

基于强夯大变形的地基流固动力耦合分析

王启平¹⁾ 谢能刚¹⁾ 史小路²⁾

1) 安徽工业大学机械工程学院, 马鞍山 243002 2) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

摘要 根据流固动力耦合方法分析强夯加固地基机理, 在土体的应变位移关系上采用大变形假设, 建立土体非线性动力平衡方程和整体流固动力耦合方程. 在算例数值分析中给出了地基位移、孔隙压力在强夯作用时间内和空间中的变化分布规律, 得到了夯锤的最大夯沉量, 计算了夯击后地基孔隙压力的消散行为, 计算结果与济南绕城高速公路强夯法施工现场的测试结果较符合.

关键词 强夯; 大变形; 流固动力耦合

分类号 TU472.3

由于天然地基是流气固三相介质, 因此强夯法加固地基的机理非常复杂, 现有计算理论基本都采取一级合理近似, 即将其处理为流固动力耦合问题. 在众多研究强夯动力固结问题的文献和成果中对土体的应变一位移关系, 基本还都采用“小变形”假定^[1-3]. 在本文的分析中, 土体应力一位移关系采用钱家欢提出的加卸载双线性强夯本构模型^[4], 考虑几何非线性, 根据大变形假设, 建立基于有限单元法的土体非线性动力平衡方程和整体流固动力耦合方程, 给出计算流程, 对强夯法加固地基的机理进行数值模拟分析.

1 基于强夯大变形的地基基本控制方程

土骨架动力平衡方程:

$$[(\delta_{ik}+u_{i,k})\sigma_{ij}]_j+q_i-\rho\ddot{u}_i=0 \quad (1)$$

土体应变位移关系:

$$\varepsilon_{ij}=\frac{1}{2}(u_{i,j}+u_{j,i}+u_{k,i}u_{k,j}) \quad (2)$$

本构关系:

$$\sigma_{ij}=\lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij}+2G\varepsilon_{ij}-\zeta p\delta_{ij} \quad (3)$$

$$\zeta=\zeta\varepsilon_{ii}+cp \quad (4)$$

连续性方程:

$$\dot{\zeta}+\bar{v}_{i,i}=0 \quad (5)$$

达西定律:

$$\bar{v}_i=-s_{ij}(p_j+f_j) \quad (6)$$

式中, u_i 为位移分量; σ_{ij} 为应力张量分量; ε_{ij} 为应变张量分量; q_i 为土体积力分量; f_i 为水的体积力分量; ρ 为土体密度; p 为孔隙水压力; ζ 为 Biot 有效应力系数; ς 为单位体积中水体体积的改变量; c 为储存系数; \bar{v}_i 为渗流速度分量; s_{ij} 为渗透系数张量分量; $\lambda=\frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)}$, $G=\frac{E}{2(1+\mu)}$ 称为拉梅常数, E, μ 为弹性模量和泊松比; δ_{ij} 为克罗内克符号; Biot 有效应力系数 ζ 和储存系数 c 可以表示为:

$$\zeta=\frac{3(\mu_w-\mu)}{A(1-2\mu)(1+\mu_w)}, c=\frac{9(1-2\mu_w)(\mu_w-\mu)}{2GA^2(1-2\mu)(1+\mu_w)^2} \quad (7)$$

式中, A 为 Skempton 孔隙压力系数; μ, μ_w 分别为排水和不排水情况下的泊松比. 因此 E, μ, μ_w, A, s 这五个材料参数构成模型中的材料定解条件.

