

DOI: 10.11779/CJGE2023S20032

# 不同土体动力参数曲线分布特征及其对地震动的影响

刘新雨, 迟明杰\*, 陈学良

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

**摘要:** 动剪切模量比和阻尼比是表征土体非线性特征的重要动力学参数,也是影响场地地震反应特征的重要因素之一。通过对多篇文献中的常见土类进行统计分析,得到了相应的土体动力参数曲线分布特征,并在此基础上研究了土体动剪切模量比和阻尼比曲线的分布特征对场地效应的影响特点和规律。研究结果表明:各类土体的两条动力曲线统计结果的平均值与推荐值有一定程度的差异,但总体趋势一致,其中砂土、黏土、卵砾土、淤泥质土等土类的两条动力曲线的分布各具特点;受动剪切模量比和阻尼比共同影响,地震动各成分的场地效应表现出不同的特点,总体上表现为低频放大效应与高频滤波效应,动剪切模量比和阻尼比分布特征不同的土类对两种效应的影响程度不同。

**关键词:** 动力参数曲线; 分布特征; 动剪切模量比; 阻尼比; 地震动场地效应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0229-06

**作者简介:** 刘新雨(1999—),女,硕士研究生,主要从事岩土地震工程的研究工作。E-mail: liuxinyu211@mailsucas.ac.cn。

## Distribution characteristics of dynamic parameter curves of different soils and their effects on ground motion

LIU Xinyu, CHI Mingjie, CHEN Xueliang

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The dynamic shear modulus ratio and damping ratio are the important dynamic parameters that characterize the nonlinear characteristics of soils, and are also one of the important factors affecting the seismic response characteristics of the site. The statistical analysis on common soil types in multiple literatures is conducted, and obtains the corresponding distribution characteristics of dynamic parameter curves of soils are obtained. Based on this, the influence characteristics and laws of the distribution characteristics of dynamic shear modulus ratio and damping ratio curves of soils on site effects are studied. The research results indicate that there is a certain degree of difference between the average and recommended values of the two dynamic curves of various types of soils, but the overall trend is consistent. Among them, the distribution of the two dynamic curves of soil types such as sand, clay, gravel soil and muddy soil has their own characteristics. Due to the combined influences of the dynamic shear modulus ratio and damping ratio, the site effects of each component of seismic motion exhibit different characteristics, generally manifested as low-frequency amplification effects and high-frequency filtering effects. The soil types with different distribution characteristics of dynamic shear modulus ratio and damping ratio have different degrees of influences on the two effects.

**Key words:** dynamic parametric curve; distribution characteristic; dynamic shear modulus ratio; damping ratio; site effect of ground motion

## 0 引言

强震作用下土体表现出明显的非线性特征,是场地地震反应分析中一直关注的重要课题<sup>[1]</sup>。土体对地震动的影响涉及两个方面:①与土体自振周期接近的地震动成分的共振效应,主要表现为对相关成分地震动幅值(或强度)的放大效应,动剪切模量比是其中重要的影响参数;②地震动在土体中能量的传递与耗散效应,主要表现为振动速度的改变。相邻两种岩土体介质的相对剪切模量程度是衡量地震动能量传递效

率的关键参数,而阻尼比是衡量地震动能量耗散程度的重要指标。

近年来,科研领域和工程领域从不同角度对动剪切模量比和阻尼比两个参数开展了广泛的试验测试及分析工作,积累了丰富的数据资料和相关的研究结论。

**基金项目:** 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3007305);国家自然科学基金重点项目(51639006);国家自然科学基金项目(51878625)

**收稿日期:** 2023-11-30

**\*通信作者** (E-mail: 03115049@bjtu.edu.cn)

袁晓铭等<sup>[2]</sup>对中国十几个地区土样进行共振柱试验,提出了 6 种常规土类即黏土、粉质黏土、粉土(密、中密、松)、砂土(密实、中密、松)、淤泥、淤泥质土的动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化的推荐值。陈国兴等<sup>[3-4]</sup>通过对南京及其附近地区的各类土的动力性参数进行分析研究,给出了该地区一般土类的动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化的拟合曲线。除此之外,武汉<sup>[5]</sup>、昆明<sup>[6]</sup>、豫东平原<sup>[7]</sup>等地区都有学者对不同土类的动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化关系进行了统计分析,这些工作对工程抗震建设和场地反应分析研究有重要的参考价值和实际意义。

