

单桩沉降的时效分析

曹海莹¹, 王树仁¹, 陈铁军²

(1 燕山大学 建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛, 066004; 2 河北建材职业技术学院 建筑工程系)

摘要: 采用 Biot 固结方程和修正的考马拉—黄模型相耦合的分析方法, 对荷载作用下的单桩进行了分析。用 Biot 固结理论模拟土体固结, 以修正的考马拉—黄模型模拟土体流变, 全面呈现了单桩受荷变形的全过程。通过分析荷载作用下土体内孔压增长和消散、沉降变形、桩侧摩阻力等随时间的变化, 得出了一些有益的结论。

关键词: 单桩; Biot 固结; 流变模型; 粘弹塑性; 沉降

中图分类号: TU413.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-7983(2007)02-0039-04

土的应力、应变受时间的影响是明显的, 不仅粘性土, 即使是无粘性的砂土, 其变形都不是瞬时产生的, 而是以某种速度增长的。根据应力状态的不同, 粘性土的变形速度有的是极其缓慢, 最后趋于停止; 有的则逐渐增长, 最后导致破坏。

建筑在软土地基上的桩筏基础, 在荷载作用下的变形是一个长期的沉降过程, 一般认为这种变形包含了瞬时变形, 固结变形和次固结变形三部分。随着土体固结和孔隙水压力的消散, 荷载逐渐转移到土骨架上。土骨架在应力作用下, 由于颗粒表面所吸附水的粘滞性, 颗粒的重排和骨架体错动具有时间效应, 土体变形与时间有关, 因此在桩基沉降分析中考虑土的流变特性, 即蠕变现象, 是很有必要的。特别是桩端下土层较软时, 土体流变变形在总变形中占有明显的比例。

1 土体的粘弹塑性本构模型

一般来说, 能概括软土流变规律的前提下最简单的模型, 是适合软土工程数值分析的理想模型。因此采用能够表现土体粘弹塑性的考马拉—黄模型(图1), 该模型能较好地描述加载瞬间的弹性变形, 同时又能模拟土体变形的延迟现象和卸载后的残留变形现象。

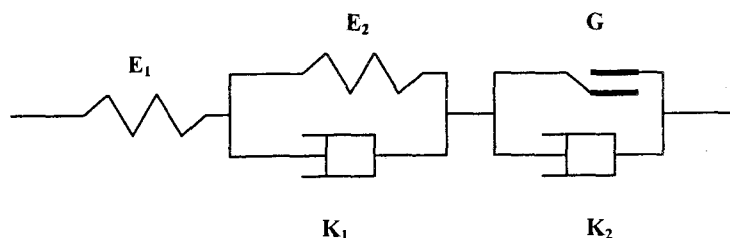


图1 考马拉—黄模型

总的应变可以看成由三部分组成: $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_e\} + \{\varepsilon_w\} + \{\varepsilon_p\}$, 其中 $\{\varepsilon_e\}$ 为弹性应变; $\{\varepsilon_w\}$ 为粘弹性应变; $\{\varepsilon_p\}$ 为粘塑性应变。现把 $\{\varepsilon_w\}$ 、 $\{\varepsilon_p\}$ 看作为初应变, 因而粘弹塑性问题的解将归结为具有初应变的弹性问题的解。

$$\text{物理方程为: } \{\sigma\} = [D]\{\varepsilon_e\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_w\} - \{\varepsilon_p\}) \quad (1)$$

$$\text{几何方程为: } \{\varepsilon\} = [B]\{\delta\} \quad (2)$$

$$\text{单元节点力为: } \{F\} = \int_V [B]^T [D] ([B]\{\delta\} - \{\varepsilon_w\} - \{\varepsilon_p\}) dV = [K](\{\delta\} - \{F_w\} - \{F_p\}) \quad (3)$$

$$[K]\{\delta\} = \{F\} + \{F_w\} + \{F_p\} \quad (4)$$

对于粘塑性流变的应变增量, 可采用如下的计算方法:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_p \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (6)$$

式中, $Q = Q(\sigma, \varepsilon_p, \kappa)$ 为塑性势; γ 为控制塑性流动率的流动参数; $\Phi(F)$ 为屈服函数, $x > 0$ 时, $\Phi(F)$ 是正的单调递增函数; 符号 $\langle \rangle$ 为开关函数, 当 $x > 0$, $\langle \Phi(x) \rangle = \Phi(x)$; 当 $x < 0$, $\langle \Phi(x) \rangle = 0$;

采用相关联的塑性流动法则, 这时有 $Q = F$, 则式(6)可以转化为:

$$\dot{\varepsilon} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma} = \gamma \langle \Phi \rangle \alpha \quad (7)$$

