

DOI: 10.11779/CJGE201604006

# 季节性温度变化对某深大基坑工程的影响分析

刘 畅<sup>1,2</sup>, 张亚龙<sup>1,2</sup>, 郑 刚<sup>1,2</sup>, 郑吉成<sup>3</sup>, 孙雅楠<sup>1,2</sup>

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;

3. 中建城市建设发展有限公司, 北京 100037)

**摘要:**通过对软土地区某停滞深大基坑16个月监测数据的整理分析,研究了季节性温度变化对环梁支撑受力、围护结构位移及基坑周边环境的影响规律。该基坑近似呈矩形,长178 m,宽148 m,采用多道钢筋混凝土圆环支撑结合中部对撑的布置形式。监测结果表明:环梁支撑轴力随着夏季到来持续增大,进入冬季后又逐渐减小,支撑内力变化受温度升降趋势影响显著;温度降低阶段,围护桩明显向坑内移动,且桩顶水平位移增量与温度变化近似呈线性关系,降温引起的多道水平支撑体系的围护结构变形增量呈倒三角变形模式;围护结构水平位移的增加,进一步加剧了坑外土体沉降,对基坑的整体变形以及基坑周边环境造成不利的影响。另外,三维有限元分析表明,围护结构刚度对支撑的温度应力影响很大,土质条件越硬,温度对支撑轴力的影响越大。

**关键词:**季节性; 温度; 基坑; 环梁支撑; 有限元法

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)04-0627-09

作者简介: 刘 畅(1974- ),女,博士,副教授,主要从事基坑工程、桩土相互作用、软土地基的研究。E-mail: lclc74@163.com。

## Effects of seasonal temperature change on a large excavation project

LIU Chang<sup>1,2</sup>, ZHANG Ya-long<sup>1,2</sup>, ZHENG Gang<sup>1,2</sup>, ZHENG Ji-cheng<sup>3</sup>, SUN Ya-nan<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin

University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 3. CSCEC City Construction Development Co., Ltd., Beijing 100037, China)

**Abstract:** The effects of seasonal temperature change on loads of circle beam strut, displacements of retaining structure and variation of the surroundings are investigated based on 16 months' monitoring data of a stagnant braced excavation in soft clay area. The excavation, 148 m wide and 178 m long, is supported by soldier piles and lagging with circle beam reinforced concrete struts. The monitoring results indicate that the loads of the circle beam with the arrival of the summer continue to increase, and decrease gradually after the winter comes. The supporting load is consistent well with the change of the seasonal temperature. At the same time, the soldier piles show apparent movement to the pit and there is approximately a linear relationship between the horizontal displacement of pile top increment and the temperature change. The temperature decrease induces the inverted triangle deformation pattern in enclosure structure with multi-level support system. The increase of horizontal displacement of the retaining structure further aggravates the soil settlement outside the foundation pit, causing adverse effects on the whole deformation of the foundation pit and the surrounding environment. In addition, three-dimensional finite element (FE) analysis is performed. The results suggest that the stiffness of retaining structure plays an important role in strut stress. The harder the soil conditions, the greater the temperature effects on the axial force.

**Key words:** seasonality; temperature; foundation pit; circle beam strut; FEM

## 0 引言

实际工程中的支撑,往往会因为温度的变化而热胀冷缩,温度对基坑支护系统的影响受到越来越多人的关注。Clough等<sup>[1]</sup>在1972年发现,温度增加使得地下连续墙出现了背向开挖侧移动的现象;Boone等<sup>[2]</sup>在美国某新建地铁车站深基坑工程中,观测到了支撑荷载与温度增量变化的直接相关性;Massoudi<sup>[3]</sup>针对

弗吉尼亚州国会大厦改造工程的深基坑实测数据,指出了在采用喷射注浆和地下连续墙的深基坑支护中锚杆受力、变形与温度变化的关系。国内相关的现场实测<sup>[4]</sup>发现,支撑温度升高20℃,支撑轴力的增大超过

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2010CB732106);国家自然科学基金项目(51108312)

收稿日期:2015-04-25

了 150%。文献[5]中报道温度应力是导致基坑工程事故的原因之一。规范<sup>[6]</sup>中也规定, 计算基坑支护系统时, 应考虑温度变化对基坑支护体系的影响。

随着中国城市建设的迅猛发展, 建设过程中大量的超深超大基坑工程越来越多, 随着基坑平面尺寸和深度的不断增大, 出现了很多跨季施工的项目。在进行跨季节施工时, 由于温度变化较大, 由温差变化对基坑支护系统的影响不能忽视。本文通过对软土地区某停滞深大基坑长达 16 个月监测数据的分析, 探究了季节性温度变化对基坑支护系统的影响机理, 通过实测数据分析, 揭示了支撑-围护结构-土三者在温度影响下的变形协调过程, 并对季节性温度变化下的深大基坑工程提出了建议。

## 1 工程实例

### 1.1 工程简介

该工程基坑近似呈矩形, 长 178 m, 宽 148 m, 设计开挖深度 20.1 m, 面积 22900 m<sup>2</sup>。围护结构采用钻孔灌注排桩, 排桩外侧采用三轴水泥搅拌桩或 TRD 水泥土搅拌墙隔水帷幕。基坑内竖向设置四道钢筋混凝土水平支撑体系, 水平支撑采用了圆环支撑结合中部对撑的布置形式。

基坑自 2011 年 4 月开始进行土方开挖, 至 2011 年 9 月普遍开挖至约 12.5 m 深, 并于 9 月底完成第三道支撑施工。由于多方面原因, 在第三道支撑施工完成后基坑一直处于停顿状态, 现场仅有基坑监测和基坑降水正常进行, 至 2013 年 2 月 1 日, 该项目暂缓施工建设长达 16 个月之久。正是基于这一情况的特殊性, 其实测的各项结果排除了基坑开挖和各施工过程的干扰和影响, 期间又经历了季节的更替, 为分析季节性温度变化对基坑支护系统的影响提供了有利条件。

