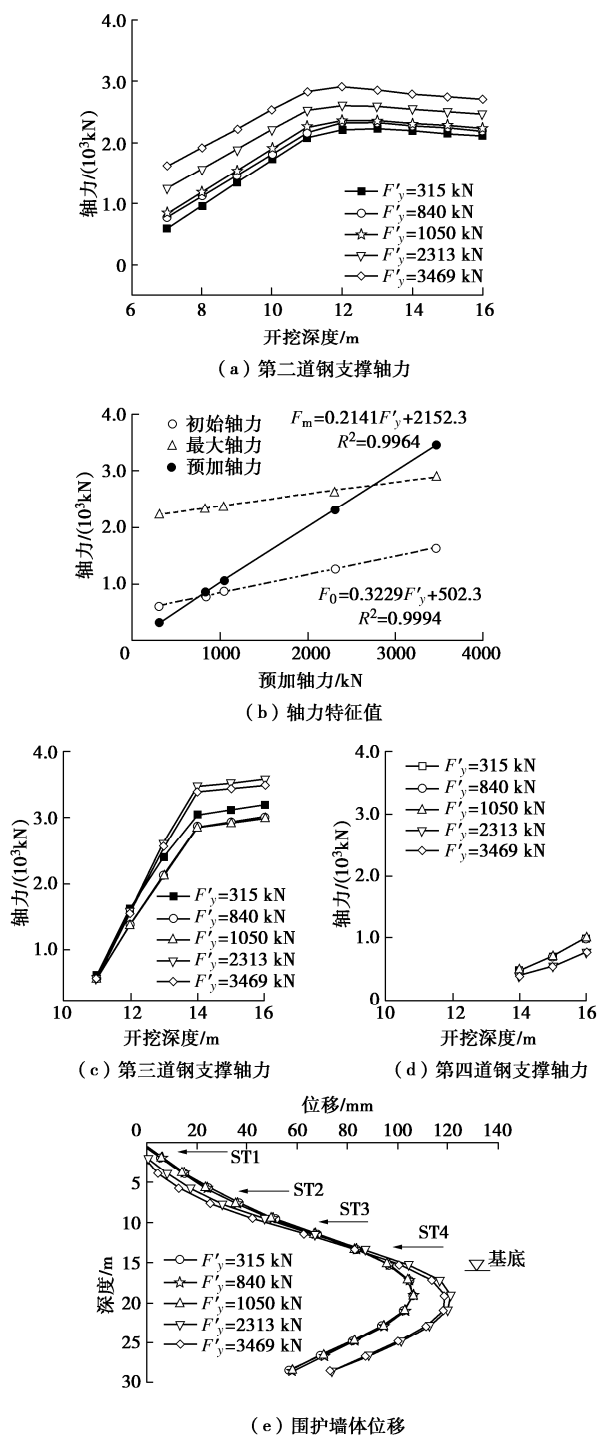
图8 围护墙体最大位移与钢支撑轴力总和的关系

Fig. 8 Relationship between maximum wall deflection and sum of axial force of steel struts

3 钢支撑轴力影响因素分析

3.1 单道钢支撑预加轴力的影响

基坑施工过程中普遍存在钢支撑预加轴力不足的情况,本工程中预加轴力仅为30%~60%的预加设计值。根据设计文件所提供的初始预加轴力值,施工人员将此换算成千斤顶油压值来实现。由于忽视了钢支撑预加轴力的衰减现象,各道各根钢支撑的轴力衰减均独立发生,进而形成了实际预加轴力值不足的随机性。为了搞清某道钢支撑预加轴力不足对基坑变形、轴力的影响,将模型中第二道支撑的预加轴力计算值分别取 $0.3F_y$, $0.8F_y$, F_y , F_s , $1.5F_s$;本基坑第二道轴力设计值 F_s 为2313 kN,预加轴力设计值 F_y 为1050 kN,是轴力设计值的0.45;计算时第三、第四道支撑预加轴力取实际预加值,分别为300, 500 kN。计算结果如图9所示。



F'_y 为预加轴力, F_0 为初始轴力, F_m 为最大轴力, ST 为内支撑, 箭头为支撑位置, ∇ 为基底位置

图 9 第二道钢支撑预加轴力对轴力及墙体位移的影响

Fig. 9 Influences of preloading of secondary steel struts on axial forces and wall deflection

