

文章编号: 1000-7598 (2013) 05-1391-06

桩基内力长期监测中的蠕变影响分析

刘争宏, 郑建国

(机械工业勘察设计研究院, 西安 710043)

摘 要: 以黄土地区桩基浸水试验为代表的桩身内力长期监测过程中, 桩身混凝土除发生弹性应变外还会发生蠕变, 以往工作中往往忽略了混凝土在轴力长期作用下蠕变对测试结果的影响, 但蠕变真实存在, 它对内力测试结果的影响程度以及如何消除其影响值得研究。根据现场实测试验资料对比分析表明, 长时间的桩基内力测试应考虑桩身蠕变的影响; 基于混凝土蠕变的相关理论, 推导了从实测应变中扣除桩身蠕变的公式; 从消除蠕变影响角度分析了黄土桩基浸水试验中应采取的措施, 其关键技术是控制试验桩的混凝土强度等级, 在桩顶附近设置标定段, 并保持标定段混凝土的温度和湿度恒定, 且与下部桩体一致, 获得具有代表性的蠕变函数曲线。

关 键 词: 混凝土蠕变; 混凝土桩; 负摩阻力; 湿陷性黄土; 桩基浸水试验; 内力测试

中图分类号: TU 473.1+6

文献标识码: A

Analysis of creep influence in long-term pile stress test

LIU Zheng-hong, ZHENG Jian-guo

(China JK Institute of Engineering Investigation and Design, Xi'an 710043, China)

Abstract: Besides elastic strain, creep would also occurred in long-term pile stress test represented by pile immersion test in loess regions for concrete pile; and the influence of creep occurred under long-term axial stress was usually be overlooked in the past when calculating stress of pile body. But creep is a real existence, influence degree of creep and how to eliminate its effect are worth studying. Based on comparative analysis of field test data, how the concrete creep affect the analytical results of pile stress is studied; and the conclusion shows that the overlook of concrete creep will lead to wrong distribution rules of axis force and friction. A formula, which calculates axial force of pile and can eliminate the creep influence, is derived from some basic theory on creep. Some measures needing be taken in pile immersion test of loess regions to attain representative creep curve are presented; mainly include: controlling the concrete strength grade of test pile, setting calibration section near pile top and keeping concrete's temperature and moisture constant in this section and are in the same with lower pile.

Key words: creep of concrete; concrete pile; negative skin friction; collapsible loess; immersion test of pile; stress test

1 引 言

自重湿陷性黄土场地中的黄土, 在水的浸湿和上覆土的自重压力作用下会发生显著的附加下沉, 当采用桩基时会产生负摩阻力作用。在湿陷性黄土地区, 混凝土桩是主要的桩基类型。为研究湿陷性黄土地区桩基的负摩阻力发挥性状, 以及确定桩基工程设计时所需的负摩阻力大小和中性点深度等参数, 往往要进行湿陷性黄土场地桩基的现场浸水试验。在 20 世纪 80 年代以前, 多采用悬吊法进行黄土场地桩基负摩阻力的试验研究^[1-2]。随着测试技术的发展, 90 年代以后多采用在桩身中埋设传感器

进行负摩阻力的测试^[3-7], 通常的做法是在黄土浸水过程中, 维持试桩桩顶恒定荷载 (包括零荷载) 不变, 在桩体中埋设传感器测试黄土在浸水发生附加下沉过程中桩身混凝土应变的情况, 按弹性理论计算桩身不同测试断面的轴力, 进而获得桩侧阻力 (含负摩阻力大小和中性点深度):

$$Q_i = \bar{\varepsilon}_i EA \quad (1)$$

式中: Q_i 为桩身第 i 断面处轴力 (kN); $\bar{\varepsilon}_i$ 为第 i 断面处应变平均值; E 为桩身材料弹性模量 (kPa); A 为桩身截面面积 (m^2)。

