

DOI: 10.11779/CJGE2014S2011

温度应力对深基坑支护结构内力与变形的影响研究

向 艳

(武汉市建设工程设计审查办公室, 湖北 武汉 430023)

摘要:通过对武汉某基坑的地连墙加钢筋混凝土内支撑结构的应力、变形监测,详细分析了温度应力对内支撑杆件轴力和支护结构变形的影响规律,研究表明,当温度从30℃增加到37℃时,内支撑的轴力增幅达41%,冠梁水平位移有较明显的降低;当温度降低时,冠梁顶水平位移增加,坑壁外侧土体的水平位移变化明显滞后于地连墙的位移变化,导致地连墙至边坡范围内土体出现大量裂缝。提出了降低温度应力对基坑施工影响的工程技术措施,以及施工期内温差较大者应将内支撑混凝土强度提高一个等级、考虑支护结构位移的影响宜适当减少支护结构位移允许值、支撑长度大于40 m时温度影响系数宜取1.2及未采取必要保温保湿措施时温度影响系数取1.4以上等建议。研究成果对于类似工程有重要的理论和实践意义。

关键词:深基坑; 温度应力; 内支撑结构; 监测; 安全性

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0064-06

作者简介: 向 艳(1963-),女,湖北武汉人,工学硕士,教授级高级工程师,武汉市深基坑工程咨询审查专家委员会秘书长。E-mail: 719077143@qq.com。

Influence of temperature stress on internal force and deformation of retaining structures for deep excavations

XIANG Yan

(Construction Engineering Design Review Office of Wuhan, Wuhan 430023, China)

Abstract: The influence of temperature stress upon internal force and deformation of retaining and structures for deep excavations is analyzed by monitoring the foundation pit of Wuhan Changjiang Shipping Center. The results show that the axial force of bracing system is increased by 41% and the horizontal displacement of the crown beams is decreased obviously when the temperature increases from 30℃ to 37℃. When the temperature drops, the horizontal displacement of the top crown beams increases 17 mm, and that of the lateral soils outside the retaining wall significantly lags behind the displacement of concrete retaining wall, resulting in large crack in soils between the wall and the side ditch. Some construction and technical measures are put forward to reduce the effect of temperature stress, and concrete strength should be increased by one grade if large temperature difference occurs during construction period. It is suggested that the allowable values of retaining structures should be appropriately reduced considering the displacement of supporting structures, the temperature influence coefficient should be 1.2 when the supporting length is greater than 40 m, and it should be above 1.4 without necessary thermal insulation and moisturizing measures. This research has important theoretical and practical significance for similar projects.

Key words: deep foundation pit; temperature stress; internal bracing; monitoring; safety

0 引言

随着中国城市建设的发展,深基坑工程越来越多,连续墙加内支撑成为普遍的支护结构型式。当内支撑的截面尺寸较大时,其温度应力对深基坑支护系统的内力与变形的影响不容忽视。从现有基坑规范可以看出^[1-4],温度高低不同使得支护结构的性能发生明显变化;已有的研究成果表明:温度应力的变化受气温差控制,当温差大于20℃时对内支撑温度应力的影响

更为显著。

国内外部分学者针对温度应力对基坑支护结构的应力和变形的影响开展了一些研究工作。郑刚等^[5]采用弹性抗力法分析因温差所引起基坑支护系统内力变化研究成果的基础上,对采用一道水平支撑的支护系统,发展了一种考虑支撑支护桩土相互作用的估算水平支撑温度应力的简化分析法,根据实例计算得出温

度升高 20℃时, 内支撑的轴力增加约 23%。吴长胜, 田敬学等^[6]以弹性地基梁理论为基础, 在基坑支护结构的分析中引入温度应力分布函数, 得出了温度升高 20℃支撑轴力增加 21%~23%、温度升高 30℃支撑轴力增加约 33%。陆培毅等^[7]将温度与场应力场耦合来分析内支撑的温度效应, 计算得出温度升高 20℃时支撑轴力增加约 15%。陈玉香^[8]采用 ANSYS 软件对东京某基坑支护结构的连续墙进行有限元分析, 得到随着开挖深度的增加, 环境温度变化对支护结构的作用范围越大, 应考虑季节性温度变化对连续墙墙形的影响。