由于多种因素的影响,如土体类型、固结比、埋深、试验误差等,导致两个参数随剪应变变化具有显著的不确定性和变异性,从而可能对场地地震反应产生影响。孙锐等<sup>[8]</sup>基于全国多个地区的 588 组土样的共振柱实验数据研究发现,动剪切模量比和阻尼比的变异系数分别随剪应变的增加而分别明显增大和减小,并且阻尼比的不确定性明显高于动剪切模量比。钟紫蓝等<sup>[9]</sup>根据土体动力特征参数相关性和不确定性进行工程场地随机地震反应分析,研究发现场地土体动力参数不确定性对场地地震反应具有较大的影响,且影响程度与地震动强度、频谱成分及场地基本周期均密切相关。因此,在进行场地地震反应分析时,动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化曲线的选择将影响计算结果的可靠性和结构响应的准确性。

本文基于前人文献积累的数据,为研究土体动力参数对地震动场地效应的影响特点和规律,将从以下 3 个方面开展研究工作:①对各类土体的动剪切模量比和阻尼比进行统计分析,得到动力参数曲线分布特征;②利用一维土层地震反应分析软件 DEEPSOIL,开展不同地震动输入条件下不同土类的地震反应计算;③根据计算结果,从不同角度分析动力参数曲线分布特征对地震动场地效应的影响。

1 试验数据的统计与分析

本文收集了 27 篇文献中动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化的数据,包含 1999-2020 年间相关试验结果及统计结果。将收集的数据按照砂土、粉土、卵砾土、黏土、粉质黏土、淤泥质土进行分类,对各土类数据进行汇总平均(下面称为“统计值”),分析不同土体的动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化的特征和区别。然后,将每种土类两个参数的平均值曲线与袁晓铭等<sup>[2]</sup>提出的推荐值曲线进行对比(埋深 $\leq 10\text{ m}$ 的推荐值称为“推荐值 1”、 $10\text{ m}<\text{埋深}\leq 20\text{ m}$ 的推荐值称为“推荐值 2”),通过对比可评估其合理性。

1.1 统计值曲线分布分析

动剪切模量比是衡量土体对剪切应力的抵抗能力的指标,表示在受到剪切力作用时土体抵抗变形的能力。动剪切模量比越大,土体变得更加刚硬,剪切形变受到的阻力增加。阻尼比衡量土体在动态加载下能量吸收和耗散的能力。阻尼比越大,土体越能够吸收振动的能量,从而减小地震引起的土层振动的振幅。

从图 1(a)曲线可以看出,对于动剪切模量比曲线:卵砾土曲线位于所有曲线上方,表明其具有较高的刚度,抵抗变形能力比较强;黏土、粉质黏土、砂土曲线居中;粉土和淤泥质土两条曲线接近重合,位于图中最下方,说明两种土体较软弱,更易发生变形。对于阻尼比曲线:可以明显看出黏性土的 3 条曲线位于非黏性土 3 条曲线上方;淤泥质土曲线位于最上方,说明其具有较好的阻尼性能,能够更有效吸收振动能量;粉质黏土、黏土、粉土 3 条曲线居中,在剪应变 $\gamma<5\times 10^{-4}$ 时 3 条曲线几乎重合,之后随着剪应变增大,3 者之间的差距逐渐显著;砂土和卵砾土两条曲线位于最下方,当剪应变 $\gamma<5\times 10^{-5}$ 时,两条曲线接近,随着剪应变的增大,两者之间的差值逐渐增加,最终又趋于接近。

