2021 年 第21 卷 第35 期
2021, 21(35): 15167-10

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:乔 峰, 薄景山, 常晁瑜, 等. 柳州地区红土的工程特性和地震反应特性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 15167-15176.
Qiao Feng, Bo Jingshan, Chang Chaoyu, et al. Analysis of engineering characteristics and seismic response characteristics of laterite in Liuzhou area[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(35): 15167-15176.

建筑科学

柳州地区红土的工程特性和地震反应特性分析

乔 峰[1,2], 薄景山[1,2,3*], 常晁瑜[1,2,3], 王 亮[4], 韩 昕[5], 黄 鑫[1]

(1. 防灾科技学院地质工程学院, 三河 065201; 2. 河北省地震灾害防御与风险评价重点实验室, 三河 065201;
3. 中国地震局工程力学研究所, 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 哈尔滨 150080;
4. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710077; 5. 甘肃省地震局, 兰州 730000)

摘 要 红土由于其特殊的物质组成和形成环境以及特殊的结构,通常会表现出不同于一般土的工程特征和动力学特性。通过总结前人研究成果,利用数值模拟的方法研究了柳州地区红土的工程特性、动力学特性以及地震反应特性。结果表明:①除液性指数外,各项物理性质指标的变异系数较小,较为稳定,各项力学性质的变异系数较大,较为离散;②柳州地区红土各项物理力学性质间相关性存在相关性进其中天然含水量、孔隙比、密度三者之间存在较为显著的相关性;③通过统计分析,给出了柳州地区红土土层剪切波速与埋深间相关系的推荐拟合模型,经过验证误差小于5%;④通过 SOILQUAKE 程序分析了不同动力学参数与实测值的差异,给出了建议值。这一工作对从事红土研究的工作者具有一定价值。

关键词 红土; 物理力学性质; 动力学特性; 地震反应特性
中图法分类号 TU311.3; **文献标志码** A

Analysis of Engineering Characteristics and Seismic Response Characteristics of Laterite in Liuzhou Area

QIAO Feng[1,2], BO Jing-shan[1,2,3*], CHANG Chao-yu[1,2,3], WANG Liang[4], HAN Xin[5], HUANG Xin[1]

(1. Institute of Disaster Prevention, Institute of Geological Engineering, Sanhe 065201, China;
2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Disaster Prevention and Risk Assessment, Sanhe 065201, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China;
4. Xi'an Research Institute of China Coal Research Institute, Xi'an 710077, China; 5. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, China)

[**Abstract**] Due to its special material composition, formation environment and special structure, red soil usually exhibits engineering characteristics and dynamic characteristics different from ordinary soil. By summarizing the previous research results, the engineering characteristics, dynamic characteristics and seismic response characteristics of red soil in Liuzhou area were studied by numerical simulation methods. The results show that: Except for the liquidity index, the coefficient of variation of each physical property index is small and relatively stable, and the coefficient of variation of each mechanical property is large and relatively discrete. The physical and mechanical properties of red soil in Liuzhou area. There is a correlation between the natural water content, void ratio, and density. Through statistical analysis, this chapter gives the relationship between the shear wave velocity and the buried depth of the red soil in the Liuzhou area. The recommended fitting model of the related system has a verified error of less than 5%. The difference between the different kinetic parameters and the measured value is analyzed through the SOILQUAKE program, and the recommended value is given. This work is of certain value to workers engaged in red soil research.

[**Keywords**] laterite; physical and mechanical properties; dynamic characteristics; seismic response characteristics

红土是一种区域性特殊土,是红黏土的简称。红土土层厚度一般为 5 ~ 8 m,很少超过 10 m,具有高含水量、大孔隙比、高液塑限等物理性质,它具有与一般黏土不同的力学性质,具有较高的强度和较低的压缩性。红土是碳酸盐类岩石经风化而形成的残坡积土,按成因可分为原生红土和次生红土。

收稿日期: 2021-04-07; **修订日期**: 2021-08-25
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助计划(ZY20180208)
第一作者: 乔 峰(1990—),男,汉族,天津人,博士研究生,讲师。研究方向:特殊土动力学。E-mail:qiaofengCT@163.com。
* **通信作者**: 薄景山(1957—),男,汉族,吉林通榆人,研究员,博士研究生导师。研究方向:岩土地震工程。E-mail:bojingshan@163.com。

