DOI:10. 19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2018. 02. 008

考虑基岩影响的场地自振特性

范留明,谢 超,赵 钦

(西安理工大学 土木建筑工程学院,陕西 西安 710048)

摘要:建筑物与工程场地之间发生共振效应,是产生震害的一个主要原因。为了使建筑物避免与场地发生共振,开展工程场地自振特性的研究是非常必要的。但是,目前对场地自振特性研究普遍将下卧层基岩视为绝对刚性体,忽略场地土体与其下卧基岩之间的相互作用,这一假设与实际情况并不相符。为此,本文提出一种可以考虑基岩影响的计算场地自振周期方法。该方法假定场地基岩为无限大半空间弹性体,将不同周期简谐波作为从基岩入射至土层中的地震波,应用界面子波方法计算地面地震反应,根据最大反应值与谐波周期组成的反应谱确定场地自振周期。为了区别于地震工程中单自由度体系的地震反应谱法,本文称此计算方法为谐波激励谱法。应用此方法计算了某工程场地的自振周期,所得计算结果与文献资料非常吻合,据此验证了此方法的正确性。在此基础上,通过改变基岩波阻抗参数,计算得到考虑基岩影响的场地自振周期,研究了基岩对场地自振特性的影响。研究表明,尽管基岩变形性质不会影响场地自振周期的取值,但是却增大了其影响振特性的影响。研究表明,尽管基岩变形性质不会影响场地自振周期的取值,但是却增大了其影响范围,对设计建筑物避让场地自振周期带来不利的影响。

关键词:自振周期;谐波激励谱;界面子波;基岩影响

中图分类号: P631.4+14 文献标志码: A 文章编号: 1006-4710(2018)02-0172-06

Natural vibration properties of engineering sites considering bedrock effect

FAN Liuming, XIE Chao, ZHAO Qin

(School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The resonance effect between the building and its site is one of the main reasons for the earthquake hazards. It is essential to study the natural vibration properties of the site to avoid resonance. However, the underlying bedrocks are generally regarded as an absolute rigid body when the conventional methods are used to ascertain the natural vibration properties of engineering sites. It is not always conformed with factual cases for which the interaction between rock and soil is neglected. For this reason, a method for calculating the natural vibration period of sites is presented, which can be used to consider the effects of the bedrock. The method can achieve the response spectrum composed by the maximum response value and the corresponding harmonic cycle, with maximum response values calculated by the interfacial wavelet algorithm under the action of different periods of harmonic wave from the bedrock, which is assumed as an infinite elastic half space. The response spectrum is called harmonic exciting spectrum with which to distinguish the seismic response spectrum for the single degree of freedom system in earthquake engineering. The method is used to calculate the natural vibration period of a project site, with the calculating results agreeing with the reference data. By changing the wave impedance parameters of bedrock, the natural vibration properties of the site considering bedrock effect are studied. Research shows that the values of natural vibration period of the site is not affected by bedrock deformation, but it can expand its influence scope. The conclusion is of adverse effects on building design avoiding resonance effect.

Key words: natural vibration period; harmonic exciting spectrum; interfacial wavelet; bedrock effect

收稿日期: 2017-03-23

基金项目: 陕西省社发攻关资助项目(2012K12-03-05)

作者简介:范留明,男,博士,教授,研究方向为岩土工程行波作用。E-mail:liuming_fan@163.com

地震是危及人民生命财产的突发式自然灾害,而大量的建筑震害是由于结构物与场地地基的共振或类共振效应引起的。当建筑结构的自振周期与场地自振周期接近或一致时,两者构成的系统在地震过程中产生共振作用,使振动幅值变大,导致建筑物发生严重损坏[1]。由于共振作用而被放大的场地自振周期称为卓越周期。

为了避免地面建筑物与地基土在地震时产生共 振,需要研究场地自振特性,而准确估算场地的自振 周期是其关键。目前,确定场地自振周期的方法大 致分为直接测定法和波速法两大类[2-3]。直接测定 法[4-5] 是通过对强震记录或地脉动记录进行 Fourier 分析得到自振周期,但这类方法需要良好的强震或 震动记录信息,且容易受场地局部条件的限制或人 为因素的干扰。在实际工程中,波速法的应用最为 广泛。波速法又可细分为简化法、解析法[6-7]和数值 法[8]三种。通过对各种自振周期计算方法比较发 现[9],虽然这些方法各有优势,但是同时也存在不足 之处,普遍问题是方法本身的假设过于理想化,对场 地的地层结构、土性特点、土层与基岩的相互作用等 问题考虑不足。为此,作者提出一种考虑基岩影响 的场地自振周期的计算方法,期望对解决上述问题 的研究工作中起到抛砖引玉的作用。

