

李兴余, 沈春杨, 陶雄武, 等. 220 kV 变电站场地地基单桩沉降时间效应数值模拟[J]. 华南地震, 2024, 44(1): 149–156. [LI Xingyu, SHEN Chunyang, TAO Xiongwu, et al. Numerical Simulation of Time Effect of Single Pile Settlement of Site Foundation in 220 kV Substation [J]. South China Journal of Seismology, 2024, 44(1): 149–156]

220 kV 变电站场地地基单桩沉降时间效应数值模拟

李兴余¹, 沈春杨¹, 陶雄武¹, 张烜梓¹, 胡小平², 舒岳水²

(1. 广东电网有限责任公司惠州供电局, 广东 惠州 516000; 2. 珠海华成电力设计院股份有限公司, 珠海 519000)

摘要: 以某地区 220 kV 变电站场地地基单桩作为试验对象, 构建桩土系统相互作用模型, 利用行波分解的波动分析程序, 通过拉普拉斯变换、波动分析程序和梯形积分等方法求解出相关数值, 模拟静荷载作用下桩土参数、弹性模量、下层土厚度、蠕变量对 220 kV 变电站场地地基单桩沉降时间效应的影响。试验结果表明: 桩土参数对 220 kV 变电站场地地基单桩沉降的影响较大, 地基单桩周围土体受到地基单桩桩顶静荷载力作用时, 随着时间增加, 会发生一定幅度的沉降, 当桩侧土体剪切波速最大时, 短时间内单桩桩顶沉降量会趋于平稳且沉降量最小; 内摩擦角和地基单桩沉降量成反比; 当弹性模量增加时, 单桩桩顶沉降量会随之降低; 下层土厚度与沉降稳定时间成反比; 蠕变量随自重应力作用时间增加而逐渐降低, 当作用时间为 2000 d 时, 桩顶沉降量最大。

关键词: 220 kV 变电站; 场地地基; 单桩沉降; 时间效应; 数值模拟; 静荷载

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)01-0149-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.01.17

Numerical Simulation of Time Effect of Single Pile Settlement of Site Foundation in 220 kV Substation

LI Xingyu¹, SHEN Chunyang¹, TAO Xiongwu¹, ZHANG Xuanzi¹,
HU Xiaoping², SHU Yueshui²

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Huizhou Power Supply Bureau, Huizhou 516000, China; 2. Zhuhai Huacheng Electric Power Design Institute Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: Taking the single pile of the site foundation of a 220 kV substation in a certain area as the test object, the pile-soil system interaction model is constructed, and the relevant values are solved by using the wave analysis program of traveling wave decomposition, Laplace transform, wave analysis program and trapezoidal integration methods, to simulate the influence of pile-soil parameters, elastic modulus, subsoil thickness and creep variable on the time effect of the single pile settlement of site foundation in 220 kV substation under static load. The test results show that the pile-soil parameters have a great influence on the single pile settlement of site foundation in the 220 kV substation. When the soil around the single pile of the foundation is subjected to the static load force of the single pile top of the foundation, a certain amount of settlement will occur with the increase of time. When the shear wave velocity of the pile side soil is the maximum, the settlement of the single pile top will tend to be stable and the settlement will be the minimum in a short time. The internal friction angle is inversely proportional to the

收稿日期: 2023-08-30

作者简介: 李兴余(1984-), 男, 工程师, 从事电力工程建设管理工作。

E-mail: sizi677871@163.com

settlement of single pile. When the elastic modulus increases, the settlement of single pile top will decrease. The thickness of subsoil is inversely proportional to the time of settlement stabilization. The creep variable gradually decreases with the increase of the action time of self-weight stress. When the action time is 2000 d, the settlement of the pile top is the largest.

Keywords: 220 kV substation; Site foundation; Single pile settlement; Time effect; Numerical simulation; Static load

0 引言

变电站作为电网的枢纽，主要负责调节电压，将调好电压输送至电网中^[1]，为我们提供生活所需的电能。220 kV 变电站可实现大容量电能从 220 kV 直接降压到 10 kV 负荷供电，其应用范围比较广泛^[2-4]。在 220 kV 变电站建设中场地地基施工安全至关重要，直接关系到整个工程质量。220 kV 变电站场地地基设计应全面考虑预计建设区域的地质条件，采用合适基础结构与桩型，设计科学施工方案^[5]。目前在 220 kV 变电站场地地基设计中主要以搅拌桩复合地基设计为主。在单桩复合地基设计之初，必须充分地分析桩基沉降相关问题，为桩基建设提供理论基础，提高 220 kV 变电站场地地基稳定性^[6]，因此对 220 kV 变电站场地地基单桩沉降研究具有积极意义。

