

主动控制轴力作用下基坑围护结构强度研究

孙九春¹, 盛健超², 王哲², 姚泽伟²

(1. 腾达建设集团股份有限公司, 上海 200122; 2. 浙江工业大学, 浙江 杭州 310012)

摘要: 伺服钢支撑可通过主动补偿损失轴力控制基坑变形, 虽应用良多但对其作用的围护结构强度问题研究甚少。基于力学原理, 采用增量法对不同钢支撑轴力作用下的围护结构强度进行计算, 得到了不同工况作用下围护结构的弯矩、剪力变化规律。以上海浦东南路站2号出入口基坑和浦东南路站基坑工程为依托, 采用Plaxis 2D数值模拟并得到了不同伺服钢支撑轴力施加工况以及极限承载状态轴力组合工况下的围护结构内力分布。结果表明, 在伺服钢支撑轴力逐渐增大作用下, 围护结构迎土侧弯矩逐渐增大, 背土侧弯矩先减小后增大, 剪力先减小再增大, 最大弯矩与最大剪力均未超过地连墙可承受极限值, 背土侧配筋需结合伺服钢支撑轴力相应提高配筋率; 各伺服钢支撑极限承载组合工况中若干工况超过地连墙设计极限值, 采用伺服控制系统不可依靠单一增加作用力来提高主动控制效果。

关键词: 伺服钢系统; 围护结构强度; 围护结构内力; 数值分析; 极限承载轴力; 主动控制; 基坑工程

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)02-0133-11

Investigating the strength of foundation pit bracing structure with active control of axial force

SUN Jiu-chun¹, SHENG Jian-chao², WANG Zhe², YAO Ze-wei²

(1. Tengda Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200122, China; 2. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: The servo steel strut can control the deformation of the foundation pit by actively compensating for the lost axial force. Although it has been widely used, there is little research on the strength of the bracing structure that it acts on. Based on the principle of mechanics, the incremental method was used to calculate the strength of the bracing structure under different axial forces of the steel strut, and thus, the changes in the bending moment and shear force of the bracing structure were obtained for different working conditions. Based on the foundation pit of the No. 2 entrance and exit of Shanghai Pudong South Road Station and the foundation pit of Pudong South Road Station, numerical simulation was carried out using Plaxis 2D. The internal force distributions of the bracing structure were obtained under different working conditions of increasing the axial force on the servo steel strut and axial force combination at the ultimate load state. When the axial force on the servo steel strut increased, the bending moment on the soil side of the bracing structure gradually increased, but the bending moment on the excavated side first decreased and then increased. Meanwhile, the shear force first decreased and then increased. Neither the maximum bending moment nor the maximum shear force exceeded the bearing capacity of the diaphragm wall. The results also suggested that the number of steel reinforcement at the excavated side of the diaphragm wall needs to be increased accordingly while the axial force of the servo steel strut increased. Some of the working conditions in the ultimate load combinations of servo steel struts exceeded the design limit of the diaphragm wall. The beneficial effect of the servo control system cannot be always achieved by simply increasing the axial force.

Key words: servo steel strut system; strength of bracing structure; internal force of bracing structure; numerical analysis; ultimate bearing axial force; active control; foundation pit engineering

0 引言

城市经济增长、人口扩增促使轨道交通系统极

力发展^[1]。我国地下空间的发展已具有一定规模, 其中安全问题占据的地位愈发重要^[2]。在基坑施工的安全问题中, 基坑围护结构变形往往是工程师最

为关心的一点。坑内支撑系统装卸便捷,可有效控制围护结构侧向变形,已被大量采用^[3]。对于支撑系统,混凝土支撑由于工期较长,在各类深基坑中通常只设置1~2道,而钢支撑具有工期短、可预加轴力等优点,因此普遍应用于地铁车站、高层建筑等超深基坑的支护体系中^[4-5]。但常规钢支撑由于现场施工不当、应力松弛以及塑性变形等因素影响,可能会造成预应力损失,降低控制变形的能力^[6],并且具有无法针对不同工况实时增加轴力、轴力施加与释放精度差、人工监测轴力依赖性强等缺点^[7-8],在这种情况下伺服钢支撑应运而生。

贾坚等^[9]首次研发并在上海一深基坑中应用了钢支撑轴力伺服系统,在控制相邻隧道以及基坑围护结构侧向变形上取得显著成果。顾国明^[10]在上海一邻近隧道基坑采用钢支撑液压伺服系统并详细介绍了其结构及工作原理,成功应用于多个工程。黄彪等^[11]基于弹性地基梁法,采用非极限土压力模型说明钢支撑轴力补偿后地下连续墙变形控制效果较好,但迎土侧地连墙弯矩显著增大。孙九春等^[12]依托实际工程探究伺服钢支撑,兼顾侧向变形控制与围护强度的分区设置方式。曹虹等^[13]提出了零位移法以及双控法来确定钢支撑轴力的方式。但上述研究多为伺服钢支撑在实际工程中的应用效果,又或是对伺服支撑如何布置以及伺服支撑轴力的确定,关于伺服钢支撑作用下轴力发生改变时地下连续墙弯矩、受力特性等问题的讨论与研究却鲜有报道。

本文基于力学原理对伺服钢支撑轴力作用下的围护结构强度控制策略进行了探讨,并基于增量法对围护结构强度控制进行分析,探究伺服钢支撑轴力作用下围护结构内力变化规律;依托上海地铁浦东南路站2号出入口基坑和浦东南路站基坑工程,采用Plaxis 2D数值模拟软件对不同伺服钢支撑轴力施加工况以及极限承载状态轴力组合工况下的围护结构内力分布进行探究,可为伺服钢支撑运用下的地连墙强度问题打下坚实基础,为同类工程提供借鉴。

1 伺服钢支撑轴力作用下的围护结构强度控制策略

在面对数量增长且深度渐深的各类基坑时,伺服钢支撑可有效补偿轴力损失,并有效控制基坑变形。虽广泛使用,但针对伺服钢支撑轴力作用下围护结构的弯矩和剪力变化规律则研究较少。

针对优化伺服钢支撑使用方法以及在特殊工

况下围护结构设计时未考虑伺服钢支撑轴力作用产生的内力变化而造成围护结构损伤甚至破坏的情况,本节先以力学原理阐述轴力作用下的围护结构强度问题,再通过增量法来验证其变化规律。

1.1 基于力学原理的围护结构强度计算简图

以基坑架设前2道伺服钢支撑时围护结构的内力变化为例(首道撑为混凝土支撑),图1~7给出了只考虑支撑轴力作用、只考虑围护结构背部水土压力作用、考虑支撑轴力与水土压力共同作用以及支撑轴力增大后的弯矩剪力计算示意图。

