

DOI: 10.11779/CJGE201805005

# 液化层特征量对场地卓越频率影响的理论解答

孙 锐, 杨 洋, 陈龙伟\*, 黄保荣

(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)

**摘要:** 液化场地对地震动影响问题以及依据地表地震记录识别场地液化问题虽分属地震波的正反演理论, 但土层液化对振动特性的改变是二者共同的物理本质, 应是这两方面研究的出发点。提出液化层存在下场地卓越频率变化的理论解答, 并分析液化层特征量对场地卓越频率的影响规律。将实际土层视为水平成层状, 以三质点体系代表具有液化夹层的场地, 推导出场地卓越下降率解答, 讨论土层及液化层特征量对场地卓越下降率的影响。结果表明: 液化夹层的存在将使场地卓越频率下降, 下降率主要与覆盖层与液化层厚度比  $\lambda_1$ 、液化层与下卧层厚度比  $\lambda_2$ 、液化层软化程度这3个参数相关;  $\lambda_1$  对场地卓越频率下降起主要的控制作用, 场地卓越频率下降率随  $\lambda_1$  变化的可分为3种模式: 指数关系降低、指数关系升高以及定值附近先增大后减小的波动, 其中后者为主要表现; 液化层与下卧层厚度比  $\lambda_2$  对场地卓越频率下降率起次要作用, 场地卓越频率下降率随  $\lambda_2$  增大呈快速上升阶段和平稳增长两个阶段, 二者转换点与  $\lambda_1$  相关; 场地卓越频率虽与液化层软化程度呈递增关系, 但绝对增幅最大为0.15, 影响较小。

**关键词:** 液化夹层; 三质点体系; 场地卓越频率; 理论解

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)05-0811-08

作者简介: 孙 锐(1972-), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土地震工程研究。E-mail: iemsr@163.com。

## Analytical solutions for changes in predominant frequency of a site based on characteristic parameters of liquefiable interlayer

SUN Rui, YANG Yang, CHEN Long-wei, HUANG Bao-rong

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

**Abstract:** Although the effect of soil liquefaction on seismic ground motion and the recognition of site liquefaction based on seismic records respectively represent forward and inverse derivation problems, the change in the self-vibration characteristics in the horizontal direction caused by soil liquefaction is the physical characteristic that is shared commonly by these two issues. Thus, the natural vibration characteristics of a site should be the basis for studying these two issues. From this perspective, the present work proposes an analytical approach for predicting the proportional decrease in the predominant frequency of a site after the occurrence of soil liquefaction ( $\delta$ ). The soil is treated as a layered and parallel structure, and a three-particle system including a liquefiable interlayer is employed to represent the sites susceptible to liquefaction. The approach is based on the characteristic parameters of the liquefiable interlayer. The effect of these parameters on  $\delta$  is also discussed. The results show that the presence of a liquefied interlayer reduces the predominant frequency of the site. The value of  $\delta$  is mainly related to the ratio of the overburden layer thickness to the thickness of the liquefiable layer  $\lambda_1$ , the ratio of the liquefiable layer thickness to the thickness of the substratum layer  $\lambda_2$ , and the degree of softening of the liquefiable layer. The ratio  $\lambda_1$  plays the dominant role in controlling  $\delta$  according to three modes: an exponentially decreasing mode, an exponentially increasing mode, and a mode where  $\delta$  first increases and then decreases, with the latter being the main representation. The ratio  $\lambda_2$  plays a secondary role in affecting  $\delta$ , where  $\delta$  initially increases rapidly with the increasing  $\lambda_2$  up to a transition point, after which  $\delta$  increases slowly. The results show that the value of the transition point is related to  $\lambda_1$ . Although  $\delta$  increases with an increasing degree of softening of the liquefied layer, the maximum absolute increment is only 0.15, which provides a negligible effect.

**Key words:** liquefaction interlayer; three-particle system; predominant frequency of site; theoretical solution

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资助项目(2017B09); 黑龙江省级资助项目(GX16C006); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0105500)

收稿日期: 2017-03-14

\*通讯作者 (E-mail: chenlw@iem.ac.cn)

## 0 引言

卓越频率是工程场地的基本力学属性, 对土木水

利等各类工程结构的地震响应有很大影响。常规土层下场地特性对上部结构的影响已经有较为系统和深入的认识<sup>[1-4]</sup>, 但液化土层对地震动输入的影响工程抗震设计中目前没有考虑, 即不论场地是否液化, 任何类型结构输入地震动均按土层为非液化计算。但是, 近期地震调查表明, 液化场地对地震动低频成分有显著的放大作用。2011 年新西兰地震在不同类型场地均获得较多记录, 分析表明<sup>[5-6]</sup>, 与非液化硬土和软土场地相比, 液化使高频结构反应减小 1/2, 使长周期结构反应分别放大 5 倍和 2.5 倍。日本学者指出, 此次地震中人员伤亡最大的 CTV 大楼可能是受“地盘液化”影响, 液化后地面晃动周期变长导致高柔结构破坏。这样, 从振动角度认为液化层起减震作用为的传统认识受到新的地震观测结果的否定, 认为液化后主要问题为地基失效而无须再考虑振动问题、液化地基处理后不必再考虑液化问题等观点不再成立, 现有长大高柔结构抗震设计中没有考虑液化振动加震作用而可能存在很大安全隐患的质疑越来越强烈。目前国际上已经注意到了液化场地高频滤波及低频放大效应, 美国 IBC、UBC 规范及美国国家地震灾害减轻项目 NEHRP 中, 均建议对液化场地的地震动输入需要特殊计算, 但因对该问题机理和规律还没有形成完整的认识, 还无法给出具体规定。

