

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0925

成层场地基本周期简化计算方法研究

李瑞山, 袁晓铭

(中国地震局工程力学研究所 地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 从波动问题物理本质出发, 提取阻抗比和周期比作为表征不同土层条件下场地周期变化规律的基本特征量。提出了子层周期贡献系数的概念, 并指出其可由阻抗比和周期比唯一确定, 建立了周期贡献系数与阻抗比和周期比一般关系。采用子层周期加权累加方式形成一套简单实用且具有明确物理意义的成层场地基本周期估算方法, 以传递函数法结果为标准, 就 240 种工况算例与现有简化方法进行对比, 给出各方法偏差分析和适用性评价。主要结论为: 阻抗比和周期比作为场地周期研究的基本特征量, 结果具有完备性; 传统法无法反映土层结构对场地周期的影响, 对最普遍的渐硬型场地, 偏差也有可能达到 40% 以上, 对存在极端软夹层情况其偏差极易大于 20%; Hadjian 法精度明显优于传统法, 但方法和参数本身缺乏明确的物理意义; 新方法在一般和极端两种情况下最大偏差均不超过 8%, 偏差小于 5% 和 2% 工况数占比分别达到 85% 和 60% 以上, 高于 Hadjian 简化法, 可以在实际工程中推广应用。

关 键 词: 成层场地; 基本周期; 简化计算方法; 周期贡献系数; 土层结构

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2019) 08—3227—09

Simplified calculation method for the fundamental period of layered soil sites

LI Rui-shan, YUAN Xiao-ming

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: Based on the wave motion principle, the impedance ratio and sublayer period ratio were extracted as basic variables to characterize the regularities of fundamental periods under different site conditions. The concept of sublayer contribution coefficient was put forward, which can be definitely determined by the two basic variables selected. Thus, a general relationship among the coefficient, impedance ratio and period ratio was established. A simple and practical method with clear physical significance was proposed to estimate the predominant period of stratified sites by using the sublayer periodic weighted cumulative technique. Taking the transfer function results as standard values, overall comparison of the proposed method with available simplified approaches was carried out under 240 calculation conditions, and the deviation analysis and applicability evaluation of different methods were given accordingly. Results show that the impedance ratio and sublayer period ratio were suitable as characteristic variables for site period research. The traditional method with simple summation of sublayer periods cannot reflect the effect of soil layer structure on the site period. Its relative deviation may reach more than 40% for the most common progressive hardening sites, and the deviations can easily be great than 20% for situations with extreme soft interlayer. Hadjian's method exhibits an obviously higher accuracy than the classical method, while the method itself and its parameters lack clear physical meanings. The maximum relative deviations are always less than 8% for the proposed method under general and extreme situations, and the case proportions with deviation less than 5% and 2% are above 85% and 60% respectively, significantly higher than those of Hadjian's method. The results strongly reveal that the new method fully meets the engineering accuracy requirements, and can be promoted in practical engineering.

Keywords: layered soil site; fundamental period; simplified calculation method; period contribution coefficient; soil layer structure

收稿日期: 2018-05-28

基金项目: 中国地震局工程力学研究所基本科研业务费专项 (No. 2018B01, No. 2018A01); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目 (No. LH2019E093)。This work was supported by the Scientific Research Fund of Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (2018B01, 2018A01) and the Heilongjiang Provincial Natural Science Foundation (LH2019E093).

第一作者简介: 李瑞山, 男, 1987 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事土动力学和岩土地震工程研究。E-mail: lrshan22@hotmail.com

通讯作者: 袁晓铭, 男, 1963 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事土动力学和岩土地震工程研究。E-mail: yxniem@126.com

1 引言

场地基本周期也称为卓越周期,是场地基本内在属性,是岩土地震工程及其他相关领域中很多问题的研究基础。历次大地震经验表明,局部场地条件对震害严重程度有非常重要的影响^[1-5],从场地与结构动力相互作用角度可以有以下两方面解释:其一是地震动在传播过程中幅值和频谱特性发生了改变,土层对输入地震动中与场地周期相近的成分显著放大,而对远离基本周期的成分有滤波作用;其二是工程结构自振周期与场地基本周期相近时会引发强烈的共振效应。尽可能避开场地周期的建筑结构抗震设计理念已深得广大科研人员和工程师的认同,可靠地估计场地基本周期便成了其中的关键。另一方面, V_{s30} 和覆盖层厚度等特征参数无法揭示土层间显著波速差异引起的场地共振效应^[6],场地周期相比 V_{s30} 能更好地表征其平均放大作用^[7]。

现有的场地基本周期求解方法大致可以分为解析法、数值算法、直接测定法和简化算法 4 类^[8]。解析法是通过数学推导给出场地卓越周期的理论解答,但主要是针对一些非常简单的理想场地模型,三层及以上便难以得到显式表达,实际场地条件往往要复杂得多,很难直接使用。数值算法从最初的集中质量法和一致质量法^[9]发展到现在的有限元法和有限差分法等,可以用于各种复杂场地剖面,类似 DEEPSOIL 等场地地震反应分析专业软件可以免费下载使用,但对绝大多数工程场地而言采用模态分析来给出其基本周期的做法缺乏实际可操作性。直接测定法是指通过地脉动或弱震数据分析来得到场地卓越周期,比如最常使用的 H/V 谱比法^[10-12],可以在缺少钻孔和波速测试资料情况下给出场地基本周期估计,但因依赖于地脉动测试技术的可靠性和高质量地震动记录的数量,应用上受到一定限制。实际工程中考虑工程技术人员方便普遍采用基于土层波速剖面的简化算法来估计场地基本周期,比如子层周期求和法、剪切波速加权平均法、等效剪切波速法和瑞利波法等,这些方法因为操作简单而被广泛使用。但是这些方法都只能考虑各层土的厚度和剪切波速,而无法反映土层结构对场地周期的影响。实际上即使两场地等效剪切波速和厚度完全相同,只是土层顺序不同,其场地卓越周期往往存在差别,且很多情况下差别很大。子层周期求和法所得场地周期与 H/V 谱比法和传递函数法结果之间存在显著偏差,正常渐变型场地上平均高估 20%,最大偏差 40%,对存在极端软夹层或软弱下卧层场

