

DOI: 10.11779/CJGE2015S1013

改进的基坑支护水平支撑温度应力及水平位移的计算方法

刘 畅^{1, 2}, 张亚龙^{1, 2}, 郑 刚^{1, 2}, 孙盼盼^{1, 2}

(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)

摘 要: 温度变化对基坑支护系统受力和变形的影响受到越来越多的人的重视。为改进基坑支护系统中温度应力的计算方法, 基于 Winkler 地基梁模型, 采用弹性抗力法, 提出等效弹簧刚度的概念, 并推导了由于温度升高引起的支撑轴力和水平位移的计算公式, 并且把计算结果和前人进行了对比。结果表明: 与迭代法相比, 省去了迭代过程, 计算量大大减少, 可用于估算实际工程中由于温度升高引起的水平支撑的温度应力和水平位移。

关键词: 基坑支护结构; 水平支撑; 温度应力; 水平位移

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)S1-0061-04

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: lcl74@163.com。

Modified method for calculating temperature stress and displacement in horizontal strut of foundation pits

LIU Chang^{1, 2}, ZHANG Ya-long^{1, 2}, ZHENG Gang^{1, 2}, SUN Pan-pan^{1, 2}

(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)

Abstract: The influence of temperature change on the stress and deformation of support system of foundation pits attracts more and more people's attention. Based on the Winkler foundation model and the elastic resistance method, the equivalent spring stiffness is proposed to improve the method for calculating the temperature stress in the horizontal strut of a foundation pit. A formula for calculating the change of axial force and horizontal displacement of strut due to temperature change is derived. Compared with the pre-method, the proposed method is simpler. Besides, it can also be used to estimate the change of axial force and horizontal displacement of strut due to temperature rise.

Key words: pit-retaining structure; horizontal strut; temperature stress; horizontal displacement

0 引 言

实际工程中的混凝土支撑, 往往会因为温度的变化而热胀冷缩^[1], 温度升高, 支撑受热膨胀, 使围护结构产生向坑外的位移, 同时由于支撑两侧土体的约束作用, 支撑内部会产生温度应力; 同理, 温度下降时, 支撑降温收缩, 围护结构向坑内位移, 支撑内部产生温度应力。在昼夜温差较大的地区或进行跨季节施工时, 由于温度变化较大, 由温差变化引起的基坑支护系统内的附加应力就不能忽视了。为此, 规范^[2]中规定, 计算基坑支护系统时, 应考虑温度变化的影响, 但并未提供具体的计算方法。吴长胜等^[3]根据弹性地基梁理论, 将温度应力分布函数用于围护结构的内力分析, 建立了解析计算模型; 郑刚等^[4]以弹性抗力法为基础, 将围护结构变形简化为线性分布, 提出

了支撑-围护桩-土三者相互变形协调作用的基坑支护水平支撑温度应力单道支撑简化分析计算模型; 吴明等^[5]又在上述方法基础上, 经过假设, 推导出可以考虑多层支撑基坑的温度应力的简化计算模型等。

文献[4, 5]的计算公式均是基于迭代法推导出的, 首先假设支撑两端固定, 温度升高 Δt 引起的支撑轴力为 $F_0 = \alpha EA \Delta t$, 而实际情况是支撑两端并非固定, 由温度引起的支撑轴力必然会使围护结构产生变形 x_0 , 又由于围护结构产生水平位移 x_0 , 使得原来假设两端固定的支撑轴力减小为 F_1 , 根据变形协调公式求出由 F_1 引起的围护结构的水平位移 x_1 , 由 x_1 使原来假设两

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

收稿日期: 2015-03-26

端固定的支撑轴力减小为 F_2 ，如此反复迭代，直到达到满足的求解精度，使 $F_{i+1} \approx F_i$ 。

迭代法的方法原理较为简单明了，易于理解，但由于精度要求不同导致迭代次数不能确定，由此可能产生较大的工作量。笔者认为该方法尚可以简化，为此，提出等效刚度的概念，并推导了由于温度变化引起的支撑轴力和水平位移的计算公式，并把计算结果和前人进行了对比，算例表明，本文方法简单，计算结果保守。

1 计算模型

温度变化对支撑受力和变形的影响，实质上是支撑、围护结构和土体三者的变形协调问题。支撑在受热膨胀时，将会使围护结构产生向坑外的位移，但由于受到支撑两侧土体的约束作用，就不能自由收缩。为简化计算，将支撑两侧土体的作用等效为弹簧，由温度作用引起支撑的内力和变形计算简图如图 1 所示。

