

孙强强,薄景山,彭达,等.瑞利阻尼矩阵对深厚场地地震反应的影响分析[J].地震工程学报,2017,39(4):0713-0718.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0713
SUN Qiang-qiang,BO Jing-shan,PENG Da,et al.Effect of Rayleigh Damping Matrix on Seismic Response Analysis of Deep Soft Soil[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(4):0713-0718.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0713

瑞利阻尼矩阵对深厚场地地震反应的影响分析^①

孙强强¹,薄景山^{1,2},彭达¹,蒋晓涵¹

(1.防灾科技学院,河北三河 065201;

2.中国地震局工程力学研究所地震工程与工程振动重点实验室,黑龙江哈尔滨 150080)

摘要:介绍场地时域分析基本理论和几种常见的阻尼矩阵确定方法,并基于有限差分方法,采用实际地震记录,考虑输入地震动强度和频谱特性,分别选择 5 种不同的瑞利阻尼矩阵形式,比较分析其对深厚场地时域动力反应的影响。结果表明:不同阻尼矩阵对加速度和反应谱均有影响,影响程度和输入地震动的频谱特性有关;当土层基频接近输入地震动卓越频率时,只根据土层基频确定阻尼矩阵是可行的,但当输入地震动卓越频率高于或远高于土层基频时,该方法会严重低估地表加速度峰值和反应谱谱值,时域分析中阻尼的确定应综合考虑土层特性和地震动频谱特性。

关键词:瑞利阻尼;时域分析;深厚土层;目标频率;地震反应分析

中图分类号:TU443

文献标志码:A

文章编号:1000-0844(2017)04-0713-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.04.0713

Effect of Rayleigh Damping Matrix on Seismic Response Analysis of Deep Soft Soil

SUN Qiang-qiang¹, BO Jing-shan^{1,2}, PENG Da¹, JIANG Xiao-han¹

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract: This paper deals with the effect of the Rayleigh damping matrix on site response analysis in the time domain. We introduce the fundamental theory of time domain analysis and summarize several methods for constructing a damping matrix. In our study, we developed a series of numerical models to simulate wave propagation through an elastic medium after using the finite difference method to consider the intensity and spectral characteristics of the input motions. We adopted a full Rayleigh damping and selected five methods to determine the high frequency. The results show that damping models have a significant influence on acceleration and spectral acceleration, and their degree of influence is related to the frequency characteristics of the input motions. When the fundamental site frequency is close to the predominant frequency of the input motions, it is feasible to determine the damping matrix based on this consideration only. However, the peak ground acceleration and spectral value are underestimated when the predominant frequency of the input motion is high or far higher than the fundamental site frequency. In time domain analysis, damping considerations should include the site frequency and frequency characteristics of the input motions.

① 收稿日期:2016-04-25

基金项目:中央高校基本科研业务费研究生科技创新基金项目(ZY20160302),国家自然科学基金项目(51208108)

作者简介:孙强强(1992-),男,硕士研究生,主要从事地下结构抗震研究。E-mail:sun_ease@126.com。

Key words: Rayleigh damping; time domain analysis; deep soft site; target frequency; seismic response analysis

0 引言

阻尼描述结构在振动过程中能量的耗散,是结构的基本动力特性之一,是影响结构动力反应的重要因素^[1]。土层地震反应分析中,频域方法和时域方法是两类常用的分析方法。频域方法假定阻尼力的大小与位移成正比并与速度同相,常采用等效线性化方法模拟土的非线性特性,并不能反映土的真非线性。时域方法则能对动荷载下土的非线性、滞后性及变形累计特性进行合理的考虑。在时域分析中,阻尼形式会直接影响计算结果,瑞利阻尼矩阵是通常采用的阻尼形式,其是频率相关的。人们已经认识到不同阻尼系数的取值对土层地震反应的影响是不可忽视的,并提出了一些实用的方法^[2-13],但在进行土层地震反应时域分析时,阻尼模型和相关系数的选择仍是一个不明确的问题。