地可能偏小 50%以上^[13-14]。为克服传统方法无法考虑土层结构的缺点,一些学者提出了一些新的简化方法,但成果十分有限^[15-17],且对其精度和适用性都缺少系统研究。

本文从土层中波动传播基本原理出发,提取影响场地动力特性的完备特征量,提出子层周期贡献率的概念,在此基础上采用耦合累加方式给出成层场地基本周期估算新方法,通过传递函数法进行全面对比,给出新方法及现有简化方法偏差分布和适用性评价。

2 计算模型

成层场地基本力学模型如图 1 所示,共由 N 层水平土层组成,其中第 i 层土由其厚度 h_i 、重度 ρ_i 和剪切波速 v_{si} 来表征,覆盖层总厚度为 $H = \sum h_i$ 。约定每一层土局部坐标 z_i 原点位于各层顶,方向以向下为正。图中 E_i 和 F_i 分别为剪切波从基岩垂直入射往地表传播过程中引起的土层中稳态上行波和下行波波幅。

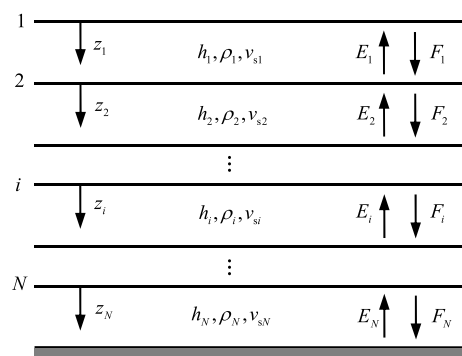


图 1 水平成层土地模型

Fig.1 Horizontally layered soil site model

3 现有简化计算方法

对图 1 成层场地模型,其基本周期求解普遍使用简化计算方法,包括传统法和双层模型法等,其中传统法主要包括子层周期求和法、剪切波速加权平均法、等效剪切波速法和瑞利波法等。

3.1 传统法

Dobry 等^[15]最先给出了单一均匀覆盖土层场地基本周期解析解 $T = 4H/v_s$,后来不断有学者将这一解答拓展到了多层土模型,这里统称传统法,其中以子层周期求和法应用最为普遍,具体做法是对每层土都采用上述精确解计算出一个子层周期,然后再将其全部叠加,公式表达如下:

$$T = 4 \sum h_i / v_{si} \quad (1)$$

剪切波速加权平均法是指将各层土剪切波速用土层厚度加权作为场地平均波速，然后采用单层土解析解计算场地周期，具体表达为

$$T = \frac{4H}{\sum v_i h_i / H} \quad (2)$$

另一种演变形式是对剪切模量和密度分别按厚度加权处理，这里不再赘述。

等效剪切波速法和瑞利波法分别假定土层剪切波速沿深度呈指数和线性变化且土体密度差异可以忽略，在此基础上给出了各自场地周期计算表达式，篇幅所限不再具体列出。

本文以子层周期求和法作为传统法代表参与后文新方法对比检验。现有结果表明，传统法对大部分场地周期存在严重高估的现象。另外必须指出的是，传统法无法考虑土层顺序结构效应，事实上软硬夹层或软弱下卧层的存在会对场地整体动力响应产生重要影响。

3.2 双层模型法

Dobry 等^[15]在给出单一土层解析解的同时还提出了两层土模型场地周期控制方程：

$$\tan\left(\frac{\pi T_1}{2T}\right) \tan\left(\frac{\pi T_2}{2T}\right) = \frac{\rho_2 h_2 T_1}{\rho_1 h_1 T_2} \quad (3)$$

式中： ρ_1 、 ρ_2 分别为上下两层土重度； h_1 、 h_2 为厚度； T_1 、 T_2 为按单层模型解析解得到的子层周期， T 为待求两层土地卓越周期。为了得到 T 的显式表达，Hadjian^[16]忽略上下两层土重度差异并采用余弦函数级数展开取其前两项的处理方式，给出了上述周期控制方程的近似解答：

$$T = T_1 \sqrt{\frac{\pi^2}{8} \left[1 + \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \left(1 + 2 \frac{h_1}{h_2} \right) \right]} \quad (4)$$

在式 (4) 中，当 $T_2/T_1 \rightarrow 0$ 时， $T/T_1 \rightarrow 1.11$ ，而精确解答应该是 $T/T_1 \rightarrow 1.0$ ，这是由于上述近似方式存在截断误差。Hadjian 针对这一问题进一步对简化公式做了修正，当 $h_1/h_2 > 1.0$ 时，修正后的双层土地周期计算公式为

$$T = T_1 \sqrt{\frac{\pi^2}{8} \left[0.75 + \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^2 \left(1 + 2 \frac{h_1}{h_2} \right) \right]} \quad (5)$$