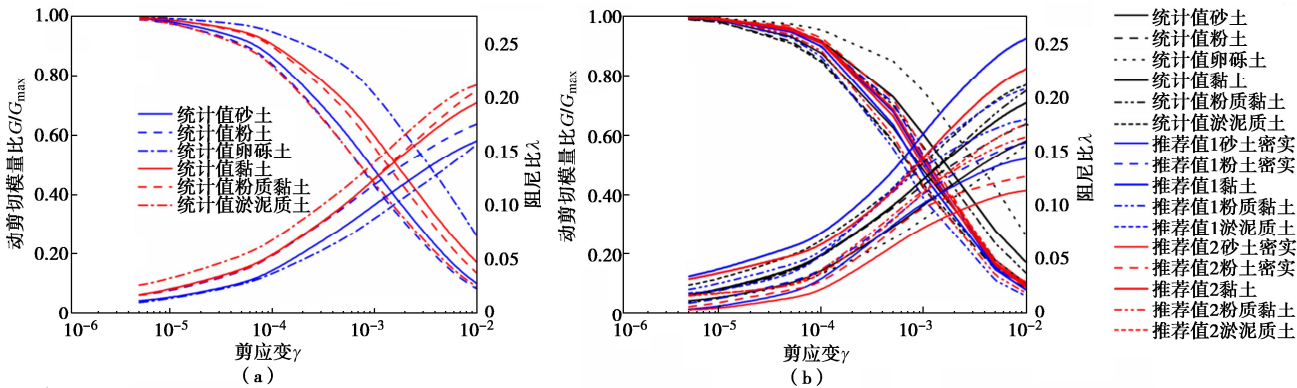


图 1 各土体动剪切模量比和阻尼比统计值曲线和推荐值曲线

Fig. 1 Statistical value curve and recommended value curve of dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils

根据以上统计结果, 对于不同类别的土体, 并非都遵循动剪切模量比越大, 相应的阻尼比就越小的规律, 如砂土具备动剪切模量比相对较小, 阻尼比也相对较小的分布特征; 而黏土具备动剪切模量比相对较大, 阻尼比也相对较大的分布特征。

1.2 与推荐值曲线对比分析

观察图 1 (b) 可知, 本文统计数据所得曲线与推荐值有一定程度的差别, 总体上与推荐值相一致。砂土的动剪切模量比曲线表现为在推荐值两曲线之下, 随着剪应变的增加逐渐趋于一致, 而阻尼比统计值曲线则与推荐值 1 曲线接近, 一直保持在推荐值 2 曲线之上。粉土的动剪切模量比曲线始终处于推荐值两曲线之下, 随着剪应变的变化, 其差值呈先增加后减小的趋势, 而阻尼比统计值曲线则持续位于推荐值两曲线之上。黏土和粉质黏土的动剪切模量比统计值曲线均位于推荐值两条曲线上方。随剪应变增加, 差值逐渐增加, 两条曲线和对应的推荐值 1 曲线的最大差值分别为 0.1364, 0.175。黏土的阻尼比统计值曲线始终位于两条推荐值曲线下方; 而粉质黏土统计值阻尼比曲线, 当剪应变  $\gamma < 2 \times 10^{-3}$  时, 位于两条曲线中间。淤泥质土动剪模量比位于推荐值两条曲线下方, 随着剪应变增大, 逐渐和埋深较浅的推荐值 1 曲线接近, 而阻尼比曲线逐渐和推荐值 1 曲线接近, 最后则趋于重合。

综上, 不同土体的动剪切模量比和阻尼比的统计值曲线的变化趋势不同, 反映了不同土体的抗震能力和能量耗散能力不同。和推荐值曲线相比, 统计值曲线和推荐值曲线既有相似之处也有差异较大的部分。这表明, 由于土体特性、试验条件以及试验方法等因素的影响, 土的动剪切模量比和阻尼比表现出不确定性和多样性。

2 计算模型

利用一维土层地震反应分析软件 DEEPSOIL, 分别对 6 种土体的 30 m 单一均质土层进行土层反应计算。土体的动剪切模量比和阻尼比数据均采用上述统计值, 土体密度采用经验取值, 剪切波速参照《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001) 中规定范围合理取值, 各土体的物理参数详见表 1。基岩设置为弹性基底, 阻尼比为 1。

基岩输入地震动是从 KiK-net 强震台网数据库选取的 4 条井下台站实测数据, 分别为 CHBH10 波、IBRH10 波、IBRH07 波、CHBH14 波。输入地震动的基本参数见表 2, 相应的加速度时程曲线和 5% 阻尼比下的加速度反应谱如图 2 所示。可以看出, 4 条地震动记录的频谱分布特征各异, 其中 CHBH10 波幅值相

对较小、具有丰富的低频成分, CHBH14 高频成分相对丰富、低频成分频谱强度很小, 而 IBRH07、IBRH10 频率成分相对均匀且幅值较大。

表 1 各土体的物理参数  
Table 1 Physical parameters of soils

土类	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	剪切波速 $V_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	土层厚度 $h/\text{m}$
砂土	1.8	250	30
粉土	1.9	280	30
卵砾石	2.0	330	30
黏土	1.9	300	30
粉质黏土	2.0	350	30
淤泥质土	1.8	150	30
基岩	2.5	500	30