基于上述考虑,本文以不同类型的实际地震记录作为计算输入,考虑输入地震动的强度和频谱特性,比较分析时域分析中不同瑞利阻尼系数确定方法对地表加速度波形、加速度峰值和加速度反应谱的影响,以期找出深厚土层时域动力分析中阻尼矩阵影响的一般规律,从而对土层地震反应时域分析中阻尼矩阵的选择提供一些参考。

1 基本运动方程

时域分析中,土节点基本运动方程如下:

$$\mathbf{M}\{\ddot{u}\}_t + \mathbf{C}\{\dot{u}\}_t + \mathbf{K}\{u\}_t = -\mathbf{M}\{\ddot{u}_g\}_t \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\{\ddot{u}\}_t$ 、 $\{\dot{u}\}_t$ 、 $\{u\}_t$ 分别为 t 时刻各节点的相对加速度、速度和位移。 $\{\ddot{u}_g\}_t$ 为 t 时刻输入地震加速度。

阻尼矩阵 \mathbf{C} 常采用瑞利阻尼形式,表达式为:

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (2)$$

式中: α 和 β 分别为质量比例系数和刚度比例系数。

频域分析中,阻尼比 ζ 是频率无关的常数,在时域计算中,假定刚度矩阵和质量矩阵正交,则:

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \begin{bmatrix} \omega_j & -\omega_i \\ -\frac{1}{\omega_j} & \frac{1}{\omega_i} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\omega_n = 2\pi f_n \quad (4)$$

$$\zeta_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_n} + \beta\omega_n \right) \quad (5)$$

式中: ω 为圆频率; ζ_i 、 ζ_j 、 ζ_n 为土层振型阻尼比,一

般假定 $\zeta_i = \zeta_j = \zeta$,则式(3)化简为:

$$\begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \frac{2\zeta}{\omega_i + \omega_j} \begin{bmatrix} \omega_i\omega_j \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过给定目标阻尼比 ζ 和目标频率 f_i 、 f_j ,可根据式(6)求得 α 和 β ,进而求得阻尼矩阵 \mathbf{C} 。

由上述公式可以看出,瑞利阻尼是与频率相关的,实际地震动包含一系列不同的频率分量,这使得计算采用的阻尼也在不断地变化。研究表明,在一定的频率范围内,阻尼随频率的变化非常小^[14],因此阻尼系数的关键是确定有效频率范围 $[f_i, f_j]$,使其包含地震动的大部分能量。归纳常见的目标频率确定方法如下:

(1) $f_i = f_j = sf$, sf 为结构的基频^[3],这是时域分析中最常用的方法;

(2) $f_i = sf$, f_j 可取输入地震动反应谱卓越频率 f_R ;反应谱曲线重心频率 f_{Rg} ;傅氏谱卓越频率 f_F ^[4-8];

(3) $f_i = sf$, $f_j = f_3$, f_3 为土体第3阶频率^[9];

(4) $f_i = sf$, $f_j = n \cdot sf$, n 为大于 $f_e/(sf)$ 的奇数,其中 f_e 为地震波傅氏谱卓越频率^[10];

(5) 滞后阻尼转换频率 f_c , f_c 与结构的基频和反应谱重心频率有关,楼梦麟等^[11]确定了其经验经验公式;

(6) 根据场地特征周期 T_g 取值,丁海平等^[12]建议取 $1/(5T_g)$ 和 $1/T_g$ 作为时域分析瑞利阻尼的两个目标频率;

(7) 等效比例阻尼,李小军等^[13]根据不同频率阻尼比的重要性程度,对振型频率赋予权重函数,再通过最小二乘拟合得到 α 和 β 的最优解。

当然,也有一些其他的方法及上述方法的改进方法,就不再一一赘述。

2 计算方法和参数选择

2.1 计算方案

本文采用有限差分软件FLAC^[14]进行场地时域地震反应分析,网格划分和边界条件等均满足动力计算要求^[15]。分别选择5种不同的目标频率确定方法构建瑞利阻尼矩阵。目标频率的确定方法如下:(1) f_i 、 f_j 均取土体基频;(2) f_i 取土体基频, f_j 取 $n \cdot f_i$;(3) f_i 取土体基频, f_j 取土体第3阶振型频率;(4) f_i 取土体基频, f_j 取输入地震动傅氏谱卓

