

软基上结构仿真计算方法及其应用

苏 超¹, 姜弘道², 谭恩会³

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098;
3. 南京市政设计院, 江苏 南京 210008)

摘要 根据半无限大地基弹性沉陷公式, 利用线粘弹性—弹性相应原理及 Laplace 变换等数学工具, 导出了 Kelvin 型和三参量型粘弹性地基沉陷公式. 用空间八结点徐变等参单元离散上部结构, 地基沉陷采用粘弹性理论解, 提出了对软基上结构进行仿真计算的半解析计算方法, 并编制了相应的计算程序. 实例计算表明, 仿真算法能很好地模拟整个工程从开挖、施工到正常运行的全过程.
关键词 软土地基 粘弹性 徐变 仿真计算 船闸
中图分类号 :TU470 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2000)04-0023-06

对于船闸、水闸之类的大型工程结构, 在以往的设计工作中, 一般把上部结构、基础和地基分割开来, 通常都是把上部结构作为外荷载加到基础上, 而把基础当做梁或板, 把软基上工程结构简化为弹性地基上基础梁或基础板进行计算. 传统的弹性地基基础梁板计算方法存在着两点明显的不足: 一是没有考虑上部结构与基础之间的整体作用, 仅考虑了它们之间的力系简化传递. 然而, 力系的分布规律是与结构的位移密切相关的. 二是不能考虑时间效应的影响, 未考虑地基的粘性、上部结构和基础混凝土的徐变特性. 事实上, 荷载不变, 地基的沉陷、上部结构和基础的位移也会不断改变. 近年来, 建在软基上的许多船闸采用了“墩底分浇、预留宽缝、后期封合”的施工方案, 就是利用地基的流变固结特性来降低船闸底板中可能出现的最大内力, 防止底板开裂, 传统的计算方法却无法与之适应. 为此, 笔者在文献 [1] 中提出了粘弹性地基模型, 并编制了粘弹性地基上基础梁仿真计算程序, 解决了软基上基础梁随时间变化规律的计算问题. 本文在此基础上进一步利用已有的空间半无限大地基弹性沉陷公式, 根据线粘弹性—弹性相应原理, 推导出相应的地基粘弹性沉陷公式, 并同时采用空间八结点等参单元对上部结构进行离散, 应用半解析方法解决软基上结构仿真计算问题.

1 空间半无限大粘弹性地基的沉陷公式

1.1 粘弹性模型

1.1.1 Kelvin 模型

Kelvin 模型是由一个弹簧和一个阻尼器并联而成, 如图 1 所示. 两个元件的应变都等于模型的总应变, 而模型的总应力为两元件应力之和, 即

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = E\varepsilon + \eta D\varepsilon \tag{1}$$

式中 D 为时间 t 的微分算子. Kelvin 模型能体现蠕变过程, 却不能反映应力松弛现象.

1.1.2 三参量固体模型

三参量固体模型也是一种常用模型, 其结构如图 2 所示, 由一个弹簧和一个阻尼器串联再和一个弹簧并联而成, 很显然模型的应力应变关系可表示为

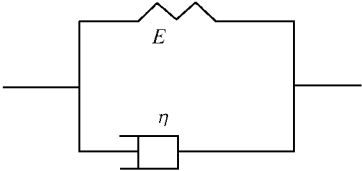


图 1 Kelvin 模型

Fig.1 Kelvin model

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \\ E_2 \varepsilon_2 &= \eta_1 D \varepsilon_1 \\ \sigma &= E_3 \varepsilon + E_2 \varepsilon_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由式(2)得

$$\sigma + \frac{\eta_1}{E_2} D \sigma = E_3 \varepsilon + \left(\frac{E_3}{E_2} + 1 \right) \eta_1 D \varepsilon \quad (3)$$

式(3)便是一维拉压情况下的三参量型粘弹性应力应变关系式,它既能体现松弛现象,又能反映材料的蠕变性能。

1.1.3 Boltzman 叠加原理

在线粘弹性问题中,多个起因的总效应等于各起因的效应之和。

1.1.4 弹性—粘弹性相应原理^[2]