从图 9 (a) 看出, 由于预加轴力值明显低于轴力设计值, 所以随开挖深度变化, 低于设计值的预加轴力对轴力的影响很不明显; 只有当预加轴力达到设计轴力值, 甚至 150% 的设计轴力值时, 第二道轴力才有稍大的增长。图 9 (b) 展示了钢支撑的轴力特征值: 预加轴力、初始轴力及最大轴力三者之间的关系。预加轴力是指计算前施加于支撑的外荷载; 初始轴力是

指该支撑激活后作用于模型结构, 首次计算完成时所具有的轴力; 最大轴力是指在支撑运行时所具有的轴力最大值。因此三者为不同支护结构状态下支撑轴力的特征量。随预加轴力增大, 初始轴力、最大轴力相应增大, 线性相关性系数 >0.99 ; 从变化率看, 以预加轴力变化梯度为 1, 则初始轴力、最大轴力的变化梯度分别为 0.32, 0.21。综合图 9 (a) ~ (d), 说明预加轴力对轴力有影响但并不显著^[8, 12], 其中原因是支护结构具有自身调节功能。

图 9 (e) 反映了第二道支撑预加轴力的加大对变形的影响。当预加轴力不大于设计值时, 围护墙体位移相差量可忽略不计, 但预加轴力达到设计轴力值及 150% 的设计轴力值时, 由于第二道支撑所在位置处位移减小, 导致围护墙体位移在基底附近的最大值反而增大。其原因是对于多道支撑的深基坑, 因相邻支撑具有阻隔作用, 所以每道支撑的作用范围为相邻支撑所围成的区域。在图 9 (e) 中, 当第二道支撑预加轴力大于设计轴力时, 虽然第二道支撑处围护墙体位移减小了, 但第四道出现支撑处及围护结构最大变形却增大了, 其力学作用机制是第三道支撑起到了使变形曲线出现拐点的作用。所以对于多道支撑的基坑, 不能盲目地增大单道支撑的预加轴力, 避免对变形控制产生不利的影响。这与陈保国等^[4]在室内试验所发现的单道上部支撑变形控制效果差的观点相近, 同时给出了预加轴力不宜过大的一个解释。

3.2 两道钢支撑预加轴力的影响

将钢支撑第二、第三道均施加预加轴力 1600 kN 作为方案 I, 均施加预加轴力 3000 kN 作为方案 II, 而两方案中第四道支撑仍施加 1050 kN, 计算预加轴力对轴力及变形的影响。计算结果如图 10 所示。

图 10 表明两道钢支撑预加轴力均较大, 轴力随基坑开挖的“线性增长到基本稳定”的发展规律仍不变。并且图 10 (a) 还显示第三道支撑施加预加轴力后, 对第二道支撑轴力起到了明显的卸载作用, 而第四道支撑施加预加轴力对第三道支撑轴力的卸载作用不明显。图 10 (b) 显示预加力再大幅增加, 则初始轴力有增加, 对第二道支撑轴力的卸荷作用更加显著。这说明开挖时支撑对邻近支撑有阻隔作用外, 较大的预加轴力还会对邻近支撑有卸荷作用。

表 6 给出第二、第三道支撑预加轴力对支撑轴力的影响。较大的预加轴力所引起的初始轴力也较大, 并且尽管支撑下土层开挖仍会使轴力增加, 但较大的预加轴力会使轴力增量略小些。第二道支撑轴力在该支撑下土层开挖完成时最大, 原因是第三道支撑在预加轴力施加结束后对第二支撑产生的较大卸载作用导致第二支撑的最终轴力降低; 而第三、第四道支撑轴

力的最大值与最终值相等,原因是第四道支撑预加轴力值小,且轴力也较小,对第三道支撑轴力无明显的卸荷和阻隔作用,表现为第四道支撑下土层开挖时第四道支撑轴力在增长,第三道支撑轴力也有增长。

总之,钢支撑轴力虽然有显著的时空效应,但其变化规律还是明确的。由于最终轴力不一定是最大轴力,而支撑受力安全性决定于最大轴力,因此设计轴力应理解为最大轴力,而不是最终轴力,支撑型号选择标准也应是最大轴力。

