

# 注浆对深基坑支护结构抗震性能的影响分析

李 兵,隋 文,谢 晋

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究地铁深基坑工程中注浆加固方法对地震作用下支护结构的改进情况,为类似的地铁深基坑工程支护结构的保护提供指导依据。方法 针对沈阳市地铁北大营街站现场施工过程中开挖深基坑过程产生的各类监测数据进行整理,基于实地测得的数据使用 MIDAS/GTS NX 进行一定区域范围内场地以及围护结构的建模,分析使用土层加固方式进行施工对地铁车站主体结构的深基坑的支护结构产生的影响。结果 在不同地震波曲线中,其对应的地震加速度变化速率与地震加速度峰值不同,在地震波影响范围内的钢支撑轴力的变化情况不同;钢支撑在受到 EL-centro 波作用时,其轴力最大值随基坑深度加大而增加,且最大值出现在第四层钢支撑处;钢支撑在受到汶川地震波作用时,其轴力最大值随深度加大而减少,最大值出现在第一组钢支撑处。结论 使用土层加固手段施工后,对深基坑支护结构中的钢支撑所受轴力有一定改善作用,但在土层加固区与土层非加固区交接处的位移与受力变化较大。

**关键词** 深基坑;地震作用;支护结构;注浆加固

中图分类号 TU753

文献标志码 A

## Grouting Influence on Seismic Performance of Deep Foundation Pit Supporting Structure

LI Bing, SUI Wen, XIE Jin

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** This paper studies the improvement of grouting reinforcement method in subway deep foundation pit engineering on the supporting structure affected by earthquake, so as to provide a guiding basis for the protection of supporting structure in similar subway deep foundation pit engineering. In view of various monitoring data during the excavation of deep foundation pit during the field construction of Beidaying Street Station in Shenyang, MIDAS / GTS NX is used to model the ground and retaining structure in a certain area based on the field measured data, and the

收稿日期:2021-04-13

基金项目:国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(52027811);辽宁省重点研发计划项目(2019JH8/10100099);沈阳市科技计划项目(20-206-4-13)

作者简介:李兵(1974—),男,教授,博士,主要从事地铁施工监测、结构工程、工程结构抗震等方面研究。

influence of soil reinforcement on the reinforcement structure of deep foundation pit of main structure of subway station is analyzed. In different seismic curves, the corresponding change rate of seismic acceleration is different from the peak value of seismic acceleration, and the change of steel support axial force within the influence range of seismic wave appears different changes; Under the action of El Centro wave, the maximum axial force of steel support increases with the deepening of foundation pit depth, and the maximum axial force appears at the fourth layer of steel support; When steel supports are subjected to Wenchuan earthquake wave, the maximum axial force decreases with the deepening of depth, and the maximum axial force appears at the first group of steel supports. The use of soil layer reinforcement can improve the axial force of steel support in deep foundation pit support structure, but the displacement and stress at the junction of soil layer reinforcement area and soil layer non reinforcement area change sharply.

**Key words:** deep foundation pit; earthquake response; supporting structure; grouting reinforcement

地下城市轨道交通系统对比其他在日常生活中经常使用的交通方式<sup>[1-3]</sup>,有着诸多的优点。但其施工持续时间长,不可控风险多也是应该重点考虑的问题。特别是当发生地震、爆炸等可能对施工进度产生威胁的重大灾害时,会严重威胁地铁深基坑周边的人身安全和施工进度<sup>[4-8]</sup>。现有研究方法有静力法<sup>[9]</sup>、反应位移法<sup>[10]</sup>、动力时程分析法<sup>[11]</sup>、模型试验分析法<sup>[12]</sup>等。

