

含软夹层的层状沉积河谷场地的地震动力响应分析

李伟华, 赵成刚

(北京交通大学 土建学院, 北京 100044)

摘 要: 把层状沉积河谷场地中的软夹层模拟为流体饱和多孔介质, 结合已有的对单相弹性固体介质、流体饱和多孔介质进行动力反应分析的显式有限元方法, 建立了既能描述沉积河谷底部的软土地场 (用流体饱和多孔介质描述), 又能描述河谷周边山体 (用单相弹性介质描述) 的计算模型, 并利用该方法分析了研究在 P 波入射下软夹层厚度以及软夹层的刚度等因素对层状沉积河谷场地地震动力响应的影响。

关 键 词: 层状沉积河谷场地; 软夹层; 动力响应分析; 显式有限元法

中图分类号: TU 312

文献标识码: A

Analysis of seismic dynamic response of layered alluvial valleys with soft interlayer

LI Wei-hua, ZHAO Cheng-gang

(School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: An explicit finite element method to analyze the surface motion of layered alluvial valleys with soft interlayer is developed based on the numerical simulation of the continuous conditions on the boundaries between fluid saturated porous medium and elastic single-phase medium. The soft interlayer of layered alluvial valleys is modeled as saturated porous medium. Numerical results are provided to illustrate the effect of the thickness and stiffness of the soft interlayer on seismic dynamic response of layered alluvial valleys with soft interlayer.

Key words: layered alluvial valleys; soft interlayer; dynamic response analysis; explicit finite element method

1 引 言

局部不均匀场地条件对地震动力响应的影响是近期颇受瞩目的研究课题之一。国内外许多学者以沉积谷作为局部不均匀场地的典型代表, 利用各种解析方法、数值方法进行了大量地研究。但是, 由于波动问题的复杂性, 解析解大多局限于沉积谷中的沉积层为单一介质, 部分文献虽采用不同的数值方法, 如线源法和离散波数法相结合^[1]、Aki-Lamar 扩展法^[2]、间接边界积分法^[3]、边界离散与波函数展开法相结合^[4]等对层状沉积谷场地进行了研究, 但均未涉及到谷中存在软夹层对场地动力响应的影响。

实际上, 由于河流的淤积和冲刷及河道的迁移, 河床沉积常常会出现非正常顺序的沉积, 导致工程中常见的软夹层现象, 大量震害调查结果表明

存在软夹层的沉积层上的震害更严重^[5]。一些有关场地地震响应的论著^[6]中也指出, 软弱夹层对谱形状和最大加速度的影响都较大, 有时能起到隔震作用。

周根寿等^[7]对场地土中软弱夹层对地面地震反应的影响进行了较全面地研究, 得出了一些有用的结果。陈镭等^[8]也研究了夹有软弱土层的横观各向同性层状场地的动力响应, 但深入分析这一问题的论述并不多。另外, 进行场地分析时绝大多数均将场地假设成水平层状单相固体介质。梁建文等^[9-10]利用 Fourier-Bessel 级数展开法分别给出了圆弧形层状沉积谷地对平面 SH 波和 P 波散射的解析解, 首次分析了软夹层存在及其相对刚度对入射波散射的影响, 但在分析过程中仍采用单相弹性固体介质模型, 而这些软夹层多为饱和软土沉积层, 在场地的地震动力响应分析中, 将其假定为流体饱和多孔

介质更为合理。

本文结合已有的对单相弹性固体介质、流体饱和多孔介质进行动力反应分析的显式有限元方法,利用人工边界,把峡谷场地从半无限空间中划分出来,根据场地实际情况把峡谷场地用两种介质来描述(对软土用流体饱和多孔介质描述,而其他岩土层可用单相弹性介质近似处理),建立既能描述沉积河谷底部的软土场地(用流体饱和多孔介质描述),又能描述河谷周边山体(用单相弹性介质描述)的计算模型。初步研究在 P 波入射下软夹层厚度以及软夹层的刚度等因素对层状沉积谷场地地震动力响应的影响。

2 含软夹层的层状沉积谷模型

2.1 计算模型

计算模型如图 1 所示,为一个嵌入无限半空间中的 V 形层状沉积河谷场地,谷中沉积层分上下 2 层,分别为上覆土层和软土夹层。由于采用有限元方法时必须把无限半空间进行有限化处理,所以设置如图虚线所示的人工边界,计算区宽度为 C ,高度为 D 。上覆土层和软土夹层的总深度 $H = 100 \text{ m}$,软土层厚度为 h ,沉积谷宽度 A ,视具体情况取 $300 \sim 500 \text{ m}$,谷底宽度为 B ,由 A 、 H 和河谷的坡角确定,取河谷的坡角为 45° 。

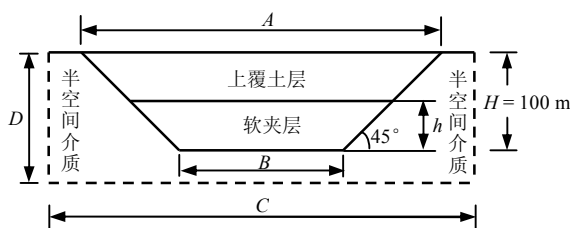


图 1 计算模型示意图

Fig.1 The model for calculation

2.2 边界条件

2.2.1 软夹层与上覆土层或半空间介质交界面的边界条件

软夹层与上覆土层或半空间的边界条件:(1)饱和多孔介质的固体骨架部分的法向位移与单相弹性介质的法向位移连续;(2)饱和多孔介质的固体骨架部分的切向位移与单相弹性介质的切向位移连续;(3)法向总应力连续;(4)饱和多孔介质的固体骨架部分的切向应力与单相弹性介质的切向应力连续。