1 场地谐波激励谱法

对给定场地输入不同周期的简谐波,可以计算得到不同周期简谐波作用下场地的最大反应,场地最大反应与相应简谐波周期所形成的关系曲线,称为场地谐波激励谱。在谐波激励谱中,对应于共振现象的简谐周期就是场地自振周期,据此判断场地自振周期的方法称为场地谐波激励谱法,其原理主要包括地震反应模型建立、地震反应计算和谐波激励谱确定三部分内容。

1.1 地震反应模型建立

在进行场地地震反应分析时,假定入射波为垂直向上的平面剪切波,将覆盖土层及下卧基岩视为力学性质沿竖向成层变化、沿横向均匀无限延伸的水平成层场地模型,并假定地层是弹性各向同性介质材料,从而将场地地震反应问题归结为成层半空间一维波动问题。

图 1 是垂直入射剪切波作用下水平地层场地反应模型。图中, ρ_i , v_i , h_i ($i=1\sim n$)分别表示第 i 个土层的密度、速度和厚度,界面 0 为地面,界面 n 为覆盖土层与下卧基岩接触面,界面 $1\sim n$ 为各土层分界面。

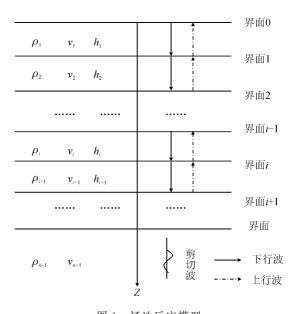


图 1 场地反应模型 Fig. 1 Site response model

1.2 地震反应计算

为了得到各个不同周期简谐波作用下场地的最大反应,需要得到各个周期简谐波作用下场地的地震反应,计算量通常很大。为了减小计算工作量,提高计算效率,在实际计算中采用了脉冲响应方法。按照地震学原理,场地地震反应等于场地脉冲响应与人射波的卷积运算,其中单位脉冲震源的地震反应称为脉冲响应。在计算场地反应时,由于人射波是已知的,因此仅需要计算场地脉冲响应即可,这样就避免了计算所有周期谐波的地震反应,节约了计算工作量。场地脉冲响应采用界面子波方法[10-11],此方法与传递矩阵方法实质上等效。两者所不同的是,前者是在时域中计算,后者则是在频域中计算。

图 1 中,从每个界面激发出来次一级地震波称为界面子波。按照传播方向,界面子波分上行波和下行波两种。其中,界面 0 为自由面,仅存在下行波 u_0^+ ;界面 n 为基岩顶面,只有上行波 u_n^- 与地震反应有关。其他土层之间的界面 $i(i=1\sim n-1)$ 都存在与地震反应有关的下行波 u_i^+ 和上行波 u_i^- (见图 2)。

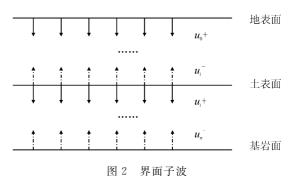


Fig. 2 Secondary wave from interfaces

根据界面子波方法,各个界面子波之间存在如下关系:

$$u_0^+(t) = -u_1 - (t - t_1) \tag{1}$$

$$u_n^-(t) = R_n u_{n-1} + (t - t_n)$$
 (2)

式中: t_i 是地震波在第 i 层内的单程传播时间, R_i 是地震波从第 i 层入射到第 i+1 层的位移反射系数,其表达式分别为:

$$t_i = h_i/v_i \tag{4}$$

$$R_{i} = \frac{\rho_{i}v_{i} - \rho_{i+1}v_{i+1}}{\rho_{i}v_{i} + v_{i+1}}$$
 (5)

且有初始条件:

$$u_n^-(0) = 1$$
 (6)

据式 $(1)\sim(6)$,可计算得到下行波 u_0^+ 。根据自由面位移倍加原理,可得场地的地震脉冲响应:

$$u_{\delta}(t) = 2u_0^+(t) \tag{7}$$

1.3 谐波激励谱确定

当场地脉冲响应确定后,就可以通过卷积运算 计算出不同周期简谐波作用下的场地谐波激励谱, 其表达式为:

$$u_{\text{max}}(T,t) = \max \mid u_{\delta}(t) * \sin(2\pi t/T) \mid (8)$$

式(8)的含义是,将不同周期的简谐波作为入射 地震波,分别与场地脉冲相应进行卷积运算,就可以 得到各个不同周期简谐波作用下的场地地震最大反 应值。

以场地最大反应值为纵坐标,所对应的周期值 为横坐标,由此绘成的曲线称为场地谐波激励谱。 根据物理学共振原理,当场地自振周期与来自基岩 的地震波周期接近时,将发生共振现象,因此场地的 各阶自振周期对应于谐波激励谱极大值,据此选取 场地的自振周期。