表 2 输入地震动的基本参数  
Table 2 Basic parameters of input ground motion

地震波	震级	分量	$A_{\max}/g$	$V_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	采样率/Hz
CHBH10	9.0	EW	0.0369	0.1421	200
IBRH10	9.0	NS	0.0977	0.1247	200
IBRH07	9.0	EW	0.1241	0.1005	200
CHBH14	4.6	NS	0.0433	0.0144	200

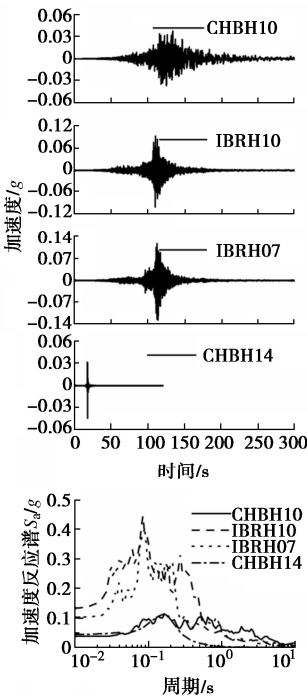


图 2 输入地震动加速度时程曲线和反应谱曲线  
Fig. 2 Time-history curves of acceleration and spectral acceleration of input ground motion

3 计算结果对比分析

地表峰值加速度 PGA、峰值速度 PGV 以及相应

表 3 地表峰值加速度 PGA 和 PGA 放大系数

Table 3 Peak ground accelerations and their magnification coefficients

土类	PGA/g				PGA 放大系数			
	CHBH10	IBRH10	IBRH07	CHBH14	CHBH10	IBRH10	IBRH07	CHBH14
砂土	0.0646	0.1308	0.1504	0.0586	1.7168	1.3132	1.1897	1.3267
粉土	0.0553	0.1113	0.1374	0.0535	1.4690	1.1177	1.0870	1.2114
卵砾土	0.0487	0.1066	0.1415	0.0517	1.2943	1.0708	1.1196	1.1713
黏土	0.0507	0.1064	0.1288	0.0522	1.3486	1.0688	1.0193	1.1815
粉质黏土	0.0456	0.1022	0.1365	0.0482	1.2122	1.0259	1.0799	1.0915
淤泥质土	0.0469	0.0852	0.1045	0.0476	1.2473	0.8559	0.8263	1.0786

表 4 地表峰值速度 PGV 和 PGV 放大系数

Table 4 Peak ground velocities and their magnification coefficients

土类	PGV/(m·s <sup>-1</sup> )				PGV 放大系数			
	CHBH10	IBRH10	IBRH07	CHBH14	CHBH10	IBRH10	IBRH07	CHBH14
砂土	0.1515	0.1313	0.1109	0.0200	1.0663	1.0524	1.1035	1.3897
粉土	0.1492	0.1278	0.1095	0.0184	1.0503	1.0246	1.0895	1.2746
卵砾土	0.1464	0.1253	0.1108	0.0178	1.0303	1.0048	1.1027	1.2365
黏土	0.1477	0.1269	0.1104	0.0180	1.0398	1.0175	1.0982	1.2462
粉质黏土	0.1456	0.1245	0.1092	0.0172	1.0251	0.9978	1.0863	1.1942
淤泥质土	0.1653	0.1446	0.1016	0.0176	1.1633	1.1591	1.0108	1.2233

