

# 深厚场地地震响应中阻尼矩阵形式的影响分析<sup>①</sup>

张如林, 程旭东, 管友海

(中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:**深厚覆盖土层地震响应时域分析中阻尼矩阵形式的选取十分重要。本文基于滞后阻尼比和振型阻尼比构造了 6 种不同的比例阻尼矩阵形式, 研究其对深覆盖土层地震响应的影响。以上海某一实际深厚覆盖土层为算例, 分别以人工合成基岩地震波、汶川地震时上海余山记录的基岩地震波为输入, 得到 6 种阻尼矩阵形式下不同深度处的土层地震响应, 并以频域解为基准解进行比较。研究表明, 阻尼矩阵形式对加速度结果的影响程度比位移结果要大, 运用同一种阻尼矩阵形式所得结果误差和输入地震波频谱特性有关。地震波自身的频谱特征对阻尼矩阵形式的选取有一定影响, 建议综合考虑地震波的频谱特征和场地土层特性来构建合适的阻尼矩阵以获得合理的结果。

**关键词:**深厚场地; 地震响应; 阻尼矩阵形式; 时域分析; 频域分析

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0868-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0868

## Influence of Different Damping Matrices on Seismic Response in Deep Soil Sites

ZHANG Ru-lin, CHENG Xu-dong, GUAN You-hai

(College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China)

**Abstract:** Seismic response analysis of soil plays a major role in the seismic safety assessment of engineering sites; it reflects the influence of the characteristics of engineering sites on the input ground motion parameters of a structure. Seismic analysis can either be performed in the time or frequency domains. The dynamic analysis of soil is based on the principle of soil dynamics and the viscous damping model, and the Rayleigh proportional damping matrix is built on the assumption that the vibration modes are orthogonal about the damping matrix; therefore, two structural vibration modes can be chosen to obtain the proportion coefficient of the damping matrix. The selection of viable damping models is important for seismic response analysis of deep soil layers in the time domain, and in this paper, the influence is discussed using six different damping matrices formed by the hysteretic damping ratio and modal damping ratio. The paper first introduces two damping matrices based on the hysteretic damping ratio and Rayleigh damping, which is based on the viscous damping ratio. Then, six different damping matrices are constructed for the seismic response analysis of a deep soil site: the first and second frequencies, the first frequency and the frequency closest to the predominant frequency of the seismic wave, the first frequency and third frequencies, a common model based on the first frequency used in soil dynamics, and other forms, such as equivalent damping matrices based on the first frequency and the translation frequency.

① 收稿日期: 2014-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408609); 山东省高等学校科技计划项目(J14LG51); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(13CX02087A); 中国石油大学科研启动基金资助项目(Y1215040)

作者简介: 张如林, 男, 博士, 讲师, 主要从事场地地震反应分析、土与结构动力相互作用等方面的研究工作。E-mail: zhangrulin@yahoo.cn

The damping frequency can be considered as independent in the frequency domain and an accurate solution can be obtained. The time domain solution is obtained using ANSYS, which uses a one-dimensional soil column for the simulation. Using a deep soil site as an example, the influence of the different damping matrices on the seismic response is analyzed under an input of synthetic bedrock seismic waves and a natural seismic wave, the Shanghai Sheshan bedrock seismic wave, recorded in the Wenchuan earthquake. The seismic response results at different depths of the soil are compared with the frequency domain solution. The results show that the influence of the damping matrix is greater on the accelerations than on the displacements. The peak ground acceleration is most overvalued by 47.28%, and most undervalued by 32.53% compared to the frequency domain solution. The cause for the different influences of these damping matrices is investigated. The chosen wave spectrum characteristics are different, and the degree of influence of a damping matrix also varies depending on the input wave spectrum characteristics. The spectrum characteristics of a seismic wave should be considered during the selection of a damping matrix. The frequency information of actual bedrock seismic records are generally abundant and due to the frequency correlation of the selected damping in the time domain, using only one frequency is often not sufficient to reasonably reflect the characteristics of a seismic wave. Therefore, both the spectrum of a seismic wave and the actual soil condition at the site should be considered to determine an appropriate damping matrix to obtain more accurate and reasonable results.

