

层状场址自由场动力分析的等价线性法研究*

宋建希, 李建波✱, 林 皋

(大连理工大学 建设工程学部工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于等价线性法和一维剪切波传播理论, 开发了等价线性法频域计算的C++程序。为验证自编C++程序的有效性, 与在工程中广泛使用的SHAKE91程序就某一核电成层土地基进行算例对比, 发现两种程序计算所得加速度峰值随高程的变化吻合较好, 地震波时程向位移频谱转换时采用不同方法会对计算结果产生影响。

关键词: 土层地震反应分析; 等价线性频域方法; 地震波时程处理; C++等价线性程序

中图分类号: TU352

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2016)01-0126-05

0 引言

土体是非线性很强的材料, 承受地震荷载时, 土的应力应变关系形成封闭的滞回圈。而各个滞回圈的形状、大小和方位都是变化的。为了简化地震作用下土的地震响应分析, Idriss 和 Seed (1968) 最早提出了等价线性方法。由于该方法概念清晰, 计算效率高, 且计算精度能满足工程需要, 目前被工程上广泛应用, 已被我国《工程场地地震安全性评价技术规范》(GB17741—2005) 推荐使用。

在与其他理论结合方面, 吴再光等 (1988) 将等价线性法与随机理论相结合, 解决了一维水平成层地基的地震反应分析问题; 吴再光等 (1989) 将该方法推广到二维, 提出了与随机理论相结合的概率平均等价线性法, 随后, 吴再光等 (1992) 又提出了水平成层地基非平稳随机地震反应分析方法, 将概率平均等价线性法和时域模态分析相结合。为提高等价线性法的精度, 针对其在强震作用下得到的地面反应与实测结果相比较小, 且高频段的频响放大倍率较低的问题, 学者们进行了一系列的研究: Yoshida 等 (2005) 将频率分为3段, 在每个频率段根据其特点采用不同的求等效剪应变抗解公式; 沈建文等 (2013) 提出

了用震级和距离参数修正土体的等效剪应变, 使等价线性法更加完善; 王伟等 (2013) 提出了刚度与阻尼频率相关的等效线性化方法, 成功地改善了传统方法压制土体地震动高频成分的缺点, 使结果更趋合理。

在实际工程应用中, 学者们将等价线性法推广到不同的工程领域: 徐学燕等 (2003) 将等价线性法应用于冻土和软土地基中, 黄雨等 (2005) 利用 Edushake 程序对上海软土进行了分析, 得到了该场地的频谱特性规律和地震加速度反应; 刘海笑和王世水 (2006) 将等价线性法成功运用于结构—波浪—海床耦合系统的动力响应分析中。

本文通过等价线性法和一维波动传播理论, 基于C++平台开发了等价线性法C++程序。对比了地震加速度时程到位移频谱的不同转换过程对结果的影响, 并与SHAKE91进行了算例对比, 验证了笔者开发程序的准确性。

1 等价线性法迭代过程

土是一种非线性材料, 其主要参数剪切模量 G 和阻尼比 D 都是剪应变 γ 的函数, 如图1所示。地震动越强, 土的非线性特征越明显。在强震作用下, 由于土体的非线性效应, 叠加原理在动力求解的过程中不再适用。等价线性法在频域范围

* 收稿日期: 2015-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51138001) 和中央高校基本科研业务费专项资金共同资助.

✱通讯作者: 李建波 (1977~), 博士, 副教授, 主要从事核电结构及水工的抗震安全性评价.

E-mail: jianboli@dlut.edu.cn.

