

# 深覆盖土层 Rayleigh 阻尼矩阵建模问题的讨论

楼梦麟, 邵新刚

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 分别应用时域和频域分析方法对土层的地震反应进行了计算, 通过比较时域和频域的计算结果, 探讨了深覆盖土层地震反应时域分析中 Rayleigh 阻尼矩阵合理建模的重要性。数值结果表明: 在深覆盖土层地震反应时域分析中, Rayleigh 比例阻尼矩阵不同建模方式对土层加速度反应计算结果的准确性影响很大, 而对土层位移反应计算结果的准确性影响非常有限。建议当土层基频高于基岩地震波的主要分量激励频率时, 确定 Rayleigh 阻尼矩阵比例系数的第 2 个自振频率  $\omega_n$  可选取土层第 2 或第 3 阶低阶自振频率, 而当土层基频接近于、低于特别是远低于基岩地震波的主要分量激励频率时, 应重视土层高阶振型共振效应对土层地震反应的贡献, 此时  $\omega_n$  应选取为输入基岩地震波反应谱的峰值频率  $\omega_R$ 。

**关键词:** Rayleigh 阻尼; 时域; 频域; 深覆盖土层; 反应谱峰值; 阻尼系数

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)07-1272-08

**作者简介:** 楼梦麟(1947-), 男, 浙江余姚人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程结构抗震防灾、土-结构动力相互作用等方面的研究与教学工作。E-mail: lml@tongji.edu.cn。

## Discussion on modeling issues of Rayleigh damping matrix in soil layers with deep deposit

LOU Meng-lin, SHAO Xin-gang

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The seismic response of soil layers is calculated by using the methods of time domain and frequency domain separately. Through the comparison of the calculated results between the time domain and the frequency domain, the importance of reasonable modeling by Rayleigh damping matrix in time domain analysis of earthquake response of soil layers with deep deposit is discussed. The numerical results show that in the time domain analysis of earthquake response of soil layers with deep deposit, different modeling methods of Rayleigh proportional damping matrix have great influence on the accuracy of the results of the acceleration response of soils but a very limited impact on that of the displacement response of soils. It is suggested that when the fundamental frequency of soil layers is higher than the excitation frequency of the main component of the bedrock seismic waves, the low-order natural frequency such as the second or third should be selected as the second natural frequency to determine the Rayleigh damping matrix proportion coefficient. When the fundamental frequency of the soil layer is close to and especially much lower than the excitation frequency of the main component of the bedrock seismic waves, the contribution of high-order modes resonance effect on the seismic response of soil layers should be highlighted and  $\omega_n$  should be selected as the response spectrum peak frequency  $\omega_R$  of the input bedrock seismic waves.

**Key words:** Rayleigh damping; time domain; frequency domain; soil layer with deep deposit; response spectrum peak frequency; damping coefficient

## 0 引言

在结构地震反应时域分析中, 出于数学建模的便利目前常采用 Rayleigh 比例阻尼的假定来建立结构的阻尼矩阵<sup>[1-2]</sup>。对于一般结构, 往往选取两个结构的低阶振型来确定 Rayleigh 阻尼矩阵。已有研究表明: 对于结构基频接近于或高于地震激励主要谐波分量的激励频率时, 上述取值方法是可行的。然而, 当结构基

频远低于地震波的主要分量的激励频率时, 仅用两个结构低阶振型频率和阻尼比来确定 Rayleigh 阻尼矩阵比例系数时, 将低估结构的地震反应<sup>[3-5]</sup>。克拉夫<sup>[1]</sup>建议  $\omega_n$  取对动力反应有显著贡献的高阶振型中选取,

基金项目: 国家科技支撑项目 (2011BAG07B01); 国家自然科学基金项目 (90915011)

收稿日期: 2012-09-06

然而在实际的场地计算中如何界定这个显著贡献的高阶振型又是十分困难的, 具有不确定性。深覆盖土层地震反应分析是重大工程场地地震安全性评价<sup>[6]</sup>工作中常会遇到的问题, 由于覆盖厚度百米以上土层的基频远低于基岩地震波主要分量的激励频率, 合理选择确定 Rayleigh 阻尼矩阵比例系数的振型频率对于准确计算土层地震反应有重要影响, 文献[7]提出了频域滞后阻尼等效为时域粘滞阻尼的转换频率新概念, 并通过输入 13 条基岩地震波的土层地震反应数值分析结果建议该频率的计算方法, 改进了深覆盖土层地震反应计算成果的准确性。但是这一方法主要针对与刚度矩阵成比例的阻尼矩阵仅依赖一个土层自振频率, 而且建议的计算公式为基于该计算的经验公式, 应用起来尚有不便之处。本文将进一步讨论建立基于两个系统自振频率的 Rayleigh 阻尼矩阵时, 如何合理的选择这两个频率参数。

## 1 地震反应分析方程

进行土层的确定性地震反应分析时, 通常区分为时域和频域两类方法, 这两种分析方法各有不同的适用范围。采用频域法时, 可以方便地对具有依赖于频率参数的线性体系进行计算, 但对于土层非线性分析只能采用等效线性化方法, 无法进行真非线性计算, 而采用时域分析能够对非线性体系进行较为合理的计算。在进行复杂土层的地震动反应时域分析时, 一般采用集中质量的有限元方法<sup>[1-2]</sup>。对原结构进行离散化处理后, 可以得到如下动力方程式<sup>[1]</sup>:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g(t) = \{p_{\text{eff}}(t)\} \quad (1)$$