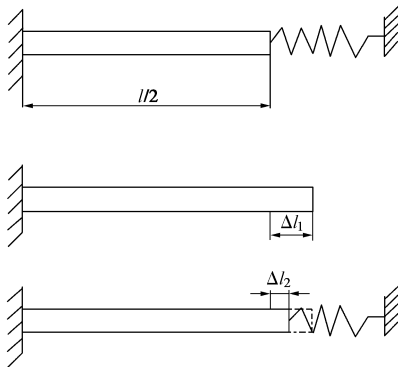


图 1 模型简图

Fig. 1 Sketch of simplified model

$$\Delta l_1 = \alpha \cdot \frac{l}{2} \cdot \Delta t, \quad (1)$$

$$\Delta l_2 = \frac{Fl}{2EA}, \quad (2)$$

$$F = K(\Delta l_1 - \Delta l_2), \quad (3)$$

$$\delta = \Delta l_1 - \Delta l_2 = \frac{\alpha l \Delta t}{2} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{2EA}{Kl}} \right). \quad (4)$$

式中 α 为温度线膨胀系数； l 为杆件的长度； Δl_1 为无约束时，由于温度升高而引起的杆件的伸长量； Δl_2 为有约束时，由于温度升高而引起的杆件的伸长量； Δt 为温度变化值； F 为杆件的轴力； E 为混凝土的弹性模量； A 为支撑的截面面积； K 为等效弹簧刚度； δ 为由于温度变化引起的水平位移增量。

等效弹簧刚度 K 的意义为：将桩顶至坑底范围内

的弹簧等效在支撑作用位置处，以弹性地基梁理论为基础，推导出 K 的取值。

由于温度升降引起的底层支撑轴力变化值最大，顶层温度升降引起的支撑轴力变化值最小^[6]，所以此处只推导底层支撑处的等效弹簧刚度 K ，计算简图如图 2。

近似假设第 i 层支撑由于温差产生的轴力 F 仅由第 i 层支撑到第 $i+1$ 层支撑之间围护桩的变形所产生的土压力来平衡。

假设围护桩受温度影响时，每段支撑之间的围护桩的变形都是线性的，坑底处变形为零，坑底以下产生向坑内的变形。

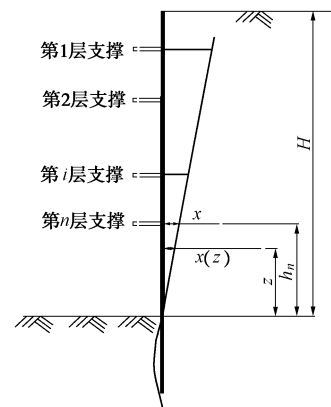


图 2 模型简图

Fig. 2 Sketch of simplified model

设温度变化后支撑位置处的水平位移为 x ，同时由于弹簧的作用，支撑轴力变化为 F ，则基坑底部高度 z 处由于温度变化引起的位移为

$$x(z) = x \frac{z}{h_n}. \quad (5)$$

假设每根支撑分担支撑水平间距 D 之间的土压力，则在任意高度 z 处取一微段 dz ，那么墙后土的反力为 $dN = kDx(z)dz$ ，则：

$$N = \int_0^{h_n} dN. \quad (6)$$

其中水平抗力系数 $k = m(H - z)$

$$N = \int_0^{h_n} dN = \frac{(3H - 2h_n)mDh_n}{6} x. \quad (7)$$

由假设可知第 n 层支撑由于温差产生的轴力 F 仅由第 n 层支撑至坑底之间围护桩的变形所产生的土压力来平衡，即

$$F = N = \frac{(3H - 2h_n)mDh_n}{6} x = Kx. \quad (8)$$

即得等效弹簧刚度为

$$K = \frac{(3H - 2h_n)mDh_n}{6}. \quad (9)$$

将求得的等效弹簧刚度 K 代入式 (4) 可得温度

变化引起的支撑水平位移增量 δ , 代入式 (3) 就可以求出支撑内的轴力增量 F , 所求出的解即为迭代法要达到的最终结果, 这样就省去了繁琐的迭代过程, 极大地减少了工作量。

2 算例对比

2.1 算例 1^[4]

某工程基坑呈矩形, 开挖深度 $H=8\text{ m}$, 围护桩顶位于地面以下 2 m , 在桩顶处设置一道钢筋混凝土水平支撑, 即 $h_n=6\text{ m}$, 支撑水平向间距 $D=10\text{ m}$, 支撑长度 $L=30\text{ m}$, 支撑横截面积 $A=0.25\text{ m}^2$, $\alpha=10\times 10^{-6}$, 白天在日光照射下钢筋混凝土支撑上升至最高温度与夜间低温时的最大温差 $\Delta T=20^\circ\text{C}$, $m=5000\text{ kN/m}^4$, $E=2.6\times 10^7\text{ kN/m}^2$ 。

