

引用本文:徐昭辰,王 强,章定文,等. 基坑混凝土支撑轴力监测值修正方法[J]. 建筑科学与工程学报,2021,38(6):48-54.

XU Zhao-chen, WANG Qiang, ZHANG Ding-wen, et al. Correction Method of Axial Force Monitoring Value of Concrete Strut in Excavation [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(6): 48-54.

DOI:10.19815/j.jace.2021.09023

基坑混凝土支撑轴力监测值修正方法

徐昭辰^{1,2}, 王 强³, 章定文^{1,2}, 朱湘旭³, 王治宇³

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 211189; 2. 东南大学 道路交通工程国家级实验教学示范中心, 江苏 南京 211189; 3. 中建八局轨道交通建设有限公司, 江苏 南京 210046)

摘要:为研究宁句城际轨道句容站基坑工程混凝土支撑轴力监测值异常报警现象,考虑混凝土收缩、徐变、弹性模量和温度等非荷载因素,采用理论分析和现场实测相结合的方法,探讨了基于理论的轴力修正公式法和基于现场实测的轴力修正系数法。结果表明:混凝土支撑轴力修正公式可对徐变应变、收缩应变和温度应变进行修正并考虑混凝土弹性模量的非线性变化,由修正公式算得的支撑轴力修正值为原始监测值的55%~64%,修正值更能反映混凝土支撑的真实受力状态;对混凝土支撑轴力影响程度由大到小依次为混凝土徐变、混凝土收缩和混凝土弹性模量,徐变对支撑监测值的影响最显著;结合现场实测数据,根据句容站基坑混凝土支撑轴力理论修正系数随时间变化的公式可直接计算偏保守的轴力修正值;工程中可采用支撑残余轴力测试、钢箱测试等方法对混凝土支撑轴力监测值进行修正,综合理论分析、现场实测和文献中实测数据,实际基坑工程中混凝土支撑轴力修正系数可取0.5~0.65来估算支撑的真实轴力值。

关键词:基坑;混凝土支撑轴力;非荷载影响因素;轴力修正

中图分类号:TU973.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)06-0048-07

Correction Method of Axial Force Monitoring Value of Concrete Strut in Excavation

XU Zhao-chen^{1,2}, WANG Qiang³, ZHANG Ding-wen^{1,2}, ZHU Xiang-xu³, WANG Zhi-yu³

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Road and Traffic Engineering Education, Southeast University, Nanjing 211189, Jiangsu, China; 3. China Construction Eighth Engineering Division Rail Transit Construction Co., Ltd, Nanjing 210046, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the abnormal alarm of axial force monitoring value of concrete strut in excavation project of Jurong station of Nanjing-Jurong rail, the theoretical axial force correction formula and the axial force correction coefficient based on field measurements were discussed by combining theoretical analysis and field measurements for non-load factors such as concrete shrinkage, creep, modulus of elasticity and temperature. The results show that the correction formula can correct the creep strain, shrinkage strain and temperature strain considering the non-linear changes in concrete modulus. The axial force correction value calculated by the formula is

收稿日期:2021-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(52078129)

作者简介:徐昭辰(1997-),男,黑龙江黑河人,工学硕士研究生,E-mail:220203211@seu.edu.cn.

通信作者:章定文(1978-),男,江苏南京人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhang@seu.edu.cn.

55%~64% of the original monitoring value, and the corrected value can better reflect the real state of the concrete strut. The descending orders of the influence on the axial force are concrete creep, concrete shrinkage and concrete modulus, with creep having the most significant influence. Combined with the field measured data of this project, the empirical formula of the axial force correction coefficient of concrete strut in excavation of Jurong station with time is obtained, according to which a conservative correction value can be calculate directly. In engineering practice, the measured concrete axial force can be corrected by means of residual axial force measurement and steel box test. Based on the theoretical analysis, field measurement and measured data in the literatures, a correction coefficient of axial force of concrete strut can be taken as 0.5~0.65 when the non-load factors are considered.