越频率; (5) f_i 取土体基频, f_j 取地震动反应谱卓越频率。分别将上述 5 种方法简称为 M1、M2、M3、M4 及 M5。土层计算高度取 80 m, 剪切波速 $v_s = 175$ m/s。单层土振型频率可采用式(7)求解^[16]:

$$f_n = \frac{v_s}{4H} (2n - 1) \quad (7)$$

式中: n 为土层阵型阶数; v_s 为土层剪切波速; H 为土层厚度; f_n 为土层第 n 阶自振频率。

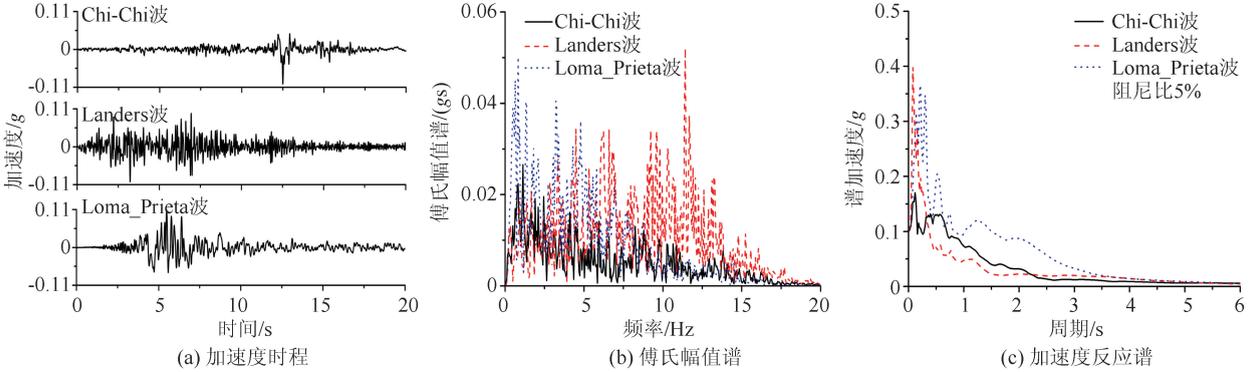


图 1 基岩输入加速度时程、傅氏谱及加速度反应谱

Fig.1 Acceleration time history and Fourier spectrum and response spectrum of input motions

3 阻尼矩阵对土层地震反应的影响分析

图 2 为 0.2g Landers 波和 Loma_Prieta 波激励

2.2 地震动输入

基岩输入为 3 种常见的实际地震记录, 分别为 Chichi 波、Landers 波和 Loma_Prieta 波, 其傅氏谱卓越频率分别为 1.12、11.43 和 0.83 Hz, 其反应谱卓越频率分别为 8.33、16.67 和 4.55 Hz。调整输入加速度峰值为 0.1g、0.2g、0.35g 和 0.5g。0.1g 时各地震波加速度时程、傅氏幅值谱及加速度反应谱如图 1 所示 ($g = 9.81$ m/s²)。