**Key words:** deep soil site; seismic response; damping matrix; time domain analysis; frequency domain analysis

## 0 引言

场地地震响应分析是工程场地地震安全性评价工作中的主要组成部分,反映了工程场地特性对结构输入地震动参数的影响<sup>[1]</sup>。目前水平分层场地多用一维土层反应分析来评估工程场地地震动场中的局部场地效应,对于复杂场地多采用二维或三维计算模型<sup>[2]</sup>。土层地震响应分析通常在时域或频域内完成。对土层结构进行动力计算分析时,根据土动力学原理一般采用黏滞阻尼模型,利用结构振动模态关于阻尼矩阵正交的假定建立瑞利比例阻尼矩阵,可选用两个结构自振模态来构造阻尼矩阵比例系数。在土动力学中常采用土层第一阶自振频率来确定瑞利比例阻尼模型的两个比例系数。但当应用于深覆盖土层地震响应计算时,可能会低估土层的地震响应,这是由于基岩中输入地震波主要分量的迫振频率一般远高于土层的基频。有学者<sup>[3]</sup>建议采用土层的基频以及接近输入地震波频率的更高阶模态的频率来组成瑞利阻尼矩阵。

除了采用黏滞阻尼形式,还可采用滞后阻尼形式。在土力学中,土介质的阻尼特性常采用滞后阻尼模型,即认为土介质材料耗能所提供的阻尼力与位移成正比,方向与速度方向相反。这样土介质的耗能与激振频率无关,与实际情况相符,但是阻尼力

的数学形式为虚数,故一般易在频率域内进行土层地震响应计算。当把滞后阻尼应用于时域分析时,需将其转换为实数形式,一般与刚度矩阵成正比。有文献研究表明<sup>[4]</sup>,土动力学中以土层基频建立的时域滞后阻尼矩阵,在深覆盖土层地震响应分析中会形成很大误差,常使土层地震响应偏小,该文献利用若干条实际地震波分析结果,统计回归得到一个阻尼系数转换频率估计公式。文献<sup>[5]</sup>讨论了时域中应用滞后阻尼模型对高土坝地震响应计算误差的影响。文献<sup>[6]</sup>提出改进阻尼系数的方法,采用不同阻尼系数对土石坝进行了时域动力分析。

无论采用黏滞阻尼模型还是滞后阻尼模型,当在时域内进行结构体系(包括土层、土坝等岩土结构体系)的动力反应时,都必须建立时域内可应用的实数矩阵,在深覆盖土层地震响应的时域分析中,合理建立阻尼矩阵是值得深入思考的问题。本文在已知土介质滞后阻尼系数的前提下,探讨如何合理地选取时域内以比例阻尼形式出现的阻尼矩阵。为了研究不同阻尼矩阵形式对深厚覆盖土层地震响应的影响,本文选取上海某实际工程场地的钻孔资料,分析 6 种阻尼矩阵形式引起计算结果的差异及原因,以期给出深厚土层场地地震响应分析时选用阻尼矩阵形式的一些建议。

## 1 阻尼矩阵

### 1.1 基于滞后阻尼比的阻尼矩阵

当采用黏滞阻尼模型时,土层有限元分析的动力平衡方程式为

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

式中,  $[\mathbf{M}]$ 、 $[\mathbf{C}]$ 和 $[\mathbf{K}]$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\{\ddot{u}(t)\}$ 、 $\{\dot{u}(t)\}$ 和 $\{u(t)\}$ 分别为土层各节点相对于基岩的相对加速度、相对速度和相对位移向量;  $\ddot{u}_g(t)$ 为底部基岩输入的加速度;  $\{\mathbf{P}_{\text{eff}}(t)\}$ 为等效地震荷载向量。

当采用滞后阻尼模型时,其对应的运动方程表示为

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{u}(t)\} + (1 + i2\xi)[\mathbf{K}]\{u(t)\} = -[\mathbf{M}]\{\mathbf{I}\} \ddot{u}_g(t) = \{\mathbf{P}_{\text{eff}}(t)\} \quad (2)$$