张社荣等<sup>[13]</sup>研究了注浆加固方法应用在盾构隧道的方案,并提出使用 Abaqus 研究不同注浆方法下的地表沉降和管片内变形情况,对注浆加固这一施工方法叙述详细,但其未考虑在遇到地震荷载作用时注浆加固后的结构性能变化;周丁恒等<sup>[14]</sup>对近接地铁条件下深基坑施工方面进行研究,考虑了近接地铁车站和区间隧道的深基坑工程并以深层土体位移、地面沉降、地下水位变化及支撑轴力为研究对象,得出其数值变化规律。但现阶段对注浆加固方法用于深基坑施工中的实际改进情况并未研究,同时对地震荷载作用下该结构性能变化情况研究较少。

综上所述,笔者基于沈阳市正在建设中的地铁四号线北大营街车站主体结构深基坑工程以及其围护结构的实测数据进行数值模拟分析,通过 MIDAS/GTS NX 对其深基坑及其影响范围内的建筑结构进行三维建模,分析地震作用下注浆加固对地铁深基坑支护

结构产生的影响,得出注浆加固施工方式,对地震荷载作用下深基坑支护结构性能有一定改进作用,可以有效提高其使用性能。

## 1 基于现场实际监测数据的有限元分析模型的建立与验证

### 1.1 工程概况

沈阳市地铁四号线北大营街车站主体的深基坑工程,其工程设计将地铁的深基坑工程分成6个步骤进行开挖,在施工现场深基坑围护桩各处的深层水平位移监测点共有16处,其编号为 CX-1~CX-16。同时在支护结构中所设各层钢支撑位置布置轴力监测部位,在文中共设置20个观测点位,其中 ZL1-1 代表该观测点位置布置在围护结构中第一层钢支撑的一号观测点位置,笔者设置深层水平位移监测点平面布置图见图1。深基坑现场支护结构中的钢支撑轴力观测点设置位置与施工区域附近的建筑物位置的布置示意图见图2。

### 1.2 抗震分析模型建立

#### 1.2.1 深基坑参数

笔者严格按照地铁深基坑各个施工步骤进行施工开挖的模拟过程中,对模型中涉及的土体本构模型使用 Mohr-Coulomb 本构准则<sup>[6]</sup>进行模拟,并将建立的有限元模型范围内力学性质相同或相似的土体进行合并。

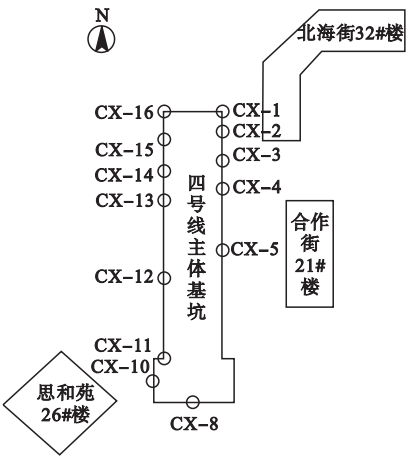


图1 水平位移测点示意图

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal displacement measuring points

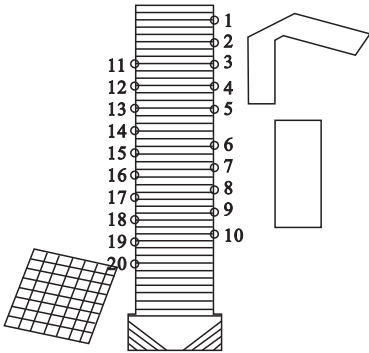


图2 钢支撑观测点位示意图

Fig. 2 Schematic diagram of steel support observation points

模拟过程中具体涉及的各类土层厚度与土层模拟所需要的相关参数为实地测量所得,其具体数值如表1所示。

表1 主要土层参数

Table 1 Main soil layer parameters

地层	土层厚度/m	重力密度 $\gamma/$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	泊松比 $\nu$	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$
杂填土	3.0	19.5	0.35	33.8	11.4	3.5
中粗砂	11.0	20.5	0.35	10.0	26.0	22.0
砾砂	14.0	20.8	0.31	12.2	27.0	26.2
圆砾	22.0	21.0	0.33	11.0	30.0	30.0
花岗岩片	25.0	20.8	0.34	9.0	33.0	29.0