式中, α 为流动矢量, 具体形式如下:

$$\alpha^T = \frac{\partial F}{\partial \sigma} = \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_x} \quad \frac{\partial F}{\partial \sigma_y} \quad \frac{\partial F}{\partial \sigma_z} \quad \frac{\partial F}{\partial \tau_{xy}} \quad \frac{\partial F}{\partial \tau_{yz}} \quad \frac{\partial F}{\partial \tau_{zx}} \right]$$

屈服函数 F 采用工程中广泛应用的摩尔—库仑屈服准则, 来弥补单纯塑性滑块的不足, 摩尔—库仑屈服准则在介绍土体本构模型的许多教材中都有详细介绍, 这里简略。

2 固结与流变耦合的有限元分析

土的流变性质是通过应力—应变关系中的时间效应来体现的, 随着孔隙水压力消散, 土体产生主固结变形, 也产生次固结变形, 即主、次固结同时产生。在有限元分析中, 将次固结看成是后效蠕变变形。

采用修正的考马拉—黄模型反映土体的粘弹塑性, 并将该模型与固结理论相结合, 导出增量形式的 Biot 固结方程:

$$\begin{bmatrix} K & K' \\ K'^T & \bar{K} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R - R_t + R_v \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

式中: K 为刚度矩阵; K' 为耦合矩阵; \bar{K} 为渗流矩阵; $\Delta \delta$ 为位移增量; β 为超静孔压值; R 为外荷载所对应的节点等效荷载; R_t 为 $t - \Delta t$ 时刻以前发生的位移相对应的应力所平衡了的那部分荷载; R_v 为 $t - \Delta t$ 时刻由于土体粘性所对应的那部分荷载。

根据上述原理和方法, 编制了二维八结点 Biot 固结粘弹塑性有限元程序, 桩土接触面单元选择 Goodman 单元, 该程序可以考虑平面应力、平面应变和轴对称问题。

3 单桩的有限元分析

3.1 模型参数的选取

单桩有限元分析模型选取桩长 $l = 16$ m, 桩径 $d = 0.6$ m, 桩身的弹性模量 $E_p = 30$ GPa, 土的压缩模量 $E_c = 4$ MPa, 根据上海地区的统计资料, 土体的弹性模量和压缩模量之间的关系为 $E = (2 \sim 5) E_c$, 取桩侧土的弹性模量 $E = 8$ MPa, 土的泊松比 $\nu = 0.4$, 渗透系数 $k_s = k_v = 1 \times 10^{-4}$ m · d⁻¹, 桩端下土层的计算深度为 14 m, 地基计算总深度为 30 m, 计算宽度取 50 m。分析中总荷载为 250 kN, 分 5 次施加, 每次 50 kN。

3.2 桩端孔隙水压力变化

图 2 为桩端处的孔压随时间变化曲线, 由图可知桩端处有明显的曼德尔效应, 在固结初期孔压不但没有下降, 反而逐渐上升, 达到一定时间(200 d)后才下降, 这与实测结果相一致。

图 3 为施加荷载 50 kN, 经历 30 d; 图 4 为施加荷载 150 kN, 经历 90 d; 图 5 为施加荷载 250 kN, 经历 150 d 后, 桩侧和桩端下土体的超孔隙水压力沿深度方向的变化。由图可知, 桩端和桩顶附近的超静孔隙水压力比较大, 桩侧和桩端下地基土中的超静孔隙水压力较小, 随着荷载的增大, 超静孔隙水压力的变化并不明显。