内用线性分析方法近似获得非线性地震响应，即假定在整个地震过程中土层的剪切模量 G 和阻尼比 D 均为常数，根据初始的 G 和 D 完成一个动力计算过程后，得出一个等效剪应变。根据新的剪应变插值出新的 G 和 D ，重复相同的计算过程，直到结果收敛误差达到允许范围为止，这就是等价线性法的非线性迭代过程。

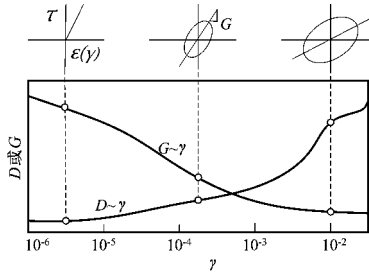


图 1 G 和 D 随剪应变大小的变化

Fig. 1 G and D changes with the shear strain

2 基于 Visual C++ 平台的软件开发与应用

Visual C++ 平台具有较高的计算和执行效率，且能与 MATLAB 结合进行数据库调用。为加深对等价线性法的理解，基于 Visual C++ 开发平台，结合一维剪切谐波传播理论、傅立叶变换理论和露头基岩和下卧基岩地震运动的比例关系编制了等价线性法频域计算程序。

2.1 一维剪切谐波传播理论

图 2 显示了一维等效线性法场地剪切波传播反应分析模型，竖直向上的水平剪切波在一维成层土体中传播，则质点的水平向变化可表示为

$$u = u(x, t). \quad (1)$$

其满足波动平衡方程

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t}. \quad (2)$$

其中， ρ 为任意土层的密度， G 为剪切模量， η 为黏性系数。

η 与 ξ 存在如下关系，其中， ξ 为临界阻尼比：

$$\omega \eta = 2G\xi. \quad (3)$$

谐波位移的频域表达式可为

$$u(x, t) = U(x) \cdot e^{i\omega t}. \quad (4)$$

通过各土层之间的位移应力连续条件，可以得到任意两层 n 层和 m 层之间的位移传递函数：

$$A_{n,m}(\omega) = u_m / u_n = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)}. \quad (5)$$

故只需知道任意层的位移信息，就可以计算出其他层的位移响应。

对位移关于时间求两次导数，可得加速度响应为

$$\ddot{u}(x, t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 (Ee^{i(kx + \omega t)} + Fe^{-i(kx - \omega t)}). \quad (6)$$

应变是关于位移的一阶导数，则

$$\gamma = \frac{\partial u}{\partial x} = ik(Ee^{i(kx + \omega t)} - Fe^{-i(kx - \omega t)}). \quad (7)$$

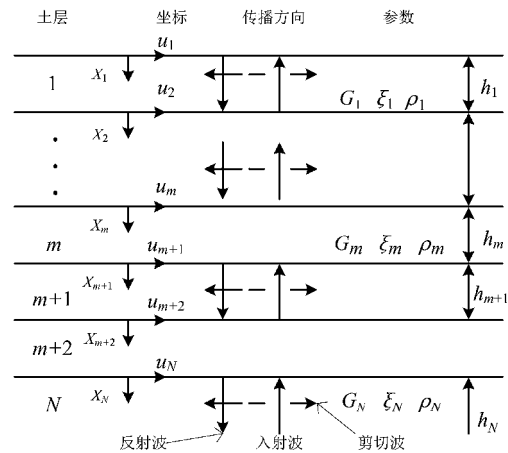


图 2 一维成层波动传播模型

Fig. 2 One-dimensional layer model of wave propagation

2.2 算法描述与程序实现

在很多工程情况下，场地土层的波动传播性质沿横向变化幅度比沿深度小，因此在求解土层地震反应分析时主要考虑土体性质沿深度的变化。通常假定地震输入为竖直向上入射的水平剪切波，将土层的地震反应问题简化为一维的波动问题。通过一维剪切谐波传播理论和等价线性法理论，编制了水平成层覆盖土场地地震响应分析的频域计算程序，其计算流程如图 3 所示。