笔者对地铁主体位置的深基坑地下连续墙体结构周边各类土体进行注浆加固,用该种方式改变深基坑周边土体的性质<sup>[16]</sup>。针对该种工况,对地铁主体位置的深基坑地下

连续墙影响范围内5 m宽,15 m深的各类土体进行注浆加固处理,其所得参数为实地测量所得,其注浆加固前后各个土层参数如表2所示。

表2 加固后土层参数表

Table 2 Parameters of soil layer after reinforcement

地层	土层厚度/m	加固后重力 密度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\nu$	$c/\text{kPa}$	$\varphi/(^{\circ})$	$E/\text{MPa}$
杂填土	3	19.0	0.35	20	11.4	3.5
中粗砂	11	20.8	0.33	10	20	11
注浆加固后	14	21.0	0.30	600	40	250

深基坑应使用支护结构进行保护,位于地铁深基坑南侧扩大段范围内的围护桩,采用 $\varphi 1\,200@1\,500$ 钻孔灌注桩。地铁车站标准段施工深基坑范围内的围护桩,采用直径

为1 000 mm,间隔为1 400 mm的钻孔灌注桩,在其北端采用直径为1 000 mm,间隔为1 400 mm的钻孔灌注桩。在钻孔灌注桩之间设置支撑,在支护结构中的第一道支撑材

质为混凝土,其余道材质为钢,基坑支护结构所涉及参数如表 3 所示。

表 3 深基坑支护结构各部部件设计参数

Table 3 Designed part parameters of deep foundation pit supporting structure

部件名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\nu$	$E/\text{GPa}$
钻孔灌注桩	20	0.17	30
混凝土支撑与圈梁	25.5	0.20	32
钢支撑	79	0.30	210
钢围檩	78	0.30	200

笔者将支护结构中使用的支护排桩等效为平板式连续墙,通过刚度转换将支护桩转化为同等刚度下的壁式地下连续墙进行模拟

表 4 施工阶段表

Table 4 Construction stage table

序号	施工阶段	激活部分	钝化部分
1	建立初始应力场	激活原状态土体及周边建筑物部分	土体无;周边建筑物位移为 0
2	地下连续墙施工	等效后地下连续墙	无
3	第一次开挖过程模拟	围护结构中混凝土支撑模型建立	开挖土体第一层
4	第二次开挖过程模拟	围护结构中钢支撑-1;钢围檩-1;模型建立	开挖土体第二层
5	第三次开挖过程模拟	围护结构中钢支撑-2;钢围檩-2;模型建立	开挖土体第三层
6	第四次开挖过程模拟	围护结构中钢支撑-3;钢围檩-3;模型建立	开挖土体第四层
7	第五次开挖工程模拟	围护结构中钢支撑-4;钢围檩-4;模型建立	开挖土体第五层
8	第六次开挖工程模拟	无	开挖土体第六层

1.2.2 场地范围内建筑物参数

沈阳市大东区合作街 26 号思和苑小区公寓楼为开挖深基坑范围内西南角位置现存建筑物,该建筑物为框架结构,建筑物总层数为 28 层,其中包括地下室 2 层,建筑物楼板厚度为 0.2 m,建筑物中桩、梁、板、柱部分,混凝土强度均为 C30,在有限元模拟中,涉及的 C30 混凝土参数主要包括混凝土泊松比、混凝土弹性模量、混凝土重力密度,其参数如下:泊松比为 0.2,弹性模量为 30 GPa,重力密度为 25 kN/m<sup>3</sup>。