以上研究表明, 温度应力对基坑支护结构应力与变形的影响不可忽略, 中国南方地区昼夜温差达 20℃, 对内支撑应力的影响更大。根据武汉某基坑的施工和监测成果, 研究温度应力对内支撑轴力、支护结构变形的影响规律, 提出减小温度应力对基坑支护结构影响的施工措施。

1 深基坑工程概况

武汉市长江航运中心还建楼基坑临江, 普遍开挖深度 10.6~12.2 m, C35 钢筋混凝土地下连续墙深 29.8 m、宽 800 mm, C40 钢筋混凝土内支撑尺寸 800 mm×1100 mm 或 800 mm×800 mm (高×宽), 基坑临时支护结构体系设计使用年限为 2 a。

2013 年 4 月 3 日基坑土体开挖, 4 月 21 日完成内支撑浇灌, 5 月 12 日基坑均开挖至设计标高, 5 月 26 日完成小基坑底板浇注, 之后暂停施工; 8 月中旬开始地下二层的施工, 9 月 29 日开始浇筑其顶板, 10 月 7 日基坑完成换撑; 2014 年 1 月 17 日施工地下一层, 1 月 22 日完成其顶板浇筑。

场区地面高程为 25.8 m, 从上至下岩土层分别为: ①杂填土, 层底高程约 17.95 m~21.15 m; ②-1 粉质黏土夹粉土, 层底高程约 9.95~16.65 m; ②-2 粉质黏土与粉土粉砂互层, 层底高程约 -2.01~8.15 m; ③-1 细砂, 粉质黏土与粉土粉砂互层, 层底高程约 -13.69~-3.41 m; ③-2 细砂, 粉质黏土与粉土粉砂互层, 层底高程约 -27.05~-26.56 m。

施工监测从 2013 年 3 月至 2014 年 3 月, 历时 1 年; ZD1 测点截面积为 800 mm×1100 mm, ZD4 测点截面积为 800 mm×800 mm (图 1, 2)。