Key words: excavation; axial force of concrete strut; non-load factor; axial force correction

0 引言

钢筋混凝土支撑轴力监测值是支撑工作状态的判断指标,也是基坑支护结构安全与否的主要判别依据^[1-3]。基坑工程中混凝土支撑轴力监测值经常超过设计限值但支撑仍完好无损,且基坑的其他监测指标均处于正常范围内,混凝土支撑轴力监测值存在与基坑的安全稳定状态不一致的问题^[4-6]。混凝土支撑轴力通常采用振弦式钢筋应力计(简称钢筋计)测试,假设混凝土应变与钢筋应变相同,通过测量钢弦频率换算出钢筋计的应力计算钢筋应变,再结合混凝土支撑的物理力学参数间接计算支撑轴力^[7]。

钢筋计初始频率、大气温度、混凝土弹性模量和混凝土收缩、徐变等非荷载因素均会影响混凝土支撑的轴力监测值。不少学者开展了非荷载因素对混凝土支撑轴力监测值的影响研究。张哲^[4]和陈科^[8]指出钢筋计的频率在混凝土浇筑前后和养护前后都会发生明显的变化,并建议取混凝土浇筑并养护完成后的频率作为初始频率。Boone等^[9]指出钢筋计监测的应变中包含了温度变化引起的应变,计算轴力时应进行温度修正。Blackburn等^[10]指出由温度变化引起的轴力可达支撑轴力的40%,必须考虑温度引起的附加应力的影响。刘畅等^[11]基于某停工基坑16个月连续监测结果指出,混凝土支撑轴力监测值随大气温度变化而变化,当气温从11℃下降到-2℃时,轴力下降幅度可超过12 000 kN。一些学者研究表明,经过混凝土收缩、徐变修正的轴力计算值为监测原始值的30%~60%,收缩和徐变是影响轴力监测的重要因素^[12-16]。

混凝土支撑轴力的监测原始值与真实值间存在较大误差。已有研究大多针对某单一因素进行分

析,较少考虑多因素的共同作用。为此,本文综合钢筋计初始频率、温度、混凝土模量、混凝土收缩和徐变等因素的影响,提出了考虑多因素影响的混凝土支撑轴力监测值修正方法,并采用宁句城际轨道句容站基坑工程的实测数据验证该方法的合理性,以期混凝土支撑轴力监测值分析提供参考。

1 宁句城际轨道句容站基坑工程概况

1.1 工程概况与工程地质条件

句容站基坑标准宽度为20.7 m,一期基坑长约308 m,底板埋深为16.68~19.51 m。基坑采用明挖法施工,围护结构采用 $\phi 1\ 000@800$ mm 钻孔咬合桩,桩长21 m。支撑体系为3道水平内支撑,第1道为钢筋混凝土支撑,截面尺寸为800 mm \times 1 000 mm,间距约8 m,第2道和第3道为 $\phi 609\times 16$ 钢支撑,间距约4 m。桩顶设置钢筋混凝土冠梁,断面尺寸为1 000 mm \times 1 400 mm。基坑剖面设计如图1所示。

基坑开挖范围内的主要土层包括杂填土、粉质黏土、强风化粉砂质泥岩、中风化凝灰角砾岩和破碎凝灰角砾岩,主要物理力学参数见表1。场地地下水主要包括松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。松散岩类孔隙水主要为孔隙潜水,近地表分布。基岩裂隙水主要赋存于粉砂质泥岩、中风化凝灰角砾岩和凝灰角砾岩强风化带。潜水与下伏基岩裂隙水之间的水力联系微弱,地下水对基坑开挖影响较小。

1.2 混凝土支撑轴力监测点布置与监测值分析

采用钢筋计监测混凝土支撑轴力,监测点布置如图2所示。基坑施工过程中,土体开挖第1天就有部分支撑的轴力监测值超过了报警值,随着开挖进行,基坑所有混凝土支撑的轴力均远超设计限值并保持超高轴力状态直至拆除,但基坑周围地

