

基于地表及地下强震动加速度记录的场地液化判别

董银峰^{1,2}, 马占雄^{1,2}, 陈 顺³, 赵 强^{1,2}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;
3. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川成都 610016)

摘要:依据强震动加速度记录快速判别土体是否发生液化及液化程度是地震实时防灾减灾的一项主要内容。目前,此类判别方法大多利用地表地震加速度记录进行判别,而对软土地基容易发生误判。针对有地表和地下加速度记录的场地提出一种基于系统辨识的方法,即在具有地表及地下加速度记录的情况下,将地下(一般为基岩位置)加速度记录作为系统输入,地表加速度记录作为系统输出,土体作为结构,利用地表及地下加速度记录组成输入、输出,计算土体的瞬时自振频率,并根据自振频率的改变判断土体液化情况。选取多组强震动记录作为样本,对提出的方法进行了验证,并用此方法对 2011 年东日本大地震造成的液化情况进行了判别,结果表明判别结果与日本震后的相关调查结果一致。

关键词:地震;地表及地下地震记录;系统辨识;液化;瞬时频率

中图分类号:TU441.3 TU311.41

文献标志码:A

Identification of soil liquefaction using surface and borehole strong ground motions

DONG Yinfeng^{1,2}, MA Zhanxiong^{1,2}, CHEN Shun³, ZHAO Qiang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China;
3. Power China Sichuan Electric Engineering Corporation, Chengdu 610016, China)

Abstract: It is a main content in real-time earthquake disaster reduction to quickly identify the occurrence and extent of soil liquefaction based on strong motion records. Currently, most methods are based on the seismic acceleration records of the surface, which can easily lead to misjudgment in case of soft soil site. A new method based on system identification is proposed for the case that borehole records are available. The borehole (base rock) record is used as the input and the surface record is used as the response (output) with the soil between these two records as the structure (system). Modal frequency of the system can be calculated according to the input-output pair by using system identification methods. Then, the occurrence of liquefaction can be identified according to the modal frequency. Some strong ground motion records are selected to verify the proposed method. Results show that the method is reliable and robust. Finally, the sites which record the strong ground motions from the March 11, 2011 Tohoku earthquake are identified and the result of the identification agrees with the disaster survey result after this earthquake.

Keywords: earthquake; surface and borehole seismic record; system identification; liquefaction; instantaneous frequency

基金项目:国家自然科学基金项目(10802104)。

作者简介:董银峰(1976—),男,甘肃天水人,工学博士,副教授。E-mail:dongyinfeng@cqu.edu.cn

收稿日期:2015 年 9 月

0 前言

场地在液化过程中呈现非线性特性,该特性在地震动的加速度记录中得到反应。目前,科研人员能够利用地震动加速度记录实时快速对场地是否发生液化进行判别。如:Miyajima 等^[1]提出了利用地震动加速度记录的三个分量作为基础的液化判别方法;Suzuki 等^[2]提出了以加速度记录的两个水平分量作为依据,采用地面峰值加速度、最大谱烈度、地面最大水平位移和过零周期作为场地液化判别指标的方法;Kostadinov 等^[3]提出采用两个水平方向与竖向共三个分量的平均瞬时频率和地面峰值速度两个参数作为判断场地液化的依据的 KY 法;胡聿贤等^[4]根据 KY 法,提出基于希尔伯特-黄变换的场地液化判别方法,该方法代替短时傅里叶变换来计算加速度的瞬时频率;孙锐等^[5]提出以场地水平自振特性的改变来判断是否液化的频率下降法。

上述研究主要针对基于强震记录的场地液化判别方法,为场地液化判别提供了依据,但仍存在以下问题:液化判别的理论依据明显不足,各种方法所采用的指标存在较大差别,针对同一加速度记录,不同判别方法所得评判结果也不完全相同,在判别软土场地时易出现误判。

为此,本文作者将地下基岩处获得的地震动记录作为系统输入,地表记录作为系统输出,土体作为系统(亦称土体结构)。利用地表及地下地震动记录组成输入、输出,计算土体的瞬时模态频率(自振频率),并根据自振频率的变化判断土体的液化情况。同时,对本文方法的有效性进行验证,并用此方法对 2011 年东日本大地震中获得的强震动记录进行判别。

1 液化判别方法

1.1 基于地表及地下记录的场地瞬时模态频率确定方法

基于振动的结构损伤判别方法大致可以分为基于物理参数的方法和基于模态参数的方法两种。在实际应用中,一般通过结构损伤前后相应模态参数的改变或者由模态参数而得到的物理量来判断结构的损伤状况。本文中土体作为结构系统,根据其瞬时模态频率的变化进行损伤判别。