由图1~7可知,单纯轴力作用下弯矩为直线图,可视为简支梁,土弹簧受拉退出工作。水土压力作用下土弹簧发挥作用,弯矩图为曲线图,二者叠加可得最终弯矩图。其中,水土压力下的弯矩图由增量法得到,当伺服钢支撑轴力逐渐增大时,围护结构的正弯矩会减小至弯矩反向。单纯轴力作用与单纯水土压力作用下的围护结构剪力作用方向相反,在支撑轴力不断增大的过程中,围护结构剪力会经历先减小而后逐步增大的过程。

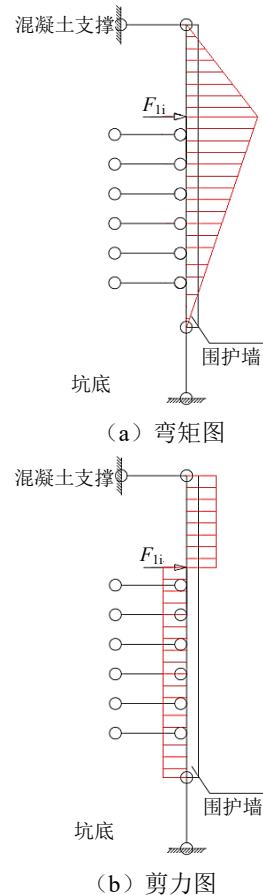


图1 第1道伺服钢支撑轴力作用下的结构弯矩和剪力图(只考虑轴力作用)

Fig. 1 Schematic diagram of the structural bending moment and shear force induced by the axial force of the first servo steel strut (only considering the effect of axial force)

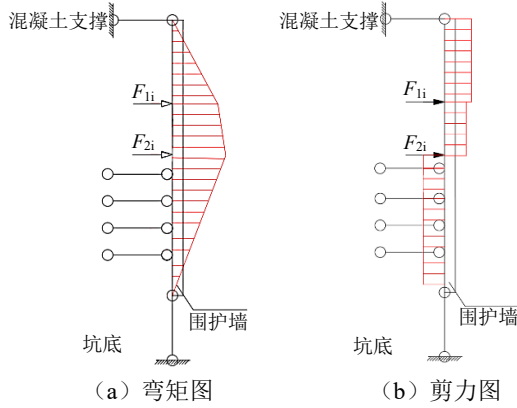


图 2 前 2 道伺服钢支撑轴力作用下的结构弯矩和剪力示意图 (只考虑轴力作用)
 Fig. 2 Schematic diagram of the structural bending moment and shear force induced by the axial forces of the first two servo steel strut (only considering the effect of axial force)

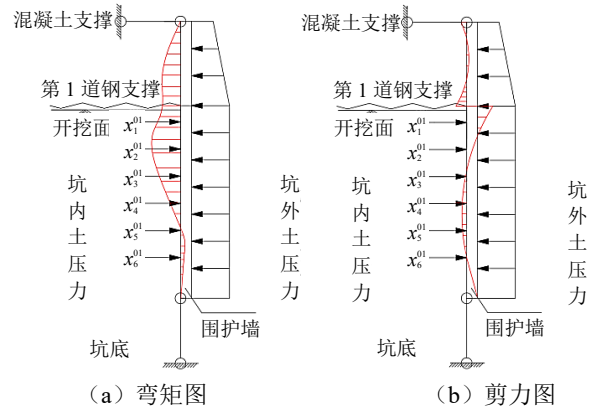


图 5 开挖至第 1 道伺服钢支撑处结构弯矩和剪力示意图 (考虑轴力与水土压力共同作用)
 Fig. 5 Schematic diagram of the structural bending moment and shear force after the soil above the first servo steel strut is excavated (considering the combined effect of axial force, water pressure, and soil pressure)

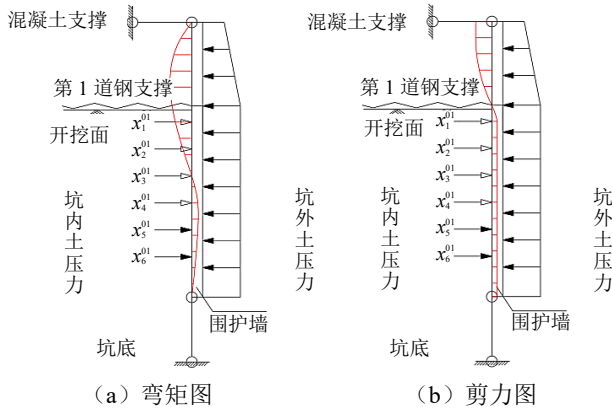


图 3 开挖至第 1 道伺服钢支撑处结构弯矩和剪力示意图 (只考虑水土压力作用)
 Fig. 3 Schematic diagram of the structural bending moment and shear force after the soil above the first servo steel strut is excavated (only considering the effect of water and soil pressure)

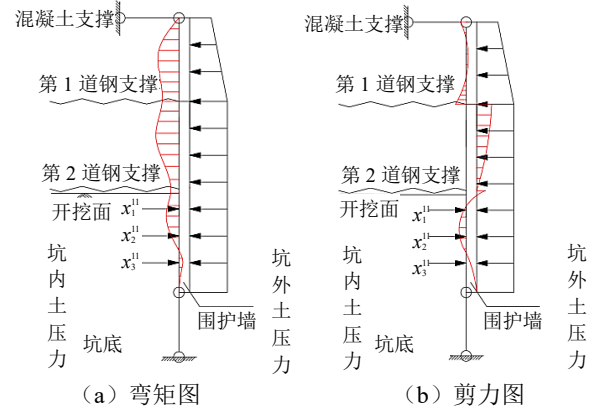


图 6 开挖至第 2 道伺服钢支撑处结构弯矩和剪力示意图 (考虑轴力与水土压力共同作用)
 Fig. 6 Schematic diagram of the structural bending moment and shear force after the soil above the second servo steel strut is excavated (considering the combined effect of axial force, water pressure, and soil pressure)

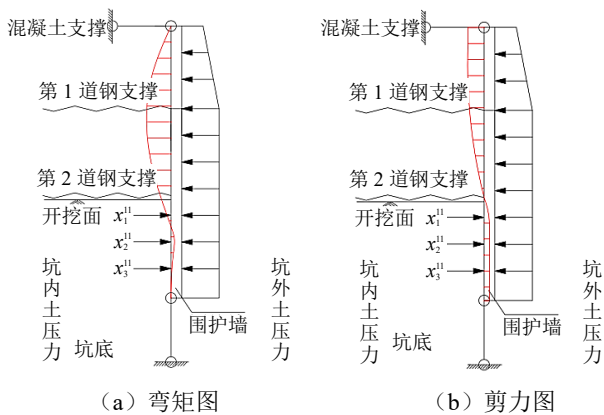


图 4 开挖至第 2 道伺服钢支撑处结构弯矩和剪力示意图 (只考虑水土压力作用)
 Fig. 4 Schematic diagram of the structural bending moment and shear force after the soil above the second servo steel strut is excavated (only considering the effect of water and soil pressure)

