

文章编号: 1000-7598 (2009) 10-2923-06

# 土-结构动力相互作用体系阻尼及地震反应分析

夏栋舟<sup>1</sup>, 何益斌<sup>1</sup>, 刘建华<sup>2</sup>

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 长沙理工大学 公路工程学院, 长沙 410076)

**摘要:** 通过全面考虑土-结构动力相互作用体系中上部结构阻尼、地基土黏滞材料阻尼以及地基基础平动与转动时的辐射阻尼, 推导了土-结构相互作用体系的耦合阻尼比公式。结合国内外关于阻尼调整系数的研究成果, 提出了基于加速度反应谱的阻尼影响因子概念, 建立阻尼影响因子 $\eta$ 与《规范》中地震影响系数 $\alpha$ 的关系式。通过耦合阻尼比公式以及提出的 $\eta$ 与 $\alpha$ 的关系式, 对土-结构相互作用体系地震作用加以研究。结果表明考虑土与上部结构的相互作用后能够增大体系的阻尼性能, 并大大降低上部结构的地震作用, 提高体系的整体抗震性能。其成果为未来抗震防灾研究与工程的抗震设计提供了理论依据。

**关键词:** 土-结构动力相互作用; 耦合阻尼比; 阻尼影响因子; 抗震性能

中图分类号: TU 352

文献标识码: A

## Study of damping property and seismic action effect for soil-structure dynamic interaction system

XIA Dong-zhou<sup>1</sup>, HE Yi-bin<sup>1</sup>, LIU Jian-hua<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Highway Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

**Abstract:** Through investigating the property of structure damping, material viscous damping of soil and the radiation damping of foundation considering translation and rocking, the coupling damping ratio and the damping reduction factor of the soil-structure-interaction system are deduced. Based on studying of the relationship between damping reduction factor $\eta$  and seismic influence coefficient  $\alpha$ , it is shown that it will improve the damping property and earthquake-resistant capability, and reduce the earthquake action of the SSI system, so as to provide a theoretical basis for the aseismatic researches and aseismatic designs.

**Key words:** soil-structure dynamic interaction; coupling damping ratios; damping reduction factors; earthquake-resistant capability

## 1 前言

地震时, 地震动通过场地土介质传播输入结构, 使其振动, 这时结构体系产生的惯性力 $h$ 如同新的震源又反过来作用于场地, 再引起的新振动作用于结构体系, 这种现象称为土-结构相互作用(soil structure interaction, 简称 SSI)。

土-结构的相互作用机制已有相当广泛的理论和试验研究<sup>[1-4]</sup>, 也有不少文献<sup>[5]</sup>对桩-土相互作用力学模型进行研究, 根据桩-土相互作用理论提出桩土应力比<sup>[6]</sup>的计算方法。但由于土介质的强非线性、共同工作机制的复杂性及地震作用的不确定性, 从而对考虑土-结构动力相互作用时体系阻尼性

能的研究国内外还为之甚少, 因此, 笔者提出了一种新的考虑土-结构动力相互作用体系阻尼的简化分析方法, 得到了耦合阻尼比公式, 并结合大西洋地震工程研究中心 102 个强震中的 1 037 条实际地震时程记录中的地震加速度反应谱数据和《建筑抗震设计规范》<sup>[7]</sup>的规定, 提出基于加速度反应谱的阻尼影响因子 $\eta$ , 并将其用于抗震设计, 建立阻尼影响因子 $\eta$ 与地震影响系数 $\alpha$ 间的关系式, 从而根据现有的抗震规范求得上部结构的地震作用。通过算例分析可知, 考虑土与上部结构的相互作用后能够增加体系的阻尼, 并大大降低上部结构的地震作用, 为未来抗震研究与工程的抗震设计提供了理论依据。

收稿日期: 2008-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.50778070)。

第一作者简介: 夏栋舟, 男, 1979 年生, 博士研究生, 主要从事钢筋-钢管混凝土、土-结构动力相互作用等研究。E-mail: xiadongzhou7941@163.com