线粘弹性边值问题的方程经过拉氏变换后与相应弹性问题的方程在形式上完全相同。

1.1.5 空间半无限大弹性地基的沉陷公式

由弹性力学可知,空间半无限大地基在边界上受法向集中力的作用时表面上任意一点的沉陷公式为

$$Z = \frac{1 - \mu_0^2}{\pi E_0 r} P \quad (4)$$

式中: E_0, μ_0 ——空间半无限大地基的弹性模量和泊松比; r ——力的作用点到位移点的距离。

由式(4),空间半无限大地基的表面作用有一边长分别为 a 和 b 其分布集度为 $\frac{1}{ab}$ 的矩形分布力引起表面上任意一点的沉陷公式为

$$z = \iint_S \frac{1 - \mu_0^2}{\pi E_0 a b r} d\eta d\xi \quad (5)$$

式中: η, ξ ——沿矩形边长方向的局部坐标; S ——整个作用表面,经积分得

$$z = \frac{1 - \mu_0^2}{E_0} F_{ki} \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} F_{ki} = \frac{1}{\pi a b} & \left[\left(x + \frac{a}{2} \right) \ln \frac{y + \frac{b}{2} + \sqrt{\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{b}{2} \right)^2}}{y - \frac{b}{2} + \sqrt{\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{b}{2} \right)^2}} + \right. \\ & \left(x - \frac{a}{2} \right) \ln \frac{y - \frac{b}{2} + \sqrt{\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{b}{2} \right)^2}}{y + \frac{b}{2} + \sqrt{\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{b}{2} \right)^2}} + \\ & \left(y + \frac{b}{2} \right) \ln \frac{x + \frac{a}{2} + \sqrt{\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{b}{2} \right)^2}}{x - \frac{a}{2} + \sqrt{\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 + \left(y + \frac{b}{2} \right)^2}} + \\ & \left. \left(y - \frac{b}{2} \right) \ln \frac{x - \frac{a}{2} + \sqrt{\left(x - \frac{a}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{b}{2} \right)^2}}{x + \frac{a}{2} + \sqrt{\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 + \left(y - \frac{b}{2} \right)^2}} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

式(6)就是空间半无限大弹性地基在矩形单位分布力作用下的沉陷公式。

1.1.6 空间半无限大粘弹性地基的沉陷公式

式(6)给出了空间半无限大弹性地基在单位均布法向力作用下的沉陷公式,若考虑从 $t = t_1$ 时起持续加载,则式(6)应乘以一个单位阶跃函数 $H(t - t_1)$,由线粘弹性—弹性相应原理可知,经拉氏变换后的粘弹性沉陷与式(6)相同,再经拉氏反变换便可得到地基沉陷的粘弹性解,弹模和泊松比的拉氏变换与所取的粘弹性模型有关。

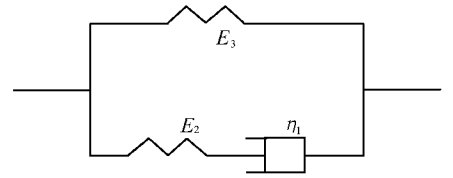


图2 三参量固体模型

Fig.2 3-parameter solid model

对于 Kelvin 模型 空间半无限大粘弹性地基的沉陷公式为

$$z_{ki} = \frac{F_{ki}}{4G} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{G}{\eta}(t - t_1)\right] + \frac{3G}{3K + G} \left\{ 1 - \exp\left[-\frac{3K + G}{\eta}(t - t_1)\right] \right\} \right\} \quad (8)$$

对于三参量固体模型 空间半无限大粘弹性地基的沉陷公式：

$$z_{ki} = \frac{F_{ki}}{4} \left\{ \left(\frac{1}{G_3} + \frac{3}{3K + G_3} \right) + \left(\frac{1}{G_3 + G_2} - \frac{1}{G_3} \right) \exp\left[-\frac{G_2 G_3}{(G_2 + G_3)\eta_1}(t - t_1)\right] + \left(\frac{3}{3K + G_3 + G_2} - \frac{3}{3K + G_3} \right) \exp\left[-\frac{G_3(3K + G_3)}{(3K + G_2 + G_3)\eta_1}(t - t_1)\right] \right\} \quad (9)$$

