

水平成层场地基本周期的估算公式

齐文浩¹, 薄景山², 刘红帅¹

(1. 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 防灾科技学院防灾工程系, 河北 三河 065201)

摘要: 针对已有场地基本周期简化公式不适用含软夹层场地的问题, 从振动的角度推导出能反映土层结构影响的场地基本周期估算公式。根据自振周期相等的原则, 推导出单层土场地简化为单自由度体系的等效高度系数; 以水平成层场地中任一土层厚度与这一系数之积作为体系高度, 将场地简化为相应的单自由度体系, 定义体系的自振周期为该土层的贡献基本周期, 场地中所有土层贡献基本周期的平方和开平方即为场地的基本周期, 并推导出相应的计算公式。检验结果表明, 所推导公式不仅能够合理地反映土层结构对场地基本周期的影响, 而且对实际工程场地基本周期的估算结果亦较已有公式的结果更接近地脉动测试结果。公式可用于估算水平成层场地的基本周期。

关键词: 水平成层场地; 基本周期; 单自由度体系; 土层结构; 等效高度系数

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2013)04 - 0779 - 06

作者简介: 齐文浩(1979 -), 男, 河南南阳人, 副研究员, 从事土动力学和岩土地震工程研究。E-mail: qwhtky@163.com。

Fundamental period formula for horizontal layered soil profiles

QI Wen-hao¹, BO Jing-shan², LIU Hong-shuai¹

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080,

China; 2. Department of Disaster Prevention Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China)

Abstract: The current formula can not calculate the fundamental periods of the sites containing soft soil layers accurately. In order to solve the problem, a fundamental period formula for a horizontal layered site, on which the effect of soil layer construction is considered, is deduced based on the vibration theory. According to the rules of natural vibration periods being equal, a single layer site is simplified into a SDOF system by means of the lumped mass method, and the equivalent height coefficient between their heights is deduced. A horizontal multi-layer site can be simplified into a SDOF system based on any one soil layer, and the height of the SDOF system is equal to that of the soil layer multiplied by the equivalent height coefficient. The natural vibration period of the SDOF system is called contributing fundamental period of the soil layer here, and the fundamental period of the site should be equal to the square root of sum square (SRSS) of the contributing fundamental periods of all the soil layers in the site, and its formula is also deduced. The test results show that (a) the proposed formula can reflect the effect of soil layer construction on fundamental periods of sites very well, and (b) by comparing the calculated fundamental periods with the test ones of 5 engineering sites by use of the microtremor method, the proposed formula is of higher accuracy and reliability than the current formula. A conclusion is drawn that the deduced formula can be adopted to estimate the fundamental period of a layered horizontal site.

Key words: layered horizontal site; fundamental period; SDOF system; soil layer structure; equivalent height coefficient

0 引 言

基本周期是场地的一种固有特性^[1]。震害调查表明, 凡建筑物的自振周期与场地的基本周期相等或接近时, 由于共振作用, 建筑物的震害都有加重的趋势, 为避免这种震害的发生, 在建筑抗震设计中, 应使建筑物的自振周期避开场地的基本周期^[2]。因而合理地估算场地的基本周期对于提高建筑物概念设计水平、减轻建筑物震害和科学解释典型震害具有重要的理论意义和工程价值。

求解场地基本周期的方法较多^[3-5], 主要有直接测定法(如地脉动法)和波速法(如加权平均波速法、子层周期求和法、瑞利波法、传递函数法、传递矩阵法和机械阻抗法等), 其中很多方法由于操作繁琐或应用范围受限等原因并没被工程界采用。当前, 除了直接测定法之外, 工程上广泛采用简化算法, 如《工程

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808164, 50978237)

收稿日期: 2012 - 06 - 18

地质手册》^[1]中推荐的子层周期求和法(6-6-7式),其计算公式(本文称“已有公式”)如下:

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{4h_i}{v_i} \quad (1)$$

式中, T 为场地基本周期, h_i 和 v_i 分别为第 i 土层的厚度和剪切波速, N 为场地土层层数。该法直接把各土层的子周期代数相加,具有一定的物理意义,其中子层周期公式采用 Dobry 提出的单层土的基本周期解析解^[6]:

$$T = \frac{4H}{v} \quad (2)$$

式中, T 为场地基本周期, H 为场地厚度, v 为剪切波速。除此之外,加权平均波速法^[3]在工程上也有一定应用,它采用土层剪切波速按厚度加权平均的办法把多层土等效为单层土后,应用式(2)求解场地基本周期,但该法的物理意义不明确。故本文以子层周期求和法作为已有方法进行评价讨论,而不过多涉及加权平均波速法。

对于一般工程场地的基本周期,已有公式计算结果的精度一定程度上可满足工程需求,但是其误差不容忽视。有关统计结果表明,加权平均波速法的推算结果比真值约小20%,而子层周期求和法的结果比真值大20%左右^[4]。林通^[7]指出已有公式的另一不合理之处,即其推算的场地基本周期并不随软夹层位置的变化而改变。是什么因素导致了已有公式存在上述问题?目前相关研究尚鲜见,不过从式(1)本身可以发现其症结所在:它只是场地各子层周期的代数和,并不考虑各子层的排列顺序,即已有公式不能考虑土层结构对场地基本周期的影响。所以有必要对能真正反映场地自振特性的场地基本周期估算方法进行研究。本文基于单自由度体系振动理论,通过把水平成层场地逐层单自由度化,推导能够反映土层结构影响的场地基本周期公式。

1 单层土单自由度化的等效高度系数

对于任意均匀水平单层土,其最大剪切模量与剪切波速 v 和密度 ρ 存在如下关系:

$$G = \rho v^2 \quad (3)$$

对于该土层中面积为 A 、高为 h 的土柱,其顶面在微小剪力 F_s 作用产生微小位移 d ,土柱可视为线弹状态,如图1所示。则土柱中产生的剪应力 τ 、剪应变 γ 可分别表示为

$$\tau = \frac{F_s}{A} = G\gamma \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{d}{h} \quad (5)$$

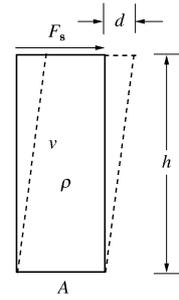


图1 土柱微变形示意图

Fig. 1 Tiny deformation of a soil column

参考式(3)~(5),土柱侧移刚度 k 为

$$k = \frac{F_s}{d} = \frac{\rho v^2 A}{h} \quad (6)$$

利用集中质量法可把该单层土中的土柱简化为等效的单自由度体系(图2),等效的原则是土柱的基本周期与单自由度体系的自振周期相等。设单自由度体系的等效质点质量为 m_e ,等效刚度为 k_e ,等效高度为 h_e 。

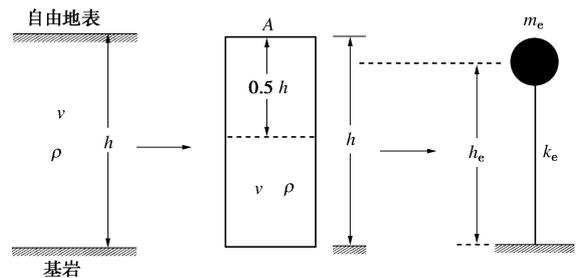


图2 单层土简化为单自由度体系示意图

Fig. 2 A single-layer site being simplified into a SDOF system

那么等效质点质量 m_e 应取土柱上半部分的质量,即

$$m_e = 0.5\rho h A \quad (7)$$

等效高度 h_e 代入式(6)可得等效刚度 k_e ,所简化的单自由度体系的自振周期可表示为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{k_e}} = \sqrt{2}\pi \frac{\sqrt{hh_e}}{v} \quad (8)$$