然而在采用埋设传感器进行的桩基浸水试验

收稿日期: 2012-02-25

第一作者简介: 刘争宏, 男, 1980 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事湿陷性土及黄土中桩基方面的研究工作。E-mail: liu_zh2004@163.com

中, 湿陷性黄土浸水沉降稳定所需的时间 (从浸水开始到沉降基本稳定) 较长, 试验一般需持续 1~3 月。在此过程中, 试桩桩体混凝土在轴力的作用下除发生弹性应变外, 还会发生蠕变, 因此, 在试桩环境条件 (温度和湿度) 维持不变条件下, 埋设在桩身中的传感器测试得到的应变实际上包含了弹性应变和蠕变两部分。在以往的测试资料整理当中, 往往忽略蠕变的影响, 直接将测试得到的应变代入式 (1) 计算桩身轴力, 当桩顶处计算轴力和桩顶施加荷载不一致时, 一般通过在式 (1) 右侧增加一小于 1 的固定修正系数 (使在桩顶处式 (1) 两侧相等) 对桩身的轴力进行修正 (本文称之为常规方法)。

本文根据现场桩基的浸水试验结果, 分析桩身混凝土蠕变对内力测试结果的影响, 通过已有蠕变理论, 分析桩基浸水试验消除蠕变影响的方法, 以及进行试验时应采取的措施, 以期对桩基浸水试验内力测试的试验和资料分析方法进行改进。

2 蠕变对内力测试结果的影响

图 1 为在陕西潼关某自重湿陷性黄土地带进行桩基浸水试验得到的部分桩身应变随深度变化曲线。桩身应变采用滑动测微计测试, 根据实测应变进行了光滑处理^[8]。1 号和 2 号桩桩径均为 0.846 m, 桩长为 60 m, 处于同一个浸水试坑当中。

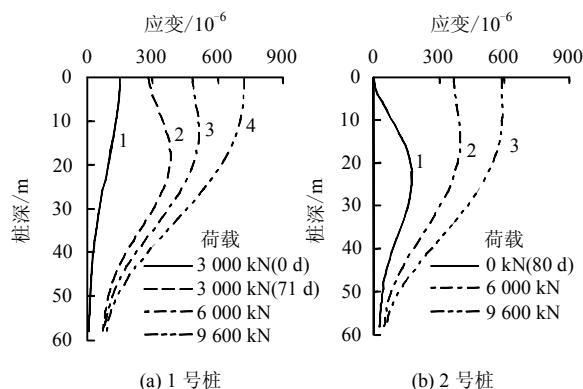


图 1 桩基浸水试验应变曲线

Fig.1 Strain curves tested in an immersion test of pile

1 号桩在浸水前分级加压至 3 000 kN, 在该荷载作用下桩顶沉降稳定后向试坑内浸水, 桩周土体发生自重湿陷沉降过程中维持桩顶 3 000 kN 荷载不变; 从浸水日起算 71 d (浸水 53 d 后停止向试坑浸水) 后桩周土体变形已稳定, 按慢速维持荷载法再分级加载至破坏。图 1(a) 中的曲线 1 和 2 分别为浸水前和黄土沉降稳定后的桩身应变随深度的变化曲线, 两曲线所对应的桩顶荷载均为 3 000 kN; 曲

线 3 为浸水后继续加压至 6 000 kN 的应变曲线; 曲线 4 为极限荷载 9 600 kN 作用下的应变曲线。

2 号桩在桩周黄土发生沉降过程中不施加荷载, 从浸水日起算 80 d 后按慢速维持荷载法分级加载至破坏。图 1(b) 中曲线 1 为黄土沉降稳定后 (从浸水日起算 80 d) 的应变曲线, 曲线 2、3 分别为桩顶荷载 6 000 kN 和 9 600 kN (极限荷载) 作用下的应变曲线。

