

# 钢支撑轴向预加压力对支护结构力学性状影响分析

李雪波<sup>1</sup>, 李 瑛<sup>2</sup>, 张金红<sup>2</sup>, 陈 东<sup>2</sup>

(1. 杭州运河集团投资发展有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州 310006)

**摘 要:** 利用连续介质有限元数值模型分析某深基坑支护结构在支撑轴向预加压力作用下的变形和内力, 支撑刚度根据现场压缩试验确定, 预加力大小通过位移监测数据反分析得到, 地基土采用 HS 模型。分析结果表明: 预加压力可减小支护桩的侧向变形和内力, 可使各道支撑轴力相当, 有助于材料循环利用和装配式作业。其后利用分析结果证明预加压力对支撑刚度的提高主要通过土方开挖前压缩支撑。支撑刚度和轴向预加压力的关系被定量研究, 支撑刚度可提高一倍以上。轴向预加压力的作用可通过适当放大支撑刚度的方法引入到平面杆系结构弹性法中。

**关键词:** 预应力; 钢支撑; 支撑刚度; 基坑

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 2096 - 7195(2019)02 - 0065 - 05

**作者简介:** 李雪波(1976 - ), 男, 浙江仙居人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事结构工程的设计和管理。E-mail: 414703998@qq.com。

## Effect of axial preloading in struts on mechanics properties of retaining system

LI Xue-bo<sup>1</sup>, LI Ying<sup>2</sup>, ZHANG Jin-hong<sup>2</sup>, CHEN Dong<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Canal Group Investment and Development Co., Ltd., Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Province Architectural Design and Research Institute, Hangzhou 310006, China)

**Abstract:** Lateral displacement and internal forces of retaining system in a deep excavation while axial load was applied in struts were investigated by means of numerical simulation of a continuous medium FEM model. In the model, support stiffness was based load test in site, axial load was determined by back analysis to monitoring data, hardening soil model was selected. It was proved that axial load could help retaining wall in the lateral displacement, bend moment and shear force. Axial forces of different struts could be keep in the same level by axial load was also shown. Then analysis data was used to reveal the relationship between axial load and support stiffness. Support stiffness could be increased in two times at least by compress the strut before excavation. The effect of axial load could be introduced to elastic supporting method by increased support stiffness properly.

**Key words:** prestress; steel strut; support stiffness; excavation

## 0 引 言

绿色施工和装配式技术已成为建筑届的共识, 虽然目前更多针对主体结构, 但是基坑支护技术也一直在朝此发展。钢支撑相对钢筋混凝土支撑的优点早就广为人知, 然而至今钢支撑出场的机会仍然很小, 即使连接节点的可靠性已有大幅度提升。部分原因是钢支撑控制变形的能力不如钢筋混凝土支撑, 钢的弹性模量是混凝土的 7 倍, 但是钢支撑的截面积通常不到混凝土支撑的 5%。基坑支护墙

侧向变形量与支撑轴向压缩紧密相关, 提高支撑刚度可增大变形控制能力, 手段之一是在土方开挖前施加轴向压力。

对支撑施加轴向压力主要有三个重要作用<sup>[1]</sup>:

(1) 消除支护系统的松弛; (2) 减少开挖时土体内积聚的剪应力; (3) 压密施工间隙。大小合适的预加力能起到良好的效果。Clough 和 Tsui<sup>[2]</sup>指出:

预加力相当于土体自重应力的 0.2~0.4 倍时, 支护墙位移可以比不加力时降低 50%。我国基坑支护行业标准<sup>[3]</sup>虽然规定预加力宜为计算得支撑轴力标准值的 0.5~0.8 倍, 但是较少考虑预加力对支撑刚度的提高。