另一方面, 随着国际上地震监测技术的迅速发展, 学者们也开始研究区别于减轻液化灾害传统手段的新方法——液化实时监测和减灾技术<sup>[7]</sup>, 以便为地震监测、震害快速和应急救援提供新的手段。液化实时监测和减灾技术的核心是基于强震记录的液化场地识别方法, 而这方面国际上现有几个方法均不成熟, 成功率只有 50%, 远没有达到工程要求, 其症结在于仅靠有限数据得到的经验, 严重缺乏理论支持<sup>[8]</sup>。

液化层存在下场地对地震地面运动影响效应研究属于力学正演问题, 依据地震记录识别液化场地方法属于力学反演问题, 其关键分别是建立液化场地与地表反应谱间的联系以及建立地表地震动对场地液化的表征关系。因此笔者认为, 无论是正演问题还是反演问题, 从地震动-液化层相互关系角度, 只是一个问题两个不同方面的表现, 而场地液化最本质的物理作用, 是对振动特性的改变, 是所有正反演问题的源头, 应是这两方面机理、规律以及分析方法等研究的出发点。但对这个最本质问题的把握上, 目前还仅停留在简单的定性认识上, 相关的理论研究尚少。笔者曾将可液化场地简化为双质点模型, 给出了液化导致场地水平卓越频率下降的计算公式, 推导出了频率下降率的下限值, 并根据此下限值提出了一个以频率下降率为基本指标的依据强震记录快速识别场地液化的方法, 取得了良好的初步效果<sup>[9]</sup>。但该双质点模型只能考虑液

化与非线化土层的厚度比和可液化土层液化前后的剪切模量比的影响, 而未包括场地中液化层具有上覆盖层的实际情况, 显然存在不足。

本文将实际土层视为水平成层状, 以三质点体系代表具有液化夹层的场地, 推导液化层存在下场地卓越频率变化的理论解答, 分析液化层特征量对场地卓越频率的影响特征, 为建立液化-场地-地震动相互关系的深入认识以及三者相互影响规律的掌握提供理论指导。

## 1 分析模型

含有可液化夹层的实际水平场地简化成如图 1 所示的三质点体系, 各土层参数见图。其中  $G_1, \rho_1, v_{s1}$  分别为上覆盖层的剪切模量、密度和剪切波速,  $G_2, \rho_2, v_{s2}$  分别为可液化层的剪切模量、密度和剪切波速,  $G_3, \rho_3, v_{s3}$  分别为下卧层的剪切模量、密度和剪切波速。 $h_1, h_2, h_3$  分别为上覆盖层、可液化层和下卧层的厚度,  $m_1, m_2, m_3$  分别为上覆盖层、可液化层和下卧层简化后各个质点的质量。 $K_1, K_3$  分别为上覆盖层和下卧层的平均水平刚度,  $K_L, K_{LL}$  分别为可液化层液化前和液化后的平均水平刚度。

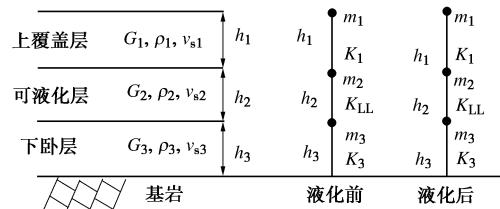


图 1 中间为可液化层的三质点体系模型

Fig. 1 Three-particle system model including a liquefiable intermediate layer

## 2 解 答

根据动力学原理, 图 1 的三质点简化模型的振动微分方程为

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{y}_1 + k_{11} y_1 + k_{12} y_2 + k_{13} y_3 &= 0, \\ m_2 \ddot{y}_2 + k_{21} y_1 + k_{22} y_2 + k_{23} y_3 &= 0, \\ m_3 \ddot{y}_3 + k_{31} y_1 + k_{32} y_2 + k_{33} y_3 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} k_{11} &= K_1, \\ k_{12} &= -K_1, \\ k_{13} &= 0, \\ k_{21} &= -K_1, \\ k_{22} &= K_1 + K_L, \\ k_{23} &= -K_L, \\ k_{31} &= 0, \\ k_{32} &= -K_L, \\ k_{33} &= K_L + K_3. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

把式(2)代入式(1), 可得到系数矩阵为

$$\begin{vmatrix} K_1 - m_1 \omega^2 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_L - m_2 \omega^2 & -K_L \\ 0 & -K_L & K_L + K_3 - m_3 \omega^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (3)$$

展开并化简得

$$\begin{aligned} \omega^6 - \left[ \frac{K_1}{m_1} + \frac{K_L + K_3}{m_3} + \frac{K_1 + K_L}{m_2} \right] \omega^4 + \\ \left[ \frac{K_1(K_L + K_3)}{m_1 m_3} + \frac{K_1 K_L}{m_1 m_2} + \frac{K_1 K_L + K_1 K_3 + K_L K_3}{m_2 m_3} \right] \omega^2 - \\ \frac{K_1 K_L K_3}{m_1 m_2 m_3} = 0 \quad , \end{aligned} \quad (4)$$