2 基于有限单元法的整体流固动力耦合方程

将夯击作用区域进行有限元离散, 考虑土体阻尼力, 上述基本控制方程可转化为流固动力耦合方程^[5]:

$$[M]\{\ddot{\delta}(t)\}+[C]\{\dot{\delta}(t)\}+[K^*]\{\delta(t)\}+[K]\Delta\{\delta(t)\}+[L]\{p(t)\}=\{Q(t)\} \quad (8)$$

$$[L]^T\{\dot{\delta}(t)\}+[D]\{\dot{p}(t)\}+[H]\{p(t)\}=\{F(t)\} \quad (9)$$

式(8)为土体非线性动力平衡方程, 式(9)为水体流量方程, 其具体的推导过程见文献[6]. 其中,

收稿日期 2003-09-15 王启平 男, 55 岁, 副教授
* 安徽省教育厅自然科学研究重点项目(2003KJ010ZD), 安徽省教育厅自然科学研究项目(2004kj057)

$[M]$ 为质量矩阵, $\{\delta(t)\}$ 为结点位移列阵, $[L]$ 为耦合矩阵, $\{p(t)\}$ 为结点孔隙水压力列阵, $[D]$ 为水体压缩矩阵, $[H]$ 为渗透矩阵, $\{Q(t)\}$ 为结点荷载列阵, $\{F(t)\}$ 为结点流量列阵, $[K']$ 和 $[K]$ 为非线性刚度矩阵.

$$[K'] = \sum_e \{[k_0]_e + [k_L]_e\}, [K] = \sum_e \{[k_0]_e + [k_L]_e + [k_\sigma]_e\} \quad (10)$$

其中,

$$[k_0]_e = \iiint_v [B_0]_e^T [D] [B_0]_e dv_e \quad (11)$$

$$[k_L]_e = \iiint_v \{ [B_0]_e^T [D] [B_L]_e + [B_L]_e^T [D] [B_L]_e + [B_L]_e^T [D] [B_0]_e \} dv_e \quad (12)$$

$$\iiint_v d[B_L]_e^T \{\sigma\} dv_e = [k_\sigma]_e d\{\delta\}_e \quad (13)$$

式中, $[B_0]_e$ 为线性应变矩阵, $[B_L]_e$ 为非线性应变矩阵, $[k_\sigma]_e$ 称为几何刚度矩阵.

$[C]$ 为结构阻尼矩阵, 可以采用 Rayleigh 形式, 即:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K'] \quad (14)$$

式中, $\alpha = \chi\omega$, $\beta = \frac{\chi}{\omega}$, χ 为结构阻尼比, ω 为结构基频.

3 数值计算

3.1 计算框图

计算流程见框图 1 所示.

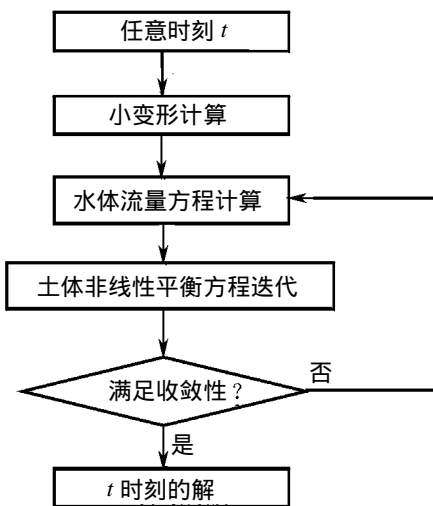


图 1 计算框图

Fig.1 Calculation flowchart

3.2 土体非线性动力平衡方程的迭代计算格式

对于第 n 次迭代步, 式(8)可表示为:

$$\Delta\{\delta(t)\}_n = -[K]_n^{-1} \{ [M] \{\ddot{\delta}(t)\}_n + [C]_n \{\dot{\delta}(t)\}_n + [K']_n \{\delta(t)\}_n + [L] \{p(t)\} - \{Q(t)\} \} \quad (15)$$

