

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2018.11.002

# 基于应变监测的基坑钢筋混凝土支撑轴力修正方法

肖振烨<sup>1</sup>, 李素贞<sup>1</sup>, 崔晓强<sup>2</sup>

(1.同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2.上海建工七建集团有限公司, 上海 200232)

**摘要:** 支撑轴力是验证基坑支撑体系安全与否的一项重要指标, 对施工期的基坑安全判定具有重要的意义。现场的支撑轴力监测数据反映出明显脱离实际的现象, 轴力监测数据常大幅超出实际安全设计值, 难以作为施工期安全监测的有效指标。考虑非荷载因素对钢筋混凝土支撑应变数据的影响, 选择CEB90模型为例, 进行应变的修正, 给出相应的计算理论和方法, 并对实际的支撑监测数据进行轴力修正, 对比修正前、后轴力变化。结果表明: 非荷载因素对轴力监测有很大的影响, 现场钢筋混凝土支撑轴力监测应该考虑非荷载因素进行修正。

**关键词:** 基坑; 钢筋混凝土支撑; 轴力; 非荷载因素

**中图分类号:** TU375.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2018)11-008-11

## Study on force correction method of reinforced concrete brace shaft in foundation ditch based on strain monitoring

XIAO Zhenye<sup>1</sup>, LI Suzhen<sup>1</sup>, CUI Xiaoqiang<sup>2</sup>

(1.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P.R.China;

2. Shanghai Construction No.7(Group) Co., Ltd., Shanghai 200232, P.R.China)

**Abstract:** The axial force of braces is an important index to verify the safety of foundation ditch supporting system, and it is of great significance to the safety judgment of foundation ditch during construction. But the monitoring data of the braces axial force in the field is obviously divorced from reality, and the axial force data monitored often exceeds the actual safety design value several times, so it is difficult to be an effective indicator of safety monitoring. Considering the influence of non-load factors on the strain data of reinforced concrete support, the CEB90 model is chosen as an example to correct the strain, and the corresponding calculation theory and method are put forward. The axial force of the actual support monitoring data is corrected, and the axial force changes before and after the correction are compared. The results show that the non-load factors have a great influence on the axial force monitoring, which indicates that the non-load factors should be considered in the monitoring of the axial force of the reinforced concrete braces.

**Keywords:** foundation ditch; reinforced concrete brace; axial force; non-load factor

基坑开挖经常会受到场地条件、周边环境的限制, 需要设计支护系统以保证施工的顺利进行, 并能较好

**收稿日期:** 2018-06-12

**作者简介:** 肖振烨(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事现代混凝土结构与生命线工程研究, (E-mail) 18817878778@163.com。

李素贞(联系人), 女, 博士生导师, 主要从事结构健康检测, (E-mail) lszh@tongji.edu.cn。

地保护周边环境。钢筋混凝土支撑由于其刚度大、变形小、布置灵活等特点在基坑内支撑系统中得以广泛应用。支撑系统对基坑的整体安全至关重要,支撑轴力是了解支撑受力特性,监测结构体系安全的一个重要指标。然而,按常规的测试方法,测试的应变和轴力一般是设计值的 2~3 倍,有时甚至更大<sup>[1]</sup>。比如,广州某地铁基坑工程轴力监测值大大超过基坑设计安全值,最大值甚至达到设计允许值的 6 倍,而支撑系统一直处于正常工作的状态<sup>[2]</sup>。由于一直没找到一个很好的解决方法,使大量测试数据失去了实际的意义<sup>[1]</sup>。轴力数据的异常,会给工程施工带来困惑,而贸然加固支撑必然带来经济上的损失。有的工程项目为了得到较准确的混凝土支撑轴力数据,在混凝土支撑中嵌入一段钢结构,通过监测钢结构段的支撑轴力来反映整个支撑的受力情况<sup>[3]</sup>。该方法确实能起到作用,但设计以及施工不便,难以推广应用。虽然,目前基坑安全能够依靠变形监测、水位监测等其他安全监测项目来保证基坑的安全,但支撑轴力作为内支撑结构体系最直接的监测指标,针对其进行轴力修正研究,使大量的轴力监测数据实际可用,能够更准确地反应真实轴力情况,这对于基坑安全的判定具有很大的工程意义。

叶万灵<sup>[1]</sup>认为混凝土的干缩和湿胀,混凝土徐变和构件温度变化是造成混凝土支撑轴力数据异常的原因。吴连祥等<sup>[4]</sup>也指出混凝土的收缩、徐变是造成钢筋应力过大的主要原因。李文峰<sup>[5]</sup>也得出了类似的结论。叶真华等<sup>[6]</sup>在对中断 2 年后重新开工的上海惠扬大厦基坑工程在中断前后支撑轴力监测数据的分析中发现,经历 2 年多的时间跨度,2 个典型监测点的轴力数据一个增大了 75%,另一个增大了几乎 3 倍,而影响支撑截面轴力变化的因素未改变,可见主要是徐变引起了这部分监测轴力的增加。综上所述,考虑非荷载因素的影响,进行轴力修正才能得到较准确的轴力数据。

现场常用的钢筋计记录的是支撑总的应变量,包括了荷载引起的应变和非荷载因素引起的应变。叶万灵在非荷载因素所引起的钢筋混凝土支撑应变修正方面已经做出了系统的整理。但是,该计算方法主要是基于大量测试结果并结合具体案例的混凝土特性进行推算,不易推广应用。文中结合相对成熟的 CEB90 模型,提出一套完整的考虑弹模龄期变化、收缩、徐变修正的计算方法,具有较高的推广性。同时,对上海漕河泾商业服务区项目基坑支撑轴力监测数据进行各项因素修正前后的对比。