另外还需要补充一个界面透水条件:界面不透

水时饱和多孔介质中流体的法向相对位移为 0;界面透水时饱和多孔介质中流体部分的应力为 0。

2.2.2 上覆土层与半空间介质交界面的边界条件

上覆土层与半空间交界面边界条件:(1)界面两侧的切向和法向运动连续;(2)界面两侧的切向和法向应力连续。

2.3 显式有限元计算格式

利用有限元将图 1 所示的模型中人工边界以内的计算区进行单元离散化处理(划分网格),用有限元节点系代替连续介质区,形成有限元离散模型。计算区内的有限元节点有 5 种类型,上覆土层或半空间介质(单相弹性介质)内部节点、软夹层(饱和多孔介质)内部节点、软夹层和上覆土层或半空间介质交界面上的节点、上覆土层和半空间介质交界面上的节点和人工边界上的节点。下面分别给出不同类型节点的动力反应分析的显式有限元表达式。

2.3.1 半空间介质和上覆土层介质内部节点的动力反应分析的显式有限元表达式

廖振鹏^[11]建立了单相弹性固体介质动力反应分析的显式有限元法,并得出了弹性固体介质中内部节点动力反应的显式表达式(对重复下标采用求和法则):

$$\{u_{sl}^{p+1}\} = \{u_{sl}^p\} + \Delta t \{\dot{u}_{sl}^p\} - \frac{\Delta t^2}{2} M_{sl}^{-1} \{k_{1il} \{u_i^p\} - F_{sl}^p\} \quad (1)$$

$$\{\dot{u}_{sl}^{p+1}\} = \{\dot{u}_{sl}^p\} - \frac{\Delta t}{2} M_{sl}^{-1} \{k_{1il} \{\{u_i^p\} + \{u_i^{p+1}\}\} - \{F_{sl}^p + F_{sl}^{p+1}\}\} \quad (2)$$

2.3.2 软夹层介质内部节点的动力反应分析的显式有限元表达式

赵成刚^[12]建立了饱和多孔介质动力反应分析的显式有限元法,给出饱和多孔介质内部节点的显式有限元表达式:

$$\{u_i^{p+1}\} = \{u_i^p\} + \Delta t \{\dot{u}_i^p\} - \frac{\Delta t^2}{2} M_{ul}^{-1} \{C_{il} (\{u_i^p\} - \{U_i^p\}) + k_{11il} \{u_i^p\} + k_{12il} \{U_i^p\} - F_{ul}^p\} \quad (3)$$

$$\{U_i^{p+1}\} = \{U_i^p\} + \Delta t \{\dot{U}_i^p\} - \frac{\Delta t^2}{2} M_{ul}^{-1} \{C_{il} (\{U_i^p\} - \{u_i^p\}) + k_{12il} \{u_i^p\} + k_{13il} \{U_i^p\} - F_{ul}^p\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \{\dot{u}_i^{p+1}\} &= \{\dot{u}_i^p\} - M_{u1}^{-1} \cdot \\ &\left\{ C_{i1} \left[(\{u_i^{p+1}\} - \{u_i^p\}) - (\{U_i^{p+1}\} - \{U_i^p\}) \right] + \right. \\ &\left. \frac{\Delta t}{2} \left[k_{11i1} (\{u_i^{p+1}\} + \{u_i^p\}) + k_{12i1} (\{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\}) - \right. \right. \\ &\left. \left. (F_{u1}^{p+1} + F_{u1}^p) \right] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \{\dot{U}_1^{p+1}\} &= \{\dot{U}_1^p\} - M_{U1}^{-1} \cdot \\ &\left\{ C_{i1} \left[(\{U_i^{p+1}\} - \{U_i^p\}) - (\{u_i^{p+1}\} - \{u_i^p\}) \right] + \right. \\ &\left. \frac{\Delta t}{2} \left[k_{12i1} (\{u_i^{p+1}\} + \{u_i^p\}) + k_{13i1} (\{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\}) - \right. \right. \\ &\left. \left. (F_{U1}^{p+1} + F_{U1}^p) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

式 (1) ~ (6) 中: $\{u_{s1}\}$ 、 $\{\dot{u}_{s1}\}$ 、 $\{u_1\}$ 、 $\{\dot{u}_1\}$ 、 $\{U_1\}$ 、 $\{\dot{U}_1\}$ 分别为单相弹性固体介质、饱和多孔介质中的固相、液相的内部某节点 1 的位移、速度; M_{s1} 、 M_{u1} 、 M_{U1} 、分别为单相弹性固体介质, 饱和多孔介质中的固相、液相的内部某节点 1 的局部组合质量矩阵; k_{1i1} 、 k_{11i1} 、 k_{12i1} 、 k_{13i1} 分别为单相弹性固体介质, 饱和和多孔介质中的固相、液相的内部某节点 1 的刚度矩阵; F_{s1} 、 F_{u1} 、 F_{U1} 分别为单相弹性固体介质, 饱和和多孔介质中的固相、液相的内部某节点 1 的节点外力。 C_{i1} 为饱和和多孔介质中内部某节点 1 的阻尼矩阵; 下标 i 为与节点 1 相关的各节点; 上标 p , $p+1$ 表示 p 、 $p+1$ 时刻; Δt 为时间离散步距。