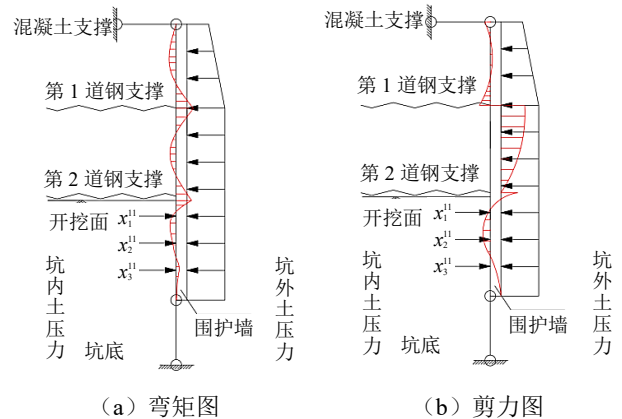


图 7 前 2 道伺服钢支撑轴力逐渐增大后的结构弯矩和剪力变化示意图
 Fig. 7 Schematic diagram of the structural bending moment and shear force after the axial forces of the first two servo steel struts are increased

1.2 不同轴力作用下围护结构弯矩和剪力变化趋势

采用增量法在实际的开挖工程中考虑支撑架设置的合理性已得到证明^[14], 针对 1.1 节的计算模型, 本节将采用增量法来定性地对钢支撑轴力作用下的围护结构内力进行分析。其中, 钢支撑为 $\Phi 800 \times 20$, 且极限承载能力为 4 000 kN, 围护墙厚为 0.8 m, 所用工况如表 1 所示。

表 1 工况描述表

Table 1 Details of the working condition

工况	工况描述	轴力施加
工况 1	首道混凝土支撑, 单道钢支撑, 间距 3.5 m	钢支撑轴力从 0 加载至极限值 3 900 kN, 共加载 13 次, 每次 300 kN
工况 2	首道混凝土支撑, 2 道钢支撑, 间距 3.5 m	钢支撑轴力从 0 加载至极限值 3 900 kN, 共加载 13 次, 每次 300 kN

图 8 为工况 1 围护墙弯矩及剪力变化图, 图 9 为工况 2 围护墙弯矩及剪力变化图。由图可见, 在不同钢支撑轴力作用下, 工况 1 与工况 2 地连墙的最大正弯矩先减小后增大, 最大负弯矩一直增大, 最大正剪力先减小后增大, 最大负剪力先增大后减小。在实际工程中, 地连墙总是于产生侧向变形后再架设支撑增加轴力, 在此种情况下, 初始增加钢支撑轴力对围护结构侧向变形是有利的, 但随着所需轴力加大, 围护结构负向弯矩也逐渐增加, 此时对地连墙的安全是不利的。因为在软土地区由于时间效应的存在, 围护结构的侧向变形会逐渐增加, 所需伺服钢支撑的轴力通常相比预计算值更大, 综上 2 种情况需增加地连墙的负向配筋。

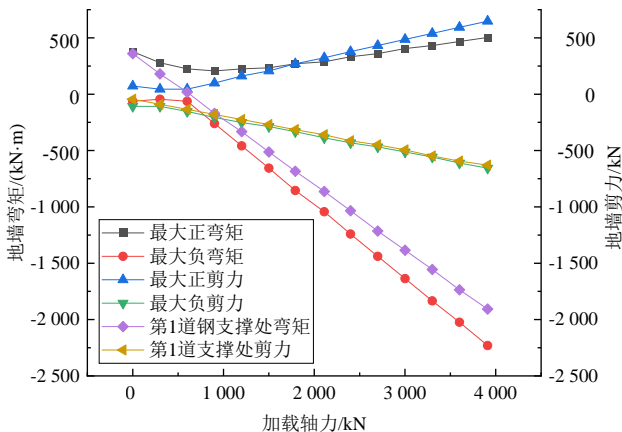


图 8 工况 1 围护墙弯矩及剪力变化图

Fig. 8 Variation of bending moment and shear force of the bracing wall under working condition 1

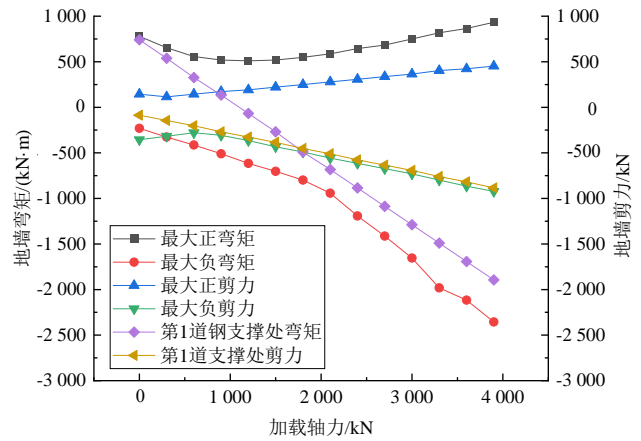


图 9 工况 2 围护墙弯矩及剪力变化图

Fig. 9 Variation of bending moment and shear force of the bracing wall under working condition 2

2 数值模拟

本节首先对实际工程中的围护结构强度进行复核, 并通过有限元软件 Plaxis 2D 对伺服钢支撑轴力作用下的地下连续墙受力特性进行研究, 给出了不同组合工况的支撑轴力以及伺服钢支撑极限承载状态下的围护结构内力分布变化规律。

2.1 工程背景

本节数值模拟计算分别依托 2 个案例, 其中案例 1 为上海地铁浦东南路站 2 号出入口基坑, 共计 5 道支撑, 首道支撑为混凝土支撑, 其余 4 道为伺服钢支撑, 地连墙厚度为 0.8 m, 地基加固方式为高压旋喷桩贴边加抽条加固, 基坑北侧与既有车站共用地连墙, 南侧地连墙距砖木混合结构小区 27 m, 按照 40 kPa 施加荷载, 立面图如图 10 所示。案例 2 为上海地铁浦东南路站基坑, 浦东南路站共计 6 道支撑, 首道支撑与第 4 道支撑为混凝土支撑, 其余 4 道支撑为钢支撑, 地连墙厚度为 1 m, 地基加固方式为高压旋喷桩贴边加抽条加固, 立面图如图 11 所示。有限元数值模型如图 12 所示。本文采用软土硬化土体本构模型对开挖过程及采用伺服钢支撑控制围护结构水平位移的过程进行计算, 所采用的参数由表 2 给出。其中, 软土硬化模型中黏性土剪胀角 ψ 为 0, 卸载再加载泊松比 ν_{ur} 取为 0.2, 模量应力水平相关的幂指数 m 取 0.8, 参考应力 P^{ref} 为 100 kPa, 破坏比 R_f 取 0.9。