式中： K ——体积变形模量； G_2, G_3 ——剪切变形模量。

2 混凝土徐变计算

由于混凝土在施工期其弹模随龄期变化，变形也随时间缓慢增长，因此，施工期仿真计算必须考虑混凝土的徐变特性。本文采用徐变力学的初应求解法^[3]，其主要原理是将结构的徐变作为初应变，把徐变力学问题转化为相应的有初应变的弹性力学问题。计算时采用指数型徐变模式，其徐变度和混凝土弹模的表达式为

$$\alpha(t, \tau) = \left(B + \frac{A}{\tau} [1 - e^{-\gamma(t-\tau)}] \right) \quad (10)$$

$$E(\tau) = E_0(1 - \beta e^{-a\tau}) \quad (11)$$

式中： $A, B, \gamma, E_0, \beta, a$ ——材料参数，可由试验获得。

3 仿真计算的半解析方法

仿真计算的半解析方法是应用有限元法求解上部结构的位移，而下部地基采用式(8)或式(9)导出的空间半无限大粘弹性地基的沉陷公式，再根据地基与上部结构在界面上的位移协调条件以及结构的平衡条件求解整个系统。它兼有有限元法适应能力强、应用面广的特点和连杆法概念明确、工作量小的优点。

3.1 典型方程

将时间离散为 n 个时段 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ ，采用空间八结点等参单元对结构进行离散，为了适应仿真分析的需要，允许上部结构包含一个或多个相对独立的子结构，整个上部结构的浇筑可以随时间的变化而变化，在最底层各单元底面的中心点处均取一刚性连杆与地基相连，并且假定各连杆力都是均匀作用于相应单元底面面积之内。计算时基本未知量取结构的刚体竖向位移增量 Δz 及结构的刚体转角增量 $\Delta\varphi_x, \Delta\varphi_y$ 和各连杆处的连杆力 X_i ，利用在任意时刻系统满足界面上的位移协调条件以及结构整体的平衡条件建立典型方程。其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sum (\delta_{ki} + \eta_{ki}) X_i + \Delta z + a_k \Delta\varphi_x + b_k \Delta\varphi_y + \sum \eta_{kj}^l - \sum \delta_{km}^p - \sum \sum \eta_{ki}^l X_i^l &= 0 \\ \sum X_i + \sum p_j &= 0 \\ \sum a_i X_i + \sum M_{xj} &= 0 \\ \sum b_i X_i + \sum M_{yj} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中： δ_{ki}, η_{ki} —— i 处的单位荷载产生的 k 处结构位移和地基沉降； a_k, b_k —— k 点到坐标原点的距离； η_{kj}^l —— j 处边荷载产生的 k 处地基沉降； δ_{km}^p —— m 处结构荷载产生的 k 处结构位移； $\eta_{ki}^l X_i^l$ ——前 $n-1$ 个时段 i 处连杆力产生的 k 点地基沉降； p_j ——结构铅直向荷载； M_x, M_y ——结构分别对 x, y 轴的矩。

3.2 仿真算法的程序实现

对于软基上工程结构的仿真计算，假定在各个时间小段内连杆分布力集度不变，软基上工程结构的仿真计算可分为以下几个步骤进行：

a. 假定在第 l 时段时，利用徐变有限元方法和粘弹性地基沉陷解，分别求出第一时段内在各单位连杆力增量作用下引起的结构底层单元中心点处的挠度增量及地基中对应点的沉陷值增量，并将挠度增量和沉陷增量叠加，以此为基础形成典型方程的未知量系数矩阵。

b. 求出第 l 时段内由于边荷载增量引起的各连杆处的地基沉降增量和在外荷载作用下结构底层单元中心点处的挠度, 以此为基础形成常数项列阵.

c. 求解典型方程, 得到各基本未知量的值, 进而求得结构的位移和应力的增量以及地基沉降的增量.

d. 将 l 时段各未知量的增量值与 $l-1$ 时段各未知量的值进行叠加, 便可得到 l 时段结束时各量的值.

e. 重复以上各步骤, 便可求得各时刻结构的位移与应力的解答及地基的沉降.