2.3.3 上覆土层或半空间介质和软夹层介质交界面上的节点的动力反应分析的显式有限元表达式

根据上面给出的单相弹性固体介质内部节点和饱和多孔介质内部节点的显式有限元表达式, 以及前面列出的交界面边界条件, 可以推导出上覆土层或半空间介质和软夹层介质交界面上的节点以及上覆土层和半空间介质这两种不同弹性固体介质交界面上的节点的动力反应分析的显式有限元表达式。

饱和和多孔介质和单相弹性固体介质交界面示意图如图 2 所示, 图中法向为 x 方向, 切向为 y 方向。把饱和和多孔介质和弹性固体介质的交界面看作饱和和多孔介质在未知外力作用下的自由界面和弹性固体介质在未知外力作用下的自由界面, 然后通过交界面的连续条件, 建立在两侧自由面上作用的未知力的相互关系, 进一步推导出用节点位移表示的节点外力的连续条件, 结合原来在交界面上的位移连续条件, 便可以建立饱和和多孔介质和弹性固体介质的交界面节点动力反应的显式表达式。

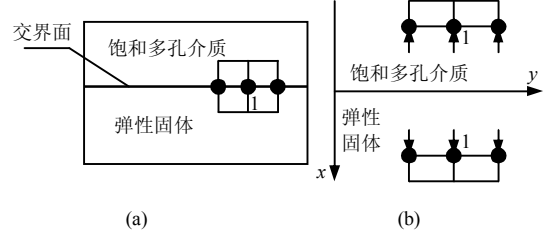


图 2 流体饱和多孔介质和弹性固体介质交界面上节点 1 示意图

Fig.2 The node 1 on the interface between fluid saturated porous medium and elastic single-phase medium

以不透水边界条件为例, 具体如下 (透水边界条件时的表达式同理可得, 此处从略):

(1) 位移反应

式 (3)、(4) 和式 (1) 可以改写为

$$\left. \begin{aligned} F_{s1}^p &= \frac{2}{\Delta t^2} M_{s1} (\{u_{s1}^{p+1}\} - \{u_{s1}^p\} - \Delta t \{\dot{u}_{s1}^p\}) + k_{s1} \{u_{s1}^p\}; \\ F_{u1}^p &= \frac{2}{\Delta t^2} M_{u1} (\{u_1^{p+1}\} - \{u_1^p\} - \Delta t \{\dot{u}_1^p\}) + \\ &\quad \{C_{i1} (\{\dot{u}_i^p\} - \{\dot{U}_i^p\}) + k_{11i1} \{u_i^p\} + k_{12i1} \{U_i^p\}\}; \\ F_{U1}^p &= \frac{2}{\Delta t^2} M_{U1} (\{U_1^{p+1}\} - \{U_1^p\} - \Delta t \{\dot{U}_1^p\}) - \\ &\quad \{C_{i1} (\{\dot{u}_i^p\} - \{\dot{U}_i^p\}) + k_{12i1} \{u_i^p\} + k_{13i1} \{U_i^p\}\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据交界面边界条件可知在交界面处有

$$F_{u1x}^p + F_{U1x}^p = -F_{s1x}^p \quad (8)$$

将式 (7) 代入 (8) 中可得

$$\begin{aligned} &\frac{2}{\Delta t^2} M_{u1} (\{u_{1x}^{p+1}\} - \{u_{1x}^p\} - \Delta t \{\dot{u}_{1x}^p\}) + \\ &m_x \{C_{i1} (\{\dot{u}_i^p\} - \{\dot{U}_i^p\}) + k_{11i1} \{u_i^p\} + k_{12i1} \{U_i^p\}\} + \\ &\frac{2}{\Delta t^2} M_{U1} (\{U_{1x}^{p+1}\} - \{U_{1x}^p\} - \Delta t \{\dot{U}_{1x}^p\}) - \\ &m_x \{C_{i1} (\{\dot{u}_i^p\} - \{\dot{U}_i^p\}) + k_{12i1} \{u_i^p\} + k_{13i1} \{U_i^p\}\} = \\ &-\left\{ \frac{2}{\Delta t^2} M_{s1} (\{u_{s1x}^{p+1}\} - \{u_{s1x}^p\} - \Delta t \{\dot{u}_{s1x}^p\}) - m_x k_{s1} \{u_{s1}^p\} \right\}_x \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $m_x = [1 \ 0]$ 。

由交界面边界条件可得

$$u_{s1x}^p = u_{1x}^p = U_x^p, \quad u_{s1x}^{p+1} = u_{1x}^{p+1} = U_x^{p+1}, \quad \dot{u}_{s1x}^p = \dot{u}_{1x}^p = \dot{U}_x^p \quad (10)$$