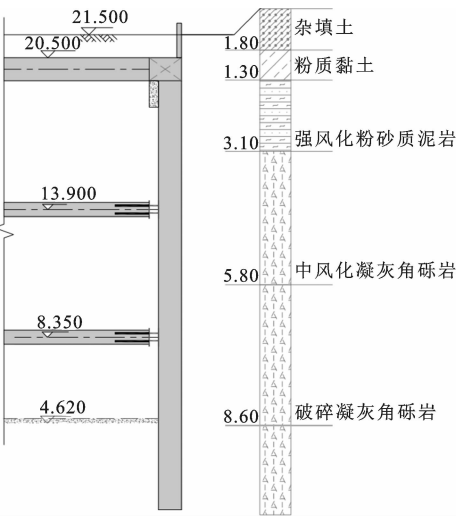


图1 基坑支护剖面(单位:m)

Fig.1 Section of Foundation Pit Supports (Unit:m)

表1 土层主要物理力学参数

Table 1 Physical and Mechanical Parameters of Soil Layers

土层名称	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	孔隙比	含水率/%	固结快剪		压缩模量/MPa	泊松比
					黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)		
杂填土	1.8	19.4	0.791	26.8	24.0	12.0	6.09	0.39
粉质黏土	1.3	19.8	0.706	23.1	48.6	16.7	8.24	0.29
强风化粉砂质泥岩	3.1	20.7		23.2	40.0	15.0	50.00	0.23
中风化凝灰角砾岩	5.8	23.5			300.0	35.0	2 000.00	0.20
破碎凝灰角砾岩	8.6	23.9			320.0	30.0	2 200.00	0.19

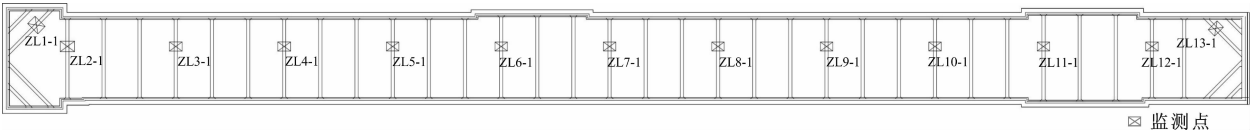


图2 句容站混凝土支撑轴力监测点布置

Fig.2 Monitoring Points of Axial Force of Concrete Struts at Jurong Station

表2 部分混凝土支撑轴力监测最大值及限值

Table 2 Maximum and Limited Values of Monitoring Axial Forces of Partial Concrete Struts

监测点	轴力监测最大值/kN	轴力设计限值/kN
ZL1-1	10 459	7 000
ZL2-1	12 828	
ZL3-1	16 936	
ZL4-1	9 351	
ZL5-1	8 795	
ZL7-1	7 735	
ZL8-1	7 941	
ZL9-1	8 655	
混凝土支撑换钢支撑	420	

本文采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[20]中的方法进行计算。

考虑钢筋效应的混凝土收缩应变 ϵ'_{cs} 和徐变系

表沉降和桩身水平位移等项目的监测值均小于设计限值,混凝土支撑自身也未出现裂缝、掉块等现象,基坑及其周边环境均处于稳定安全状态。部分混凝土支撑的轴力最大监测值与设计限值见表2。施工现场采用2根钢支撑替换监测点ZL6-1处的混凝土支撑,钢支撑的轴力最大值仅为420 kN,远小于混凝土支撑轴力监测值,这表明支撑轴力实际值与监测值差异显著。

2 基于理论的修正公式法

2.1 混凝土支撑轴力的理论修正公式

在计算混凝土支撑轴力时,理想的应变只包含支撑在两侧围护结构作用下的变形,故轴力计算公式中应对混凝土收缩应变、徐变应变和温度应变进行修正。混凝土的收缩和徐变有多种计算模型^[17-19],