迭代法计算结果如表 1。

表 1 算例 1 计算结果

Table 1 Results of example 1

迭代次数 i	$Y_i = \frac{6}{(3H - 2h_n)mDh_n} N_i$	$N_i = N_0 - \frac{AE}{L} \cdot 2Y_i$
0	—	1300.0
1	2.17×10^{-3}	360.4
2	6.01×10^{-4}	1039.8
3	1.74×10^{-3}	546.6
4	9.13×10^{-4}	904.7
5	1.51×10^{-3}	646.2
6	1.08×10^{-4}	832.4
7	1.39×10^{-3}	698.1
8	1.17×10^{-4}	793.4
9	1.32×10^{-3}	728.4
10	1.22×10^{-4}	771.7
11	1.29×10^{-3}	741.4
12	1.24×10^{-4}	763.1
13	1.27×10^{-3}	750.1
14	1.25×10^{-4}	757.6

注: Y_i 单位为 m , N_i 单位为 kN 。

利用迭代法, 迭代了 14 步之后得到结果 $\delta=1.25\times 10^{-3}\text{ m}$, $F=757.6\text{ kN}$ 。

用本文计算方法:

利用式 (9) 可得等效弹簧刚度为 $K=6\times 10^5\text{ kN/m}$ 。

将等效弹簧刚度代入式 (4) 可得支撑的水平位移为 $\delta=1.258\times 10^{-3}\text{ m}$ 。

将求得的支撑的水平位移为 δ 代入式 (3) 可得, 支撑内的轴力为 $F=754.84\text{ kN}$ 。

通过对比可以发现, 利用迭代法需要迭代 14 步才能得到相对稳定的结果, 本文所提出的方法省去了迭代过程, 使计算量大大减少。本工程实测得到的水平支撑轴力白天最大值为 3150 kN , 清晨轴力为 2540 kN , 轴力变化幅度 610 kN 。计算所得温度升高引起支撑轴力变化值为 754.84 kN , 计算结果大于轴力变化实

测值, 偏于保守。

2.2 算例 2^[4]

某基坑长 150 m , 宽 33 m , 深 9 m , 采用 $800@1000$ 的灌注桩支护, 桩长 16 m , 桩的混凝土标号为 C25。开挖深度 $H=9\text{ m}$, 围护桩顶位于地面以下 2 m , 在桩顶处设置一道格构式水平钢支撑, 即 $h_n=7\text{ m}$, 支撑水平向间距 $D=10\text{ m}$, 支撑长度 $L=33\text{ m}$, 支撑横截面积 $A=0.0196\text{ m}^2$, $\alpha=12\times 10^{-6}$, 白天在日光照射下, 钢支撑上升至最高温度与夜间低温时的最大温差 $\Delta T=10^\circ\text{C}$, $m=5000\text{ kN/m}^4$, $E=2.06\times 10^8\text{ kN/m}^2$ 。

迭代法计算结果如表 2。

表 2 算例 2 计算结果

Table 2 Results of example 2

迭代次数 i	$Y_i = \frac{6}{(3H - 2h_n)mDh_n} N_i$	$N_i = N_0 - \frac{AE}{L} \cdot 2Y_i$
0	—	484.5
1	6.39×10^{-4}	328.2
2	4.33×10^{-4}	378.5
3	4.99×10^{-4}	362.3
4	4.78×10^{-4}	367.6
5	4.85×10^{-4}	365.9

利用迭代法, 迭代了 5 步之后得到结果 $\delta=4.85\times 10^{-4}\text{ m}$, $F=365.9\text{ kN}$ 。

用本文计算方法:

利用式 (9) 可得等效弹簧刚度为 $K=7.58\times 10^5\text{ kN/m}$ 。

将等效弹簧刚度代入式 (4) 可得支撑的水平位移为 $\delta=4.83\times 10^{-4}\text{ m}$ 。

将求得的支撑的水平位移为 δ 代入式 (3) 可得, 支撑内的轴力为 $F=366.31\text{ kN}$ 。

通过对比可以发现, 利用迭代法需要迭代 5 步才能得到相对稳定的结果, 利用本文的方法将会使计算量大大减少。本工程钢支撑的轴力变化实测值平均约为 250 kN , 计算所得温度升高引起支撑轴力变化值为 366.31 kN , 计算结果大于轴力变化实测值, 按计算值考虑偏于保守。

2.3 算例 3^[5]

基坑深度 15.2 m , 共设置两道支撑, 第一道支撑距地面 3.1 m , 第二道支撑距地面 8.69 m , $h_n=6.51\text{ m}$, $H=15.2\text{ m}$, $m=6000\text{ kN/m}^4$, 支撑长度 $L=27.3\text{ m}$, 支撑面积 $A_c=0.0138\text{ m}^2$, 热膨胀系数 $\alpha=5.0\times 10^{-6}$, 钢支撑弹性模量 $E_c=2.08\times 10^8\text{ kN/m}^2$, 对撑间距 $D=3.1\text{ m}$, $\Delta T=22^\circ\text{C}$ (40°F)。