把式(10)代入式(9),整理得到上覆土层或半空间介质和软夹层介质交界面上的节点法向位移反应的显式表达式:

$$\{u_{lx}^{p+1}\} = \{u_{lx}^p\} + \Delta t \{\dot{u}_{lx}^p\} - \frac{\Delta t^2}{2} m_x \frac{1}{M_{s1} + M_{u1} + M_{U1}} \cdot \left(k_{s1l} \{u_{sl}^p\} + k_{11l} \{u_l^p\} + k_{12l} \{U_l^p\} + k_{12il} \{u_i^p\} + k_{13il} \{U_i^p\} \right) \quad (11)$$

$$u_{s1x}^{p+1} = u_{1x}^{p+1} = U_{1x}^{p+1} \quad (12)$$

用同样方法可得到上覆土层或半空间介质和软夹层介质交界面上的节点切向位移反应的显式表达式:

$$\{u_{ly}^{p+1}\} = \{u_{ly}^p\} + \Delta t \{\dot{u}_{ly}^p\} - \frac{\Delta t^2}{2} m_y \frac{1}{M_{s1} + M_{u1}} \cdot \left[C_{il} (\{u_i^p\} - \{U_i^p\}) + k_{11il} \{u_i^p\} + k_{12il} \{U_i^p\} + k_{1il} \{u_{sl}^p\} \right] \quad (13)$$

$$\{U_{ly}^{p+1}\} = \{U_{ly}^p\} + \Delta t \{\dot{U}_{ly}^p\} - \frac{\Delta t^2}{2} m_y \frac{1}{M_{U1}} \cdot \left[C_{il} (\{U_i^p\} - \{u_i^p\}) + k_{12il} \{u_i^p\} + k_{13il} \{U_i^p\} \right] \quad (14)$$

$$u_{ly}^{p+1} = u_{sly}^{p+1} \quad (15)$$

(2) 速度反应

式(3)、(4)和式(1)可以改写为

$$F_{u1l}^p + F_{u1l}^{p+1} = \frac{2}{\Delta t} M_{u1} \left\{ \{\dot{u}_1^{p+1}\} - \{\dot{u}_1^p\} + C_{il} (\{u_i^{p+1}\} - \{u_i^p\} - \{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\}) \right\} + k_{11il} (\{u_i^{p+1}\} + \{u_i^p\}) + k_{12il} (\{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\});$$

$$F_{U1l}^p + F_{U1l}^{p+1} = \frac{2}{\Delta t} M_{U1} \left\{ \{\dot{U}_1^{p+1}\} - \{\dot{U}_1^p\} - C_{il} (\{u_i^{p+1}\} - \{u_i^p\} - \{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\}) \right\} + k_{12il} (\{u_i^{p+1}\} + \{u_i^p\}) + k_{13il} (\{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\});$$

$$F_{s1l}^p + F_{s1l}^{p+1} = \frac{2}{\Delta t} M_{s1} \left\{ \{\dot{u}_{s1}^{p+1}\} - \{\dot{u}_{s1}^p\} \right\} + k_{s1l} \left(\{u_{sl}^{p+1}\} + \{u_{sl}^p\} \right) \quad (16)$$

根据交界面边界条件可知在交界面处有

$$F_{u1lx}^p + F_{u1lx}^{p+1} + F_{U1lx}^p + F_{U1lx}^{p+1} = -F_{s1lx}^p - F_{s1lx}^{p+1} \quad (17)$$

将式(16)代入式(17)中得

$$\begin{aligned} & \frac{2}{\Delta t} M_{u1} \left\{ \{\dot{u}_1^{p+1}\} - \{\dot{u}_1^p\} + \right. \\ & m_x C_{il} (\{u_i^{p+1}\} - \{u_i^p\} - \{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\}) \left. \right\} + \\ & m_x k_{11il} (\{u_i^{p+1}\} + \{u_i^p\}) + m_x k_{12il} (\{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\}) + \\ & \frac{2}{\Delta t} M_{U1} \left\{ \{\dot{U}_1^{p+1}\} - \{\dot{U}_1^p\} - \right. \\ & m_x C_{il} (\{u_i^{p+1}\} - \{u_i^p\} - \{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\}) \left. \right\} + \\ & m_x k_{12il} (\{u_i^{p+1}\} + \{u_i^p\}) + m_x k_{13il} (\{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\}) = \\ & - \left(\frac{2}{\Delta t} M_{s1} \{\dot{u}_{s1}^{p+1}\} - \{\dot{u}_{s1}^p\} \right) + m_x k_{s1l} (\{u_{sl}^{p+1}\} + \{u_{sl}^p\}) \end{aligned} \quad (18)$$

由交界面边界条件还可以得到

$$\dot{u}_{s1x}^{p+1} - \dot{u}_{s1x}^p = \dot{u}_{1x}^{p+1} - \dot{u}_{1x}^p = \dot{U}_x^{p+1} - \dot{U}_x^p \quad (19)$$

