

DOI: 10.11779/CJGE2019S1024

预应力型钢组合支撑受力性能分析及试验研究

胡琦^{1, 2, 3}, 施坚¹, 黄天明^{2, 3}, 方华建^{2, 3}, 李健平^{2, 3}, 陈赟⁴, 张凯¹

(1. 浙江工业大学, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江浙峰工程咨询有限公司, 浙江 杭州 310020; 3. 东通岩土科技股份有限公司, 浙江 杭州 310020;
4. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 预应力型钢组合支撑是近年来国内出现的新型钢支撑, 该项技术除了具有可回收的优点外, 还具有高强连接、可施加预应力、可靠性高等优点, 因而在国内的应用不断增多。虽然该项技术已渐趋成熟, 但是仍有一些问题亟待研究。因而在支撑跨度较大、土质较差的杭州城西某工程进行多组支撑加压、观测试验。型钢组合支撑实际刚度略小于理论刚度, 支撑预应力锁定值是影响基坑变形的关键因素, 应采取措施保证支撑预应力满足要求; 型钢组合支撑的承载力取决于支撑的稳定性, 型钢组合支撑的承载力满足设计要求, 且有较高的冗余度; 型钢组合支撑的温度应力变化幅度约占实际轴力的 29.1%, 占设计轴力的 7.4%, 温度应力对支撑承载力的影响处于可控水平。

关键词: 稳定性; 钢支撑; 深基坑

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0093-04

作者简介: 胡琦(1978—), 男, 江西南城人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土力学、基坑工程等方面的研究与教学工作。E-mail: huqi@zju.edu.cn。

Experimental study on prestressed assembly steel strut system in foundation excavations

HU Qi^{1, 2, 3}, SHI Jian¹, HUANG Tian-ming^{2, 3}, FANG Hua-jian^{2, 3}, LI Jian-ping^{2, 3}, CHEN Yun⁴, ZHANG Kai¹

(1. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Zhejiang Zhefeng Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou 310020, China; 3. Dongtong Geotechnical Technology Limited Co., Ltd., Hangzhou 310020, China; 4. The Architectural Design & Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., 310012, China)

Abstract: The prestressed assembly steel support system (PASS) is an innovative steel support which can be recycled and prestressed and has a lot of advantages, such as high-strength connection and high reliability, so it has been used more and more in China. To solve some problems urgently, a series of PASS pressure and observation experiments are carried out in a project with large span and poor soil in the west of Hangzhou. The experiment shows that the measured stiffness of PASS is slightly less than that in theory, and the critical factor for deformation of the foundation pit is the supporting prestress. The carrying capacity of PASS depends on the stability of support, so it should meet the design requirements and has a certain redundancy. The maximum stress of PASS varying with temperature is about 29.1% of the actual axial force or 7.4% of the design axial force, and the influences of temperature stress are controllable.

Key words: stability; steel struts; deep excavation

0 引言

近些年来, 随着国家对环境问题越来越重视, 作为临时围护结构的基坑工程中可回收构件的应用也逐渐增多。钢支撑作为可回收的水平受力构件, 应用也十分广泛。传统的钢支撑主要有型钢支撑、钢管支撑, 这些支撑体系几乎都是由单根杆件单独受力的, 且连接节点多有薄弱位置, 由此引发了多起严重的基坑坍塌事故, 比较典型的如: 杭州湘湖地铁站基坑坍塌事故^[1]、新加坡 Nicoll Highway 基坑坍塌事故^[2]。程雪松等^[3]就曾指出基坑支护体系按照临时结构进行设计,

安全储备相对较低, 基坑局部构件失效时可能由局部破坏产生连续破坏, 最终导致基坑整体崩溃, 造成非常严重的后果。

预应力型钢组合支撑是近年来国内出现的新型钢支撑, 该项技术除了具有传统钢支撑可回收、施工便捷快速的优点外, 还具有高强连接、可施加预应力、可靠性高等优点^[4], 因而在国内的应用不断增多。预应力型钢组合支撑技术目前也基本成熟, 相应的地方

收稿日期: 2019-04-29

*通讯作者: (E-mail: htm3@sina.com)

建设标准——浙江省工程建设标准 DB33/T 1142—2017《基坑工程装配式型钢组合支撑应用技术规程》^[5]也已发布使用。

近些年来,学者们对于型钢组合支撑有一定的研究。但是,工程界对于预应力型钢组合支撑还有一些疑问,主要有:①支撑的实际支锚刚度会不会小于理论计算值;②型钢组合支撑的稳定性计算是否合理,支撑能够承受多大的极限荷载;③温度变化下型钢组合支撑内力的变化是否会影响基坑安全。

因而,笔者特别选取了支撑跨度较大、土质较差的杭州城西某工程进行多组支撑进行加压、观测试验。

1 试验概况

试验基坑范围内主要土层属于典型的杭州城西淤泥质土,土质较差,土体力学指标如表 1 所示。

表 1 土体物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical parameters of soils