## 2 土-结构动力相互作用体系阻尼的简化分析方法

文献[8]根据直接分析法提出不考虑基础质量的计算模型,如图1所示。它由结构单自由度体系和允许由平动和转动的基础组成,可以看成单层建筑的直接模型,或者更多的看成是以第1振型为主导的多层建筑。对后一种情况, $h$ 应理解为从基础至与第1振型相对应的惯性力中心之间的距离,而 $m$ 、 $k$ 和 $c$ 应理解为相应的广义质量、广义刚度和广义阻尼系数。模型中单自由度结构的质量、刚度、阻尼系数和高度分别为 $m$ 、 $k$ 、 $c$ 和 $h$ 。在基础处,由于能量向外辐射和消散,土可由弹簧和阻尼器来模拟,并且将水平方向刚度系数和阻尼系数表示为 $k_u$ 和 $c_u$ ,转动方向刚度系数和阻尼系数表示为 $k_\theta$ 和 $c_\theta$ ,其等效体系的频率 $\tilde{\omega}$ 和耦合阻尼比 $\tilde{\xi}$ 与结构和地基基础的频率和阻尼比之间的关系式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{\tilde{\omega}^2} &= \frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{\omega_u^2} + \frac{1}{\omega_\theta^2} \\ \tilde{T} &= \sqrt{T^2 + T_u^2 + T_\theta^2} \\ \tilde{\xi} &= \xi \left( \frac{\tilde{\omega}}{\omega} \right)^3 + \xi_u \left( \frac{\tilde{\omega}}{\omega_u} \right)^3 + \xi_\theta \left( \frac{\tilde{\omega}}{\omega_\theta} \right)^3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 和 $\xi$ 分别为结构的频率和阻尼比; $\omega_u$ 和 $\xi_u$ 为地基基础的平动频率和阻尼比; $\omega_\theta$ 和 $\xi_\theta$ 为地基基础的转动频率和阻尼比。式(1)中体系耦合阻尼比 $\tilde{\xi}$ 公式右端的第1项、第2项、第3项分别表示上部结构对振动能量的衰减和地基土对振动能量的逸散衰减对相互作用体系阻尼比 $\tilde{\xi}$ 的影响。

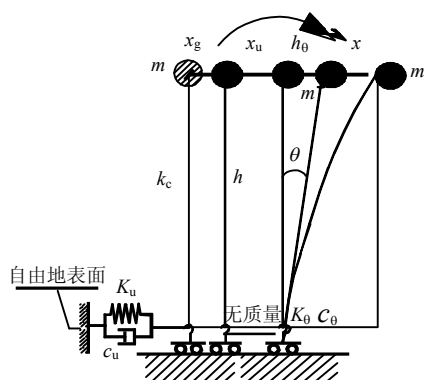


图1 土-结构动力相互作用体系简化模型1

Fig.1 The simplified model 1 for soil-structure-interaction system

但是,在土-结构动力相互作用时,其非线性接触及动力相互作用往往导致的能量损耗就发生在结

构与基础、基础与地基土之间,因而忽略基础质量是不妥的。笔者提出一个改进的简化分析方法,能考虑基础质量 $m_0$ 、基础的等效半径 $a$ ,同时也考虑了柔性地基土本身的黏滞材料阻尼 $\xi_s$ 。其简化模型如图2所示,根据简化模型建立体系的整体运动方程:

$$\left. \begin{aligned} m(\ddot{x}_u + h\ddot{\theta} + \ddot{x}) + m_0\ddot{x}_u + k_u x_u &= F_R - (m + m_0)\ddot{x}_g \\ mh(\ddot{x}_u + h\ddot{\theta} + \ddot{x}) + I_0\ddot{\theta} + k_\theta \theta &= M_R - m\ddot{x}_g h \\ m(\ddot{x}_u + h\ddot{\theta} + \ddot{x}) + c\dot{x} + kx &= F_1 m\ddot{x}_g \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $F_1$ 为结构顶部承受的水平外力; $F_R$ 与 $M_R$ 为基础承受的对应于外力作用的总作用力与总弯矩,这里 $F_R = F_1$ ,  $M_R = F_1 h$ ;  $I_0$ 为基础与上部结构对各自通过质心的水平轴的惯性矩之和。