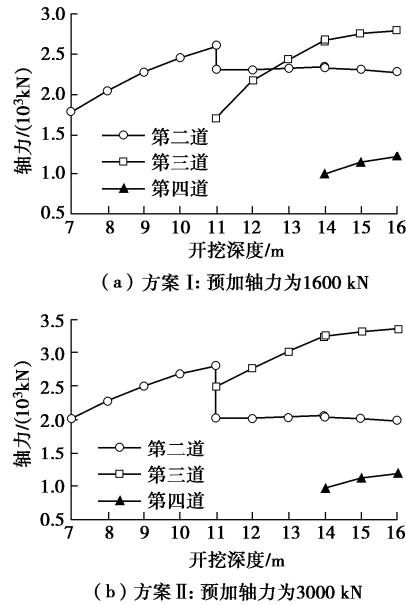


图 10 第二、第三道钢支撑预加轴力对支撑轴力的影响
Fig. 10 Influences of preloading of struts No. 2 and No. 3 on axial force

表 6 第二、第三道钢支撑预加轴力对支撑轴力的影响
Table 6 Influences of preloading of struts No.2 and No.3 on axial force

计算模式	预加轴力/kN	初始轴力/kN	最大轴力/kN	最终轴力/kN	设计轴力/kN
方案 I	第二道	1600	1787	2610	2285
	第三道	1600	1701	2800	2800
	第四道	1050	999	1215	1215
方案 II	第二道	3000	2014	2806	1988
	第三道	3000	2499	3340	3340
	第四道	1050	968	1182	1182

图 11, 12 给出第二、第三道支撑预加轴力为 1600, 3000 kN 时对围护墙体位移、弯矩的影响,表明较大的预加轴力对位移控制效果好,且弯矩无明显变化。与单道支撑工况相比,第二、第三道支撑均有较大的预加轴力时,显著扩大了影响范围;并且此时第四道支撑轴力的拐点作用不明显,围护墙刚度得到了显著提高,变形控制能力加强;围护墙体位移从第二道支撑至基底范围内基本上整体减小,这就体现支撑对围护墙的刚度提高、变形控制的作用。

所以对于多道支撑的基坑预加轴力施加方法,两

道支撑施加效果明显不同于单道支撑,这也解释了各道按比例增加预加轴力^[8]、等位移变化^[4]的变形控制效果佳的结论。

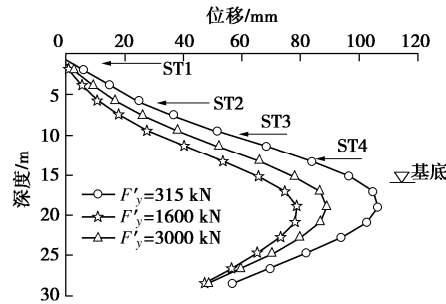


图 11 第二、第三道支撑不同预加轴力下围护墙体位移
Fig. 11 Comparison of wall deflection under different preloading axial forces of struts No. 2 and No. 3

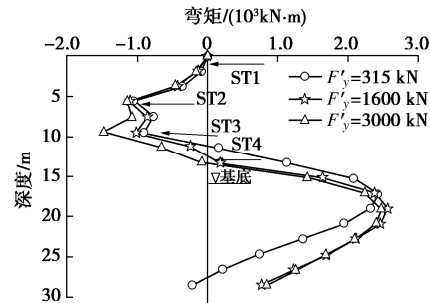


图 12 第二、第三道支撑不同预加轴力下围护墙体弯矩
Fig. 12 Comparison of wall moment under different preloading axial forces of struts No. 2 and No. 3

3.3 支撑架设条件对钢支撑轴力的影响

基坑开挖过程中,钢支撑轴力与支撑下土层所开挖的深度成线性增长比例,直到下道支撑的阻隔作用才改变。为了探索轴力增长的时空效应,根据支撑与即将开挖土层顶面关系,确定了悬挂架设、常规架设及超挖 1 m 后架设的钢支撑 3 种模式,如图 13 所示。