## 1 支撑轴力监测原理

钢筋混凝土支撑采用钢筋计测量钢筋的应力来反算钢筋的应变,然后,根据钢筋与混凝土共同工作、变形协调条件反算支撑轴力。由频率仪采集应变计的频率值,利用公式(1)来计算支撑轴力:

$$N = [K(F_i^2 - F_0^2) + B(T_i - T_0)](A_c E_c / E_s + A_s), \quad (1)$$

其中: $N$  为混凝土支撑轴力; $K$  为应变计标定系数; $F_0$  为初始频率值; $F_i$  为当天频率值; $E_c$  为混凝土弹性模量; $A_c$  为混凝土截面积; $E_s$  为钢筋弹性模量; $A_s$  为钢筋截面积; $B$  为应变计的温度修正系数; $T_i$  为本次测试温度值; $T_0$  为初始测试温度值。

虽然,厂家给了温度修正系数,但很多现场人员在实际操作的时候并未进行温度修正,有些甚至连温度数据都未做详细记录。

## 2 非荷载因素对轴力监测的影响

### 2.1 温度影响

由于钢筋混凝土的热胀冷缩,温度变化会引起支撑轴向应变的一个附加值。钢筋混凝土的平均热膨胀系数为  $\alpha = 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,基始温度为  $T_0$ ,由此产生的温度应变为  $\epsilon_t = -\alpha(T - T_0)$ 。温度应变受到支撑边界的约束将导致附加应力的产生。罗忠贵<sup>[6]</sup>对石家庄市地铁车站基坑工程进行了同一天、同一施工工况下混凝土支撑轴力监测,发现随着温度的变化,钢筋计监测数据计算出的轴力数值变化相当大,同一天的混凝土支撑轴力差值甚至可达到 800 kN 以上(当天最大温差  $14^\circ\text{C}$ )。向艳<sup>[7]</sup>对武汉市长江航运中心还建楼基坑支撑轴力监测数据分析后发现,当温度从  $30^\circ\text{C}$  增加到  $37^\circ\text{C}$  时,内支撑的轴力增幅达 41%。姚顺雨等<sup>[8]</sup>和刘畅等<sup>[9]</sup>也发现温度变化导致支撑轴力监测数据的大幅波动。可见,现场钢筋计监测到的应变数据必须考虑温度应变才能用于实际轴力的计算,对于温度变化幅度大的施工现场,温度修正显得尤为重要。

## 2.2 弹模随龄期变化的影响

工程中支撑轴力使用混凝土规范给出的混凝土弹模来进行计算,是 28 d 强度混凝土对应的弹模。而实际上,弹模随龄期变化而变化,这一点在早龄期阶段尤为明显。

CEB90 模型给出了混凝土弹性模量随龄期变化的函数关系。不同龄期阶段混凝土弹模计算如公式(2)所示:

$$E(\tau) = E_c \sqrt{\exp\left\{s\left(1 - \sqrt{\frac{28}{\tau}}\right)\right\}}, \quad (2)$$

$$E_c = 2.15 \times 10^4 \left[ \frac{f_{cu,k} + 8}{10} \right] \frac{1}{3},$$

其中: $\tau$  为混凝土龄期; $f_{cu,k}$  为边长为 150 mm 的混凝土立方体抗压强度标准值; $s$  为与水泥品种相关的常数。对于快干高强水泥、快干普通水泥和慢干水泥,分别取 0.20、0.25 和 0.30。

对于 C35 混凝土,绘制混凝土弹模随龄期增长曲线,如图 1 所示。

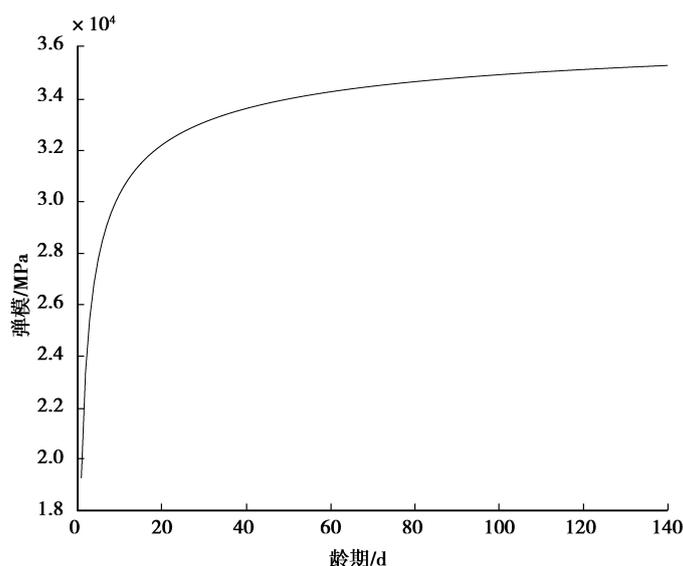


图 1 C35 混凝土弹模-龄期增长曲线

Fig.1 Modulus-age growth curve of C35 concrete

GB50010 中给出的 C35 混凝土建议弹模是  $3.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ,从图 1 曲线中可以发现,在 15 d 龄期以前,混凝土弹模比规范值来的小,15 d 龄期以后,混凝土弹模比规范值来的大。单纯考虑弹模的影响,工程中选择统一的弹模计算,会导致计算轴力与实际轴力的不符。随着支撑受压应变的增加,在 15 d 龄期以前,计算轴力比实际轴力来的小,15 d 之后的一段龄期内计算轴力与实际轴力之间差距减小,再随着龄期的进一步发展,实际弹模比规范弹模大,计算轴力将比实际轴力来的小。

## 2.3 混凝土收缩的影响

在钢筋混凝土支撑轴压力不变的情况下,混凝土的干燥收缩会导致压应变增大,由此计算出的支撑轴压力将偏大。

CEB90 模型中给出的混凝土收缩应变计算公式<sup>[10]</sup>如下:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{cs}(t, t_s) &= \epsilon_{cso} \cdot \beta_s(t - t_s) \\ \epsilon_{cso} &= \epsilon_s(f_{cm}) \cdot \beta_{RH} \\ \epsilon_s(f_{cm}) &= [160 + 10\beta_{sc}(9 - f_{cm}/f_{cmo})] \times 10^{-6} \\ \beta_{RH} &= 1.55[1 - (RH/RH_0)3] \\ \beta_s(t - t_s) &= \left[ \frac{(t - t_s)/t_1}{350(h/h_0)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0.5} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

