

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2024.02.014

可拉压预应力钢支撑结构 及其性能评价

张金柱, 张建良, 李延川

(北京城建信捷轨道交通工程咨询有限公司, 北京 100045)

摘要: 针对传统钢支撑不能受拉、混凝土支撑工序复杂且拆除产生大量建筑垃圾等问题, 研发可拉压预应力钢支撑结构。对可拉压预应力钢支撑结构进行技术评价及造价对比, 结果表明: 其抗压承载力与传统钢支撑相同, 与混凝土支撑相当; 抗拉性能及支撑刚度与混凝土支撑相当, 优于传统钢支撑; 施工便捷性与传统钢支撑相当, 优于混凝土支撑; 造价与传统钢支撑相当, 比混凝土支撑低 20%~30%。在地铁基坑工程中, 首道支撑采用可拉压预应力钢支撑, 相比混凝土支撑, 在保证支护效果的同时, 能够产生更好的经济效益和社会效益。

关键词: 地铁; 基坑支护; 可拉压预应力钢支撑; 性能评价; 垃圾减量

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)02-0092-07

Structure and Performance Evaluation of Prestressed Steel Strut Capable Against Tensile and Compressive Stresses

ZHANG Jinzhu, ZHANG Jianliang, LI Yanchuan

(Beijing Urban Construction Xinjie Rail Transit Engineering Consultation Co., Ltd., Beijing 100045)

Abstract: Traditional steel struts cannot be tensioned, and the construction of concrete struts is complex and generates considerable construction waste during the demolition phase. Therefore, prestressed steel struts capable against tensile and compressive stresses have been invented. The performance evaluation results of mechanics, construction adaptability, and cost with a prestressed steel strut capable against tensile and compressive stresses show that its compression bearing capacity is the same as that of a traditional steel strut and equivalent to that of a concrete strut. Furthermore, its tensile and strut stiffness performances are equivalent to those of a concrete strut and superior to those of a traditional steel strut. Its construction convenience is equivalent to that of a traditional steel strut and 20%–30% lower than that of a concrete strut. The first concrete strut replaced by a prestressed steel strut capable against tensile and compressive stresses for metro excavations can not only ensure technical performance but also result in better economic and social benefits.

Keywords: metro; retention and protection for excavations; prestressed steel strut capable of tensile and compressive strengths; performance evaluation; waste reduction

1 研究背景

内支撑可以直接平衡两端围护结构上所受的侧压

力, 构造简单, 受力明确, 常应用于地铁车站等狭长基坑工程中。内支撑主要有钢支撑和混凝土支撑两类。钢支撑具有施工便捷、可重复使用、可施加预加轴力

收稿日期: 2023-01-09 修回日期: 2023-11-06

第一作者: 张金柱, 男, 硕士, 高级工程师, 从事轨道交通设计、审查和研究工作, 344529965@qq.com

基金项目: 山西省重点研发计划(高新领域)(201703D121031)

引用格式: 张金柱, 张建良, 李延川. 可拉压预应力钢支撑结构及其性能评价[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(2): 92–98.

ZHANG Jinzhu, ZHANG Jianliang, LI Yanchuan. Structure and performance evaluation of prestressed steel strut capable against tensile and compressive stresses[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(2): 92–98.

等优点,广泛用于北京等地质条件较好的城市。但钢支撑也存在不能受拉、轴力易损失等缺点,因此,遇到高水位、软土、环境复杂、变形控制要求高时,首道支撑常采用混凝土支撑。张金柱等^[1]认为,首道混凝土支撑能够避免轴力损失从而起到更好的基坑变形控制效果;何山^[2]根据宁波地铁车站基坑监测数据提出,大部分软土基坑的首道支撑受到不同程度的拉力,推荐采用具有抗拉承载能力的混凝土支撑;刘树亚等^[3]介绍,在深圳地铁二期工程后期,建设主管部门要求明挖基坑的首道支撑必须为混凝土支撑。