采用线性加速度法, 得到 t 时刻的下次迭

代值:

$$\{\delta(t)\}_{n+1} = \{\delta(t)\}_n + \Delta\{\delta(t)\}_n \quad (16)$$

$$\{\dot{\delta}(t)\}_{n+1} = \{\delta(t)\}_{n+1} \frac{3}{\Delta t} - \{\delta(t-\Delta t)\} \frac{3}{\Delta t} - 2\{\dot{\delta}(t-\Delta t)\} - \{\ddot{\delta}(t-\Delta t)\} \frac{\Delta t}{2} \quad (17)$$

$$\{\ddot{\delta}(t)\}_{n+1} = \{\delta(t)\}_{n+1} \frac{6}{\Delta t^2} - \{\delta(t-\Delta t)\} \frac{6}{\Delta t^2} - \{\dot{\delta}(t-\Delta t)\} \frac{6}{\Delta t} - 2\{\ddot{\delta}(t-\Delta t)\} \quad (18)$$

其中, $\{\delta(t-\Delta t)\}$, $\{\dot{\delta}(t-\Delta t)\}$ 和 $\{\ddot{\delta}(t-\Delta t)\}$ 为该问题在 $t-\Delta t$ 时刻的土体位移、速度和加速度.

3.3 水体流量方程的计算格式

对式(9)采用两点递进格式, 得控制方程

$$\{\theta[H] + \frac{1}{\Delta t}[D]\} \{p(\Delta t)\} + \frac{1}{\Delta t}[L]^T \{\delta(\Delta t)\} = \{F(t-\Delta t)\} - [H] \{p(t-\Delta t)\} \quad (19)$$

式中, 向前差分 $\theta=0$, 中点差分 $\theta=0.5$, 向后差分 $\theta=1$.

同时, 有迭代格式

$$\{p(t)\} = \{p(\Delta t)\} + \{p(t-\Delta t)\} \quad (20)$$

$$\{\delta(t)\} = \{\delta(\Delta t)\} + \{\delta(t-\Delta t)\} \quad (21)$$

3.4 定解条件

边界条件如图 2 所示. (1) 在土体底部 $z=H_0$ 处, $u=v=w=0, \bar{v}_z=0$. (2) 在侧面 $x=\pm\frac{B}{2}$ 或 $y=\pm\frac{B}{2}$ 处, $w=0, \bar{v}_x=0$ 或 $\bar{v}_y=0$. (3) 在表面 $z=0$ 处的非夯击区, $p=0$. (4) 在表面 $z=0$ 处的夯击区 (图 2 中的阴影区域), $\bar{v}_z=0$. 其中, H_0 为加固影响深度, B 为加固横向有效影响宽度; u, v, w 分别为三个方向的位移; $\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z$ 分别为三个方向渗流速度; p 为孔隙水压力.

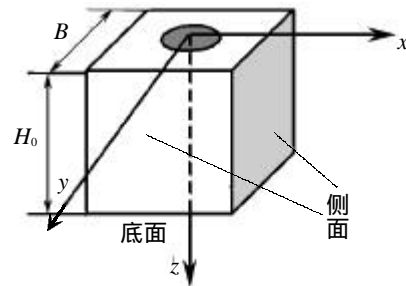


图 2 强夯作用区域

Fig.2 Dynamic effective area

初始条件: 系统中的任一点 (包括边界), 在 $t=0$ 时刻都满足 $u=v=w=0, \dot{u}=\dot{v}=\dot{w}=0, \ddot{u}=\ddot{v}=\ddot{w}=0, p(x,y,z)=0$.

4 算例分析

4.1 计算说明

济南绕城高速公路工程, 现场为非自重性湿

陷性黄土地基,场地试夯的三个试验区实测数据见表1,地基土重度为 19.0 kN/m^3 , $\mu=0.40, \mu_u=0.45$, Skempton 孔压系数 $A=0.73$, 渗透系数 $K_h=5.64 \times 10^{-12} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1})$, 渗透系数 $K_v=5.13 \times 10^{-12} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1})$. 对强夯的第一击进行计算,最大接触

应力为 940 kPa ,接触时间为 120 ms ,时程曲线简化为等腰三角形,加荷弹性模量取 6000 kPa ,卸荷弹性模量取 24000 kPa ,阻尼比 χ 取 0.15 .时间步长 $\Delta t=1 \text{ ms}$.有限元离散区域取垂直深度 $H_0=20.0 \text{ m}$, $B=10.0 \text{ m}$.