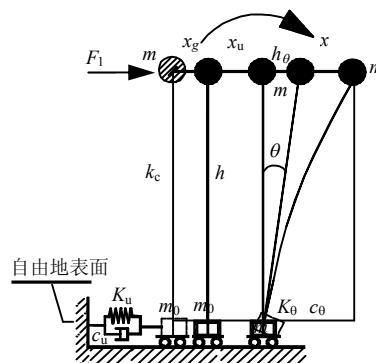


图2 土-结构动力相互作用体系简化模型2

Fig.2 The simplified model 2 for soil-structure-interaction system

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{c}{2m\omega}; \quad \omega^2 = \frac{k}{m} \\ K_u &= m\omega_u^2 \{1 + 2i[\xi_s + (\omega/\omega_u)\xi_u]\} \\ K_\theta &= mh^2\omega_\theta^2 \{1 + 2i[\xi_s + (\omega/\omega_\theta)\xi_\theta]\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\text{这里,} \quad \omega_u = \sqrt{\frac{\text{Re}K_u}{m}} \quad (4)$$

$$\xi_u = \frac{1}{2} \frac{\omega_u}{\omega} \left[ \left( \frac{\text{Im}K_u}{\text{Re}K_u} \right) - 2\xi_s \right] \quad (5)$$

$$\omega_\theta = \sqrt{\frac{\text{Re}K_\theta}{mh^2}} \quad (6)$$

$$\xi_\theta = \frac{1}{2} \frac{\omega_\theta}{\omega} \left[ \left( \frac{\text{Im}K_\theta}{\text{Re}K_\theta} \right) - 2\xi_s \right] \quad (7)$$

式中:Re为复数函数的实部;Im为复数函数的虚部; $\omega$ 、 $\xi$ 为刚性地基上结构的自振频率与阻尼比;

$\omega_u$ 、 $\omega_\theta$  为地基基础平动与转动的特征频率;  $\xi_u$ 、 $\xi_\theta$  为地基基础平动与转动的辐射阻尼比;  $\xi_s$  为柔性地基的土介质黏滞材料阻尼。

根据方程 (3), 整个土-结构动力相互作用体系的运动方程可以写成如下形式:

$$[D(\omega_i)] \begin{Bmatrix} (\omega_u/\omega)x_u \\ (\omega_\theta/\omega)h_\theta \\ x \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [\varepsilon F_1/m + \omega_i^2 x_g]/\omega\omega_u \\ [\varepsilon F_1/m + \omega_i^2 x_g]/\omega\omega_\theta \\ [F_1/m + \omega_i^2 x_g]/\omega^2 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

当  $F_1$  作用于结构顶部时,  $\varepsilon=1$ ; 当相互作用体系在外力作用下自平衡时,  $\varepsilon=0$ 。可以得到如下单元矩阵  $[D(\omega_i)]$ :

$$\left. \begin{aligned} D_{11} &= \left\{ 1 - \left( \frac{\omega_i}{\omega_u} \right)^2 + 2i \left[ \xi_s + \left( \frac{\omega_i}{\omega_u} \right) \xi_u \right] \right\} \\ D_{22} &= \left\{ 1 - \left( \frac{\omega_i}{\omega_\theta} \right)^2 + 2i \left[ \xi_s + \left( \frac{\omega_i}{\omega_\theta} \right) \xi_\theta \right] \right\} \\ D_{33} &= \left\{ 1 - \left( \frac{\omega_i}{\omega} \right)^2 + 2i \left( \frac{\omega_i}{\omega} \right) \xi_s \right\} \\ D_{12} &= D_{21} = - \left( \frac{\omega_i}{\omega_u} \right) \left( \frac{\omega_i}{\omega_\theta} \right) \\ D_{13} &= D_{31} = - \left( \frac{\omega_i}{\omega_u} \right) \left( \frac{\omega_i}{\omega} \right) \\ D_{32} &= D_{23} = - \left( \frac{\omega_i}{\omega_\theta} \right) \left( \frac{\omega_i}{\omega} \right) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

刚性地基的情况下, 不考虑土-结构动力相互作用时可以得到极限状态下  $\omega_u \rightarrow \infty$ ,  $\omega_\theta \rightarrow \infty$  时,

$$\left. \begin{aligned} x_u &= \theta = 0 \\ x &= \frac{(\omega_i/\omega)^2 x_g + F_1/(m\omega^2)}{1 - (\omega_i/\omega)^2 + 2i(\omega_i/\omega)\xi_s} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