钢支撑在欧美、日韩、台湾等国家和地区有较多应用, 但是对预加力作用的研究却不多。国内对圆管支撑施加预加压力的作用只是为了对支护墙产生适量的预顶力, 同时检验支撑连接节点的可靠性。国内近年大力推广的型钢组合支撑主要依靠预加力提高支撑刚度, 有不少成功案例<sup>[4]</sup>, 也有一些研究成果。裴捷等<sup>[5]</sup>认为预加力可控制大基坑的水平位移, 并进行理论分析。刘发前和卢永成<sup>[6]</sup>结合两个工程实例分析了预加力对钢支撑刚度的提高。为了进一步研究支撑轴向预加压力的作用, 本文结合杭州某工程实例进行数值分析。

## 1 项目简介

某地下停车库项目位于杭州复兴地区, 基坑平面形状复杂, 周长约 820 m, 东北部为 92 m×33 m 标准矩形, 如图 1 所示, 为本文研究对象。该部分基坑三侧均为已建设一层或两层地下室的桩基础框架-剪力墙结构建筑, 周边道路底埋设多条重要市政管线, 因此环境保护要求较高。

粉砂土为地基的主要土层, 底部为全风化凝灰岩, 中间有流塑状淤泥质粉质黏土层。各土层的主要物理力学指标按高程自上而下列于表 1。场地内地下水主要为第四系孔隙水和基岩裂隙水, 孔隙水主要赋存于①层和④层, ⑥层含有少量孔隙承压水。

基坑开挖深度为 13.7 m, 支护结构为渠式切割 (TRD) 型钢水泥土地下连续墙结合三道水平向预应力型钢组合内支撑, 如图 2 所示。水泥土墙厚度为 850 mm, 底部进入相对隔水层全风化凝灰岩层。型钢截面为 H700×300×13×24, 间距为 600 mm, 插

入长度为 13.8 m。支撑梁均由 4 根 H350×350×12×19 型钢通过高强螺栓连接, 可由油压千斤顶施加轴向压力, 并用专用钢盒和钢板保持预加力。支撑梁与支护型钢或冠梁之间用双拼 H400×400×13×21 型钢腰梁连接。地表 2 m 采用 1:1 的坡率放坡开挖。为控制拆撑阶段变形, 支撑梁竖向间距较小, 约 3 m, 设计时考虑支撑梁底 1.5 m 的超挖。坑外地下水位控制在地表下 6 m 以上。

除了常规的基坑监测, 支撑拆除前还对支撑梁进行了现场抗压试验, 试验位置如图 1 所示。试验方法是通过油压千斤顶对支撑梁施加不同的轴向压力, 并测量各自的轴向压缩变形。试验结果如图 3 所示。根据虎克定律, 有:

$$EA = L \frac{P}{\Delta L} \quad (1)$$

式中:  $E$  和  $A$  分别为钢的弹性模量 (MPa) 和支撑梁的截面积 ( $\text{mm}^2$ );  $L$  和  $\Delta L$  分别为支撑梁的轴向长度 (mm) 和轴向压缩变形 (mm);  $P$  为施加在支撑梁上的轴向压力 (N)。根据图 3 可计算得本文研究支撑的  $EA$  约为  $3.57 \times 10^6$  kN。

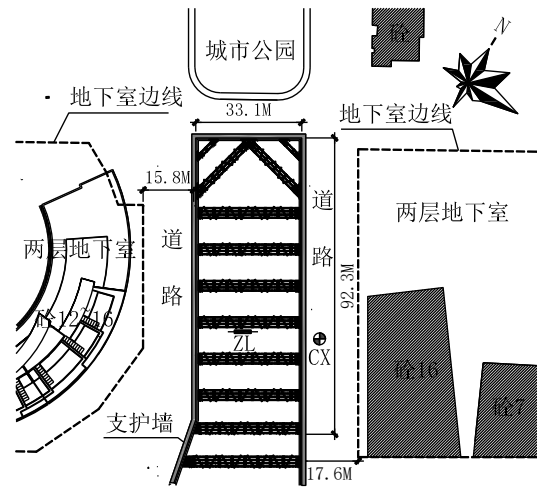


图 1 某基坑主要周边环境

Figure 1 Layout of foundation pit investigated

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Mechanical parameters for soil layers and structures