混凝土支撑在发挥重要作用的同时,也存在一些问题。首先,施工工序复杂,混凝土支撑涉及测量、绑筋、支模、浇筑、养护、拆除等工序。其次,拆除困难,绳锯切割造价高,爆破拆除环境影响大^[4]。再次,混凝土支撑拆除会产生大量建筑垃圾。以地铁地下二层站主体基坑为例,当首道支撑采用截面 $0.8\text{ m}\times 1\text{ m}$ 、间距 6 m 的混凝土支撑时,拆除产生的建筑垃圾每万平方米约 $1\ 600\text{ t}$,仅此一项,便远大于《“十四五”建筑业发展规划》中提出的2025年建筑垃圾排放量每万平方米不高于 300 t 的控制标准,显著增加了地下工程的碳排放。施仲衡等^[5]提出,轨道交通建设过程中,装配式建造技术亟待推广;袁青云等^[6]对混凝土支撑和H型钢支撑的碳排放量进行了对比,结果表明混凝土支撑碳排放量是钢支撑的5倍。最后,混凝土支撑无法施加预加轴力,对基坑土体变形的控制是被动控制^[7],无法满足主动控制、进一步提升支撑效果的需求。

钢支撑与混凝土支撑的上述问题已经引起了许多学者的关注。贾坚等^[8]为解决钢支撑轴力损失问题、提升基坑变形控制效果,研发了钢支撑轴力伺服系统;张明聚等^[9]针对钢支撑活络头整体性差等缺陷研发了一种螺栓紧固锥楔式活络头;井国庆等^[10]为解决混凝土支撑使用不便、产生建筑垃圾等问题,发明了装配式钢管混凝土支撑;此外,国内外学者还提出张弦梁式自锁预应力支撑系统^[11]、格构式型钢内支撑结构^[12]等。

现有研究成果主要解决了钢支撑轴力损失或混凝土支撑拆除建筑垃圾排放等问题,而理想的内支撑应同时具备适应拉压多种工况、施工便捷、可重复使用、可施加预加轴力、不产生建筑垃圾等特点。为此,本文研发了可拉压预应力钢支撑^[13],并对其进行技术经济评价,期望能够作为首道支撑应用于地铁明挖基坑

中,在达到混凝土支撑效果的同时,取得更好的经济效益和社会效益。

2 结构型式及施工工艺

2.1 结构组成

与传统钢支撑相比,可拉压预应力钢支撑取消了活络头,增加了方钢管端节、U型卡槽、高强螺栓、填充材料等,结构总装图如图1所示。

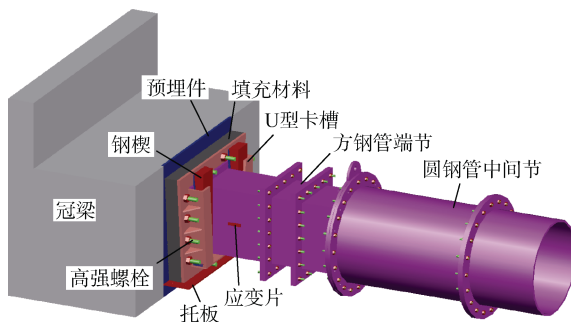


图1 可拉压预应力钢支撑总装图

Figure 1 General assembly drawing of a prestressed steel strut capable against tensile and compressive stresses