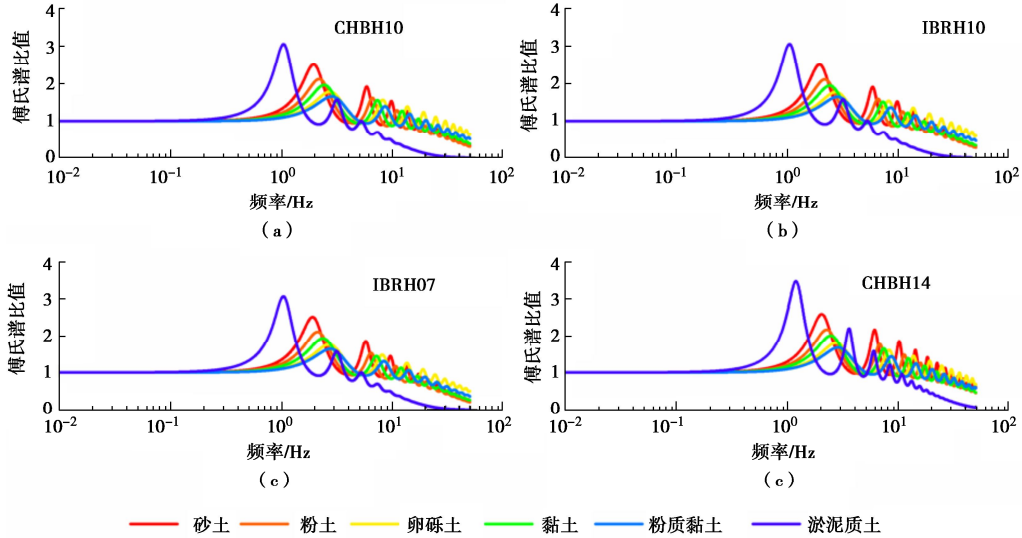


图 3 不同地震动输入下的傅氏谱比值曲线

Fig. 3 Fourier spectral ratios under different ground motion inputs

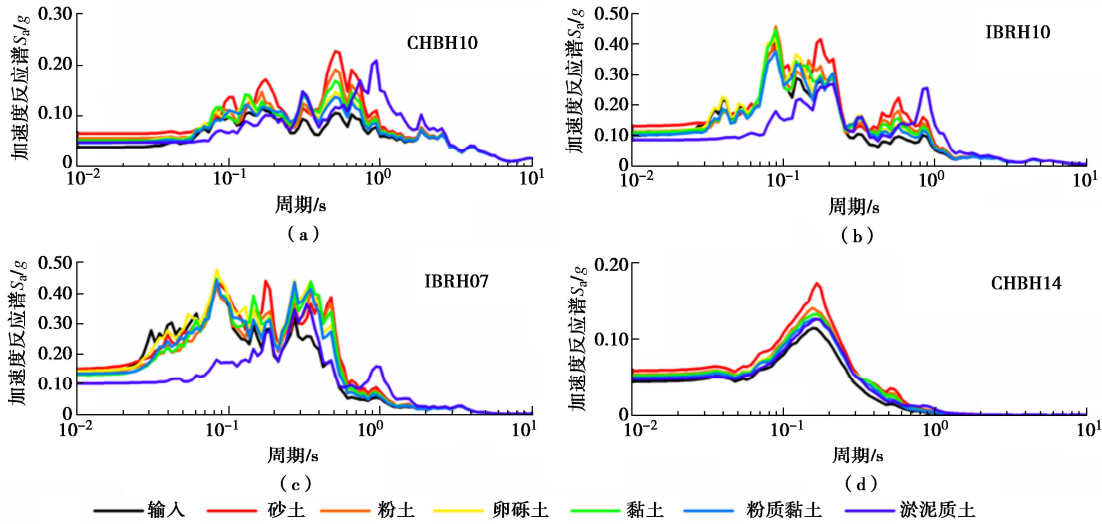


图 4 不同地震动输入下的加速度反应谱曲线

Fig. 4 Response spectra of acceleration under different ground motion inputs

的放大系数, 是有效评估不同土体对地震动强度影响的关键参数。与此同时, 傅氏谱比值和加速度反应谱则能直观展示各土体对地震动频谱的放大效应。在考察四种不同地震动输入条件下, 通过综合分析上述关键参数, 能够全面阐明土体的非线性特性对场地地震反应的影响。

表 3, 4 分别为 4 种不同地震动输入条件下, 6 种土体的场地地表峰值加速度 PGA、地表峰值速度 PGV 以及各自对应的放大系数; 图 3, 4 为 4 种不同地震动输入条件下, 各土体傅氏谱比值曲线和 5% 阻尼比下的加速度反应谱曲线。

### 3.1 地表峰值加速度和加速度放大系数

不同土体对地震动强度的影响表现出不同的特点。总体而言, 非黏性土的峰值加速度大于黏性土。在大多数工况下, 计算得到的放大系数均大于 1, 且随着输入强度的增加, 放大系数减小。在 4 种地震动输入条件下, 砂土模型计算得到的地表峰值加速度和放大系数均为最大, 如 CHBH10 时砂土放大系数分别为 1.72; 而淤泥质土的地表峰值加速度最小, 放大系数也最小, IBRH10 和 IBRH07 输入下淤泥质土的放大系数为 0.86, 0.83, 表现出对地震反应的抑制作用。