4 算 例

为了验证所提仿真算法的合理性, 以某船闸下闸首为例进行分析. 船闸下闸首系建在开挖后的天然粉砂地基上的钢筋混凝土大开挖深埋式坞式结构, 为了减少结构自重和边荷载对闸首底板所产生的负弯矩, 以改善闸首底板的受力条件, 施工中采用了“墩底分浇、预留宽缝、后期封合”的工程措施. 下闸首宽 29.6 m, 总长 39 m, 在施工的前期分别在左、右空箱内侧向外延伸 2 m 处设置施工宽缝各一条, 这样闸首底板就被切割成长分别为 10 m, 15 m, 10 m 的左、中、右三块, 底板于浇筑开始算起第 180 d 合缝. 下闸首的施工及现场试验时间基本上可分为四个阶段: 第一阶段历时 8 个月, 主要进行土方开挖, 设置降水井、打钢板桩和高压定喷构筑防渗墙; 第二阶段历时 7 个月, 主要完成闸首混凝土结构的施工及对墙后部分回填土; 第三阶段历时 8 个月, 主要进行宽缝合缝和回填土; 第四阶段历时 2 个月, 这期间主要是闸室充水, 西侧墙后回填土. 在仿真分析时, 我们对下闸首结构分六个阶段来分别离散, 图 3 是第一和第六阶段的有限元网格剖分图. 结构离散时单元最多为 1397 个, 结点最多为 1848 个, 底板最下层单元为 221 个. 混凝土的徐变力学参数取为 $E_0 = 20000 \text{ MPa}$, $\mu = 0.167$, $\beta = 1$, $\gamma = -0.03 \text{ d}^{-1}$, $B = 0.00005 \text{ MPa}^{-1}$, $A = 0.0001 \text{ d/MPa}$, $\rho = 24 \text{ kN/m}^3$, 粘弹性地基参数取为 $E_1 = 17.546 \text{ MPa}$, $E_2 = 15.552 \text{ MPa}$, $\eta = 813.9 \text{ MPa} \cdot \text{d}$, $\mu_0 = 0.3$.

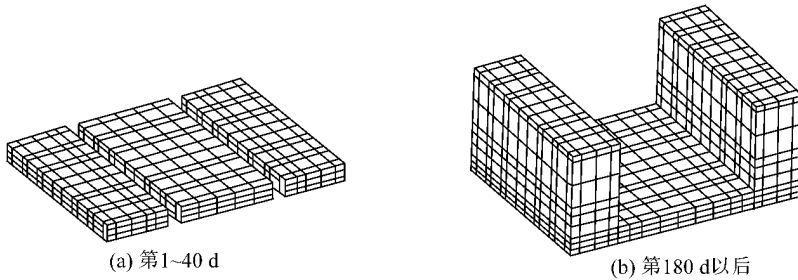


图 3 结构离散情况

Fig.3 Discretization of structure

比较图 4 与图 5, 可以看出底板合缝前后, 地基反力的大小变化不大, 但分布规律有所不同, 合缝前, 结构浇筑及边荷载的施加基本上是对称的, 因此地基反力也呈现了很好的对称性; 在第 210 d 之前就已有不对称边荷作用, 但由于时间效应的缘故, 第 210 d 的地基反力并未呈现出明显的不对称, 随着不对称回填土的增加, 时间的延续, 到第 400 d 时(图 6), 地基反力呈现出明显的不对称性, 底板西侧角点的地基反力达 0.76 MPa, 而东侧角点的地基反力仅有 0.64 MPa, 这主要是由于东侧回填土在第 250 d 时已填至 9.0 高程, 而西侧回填土仅筑至 6.0 高程, 造成了东侧沉降大、反力小, 而西侧沉降小、反力大. 到第 700 d 时(图 7), 地基反力已基本稳定下来, 西侧地基反力达到 0.91 MPa, 东侧只有 0.84 MPa. 图 8 给出了底板中心处绕船闸轴线的弯矩随时间的变化曲线, 可以看出, 在合缝前负弯矩值增大缓慢, 合缝后负弯矩增长相对较快, 到闸室充水前夕达到最大值 $-2143.7 \text{ kN} \cdot \text{m}$. 闸室充水后, 负弯矩值减小, 直至最后基本上稳定在正 $700 \text{ kN} \cdot \text{m}$.