其中:  $t$  为计算考虑时刻的混凝土龄期,  $d$ ;  $t_s$  为收缩开始时的混凝土龄期,  $d$ , 可假定为  $3 \sim 7$   $d$ ;  $\epsilon_{cs}(t, t_s)$  为收缩开始时的龄期为  $t_s$ , 计算考虑龄期为  $t$  时的收缩应变;  $\epsilon_{cs0}$  为名义收缩系数;  $\beta_s$  为收缩随时间发展的系数;  $f_{cm}$  为强度等级 C20~C50 混凝土在 28  $d$  龄期的平均立方体抗压强度,  $MPa$ ,  $f_{cm} = 0.8f_{cu,k} + 8$   $MPa$ ;  $f_{cu,k}$  为龄期为 28  $d$ , 具有 95% 保证率的混凝土立方体抗压强度,  $MPa$ ;  $\beta_{RH}$  为与年平均相对湿度相关的系数, 适用于  $40\% \leq RH < 90\%$ ;  $RH$  为环境年均相对湿度, %;  $\beta_{sc}$  为依水泥种类而定的系数, 对一般的硅酸盐类水泥或快硬水泥, 取为 5.0;  $h$  为构件理论厚度,  $mm$ ,  $h = 2A/u$ ,  $A$  为构件截面面积,  $u$  为构件与大气接触的周边长度;  $RH_0 = 100\%$ ;  $h_0 = 100$   $mm$ ;  $t_1 = 1$   $d$ ;  $f_{cm0} = 10$   $MPa$ 。

以漕河泾商业服务区基坑中编号为 ZC1-20 的支撑参数 (C35 混凝土,  $b \times h = 800$   $mm \times 900$   $mm$ ,  $t_s = 5$   $d$  湿养护时间) 为例, 代入公式 (3), 假设平均相对湿度分别为 20%、40%、60%、80%, 绘制出收缩应变-龄期变化曲线, 如图 2 所示。

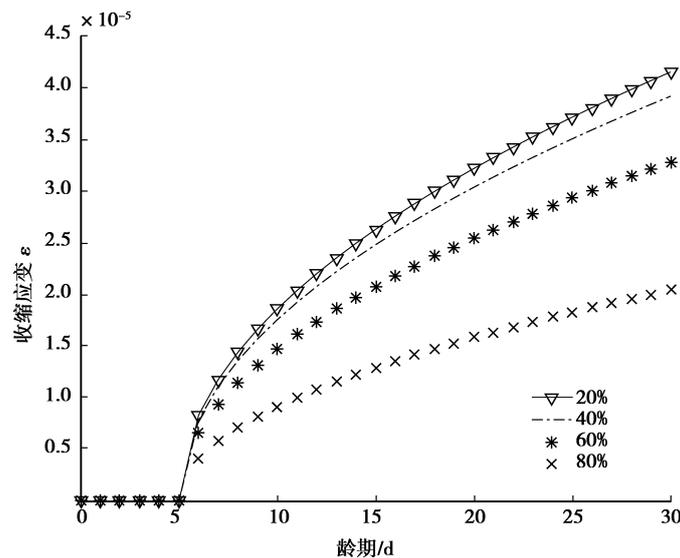


图 2 收缩应变-龄期变化曲线

Fig.2 Shrinkage strain-age variation curve

从图中可以发现, 湿度对混凝土自由收缩应变的发展具有很大的影响。建议施工现场增加湿度数据的监测, 以便对监测数据进行混凝土收缩应变的修正。

以上公式只是对素混凝土的收缩应变进行了计算。但钢筋混凝土支撑由于配筋的存在, 混凝土的收缩应变会受到制约, 实际钢筋混凝土的收缩应变比素混凝土的自由收缩应变小。龄期为  $t$   $d$  时, 当天的钢筋混凝土的收缩应变增量为

$$\Delta\epsilon_{sh,s}(t) = \Delta\epsilon_{sh}(t) / (1 + \alpha_E \rho_s), \quad (4)$$

其中:  $\Delta\epsilon_{sh}(t)$  为龄期为  $t$   $d$  时, 当天的自由收缩应变增量;  $\alpha_E$  为  $E_s(t)/E_c$ , 龄期  $t$   $d$  时, 的弹性模量比;  $\rho_s$  为配筋率。

#### 2.4 混凝土徐变的影响

混凝土徐变作用会导致轴力荷载不变时, 支撑轴向应变增加。混凝土徐变在 3~6 个月发展最快<sup>[11]</sup>, 基坑工程施工期也恰在徐变发展较快的时间段内。而工程中轴力计算时并没有考虑徐变的影响。徐劲等<sup>[12]</sup> 设计了全尺寸支撑实体模型, 采用预拉钢筋模拟真实混凝土支撑受力情况, 以锚索计测值为标准值, 将仪器测值与锚索计测值之差与锚索计测值的比值, 即偏离率作为衡量仪器准确度的标准, 试验 1 年后发现 3 个不同厂家仪器偏离率平均值区间为 78.8%~169.6%, 说明徐变对轴力测试值有较大影响。

国外众多科研机构及学者在大量研究和试验数据拟合的基础上, 提出了各种徐变计算模型, 其中, 应用较多的有: CEB-FIP 系列模型、ACI-209 系列模型、B-P 系列模型、G-Z 模型和 GL2000 模型等<sup>[16]</sup>。