2 温度应力对支撑杆件内力的影响

2.1 基坑施工和监测期间的温度变化

武汉属亚热带季风性湿润气候区, 具有雨量充沛、

夏季酷热和冬季寒冷的特点。武汉市长江航运中心还建楼基坑施工和监测期间, 其气温变化情况如图 3 所示。

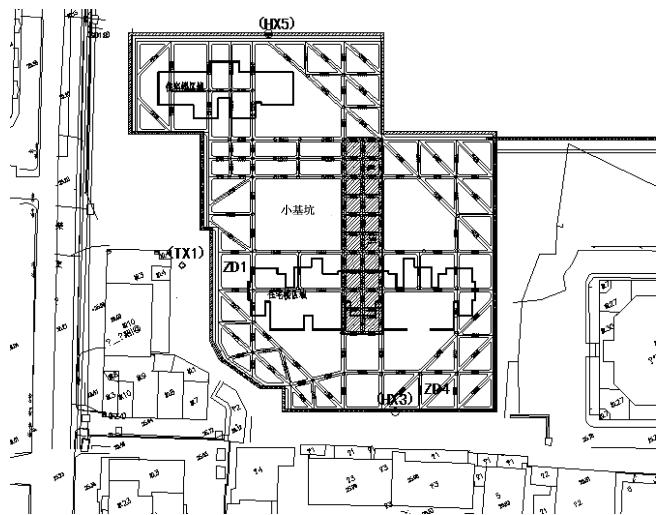


图 1 基坑支护结构的平面图

Fig. 1 Plan of supporting structures

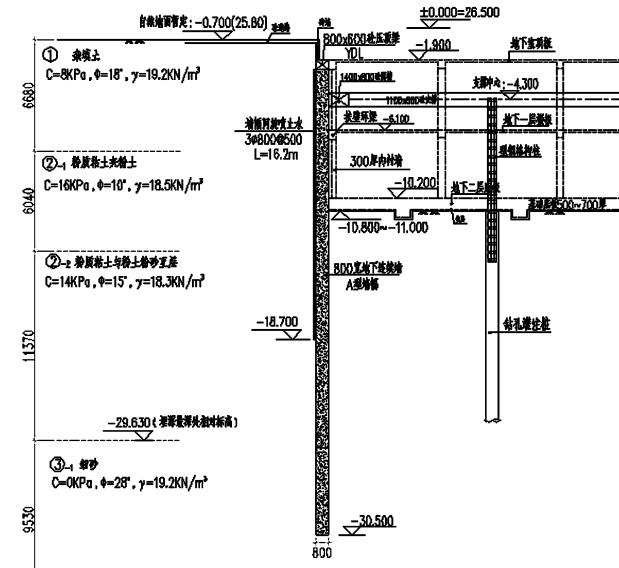


图 2 基坑支护结构剖面图

Fig. 2 Profile of supporting structures

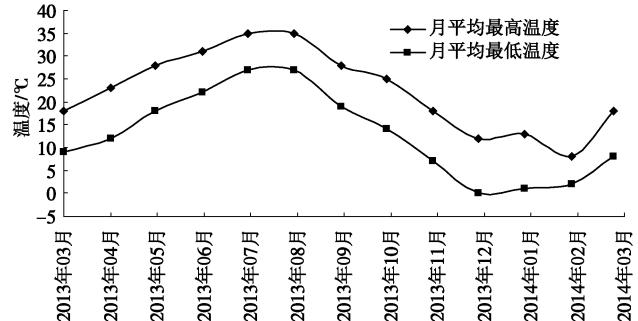


图 3 基坑监测期间气温变化情况

Fig. 3 Change of temperature

2.2 温度应力对内支撑轴力的影响

选定两根内支撑进行温度应力的监测, ZD1 测点所在的内支撑截面积为 $800 \text{ mm} \times 1100 \text{ mm}$, ZD4 测点所在的内支撑截面积为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$; 用监测截面钢筋计的轴力的平均值, 来计算监测截面处的内支撑轴力值。内支撑轴力的单日最大受力值、每日最高气温值的日变化曲线, 见图 4。

根据监测结果, 可以得到以下结论:

(1) 5月26日底板混凝土浇注完成后, 内支撑的截面尺寸较大, 随气温不同其轴力变化明显: 气温升高时内支撑轴力明显增大, 当气温降低时内支撑轴力明显减小。

(2) 7月21日中雨一阵雨, ZD1 内支撑, 测点处截面顶部的轴力约-9650 kN、底部轴力约-9450 kN, 轴力差值为 200 kN 系由内支撑自重所引起。

(3) 8月1日晴, 17:00 时, ZD1 内支撑, 测点处截面顶部的轴力约 14070 kN、底部轴力约 12900 kN; 轴力差值为 1170 kN, 系由于太阳照射导致梁上下温差不一致, 温度应力使内支撑梁上下的应力分布不一致。

由于 8月1日的测量时间不是在中午最热时段, 中午最热时段温度应力引起的内支撑轴力变化值较上述结果更大。

(4) 7月21日最高气温 30°C , 8月1日最高气温 37°C , 气温升高 7°C 时, ZD1 内支撑测点处截面的轴力从-9550 kN 变化到-13480 kN, 轴力增加 3930 kN, 增大 41%, 远大于内支撑轴力监测报警值 8000 kN。

(5) 内支撑混凝土强度等级为 C30, 其轴心抗压

强度设计值为 14.3 kN/mm^2 、标准值为 20.1 N/mm^2 。根据监测成果, 内支撑轴力最大值约为 14070 kN, 截面应力为 14.5 kN/mm^2 , 大于混凝土轴心抗压强度设计值, 但小于标准值, 内支撑结构仍能发挥工作效应。

