

# 宁波市轨道交通海晏北路换乘站 基坑支撑优化与分析\*

陈金铭<sup>1</sup> 狄宏规<sup>2</sup> 宣 炜<sup>1</sup> 梁浩毅<sup>2</sup> 苏光北<sup>2</sup>

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司, 315012, 宁波;

2. 同济大学上海市轨道交通结构耐久性与系统安全重点实验室, 201804, 上海//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 基于宁波市轨道交通海晏北路换乘站基坑实测数据对比,研究了液压伺服钢支撑与普通钢支撑的支撑效果。利用 Plaxis 3D 软件对第 5 道混凝土支撑替换为液压伺服钢支撑的设计方案进行了模拟分析。结果表明:相较于普通钢支撑段,相邻液压伺服钢支撑段围护结构的水平,变形小 22% 左右,液压伺服钢支撑的支撑效果优于普通钢支撑。通过发挥伺服系统低补偿的优势,将伺服支撑段的第 5 道混凝土支撑替换为 3 000 kN 或 4 000 kN 轴力情况下的液压伺服钢支撑,均满足规范对变形的要求。采用伺服钢支撑代替第 5 道混凝土撑的方案具有可行性。

**关键词** 车站;深基坑;液压伺服钢支撑;侧向变形;支撑轴力

**中图分类号** TU94<sup>+</sup>2;U231.4

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2021.03.006

## Optimization and Analysis of the Foundation Pit Support at Haiyan North Transfer Station of Ningbo Rail Transit

CHEN Jinming, DI Honggui, XUAN Wei, LIANG Haoyi, SU Guangbei

**Abstract** According to a comparison based on measured foundation pit data at Haiyan North Road Station on Ningbo rail transit, the supporting effects of hydraulic servo steel support and ordinary steel support are studied. Then, Plaxis 3D software is used to conduct a numerical simulation of foundation pit excavation design scheme, which is to replace the fifth concrete support with hydraulic servo steel support. The monitoring data analysis shows that compared with the ordinary steel support section, the deformation displacement of the adjacent hydraulic servo steel support section is about 22% smaller than that of ordinary steel support, the effect of the hydraulic servo steel support is obviously better than ordinary steel support. By taking the advantages of the servo system low compensation,

when the fifth concrete support of servo supporting section is replaced with hydraulic servo steel support under the condition of 3 000 kN or 4 000 kN axial force, both solutions can meet the deformation requirements allowed by the specification. Therefore, it has certain feasibility if the servo steel support is used to replace the fifth concrete support.

**Key words** station; deep foundation pit; hydraulic servo steel support; horizontal deformation; supporting axial force

**First-author's address** Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315012, Ningbo, China

在城市轨道交通建设中,控制深基坑的开挖变形对于基坑自身安全和周边环境的保护极其重要<sup>[1-2]</sup>。目前,城市轨道交通车站的基坑施工主要采用钢支撑与混凝土支撑相结合的方式。近年来,相关人员设计出基于液压自动伺服控制原理的液压伺服钢支撑。该支撑方式采用设备对支撑轴力及围护结构变形实施全天候动态监测,将监测结果发送至程控主机,与预先设计的轴力值进行对比,再通过液压系统自动调整钢支撑轴力,做到低压自动补偿、高压自动报警,从而避免出现因轴力损失过大而导致围护结构变形过大的风险<sup>[3]</sup>。但该支撑方式的造价较高,尚未在城市轨道交通建设中大规模推广,可供研究的案例极少。

本文基于宁波市轨道交通 5 号线海晏北路站接驳既有车站工程,通过实测数据的分析,对比液压伺服钢支撑与普通钢支撑的支撑效果,讨论采用液压伺服钢支撑代替第 5 道混凝土支撑的可行性,以期为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

海晏北路站为宁波市轨道交通 1 号线与 5 号线

\* 国家自然科学基金青年基金项目(51808405)