式中,

$$K_1 = \frac{G_1}{h_1} = \frac{\rho_1 v_{s1}^2}{h_1} \quad , \quad (5)$$

$$K_L = \frac{G_2}{h_2} = \frac{\rho_2 v_{s2}^2}{h_2} \quad , \quad (6)$$

$$K_3 = \frac{G_3}{h_3} = \frac{\rho_3 v_{s3}^2}{h_3} \quad . \quad (7)$$

假设各个土层的密度一样, 即

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 ,$$

令

$$\frac{b}{a} = - \left( \frac{K_1}{m_1} + \frac{K_L + K_3}{m_3} + \frac{K_1 + K_L}{m_2} \right) \quad , \quad (8)$$

$$\frac{c}{a} = \left( \frac{K_1(K_L + K_3)}{m_1 m_3} + \frac{K_1 K_L}{m_1 m_2} + \frac{K_1 K_L + K_1 K_3 + K_L K_3}{m_2 m_3} \right) , \quad (9)$$

$$\frac{d}{a} = - \frac{K_1 K_L K_3}{m_1 m_2 m_3} \quad . \quad (10)$$

把式(5)~(7)代入式(8)~(10)得

$$\frac{b}{a} = - \left( \frac{v_{s1}^2}{h_1^2} + \frac{v_{s2}^2}{h_2^2} + \frac{v_{s3}^2}{h_3^2} + \frac{v_{s1}^2}{h_1 h_2} + \frac{v_{s2}^2}{h_2 h_3} \right) , \quad (11)$$

$$\frac{c}{a} = \left( \frac{v_{s1}^2 v_{s2}^2}{h_1^2 h_2 h_3} + \frac{v_{s1}^2 v_{s3}^2}{h_1^2 h_3^2} + \frac{v_{s2}^2 v_{s3}^2}{h_2^2 h_3^2} + \frac{v_{s1}^2 v_{s2}^2}{h_1 h_2^2 h_3} + \frac{v_{s1}^2 v_{s3}^2}{h_1 h_2 h_3^2} + \frac{v_{s2}^2 v_{s3}^2}{h_2^2 h_3^2} \right) , \quad (12)$$

$$\frac{d}{a} = - \frac{v_{s1}^2 v_{s2}^2 v_{s3}^2}{h_1^2 h_2^2 h_3^2} \quad . \quad (13)$$

则式(4)可化简为

$$\omega^6 + \frac{b}{a} \omega^4 + \frac{c}{a} \omega^2 + \frac{d}{a} = 0 \quad . \quad (14)$$

求解方程(14), 取最小值作为卓越频率, 有

$$\omega^2 = \frac{-1 + i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} +$$

$$\frac{-1 - i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} - \frac{b}{3a} \quad , \quad (15)$$

式中,

$$p = \frac{c}{a} - \frac{b^2}{3a^2} \quad , \quad (16)$$

$$q = \frac{2b^3}{27a^3} - \frac{bc}{3a^2} + \frac{d}{a} \quad , \quad (17)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt[3]{\frac{-1 + i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \frac{-1 - i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} - \frac{b}{3a}}^{1/2} \quad . \quad (18)$$

同理, 可以求得可液化层液化后场地的卓越周期  $T'$  为

$$T' = 2\pi \sqrt[3]{\frac{-1 + i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q'}{2} + \sqrt{\left(\frac{q'}{2}\right)^2 + \left(\frac{p'}{3}\right)^3}} + \frac{-1 - i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q'}{2} - \sqrt{\left(\frac{q'}{2}\right)^2 + \left(\frac{p'}{3}\right)^3}} - \frac{1}{3} \left( \frac{b}{a} \right)' }^{1/2} , \quad (19)$$

式中,

$$p' = \left( \frac{c}{a} \right)' - \frac{1}{3} \left( \frac{b}{a} \right)^2 \quad , \quad (20)$$

$$q' = \frac{2}{27} \left( \frac{b}{a} \right)^3 - \frac{1}{3} \left( \frac{b}{a} \right)' \left( \frac{c}{a} \right)' + \left( \frac{d}{a} \right)' \quad , \quad (21)$$

$$\left( \frac{b}{a} \right)' = - \left( \frac{v_{s1}^2}{h_1^2} + \frac{v_{s2}^2}{h_2^2} + \frac{v_{s3}^2}{h_3^2} + \frac{v_{s1}^2}{h_1 h_2} + \frac{v_{s2}^2}{h_2 h_3} \right) , \quad (22)$$

$$\left( \frac{c}{a} \right)' = \left( \frac{v_{s1}^2 v_{s2}^2}{h_1^2 h_2 h_3} + \frac{v_{s1}^2 v_{s3}^2}{h_1^2 h_3^2} + \frac{v_{s2}^2 v_{s3}^2}{h_2^2 h_3^2} + \frac{v_{s1}^2 v_{s2}^2}{h_1 h_2^2 h_3} + \frac{v_{s1}^2 v_{s3}^2}{h_1 h_2 h_3^2} + \frac{v_{s2}^2 v_{s3}^2}{h_2^2 h_3^2} \right) , \quad (23)$$

$$\left( \frac{d}{a} \right)' = - \frac{v_{s1}^2 v_{s2}^2 v_{s3}^2}{h_1^2 h_2^2 h_3^2} \quad , \quad (24)$$

其中,  $v_{s1}$ ,  $v_{s2}$ ,  $v_{s3}$  为可液化层液化后的剪切波速。

可液化层液化前后场地卓越周期上升比  $\Delta$  为

$$\Delta = \frac{T' - T}{T} = \left\{ \frac{-1 + i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \frac{-1 - i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} - \frac{b}{3a} \right\} / \left\{ \frac{-1 + i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q'}{2} + \sqrt{\left(\frac{q'}{2}\right)^2 + \left(\frac{p'}{3}\right)^3}} + \frac{-1 - i\sqrt{3}}{2} \sqrt[3]{-\frac{q'}{2} - \sqrt{\left(\frac{q'}{2}\right)^2 + \left(\frac{p'}{3}\right)^3}} - \frac{b}{3a} \right\}$$

$$\frac{-1-i\sqrt{3}}{2}\sqrt[3]{-\frac{q'}{2}-\sqrt{\left(\frac{q'}{2}\right)^2+\left(\frac{p'}{3}\right)^3}-\frac{1}{3}\left(\frac{b}{a}\right)'}\left\{\frac{1}{2}\right\}-1. \quad (25)$$