式中,  $\xi$ 为滞后阻尼比;其他与式(1)相同。式(2)直接在时域内求解十分困难,对于线性问题,可以转换到频域求解或采用复模态叠加法求解。

在零初始条件下,对式(1)和式(2)分别做傅里叶变换,可得到

$$(-\omega^2[\mathbf{M}] + i\omega[\mathbf{C}] + [\mathbf{K}]) \cdot \{\mathbf{U}(\omega)\} = \{\mathbf{P}_{\text{eff}}(\omega)\} \quad (3)$$

$$(-\omega^2[\mathbf{M}] + i2\xi[\mathbf{K}] + [\mathbf{K}]) \cdot \{\mathbf{U}(\omega)\} = \{\mathbf{P}_{\text{eff}}(\omega)\} \quad (4)$$

比较式(3)和式(4)可知,对于同一有限范围的土层,在同一个简谐荷载作用下,这两个方程应具有同一性,这样可得

$$[\mathbf{C}] = \frac{2\xi}{\omega}[\mathbf{K}] = \frac{\xi}{\pi f}[\mathbf{K}] \quad (5)$$

式中,  $\omega$ 和 $f$ 分别为简谐荷载的迫振圆频率和工程频率。我们把式(5)的阻尼矩阵称为基于滞后阻尼比的等效阻尼矩阵,该式表明,在时域内建立基于滞后阻尼比的阻尼矩阵时,与刚度矩阵成线性,只需一个频率来确定,在以往土动力学中一般取土层的基频。

根据傅里叶变换,地震波可分解为一系列具有不同迫振频率简谐波的组合。在时域内求解土层地震响应时,难以用某一具体的迫振频率和滞后阻尼系数去表示滞后阻尼矩阵 $[\mathbf{C}]$ ,文献[4]曾提出用一个阻尼系数转换频率来代替。

### 1.2 基于振型阻尼比的瑞利阻尼矩阵

当阻尼矩阵采用瑞利阻尼矩阵时,在振型关于

阻尼矩阵正交的假定下可以得到瑞利阻尼矩阵:

$$[\mathbf{C}] = \alpha[\mathbf{M}] + \beta[\mathbf{K}] \quad (6)$$

式中,  $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为与质量和刚度成比例的阻尼常数,通过两阶特定的自振频率 $\omega_i$ 、 $\omega_j$ 和振型阻尼比 $\xi_i$ 、 $\xi_j$ 确定两个比例系数:

$$\alpha = \frac{2(\xi_j\omega_i - \xi_i\omega_j)\omega_i\omega_j}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{2(\xi_i\omega_i - \xi_j\omega_j)}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \quad (8)$$

当土介质材料的滞后阻尼比 $\eta$ 值不大于0.25时,一般可以认为土层(或土介质结构)系统的振型阻尼比 $\xi$ 与材料滞后阻尼比 $\eta$ 相等,可用 $\eta$ 代替上两式中的 $\xi$ 。

### 1.3 土层地震响应分析中的阻尼矩阵

在土层地震响应分析中,阻尼矩阵可以有多种选择形式。本文总结如下几种形式阻尼矩阵:

(1)瑞利阻尼矩阵。由土层前2阶自振频率 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 来确定比例系数 $\alpha$ 和 $\beta$ ,计算公式如下:

$$[\mathbf{C}] = 2\xi\omega_1\omega_2/(\omega_1 + \omega_2)[\mathbf{M}] + 2\xi/(\omega_1 + \omega_2)[\mathbf{K}] \quad (9)$$

(2)瑞利阻尼矩阵。由土层基频 $\omega_1$ 和接近输入地震波卓越频率的更高阶模态的频率 $\omega_p$ 来确定 $\alpha$ 和 $\beta$ ,对应的阻尼矩阵可写为

$$[\mathbf{C}] = 2\xi\omega_1\omega_p/(\omega_1 + \omega_p)[\mathbf{M}] + 2\xi/(\omega_1 + \omega_p)[\mathbf{K}] \quad (10)$$

(3)瑞利阻尼矩阵。由土层基频 $\omega_1$ 和第3阶自振频率 $\omega_3$ 来确定 $\alpha$ 和 $\beta$ ,阻尼矩阵表达式如下:

$$[\mathbf{C}] = 2\xi\omega_1\omega_3/(\omega_1 + \omega_3)[\mathbf{M}] + 2\xi/(\omega_1 + \omega_3)[\mathbf{K}] \quad (11)$$