2.2 围护结构强度验算

由于伺服钢支撑上施加了较大的主动轴力, 需对地下连续墙 (包括与既有车站共用的地连墙) 的强度进行验算。

表 2 土体模型参数表
Table 2 Parameters of the soil model

土层名称	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c/kPa	$\phi/(\text{°})$	K_0	E_s/MPa	E_{50}/MPa	E_{ur}/MPa
②褐黄-灰黄色粉质黏土	18.2	20	17.5	0.47	9.7	9.7	48.5
③ ₁ 灰色淤泥质粉质黏土	17.5	12	19.5	0.46	9.2	9.2	46.5
③ ₂ 夹砂质粉土	18.6	6	29.0	0.45	7.5	7.5	37.5
④淤泥质黏土	16.7	14	12.0	0.58	21.6	21.6	107.8
⑤ ₁ 灰色粉质黏土	18.0	16	17.0	0.54	5.8	5.8	28.8
⑥暗绿-草黄色粉质黏土	19.5	46	16.0	0.46	8.2	8.2	41.1
⑦ _{1,2} 草黄-灰黄色砂质粉土	18.5	2	31.5	0.37	13.7	13.7	68.6
⑧粉砂	18.8	1	33.0	0.34	25.3	25.3	126.6

单位: mm

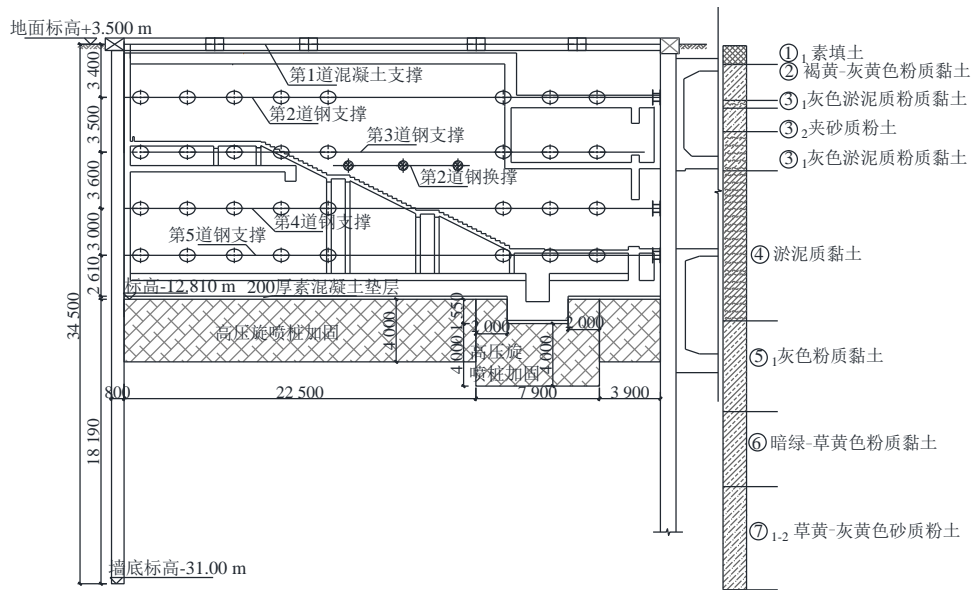


图 10 上海地铁浦东南路站 2 号出入口基坑立面示意图

Fig. 10 Section of the foundation pit of the No. 2 entrance of Pudong South Road of Shanghai Metro Station

单位: mm

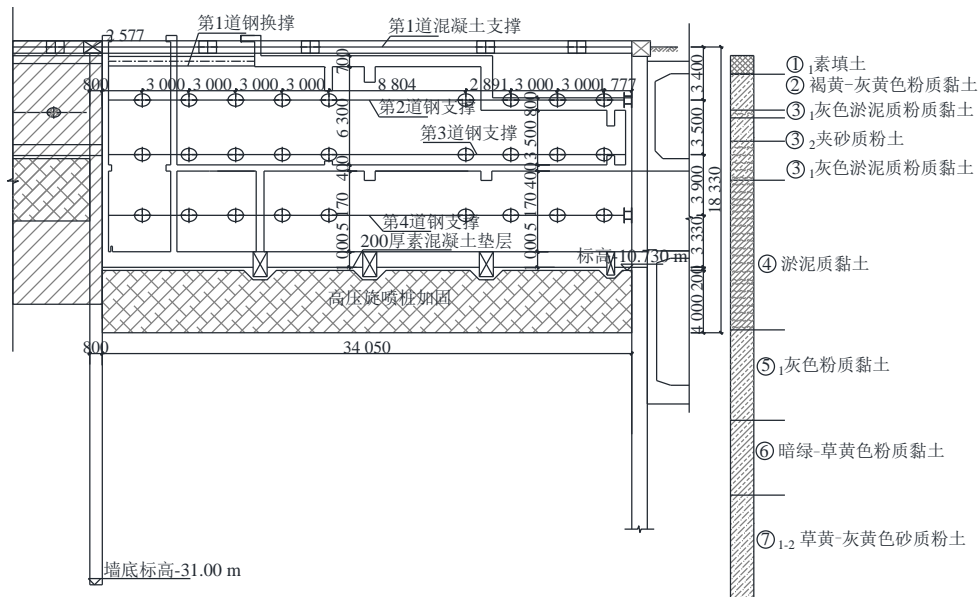


图 11 上海地铁浦东南路地铁站基坑立面示意图

Fig. 11 Section of the foundation pit of Pudong South Road Station of Shanghai Metro