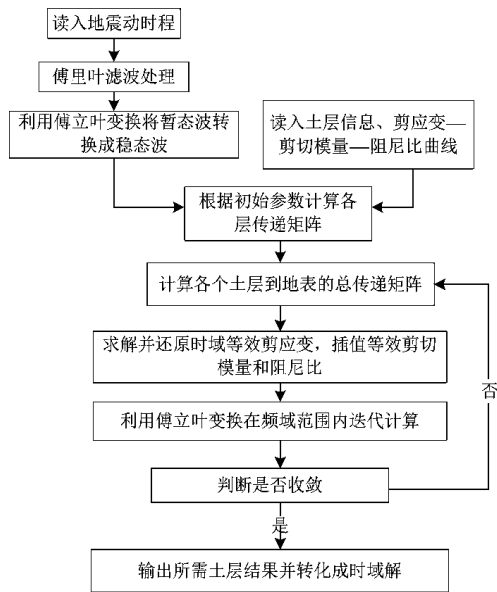


图3 C++ 程序计算流程图

Fig. 3 The calculation process of C++ program

该程序通过输入土层编号、厚度、密度、剪切模量、剪切波速和泊松比等参数信息，结合等效剪应变与剪切模量、阻尼比关系曲线，输入地震波并进行土层地震响应的迭代计算，直至收敛。在进行计算时，可以选择露头基岩、内部层两种地震动输入方式，以通过露头基岩和下卧基岩地震运动的比例关系理论，实现地震波任意层输入所得到的土层地震响应结果。其参数输入界面如图4所示。该程序可输出各土层的位移、速度、加速度、最大剪应变时程以及各参数峰值。

图4 程序输入选择界面

Fig. 4 The selection screen for program inputting

2.3 频域计算程序 SHAKE 简介

计算机程序 SHAKE72 是 1972 年由加州大学伯克利分校的地震工程研究中心研发的，是一维水平成层场地地震响应分析程序，采用等价线性法在频域范围内进行迭代计算。利用 SHAKE 软件可以实现：(1) 读取输入地震动，确定最大加速度值、卓越周期；(2) 读取场地成层土的数据，并计算土层的特征周期；(3) 计算每层场地中间层的最大应力和应变，获得与最大应变某一百分比相协调的新的模量和阻尼值；(4) 生成系统内任意子层顶部或露头基岩（自由场表面）处的新的地震响应；(5) 输出任意子层顶部的运动响应；(6) 输出该运动的反应谱；(7) 输出该运动的反应谱；(8) 计算任意两子层之间的放大函数等。

3 工程算例对比

为验证自编 C++ 程序的有效性，笔者将此程序与工程中广泛使用的 SHAKE91 程序就某一核电成层土地基进行了对比。某核电拟建厂址地基为不均匀非岩性地基，由不同类型的粘土、砂土组成，水平成层特征明显，共 31 层，且厚度较大，为 200 m，基岩埋深大。在探孔勘测的基础上，获得了场地的剪切波速和密度等物型参数。图 5 为输入的加速度时程，各分层剪切波速、密度随厚度变化如图 6 所示。

在等价线性的频域算法中，计算结果的精度受很多因素的影响。地震加速度时程转换到位移频谱的转换过程就是需要注意的因素之一，在编制 C++ 等价线性法频域算法程序时，对这一问题进行了分析比较。结果表明，若对地震波时程先积分到位移时程，再通过傅里叶变换到位移频谱，自编 C++ 程序与 SHAKE91 在地表附近处所得加速度峰值误差较大，如图 7a、b 所示，且计算所得位移谱通过傅里叶逆变