(4)土动力学常用模型。由土层基频 $\omega_1$ 来确定 $\alpha$ 和 $\beta$ ,阻尼矩阵为

$$[\mathbf{C}] = \xi\omega_1[\mathbf{M}] + [\mathbf{K}]\xi/\omega_1 \quad (12)$$

(5)基于土层基频的等效阻尼矩阵。按式(5),取土层基频 $\omega_1$ ,阻尼矩阵表达式如下:

$$[\mathbf{C}] = \frac{2\xi}{\omega_1}[\mathbf{K}] \quad (13)$$

(6)基于阻尼系数转化频率的等效阻尼矩阵。由文献[8]建议的公式计算:

$$[\mathbf{C}] = \frac{2\xi}{\omega_c}[\mathbf{K}] \quad (14)$$

式中,  $\omega_c$ 为阻尼系数转换频率。

这样一共有6种阻尼矩阵组成形式,为了便于比较分析,本文分别把式(9)~式(14)称阻尼矩阵形式1至阻尼矩阵形式6。

## 2 算例分析

在时域分析时,通过求解实系数微分方程组便可求得各点的反应时程。而在频域分析时,通常采用傅里叶变换,通过求解复代数方程可求得土层的稳态解<sup>[4]</sup>。以频域内的结果为比较基准,比较不同阻尼矩阵对土层地震响应结果的影响。以上 6 种阻尼矩阵形式的本质是比例阻尼矩阵,ANSYS 程序具有此功能,在相同网格和输入条件下由 ANSYS 完成时域分析。

选择上海某实际工程场地进行研究。该场地水平分层均匀土层,深覆盖土层为深度 250 m。表 1 列出了通过场地现场钻孔所得土层材料特性。土体泊松比取 0.35。土层的基频为 0.49 Hz。表 2 列出了土层的前 10 阶模态。

表 1 上海某场地自然土层模型参数

Table 1 Parameters of soil layers in one site in Shanghai

层号	土性	层底深度 / m	剪切波速 / (m · s <sup>-1</sup> )	密度 / (kg · m <sup>-3</sup> )
1	杂填土	-2.1	100	1 900
2	粉质黏土	-3.3	110	1 860
3	淤泥质粉质黏土夹砂	-9.5	120	1 840
4	淤泥质黏土	-15	150	1 760
5	黏土	-24	200	1 820
6	粉质黏土	-27.5	260	2 010
7	砂质粉土	-38	280	1 900
8	粉细砂	-60	330	1 940
9	砂质粉土	-72.5	350	1 900
10	粉细砂	-78.5	360	1 930
11	粉砂夹中粗砂	-100	380	1 940
12	粉细砂夹中砂	-150	496	1 970
13	粉质黏土	-165	480	2 000
14	粉细砂夹粗砂	-210	522	1 950
15	黏土夹粉砂	-250	530	2 000

选用工程场地地震安全性安评中报告中人工合成的 50 年超越概率 10% 基岩水平加速度时程,峰值加速度为 0.836 m/s<sup>2</sup>,以及 2008 年汶川地震发生时上海市松江区西佘山南麓的佘山地震台测得的基岩波<sup>[7]</sup>进行分析。其中 EW 方向的峰值加速度为 -0.915 cm/s<sup>2</sup>,NS 方向的峰值加速度为 -1.122 cm/s<sup>2</sup>,以下简称人工波和佘山波。人工波地震波时程如图 1 所示,佘山波地震波时程详见文献<sup>[7]</sup>。

分层均匀土层地震响应分析可采用一维土柱有限元模型进行计算<sup>[8]</sup>。水平方向取单位长度,竖向取至基岩面,输入水平地震波,模型底部采用固定约束,两侧约束竖向自由度。文中提取土层地表处、地表下方 20 m 以及中间深度处的加速度和位移反应进行比较。

表 2 土层自振频率 (Hz)

Table 2 Natural frequency of soil (Hz)

阶数	1	2	3	4	5
频率	0.490	1.184	1.870	2.529	3.288
阶数	6	7	8	9	10
频率	4.046	4.718	5.497	6.179	6.974