式中  $[M]$ ,  $[C]$  和  $[K]$  分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\{u(t)\}$  为土层各节点相对于下卧基岩面的相对位移向量;  $\ddot{u}_g(t)$  为土层下卧基岩面处的输入地震加速度;  $\{p_{\text{eff}}(t)\}$  为等效地震荷载向量。目前, 在土层、土坝等以土介质为主的土工体系地震反应的时域计算中, 应用最为广泛的阻尼模型是 Rayleigh 比例阻尼矩阵, 即假定土层的阻尼矩阵是质量矩阵和刚度矩阵的线性组合:

$$[C] = a_0[M] + a_1[K] \quad (2)$$

式中,  $a_0$  和  $a_1$  为比例常数。利用振型正交性, 可得

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \frac{2\omega_m\omega_n}{\omega_n^2 - \omega_m^2} \begin{bmatrix} \omega_n & -\omega_m \\ -1/\omega_n & 1/\omega_m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \xi_m \\ \xi_n \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $\omega_m$ ,  $\omega_n$  和  $\xi_m$ ,  $\xi_n$  分别为计算体系第  $m$ ,  $n$  阶振型的自振频率及对应的阻尼比。振型阻尼比是结构体系耗能特性的宏观描述, 易于从室内土样实验和实测试验中获取。当各阶阻尼比相同时, 即  $\xi_m = \xi_n = \xi$ ,

式 (3) 可简化为

$$\begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_m + \omega_n} \begin{Bmatrix} \omega_m\omega_n \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

这样由式 (2) 确定的第  $i$  阶振型阻尼比的计算值为

$$\xi_i = \frac{a_0}{2\omega_i} + \frac{a_1\omega_i}{2} \quad (5)$$

式 (5) 表示的第  $i$  阶振型阻尼比与第  $i$  阶自振频率之间的关系, 如图 1 所示。

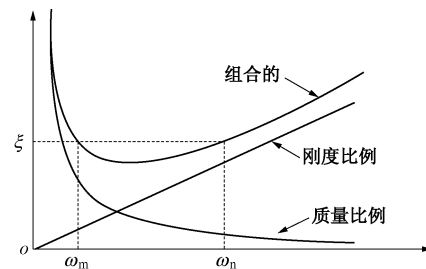


图 1 振型阻尼比与频率的关系

Fig. 1 Relationship between modal damping ratio and frequency

对于一般工程结构而言, 因为低阶振型在结构的地震反应中起主导作用, 通常取低阶振型来确定比例系数  $a_0$  和  $a_1$ , 一般取  $\omega_m = \omega_1$ ,  $\omega_n$  取为结构计算模式的第 2 或第 3 阶振型频率。对于高频分量比较丰富的基岩波而言, 深覆盖土层低阶自振频率的数值一般远小于基岩波主要分量的激励频率。从图 1 曲线可以看出, 如何合理选取  $\omega_n$  使得介于  $\omega_1 - \omega_n$  之间的振型阻尼比偏小和大于  $\omega_n$  振型阻尼比偏大给土层地震反应计算准确性带来的综合影响为最小是值得研究的问题。

## 2 数值分析

### 2.1 土层计算

本文通过算例的数值分析来介绍这一问题的解决方法。土层计算模型采用港珠澳隧道工程场地模型的纵剖面为分析对象, 土层水平范围为 1016 m, 底部为基岩面, 左端深度为 85 m, 右端深度为 112 m, 这一有限元分析模型称为土层模型 1, 如图 2 所示。

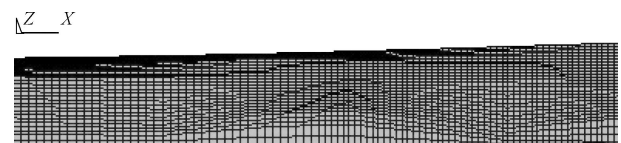


图 2 土层有限元网格图

Fig. 2 Finite element mesh of soil layer

为了考察土层不同基频对  $\omega_n$  值取值的影响, 另外在此模型基础上, 减小土层厚度, 形成新的土层计算模型, 分别称为土层模型 2 和土层模型 3, 其中土层

模型 2 的左端厚度为 46 m, 右端厚度为 61 m, 土层模型 3 的左端厚度为 17 m, 右端厚度为 22 m。表 1 中列出了 3 个土层模型的前 10 阶自振频率与  $X$ 、 $Y$  方向的振型参与系数。

从表 1 可以看出土层的前 3 阶振型都是以  $X$  向的振型为主的, 下文计算中所取的  $f_1$  和  $f_2$  即是取自各土层  $X$  向的第 1 阶频率和第 2 阶频率。

2.2 基岩面输入地震波

为了比较全面地考察土层下卧基岩面处的输入地震波的影响, 在土层地震反应计算中共选用了 5 条地震波, 包括该工程场地地震安全性评估报告给出的基岩人工波和 El Centro、Kobe、Taft、汶川基岩波等 4

条地震实测波, 它们的时程 Fourier 幅值谱和反应谱分别如图 3~7 所示。计算中输入地震波的加速度峰值都调整为 0.1g, 土层各阶振型的阻尼比取为 0.08。

为了考察地震波频谱分布对质量比例阻尼系数取值的影响, 选取了几个频率参数作为地震波的特征频率参数, 分别为: ①反应谱峰值频率  $f_R$ ; ②反应谱曲线重心频率  $f_{Rg}$ ; ③Fourier 幅值谱峰值频率  $f_F$ 。此外还引入考虑结构基频和地震波特征频率综合影响的频率参数; ④ $f_a=(f_1+f_R)/2$ ; ⑤ $f_b=(f_1+f_F)/2$ ; ⑥文献[6]中滞后阻尼转换频率  $f_c$ 。对应于 5 条输入地震波的不同特征频率值如表 2 所示。