### 1.2 工程与水文地质概况

表 1 典型土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of typical soil layers

土层名称	土层厚度/m	含水率/%	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	孔隙比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	塑性指数	液性指数	压缩系数 α <sub>s</sub> /(MPa <sup>-1</sup> )	压缩模量 E <sub>s</sub> /MPa
1b 素填土	4.3	24.5	19.0	0.73	7.92	11.65	11.2	0.76	0.37	5.1
2a 粉质黏土	4.2	29.1	18.9	0.81	12.14	22.55	11.3	0.92	0.27	7.3
2b 淤泥质黏土	3.0	43.0	17.5	1.21	10.36	11.10	19.5	1.05	0.80	2.9
2c 粉质黏土	8.0	29.4	18.9	0.83	12.70	16.63	14.6	0.78	0.39	5.0
3 粉质黏土	2.0	24.4	19.7	0.67	12.90	20.69	11.8	0.56	0.28	6.2
4 粉质黏土	4.5	25.2	19.6	0.70	13.85	21.66	13.1	0.59	0.32	5.6
5 粉砂	17.0	20.2	20.1	0.58	6.80	37.63	—	—	0.10	16.8

注: c, φ 值为直剪固结快剪试验结果。

该工程场地埋深 60 m 范围内, 分布土层主要为粉质黏土层和粉砂层。场地的浅层地下水含水层为潜水及微承压水。潜水含水组位于场地埋深 19 m 以上, 主要由黏性土组成, 基坑在停滞期间降水一直在进行, 观测数据显示, 潜水水位高度比较稳定, 水位年变幅在 0.6 m 左右; 承压水位于埋深 26 m 处, 主要赋存于(7)粉砂层, 隔水顶板为粉质黏土(6)层, 由于开挖只达到 12 m 深处, 所以尚未涉及承压水问题。场地典型土层的物理力学参数见表 1, 基坑剖面设计如图 1 所示。

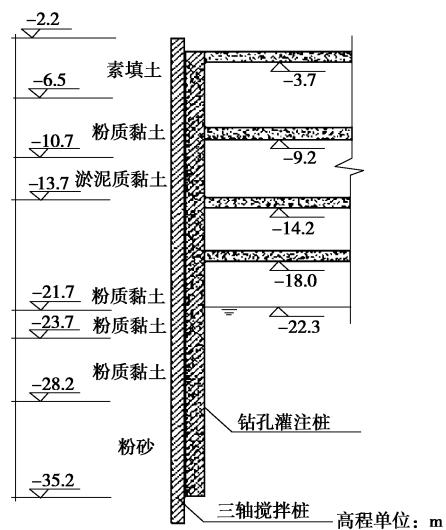


图 1 基坑剖面图

Fig. 1 Sectional view of excavation

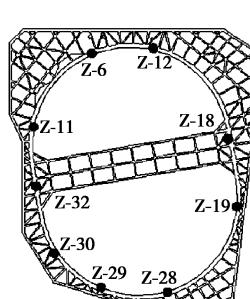
### 1.3 工程监测概况

该工程目前周边建筑物较少, 但管线分布较密。在 2 倍基坑开挖深度范围内分布有给水、燃气、电力、污水和供热等管线, 部分管线在 1 倍基坑开挖深度范围内, 周边环境保护要求较高, 基于工程特点, 制定了较为严格的监测措施。环梁支撑轴力及围护结构测斜监测点布置如图 2。

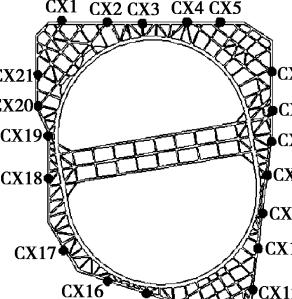
表2 第一、二道环梁实测轴力与现场实测气温

Table 2 Monitored axial forces of 1st and 2nd circle beams and temperatures

日期	第一道环梁实测轴力/kN					第二道环梁实测轴力/kN					实测气 温/℃	
	Z1-6	Z1-11	Z1-18	Z1-30	Z1-32	Z2-6	Z2-12	Z2-18	Z2-19	Z2-29	Z2-32	
2011-11-01	14486.7	9733.1	13248.7	16429.0	11030.2	9932.9	19131.8	11709.9	6344.9	13999.6	3571.5	11
2011-12-01	11087.1	8225.4	11666.4	12015.4	9588.4	1528.1	8847.3	4480.7	2092.5	3571.2	685.8	2.5
2012-01-01	9596.6	7615.5	10655.3	10722.0	9552.3	717.0	5649.8	1765.3	534.3	1859.4	180.7	-2
2012-02-01	10378.8	7739.4	11737.3	11913.7	9964.7	1282.3	6149.4	2658.8	791.2	2579.7	486.4	-1
2012-03-01	12620.9	8163.0	12772.8	13569.9	11044.5	5726.5	14141.4	8825.9	5639.5	8592.9	2514.8	6
2012-04-01	12757.0	8607.2	12695.8	14186.5	11135.0	6694.7	16761.0	9990.7	5689.6	12945.2	3214.0	8
2012-05-01	14430.3	10333.9	13601.4	15201.9	11638.1	15179.4	25707.2	18743.0	18004.9	21467.9	13474.3	20
2012-06-01	15853.0	12279.0	14069.5	16344.7	13288.8	24757.3	32945.9	21877.7	20453.5	24850.1	18269.4	31
2012-07-01	16506.1	13877.0	15370.4	17851.7	13893.0	27134.9	36131.5	22062.8	24014.8	25940.1	21433.9	35
2012-08-01	15618.0	13216.0	15331.0	17403.0	12839.0	22587.0	33454.0	19645.0	22780.0	25674.0	19897.0	34
2012-09-01	16380.6	13605.2	15578.3	17428.3	13460.6	21829.0	34524.0	20820.0	22397.2	25256.0	19952.8	34
2012-10-01	16104.1	12466.5	15531.0	16615.5	12753.5	17222.0	27386.0	16860.0	11096.8	21785.0	13001.5	26
2012-11-01	14827.2	11592.6	13780.9	15064.2	12036.1	13670.0	20779.0	11135.0	5320.0	16260.0	6762.3	17
2012-12-01	13204.9	8879.8	11194.5	11334.4	10326.1	9882.0	9788.0	2034.0	2096.0	10240.0	2165.0	3
2013-01-01	11693.3	7961.6	9468.3	7997.1	8596.0	8533.9	7222.0	1628.0	1234.2	7949.0	1055.2	-1
2013-02-01	14260.1	11183.8	12489.7	14291.0	11714.3	12459.7	16407.8	7620.3	5516.3	17064.4	4328.5	3