2.1.1 结构主要构件

图1中端节采用方钢管,是为了便于端节能够卡入U型卡槽内。应变片贴于方钢管端节侧面中轴线处,用于测量支撑轴力。其他主要构件如图2所示。

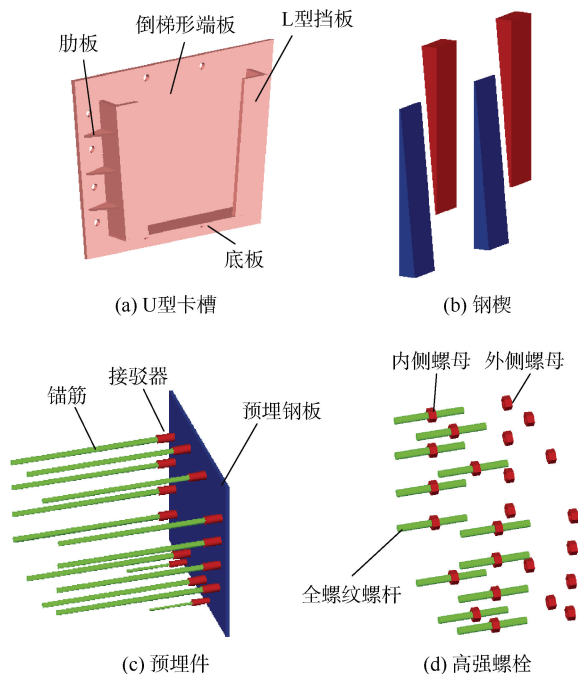


图2 结构主要零件

Figure 2 Main parts of the structure

U型卡槽和预埋件是钢管支撑与冠梁之间的联系构件，与填充材料配合实现支撑受压功能，与高强螺栓和钢楔配合实现支撑受拉功能；预埋件的预埋钢板留孔，用于锚筋与高强螺栓接驳器连接；高强螺栓配备内、外侧两组螺母，内侧螺母在支撑安装施加预加轴力阶段螺栓受压时使用，外侧螺母在使用阶段支撑受拉工况下螺栓受拉时使用。

2.1.2 结构辅助构件

结构辅助构件如图 3 所示。托架作为 U 型卡槽的施工平台；侧边钢模板在填充材料浇筑时作为模板使用；千斤顶为超薄型千斤顶，临时放置于预埋件和 U 型卡槽之间，用于对支撑施加预加轴力。

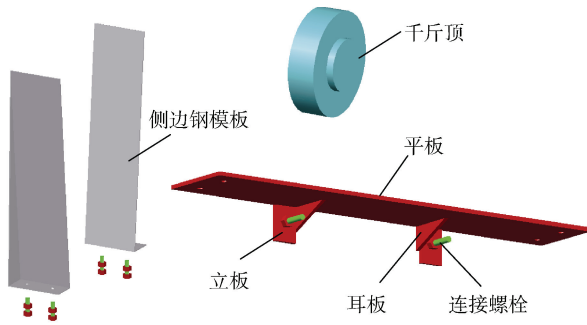


图 3 结构辅助构件

Figure 3 Auxiliary parts of the structure

2.2 施工步骤

2.2.1 安装步骤

可拉压预应力钢支撑的所有钢结构构件均是工厂加工、现场安装，现场安装步骤如图 4 所示。

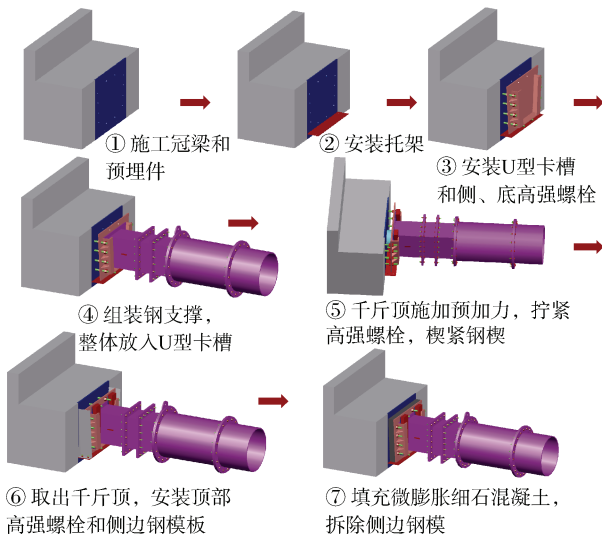


图 4 安装步骤

Figure 4 Construction install diagram

2.2.2 拆除步骤

拆除步骤如图 5 所示，可拉压预应力钢支撑除冠梁预埋件、填充材料和侧、下部 10 根高强度螺杆外，其余均可拆除回收再利用。

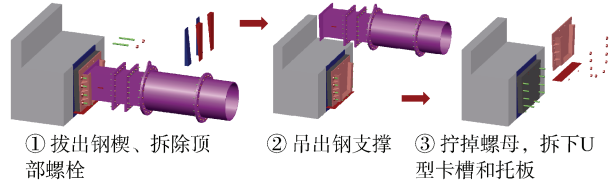


图 5 拆除步骤

Figure 5 Construction demolition diagram

2.3 传力路径

1) 可拉压预应力钢支撑的压力传递路径如图 6 所示。围护结构和冠梁向基坑内变形时，压力通过冠梁、填充材料和 U 型卡槽传递至钢支撑端节及中间节。

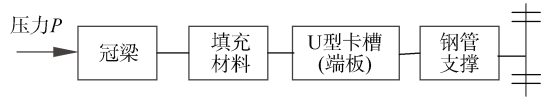


图 6 压力传递路径

Figure 6 Pressure transmission path

2) 可拉压预应力钢支撑的拉力传递路径如图 7 所示。围护结构和冠梁向基坑外变形时，拉力通过冠梁和高强螺栓传递至 U 型卡槽，再通过钢楔将拉力传递至钢支撑端节和中间节。

