

# 温度作用下深基坑钢支撑自伺服系统轴力研究

赵良云<sup>1</sup>, 卜铭<sup>1</sup>, 徐茂虎<sup>2</sup>, 杜潇<sup>3</sup>, 曾国良<sup>3</sup>

(1. 杭州地铁集团, 浙江 杭州 310028; 2. 中铁二局第六工程有限公司; 3. 湖南联智科技股份有限公司)

**摘要:** 该文以杭州某基坑为工程背景, 结合现场监测数据, 利用 Midas GTS 软件对基坑进行三维数值模拟, 研究钢支撑自伺服系统对基坑位移的影响, 以及温度作用下钢支撑轴力与位移的变化情况。结果表明: 钢支撑轴力与位移随基坑开挖深度的增大而增大, 开挖完成后轴力略有减小。另外, 钢支撑自伺服系统能较好地控制地连墙的水平位移。在不同温度影响下, 钢支撑轴力变化规律相同, 基本表现为温度升高 1 °C 钢支撑轴力增加约 19.5 kN。

**关键词:** 深基坑; 钢支撑; 自伺服系统; 温度; 轴力修正

随着城市基坑工程的规模不断增大, 基坑的支撑体系也逐渐由传统的混凝土支撑向钢支撑转化, 近年来机械自动化以及信息化技术的发展, 使得钢支撑自伺服体系也快速发展, 并逐渐在工程中得到运用, 以此达到严格控制基坑变形的需求。

姜衍良等通过对基坑支护结构内力与基坑位移的观测以及数值模拟, 提出开挖面处的土体及围护桩产生的位移最大, 施工中应尽量避免无支撑的情况出现; 王继槐通过对管廊深基坑进行模拟和监测, 发现普通钢支撑轴力随开挖深度的变化规律; 崔维久等通过对特殊工况下地铁基坑的负载响应研究, 发现“超挖、加撑滞后”会造成第 1 道撑的轴力远大于设计值, 第 3 道撑的轴力远小于设计值, 施工中应避免违规施工, 同时通过安装预应力补加装置, 可预防因支撑轴力过小而发生事故; 郭利娜等通过对基坑的数值模拟, 得到了施工过程中钢支撑轴力变化规律; 熊栋栋通过现场监测与数值分析, 解释了钢支撑轴力设计值普遍比实测值偏大的原因, 同时提出在钢支撑固定端钢管内灌浆能有效减小固定端的塑性变形; 孙九春等通过对钢支撑伺服系统的设置方式进行研究, 发现不同的钢支撑伺服系统的布置方式产生的控制效果差异较大, 因此需要对伺服系统的设置方式进行合理性研究。

该文以杭州某基坑开挖为工程背景, 研究钢支撑自伺服系统对深基坑开挖过程中位移的影响, 以及各支撑轴力的变化规律。另外, 研究在不同温度作用下, 钢支撑轴力变化规律, 提出相应的温度修正系数, 从而

确保钢支撑自伺服系统轴力与位移的监测精度。

## 1 钢支撑自伺服系统工作原理

钢支撑自伺服系统主要由监控站、操作站、现场控制站、液压伺服泵站系统等组成, 同时利用现代机电液一体化自动控制技术、计算机信息处理技术以及可视化监控系统等高新技术手段, 实现了对钢支撑轴力的实时监测和控制, 解决常规施工方法无法控制的苛刻变形要求和技术难题, 使工程始终处于可控可知状态, 具有良好的社会效益、经济效益和环境保护效益。

钢支撑自伺服系统轴力可保持某一特定值, 当轴力低于设定值时, 自动启动油泵补压至设定值, 当轴力高于最大设定值时, 控制台自动报警, 通知技术人员进行保压或减压操作。

## 2 工程实例

基坑位于采用排桩加内支撑的支护方式, 通惠路站地铁基坑设计⑦~⑩轴之间, 基坑共设 5 道内支撑, 第 1 道和第 3 道支撑为混凝土支撑, 第 2 道、第 4 道及第 5 道为钢支撑, 每层钢支撑为 11 根, 共 33 根。其中第 2 道采用直径  $\phi 609$  mm 的钢支撑, 第 4 道以及第 5 道采用直径  $\phi 800$  mm 的钢支撑。另外, 在第 2 层钢支撑的 4<sup>#</sup>~8<sup>#</sup> 支撑上采用自伺服系统, 轴力目标值设定为 2 000 kN。具体如图 1 所示。