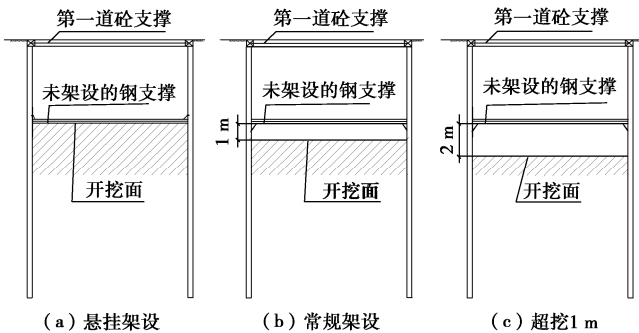


图 13 支撑架设条件
Fig. 13 Conditions of strut erection

钢支撑常规架设是指基坑开挖至钢支撑位置下 1 m 后架设,支撑下 1 m 空间是用于支承钢围檩、钢支撑的三角牛腿及坑中部立柱横向联系梁等架设需要的;悬挂架设是指开挖至钢支撑底面即开始架设,由

于此时三角牛腿及坑中部立柱横向联系梁没有架设空间, 所以只能采用围护墙预埋钢构件, 通过悬挂结构固定钢支撑; 超挖 1 m 是因出土过量导致开挖面过低, 低于常规架设的开挖面 1 m 所形成的特殊工况。工程中常规架设钢支撑施工工艺成熟, 工效高; 而悬挂架设属于新技术, 如采用钢支撑下开槽施工, 则工效低, 难度大, 很难推广; 超挖情况一般不会发生, 出现时表明工程管理存在问题, 其结果是工效低且还有高空架设问题。

以计算模型为基础, 对不同支撑架设条件的基坑开挖进行模拟计算, 计算结果如图 14 所示。

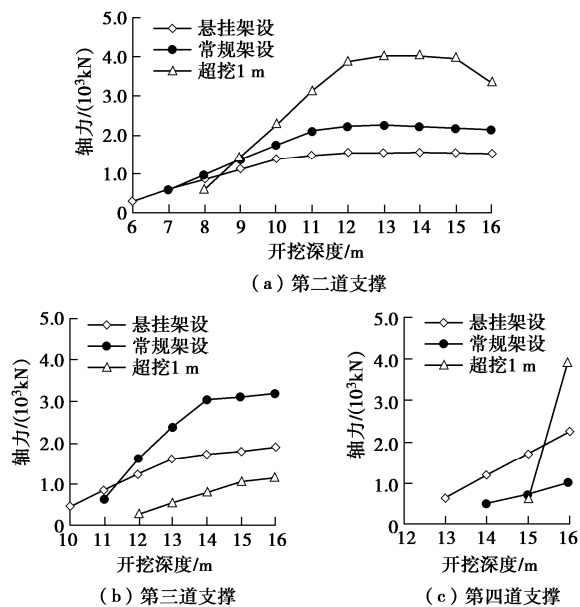


图 14 不同架设条件下钢支撑轴力值变化

Fig. 14 Variation of axial force of steel struts under different erection conditions

支撑轴力受架设条件影响很大, 相应的支撑风险也增大。由图 14 (a) 可知, 首先对初始轴力值的影响。虽然预加轴力值一样, 但不同架设条件下支护结构所处状态不同, 导致支撑激活后作用于围护结构, 首次计算所得支撑轴力也不同。悬挂式最小, 而超挖 1 m 时最大。其次是开挖过程中轴力变化规律不同。第二道支撑位置为基坑深度 6 m 处, 无论开挖深度与支撑位置的深度差是多大, 当开挖深度增大时, 第二支撑轴力均有线性增长趋势, 所不同的是支撑轴力增长幅度随深度差增大而增大。支撑采用悬挂架设, 深度差为零, 轴力增长幅度最小, 而超挖 1 m 时架设的轴力增长幅度最大; 至下道支撑架设时开挖深度增长量相同, 但所累计的轴力相差很大, 如表 7 所示, 超挖 1 m 条件下架设支撑轴力达到 4026 kN, 是常规架设时支撑轴力的 180%, 此时对于支撑量程为 3200 kN 的 $\Phi 609$ mm、 $t=16$ mm 的常规钢支撑, 极易引发支撑轴力失效, 进而引发基坑事故^[6,20]; 悬挂架设支撑轴力最小, 是常规架设时支撑轴力的 69%。图 14 (b)