将式(19)代入式(20),整理得到法向速度反应的显式表达式:

$$\begin{aligned} \{\dot{u}_{lx}^{p+1}\} = \{\dot{u}_{lx}^p\} - \frac{\Delta t}{2} \frac{1}{M_{s1} + M_{u1} + M_{U1}} m_x \cdot \\ \left\{ k_{s1l} (\{u_{sl}^p\} + \{u_{sl}^{p+1}\}) + k_{11il} (\{u_i^p\} + \{u_i^{p+1}\}) + \right. \\ k_{12il} (\{U_i^p\} + \{U_i^{p+1}\}) + k_{12il} (\{u_i^p\} + \{u_i^{p+1}\}) + \\ \left. k_{13il} (\{U_i^p\} + \{U_i^{p+1}\}) \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\dot{U}_{1x}^{p+1} = \dot{u}_{1x}^{p+1} = \dot{u}_{s1x}^{p+1} \quad (21)$$

用同样方法可得切向速度反应的显式表达式:

$$\begin{aligned} \{\dot{u}_{ly}^{p+1}\} = \{\dot{u}_{ly}^p\} - m_y \frac{1}{M_{u1} + M_{s1}} \cdot \\ \left\{ C_{il} (\{u_i^{p+1}\} - \{u_i^p\}) - (\{U_i^{p+1}\} - \{U_i^p\}) \right\} + \\ \frac{\Delta t}{2} \left\{ k_{11il} (\{u_i^{p+1}\} + \{u_i^p\}) + k_{12il} (\{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\}) + \right. \\ \left. k_{3il} (\{u_{sl}^{p+1}\} + \{u_{sl}^p\}) \right\} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \{\dot{U}_{ly}^{p+1}\} = \{\dot{U}_{ly}^p\} - m_y M_{U1}^{-1} \cdot \\ \left\{ C_{il} (\{U_i^{p+1}\} - \{U_i^p\}) - (\{u_i^{p+1}\} - \{u_i^p\}) \right\} + \\ \frac{\Delta t}{2} \left\{ k_{12il} (\{u_i^{p+1}\} + \{u_i^p\}) + k_{13il} (\{U_i^{p+1}\} + \{U_i^p\}) \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

$$\dot{u}_{ly}^{p+1} = \dot{u}_{sly}^{p+1} \quad (24)$$

2.3.4 上覆土层和半空间介质交界面上节点的动力反应分析的显式有限元表达式

上覆土层和半空间介质为不同弹性固体介质, 其交界面上的边界条件为二者的运动、应力在法向、切向都连续, 交界面上节点的位移、速度的显式表达式可根据连续性条件写出, 为节省篇幅, 这里不再写出。

2.3.5 人工边界上节点的动力反应表达式

本文中人工边界节点的位移和速度计算均采用多次透射人工边界的修正公式^[13]:

$$\tilde{u}_{RJ}^{P+1} = \tilde{u}_{RJ}^{P+1} + u_{RJ-1}^{P+1} - \tilde{u}_{RJ-1}^{P+1} \quad (25)$$

式中: $\tilde{u}_{RJ}^{P+1}$ 为 $P+1$ 时刻 $J'(J'=J, J-1)$ 点处外行波场的原 N 阶透射公式的估计值; u_{RJ-1}^{P+1} 为 $P+1$ 时刻外行波场在 $J-1$ 点处的实际离散化数值计算值, 可由离散网格中内点运动的数值积分方法给出; $\tilde{u}_{RJ}^{P+1}$ 为 $P+1$ 时刻外行波场在 J 点处的修正 N 阶透射人工边界公式估计值, J 点即为人工边界上的点, $J-1$ 点为与人工边界点相邻的介质内部节点。

2.4 计算步骤

上面已经得到计算区内所有节点的动力反应的有限元表达式, 在此基础上就可以按照以下的计算步骤, 根据节点的顺序, 计算出每一节点在不同时刻的反应, 计算步骤:

第①步 引入人工边界, 给出计算区域;

第②步 输入初始位移场或作用力场;

第③步 将计算区划为有限元网格, 用有限元节点系代替连续介质区;

第④步 计算准备 (1) 形成集中于每一节点的质量; (2) 形成每一节点的计算刚度和阻尼; (3) 令 $p=0$ 和 $p=0$ 时刻以前的若干时刻的节点位移为 0;

第⑤步 计算 p 、 $p+1$ 时刻的节点外力;

第⑥步 计算 $p+1$ 时刻的动力反应, 即 (I) 计算每一内部节点 $t+\Delta t$ ($p+1$ 步) 时刻的位移反应, 再利用 $u_s = u - u_1$ (u_1 为入射位移场), 得到人工边界散射位移场。计算人工边界上 $p+1$ 时刻的散射位移, 然后采用 $u = u_s + u_1$, 计算出人工边界上的总位移场; (II) 计算每一内部节点 $t+\Delta t$ ($p+1$ 步) 时刻速度反应, 与第⑥步中 (I) 同理, 可得人工边界上的总速度场; (III) 计算每一节点 $t+\Delta t$ ($p+1$ 步) 时刻的加速度反应。