表 1 不同土层模型的前 10 阶自振频率及对应振型参与系数

| Table 1 First 10 natural frequencies of different soil layer models and corresponding modal participation factors |        |           |         |        |           |         |        |           |        |
|---|--------|-----------|---------|--------|-----------|---------|--------|-----------|--------|
| 模态  | 频率 /Hz | 模型 1 参与系数 |         | 频率 /Hz | 模型 2 参与系数 |         | 频率 /Hz | 模型 3 参与系数 |        |
|   |        | $X$ 方向    | $Y$ 方向  |        | $X$ 方向    | $Y$ 方向  |        | $X$ 方向    | $Y$ 方向 |
| 1   | 0.65   | 10257.00  | 42.40   | 1.17   | 6586.40   | 7.39    | 3.15   | 3276.80   | 0.18   |
| 2   | 0.76   | 7053.20   | 88.08   | 1.30   | 4534.20   | 42.30   | 3.29   | 1620.30   | 8.03   |
| 3   | 0.84   | 2228.80   | -86.83  | 1.40   | 4340.90   | -7.38   | 3.42   | 2163.60   | -0.55  |
| 4   | 0.96   | 170.00    | 225.28  | 1.47   | 2049.90   | 22.34   | 3.53   | 1437.70   | 5.94   |
| 5   | 1.09   | -44.03    | 5893.80 | 1.56   | 515.68    | -41.42  | 3.63   | 1801.20   | 0.70   |
| 6   | 1.12   | 51.74     | 2810.90 | 1.69   | -24.39    | 60.13   | 3.73   | 1452.00   | 3.33   |
| 7   | 1.14   | -192.03   | 2680.60 | 1.84   | 119.65    | -149.15 | 3.81   | 1717.20   | 1.58   |
| 8   | 1.18   | -46.01    | 5144.90 | 1.97   | 5.18      | 3309.70 | 3.89   | 1552.70   | 0.61   |
| 9   | 1.22   | -122.99   | 3314.20 | 1.99   | 49.75     | 1603.90 | 3.95   | 1043.70   | 0.48   |
| 10  | 1.26   | -31.02    | 4437.70 | 2.01   | -91.87    | 1260.20 | 4.03   | 255.32    | -2.29  |