(a) 轴力监测点布置



(b) 测斜监测点布置

图2 环梁支撑轴力及围护结构测斜监测点平面布置图

Fig. 2 Floor plan of axial force of circle beams and monitoring points for inclination

别为相应曲线。

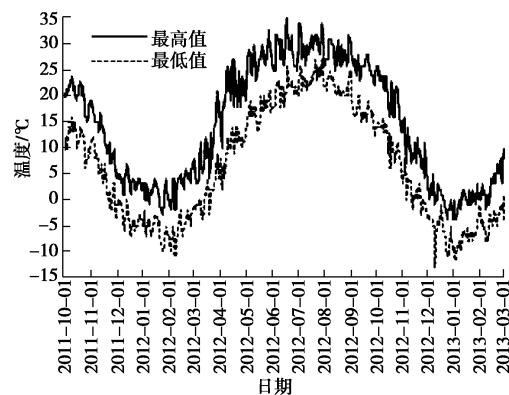


图3 当地的大气温度变化曲线

Fig. 3 Curves of local atmospheric temperature

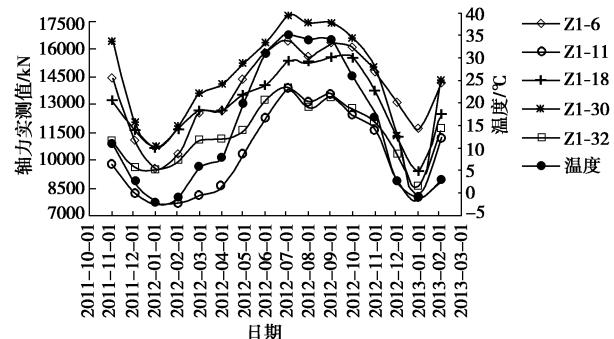


图4 第一道环梁实测轴力随气温和时间变化图

Fig. 4 Variation of monitored axial forces of 1st circle beam with atmospheric temperature and time

## 2 监测结果分析

### 2.1 环梁支撑轴力实测分析

笔者有意选择停止施工一个月后的支撑轴力监测数据开始进行分析, 以排除混凝土支撑收缩徐变等因素带来的影响。轴力监测时, 在每天的同一时间段进行测量, 并同步记录监测时的大气温度。基坑暂缓施工期间, 当地的大气温度变化如图3所示。

从图中可以看出, 从2011年10月1日至2012年1月, 温度逐渐下降, 至2012年7月, 温度呈上升趋势, 然后到2013年的1月, 又逐渐下降到最低值, 该期间温度经历了大幅度变化。表2为第一、二道环梁实测轴力与监测时的现场实测气温, 图4和图5分

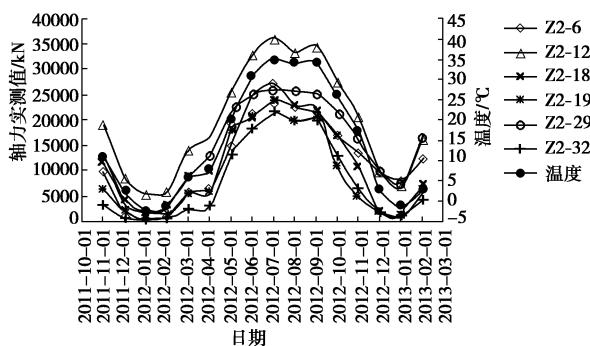


图 5 第二道环梁实测轴力随气温和时间变化图

Fig. 5 Variation of monitored axial forces of 2nd circle beam with atmospheric temperature and time

从图 4, 5 中可以看出, 轴力变化与当地的大气温度变化趋势非常吻合。夏季来临, 温度升高, 支撑受热膨胀, 由于受到两侧土体的约束作用, 支撑内部产生温度应力, 支撑轴力随着季节性温度的升高而增大, 直到达到荷载和变形的协调; 当工程进入冬季时, 大气温度降低, 支撑遇冷收缩, 受两侧土体的约束作用就会减弱, 因此就会出现支撑中的轴力随着温度的降低而减小的现象。

表 3 为温度随季节变化达到最低值和最高值时, 支撑轴力的变化差值。从表中可以看出, 自 2011 年 11 月 1 日至 2012 年 1 月 1 日, 当温度从 11℃ 下降至 -2℃ 时, 第一道环梁轴力最大下降 5707 kN, 第二道最大下降幅度高达 12140 kN, 随着温度降低后, 有些位置 (Z2-6、Z2-19、Z2-32) 处环梁甚至出现基本不受力的状态; 此后温度回升, 到 2012 年 9 月 1 日时, 气温达到最大值 34℃, 此过程温度上升 36℃, 第一道环梁轴力最大增加了 6784 kN, 第二道增幅高达 28874 kN; 当温度再次下降到 2013 年 1 月 1 日时的 -1℃ 时,