值得注意的是,地震工程中所提出的地震激励谱与本文提出的谐波激励谱有所不同。前者仅仅需要输入一个地震时程,反映了具有不同周期的单质点体系对同一次地震作用的最大反应;后者则需要输入一系列具有不同周期的简谐波,反映了给定的地层结构场地对不同周期简谐波作用的最大反应。

2 工程场地算例

2.1 场地地层条件

为了验证上述方法的正确性,对文献[6]例 1 进行了计算。例 1 中分别包含两层土和三层土两个工程场地,地层条件如图 3 所示。场地土厚 20 m,共有两类土,其参数 G_1 , G_2 , ρ_1 , ρ_2 分别为 81.64 MPa,

192.9 MPa,2 041 kg/m³ 和 2 143 kg/m³。

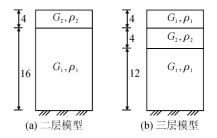


图 3 场地实例^[6] Fig. 3 Example model^[6]

2.2 自振周期计算

采用场地谐波激励谱法分别对上述两层土和三层土场地进行了计算。因篇幅所限,本文仅以两层土场地为例,叙述计算过程。需要特别说明的是,在计算过程中,震源采用单位脉冲函数,据式(6)按照初值问题处理,由此得到的地震脉冲响应及其谐波激励谱位移量没有物理单位,是一个无量纲量,反映了不同条件下场地反应程度的相对大小关系。

1) 输入地层参数

根据场地土层剪切模量和密度,可计算出土层剪切波速度 $v_1 = 200 \text{ m/s}, v_2 = 300 \text{ m/s},$ 进而得到地震波在土层内的传播时间 $t_1 = 0.013 \text{ s}, t_2 = 0.080 \text{ s}$ 以及土层界面反射系数 $R_1 = -0.223 \text{ 3}$ 。

假定基岩完全刚性,不考虑基岩与场地土层的相互作用,则基岩与土层接触面的反射系数 $R_2 = -1.0$ 。

2) 计算地震脉冲响应

取时间间隔为 0.000 1 s、持时 10 s,将上述地层参数值 R_1 , R_2 , t_1 , t_2 代人式(1) \sim (7),可计算得到两层土场地的单位地震脉冲响应 u_{δ} (见图 4)。

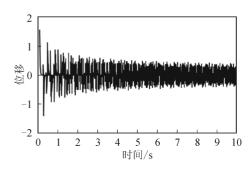


图 4 两层土场地的脉冲响应

Fig. 4 Seismic impulse response of double layer soil site

3) 计算谐波激励谱

据式(8),分别用不同周期正弦波与场地地震脉冲响应(见图 4)进行卷积运算,求取最大反应值(绝对值),可获得场地谐波激励谱。图 5 是选取采样间隔 0.001 s、持续时间 10 s、周期范围为 0.05~0.8 s

的若干正弦波计算得到的激励谱。

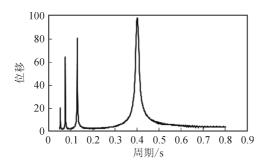


图 5 两层土场地的谐波激励谱

Fig. 5 Displacement response spectrum of harmonic waves

3 确定自振周期

图 5 中,出现了 4 条"谱线",每条"谱线"最大值对应的周期为场地自振周期,前 4 阶的自振周期分别为 0.402 s,0.131 s,0.076 s 和 0.053 s。除基本周期(第 1 阶自振周期,下同)外,其他 3 阶的自振周期与文献[6]传递矩阵法计算结果完全一致(见表 1)。

表 1 二层土场地自振周期 Tab. 1 Natural period of double layer soil site

计算方法	各阶自振周期/s				
	1	2	3	4	
激励谱法	0.402	0.131	0.076	0.053	
直接法	0.401	0.126	0.071	0.048	
传递矩阵法	0.404	0.131	0.076	0.053	
有限元法	0.410	0.130	0.080	0.050	

图 6 是周期等于场地基本周期 0.402 s 的正弦波与脉冲响应(图 4)卷积运算的结果。由图可见,地震反应出现共振现象,其他各阶自振周期对应的地震反应也出现类似共振现象,表明计算结果正确。