经对比检验，当 $h_1/h_2 < 1.0$ 时采用式 (5) 计算出的场地周期很可能偏大。文献作者参照上面形式，给出了当 $h_1/h_2 \leq 1.0$ 时相应的计算公式及参数：

$$T = T_1 \left[1 + \beta \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^n \left(1 + \frac{h_1}{h_2} \right)^n \right]^{1/n} \quad (6)$$

$$\beta = 1 - 0.2(h_1/h_2)^2 \quad (7)$$

$$n = 4 - 1.8(h_1/h_2) \quad (8)$$

式 (5)、(6) 简化算法是对两层模型周期控制方程的近似解答，需要通过连续调用方可将其应用到多层模型，具体操作后有详细介绍。本方法虽然能够考虑土层结构对场地周期的影响，并使计算偏差相比传统法有大幅降低，但依然存在以下两方面的不足：一是式 (5)、(6) 在 $h_1/h_2 = 1.0$ 处不连续；二是方法本身物理含义不明确，参数相互之间不独立。

4 新方法基本原理

4.1 基本特征量

在图 1 的水平成层场地力学模型中，最重要参数有两组：各土层厚度和剪切波速。根据经典工程波动理论^[18]，相邻土层之间稳态震动波幅矢量传递矩阵可表达为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{1 + \alpha_i}{2} \exp(ik_i h_i), & \frac{1 - \alpha_i}{2} \exp(-ik_i h_i) \\ \frac{1 - \alpha_i}{2} \exp(ik_i h_i), & \frac{1 + \alpha_i}{2} \exp(-ik_i h_i) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中： i 为虚数单位； α 为两层土之间的波阻抗； k 为波数，二者计算公式分别为

$$\alpha_i = (\rho_i v_{si}) / (\rho_{i+1} v_{s(i+1)}) \quad (10)$$

$$k_i = \omega / v_{si} = 2\pi f / v_{si} \quad (11)$$

从式 (9) 可以看出，行波在土层间传播主要受到 α 和 kh 两部分的影响。从土层地震反应分析角度来讲，场地响应主要由其绝对软硬程度和层间相对差别两方面因素控制，因此，本文暂定子层周期 T 和层间阻抗比 α 作为研究场地周期特征规律的两个基本特征量。

阻抗比 α 代表了相邻两层土之间力学性质的差异，阻抗序列从整体上反映出场地土层顺序结构性，所以本文选择土层间阻抗比作为反映场地周期特性的其中一个特征量。波数 k 与土层厚度 h 相乘，结合单层土周期公式 $T = 4h/v_s$ 和式 (11)，可以得到 $kh = (\pi f / 2)T$ ，其中 f 为谐波频率。考虑到第 1 层土周期存在精确解析表达，故将子层周期用层间周期比来替换，以 λ 表示，作为反映场地周期特性

的另一个特征量,具体定义如下:

$$\lambda = T_{i+1} / T^i \quad (12)$$

式中: T_{i+1} 为第 $i+1$ 子层的基本周期; T^i 为考虑全部第 $1 \sim i$ 层土后场地的基本周期。阻抗比 α 和周期比 λ 两个特征量选择的完备性将在下一节得到证明。

4.2 子层周期贡献系数

采用传统方法(式(1))计算成层场地基本周期会有偏差,其最根本原因是各土层独立计算后简单相加的求解方式没有考虑到场地动力特性是各土层共同耦合作用的结果,其中包括没有考虑土层排序的影响。这样,即使对于简单的两层土,当二者阻抗相差较大时,传统方法得到基本周期也会有很大偏差。

本文采用与传统方法不同的求解思路,认为各土层对场地动力特性影响的权重并不完全一样,而是与土层本身属性及层间差异都有直接关系,这与本文选取的两个基本特征量是一致的。为此,笔者提出子层周期贡献系数的概念,具体定义为

$$\chi_{i+1} = \frac{T^{i+1} - T^i}{T_{i+1}} \quad (13)$$

式中: T^i 和 T^{i+1} 分别为考虑全部 i 层土和全部 $i+1$ 层土后场地的基本周期; T_{i+1} 为第 $i+1$ 子层按单层精确解公式计算得到的周期; χ_{i+1} 为第 $i+1$ 子层对场地基本周期贡献系数,代表第 $i+1$ 子层周期 T_{i+1} 的真实参与比例。从上述定义可以明显看出对所有场地都有 $\chi_1 = 1$, 满足单层模型边界条件,场地基本周期可以表达为

$$T = \sum \chi_i T_i = 4 \sum \chi_i h_i / v_{si} \quad (14)$$

对比式(1)和式(14)可以看出,本文方法相比传统法最大的改进是加入了子层周期贡献系数的概念,形成了子层周期加权求和的场地周期求解方式。为研究 χ 与阻抗比 α 和周期比 λ 两个特征量之间关系,构建两组两层土模型如表1所示,阻抗比 α 分别取 0.5 和 1.5,通过改变下层土厚度来改变周期比 λ 。计算所得表1中两组阻抗比对应的各3个工况子层周期贡献系数随周期比变化规律分别如图2和图3所示。从图中可以明显看出,无论是上软下硬($\alpha=0.5$)还是上硬下软($\alpha=1.5$),当上下层阻抗比一定时,下层土的周期贡献系数只与两层土间的周期比有关,与子层周期大小无关。