根据上述等效原则,比较式(8)与式(2)可得

$$h_e = \frac{8}{\pi^2} h \quad (9)$$

本文定义 $\alpha = \frac{8}{\pi^2}$ 为等效高度系数。 $\alpha \approx 0.8$,这说明

利用集中质量法将单层土简化成等效的单自由度体系时,体系的等效高度并不等于土层厚度,而略小于土层厚度。

2 土层贡献基本周期及场地基本周期

2.1 土层贡献基本周期

对于任一 N 层的水平成层自由场地 (图 3), 设其中任意第 n ($1 \leq n \leq N$) 土层的厚度为 h_n , 密度为 ρ_n , 剪切波速为 v_n , 则该土层中截面积为 A 的土柱的质量 m_n 为

$$m_n = \rho_n h_n A \quad (10)$$

根据第 i ($1 \leq i \leq N$) 土层, 利用集中质量法将第 i 土层至地表的场地按图 3 所示简化为单自由度体系。

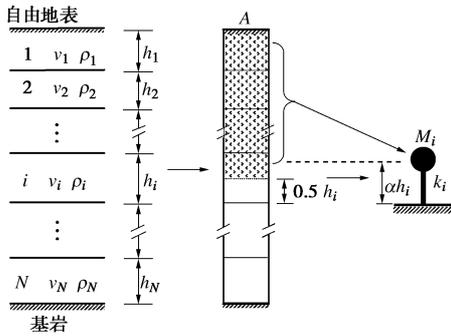


图 3 场地根据第 i 层土简化为单自由度体系

Fig. 3 A site being simplified into a SDOF system according to i th soil layer

体系的集中质量 M_i 为第 i 层中点至地表所有土柱的质量:

$$M_i = \sum_{n=1}^i \rho_n h_n A - 0.5 \rho_i h_i A \quad (11)$$

参考式 (9) 可知体系等效高度应为 αh_i , 根据式 (6) 可得到体系的侧移刚度 k_i :

$$k_i = \frac{\rho_i v_i^2 A}{\alpha h_i} \quad (12)$$

所简化单自由度体系的自振周期 T_i 可表示为

$$T_i = 2\pi \sqrt{\frac{M_i}{k_i}} = \sqrt{32 \frac{h_i (\sum_{n=1}^i \rho_n h_n - 0.5 \rho_i h_i)}{\rho_i v_i^2}} \quad (13)$$

本文定义 T_i 为第 i 土层的贡献基本周期。

2.2 场地基本周期公式

按上述思路, 把水平成层自由场地从第 1 层至第 N 层分别逐层单自由度化, 由式 (13) 获取不同土层的贡献基本周期, 所有土层贡献基本周期的平方和开平方 (SRSS 法) 即为场地的基本周期:

$$T = \sqrt{\sum_{i=1}^N T_i^2} = \sqrt{32 \sum_{i=1}^N \frac{h_i (\sum_{n=1}^i \rho_n h_n - 0.5 \rho_i h_i)}{\rho_i v_i^2}} \quad (14)$$

式中, T 为场地基本周期 (s), N 为场地土层层数, v_i 为第 i 层的剪切波速 (m/s), ρ_i, ρ_n 分别为第 i, n ($n \leq i$) 层的密度 (二者单位统一即可), h_i, h_n 分别为第 i, n 层的厚度 (m)。

2.3 场地基本周期简化公式

实际工程经验表明, 大部分土类的密度近似相等, 即 $\rho_i \approx \rho_n$, 据此, 式 (13)、(14) 可分别简化为

$$T_i = \frac{4h_i}{v_i} \sqrt{\frac{2H_i}{h_i}} \quad (15)$$

$$T = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{4h_i}{v_i} \right)^2 \frac{2H_i}{h_i}} \quad (16)$$

式中, $H_i = \sum_{n=1}^i h_n - h_i$, 为第 i 土层的中点深度。式 (16)