总体上, 强震输入下各种土体表现出明显的非线性特征。黏性土对高频地震动的能量耗散要强于非黏性土。土层对地震动的放大效应是动剪切模量比和阻尼比共同作用下的综合表现, 并且还受输入地震动的强度和频谱分布影响。不同的土体其动剪切模量比和阻尼比组合状态使得土体地震动放大效应表现出不同的特点, 根据计算分析结果: 动剪切模量比和阻尼比都较小的砂土对峰值加速度的放大效应最为显著; 动剪切模量比很小、阻尼比很大的淤泥质土对峰值加速度的抑制效应最为显著; 动剪切模量比很大、阻尼比很小的卵砾土对峰值加速度的放大效应随输入地震动强度的增大而增大特点明显。

### 3.2 地表峰值速度和速度放大系数

观察表 4 中数据发现, 相比于对加速度的放大作用, 各土体对速度放大作用略小。4 种地震动输入下, 所有工况的速度峰值放大系数范围为 1.00~1.39, 因此各土体地表速度峰值数值相近。整体上对比, 砂土和粉土的放大系数最大, 粉质黏土放大系数最小, 甚至在 IBRH10 输入下放大系数小于 1。淤泥质土的放大系数受地震动输入影响较大。在 CHBH10 和 IBRH10 输入下, 淤泥质土放大系数最大, 均为 1.16; 而在 IBRH07 和 CHBH14 输入下, 淤泥质土的放大系数为 6 种土体中最小, 分别为 1.01, 1.22。

综上, 在土层反应中, 动剪切模量比和阻尼比两个参数相互关联, 共同影响土层反应结果。不同土体

的地震反应分析得到的地表峰值加速度、峰值速度以及对应的放大系数有显著差异, 同时输入地震动强度对场地地震反应也有着重要的影响作用。如 CHBH10 的峰值加速度最小, 但峰值速度最大, 因此各类土的峰值加速度放大系数明显高于其它地震动输入, 而各类土的峰值速度的放大系数则明显低于其它地震动输入, 表现出输入地震动各成分振动强度对放大效应的明显影响; 而 CHBH14 的峰值加速度较小, 峰值速度最小, 各类土的峰值速度的放大系数则明显高于其它地震动输入。

### 3.3 傅氏谱比值分析

从傅氏谱幅值比值图中的曲线趋势可以看出不同土体对地震动的频率响应存在显著差异。各类土体对输入地震动的响应强弱依次排列为淤泥质土、砂土、粉土、黏土、卵砾土和粉质黏土, 其谱比峰值逐渐降低, 峰值对应的频率也逐渐右移。谱比曲线上的一系列极值是与土体各阶自振周期相对应的, 反映了共振效应对地震动的影响。总体上, 随着频率的提高, 相应的谱比值呈现逐步降低的趋势, 这反映了不同频率地震动耗能效应的特点和规律, 即频率越高的地震动成分其耗能效果越显著。每条谱比曲线都有多个极值, 这对应了土体不同阶自振周期的放大效应。阻尼比最小的卵砾土在高频成分的谱比明显高于其它土类的, 相应的阻尼比最大的淤泥质土在高频部分的谱比则显著的低于其它土类的, 反映出不同土类的耗能特点。

### 3.4 加速度反应谱分析

各个土体在不同周期段对地震动加速度反应谱具有不同的放大效应。整体上观察, 所有土体对谱值反应强弱排序为砂土、粉土、黏土、卵砾土、粉质黏土、淤泥质土, 砂土对反应谱值放大作用最明显, 并且在 0.2 s 时更加突出。除去淤泥质土, 剩余的 5 种土体在 0.3~1 s 有明显的放大作用, 对长周期地震动放大作用不明显。同时发现, 所有土体对长周期部分 (>2 s) 都没有明显的放大作用。对于动剪切模量比很小、阻尼比很大的淤泥质土, 短周期成分的滤波效应和较长周期成分的放大效应非常显著; 砂土对中等以及短周期成分的地震动放大效应显著, 尤其是中等周期成分最为显著; 卵砾石对于短周期成分地震动的放大效应显著, 对于中等和长周期成分也有一定的放大效应。