表 3 温度对支撑轴力的影响

Table 3 Influences of temperature on axial force

支撑编号	温度		差值/kN	温度		差值/kN	温度		差值/kN
	11℃	-2℃		-2℃	34℃		34℃	-1℃	
Z1-6	14486.7	9596.6	4890.1	9596.6	16380.6	6784	16380.6	11693.3	4687.3
Z1-11	9733.1	7615.5	2117.6	7615.5	13605.2	5989.7	13605.2	6961.6	6643.6
Z1-18	13248.7	10655.3	2593.4	10655.3	15578.3	4923	15578.3	9468.3	6110
Z1-30	16429	10722	5707	10722	17428.3	6706.3	17428.3	7997.1	9431.2
Z1-32	11030.2	9552.3	1477.9	9552.3	13460.6	3908.3	13460.6	8596	4864.6
Z2-6	9932.9	717	9215.9	717	21829	21112	21829	8533.9	13295.1
Z2-12	19131.8	5649.8	13482	5649.8	34524	28874.2	34524	7222	27302
Z2-18	11709.9	1765.3	9944.6	1765.3	20820	19054.7	20820	1628	19192
Z2-19	6344.9	534.3	5810.6	534.3	22397.2	21862.9	22397.2	1234.2	21163
Z2-29	13999.6	1859.4	12140.2	1859.4	25256	23396.6	25256	7949	17307
Z2-32	3571.5	180.7	3390.8	180.7	19952.8	19772.1	19952.8	1055.2	18897.6

第一道支撑轴力最大下降 9431 kN, 第二道环梁轴力最大下降 27302 kN, 由此可见, 季节性温度变化对支撑轴力的影响是巨大的。对比上一升温过程可以发现, 在经历了季节性温度下降—上升—再下降之后, 支撑轴力似乎又回到了升温前 (-2℃) 的轴力水平, 即温度上升时, 支撑的膨胀受到被动区土体的约束, 温度下降后, 支撑收缩, 土体对支撑的约束下降, 轴力又回到升温前的水平, 这一点从图 4 和图 5 中环梁轴力随温度升降趋势也可以看出。

同时也可以看出, 温差对第二道支撑轴力的影响比第一道支撑大很多, 一方面是由于随着基坑深度的增大, 土体和围护结构对支撑的约束增大所致; 另一方面, 温度变化引起的多道水平支撑体系的围护结构变形呈倒三角型变形模式(见下文分析), 上层支撑的位移大于下层支撑的位移, 这样较大的初始变形对支撑受力来说就相当于卸荷效应, 这就使上层支撑轴力受温度变化的影响比下层支撑的小。

## 2.2 围护桩测斜监测分析

根据前文施工节点介绍可知, 2011 年 10 月 1 日基坑第三道水平支撑施工完毕, 坑底标高位于支撑底部, 此后项目缓建, 仅进行基坑降水。图 6 为基坑暂缓施工期间, 部分围护桩水平位移随时间的变化曲线。

从图 6 中可以看出, 桩身位移持续增长主要发生在 2011 年 10 月至次年 1 月, 由于围护桩变形在坑底位置及坑底以上受到第三道支撑的约束, 坑底以下土体固结、流变对围护桩变形的影响较小。而从当地的温度变化曲线(如图 3 所示)可以发现, 从 10 月开始温度逐渐降低, 至 2012 年 1 月降至最低, 此后天气回暖, 温度逐渐上升。将水平位移与温度变化曲线对比可以发现, 两者变化趋势的吻合度较高。大气温度降

低阶段, 围护桩呈现明显的向坑内移动的现象, 而当温度逐步回升后围护结构变形也趋于稳定。可以推断导致围护桩位移持续增长的原因是温度降低引起混凝土支撑收缩, 从而使围护桩产生向坑内的附加位移, 当气温回升后支撑的收缩现象消失, 围护桩变形也逐渐稳定。

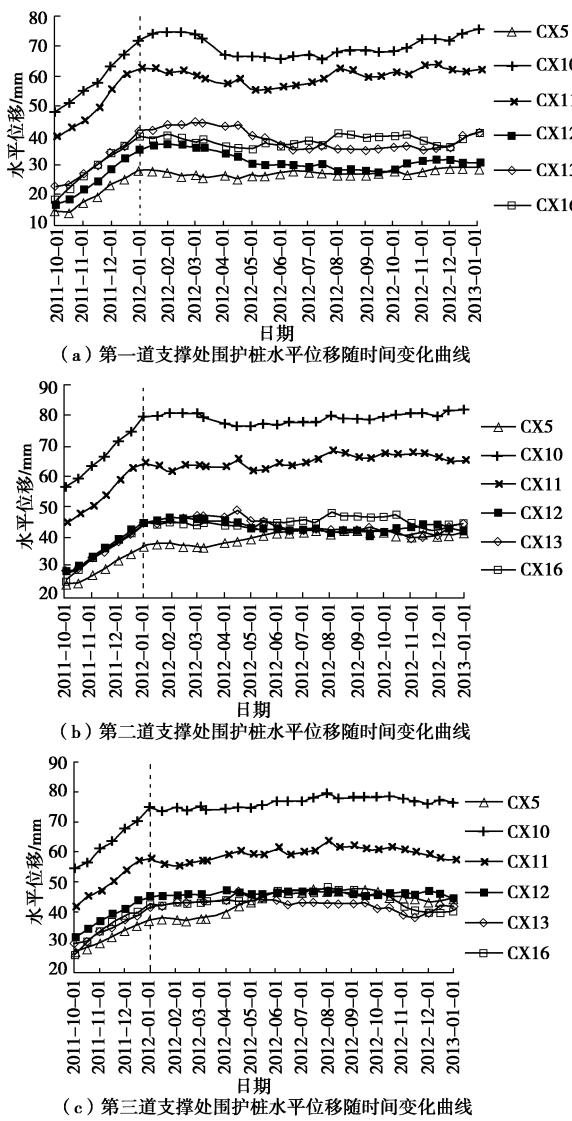


图 6 围护桩水平位移随时间变化曲线

Fig. 6 Variation of horizontal displacement of retaining pile with time

值得注意的是, 在 2012 年 10 月至 2013 年 1 月的第二个降温周期, 围护结构水平位移增量并未随温度的降低持续增大, 笔者分析其原因, 认为由于支撑在温度升高膨胀时, 支撑两侧的约束远远大于在温度降低时支撑两侧的约束, 因此, 在升温阶段, 围护结构的变形趋于稳定, 轴力随温度增大, 说明墙体和墙后土体有足够的刚度抵抗支撑的变形, 这样, 在温度再次降低后, 只是将支撑中的温度应力释放掉(这一过程从图 4 和图 5 中环梁轴力随温度升降趋势也可以看