目前相关学者已经开始对 220 kV 变电站场地地基单桩沉降相关课题展开研究。如马艳等人提出 DUNCAN-CHANG 模型的地基沉降变形分析方法^[7]，构建 DUNCAN-CHANG 模型后，通过有限元

分析得出褥垫层是引起地基沉降变形主要原因。但是该方法计算过程比较复杂，导致研究效率低。邹新军等人研究地基中联合受荷单桩承载特性分析方法^[8]，依据室内模型试验结果，得出单桩承载力曲线，分析承载力和地基沉降之间的关系。但是该方法未涉及时间效应对地基单桩沉降的影响，研究结果具有片面性。鉴于上述研究方法的不足，通过行波分解的波动分析程序对 220 kV 变电站场地复合地基水泥土搅拌桩单桩沉降时间效应数值模拟，深入分析静荷载作用下单桩沉降的时间效应，为桩基建设提供科学指导方案。

1 数值模拟对象说明

选取惠州地区 220 kV 博西站工程中场地地基单桩作为试验对象，该变电站所在区域地势比较平坦，地层分为三层，每个土层的主要物理力学参数，见表 1。桩体和接触面相关参数，见表 2。

该 220 kV 变电站采用单桩复合地基设计方案，单桩以水泥土搅拌桩为主要桩型^[9-10]，单桩复合地基力边界条件设定，见表 3。

表 1 土层主要物理力学参数
Table 1 Main physical and mechanical parameters of the soil layer

物理力学参数	地层岩性		
	第一层素填土	第二层中细砂	第三层粉质强风化泥质粉砂岩
内摩擦角/(°)	6	30	22.8
渗透系数/(10 ⁻⁶ cm·s ⁻¹)	1.5	1.2	2.1
压缩模量/(MPa)	/	/	10.94
重力密度/(kN·m ⁻³)	18.5	19.0	20.5
粘聚力/(kPa)	10	/	35.7
天然含水量/(%)	/	/	16.85
承载力特征值/(kPa)	/	150	450
液性指数	<0	<0	<0
厚度/(m)	9	10	9
天然孔隙比	/	/	16.85

表2 桩体和接触面相关参数

Table 2 Parameters related to the pile body and the contact surface

项目	接触面凝聚力/ (kPa)	接触面剪切刚度/ (MPa)	接触面内摩擦角/ (°)	间距/ (mm)	弹性模量/ (MPa)	直径/ (mm)
其他单元	490	19	24	120	490	500
粘土中单元	51	19	0	120	90	500

表3 单桩复合地基力边界条件设定

Table 3 Setting of force boundary conditions of single pile composite foundation

地层岩性	第一层素填土	第二层中细砂	第三层粉质强风化泥质粉砂岩
桩端承载力特征值	/	/	1000
桩周侧阻力特征值	8	15	75

220 kV 变电站工程中场地地基单桩试验的主要模型参数,见表4。

表4 地基单桩试验的主要模型参数

Table 4 Main model parameters of the single-pile test for the foundation

参数	取值
桩长/(m)	12
桩径/(m)	0.5
桩侧土体密度/(kg·m ⁻³)	1850
桩长泊松比	0.17
桩顶作用荷载/(kN)	500
桩底土体密度/(kg·m ⁻³)	1900
桩体材料密度/(kg·m ⁻³)	2600
桩身混凝土弹性模量/(GPa)	38.5
地基变形模量/(MPa)	12
剪切模量/(MPa)	612
干容量/(kN·m ⁻³)	17
饱和度/(kN·m ⁻³)	19
渗透系数/(m·d ⁻¹)	1*10 ⁻⁴
桩身截面半径/(m)	0.25

2 220 kV 变电站场地地基单桩沉降时间效应计算

采用行波分解的波动分析程序对 220 kV 变电站场地地基单桩沉降时间效应实施数值模拟^[11]。设置 $e_b(x, t)$ 、 $s_b(x, t)$ 表示桩侧土对第 b 桩土层内桩身 x 点, t 时刻的侧摩阻力、位移, 单位为 kN。通过拉普拉斯变换计算出 $e_b(x, t)$ 的频域公式如下:

$$E_b(x, w) = S_b(x, w) \left(\sum_{y=1}^n \frac{1}{k_{b,y} + \eta_{b,y} w} \right)^{-1} \quad (1)$$

式(1)中: 复参量用 w 描述, 弹簧常数用 $k_{b,y}$ 描述; $E_b(x, w)$ 、 $S_b(x, w)$ 分别为 $e_b(x, t)$ 、 $s_b(x, t)$ 拉普拉斯变换式; 粘性系数用 $\eta_{b,y}$ 描述。

桩底土对桩端支承力计算公式如下:

$$P_{\text{toe}}(b) = D_{\text{toe}} c_{\text{toe}} v(m, b) + D_{\text{toe}} k_{\text{toe}} s(m, b) \quad (2)$$

