

梁师俊,陆吉赟,石树中.沉积相和地质年代对第四纪土动力学参数的影响[J].地震工程学报,2019,41(3):702-709.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.702

LIANG Shijun, LU Jiyun, SHI Shuzhong. Influence of Sedimentary Facies and Geological Time on Kinetic Parameters of Quaternary Soil[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(3): 702-709. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.702

沉积相和地质年代对第四纪土动力学参数的影响

梁师俊¹, 陆吉赟², 石树中²

(1. 浙江建设职业技术学院,浙江 杭州 311231; 2. 浙江省地震局,浙江 杭州 310000)

摘要:依据收集的嘉兴地区原状土样实测数据,研究土的沉积环境和地质年代对土的动剪切模量比和动阻尼比的影响及土的塑性指数分布规律。结果表明沉积相和地质年代对嘉兴第四纪土层的 $G/G_{\max}-\gamma$ 、 $\lambda-\gamma$ 有明显影响。沉积相相同时,地质年代越新,动剪切模量比越大、动阻尼比越小;地质年代相同时,冲湖相沉积土的动剪切模量比最大、动阻尼比最小。最后给出嘉兴地区不同沉积相和地质年代土层的动剪切模量比、动阻尼比推荐值,并分别利用推荐值和实测值基于 FLAC^{3D}进行了土层动力响应分析,从反应谱形状、地表峰值加速度、峰值速度和特征周期等方面验证推荐值的适用性,可供工程参考应用。

关键词:第四纪土层; 动剪切模量比; 阻尼比; 沉积相; 地质年代

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)03-0702-09

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.03.702

Influence of Sedimentary Facies and Geological Time on Kinetic Parameters of Quaternary Soil

LIANG Shijun¹, LU Jiyun², SHI Shuzhong²

(1.Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, Zhejiang, China;
2.Earthquake Agency of Zhejiang Province, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: To gain a better understanding of the deformation behavior of Jiaxing Quaternary sedimentary soils, we collected total 34 undisturbed soil samples. The analysis results revealed that the variation characteristics of the normalized dynamic shear modulus ratio (G/G_{\max}) and damping ratio (λ) with increasing shear strain (γ) are strongly influenced by the sedimentary facies and geological time. For the same sedimentary facies, the more recent the geological time, the larger is the dynamic shear modulus ratio and the smaller is the dynamic damping ratio. For the same geological time, we found the dynamic shear modulus ratio of the alluvial-lacustrine deposit to be largest, and the dynamic damping ratio the smallest. Moreover, we suggest recommended values for the dynamic shear modulus ratios and dynamic damping ratios of soils of different sedimentary facies and geological time in Jiaxing area. Furthermore, we used FLAC^{3D} modelling software to perform a dynamic response analysis of the soils at one typical engineering site using the recommended and measured values and verified the applicability of the recommended values. These study results can be used as reference in the seismic risk assessments of engineering pro-

jects.

Keywords: Quaternary soil; dynamic shear modulus ratio; damping ratio; sedimentary facies; geological time

0 引言

土的动剪切模量比和阻尼比受地质年代、沉积环境、塑性指数、土的类型、含水率、土层埋深、围压、循环加载模式等因素影响,呈现出极强的差异性和非线性特性,是工程场地地震反应分析的基本参数。工程界和理论界高度重视,对其进行了大量的研究,如袁晓明等^[1]、战吉艳等^[2]、陈国兴等^[3]、王炳辉等^[4]、尚守平等^[5]及史丙新等^[6]分析了土的类型、土层深度对土的动剪切模量比和阻尼比的影响,给出了黏土、粉质黏土、粉土等常规土类不同埋深动剪切模量比和阻尼比与剪应变的推荐值;陈国兴等^[7]研究了沉积相对土的动剪切模量比和阻尼比的影响,总结了不同土类在不同沉积相和土层埋深下土层动剪切模量比和阻尼比与剪应变的推荐值;另外,吕悦军等^[8]、王志杰等^[9]、孙田等^[10]、张效龙等^[11]还研究了黄土、海底土、滩涂土等特殊类土的动剪切模量比和阻尼比的变化规律。

目前针对土的动剪切模量比和阻尼比变化规律的研究基本上都是基于土层深度和土类进行的,而土的性质除了受到土类、埋深影响外,还与地质年代、沉积环境密切相关。因此,仅从土的类别、土层深度分析土的动剪切模量比和阻尼比的变化规律,还不足以工程场地地震反应分析提供可靠的的动力稳定性分析参数。基于此,本文根据收集的嘉兴市典型钻孔第四纪地层的土样动三轴试验结果,分析了沉积相、地质年代对该区域动剪切模量比和阻尼比的影响,给出了基于沉积相、地质年代的动剪切模量比和阻尼比推荐值,并选取标准钻孔,构建了

FLAC^{3D}平台的场地分析模型,分别以基于沉积相和地质年代的动剪切模量比和阻尼比推荐值和实测值进行了非线性场地地震反应分析。

1 试验数据收集

嘉兴市地处长江三角洲冲海积平原地区,地层成因复杂,区内第四系为一套河流冲积及河湖相、滨海相松散沉积物,覆盖层厚度可达 200 m 左右,第四系土层的形成和结构与长江三角洲的发育、江海变迁、气候等自然变化有着密切的联系,具有层序复杂、相变剧烈、厚度较大的特点。根据勘探孔资料,土层自上而下分别为:填土、粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉质黏土、粉质黏土夹粉土、砂质粉土夹粉质黏土、粉砂、粉质黏土、粉质黏土夹砂质粉土。