考虑到内支撑受力的不均性和环境的不利影响, 为了保证内支撑的安全性, 宜使内支撑的应力值控制在混凝土轴心抗压强度设计值以内。建议在进行基坑支护结构设计时, 在遵循现有规范的基础上, 对于施工期内温差较大者应将内支撑混凝土强度提高一个等级。

2.3 早期混凝土温度裂缝观测与分析

因水泥水化放热, 混凝土早期达到温度峰值; 随后温度逐渐下降, 混凝土表层温度下降快, 造成由表至里不均匀收缩, 使表层产生拉应力。当拉应力大于混凝土的抗拉强度时, 产生温度裂缝。基坑中大截面尺寸的内支撑的温度裂缝, 如图 5 所示。

在监测过程中, 未发现内支撑的早期温度裂缝有进一步扩大现象。其原因是: 早期温度裂缝为不均匀的收缩裂缝, 在基坑下挖至内支撑拆除期间, 内支撑截面均处于受压状态; 早期的温度裂缝对抗拉强度的影响, 大于对抗压强度的影响。

3 杆件温度应力对支护结构变形影响

3.1 对地连墙及冠梁变形影响与分析

基坑施工期间, 对地连墙的深部水平位移进行了监测。HX3 测斜管高出地面 1.4 m , 从 2013 年 4 月 10 日开始测量, 于 2014 年 3 月 28 日结束。测斜管的位移正值表示位移方向朝向基坑内侧, HX3 测斜管各点水平位移 - 深度变化曲线, 如图 6 所示。