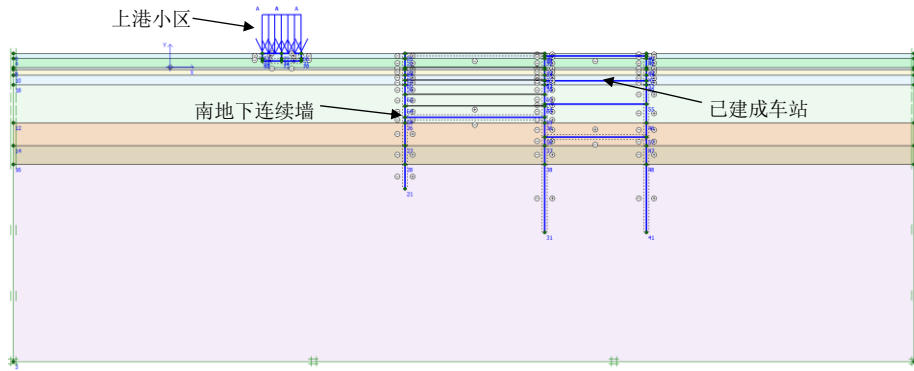


图 12 有限元计算模型示意图

Fig. 12 Schematic of the finite element calculation model

基于国家标准《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010, 2015 年版)^[15] 计算后得到的地连墙极限弯矩结果由表 3 给出, 极限剪力结果由表 4 给出, 伺服钢支撑极限轴力结果由表 5 给出。

表 3 地下连续墙极限弯矩表

Table 3 Limiting bending moment of the diaphragm walls

位置/受力	迎土侧极限弯矩/ (kN·m)	背土侧极限弯矩/ (kN·m)
浦东南路站 2 号出入口 基坑地连墙	1 690	2 595
浦东南路站基坑地连墙	2 684	3 704

表 4 地下连续墙极限剪力表

Table 4 Limiting shear force of the diaphragm walls

位置/受力	极限剪力/kN
浦东南路站 2 号出入口基坑地连墙	2 472
浦东南路站基坑地连墙	3 132

表 5 钢支撑极限轴力表

Table 5 Limiting axial force of the steel struts

位置/受力	支撑极限轴力/kN
浦东南路站 2 号出入口基坑地连墙	44 974
浦东南路站基坑地连墙	44 362

2.3 伺服钢支撑轴力对围护结构内力的影响

为探究伺服钢支撑在不同轴力作用下的围护结构内力变化规律, 数值模拟计算采用的轴力按照不额外施加伺服轴力条件下的实际工程设计值百分比进行施加, 浦东南路站 2 号出入口基坑伺服钢支撑轴力如表 6 所示, 浦东南路站基坑伺服钢支撑轴力如表 7 所示。

上述两基坑围护结构的内力最大值汇总于表 8~9 中。浦东南路站 2 号出入口(案例 1)基坑围护结构弯矩及剪力包络图见图 13~14, 浦东南路站基坑(案例 2)围护结构弯矩和剪力包络图见图 15~16。

表 6 浦东南路站 2 号出入口基坑支撑施加轴力表

Table 6 Axial forces applied to the struts for the excavation of No. 2 entrance and exit of Pudong South Road Station kN

位置/受力	60% 轴力	80% 轴力	100% 轴力	120% 轴力	140% 轴力
第 1 道钢支撑	262	350	437	525	612
第 2 道钢支撑	330	440	550	660	770
第 3 道钢支撑	349	466	582	699	815
第 4 道钢支撑	395	526	658	789	921

表 7 浦东南路站基坑支撑施加轴力表

Table 7 Axial forces applied to the struts for the excavation of Pudong South Road Station kN

位置/工况	60% 轴力	80% 轴力	100% 轴力	120% 轴力	140% 轴力
第 1 道钢支撑	323	430	538	645	753
第 2 道钢支撑	342	456	570	684	799
第 3 道钢支撑	509	679	849	1 019	1 189
第 4 道钢支撑	298	397	496	595	694

由表 8~9、图 13~16 可以看出, 随着支撑轴力增加, 围护结构的弯矩和剪力均有不同程度增大; 支撑轴力的改变对各支撑处围护结构的内力影响最为明显, 距离该道支撑越远, 支撑轴力变化所产生的影响幅度越小, 且不同轴力对 25 m 以下的围护结构内力影响均较小; 随着伺服钢支撑轴力的增大, 围护结构在前 2 道支撑范围内的正弯矩先减小, 在后 2 道支撑范围内的正弯矩再增大, 剪力变化规律则与之相反。在背侧土压力不变的条件下, 轴力较小时, 支撑轴力与一部分土压力相抵消, 随着轴力增大, 产生弯矩的主要作用目标转为较大的轴力; 最大弯矩与最大剪力均未超过原围护结构可承受极限值。

计算结果表明常规支撑轴力对围护结构强度产生的影响在容许范围之内, 但考虑到工程的复杂性及实际施工中的人为误差, 有必要研究极限钢支撑轴力对围护结构内力的影响。

表 8 浦东南路站 2 号出入口基坑内力最大值表
Table 8 Maximum internal forces of the excavation of the entrance of Pudong South Road Station No. 2

受力/工况	60%	80%	100%	120%	140%
	轴力	轴力	轴力	轴力	轴力
迎土侧最大负弯矩/(kN·m)	-477	-744	-795	-1 011	-1 167
背土侧最大正弯矩/(kN·m)	872	974	1 050	1 111	1 241
迎土侧最大负剪力/kN	-346	-456	-580	-710	-829
背土侧最大正剪力/kN	139	190	241	298	351

表 9 浦东南路地铁站基坑内力最大值表

Table 9 Maximum internal forces of the excavation of Pudong South Road Station

受力/工况	60%	80%	100%	120%	140%
	轴力	轴力	轴力	轴力	轴力
迎土侧最大负弯矩/(kN·m)	-888	-821	-1 012	-1 267	-1 591
背土侧最大正弯矩/(kN·m)	1 398	1 256	1 132	1 066	1 083
迎土侧最大负剪力/kN	-352	-386	-453	-629	-710
背土侧最大正剪力/kN	482	506	551	534	624

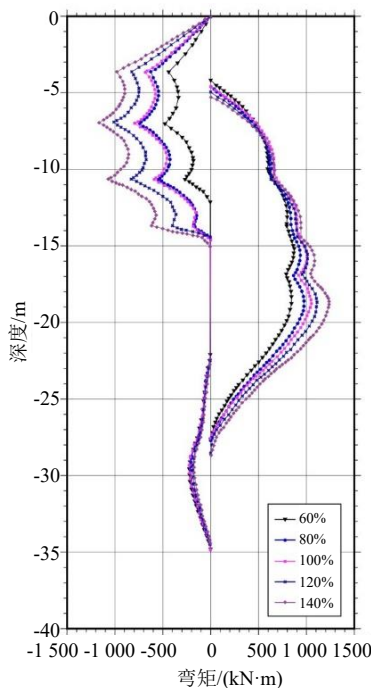


图 13 案例 1: 60%~140%预加轴力对应轴力下围护结构弯矩包络对比图
Fig. 13 Case 1: Bending moment envelope of the bracing structure under 60% to 140% of prescribed axial force