试验土样取自嘉兴市科技城近 30 km² 范围,共计 34 个原状土样。从地质年代分, Q_4^3 试样有 2 个、 Q_4^2 试样有 2 个、 Q_4^1 试样有 4 个、 Q_3^2 试样有 8 个、 Q_3^1 试样有 8 个、 Q_2^2 试样有 2 个、 Q_2^1 试样有 6 个、 Q_1 试样有 2 个;从沉积相分,冲湖相(al-l)试样有 20 个、冲洪相(al-pl)试样有 4 个、冲海相(al-m)试样有 4 个、海相(m)试样有 6 个。

2 试验结果与分析

影响 $G/G_{\max}-\gamma-\lambda-\gamma$ 的土质性质主要有孔隙比 e 、塑性指数 I_P 、沉积年代等,其中塑性指数 I_P 是最主要因素^[12-14]。

2.1 塑性指数分布规律

图 1 为试验土样塑性指数与深度、土类、沉积相

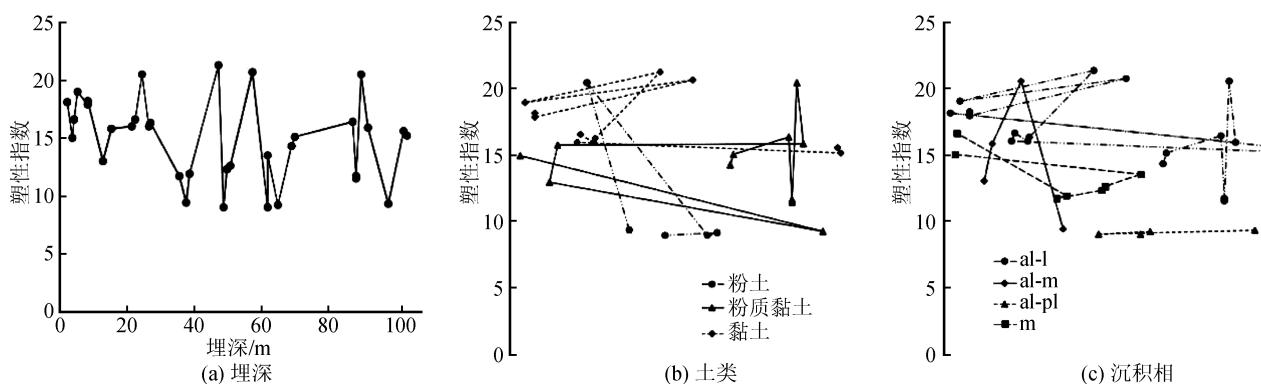


图 1 塑性指数分布情况

Fig.1 Distribution of plasticity index

关系。从图中可以看出,塑性指数与土层埋深没有显示出任何相关性。塑性指数与土类则显示出较大的相关性,区域分布最广的三种土类(黏土、粉质黏土、粉土)中,黏土的塑性指数最大(介于15~25之间)、粉质黏土次之(介于10~15之间)、粉土最小(一般小于10)。从沉积相看,塑性指数与沉积相也