为场地基本周期简化公式, 该公式形式简单, 便于工程应用, 称之为“本文公式”。

比较式 (1) 和式 (16) 可以看出, 本文公式与已有公式具有不同的形式, 但是, 两个公式都考虑了子层周期对场地基本周期的影响, 即土层越厚, 剪切波速度愈低 (即土层愈松软), 则基本周期愈长, 这符合当前地震工程界的共识; 并且, 当 $N=1$ 时, 式 (16) 退化式 (2), 即对于单层土, 本文公式与已有公式完全相同。但是, 本文公式与已有公式具有不同的形式, 本文公式是经深厚比加权后的子层周期平方和开平方的形式, 而不是已有公式的子层周期的简单代数相加, 即, 本文公式除子层周期外, 还考虑了场地中每一土层的埋深对场地基本周期的影响, 在土层厚度和剪切波速不变的情况下, 软夹层的埋深越大, 场地基本周期越大, 场地亦越软, 这也符合地震工程界当前的认识, 这一点恰是已有公式所不具备的。

3 典型土层结构场地模型的检验

为检验本文公式是否能够合理反映土层结构对场地基本周期的影响, 构造典型的土层结构场地模型作为测试场地进行计算。由于这类场地缺乏基本周期的实测资料, 本文研究选择传递函数法得到的场地基本周期作为检验标准, 来检验本文公式和已有公式的可靠性。以下简要说明选用传递函数法的结果作为检验标准的依据。

3.1 传递函数法求解场地基本周期

场地传递函数幅值谱的峰值对应的周期 (或频率) 值就是场地的基本周期, 所以在场地基本周期的研究中, 传递函数法也是一种常用的方法。其原理^[8]如下: 一个体系的加速度传递函数 $H(i\omega)$ 的幅值 $|H(i\omega)|$ 可表示为

$$|H(i\omega)| = \sqrt{\frac{4\xi^2 \omega_0^2 \omega^2 + \omega_0^4}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\xi^2 \omega_0^2 \omega^2}} \quad (17)$$

式中, ω 为频率, ω_0, ξ 分别为体系的固有频率和阻尼比。 $|H(i\omega)|$ 表示体系反应与输入的傅里叶谱幅值之

比。由公式(17)可知,当 $\omega = \omega_0$ 时, $|H(i\omega)|$ 取极大值(峰值)。故 $|H(i\omega)| - \omega$ 关系曲线的峰值对应的周期(频率)即为体系的基本周期。

对于一个水平成层场地的具体体系,其加速度传递函数幅值 $|H(i\omega)|$ 按下式确定:

$$|H(i\omega)| = \frac{\left| \int x(t)e^{-i\omega t} dt \right|}{\left| \int y(t)e^{-i\omega t} dt \right|}, \quad (18)$$

式中, $x(t)$, $y(t)$ 分别为基底输入地震动加速度时程和经过土层地震反应分析^[9]得到的地表加速度时程, $\left| \int x(t)e^{-i\omega t} dt \right|$, $\left| \int y(t)e^{-i\omega t} dt \right|$ 分别为 $x(t)$, $y(t)$ 的傅里叶谱的幅值。依据 $|H(i\omega)| - \omega$ 关系曲线的峰值对应的周期(频率)可得到场地的基本周期。

从上述原理可知,传递函数法基于共振放大效应求解场地的基本周期,其结果为场地的真实基本周期。故传递函数法得到的场地基本周期可作为标准来检验其它方法的合理性。

3.2 典型土层结构场地模型及其基本周期

典型土层结构场地模型构造如下:利用剪切波速分别为100, 200和300m/s、厚度均为5m的3层均匀土层,按不同的排列顺序,分别构造了软夹层(No.1层)在剖面上部、中部、下部的 a , b , c 3个典型土层结构的场地模型(图4)。