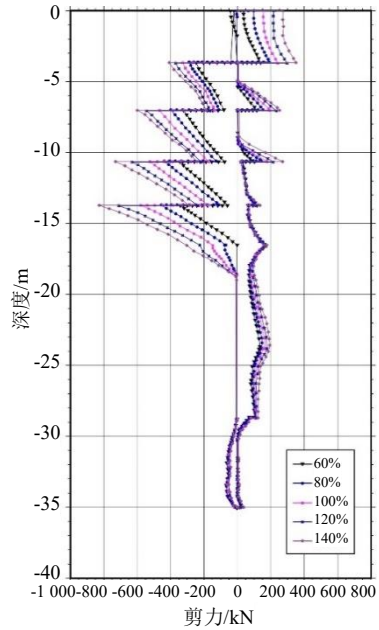


图 14 案例 1: 60%~140%预加轴力对应轴力下围护结构剪力包络对比图
Fig. 14 Case 1: Shear force envelope of the bracing structure under 60% to 140% of prescribed axial force

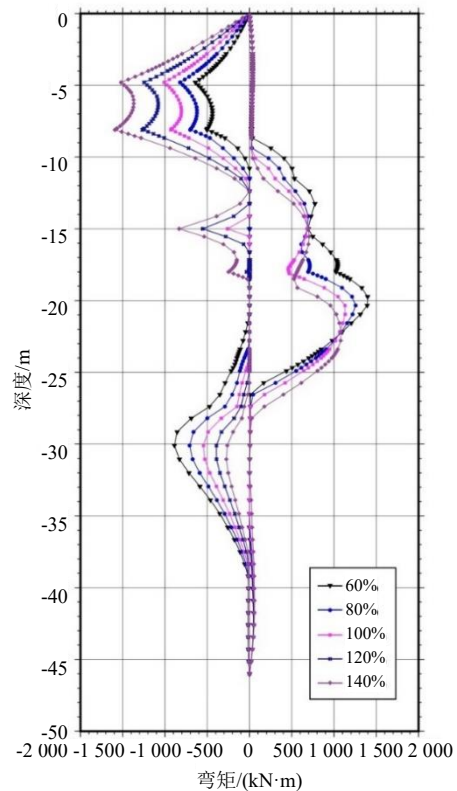


图 15 案例 2: 60%~140%预加轴力对应轴力下围护结构弯矩包络对比图
Fig. 15 Case 2: Bending moment envelope of the bracing structure under 60% to 140% of prescribed axial force

2.4 极限伺服钢支撑轴力对围护结构内力的影响

基坑开挖过程中, 根据变形控制要求采用单一或多道伺服钢支撑施加轴力以达到理想效果。由 2.3 节分析已知, 常规变化范围内的伺服钢支撑轴

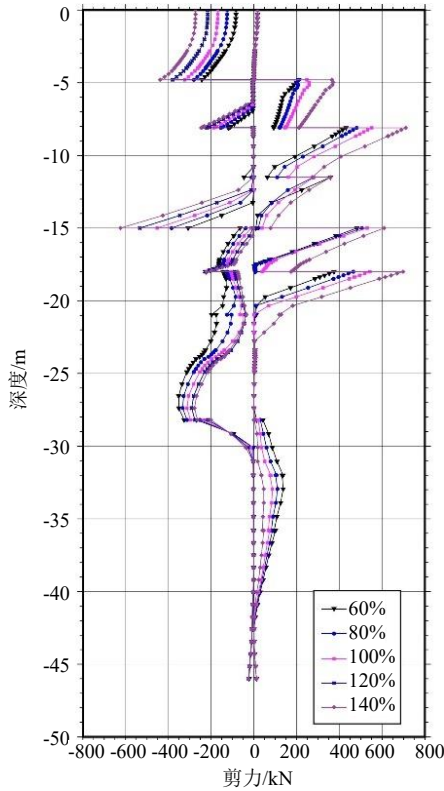


图 16 案例 2: 60%~140%预加轴力对应轴力下围护结构剪力包络对比图

Fig. 16 Case 2: Shear force envelope of the bracing structure under 60% to 140% of prescribed axial force

力不会使围护结构的内力超过承载极限, 此小节则对不同极限支撑轴力工况组合下的围护结构内力的影响展开分析。

Φ609 钢支撑极限轴力为 3 000 kN, Φ800 钢支撑极限轴力为 4 000 kN, 计算工况由表 10 所示, 案例 1 各工况剪力弯矩变化见图 17~18, 案例 2 各工况剪力弯矩变化见图 19~20, 各工况围护结构内力极值汇总由表 11~12 所示。

由上述图表可知, 极限轴力施加时围护结构弯矩均于各支撑处附近出现峰值, 在不同极限轴力施加方式下, 案例中所有工况的剪力皆满足设计计算要求, 但案例 1 中的工况 1、4、7~13 以及案例 2 中的工况 1、7~8、11~12 中的弯矩值全部超过围护结构极限设计值, 盲目增加轴力来控制围护结构侧向变形存在隐患。此外根据计算结果, 开挖至坑底时, 第 2 道支撑处的围护结构弯矩易出现最大值, 而第 2 道与第 4 道支撑处的剪力易出现最大值。由于轴力间具有相干性, 其他支撑施加轴力时会对已施加轴力支撑处的内力产生增强效应, 其中位于最上方的第 1 道支撑处受其他支撑轴力的内力影响最为明显, 且第 1 道支撑轴力施加产生的变化幅度最大。因此实际工程中通过轴力控制围护结构侧向变

形时应注意钢支撑的安全控制和围护结构的强度控制, 第 1 道伺服支撑所加轴力不宜过大, 欲整体采用高轴力对围护结构变形进行控制前应增加负向配筋, 并以第 2 道支撑处为重点加强区域。

表 10 计算工况表

Table 10 Working conditions for calculation

工况	工况内容
1	第 1 道与第 2 道钢支撑施加至极限轴力
2	第 1 道与第 3 道钢支撑施加至极限轴力
3	第 1 道与第 4 道钢支撑施加至极限轴力
4	第 2 道与第 3 道钢支撑施加至极限轴力
5	第 2 道与第 4 道钢支撑施加至极限轴力
6	第 3 道与第 4 道钢支撑施加至极限轴力
7	第 1、2、3 道钢支撑施加至极限轴力
8	第 1、2、4 道钢支撑施加至极限轴力
9	第 1、3、4 道钢支撑施加至极限轴力
10	第 2、3、4 道钢支撑施加至极限轴力
11	第 1、2、3、4 道钢支撑施加至极限轴力
12	第 1 道钢支撑轴力施加至极限轴力
13	第 2 道钢支撑轴力施加至极限轴力
14	第 3 道钢支撑轴力施加至极限轴力
15	第 4 道钢支撑轴力施加至极限轴力