沈阳市大东区北海街 32 号楼位于开挖深基坑的东北角,该建筑物采用砖混结构,共有 5 层,楼板使用预制混凝土板,楼板厚度为 0.2 m。

计算,该种情况下的刚度计算式如下:

$$\frac{1}{12}(D+t)h^3=\frac{1}{64}\pi D^4. \tag{1}$$

$$h=0.838D\sqrt[3]{\frac{1}{1+\frac{t}{D}}}. \tag{2}$$

式中: $D$  为深基坑支护结构灌注桩直径; $t$  为支护结构相邻灌注桩间距; $h$  为等刚度转换后壁式地下连续墙厚度。

在基坑开挖后,位于地铁深基坑南端的盾构扩大段的地下连续墙,等效后结构厚度  $h$  为 0.9 m,东西两侧及北侧等效后地下连续墙厚度为 0.8 m。模拟施工开挖各阶段如表 4 所示。

沈阳市大东区合作街 21 号楼位于合作街路东,与地铁站相距约 18 m,与基坑长边处于平行方向,该建筑物采用砖混结构,整体共分为 7 层,建筑物楼板采用预制混凝土板,厚度为 0.2 m。

1.2.3 有限元模型参数

笔者建立的有限元模型取实际施工范围内长×宽×深为 260 m×180 m×75 m,其  $X$  轴方向长 180 m, $Y$  轴方向长 260 m, $Z$  轴方向长 50 m。因在开挖施工阶段开始前,施工区域内地下水位降低至基坑开挖面以下,故笔者忽略土体出现固结及蠕变情况对深基坑及围护结构模型计算产生的各种影响,在有限元模型建立过程中,共涉及土体、地下连续墙和深基坑围护结构。各层土体使用 3D 实

体单元进行建模计算、等效后的地下连续墙采用2D板单元进行建模计算、开挖后深基坑围护结构既文中纵钢支撑采用1D桁架单元进行建模计算<sup>[15]</sup>,有限元模型建模如图3所示。

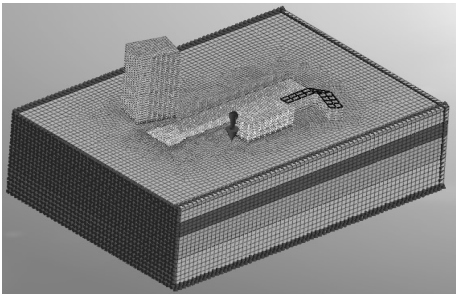


图3 有限元模型示意图

Fig.3 Schematic diagram of finite element model

1.3 抗震分析模型验证

笔者选择实际测量中最具代表性的水平位移监测点进行有限元分析,并将其实测数据与模拟结果进行对比,选取的位移监测点为CX-8,该点位为位于地铁深基坑的南侧扩大段中部位位置的位移监测点位,其实测值与模拟值对照曲线如图4所示。由分析结果可看出,笔者的模拟过程能有效反映实际工况。

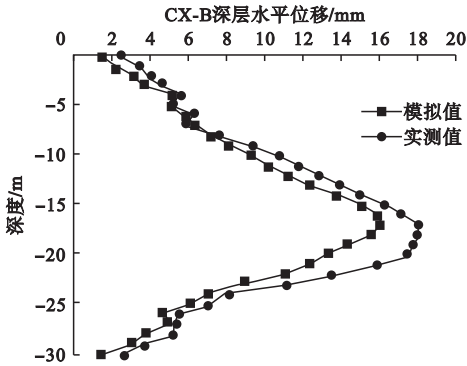


图4 有限元模拟数据与实测数据对比

Fig.4 Comparison between finite element simulation data and measured data

2 深基坑支护结构抗震性能分析

2.1 结构时程分析过程参数选择

笔者使用动力时程分析进行地铁深基坑

的抗震性能分析,并选取两种不同的地震波进行抗震性能模拟分析,即EL-centro地震波<sup>[16]</sup>、汶川地震加速度<sup>[17]</sup>。

根据建筑抗震设计规范对抗震性能分析的规定,应对模拟中涉及的地震加速度时程曲线,取其0~5s时域进行分析,且该时域内应包含地震加速度峰值。

2.2 基于时程分析方法的结构抗震性能分析

2.2.1 地震分析方式及曲线选择

在地震的时程分析模型中,用于抗震性能分析中使用的地震加速度峰值,应与规范中模拟位置所在地区要求的抗震设防烈度,既模拟所在地区的多遇地震和罕遇地震两种情况下,地震加速度峰值相当,当两者相差较大时,可按照如下公式对选取的地震波进行适当调整。

A'(t)=(A'\_{max}/A\_{max})A(t).