显示第三道支撑轴力对超挖 1 m 条件下最小, 这与第二道轴力过大直接相关; 图 14 (c) 中第四道支撑轴力在超挖 1 m 条件下再次达到最大, 与第三道轴力过小相关; 常规架设条件下最小, 与第三道轴力过大相关; 只有悬挂架设的轴力增长最平稳, 相应风险最小。

基坑开挖深度不同, 轴力差异幅度也有差异。图 14 显示, 开挖深度小于 10 m 的基坑, 仅架设了第二道支撑, 则各种支撑架设条件的影响不明显, 即使发生超挖 1 m 工况, 支撑轴力最大达 2000 kN; 但如基坑开挖深度约 13 m, 要架设第三道支撑, 则超挖 1 m 条件下第二道支撑轴力可能达到 3893 kN, 风险很大; 而常规架设时风险相对要小些。

综上, 支撑架设条件对支撑轴力的变化具有显著影响。基坑工程实施开挖过程中, 由于每阶段开挖深度没有质量评定要求, 必然存在开挖面深度的随机性差值, 进而引起轴力实测值离散^[1]。根据钢支撑轴力增长与变形的相关性^[7], 由支撑架设时间延迟也会引发围护结构变形增长, 进而导致上道支撑轴力变化, 加剧轴力实测值离散性。多种因素共同作用是目前轴力变化规律不清^[6]的关键, 因此需要进一步细化施工过程中管控指标, 强化施工工艺精细控制, 以达到预防基坑事故的功效。

表 7 各架设条件下钢支撑最大轴力值

Table 7 Maximum axial forces of steel struts under various erection conditions (kN)			
项目	第二道	第三道	第四道
悬挂架设	1544	1893	2266
常规架设	2228	3182	997
超挖 1 m	4026	1159	3904
设计值	2313	1543	1951
实际值	2015	2627	926

支撑架设条件对围护墙位移、弯矩的影响分别如图 15、16 所示。围护墙体位移和弯矩在悬挂架设条件下均最小, 而超挖条件下均最大。这说明围护墙位移、弯矩与支撑轴力是密切相关的, 悬挂架设的钢支撑轴力总和最小, 对应的墙体位移、弯矩均最小; 而超挖 1 m 条件下钢支撑轴力总和最大, 对应的墙体位移、弯矩也是最大的。

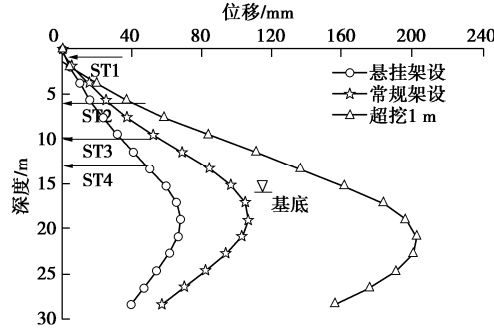


图 15 不同支撑架设条件下围护墙体位移

Fig. 15 Wall deflections under different strut erection conditions

另外,图 15, 16 还表明具有厚层软土的深基坑变形控制的优化方向。表 8 展示了不同支撑架设条件下围护墙体位移及弯矩的变化情况。在超挖 1 m 条件下进行支撑架设的基坑风险最大,不仅体现于变形过大,而且正负弯矩也是最大的;相比常规架设条件,墙体位移增大 95%,而正弯矩增大 39%,负弯矩增大 91%,所以此工况必须严格杜绝;反之,悬挂架设条件下围护墙体位移小、正负弯矩均得到显著减小,应大力发展。

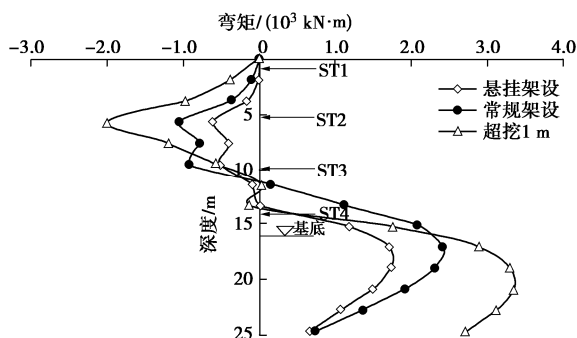


图 16 不同支撑架设条件下围护墙弯矩图

Fig. 16 Wall moments under different strut erection conditions

表 8 不同支撑架设条件下围护墙位移、弯矩最大值

Table 8 Maximum wall deflections and moments under different strut erection conditions