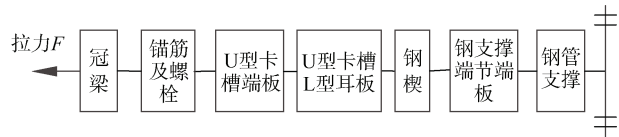


图 7 拉力传递路径

Figure 7 Tension transmission path

3 技术评价

3.1 构件型号、尺寸

以可拉压预应力钢支撑各构件受力协调为原则，拟定构件型号和尺寸如表 1 所示。

3.2 受压承载能力评价

3.2.1 安装阶段

1) 受力控制点分析。根据 2.2.1 节安装步骤⑥，取出千斤顶后、填充细石混凝土前，高强螺栓受压承担预加轴力，其截面积远小于钢管支撑等其他受压构件，因此该阶段高强螺栓受压稳定为承载力控制点。

表 1 主要构件型号、尺寸

Table 1 Model and size of main components

序号	构件	型号/尺寸
1	圆钢管中间节	$\phi 800 \times (16 \sim 20)$ mm
2	方钢管端节	400 mm \times 500 mm($t=30$ mm, 内侧加肋)
3	钢管连接螺栓	8.8A 级 M27(24 根)
4	U 型卡槽	$t=40$ mm(肋板厚 10 mm)
5	预埋件预埋钢板	$t=20$ mm
6	锚筋、高强螺栓	12 ϕ 30, $f=500$ MPa
7	托架	$t=10$ mm
8	填充材料	微膨胀细石混凝土
9	千斤顶	超薄千斤顶, 含行程总厚度不大于 150 mm

2) 预加轴力作用下高强螺栓稳定承载能力。预加轴力由 8 根高强螺栓承受(顶部 2 根螺栓未安装, 底部 2 根螺栓未计入)。U 型卡槽与冠梁间隙最大 150 mm, 螺栓按 150 mm 长的悬臂受压构件考虑, 长细比为 28.4, 受压稳定系数为 0.941, 8 根螺栓的受压稳定承载力为 2 657 kN。

3) 评价。首道支撑间距 6 m 时, 预加轴力一般不大于 600 kN, 即螺栓受压稳定承载能力为常见预加轴力 4 倍左右。

3.2.2 使用阶段

1) 受力控制点分析。可拉压预应力钢支撑的截面特性如表 2 所示。端节方钢管截面外轮廓尺寸小于圆钢管, 是变截面支撑, 需分析受压稳定承载力。

表 2 支撑截面特性

Table 2 Characteristics of strut section

支撑断面	截面/mm	净截面积/ mm ²	绕弱轴惯性矩/cm ⁴	绕弱轴回转半径/mm
端节方钢管	400 \times 500($t=30$)	50 400	162 185	155.9
中间节圆钢管	$\phi 800 \times 20$	49 009	372 957	275.9
	$\phi 800 \times 16$	39 408	302 906	277.2

2) 变截面支撑的受压稳定分析方法。可拉压预应力钢支撑的受压计算长度分析方法参考《塔式起重机设计规范》(GB/T 13752—2017)^[14]附录 G, 计算公式如下

$$l_c = \mu_1 \mu_2 l \quad (1)$$

式中, l_c 为可拉压预应力钢支撑(变截面支撑)的受压计算长度; l 为支撑的几何长度; μ_1 为与构件支承方式有关的计算长度系数, 钢支撑计算时可按两端铰接考虑, 取 1.0; μ_2 为变截面构件的计算长度系数, 可根据圆钢管与方钢管的长度比和惯性矩比查文献[14]