4.3 周期贡献系数与阻抗比和周期比的一般关系

在阻抗比 α 一定的情况下,周期贡献系数 χ 可

由两层土之间的周期比 λ 唯一确定,这是本文方法建立的核心基础。本节主要目的是建立周期贡献系数 χ 与阻抗比 α 和周期比 λ 的一般关系。

表1 α 分别取 0.5 和 1.5 时的计算工况
Table 1 Calculation cases under $\alpha=0.5$ and $\alpha=1.5$

阻抗比 α	上层波速 v_1 /(m/s)	上层厚度 h_1 /m	上层周期 T_1 /s	下层波速 v_2 /(m/s)
0.5	200	10	0.20	400
	160	12	0.30	320
	120	12	0.40	240
1.5	300	15	0.20	200
	450	30	0.27	300
	240	24	0.40	160

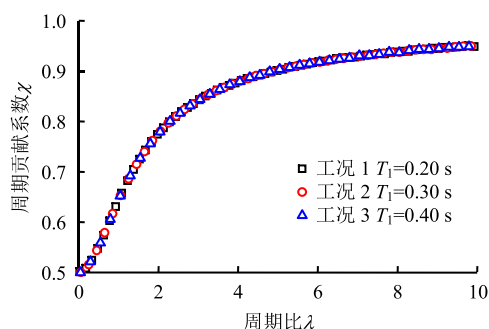


图2 阻抗比 $\alpha=0.5$ 时周期贡献系数随周期比变化
Fig.2 Relationships between period contribution coefficient and period ratio under the case of impedance ratio $\alpha=0.5$

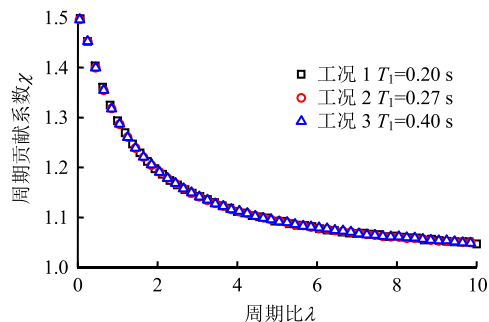
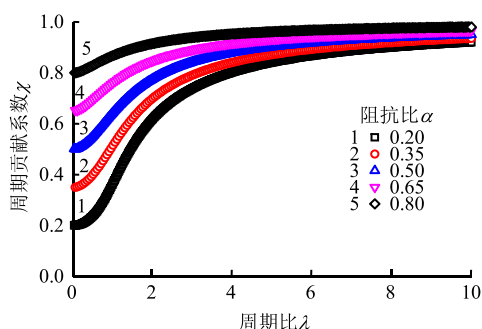
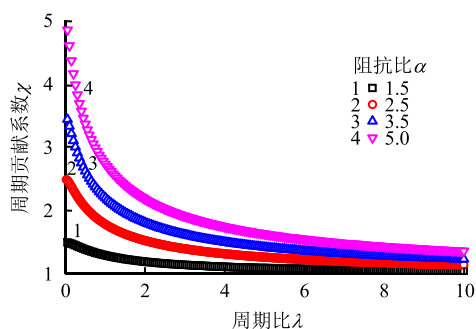


图3 阻抗比 $\alpha=1.5$ 时周期贡献系数随周期比变化
Fig.3 Relationships between period contribution coefficient and period ratio under the case of impedance ratio $\alpha=1.5$

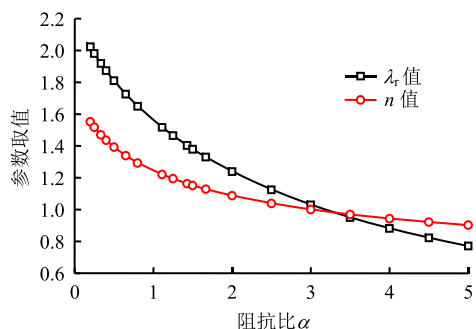
图4和图5分别给出了 $\alpha < 1$ (上软下硬) 和 $\alpha > 1$ (上硬下软) 时不同阻抗比对应的周期贡献系数 χ 随周期比 λ 的变化曲线。通过对图中曲线分布范围及变化趋势分析,笔者尝试了不同曲线拟合方式,最后采用以下双曲线形式对 χ - λ 关系进行拟合:

$$\chi = \alpha + \frac{1 - \alpha}{1 + (\lambda_r / \lambda)^n} \quad (15)$$

式中: λ_r 和 n 分别为参考周期比和线形修正指数,为两个待定参数。

图 4 不同阻抗比下周期贡献系数随周期比变化 ($\alpha < 1$)Fig.4 Relationships between period contribution coefficients and period ratio under the cases of $\alpha < 1$ 图 5 不同阻抗比下周期贡献系数随周期比变化 ($\alpha > 1$)Fig.5 Relationships between period contribution coefficients and period ratio under the cases of $\alpha > 1$

式(15)具有如下特征：①当周期比很小($\lambda \rightarrow 0$)时， χ 值趋近于 α 值；②当周期比很大($\lambda \rightarrow \infty$)时， χ 值趋近于1；③曲线存在渐近线。以上3个特征与图像信息完全吻合，按式(15)对不同阻抗比所对应的曲线进行拟合，得到不同阻抗比 α 对应的 λ_r 和 n 值如图6所示。所有情形下拟合决定性系数 R^2 都在0.99以上，不仅说明式(15)对本问题的适用性，也充分证明了阻抗比 α 和周期比 λ 两个参数对场地周期研究的完备性。

图 6 不同阻抗比下 λ_r 和 n 值拟合结果Fig.6 Reference period ratio λ_r and curve shape correction exponent n under different impedance ratios