数 $\varphi'(t,t_0)^{[21]}$ 为

$$\epsilon'_{cs} = \frac{1 - \rho_s}{1 + (n_e - 1)\rho_s} \epsilon_{cs} \tag{1}$$

$$\varphi'(t,t_0) = \frac{k_n [1 + \varphi(t,t_0)]}{1 - \rho_s} - 1 \tag{2}$$

$$k_n = \frac{\{1 + [n_e - 1 - n_e \varphi(t,t_0)]\rho_s\} (1 - \rho_s)}{[1 + (n_e - 1)\rho_s]^2} \tag{3}$$

式中: k_n 为混凝土长期内力分配系数; ρ_s 为钢筋混凝土支撑配筋率; n_e 为钢筋弹性模量与混凝土弹性模量比值; ϵ_{cs} 和 $\varphi(t,t_0)$ 分别为混凝土收缩应变和混凝土徐变系数,由《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[20]条文说明附录K中的公式进行计算。

温度补偿应变 $\epsilon_T^{[22]}$ 为

$$\epsilon_T = (\alpha_s - \alpha_c) \Delta T \tag{4}$$

式中: α_s, α_c 分别为钢弦和混凝土的热膨胀系数; ΔT 为某时刻大气温度与初始温度的差值。

由式(1)~(4)及钢筋计平均应变 ϵ_s 可得混凝土支撑修正应变 ϵ_r 为

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{cs} + \epsilon_T}{1 + \varphi(t, t_0)}$$

(5)

考虑混凝土应力-应变关系的混凝土截面应力^[20] σ_c 为

$$\sigma_c = \frac{\rho_c n}{n - 1 + (\epsilon_r / \epsilon_{cr})^n} E_c \epsilon_r$$

(6)

$$\rho_c = \frac{f_{cm}}{E_c \epsilon_{cr}}$$

(7)

$$n = \frac{E_c \epsilon_{cr}}{E_c \epsilon_{cr} - f_{cm}}$$

(8)

$$f_{cm} = \frac{f_{ck}}{1 - 1.645 \delta_c}$$

(9)

式中: E_c 为混凝土弹性模量; ρ_c, n 为混凝土单轴受压应力-应变关系参数; f_{cm} 为混凝土平均抗压强度; ϵ_{cr} 为与 f_{cm} 相应的混凝土峰值压应变; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值; δ_c 为混凝土强度变异系数。

钢筋截面应力 σ_s 为

$$\sigma_s = \epsilon_s E_s$$

(10)

式中: E_s 为钢筋弹性模量。

由式(6)~(10)可得混凝土支撑轴力监测修正值 N_c 为

$$N_c = \sigma_s A_s + \sigma_c A_c$$

(11)

式中: A_c 为混凝土截面总面积; A_s 为钢筋截面总面积。

采用修正公式(11)对句容站基坑的 ZL2-1, ZL3-1 监测点处的混凝土支撑轴力进行计算,相关的计算参数见表 3,其中 R_H 为年平均相对湿度。由于缺少温度数据,计算时暂不考虑温度修正。

表 3 混凝土支撑轴力计算系数

Table 3 Calculation Coefficients of Axial Force of Concrete Strut				
$\rho_s / \%$	$R_H / \%$	δ_c	$\epsilon_{cr} / 10^{-6}$	f_{ck} / MPa
1.54	75	16.4	1 673	23.4
f_{cm} / MPa	E_c / MPa	E_s / MPa	n_c	
32	31 500	200 000	6.35	

2 根支撑的轴力修正计算结果如图 3 所示。由图 3 可见:修正后的轴力值与原始监测值相差较大,ZL2-1, ZL3-1 处混凝土支撑轴力的最大监测值分别为 12 828, 16 937 kN, 而修正后的最大轴力分别为 7 774, 10 089 kN;修正轴力值与监测值的差距随着时间 t 的增加而逐渐增加,当 $t=30$ d 时,修正值约