出), 而支撑在这个过程中并未伸长或缩短, 这很好地体现了支撑—围护结构—土体三者在温度影响下受力和变形的协调过程。

笔者进一步分析了, 从 2011 年 10 月到 2012 年 1 月, 温度下降期间, 围护桩顶部水平位移与温度变化的关系, 如图 7 所示。从图中可以看出, 随着温度下降, 围护桩顶的水平位移逐渐增大, 且呈现出与温度变化近似线性的关系。当温度下降 18℃ 时, 围护桩在桩顶处侧移增加约 15.67~21.45 mm, 占到初始位移的 50%~152%, 可见温度变化对围护结构变形的影响是巨大的。

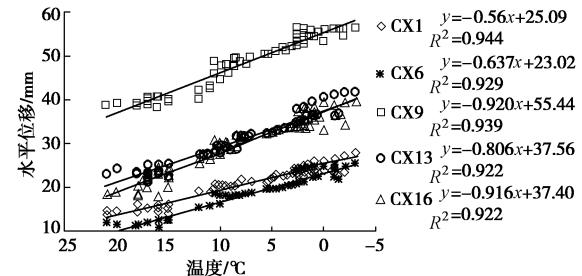
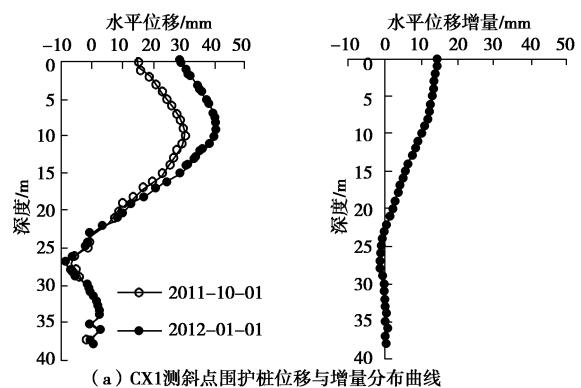


图 7 围护桩顶部水平位移随温度变化曲线

Fig. 7 Variation of horizontal displacement of retaining pile top with temperature

温度下降, 支撑会产生收缩, 支撑的收缩导致围护结构产生向坑内的位移, 必然带动坑外土体产生变形, 进而对坑外既有结构产生影响。因此有必要对温度变化引起的多道水平支撑体系的围护结构变形特点进行深入分析, 研究多支撑围护结构受到温度降低影响产生的附加位移的变形模式。

根据施工节点介绍、塘沽地区温度变化以及围护桩最大位移变化时程曲线可知, 2011 年 10 月 1 日后基坑项目缓建, 至 2012 年 1 月 1 日各测斜监测点位移增长基本达到最大值。因此分别绘制各测斜监测点在该两个时间节点的水平位移沿深度分布曲线, 并绘制该时间段内受到温度降低影响围护桩产生的位移增量分布曲线, 如图 8 所示。



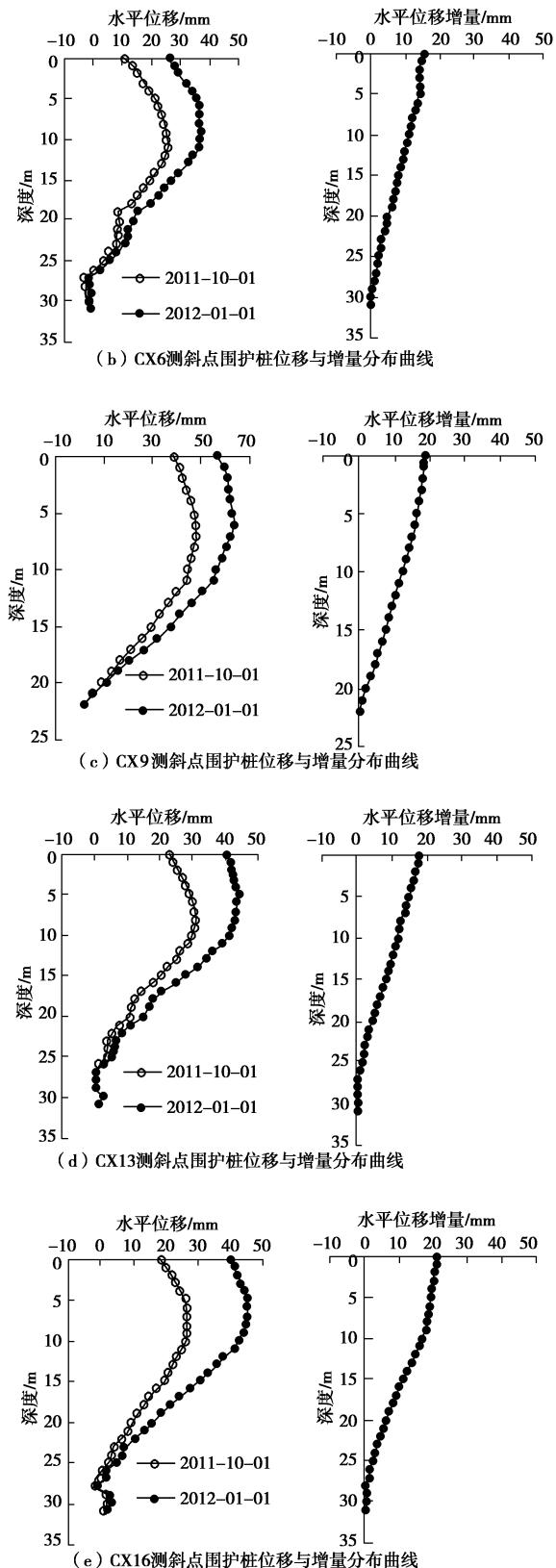


图 8 围护桩水平位移与水平位移增量分布曲线

Fig. 8 Variation of horizontal displacements and their increments of retaining pile with temperature