下阻尼矩阵对地表加速度时程及其傅氏幅值谱的影响。可以看出: 阻尼矩阵对高频的 Landers 波影响显著, 当阻尼矩阵考虑地震动频谱特性时地表加速

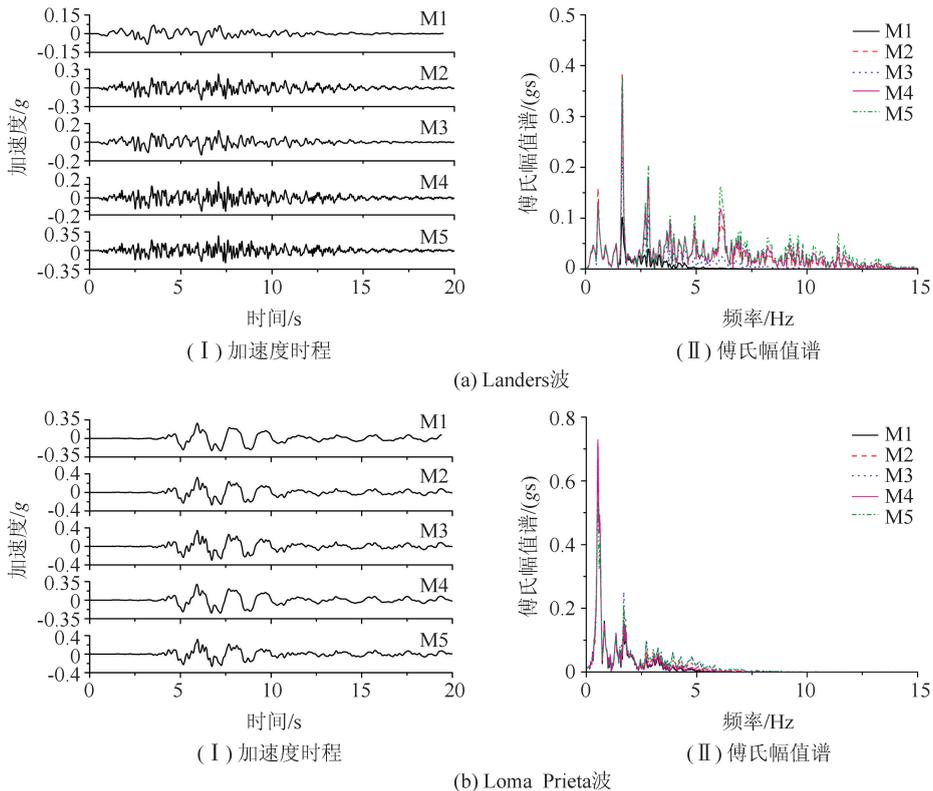


图 2 地表加速度时程和傅氏幅值谱(0.2g)

Fig.2 Acceleration time history and Fourier amplitude spectrum (0.2g)

度时程波形相似,地震动高频分量明显;而只考虑土体基频时,地震动高频分量被显著的抑制,低频分量傅氏谱幅值较小。阻尼矩阵对长周期的 Loma_Prieta 波的影响较小,地表加速度波形相似,傅氏幅值谱也较为接近。其他地震动强度输入时规律相似,不再详述。

表 1 为 0.2g 地震动输入下各计算工况的地表加速度峰值绝对值 A_{\max} 及相对误差 e 。相对误差采用下式计算,衡量各阻尼矩阵计算结果与平均计算结果的偏差。

$$e_i = \frac{A_i - (\sum_1^5 A_i)/5}{(\sum_1^5 A_i)/5} \times 100\% \quad (8)$$

式中: e_i 为阻尼矩阵 i 的相对误差; A_i 为采用阻尼矩阵 i 计算的地表加速度峰值绝对值。

表 1 地表加速度峰值及相对误差(0.2g)

Table 1 Peak ground acceleration and relative errors(0.2g)

方法	Chi-Chi 波		Landers 波		Loma_Prieta 波	
	A_{\max}/g	$e/\%$	A_{\max}/g	$e/\%$	A_{\max}/g	$e/\%$
M1	0.180	-18.22	0.092	-52.81	0.287	-8.78
M2	0.211	-4.17	0.224	15.47	0.324	2.96
M3	0.228	3.65	0.136	-30.03	0.343	9.16
M4	0.199	0.23	0.241	24.05	0.300	-4.46
M5	0.283	28.29	0.278	43.32	0.318	1.13

从表 1 中可以看出, Loma_Prieta 波输入时,各阻尼矩阵计算结果离散性较小,相对误差均在 10% 以内。Landers 波则对阻尼矩阵较敏感,不同阻尼矩阵下结果偏差较大,阻尼矩阵 M1 低估了加速度峰值为 52.8%,而 M5 则高估了加速度峰值约 43.3%。