欧洲混凝土协会 (CEB) 和国际预应力混凝土协会 (FIP) 先后提出了: 70 模型、78 模型<sup>[17]</sup>、90 模型, 其中,

78 模型采用将可恢复的徐变和不可恢复的徐变加起来的徐变系数表达式。90 模型不再考虑徐变的区分,而采用乘积形式将徐变系数随时间的变化规律拟合为一双曲幂函数。美国混凝土协会 (ACI) 则先后推 78 模型、82 模型和 92 模型。82 模型的精度较差,通常低估了混凝土的徐变效应。92 模型<sup>[18]</sup>在原有模式框架的基础上进行改进,仍采用极限徐变系数与时间函数相乘的形式,但时间系数采用了双曲线函数。1979 年美国 Bazant 教授在对世界范围内庞大的试验数据进行优化拟合的基础上提出了 B-P 模型、BP-2 模型,随后又在这些模型的基础上提出了更为简化、理论性更强的 B3 模型<sup>[19]</sup>。B3 模型建立在固化理论<sup>[20-21]</sup>基础上,创造性地将混凝土的水灰比和骨料水泥比对徐变的影响计入到模型计算中,相比其他模型 (ACI209、CEB-FIP、GL2000 等)需要定义更多的参数。美国 Gardner N J 与 Zhao J W 在长期试验数据分析的基础上提出 G-Z 模型<sup>[22]</sup>。之后,Gardner N J 和 Lockman M J 对 G-Z 模型加以改进,提出了 GL2000 模型<sup>[23]</sup>,克服了 G-Z 模式加载初期的应力松弛和不合理的徐变恢复,并在计算参数方面考虑的更加合理。

以上模型有各自的适用性、计算繁琐程度不一,其中,CEB 系列模型在国内应用较为普遍,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范就是参考该系列模型进行徐变计算,最新桥涵规范即采用 CEB90 模型<sup>[10]</sup>。文中也采用 CEB90 模型中徐变系数计算方法来进行应变的修正<sup>[10]</sup>,混凝土徐变系数按下列公式(5)来计算:

$$\left. \begin{aligned} \varphi(t, t_0) &= \varphi_0 \cdot \beta_c(t - t_0) \\ \varphi_0 &= \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \\ \varphi_{RH} &= 1 + \frac{1 - RH/RH_0}{0.46(h/h_0)^{1/3}} \\ \beta(f_{cm}) &= \frac{5.3}{(f_{cm}/f_{cm0})^{0.5}} \\ \beta(t_0) &= \frac{1}{0.1 + (t_0/t_1)^{0.2}} \\ \beta_c(t - t_0) &= \left[ \frac{(t - t_0)/t_1}{\beta_H + ((t - t_0)/t_1)} \right]^{0.3} \\ \beta_H &= 150 \left[ 1 + \left( 1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right] \frac{h}{h_0} + 250 \leq 1500 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

其中: $t_0$  为加载时的混凝土龄期,d; $t$  为计算考虑时刻的混凝土龄期,d; $\varphi(t, t_0)$  为加载龄期为  $t_0$ , 计算考虑龄期为  $t$  时的混凝土徐变系数; $\varphi_0$  为名义徐变系数; $\beta_c$  为加载后徐变随时间发展的系数。

公式(5)中未标明的符号意义与公式(4)中的意义相同。

需要特别指出的是,CEB90 模型中的徐变系数  $\varphi(t, t_0)$  与徐变度  $J(t, t_0)$  遵循公式(6)关系:

$$J(t, t_0) = \frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{1}{E_c(28)} \varphi(t, t_0), \quad (6)$$

其中: $J(t, t_0)$  为在  $t_0$  时刻施加单位应力在  $t$  时刻产生的应变; $E_c(28)$  为 28 d 龄期混凝土的弹性模量; $E_c(t_0)$  为  $t_0$  龄期混凝土的弹性模量。

以漕河泾商业服务区基坑中编号为 ZC1-20 的支撑参数为例(由于缺少平均湿度数据,暂且假设平均湿度为 55%),绘制不同龄期加载情况下的混凝土徐变系数随龄期变化曲线,如图 3 所示。从图 3 可以看出,加载时的混凝土龄期越早,徐变系数随时间发展越快。即  $t_0$  越小,相同考虑时刻的混凝土龄期  $t$  所对应的徐变系数越大。

### 3 考虑非荷载因素影响轴力修正方法

钢筋混凝土支撑的总应变  $\epsilon_{all}$  包括 3 个部分:

$$\epsilon_{all} = \epsilon_t + \epsilon_d + \epsilon_u, \quad (7)$$

其中: $\epsilon_t$  为温度变化引起的应变; $\epsilon_d$  为混凝土收缩引起的应变,考虑配筋的影响; $\epsilon_u$  为应力引起的应变。对于钢筋部分, $\epsilon_u$  即为钢筋应力应变;对于混凝土部分, $\epsilon_u$  包含了混凝土应力应变和由该应力作用引起的徐变。

选定钢筋计标定时温度为初始温度  $T_0$ , 将基坑现场监测到的钢筋计数据换算成总应变  $\epsilon_{all}$ , 然后扣除温度应变  $\epsilon_t$ , 和收缩应变  $\epsilon_d$ , 对余下的应力应变  $\epsilon_u$ , 进行后续的处理。

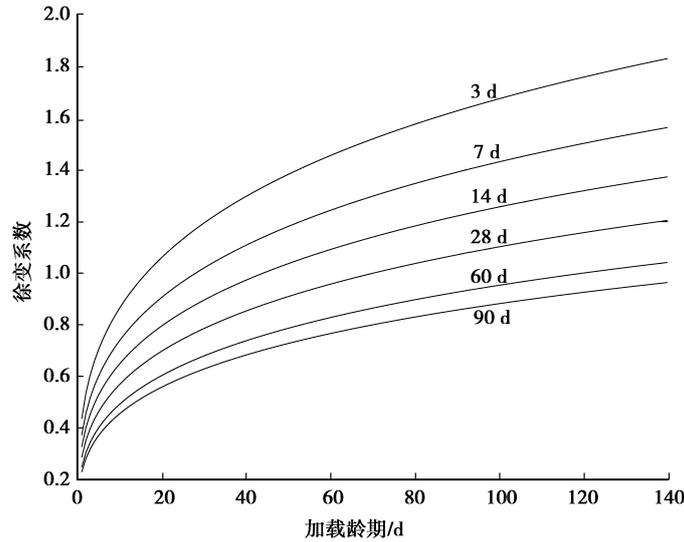


图 3 徐变系数-加载龄期变化曲线  
Fig.3 Creep coefficient-loading age variation curve

钢筋混凝土支撑轴力  $N$  按公式(8)分为 2 部分进行计算,即:

$$N = N_s + N_c, \tag{8}$$

其中: $N_s$  为钢筋承担轴力,等于  $A_s E_s \epsilon_u$ ;  $N_c$  为混凝土承担轴力,需要进行徐变修正。

徐变对混凝土龄期敏感,还涉及到弹模随时间的变化,计算难度较大。早在 1972 年,Z.P.Bazant 就针对 H.Trost 所提出的徐变应力应变关系的代数方程式进行了严密的论证,并在老化系数法的基础上加以改进,提出了按龄期调整的有效模量法<sup>[24]</sup>。赵世明等<sup>[13]</sup>采用了按龄期调整的有效模量法来考虑支撑徐变效应。文中徐变处理方法参考了方大勇等提出的方法<sup>[14]</sup>。彭海波<sup>[15]</sup>等对应变时段分析的思路,在计算混凝土承担轴力的时候,采用分段叠加变形的方法来进行计算。对应各个应力应变数据  $\epsilon_{u1}, \epsilon_{u2}, \epsilon_{u3} \dots \epsilon_{ui} \dots \epsilon_{un}$ ,其采集时混凝土龄期为:  $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \dots \tau_i \dots \tau_n$ 。基坑工程中支撑轴力监测频率较高,一般为 1 天 1 次,为方便进行徐变修正,将混凝土应力变化集中视为在数据采集时发生变化,即在对应  $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \dots \tau_i \dots \tau_n$  时刻,混凝土施加有  $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3 \dots \Delta\sigma_i \dots \Delta\sigma_n$  的应力增量,则混凝土承担轴力  $N_c$  采用公式(9)进行累加求和计算:

$$N_c = \left( \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_i \right) A_c. \tag{9}$$

应力增量  $\Delta\sigma_i$  的计算采用下列公式(10)计算:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{u1} &= \Delta\sigma_1 \left[ \frac{1}{E_c(\tau_1)} \right] \\ \epsilon_{u2} &= \Delta\sigma_1 \left[ \frac{1}{E_c(\tau_1)} + \frac{1}{E_c(28)} \varphi(\tau_2, \tau_1) \right] + \Delta\sigma_2 \left[ \frac{1}{E_c(\tau_2)} \right] \\ \epsilon_{ui} &= \Delta\sigma_1 \left[ \frac{1}{E_c(\tau_1)} + \frac{1}{E_c(28)} \varphi(\tau_i, \tau_1) \right] + \Delta\sigma_2 \left[ \frac{1}{E_c(\tau_2)} + \frac{1}{E_c(28)} \varphi(\tau_i, \tau_2) \right] + \dots + \Delta\sigma_i \left[ \frac{1}{E_c(\tau_i)} \right] \end{aligned} \right\}. \tag{10}$$

应力作用下混凝土徐变效应分析如图 4 所示,  $\Delta\epsilon_i$  表示混凝土龄期为  $\tau_i$  时,该时刻增加的应力  $\Delta\sigma_i$  所引起的混凝土应变增量,满足公式(11)的关系。

$$\Delta\epsilon_i = \Delta\sigma_i \left[ \frac{1}{E_c(\tau_i)} \right]. \tag{11}$$

而  $\epsilon_{ui}$  包含了  $\tau_i$  时刻的应力应变  $\Delta\epsilon_i$ , 以及  $\tau_1, \tau_2, \tau_3 \dots \tau_{i-1}$  时刻的应力  $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2, \Delta\sigma_3 \dots \Delta\sigma_{i-1}$  在  $\tau_i$  时刻所产生的应力应变和徐变之和。

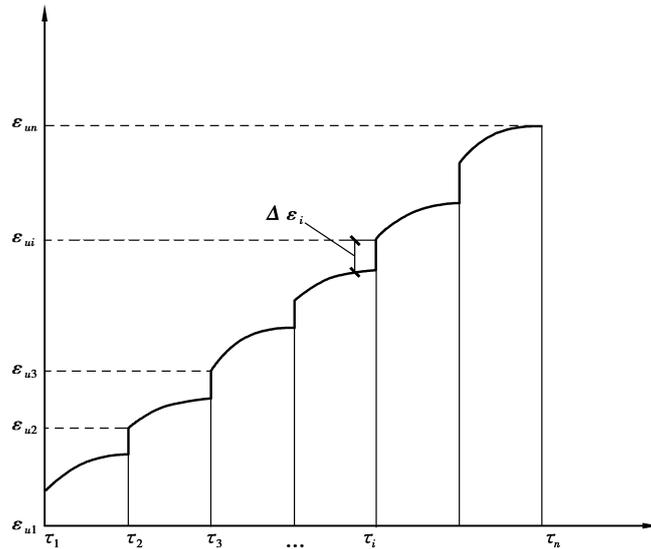


图 4 混凝土徐变效应分析图

Fig.4 Analysis of creep effect of concrete

#### 4 漕河泾商业服务区基坑钢筋混凝土支撑算例

以漕河泾商业服务区基坑中编号为 ZC1-20 的支撑监测数据为例,进行支撑轴力非荷载因素影响修正,同时,比较 3 个因素对轴力变化的不同影响程度。该工程轴力监测频率 1 天 1 次。漕河泾商业服务区基坑情况,如图 5 所示。



图 5 漕河泾商业服务区基坑

Fig.5 Pit of Caohejing business services area

利用收集到的现场监测资料,绘制该支撑轴力-时间曲线以及应变-时间曲线,如图 6、图 7 所示。

由于该项目现场缺少详细的温度记录数据,温度应变修正部分本算例未进行。仅对弹模随时间变化、收缩影响、徐变影响进行相应的修正,分析这些因素对轴力的影响。

##### 4.1 仅考虑弹模随时间变化进行修正

仅考虑弹模随时间变化的轴力数据修正,认为现场钢筋计记录的应变等于应力应变  $\epsilon_u$ ,将每天的应变增

量与每天的弹模相乘作为当天混凝土的应力增量来参与计算。进行弹模修正后,轴力曲线与原曲线对比,如图 8 所示。工程现场使用统一的规范弹模来进行计算,而实际弹模随龄期发展逐渐增大。开始时,小于规范弹模,随时间发展到一定程度时,会超过规范弹模。从图 7 可以发现,早期修正轴力绝对值小于修正前轴力;而后期,修正轴力的绝对值大于修正前轴力。这跟弹模发展规律相吻合。但整体上看,单纯考虑弹模随时间变化所引起的差异并不大。