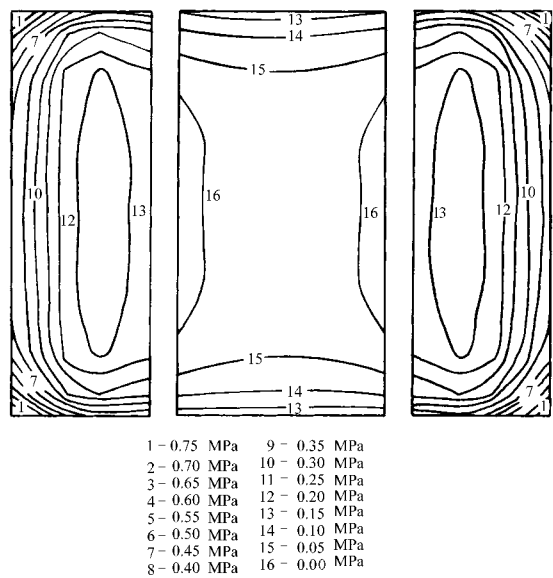


图 4 第 160 d 时的地基反力等值线
(空箱已浇筑完毕)

Fig.4 Isoline map for foundation reactions
on the 160th day(empty trunk moulded)

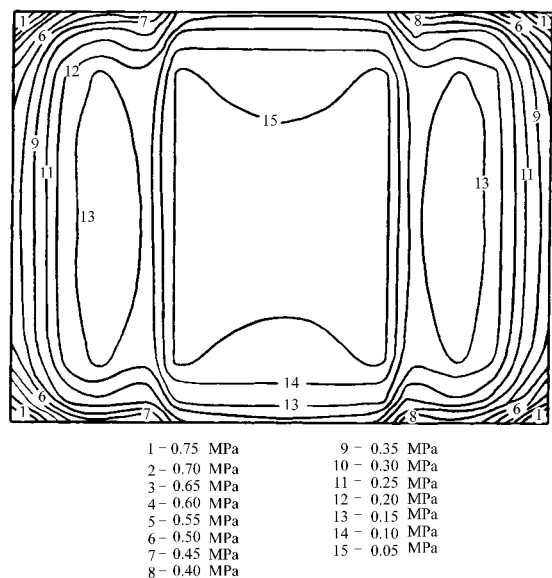


图 5 第 210 d 时的地基反力等值线
(已于第 180 d 时合缝)

Fig.5 Isoline map for foundation reactions on
the 210th day(joints connected on the 180th day)

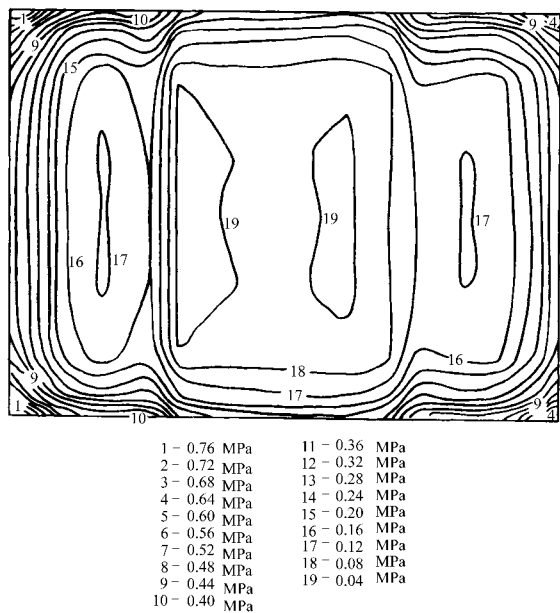


图 6 第 400 d 时的地基反力等值线(闸室充水前夕)
Fig.6 Isoline map for foundation reactions on the
400th day(on the eve of water filling in lock bay)