项目	最大位移 /mm	最大正弯矩 /(kN·m)	最大负弯矩 /(kN·m)
悬挂架设	68	1729	-603
常规架设	110	2412	-1045
超挖 1 m	204	3354	-1996

4 结 论

(1) 支护系统中的钢支撑可显著提高围护墙的挡土功能,减小位移、弯矩等,因此揭示钢支撑轴力变化规律,具有重要的工程意义。

(2) 提出了围护墙体位移与支撑轴力双元组合的计算模型验证方法。在围护墙体位移拟合基础上,通过将第二—第四道钢支撑的实际刚度分别折减为理论刚度的 34%, 34%, 30%后,计算轴力值与实测值较为接近;本文的双元组合验证法不仅提高了模型适用性、计算参数合理性,还能更好地反映出基坑开挖过程中围护墙的变形和支撑轴力的发展规律。

(3) 揭示了随基坑开挖深度增加,围护墙体位移增长规律。对于具有厚层软土的深基坑,围护墙体最大位移及相对值均超控制值的现象不是个别案例,具有普遍性,应进一步加强监测预警的设计与施工配合程度。

(4) 揭示了钢支撑轴力变化规律。钢支撑架设后,

随土层开挖,该道支撑轴力有一个从线性增加至基本稳定的发展过程,轴力变化的转折点是下道支撑的阻隔作用的结果。因此,钢支撑轴力变化规律应考虑该支撑所在部位、基坑开挖深度位置及下道支撑的阻隔作用等影响因素,同时应包含钢支撑轴力总和的变化趋势。

(5) 揭示了预加轴力、支撑架设条件对钢支撑轴力变化的影响规律。预加值大小及施加方式、支撑架设条件等不改变轴力发展过程的变化趋势,但较大轴力预加值具有对上道支撑轴力的卸荷调整作用,增大本道轴力初始值、减小线性增加幅度等影响。

(6) 多道支撑的基坑,单道钢支撑预加轴力施加对墙体变形控制产生不利的影响;而双道钢支撑预加轴力对变形控制有利,因此建议轴力伺服系统应用时应不少于 2 道支撑。

(7) 支撑架设条件对支撑轴力、围护墙位移和弯矩的影响很大。相对于常规架设条件,超挖后支撑架设引起支撑轴力、围护墙体位移及正负弯矩均显著增大,显著加大基坑安全风险,应严禁超挖;而悬挂架设则使支撑轴力、围护墙体位移及正负弯矩均显著减小,应大力发展悬挂架设。

钢支撑是深基坑工程内支撑的一种重要结构,优点突出,应用广泛,但使用效果并不突出,因此需要精细化施工,强化设计与施工的配合程度,通过更多的典型案例提高对钢支撑轴力变化规律的认识,这对软土深基坑的变形设计控制具有重要的工程意义。

参考文献:

- [1] 蒋洪胜, 刘国彬. 软土深基坑支撑轴力的时空效应变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 105 - 107. (JIANG Hong-sheng, LIU Guo-bin. Time-space effect on strut force in deep excavation of soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 105 - 107. (in Chinese))
- [2] GOLDBERG D T, JAWORSKI W E, GORDON M D. Lateral Support Systems and Underpinning[R]. Washington: Federal Highway Administration, 1976.
- [3] 曹雪山, 张荣宽, 顾 琴. 一种深基坑变形报警方法: CN105064371B[P]. 2017-07-18. (CAO Xue-shan, ZHANG Rong-kuan, GU Qing. Deformation Alarming Method for Deep Foundation Pit: CN105064371B[P]. 2017-07-18. (in Chinese))
- [4] 陈保国, 闫腾飞, 王程鹏, 等. 深基坑地连墙支护体系协调变形规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3289 - 3299. (CHEN Bao-guo, YAN Teng-fei, WANG