对应图 1 中的应变曲线, 图 2、3 分别为不考虑蠕变影响按前述常规方法和考虑蠕变影响 (分析方法见后) 分析得到的侧阻力随深度变化曲线。

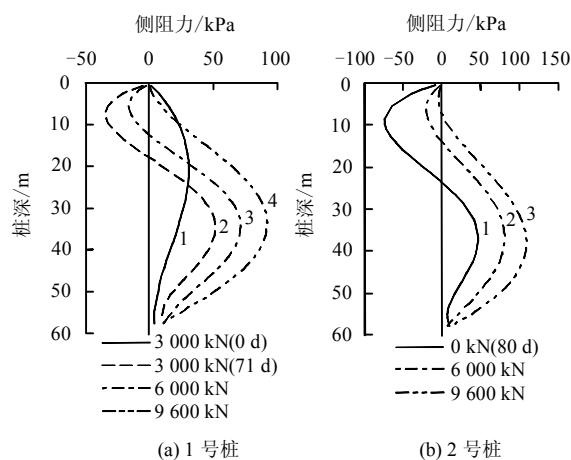


图 2 不考虑蠕变的侧阻力分析结果

Fig.2 Lateral resistance results without considering concrete creep influence

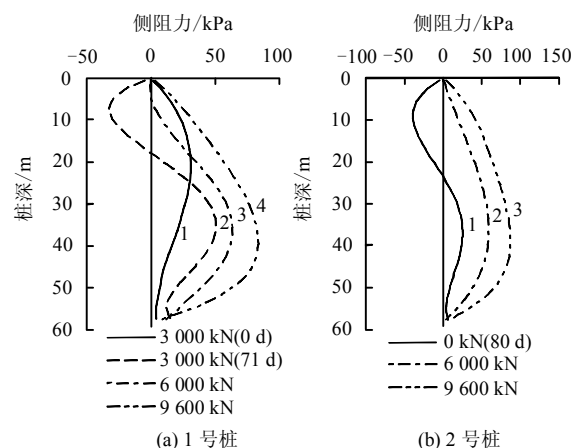


图 3 考虑蠕变的侧阻力分析结果

Fig.3 Lateral resistance results considering concrete creep influence

分析图 1~3, 可以得到以下结果:

(1) 对比图 1(a) 中曲线 1、2, 在维持 3 000 kN 的长期荷载作用下, 桩顶处发生了较大蠕变量, 蠕变与弹性应变的比值为 0.89, 亦即蠕变和弹性应变在同一个数量级。

(2) 按常规方法分析(见图2), 1、2号桩浸水产生的负摩阻力平均值分别为 22、46 kPa, 得到无荷载桩负摩阻力比有荷载桩大得多的规律; 但考虑蠕变影响分析得到的结果(见图3)分别为 27、32 kPa, 两者差异并不大。此外, 图2中极限荷载下两桩的桩侧阻力分布特征具较大差别, 而图3中桩侧阻力分布特征趋于统一。

因此, 在桩基浸水试验中, 桩身混凝土在长期荷载作用下产生的蠕变量较大, 应充分考虑长期荷载作用下桩身蠕变的影响, 否则会给负摩阻力以及后期桩周土体沉降稳定后加载过程中的桩侧阻力分析结果带来较大影响, 甚至出现规律性的偏差。

3 消除蠕变影响的理论公式

混凝土蠕变是指混凝土在某一不变荷载的长期作用下(即应力维持不变时), 其应变随时间而增长的现象。蠕变增长可延续几十年, 但大部分在 1~2 a 内出现, 前 2~6 个月发展最快^[9], 对加载龄期为 28 d 的混凝土, 收敛时(持荷时间 $t=\infty$) 蠕变与弹性应变的比值达 2~4。严格来说, 应该采用非线性的蠕变准则来预测混凝土结构的蠕变变形, 但目前非线性蠕变理论还没有达到实用的地步, 人们常常近似地认为, 蠕变变形与其应力之间存在着线性关系, 服从 Boltzman 叠加原理。在下列条件下, 实测结果与叠加原理(或者线性关系)非常接近^[10]:

- (1) 应力的数值低于混凝土强度的 40%~50%, 或者是说在工作应力范围之内;
- (2) 应变值在过程中没有减小;
- (3) 蠕变过程没有经历显著的干燥;
- (4) 在初始加载以后应力值没有大幅度增加。

与前 3 个条件的任何一个相比, 违背最后一个条件引起的误差较小, 最后一个条件在计算时通常可以忽略。在桩基浸水试验中, 条件(1)、(3)可以通过人为干预实现; 条件(2)基本满足, 即试验中由于负摩阻力的逐渐发展, 桩身应变是逐渐增加的。在叠加原理和线性蠕变假设条件下, 蠕变可表达为^[10]

$$\varepsilon_c(t) = \sigma(\tau_0)C(t, \tau_0) + \int_{\tau_0}^t C(t, \tau) d\sigma(\tau) \quad (2)$$

将式(2)离散, 有

$$\varepsilon_c(t) = \sigma(\tau_0)C(t, \tau_0) + \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_i C(t, \tau_i) \quad (3)$$

式中: $\varepsilon_c(t)$ 为 t 时刻的蠕变应变; $\sigma(\tau_0)$ 为 τ_0 时刻施加的应力; $\Delta\sigma_i$ 为 τ_i 时刻施加的应力; $C(t, \tau_0)$ 、 $C(t, \tau_i)$ 分别为加载龄期为 τ_0 和 τ_i 时的蠕变度函数,

即单位应力下的蠕变函数。

结合混凝土蠕变的定义, 式(3)的实质是将连续变化的荷载离散成若干不变荷载叠加计算变荷载的蠕变量。运用其计算桩身混凝土的蠕变, 需知离散荷载 $\Delta\sigma_i$ 的施加时间 τ_i 。设桩基浸水试验中不同监测时间 t_n ($n=1, 2, 3, \dots$) 的轴力如图4所示, 浸水前最后一级荷载的加载时间 τ_0 为已知; 取任一应变监测断面为研究对象, 浸水前在桩顶荷载作用下稳定后的轴力为 P_0 (加载时间较短, 可不考虑蠕变, 按式(1)计算), 浸水后随着负摩阻力的发展, t_n 时间的轴力为

$$P_n = P_0 + \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (4)$$

式中: n 为浸水期 t_n 时刻已监测的内力测试次数; ΔP_i 是连续变化的, 但当内力监测间隔不大时, 可将连续变化的轴力进行离散, 假定 ΔP_i 在本次测试时间 t_i 与上次测试时间 t_{i-1} ($i=1$ 时为 τ_0) 的中间时刻 τ_i 集中发生。

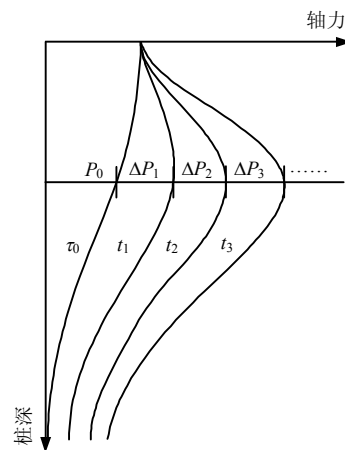


图4 轴力离散

Fig.4 Discretizing axial force

根据弹性理论, 有

$$EA(\varepsilon^* - \varepsilon_c) = P_0 + \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (5)$$

式中: ε^* 为 t_n 时刻测试得到的(总)应变; ε_c 为 t_n 时刻的蠕变应变; P_0 为浸水前桩身轴力。

将式(3)代入式(5), 整理后可得

$$\Delta P_n = \frac{1}{1 + EC(t_n, \tau_n)} \{ E[A\varepsilon^* - P_0 C(t_n, \tau_0) - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta P_i C(t_n, \tau_i)] - P_0 - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta P_i \} \quad (6)$$