式(2)中: 第 m 节点位移用 $s(m, b)$ 描述, 单位为 mm; 桩端横截面积用 D_{toe} 描述, 单位为 mm²; 第 m 节点速度用 $v(m, b)$ 描述, 单位为 mm/s; Voigt 体模型参数分别用 c_{toe} 、 k_{toe} 描述。

通过双曲线模型表示桩—土剪应力和桩土位移之间的联系。桩—土剪应力表达式为:

$$\tau(b, t) = s(b, t) / \beta(b) + \chi(b) * s(b, t) \quad (3)$$

式(3)中: 荷载传递参数分别用 $\beta(b)$ 、 $\chi(b)$ 描述; 桩土位移用 $s(b, t)$ 描述, 单位为 mm。

在静荷载条件下, 通过波动分析程序计算出 220 kV 变电站场地地基单桩第 b 节点, t 时刻的速度, 其求解公式为:

$$v(b, t) = \frac{2 * [R_1^-(b-1, t-1) - R_1^+(b+1, t-1)] - e_b(b, t)}{Z(b) + Z(b+1)} \quad (4)$$

式(4)中: 上行波系数用 R_1^+ 描述; 下行波系数用 R_1^- 描述; 第 b 节点, t 时刻的侧摩阻力用 $e_b(b, t)$ 描述, 单位为 kN; b 节点阻抗用 $Z(b)$ 描述, 单位为 Ns/m; $(b+1)$ 节点阻抗用 $Z(b+1)$ 描述, 单位为 Ns/m。

通过梯形积分求解出桩身节点位移^[12], 其求解公式如下:

$$s(b, t) = \Delta t * \frac{v(b, t) + v(b, t-1)}{2} + s(b, t-1) \quad (5)$$

式(5)中: 220 kV 变电站场地地基单桩第 b 节点, $t-1$ 时刻的速度和位移分别用 $v(b, t-1)$ 、 $s(b, t-1)$ 描述, 单位分别为 mm/s 和 mm。按照桩身稳定后位移可计算出桩身轴力^[13]。

在模拟静荷载试验时,对220 kV变电站场地地基单桩桩顶实施加荷载^[14-15]。单桩沉降时间效应计算公式如下:

$$f(t) \begin{cases} \kappa & (T_1 < t \leq T_2) \\ \frac{\kappa}{T_1} & (t \leq T_1) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中:加载时间用 T_2 描述,单位为s;最大加载量用 κ 描述,单位为kN;加载稳定时间用 T_1 描述,单位为s。

3 沉降时间效应计算模型建立

3.1 计算模型架构确定

为了分析220 kV变电站场地地基单桩沉降时间效应,采用行波分解的波动分析程序对220 kV变电站场地地基单桩沉降时间效应进行数值模拟分析,构建桩土系统相互作用模型,该计算模型架构,见图1。