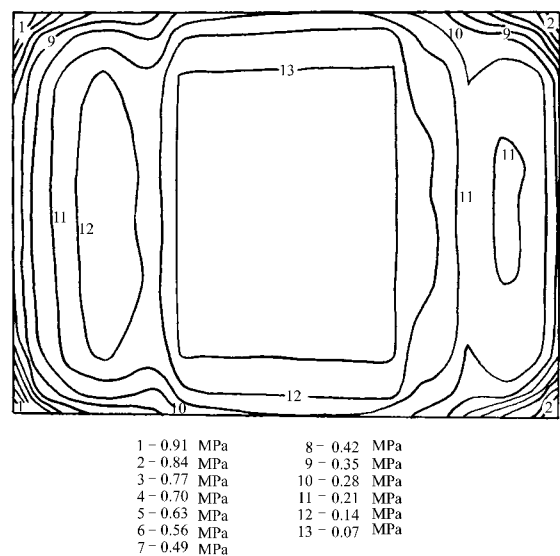


图 7 第 700 d 时的地基反力等值线(闸室充水后)
Fig.7 Isoline map for foundation reactions on
the 700th day(water filled in lock bay)

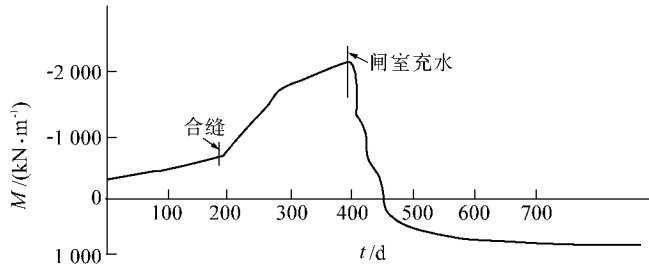


图8 底板中心处绕船闸轴线弯矩随时间变化曲线

Fig.8 Curve of flexure member of lock axle line produced by bottom block center vs time

5 结 论

本文在前人工作的基础上,提出了软基上结构的仿真算法,可以有效地模拟软基上结构混凝土浇筑过程及封缝前后地基与结构的工作状态,从理论上讲仿真算法比以前应用较多的弹性算法更科学、更合理。算例表明结构内力最不利情况不一定发生在完建期,很可能发生在工程施工过程中的某一时刻,如闸室充水前夕。作为计算工具,本文方法可以为合理地确定分缝时间和回填次序及船闸充水过程提供定量的分析数据。若将该方法应用于工程设计还有许多工作要做,针对不同类型地基如何选择不同的粘弹性地基模型,粘弹性地基模型参数的选择,设计准则的确定等都需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] 姜弘道,苏超,谭恩会.粘弹性地基上船闸底板的计算方法及程序设计[A].见:赵光恒,姜弘道主编.江苏力学论文集[C].南京:河海大学出版社,1994.85~91.
- [2] 杨廷青.粘弹性力学[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.73~77.
- [3] 傅作新.工程徐变力学[M].北京:水利电力出版社,1985.120~124.

Simulating Computation Method and Its Application to Structures on Soft Foundations

SU Chao¹, JIANG Hong-dao², TAN En-hui³

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
2. College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
3. Nanjing Municipal Design Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: In the paper, according to the elastic subsidence formula for the semi-infinite foundation, viscoelastic foundation subsidence formulas of Kelvin type and three parameters are derived with the linear viscoelastic-elastic principle and Laplace transform. The upper structure is discretized with 3-D 8-node creep iso-parameter elements, the subsidence value of the foundation is computed with the viscoelastic theory solution, a semi-theory method of simulating computation for the structure on a soft foundation is presented, and a computation program is compiled. An example shows that the whole process of excavation, construction and operation in a project can be better simulated with the simulating algorithm.

Key words: soft-soil foundation; viscoelasticity; creep; simulating computation; lock