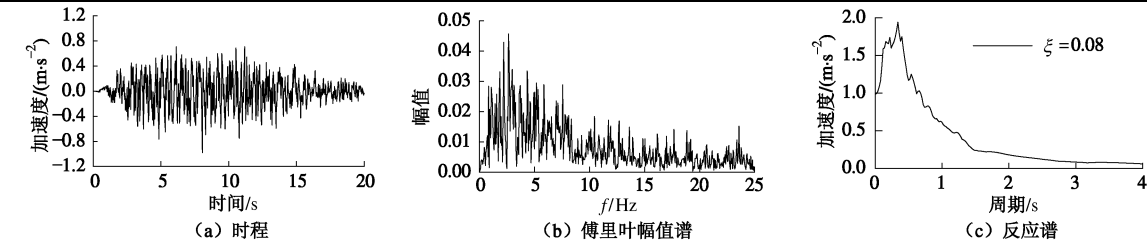


图 3 基岩人工波

Fig. 3 Bedrock artificial wave

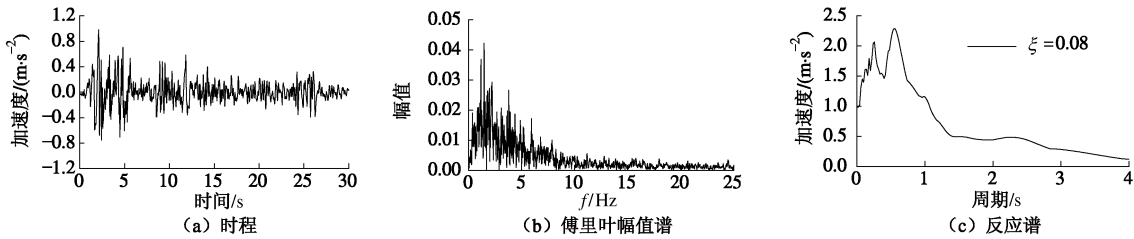


图 4 El Centro 波

Fig. 4 El Centro wave

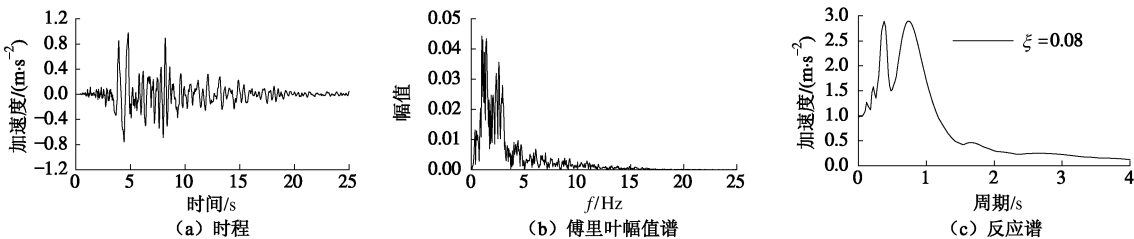


图 5 Kobe 波

Fig. 5 Kobe wave

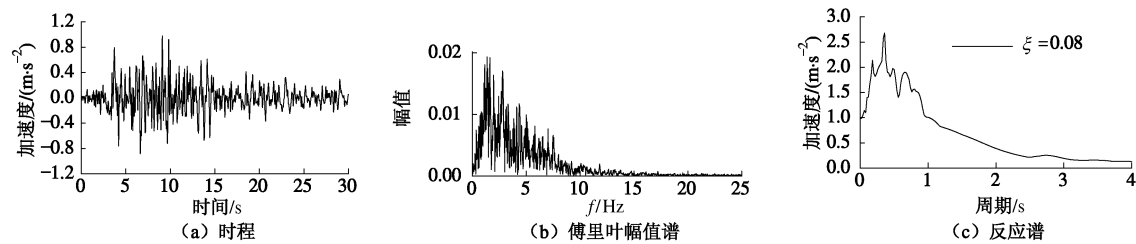


图 6 Taft 波

Fig. 6 Taft wave

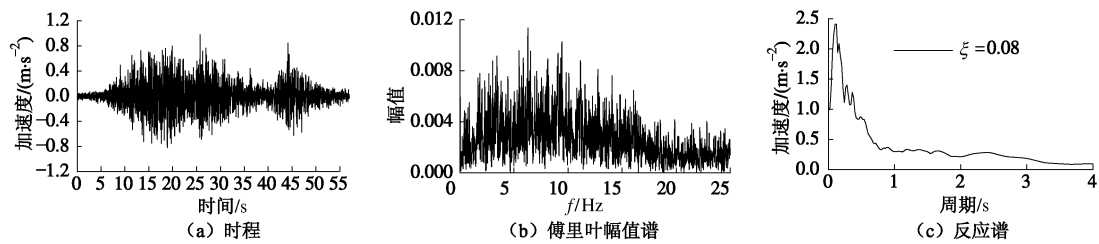


图 7 汶川波

Fig. 7 Wenchuan wave

表 2 对应于土层模型的特征频率值

Table 2 Characteristic frequency values corresponding to model of soil layers

| 地震波       | $f_R$ | $f_{Rg}$ | $f_F$ | 土层模型 1 |       |       | 土层模型 2 |       |       | 土层模型 3 |       |       |
|-----------|-------|----------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
|           |       |          |       | $f_a$  | $f_b$ | $f_c$ | $f_a$  | $f_b$ | $f_c$ | $f_a$  | $f_b$ | $f_c$ |
| 人工波       | 2.94  | 1.66     | 2.64  | 1.80   | 1.64  | 3.00  | 2.06   | 1.91  | 3.81  | 3.04   | 2.89  | 6.84  |
| El Centro | 1.79  | 0.93     | 1.46  | 1.22   | 1.06  | 1.55  | 1.48   | 1.32  | 2.01  | 2.47   | 2.31  | 3.42  |
| Kobe      | 1.35  | 1.26     | 0.98  | 1.00   | 0.81  | 1.55  | 1.26   | 1.08  | 2.01  | 2.25   | 2.06  | 3.42  |
| Taft      | 2.78  | 1.24     | 1.37  | 1.72   | 1.01  | 1.55  | 1.98   | 1.27  | 2.01  | 2.96   | 2.26  | 3.42  |
| 汶川        | 10.0  | 1.37     | 6.29  | 5.33   | 3.47  | 4.04  | 5.59   | 3.73  | 5.12  | 6.57   | 4.72  | 9.19  |

地震波的反应谱曲线重心处的频率  $f_{Rg}$  :

$$f_{Rg} = \lambda_1 / \lambda_0 \quad , \quad (6)$$

式中,  $\lambda_i$  为反应谱的谱矩, 即

$$\lambda_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty f^i A(f) df \quad (i=0, 1, 2) \quad . \quad (7)$$

分析表中 5 条地震波的特征频率参数  $f_R$ ,  $f_F$  和  $f_{Rg}$  可以看出: 所选的汶川基岩地震波由于频谱成分分布很广, 所以  $f_R$ ,  $f_F$  值很高, 是比较特殊的一条地震波, 表明高频成分很丰富, 同样基岩人工波中高频成分也较为丰富。

2.3 阻尼矩阵建模方式对土层地震反应的影响

(1) 误差计算公式

对于同一有限元模型, 分别采用时域和频域分析方法, 以频域计算所得的土层反应为准确值, 由于文献[7]中详细阐述了频域计算相关概念及原理, 本文不再作详细介绍。在时域分析中, 不同工况计算所得的反应结果与频域的计算结果相比较, 时域近似分析结果的相对误差可表示为

$$e = \frac{|a| - |a^*|}{|a^*|} \times 100\% \quad , \quad (8)$$

式中,  $a$  和  $a^*$  为土层同一节点处地震位移或加速度反应峰值, 其中  $a$  为时域分析结果,  $a^*$  为频域分析结果。

(2) 数值计算结果

由于土层倾斜, 尽管基岩面上只输入水平加速度, 土层中任意一点处都会有竖向振动分量。由于土层倾角不大, 相比于水平分量, 竖向分量很小, 为此本文主要从水平分量来考察阻尼矩阵系数计算的方法问题。数值结果表明竖向分量的变化规律与水平分量一致, 为此文中不一一介绍。表 3, 4 中列出了土层模型 1 在不同地震波激励下土层地表中点的水平加速度和位移反应幅值及相应的时域计算结果的误差。

表 5, 6 中列出了土层模型 2 在不同地震波激励下土层地表中点的水平加速度和位移反应幅值及相应的时域计算结果。

表 7, 8 中列出了土层模型 3 在不同地震波激励下土层地表中点处的水平加速度和位移反应幅值及相应的时域计算结果的误差。

(3) 不同阻尼矩阵建模对加速度的影响

从表 4 中可以看出: 土层模型 1 的基频远低于表 2 中 5 条地震波的特征频率  $f_R$ ,  $f_F$  以及  $f_{Rg}$ , 当取  $\omega_n = \omega_2$  形成土层地震反应计算中的阻尼矩阵时, 显然低估了土层地表的加速度峰值。相比之下取其  $\omega_n = \omega_R = 2\pi f_R$  及  $\omega_n = \omega_c = 2\pi f_c$  特征频率时, 土层地震反应峰值计算结果的误差水平要好于  $\omega_n = \omega_2$  时的结果, 尤其体现在



表 3 土层模型 1 中地表中点加速度与位移反应幅值

Table 3 Acceleration and displacement response amplitude of surface midpoint on soil model 1

| 地震波       | 加速度/(m·s <sup>-2</sup> ) |                       |                        |                       |                       |                       |                       |      | 位移/cm                 |                       |                        |                       |                       |                       |                       |      |
|-----------|--------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|
|           | <i>f</i> <sub>2</sub>    | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> | 频域   | <i>f</i> <sub>2</sub> | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> | 频域   |
| 人工波       | 1.10                     | 1.34                  | 1.20                   | 1.31                  | 1.22                  | 1.20                  | 1.35                  | 1.33 | 1.83                  | 1.87                  | 1.86                   | 1.87                  | 1.86                  | 1.86                  | 1.87                  | 1.90 |
| El Centro | 1.89                     | 1.99                  | 1.92                   | 1.97                  | 1.95                  | 1.93                  | 1.98                  | 1.99 | 3.57                  | 3.65                  | 3.58                   | 3.63                  | 3.61                  | 3.59                  | 3.63                  | 3.61 |
| Kobe      | 1.87                     | 1.85                  | 1.86                   | 1.86                  | 1.86                  | 1.86                  | 1.85                  | 1.96 | 3.40                  | 3.45                  | 3.44                   | 3.42                  | 3.42                  | 3.41                  | 3.46                  | 3.48 |
| Taft      | 1.47                     | 1.46                  | 1.45                   | 1.44                  | 1.43                  | 1.46                  | 1.44                  | 1.53 | 4.67                  | 4.74                  | 4.70                   | 4.70                  | 4.72                  | 4.69                  | 4.71                  | 4.72 |
| 汶川        | 0.83                     | 1.21                  | 0.86                   | 1.08                  | 1.03                  | 0.97                  | 0.99                  | 1.19 | 1.62                  | 1.63                  | 1.63                   | 1.64                  | 1.64                  | 1.64                  | 1.64                  | 1.41 |