令

$$\lambda_1 = \frac{h_1}{h_2} = \frac{m_1}{m_2}, \quad (26)$$

$$\lambda_2 = \frac{h_2}{h_3} = \frac{m_2}{m_3}, \quad (27)$$

$$P_1 = \frac{G_1}{G_2} = \frac{v_{s1}^2}{v_{s2}^2}, \quad (28)$$

$$P_2 = \frac{G_2}{G_3} = \frac{v_{s2}^2}{v_{s3}^2}, \quad (29)$$

$$P_L = \frac{G'_2}{G_2} = \frac{v_{s2}^{\prime 2}}{v_{s2}^2}, \quad (30)$$

式中,  $\lambda_1$  为上覆盖层与液化层的厚度比,  $\lambda_2$  为液化层与下卧层的厚度比,  $P_1$  为上覆盖层与液化层液化前的剪切模量比,  $P_2$  为液化层液化前与下卧层的剪切模量比,  $P_L$  为液化层液化后与液化前的剪切模量比。

假设剪切波速与深度存在如下关系<sup>[10]</sup>:

$$v_s = mh^n, \quad (31)$$

式中,  $n$  取为 0.2, 取土层 2/3 处的剪切模量为该层土的平均剪切模量。则

$$P_1 = \frac{G_1}{G_2} = \frac{v_{s1}^2}{v_{s2}^2} = \left( \frac{a \left( \frac{2}{3} h_1 \right)^{0.2}}{a \left( h_1 + \frac{2}{3} h_2 \right)^{0.2}} \right)^2 = \left( \frac{\frac{2}{3} \lambda_1}{\lambda_1 + \frac{2}{3}} \right)^{0.4}, \quad (32)$$

$$P_2 = \frac{G_2}{G_3} = \frac{v_{s2}^2}{v_{s3}^2} = \left( \frac{a \left( h_1 + \frac{2}{3} h_2 \right)^{0.2}}{a \left( h_1 + h_2 + \frac{2}{3} h_3 \right)^{0.2}} \right)^2 = \left( \frac{\lambda_1 + \frac{2}{3}}{\lambda_1 + 1 + \frac{2}{3} \lambda_2} \right)^{0.4}. \quad (33)$$

化简式 (25) 可得

$$\Delta = \left( \frac{\frac{-1+i\sqrt{3}}{2} L_1 + \frac{-1-i\sqrt{3}}{2} L_2 - \frac{M_1}{3}}{\frac{-1+i\sqrt{3}}{2} L_3 + \frac{-1-i\sqrt{3}}{2} L_4 - \frac{N_1}{3}} \right)^{\frac{1}{2}} - 1, \quad (34)$$

式中,

$$M_1 = -P_1 P_2 - \lambda_1 \lambda_2 (P_2 \lambda_1 + \lambda_1 \lambda_2) - \lambda_1 (P_1 P_2 + P_2 \lambda_1), \quad (35)$$

$$M_2 = P_1 P_2 \lambda_1 \lambda_2 (P_2 \lambda_1 + \lambda_1 \lambda_2) + P_1 P_2^2 \lambda_1^2 + \lambda_1^2 \lambda_2 (P_1 P_2^2 \lambda_1 + P_1 P_2 \lambda_1 \lambda_2 + P_2 \lambda_1^2 \lambda_2), \quad (36)$$

$$M_3 = -P_1 P_2^2 \lambda_1^4 \lambda_2^2, \quad (37)$$

$$N_1 = -P_1 P_2 - \lambda_1 \lambda_2 (P_2 P_L \lambda_1 + \lambda_1 \lambda_2) - \lambda_1 (P_1 P_2 + P_2 P_L \lambda_1), \quad (38)$$

$$N_2 = P_1 P_2 \lambda_1 \lambda_2 (P_2 P_L \lambda_1 + \lambda_1 \lambda_2) + P_1 P_2^2 P_L \lambda_1^2 + \lambda_1^2 \lambda_2 (P_1 P_2^2 P_L \lambda_1 + P_1 P_2 \lambda_1 \lambda_2 + P_2 P_L \lambda_1^2 \lambda_2), \quad (39)$$

$$N_3 = -P_1 P_2^2 P_L \lambda_1^4 \lambda_2^2, \quad (40)$$

$$L_1 = \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{2M_1^3}{27} - \frac{M_1 M_2}{3} + M_3 \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{2M_1^3}{27} - \frac{M_1 M_2}{3} + M_3 \right)^2 + \frac{1}{27} \left( M_2 - \frac{M_1^2}{3} \right)^3} \right\}^{\frac{1}{3}}, \quad (41)$$

$$L_2 = \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{2M_1^3}{27} - \frac{M_1 M_2}{3} + M_3 \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{2M_1^3}{27} - \frac{M_1 M_2}{3} + M_3 \right)^2 + \frac{1}{27} \left( M_2 - \frac{M_1^2}{3} \right)^3} \right\}^{\frac{1}{3}}, \quad (42)$$

$$L_3 = \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{2N_1^3}{27} - \frac{N_1 N_2}{3} + N_3 \right) + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{2N_1^3}{27} - \frac{N_1 N_2}{3} + N_3 \right)^2 + \frac{1}{27} \left( N_2 - \frac{N_1^2}{3} \right)^3} \right\}^{\frac{1}{3}}, \quad (43)$$

$$L_4 = \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{2N_1^3}{27} - \frac{N_1 N_2}{3} + N_3 \right) - \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{2N_1^3}{27} - \frac{N_1 N_2}{3} + N_3 \right)^2 + \frac{1}{27} \left( N_2 - \frac{N_1^2}{3} \right)^3} \right\}^{\frac{1}{3}}. \quad (44)$$