据统计,中国红土分布面积约为 100 万 km^2,主要分布在西南、中南地区,以云贵地区红土最为典型和广泛[1-2]。在红土覆盖地区的天然竖向剖面上,常常出现随着土层深度的增加,天然含水量、孔隙比等物理性质逐渐增大,强度等力学性质逐步变差,土体状态由硬变软的“反剖面”现象[3-4]。红土这种特殊的“反剖面”现象,对红土地区场地稳定性存在影响。廖义玲等[1-2]以西南地区红土为例,详细描述了红土的“反剖面”特征,同时认为红土特殊的成土条件是形成上硬下软现象的主要原因。红土地区存在许多边坡,对于红土边坡稳定性的研究起步较晚,进入 21 世纪后,此类研究越来越受到学术界和工程界的关注。方薇[5]以残积红土路堑边坡的稳定性为研究对象,进行室内试验研究,研究救过表明,降雨对红土边坡稳定性的影响较大;同时提出,红土边坡稳定性分析应选取抗剪强度为评价指标。刘忠[6]利用 GeoStudio 软件对红土边坡地震稳定性进行分析,研究结果表明,随着地震烈度的增大,坡顶和坡角的最大水平位移开始变大,边坡稳定系数则逐渐变小,同时指出降雨对边坡的地震稳定性存在影响。

云贵地区位于中国南北地震带的南部地区,地震活动比较强烈,地震地质灾害严重[7]。近些年,云贵地区经济建设快速发展,工程建设大规模兴起。当红土作为地基时,存在一定的工程隐患。宏观及微观结构进行了详细的描述。赵颖文等[8-9]对广西红土进行研究,发现红土的涨缩性主要与干密度和击实后的含水量有关,含水量越低、土体越密实,红黏土的膨胀性越强。阳卫红[10]利用室内动静三轴试验机对南昌地区红土的动强度进行研究,发现地区内红土的动强度与固结比成反比,与固结压力成正比,同时发现地区内红土的动内摩擦角与固结比成正比,动黏聚力与固结比成反比。冯钰洁等[11]利用自制的大型单剪仪对海口红黏土重塑土样进行了不同含水率条件下的大型单剪试验,试验结果表明,红黏土的抗剪强度随含水率的增加而降低,其中,单剪抗剪强度较直剪低 4% ~6%。陈学军等[12]研究木质素对红黏土物理力学特性的影响,结果表明,红黏土的液塑限和 pH 随着木质素掺量的增加而增大。

红土一般都有裂隙发育,会造成地基不均匀沉降,基础结构因而发生破坏,同时地表水易由裂隙侵入土体,引起土体软化,进而造成更大的损失。由于红土特殊的土层结构和在高烈度区广泛分布[13],因此研究红土的工程特性和动力特性具有重要意义。

红土由于其成因、物质组成不尽相同且分布广泛,多项物理力学性质指标变化幅度较大,因此不同地区红土之间应存在差异。现选取广西壮族自治区的柳州地区红土为研究对象。

收集整理柳州地区实测钻孔资料,通过对钻孔数据的分类整理,并利用 Statistical Product and Service Solutions(SPSS)软件,分析柳州地区红土的物理性质和动力学特性,同时建立两种不同的红土土层模型,研究不同地震动强度和动力学参数条件下,设计反应谱的特征参数和峰值加速度的差异,通过对比分析给出本文中建议值。研究成果对进一步开展红土场地地震反应特性的研究工作有一定的参考意义。

根据钻孔资料,柳州地区内红土的主要特征如下:棕红色-褐黄色,均质,可塑-硬塑状。土质均匀,切面光滑,干强度及韧性高,含少量铁锰质结核。

1 常规物理力学指标的统计

1.1 物理力学性质指标概况

对柳州地区红土各项物理力学性质进行分类统计分析,整理结果列于表 1 和表 2。

在统计学中,常用变异系数表示一组数据的离散程度,通常变异系数越大,说明数据离散程度越大;反之,变异系数越小,表明数据的离散程度越小。从表 1 中可以发现,除液性指数外,柳州地区红土其余各项物理性质指标值的变异系数均在 0.10 左右,较为稳定,其中密度的变异系数最小,为 0.05;液性指数的变异系数为 0.62,较为离散;力学性质指标值的变异系数较之物理性质指标值的变异系数,明显偏大,这可能与力学性质指标的影响因素更多、更复杂有关。其中压缩模量和黏聚力的变异系数在 0.60 左右,相对较为离散,内摩擦角的变异系数为 0.41,较为稳定。