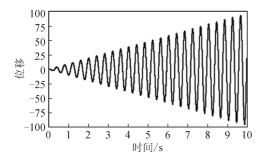


图 6 两层土场地反应时程

Fig. 6 Time history of double layer soil site response

采用上述谐波激励谱方法,对文献 6 例 1 中的 三层土场地也进行了计算,计算结果与文献中传递 矩阵法完全一致(见表 2)。

表 2 三层土场地自振周期 T_i

Tab. 2 Natural period of trible layer soil site

计算方法	各阶自振周期/s				
	1	2	3	4	
激励谱法	0.393	0.119	0.074	0.056	
直接法	0.382	0.109	0.071	0.053	
传递矩阵法	0.394	0.119	0.074	0.056	
有限元法	0.400	0.120	0.080	0.060	

4 基岩对场地自振特性的影响

4.1 基于谐波激励谱法的自振周期计算

事实上,尽管基岩剪切模量比上覆土层大很多,但是并非完全刚性,显然 $|R_2|$ < $1.0(R_2$ 是基岩与其上覆土层的反射系数)。如果考虑基岩对自振特性的影响,计算时需要对 R_2 进行必要修改。

下面以图 3(a)两层土场地为例,分别取基岩波阻抗 $\rho_r v_r = 20 \rho_1 v_1$ 和 $\rho_r v_r = 10 \rho_1 v_1$ 为例,其他参数不变,应用上述谐波激励谱法计算场地的自振周期。据式(5),当 $\rho_r v_r = 20 \rho_1 v_1$ 时, $R_2 = -19/21$; $\rho_r v_r = 10 \rho_1 v_1$ 时, $R_2 = -9/11$ 。 场地激励谱计算结果如图7 所示,图 8 是入射简谐波周期等于 0.402 s 时场地反应时程。

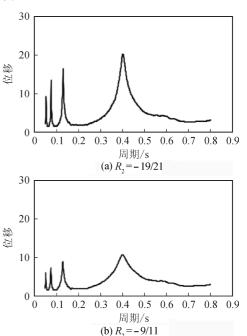


图 7 考虑基岩影响的谐波激励谱 Fig. 7 Spectrum excited by harmonic waves considering bedrock effect

由图 7 可见,图中也存在 4 条类似于图 5 的"谱线",对应的场地自振周期与图 5 完全相同,分别为 0.402 s,0.131 s,0.076 s 和 0.053 s,说明基岩变形性质不影响场地自振周期的取值。

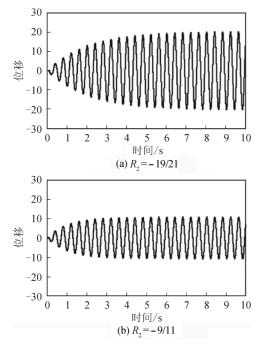


图 8 考虑基岩影响的场地反应时程 Fig. 8 Time history of bedrock effect

由图 8 可见,场地反应随时间变化规律与图 6 "共振"现象明显不同。场地反应值经过一段时间增大后,逐渐趋于稳定,呈现出似平稳振动特征,没有出现随时间无限增大的趋势。表明非完全刚性的基岩对场地反应有阻尼作用,由于土层中部分地震能量通过基岩耗散出去,场地土层不会发生物理学"共振"现象。

4.2 基岩对场地自振特性的影响分析

1) 基岩对场地自振强度的影响

对比图 8(a)和(b)可知,考虑基岩影响时,由于场地反应不会出现随时间无限增大的"共振"现象,场地反应值较图 6 明显减小,相当于对场地反应起着阻尼作用。随着 | R | 越小,这种阻尼效果越明显,对实际工程也越有利。这一特点与图 7(a)和(b)的结果一致。

2) 基岩对场地自振周期的影响

与图 5 相比,除了激励谱大小有所降低外,其形状也有很大变化,总体上变得宽缓,将尖锐的脉冲形曲线(见图 5)变成相应宽缓的多峰形曲线(图 7),由窄小"谱线"变为相对宽大的"谱带",其中基本周期变化尤为显著。

为了直观揭示谐波激励谱形状与 $|R_2|$ 之间的变化关系,对图 7(a)与图 7(b)激励谱进行了归一化处理,将两者激励谱最大位移值都调整为 1,图 9 是对图 7 归一化处理结果,其中谱 1、谱 2 分别对应图 7(a)、图 7(b)。由图可见,曲线谱 2 较谱 1 明显宽