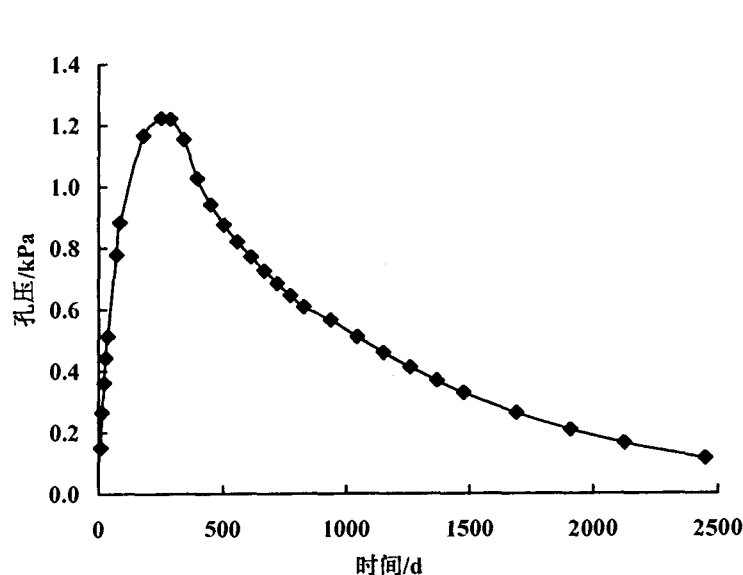


图2 桩端土的孔压随时间的变化曲线

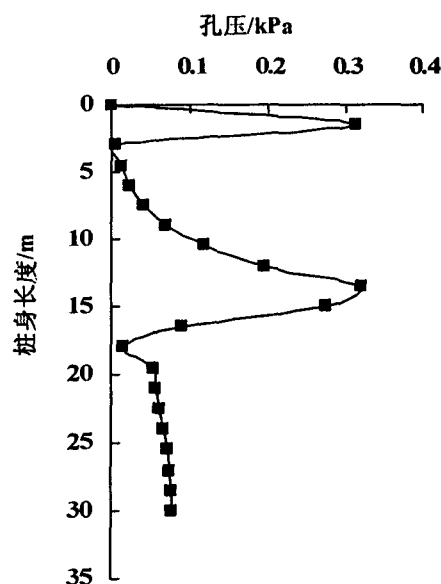


图3 加载50 kN时,桩侧与桩端土的孔压分布

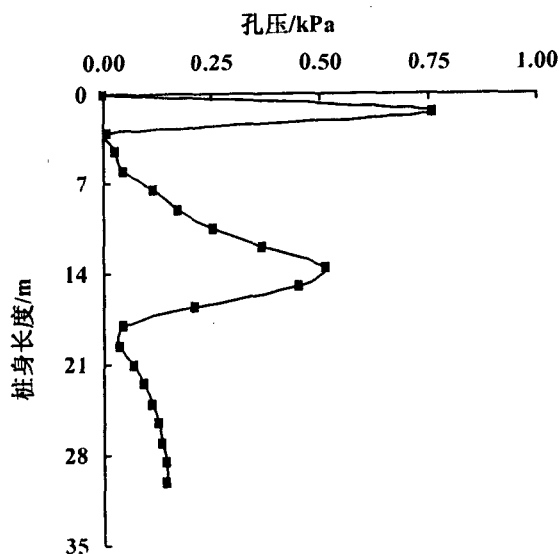


图4 加载150 kN时,桩侧与桩端土的孔压分布

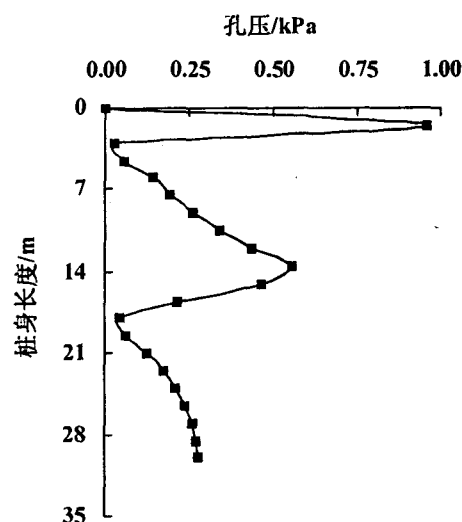


图5 加载250 kN时,桩侧与桩端土的孔压分布

3.3 桩土之间的相互作用

从图6 桩土接触面单元应力沿深度的变化曲线可以看出,桩土接触面的单元应力随着加载历时,逐渐呈现出中部较小,桩顶和桩端增长较快的现象。

图7和图8分别为桩端处土体剪应力沿水平方向的变化和桩端处土体正应力沿水平方向的变化,可以看出两图中应力变化规律较为一致,桩端处土体正应力和剪应力都随着距桩水平距离的增大迅速减小,在距桩5 m后曲线变得较为平直,土中的应力已经很小,在进行群桩分析时可以忽略不计。在荷载作用下桩端应力的影响范围是有限的,这和 Randolph 等人通过试验测试得出的结论较为一致。