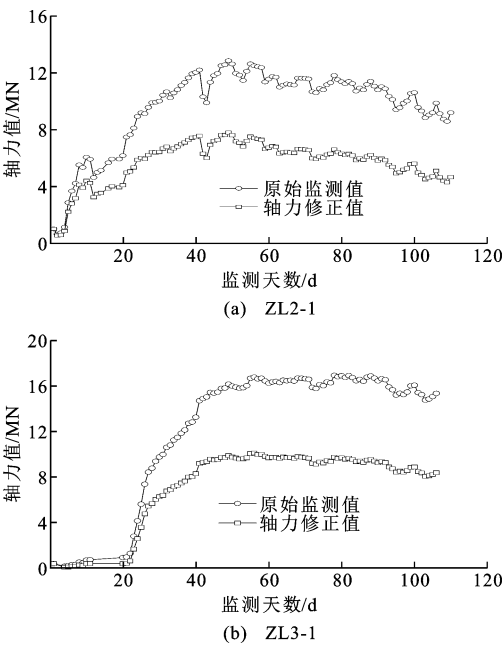


图 3 混凝土支撑轴力监测值与修正值对比

Fig. 3 Comparison of Monitored and Corrected Axial Forces of Concrete Struts

为原始监测值的 64%,而当 $t=100$ d 时,修正值仅为原始监测值的 55%。随着基坑开挖时间的增加,混凝土收缩、徐变等因素对轴力监测值的影响也逐渐增大。

图 4 为句容站 ZL2-1, ZL3-1, ZL4-1 和 ZL5-1 四根混凝土支撑轴力修正值与监测值的比值[理论修正系数 $K(t)$]随时间的变化曲线。在开挖初期,各支撑的理论修正系数波动较大,开挖时间超过 30 d 后基本趋于稳定。各支撑轴力理论修正系数包络线公式为 $K(t) = 0.868 - 0.068 \ln(t - 0.846)$,则轴力修正值 $N_c = K(t) N_e$,据此可直接计算出偏保守的修正值。

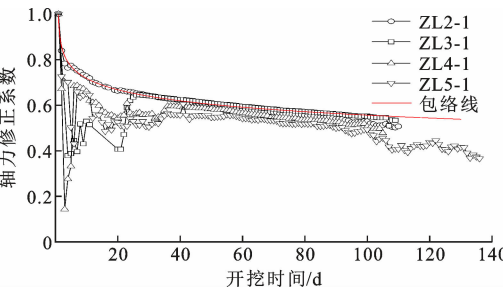


图 4 轴力修正系数随时间变化曲线

Fig. 4 Change Curves of Correction Factor of Axial Force with Time

2.2 各因素影响程度分析

分别仅进行徐变、收缩和弹性模量修正以探究各因素对支撑轴力的影响程度。ZL2-1 处混凝土支

撑轴力修正值如图 5 所示。仅弹性模量修正的计算结果约为监测值的 98%，仅进行收缩修正的计算结果为监测值的 82%~96%，仅进行徐变修正的计算结果为监测值的 60%~87%。可见，对混凝土支撑轴力监测值影响程度由大到小依次为混凝土徐变、混凝土收缩和混凝土弹性模量，徐变是影响轴力监测值的最主要因素。混凝土徐变的持续时间很长，徐变变形可比瞬时弹性变形大 1 倍~3 倍，对混凝土支撑轴力监测值有显著影响^[23]。

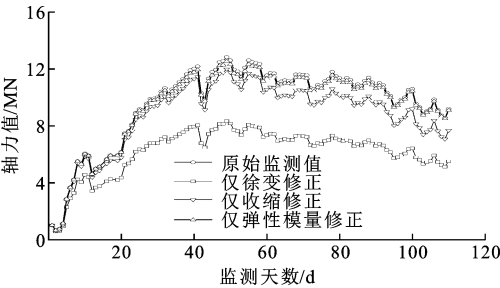


图 5 不同因素修正后轴力随时间变化曲线
Fig. 5 Change Curves of Axial Force Corrected by Various Factors with Time