的换乘车站。其中:1 号线海晏北路站为地下双层岛式车站,沿东西向敷设,目前已开通运营;5 号线海晏北路站为地下 3 层车站,沿南北向敷设,与 1 号线海晏北路站形成“十”字形交叉接驳,其基坑平面布置如图 1 所示。5 号线海晏北路站的主体框架结构长度为 189.00 m,标准段基坑宽度为 22.10 m,深度为 24.71 ~ 24.76 m,南、北端头井基坑宽度为 26.20 m,基坑深度为 26.46 ~ 26.51 m。该站基坑开挖采用明挖顺筑法,以 1 000 mm 和 1 200 mm 厚的地下连续墙作为车站主体的围护结构,以钢筋混凝土支撑和钢管支撑(直径 609 mm 或 800 mm,壁厚 16 mm)作为围护结构的支撑体系。常规支撑体系与伺服支撑体系结构剖面图如图 2 所示。该基坑工程周边环境较为复杂,对于该基坑施工的变形控制而言,施工的风险较大。

2 基坑变形与沉降的监测、分析

在该基坑的开挖过程中,对围护结构的水平变形、地表沉降进行了监测,根据实际情况选取了部分监测点进行分析,其测点布置如图 3 所示。其中,

测斜点 20 个,地表沉降监测点 54 个。

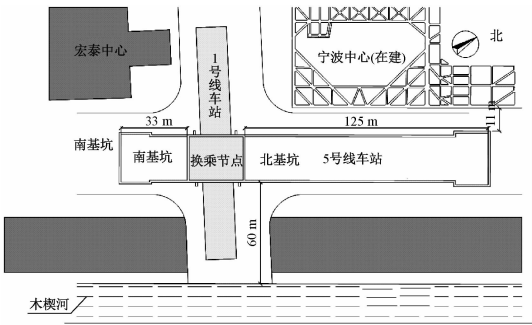
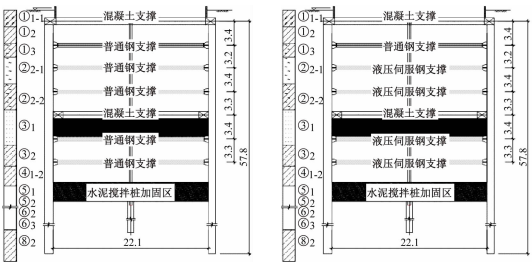
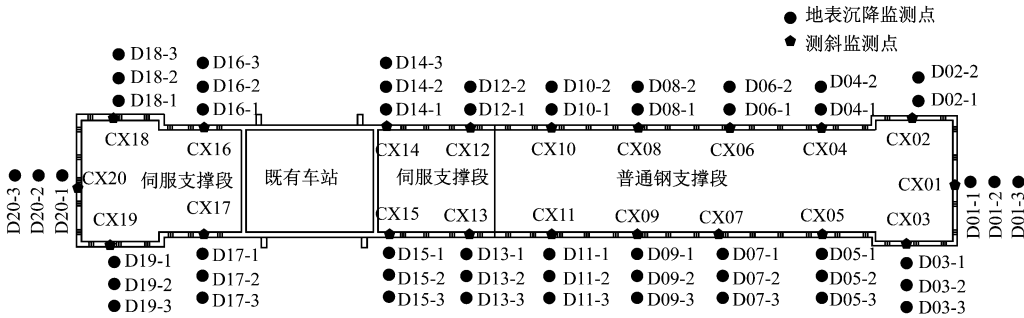