基于瞬时模态频率的损伤判别方法,首先利用时变 VARMA 模型^[6],对土体结构或者系统的输入与输出进行建模,依据时变 VARMA 模型的参数,

计算土体结构的瞬时模态振型和模态频率,最后根据土体结构的瞬时模态频率的变化来判断其损伤情况。

土体结构的输入和输出之间的对应关系可以用时变 VARMA(p, q) 模型^[6]反映,其表达式为

$$\mathbf{y}_k = \sum_{i=1}^p \Phi_{i,k} \mathbf{y}_{k-i} + \sum_{i=1}^q \Theta_{i,k} \mathbf{u}_{k-i} + \mathbf{e}_k \quad (1)$$

式中: \mathbf{y}_k 为 n 个结构反应(输出),即 $\mathbf{y}_k = \{y_{1,k}, y_{2,k}, \dots, y_{n-1,k}, y_{n,k}\}^T$; 时变系数 $\Phi_{i,k}$ 和 $\Theta_{i,k}$ 均为 n 阶方阵; \mathbf{u}_k 为结构的输入; \mathbf{e}_k 为 n 维零均值高斯白噪声过程,模型的方差为 $\mathbf{R}_k \mathbf{I}$ (\mathbf{I} 是单位矩阵),同时 $\mathbf{R}_k > \mathbf{0}$; 下标 k 表示时刻 $t = k\Delta t$, Δt 为采样间隔。

将式(1)转换成相应的空间状态模型^[6]:

$$\begin{cases} \xi_k = \xi_{k-1} + \mathbf{v}_{k-1} \\ \mathbf{y}_k = [\mathbf{H}_k \xi_k]^T + \mathbf{e}_k \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\xi_k = [\Phi_{1,k}, \dots, \Phi_{q,k}, \Theta_{1,k}, \dots, \Theta_{q,k}]^T$ 为状态向量; $\mathbf{v}_k = [v_{1,k}, v_{2,k}, \dots, v_{p+q,k}]^T$ 为高斯过程噪声,且 \mathbf{v}_k 服从正态分布; $\mathbf{H}_k = [\mathbf{y}_{k-1}^T, \dots, \mathbf{y}_{k-p}^T, \mathbf{u}_{k-1}^T, \dots, \mathbf{u}_{k-q}^T]$ 是观测向量。

对于式(2)所示的空间状态模型,可以采用标准的 Kalman 滤波方法估计其状态向量 ξ_k ^[6], 同时,定义系统的转换矩阵为 \mathbf{A}_k

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \Phi_{1,k} & \dots & \Phi_{p,k} \\ \mathbf{I} & \dots & \mathbf{0} \end{bmatrix}_{np \times np} \quad (3)$$

对 \mathbf{A}_k 进行特征值分解,可得

$$\mathbf{A}_k = \Psi_k \boldsymbol{\lambda}_k \Psi_k^{-1} \quad (4)$$

式中: $\boldsymbol{\lambda}_k = \text{diag}[\lambda_{i,k}]$, ($i = 1, 2, \dots, np$)。相应的瞬时模态频率 $f_{i,k}$ 可以根据特征值 $\lambda_{i,k}$ 得出,即

$$f_{i,k} = \|\ln[\lambda_{i,k}]\| / (2\pi\Delta t) \quad (5)$$

由于瞬时模态频率成对出现,因此每对频率对应一个模态。本文中以地表两个水平分量为输出,即 $n=2$,用 VARMA(2, 1) 模型表示输入和输出之间的映射关系,因此可得到两对瞬时模态频率,每一对对应一个水平振动方向。由于土体一般两个方向动力特性相近,因此两对瞬时模态频率的数值实际上也差别很小,本文中取两对瞬时频率的均值作为场地土体的瞬时模态频率。

1.2 液化和非液化场地瞬时模态频率的对比

图 1 为阪神地震中 Port Island 台站的地表和地下 83 m 处两个水平分量的加速度记录时程及计算得到的土体的瞬时模态频率。阪神地震中,Port Island 台站处地表的土体发生了液化,而台站地下 83 m 处没有液化。图 2 是 Eureka 地震中在 El Centro Vertical Array 台站获得的地表及地下 75 m 处强震记录的两个水平分量的加速度时程和计算的瞬时模态频率,而该台站的场地没有发生液化。