编号	土层	描述	层厚/m	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	$e$	$c'/\text{kPa}$	$\phi'/^\circ$	$\nu$	$m$	$E_{50}$	$E_{\text{oed}}$	$E_{\text{ur}}$
①	杂填土	—	2.7	19.0	0.75	1.0	28.0	0.30	0.8	8.1	5.4	43.2
②	砂质粉土	稍密	9.0	18.7	0.82	15.0	25.0	0.29	0.5	30.0	15.0	150.0
④	粉砂	中密	5.0	19.1	0.70	2.0	30.0	0.28	0.5	70.0	35.0	350.0
⑤	淤泥质粉质黏土	流塑	6.0	17.9	1.02	2.0	24.0	0.35	1.0	6.8	2.7	27.0
⑥	粉砂	中密	6.0	19.1	0.68	2.0	30.0	0.28	0.5	70.0	35.0	350.0
⑦ <sub>1</sub>	全风化凝灰岩	软可塑	4.0	16.2	1.45	15.0	20.0	0.32	0.6	15.0	8.0	50.0

注:  $E_{50}$ ,  $E_{\text{oed}}$ ,  $E_{\text{ur}}$  的单位均为 MPa, 综合地勘资料和类似土层<sup>[7]</sup>确定; ①层指标均为经验值。

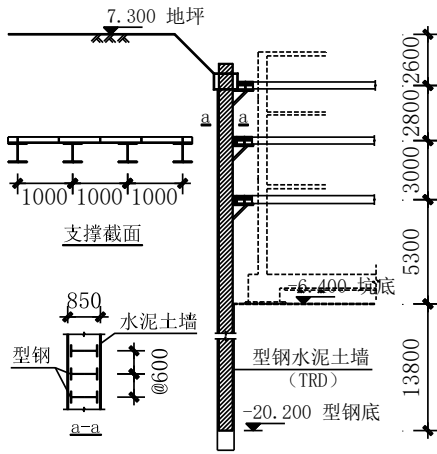


图 2 支护剖面示意图

Figure 2 Generalized excavation section

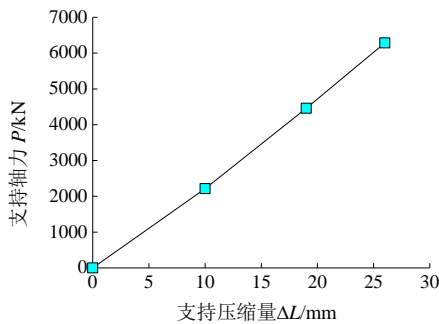


图 3 支撑梁轴向压力和压缩变形的关系

Figure 3 Relationship between axial pressure and axial deformation

## 2 数值分析模型

平面杆系结构弹性支点法是基坑设计计算常用方法,但是主动区没有设置弹性支座,不能考虑预加力的作用。计算分析采用连续介质有限元法,因研究区域平面长度是宽度的 3 倍,其长边中部可近似为平面应变问题,故使用 PLAXIS 2D 软件进行二维分析,并取基坑的一半进行模拟。分析模型如图 4 所示,宽 57 m,高 35 m。地基土以粉砂土为主,开挖影响范围按开挖深度的 3 倍考虑,即模型中坑外宽度为 40 m。地层结构严格按照地勘报告,如表 1 所示。坑周 15 m 范围布置 10 kPa 地面超载。

分析过程完全按照实际开挖步骤,先撑后挖,但未进行拆撑阶段的分析。有预加力模型的分析过程分为 8 个步骤,依次为:(1) 支护墙施工;(2) 开挖至地表下 4.2 m;(3) 安装第一道支撑并施加 30 kN/m 的轴向压力;(4) 开挖至地表下 7.2 m;(5) 安装第二道支撑并施加施加 30 kN/m 的轴向压力;(6) 开挖至地表下 10.2 m;(7) 安装第三道支撑并施加施加 45 kN/m 的轴向压力;(8) 开挖至坑底。