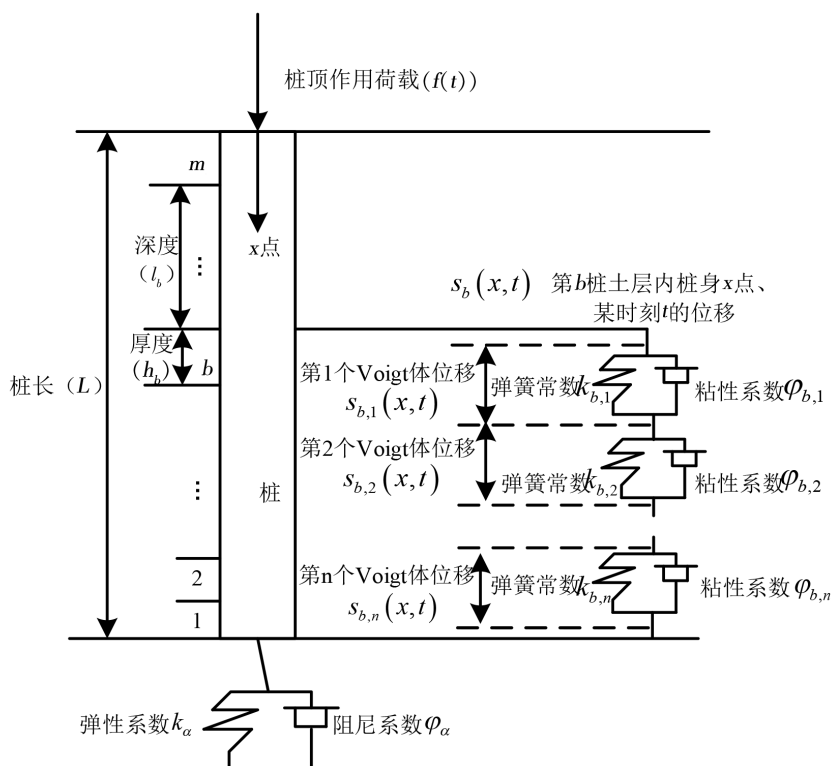


图1 计算模型架构

Fig.1 Computational model architecture

分析图1可知,桩土系统相互作用模型中具体参数解释,将桩土系统分成 m 层,设置桩身截面尺寸均一样,该模型包括 n 个Voigt体组成^[11]。

3.2 数值模拟建模过程

结合表4内容,利用ANSYS有限元软件中Mohr-Coulomb作为本构模型进行数值模拟。利用模型中CAX4R单元在变电站场地与复合地基之间、复合地基与搅拌桩及单桩之间形成硬接触状态,通过分析接触状态,将接触系数取值设置为0.6, X 、 Y 、 Z 为计算模型所代表的不同正交方向。

本构模型中地基单桩桩长为12 m,桩径为0.5 m,桩间距为0.1 m,以正方形的形式进行布置。在网格划分过程中,使单桩桩长、桩径、桩距保持一致,单桩网格划分结果如图2所示。

结合图2内容与该进行分析,在对单桩桩顶施加荷载的过程中,桩顶的竖向沉降量会发生明显变化,当施加载荷达到桩身承载量时,复合地基单桩承载能力为最高限值。结合上述内容根据实际情况设定加载方式为静态垂直加载,施加500 kN的垂直荷载,施加频率为10 Hz、振幅为5 mm、持续时间为30 s,复合地基水泥土搅拌桩单桩沉降计算云图如图3所示。

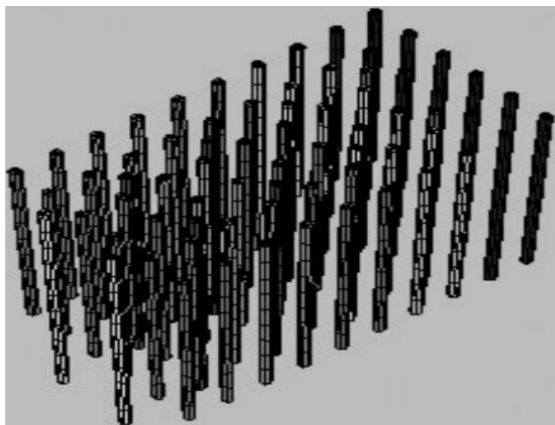


图2 单桩网格划分结果

Fig.2 Grid division results of single pile

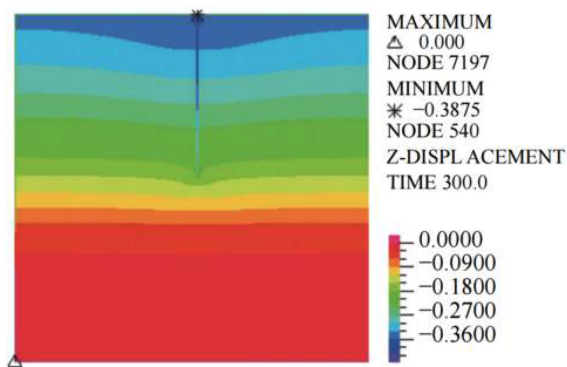


图3 复合地基水泥土搅拌桩单桩沉降计算云图

Fig.3 Calculation cloud map of single pile settlement of cement soil mixing pile of composite foundation

4 数值模拟结果分析

4.1 桩土参数对220 kV变电站场地地基单桩沉降的影响

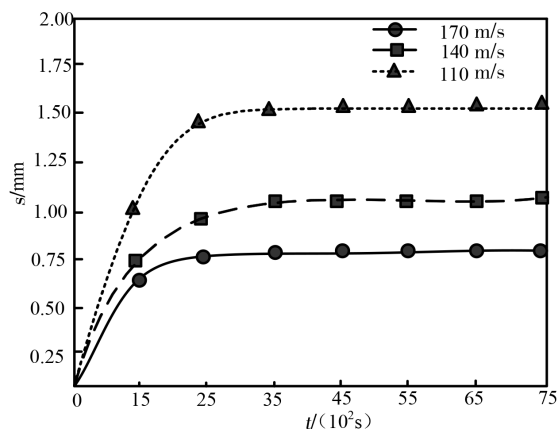
4.1.1 桩侧土体剪切波速的影响

由于剪切波速反映了土体中横波传播的速度,当外界荷载施加到地基上时,荷载通过土体以剪切波的形式传播。剪切波速的大小将直接影响到荷载传递的速度,从而影响沉降信号的传播速度和传播时间。因此,在沉降时间效应求解与分析的过程中,需要考虑剪切波速对单桩沉降的影响,以此帮助确定沉降信号的延迟时间,即明确单桩沉降量达到稳定状态所耗费的时间。