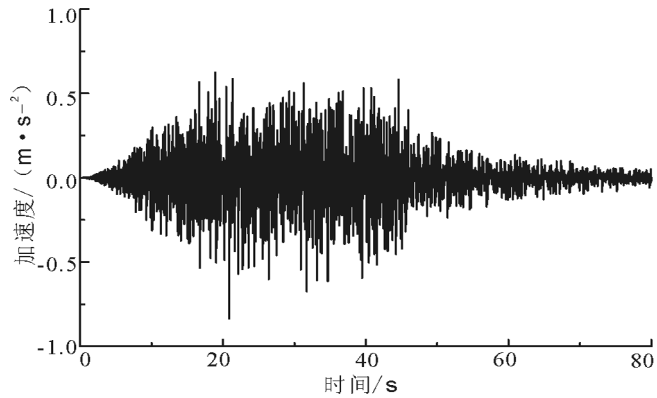


图 1 人工波加速度时程

Fig.1 Acceleration time history of artificial seismic wave

## 3 不同阻尼矩阵形式对计算结果的影响分析

列出两种地震波输入时形成 6 种阻尼矩阵所对应的各个频率值以及地震波卓越频率  $f_e$ ,如表 3 所示。6 种阻尼矩阵比例系数如表 4 所示。

表 3 不同地震波输入时对应的频率值 (Hz)

Table 3 Corresponding frequency under input of different seismic waves (Hz)

频率	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_p$	$f_c$	$f_e$
人工波	0.49	1.18	1.87	8.55	2.60	8.46
佘山波	0.49	1.18	1.87	0.49	1.40	0.134
	(0.49)	(1.18)	(1.87)	(0.49)	(1.40)	(0.084)

注:括弧内为佘山波南北分量计算结果(下同)

表 4 不同阻尼矩阵形式的比例系数

Table 4 Proportional coefficient of different damping matrices

阻尼矩阵形式	人工波		佘山波	
	$\alpha$	$\beta$	$\alpha$	$\beta$
1	0.228	9.50E-3	0.228	9.50E-3
2	0.291	1.76E-3	0.154	0.016 2
3	0.244	6.74E-3	0.244	6.74E-3
4	0.154	0.016 2	0.154	0.016 2
5	-	0.032 4	-	0.032 4
6	-	0.006 1	-	0.011 4

注:佘山波南北向和东西向计算结果相同,不再单独列出

### 3.1 对峰值加速度的影响

以频域解为准,将各种阻尼矩阵形式下计算的土层地表、土层地表以下 20 m 以及土层深度中间

位置处(简称中部)的峰值加速度时域解的误差列于表5中。

表5 土层不同深度处峰值加速度误差比较(%)

Table 5 Comparisons of peak acceleration at different depth (%)

阻尼矩阵	地表处		地下 20 m		土层中部	
	人工波	余山波	人工波	余山波	人工波	余山波
1	2.76	-12.50 (-20.43)	-1.19	-14.26 (-21.74)	20.68	-27.84 (-34.53)
2	47.28	-12.79 (-19.94)	28.16	-14.36 (-21.43)	65.42	-27.99 (-34.83)
3	13.48	-12.30 (-20.72)	3.58	-14.15 (-21.74)	27.12	-27.68 (-34.38)
4	-15.58	-12.79 (-19.94)	-7.40	-14.36 (-21.43)	14.24	-27.99 (-34.83)
5	-32.53	-12.70 (-19.26)	-5.97	-14.26 (-21.13)	12.54	-28.62 (-35.28)
6	43.52	23.54 (12.10)	19.81	20.81 (9.16)	39.66	0.31 (-10.91)

输入人工波时,采用阻尼矩阵1计算地表误差最小;采用阻尼矩阵形式1、3、4和5算得地表以下-20 m以及土层中部误差较为接近;采用阻尼矩阵形式2算得三个位置处误差都很大。土层中部位置采用6种阻尼矩阵形式峰值加速度都被高估,最高达到65.42%。而地表处采用阻尼形式2和6被高估,采用阻尼形式5又被大大地低估,最大高估了47.28%,最大低估了32.53%。地表以下20 m处的误差相比其他两处随阻尼形式变化较小。当采用余山波输入时,无论是EW向还是NS向,采用前5种阻尼形式计算的误差结果都比较接近,并且都低估了反应,其中采用余山波NS向计算的土层中部的误差最大,在35%左右。采用阻尼矩阵形式6计算的误差在不同位置处表现差异较大。