考虑结构顶部受外部作用力  $F_1$  时 ( $\varepsilon=1$ ), 式 (8) 可以假设  $\tilde{\omega}$  近似等于  $\omega$ , 从而可得

$$\left. \begin{aligned} \begin{Bmatrix} x_u \\ h_\theta \\ x \end{Bmatrix} &= \frac{(\omega_i/\tilde{\omega})^2 x_g + F_1/(m\tilde{\omega}^2)}{1 - (\omega_i/\tilde{\omega})^2 + 2i(\omega_i/\tilde{\omega})\xi_s} \begin{Bmatrix} (\tilde{\omega}/\omega_u)^2 \\ (\tilde{\omega}/\omega_\theta)^2 \\ (\tilde{\omega}/\omega)^2 \end{Bmatrix} \\ \frac{1}{\tilde{\omega}^2} &= \frac{1}{\omega^2} + \frac{1}{\omega_u^2} + \frac{1}{\omega_\theta^2} \\ \tilde{T} &= \sqrt{T^2 + T_u^2 + T_\theta^2} \\ \tilde{\xi} &= \xi \left( \frac{\tilde{\omega}}{\omega} \right)^3 + \left[ 1 - \left( \frac{\tilde{\omega}}{\omega} \right)^2 \right] \xi_s + \xi_u \left( \frac{\tilde{\omega}}{\omega_u} \right)^3 + \xi_\theta \left( \frac{\tilde{\omega}}{\omega_\theta} \right)^3 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

从以上分析可知, 将地基土、基础和上部结构分离开来设计计算是片面的, 考虑三者共同作用才符合实际工作情况。

本文所提出的方法不仅考虑了上部结构的阻尼特性, 还考虑了地基基础在平动与转动情况下的辐射阻尼, 同时考虑了地基土的黏滞材料阻尼, 能更加全面把握土-结构动力相互作用体系各部分阻尼特性对抗震性能贡献。

### 3 考虑土-结构动力相互作用时体系的地震反应研究

目前国外的各种规范与规程以及国内的《建筑抗震设计规范》都对阻尼调整系数作了规定 (表 1), 但我国抗震设计规范所用的设计反应谱, 是按结构的常阻尼比进行计算分析的, 结构本身就具有非线性性质, 这种常阻尼比考虑方式从工程实际来说是不合理的。因此, 研究土-结构相互作用后系统的阻尼特性的改变, 以及设计反应谱的变化便显得尤为重要。

当相互作用体系阻尼比  $\tilde{\xi}$  在 0.01~0.02 之间时, 可由《建筑抗震设计规范》<sup>[7]</sup> 的地震影响系数曲线计算出体系的地震影响系数; 当相互作用体系阻尼比  $\tilde{\xi}$  在 0.02~0.5 之间, 则可先设  $\tilde{\xi}=0.05$ , 根据《建筑抗震设计规范》的地震影响系数曲线计算出  $\alpha_{\tilde{\xi}=5\%}$ , 再根据地震影响系数曲线中相应公式而得到  $\alpha$ 。针对不同的阻尼比, 文献[9]对大西洋地震工程研究中心 102 个强震中的 1 037 条实际地震时程记录进行统计研究, 得到了不同场地类别的基于位移反应谱、速度反应谱、加速度反应谱的阻尼影响系数。表 2 列出了基于加速度反应谱的阻尼影响系数  $B_a$ , 其中场地类别 AB、C 和 D 根据美国《国家地震灾害减轻计划》规程 NEHRP(FEMA2000)的规定, 表 3 列出了其与《建筑抗震设计规范》<sup>[7]</sup> 中场地类别 I~IV 以及美国地质调查局 (USGS) 中 A~D 规定的场地类别分类的关系, NEHRP (FEMA2000) 规定的场地 C 和 D 与我国《建筑抗震设计规范》中场地类别 I~IV 相当, 可以根据剪切波速的不同进行插值引用。

$B_a$  的计算公式为

$$B_a = \frac{S_a}{S_{a,\xi=5\%}} \quad (12)$$

$S_a$  为加速度反应谱, 表示为

$$S_a = |\ddot{x}'(t)|_{\max} = |\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)|_{\max} \quad (13)$$

式中:  $\ddot{x}'(t)$  为体系绝对加速度;  $\ddot{x}(t)$  为体系相对加速度;  $\ddot{x}_g(t)$  为地动加速度。