土层	重度 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
1-1 杂填土	18.0	5.0	9.0
1-2 粉质黏土	18.4	19.5	12.0
3 淤泥质黏土	17.0	14.4	9.0
4-1 粉质黏土	19.2	26.5	13.5
4-2 粉质黏土	18.4	20.8	13.4
5-1 淤泥质黏土	17.4	14.2	10.5
6 黏土	18.8	42.0	15.0

本基坑长约 324 m,宽约 151 m,基坑普遍开挖深度约 12.00 m,采用二道预应力型钢组合支撑+SMW 工法桩作围护结构,坑内一、二层地下室交界处采用钻孔灌注桩作分隔桩。试验基坑概况见图 1。

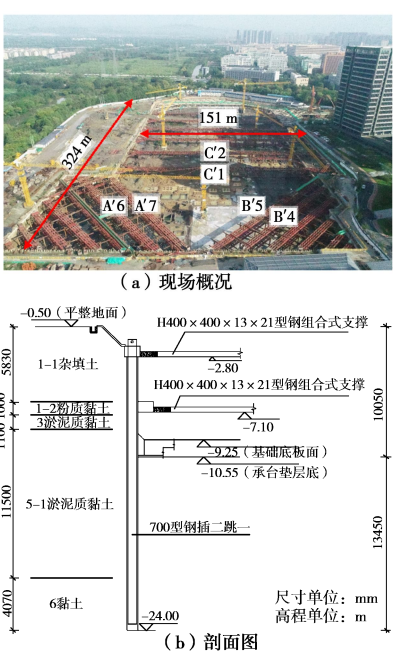


图 1 试验基坑概况

Fig. 1 General situation of experimental field

1.1 支撑概况

试验选取本基坑中最不利的支撑进行,即基坑南侧第二道角撑及对撑,角撑跨度最大约为 95.5 m(计算截面跨度,余同),对撑跨度最大为 113.2 m,剖面计算得到的支撑支反力大小为 400 kN/m。

1.2 试验仪器

试验采用油压千斤顶对型钢组合支撑施加荷载,施加荷载的位置是在型钢组合支撑的中部,在该位置采用 LTC 拉杆式位移计记录支撑的压缩变形(2(a))。

试验采用振弦式表面应变计与读数仪来获取型钢的轴力变化,如图 2(b)所示,应变计安装在每组支撑的内外二根型钢腹板上。采用读数仪读出应变计频率值,再计算得出单根支撑轴力。

采用百分表记录支撑侧向变形,百分表的支座均架设在已完成的底板上(图 2(c))。

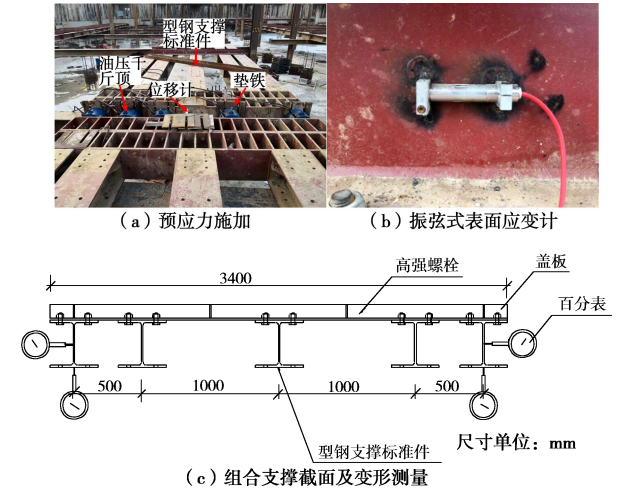


图 2 试验仪器

Fig. 2 Experimental instruments

2 型钢支撑刚度

通过对支撑逐级加压,测得支撑的压缩变形及实际轴力,即可算得支撑的实测刚度。为了确保基坑的安全,加压试验是在底板结构及传力带施工完成且达到一定强度后进行的。

为了对比支撑加压过程中有无荷载损失及验证轴力计计算轴力的精确度,对支撑实际轴力与油压千斤顶施加的轴力比较发现,二者基本一致,支撑荷载施加过程中并不存在轴力损失图 3(a)。通过对比支撑轴力与压缩变形的关系发现:加载前期,实测位移增大较快,斜率明显大于理论值;加载后期,斜率与理论值差异不大。这是由于型钢拼接处一般会有微小的缝隙,施加预应力的过程消除了型钢间的间隙。理论刚度与试验测得的刚度对比见表 2,可见实测的支撑刚度与理论刚度相比偏小,但差距在 20% 范围内。多