表 1 物理力学性质汇总表

Table 1 Summary table of physical and mechanical properties

参数	最大值	最小值	平均值	变异系数
天然含水量 ω/%	73.20	25.40	45.55	0.10
孔隙比 e	2.13	0.68	1.36	0.12
密度 ρ/(g·cm^{-3})	2.00	1.54	1.74	0.05
液限 ω_L/%	90.00	30.70	66.14	0.15
塑限 ω_P/%	56.00	17.20	37.66	0.12
液性指数 I_L	0.73	0.05	0.42	0.62
塑性指数 I_P	39.20	8.10	28.74	0.18
压缩模量 E_S/MPa	29.20	2.10	11.49	0.59
黏聚力 c/kPa	88.60	10.63	48.08	0.62
内摩擦角 φ/(°)	81.60	1.50	24.13	0.41

在统计学中,相关系数 r 常用来表示两个变量之间的相关性,它的取值范围是[-1,1],当$|r|\to 1$,说明两个变量之间的相关性越强;当$|r|\to 0$,说明两个变量之间的相关性越弱。按相关系数的取值范围,可以将两个变量的相关程度分为四种情况[14]:当$|r|\in[0.8,1]$时,说明两个变量之间高度相关;当$|r|\in[0.5.0.8)$时,说明两个变量之间中度相关;$|r|\in[0.3.0.5)$时,说明两个变量之间低度相关;$|r|\in[0.0.3)$时,说明两个变量之间相关性较弱,可以视为不相关。

表2为根据统计资料给出的柳州地区红土物理力学性质指标间的相关系数,根据相关系数的分类标准对柳州地区红土各项物理力学指标间相关性进行分类研究,发现天然含水量、孔隙比、密度、液限、塑限5项指标之间存在较为显著的相关性,其中天然含水量、孔隙比、密度三者之间的相关系数的绝对值均在0.95以上,属于高度相关;塑性指数与天然含水量、孔隙比、密度、液限、塑限之间存在中度以上的相关性;液限和塑限之间的相关系数为0.804,属于高度相关。其余情况下,各项物理力学指标间的相关系数均在0.5以下,属于低度相关,甚至不相关。

1.2　各项物理力学性质间相关性分析

在实际数据统计中,可能存在试验条件突然变化,试验人员操作不当,试验仪器性能不稳定等问题或其他原因,可能会出现异常数据使得统计数据中可能存在异常值。异常值会对数据分析结果造成不利影响,因此,在统计之前必须剔除数据中可能存在的异常值[15]。在统计学中,经常用显著性检验的方法来判断一组数据中是否存在异常值。通常采用下述方法确定小概率事件,并视为异常值。本文中利用正态分布的 2σ 原则对柳州地区红土的各项物理力学指标值进行筛选,剔除其中存在的异常值。筛选结果列于表3,本文中以筛选后的统计数为样本统计各物理力学性质指标的关系。

基于相关系数分类标准,对柳州地区红土各项物理力学指标间的相关性进行了区分。同时,针对相关系数取值为0.5~1或-1~-0.5,具有中高程度相关性的变量,在剔除异常值后进行回归拟合分析,研究分析了不同指标之间的相关性并给出统计回归公式。利用SPSS软件对比多种回归方程的拟合优度,选取其中回归拟合效果最好的回归方程作为相应物理力学指标间相关性的推荐拟合模型,当几个拟合方程的拟合优度相近时,按照“拟合优度相差不大的条件下,优先选取参数较少且形式较为简单的模型”的原则进行筛选,相关统计结果列于表4。

一元回归方程显著性检验通常有3种方法,一是利用散点图的线性分布;二是利用两个回归量的相关系数;三是利用精确的数学方法进行假设检验,包括线性关系的检验(F 检验)和回归系数的检验(t 检验)两种[14,16],F 检验和 t 检验是等价的,比如,自变量和因变量之间存在线性关系的话,二者之间的回归系数也必然不会等于0。本文中利用 F 检验来对回归方程进行显著性检验。

表2　物理力学性质指标相关性列表

Table 2　Correlation coefficient table of physical and mechanical properties index

指标	e	ρ	ω_L	ω_P	I_L	I_P	E_S	c	φ
ω	0.993	-0.949	0.774	0.798	0.167	0.785	-0.324	-0.070	-0.209
e		-0.977	0.792	0.790	0.175	0.783	-0.262	-0.046	-0.187
ρ			-0.797	-0.772	-0.126	-0.782	0.370	0.024	0.127
ω_L				0.804	-0.289	0.848	-0.060	-0.056	-0.159
ω_P					-0.364	0.707	-0.065	-0.034	-0.153
I_L						-0.127	-0.235	-0.180	-0.131
I_P							-0.013	-0.066	-0.129
E_S								0.139	0.111
c									0.378