表 1 国内外各规范、规程所规定的阻尼调整系数  
Table 1 The damping reduction factors in design codes and documents all over the world

| 阻尼比<br>/% | 美国<br>UBC-94<br>(NEHRP94) | 美国 UBC-97<br>(NEHRP97)<br>(IBC2000) | ATC-40(1996 年)         |                    | 美国 FEMA-273(1997 年)    |                    | 美国 NEHRP<br>(2000) | 建筑抗震设计规范<br>(GB 50011-2001) |
|-----------|---------------------------|-------------------------------------|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|
|           |                           |                                     | Acceleration<br>region | Velocity<br>region | Acceleration<br>region | Velocity<br>region |                    |                             |
| 2         |                           | 1.25                                | 1.28                   | 1.23               | 1.25                   | 1.25               | 1.25               | 1.32                        |
| 5         | 1.00                      | 1.00                                | 1.00                   | 1.00               | 1.00                   | 1.00               | 1.00               | 1.00                        |
| 10        | 0.84                      | 0.83                                | 0.77                   | 0.83               | 0.77                   | 0.83               | 0.83               | 0.78                        |
| 20        | 0.64                      | 0.67                                | 0.55                   | 0.65               | 0.56                   | 0.67               | 0.67               | 0.62                        |
| 30        | 0.53                      | 0.59                                | 0.42                   | 0.56               | 0.43                   | 0.59               | 0.56               | 0.56                        |
| 40        |                           | 0.53                                | 0.33                   | 0.48               | 0.37                   | 0.53               | 0.48               | 0.55                        |
| 50        |                           | 0.50                                | 0.26                   | 0.43               | 0.33                   | 0.50               | 0.42               | 0.55                        |

表 2 基于加速度反应谱的阻尼影响系数  $B_a$   
Table 2 The damping reduction factors based on the acceleration responses spectrum

| 阻尼比<br>/% | 不同周期(s)的 $B_a$ |      |      |      |      |      |      |      | 阻尼比<br>/% | 不同周期(s)的 $B_a$ |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
|           | 0.1            | 0.5  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |           | 0.1            | 0.5  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
| (C) 2     | 1.20           | 1.27 | 1.27 | 1.16 | 1.08 | 1.08 | 1.02 | 0.99 | (D) 2     | 1.24           | 1.33 | 1.25 | 1.18 | 1.13 | 1.10 | 1.08 | 1.05 |
| 5         | 1.00           | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 5         | 1.00           | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| 10        | 0.88           | 0.79 | 0.80 | 0.89 | 0.95 | 0.95 | 1.02 | 1.05 | 10        | 0.84           | 0.77 | 0.80 | 0.87 | 0.91 | 0.93 | 0.96 | 0.99 |
| 20        | 0.77           | 0.63 | 0.63 | 0.86 | 0.95 | 0.99 | 1.12 | 1.18 | 20        | 0.72           | 0.60 | 0.64 | 0.76 | 0.86 | 0.92 | 0.96 | 1.02 |
| 30        | 0.72           | 0.56 | 0.59 | 0.88 | 1.01 | 1.08 | 1.27 | 1.36 | 30        | 0.67           | 0.52 | 0.59 | 0.74 | 0.87 | 0.93 | 1.00 | 1.09 |
| 40        | 0.69           | 0.53 | 0.57 | 0.93 | 1.13 | 1.23 | 1.43 | 1.57 | 40        | 0.63           | 0.49 | 0.57 | 0.75 | 0.91 | 0.98 | 1.07 | 1.18 |
| 50        | 0.67           | 0.51 | 0.57 | 0.99 | 1.27 | 1.37 | 1.63 | 1.82 | 50        | 0.62           | 0.47 | 0.57 | 0.77 | 0.96 | 1.04 | 1.15 | 1.30 |

表 3 建筑抗震设计规范(GB 50011-2001)、  
NEHRP(FEMA2000)与美国 USGS 场地类别分类  
Table 3 The site classification in code for seismic design of  
buildings(GB50011-2001), NEHRP(FEMA2000)  
and USGS in America

| GB 50011-2001 |                       | NEHRP(FEMA2000) |                       | USGS     |                       |
|---------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|----------|-----------------------|
| 场地<br>类别      | 剪切波速<br>$V_s / (m/s)$ | 场地<br>类别        | 剪切波速<br>$V_s / (m/s)$ | 场地<br>类别 | 剪切波速<br>$V_s / (m/s)$ |
| I             | $>500$                | A、B             | $>760$                | A        | $>750$                |
| II            | $250 \sim 300$        | C               | $360 \sim 760$        | B        | $360 \sim 750$        |
| III           | $140 \sim 250$        | D               | $180 \sim 360$        | C        | $180 \sim 360$        |
| IV            | $V_s \leq 140$        |                 |                       | D        | $V_s \leq 180$        |