从图6可以看出，随着阻抗比的增大，两个参数都呈现良好的规律性递减。采用形如下式的指数函数对参考周期比 λ_r 和线形修正指数 n 与阻抗比 α 之间的关系进行拟合：

$$f(\alpha) = a + bc^\alpha \quad (16)$$

参数取值如表2所示，公式如式(17)、(18)，两组结果 R^2 都非常接近1，保证了结果的可靠性。

$$\lambda_r = 0.49 + 1.60 \times 0.69^\alpha \quad (17)$$

$$n = 0.85 + 0.75 \times 0.55^\alpha \quad (18)$$

表2 λ_r 和 n 值随阻抗比 α 变化曲线拟合参数
Table 2 Curve fitting parameters for reference period ratio λ_r and shape correction exponent n under different α values

参数	a	b	c	R^2
λ_r 值	0.492 5	1.599 2	0.687 0	0.99
n 值	0.851 8	0.746 6	0.553 6	0.99

5 新方法计算步骤

本文方法采用各子层周期加权累加的方式计算场地基本周期(式(14))，考虑到子层周期贡献系数 χ_{i+1} 的确定与 T^i 直接相关，无法一次性给出所有土层的 χ 值，因此在具体操作过程中通过依次增加土层来达到求解的目的，递推公式和初始条件表达如下：

$$T^i = T^{i-1} + \chi_i T_i \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (19)$$

$$T^1 = T_1 = 4h_1 / v_{s1} \quad (20)$$

式中： T^i 为考虑全部1~ i 层土后场地基本周期； T_i 为第 i 层土按单层模型精确解计算得到的子层周期； χ_i 为第 i 子层周期参与累加时的权重。

图7为新方法计算流程图，下面通过一个构造的3层土模型(见图8(a))来演示其详细计算过程，3层土剪切波速分别为100、200、400 m/s，厚度分别为10、10、15 m，按单层模型精确解计算得到的子层周期分别为0.40、0.20、0.15 s，传统法累加求和结果为0.75 s。本文方法具体计算步骤如下：

(1)第2层与第1层之间的波阻抗 $\alpha = 0.5$ ，周期比 $\lambda = 0.5$ ，根据式(17)、(18)分别计算得到参考周期比 $\lambda_r = 1.82$ ，线形修正指数 $n = 1.41$ ，代入式(15)得到第2层土周期贡献系数 $\chi_2 = 0.57$ ，因此，考虑前两层土后场地周期 $T^2 = 0.4 + 0.57 \times 0.2 =$

0.51 s。

(2) 将前两层土等效为均匀单层土 (见图 8(b)), 等效厚度 $H_e = h_1 + h_2 = 20$ m, 等效剪切波速 $v_{sc} = 4H_e / T^2 = 156$ m/s。

(3) 将第 3 层土和前面等效单层土看作两层模型, 波阻抗 $\alpha = 156 / 400 = 0.39$, 周期比 $\lambda = 0.15 / 0.51 = 0.29$, 根据式 (17)、(18) 分别计算得到参考周期比 $\lambda_r = 1.87$, 线形修正指数 $n = 1.45$, 代入式 (15) 得到第 3 层土周期贡献系数 $\chi_3 = 0.43$, 因此, 考虑总共 3 层土后场地周期 $T = T^3 = 0.51 + 0.43 \times 0.15 = 0.58$ s, 传统法结果与此相比偏大 30%。

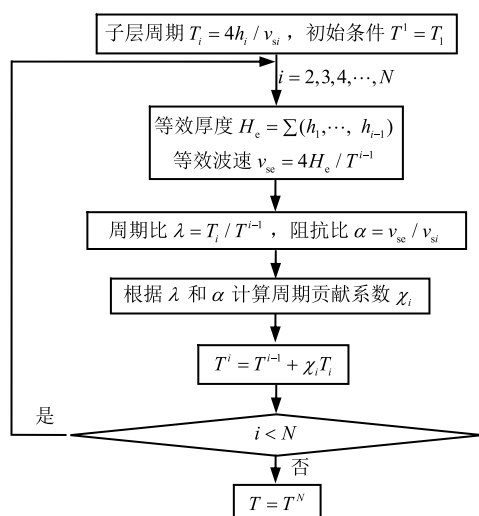


图 7 本文方法计算场地周期流程图

Fig.7 Flow chart of the proposed method for calculating site fundamental period

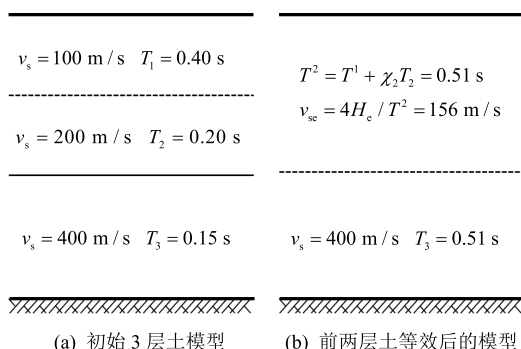


图 8 3 层土模型计算示例

Fig.8 Calculation model composed of three layers

对于多层土模型, 只需按上述计算过程不断增加土层便可很方便地得到整个场地的基本周期。有一个需要注意的细节是阻抗比是上层比下层, 而周期比则是下层比上层。本文方法采用逐层耦合累加计算方式, 当土体密度相差不大时只需要各层土剪切波速和层厚信息, 具有与传统法相同的优势, 通