表 4 土层模型 1 中地表加速度与位移计算误差

Table 4 Acceleration and displacement errors of calculation of surface midpoint on soil model 1

%

| 地震波       | 加速度                   |                       |                        |                       |                       |                       |                       |  | 位移                    |                       |                        |                       |                       |                       |                       |  |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
|           | <i>f</i> <sub>2</sub> | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> |  | <i>f</i> <sub>2</sub> | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> |  |
| 人工波       | -17                   | 1                     | -10                    | -1                    | -8                    | -10                   | 1                     |  | -3                    | -1                    | -2                     | -1                    | -2                    | -2                    | -1                    |  |
| El Centro | -5                    | 0                     | -4                     | -1                    | -2                    | -3                    | -1                    |  | -1                    | 1                     | -1                     | 0                     | 0                     | -1                    | 1                     |  |
| Kobe      | -5                    | -5                    | -5                     | -5                    | -5                    | -5                    | -5                    |  | -2                    | -1                    | -1                     | -2                    | -1                    | -2                    | -1                    |  |
| Taft      | -4                    | -4                    | -5                     | -5                    | -6                    | -5                    | -6                    |  | -1                    | 1                     | 0                      | 0                     | 0                     | -1                    | 0                     |  |
| 汶川        | -30                   | 1                     | -28                    | -9                    | -13                   | -19                   | -17                   |  | 15                    | 16                    | 16                     | 16                    | 16                    | 17                    | 16                    |  |

表 5 土层模型 2 中地表中点加速度与位移反应幅值

Table 5 Acceleration and displacement response amplitude of surface midpoint on soil model 2

| 地震波       | 加速度/(m·s <sup>-2</sup> ) |                       |                        |                       |                       |                       |                       |      | 位移/cm                 |                       |                        |                       |                       |                       |                       |      |
|-----------|--------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|
|           | <i>f</i> <sub>2</sub>    | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> | 频域   | <i>f</i> <sub>2</sub> | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> | 频域   |
| 人工波       | 1.63                     | 1.71                  | 1.65                   | 1.69                  | 1.67                  | 1.66                  | 1.75                  | 1.90 | 1.57                  | 1.61                  | 1.58                   | 1.60                  | 1.59                  | 1.59                  | 1.62                  | 1.54 |
| El Centro | 2.24                     | 2.25                  | 2.23                   | 2.24                  | 2.24                  | 2.22                  | 2.26                  | 2.38 | 2.71                  | 2.73                  | 2.69                   | 2.72                  | 2.72                  | 2.71                  | 2.74                  | 2.70 |
| Kobe      | 3.80                     | 3.80                  | 3.80                   | 3.79                  | 3.80                  | 3.79                  | 3.80                  | 3.77 | 5.47                  | 5.48                  | 5.47                   | 5.45                  | 5.47                  | 5.46                  | 5.51                  | 5.46 |
| Taft      | 2.43                     | 2.48                  | 2.43                   | 2.44                  | 2.45                  | 2.43                  | 2.45                  | 2.70 | 2.80                  | 2.82                  | 2.80                   | 2.80                  | 2.81                  | 2.80                  | 2.81                  | 2.78 |
| 汶川        | 0.99                     | 1.37                  | 0.99                   | 1.22                  | 1.19                  | 1.09                  | 1.16                  | 1.48 | 0.70                  | 0.72                  | 0.70                   | 0.71                  | 0.71                  | 0.71                  | 0.71                  | 0.67 |

表 6 土层模型 2 中地表加速度与位移计算误差

Table 6 Acceleration and displacement errors of calculation of surface midpoint on soil model 2

%

| 地震波       | 加速度                   |                       |                        |                       |                       |                       |                       |  | 位移                    |                       |                        |                       |                       |                       |                       |  |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
|           | <i>f</i> <sub>2</sub> | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> |  | <i>f</i> <sub>2</sub> | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> |  |
| 人工波       | -14                   | -10                   | -13                    | -11                   | -12                   | -12                   | -8                    |  | 1                     | 4                     | 2                      | 4                     | 3                     | 3                     | 5                     |  |
| El Centro | -6                    | -5                    | -7                     | -6                    | -6                    | -7                    | -5                    |  | 0                     | 1                     | -1                     | 0                     | 0                     | 0                     | 1                     |  |
| Kobe      | 1                     | 1                     | 1                      | 0                     | 1                     | 0                     | 1                     |  | 0                     | 0                     | 0                      | 0                     | 0                     | 0                     | 1                     |  |
| Taft      | -10                   | -8                    | -10                    | -10                   | -9                    | -10                   | -9                    |  | 1                     | 2                     | 1                      | 1                     | 1                     | 1                     | 1                     |  |
| 汶川        | -33                   | -7                    | -33                    | -17                   | -20                   | -26                   | -21                   |  | 4                     | 6                     | 4                      | 6                     | 6                     | 5                     | 6                     |  |