3 基于现场实测的修正系数法

混凝土支撑的轴力还可以采用现场试验进行修正，主要有残余轴力修正法和钢箱测试修正法。本研究对句容站基坑的部分混凝土支撑开展了残余轴力监测，对混凝土支撑 2 次切割及拆除过程中的支撑轴力进行连续监测，现场试验如图 6 所示。ZL12-1 和 ZL13-1 处测试结果如图 7 所示，混凝土支撑在一端切割后轴力立刻下降，在另一端切割后轴力仍有小幅下降，在拆除后略有下降并趋于稳定，最终残余轴力值约为 3 500 kN，由此计算得到混凝土支撑轴力修正系数为 0.57。当 $t=100\text{ d}$ 时，由图 4 中的包络线公式可算得理论修正系数 $K(t)=0.56$ ，与本文现场试验得到的轴力修正系数接近。

文献[24]和文献[25]采用钢箱测试法分析同一支撑混凝土段和钢箱段的轴力监测值，其结果如图 8 所示。支撑钢箱段的轴力监测值小于混凝土段的监测值，两者的差距在主要施工阶段随时间增加而增大，而后基本维持稳定，与理论公式计算得到的变化趋势相同。支撑轴力趋于稳定后，3 根支撑钢箱段的轴力监测值分别为混凝土段的 0.48 倍、0.63 倍、0.56 倍。

综合上述分析，实际基坑工程中可在支撑轴力变化趋于稳定后取修正系数 0.5~0.65 来估算混凝土

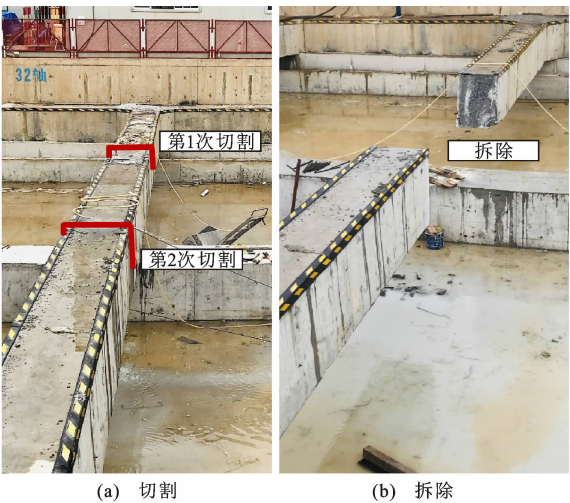


图 6 混凝土支撑残余轴力监测试验现场
Fig. 6 Residual Axial Force Monitoring Test Site of Concrete Struts

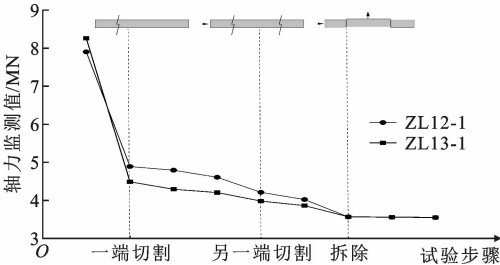


图 7 混凝土支撑残余轴力监测结果
Fig. 7 Residual Axial Force Monitoring Values of Concrete Struts

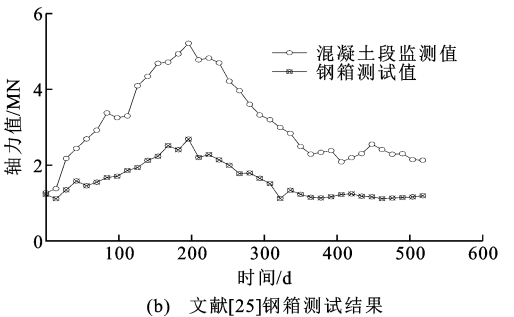
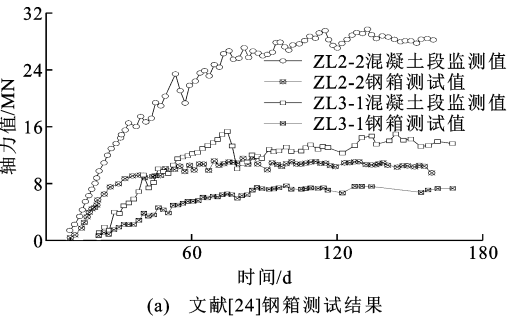