迭代方法计算结果如表 3。

利用迭代法, 迭代了 6 步之后得到结果 $\delta=6.61\times 10^{-4}\text{ m}$, $F=435.10\text{ kN}$ 。

用本文计算方法:

利用式 (9) 可得等效弹簧刚度为 $K=6.569\times 10^5$ kN/m。

表 3 算例 3 计算结果
Table 3 Results of example 3

迭代次数 i	$Y_i = \frac{6}{(3H - 2h_n)mDh_n}N_i$	$N_i = N_0 - \frac{AE}{L} \cdot 2Y_i$
0	—	574.30
1	8.74×10^{-4}	390.27
2	5.94×10^{-4}	449.27
3	6.84×10^{-4}	430.36
4	6.55×10^{-4}	436.42
5	6.64×10^{-4}	434.47
6	6.61×10^{-4}	435.10

将等效弹簧刚度代入式 (4) 可得支撑的水平位移为 $\delta=6.62\times 10^{-4}$ m。

将求得的支撑的水平位移为 δ 代入式 (3) 可得, 支撑内的轴力为 $F=434.87$ kN。

通过对比可以发现, 利用迭代法需要迭代 6 步才能得到相对稳定的结果, 利用本文的方法将会使计算量大大减少。本工程支撑实测温度升降引起的轴力变化值为 350 kN, 计算所得温度升高引起支撑轴力变化值为 434.87 kN, 计算结果大于轴力变化实测值, 按计算值考虑偏于保守。

3 结 论

本文在前人研究的基础上, 基于 Winkler 地基梁模型, 采用弹性抗力法, 以温度变化引起的支撑轴力和水平位移变化达到平衡状态为推导前提, 提出了等效弹簧刚度的概念, 推导了由温度变化引起的支撑轴力和水平位移的计算公式, 并且把计算结果和前人进行了对比。结果表明:

(1)迭代法的计算原理虽然简单明了, 易于理解, 但由于精度要求不同导致迭代次数不能确定, 由此可能产生较大的工作量。改进后的方法与迭代法相比, 所求出的解即为迭代法要达到的最终结果, 省去了繁琐的迭代过程, 使计算量大大减少。

(2)通过本文的计算结果和工程实测结果对比可以看出, 计算结果大于轴力变化实测值, 计算结果偏于保守, 而且计算方法简单易易于手算, 可用于估算实际工程中水平支撑的温度应力和由温度引起的水平位移, 为工程技术人员考虑温度效应的影响时提供了参考。

参考文献:

[1] 王志刚, 范 鹏, 杨会军, 等. 温度变化引起的超宽基坑围护结构变形分析[J]. 隧道建设, 2005, 25(3): 12 - 14. (WANG Zhi-gang, FAN Peng, YANG Hui-jun, et al. Deformation analysis on super wide envelope of foundation pit due to temperature change[J]. Tunnel Construction, 2005, 25(3): 12 - 14. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 吴长胜, 田敬学. 基坑围护结构温度应力分析[J]. 西部探矿工程, 2004(5): 17 - 18. (WU Chang-sheng, TIAN Jing-xue. Analysis of thermal stress of excavation enclosure structure[J]. West-China Exploration Engineering, 2004(5): 17 - 18. (in Chinese))

[4] 郑 刚, 顾晓鲁. 考虑支撑-围护桩-土相互作用的基坑支护水平支撑温度应力的简化分析法[J]. 土木工程学报, 2004, 35(3): 87 - 89. (ZHENG Gang, GU Xiao-lu. Simple method for calculating temperature stress in horizontal strut of foundation pit considering strut-pile-soil interaction[J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 35(3): 87 - 89. (in Chinese))

[5] 吴 明, 孙鸣宇, 夏唐代, 等. 多层支撑深基坑中考虑支撑-围护桩-土相互作用的水平支撑温度应力简化计算方法[J]. 土木工程学报, 2009, 42(1): 91 - 94. (WU Ming, SUN Ming-yu, XIA Tang-dai, et al. Simplified method of calculating temperature stress in multi-layer struts for deep excavations considering strut-pile-soil interactions[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(1): 91 - 94. (in Chinese))

[6] 郑 刚, 顾晓鲁, 王建林. 温度变化对基坑支护结构的影响分析[C]// 中国土木工程学会第八届全国土力学及岩土工程学术会议论文集. 南京: 万国学术出版社, 1999: 631 - 634. (ZHENG Gang, GU Xiao-lu, WANG Jian-lin. Analysis of effect of temperature change on the retaining structure of foundation pit[C]// Proceedings of China Civil Engineering Society Symposium on the Eighth National Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Nanjing: International Academic Publishers, 1999: 631 - 634. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)