图 1 海晏北路换乘站基坑平面布置示意图



a) 普通钢支撑段      b) 液压伺服钢支撑段  
尺寸单位:m

图 2 5 号线海晏北路站基坑标准段横剖面图



注: CX01为第一个测斜点, D01为第一个沉降监测点, 余类推。

图 3 基坑围护结构的监测点布置图

为对比液压伺服钢支撑与普通钢支撑的支撑效果,选取普通钢支撑段的测斜管 CX11,以及液压伺服钢支撑段的测斜管 CX17、CX15、CX13 进行数据分析。图 4 为该围护结构累计水平变形随深度变化的曲线。从图 4 可以看出,CX17 的最大累计水平变形量(29.3 mm)明显小于 CX11 的水平变形最大值(90.1 mm),说明伺服支撑围护结构的变形控制效果更好;CX13 的最大累计水平变形值较大(76.1 mm),原因是 CX13 更靠近普通钢支撑段,故此处优化效果不明显;CX15 的最大累计水平变形值最小(27.9 mm),这是由于 CX15 处既采用了液压伺服钢支撑,且距离既有车站最近,故围护结构水平变形得到了很好的控制。

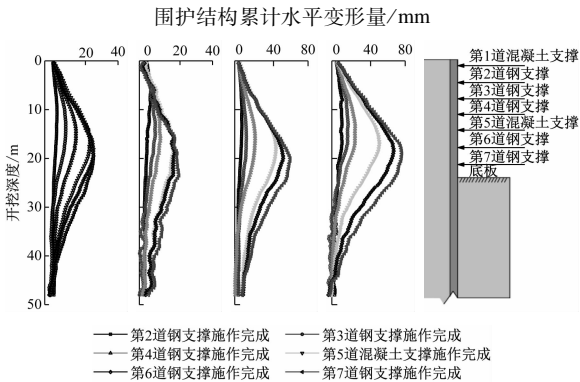


图 4 围护结构累计水平变形量随开挖深度变化曲线

从图 4 还可以得出结论:围护结构水平变形量随开挖深度的增大而增大,其最大累计水平变形值

出现在开挖深度附近。从第 4 道钢支撑架设完成至第 5 道混凝土支撑施作,该基坑的累计水平变形增量变化较大,增量最大的测点的变形量达到了总变形量的 40%。其原因主要为该基坑时空效应明显,从混凝土支撑的施作完成至达到设计强度值需要一定养护龄期,此阶段的基坑处于无支撑暴露状态,因而会产生较大的水平变形。

### 3 钢支撑替代混凝土支撑的有限元模拟

#### 3.1 有限元模型的建立

采用有限元计算软件 Plaxis3D 2017 对该基坑开挖过程进行数值模拟,设基坑的开挖深度为 26 m,模型沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  3 个方向的尺寸分别为 310 m、220 m、80 m,如图 5 所示。

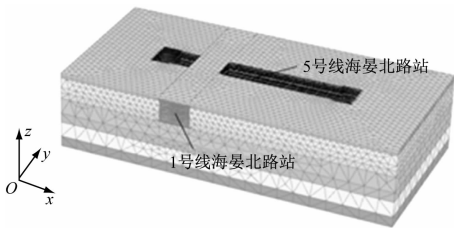


图 5 海晏北路换乘站的有限元模型

土体本构模型采用小应变土体硬化模型(HSS)。根据地质勘查报告及施工现场的软土工程特征,合并相近土层后得到土体模型参数如表 1 所示。

表 1 海晏北路换乘站的土体模型参数表					
土层	$c$ / kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$E_{50}$ / MPa	$E_{ur}$ / MPa	$G_0$ / MPa
杂填土	8.0	20.0	4.00	16.00	40.0
黏土① <sub>1-1</sub>	17.0	21.0	4.13	28.90	41.3
淤泥质粉质黏土① <sub>2</sub>	12.0	17.0	2.54	7.62	50.8
粉砂② <sub>2,2</sub>	4.0	31.4	9.44	94.40	141.6
淤泥质粉质黏土③ <sub>2</sub>	18.0	21.0	4.73	47.30	47.3
粉质黏土⑤ <sub>1b</sub>	23.0	24.0	6.74	60.60	101.1
粉质黏土⑥ <sub>2</sub>	20.0	22.0	5.43	54.30	54.3
粉砂⑥ <sub>3</sub>	18.0	23.0	5.90	59.00	88.5
粉砂⑧ <sub>2</sub>	3.0	31.0	12.04	60.20	180.6