由于在变电站场地的复合地基设计中需要考虑土体的力学特性和沉降行为,因此通过分析剪切波速的影响,可以更准确地评估桩侧土体的刚度和弹性模量,进而在搅拌桩的施工过程中,预

测桩侧土体的动力响应和沉降时间效应,为施工监测提供指导。

在相同荷载下,桩侧土体的剪切波速分别为110 m/s、140 m/s、170 m/s时,分析不同剪切波速对220 kV变电站场地地基单桩沉降的影响,得出沉降—时间($s-t$)曲线,见图4。

图4 桩侧土体剪切波速对沉降—时间($s-t$)曲线的影响Fig.4 Influence of shear wave velocity of pile side soil on settlement-time($s-t$) curves

分析图4可知,地基单桩周围土体受到地基单桩桩顶静荷载力作用时,随着时间增大,会发生一定幅度的沉降。当220 kV变电站场地地基单桩桩顶在荷载力作用下,随时间增大,单桩桩顶沉降量先上升后趋于平缓趋势,最后收敛于一个固定值。这是因为初始阶段,土体的初始压密和调整,单桩桩顶沉降量会逐渐增加。在一定时间后,土体经历了初期压缩和重新排列过程,达到了一个新的平衡状态,变形便会逐渐趋于平缓并收敛;当桩侧土体剪切波速最大即170 m/s时,在 25×10^2 s后单桩桩顶沉降量趋于平稳且沉降量最小,其所耗费时间最低。这是因为高剪切波速的土体具有较高的刚度和抗压强度,对荷载力的响应能力较强,能够有效减小沉降量。这种土体具有较好的变形抵抗能力,导致在相同时间下沉降量较低,耗费的时间也较短。

在相同荷载下,桩侧土体剪切波速对沉降稳定后的桩身侧摩阻力曲线,见图5。

分析图5可知,桩身侧摩阻力曲线呈现先增加到最大值后,随深度升高而缓慢降低。剪切波速和桩身侧摩阻力在浅部位置、深部位置分别成正比和反比。出现这种变化趋势是因为在靠近地表的浅部位置,土体的密实程度较高,而且土体与桩身的接触面积也较大,因此摩阻力较大。在

深部位置,土体的密实程度相对较低,土体与桩身的接触面积减小,从而导致摩阻力逐渐降低。剪切波速是土体刚度的反映,而在浅部位置,由于土体的密实程度较高,土体刚度较大,因此剪切波速与桩身侧摩阻力成正比。而在深部位置,土体密实程度相对较低,土体刚度逐渐降低,导致剪切波速与桩身侧摩阻力成反比。

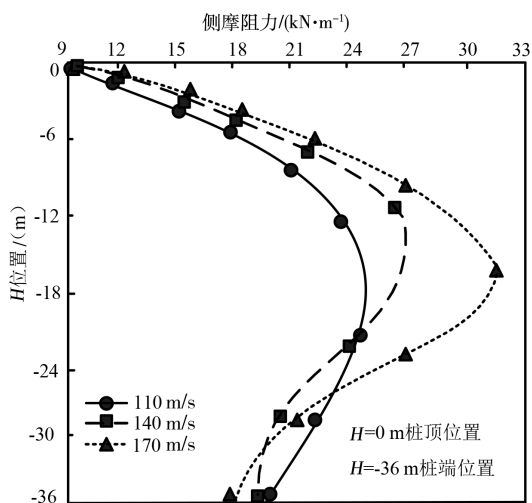


图5 桩身侧摩阻力曲线

Fig.5 Side friction resistance curves of pile body

在相同荷载下,桩侧土体剪切波速对沉降稳定后桩身轴力曲线,见图6。

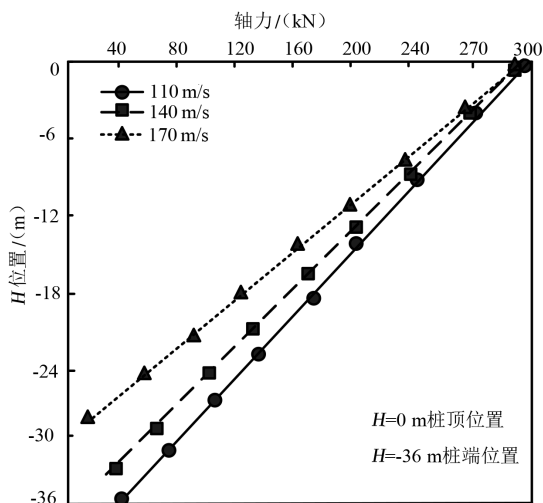


图6 桩身轴力曲线

Fig.6 Axial force curves of pile body

分析图6可知,同等位置下,剪切波速和220 kV变电站场地地基桩身轴力成反比。当剪切波速为170 m/s时,桩身轴力最小,同时剪切波速的增加会降低单桩沉降量,使得端阻力降低;桩身轴力受桩顶位置影响,当桩身向下,会受到侧摩擦阻力影响,导致桩身轴力降低。