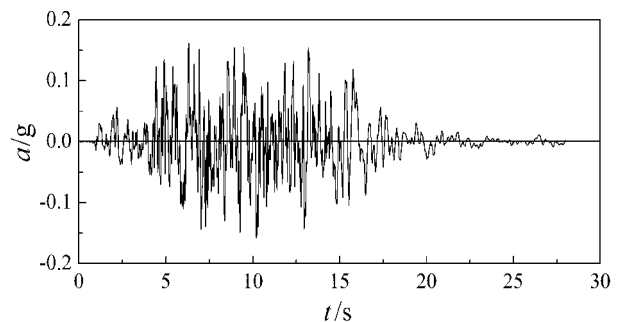


图5 输入的加速度时程

Fig. 5 Acceleration time history of the input earthquake

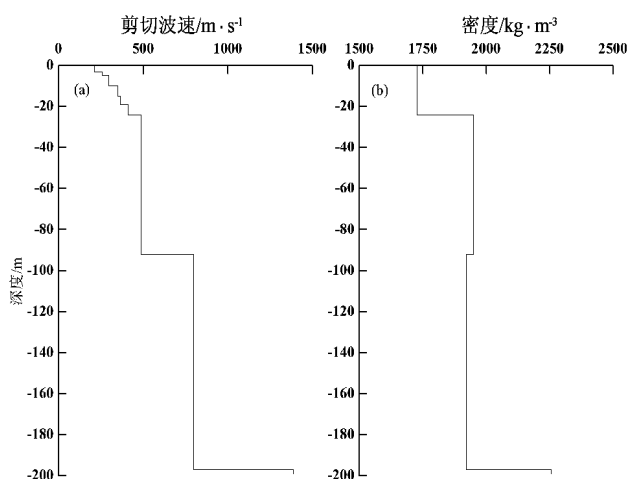


图 6 剪切波速 (a) 和土体密度 (b) 沿深度的变化
Fig. 6 Shear wave velocity (a) and soil density (b) varied with the depth

换向加速度时程还原时在 20 s 后会出现震荡的情况。若采用直接将加速度时程通过傅里叶变换转换到加速度频谱, 通过加速度频谱和位移频谱的转换关系进行计算, C++ 程序与 SHAKE91 的计算结果吻合较好, 如图 7c、d 所示。采用内部层输入和露头基岩输入两种不同的输入方式, SHAKE91 与 C++ 所得结果基本重合。内部层输入地震动时, 基岩 (−199 m) 处的峰值加速度即为地震波的峰值加速度 $1.638 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 而露头基岩处输入时, 基岩 (−199 m) 处的峰值加速度为 $1.325 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 这是因为露头基岩输入时, −199 m 处上行波为输入地震动的一半, 上行波向上传播时, 受到土层阻尼、反射、散射等的影响, 到达土层底部的下行波明显小于输入的上行波, 这也很好地印证了露头基岩和下卧基岩地震运动的比例关系。