表现出较大的相关性,冲洪相(al-pl)沉积土塑性指数最小,冲湖相(al-l)沉积土塑性指数最大、冲海相(al-m)和海相(m)沉积土居中。

2.2 埋深对动参数的影响

依试样埋深,选取粉质黏土、黏土、粉土三类土,其 $G/G_{\max}-\gamma$ 、 $\lambda-\gamma$ 曲线如图2所示。

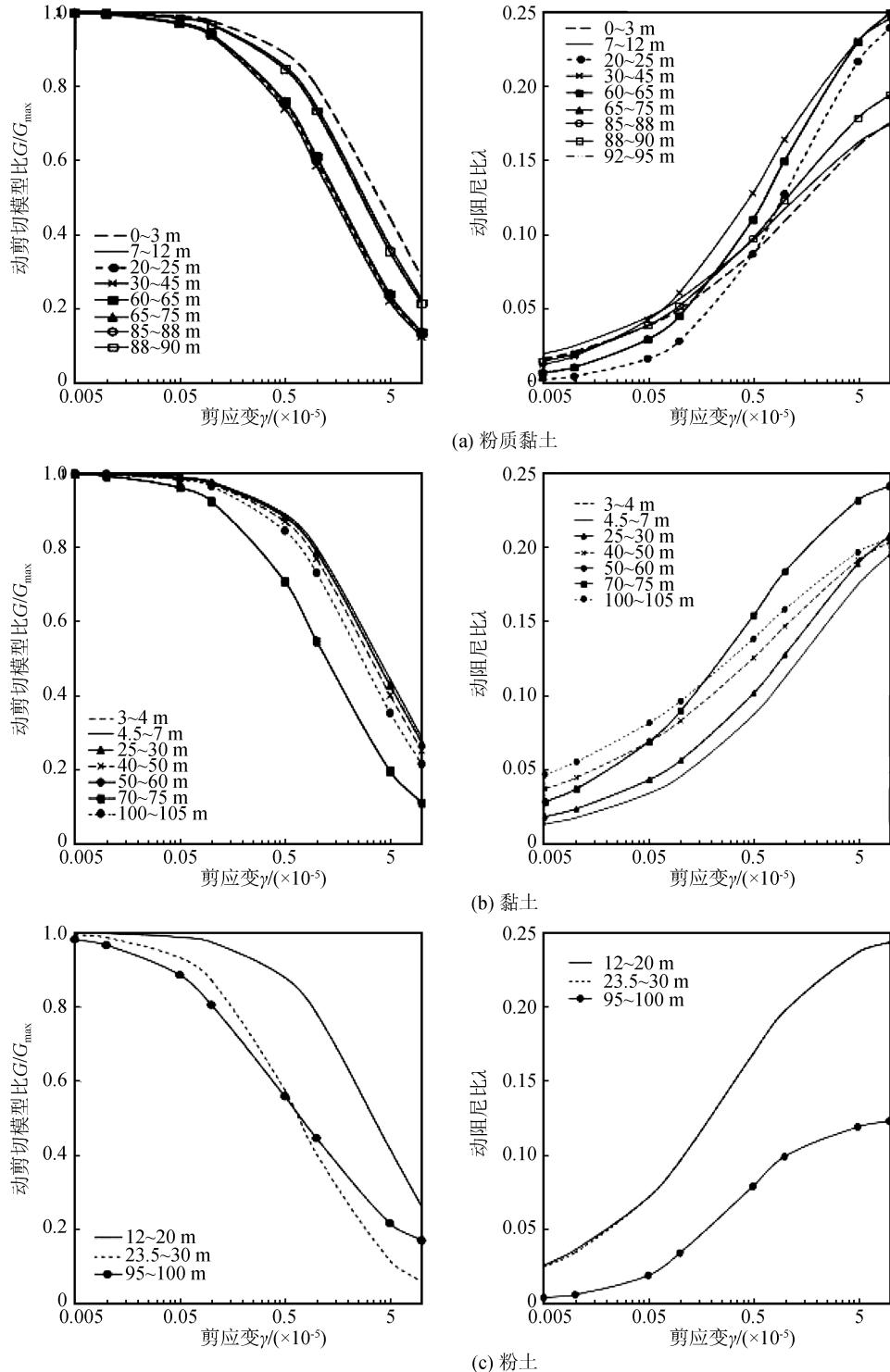


图2 不同深度土的动模量阻尼比关系曲线

Fig.2 Influence of soil depth on G/G_{\max} , γ , $\lambda-\gamma$ curves

从图 2 可以看出, 随着埋深的加大, 一定程度上, $G/G_{\max}-\gamma$ 、 $\lambda-\gamma$ 的衰减逐渐变慢, 但不管是黏土、粉质黏土还是粉土, 埋深与 $G/G_{\max}-\gamma$ 、 $\lambda-\gamma$ 均未显示出明显相关性。

2.3 地质年代对动参数的影响

为探讨地质年代对土动剪切模量比和阻尼比的

影响, 按冲湖相(al-l)、冲海相(al-m)、海相(m)、冲洪相(al-pl)绘制不同地质年代土 $G/G_{\max}-\gamma$ 、 $\lambda-\gamma$ 关系曲线(图 3)。

从图 3 不同地质年代土 $G/G_{\max}-\gamma$ 、 $\lambda-\gamma$ 关系曲线可见, 地质年代对土的动剪切模量比(G/G_{\max})、阻尼比(λ)具有明显的影响, 土层沉积相相同时, 地