4.1.2 桩侧土体内摩擦角的影响

在相同荷载下,在不同的桩侧土体的内摩擦角时,分析内摩擦角对220 kV变电站场地地基单桩沉降的影响,得出沉降—时间($s-t$)曲线,见图7。

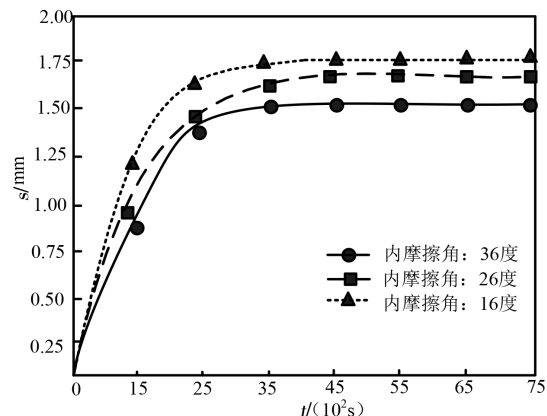


图7 桩侧土体内摩擦角对沉降—时间($s-t$)曲线的影响

Fig.7 Influence of internal friction angle of pile side soil on settlement-time ($s-t$) curves

分析图7可知,当220 kV变电站场地地基单桩桩顶在荷载力作用下,随时间增大,单桩桩顶沉降量先上升后趋于平缓趋势,最后收敛于一个固定值。这是因为在初始阶段,土体受到荷载力的压实作用,单桩桩顶的沉降量逐渐增加。然后,随着土体的继续调整和变形,土体力学平衡,因此桩顶沉降量逐渐趋于平缓,最终收敛于一个固定值。当桩侧土体内摩擦角最大时,在短时间内单桩桩顶沉降量趋于平稳且沉降量最小。这是因为具有较大内摩擦角的土体能够提供较大的抗剪强度,以减小桩身侧壁与土体之间的相对位移,从而减小沉降量。

在相同荷载下,桩侧土体内摩擦角对沉降稳定后的桩身侧摩阻力曲线,见图8。

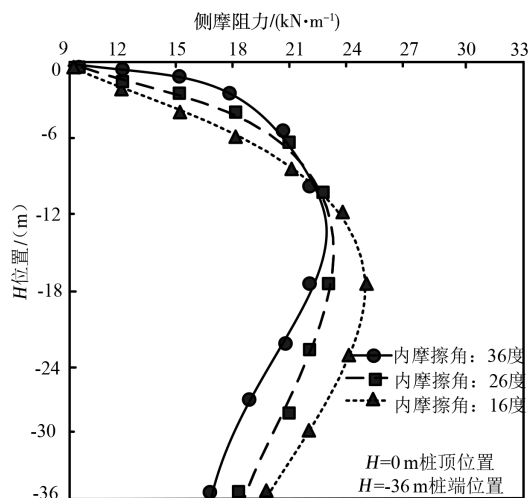


图8 桩身侧摩阻力曲线

Fig.8 Side friction resistance curves of pile body

分析图8可知,在0 m至-10 m时,桩身侧摩阻力和内摩擦角成正比,-10 m以下桩身侧摩阻力和内摩擦角成反比;当 H 位置为-9 m时,侧摩阻力为22 kN/m,此时三种摩擦角沉降量一样,说明,此时内摩擦角对侧摩阻力影响较小。