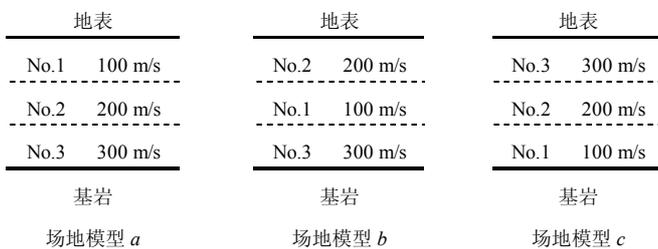


图4 3层土组成的典型的不同的土层结构场地模型

Fig. 4 Three typical site models with different soil layer structures based on three soil layers

分别用本文公式、已有公式和传递函数法计算 a , b , c 3个场地模型的基本周期(表1),计算结果显示如下规律:①随着软夹层位置在场地剖面中下移,传递函数法的结果有变大的趋势,这表明场地基本周期随着土层结构的变化而改变;②本文公式的结果也很好反映了场地基本周期随着软夹层位置下移而变大的这一趋势,并且与传递函数法的结果吻合较好;③由于组成3个场地的土层完全相同,无论软夹层位置怎么移动,已有公式的结果始终保持不变。

上述规律说明了本文公式不但能够很好反映土层结构对场地基本周期的影响,并且计算结果接近场地的真实基本周期,同时也再现了已有公式不能反映土层结构对场地基本周期的影响这一不合理之处。

表1 土层结构场地模型基本周期的计算结果

Table 1 Calculated fundamental periods of three site models with soil layer structures

计算方法	场地模型 a		场地模型 b		场地模型 c	
	周期/s	误差/s	周期/s	误差/s	周期/s	误差/s
传递函数法	0.271	标准	0.455	标准	0.594	标准
本文公式	0.296	0.025	0.402	0.043	0.513	0.081
已有公式	0.300	0.029	0.300	0.145	0.300	0.294

4 地脉动测试结果的检验

为进一步验证本文公式在工程应用中的可靠性,选用实际工程场地的地脉动测试资料进行检验。本文检验选用的同时具有地脉动测试资料和钻孔土层剪切波速测试资料的5个工程场地均来自于已通过专家评审的西安市阎良区地震小区划工作^[10]。

4.1 场地条件概况

阎良区小区划范围内地势开阔平坦,地貌单元属渭河冲洪积河谷平原。依据小区划范围内22个控制性工程地质钻孔(剪切波速>500m/s,深度约90m)揭示的地层岩性、岩土体结构、物理力学性质综合分析结果,将小区划范围划分为M1、M2、M3、M4和M5共5个工程地质单元,各工程地质单元的场地特征简要描述见表2。

表2 5个工程地质单元的场地特征

Table 2 Site characteristics of 5 engineering geological units

工程地质单元	场地特性
M1	地形平坦开阔。上部 Q4 黄土状土夹细砂层,黄土状土,可塑,细砂层,中密。下部粉质黏土,可塑偏硬。
M2	地形平坦开阔。上部 Q4 黄土状土,可塑。下部粉质黏土,可塑—硬塑。
M3	地形平坦开阔,略有起伏。上部 Q4 黄土状土,可塑~软塑。下部粉质黏土,可塑—软塑。
M4	地形平坦开阔。上部 Q4 黄土状土,可塑—软塑。下部粉质黏土、细砂、卵砾石,粉质黏土,可塑—软塑,细砂、卵砾石,密实。
M5	地形平坦开阔。上部 Q4 黄土状土,可塑。下部粉质黏土、细砂、卵砾石,粉质黏土,可塑,细砂、卵砾石,密实。

4.2 地脉动测试结果及对两种计算公式的检验

由于同一工程地质单元内土层特性和土层结构基本相同,工程地质单元内各场地的自振特性也基本相同,故阎良区小区划工作在每一工程地质单元上只选择一个钻孔作为代表,对其场地进行了地脉动测试,对采集的地脉动数据采用频谱分析法进行处理,得到场地基本周期。为方便表述,本文所选用的5个代表性钻孔的编号分别取各自所在工程地质单元的编号:M1、M2、M3、M4和M5。