预加力的大小是根据监测资料反分析得出的。除了预加轴向压力为 0 外,无预加力模型的分析过程与有预加力的完全相同。

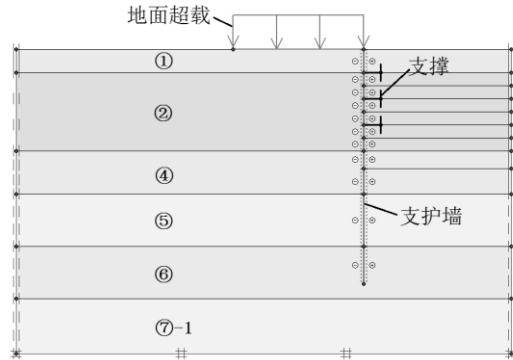


图 4 分析模型简图

Figure 4 Analysis model

土体本构关系采用硬化土模型(HS 模型)。HS 模型为等向硬化弹塑性模型,有屈服帽盖,它能考虑软黏土的硬化特征,可区分加荷和卸荷的区别,刚度依赖于应力历史和应力路径,计算结果能同时给出较为合理的墙体变形及墙后土体变形,适合于敏感环境下的基坑开挖数值分析<sup>[8]</sup>。本文采用的模型参数列于表 1。静止侧压力系数  $K_0=1-\sin\phi$  计算得出。支撑用锚杆单元模拟,根据支撑平面间距、围檩刚度和试验结果,每米压缩刚度  $EA$  取  $3.0 \times 10^4$  kN。支护型钢用板单元模拟, $E$  取 206 GPa,泊松比  $\nu$  取 0.20。

## 3 支护结构变形和内力

图 5 显示了基坑开挖到底后支护墙侧向变形,监测数据也显示其中,测斜孔的平面位置如图 1 所示。由于预加力较小,支撑加压后支护墙也显现出“悬臂开挖”的位移曲线。但是预加力可明显减小支护墙的侧向变形,从 5.6 cm 减少到 3.7 cm,但是对坑底以下支护墙侧向变形的影响较小。

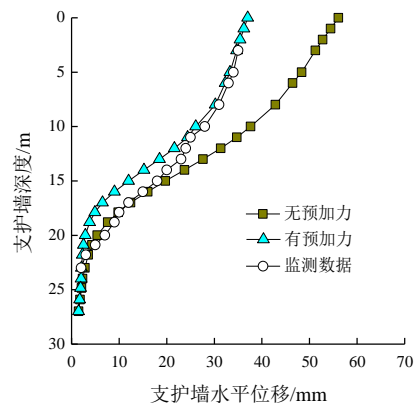


图 5 预加力对支护墙侧向变形的影响

Figure 5 Lateral displacement of retaining wall

图6显示的是有预加力和无预加力时支护墙弯矩包络图,坑内侧受拉的正弯矩受预加力的影响较小,而坑外侧受拉的负弯矩受预加力的影响较大。表2还列出支护墙的其他内力。预加力可减少支护墙承受的轴力、剪力和负弯矩,但是会增大正弯矩。由于负弯矩值比正弯矩大,故轴向预加力对控制支护墙的内力是有利的。

表3列出开挖过程中三个主要分析步的支撑轴力计算结果。预加力使得支撑承受的轴力增大,客观上加大了支撑的强度和稳定要求。支撑承受的最大轴力受预加力的影响较小,而且预加力让各道支撑的轴力接近,利于材料的循环利用。第一道支撑轴力比其他两道大,与支撑刚度和位移曲线有关。