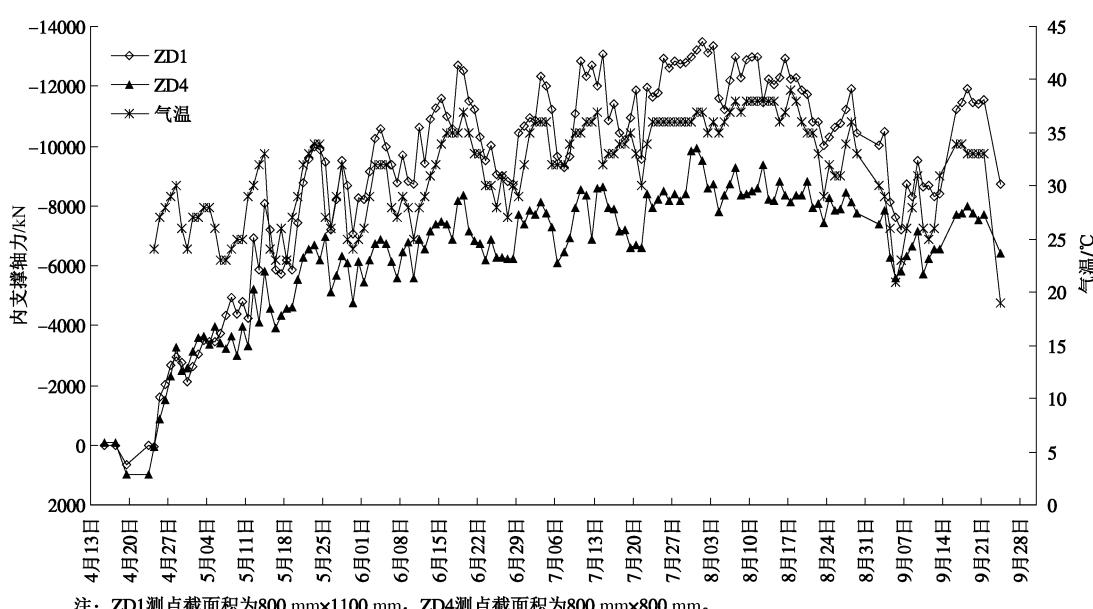


图 4 内支撑轴力、气温变化值的日变化曲线

Fig. 4 Change of axial force of internal supporting with temperature

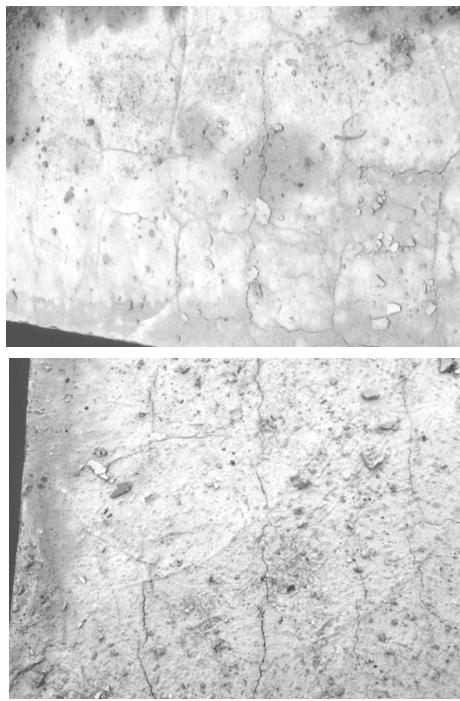


图 5 内支撑梁上温度裂缝

Fig. 5 Temperature cracks

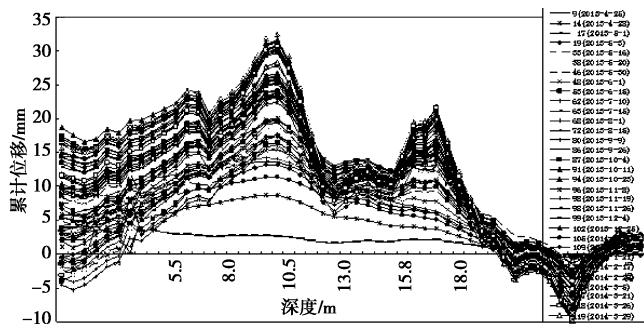


图 6 HX3 测斜管水平位移 - 深度曲线图

Fig. 6 Horizontal displacement

根据监测结果可知：测斜管口以下 10 m 处，该点的水平位移量最大，监测结束时达到 31 mm，超过水平位移报警值（报警值为 24 mm）。

冠梁顶位于测斜管口以下 1.5 m 处，该点的水平位移、管口下 10 m 处的水平位移，日最高气温与监测时间的关系曲线，见图 7。

从图 6, 7 中可知

(1) 基坑底板施工之后的时间段，HX3 测斜管的水平位移与温度应力具有较好相关性；2013 年 6 月—8 月初，气温升高，深部最大水平位移值影响不大，内支撑受热膨胀使冠梁顶水平位移有较明显的降低；2013 年 8 月—12 月中旬，气温降低，内支撑、混凝土底板和顶板遇冷收缩，使深部最大水平位移值和冠梁顶水平位移均随气温降低而增大；2014 年 2 月中旬—3 月底，气温回升，深部最大水平位移值影响不大，顶板受热膨胀使冠梁顶水平位移有较明显的降低。

(2) 2013 年 8 月初，深部最大水平位移平均值约 18 mm，略小于累计水平位移预警值 19.2 mm；2014 年 2 月中旬，深部最大水平位移增大至 32 mm，大于累计水平位移报警值 24 mm；因降温温度应力影响，深部最大水平位移增加了 14 mm，即 78%。

(3) 因降温温度应力影响，冠梁顶水平位移增加 17 mm，即地连墙顶部的水平位移受温度应力影响比墙深部大。

3.2 对周边土体位移、地面裂缝影响与分析

测斜管 TX1 的管口高出地面 0.5 m，位于基坑水沟外侧，距地连墙约 4 m。测斜管的水平位移正值表示朝向基坑内侧，TX1 测斜管口下 0.5, 8 m 处的水平位移 - 时间变化曲线，如图 8 所示。

坑壁外侧土体的最大水平位移出现在管口下 8 m 处，根据 TX1 测斜管的监测成果，可知：

(1) 两测点的水平位移变化规律与气温变化有较好的相关性，其规律与地连墙的水平位移变化规律基本相似；2013 年 8 月初，气温开始降低，水平位移从 8 月底开始增大，明显滞后于地连墙的位移变化，导致地连墙至边沟范围内土体出现大量裂缝。