图 3 为不同地震动激励、不同阻尼矩阵下土层地表水平加速度峰值对比图。通过比较可以得出: 阻尼矩阵对地表加速度峰值有影响,影响程度和阻

尼确定方法及地震动的频谱特性有关。只采用土体基频确定阻尼矩阵(M1),各工况计算结果都偏小,这是由于计算中阻尼选取过大造成的;当采用土体基频和反应谱卓越频率确定阻尼矩阵时(M5),计算结果一般较大,对输入地震动的放大作用明显。而考虑土体基频和第三阶频率的阻尼确定方法(M3),则对输入地震动的频谱特性较敏感, Landers 波作用下其计算结果较小, Loma_Prieta 波作用下其计算结果则较大。考虑土体基频和傅氏谱卓越频率的阻尼确定方法(M2、M4),地表加速度峰值相差不大。同时也可看出,随着输入地震动强度的增大,地表加速度峰值绝对误差逐渐变大,最大可达 2.5 倍。

图 4 为不同阻尼矩阵下 Chichi 波和 Loma_Prieta 波输入下加速度峰值沿土层高度的分布图。从图中可以看出,在 0.1g 地震动输入下,相同土层高度处加速度峰值相差较小。随着输入地震动峰值(0.35g)的增大,相同高度处的加速度峰值绝对误差增大。不同阻尼矩阵时,加速度峰值沿土层高度的分布规律相似,但不同地震动强度和频谱特性下,加速度峰值沿高度的分布规律有一定差异。

不同阻尼矩阵下地表加速度反应谱见图 5。通过比较可以得出: 同一地震动输入下,采用不同阻尼矩阵计算得到的地表加速度反应谱形状基本相同,周期大于 1 s 后,反应谱曲线基本重合。对比反应谱峰值可以看出,当输入地震动的傅氏谱卓越频率高于土层基频时(Chichi 波、Landers 波),阻尼矩阵对反应谱峰值影响显著。阻尼矩阵 M5 的反应谱峰值是阻尼矩阵 M1 的 1.5~2 倍,而只考虑土体基频的阻尼矩阵,高频段的反应谱峰值较小,尤其在 Landers 波作用下,其高频段被明显抑制。当输入地震动的傅氏谱卓越频率接近土层基频时,各阻尼矩阵得到的反应谱峰值相差不大。