根据式(4)、(6)可递推计算得到浸水期第 n 次 ($n=1, 2, 3, \dots$) 内力测试时的轴力, 可作为桩基

浸水试验内力测试结果分析的基本公式。

消除混凝土蠕变后的弹性应变为

$$\varepsilon_n = \frac{P_n}{EA} = \varepsilon^* - \frac{P_0}{A} C(t_n, \tau_0) - \sum_{i=1}^n \frac{\Delta P_i}{A} C(t_n, \tau_i) \quad (7)$$

4 试验中应注意的问题

根据式(4)、(6)计算桩基浸水试验过程中的桩身内力,关键在于确定蠕变函数。关于混凝土的蠕变,国内外学者建立了较多的经验预测模型,但难以满足桩身内力测试较高精度的应变要求。桩基浸水试验成果分析过程中用到的蠕变函数应以试验实测为基础,一种方法是采用室内试验,用与试桩混凝土配比相同的试样,模拟试桩的养护和工作条件,在不同的加载龄期荷载作用下测试蠕变,拟合混凝土的蠕变函数公式,其缺点是较为费时,优点是可以获得不同加载龄期的蠕变函数曲线;另一种方法是现场实测,即在试桩桩顶附近设置标定段,测试试验过程恒定荷载 Q 作用下标定段混凝土蠕变变化,其缺点是仅能获得式(6)中的 $C(t_n, \tau_0)$,而不能获得 $C(t_n, \tau_i)$,优点是方便操作。本文针对现场实测获得蠕变函数方法,就相关问题进行分析。

4.1 蠕变函数的确定

现场实测蠕变函数曲线必须在有荷载桩上(类似图1中1号桩工况)进行,其方法是在桩顶附近设置标定段(如图5所示,以滑动测微计测试桩身应变为例),标定段应距桩顶一定距离,避开试桩横截面上应力不均匀的桩段。试验中,在负摩阻力测试期间维持桩顶荷载 Q (对应应力 Q/A) 不变,监测标定段随时间增长的混凝土蠕变,将其换算成单位应力作用下的蠕变,并采用双曲线、多项式及其他曲线方式对蠕变监测数据进行拟合,即得到蠕变函数表达式 $C(t, \tau_0)$ 。如图6为潼关1号桩在维持桩顶荷载3000 kN长期作用下标定段相对于浸水前的应变增加值(蠕变)随时间散点图及趋势拟合线,按此获得的蠕变函数曲线 $C(t, \tau_0)$ 见图7。