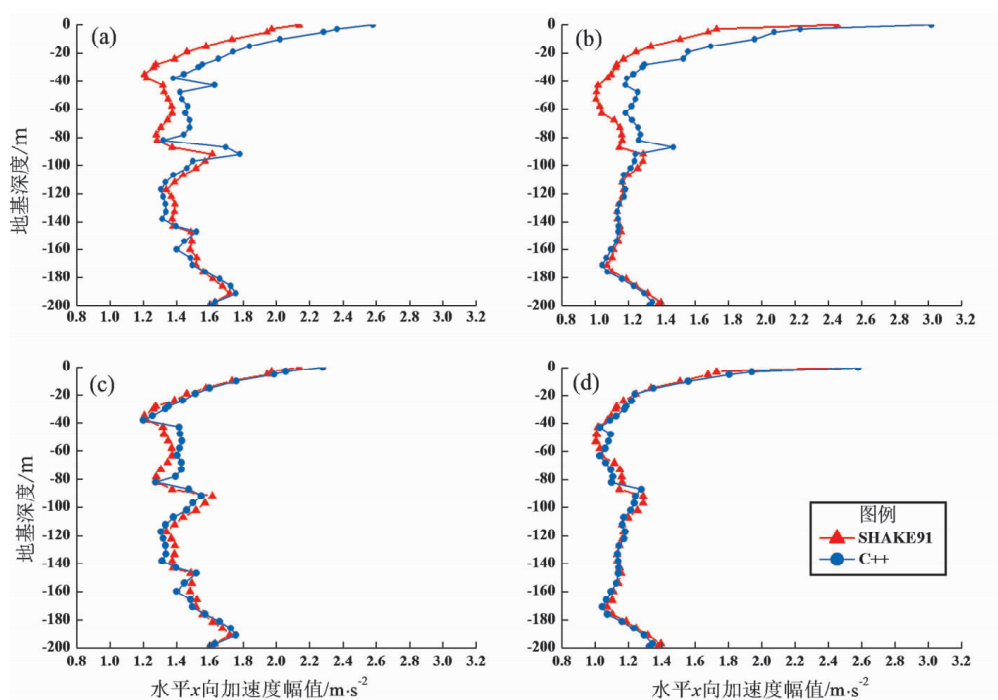


图 7 加速度峰值沿高程的分布

(a) 内部层输入; (b) 露头基岩处输入; (c) 内部层输入; (d) 露头基岩处输入

Fig. 7 The distribution of the peak of acceleration along the height

(a) internal layer input; (b) bedrock outcrop input; (c) internal layer input; (d) bedrock outcrop input

4 结语

本文基于 C++ 平台, 使用等价线性法和一维剪切波传播理论, 开发编制了等价线性法频域计算程序, 并对层状地基自由场动力分析的影响因素进行了研究。研究结果表明, 地震波时程向位

移频谱的转换采用不同的方法会对计算结果产生影响, 为等价线性法计算中地震波向位移谱的转换和加速度时程的还原提供了参考。最后将自编 C++ 程序与 SHAKE91 进行了算例对比, 发现两种程序所得加速度峰值吻合良好, 验证了所开发程序的准确性。

参考文献:

- 黄雨,叶为民,唐益群等. 2005. 上海软土地震反应特征分析[J]. 地下空间与工程学报,1(5):773-778.
- 刘海笑,王世水. 2006. 改进的等效线性化计算模型及在结构海床耦合系统动力分析中应用[J]. 中国港湾建设,(1):12-15,42.
- 沈建文,刘峥,石树中. 2013. 用震级和距离参数修正土层反应的等效线性化方法[J]. 中国工程科学,15(4):62-73.
- 王伟,周正华,王玉石等. 2013. 典型场地在不同地震动输入水平下的反应[J]. 中国工程科学,15(4):62-73.
- 吴再光,韩国城,林皋. 1988. 非线性土层平稳随机地震反应分析的等价线性化法[J]. 水利学报,(8):68-73.
- 吴再光,韩国城,林皋. 1989. 非线性土层随机地震反应的概率平均等价线性化法[J]. 岩土工程学报,11(4):9-16.
- 吴再光,林皋,韩国城. 1992. 水平成层地基非平稳随机地震反应分析[J]. 土木工程学报,25(3):60-67.
- 徐学燕,徐春华,李晓稚. 2003. 冻土地震加速度反应谱研究[J]. 岩土工程学报,25(6):680-683.
- Idriss I M, Seed H B. 1968. Seismic response of horizonatal soil layers [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 94(SM4):1003-1031.
- Yoshida, Kobayashi, Suetomi, *et al.* 2002. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 22(3):205-222.
- GB17741—2005. 工程场地地震安全性评价技术规范[S].

Research on Equivalent Linearization Method for Free Field Dynamic Analysis of Layer Site

SONG Jianxi, LI Jianbo, LIN Gao

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116622, Liaoning, China)

Abstract

Based on the equivalent linearization method and the one-dimensional shear wave propagation theory, we developed the C++ program of the equivalent linearization method in frequency domain. To verify the validity of the C++ program, through the comparative analysis on layer foundation of a nuclear power by using C++ program and the widely used program SHAKE91, we find that the change of acceleration peak value with elevation by two programs are in good agreement, and transforming from history of seismic waves to displacement spectrum by different ways has an impact on the calculation results.

Key words: soil seismic response analysis; equivalent linear frequency-domain method; the processing of time history of the seismic wave; C++ equivalent linear program