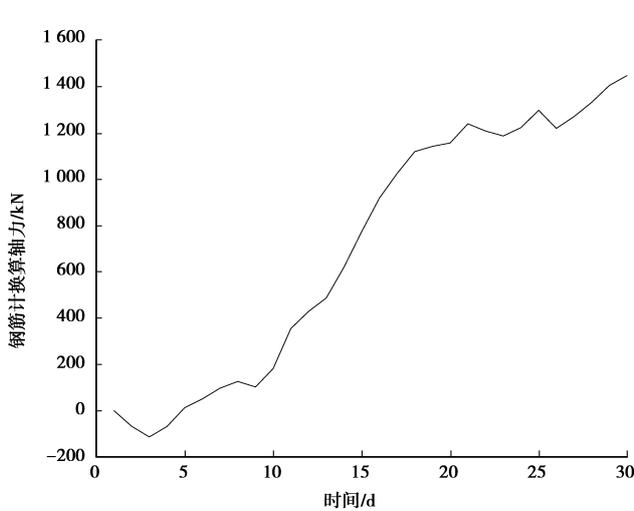


图 6 ZC1-20 支撑轴力-时间曲线  
Fig.6 Support axis force-time curve of ZC1-20

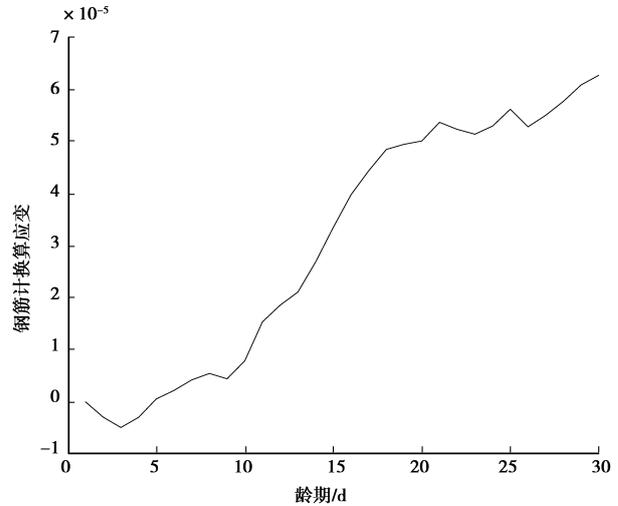


图 7 ZC1-20 支撑应变-时间曲线  
Fig.7 Support strain-time curve of ZC1-20

#### 4.2 考虑弹模随时间变化和收缩影响进行修正

考虑收缩和弹模随时间变化的影响,将现场应变数据扣除收缩应变(现场没有湿度采集数据,取 55% 使用),再结合随时间变化的弹模进行轴力修正。修正前后的应变曲线如图 9 所示。

修正前后轴力变化曲线如图 10 所示。从图 9、图 10 可以发现,监测轴力扣除收缩影响后,轴力有大幅度的折减,可见收缩因素对轴力影响很大。

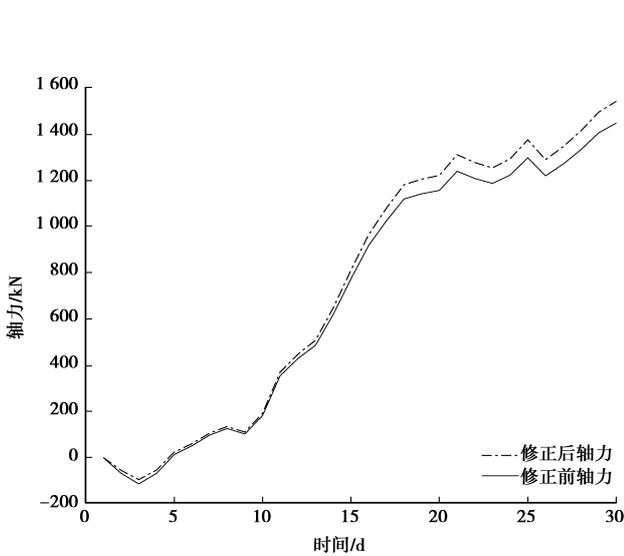


图 8 仅考虑弹模修正的轴力曲线对比  
Fig.8 Axial force curve considering only elastic modulus correction

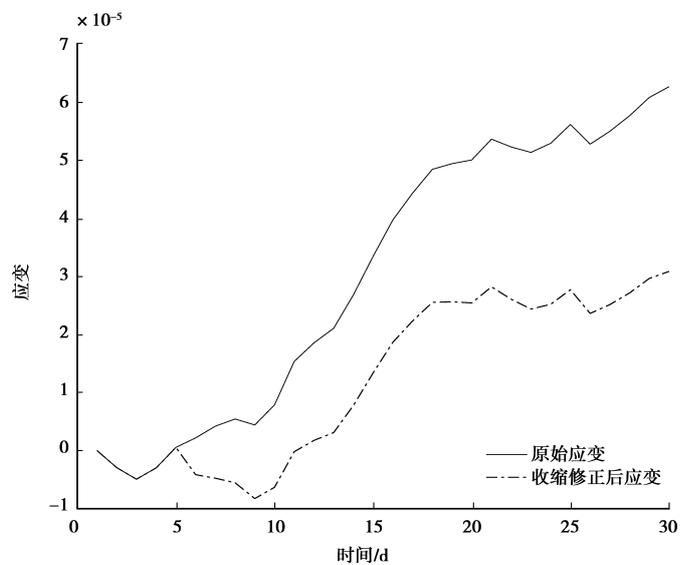


图 9 修正前后应变曲线对比  
Fig.9 Strain curve changes before and after correction

### 4.3 考虑弹模随时间变化和徐变影响进行修正

不对原始应变做收缩修正,直接进行弹模随龄期变化和徐变影响的修正。修正前后轴力变化曲线如图 11 所示。从图 11 可见,早期,修正前后轴力曲线较为接近;而随着时间发展,修正前后的轴力曲线出现明显的差别。这与徐变随时间积累越来越大的发展规律是吻合的。从图中曲线后段的差距来看,徐变对支撑轴力的修正具有很大的影响。