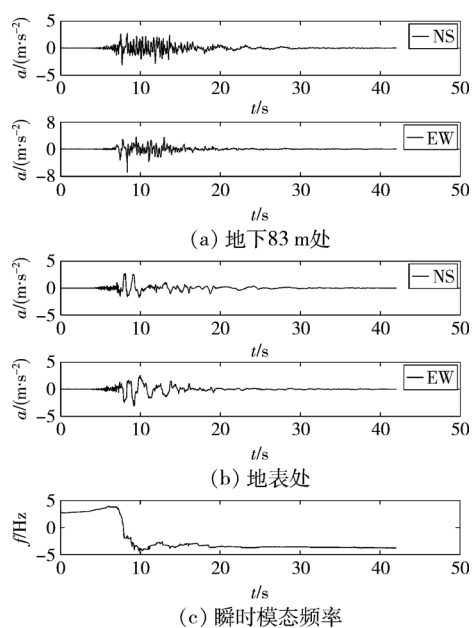


图1 Port Island 台站地下地上加速度记录及瞬时模态频率

Fig.1 Borehole acceleration records and instantaneous modal frequency at Port Island station

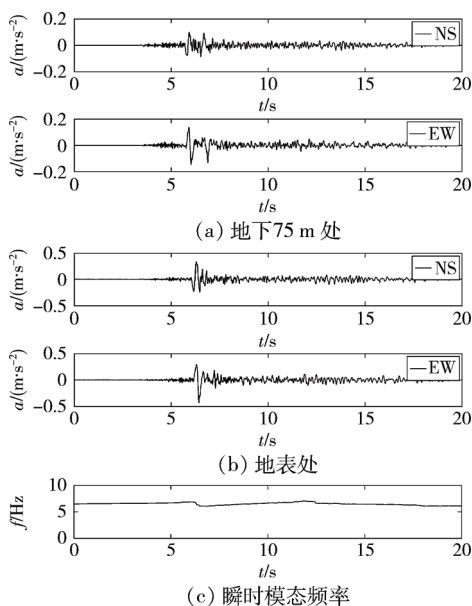


图2 El Centro Vertical Array 台站地下地上加速度记录及瞬时模态频率

Fig.2 Borehole acceleration records and instantaneous modal frequency at El Centro Vertical Array station

对比图1、2 可以看到:液化场地的地表加速度记录在8 s 左右频率发生突变,周期明显变大(图1b),而非液化场地的地表加速度记录的频率则没有明显的变化(图2b);瞬时模态频率可以认为是土体的自振频率,比较两个场地的瞬时模态频率,可以发现,

在液化场地(Port Island 台站),土体的瞬时模态频率在8 s 左右突然下降,如图1c 所示,而在非液化场地(El Centro Vertical Array 台站),土体的瞬时模态频率在整个地震过程中基本没有变化,如图2c 所示。说明在液化场地,土体发生破坏导致土体刚度突然下降,从而使得自振频率发生突降。

1.3 基于瞬时频率的液化判别方法

地震作用下,液化场地土体的瞬时频率会发生突变,而在非液化场地的瞬时频率没有明显的变化。为此,依据瞬时模态频率的变化判别场地液化情况。

对于一次地震,在不同的地震台站用不同的仪器所记录到的加速度的持续时间有所不同,对于液化判别,主要关注地震动比较强烈的时间段。采用地震动强度包线反映地震动的强度非平稳特性,依据分段函数模型^[8](图3a)表示的强度包线来确定液化判别时选用的时间段数据,图中 t_0 为地震动开始时刻, t_1 为地震动上升段终点时刻, t_2 为地震动下降段起点时刻, $E(t)$ 为地震动强度函数。

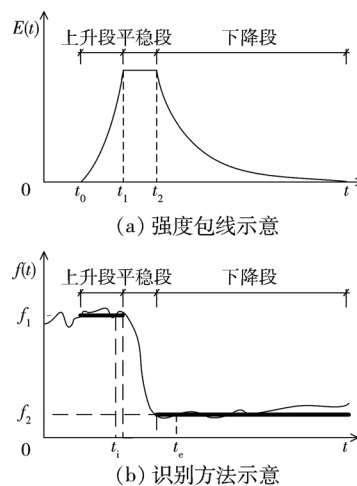


图3 判别方法示意

Fig.3 Diagram of identification method

场地液化判别方法包含以下步骤:

- 1) 判断地表水平地震记录的峰值加速度,如果峰值加速度 $a_p < 0.1 \text{ m/s}^2$,则土体未液化。
- 2) 如果场地地表的水平地震记录的峰值加速度 $a_p \geq 0.1 \text{ m/s}^2$,则以地下两个水平加速度记录为输入,两条地表水平加速度记录为输出,通过时变VARMA模型参数,计算土体的瞬时模态频率,所得时频曲线即为土体自振频率曲线。
- 3) 采用分段函数模型,计算地表加速度记录的地震动强度包线,对于两个水平方向,分别计算后取其算术平均值。
- 4) 如图3b 所示,结合土体自振频率时频曲线和地震动强度包线的时间参数,计算土体在上升段的