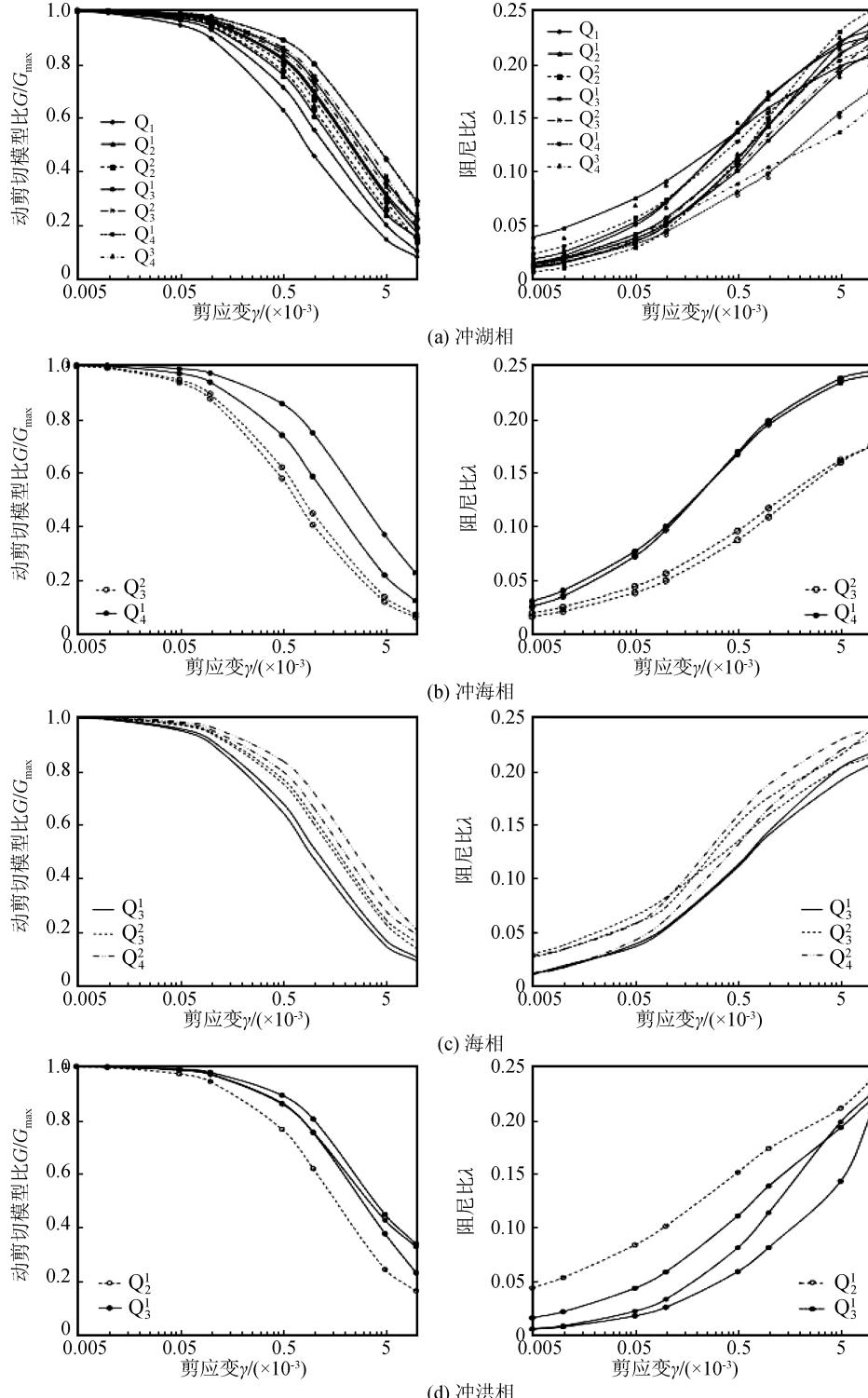


图 3 不同地质年代土的动剪切模量比和阻尼比关系曲线

Fig.3 Influence of soil geologic time on $G/G_{\max}-\gamma$, $\lambda-\gamma$ curves

质年代越新,动剪切模量比(G/G_{\max})越大,动阻尼比(λ)越小;且地质年代越新,不管是动剪切模量比(G/G_{\max})还是阻尼比(λ)其离散性基本上越大。表明地质年代越新,土层非线性特性越明显,受应变累计效应影响大,其动力特性不均匀性也越大。

2.4 沉积相对动参数的影响

为研究沉积相对土动剪切模量比和阻尼比的影响,按下全新统(Q_4^1)、上更新统(Q_3^2)、下更新统(Q_3^1)绘制不同沉积相土层的 $G/G_{\max}-\gamma-\lambda-\gamma$ 关系(图4)。

由图4可以看出,在下全新统(Q_4^1)形成的沉积土中,冲湖相(al-1)沉积土较冲海相(al-m)沉积

土动剪切模量比 G/G_{\max} 大,而动阻尼比 λ 较小。在上更新统(Q_3^2)形成的沉积土中,冲湖相沉积土动剪切模量比 G/G_{\max} 最大、海相沉积土次之、冲海相沉积土最小;动阻尼比 λ 则表现为冲海相沉积土最大、海相沉积土次之、冲湖相沉积土最小。在下更新统(Q_3^1)形成的沉积土中,海相形成的动剪切模量比 G/G_{\max} 最小、冲洪相与冲湖相类似,但冲洪相离散性更大;动阻尼比 λ 海相最大、冲湖相与冲洪相混杂。