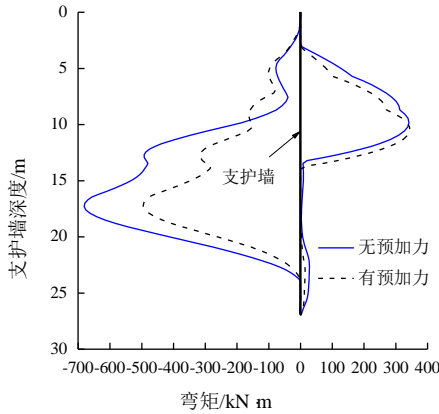


图6 预加力对支护墙弯矩的影响

Figure 6 Envelope of bending moment of retaining wall

表2 预加力和支护墙内力

Table 2 Axial preload and internal force

加压方式	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/kN m	
			负	正
无预加力	1290	258	680	341
有预加力	391	230	495	343

表3 预加力和支撑轴力

Table 3 Axial preload and supporting force

分析步		第一道		第二道		第三道	
		轴力	$\alpha$	轴力	$\alpha$	轴力	$\alpha$
(4)	无预加力	20.8	—	—	—	—	—
	有预加力	42.2	3.5	—	—	—	—
(6)	无预加力	48.1	—	23.7	—	—	—
	有预加力	59.4	—	46.1	2.9	—	—
(8)	无预加力	84.9	—	65.8	—	45.6	—
	有预加力	86.6	—	77.0	—	78.8	2.3

注:表中所有轴力单位均为kN/m。

### 4 支撑刚度

支撑轴向预加压力可减少支护墙的侧向变形,其原因似乎可归结为两个方面,一方面是预加力将已经变形的墙体顶回去,同时减少了主动土压力,另一方面是通过预加力在土方开挖前压缩支撑来减少土方开挖过程中支撑压缩量,相当于增加了支撑刚度。

图7是加压前后模型的塑性点分布,此时土方开挖到第三道支撑底下,图7(a)对应的是分析步(6),图7(b)对应的是分析步(7)。施加压力后,土体的应力状态明显好转,帽盖点、强化点、帽盖&强化点大幅减少。然而,加压并不能直接明显地减少支护墙已经发生的水平位移。图8所示为轴向加压前后支护墙的水平变形,两者的差别可以忽略不计。这表示支撑刚度的提高是预加力起作用的主要方面。

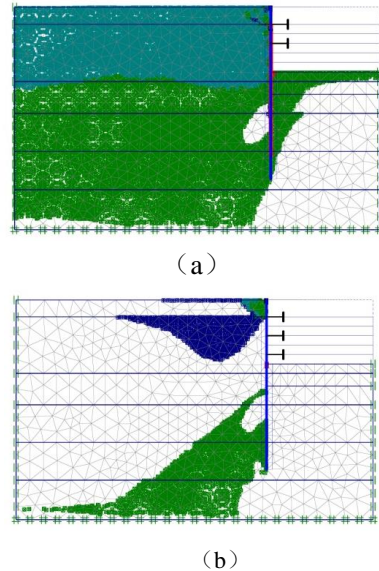


图7 加压前后塑性点分布

Figure 7 Plastic zone: (a) before preload; (b) after preload

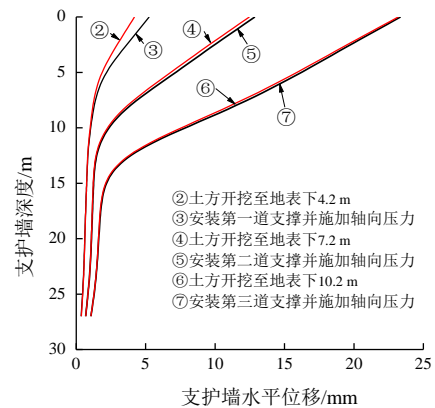


图8 预加力对支护墙侧向变形的影响

Figure 8 Axial pressure and corresponding lateral displacement of retaining wall

根据钢结构的刚度概念, 支撑刚度  $K_1$  可表示为:

$$K_1 = \frac{EA}{L} \quad (2)$$

记土方开挖前对支撑施加的轴向压力为  $P_1$ , 钢支撑对应的弹性压缩变形  $\Delta L_1$  为:

$$\Delta L_1 = \frac{P_1 L}{EA} \quad (3)$$

土方开挖后, 支撑承受的压力记为  $P_2$ , 钢支撑的总压缩量为  $\Delta L_2$ , 此时的支撑刚  $K_2$  为:

$$K_2 = \frac{P_2}{P_2 - P_1} \times \frac{EA}{L} \quad (4)$$

则预加力对支撑刚度的增大系数  $\alpha$  可表示为:

$$\alpha = \frac{P_2}{P_2 - P_1} \quad (5)$$

还可进一步将  $\alpha$  的表达式改写为:

$$\alpha = 1 + \frac{P_1}{P_2 - P_1} \quad (6)$$

实际操作中, 可以先以无预加力计算出支撑处的支点反力  $F$  然后根据规范取  $P_1=0.5\sim 0.7F$ 。但是  $P_2$  与  $F$  之间的定量关系很难确定, 它与支护墙的位移大小有关, 而位移又牵涉到支撑刚度。式(6)至少说明预加力能提高支撑刚度。似乎预加力越大支撑刚度增大越多, 限于篇幅, 本文就此不展开讨论。表3列出根据分析结果计算得到的增大系数  $\alpha$ , 其值介于 2.3~3.5。

## 5 工程应用

前已提及, 平面杆系结构弹性支点法在主动区没有设置弹性支座, 不能考虑预加力的作用。而用连续介质有限元进行工程设计尚需要时间。如果能将有限元分析得出的规律应用到弹性支点法, 即使计算结果与实际有偏差, 计算精度总归又前进一步。假设  $P_1=0.7F$ ,  $P_2=1.05F$ , 则  $\alpha=3.0$ 。根据之前的反分析, 无轴向预加压力时支撑刚度约 50 MN/m。那么考虑轴向加压作用的支撑刚度为 150 MN/m。图9显示了用弹性支点法对本文项目的计算结果, 虽然位移模式不同, 但是对最大位移的估计与有限元分析结果基本相同。该方法用于变形的初步分析精度足够, 亦可用于支撑平面整体分析。

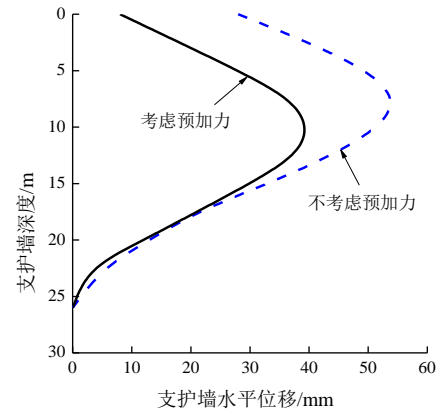


图9 预加力对支撑刚度的提高

Figure 9 Support stiffness affected by axial preload

## 6 结论

(1) 支撑轴向预加压力可减小支护墙侧向变形和内力, 可使各道支撑轴力相当, 充分利用材料特性。

(2) 支撑轴向预加压力通过提前压缩支撑来提高支撑刚度, 可将支撑刚度增大一倍以上。

(3) 在弹性支点法中可通过合理增大支撑刚度来考虑支撑轴向预加压力的作用。

(4) 支撑轴向预加压力对支护结构的影响还与地基土质、加压方式等因素相关, 可作进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 王光明, 萧岩, 卢常亘. 深基坑钢支撑施加预加轴力的合理数值分析[J]. 市政技术, 2006, 24(5): 336-339.
- [2] Clough G W, Tsui Y. Performance of tied-back walls in clay[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1974, 100(12): 1259-1273.
- [3] JGJ 120-2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [4] 张衡. 装配式预应力鱼腹梁钢结构支撑对深基坑变形的控制技术与方法研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
- [5] 裴捷, 赵元一, 李建清, 等. 预应力控制大基坑中的水平位移[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(S1): 103-107.
- [6] 刘发前, 卢永成. 预应力装配式鱼腹梁内支撑的刚度分析[J]. 城市道桥与防洪, 2016, (2): 154-156.
- [7] 许雷挺. 紫金港隧道深基坑现场监测及开挖过程模拟分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [8] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2283-2289.