我国现阶段抗震设计的主要依据仍然采用加速度反应谱, 不足的是规范由反应谱理论得到的地震影响系数是基于结构为常阻尼比, 没有充分考虑场地条件以及土-结构动力相互作用等基础上而提出的, 由此会导致阻尼比往往估计过小。而系统阻尼比的微小变化, 都可能对地震反应谱曲线产生较大变化, 从而对结构的安全性以及设计与工程造价都会造成重大影响, 因此, 现有的理论研究中更应该考虑土-结构动力相互作用对地震作用的影响。根据规范规定及给出的地震影响系数曲线, 本文定义了一个新的概念, 即为基于加速度反应谱的阻尼影响因子  $\eta$ 。根据以上分析可知, 文献[9]同样是根据加速度反应谱理论而推导出阻尼影响系数, 并具有

广泛的实际地震数据基础, 与我国抗震设计基本理论相同, 所以本文采用  $\eta = B_a$ , 更具有实践意义, 可以充分考虑地基土与上部结构的动力相互作用。图 3、4 为阻尼影响因子  $\eta$  的曲线示意图。

根据抗震规范中地震反应谱的分段公式, 可以推得  $\eta$  的表达式为

$$\eta = B_a = \begin{cases} \left( \frac{5.5T + 0.45}{T} \frac{\alpha}{\alpha_{\xi=5\%}} - \frac{0.45}{T} \right) + 0.45, & (0 \leq T < 0.1 \text{ s}) \\ \frac{\alpha}{\alpha_{\xi=5\%}}, & (0.1 \leq T < 5T_g) \\ \frac{\eta_1(T - 5T_g)}{0.2^\gamma} + \frac{[0.23 - 0.02(T - 5T_g)]}{0.2^\gamma} \frac{\alpha}{\alpha_{\xi=5\%}}, & (5T_g \leq T < 6 \text{ s}) \end{cases}$$

(14)

式中:  $\eta_1$ 、 $T_g$  和  $\gamma$  的取值依据《建筑抗震设计规范》中 5.1.5 规定。

根据式 (14) 便可求得  $\alpha$ , 从而得到总地震作用  $F_{EK}$ :

$$F_{EK} = \alpha G_{eq}$$

(15)

再根据底部剪力法求出各个质点的地震作用:

$$F_i = \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} F_{EK}, \quad (i=1 \sim n) \quad (16)$$

根据本文提出的阻尼影响因子计算得到的地震影响系数，充分考虑了土-结构动力相互作用效应，亦考虑了上部结构阻尼、地基土的黏滞材料阻尼，以及地基基础的辐射阻尼对体系动力反应的影响，由此得到的地震作用更加符合上下部结构的实际工作机制。

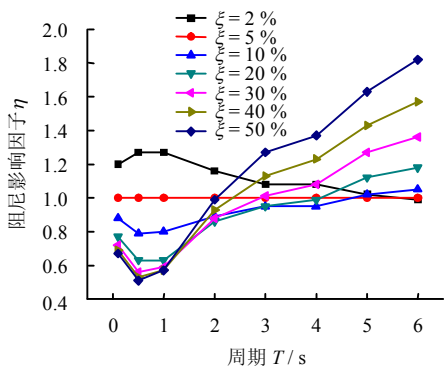


图 3 C 类场地阻尼影响因子  $\eta$  曲线示意图  
Fig.3 The damping reduction factor  $\eta$  schematic diagram of site C

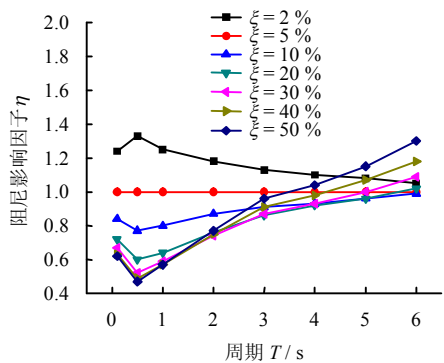


图 4 D 类场地阻尼影响因子  $\eta$  曲线示意图  
Fig.4 The damping reduction factor  $\eta$  schematic diagram of site D