表 11 案例 1: 极限轴力组合下各工况内力最大值表

Table 11 Case 1: Maximum values of internal force under different working conditions when the axial force combination reaches the limiting value

工况	迎土侧最大	背土侧最大	迎土侧最大负	背土侧最大正
	负剪力/kN	正剪力/kN	弯矩/(kN·m)	弯矩/(kN·m)
1	-620	745	-2 284	1 409
2	-461	621	-1 157	1 169
3	-420	590	-1 062	1 060
4	-417	632	-1 847	1 155
5	-373	556	-1 003	946
6	-325	395	-795	848
7	-792	1 264	-2 805	1 812
8	-802	1 141	-2 384	1 531
9	-679	1 145	-1 758	1 448
10	-741	1 267	-2 385	1 544
11	-792	1 338	-2 770	2 000
12	-636	779	-1 737	1 394
13	-627	783	-1 766	1 137
14	-615	772	-1 195	852
15	-712	662	-777	1 096

表 12 案例 2: 极限轴力组合下各工况内力最大值表

Table 12 Case 2: Maximum values of internal force under different working conditions when the axial force combination reaches the limiting value

工况	迎土侧最大 负剪力/kN	背土侧最大 正剪力/kN	迎土侧最大负 弯矩/(kN·m)	背土侧最大正 弯矩/(kN·m)
1	-830	1 164	-3 500	2 184
2	-664	1 234	-2 554	2 068
3	-878	796	-2 515	1 368
4	-824	1 091	-2 050	1 321
5	-813	814	-2 075	1 061
6	-1 145	1 053	-1 870	1 192
7	-766	1 153	-3 168	1 720
8	-796	1 163	-3 185	2 008
9	-915	805	-2 423	1 390
10	-972	1 145	-2 050	1 095
11	-894	1 154	-3 168	1 471
12	-712	774	-2 700	1 953
13	-745	813	-2 406	1 839
14	-1 005	945	-1 517	997
15	-913	658	-750	1 259

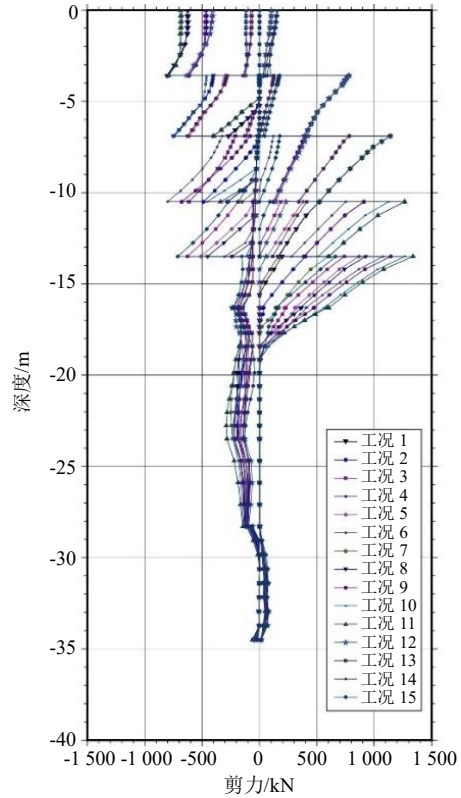


图 18 案例 1: 各工况下对应围护结构剪力包络对比图
Fig. 18 Case 1: Shear force envelopes of the bracing structure under various working conditions

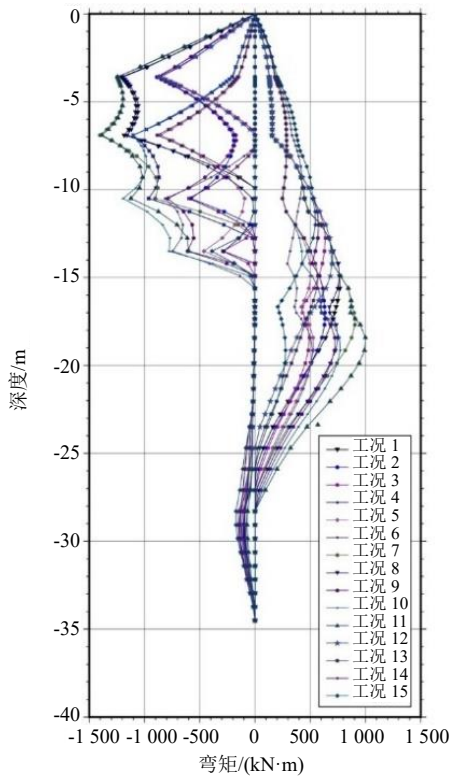


图 17 案例 1: 各工况下对应围护结构弯矩包络对比图
Fig. 17 Case 1: Bending moment envelopes of the bracing structure under various working conditions

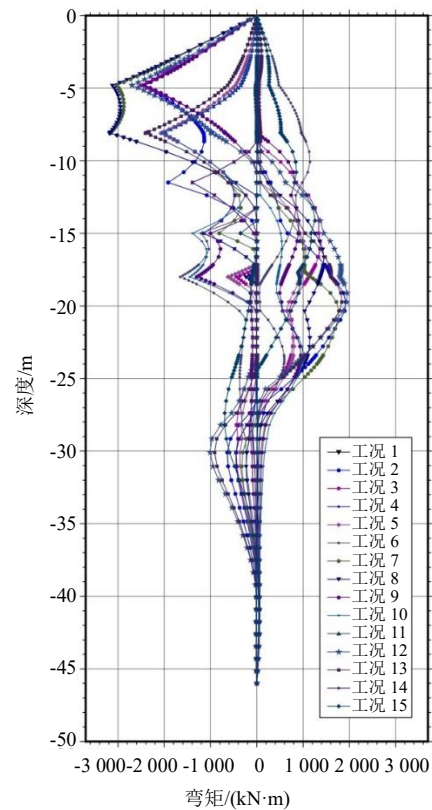


图 19 案例 2: 各工况下对应围护结构弯矩包络对比图
Fig. 19 Case 2: Bending moment envelopes of the bracing structure under various working conditions

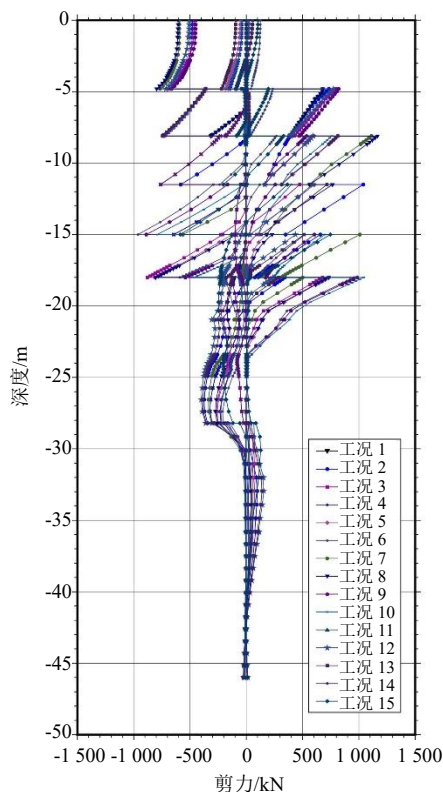


图 20 案例 2: 各工况下对应围护结构剪力包络对比图
Fig. 20 Case 2: Shear force envelopes of the bracing structure under various working conditions