图 8 混凝土支撑钢箱测试结果
Fig. 8 Test Results of Concrete Supported Steel Box

土支撑的真实轴力值。

4 结 语

(1)混凝土徐变和收缩、混凝土弹性模量和温度是影响基坑钢筋混凝土支撑轴力监测值的主要因素,其中混凝土徐变影响最大。现场实测轴力计算中应考虑上述非荷载因素的影响,避免基坑混凝土支撑轴力监测值过大而误报警。

(2)依据理论修正的混凝土支撑轴力修正公式可考虑非荷载因素影响。结合工程现场实测数据,获得了句容站基坑轴力修正系数随时间的经验公式为 $K(t)=0.868-0.068\ln(t-0.846)$;基坑轴力修正值为监测值的 55%~64%。

(3)工程实践中可以通过支撑残余轴力监测法、钢箱测试法获得轴力修正系数。综合理论分析、现场实测和文献中实测数据,实际基坑工程中考虑非荷载因素影响,混凝土支撑轴力修正系数可取 0.5~0.65 来估算支撑的真实轴力值。

参考文献:

References:

- [1] 孙超,郭浩天.深基坑支护新技术现状及展望[J].建筑科学与工程学报,2018,35(3):104-117.
SUN Chao, GUO Hao-tian. Present Situation and Prospect of New Technology for Deep Foundation Pit Support[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3): 104-117.
- [2] KIM S, FINNO R J. Inverse Analysis of a Support Excavation in Chicago[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(9): 04019050.
- [3] WANG Z C, WANG C. Analysis of Deep Foundation Pit Construction Monitoring in a Metro Station in Jinan City[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37: 813-822.
- [4] 张哲.基坑混凝土支撑轴力监测数据异常情况分析与探讨[J].隧道建设,2016,36(8):976-981
ZHANG Zhe. Analysis and Discussion of Monitoring Data Anomaly of Axial Force for Concrete Support of Foundation Pit[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(8): 976-981.
- [5] 陈小羊,冯大阔,王寿忆,等.数据监测在深基坑开挖过程中的应用分析[J].施工技术,2018,47(增4):11-17.
CHEN Xiao-yang, FENG Da-kuo, WANG Shou-yi, et al. Analysis on the Application of Data Monitoring in Deep Foundation Excavation [J]. Construction Technology, 2018, 47(S4): 11-17.
- [6] 张浩,吴志鸿,张峰,等.深基坑混凝土支撑轴力精确性分析[J].地下空间与工程学报,2018,14(增1):342-348.
ZHANG Hao, WU Zhi-hong, ZHANG Feng, et al. Accuracy Analysis on Axial Force of Concrete Support in Deep Foundation Pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 342-348.
- [7] 刘俊岩.建筑基坑工程监测技术规范(GB 50497—2009)实施手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
LIU Jun-yan. Implementation Manual of Technical Code for Monitoring of Building Excavation Engineering (GB 50497—2009)[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [8] 陈科.成都地铁四号线万年场站深基坑混凝土支撑轴力监测及影响因素分析[D].绵阳:西南科技大学,2018.
CHEN Ke. Struct Axial Forces Monitoring and Influence Factors Analysis of Concrete in Deep Foundation Pit of Chengdu Metro Line Four Wannian Station [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2018.
- [9] BOONE S J, CRAWFORD A M. Braced Excavations: Temperature, Elastic Modulus, and Strut Loads[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(10): 870-881.
- [10] BLACKBURN J T, FINNO R J. Three-dimensional Responses Observed in an Internally Braced Excavation in Soft Clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(11): 1364-1373.
- [11] 刘畅,张亚龙,郑刚,等.季节性温度变化对某深大基坑工程的影响分析[J].岩土工程学报,2016,38(4):627-635.
LIU Chang, ZHANG Ya-long, ZHENG Gang, et al. Effects of Seasonal Temperature Change on a Large Excavation Project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 627-635.
- [12] 郑文允.深大基坑中混凝土支撑收缩徐变对围护结构内力及位移影响分析[D].上海:同济大学,2008.
ZHENG Wen-yu. Analysis of the Effect of Shrinkage Creep of Concrete Supports on the Internal Forces and Displacements of the Enclosure in Deep and Large Foundation Pits [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [13] 李兆源.基坑混凝土支撑轴力监测值计算方法研究[D].广州:华南理工大学,2014.