表 G.5 取值。

以标准地下车站主体基坑 20 m 长支撑为例, 方钢管长度(两端)与支撑总长度比值小于 0.08, 圆钢管与方钢管的惯性矩比值分别为 2.3(圆钢管壁厚 $t=20$ mm)和 1.88($t=16$ mm), 查表得 $\mu_2 \approx 1.0$, 即 20 m 长的可拉压预应力钢支撑可等效为 20 m 长的圆钢管支撑计算受压稳定承载力, 如图 8 所示。其他支撑长度情况下, 稳定承载力可根据上述方法进行具体计算。

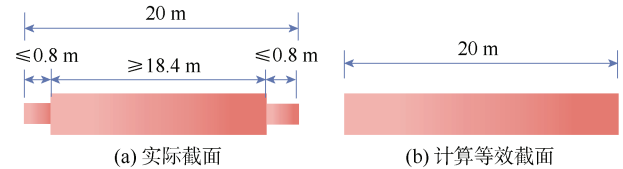


图 8 变截面撑计算等效截面

Figure 8 Calculation equivalent section of variable section steel strut

确定构件受压计算长度后, 可按照《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[15]中的压弯构件(考虑自重产生的弯矩)稳定性计算方法计算受压承载力。

3) 支撑受压承载力比较。以支撑长度 20 m 为例, 计算 9 m 间距混凝土支撑和 6 m 间距钢支撑的稳定承载能力, 结果见表 3。结果显示, $\phi 800@6$ m 可拉压预应力钢支撑受压承载力与传统钢支撑相同, 与 $800 \times 1000@9$ m 混凝土支撑基本相当。

表 3 受压承载力比较

Table 3 Comparison of compressive bearing capacity

支撑类型	支撑截面/mm	间距/m	单根受压承载力/kN	摊至基坑每延米的受压承载力/kN
混凝土支撑	800 \times 1 000	9	7 150	794
可拉压预应力钢支撑/传统钢支撑	$\phi 800 \times 16$	6	4 488	748
	$\phi 800 \times 20$	6	5 547	925

3.3 受拉承载能力评价

根据上文中的结构组成和构件型号可知, 使用阶段受拉工况, 钢支撑端头与冠梁间的高强螺栓和锚筋受拉、管节间的法兰连接螺栓受拉、钢支撑端板与 U 型卡槽接触受力等 3 处是支撑受拉承载力的潜在控制点, 下面将逐一进行承载能力分析。

1) 高强螺栓、锚筋受拉承载能力。高强螺栓与锚筋材料、直径及受力承载力相同; 锚筋在冠梁内锚固, 满足规范构造要求时, 抗拔承载力不小于螺栓、锚筋本体受拉承载力; 螺栓、锚筋本体受拉承载力可根据直径和材料强度按钢结构计算方法得到。12 根 $\phi 30$ 高

强螺栓、锚筋本体的受拉承载力 $F=4\ 239\text{ kN}$ 。

2) 管节连接受拉承载力验算。管节间采用 24 根 8.8A 级 M27 高强螺栓连接, 在自重和轴向拉力作用下, 偏心受拉承载力为 3 823 kN。

3) 端板与 U 型卡槽的接触连接承载力。钢支撑端板通过钢楔与 U 型卡槽接触连接抗拉时, U 型卡槽的 L 型挡板为受力最不利构件。在钢板作用下, L 型挡板与钢楔接触面可简化为三角形荷载作用下的悬臂板(见图 9), 按此计算, 接触连接受拉承载力为 3 176 kN。

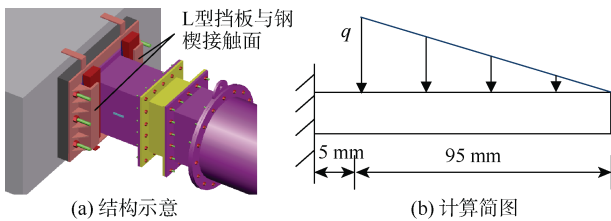


图 9 L 型挡板计算模型

Figure 9 Computation model of L-shaped baffle

4) 混凝土支撑常见配筋时的受拉承载能力。混凝土支撑配筋 20 根 $\phi 25\text{ mm}$ 主筋+6 根 $\phi 20\text{ mm}$ 腰筋