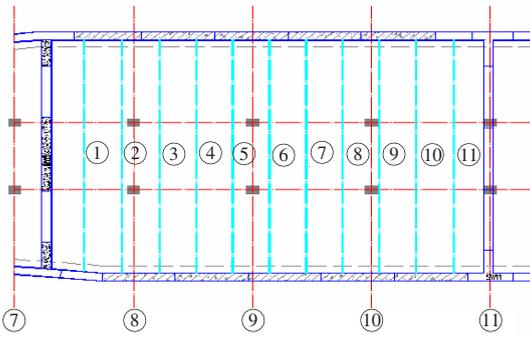


图1 第2道钢支撑布置图

### 3 模型建立

#### 3.1 基本假定

为方便计算,假定整个基坑及周围土体均质成层分布,并采用摩尔-库仑本构模型进行计算,同时忽略地下水的影响。

根据 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》相关规定,深基坑开挖影响范围约为基坑开挖深度的3倍。根据实际工程背景基坑最大开挖深度为16.5 m,有限元模型尺寸为108 m×72 m×45 m。基坑开挖尺寸为36 m×24 m×16.5 m。

利用 Midas GTS NX 建立该项目有限元模型,为保证有限元模型较快收敛,将围护桩转化为等刚度的地下连续墙结构。项目钻孔桩直径为1 m,间距为0.2 m,根据转换式(1)、(2)计算得到等效的地下连续墙厚度为0.79 m。模型中取0.8 m。

$$\frac{1}{12}(D+s)h^3 = \frac{1}{64}\pi D^4 \quad (1)$$

$$h = 0.838D \sqrt[3]{\frac{1}{1+\frac{s}{D}}} \quad (2)$$

利用 Midas GTS NX 自动边界功能,完成整个基坑模型的边界条件设置,具体表现为固定侧面水平方向位移,同时,底面水平位移和垂直方向位移均固定,基坑顶面保持为自由边界。

#### 3.2 参数选取

##### (1) 土层参数

据现场提供的地质勘察报告可知,基坑开挖区各类地层的物理力学参数如表1所示。

表1 各土层物理力学参数

土层	弹性模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	层厚/m
淤泥黏土	9.0	12	6	0.45	4.90
黏土	10.5	16	8	0.42	5.66
淤泥细砂层	25.0	8	21	0.49	6.44

##### (2) 内支撑参数

该项目内支撑包含混凝土支撑和钢支撑,具体参数如表2所示。

表2 各内支撑物理力学参数

构件名称	材料	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/MPa	泊松比
地下连续墙	C35 混凝土	23	34.5	0.22
冠梁、腰梁	C35 混凝土	23	34.5	0.22
混凝土支撑	C30 混凝土	23	30.5	0.20
钢支撑	Q235 圆钢管	77	205.0	0.20

#### 3.3 开挖工况

根据实际情况建立基坑开挖工况,具体见表3。

表3 开挖工况

阶段号	阶段名称	激活	钝化
1	初始应力	基坑开挖区、周围影响区土体、基坑边界、自重	
2	地下连续墙	地下连续墙	
3	开挖第1层土	冠梁、第1道支撑(混凝土支撑)、立柱	开挖第1层土
4	开挖第2层土	第1道腰梁、第2道支撑(钢支撑)	开挖第2层土
5	开挖第3层土	第2道腰梁、第3道支撑(混凝土支撑)	开挖第3层土
6	开挖第4层土	第3道腰梁、第4道支撑(钢支撑)	开挖第4层土
7	开挖第5层土	第4道腰梁、第5道支撑(钢支撑)	开挖第5层土
8	开挖第6层土	开挖第6层土	

## 4 结果分析

### 4.1 理论与实测值对比

利用钢支撑自伺服系统对第 2 道内支撑中 4<sup>#</sup>~8<sup>#</sup> 钢支撑进行轴力和位移监测,确保钢支撑轴力与基坑位移满足规范要求。另外,可根据监测数据,及时调整开挖速度及位置,防止因开挖过大,基坑产生较大的位移,甚至破坏。为模拟钢支撑自伺服系统,在模型计算中,对相应钢支撑预加 2 000 kN 轴力,由于在施工过程中轴力未出现报警情况,因此未启动自动补偿功能。具体计算结果如图 2~4 所示。