注: $c$ 、 $\varphi$  为抗剪指标; $E_{50}$  为割线弹性模量; $E_{ur}$  为加卸载模量; $G_0$  为小应变初始模量。

施工中,围护结构采用板单元,车站主体结构采用线弹性实体单元,混凝土支撑采用梁单元,普通钢支撑采用锚杆单元,液压伺服钢支撑系统采用点荷载。土体与结构之间的接触作用通过界面单元来模拟。数值模拟分为 2 种方案,其主要差异在于第 5 道支撑方式:方案 1 中第 5 道撑为混凝土支

撑,方案 2 中第 5 道撑为钢支撑(液压伺服钢支撑段为液压伺服钢支撑,普通段为普通钢支撑)。

#### 3.2 数值模拟结果分析

##### 3.2.1 模型可靠性验证

为验证模型的可靠性,提取方案 1 中 CX17 位置处围护结构的累计水平位移与实测数据进行对比分析,结果如图 6 所示。由图 6 可知,数值模拟围护结构的累计水平变形与实测结构的累计水平变形规律基本一致,表明采用该模拟方法是合理可行的。

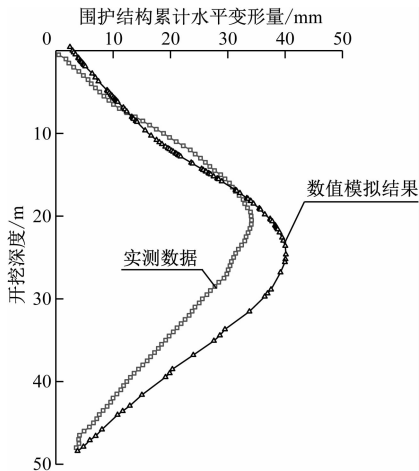


图 6 CX17 处围护结构的累计水平变形量对比

##### 3.2.2 数值模拟方案设计

为了验证用伺服钢支撑代替第 5 道混凝土支撑的可行性,将伺服钢支撑区段的第 5 道支撑替换成不同轴力情况下的液压伺服钢支撑,并与混凝土支撑方案进行比对。

城市轨道交通车站基坑所用的钢支撑可视为细长薄壁圆柱型结构。根据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》来计算钢支撑的稳定性,计算公式为:

$$\frac{N}{\varphi A f} \leq 1.0$$

式中:

- $N$ ——构件极限稳定承载力;
- $\varphi$ ——构件稳定系数。其值根据长细比、钢材屈服强度、截面分类决定;
- $A$ ——截面面积;
- $f$ ——钢材的屈服强度。

本基坑所采用的液压伺服钢支撑参数为:直径为 800 mm,壁厚为 16 mm,长度为 26.2 m。根据截面回转半径及长细比,确定式(1)中的  $\varphi$  取 0.584;钢材材料为 Q235B,则  $f$  取 235 MPa, $A$  为 39 388.16 mm<sup>2</sup>。由式(1)可得到该类型液压伺服钢支撑的极

限稳定承载力  $N$  为 5 405.63 kN。

根据文献[4],将传统钢支撑预加 60% 的极限稳定承载力作为预加轴力,可以起到良好的支撑效果,因而本文在数值模拟方案中设计了 3 种方案进行可行性验算。这 3 种方案的区别在于:在其他钢支撑轴力情况不变的情况下,第 5 道混凝土支撑的液压伺服钢支撑标定轴力分别采用 2 000 kN、3 000 kN、4 000 kN 进行试算,以验证第 5 道支撑替换为钢支撑的可行性。