(HRB400 级) 时, 自重和轴力作用下, 偏心受拉承载力为 3 118 kN。

相比传统钢支撑不能提供受拉承载力, 可拉压预应力钢支撑可提供受拉承载力。轴向拉力作用下, U 型卡槽 L 型挡板受弯是支撑受拉承载力的控制点, 承载能力为 3 176 kN, 与常见配筋情况下混凝土支撑受拉承载力 3 118 kN 基本相当。

3.4 支撑刚度评价

1) 支撑刚度比较。轴力作用下支撑端部的位移能反映围护结构的变形, 可作为支撑刚度的评价指标。以支撑长 20 m、每延米基坑产生的轴力 300 kN 为例, 计算不同支撑情况下的支撑端部位移, 如表 4 所示, 单根混凝土支撑刚度是可拉压预应力钢支撑的 2~3 倍, 但是首道支撑轴力和支撑压缩变形较小, 基坑单侧支点位移仅有 1~2 mm, 如采用 $\phi 800\times 16\text{ mm}$ 钢支撑时, 基坑单侧支点位移仅比采用混凝土支撑时大 1.09 mm; 考虑预加轴力后, 采用可拉压预应力钢支撑时的基坑单侧支点位移与采用混凝土支撑时相比, 仅大 0.06~0.35 mm。

表 4 支撑刚度比较

Table 4 Strut stiffness comparison

支撑类型	支撑截面/mm	支撑长度/m	支撑间距/m	单根支撑轴力/kN	单根支撑刚度/(MN/m ²)	单侧压缩变形/mm	预加轴力/kN	预压缩变形/mm	围护顶水平位移/mm
混凝土支撑	800×1 000	20	9	2 700	2 400.00	1.13	0	0	1.13
钢支撑	$\phi 800\times 16$	20	6	1 800	811.81	2.22	600	0.74	1.48
	$\phi 800\times 20$	20	6	1 800	1 009.58	1.78	600	0.59	1.19

表 4 中钢支撑为可拉压预应力钢支撑和传统钢支撑, 理论计算结果二者相同。但与传统钢支撑相比, 可拉压预应力钢支撑几乎不存在轴力损失, 支撑刚度和效果更优。

2) 评价。可拉压预应力钢支撑的刚度和对基坑变形的控制效果, 与混凝土支撑基本相当, 且不存在活络头, 受压工况传力路径简单明确, 初步判断可规避传统钢支撑活络头松动、预应力损失、支撑刚度降低等缺点。

3.5 施工适应性评价

1) 对基坑宽度的适应性。可拉压预应力钢支撑长度可调节部分示意如图 10 所示。中间节长度模数为 500 mm, 端节长度模数为 200 mm; 预埋件与 U 型卡槽间填充材料厚度可调节长度为 150 mm(放千斤顶侧长度为 150 mm 左右, 另外一侧为 0~150 mm)。

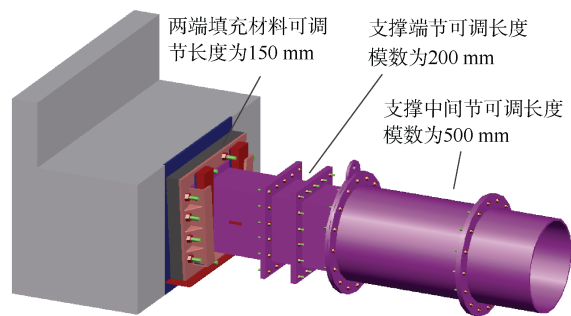


图 10 长度调节示意

Figure 10 Length adjustment diagram

经测算, 3 处调节装置共同作用下, 可适用于各种宽度基坑。

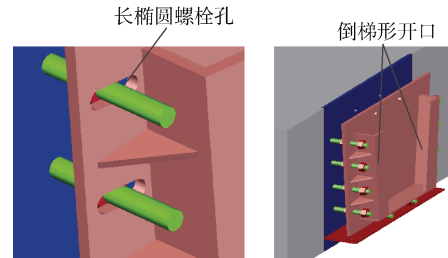
2) 对施工误差的适应性。钢管支撑、U 型卡槽、预埋件等工厂加工的钢结构构件, 其精度能够满足要求。冠梁预埋件的预埋, 考虑现场施工, 且有混