表 7 土层模型 3 中地表中点加速度与位移反应幅值

Table 7 Acceleration and displacement response amplitude of surface midpoint on soil model 3

| 地震波       | 加速度/(m·s <sup>-2</sup> ) |                       |                        |                       |                       |                       |                       |      | 位移/cm                 |                       |                        |                       |                       |                       |                       |      |
|-----------|--------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------|
|           | <i>f</i> <sub>2</sub>    | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> | 频域   | <i>f</i> <sub>2</sub> | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> | 频域   |
| 人工波       | 2.28                     | 2.27                  | 2.24                   | 2.27                  | 2.28                  | 2.27                  | 2.32                  | 2.63 | 0.44                  | 0.44                  | 0.44                   | 0.44                  | 0.44                  | 0.44                  | 0.45                  | 0.44 |
| El Centro | 2.69                     | 2.66                  | 2.64                   | 2.65                  | 2.68                  | 2.67                  | 2.70                  | 2.83 | 0.44                  | 0.43                  | 0.43                   | 0.43                  | 0.44                  | 0.44                  | 0.44                  | 0.45 |
| Kobe      | 1.64                     | 1.62                  | 1.62                   | 1.62                  | 1.63                  | 1.63                  | 1.65                  | 1.56 | 0.45                  | 0.44                  | 0.44                   | 0.44                  | 0.45                  | 0.44                  | 0.45                  | 0.43 |
| Taft      | 1.82                     | 1.81                  | 1.81                   | 1.81                  | 1.82                  | 1.81                  | 1.82                  | 2.05 | 0.53                  | 0.53                  | 0.52                   | 0.52                  | 0.53                  | 0.52                  | 0.53                  | 0.54 |
| 汶川        | 1.95                     | 2.10                  | 1.86                   | 2.03                  | 2.04                  | 1.99                  | 2.09                  | 2.34 | 0.34                  | 0.35                  | 0.33                   | 0.34                  | 0.34                  | 0.34                  | 0.34                  | 0.36 |

表 8 土层模型 3 中地表加速度与位移计算误差

Table 8 Acceleration and displacement errors of calculation of surface midpoint on soil model 3

%

| 地震波       | 加速度                   |                       |                        |                       |                       |                       |                       |  | 位移                    |                       |                        |                       |                       |                       |                       |  |
|-----------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
|           | <i>f</i> <sub>2</sub> | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> |  | <i>f</i> <sub>2</sub> | <i>f</i> <sub>R</sub> | <i>f</i> <sub>Rg</sub> | <i>f</i> <sub>F</sub> | <i>f</i> <sub>a</sub> | <i>f</i> <sub>b</sub> | <i>f</i> <sub>c</sub> |  |
| 人工波       | -13                   | -13                   | -15                    | -14                   | -13                   | -13                   | -12                   |  | 0                     | 0                     | -1                     | 0                     | 0                     | 0                     | 2                     |  |
| El Centro | -5                    | -6                    | -7                     | -6                    | -5                    | -5                    | -5                    |  | -3                    | -4                    | -5                     | -4                    | -3                    | -3                    | -3                    |  |
| Kobe      | 6                     | 4                     | 4                      | 4                     | 5                     | 5                     | 6                     |  | 3                     | 2                     | 2                      | 2                     | 3                     | 3                     | 3                     |  |
| Taft      | -12                   | -12                   | -12                    | -12                   | -12                   | -12                   | -12                   |  | -2                    | -2                    | -3                     | -3                    | -2                    | -2                    | -2                    |  |
| 汶川        | -17                   | -10                   | -20                    | -13                   | -13                   | -15                   | -11                   |  | -7                    | -4                    | -9                     | -5                    | -5                    | -6                    | -5                    |  |

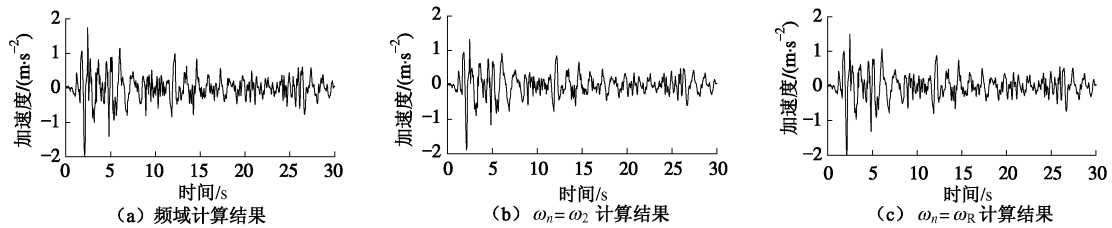


图8 土层模型1 土层地表中点加速度反应时程图 (El Centro 波激励)

Fig. 8 Time history of soil response of surface midpoint of soil model 1 (El Centro wave)

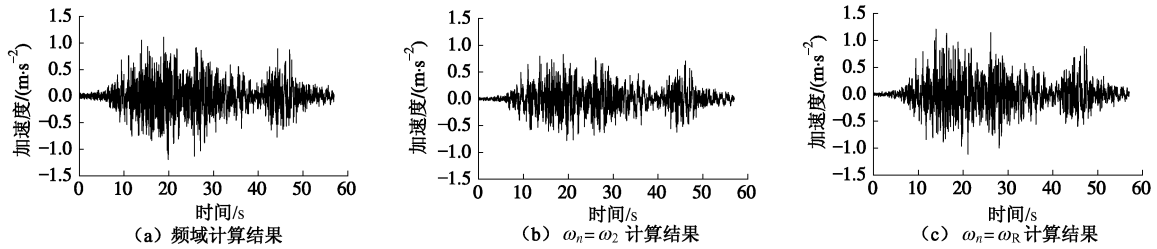


图9 土层模型1 土层地表中点加速度反应时程图 (汶川波激励)

Fig. 9 Time history of soil response of surface midpoint of soil model 1 (Wenchuan wave)

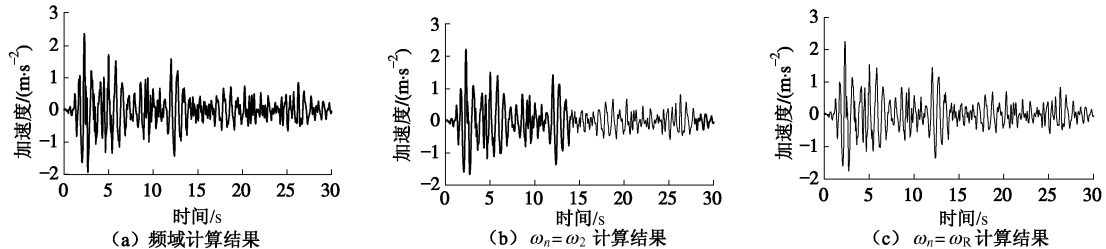


图10 土层模型2 土层地表中点加速度反应时程图 (El Centro 波激励)