次加卸载试验图 3 (b) 表明支撑多次使用后, 仍然处于线弹性变形的范围内, 几乎不产生塑性变形。

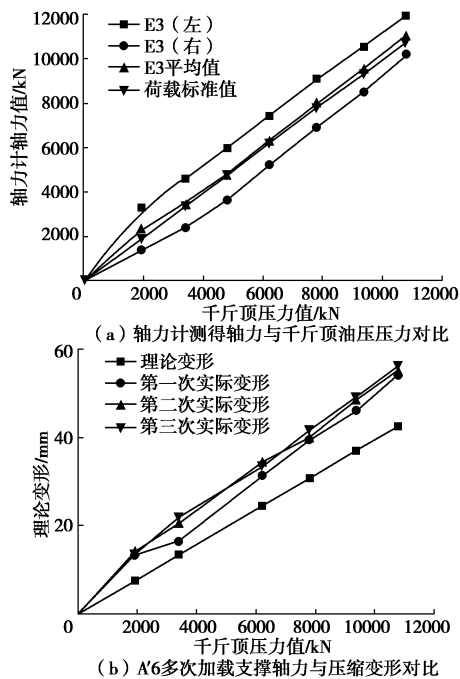


图 3 型钢组合支撑刚度试验

Fig. 3 Stiffness experiment of assembly steel struts

表 2 组合支撑截面信息

Table 2 Section characteristics of assembly steel struts

编号	组合形式	长度/m	理论刚度/MN	实测刚度/MN
A'6 (角撑)	5 根型钢组合	89.5	22292	18883
A'7 (角撑)		81.9		16707
B'4 (角撑)		77.9		18841
B'5 (角撑)		95.5		21566
C'1 (对撑)	6 根型钢组合	113.2	26750	20168

需要指出的是, 支撑端部反力构件是围护桩及桩后土体, 并不是是固定的反力结构, 在计算支撑刚度时已减去这部分变形。考虑到围护桩和支撑计算截面间还有混凝土三角件及加压件的变形没有减去, 实际的支撑刚度应该还要再大一些。每组加压试验在围护桩产生较大的往坑外方向的变形后终止, 此时单道支撑轴力为 12343 kN。

目前型钢组合支撑预应力锁定的方式是通过在保力盒位置塞垫铁 (图 2 (a)) 来实现的, 故而实际预应力锁定的大小可能会偏小, 甚至在早期项目中, 由于设计预应力较小, 导致最终预应力可能会小到无法完全消除支撑间缝隙, 因此围护结构在开挖过程中可能会产生类似于悬臂的变形^[4]。

因此, 预应力型钢组合支撑的预应力锁定是非常关键的。但是, 型钢组合支撑所有节点都需以高强螺栓连接, 支撑加压处在预应力锁定后也需以高强螺栓连接该节点, 以保证支撑的整体性。故而无法采用伺

服装置等控制预应力大小。目前的解决方案是加压后对锁定后的支撑轴力进行监测, 当预应力大小不满足要求时补加预应力。

3 支撑承载能力

根据钢结构理论及规范^[5], 支撑梁承载力实际上是稳定性问题, 包括水平面内和竖直平面内型钢组合支撑的稳定性计算。按规范^[5-6]计算角撑最大轴力设计值 $N=1.1\times1.25\times400\times13/\sin45^\circ=10112\text{ kN}$ 。计算得到的最大应力为 178 MPa, 相应的安全系数为 1.66。而实际使用过程中, 角撑区域最大轴力仅为 2510 kN。

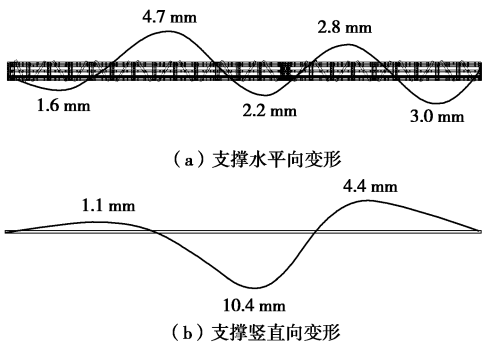


图 4 型钢组合支撑变形

Fig. 4 Deformations of assembly steel struts

为了验证型钢组合支撑的可靠性及稳定计算的科学性, 在前述加压试验进行的同时, 还对组合支撑水平向及竖直向的变形进行了测量。以 A'6 支撑为例 (图 4), 支撑在水平方向的最大变形约为 4.7 mm, 支撑在竖直方向的最大变形约为 10.4 mm, 说明型钢组合支撑整体性较好, 按整体考虑支撑的稳定性是合理的。

4 支撑温度应力变化

对传统钢支撑的研究表明, 钢支撑轴力受温度影响较大, 最大可达 30% 左右。为了研究型钢组合支撑轴力与温度的关系, 在气候炎热的 8 月份每天的 5 点、14 点和 18 点 30 分分别对 C'2 支撑 (与 C'1 支撑基本相同) 的温度和轴力进行较长时间的连续监测。