混凝土振捣时的振动影响,施工精度控制难度较大。支撑与U型卡槽之间无精确固定的竖向关系,预埋件预埋的竖向误差可通过支撑与预埋件的相对高度调节。横向误差可通过钢支撑端节端板与U型卡槽之间的空隙及U型卡槽端板上的长椭圆螺栓孔消化;同时,钢支撑端节端板和U型卡槽L型挡板开口为倒梯形,可减小支撑吊装施工时的定位难度,如图11所示。

4 造价对比

以支撑长度20 m、混凝土支撑间距9 m、钢支撑间距6 m为例估算,可拉压预应力钢支撑与传统钢支

撑造价基本相当,比混凝土支撑低20%~30%(材料价格变动时,造价降低幅度会微调),具体见表5。



(a) U型长槽长椭圆螺栓孔 (b) L型挡板倒梯形开口

图11 U型卡槽长椭圆螺栓孔及L型挡板倒梯形开口
Figure 11 Long oval bolt hole of U-shaped slot and opening inverted trapezoid of L-shaped baffle

表5 造价比较

Table 5 Cost comparison

支撑类型	支撑截面/m	可回收钢结构		不可回收钢结构		钢筋混凝土/细石混凝土		单根撑价格/元	摊至每延米基坑的支撑价格/(元/m)
		质量/t	单价(元/t)	质量/t	单价(元/t)	体积/m ³	单价(含拆除)/(元/m ³)		
混凝土支撑	800×1 000	—	—	—	—	16.0	1 950(含钢筋)	31 200	3 467
传统钢支撑	φ800×16	6.9	1 800	0.31	6 000	—	—	14 368	2 395
	φ800×20	8.4	1 800	0.31	6 000	—	—	17 081	2 962
可拉压预应力钢支撑	φ800×16	6.8	1 800	0.31	6 000	0.3	600	14 291	2 382
	φ800×20	8.3	1 800	0.31	6 000	0.3	600	16 964	2 827

5 应用及预期效果

可拉压预应力钢支撑可代替首道混凝土支撑用于地铁等基坑工程中,如图12所示,预期效果如下。

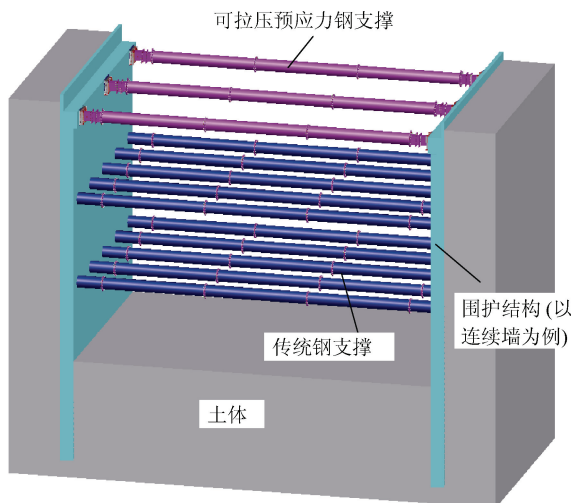


图12 支撑结构布置示意

Figure 12 Diagram of support structure layout

1) 能同时满足一般工况下的支撑受压需求和极端工况下的支撑受拉需求,保证基坑支护达到采用首

道混凝土支撑时的安全水平。

2) 可施加预加轴力,实现对围护结构的主动支撑,提高基坑变形控制能力。

3) 压力传递路径上无活络头等易滑移构件,避免支撑使用过程中的轴力损失。

4) 采用装配式钢结构,制作、安装、拆除方便,可回收重复使用,几乎不产生建筑垃圾。

6 结论

本文研发了可拉压预应力钢支撑,并对其进行了技术经济评价,主要研究结论如下。

1) 可拉压预应力钢支撑的抗压承载力与传统钢支撑相同,与混凝土支撑相当,且不存在支撑轴力损失;抗拉性能和支撑刚度与混凝土支撑相当,优于传统钢支撑。

2) 可拉压预应力钢支撑施工便捷性与传统钢支撑相当,优于混凝土支撑。

3) 可拉压预应力钢支撑造价与传统钢支撑相当,比混凝土支撑低20%~30%。

4) 可拉压预应力钢支撑可回收重复使用,几乎不产生建筑垃圾。

5) 理论研究结果表明:可拉压预应力钢支撑替代首道混凝土支撑应用于明挖基坑,在保证技术性能的同时,能产生更好的经济效益和社会效益。后续需要进一步通过试验验证和工程实践积累监测数据及施工经验。