表1 三试验区单点夯实测数据

Table 1 Measured data in three experimental areas

位置区	锤重/kN	锤底面积/ m^2	落距/m	基区范围/ m^2	基区深度/m	第一击最大夯沉量/cm
K7+174.3(A)	98	3.9	10.0	27.2×26.2	6.25	19.57
K6+473.65(B)	60	4.0	5.0	51.1×38.5	4.00	18.35
K13+814(C)	170	4.4	13.2	28.1×25.5	8.75	37.33

4.2 计算结果及分析

图3为计算所得的三实验区夯坑形状,与现场实测情况较为符合,实测的单击最大夯沉量见表1,计算所得的单击夯沉量分别为 19.84 cm ,

18.57 cm 和 38.76 cm ,误差均 $<4\%$.

图4为夯锤下部不同深度土体的竖向位移时程曲线,由图4可见,随着深度的增加,位移峰值出现的时间依次滞后、大小依次递减,这反映了

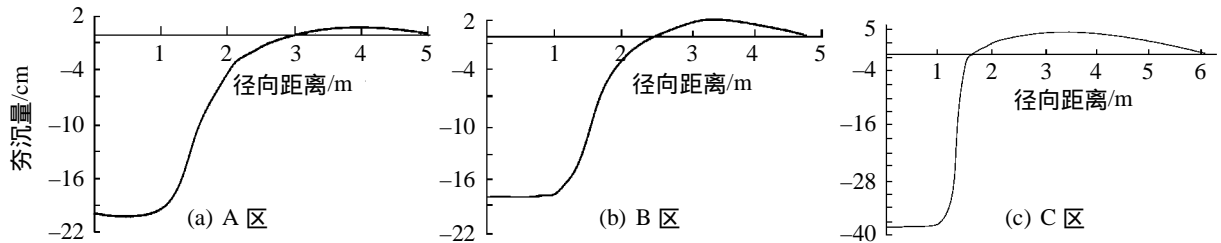


图3 计算所得夯坑形状

Fig.3 Calculated shapes of compaction craters

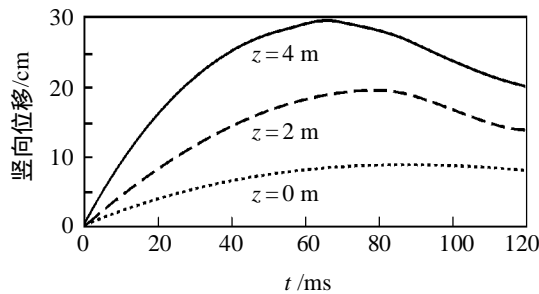


图4 夯锤下部不同深度土体的竖向位移时程曲线

Fig.4 Time curves of displacement in different depths of soil

应力波在土体中的传播特性.

图5(a),(b)分别绘出了土体在24,72 h的等压线图.由图可见,高压孔区随时间逐渐减少,说明孔隙压力随时间逐渐消散.

图6为第一次夯击后,孔隙压力随时间的消散曲线.A,B,C点的位置见图7所示.其中A点位于高压孔区,B点在72 h左右达到稳定,C点有先升高再稳定的现象.A,B,C点变化趋势在120 h以后基本上变化不大,这个结果与济南绕城高速公