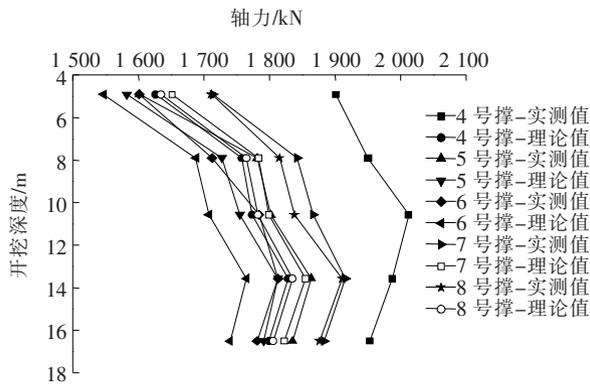


图 2 实测轴力与理论轴力对比图

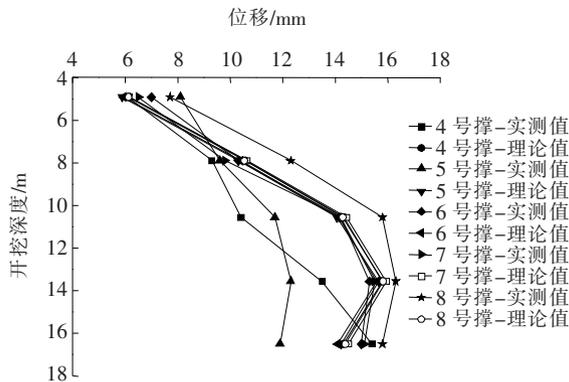


图 3 实测位移与理论位移对比图

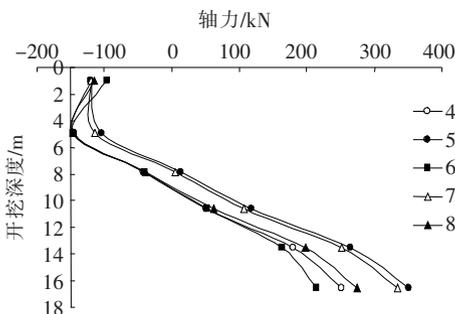


图 4 首层混凝土撑理论轴力图

由图 2、3 可知:实测值与理论计算值变化规律一致,并且数据吻合较好,说明三维基坑模型能较好地反映实际情况。另外,第 2 道钢支撑轴力与位移随基坑开挖深度的增大而增大,在开挖完成后,内支撑轴力与位移略有减小,这是由于基坑开挖完成后,各道支撑完成内力重分布,基坑整体趋于稳定。在开挖到第 5 层时,第 2 道支撑轴力与位移达到最大,其中轴力最大值为 1 855 kN,位移最大值约为 15.9 mm。

鉴于第 2 道撑的实测和理论轴力均低于预加轴力,对首道混凝土撑的轴力进行了分析。由图 4 可知:混凝土撑随基坑开挖,轴力逐渐减小,出现了拉应力,表明基坑第 2~5 层支撑对地连墙结构具有良好的减跨作用。

### 4.2 地下连续墙位移

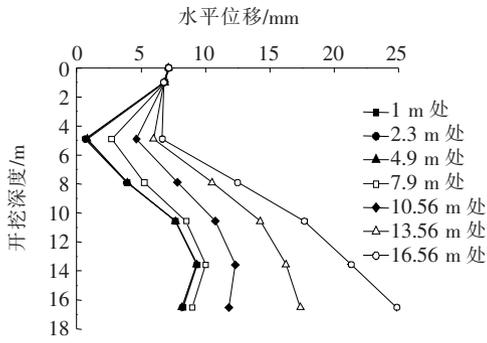
地下连续墙水平位移能较好地反映整个基坑的位移情况,因此利用三维模型对基坑地下连续墙的位移进行模拟分析,研究钢支撑自伺服系统对地下连续墙的位移影响。选取地下连续墙 3 个断面进行分析,左侧断面距基坑左侧 8 m,右侧断面距基坑右侧 8 m,中间断面为地下连续墙中心处。详细计算结果见图 5。

由图 5 可知:随基坑开挖深度的增大,地下连续墙的各点位移先减小后增大,3 个断面的变化规律一致,基坑最大位移出现在基坑底部,且中间断面位移略大于两侧,最大位移约为 2.5 cm。另外,由于第 2 道钢支撑采用自伺服系统,轴力始终保持稳定,因此基坑在第 2 道支撑处的位移最小,约为 4 mm。钢支撑自伺服系统控制位移的效果明显。

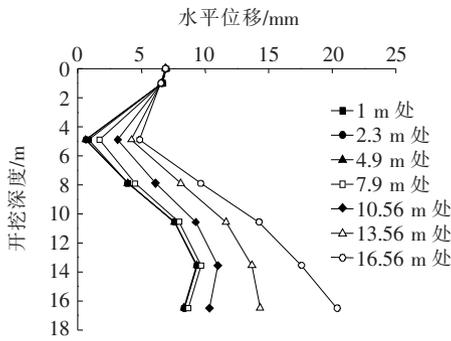
### 4.3 温度影响下轴力变化

为提出钢支撑在不同温度荷载作用下的修正值,利用 Midas 模型研究分析温度升高 10、15 以及 20 ℃ 3 种情况下的轴力变化,详细结果如表 4 所示。同时考虑到该项目的工期以及当地气候,重点分析升温 20 ℃ 时,各支撑轴力与位移的变化情况。计算结果见图 6、7。