3 结 论

本文针对伺服钢支撑作用下的地下连续墙强度问题, 基于力学原理, 通过增量法对地连墙弯矩进行了计算, 并以 2 个实际案例为依托对不同伺服钢支撑轴力条件下以及不同钢支撑极限承载轴力组合工况进行了数值分析, 得到如下结论:

(1) 在钢支撑轴力作用下地连墙弯矩会先减小后增大, 剪力会先减小后增大, 在考虑到软土时间效应的同时, 需增加地连墙的负向配筋以保障围护结构在伺服支撑轴力作用下的安全性。

(2) 随着伺服钢支撑轴力在设计轴力一定范围内的增大, 围护结构正弯矩在前 2 道支撑范围内先减小, 在后 2 道支撑范围内再增大, 剪力变化规律则与之相反。最大弯矩与最大剪力分别出现在第 2 道和第 4 道支撑处, 且均未超过围护结构可承受极限值。

(3) 围护结构受不同极限轴力组合作用时, 若干工况下所受的内力超过设计极限值, 控制围护结构侧向变形时应注意钢支撑的安全控制和围护结构的强度控制。综合考虑围护结构内力影响, 第 1 道伺服支撑所加轴力不宜过大, 若采用高轴力对围

护结构变形进行控制前应增加负向配筋, 并以第 2 道支撑处为重点加强区域。

参考文献

- [1] 田野, 刘宏, 张智峰, 等. 中国地下空间学术研究发展综述[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1596-1610.
TIAN Ye, LIU Hong, ZHANG Zhi-feng, et al. A summary of the development of underground space academic research in China[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1596-1610.
- [2] 彭建, 柳昆, 阎治国, 等. 地下空间安全问题及管理对策探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(1): 1-7.
PENG Jian, LIU Kun, YAN Zhi-guo, et al. Discussion on safety problems of underground space and appropriate managing measures[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(1): 1-7.
- [3] 王卫东, 刘国彬, 徐中华, 等. 基坑工程手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
WANG Wei-dong, LIU Guo-bin, XU Zhong-hua, et al. Excavation Engineering Manual[M]. Second Edition. Beijing: China Construction Industry Press, 2009.
- [4] 顾国明, 陆云, 王正平, 等. 深基坑钢支撑轴力实时补偿与监控系统设计[J]. 建筑机械化, 2010, 31(11): 67-69.
GU Guo-ming, LU Yun, WANG Zheng-ping, et al. The real-time compensation and monitoring system design on steel support axial force in deep foundation pit[J]. Construction Mechanization, 2010, 31(11): 67-69.
- [5] LI H P. Research of the underground water level prediction model in deep foundation pit engineering[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3547(675-677): 901-904.
- [6] 李祥, 茆丽霞, 刘建刚. 环境温度和混凝土徐变对钢筋混凝土支撑轴力的影响分析[J]. 施工技术, 2014, 43(增刊1): 178-179.
LI Xiang, MAO Li-xia, LIU Jian-gang. Influence analysis of surrounding temperature and concrete creep to RC support's axis force[J]. Construction Technology, 2014, 43(S1): 178-179.
- [7] 张秀川, 郑彬, 闫磊, 等. 伺服系统钢支撑同步施工技术临近地铁狭长深基坑中的应用[J]. 施工技术, 2016, 45(19): 23-26.
ZHANG Xiu-chuan, ZHENG Bin, YAN Lei, et al.

- Application of synchronous construction technology of servo system steel support in deep foundation excavation near subway[J]. *Construction Technology*, 2016, 45(19): 23-26.
- [8] 程展林, 吴忠明, 徐言勇. 砂基中泥浆盾构法隧道施工开挖面稳定性试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2001, 18(5): 53-55, 64.
CHENG Zhan-lin, WU Zhong-ming, XU Yan-yong. Experimental study on stability of tunnel excavation surface in sand foundation by slurry shield method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2001, 18(5): 53-55, 64.
- [9] 贾坚, 谢小林, 罗发扬, 等. 控制深基坑变形的支撑轴力伺服系统[J]. *上海交通大学学报*, 2009, 43(10): 1589-1594.
JIA Jian, XIE Xiao-lin, LUO Fa-yang, et al. Support axial force servo system in deep excavation deformation control[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2009, 43(10): 1589-1594.
- [10] 顾国明. 液压伺服系统在深基坑施工中的应用[J]. *建筑机械化*, 2010, 31(12): 49-51, 6.
GU Guo-ming. Application of hydraulic servo system in deep foundation pit construction[J]. *Construction Mechanization*, 2010, 31(12): 49-51, 6.
- [11] 黄彪, 李明广, 侯永茂, 等. 轴力自补偿支撑对支护结构受力变形影响研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(增刊2): 359-365.
HUANG Biao, LI Ming-guang, HOU Yong-mao, et al. Effect of auto-compensating steel struts on stress and deformation behaviors of supporting structures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S2): 359-365.
- [12] 孙九春, 白廷辉. 地铁基坑钢支撑轴力伺服系统设置方式研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(增刊1): 195-204.
SUN Jiu-chun, BAI Ting-hui. Study on the setting method of steel supporting axial force servo system for subway foundation pit[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(S1): 195-204.
- [13] 曹虹, 孙九春. 软土基坑钢支撑伺服系统轴力的确定方法研究[J]. *建筑施工*, 2019, 41(5): 754-758.
CAO Hong, SUN Jiu-chun. Research on determination method of axial force of steel support servo system for soft soil foundation pit[J]. *Building Construction*, 2019, 41(5): 754-758.
- [14] 武亚军, 栾茂田, 任汉锋. 深基坑支护设计增量法的理论分析及其应用[J]. *工业建筑*, 2004, 34(9): 1-4.
WU Ya-jun, LUAN Mao-tian, REN Han-feng. Theoretical analysis and applications of the incremental method for design of deep excavation support[J]. *Industrial Construction*, 2004, 34(9): 1-4.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 2015年版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Concrete Structures: GB 50010—2010[S]. 2015 Edition. Beijing: China Construction Industry Press, 2015.