从上分析可知,地质年代相同时,冲海相沉积土的动剪切模量比 G/G_{\max} 值较小、海相次之、冲湖相

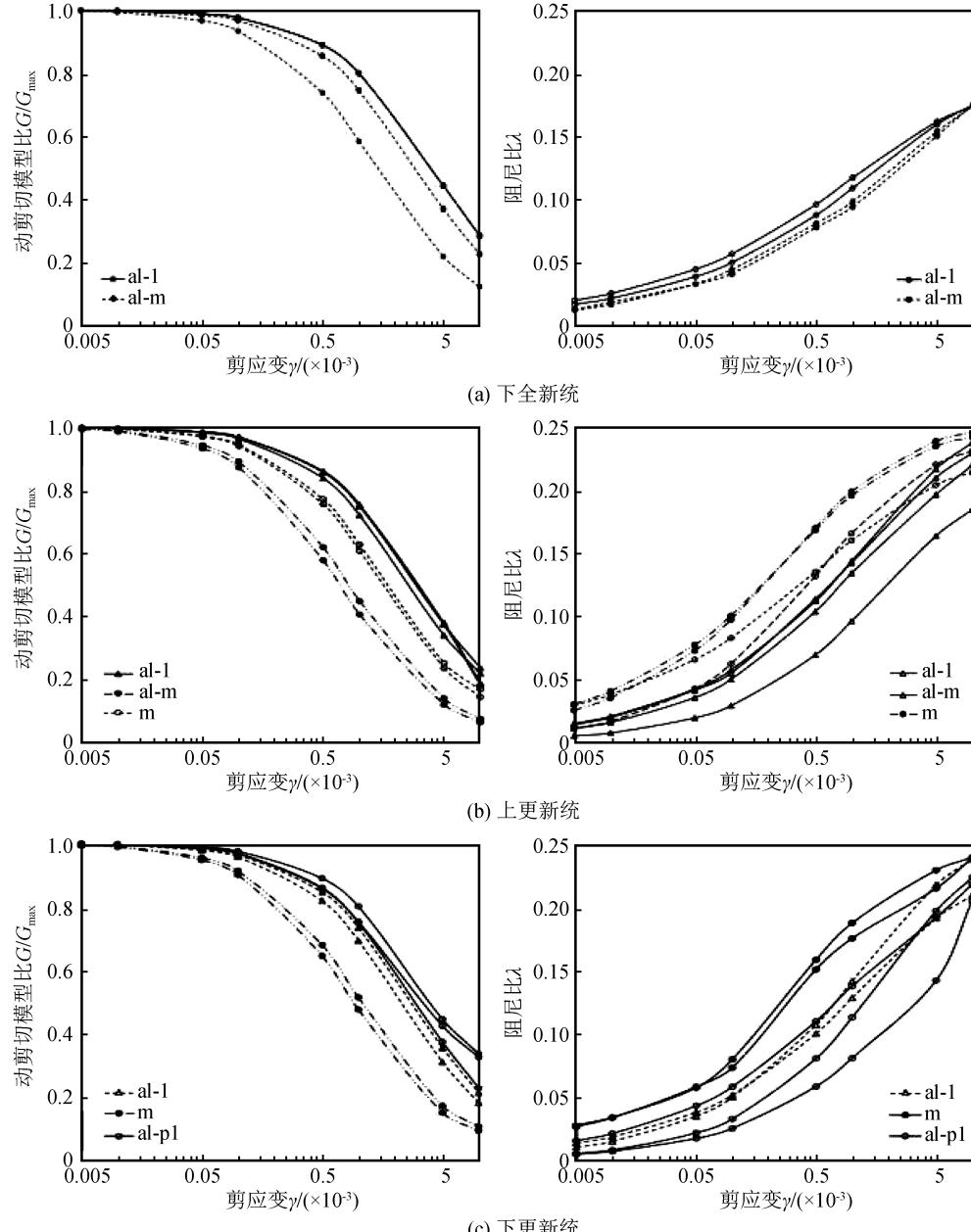


图4 不同沉积相土的动模量阻尼比关系曲线

Fig.4 Influence of soil sedimentary facies on $G/G_{\max}-\gamma-\lambda-\gamma$ curves

(冲洪相)较大, 动阻尼比 λ 值则显示为冲海相较大、海相次之、冲湖相(冲洪相)较小。表明地质年代相同时, 冲湖相(冲洪相)沉积土非线性特性最为明显, 受应变累计效应影响大; 但冲洪相沉积土动力特性不均匀性较冲湖相大。

2.5 嘉兴地区动模量阻尼比推荐使用值

可以看出, 不同地质年代、不同沉积相土层的塑

性指数差异导致嘉兴市不同地质年代、不同沉积环境土层的 $G/G_{\max}-\gamma$ 、 $\lambda-\gamma$ 曲线变化规律。因此, 基于地质年代和沉积环境来分析嘉兴市土层 $G/G_{\max}-\gamma$ 、 $\lambda-\gamma$ 曲线更加符合区域实际。为更好地提供土地规划利用和工程设计所需的土动力学参数, 表 1 根据试验结果并根据 $G/G_{\max}-\gamma$ 、 $\lambda-\gamma$ 经验关系, 给出了应变范围 $5 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-3}$ 的 $G/G_{\max}, \lambda$ 推荐值。

表 1 土动力学参数推荐值

Table 1 Recommended values of the soil dynamic parameters

地质年代	沉积相	动力参数	剪应变 $\gamma (\times 10^{-3})$							
			0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	1	5	10
Q_1^3	al-l	G/G_{\max}	0.998 7	0.997 5	0.987 3	0.975 0	0.886 2	0.795 6	0.437 7	0.280 2
		λ	0.032 4	0.038 8	0.059 1	0.070 7	0.105 4	0.123 1	0.160 8	0.171 6
Q_1^2	m	G/G_{\max}	0.997 8	0.995 6	0.978 2	0.957 3	0.817 9	0.692 4	0.311 8	0.115 1
		λ	0.021 3	0.028 0	0.052 7	0.069 0	0.121 6	0.147 3	0.191 9	0.201 8
Q_1^1	al-l	G/G_{\max}	0.998 8	0.997 5	0.987 7	0.975 6	0.888 7	0.799 5	0.443 8	0.285 1
		λ	0.014 2	0.018 7	0.035 6	0.046 9	0.086 7	0.110 1	0.166 8	0.184 8
	m	G/G_{\max}	0.997 4	0.994 8	0.974 4	0.950 3	0.795 9	0.665 0	0.294 5	0.174 9
		λ	0.016 1	0.021 6	0.043 5	0.058 7	0.111 9	0.140 5	0.196 2	0.209 8
Q_2^3	al-l	G/G_{\max}	0.998 3	0.996 6	0.983 0	0.966 5	0.852 3	0.742 7	0.366 4	0.187 3
		λ	0.018 0	0.023 1	0.042 2	0.055 2	0.101 7	0.128 5	0.188 0	0.206 7
	al-m	G/G_{\max}	0.993 3	0.986 7	0.936 9	0.881 2	0.597 9	0.426 7	0.129 8	0.069 5
		λ	0.028 1	0.037 9	0.074 7	0.098 5	0.168 1	0.196 3	0.235 6	0.242 6
Q_2^2	m	G/G_{\max}	0.996 9	0.993 8	0.969 8	0.941 5	0.762 9	0.616 7	0.243 6	0.155 9
		λ	0.020 5	0.027 3	0.054 0	0.072 2	0.132 9	0.162 2	0.211 1	0.221 3
	al-l	G/G_{\max}	0.998 0	0.996 0	0.980 5	0.961 8	0.834 2	0.715 9	0.335 9	0.202 1
		λ	0.012 1	0.016 9	0.036 6	0.050 7	0.103 7	0.135 0	0.204 4	0.223 4
Q_2^1	m	G/G_{\max}	0.995 0	0.990 0	0.951 9	0.908 2	0.664 7	0.498 0	0.165 8	0.115 4
		λ	0.027 1	0.036 4	0.055 6	0.080 8	0.156 6	0.190 4	0.228 8	0.282 1
	al-pl	G/G_{\max}	0.998 2	0.996 3	0.982 0	0.964 7	0.846 8	0.736 5	0.367 1	0.196 1
		λ	0.008 7	0.012 3	0.027 5	0.038 8	0.083 0	0.110 5	0.176 9	0.194 1
Q_3^2	al-l	G/G_{\max}	0.997 3	0.994 6	0.973 4	0.948 1	0.785 1	0.646 4	0.268 2	0.140 1
		λ	0.015 2	0.020 7	0.043 3	0.059 5	0.118 9	0.152 0	0.216 1	0.231 4
Q_3^1	al-l	G/G_{\max}	0.997 1	0.994 2	0.971 8	0.945 2	0.775 8	0.634 2	0.258 7	0.138 8
		λ	0.023 5	0.030 6	0.056 5	0.073 5	0.129 4	0.157 5	0.208 4	0.219 9
	al-pl	G/G_{\max}	0.996 9	0.993 9	0.970 1	0.942	0.764 6	0.618 9	0.245 1	0.165 8
		λ	0.043 3	0.052 8	0.083 1	0.100 6	0.150 3	0.172 5	0.209 8	0.236 4
Q_1^1	al-l	G/G_{\max}	0.995 0	0.990 0	0.952 2	0.908 9	0.668 0	0.503 1	0.170 1	0.087 9
		λ	0.014 7	0.020 7	0.045 9	0.063 8	0.125 4	0.156 3	0.211 8	0.224 5