(2) 2013 年 8 月底，最大水平位移平均值约 7 mm；2014 年 2 月中旬，最大水平位移增大至 26 mm，大于水平位移报警值 24 mm；因降温温度应力影响，最大水平位移增加了 19 mm，即增幅达 271%。

(3) 受温降导致的温度应力影响，冠梁顶水平位移增加 25 mm，即墙顶部的水平位移受其影响，比墙中部要大。

地连墙和坑壁外侧土体的水平位移受降温影响显著，对周边建筑物的安全影响较大，特别是砖混凝土结构、有两种以上基础型式的建筑物，例如在本基坑工程中，靠近基坑侧为 2~3 层裙楼的基础为条形基础，16 层大楼主楼为桩基础，在裙楼和主楼的连接处出现连续贯穿裂缝，二楼的裂缝宽度达到 2~3 cm。

4 防止支撑裂缝与控制变形措施

由于温度应力导致支护结构变形，对超静定基坑支护系统的极限承载力影响较小，但影响支护结构裂缝的开展密度和深度。因此，确保基坑支护系统的安全、可靠，主要是防止或减少由于温度变化引起的裂缝。

4.1 内支撑的裂缝性状及原因分析

升温阶段，内支撑杆件伸长，表现为轴力增大、地连墙向坑内的水平位移减少，但其弯矩增大；温度降低，则内支撑杆件收缩，可导致内支撑混凝土的裂缝增加，地连墙向坑内的位移增大。