### 3 液化层特征量对场地卓越频率的影响

式 (34) 给出了液化导致场地卓越周期上升比的理论解答, 为了与地震动的卓越频率相对应, 将卓越周期上升比的表达改为卓越频率下降率的表达, 则场地卓越频率下降率  $\delta$  可表达为

$$\delta = (f - f')/f = \Delta/(1 + \Delta), \quad (45)$$

式中,  $f$  和  $f'$  分别代表液化前与液化后场地的卓越频率。由公式可见, 场地卓越频率下降率  $\delta$  由 3 个特征参数决定: 上覆盖层与液化层的厚度比  $\lambda_1$ , 液化层与下卧层的厚度比  $\lambda_2$ , 液化层液化后与液化前的剪切模量比  $P_L$ 。

需要说明的是, 土层在强地震作用下的动力响应为非线性问题, 三质点体系显然并不能代表一般的情况。但是, 考虑到液化导致土层刚度明显下降, 远超

出土体一般非线性导致土体刚度变化的影响, 即一般非线性导致土体刚度的降低与液化导致土层刚度降低相比为小量。因此, 本文的模型对含有液化层导致的场地刚度相对降低的估计应具有较大可靠性。

### 3.1 特征量影响的一般情况

图2给出了场地卓越频率下降率随覆盖层与液化的厚度比 $\lambda_1$ 和液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 的变化曲线, 其中液化后剪切模量为初始剪切模量比(液化层软化程度)为1/80。由图2可知, 场地卓越频率下降率随液化层与下卧层的厚度比的增大而增大, 随着上覆盖层与液化层厚度比的增大先增大后减小,  $\delta$ 对覆盖层与液化层厚度比 $\lambda_1$ 要比液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 的敏感。

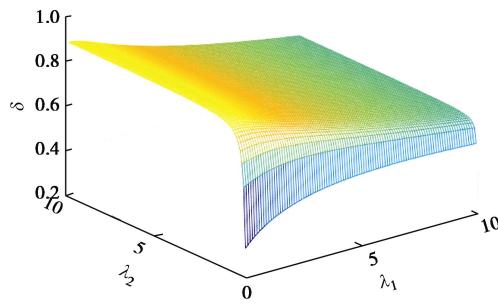


图2 场地卓越频率下降率 $\delta$ 与覆盖层与液化层厚度比 $\lambda_1$ 、液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 的关系

Fig. 2 Proportional decrease in predominant frequency ( $\delta$ ) versus ratio of overburden layer thickness to liquefied layer thickness ( $\lambda_1$ ) and ratio of liquefied layer thickness to substratum layer thickness ( $\lambda_2$ )

图3为液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 取1时, 场地卓越频率下降率与液化层软化程度 $P_L^{-1}$ 及覆盖层与液化厚度比 $\lambda_1$ 的关系。图4覆盖层与液化厚度比 $\lambda_1$ 取1时, 场地卓越频率下降率与液化层软化程度 $P_L^{-1}$ 及液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 的关系; 由图3可知,  $\lambda_2$ 取一定值时, 场地卓越频率下降率随着覆盖层与液化厚度比的增大而呈减小趋势。由图4可见,  $\lambda_1$ 取一定值时, 场地卓越频率下降率随液化层软化程度的增大而增大, 随着液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 的增大而增大。对比图3, 4可以发现, 同样 $P_L^{-1}$ ,  $\delta$ 与 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的关系有不同表现,  $\delta$ 随 $\lambda_1$ 增大呈现平稳减小的趋势,  $\delta$ 随 $\lambda_2$ 增大则成先迅速增长后平稳增长的趋势, 本图中的拐点在液化层与下卧层厚度比为1左右, 其他情况还有待进一步讨论。

### 3.2 覆盖层厚度的影响

液化层3种软化程度和不同液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 下, 覆盖层与液化层厚度比 $\lambda_1$ 对场地频率下降率 $\delta$ 的影响见图5。从图5可看出, 覆盖层与液化层厚

度比对场地频率下降率的影响模式与液化层软化程度基本无关, 覆盖层与液化层厚度比 $\lambda_1$ 对场地频率下降率 $\delta$ 影响的具体模式与液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 密切相关。在不同的 $\lambda_2$ 下,  $\lambda_1$ 对 $\delta$ 的影响可分为3种模式:  $\lambda_2$ 较大时, 即图5中 $\lambda_2>0.5$ 的情况,  $\delta$ 很大(0.4以上), 且随着 $\lambda_1$ 增大 $\delta$ 减小, 即液化层与下卧层厚度比很大时, 场地频率下降率很大, 且随上覆盖层与液化层厚度比增大有所降低, 二者呈指数关系; 当 $\lambda_2$ 较小时(如 $\lambda_2<0.04$ ),  $\delta$ 很小在0.4以下, 且随着 $\lambda_1$ 增大 $\delta$ 增大, 即液化层与下卧层厚度比很小时, 场地频率下降率不大, 且随上覆盖层与液化层厚度比增大有所增加, 二者也呈指数关系; 当 $\lambda_2$ 为中等值时,  $\delta$ 在0.2~0.6左右间呈现波动状态, 随着 $\lambda_1$ 增大 $\delta$ 先增大后减小。

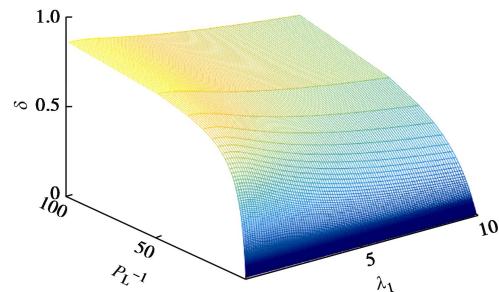


图3  $\lambda_2=1$ 时 $\delta$ 与液化层软化程度 $P_L^{-1}$ 、覆盖层与液化层厚度比 $\lambda_1$ 的三维关系图

Fig. 3 Three-dimensional plot of  $\delta$  versus degree of softening of liquefied layer ( $P_L^{-1}$ ) and  $\lambda_1$  for  $\lambda_2=1$