- LI Zhao-yuan. Research on Calculation Method of Concrete Strut Axial Force Monitoring Value on Excavation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [14] 肖振烨, 李素贞, 崔晓强. 基于应变监测的基坑钢筋混凝土支撑轴力修正方法[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(11): 8-18.
- XIAO Zhen-ye, LI Su-zhen, CUI Xiao-qiang. Study on Force Correction Method of Reinforced Concrete Brace Shaft in Foundation Ditch Based on Strain Monitoring[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(11): 8-18.
- [15] 陈进河, 陈国良, 陈健, 等. 基于光纤传感技术的混凝土支撑轴力监测及数据分析[J]. 现代城市轨道交通, 2020(5): 61-67.
- CHEN Jin-he, CHEN Guo-liang, CHEN Jian, et al. Monitoring and Data Analysis of Axial Force of Concrete Support Based on Optical Fiber Sensing Technology[J]. Modern Urban Transit, 2020(5): 61-67.
- [16] 钟思成. 时间效应对钢筋混凝土支撑轴力的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增1): 1293-1297.
- ZHONG Si-cheng. Analysis of the Influence of Time Effect on Axial Force of Reinforced Concrete Strut[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 1293-1297.
- [17] BAZANT Z P, MURPHY W P. Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures; Model B3[J]. Materials and Structures, 1995, 28(6): 357-365.
- [18] GOEL R, KUMAR R, PAUL D K. Comparative Study of Various Creep and Shrinkage Prediction Models for Concrete[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(3): 249-260.
- [19] YU P, DUAN Y H, FAN Q X, et al. Improved MPS Model for Concrete Creep Under Variable Humidity and Temperature[J]. Construction and Building Materials, 2020, 243: 118183.
- [20] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [21] 孙臻. 钢筋混凝土结构长期徐变收缩效应研究应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- SUN Can. Research and Application of Long-term Creep and Shrinkage Effects on Reinforced Concrete Structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [22] 鲁智明, 和再良, 陈刚. 基坑工程监测中钢筋混凝土支撑轴力测试计算方法[J]. 上海地质, 2010(1): 46-49.
- LU Zhi-ming, HE Zai-liang, CHEN Gang. Measurement and Calculation Method of Steel Concrete Bracing Axial Force in Foundation Pit Monitoring Survey[J]. Shanghai Geology, 2010(1): 46-49.
- [23] 黄国兴, 惠荣炎, 王秀军. 混凝土徐变与收缩[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- HUANG Guo-xing, HUI Rong-yan, WANG Xiu-jun. Concrete Creep and Shrinkage[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [24] 叶万灵. 围护结构中钢筋混凝土支撑轴力和变形的研究[J]. 土木工程学报, 2000, 33(5): 83-87, 96.
- YE Wan-ling. Research on the Axial Force and Deformation of Reinforced Concrete Braces of Support Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(5): 83-87, 96.
- [25] 张开伟, 郝佳福, 陈宏. 支护结构混凝土支撑轴力受力组成分析研究[J]. 城市勘测, 2017(1): 169-171.
- ZHANG Kai-wei, HAO Jia-fu, CHEN Hong. Concrete Supporting Axial Force of Support Structure Analysis[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2017(1): 169-171.