3 数据采用与地震时程反应分析

为说明嘉兴市土动力学参数推荐值的适用性和合理性, 根据实测值、推荐值对实际钻孔基于 FLAC^{3D}采用一维剪切波理论分别进行非线性土层地震动力反应分析。

3.1 场地计算参数

选取覆盖土层深度超过 100 m 的实测 9 号钻孔为计算场地, 场地地质情况和剪切波速随深度变化情况如图 5 所示。

场地土层地震反应模型的模型参数, 如土层分层, 岩性描述、土层密度、深度和厚度、剪切波速等,

采用现场勘察和实际测试数据, 体积模量 K 和剪切模量 G 由式(1)确定。

$$\begin{cases} K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \\ G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{c_s^2}{\rho} \end{cases} \quad (1)$$

式中: c_s 为剪切波速; ρ 为土体密度; ν 为土体泊松比。

3.2 输入地震动的确定

以地震危险性分析得到的基岩峰值加速度和反应谱作为目标函数, 按照 50 年超越概率分别为 2%、10%、63% 三种水准, 结合适应地区地震活动特

征的强度包络函数,采用时域迭加和反应谱整体逼近相结合的方法合成基岩地震动时程,作为场地土层地震动反应分析的基岩输入地震动时程,不同概率水准的输入地震加速度反应谱如图 6 所示。

3.3 动力反应模型设置

根据场地地质情况和剪切波速分布图,确定地面以下 100.6 m 深度处作为基岩地震动输入界面,模型水平方向网格长度均设为 1 m,纵向网格长度综合考虑地质分层和剪切波速分层结果,设为 0.5 m,水平方向均取为 1 个单元格。

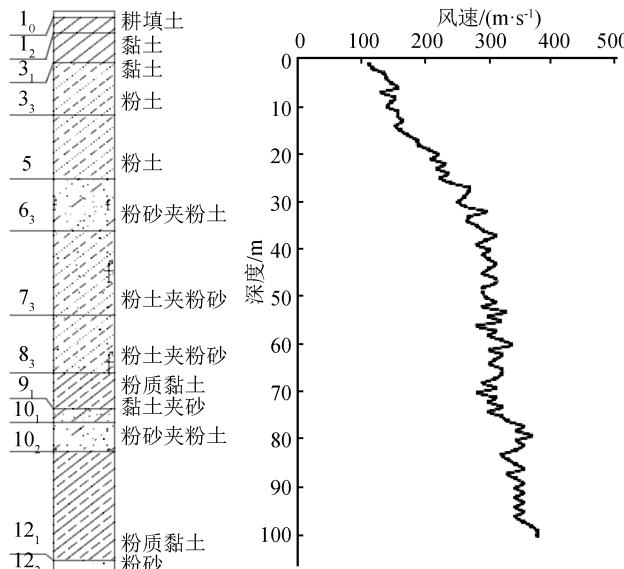


图 5 地质分布及剪切波速分布情况

Fig.5 Soil layer profile and distribution of shear wave velocity

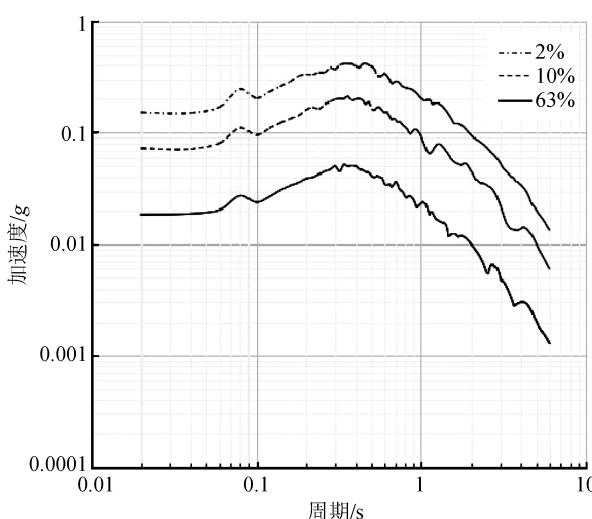


图 6 不同概率水准的基岩输入地震动加速度反应谱

Fig.6 Acceleration response spectrum on bedrock at different exceeding probabilities