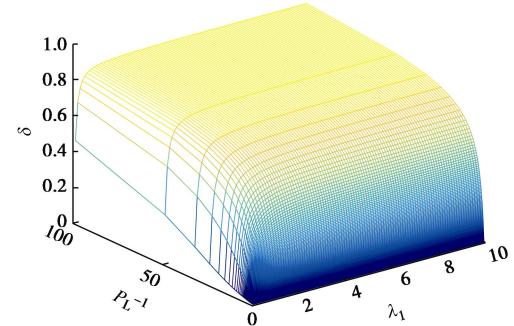


图4  $\lambda_1=1$ 时 $\delta$ 与液化层软化程度 $P_L^{-1}$ 、液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 的三维关系图

Fig. 4 Three-dimensional plot of  $\delta$  versus  $P_L^{-1}$  and  $\lambda_2$  for  $\lambda_1=1$

### 3.3 下卧层厚度的影响

液化层3种软化程度和不同覆盖层与液化层厚度比 $\lambda_2$ 下, 液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 对场地频率下降率 $\delta$ 的影响见图6。由图6可知, 液化层3种软化程度下,  $\lambda_2$ 对 $\delta$ 影响的整体模式大致相同, 覆盖层与液化层厚度比 $\lambda_1$ 对液化层与下卧层厚度比 $\lambda_2$ 与场地频率

下降率  $\delta$  关系具有较大影响, 在不同的  $\lambda_1$  下,  $\lambda_2$  与  $\delta$  的关系曲线有所不同。总体上,  $\delta$  随  $\lambda_1$  的增大而增大, 曲线可分为两个阶段, 一个是快速上升阶段, 一个是平稳增长阶段, 二者的转换点与  $\lambda_1$  密切相关。当  $\lambda_1$  较小时 ( $\lambda_1 < 1$ ),  $\delta$  可达 0.8 以上, 且  $\delta$  在  $\lambda_1 = 1$  时由快速上升转为平稳增长; 当  $\lambda_1$  较大时 ( $\lambda_1 > 20$ ),  $\delta$  较小, 即场地频率下降率不超过 60%, 转换点则移至  $\lambda_1 = 0.1$  左右; 当  $\lambda_1$  为中等时 ( $5 < \lambda_1 < 10$ ), 在  $\lambda_1 = 0.2$  左右转变为平稳增长, 场地频率下降率在 40%~80% 之间变化。

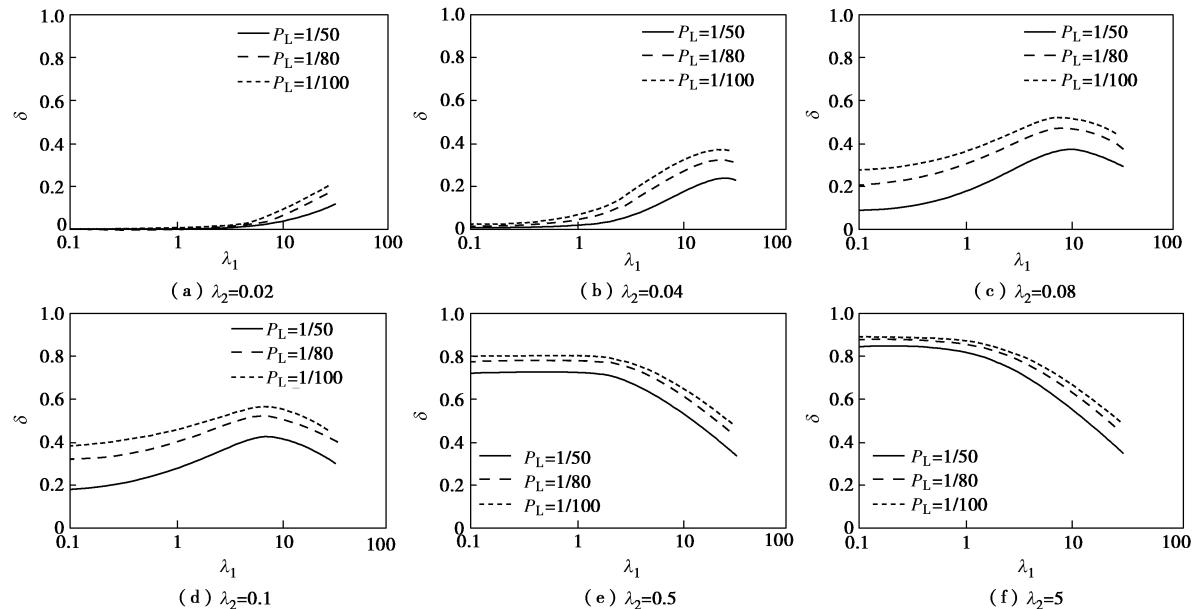


图 5 不同液化层与下卧层厚度比  $\lambda_2$  下场地频率下降率与覆盖层与液化层厚度比  $\lambda_1$  的关系

Fig. 5 Plots of  $\delta$  versus  $\lambda_1$  for three different values of  $P_L^{-1}$  at different  $\lambda_2$