## 4 讨论与结论

(1) 不同土类受其组成材料和排列结构等各方面因素的影响, 并非完全遵循剪切模量比越大阻尼比就越小的规律, 其动剪切模量比和阻尼比曲线分布特征不尽相同。总体上, 黏性土的阻尼比要大于非黏性土的, 各类土的动力参数曲线分布相比较虽各有特点,

但却没有明显的分布规律。

(2) 不同土类在不同输入地震动条件下, 低频成分的场地放大系数相对高, 高频成分的场地放大系数相对低。对于不同的土类, 土层与基岩的剪切模量比越小, 低频的场地放大系数越大, 阻尼比越大高频的场地放大系数越小。如动剪切模量比很小和阻尼比很大的淤泥质土, 低频放大效应和高频的滤波效应非常显著。

(3) 在地震区划图的场地分类中, 场地的地震动放大系数仅根据土体的等效剪切波速(与动剪切模量相关)和深度进行分档, 并综合考虑了土体软硬程度。然而, 并未明确的从土体阻尼比的角度考虑地震动放大系数。根据本文的统计分析结果, 总体上黏性土的阻尼比要大于非黏性土的, 因此对于以黏性土为主的土层, 放大系数可以适当降低, 以非黏性土为主的土层, 放大系数可以适当提高。

#### 参考文献:

- [1] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 150-151. (CHEN Guoxing. Geotechnical Earthquake Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2007: 150-151. in Chinese))
- [2] 袁晓铭, 孙 锐, 孙 静, 等. 常规土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4): 133-139. (YUAN Xiaoming, SUN Rui, SUN Jing, et al. Laboratory experimental study on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of soils[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(4): 133-139. (in Chinese))
- [3] 陈国兴, 刘雪珠, 朱定华, 等. 南京新近沉积土动剪切模量比与阻尼比的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 1023-1027. (CHEN Guoxing, LIU Xuezh, ZHU Dinghua, et al. Experimental studies on dynamic shear modulus ratio and damping ratio of recently deposited soils in Nanjing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 1023-1027. (in Chinese))
- [4] 陈国兴, 卜屹凡, 周正龙, 等. 沉积相和深度对第四纪土动剪切模量和阻尼比的影响[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1344-1350. (CHEN Guoxing, BU Yifan, ZHOU Zhenglong, et al. Influence of sedimentary facies and depth on normalized dynamic shear modulus and damping ratio of quaternary soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1344-1350. (in Chinese))
- [5] 孔宇阳, 廉 超, 李井冈, 等. 武汉地区典型土类动力非线性参数的统计分析[J]. 地震工程学报, 2014, 36(4): 832-837. (KONG Yuyang, LIAN Chao, LI Jinggang, et al. Statistical analysis of dynamic nonlinear parameters of typical soils in Wuhan area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(4): 832-837. (in Chinese))
- [6] 李建有, 太树刚, 林凤仙, 等. 昆明盆地粉质黏土土动力参数研究[J]. 震灾防御技术, 2015, 10(4): 872-883. (LI Jianyou, TAI Shugang, LIN Fengxian, et al. Research on dynamic parameters of silty clay in the Kunming Basin[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2015, 10(4): 872-883. (in Chinese))
- [7] 宋前进, 程 磊, 贺为民. 豫东平原粉质黏土动剪切模量与阻尼比试验研究[J]. 地震工程学报, 2020, 42(4): 1013-1018. (SONG Qianjin, CHENG Lei, HE Weimin. Experimental study of the dynamic shear modulus and damping ratio of silty clay on eastern Henan Plain[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4): 1013-1018. (in Chinese))
- [8] 孙 锐, 陈红娟, 袁晓铭. 土的非线性动剪切模量比和阻尼比不确定性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1228-1235. (SUN Rui, CHEN Hongjuan, YUAN Xiaoming. Uncertainty of non-linear dynamic shear modular ratio and damping ratio of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1228-1235. (in Chinese))
- [9] 钟紫蓝, 史跃波, 李锦强, 等. 考虑土体动力特征参数相关性的工程场地随机地震反应分析[J]. 岩土力学, 2022, 43(7): 2015-2024, 2033. (ZHONG Zilan, SHI Yuebo, LI Jinqiang, et al. Stochastic seismic response analysis of engineering site considering correlations of critical soil dynamic parameters[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(7): 2015-2024, 2033. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)