自振频率的平均值 f_1 和下降段自振频率的平均值 f_2 ;从左向右寻找自振频率时频曲线上最后1个频率等于 f_1 对应的时间 t_i ,从右向左寻找第1个自振频率等于 f_2 所对应的时间 t_e 。

5) 根据文献[7]中统计分析的结果,建议当 $(f_1 - f_2)/f_1 > 0.5$,同时 $\Delta t = t_e - t_i \leq 0.25 T_d$ (T_d 为地震动总持续时间)时,则判断该场地将发生液化;当 $(f_1 - f_2)/f_1 > 0.5$,同时 $\Delta t = t_e - t_i > 0.25 T_d$ 时,则认为该场地可能发生液化,需要更进一步的勘察;其他情况则判断土体未液化。

2 建议方法验证

2.1 本文方法的验证

为验证本文建议方法的准确性,选取阪神地震、Eureka地震、2011年东日本大地震等11个台站记录,作为验证本文方法的样本。这11个记录中,震害调查明确为液化的有阪神地震的Port Island台站、2011年东日本大地震中的CHBH10和CHBH11等台站。表1列出了11个记录的信息、震害调查结果及Suzuki方法^[2]、频率下降法^[5]和本文方法的判别结果,可以看出,采用本文方法可以有效判别液化场地与非液化场地。

表1 场地液化判别结果

Table 1 Identification results of site liquefaction

序号	台站	场地类别	震害调查	Suzuki方法	频率下降法	本文方法
1	Port Island(日本)	D类	液化	液化	液化	液化
2	Somoa Bridge(美国)	D类	非液化	液化	非液化	非液化
3	El Centro(美国)	E类	非液化	非液化	液化	非液化
4	La Cienega(美国)	D类	非液化	非液化	液化	非液化
5	Jensen Bldg(美国)	C类	非液化	非液化	非液化	非液化
6	ASBH02(日本)	E类	非液化	非液化	非液化	非液化
7	AICH17(日本)	D类	非液化	液化	液化	非液化
8	AOMH01(日本)	C类	非液化	非液化	非液化	非液化
9	AOMH02(日本)	C类	非液化	非液化	非液化	非液化
10	CHBH10(日本)	D类	液化	非液化	液化	液化
11	CHBH11(日本)	D类	液化	非液化	非液化	液化

2.2 2011年东日本大地震液化场地判别

在2011年3月11日的东日本大地震中,KiK-NET台网收录了525个台站的记录,每个台站记录都由地表的三个方向的加速度记录和三个方向的基岩加速度记录组成^[8]。这些台站基本覆盖了日本国土面积。采用本文中建议的方法对上述525个场地进行了判别,其中有11个场地判别为液化,具体见表2,表中同时列出了场地台站的经纬度及场地类别。图4中标记了这11个场地的分布及位置。

表2 东日本大地震液化场地类别

Table 2 Category of site liquefaction in Tohoku earthquake

台站	纬度	经度	场地类别
CHBH10	35.5458N	140.2417E	D类场地
CHBH11	35.2867N	140.1529E	D类场地
CHBH12	35.3445N	139.8554E	D类场地
CHBH16	35.1384N	139.9649E	D类场地
CHBH17	35.1714N	140.3398E	E类场地
CHBH04	35.7966N	140.0206E	E类场地
CHBH20	35.0882N	140.0997E	D类场地
IBRH07	35.9521N	140.3301E	E类场地
IBRH10	36.1112N	139.9889E	E类场地
IBRH20	35.8284E	140.7323E	E类场地
TKYH02	35.6539N	139.4704E	D类场地



图4 KIK-NET判别液化台站的分布

Fig.4 Distribution of liquefaction stations

从图4可以看出,在此次地震中,发生液化的主要地点是在东京湾附近和利根川流域,这与日本震后进行的灾害调查所出的结果一致。

3 结论

1) 提出了一种以自振频率为指标判别场地液化的方法,即将基岩记录作为系统输入,地表记录作为系统输出,土体作为结构,利用地表及地下记录组成输入、输出,计算土体的瞬时自振频率,并根据自振频率的改变判断土体液化情况。

2) 选取阪神地震、Eureka地震、2011年东日本大地震等11个台站记录,对本文中建议的方法进行验证。

3) 应用本文方法对2011年东日本大地震的液化情况进行了判别,液化台站分布情况与日本震后的相关调查结果一致。

参考文献

[1] Miyajima M, Kitaura M, Nozu S. Detective method of liquefaction using strong ground motion records [C]// Proceeding 3rd China-Japan-US Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering. [S. l.]: [s. n.], 1998:133-140.

(下转第379页)