缓,表明激励谱极大值附近的周期宽度随 $|R_2|$ 减小而增大。

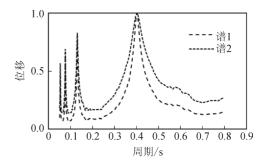


图 9 归一化处理后的谐波激励谱

Fig. 9 Normalized spectrum excited by harmonic waves

周期谱的形状与自振特性密切相关。自振周期是物体的固有性质,周期谱则反映了物体的自振随其周期的变化关系。为了叙述方便,本文将激励谱极大值附近的一定周期范围定义为自振周期影响带。显然,自振周期影响带越宽,表明能够使场地产生强烈振动的周期范围也越大,越不利于建筑物避让场地自振周期。

5 结 语

将场地基岩视为无限大半空间弹性体,基于物理学共振原理,提出了计算场地自振周期的谐波激励谱法,并通过对实际工程场地的自振周期的计算,验证了该方法的正确性。应用这一方法,通过改变基岩波阻抗参数,计算了场地自振周期,据此研究了基岩对场地自振特性的影响,主要结论如下:

1) 基岩对场地反应有阻尼作用。

与绝对刚性基岩不同,弹性基岩通过与土层之间的相互作用,部分地震能量通过基岩耗散出去,场地反应强度有所减小,不会发生物理学"共振"现象,有利于建筑物抗震。

2) 基岩对自振周期影响带有放大作用。

尽管基岩变形性质不会影响场地自振周期的取值,却增大了其影响带范围。如果将基岩视为刚体,则谐波激励谱中自振周期影响带很窄。如果将基岩视为弹性体,则随着 | R₂ | 减小,基岩动剪切模量减小,自振周期影响也随之变宽,且基本周期表现尤其显著。自振周期影响带增大,表明能够使场地产生强烈振动的周期范围增大,不利于建筑物避让场地自振周期。

另外,虽然本文计算场地自振周期方法是针对 考虑基岩影响所提出的,但是也可以推广应用于考 虑地震阻尼作用的粘弹性地层。

参考文献:

- [1] 沈蒲生, 张超, 叶缙垚, 等. 我国高层及超高层建筑的基本自振周期 [J]. 建筑结构, 2014, 44(18): 29-31. SHEN Pusheng, ZHANG Chao, YE Jinyao, et al. Fundamental natural period of high-rise and super high-rise buildings in China [J]. Building Structure, 2014, 44(18): 29-31.
- [2] 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 Guangcai, LIU Kanghe. Determine predominant period of site [J]. Electric Power Survey, 2000,(2): 43-46.
- [3] 奇文浩, 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 Wenhao, BO Jingshan, LIU Hongshuai. Fundamental period formula for horizontal layered soil profiles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(4): 779-784.
- [4] 高广运, 吴世明, 周健, 等. 场地卓越周期的讨论与测定[J]. 工程勘察, 2000,(5): 29-31.
 GAO Guangyun, WU Shiming, ZHOU Jian, et al. Discussion and measurement of site predominant period [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2000, (5): 29-31.
- [5] 彭远黔,路正,李雪英,等. 场地脉动卓越周期在工程 抗震中的应用 [J]. 华北地震科学,2000,18(4):61-68.
 - PENG Yuanqian, LU Zheng, LI Xueying, et al. The application for the pulsant predominant period of the subsoil in engineering seismics [J]. North China Earthquake Science, 2000, 18(4): 61-68.
- [6] 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 Jianguo, XU Yiyan. Analysis of the behavior of natural vibration of layered soil deposits [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,

- 1986, 6(4): 21-35.
- [7] 黄茂松, 陈龙珠, 吴世明. 分层地基的自由震动特性 [J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1990, 24(5): 638-646.
 - HUANG Maosong, CHEN Longzhu, WU Shiming. Analysis of the natural frequency of layered soil deposit [J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science), 1990, 24(5): 638-646.
- [8] 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.
 - DENG Yahong, XIA Tangdai, PENG Jianbing, 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.
- [9] 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]. Fujian Architecture & Construction, 2009, 129(3): 70-71.
- [10] 范留明,赵钦,刘云贺. 倾斜入射地震波作用下成层场地动力反应的界面子波算法 [J]. 岩土工程学报,2015,37(4):601-607.
 - FAN Liuming, ZHAO Qin, LIU Yunhe. Interfacial wavelet algorithm for dynamic response of horizontal layered site due to inclined seismic waves [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (4): 601-607.
- [11] 范留明, 赵钦. 成层半空间出平面自由波场的界面子波算法 [J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 765-772. FAN Liuming, ZHAO Qin. Interfacial wavelet superposition method for out-of-plane wave motion of free field in a layered half space [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 765-772.

(责任编辑 王绪迪)