从图 8 中可以看出, 经过温度降低支撑收缩影响后, 围护桩明显地向坑内移动, 表现为桩顶产生一定水平位移, 而最大水平位移出现在桩身中部, 即悬臂

式与内凸式组合的复合式变形模式<sup>[7]</sup>。但观察围护桩在该期间的位移增量可以发现, 由于受到温度变化影响, 围护桩的附加位移变形表现为顶部位移最大, 随深度增加逐渐减小的倒三角型变形模式。表明温度变化引起的多道水平支撑体系的围护结构变形主要集中在坑底以上部位, 并受到多支撑体系协调变形的影响而呈现出倒三角型特点。

通过上述分析可知, 温度降低附加位移分布形式表现为顶部最大沿深度逐渐减小的倒三角型模式, 该模式对坑外土体的扰动主要集中在坑底以上的浅层部位, 且距围护结构越近影响越明显。本工程在 2 倍基坑开挖深度范围内分布有给水、燃气、电力、污水和供热等管线, 部分管线甚至在 1 倍基坑开挖深度范围内, 由此, 温度降低对坑外既有的浅基础和市政管线等浅埋结构将产生不利影响。

因此, 对于深大基坑工程, 基坑周边存在对变形较为敏感的建筑或市政管线等, 对变形控制较为严格时, 季节性温度变化对围护体系产生的影响应该引起高度关注, 并且有必要对温度效应的影响规律进行深入探讨与研究。

### 3 有限元分析

为深入探究温度对多道基坑支护系统的影响, 采用通用有限元软件 ABAQUS 进行三维建模分析, 将温度荷载作用于支撑上, 并与现场实测结果进行对比。模型选用 1/4 简化计算模型, 模型示意图如图 9 所示。

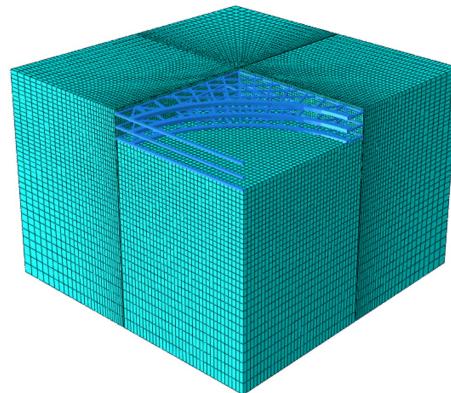


图 9 有限元模型示意图

Fig. 9 Finite element model

#### 3.1 有限元计算参数及工况

土体本构采用修正剑桥模型, 地连墙和环梁支撑分别采用弹性模型和理想弹塑性模型。混凝土环梁支撑的收缩系数取  $\alpha=10^{-5}$ , 为简化计算, 土层参数选用表 1 粉质黏土层和粉砂层, 土层参数如表 4 所示。有限元模拟时, 待第三道支撑完成后, 在支撑上逐级施加温度荷载。

表4 有限元计算模型土层参数

Table 4 Parameters of finite element calculation

土层名称	土层厚度/m	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	$\lambda$	$\kappa$	$M$	$e$
粉质黏土	32	18.9	0.037	0.0052	0.86	0.83
粉砂	34	20.1	0.015	0.0032	1.59	0.58
粉质黏土	34	19.5	0.042	0.0061	1.10	0.7

### 3.2 有限元计算值与实测对比

图10为环梁支撑轴力有限元计算值与实测值对比曲线, 图11为围护结构水平位移及增量计算值与实测值对比。从图10, 11可以看出: 环梁支撑轴力计算值、实测值与现场气温能较好地吻合, 支撑轴力随着温度的波动而波动; 围护结构水平位移计算值与实测值亦能较好地吻合, 说明有限元能很好地模拟由于温度变化对基坑支护系统的影响。

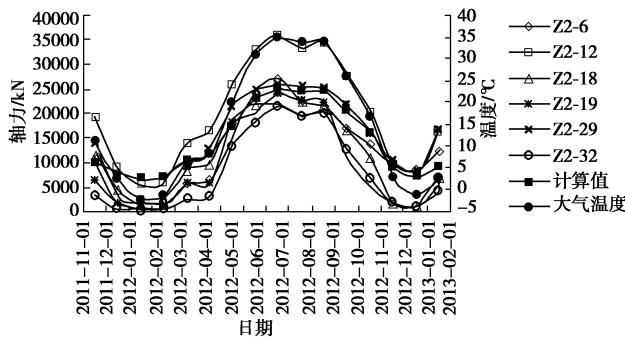


图10 环梁支撑轴力实测值与计算值对比

Fig. 10 Comparison between monitored and calculated axial forces of circle beams

### 3.3 不同因素对支撑温度应力影响的探究

支撑的温度应力是土体、围护结构和支撑三者共同作用的变形协调与受力平衡问题, 除温差外, 和支撑的刚度、围护桩(墙)的刚度以及土的性质等因素均有关系, 下面分别进行探讨分析。