式中:A'(t)为调整后加速度随变化值;A(t)为选取的地震加速度值;A'\_{max}为规范规定模拟所在地区内多遇和罕遇地震加速度峰值;A\_{max}选取地震加速度峰值。

2.2.2 注浆加固前后钢支撑结构抗震性能的对比分析

笔者使用调整后的地震波对笔者建立模型进行抗震性能分析,并对深基坑支护结构中的钢支撑所产生的各项数据进行分析,图5为调整后汶川地震波作用下,模拟土体加固前后围护结构中各层钢支撑最大轴力数值变化对比。图中将每层钢支撑观测点以5个观测点为一组进行绘图,共分为四组,如1-1为第一层钢支撑第一个观测点。

通过对地铁深基坑周围土体加固<sup>[18]</sup>前后,不同组观测点位置最大轴力折线图分析得出,对深基坑施工影响范围内的土体进行注浆加固可以有效减小一二层钢支撑所受的轴力作用,但注浆加固的方法对第三层钢支撑的轴力作用改善效果并不明显。对上层土体进行注浆加固后,位于第四层钢支撑



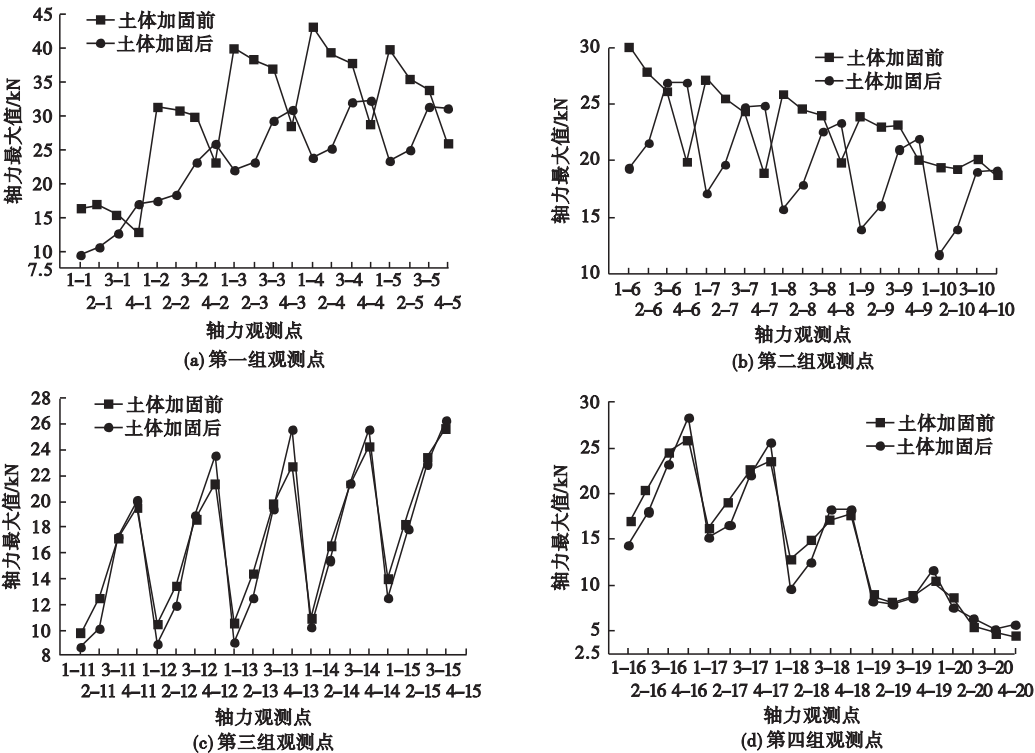


图 5 调整后汶川地震波作用土体加固前后深基坑支护结构各层钢支撑最大轴力对比

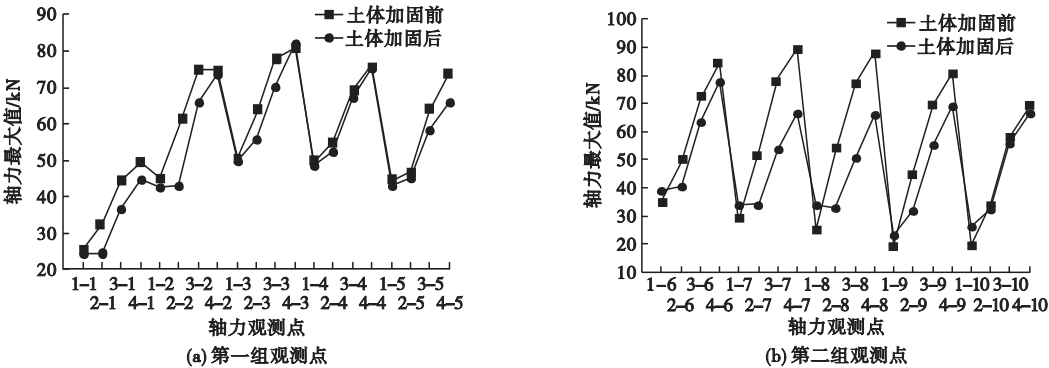