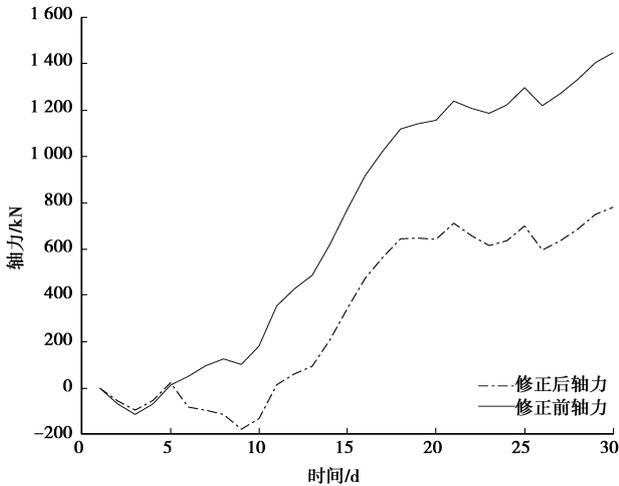


图 10 考虑弹模和收缩修正的轴力曲线对比

Fig.10 Axial force curve considering elastic modulus and shrinkage correction

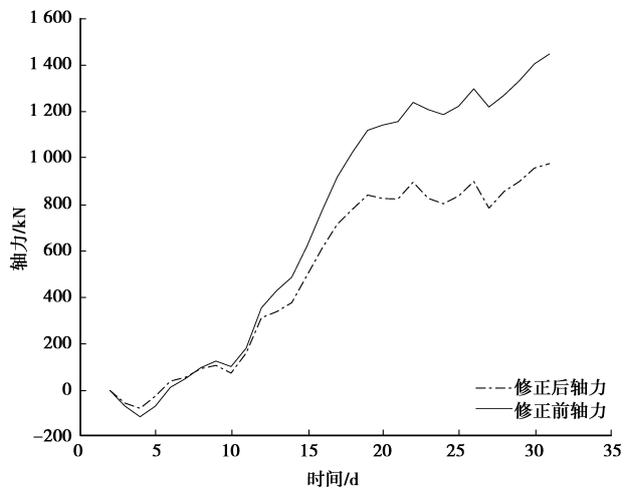


图 11 考虑弹模和徐变修正的轴力曲线对比

Fig.11 Axial force curve considering elastic modulus and creep correction

### 4.4 考虑弹模随时间变化、收缩以及徐变影响进行修正

综合考虑混凝土的弹模随时间变化、收缩以及徐变的影响,进行轴力修正。修正前后轴力变化曲线如图 12 所示。从图 12 可知,钢筋混凝土支撑轴力具有最大幅度的改变。修正后的轴力远小于修正前的轴力,且修正后的轴力最大值在修正前轴力最大值得 1/3 左右。

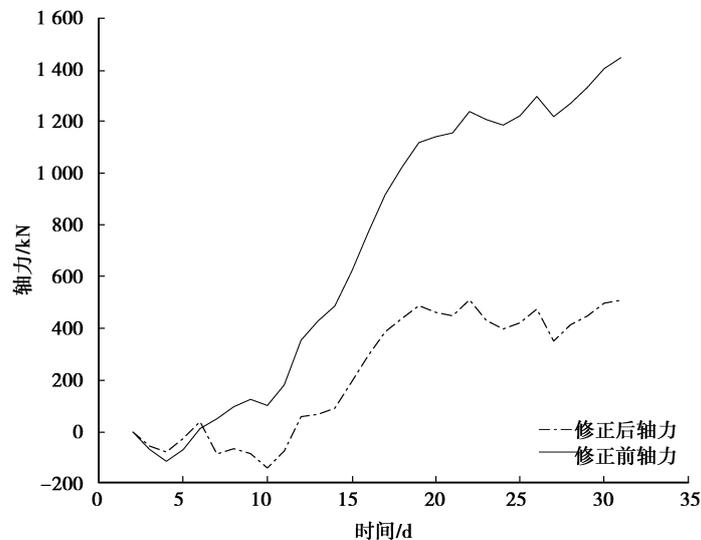


图 12 考虑弹模、收缩、徐变修正的轴力曲线对比

Fig.12 Axial force curve considering elastic modulus, shrinkage and creep correction

## 5 结 论

1)通过对基坑工程轴力监测影响因素的分析,结合 CEB90 模型,文中提出了一套完整的轴力修正计算方法。

2)基坑的钢筋混凝土支撑轴力监测数据偏大的现象在基坑工程中是一个常见的现象。文中从温度、收缩、徐变以及弹模随时间变化的角度对监测的轴力数据进行修正,轴力数据修正结果发现,收缩和徐变对轴力监测影响确实很大。

3)基坑工程中要使用文中提供的修正方法,需要有现场湿度记录数据、温度记录数据,以及完整的支撑尺寸、养护资料。文中算例由于漕河泾项目现场没有具体的湿度、温度记录数据,使得算例计算时不能结合精确的现场实际情况分析。

4)以 CEB90 模型作为参考模型进行轴力修正的计算。国际上较通用的模型还有 B3 模型, GL2000 模型等,可以进一步进行这些参考模型的修正探讨,以及进行不同模型间修正结果的比较。