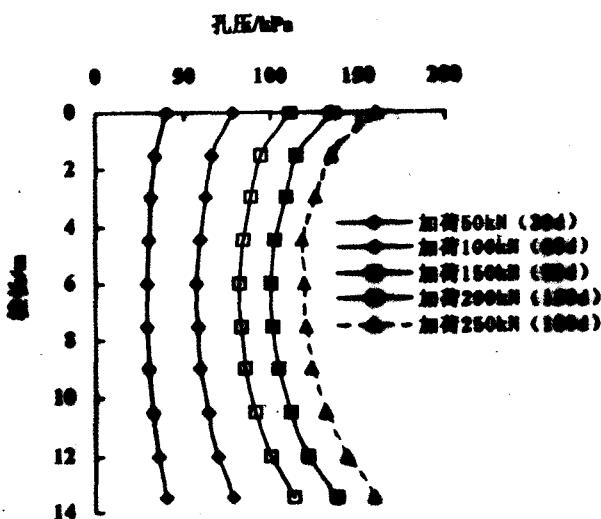
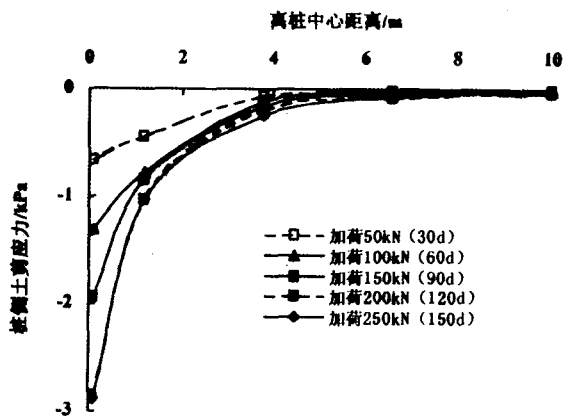
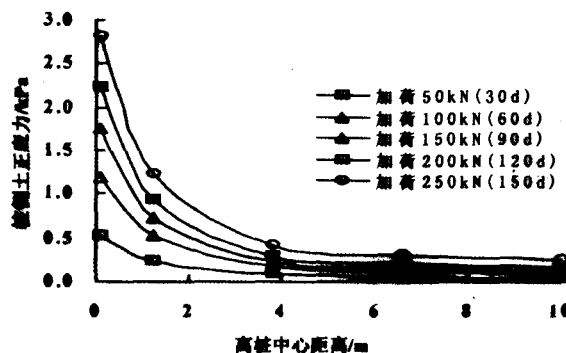


图6 桩土接触面单元应力沿深度的变化

图7 桩端处土的 τ_x 沿水平方向的变化图8 桩端处土的 σ_x 沿水平方向的变化

4 结 论

采用将 Biot 固结方程和修正的考马拉—黄模型相耦合的分析方法,对荷载作用下单桩沉降变形的全过程进行了分析。通过对桩周土体固结沉降过程的模拟,可以初步得出以下几条结论:

(1)在荷载作用下,单桩桩端处孔隙水压力存在明显的曼德尔效应,即在固结初期,孔压不但没有下降,相反却逐渐上升,达到一定时间后,才开始下降。

(2)桩基沉降引起的土体水平位移,随着与桩距离的增大迅速减小,特别是在靠近桩的附近,位移急剧减小,这说明桩对周围土体位移的影响是有限的,超出此范围,影响可以忽略不计。

(3)桩端处土中的正应力和剪应力都随着距桩水平距离的增大迅速减小,在离桩一定距离后曲线变得较为平直,土中的应力已经很小。

参考文献:

- [1] 欧文,辛顿. 塑性力学有限元 [M]. 北京:兵器工业出版社,1989.
- [2] 孙钧. 岩土材料记变及其工程应用 [M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [3] 阮波,田管凤. 弹塑性地基中的竖直受力桩分析 [J]. 长沙铁道学院学报,2001,19(2):6-13.
- [4] 段继伟,龚晓南,曾国熙. 单桩带台复合地基的有限元分析 [J]. 地基处理,1994,5(2):5-12.
- [5] 赵维炳,施健勇. 软土固结与流变 [M]. 南京:河海大学出版社,1996.
- [6] 李雄,刘金砺. 饱和软土中预制桩在载力时效的研究 [J]. 岩土工程学报. 1992,14(4):5-12.

作者简介:曹海莹(1979-),男,硕士,助教。主要研究方向:岩土工程。

(责任编辑:石瑞珍)

A Time Effect Analysis of Single Pile Settlement

CAO Hai-ying¹, WANG Shu-ren¹, CHEN Tie-jun²

(1 School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei 066004;

2 Department of Construction Engineering, Hebei Vo-tech College of Building Materials; China)

Abstract: In this paper, the coupled methods of Biot consolidation theory and the modified Kommala-huang model are employed to perform a theoretical analysis of a pile-raft foundation. Given that the Biot consolidation theory simulates soil consolidation, and the modified Komamura-Huang model simulates soil rheology, it allows the deformation process of pile-raft foundation under longtime loads to be fully presented. Some useful conclusions are drawn from an analysis of soil pore pressure increasing and dissipating, of settlement, and of a pile profile frictional resistance's variation with time.

Key words: single pile; settlement; Biot consolidation; rheological model