模型侧边设置自由场边界条件,底面设置安静边界条件。各土层均施加滞后阻尼,阻尼值由 Hardin-Drnevich 方程拟合动剪切模量衰减曲线得到。

3.4 计算结果分析

根据实测值及推荐值的土动力参数下地面加速度反应谱曲线如图 7 所示,加速度峰值、速度峰值、特征周期列于表 2。

从图 7 可以看出,3 种概率水准下,根据实测值和推荐值计算的反应谱曲线均差别不大,在高频部分(>1 s)和低频部分(<0.1 s),推荐值计算的反应

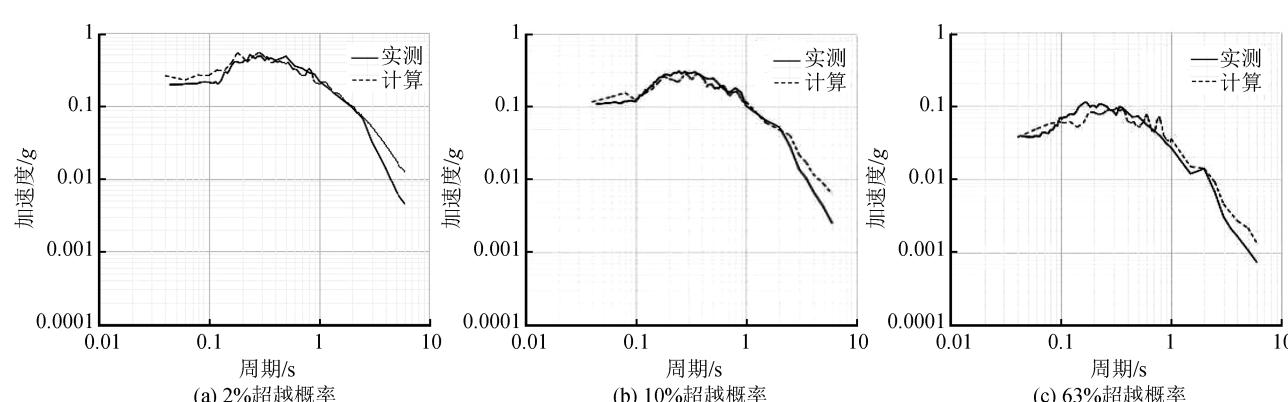


图 7 不同动力参数取值的地面加速度反应谱

Fig.7 Acceleration response spectra at surface with different dynamic parameters

表 2 不同动力参数取值的地面峰值加速度、峰值速度及特征周期

Table 2 Surface peak acceleration, peak velocity, and characteristic period with different soil dynamic parameters

概率水准	峰值加速度/(cm·s⁻²)		峰值速度/(cm·s⁻¹)		特征周期/s	
	实测值	推荐值	实测值	推荐值	实测值	推荐值
2%	166.4	167.0	10.1	10.3	0.53	0.54
10%	71.1	71.7	6.9	6.9	0.43	0.42
63%	24.0	24.5	2.0	2.2	0.37	0.39

谱值均要大于实测值计算结果;在 0.1~1 s 间两者计算结果接近。

从表 2 可以看出,由推荐值计算的地面峰值加速度、峰值速度、特征周期均与采用实测值计算结果接近,峰值加速度的最大偏差率 2.1%、峰值速度最大偏差率 10%、特征周期最大偏差率 5.4%,推荐值表现出良好的适用性,可以用于嘉兴地区土层动力反应分析。

4 结论

利用收集到的土动力参数实测数据,分析了嘉兴第四纪地层土动剪切模量比和动阻尼比的变化规律,得出如下主要结论:

(1) 土层埋深对嘉兴第四纪地层土动剪切模量比和动阻尼比没有明显影响。

(2) 沉积相对嘉兴第四纪地层土动剪切模量比和动阻尼比有较大影响。对于地质年代相同的土,冲湖湘沉积土动剪切模量比(G/G_{\max})最大,动阻尼比(λ)最小。

(3) 地质年代对嘉兴第四纪地层土动剪切模量比和动阻尼比有明显影响。对于沉积相相同的土,地质年代越新,动剪切模量比(G/G_{\max})越大,动阻尼比(λ)越小。