过 Excel 表格等工具便可轻松实现, 非常便于在工程实践中推广应用。

6 新方法对比检验

6.1 标准值

在不同频率荷载输入下, 场地效应传递函数表为^[19]

$$|H(i\omega)| = \sqrt{\frac{4\xi\omega_0^2\omega^2 + \omega_0^4}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\xi^2\omega_0^2\omega^2}} \quad (21)$$

式中: ω 为动荷载频率; ω_0 、 ξ 分别为场地基频 (与基本周期对应的圆频率) 和阻尼比。

式 (21) 典型的频响曲线如图 9 所示, 从图中可以明显观察到基频附近强烈的放大作用, 也就是说频响曲线最高点所对应的荷载频率即为场地基频, 相应周期即为场地卓越周期。采用波动数值模拟方法确定的场地卓越周期可以认为是其真值, 本文以此为标准值对新方法和已有方法进行对比检验。

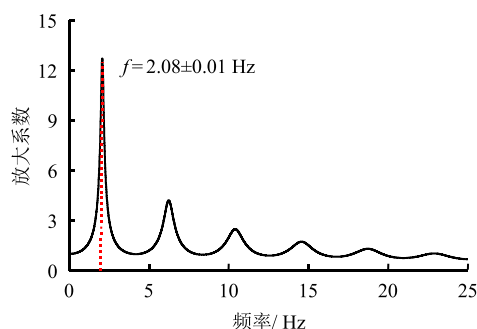


图 9 典型土层场地频响曲线

Fig.9 Typical frequency response curve of layered soil site

6.2 新方法检验

本文以传递函数法结果为标准, 构造不同场地概化模型, 分别采用新方法、传统法和 Hadjian 法开展场地周期计算, 对比分析各简化算法计算结果相对偏差, 以检验本文方法计算结果的可靠性和先进性。

构造场地概化模型分为两类: ①剪切波速分别为 100、200、300、400、500 m/s, 厚度均为 10 m 的 5 层土, 按照数学排列的方式总共生成了 120 组土层剖面, 代表一般情况 (包括含软硬夹层场地); ②剪切波速分别为 30、200、300、400、500 m/s, 厚度均为 5 m 的 5 层土, 按照排列方式共生成了 120 组土层剖面, 代表存在非常软夹层 (例如液化层) 的极端情况。

3 种方法计算得到的场地基本周期与标准值之间的相对偏差如图 10 所示,横坐标场地周期为标准值。从图中可以看出:①土层结构对场地周期影响显著,相同土层不同排列顺序周期可能相差一倍以上;②大多数情况下传统法计算偏差不容忽视,在存在极端软夹层情况下偏差极易大于 20%;③从上往下逐渐变硬的最普遍情况(图 10 最左侧),传统法计算结果明显偏大,最大偏差超 40%;④存在软夹层或软弱下卧层时传统法计算结果严重偏小,存在极端软夹层时低估非常显著,接近 60%;⑤本文方法和 Hadjian 法偏差都比传统法小很多,总体而言本文方法偏差最小,表现更优。

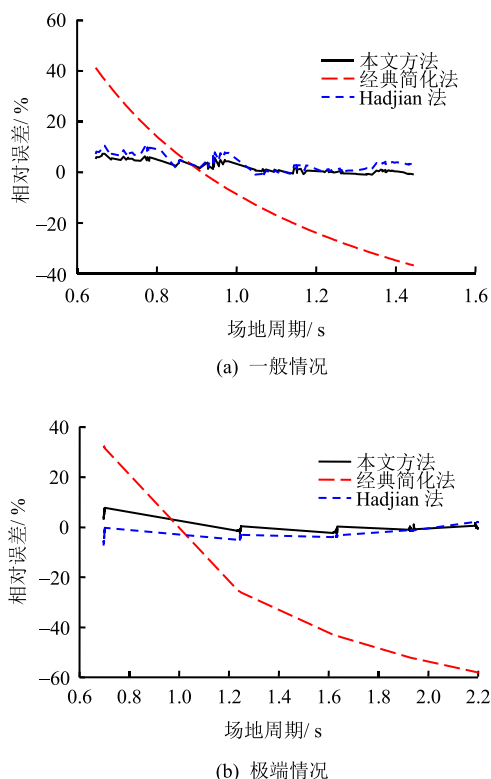


图 10 3 种方法计算所得各场地周期相对偏差
Fig.10 Relative deviations of site periods calculated through the three different simplified procedures

3 种方法计算所得场地周期偏差统计如表 3 和表 4 所示,本文方法与 Hadjian 法细致比较如图 11 所示。从图中可以看出:①在一般情况下,本文方法计算结果偏差最大不超过 8%,并且偏差 2%以下工况数占比 60%以上,偏差在 5%以下工况数占比达到 85%;②一般情况下, Hadjian 法最大偏差超过 10%,偏差 2%以下工况占比仅有 37%,偏差大于 5%以上工况数占比 25%以上;③极端情况下,虽然 Hadjian 法偏差 5%以内的占比 91%,略高于本文方法 86%,但本文方法偏差 2%以内工况占比高达

73%,远大于 Hadjian 法的 32%;(4)从偏差分布形态来看,本文方法偏差集中在小偏差范围内,综合表现明显优于 Hadjian 法。

表 3 3 种方法计算所得场地周期相对偏差:
一般情况 (单位: %)

Table 3 Statistics on relative deviation of site fundamental period calculated by three different methods under general situation (unit: %)

方法	均值	最大值	2%以内占比	5%以内占比
本文方法	2.1	7.3	63	85
传统法	22.2	41.3	5	12
Hadjian 法	3.7	10.4	37	73