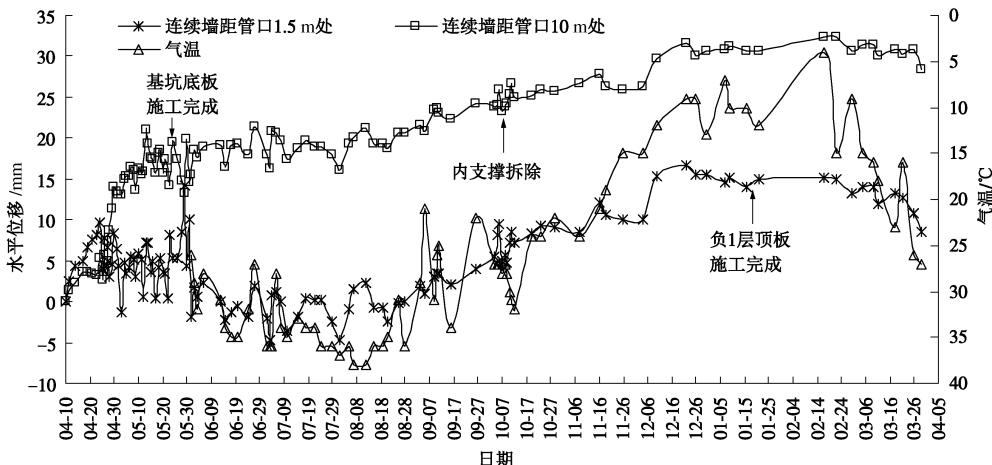


图 7 HX3 测斜管水平位移、气温 - 时间曲线图

Fig. 7 Change of horizontal displacement and temperature

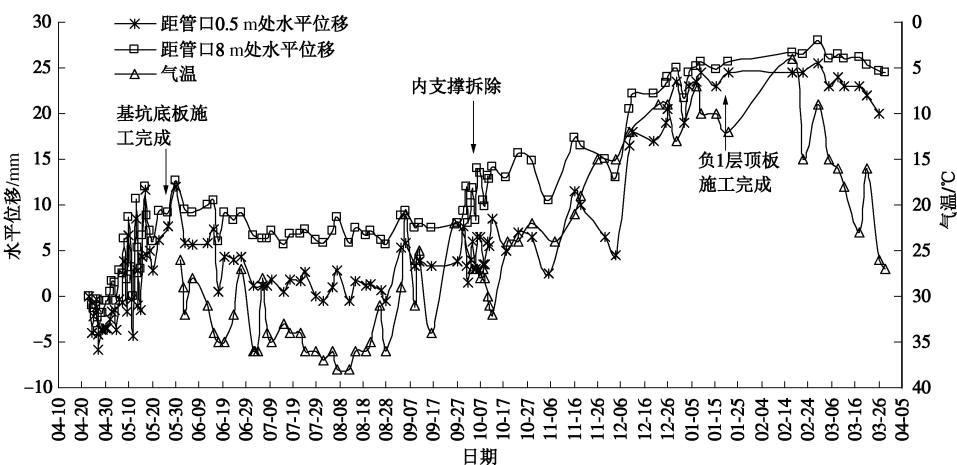


图 8 TX1 测斜管口下 0.5 m、8 m 处的水平位移及气温与时间的关系曲线图

Fig. 8 Change of horizontal displacement and temperature at depth of 0.5 m and 8 m below inclinometer TX1

(1) 裂缝性状

如图 5 所示, 裂缝方向基本垂直内支撑杆件长边方向、约束较大方向, 或垂直于抗拉能力较弱方向。节点附近, 亦可能出现斜向裂缝。本工程支撑结构厚度大于 500 mm, 多为表面裂缝。厚度小于 300 mm 的支撑板主要承受均匀收缩和均匀温降影响, 多产生贯穿裂缝。

(2) 混凝土温降对产生裂缝的影响

造成内支撑混凝土开裂的主要原因为温度骤降, 如昼夜骤降温差(可达 20°C 以上)、暴晒后受雨淋冷却引起的骤降温差、秋冬寒潮袭击的骤降温差。混凝土杆件在全约束条件下, 无变形时产生最大温度应力与混凝土温度下降值成正比, 降温引起的应力在梁、板温度平衡后, 可以消失。

因此, 内支撑杆件裂缝是在受框架约束条件下, 混凝土自生收缩和骤降温差共同作用结果, 后期则主要受骤降温差影响。

4.2 防止内支撑产生裂缝措施

采用“抗、放、防”的综合措施如下:

(1) 抗

由于温度应力在超静定结构中引起的内力, 随杆件刚度增大而增大, 因此采用增大结构截面尺寸不是合理措施。可采取适当提高混凝土抗压强度等级、施工中采用两次振捣等方法提高混凝土密实度和均匀性改善混凝土质量; 配置小直径($\phi 8\sim 14$ mm)、小间距(≥ 150 mm)构造筋, 有利于减少裂缝密度和深度; 对结合永久运用、抗裂要求较高的内支撑及楼板可限制钢筋使用应力不超过 1200~1500 MPa。

(2) 放

采用分段浇筑混凝土、逐步形成整体支撑; 设置后浇块, 每隔 30~40 m 在梁、板内力较小部位设一个宽 0.7~1.0 m 后浇块, 待两侧混凝土浇筑 30 d 后, 用提高一个强度等级的混凝土回填, 使早期混凝土温降及混凝土自身收缩基本完成, 后浇块内钢筋应连续; 也可设置宽 2~3 m 的膨胀加强带, 即浇混凝土到膨胀带时改浇延滞性微膨胀混凝土, 来补偿混凝土收缩效应, 通过膨胀带后再浇普通混凝土。

(3) 防

内支撑断面截面尺寸变化时, 应设置逐渐变化的

过渡段，并加强配筋，尽可能消除应力集中现象；支撑及楼板内的孔洞周边增加配筋；底板下表面贴油毡形成滑动层，减少约束应力；采用保温措施，使混凝土缓慢降温，创造应力松弛条件，保持良好潮湿状态以减少混凝土收缩；在炎热季节，太阳辐射采用洒水或保温材料覆盖；冬季采用封闭风口及保温措施。