从钻孔土层剪切波速沿深度分布(图5)来看,

这5个钻孔的基岩面埋深均较大(约90 m), 根据《工程地质手册》^[1]的规定, 这种情况下场地基本周期可计算至30~50 m, 本文中计算深度取其上限30 m. 分别采用本文公式和已有公式估算这5个场地的基本周期, 并以M1场地为例, 以表格形式给出了利用本文公式求解场地基本周期的计算过程(表3), 即, 根据计算深度内每一土层的层底深度 D_i 和土层剪切波速 v_i 这两个已知参数, 自上而下分别求出各土层的

层厚 h_i 、层中点深度 H_i 、 $\left(\frac{4h_i}{v_i}\right)^2 \frac{2H_i}{h_i}$ 等参数, 进

而得到M1场地基本周期为0.392s, 结果列于表4. 其它钻孔场地的基本周期也按同样的方法计算给出, 结果也列于表4. 为了方便比较, 这5个场地基本周期的地脉动测试结果和已有公式的计算结果也一并列于表4.

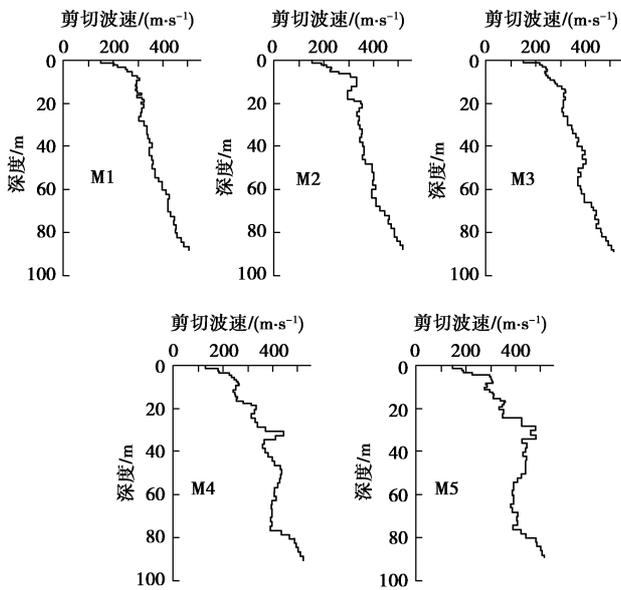


图5 代表性钻孔土层剪切波速沿深度分布

Fig. 5 Distribution of shear wave velocity of soil layer along depth of five representative boreholes

对比这个5场地基本周期的地脉动实测值与两个公式的计算值(表4)可以看出:

(1) 与场地基本周期的地脉动实测结果相比, 每个场地的基本周期估算结果, 本文公式的误差均比已有公式的误差小得多, 其中本文公式的误差最大为12%, 最小为1.7%, 而已有公式的误差最大为21.4%, 最小为8.2%.

(2) 尽管场地基本周期公式的计算深度采用了规定深度范围的上限值(最小值), 对这几个场地的基本周期, 已有公式的计算结果仍然都要比实测结果大, 这与文献[4]中的统计结果一致. 上述结果说明, 在实

际工程场地的基本周期估算应用中, 本文公式的估算结果较已有公式的结果更加接近实测值, 即本文公式较已有公式更加合理可靠. 另外也发现, 场地基本周期的计算深度的取值也是一个需要慎重考虑和专门研究的问题.

表3 本文方法求解M1场地基本周期计算过程

Table 3 Calculation process of fundamental period of site M1 by proposed method

土层序号	层底深度 D_i /m	剪切波速 v_i /(m·s ⁻²)	层厚 h_i /m	层中点深度 H_i /m	$\left(\frac{4h_i}{v_i}\right)^2 \frac{2H_i}{h_i}$ /s ²
1	1	151	1	0.5	7.01×10^{-4}
2	2	203	1	1.5	1.16×10^{-3}
3	3	217	1	2.5	1.70×10^{-3}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
25	27	302	1	26.5	9.31×10^{-3}
26	30	322	3	28.5	2.64×10^{-2}

$$\sum_i \left(\frac{4h_i}{v_i}\right)^2 \frac{2H_i}{h_i} = 1.54 \times 10^{-1} \text{ s}^2$$

$$T = \sqrt{\sum_i \left(\frac{4h_i}{v_i}\right)^2 \frac{2H_i}{h_i}} = 0.392 \text{ s}$$