### 3.2.3 数值模拟结果对比分析

提取上文 3 种方案中伺服支撑段 CX17 处围护结构的累计水平变形量,结果如图 7 所示。

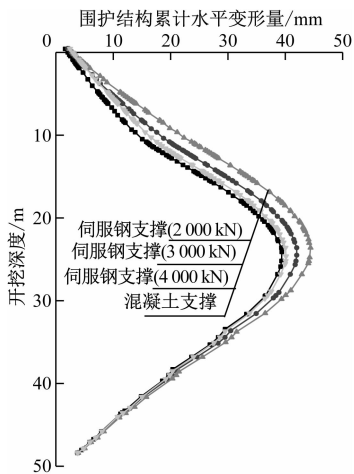


图7 3种标定轴力下 CX17 处围护结构的累计水平变形量对比

从图 7 可以看出,采用第 5 道支撑为液压伺服钢支撑时,伺服支撑轴力越大,围护结构的累计水平变形量越小,其变化规律与采用混凝土支撑时的变化规律相同。轴力为 4 000 kN、3 000 kN、2 000 kN 情况时,围护结构的水平累计变形分别为 39.39 mm、41.99 mm、44.40 mm;而混凝土支撑情况下,围护结构的水平累计变形为 40.13 mm。由此可以得到,当支撑轴力达到 3 000 kN 时,液压伺服钢支撑对围护结构累计水平变形的控制近似达到混凝土支撑的效果,所以第 5 道混凝土支撑用伺服液压钢支撑代替混凝土支撑具有一定的可行性。参照 GB 50497—2009《建筑基坑工程监测技术规范》,上述 3 个方案的轴力情况均能够满足规范要求。

同样提取这 3 种方案中伺服支撑段南基坑的地表沉降监测点 (D17) 断面位置处的数据,基坑边缘地表沉降的模拟结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出,在距离基坑边缘约 12 m 处为地表的沉降最大处。此位置在混凝土支撑情况下

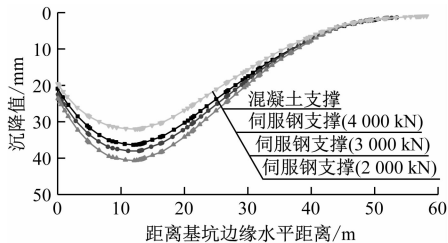


图8 3种标定轴力下 D17 处地表沉降量对比

的地表最大沉降为 24.92 mm,在液压伺服钢支撑情况下轴力为 2 000 kN、3 000 kN、4 000 kN 时地表最大沉降分别为 41.29 mm、38.85 mm、36.46 mm。由此可知混凝土支撑控制地表沉降的效果优于液压伺服和普通钢支撑组成的伺服刚支撑体系。

DG/TJ 08-61—2018《上海基坑工程技术规范》中规定,根据工程经验,由基坑的开挖引起的建筑物容许总沉降量建议取值为 40 mm。因而,混凝土支撑以及液压伺服钢支撑 3 000 kN、4 000 kN 轴力下的最大地表沉降量可以满足该规范对基坑变形控制的要求。

## 4 结论

1) 实测数据表明,与普通钢支撑的水平变形相比,液压伺服钢支撑的水平变形可以减少 22% 左右,液压伺服钢支撑能更有效地控制围护结构水平变形。

2) 在施作混凝土支撑过程中,围护结构水平变形增量最大可占总变形量的 40%。

3) 在液压伺服支撑段,用液压伺服钢支撑代替第 5 道混凝土支撑后,轴力为 2 000 kN 的设计方案优化效果不明显,轴力为 3 000 kN 和 4 000 kN 的设计方案均能有效控制地表沉降与围护结构累计水平变形,从而可以有效避免混凝土支撑在施工过程中无支撑暴露期产生较大水平变形的情况,具有一定的施工可行性。

## 参考文献

- [1] 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(6):1.
- [2] 徐江,龚维明,穆保岗,等. 软土区某地铁深基坑施工过程数值模拟及现场监测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017(3):590
- [3] 秦宏亮. 钢支撑轴力伺服系统技术在基坑开挖中的应用[J]. 建筑施工, 2019(7):1195.
- [4] 王光明. 地铁深基坑钢支撑内力影响因素分析[D]. 北京:北京市市政工程研究院, 2005.

(收稿日期:2019-10-31)