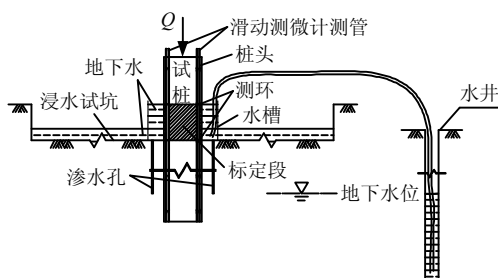


图5 桩顶附近标定段设置
Fig.5 Calibration section near pile top

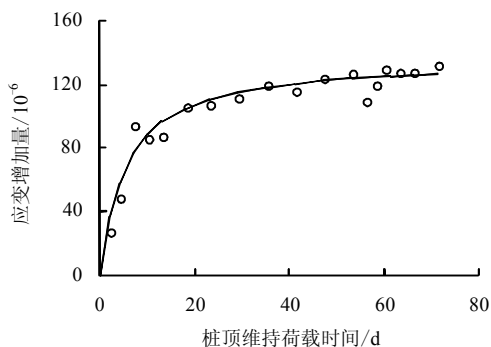


图6 1号桩标定段蠕变散点图
Fig.6 Measured creep in calibration section of pile 1

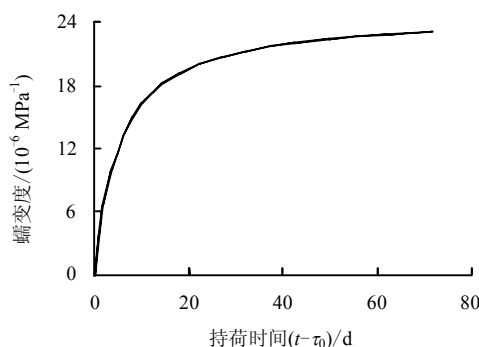


图7 蠕变度曲线
Fig.7 Creep curve under unit pressure

蠕变计算的基本理论主要包括老化理论、先天理论(又称为继效理论)和混合理论(又称为弹性蠕变理论)。如已知加载龄期 τ_0 的混凝土蠕变基本曲线 $C(t, \tau_0)$, 通过坐标系的垂直平移和水平平移可分别得到老化理论和先天理论任意加载龄期 τ 的混凝土蠕变曲线, 即老化理论: $C(t, \tau) = C(t, \tau_0) - C(\tau, \tau_0)$, 先天理论: $C(t, \tau) = C(t - \tau + \tau_0, \tau_0)$ 。老化理论考虑了混凝土老化对蠕变变形的影响, 而先天理论强调了蠕变变形的遗传性。实际上, 混凝土在前期老化特征十分明显, 而后期则主要表现为遗传性, 这一点已被试验所证明^[11]。对于桩基浸水试验特点, 浸水时桩身混凝土龄期大多在28~90 d之间, 根据有关蠕变试验结果^[12-13]及图7综合分析, 试验期间混凝土蠕变随加载龄期的增大确有减小, 采用先天理论会高估蠕变量值, 但采用老化理论也会低估蠕变量值; 就负摩阻力分析结果而言, 运用先天理论得到的负摩阻力偏小, 而老化理论得到的偏大, 真实负摩阻力值处于两者之间。如图1中运用先天理论分析得到的1、2号桩的负摩阻力平均值分别为21、25 kPa, 而运用老化理论得到的值分别为33、38 kPa, 因此, 两桩的负摩阻力真实值应分别在区间(21 kPa, 33 kPa)和(25 kPa, 38 kPa)内。考虑工程上允许的误差, 可考虑将先天理论和

老化理论分析得到的负摩阻力值加以平均作为负摩阻力测试值, 即 1、2 号桩的负摩阻力测试值为 27 kPa 和 32 kPa, 但在工程设计时应考虑误差可能带来的影响。

蠕变混合理论将老化理论和先天理论相结合, 可更好地模拟蠕变的特点, 更准确地测试负摩阻力值, 但需要在试验中测得多个加载龄期下的蠕变度曲线。

4.2 试桩及监测要求

影响混凝土蠕变的因素很多, 主要包括混凝土的组成、环境条件(包括制作和养护条件)、应力情况、构件尺寸^[9, 12]等, 其中处于密闭状态的混凝土, 构件尺寸不影响蠕变。为确保测试得到较好的标定段蠕变曲线并具有代表性, 试验桩和监测时间间隔应满足一定的要求。

(1) 桩身混凝土强度

式(6)是根据线性蠕变理论导出的轴力计算公式, 只有当最大轴力小于 0.4~0.5 倍混凝土强度才能适用, 超过该值蠕变将呈现非线性, 蠕变度曲线将与应力大小有关, 使得蠕变问题更加复杂。因此, 应根据负摩阻力测试期间桩顶维持荷载大小以及预估下拉荷载大小, 选择试桩合适的强度等级, 使桩身混凝土的抗压强度大于 2.5 倍中性点处应力; 反之, 也可根据桩身混凝土强度等级和预估下拉荷载大小, 控制桩顶维持荷载的大小。