在相同荷载下,分析桩侧土体内摩擦角对沉降稳定后桩身轴力曲线的影响,见图9。

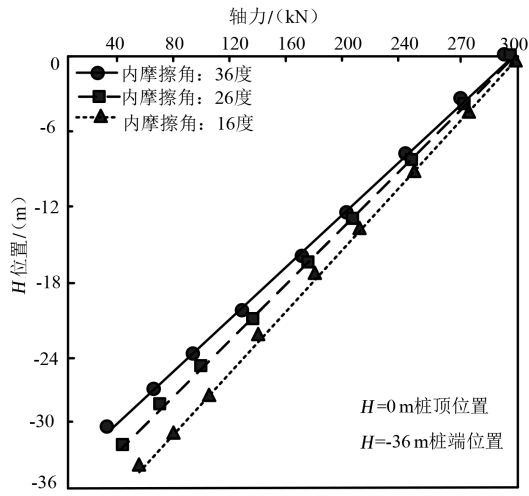


图9 桩身轴力曲线
Fig. 9 Axial force curves of pile body

分析图9可知,因内摩擦角和220 kV变电站场地地基单桩沉降量成反比,导致内摩擦角和桩身轴力成反比,端阻力亦与内摩擦角成反比。

4.1.3 桩身混凝土弹性模量的影响

在相同荷载下,分析不同桩身混凝土弹性模量对220 kV变电站场地地基单桩沉降的影响,得出沉降—时间($s-t$)曲线,见图10。

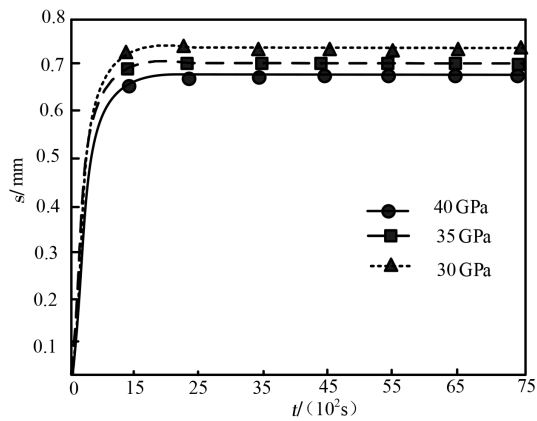


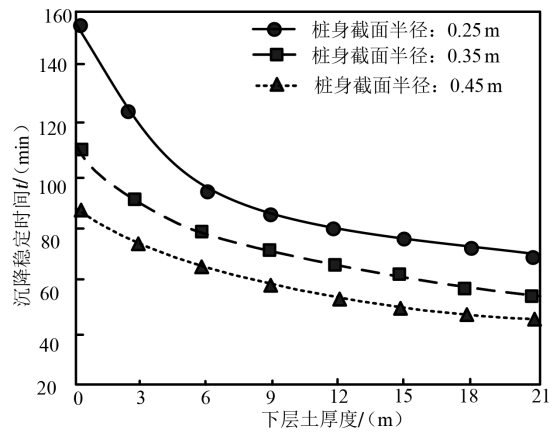
图10 桩身混凝土弹性模量对沉降—时间($s-t$)曲线影响
Fig.10 Influence of elastic modulus of pile concrete on settlement-time($s-t$) curves

分析图10可知,220 kV变电站场地地基单桩桩顶在荷载力作用下,随时间增大,单桩桩顶沉降量先上升后趋于平缓趋势,最后收敛于一个固

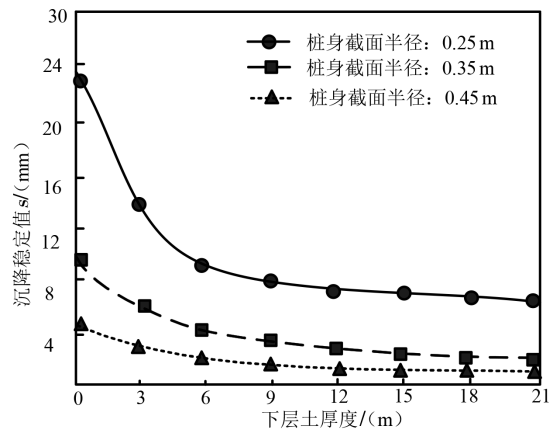
定值,弹性模量增加时,单桩桩顶沉降量会随之降低。这是因为弹性模量是材料刚度的度量,即材料对应变的抵抗能力。当弹性模量较高时,材料具有较大的刚度,能够更好地抵抗荷载力引起的变形,从而减小桩顶的沉降量。但是沉降量趋于稳定的时间不受桩身混凝土弹性模量的影响。这可能是因为沉降量趋于稳定的时间主要与土体的变形和调整过程有关,而不是与桩身混凝土的稳定时间有关。

4.1.4 下层土厚度的影响

在相同荷载下,桩身截面半径分别为0.25 m、0.35 m、0.45 m时,分析不同下层土厚度对220 kV变电站场地地基单桩沉降的影响,得出结果见图11。



(a) 沉降稳定时间



(b) 沉降稳定值

图11 下层土厚度对桩顶沉降稳定值和稳定时间的影响
Fig.11 Influence of subsoil thickness on settlement stability value and stability time of pile top

分析图11(a)可知,下层土厚度与沉降稳定时间成反比,当土层厚度一样时,桩身横截面半径最大时,其沉降稳定时间最低;分析图11(b)可知,随着下层土体厚度升高,对应的沉降稳定值呈下降趋势。这是因为下层土体的存在能够分担上层土体的荷载,减小了上层土体的变形和沉降。

通过增加下层土体的厚度,相同的荷载作用下上层土体的应力会减小,从而导致沉降稳定值的下降。当桩身横截面半径为最大时,沉降稳定值下降幅度比较小。这是因为桩身横截面半径的增大可以增加桩的刚度和抗弯承载力,从而减小了桩身的变形和沉降。较大的横截面半径能够提供更大的承载面积,使得荷载分布更均匀,减少了局部应力集中,从而减小了桩身周围土体的变形和沉降。