表 4 3 种方法计算所得场地周期相对偏差:
极端情况 (单位: %)

Table 4 Statistics on relative deviation of site fundamental period calculated by three different methods under extreme situation (unit: %)

方法	均值	最大值	2%以内占比	5%以内占比
本文方法	1.9	7.7	73	86
传统法	42.3	58.1	0	0
Hadjian 法	3.0	7.4	32	91

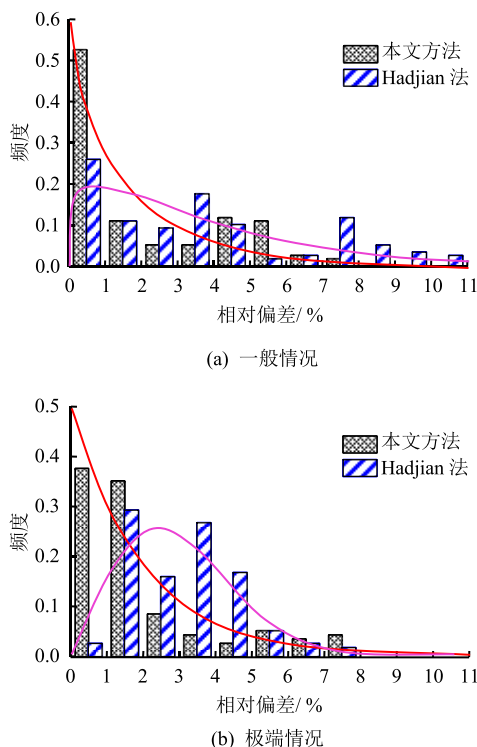


图 11 本文方法和 Hadjian 法相对偏差分布
Fig.11 Relative deviation distributions based on Hadjian's method and the proposed one in this paper

6.3 工程场地应用实例

图 12 所示为美国旧金山湾 Treasure Island^[20]和日本 KiK-net 强震动观测台网 YMNH14 场地剪切波

速剖面,这两个场地分别代表实际软场地和硬场地。依据我国《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)场地类别划分标准^[21], Treasure Island 场地覆盖层厚度 $H = 88$ m, 等效剪切波速 $v_{se} = 169$ m/s, 属于 III 类偏 IV 类软场地; YMNH14 场地覆盖土层厚度 $H = 15$ m, 等效剪切波速 $v_{se} = 192$ m/s, 属于典型 II 类场地。

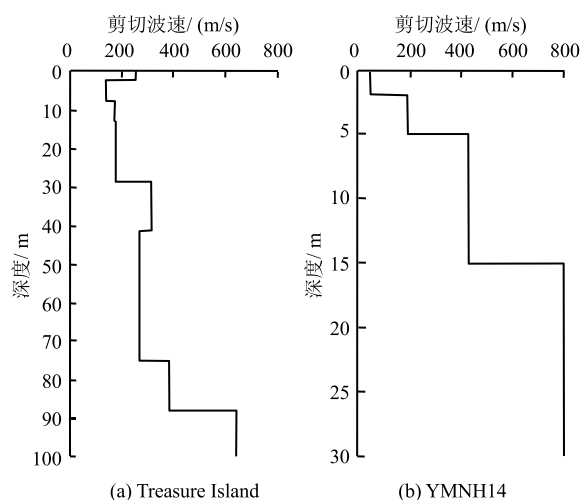


图 12 Treasure Island 和 YMNH14 剪切波速沿深度分布
Fig.12 Shear wave velocity profiles of Treasure Island and YMNH14 sites

按我国场地类别划分标准, 土层剪切波速大于 500 m/s 判定为基岩, 不参与场地周期计算。利用传递函数法、本文方法、Hadjian 法和经典简化法分别计算场地周期, 结果如表 5 所示。以传递函数法为标准, 另外 3 种方法计算结果相对偏差如表 6 所示。表中可以明显看出, 本文方法与传递函数法结果最为接近, 而 Hadjian 法和经典简化法均表现出不同程度的偏差, 特别是经典简化法的偏差不可忽视,

表 5 不同方法计算所得场地周期 (单位: s)
Table 5 Site periods calculated by different methods (unit: s)

方法	Treasure Island	YMNH14
传递函数法	1.248 4	0.196 9
本文方法	1.272 1	0.211 2
Hadjian 法	1.356 4	0.229 9
经典简化法	1.465 7	0.313 0

表 6 场地周期与精确解的相对偏差 (单位: %)
Table 6 Relative deviations of site periods from the exact solution (unit: %)

方法	Treasure Island	YMNH14
本文方法	1.89	7.26
Hadjian 法	8.65	16.75
经典简化法	17.40	58.95

再次体现出本文方法应用于实际工程场地的可行性, 也说明经典简化法在一些情况下的不可靠性。

7 结 论

传统方法将各子层周期简单相加来估计场地基本周期, 方便实用, 但无法体现土层结构的影响。Hadjian 法利用数学手段给出了双层模型周期控制方程近似解, 创造性地通过连续使用该解答来达到求解场地周期的目的, 但其物理含义不够明确。本文所给子层周期加权累加计算方法保留了传统方法计算简便的优势, 且具有明确的物理意义, 采用先进的滚动两层土法来实现, 主要创新和结论如下:

(1) 从波动问题物理本质出发, 提取阻抗比 α 和周期比 λ 作为表征不同土层条件下场地周期变化规律的基本特征量, 并证明了其对相关问题研究具有完备性。

(2) 提出了子层周期贡献系数的概念, 给出了周期贡献系数 χ 可由两层土之间的阻抗比 α 和周期比 λ 唯一确定这一重要结论, 建立了子层周期贡献系数 χ 与阻抗比 α 和周期比 λ 的一般关系。

(3) 形成了一套全新的成层场地基本周期估算方法, 并以传递函数法计算结果为标准对本文方法、传统法和 Hadjian 法进行了对比, 分析了各简化方法的偏差和适用性。

(4) 子层周期独立求和的传统简化方法, 大多数情况偏差不容忽视, 对最普遍的渐硬型场地最大偏差可达到 40%, 对存在极端软夹层情况其偏差极易大于 20%。

(5) 与传递函数法标准值相比, 本文方法完全满足工程精度要求, 对一般情况和极端情况, 最大偏差均不超过 8%, 偏差小于 5% 工况数占比均达到 85% 以上, 偏差小于 2% 工况数占比均达到 60% 以上, 明显高于 Hadjian 简化法, 对实际场地对比情况也是如此。

参 考 文 献

- [1] SEED H B, ROMO M P, SUN J I, et al. The Mexico earthquake of September 19, 1985—relationships between soil conditions and earth-quake ground motions[J]. *Earthquake Spectra*, 1988, 4(4): 687—729.
- [2] HANKS T C, BRADY A G. The Loma Prieta earthquake, ground motion, and damage in Oakland, Treasure Island, and San Francisco[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1991, 81(5): 2019—2047.
- [3] KIM B, HASHASH Y M A. Site response analysis using downhole array recordings during the March 2011

- Tohoku-Oki earthquake and the effect of long-duration ground motions[J]. **Earthquake Spectra**, 2013, 29(Suppl.1): 37—54.
- [4] 李瑞山. 新一代土层地震反应分析方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2016.
- LI Rui-shan. Research on a new generation technique for ground seismic response analysis[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2016.
- [5] DIKMEN S Ü, TANIRCAN G. Site amplification and resonance frequency in the urban environment[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2018, 105: 160—170.
- [6] KWAK D Y, STEWART J P, MANDOKHAIL S J, et al. Supplementing VS30 with H/V spectral ratios for predicting site effects[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2017, 107(5): 2028—2042.
- [7] ZHAO J X, XU H. A comparison of VS30 and site period as site-effect parameters in response spectral ground-motion prediction equations[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2013, 103(1): 1—18.
- [8] 熊建国, 许贻燕. 分层土自振特性分析[J]. 地震工程与工程振动, 1986, 6(4): 21—35.
- XIONG Jian-guo, XU Yi-yan. Analysis of the behavior of natural vibration of layered soil deposits[J]. **Chinese Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1986, 6(4): 21—35.
- [9] 邓亚虹, 夏唐代, 彭建兵, 等. 水平层状场地自振频率的剪切质点系法研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2489—2494, 2500.
- DENG Ya-hong, XIA Tang-dai, PENG Jian-bing, et al. Research on shear particle system method of natural frequency of horizontal layered soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(8): 2489—2494, 2500.
- [10] YAMAZAKI F, ANSARY M A. Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization[J]. **Earthquake Engineering and Structural Dynamics**, 1997, 26(7): 671—689.
- [11] ZHAO J X, IRIKURA K, ZHANG J, et al. An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response spectral ratio[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 2006, 96(3): 914—925.
- [12] WEN R Z, REN Y F, SHI D C. Improved HVSr site classification method for free-field strong motion stations validated with Wenchuan aftershock recordings[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2011, 10(3): 325—337.
- [13] MOTAZEDIAN D, HUNTER J A, PUGIN A, et al. Development of a V_{S30} (NEHRP) map for the city of Ottawa, Ontario, Canada[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2011, 48(3): 458—472.
- [14] 李瑞山, 袁晓铭, 吴晓阳. 抗震规范等效剪切波速简化算法适用性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(3): 30—36.
- LI Rui-shan, YUAN Xiao-ming, WU Xiao-yang. Study on the applicability of simplified equivalent shear wave velocity calculation method in seismic design code[J]. **Chinese Journal of Earthquake Engineering and Engineering Dynamics**, 2018, 38(3): 30—36.
- [15] DOBRY R, OWEIS I, URZUA A. Simplified procedures for estimating the fundamental period of a soil profile[J]. **Bulletin of the Seismological Society of America**, 1976, 66(4): 1293—1321.
- [16] HADJIAN A H. Fundamental period and mode shape of layered soil profiles[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2002, 22(9—12): 885—891.
- [17] 齐文浩, 薄景山, 刘红帅. 水平成层场地基本周期的估算公式[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4): 779—784.
- QI Wen-hao, BO Jing-shan, LIU Hong-shuai. Fundamental period formula for horizontal layered soil profiles[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(4): 779—784.
- [18] 廖振鹏. 工程波动理论导论[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2002: 51.
- LIAO Zhen-peng. Introduction to wave motion theories for engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002: 51.
- [19] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 2版. 北京: 地震出版社, 2006: 145.
- HU Yu-xian. Earthquake engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press, 2006: 145.
- [20] GIBBS J F, FUMAL T E, BOORE D M, et al. Seismic velocities and geologic logs from borehole measurements at seven strong-motion stations that recorded the Loma Prieta earthquake[R]/U.S. Geological Survey Open-File Report. [S. l.]: [s. n.], 1993.
- [21] 中国建筑科学研究院. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- China Academy of Building Research. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.