表4 场地基本周期地脉动测试结果与计算结果

Table 4 Fundamental periods of ground micro-tremor and calculated fundamental periods

地脉动测点	场地基本周期获取方法及误差				
	地脉动(标准)/s	本文方法/s	误差/%	已有方法/s	误差/%
M1	0.35	0.392	12.0	0.425	21.4
M2	0.38	0.372	-2.1	0.411	8.2
M3	0.36	0.395	9.7	0.433	20.3
M4	0.41	0.403	-1.7	0.454	10.7
M5	0.33	0.324	-1.8	0.377	14.2

5 结 语

通过把水平成层场地逐层单自由度化, 利用单自由度体系的周期公式推导出了场地基本周期估算公式, 所推导公式形式比较简单, 它不仅能考虑土层剪切波速和厚度这两个因素的影响, 还可考虑土层埋深因素的影响, 从形式上解决了已有的场地基本周期公式不能考虑土层结构影响的问题. 利用典型土层结构场地模型检验结果表明, 本文公式不仅能够合理反映软夹层在剖面中位置变化对场地基本周期的影响规律, 而且与传递函数法的结果吻合; 对于实际工程场地基本周期的估算结果, 以地脉动测试结果为基准, 本文公式显示出较已有公式更高的精度和可靠性. 本文公式的上述特点说明它适合作为估计场地基本周期的参考公式为工程服务. 在研究中还发现传统做法中

的一些问题: ①利用集中质量法对土层离散时, 顶层土对应的质点高度通常被取为整个土层厚度, 而本文研究发现这一高度应该取其层厚的约 0.8 倍; ②地脉动法的有效测试深度应该重新界定, 以提高估算场地基本周期的精度。

致 谢: 中国地震局工程力学研究所田启文研究员对本文工作进行了指导并提出了宝贵建议, 在此致谢。

参考文献:

- [1] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (Editorial Board of Engineering Geology Manual. Engineering geology manual[M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2006. (in Chinese))
- [2] 薛素铎, 赵 均, 高向宇. 建筑抗震设计[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2007. (XUE Su-duo, ZHAO Jun, GAO Xiang-yu. Seismic design of building[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [3] 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. (in Chinese))
- [4] 童广才, 刘康和. 场地卓越周期的确定[J]. 电力勘测, 2000, 2: 43 - 46. (TONG Guang-cai, LIU Kang-he. Determine predominant period of site[J]. Chinese Journal of Electric Power Survey, 2000, 2: 43 - 46. (in Chinese))
- [5] MOTAZEDIAN D, BANAB K K, HUNTER J A, et al. Comparison of site period derived from different evaluation methods[J]. BSSA, 2011, 101(6): 2942 - 2954.
- [6] DOBRY R, OWEIS I, URZUR A. Simplified procedures for estimation the fundamental period of a soil profile[J]. BSSA, 1976(4): 1293 - 1321.
- [7] 林 通. 场地自振周期计算方法的比较[J]. 福建建筑, 2009, 129(3): 70 - 71. (LIN Tong. The comparison of some solution used in natural ground period calculate[J]. Chinese Journal of Fujian Architecture & Construction, 2009, 129(3): 70 - 71. (in Chinese))
- [8] 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: Earthquake Press, 2006: 145. (in Chinese))
- [9] IDRIS I M, SEED H B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 1968, 94(4): 1003 - 1034.
- [10] 中国地震局工程力学研究所. 西安市阎良区地震小区划工作报告[R]. 西安: 中国地震局工程力学研究所, 2007. (Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration. Seismic microzonation report of Yanliang district, Xi'an[R]. Xi'an: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2007. (in Chinese))