#### (1) 围护结构刚度对支撑轴力的影响

结合上节模型, 分析围护结构刚度增大1.5倍和2倍时, 2012年1月1日与2012年7月1日升温阶段, 第二道支撑的轴力变化情况, 结果见表5。

表5 围护结构刚度与支撑轴力的变化情况

Table 5 Variation of axial force change with retaining stiffness

围护刚度 增大倍数	-2℃时		35℃时		轴力 增大倍数
	轴力/kN	轴力/kN	差值/kN	轴力/kN	
1.0	6778.1	25115.3	18337.2	2.7倍	
1.5	5579.4	24571.6	18992.2	3.4倍	
2.0	4801.2	24237.8	19436.6	4.0倍	

由表5可以看出, 围护结构刚度对环梁轴力的影响很大, 轴力增大的速率随着刚度的增大急剧增大。这是由于随着围护结构刚度的增大, 围护结构对支撑

的约束也随之增大, 由此便导致了在温度作用下, 轴力增大的速率随着刚度的增大而增大的结果。

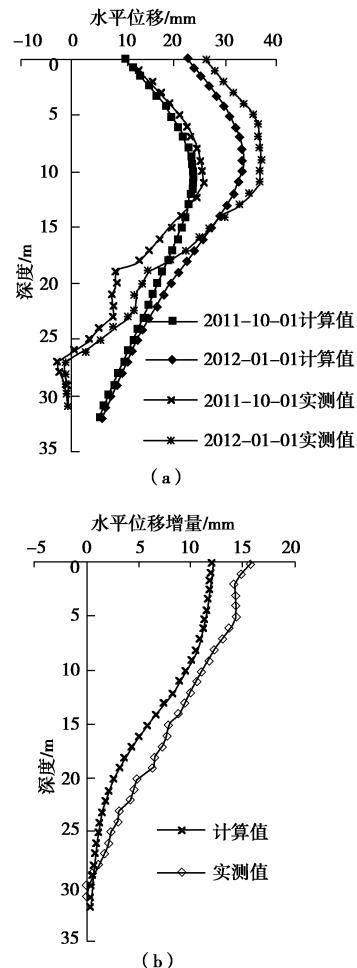


图11 围护结构水平位移与增量计算值和实测值对比

Fig. 11 Comparison between monitored and calculated horizontal displacements and their increments

#### (2) 支撑刚度对支撑轴力的影响

同样将支撑的刚度增大1.5倍和2倍, 与3.2节模型中轴力值进行对比, 结果见表6。

表6 支撑刚度与支撑轴力的变化情况

Table 6 Variation of axial force with strut stiffness

支撑刚度 增大倍数	-2℃时		35℃时		轴力 增大倍数
	轴力/kN	轴力/kN	轴力/kN	差值/kN	
1.0	6778.1	25115.3	25115.3	18337.2	2.7倍
1.5	8637.7	29738	29738	21100.3	2.4倍
2.0	10319.7	32960.8	32960.8	22641.1	2.2倍

由表6可以看出, 支撑刚度对环梁轴力的影响不大, 轴力增大的速率随着支撑刚度的增大略有减小, 采取增大支撑刚度减小温度应力的影响并不是有效的措施。

#### (3) 土的性质对支撑轴力的影响

支撑轴力实际上是由土体和围护结构对支撑的约束产生的, 所以要研究温度对基坑支护体系的影响, 就不能忽略土的性质的影响。这里分别采用表 1 中 2 (b) 层淤泥质黏土、第 4 层粉质黏土和第 6 层粉砂层进行分析。

表 7 土的性质对支撑轴力的影响

Table 7 Variation of axial force with soil parameters

土层	-2℃时 轴力/kN	35℃时 轴力/kN	差值 /kN	轴力 增大倍数
淤泥质黏土	15250	27867	12617	0.83 倍
粉质黏土	12565	30416	17851	1.42 倍
粉砂	7054	34408	27354	3.88 倍

由表 7 可以看出, 温度由-2℃上升至 35℃后, 土层为淤泥质黏土时, 轴力增大 0.83 倍, 粉质黏土时, 轴力增大 1.42 倍, 土层为粉砂时, 环梁轴力增大了 3.88 倍。可见, 随着土质条件越来越硬, 土体对支撑的约束越来越大, 由此导致温度对支撑轴力的影响也越来越大。

### 3.4 温度对环梁弯矩的影响分析

图 12 为环梁的弯矩计算值随温度的变化曲线, 由图 12 可以看出, 环梁弯矩随温度的变化趋势与轴力正好相反, 温度升高, 弯矩减小, 温度降低, 环梁的弯矩反而增大, 且弯矩随温度变化近似呈线性关系。降温过程虽然使轴力降低, 但却增大了环梁的弯矩, 这对于以承受轴向荷载的支撑来说显然是不利的。

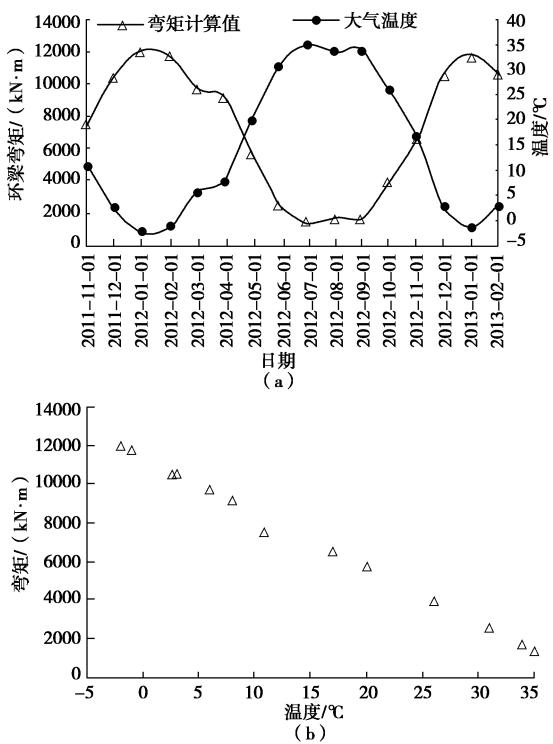


图 12 环梁弯矩随温度变化

Fig. 12 Variation of bending moment of circle beam with temperature

通过对其原因的分析探究, 笔者认为, 这可能是由于降温使环梁支撑产生了不均匀变形, 从而导致圆环撑由轴压受力状态变为偏压和纯弯受力状态, 使环梁的拱效应被削弱。

## 4 结 论

本文通过对软土地区某深大基坑长达 16 个月的监测数据分析, 探究了季节性温度变化对基坑支护系统的影响机理, 通过现场实测数据分析, 揭示了支撑—围护结构—土三者在温度影响下的变形协调过程, 并通过三维有限元分析, 得出以下结论:

(1) 环梁轴力随着季节性温度变化而波动, 且轴力升降幅度与温度变化趋势非常吻合; 温度升高 36℃ 引起支撑轴力的增幅高达 28874 kN, 由此可见, 季节性温度变化对支撑轴力的影响是巨大的; 同时发现, 温差对第二道支撑轴力的影响比第一道支撑大很多。

(2) 导致围护结构位移持续增长的原因是温度降低引起混凝土支撑收缩, 从而使围护桩产生向坑内的附加位移, 当气温回升后支撑的收缩现象消失, 围护桩变形也基本稳定。随着温度下降, 围护桩顶的水平位移逐渐增大, 且呈现出与温度变化近似线性的关系。当温度下降 18℃ 时, 围护桩在桩顶处侧移增加 15.67~21.45 mm, 占到初始位移的 50%~152%, 可见温度变化对围护结构变形的影响是巨大的。通过实测和计算发现, 降温引起的多道水平支撑体系的围护结构变形呈倒三角型变形模式。

(3) 降温过程使得围护结构水平位移增加, 而围护结构水平位移的增加, 又进一步加剧了坑外土体沉降, 对基坑的整体变形以及基坑周边环境造成不利的影响。当出现跨季节施工时, 季节性温度变化对基坑支护结构的受力及变形的影响, 应该引起足够的重视, 并作为基坑支护系统设计的一部分予以考虑并加强监测。

(4) 在设计时, 对于昼夜温差较大或跨季节施工的深大基坑工程, 应将温度效应作为一种工况进行考虑, 对环梁支撑适当增加配筋, 以抵抗升温时轴力增大, 降温时弯矩增大的不利影响。在施工过程中, 进入夏季后, 对支撑可以采取遮挡、水淋等降温措施, 进入冬季时, 可以采取遮盖等保温措施, 以保证基坑及周边环境的安全。

(5) 围护结构对环梁轴力的影响很大, 轴力增大的速率随着围护结构刚度的增大急剧增大但随支撑刚度的增大略有减小; 土质条件越硬, 温度对支撑轴力的影响越大。

(6) 降温过程虽然使轴力降低, 但却增大了环梁

的弯矩,这对于以承受轴向荷载的支撑来说十分不利。因此,应加强对环梁内力监测,测量时尽量在一天的同一时段进行,以确保监测结果的条件统一性。

需要说明的是,由于篇幅限制,本文未考虑土体和围护结构的温度变化、围护结构内外侧的温差、支撑的长度、支撑的不同位置等因素的影响,而这些因素均会对支撑轴力产生影响,针对这些因素影响的研究正在进行中。

### 参考文献:

- [1] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Temperature effects on behavior of port allen locks[C]// Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structure. New York: ASCE, 1972: 1467 - 1479.
- [2] BOONE S J, CRAWFORD A M. Braced excavations: Temperature, elastic modulus, and strut loads[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2000, **126**(10): 870 - 881.
- [3] MASSOUDI N. Temperature effect on tieback loads[C]// 2009 International Foundation Congress and Equipment Expo. Orlando: ASCE, 2009: 49 - 56.
- [4] 田敬学. 深基坑围护结构温度应力监测与分析[J], 施工技术, 2006, **35**(7): 21 - 22. (TIAN Jing-xue. Monitoring and analysis of deep foundation pit enclosure structure thermal stress[J]. Construction Technology, 2006, **35**(7): 21 - 22. (in Chinese))
- [5] 张中普, 姚笑青. 某深基坑事故分析及技术处理[J]. 施工技术, 2005, **34**(12): 72 - 73. (ZHANG Zhong-pu, YAO Xiao-qing. Accident analysis and technology dispose of certain deep foundation pit[J]. Construction Technology, 2005, **34**(12): 72 - 73. (in Chinese))
- [6] 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. (JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese))
- [7] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程施工设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (GONG Xiao-nan, GAO You-chao. Construction and design manual of deep excavation engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998. (in Chinese))

### 《岩土工程学报》第十二届编委会第一次全体会议纪要

《岩土工程学报》第十二届编委会第一次全体会议于2016年4月8日20时在南京召开,会议由学报第十一届编委会主任殷宗泽教授主持,参加会议的代表包括新一届编委会委员70人及编委委托人4人,共计74人,学报编辑部的所有成员列席了会议。会议宣布《岩土工程学报》第十二届编委会成立,并向新一届编委颁发了聘书。会议通过了新一届编委会负责人名单,陈生水担任编委会主任,汪小刚、龚晓南、孔令伟、滕延京、陈祖煜和张建民担任编委会副主任。会议还通过了学报主编、

副主编以及常务编委名单。会上编辑部主任明经平做了第十二届编委会筹备情况的报告和《岩土工程学报》编辑部工作报告,与会代表对如何进一步做好学报工作、提高学报质量进行了交流和讨论。会议还选举了第20讲黄文熙讲座主讲人,经过与会编委的投票选举,香港科技大学的吴宏伟教授得票领先,当选为第20讲黄文熙讲座主讲人。本次编委会期间,第19讲黄文熙讲座学术报告会于2016年4月9日在南京隆重举行,讲座学术报告会由河海大学承办,500多名各界代表出席了会议。

(本刊编辑部)