Fig. 5 Comparison of maximum axial force at each steel support layer of deep foundation pit support structure before and after soil reinforcement under the action of adjusted Wenchuan earthquake wave

的最大轴力值普遍较注浆前增加。造成该种现象是因为深基坑上部土体在进行注浆加固后,土体重力密度上升,该部分土体对其下部施加侧向压力,并造成该部分的地下连续墙结构在第四层钢支撑处的侧壁土压力上升。上述第四层钢支撑轴力值普遍增加的问题可利用加大注浆加固深度的方式来解决。

图 6 为 EI-centro 地震波作用下土体注浆加固前后的围护结构中各层钢支撑模拟得

到的最大轴力值对比图。

对图 6 进行分析,北海街 32#楼区域内观测点位为第一组观测点,通过该观测点位数据对比土体加固前后的变化,该组观测点中大部分测量点位出现轴力最大值下降现象,ZL2-2 观测点的周边土体在注浆加固前后的最大轴力下降 16.131 kN,该点位为该部分数据中,轴力最大值变化最明显的点位。通过第一组观测点的数据分析,在注浆加固



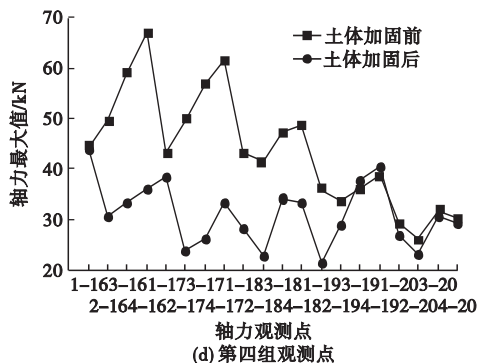
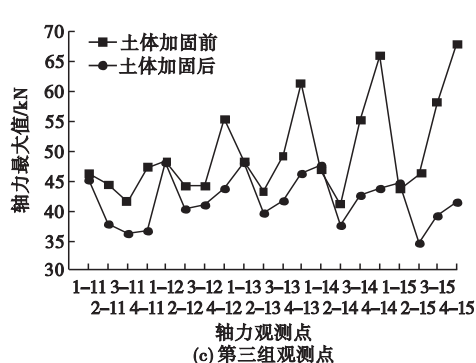