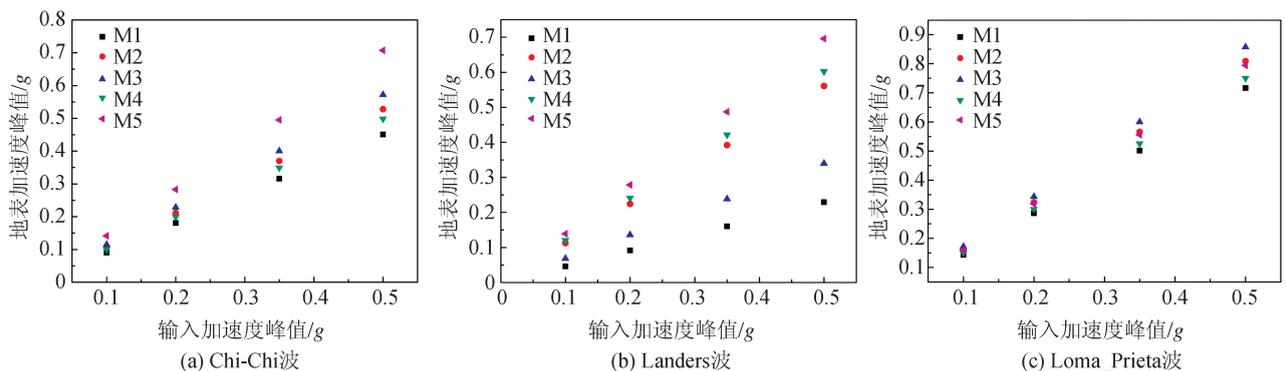


图 3 不同地震动输入下地表加速度峰值

Fig.3 Peak ground acceleration in various input motions

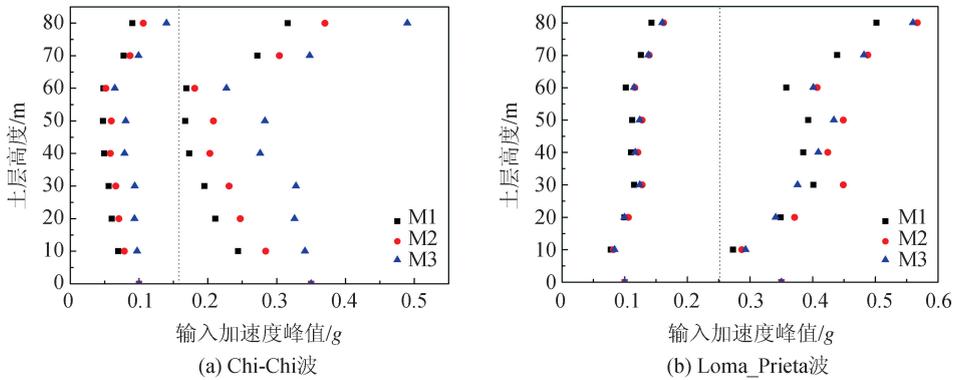


图 4 不同阻尼矩阵下加速度峰值沿土层高度分布图(0.1g;0.35g)

Fig.4 Peak ground acceleration distribution on soil depth various damping matrices (0.1g;0.35g)

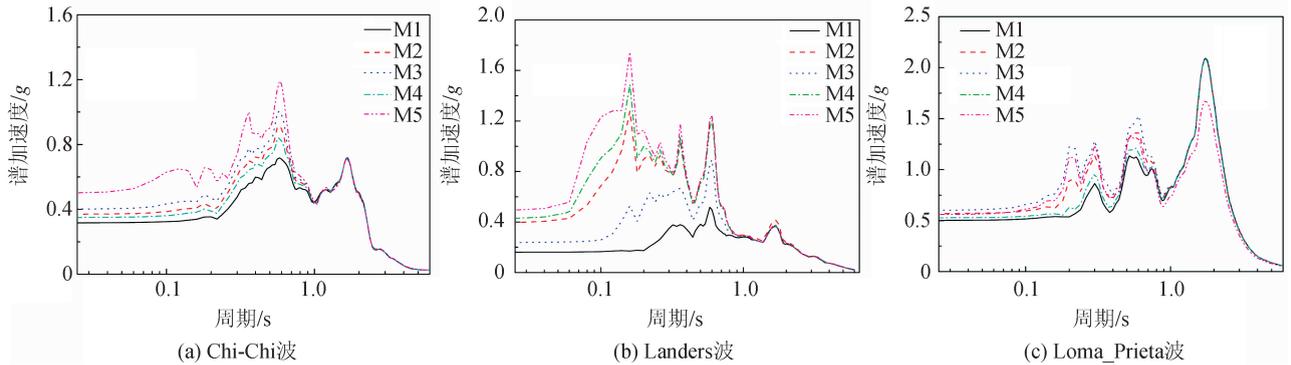


图 5 不同阻尼矩阵下地表加速度反应谱(0.35g)

Fig.5 Acceleration response spectrum in various damping matrices (0.35g)

4 结论

本文对一深厚场地进行时域线性动力反应分析,比较不同阻尼形式时结果的差异,并考虑输入地震动的强度和频谱特性,得到如下结论:

(1) 不同瑞利阻尼矩阵对加速度及反应谱有影响,影响程度和阻尼确定方法、地震动的强度和频谱特性有关。强地震动输入下,计算结果的绝对误差变大。当土层基频低于或远低于输入地震波卓越频率时,计算结果离散性较大。

(2) 当输入地震动的卓越频率和土层基频接近时,只由土层基频确定瑞利阻尼矩阵是可行的,但当两个频率相差较大时,应综合考虑土层和输入地震动特性。

(3) 在时域中研究频谱特性对土层地震反应影响时应重视阻尼矩阵的选择,即有些结果并不是地震动频谱特性造成的,而是由阻尼的频率依赖性造成的,而这种频率依赖性在实际中并不存在。