5)文中的工程算例分析结果,还停留在理论上,仅凭工程经验来初步评价修正结果的可靠性。具体是否可行,还需要有相应的可供对比试验来进一步研究论证。

### 参考文献:

- [ 1 ] 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(5):83-87.  
YE Wanling. Study on the axial force and deformation of reinforced concrete support in the enclosure structure [J]. Journal of Civil Engineering, 2000 (5): 73-87.(in Chinese)
- [ 2 ] 高德恒,王小刚,何振元.混凝土支撑轴力监测分析[J].珠江现代建设,2008,29(6):24-26.  
GAO Deheng, WANG Xiaogang, HE Zhenyuan. Monitoring and analysis of axial force of concrete support [J]. Pearl River Modern Construction, 2008, 29 (6): 24-26.(in Chinese)
- [ 3 ] 程胜一,王维,唐坚,等.基坑支撑轴力监测技术分析[J].工业建筑,2011(s1):600-602.  
CHENG Shengyi, WANG Wei, TANG Jian, et al. Analysis of industrial construction force monitoring technology of foundation pit support[J]. Industrial Construction, 2011 (s1): 600-602.(in Chinese)
- [ 4 ] 吴连祥,樊永平.基坑监测中混凝土支撑轴力监测结果分析与判断[J].江苏建筑,2015(2):99-101.  
WU Lianxiang, FAN Yongping. Analysis and judgment of the monitoring results of axial force of concrete support in foundation pit monitoring [J]. Jiangsu Architecture, 2015 (2): 99-101.(in Chinese)
- [ 5 ] 李文峰.对地铁基坑混凝土支撑轴力监测精准性的探讨[J].隧道建设,2009,29(4):424-426.  
LI Wenfeng. Research on precision of axial force monitoring of concrete support in subway foundation pit [J]. Tunnel Construction, 2009, 29 (4): 424-426.(in Chinese)
- [ 6 ] 叶真华,黄飘.基坑支撑轴力实测值与理论计算值对比分析[J].矿产勘查,2009,12(3):27-30.  
YE Zhenhua, HUANG piao. Comparison and analysis of the measured values of axial force and theoretical calculation in foundation pit support [J]. Mineral Exploration, 2009, 12 (3): 27-30.(in Chinese)
- [ 7 ] 向艳.温度应力对深基坑支护结构内力与变形的影响研究[J].岩土工程学报,2014,36(s2):64-69.  
XIANG Yan. Study on the effect of temperature stress on internal force and deformation of deep foundation pit supporting structure [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (s2): 64-69.(in Chinese)
- [ 8 ] 姚顺雨,林立祥.深基坑支撑轴力测试与分析[J].建筑结构,2012(1):112-114.  
YAO Shunyu, LIN Lixiang. Test and analysis of axial force of deep foundation pit support [J]. Building Structure, 2012 (1): 112-114.(in Chinese)
- [ 9 ] 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 Yalong, ZHENG Gang, et al. Analysis of the influence of seasonal temperature changes on a certain deep foundation pit engineering [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (4): 627-635.(in Chinese)
- [10]中交公路规划设计院.中华人民共和国行业标准 JTG D62-2004:公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].北京:人民交通出版社,2004.  
China Jiaotong Highway Planning and Design Institute. People's Republic of China industrial standard JTG D62-2004: highway reinforced concrete and prestressed concrete bridge and culvert design code [S]. Beijing: people's transport press,

2004.(in Chinese)

- [11] 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 Zhaoyuan. Research on the calculation method of axial force monitoring of foundation pit concrete support [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.(in Chinese)
- [12] 徐劲, 李均, 匡妍艺. 基坑工程中混凝土支撑轴力试验与分析[J]. 广东土木与建筑, 2017(3):46-48.  
XU Jin, LI Jun, KUANG Yanyi. Excavation concrete support axial force test and analysis [J]. Guangdong Architecture and Civil Engineering, 2017 (3):46-48. (in Chinese)
- [13] 赵世明, 崔永高, 陈卫东. 考虑混凝土支撑徐变的深基坑开挖有限元分析[J]. 建筑科学, 2009, 25(11):49-53.  
ZHAO Shiming, CUI Yonggao, CHEN Weidong. Finite element analysis of deep foundation pit excavation considering concrete support creep [J]. Architecture Science, 2009, 25 (11): 49-53.(in Chinese)
- [14] 方大勇, 周辉. 围护结构混凝土支撑轴力计算中的徐变分析研究[J]. 广东水利水电, 2006(4):11-13.  
FANG Dayong, ZHOU Hui. Creep analysis of retaining structure of concrete support axial force calculation [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2006 (4): 11-13.(in Chinese)
- [15] 彭海波, 卢文富, 梁波. 混凝土应力应变观测的探讨[J]. 水利信息化, 2005(1):36-39.  
PENG Haibo, LU Wenfu, LIANG Bo. Study on the observation of stress and strain of concrete [J]. Water Conservancy Information, 2005 (1): 36-39.(in Chinese)
- [16] 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.
- [17] Neville, AdamM. Creep of plain and structural concrete[M]. Construction Press, 1983.
- [18] ACI Committee 209. Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures[M]. American Concrete Institute, 1992.
- [19] Bazant Z P, Baweja S, Bazant Z P, et al. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures— model B 3[J]. Materials & Structures, 1995, 28(6):357-365.
- [20] Bazant Z P, Prasannan S. Solidification theory for concrete creep. I: formulation = Théorie de la solidification pour le fluage du béton. I: formulation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989,115.
- [21] Bazant Z P, Prasannan S. Solidification theory for concrete creep II: Verification and application [J]. Engineering Mechanical, 1989, 115 :1704-172.
- [22] Gardner N J. Creep and Shrinkage Revisited[J]. Aci Materials Journal, 1993, 90(3):236-246.
- [23] Gardner N J, Lockman M J. Design provisions for drying shrinkage and creep of normal-strength concrete[J]. ACI Materials Journal, 2002, 98(2):159-167.
- [24] Bazant Z P. Prediction of concrete creep effects using age adjusted effective modulus method[J]. ACI Journal, 1972, 69 : 212-217.

(编辑 陈移峰)