总的来说,输入人工波时加速度误差离散性较大,输入余山波时,误差离散性较小。

### 3.2 对峰值位移的影响

以频域解为准,将各种阻尼矩阵形式下计算的土层地表,土层地表以下20 m以及土层中部的峰值位移时域解的误差列于表6中。

和峰值加速度计算的误差结果相比,可以看出无论是人工波输入还是余山波输入,采用前5个阻尼矩阵形式得到的峰值位移误差变化都比较小,都在5%以内。阻尼矩阵形式6只与刚度矩阵成比例,仅含1个转化频率,由其得到的位移结果误差稍大。这说明不同的阻尼矩阵形式对位移的影响较小,在工程可以接受的范围内,而对加速度误差影响

较大。

表6 土层不同深度处峰值位移误差比较(%)

Table 6 Comparisons of peak displacement at different depth (%)

阻尼矩阵	地表处		地下 20 m		土层中部	
	人工波	余山波	人工波	余山波	人工波	余山波
1	0	-0.85 (-0.82)	-0.49	0.00 (-0.88)	0.00	0.00 (-1.54)
2	1.78	-0.85 (-0.82)	-1.47	0.00 (-0.88)	0.89	0.00 (-1.54)
3	0.89	-0.85 (-0.82)	-0.49	0.00 (-0.88)	0.00	0.00 (-1.54)
4	2.22	-0.85 (-0.82)	-0.49	0.00 (-0.88)	0.00	0.00 (-1.54)
5	3.56	-0.85 (-0.82)	-1.47	0.00 (-0.88)	0.89	0.00 (-1.54)
6	30.22	22.03 (21.31)	25.49	22.02 (21.24)	0.00	20.97 (20.00)

### 3.3 误差分析

通过谱分析得到土层前3阶的有效质量,分别占总有效质量的76.35%,11.27%和3.73%,总和达到91.35%。前面讲到,采用瑞利阻尼矩阵形式时,其等效阻尼比是和频率相关的。这里仅将阻尼矩阵形式1到阻尼矩阵形式4得到的等效阻尼比和自振频率的关系曲线绘于图2中。

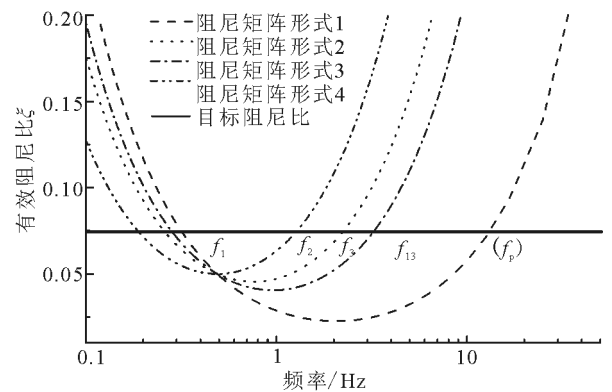


图2 不同阻尼矩阵形式的有效阻尼比-频率曲线

Fig.2 Curves of effective damping ratio and frequency in different damping matrices

输入人工波时,通过频谱分析知该地震波在0~10 Hz内分量较多。阻尼矩阵形式1抓住模型前2阶的动力特征,保证了这两个频率处等效阻尼比和目标阻尼比相等,计算结果和频域解接近;而阻尼矩阵形式2,第2阶至12阶的等效阻尼比和目标阻尼比偏差较大,小于目标阻尼比,而根据模态分析前3阶的振型参与量较大,故较频域解偏差较多;同样阻尼矩阵形式3尽管保证了第1和第3阶频率处的等效阻尼比和目标阻尼比相等,但低估了第2阶自

振频率附近的阻尼比;阻尼矩阵形式 4 仅在基频处的阻尼比等于目标阻尼比,而其他振型的阻尼比均被高估,故较频域值偏小。可见,只以土层的基频来确定的瑞利比例阻尼矩阵大幅提高了高阶振型的阻尼比,抑制了高阶振型对土层地震响应的贡献,造成计算结果误差较大。