第⑦步 循环第⑤、⑥步, 计算区域网格上所有节点在不同时刻的动力反应。

3 计算分析与讨论

计算区内软夹层介质采用饱和多孔介质模型, 取固体骨架密度 $\rho_s = 2\,650\text{ kg/m}^3$, 孔隙水密度 $\rho_f = 1\,000\text{ kg/m}^3$, 孔隙率 $n=0.6$, 其余参数见表 1。半空间介质和上覆土层介质假定为单相弹性介质, 半空间介质密度 $\rho = 2\,800\text{ kg/m}^3$, Lamé 常数 $\lambda = 2.1\text{ GPa}$, $\mu = 1.4\text{ GPa}$, 此参数下半空间介质中 P 波的波速为 $1\,322.9\text{ m/s}$, SV 波的波速为 707.1 m/s ; 上覆土层介质密度 $\rho = 2\,100\text{ kg/m}^3$, Lamé 常数 $\lambda = 0.54\text{ GPa}$, $\mu = 0.36\text{ GPa}$, 相应的 P 波波速为 774.6 m/s , SV 波波速为 414.0 m/s 。计算中假定上覆土层不透水。

表 1 软夹层介质材料参数表
Table 1 Material parameters of fluid saturated porous medium

组别	A / GPa	N / GPa	R / GPa	Q / GPa	k	η	P _I 波波速 / (m/s)	P _{II} 波波速 / (m/s)	S 波波速 / (m/s)
1	0.065 25	0.04	0.011 89	0.078 77	0.01	10^5	308.4	109.7	171.3
2	0.155 22	0.10	0.011 89	0.078 77	0.01	10^5	584.7	112.2	270.9
3	0.305 21	0.20	0.011 89	0.078 77	0.01	10^5	819.6	112.9	383.1

3.1 软夹层厚度对场地反应的影响

按图 1 所示的计算模型, 取计算区宽度 $C \times D = 1\,000\text{ m} \times 200\text{ m}$, 沉积谷谷深 $H = 100\text{ m}$ 沉积谷的高宽比 $H/A = 1/5$, 相应的谷顶部宽度 $A = 500\text{ m}$, 河谷底部宽度 $B = 300\text{ m}$ 。网格间距为满足精度和稳定性的要求, 取横向和竖向均为 5 m , 单元采用四边形等参元和常应变三角形单元。输入波场为幅值为 1 的正弦 P 波波场。

保持其他参数不变, 只改变软土层和上覆土层的厚度, 保持二者的总厚度为 100 m 不变。图 3 为

软夹层介质计算参数取表 1 中第 1 组参数时及厚度 h 分别为 20 、 40 m 和 60 m 时, 观察点 O (沉积谷地表中心点) 在不同频率下的竖向位移与入射波场位移幅值的比值 (即放大系数) 的反应时程。从图 3 中可以看出, 当软土层厚度为 20 m 时, 在频段 $0.8 \sim 2.0\text{ Hz}$ 内, 地面观察点的位移反应有放大效应; 当输入频率为 1.0 Hz 时, 地面观察点的位移达最大值; 在低频域 (低于 0.5 Hz) 和高频域内 (高于 2 Hz) 时, 地面观察点的位移反应有减弱效应, 特别是高频时, 减弱效应很明显。

当软土层厚度为 40 m 时,在频率段 0.5~1.5 Hz 内地面观察点的位移反应有放大效应,且此时的放大效应比软土层厚度为 20 m 时明显;当输入频率为 0.8 Hz 时,地面观察点的位移达最大值;在低频域(低于 0.5 Hz)和高频域(高于 1.5 Hz)时,地面观察点的位移反应有减弱效应,特别是高频时,减弱效应很明显。

当软土层厚度为 60 m 时,在频率段 0.5~1.0 Hz 内地面观察点的位移反应有放大效应,此时的放大效应很明显,特别是在低频时,当输入频率为 0.8 Hz 时地面观察点的位移达最大值;在高频域内地面观察点的位移反应有减弱效应。

对比不同软夹层厚度时的反应可以看出:(1)软土层的存在使的地面观察点的位移反应在一些频率较低的频段内有放大效应,随着软土层厚度的增加,放大效应明显,放大频段向低频方向移动,位移峰值也向低频方向移动,这主要是因为随着软土层高度的增加,结构的刚度减小,自振频率减小,对应的敏感频率也减小。(2)软土层的存在使得地面观察点的位移反应在高频内有明显的减弱效应,是因为在高频时波长较短,地震波不能传到地面,能量都积聚在软土层内。

3.2 软夹层刚度对场地反应的影响

仍取沉积谷谷深 $H = 100$ m,沉积谷的高宽比 $H/A = 1/5$,改变软土层固体骨架的刚度,图 4 为软土层厚度为 40 m 时观察点在不同频率下的位移反应。从表 1 中给出的波速看,表中第 1~3 组参数

对应的土层是由软至硬的。从图中可以看出,取第 1 组参数时,此时沉积谷中夹层的刚度最小。在频率段 0.5~1.5 Hz 内,地面观察点的位移反应有放大效应,当输入频率为 0.8 Hz 时,地面观察点的位移达最大值;在低频域(低于 0.5 Hz)和高频域(高于 1.5 Hz)时,地面观察点的位移反应有减弱效应,特别是高频时,减弱效应很明显。取第 2 组参数时,在频率段 1.0~2.0 Hz 内,地面观察点的位移反应有较明显的放大效应,但放大效应没有取第 1 组参数时的明显,当输入频率为 1.0 Hz 时,地面观察点的位移达最大值;在低频域(低于 0.5 Hz)和高频域内(高于 2.0 Hz)时,地面观察点的位移反应有减弱效应,特别是高频时,减弱效应很明显。当取第 3 组参数时,此时沉积谷中夹层的刚度最大,地面观察点的位移反应的放大效应较前二者小,在 0.5~1.0 Hz 的频段范围内位移放大系数在 2 左右,与自由场地的放大系数相当;在高频域内,地面观察点的位移反应有减弱效应。