4.3 减少支撑收缩变形对支护结构位移影响措施

采用上述减少支撑收缩变形、防止支撑裂缝措施，均有利于减少支护结构向坑内位移。还可采用下述措施减少支护结构位移。

(1) 基坑各边支护结构的中部变形量相对较大，宜适当加大桩、墙埋入深度。

(2) 增大支撑构件断面积，减少支撑杆件长度，以增大支撑水平刚度系数。

(3) 尽可能在低温季节或较低气温时段浇筑内支撑混凝土，减少混凝土最高温度。

(4) 由于混凝土支撑收缩，支护结构向基坑内位移形成的地面裂缝，及时灌注水泥黏土浆填充。

(5) 地下结构完成后，尽早覆土或进行上部建筑施工。

5 结 论

通过上述研究，可以得出如下结论

(1) 监测成果表明，当温度从30℃增加到37℃时，内支撑的轴力增幅达41%，使得内支撑轴力值大于监测报警值；内支撑的截面应力大于混凝土轴心抗压强度设计值，但小于标准值，内支撑结构仍能发挥工作效应。建议在进行基坑支护结构设计时，在遵循现有规范的基础上，对于施工期内温差较大者应将内支撑混凝土强度提高一个等级。

(2) 温度升高使内支撑受热膨胀，冠梁水平位移有较明显的降低；因降温温度应力影响，冠梁顶水平位移增加17 mm，地连墙顶部的水平位移受温度应力影响比墙深部大。气温开始降低，坑壁外侧土体的水平位移变化明显滞后于地连墙的位移变化，导致地连墙至边坡范围内土体出现大量裂缝。

(3) 混凝土支撑降温收缩引起支护结构向基坑内侧的位移，会随着温度升高、杆件伸长会有所恢复，可不考虑其对距基坑有一定距离建筑物的影响，但对紧邻基坑的建筑物的控制变形较严部位，宜考虑支护结构位移的影响，适当减少支护结构位移允许值。

(4) 湖北省《基坑工程技术规程》DB42/T159—2012的6.9.8条提出，轴向支撑力设计值，考虑内力分布不均匀及温度影响系数 ζ 值，在采取必要保湿、保温措施时混凝土缓慢降温及混凝土的徐变性，支撑长度大于20 m时，取1.0~1.2基本合理。建议补充：

当支撑长度大于40 m，宜取1.2；当未采取必要保湿、保湿措施时，可达1.4以上。

参考文献：

- [1] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2012. (in Chinese))
- [2] DB42/T159—2012 建筑基坑工程监测技术规范[S]. 2012. (DB42/T159 — 2012 Code for monitoring of building foundation pit engineering[S]. 2012. (in Chinese))
- [3] GB50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 2010. (GB50010—2010 Code for design of concrete structures[S]. 2010. (in Chinese))
- [4] SL/T191—96 水工混凝土结构设计规范[S]. 1996. (SL/T191—96 Design code for hydraulic concrete structures[S]. 1996. (in Chinese))
- [5] 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, 2002, 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, 2002, 35(3): 87 - 89. (in Chinese))
- [6] 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, 16(5): 17 - 18. (WU Chang-sheng, TIAN Jing-xue. Analysis of the thermal stress of excavation enclosure structure[J]. West-China Exploration Engineering, 2004, 16(5): 17 - 18. (in Chinese))
- [7] 陆培毅, 韩丽君. 基坑支撑温度应力的有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1290 - 1294. (LU Yi-pei, HAN Li-jun. Finite element analysis of temperature stress in strut of foundation pit[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1290 - 1294. (in Chinese))
- [8] 陈玉香. 环境温度对某深基坑围护结构内力与变形影响分析[J]. 昆明工学院学报, 2010, 32(3): 100 - 103. (CHEN Yu-xiang. Analysis on the influence of ambient temperature to enclosure structure internal force and deformation in a deep foundation excavation[J]. Journal of Kunming University, 2010, 32(3): 100 - 103. (in Chinese))
- [9] 庞卫涛. 深基坑支护结构变形随温度变化原因分析及加固处理措施[J]. 建筑工程, 2012(1): 10 - 12. (PANG Wei-tao. Supporting structure of deep foundation pit deformation with the reasons of temperature change analysis and reinforcement treatment measures[J]. Constructional Engineering, 2012(1): 10 - 12. (in Chinese))