Fig. 10 Time history of soil response of surface midpoint of soil model 2 (El Centro wave)

高频激励的情况下。对比而言, 采用  $f_c$  时土层加速度反应的误差水平要略高于采用  $f_R$ , 且不如  $f_R$  使用方便。

图8, 9中给出了不同计算工况下在 El Centro 波和汶川波激励下土层模型1 地表中点的水平加速度时程曲线。比较不同计算工况下时程曲线可以看出, 采用  $\omega_n = \omega_R$  形成阻尼矩阵后, 计算所得的土层地表中点加速度反应时程与频域计算所得的时程更为接近。其他地震波激励下的土层地表中点加速度反应时程曲线的比较情况类似, 限于篇幅, 不一一列出。

从表6可以看出: 土层模型2的基频总体上略低于表2中5条地震波的特征频率, 当取  $\omega_n = \omega_2$  形成土层地震反应计算中的阻尼矩阵时, 依然低估了土层地表的加速度峰值, 误差水平基本与模型1相差不多。

另外, 在取  $\omega_n = 2\pi f_R$  及  $\omega_n = 2\pi f_c$  特征频率时, 土层地震反应峰值计算结果的误差水平依然要好于  $\omega_n = \omega_2$  时的结果, 但这两种情况其自身的误差水平有所提高, 且  $\omega_n = \omega_R$  的误差水平优于  $\omega_n = \omega_c$ 。

图10, 11中给出了在 El Centro 波和汶川波激励下土层模型2 地表中点处的水平加速度反应时程曲线, 通过比较可以看出: 采用  $\omega_n = \omega_R$  形成阻尼矩阵后, 土层地表中点处的水平加速度反应时程与频域结果非常接近。在汶川地震波激励时更是如此。

从表8可以看出, 由于土层基频总体上高于或远高于(汶川地震波除外)表2中5条地震波的特征频率,  $\omega_n$  取各种特征频率时, 计算误差已非常接近。

图12, 13中给出了在 El Centro 波和汶川波激

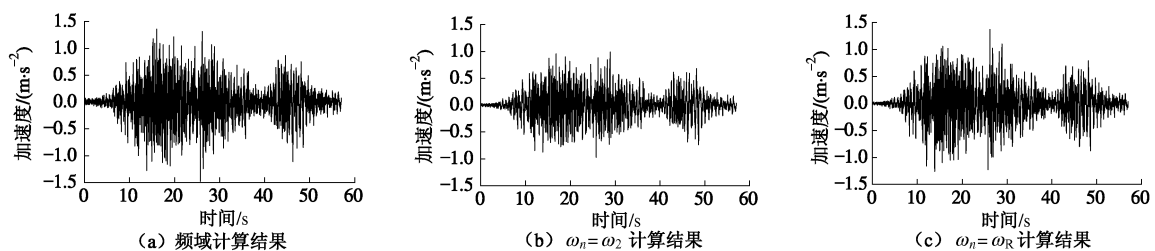


图11 土层模型2 土层地表中点加速度反应时程图 (汶川波激励)

Fig. 11 Time history of soil response of surface midpoint of soil model 2 (Wenchuan wave)

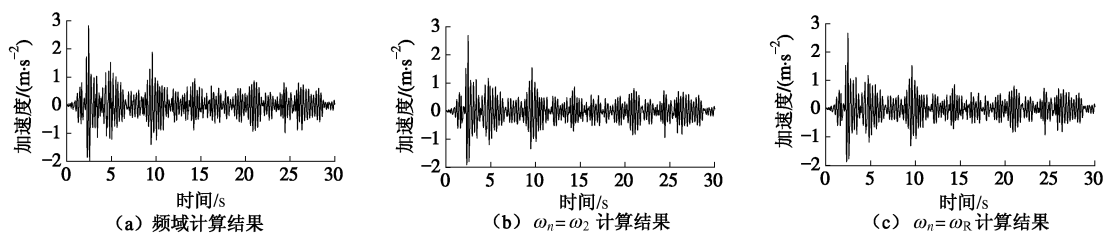


图 12 土层模型 3 土层地表中点加速度反应时程图 (El Centro 波激励)

Fig. 12 Time history of soil response of surface midpoint of soil model 3 (El Centro wave)

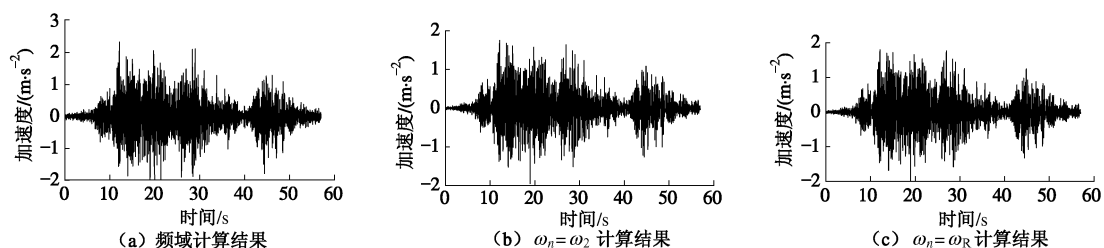


图 13 土层模型 3 土层地表中点加速度反应时程图 (汶川波激励)

Fig. 13 Time history of soil response of surface midpoint of soil model 3 (Wenchuan wave)