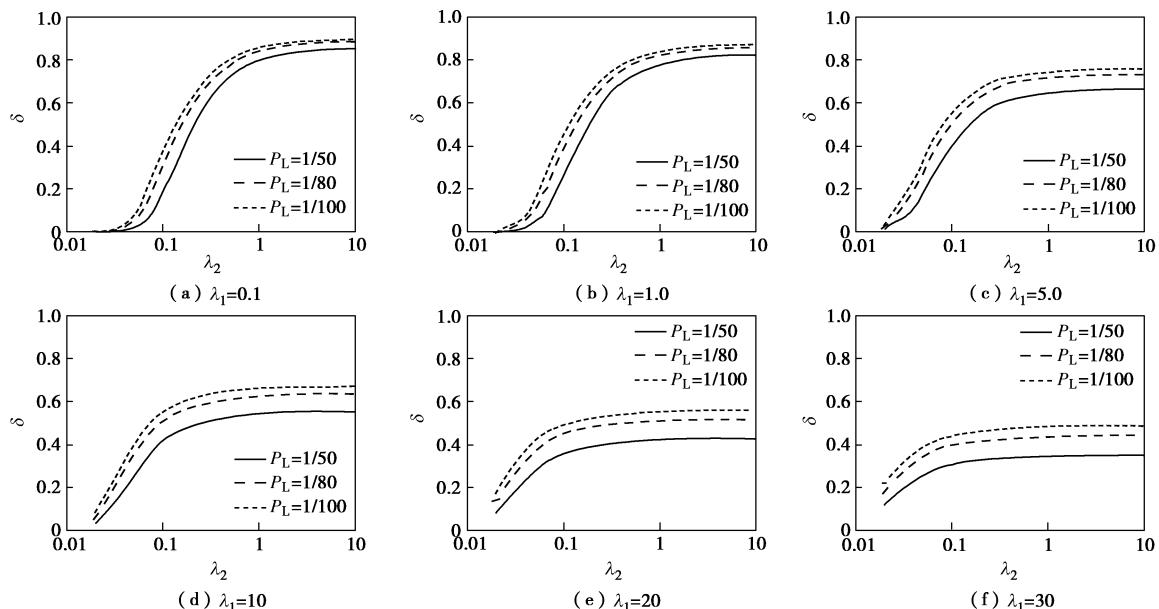
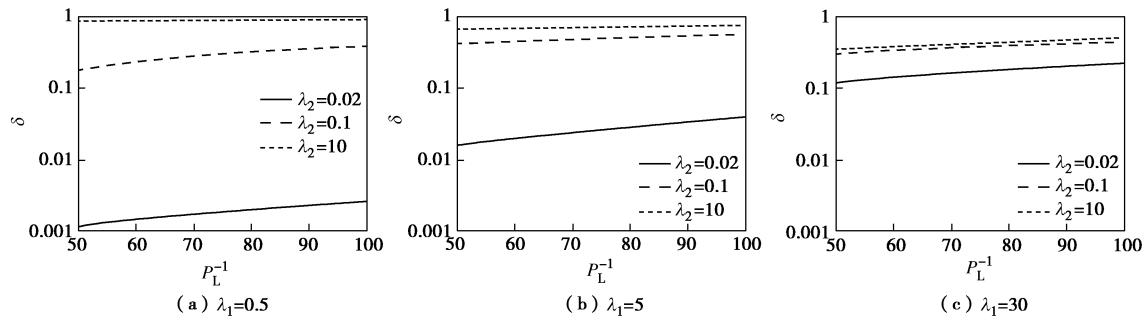
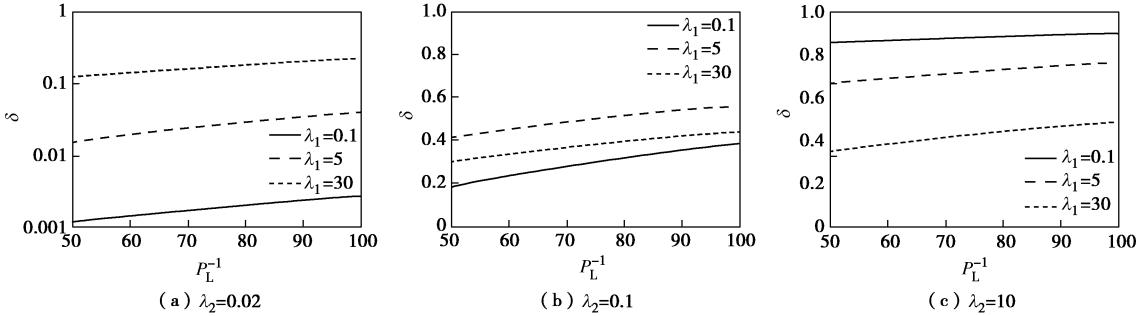


图 6 不同覆盖层与液化层厚度比  $\lambda_1$  下场地频率下降率  $\delta$  与液化层与下卧层厚度比  $\lambda_2$  的关系

Fig. 6 Relationship between  $\delta$  and  $\lambda_1$  for different values of  $\lambda_2$  at different  $P_L^{-1}$

### 3.4 液化层软化程度的影响

不同液化层与下卧层厚度比  $\lambda_2$ 、不同下覆盖层与液化层厚度比  $P_L^{-1}$  场地频率下降率  $\delta$  与液化层软化程度关系见图 7, 8。可以看出, 对于不同的  $\lambda_2$  和  $P_L^{-1}$ ,  $\delta$  与  $P_L^{-1}$  均呈指数形式递增, 即不论覆盖层和下卧层厚度如何, 场地频率下降率与液化层软化程度均呈指数递增关系。但是, 从图中可见, 场地频率下降率与液化层软化程度虽呈递增关系, 但绝对增长幅度不大, 0.001~0.15, 因此液化层的软化程度在常规范围内对