对比不同软夹层刚度时的反应可以看出:(1)随着软土层刚度的减小,放大效应明显,放大频段向低频方向移动。位移峰值也向低频方向移动,这主要是因为随着软土层刚度减小,自振频率减小,对应的敏感频率也减小。(2)软土层的存在使的地面观察点的位移反应在高频内有明显的减弱效应,是因为在高频时波长较短,地震波不能传到地面,能量都积聚在软土层内。

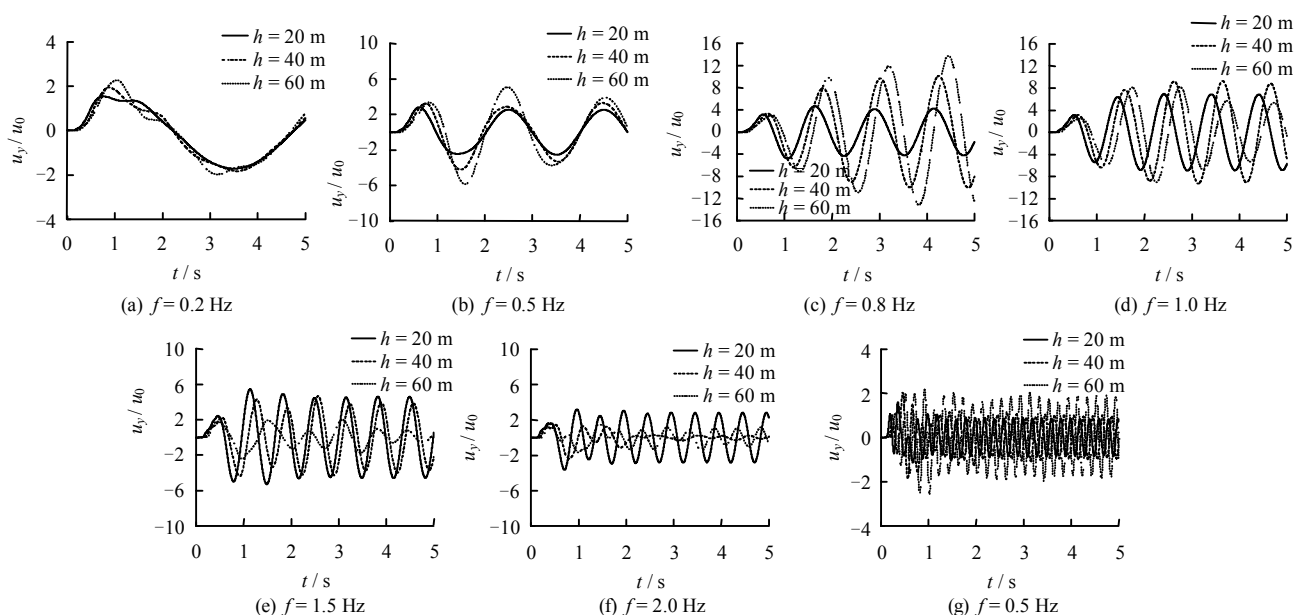


图 3 各入射波频率下具有不同厚度软夹层的沉积谷在地面观测点的竖向位移
Fig.3 The vertical displacements of the fixed point on the ground surface of layered alluvial valleys with different thicknesses soft interlayer under different incident frequencies