本文仅分析了深厚场地时各阻尼矩阵结果的差异,在其他土层厚度、土层软硬和土层结构等条

件下各阻尼矩阵的适用性情况,则仍需做进一步的研究。

参考文献(References)

- [1] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,2006:166-180.
HU Yu-xian. Earthquake Engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 2006: 166-180. (in Chinese)
- [2] 黄宗明,白绍良,赖明.结构地震反应时程分析中阻尼问题评述[J].地震工程与工程振动,1996,16(2):95-105.
HUANG Zong-ming, BAI Shao-liang, LAI Ming. Review on the Damping in Earthquake Response Time-history Analysis of Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996, 16(2): 95-105. (in Chinese)
- [3] 董云,楼梦麟.关于超长沉管隧道地震反应分析中瑞利阻尼矩阵的讨论[J].地震工程与工程振动,2014,34(1):87-94.
DONG Yun, LOU Meng-lin. Discussion on Rayleigh Damping Matrix for Seismic Response Analysis of Long Immersed Tube Tunnel[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 87-94. (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] 张如林, 程旭东, 管友海. 深厚场地地震响应中阻尼矩阵形式的影响分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 868-873.
ZHANG Ru-lin, CHEN Xu-dong, GUAN You-hai. Influence of Different Damping Matrices on Seismic Response in Deep Soil Sites[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 868-873. (in Chinese)
- [6] 邹德高, 徐斌, 孔宪京. 瑞利阻尼系数确定方法对高土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 Calculation Rayleigh Damping Coefficient on High Earth-rock Dam Seismic Response[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 797-803. (in Chinese)
- [7] 马俊玲, 丁海平. 土层地震反应分析中不同阻尼取值的影响比较[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5): 517-523.
MA Jun-ling, DING Hai-ping. Comparative Study on Influence of Different Damping Values in Soil-layer Seismic Response Analysis[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(5): 517-523. (in Chinese)
- [8] 迟世春, 陶警园, 贾宇峰. 土石坝动力反应分析的阻尼模型和计算频率[J]. 黑龙江大学工程学报, 2013, 4(1): 1-7.
CHI Shi-chun, TAO Jing-yuan, JIA Yu-feng. Damping Models and Calculated Frequencies of Earth-rock Dams[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2013, 4(1): 1-7. (in Chinese)
- [9] Annie O L K, Jonathan P S, Hashash Y M A, et al. Use of Exact Solutions of Wave Propagation Problems to Guide Implementation of Nonlinear Seismic Ground Response Analysis Procedures[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(11): 1385-1398.
- [10] Hudson M, Idriss M, Beikae M. User Manual for QUAD4m; A Computer Program to Evaluate the Seismic Response of Soil Structures Using Finite Element Procedures and Incorporating a Compliant Base[D]; Berkeley: University of California, 1994.
- [11] 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, 2004, 3(3): 281-285.
LOU Meng-lin, PAN Dan-guang. Hysteretic Damping Application in Time Domain Analysis of Soil Layer[J]. Journal of Tongji University, 2004, 3(3): 281-285. (in Chinese)
- [12] 丁海平, 马俊玲. 基于场地特征周期的瑞利阻尼确定方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 35-40.
DING Hai-ping, Ma Jun-ling. A Method for Rayleigh Damping Based on Site Characteristic Period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Supp2): 35-40. (in Chinese)
- [13] 李小军, 侯春林, 潘蓉, 等. 阻尼矩阵选取对核电厂结构地震响应的影响分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(1): 110-116.
LI Xiao-jun, HOU Chun-lin, PAN Rong, et al. Effect of Damping Matrix Selection on Seismic Response of Nuclear Power Plant Structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(1): 110-116. (in Chinese)
- [14] Software Manual of FLAC Version 5.0[Z]. Itasca: Itasca Consulting Group, 2005.
- [15] Kramer S L. Geotechnical Earthquake Engineering[M]. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1996.
- [16] Lysmer J, Kuhlemeyer R L. Finite Dynamic Model for Infinite Media[J]. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1969, (95): 859-77.