图6 注浆加固处理前后 EL-centro 地震波作用下深基坑各层钢支撑支护最大轴力值变化趋势图

Fig. 6 Variation trend of maximum axial force at each steel support layer of deep foundation pit under El Centro seismic wave before and after grouting reinforcement

前后,第四层钢支撑最大轴力值变化不大,即该种改进方式对该部分第四层钢支撑的改进效果较差。

位于合作街21#楼范围内轴力观测点为笔者设置的第二组观测点,通过分析第二组第一层钢支撑最大轴力观测数据,在EL地震波作用影响下,该范围内的围护结构钢支撑的轴力最大值在注浆加固前后数值增大,其中ZL1-8点的最大轴力值增加至8 813 kN,该点为该组测量点中数值变化最大的测量点。在土体加固前后,各组观测点位的第四层钢支撑为各组钢支撑轴力最大值中最大的,在该部分观测点位中,土体注浆加固前后,第四层钢支撑监测到的最大轴力值均有所下降,其中ZL4-7点位的最大轴力值在注浆加固前后减少22.905 kN。该点为该组监测点中最大轴力值减少最大的点位。

### 3 结论

(1)通过对汶川地震和EL-centro地震作用下各层钢支撑最大轴力图进行对比可以得出,在地震作用下注浆加固部分处理后的钢支撑轴力变小,且当钢支撑处于土体加固区与非加固区之间时,钢支撑应力与变形情况发生突变。

(2)通过对不同观测点处轴力曲线进行

分析,在对地铁深基坑维护结构使用土体注浆加固方式进行加固后,当观测的钢支撑位置越接近于加固区与非加固区交界位置处,其轴力值越大,即注浆加固对其轴力值控制效果越差。

(3)在不同的地震荷载作用下,各观测点位置处钢支撑反应各不相同,是因为不同的地震荷载作用时,地震加速度峰值不同与地震加速度随时间变化速率不同所导致。

### 参考文献

- [1] 雷升祥,申艳军,肖清华,等.城市地下空间开发利用现状及未来发展理念[J].地下空间与工程学报,2019,15(4):965-979.  
(LEI Shengxiang, SHEN Yanjun, XIAO Qinghua, et al. Current situation and future development concept of urban underground space development and utilization [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2019, 15(4): 965-979.)
- [2] 李锐.地下轨道与城市道路及综合管廊大断面共建[J].西安科技大学学报,2018,38(3):466-472.  
(LI Rui. Joint construction of underground rail, urban road and comprehensive pipe gallery [J]. Journal of Xi'an university of science and technology, 2018, 38(3): 466-472.)
- [3] 查晓鸣.地下城市人居环境空间布局简述[J].环渤海经济瞭望,2016(4):16-19.  
(ZHA Xiaoming. Brief introduction to the spatial layout of human settlements in underground cities [J]. Economic outlook the Bohai sea, 2016(4): 16-19.)
- [4] 郑刚,朱合华,刘新荣,等.基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J].土木工程学报,2016,49(6):1-24.