(2) 试验工况

采用现场试验测试蠕变度曲线时, 必须在有荷载桩上进行, 不宜单独进行无荷载桩的负摩阻力的试验。当需将有荷载桩上测得的蠕变度曲线运用到无荷载桩上时, 两桩的混凝土组成、成桩时间及环境条件等应基本相同。

(3) 内力监测时间间隔

本文所述方法是将连续变化的轴力进行离散, 并假定轴力增量的发生时间是在两次内力监测时间的中间时刻, 因此, 内力监测的时间间隔不宜太长, 尤其是在浸水初期蠕变迅速增长, 以及浸水初期和停水初期负摩阻力(桩身轴力)迅速增长期间。

(4) 温度和湿度控制

图 8 为西安某黄土场地夏季测得的地温随深度变化曲线。从图中可以看出, 地面下 5 m 以上的土层温度受大气温度的影响较为严重, 而其下的温度较为恒定。而桩基浸水试验历时较长, 往往还跨越不同季节, 大气温度变化幅度较大, 不采取措施将使得桩顶附近标定段的不具代表性, 甚至出现实测应变较为混乱的情况(混凝土温度每升高 1℃, 将

产生约 12.4×10^{-6} 的应变^[14])。因此, 应采取措施使得标定段的温度较为恒定, 且与下部桩体基本相同。当采用地下水作为浸水水源时, 可在标定段周围设置一个水槽(如图 5 所示), 让地下水从底部进入水槽, 上部溢出进入浸水试坑, 以起到标定段温度基本恒定, 且与下部桩体温度基本相同的目的。同时标定段的湿度也存在与温度相类似的问题。若在水槽中设置渗水孔, 可使得上下桩体混凝土的湿度(养护条件之一)迅速达到基本相同, 标定段测得的蠕变度曲线更具代表性。

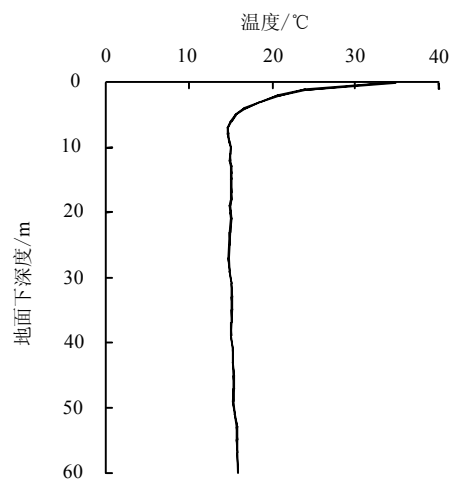


图 8 地下温度

Fig.8 Subsurface temperatures

5 结 论

(1) 桩基内力长期监测时, 桩身混凝土发生的蠕变量较大, 应考虑蠕变对资料分析结果的影响, 否则, 在桩侧阻力分析结果的规律性方面会产生较大偏差。

(2) 根据线性蠕变理论推导的消除蠕变影响的轴力计算公式, 表达式简单, 当内力监测时间间隔不大时, 可逐级计算各监测时间下的桩身内力。

(3) 通过恒定桩顶荷载, 在桩顶附近设置悬空标定段, 可获得一蠕变度基本曲线, 据此按先天理论和老化理论推导任意加载龄期的蠕变度曲线, 可获得包含侧阻力真值的一个区间值。采用混合理论可得到更准确的侧阻力值, 但需要在多桩上测试不同加载龄期的蠕变度曲线。

(4) 为使获得的蠕变度曲线具代表性, 应控制桩身混凝土强度等级, 其抗压强度应大于 2.5 倍中性点处应力; 对黄土桩基浸水试验可利用地下水温度较为恒定的原理控制标定段混凝土的温度和湿度, 使其与下部桩体的环境条件基本相同。

(5) 混凝土的蠕变是个较为复杂的问题, 本文以实用为原则考虑了桩基浸水试验中消除桩身蠕变影响的内力分析方法, 还不甚完善, 有待根据蠕变相关理论结合实际进行深入研究。