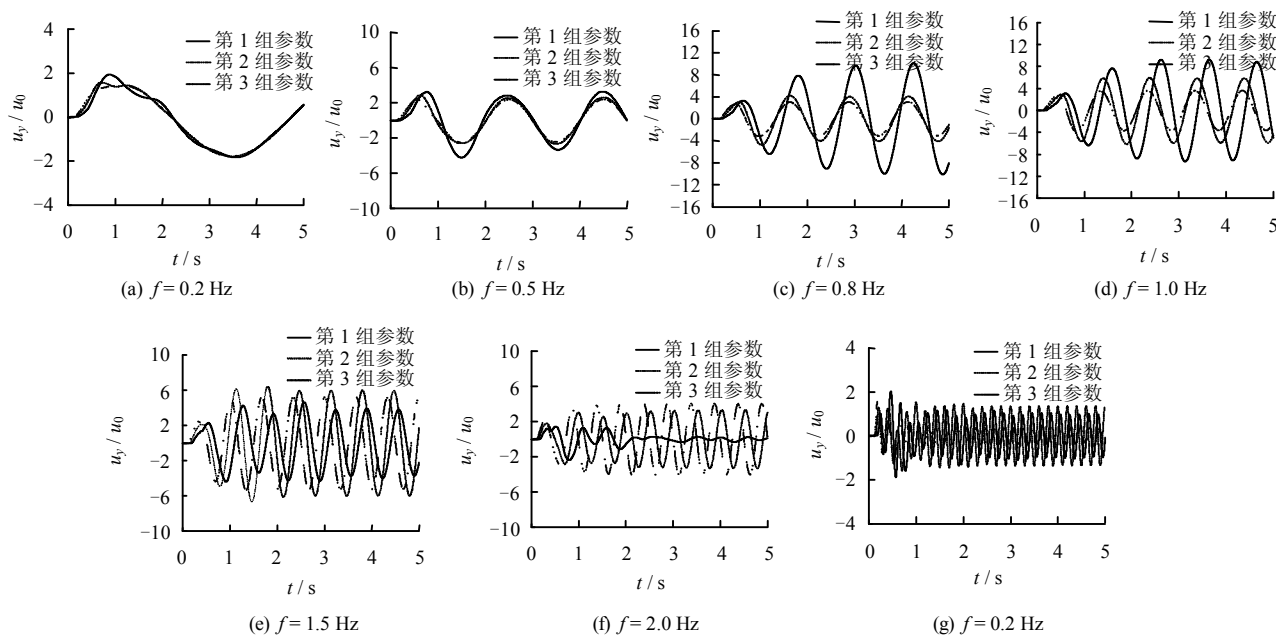


图4 各入射波频率下具有不同刚度软夹层的沉积谷在地面观测点的竖向位移

Fig.4 The vertical displacements of the fixed point on the ground surface of layered alluvial valleys with different stiffnesses soft interlayer under different incident frequencies

4 结 论

将层状沉积河谷场地中的软夹层模拟为流体饱和和多孔介质, 本文建立了既能描述沉积河谷底部的软土地场(用饱和和多孔介质描述), 又能描述河谷周边山体(用单相弹性介质描述)的计算模型, 研究了层状沉积河谷场地地震动力响应, 分析了软夹层的厚度和刚度对沉积河谷场地地震动力响应的影响, 得到如下初步结论:

(1) 软弱土夹层会明显改变场地的响应, 它并非总是减小场地的响应。

(2) 软土层的存在使的地面观察点的位移反应在一些敏感频段内有放大效应, 随着软土层厚度的增加, 放大效应明显, 放大频段加长, 位移峰值向低频方向移动。

(3) 软土层刚度越小, 放大效应越明显, 放大频段向低频方向移动。位移峰值也向低频方向移动。

(4) 软土层的存在使的地面观察点的位移反应在高频内有明显的减弱效应。

影响含软夹层的层状沉积河谷场地的地震动力响应的因素还有很多, 由于论文篇幅限制, 这里只给出了一些初步的结果, 但对其进一步地研究时通过本文建立的方法很容易得到。

参 考 文 献

[1] BRAVO M A, SCHANEZ-SESMA F J, CHAVEZ-GARCIA F J. Ground motion on stratified alluvial

deposits for incident SH waves[J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1988, 78: 436—450.

- [2] KURIBAYASHI E, NIIRRO T, NISHIOKA S, et al. Site effect of earthquake ground motion[C]//Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1992: 947—951.
- [3] DRAVINSKI M, MOSSESIAN T K. Scattering of plane harmonic P, SV waves and Rayleigh waves by dipping layers of arbitrary shape[J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1987, 77: 212—235.
- [4] TRIFUNAC M V. Scattering and diffraction of plane P and SV waves by two-dimensional inhomogeneities[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1988, 7: 189—200.
- [5] SINGH S K, MENA E, CASTRO R. Some aspects of source characteristics of the 19 september 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico City from strong motion data[J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 1988, 78(2): 451—451.
- [6] 周锡元, 王广军, 苏经宇. 场地、地基、设计地震[M]. 北京: 地震出版社, 1990.
- [7] 周根寿, 王志良, 韩清宇. 地基与工业建筑抗震[M]. 北京: 地震出版社, 1984.

- [8] 陈镭, 陈竹昌, 薛松涛, 等. 夹有软弱土层的层状场地对入射 SH 波的响应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(2): 161—165.
CHEN Rong, CHEN Zhu-chang, XUE Song-tao, et al. The response analysis of strata with extremely soft soil layer to incident SH waves[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(2): 161—165.
- [9] 梁建文, 张郁山, 顾晓鲁, 等. 圆弧形层状沉积河谷场地在平面 SH 波入射下动力响应分析[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 396—401.
LIANG Jian-wen, ZHANG Yu-shan, GU Xiao-lu, et al. Surface motion of circular-arc layered alluvial valleys for incident plane SH waves[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(4): 396—401.
- [10] 梁建文, 严林隽, WINCENT W L. 圆弧形层状沉积河谷场地对入射平面 P 波的散射解析解[J]. 地震学报, 2001, 23(2): 167—184.
LIANG Jian-wen, YAN Lin-jun, WINCENT W L. Scattering of plane P waves by circular-arc layered alluvial valleys: an analytical solution[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 2001, 23(2): 167—184.
- [11] 廖振鹏. 工程波动理论导引[M]. 北京: 北京科学出版, 1996.
- [12] 赵成刚, 王进廷, 史培新, 等. 流体饱和二相多孔介质动力反应分析的显式有限元法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(2): 178—182.
ZHAO Cheng-gang, WANG Jin-ting, SHI Pei-xin, et al. Dynamic analysis of fluid-saturated porous media by using explicit finite element method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(2): 178—182.
- [13] 李小军. 非线性场地地震反应分析方法的研究[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所, 1993.