4 算 例

1 栋 6 层钢筋混凝土框架结构建筑，建在Ⅳ类地基土上，地震烈度为 8 度，设计地震分组为第 1 组。房屋各层的刚度、质量、层高和基本振型见表 4。已知框架结构的基本频率和阻尼比分别为  $\omega = 12.98 \text{ rad/s}$ ， $\xi = 0.05$ ，地基土的黏滞阻尼比为  $\xi_s = 0.048$ 。地基基础的平动频率和阻尼比分别为  $\omega_u = 9.28 \text{ rad/s}$ ， $\xi_u = 0.52 \%$ 。转动频率和阻尼比分别为  $\omega_\theta = 27.90 \text{ rad/s}$ ， $\xi_\theta = 0.86 \%$ 。由式 (11) 中

后 3 个公式则可计算得出土-结构相互作用体系的频率、周期和阻尼比分别为  $\tilde{\omega} = 7.29 \text{ rad/s}$ ， $\tilde{T} = 0.14 \text{ s}$ ， $\tilde{\xi} = 0.276$ 。查表 2 中 D 类场地便可得  $B_a = 0.68$ ，根据式 (14) 可知属于第 2 种情况，按式 (14) 的第 2 式计算便可以得到地震影响系数  $\alpha$ 。根据上述参数算得土-结构相互作用体系和基础固定结构各质点地震作用取值，计算结果见表 5。

表 4 建筑结构参数  
Table 4 Parameters of structures

| 层号 | 质量 / kg | 刚度 / (kN/m) | 层高 / m | 基本振型    |
|----|---------|-------------|--------|---------|
| 6  | 180 000 | 410 000     | 3.0    | 1.000 0 |
| 5  | 190 000 | 430 000     | 3.0    | 0.936 3 |
| 4  | 220 000 | 460 000     | 3.0    | 0.853 2 |
| 3  | 220 000 | 460 000     | 3.0    | 0.676 2 |
| 2  | 220 000 | 460 000     | 3.0    | 0.572 6 |
| 1  | 230 000 | 470 000     | 3.0    | 0.321 5 |

表 5 地震作用取值比较  
Table 5 Comparison of earthquake action values (kN)

| 层号 | 土-结构相互作用体系         | 基础固定结构             |
|----|--------------------|--------------------|
| 6  | $2.13 \times 10^2$ | $3.96 \times 10^2$ |
| 5  | $1.98 \times 10^2$ | $3.78 \times 10^2$ |
| 4  | $1.63 \times 10^2$ | $3.41 \times 10^2$ |
| 3  | $1.37 \times 10^2$ | $3.13 \times 10^2$ |
| 2  | $1.03 \times 10^2$ | $2.51 \times 10^2$ |
| 1  | $0.78 \times 10^2$ | $1.62 \times 10^2$ |

从算例可以看出，土-结构相互作用体系的周期和阻尼会比不考虑相互作用的固定基础的结构大幅增加，且体系的地震作用也会相应变小，这是因为在求地震影响系数  $\alpha$  时，必须考虑土-结构相互作用后的结构体系的频率和阻尼，且用基于加速度谱的阻尼影响因子  $\eta$  来修正。土-结构相互作用体系地震作用取值很大取决于地基土和基础参数的取值，确定基础类型和场地类别对体系抗震性能影响的一一对应关系将是未来一个非常值得研究的课题。

5 与已有试验结果的对比

同济大学吕西林学术梯队<sup>[10]</sup>与湖南大学尚守平学术梯队<sup>[11]</sup>在国家自然科学基金项目的资助下，分别做了对土-结构动力相互作用的室内模型试验与现场大比例模型试验研究，得到了较为一致的结论：在动力荷载作用下土-结构动力相互作用体系的自振周期要比不考虑相互作用时有较大延长，其自振频率要降低 10 % 左右，体系的各阶振型下阻尼性能都有所提高，大部分结构各楼层的地震作用也

相应有所减小且结构反应主要取决于基础转动引起的摆动,这与本文理论结果相吻合,也验证了笔者提出的阻尼影响因子与地震影响系数的关系来求解结构地震作用的有效性,为今后研究土、基础与上部结构各部分阻尼特性的变化对整个土-结构动力相互作用体系抗震性能的贡献提供了理论依据。

但有研究表明<sup>[12]</sup>,某些情况下上部结构顶部几层水平地震作用有放大现象,考虑土-结构相互作用的影响对结构并不总是偏于安全的。因此,研究在不同场地条件、不同基础型式,以及不同上部结构等条件下整个体系的阻尼性能与地震作用的变化是未来的一个重要研究课题。