参考文献

- [1] 钱鸿缙, 王继唐, 罗宇生, 等. 湿陷性黄土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985: 363—369.
- [2] 张广林. 国营524厂金工车间单桩负摩擦力试验[J]. 岩土工程技术, 1998, (1): 41—64.
ZHANG Guang-lin. The single pile negative friction of 524 factory metal working shop[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 1998, (1): 41—64.
- [3] 李大展, 滕延京, 何颐华, 等. 湿陷性黄土中大直径扩底桩垂直承载性状的试验研究[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 11—21.
LI Da-zhan, TENG Yan-jing, HE Yi-hua, et al. Vertical bearing behaviour of large diameter belled pile in collapsible loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(2): 11—21.
- [4] 张献辉, 高永贵. 自重湿陷性黄土中大直径桩荷载传递机理试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报, 1996, 28(4): 467—471.
ZHANG Xian-hui, GAO Yong-gui. Experimental study on the load transfer mechanism of large diameter pile in loess[J]. **Journal of Xi'an University of Architecture and Technology**, 1996, 28(4): 467—471.
- [5] 齐静静, 徐日庆, 龚维明. 湿陷性黄土地区桩侧负摩阻力问题的试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(增刊): 881—884.
QI Jing-jing, XU Ri-qing, GONG Wei-ming. Experimental study on negative skin friction resistance on piles in collapsible loess area[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp.): 881—884.
- [6] 黄雪峰, 陈正汉, 哈双, 等. 大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 338—346.
HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(3): 338—346.
- [7] 马佩彦, 张继文, 王东红, 等. 自重湿陷性黄土场地桩的负摩阻力[J]. 岩土工程技术, 2009, 23(4): 163—166.
MA Kan-yan, ZHANG Ji-wen, WANG Dong-hong, et al. Negative skin friction of pile in self-weight collapse loess site[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2009, 13(4): 163—166.
- [8] 朱国甫, 李光煜. 确定桩侧摩阻力曲线的约束样条拟合方法[J]. 岩土力学, 1994, 15(3): 1—8.
ZHU Guo-fu, LI Guang-yu. Determination of pile friction curves by spline fitting method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1994, 15(3): 1—8.
- [9] 唐家华, 张玉坤. 混凝土徐变的分析与研究[J]. 泰州职业技术学院学报, 2005, 5(6): 24—26.
TANG Jia-hua, ZHANG Yu-kun. Prediction of creep in concrete[J]. **Journal of Taizhou Polytechnical Institute**, 2005, 5(6): 24—26.
- [10] 孙海林, 叶列平, 丁建彤. 混凝土徐变计算分析方法[C]//高强与高性能混凝土及其应用——第五届学术讨论会论文集. 北京: 中国建材工业出版社, 2004: 180—186.
- [11] 晏育松. 混凝土收缩、徐变的计算理论[J]. 科技广场, 2007, (4): 250—252.
YAN Yu-song. Calculation theory of concrete shrinkage and creep[J]. **Science Mosaic**, 2007, (4): 250—252.
- [12] 李之达, 邓科, 李耘宇, 等. 混凝土徐变及其在桥梁预拱度设置中的应用[J]. 交通科技, 2006, (6): 14—16.
LI Zhi-da, DENG Ke, LI Yun-yu, et al. Research on concrete creep and application in pre-camber setup of bridge[J]. **Transportation Science & Technology**, 2006, (6): 14—16.
- [13] 陈武, 段文生, 侯建国, 等. 大体积混凝土徐变试验研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(增刊): 519—521.
CHEN Wu, DUAN Wen-sheng, HOU Jian-guo, et al. Experimental study on creep of mass concrete[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2007, 40(Supp.): 519—521.
- [14] 宋子康, 蔡文安. 材料力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998: 53—56.