输入余山波时,由频谱分析知地震波卓越频率(0.1 Hz 左右)远低于模型基频,并且该地震波的主要频率成份在 0.1~0.4 Hz,长周期分量较为明显。根据图 2,采用前 4 个阻尼矩阵形式时,频率小于 0.49 Hz 的振型阻尼比均被高估,故计算结果都偏小,而采用阻尼系数转换频率构建的阻尼矩阵形式 6 计算结果稍好。

### 3.4 阻尼矩阵形式选取建议

根据前面分析,地震波的频谱特征差异引起不同阻尼矩阵形式时计算结果的误差。这说明,采用长周期分量较多的地震波输入时(如余山波),尤其是土层基频高于地震波主要成分的迫振频率时,同样也会低估土层的地震响应。由此,地震波的频谱特征是影响阻尼矩阵形式选择的重要因素之一。而从计算结果来看,仅仅采用一种阻尼矩阵形式进行深厚覆盖场地地震响应分析可能是不够的。

根据统计,实际基岩记录的地震波频率成分较为丰富,时域计算中由于所选阻尼的频率相关性,仅用一个频率往往难以合理反映地震波的特征。针对本文的人工合成基岩地震波,频谱中频率成分较多,仅用一个频率形成的阻尼模型计算误差较大。因此应综合考虑地震波的频谱特性以及实际场地土层条件特征,进而确定出合适的阻尼矩阵形式,这样得到的结果将会更为准确合理。

## 4 结论

通过构建 6 种不同阻尼矩阵形式,分别采用人工波和余山波作为输入,对上海某实际深厚覆盖土层场地进行了地震响应计算,探讨了不同阻尼矩阵形式计算结果的差别及影响。结果表明:

(1) 不同阻尼矩阵形式对加速度影响程度较大,对位移影响较小。对加速度结果而言,运用同一种阻尼矩阵形式所得结果误差和输入地震波频谱特性有关。

(2) 只用一个频率控制阻尼比有时难以全面反映地震波和深厚覆盖土层的特征,采用一个低阶频率控制的阻尼矩阵形式抑制了高阶振型的反应,往

往会低估地震响应。

(3) 地震波的频谱特征十分重要,对计算误差影响较大,尤其是长周期分量明显的地震波,建议综合考虑地震波的频谱特征和场地土层特性来构建阻尼矩阵。

## 参考文献(References)

- [1] 文雯,陈宇军,王珏,等.地震安全性评价中地震动衰减关系的类型及其选取[J].地震工程学报,2013,35(3):709-714.  
WEN Wen, CHEN Yu-jun, WANG Jue. Type and Selection of the Ground Motion Attenuation Relations During Seismic Safety Evaluation[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 709-714. (in Chinese)
- [2] 盛志强,卢育霞,石玉成,等.河谷地形的地震反应分析[J].地震工程学报,2013,35(1):126-132.  
SHENG Zhi-qiang, LU Yu-xia, SHI Yu-cheng. Seismic Response Analysis of Valley Topography[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 126-132. (in Chinese)
- [3] Rathje E M, Bray J D. One-and two-dimensional Seismic Analysis of Solid-waste Landfills[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(4): 850-862.
- [4] 楼梦麟,潘日光.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: Natural Science, 2004, 32(3): 281-285. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 邹德高,徐斌,孔宪京.瑞利阻尼系数确定方法对高土石坝地震反应的影响研究[J].岩土力学,2011,32(3):797-803.  
ZOU De-gao, XU Bin, KONG Xian-jing. Study of Influence of Different Methods for Calculating Rayleigh Damping Coefficient on High Earth-Rock Dam Seismic Response[J]. rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 797-803. (in Chinese)
- [7] 杨燕,楼梦麟.汶川地震中远场深覆盖土层动力反应分析[J].防灾减灾学报,2011,31(4):462-468.  
YANG Yan, LOU Meng-lin. Dynamic Response Analysis of Far-field Soil Layer with Deep Deposit during Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(4): 462-468. (in Chinese)
- [8] 邹都,楼梦麟.水平成层土层地震响应分析的一维有限元方法[J].震灾防御技术,2008,3(1):45-52.  
WU Du, LOU Meng-lin. Seismic Response Analysis in Horizontal Layer with 1-D Finite Element Method[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2008, 3(1): 45-52. (in Chinese)