## 6 结 论

(1) 本文提出了考虑地基、基础与上部结构不同阻尼特性的研究方法,并通过公式的推导,得到了基于频率的土-结构相互作用体系的耦合阻尼比,弥补了传统设计方法的不足。

(2) 根据提出的耦合阻尼比公式,结合国内外有关阻尼调整系数的研究,并对 1 037 条实际地震时程记录进行统计分析,提出了结合《建筑抗震设计规范》的基于加速度反应谱的阻尼影响因子 $\eta$ 的概念,并考察了阻尼影响因子 $\eta$ 与地震影响系数 $\alpha$ 的关系。为研究考虑土-结构动力相互作用后体系的阻尼变化对整体抗震性能的影响提供了最有力的理论依据。

(3) 通过算例分析可知,考虑地基、基础与上部结构的相互作用,不仅提高了整个体系的阻尼性能,降低了地震作用幅值,而且对结构抗震性能的优化可以提供很大贡献,为避免震害对人身安全的危害及造成的财产损失带来了比较可靠的保证。

## 参 考 文 献

- [1] MEYERHOF G G. Some recent foundation research and its application to design[J]. **Struct. Engr.**, 1953, 31: 151-167.
- [2] LEE I K, HARRISON H B. A theoretical study of the interaction of structure and foundation[J]. **J. Struct. Div, Proc. ASCE**, 1970, 96: 177-197.
- [3] HUMAR J L, BAGCHI A, XIA H. Frequency domain analysis of soil-structure interaction[J]. **Computers and Structures**, 1998, 66(2-3): 337-351.
- [4] JAVIER AVILES, MARTHA SUAREZ. Effective periods and dampings of building-foundation systems including seismic wave effects[J]. **Engineering Structures**, 2002, 24: 553-562.
- [5] 赵明华, 刘建华, 段少华. 考虑基桩差异性 & 桩土共同工作的桩基承台梁内力分析[J]. **岩土力学**, 2006, 27(12): 2149-2153.  
ZHAO Ming-hua, LIU Jian-hua, DUAN Shao-hua. Inner force analysis of pile capping beam considering stiffness variance of pile and pile-soil interaction[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(12): 2149-2153.
- [6] 杨明辉, 赵明华, 姚琪阳. 碎石桩复合地基桩土应力比计算[J]. **湖南大学学报(自然科学版)**, 2006, 33(5): 6-9.  
YANG Ming-hui, ZHAO Ming-hua, YAO Qi-yang. Calculation for pile-soil stress ratio in crush stone pile composition[J]. **Journal of Hunan University(Natural Sciences)**, 2006, 33(5): 6-9.
- [7] 中国建筑科学院. GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [8] STEWART J P, SEEK R B, FENVES G L. Empirical evaluation of inertial soil-structure interaction effects[R]. Report No. PEER-98/07, PEER-ctr, USA: University of California, Berkeley, 1998.
- [9] LIN Y Y, CHANG K C. Effects of site classes on damping reduction factors[J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 2004, 130(11): 1667-1675.
- [10] 陈跃庆, 吕西林, 李培振, 等. 不同土性的地基-结构动力相互作用振动台模型试验对比研究[J]. **土木工程学报**, 2006, 39(5): 58-64.  
CHEN Yue-qing, Lü Xi-lin, LI Pei-zhen. Comparative study on the dynamic soil-structure interaction system with various soils by using shaking table model tests [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2006, 39(5): 58-64.
- [11] 尚守平, 朱志辉, 吴方伯. 土-箱基-框架结构动力相互作用大比例模型野外试验研究[J]. **工程力学**, 2006, 23(10): 118-124.  
SHANG Shou-ping, ZHU Zhi-hui, WU Fang-bo. Large-scale field model test on dynamic soil-box foundation-structure interaction[J]. **Engineering Mechanics**, 2006, 23(10): 118-124.
- [12] 王凤霞, 何政, 欧进萍. 桩-土-结构动力相互作用的线弹性地震反应分析[J]. **世界地震工程**, 2003, 6(19): 58-66.  
WANG Feng-xia, HE Zheng, OU Jin-ping. The elastic seismic response analysis of pile-soil-structure interaction system[J]. **World Earthquake Engineering**, 2003, 6(19): 58-66.