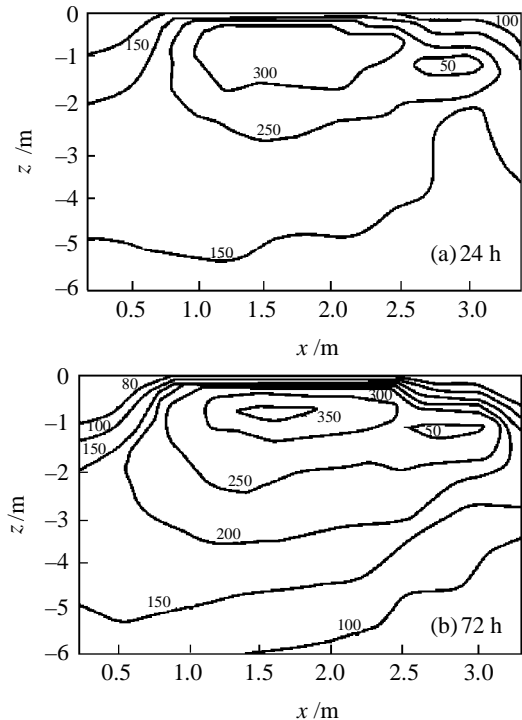


图5 局部区域的孔隙水压力等值线(单位:kPa)

Fig.5 Pore pressure in local area

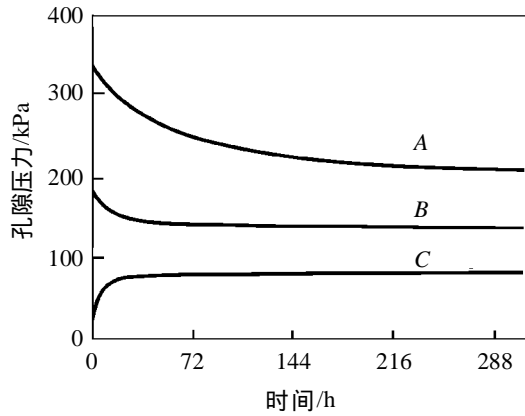


图6 孔隙压力消散曲线状

Fig.6 Pore pressure dissipating curves

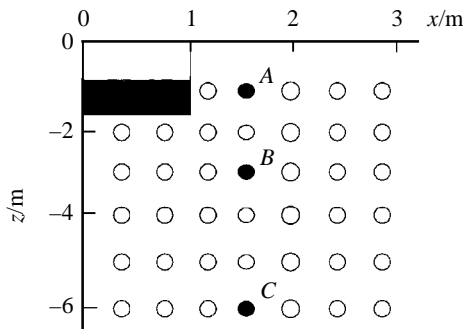


图7 A,B,C点在土层中的位置

Fig.7 Positions of point A,B,C in soil

路现场实测相符.

5 结论

通过算例的数值分析表明,本文给出的强夯大变形流固动力耦合的整体控制方程和迭代计算方法,可以初步得到地基位移、孔隙压力在强夯作用时间内和空间中的变化及分布规律,为进一步模拟分析强夯加固机理提供了较为有效的途径.

参 考 文 献

- 1 杨峻,吴世明. 非均质流固耦合介质轴对称动力问题时域解[J]. 力学学报,1996,28(3): 308
- 2 孔令伟. 流固耦合介质轴对称动力问题解法的改进[J]. 力学学报,1998,30(2): 229
- 3 李尧臣,周顺华. 动力固结流——固耦合模型的求解方法[J]. 岩土力学,2001,22(1): 6
- 4 钱家欢,帅方生. 边界元法在地基强夯加固中的应用[J]. 中国科学(A辑),1987(3): 329
- 5 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社,1998
- 6 谢能刚,宋修广. 基于几何非线性的强夯加固机理分析[J]. 岩土工程学报,2003,25(4): 472

Fluid-Solid Dynamic Coupling Analysis of Foundation Soil during Large Deformation by Dynamic Consolidation

WANG Qiping¹⁾, XIE Nenggang¹⁾, SHI Xiaolu²⁾

1) Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China

2) Mechanical Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

ABSTRACT For the fluid-solid dynamic coupling question of foundation soil by dynamic consolidation, large deformation hypothesis on the relationship of strain and displacement was adopted to make a non-linear dynamic equilibrium equation and a fluid-solid dynamic coupling equation. In the analysis of a computed example, the distribution regularities of displacement and pore pressure of the foundation in the effective time and space were given. The maximum contact displacement was obtained. The dissipation of pore pressure was worked out. The results coincide the measured data of the highway around Jinan City of China perfectly.

KEY WORDS dynamic consolidation; large deformation; fluid-solid dynamic coupling