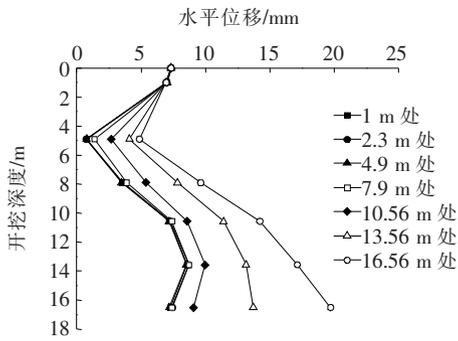
由图 6、7 可知:温度升高时,钢支撑在整个过程中的轴力与位移变化规律不变,但支撑轴力明显增大,位移有所减小,主要是由于温度升高,钢支撑向两侧膨胀,导致基坑位移减小,同时由于腰梁对钢支撑的约束,膨胀无法完全释放,导致钢支撑轴力明显增大。同时,由表 4 可知:在温度荷载下,钢支撑轴力成线性增加,即温度每升高 1 ℃ 轴力增加约 19.5 kN。



(a) 中间断面



(b) 左侧断面



(c) 右侧断面

图5 地下连续墙水平位移

表4 不同温度下轴力变化情况

升温/ ℃	轴力增加值/ kN	单位温度下轴力变 化值/[kN·(℃) <sup>-1</sup> ]
10	194.5	19.5
15	291.7	19.4
20	389.0	19.5

### 5 结论

通过对杭州某基坑钢支撑轴力监测与有限元模拟,分析了基坑开挖过程中钢支撑轴力与位移的变化规律,得到以下结论:

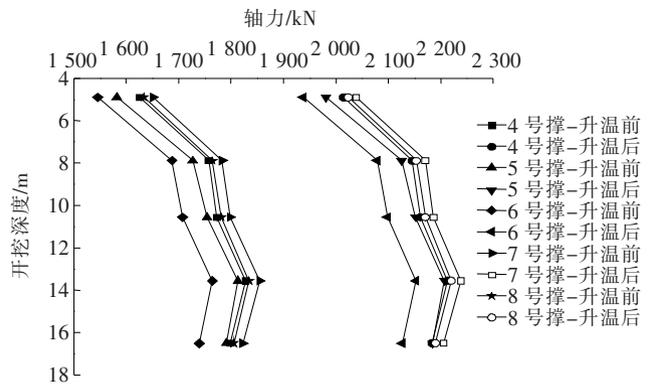


图6 升温前后轴力变化图

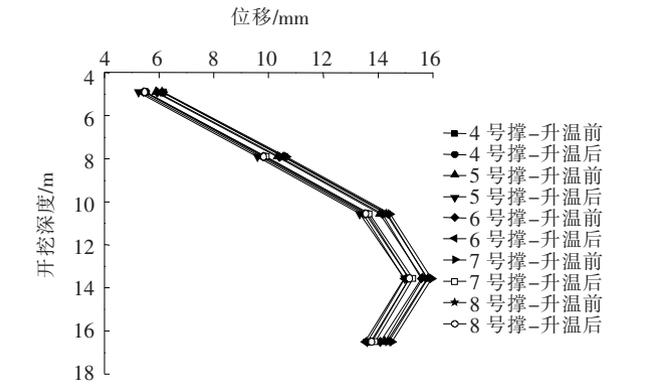


图7 升温前后位移变化图

(1) 第2道钢支撑轴力与位移随着开挖深度的增加而增加,这是由于随基坑开挖深度的增加,两侧主动土压力增大,地下连续墙向内测移动的位移增大,从而使各道支撑的轴力与位移增大。随基坑开挖完成,基坑周围土体完成内力重分布,因此第2道钢支撑轴力略有减小。

(2) 地下连续墙的水平位移随基坑开挖深度的增加,最大位移出现在基坑底部。由于第2道钢支撑采用自伺服系统,轴力始终稳定在设定值,基坑在此处的水平位移最小。说明钢支撑自伺服系统对控制基坑变形的效果明显。

(3) 在温度作用的影响下,钢支撑受热膨胀,导致轴力增加,基坑内侧位移减小,通过计算分析发现,在升温10、15以及20℃下,轴力分别增加195、290以及390 kN,即温度升高1℃钢支撑轴力增加约19.5 kN,在钢支撑自伺服系统中,可设置相应的温度修正值。

### 参考文献:

[1] 姜忻良,宗金辉,孙良涛.天津某深基坑工程施工监测及数值模拟分析[J].土木工程学报,2007(2).  
 [2] 王继槐.管廊深基坑大间距支护桩数值模拟及施工监测[J].中外公路,2020(3).