图 7 不同  $\lambda_1$  情况下  $\delta$  与  $P_L^{-1}$  的关系Fig. 7 Relationship between  $\delta$  and  $P_L^{-1}$  for different  $\lambda_1$ 图 8 不同  $\lambda_2$  情况下  $\delta$  与  $P_L^{-1}$  的关系Fig. 8 Relationship between  $\delta$  and  $P_L^{-1}$  for different  $\lambda_2$ 

场地频率下降率影响较小。

## 4 结 论

本文将实际土层视为水平成层状, 以三质点体系代表具有液化夹层的普适性场地, 提出了土体液化引起场地卓越频率变化的解答, 得到了土层及液化层特征量对场地卓越频率的影响规律。

(1) 液化夹层的存在将使场地卓越频率下降, 场地卓越下降率主要与覆盖层与液化层厚度比、液化层与下卧层厚度比、液化层软化程度这3个参数相关。

(2) 3个参数对场地卓越下降率影响程度大小的排序为覆盖层与液化层厚度比、液化层与下卧层厚度比和液化层软化程度, 其中覆盖层与液化层厚度比起控制作用, 但对场地卓越下降率影响模式随液化层与下卧层厚度比的变化而不同; 场地卓越下降率随液化层与下卧层厚度比的增大而增大, 随液化层软化程度增大而增大。

(3) 场地卓越下降率随覆盖层与液化层厚度比的变化具体可分为3种模式: 液化层与下卧层厚度比很大时, 场地卓越下降率随覆盖层与液化层厚度比增大呈指数关系降低, 变化在40%~80%之间; 液化层与下卧层厚度比很小时, 场地卓越下降率随覆盖层与液化层厚度比增大呈指数关系增加, 但不超过40%; 液化层与下卧层厚度比为常规值, 场地卓越下降率则随

覆盖层与液化层厚度比呈现一种定值附近先增大后减小的波动状态, 变化介于20%~60%之间。

(4) 场地卓越下降率随液化层与下卧层厚度比增大呈快速上升阶段和平稳增长两个阶段, 二者转换点与覆盖层与液化层厚度比密切相关: 当覆盖层与液化层厚度比较小时, 转换点为1左右; 当覆盖层与液化层厚度比较大时, 则转换点移至0.2左右。液化层与下卧层厚度比对场地卓越下降率的影响大小与覆盖层与液化层厚度比密切相关: 覆盖层与液化层厚度比小于1.0时, 场地卓越下降率范围较大, 且最大可达到90%; 覆盖层与液化层厚度比很大时,  $\delta$  在10%~60%之间; 当覆盖层与液化层厚度比为中等时, 场地卓越下降率在40%~80%之间变化。

(5) 场地卓越下降率与液化层软化程度虽呈递增关系, 但绝对增幅最大为0.15, 因此常规范围内液化层的软化程度对 $\delta$ 的影响较小。

## 参考文献:

- [1] BARTLETT S F, YOUD T L. Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction-induced lateral spread[R]. Buffalo: National Center for Earthquake Engineering Research Technical Report, 1992, NCEER-92-0021.
- [2] YOUD T L, BEN L. Influence of soil softening and

- liquefaction on spectral acceleration[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(7): 811 – 825.
- [3] ISHIHARA K, YASUDA S, SHINKAWA N. Soil characteristics and ground damage[J]. Soils and foundations, 2012, **36**(1): 109 – 118.
- [4] 陈龙伟, 袁晓铭, 李雨润. 水平土层特性变异性对传递函数影响分析初探[J]. 岩土力学, 2013, **34**(增刊 2): 363 – 367. (CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, LI Yu-run. Preliminary analysis of influence of site characteristics variability on site transfer function for horizontal strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(S2): 363 – 367. (in Chinese))
- [5] MISKO Cubrinovski, BRENDON Bradley, LIAM Wotherspoon, et al. Geotechnical aspects of the 22 February 2011 Christchurch earthquake[J]. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 2011, **44**(4): 205 – 226.
- [6] 陈龙伟, 袁晓铭, 孙 锐. 2011 年新西兰 Mw6.3 地震液化及岩土震害评述[J]. 世界地震工程, 2013, **29**(3): 1 – 9. (CHEN Long-wei, YUAN Xiao-ming, SUN Rui. Review of liquefaction phenomena and geotechnical damage in the 2011 New Zealand Mw6.3 earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2013, **29**(3): 1 – 9. (in Chinese))
- [7] NAKAYAMA W, SHIMUZU Y, SUZUKI T. Development of new method to detect subsoil liquefaction using seismic records[C]// Institute of Social Safety Science. 1998: 60 – 61.
- [8] 孙 锐, 袁晓铭. 基于强震记录快速识别场地液化的频率下降率法[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(9): 1372 – 1379. (SUN Rui, YUAN Xiao-ming. The method of frequency decrease rate for fast identification of site liquefaction from surface acceleration records[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(9): 1372 – 1379. (in Chinese))
- [9] 刘汉龙. 土动力学与土工抗震研究进展综述[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(4): 148 – 164. (LIU Han-long. A review of recent advances in soil dynamics and geotechnical earthquake engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(4): 148 – 164. (in Chinese))
- [10] 陈国兴, 徐建龙, 袁灿勤. 南京城区岩土体剪切波速与土层深度的关系[J]. 南京建筑工程学院学报, 1998, **45**(2): 32 – 37. (CHEN Guo-xing, XU Jian-long, YUAN Can-qin. Relation between depth and shear wave velocity of soil and bedrock in Nanjing City[J]. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute, 1998, **45**(2): 32 – 37. (in Chinese))

## 本期广告索引

- 封 2 重庆地质仪器厂
- 封 3 南瑞集团水利水电技术分公司
- 封 4 北京理正软件股份有限公司