- Cheng-peng, et al. Experimental study on compatible deformation of diaphragm wall support system for deep foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(10): 3289 - 3299. (in Chinese))
- [5] 金亚兵, 沈翔, 劳丽燕. 温度变化对深基坑内支撑轴力和变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(8): 1417 - 1425. (JIN Ya-bing, SHEN Xiang, LAO Li-yan. Influences of temperature change on axial force and deformation of inner support in deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(8): 1417 - 1425. (in Chinese))
- [6] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 第2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009: 1108 - 1150. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation Engineering Manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 1108 - 1150. in Chinese))
- [7] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 2012. (Technical Specification for Retaining and Protection of Building Foundation Excavations: JGJ 120—2012[S]. 2012. (in Chinese))
- [8] 曹雪山, 额力素, 曹怀玉. 深基坑钢支撑预加力对围护墙变形影响[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2020, **37**(3): 33 - 39. (CAO Xue-shan, E Li-su, CAO Huai-yu. Influence of inner steel strut prestress on the retaining wall deformation of deep excavation[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2020, **37**(3): 33 - 39. (in Chinese))
- [9] 建筑基坑工程监测技术规范: GB 50497—2009[S]. 2009. (Technical Code for Monitoring of Building Excavation Engineering: GB 50497—2009[S]. 2009. (in Chinese))
- [10] 江苏省城市轨道交通工程监测规程: DGJ32—J195—2015[S]. 2015. (Technical Specification for Monitoring Measurement of Urban Rail Transit Engineering in Jiangsu Province: DGJ32—J195—2015[S]. 2015. (in Chinese))
- [11] 李书银, 李世良. 地铁深基坑钢支撑预加轴力消散原因分析[J]. 铁道勘察, 2018, **44**(5): 39 - 42. (LI Shu-yin, LI Shi-liang. Analysis on dissipation of preloaded axial force of steel support in subway deep foundation pit[J]. Railway Investigation and Surveying, 2018, **44**(5): 39 - 42. (in Chinese))
- [12] 洪德海. 钢支撑预加力对围护结构内力的影响分析[J]. 铁道勘察, 2010, **36**(2): 62 - 64. (HONG De-hai. Analysis on influence of steel support prestress on endogenous force of support structure[J]. Railway Investigation and Surveying, 2010, **36**(2): 62 - 64. (in Chinese))
- [13] CLOUGH G W, TSUI Y. Performance of tied-back walls in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1974, **100**(12): 1259 - 1273.
- [14] 建筑基坑工程监测技术标准: GB 50497—2019[S]. 2019. (Technical Standard for Monitoring of Building Excavation Engineering: GB 50497—2019[S]. 2019. (in Chinese))
- [15] 张洁玲. 某地铁车站深基坑开挖变形及稳定性研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018. (ZHANG Jie-ling. Study on the Excavation Deformation and Stability of Deep Foundation Pit in Subway Station[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018. (in Chinese))
- [16] 雷霆, 丁保华, 张瑞鑫, 等. 钢支撑有限元模型刚度取值研究[J]. 市政技术, 2020, **38**(1): 220 - 223. (LEI Ting, DING Bao-hua, ZHANG Rui-xin, et al. On stiffness values of finite element model in steel support structure[J]. Municipal Engineering Technology, 2020, **38**(1): 220 - 223. (in Chinese))
- [17] 杨学涛, 曹雪山. 深基坑围护结构水平位移变形分析[J]. 施工技术, 2014, **43**(13): 51 - 54. (YANG Xue-tao, CAO Xue-shan. Horizontal displacement analysis on deep foundation excavation retaining structure[J]. Construction Technology, 2014, **43**(13): 51 - 54. (in Chinese))
- [18] 杨学涛. 南京河西某深基坑变形特征及对周围建筑物的影响分析[D]. 南京: 河海大学, 2015. (YANG Xue-tao. Study on Deformation of Deep Foundation Pit in Soft Area and Influence to Building Adjacent, Hexi, Nanjing[D]. Nanjing: Hohai University, 2015. (in Chinese))
- [19] 吴昌将, 孙召花, 赖允瑾, 等. 软土地区地下连续墙深大基坑的变形性状研究[J]. 岩土力学, 2018, **39**(增刊 2): 245 - 253. (WU Chang-jiang, SUN Zhao-hua, LAI Yun-jin, et al. Study of deformation characteristics of diaphragm wall induced by deep large excavation in soft soil region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(S2): 245 - 253. (in Chinese))
- [20] 张旷成, 李继民. 杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 338 - 342. (ZHANG Kuang-cheng, LI Ji-min. Accident analysis for “08.11.15” foundation pit collapse of Xianghu Station of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 338 - 342. (in Chinese))