(4) 土的塑性指数与沉积相具有较大的相关性,冲湖相(al-1)沉积土塑性指数大,冲海相(al-m)沉积土塑性指数小。

(5) 根据沉积相和地质年代关系,给出了嘉兴第四纪地层土动剪切模量比和动阻尼比推荐值,可供工程实际应用。

参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 戚吉艳,陈国兴,杨伟林,等.苏州第四纪沉积土动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(3):559-566.
ZHAN Jiyan, CHEN Guoxing, YANG Weilin, et al. Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Suzhou Quaternary Sedimentary Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3): 559-566.
- [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 Xuezhu, 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.
- [4] 王炳辉,陈国兴,胡庆兴,等.南京细砂动剪切模量和阻尼比的试验研究[J].世界地震工程,2010,26(3):7-15.
WANG Binghui, CHEN Guoxing, HU Qingxing, et al. Experiment of Dynamic Shear Modulus and Damping of Nanjing Fine Sand[J]. World Earthquake Engineering, 2010, 26(3): 7-15.
- [5] 尚守平,卢华喜,任慧,等.粉质黏土动剪切模量的试验对比研究[J].岩土工程学报,2006,28(3):410-414.
SHANG Shouping, LU Huaxi, REN Hui, et al. Comparative Study on Dynamic Shear Modulus of Silty Clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(3): 410-414.
- [6] 史丙新,张力方,吕悦军,等.天津滨海场地土动力学参数研究[J].震灾防御技术,2010,5(3):288-298.
SHI Bingxin, ZHANG Lifang, LÜ Yuejun, et al. Research on Dynamic Parameters of Soil Site in Tianjin Coastal Area[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2010, 5(3): 288-298.
- [7] 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.
- [8] 吕悦军,唐荣余,沙海军,渤海海底土类动剪切模量比和阻尼比试验研究[J].防灾减灾工程学报,2003,23(2):35-42.
LÜ Yuejun, TANG Rongyu, SHA Haijun. Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of the Soils of Bohai Seafloor[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(2): 35-42.
- [9] 王志杰,骆亚生,王瑞瑞,等.不同地区原状黄土动剪切模量与阻尼比试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(9):1464-1469.
WANG Zhijie, LUO Yasheng, WANG Ruirui, et al. Experimental Study on Dynamic Shear Modulus and Damping Ratio of Undisturbed Loess in Different Regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1464-1469.
- [10] 孙田,陈国兴,周恩全,等.深层海床粉质黏土动剪切模量和阻尼比试验研究[J].土木工程学报,2012,45(增刊 1):9-14.
SUN Tian, CHEN Guoxing, ZHOU Enquan, et al. Experimental Research on the Dynamic Shear Modulus and the Damping Ratio of Deep-Seabed Marine Silty Clay[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(Suppl): 9-14.
- [11] 张效龙,金永德,孙永福,等.天津滨海滩涂土动剪切模量比和动阻尼比试验[J].海洋地质动态,2005,21(10):27-30.
ZHANG Xiaolong, JIN Yongde, SUN Yongfu, et al. Experimental Study on Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of the Soils from Tianjin Inshore Areas[J]. Marine Geology Letters, 2005, 21(10): 27-30. (下转第 723 页)

- Sinica,2013,29(5):1841-1845.
- [11] 徐佩芬,李世豪,凌甦群,等.利用 SPAC 法估算地壳 S 波速度结构[J].地球物理学报,2013,56(11):3846-3854.
XU Peifen, LI Shihao, LING Suqun, et al. Application of SPAC Method to Estimate the Crustal S-wave Velocity Structure[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3846-3854.
- [12] 魏运浩,李井冈,姚运生.微动台阵法探测地下结构的实验研究[J].大地测量与地球动力学,2015,35(1):167-171.
WEI Yunhao, LI Jinggang, YAO Yunsheng, et al. Experimental Study on Detecting the Subsurface Structure Using Microtremor Array Survey Method[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(1): 167-171.
- [13] 吴立.江汉平原中全新世古洪水事件环境考古研究[D].南京:南京大学,2013.
WU Li. Environmental Archaeology of the Mid-Holocene Palaeofloods in the Jianghan Plain, Central China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [14] AKI K. Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors [J]. Bull. Earthq. Res. Inst., 1957, 35: 415-456.
- [15] 李传金,徐佩芬,凌甦群.微动勘探法圆形阵列台站数量和分布方式研究[J].科学技术与工程,2016,16(7):27-30,46.
LI Chuanjin, XU Peifen, LING Suqun. Study on Staton Number and Arrangement of Circle Array in Mircotremor survey Method[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16 (7): 27-30, 46.
- [16] 孙勇军,徐佩芬,凌甦群,等.微动勘查方法及其研究进展[J].地球物理学进展,2009,24(1):326-334.
SUNYongjun, XU Peifen, LING Suqun, et al. Microtremor Survey Method and Its Progress[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 326-334.
- [17] 付微,徐佩芬,凌苏群,等.微动勘探方法在地热勘查中的应用[J].上海国土资源,2012,(3):71-75.
FU Wei, XU Peifen, LING Suqun, et al. Application of the Microtremor Survey Method to Geothermal Exploration [J]. Shanghai Land & Resources, 2012, (3): 71-75.
- [18] 王秋良,胡思辉,李长安.周老镇钻孔砾石层重矿物特征及地质意义[J].中国地质,2009,36(4):878-884.
WANG Qiuliang HU Sihui, LI Chang'an. Heavy Mineral Characteristics of Gravel Layers in the Zhoulao Town Borehole[J]. Geology in China, 2009, 36(4): 878-884.

(上接第 709 页)

- [12] 陈国兴,谢君斐,张克绪.土的动模量和阻尼比的经验估计[J].地震工程与工程振动,1995,15(1):73-84.
CHEN Guoxing, XIE Junfei, ZHANG Kexu. The Empirical Evaluation of Soil Moduli and Damping Ratio for Dynamic Analysis[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1995, 15(1): 73-84.
- [13] HARDIN B O, DRNEVICH V P. Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects[J]. Journal of Terramechanics, 1973, 9(2): 102.
- [14] VUCETIC M, DOBRY R. Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 117 (1): 89-107.