- (ZHENG Gang, ZHU Hehua, LIU Xinrong, et al. Safety and environmental impact control of foundation pit engineering and underground engineering [J]. China civil engineering journal, 2016, 49(6): 1-24.)
- [5] 李兵, 曲晶彤, 葛思远. 温度对地铁深基坑支护结构的影响分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(1): 69-76.  
(LI Bing, QU Jingtong, GE Siyuan. Effect of temperature on supporting structure of metro deep foundation pit [J]. Journal of Shenyang jianzhu university( natural science), 2021, 37(1): 69-76.)
- [6] 徐青, 何松, 魏可可, 等. 基于复杂网络理论的地铁深基坑施工事故致因研究[J]. 安全与环境工程, 2017, 24(1): 152-157.  
(XU Qing, HE Song, WEI Keke, et al. Study on causes of subway deep foundation pit construction accidents based on complex network theory [J]. Safety and environmental engineering, 2017, 24(1): 152-157.)
- [7] 孙超, 郭浩天. 深基坑支护新技术现状及展望[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(3): 104-117.  
(SUN Chao, GUO Haotian. Current situation and prospect of new deep foundation pit support technology [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2018, 35(3): 104-117.)
- [8] 涂天骄, 刘帅. 地铁工程安全风险评估及规避措施[J]. 中国地名, 2020(6): 78.  
(TU Tianjiao, LIU Shuai. Safety risk assessment and avoidance measures of subway engineering [J]. China place name, 2020(6): 78.)
- [9] 唐世雄, 玉玉鹏, 刘鑫. 地震滑坡的形成机制及中美欧地震拟静力计算方式[J]. 西南公路, 2020(1): 41-45.  
(TANG Shixiong, YAO Yupeng, LIU Xin. Formation mechanism of earthquake landslide and quasi-static calculation method of earthquakes in China, the United States and Europe [J]. Southwest highway, 2020(1): 41-45.)
- [10] 韦扣均. 基于反应位移法的地下结构抗震分析[J]. 北方建筑, 2020, 5(1): 21-25.  
(WEI Koujun. Seismic analysis of underground structures based on response displacement method [J]. Northern architecture, 2020, 5(1): 21-25.)
- [11] 刘喆. 地铁地下车站结构的地震反应分析[J]. 广东土木与建筑, 2020, 27(2): 21-27.  
(LIU Zhe. Seismic response analysis of subway underground station structure [J]. Guangdong architecture civil engineering, 2020, 27(2): 21-27.)
- [12] 许成顺, 豆鹏飞, 杜修飞, 等. 液化自由场地震响应大型振动台模型试验分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(10): 3767-3777.  
(XU Chengshun, DOU Pengfei, DU Xiufei, et al. Large shaking table model test analysis of seismic response of liquefaction free field [J]. Rock and soil mechanics, 2019, 40(10): 3767-3777.)
- [13] 张社荣, 郭紫薇, 曹克磊, 等. 基于盾构隧道施工力学特性的注浆加固方案比较分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 147-152.  
(ZHANG Sherong, GUO Ziwei, CAO Kelei, et al. Comparative analysis of grouting reinforcement schemes based on mechanical characteristics of shield tunnel construction [J]. Urban mass transit, 2021, 24(9): 147-152.)
- [14] 周丁恒, 张志勇, 贾世涛, 等. 近接地铁条件下深基坑施工控制与分析[J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42(4): 35-42.  
(ZHOU Dingheng, ZHANG Zhiyong, JIA Shitao, et al. Construction control and analysis of deep foundation pit under the condition of adjacent subway [J]. Journal of Qingdao university of technology, 2021, 42(4): 35-42.)
- [15] XIE Qiang, HE Chang, JIANG Bin, et al. Linear-elastic analysis of seismic responses of porcelain post electrical equipment [J]. Engineering structures, 2019, 201: 109848.
- [16] HUANG Changxi, WANG Xinghua, ZHOU Hao, et al. Damping effects of different shock absorbing materials for tunnel under seismic loadings [J]. Journal of vibro engineering, 2019, 21(5): 1353-1372.
- [17] HEINS E, GRABE J. FE-based identification of pile-soil interactions from dynamic load tests to predict the axial bearing capacity [J]. Acta geotechnica, 2019, 14(6): 1821-1841.
- [18] 刘非, 王乾峰, 彭刚, 等. 非均质土层的注浆扩散特性与加固力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2245-2253.  
(LIU Fei, WANG Qianfeng, PENG Gang, et al. Study on grouting diffusion characteristics and reinforcement mechanical behavior of heterogeneous soil layer [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37(12): 2245-2253.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)