参考文献

- [1] 张金柱,朱剑,贾霄. 软土基坑围护结构水平位移控制措施[J]. 都市轨道交通, 2017, 30(6): 62-68.
ZHANG Jinzhu, ZHU Jian, JIA Xiao. Horizontal displacement control of supporting structure in soft soil foundation pit[J]. Urban rapid rail transit, 2017, 30(6): 62-68.
- [2] 何山. 深基坑首道钢筋混凝土支撑受力分析及风险管控应用[J]. 铁道勘察, 2017, 43(6): 53-56.
HE Shan. The analysis and application of risk control on stress of reinforced concrete in deep foundation pit[J]. Railway investigation and surveying, 2017, 43(6): 53-56.
- [3] 刘树亚,潘晓明,欧阳蓉,等. 用钢筋混凝土支撑代替钢支撑的深基坑支护特性研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 309-314.
LIU Shuya, PAN Xiaoming, OUYANG Rong, et al. Study on supporting characteristics of deep foundation pit with reinforced concrete support instead of steel support[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2012, 34(S1): 309-314.
- [4] 王高敏,王磊. 地铁深基坑支撑拆除两种方法的比较与分析[J]. 西部探矿工程, 2015, 27(10): 179-181.
WANG Gaomin, WANG Lei. Comparison and analysis of two methods for removing the support of subway deep foundation pit[J]. West-China exploration engineering, 2015, 27(10): 179-181.
- [5] 施仲衡,丁树奎. 城市轨道交通绿色低碳发展策略[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 1-4.
SHI Zhongheng, DING Shukui. Strategies for green and low-carbon development of urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 1-4.
- [6] 袁青云,孙旻. 基坑混凝土支撑及H型钢支撑体系全寿命周期碳排放量计算与分析[J]. 重庆建筑, 2022, 21(7): 33-37.
YUAN Qingyun, SUN Min. Calculation and analysis of carbon emission in whole life cycle of concrete bracing and the H-shaped steel bracing system for foundation pits[J]. Chongqing architecture, 2022, 21(7): 33-37.
- [7] 吕彦菲,王健. 对撑预加轴力对基坑变形的影响分析[J]. 北京建筑工程学院学报, 2013, 29(3): 30-34.
LÜ Yanfei, WANG Jian. Analysis on the effect of pre-axial forces on the soil displacement[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2013, 29(3): 30-34.
- [8] 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 Xiaolin, LUO Fayang, et al. Support axial force servo system in deep excavation deformation control[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong university, 2009, 43(10): 1589-1594.
- [9] 张明聚,杨萌,王锡军. 基坑工程内支撑活络端结构革新性研究[J]. 工程力学, 2018, 35(增刊 1): 88-94.
ZHANG Mingju, YANG Meng, WANG Xijun. Study on structural innovation of movable end of internal support in foundation pit engineering[J]. Engineering mechanics, 2018, 35(S1): 88-94.
- [10] 井国庆,赵益,刘启宾,等. 一种基坑横向内支撑: CN202530463U[P]. 2012-11-14.
JING Guoqing, ZHAO Yi, LIU Qibin, et al. Transverse inner support for foundation pit: CN202530463U[P]. 2012-11-14.
- [11] PARK J S, JOO Y S, KIM N K. New earth retention system with prestressed Wales in an urban excavation[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2009, 135(11): 1596-1604.
- [12] 刘发前. 装配式型钢内支撑稳定性设计[J]. 城市道桥与防洪, 2016(5): 81-83.
LIU Faqian. Stability design of assembled steel inner support[J]. Urban roads bridges & flood control, 2016(5): 81-83.
- [13] 张金柱,张建良,田东,等. 可拉压预应力钢支撑结构: ZL202221241315.1[P]. 2022-05-23.
- [14] 中国机械工业联合会. 塔式起重机设计规范: GB/T 13752—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
China Machinery Industry Federation. Design rules for tower cranes: GB/T 13752—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

(编辑:傅依萱)