4.2 单桩蠕变时间效应分析

在不同自重应力作用下,220 kV 变电站场地地基单桩在分级荷载下,经测试得出蠕变曲线,如图 12 所示。

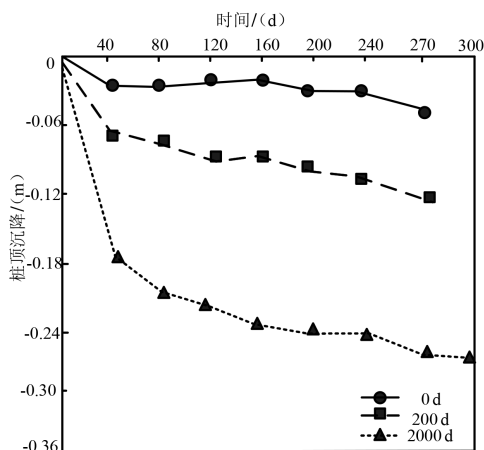


图 12 蠕变曲线

Fig.12 Creep curves

分析图 12 可知,220 kV 变电站场地地基单桩在长期荷载情况时,蠕变时间效应影响单桩沉降时间。蠕变量随自重应力作用时间增加逐渐降低,当作用时间为 2000 d 时,桩顶沉降量最大,这是因为地基沉积时间较长,土体蠕变性较稳定,且为固结形态,蠕变性对其影响较小。

5 结论

本文创新性地构建桩土系统相互作用模型,利用行波分解的波动分析程序,通过拉普拉斯变换、波动分析程序和梯形积分等方法求解出相关数值,能够准确模拟静荷载作用下桩土参数、弹性模量、下层土厚度、蠕变量对 220 kV 变电站场地地基单桩沉降时间效应的影响。得出数值模拟试验结果如下:

(1)对 220 kV 变电站场地地基单桩桩顶实施荷载试验,沉降量和时间成正比,说明荷载对单桩时间效应比较明显;

(2)桩土参数对 220 kV 变电站场地地基单桩沉降时间效应影响较大;

(3)蠕变量随自重应力作用时间增加逐渐降低,当作用时间为 2000 d 时,桩顶沉降量最大。

参考文献

- [1] 董建军,李昕,梅媛,等.老采空区地表变电站场地稳定性的 D-InSAR 监测[J].采矿与安全工程学报,2022,39(01):62-71.
- [2] 吴海亮,邢琳,张戊晨,等.非均匀地基变桩长沉降控制三维有限元协同分析[J].建筑结构,2022,52(08):124-130+65.
- [3] 慕东霖,田英辉,王乐,等.考虑软土软化效应时单桩基础水平循环受荷的有限元数值模拟[J].岩土工程学报,2022,44(04):740-748.
- [4] 黄果,刘争平,刘茂洋.地下空洞的面波场地效应数值模拟研究[J].地震工程学报,2021,43(02):468-475.
- [5] 杨光华,李卓勋,王东英,等.高级切线模量法及其在地基沉降计算中的应用[J].岩土工程学报,2022,44(05):787-798.
- [6] 周琳,施尚伟,李升,等.真空-堆载联合预压法加固软土地基的效果分析及沉降机理研究[J].建筑结构,2022,52(S1):2178-2182.
- [7] 马艳,王永生,张昊,等.基于 DUNCAN-CHANG 模型的刚性桩复合地基沉降变形分析[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2021,34(01):151-157.
- [8] 邹新军,周长林.上砂下黏地基中竖向力-扭矩联合受荷单桩承载特性[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(09):126-135.
- [9] 文兵,袁内镇,孔令伟,等.吹填珊瑚砂场地高层建筑复合地基工程实践与沉降估算[J].土木工程学报,2021,54(12):85-93.
- [10] 程志,熊志武,芮瑞,等.扩径石灰桩复合地基现场试验与数值模拟[J].土木工程与管理学报,2021,38(05):64-69.
- [11] 李东阔,郑源,张飞,等.横向布置单桩潮流能水轮机的数值模拟研究[J].可再生能源,2020,38(06):784-790.
- [12] 刘华清,安增军,刘佳龙,等.加筋填芯预应力高强混凝土管桩一承台节点拉弯受力性能分析[J].工业建筑,2022,52(06):12-18.
- [13] 吕玺琳,范琪,刘泳钢,等.含水率变化对膨胀土地基单桩承载特性影响数值模拟[J].结构工程师,2022,38(03):117-122.
- [14] 刘梦捷,常光磊.碎石桩与包裹碎石桩复合地基现场静载试验对比研究[J].公路,2022,67(09):61-69.
- [15] 董俊利,陈军浩,聂如松,等.螺旋桩复合地基桩土应力比模型试验与数值模拟[J].铁道科学与工程学报,2022,19(10):2966-2975.