励下土层模型 3 地表中点处的水平加速度反应时程曲线,从图中可以看出,土层地表中点处的水平加速度反应时程已经非常接近。

#### (4) 不同阻尼矩阵建模对位移峰值的影响

此外,从表 4, 6, 8 可以看出,式 (8) 中  $\omega_n$  的不同取值对位移反应的影响非常有限。对于 3 种不同类型的土层,  $\omega_n$  取为土层反应水平方向第二阶频率时,土层地表位移峰值的计算误差均不算太大。其原因分析如下:当基岩面处存在简谐波  $a_g(t) = A_g \sin \omega t$  激励时,土层中某一点处的地震加速度反应的公式为  $a(t) = D(\omega) A_g \sin \omega t = A_0(\omega) \sin \omega t$ , 其中  $D(\omega)$  为动力放大系数。此时,对应同一点处的地震位移反应为、 $u(t) = -\frac{A_0(\omega)}{\omega^2} \sin \omega t = u_0(\omega) \sin \omega t$ 。很显然,随着激励频率  $\omega$  的升高,位移反应的幅值按激励频率平方减小。说明与土层地震加速度反应相比,土层地震位移反应更敏感于低频激励。因此,在计算土层地震位移反应时,准确计算土层第 1 阶振型位移反应是最为关键,高阶振型对土层地震位移反应的贡献非常有限,  $\omega_n$  的不同取值对土层地震位移反应的计算准确性影响不大。

### 3 结 论

(1) 在土层地震反应时域分析中采用 Rayleigh 比例阻尼矩阵时对土层加速度反应计算结果的准确性影响很大,而对土层位移反应计算结果的准确性影响非常有限。

(2) 应重视在形成 Rayleigh 阻尼矩阵时两个振型频率的合理选择。一般来说,首先第一个频率  $\omega_m$  应

选土层的基频,而第 2 个频率  $\omega_n$  的选择应考虑土层基频与基岩激励地震波的频谱分布情况。当土层基频高于基岩地震波的主要分量激励频率时,可取土层第 2 或第 3 阶低阶自振频率,而当土层基频接近于、低于特别是远低于基岩地震波的主要分量激励频率时,仅取土层低阶自振频率为第 2 个频率参数时,将给土层加速度反应计算结果带来较大的误差,此时,土层高阶振型的共振效应对土层地震反应的贡献作用明显增加,应予充分重视。建议第 2 个频率  $\omega_n$  取为输入基岩地震波反应谱的峰值频率  $\omega_R$  或滞后阻尼转换频率  $\omega_c$ 。

(3) 由于工程设计人员普遍熟悉反应谱方法,因此选用反应谱峰值频率  $\omega_R$  比选用阻尼矩阵特征频率  $\omega_c$  更便于工程人员应用,且物理意义更加明确。

(4) 由于土层地震反应计算的主要目的之一是为地面结构提供结构基底输入地震加速度,为此本文上述结论主要是针对土层地震加速度反应计算,而对于地震位移反应计算时,  $\omega_n$  取值对土层地震位移反应的影响不大。

#### 参考文献:

- [1] CLOUGH R W, PENZIEN J. Dynamics of structures[M]. New York: Mc-Graw Hill Inc, 1993.
- [2] 廖振鹏. 近场波动问题的有限元解法[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(2): 1 - 14. (LIAO Zhen-peng. A finite element method for near-field wave motion in heterogeneous materials[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1984, 4(2): 1 - 14. (in Chinese))
- [3] 楼梦麟, 张 静. 结构爆破地震反应计算中的阻尼模型[J].



- 防护工程, 2009, **31**(1): 15 - 19. (LOU Meng-lin, ZHANG Jing. Damping models in calculation of the structure blasting seismic response[J]. Protective Engineering, 2009, **31**(1): 15 - 19. (in Chinese))
- [4] 楼梦麟, 殷琳. 关于高土坝地震反应分析中阻尼模型的讨论[J]. 水力发电学报, 2009, **28**(5): 103 - 107. (LOU Meng-lin, YIN Lin. Discussion on damping models for seismic response analysis of high earth dams[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, **28**(5): 103 - 107. (in Chinese))
- [5] 楼梦麟, 张静. 大跨度拱桥地震反应分析中阻尼模型的讨论[J]. 振动与冲击, 2009, **28**(5): 22 - 26. (LOU Meng-lin, ZHANG Jing. Discussion on damping models for seismic response analysis of long-span bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, **28**(5): 22 - 26. (in Chinese))
- [6] GB17741—2005 工程场地地震安全性评价[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005. (GB17741—2005 Evaluation of seismic for engineering sites[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005. (in Chinese))
- [7] 楼梦麟, 潘旦光. 滞后阻尼在土层时域分析中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, **32**(3): 281 - 285. (LOU Meng-lin, PAN Dan-guang. Hysteretic damping application in time domain analysis of soil layer[J]. Journal of Tongji University (National Science), 2004, **32**(3): 281 - 285. (in Chinese))

## 第一届岩土工程新技术发布推广会即将召开

为了促进岩土工程领域新技术的推广应用, 加快科学技术向生产力的转化进程, 经龚晓南院士倡议, 第一届岩土工程新技术发布推广会将于2013年10月18日~20日在杭州召开, 本次会议也是西湖博览会支持项目之一。

本次会议拟在岩土工程新技术的发明人和企业之间搭建桥梁, 通过专家推荐、网上征集、专利权人自己选送等方式, 征集岩土工程领域新的方法、工艺、材料等新技术, 经专家认证、筛选后, 选择有较好实用性和发展前途的新技术在本次发布会上正式发布, 向全国岩土工程施工企业、设备制造企业介绍、推广, 本次会议将为企业在新技术引进和转化方面提供跟踪服务, 切实促进新技术的成功转化和推广应用。

会议诚向全国岩土工程界各新技术发明人征集专利, 应征专利要求内容具体、明确、严谨, 有一定的应用推广价值, 专利征集截止时间: 2013年8月30日, 专利录用通知时间: 2013

年9月20日。

本次会议主办单位: 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心、浙江省建设科技推广中心、浙江省水利科技推广与发展中心、浙江省交通厅科技推广中心、浙江省岩土力学与工程学会

协办单位: 浙江省地质矿产工程公司、浙江省大成建设集团有限公司基础工程公司、浙江益坚工程有限公司、浙江绩丰岩土技术股份有限公司

支持单位: 中国岩土网、杭州市结构与地基处理学会

会议日程: 2013年10月18日全天报到、注册; 10月18日晚上专家委员会会议, 10月19日专利技术发布会, 10月20日高新技术企业参观。

会务联系人: 王笑笑; 会务邮箱: wangxiuxiu713@163.com; 邮政编码: 310058, 电话: 0571-88208775, 13646828087。

(会务组 供稿)