由图 5 可知监测期间, 气温变化范围为 24.8℃~39.6℃, 钢支撑上表面温度变化范围为 23.4℃~51.4℃, 钢支撑上表面温度变化范围为 23.8℃~45.8℃。C'2 初始轴力为 4327 kN, 支撑轴力变化范围为 3853~5113 kN, 变化幅度为 1260 kN, 支撑轴力变化趋势与温度变化趋势基本一致。型钢组合支撑的温度应力变化幅度约占实际轴力的 29.1%, 占比较大, 这主要是因为初始轴力较小。温度应力占设计轴力 17050 kN 的 7.4%, 如果按照基坑规范考虑 10% 设计轴力, 则是偏于安全的。

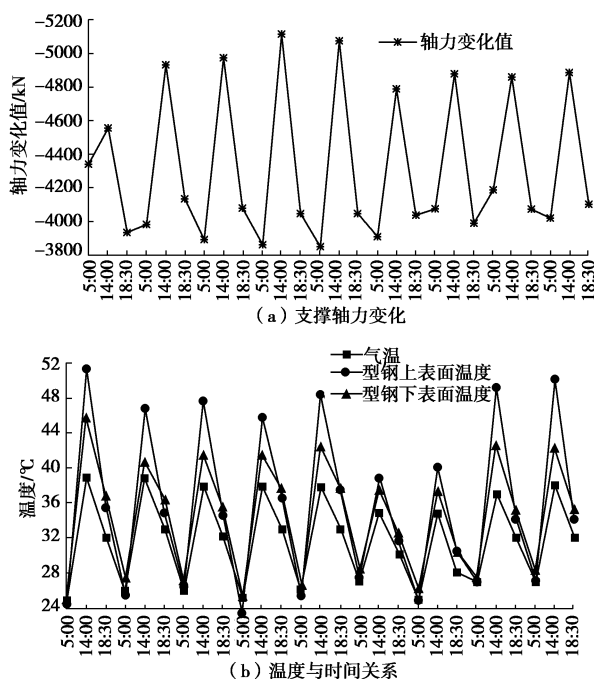


图5 型钢支撑轴力与温度关系

Fig. 5 Axial forces affected by thermal stress

5 结 论

预应力型钢组合支撑是近年来国内出现的新型钢支撑，该项技术除了具有传统钢支撑可回收、施工便捷快速的优点外，还具有高强连接、可施加预应力、可靠性高等优点。本文通过现场试验，验证了预应力型钢组合支撑的受力性能，主要得出3点结论。

(1) 型钢组合支撑实际刚度略小于理论刚度，支撑预应力锁定值是影响基坑变形的关键因素，应采取保证措施保证预应力锁定值满足要求；

(2) 型钢组合支撑的承载力取决于支撑的稳定性，按整体考虑支撑的稳定性是合理的，本工程中支撑承载力满足设计要求，且有较高的冗余度；

(3) 型钢组合支撑的温度应力变化幅度约占实际轴力的29.1%，占设计轴力的7.4%，设计中还应额外考虑温度应力的影响，目前按10%设计轴力考虑温度应力是可行的。

致谢：感谢浙江工业大学硕士研究生宋均国、何品品、谢家文为现场试验作出的贡献。

参考文献：

- [1] 张旷成, 李继民. 杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 338 - 342. (ZHANG Kuang-cheng, LI Ji-min. Accident analysis for ‘08.11.15’ foundation pit collapse of Xianghu Station of Hangzhou metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 338 - 342. (in Chinese))
- [2] COI(2005). Report of the Committee of Inquiry into the incident at the MRT circle line worksite that led to collapse of Nicoll Highway on 20 April 2004[R]. Singapore City: Ministry of Manpower.
- [3] 程雪松, 郑 刚, 邓楚涵, 等. 基坑悬臂排桩支护局部失效引发连续破坏机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1249 - 1263. (CHENG Xue-song, ZHENG Gang, DENG Chu-han, et al. Study of the mechanism of progressive collapse induced by partial failure of cantilever contiguous retaining piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1249 - 1263. (in Chinese))
- [4] 李 瑛, 陈 东, 刘兴旺, 等. 预应力型钢组合支撑应用于软土基坑支护[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 1): 51 - 55. (LI Ying, CHEN Dong, LIU Xingwang, et al. Application of prestressed assemble steel support system in retaining structures for foundation pits in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S1): 51 - 55. (in Chinese))
- [5] DB33T1142—2017 基坑工程装配式型钢组合支撑应用技术规程[S]. 2017. (DB33T1142—2017 Technical specification for assembly steel strutssystem in foundation excavation[S]. 2017. (in Chinese))
- [6] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2012. (in Chinese))

(责编：孙振远)