表3　物理力学性质指标异常值列表

Table 3　Screening list of abnormal values of physical and mechanical properties

指标	ω	e	ρ	ω_L	ω_P	I_L	I_P	E_S	c	φ
样本数	246	246	246	246	246	246	246	166	171	171
异常值	10	9	7	3	8	9	8	7	5	8
统计数	236	237	239	243	238	237	238	159	166	163

F 检验共分 3 步:①提出假设,假设两个指标之间不相关;②计算统计量 F;③给出显著性水平 α,根据分子自由度为 1,分母自由度为 $n-2$ 查 F 分布表得到 F_α,若 $F>F_\alpha(1,n-2)$,则拒绝原假设,即认为两个指标之间相关;若 $F<F_\alpha(1,n-2)$,则不拒绝原假设,即认为两个指标之间不相关。

本文中显著性水平 α 分别为 0.05、0.01 和 0.001 的条件下,对表 4 中各拟合公式进行假设检验,计算各拟合公式的 F,并与 F 分布表中相应 F_α 进行对比,结果表明表 4 中各项物理力学性质指标之间均存在相关性,详见表 5。

在统计学中,当 $F>F_\alpha(1,n-2)$ 时,可以认为拟合公式回归效果显著[17]。当 $\alpha=0.05$,认为回归效果较为显著;当 $\alpha=0.01$ 时,认为回归效果显著;当 $\alpha=0.001$ 时,认为回归效果极为显著。利用上述方法对表4中各拟合公式的回归效果进行检验,结果表明本文中给出的各拟合公式的 F 均大于 $F_{0.001}$,回归效果显著。

对比各项拟合公式的拟合优度和统计量,发现二者之间是呈正比的关系,拟合优度越趋近于 1,统计量越大。

2 动剪切模量比和阻尼比

对柳州地区红土的动剪切模量比 G/G_{max} 和阻尼比 λ 的实测数据进行整理分析,统计出地区内红土动剪切模量比和阻尼比的最大、最小平均值,详见表6。

表 7 为柳州地区红土动剪切模量比和阻尼比数据中异常值列表,剔除可能存在的异常值后,利用 SPSS 软件对柳州地区红土动剪切模量比和阻尼比随剪应变 γ 变化规律进行回归拟合,所得结果见表 8。

表 4 指标间相关性分析列表

Table 4 Analysis of the correlation between indicators

序号	回归模型	拟合优度
1	$e=0.033\ 1\omega-0.285\ 9$	0.99
2	$\rho=-0.010\ 2\omega+2.245\ 4$	0.98
3	$\omega_L=-0.020\ 1\omega^2+3.136\ 1\omega-38.198$	0.72
4	$\omega_P=-0.005\ 8\omega^2+1.275\ 7\omega-10.711$	0.71
5	$I_P=-0.014\ 6\omega^2+1.924\ 9\omega-29.654$	0.72
6	$\rho=-0.304\ 2e+2.154\ 3$	0.97
7	$\omega_L=-17.112e^2+79.461e-8.590\ 8$	0.73
8	$\omega_P=-4.093\ 9e^2+31.598e+2.717\ 4$	0.70
9	$I_P=-14.136e^2+52.412e-15.048$	0.71
10	$\omega_L=-75.513\rho^2+157.36\rho+21.81$	0.74
11	$\omega_P=0.714\ 8\rho^2-69.496\rho+156.54$	0.71
12	$I_P=-91.839\rho^2+276.54\rho-173.52$	0.72
13	$\omega_P=0.547\ 6\omega_L+1.445\ 5$	0.78
14	$I_P=-0.003\ 3{\omega_L}^2+0.815\omega_L-10.191$	0.82
15	$I_P=-0.013{\omega_P}^2+1.455\omega_P-6.949\ 4$	0.53

表 5 物理力学性质间相关性检验

Table 5 Correlation test results between physical and mechanical properties

序号	指标	样本数	F	F_α		
				$\alpha=0.05$	$\alpha=0.01$	$\alpha=0.001$
1	e-ω	237	970.24	3.88	6.74	11.10
2	ρ-ω	239	760.97	3.88	6.74	11.10
3	ω_L-ω	236	42.67	3.88	6.74	11.11
4	ω_P-ω	234	17.22	3.88	6.75	11.11
5	I_P-ω	235	60.02	3.88	6.74	11.11
6	ρ-e	235	841.81	3.88	6.74	11.11
7	ω_L-e	238	27.99	3.88	6.74	11.10
8	ω_P-e	236	14.19	3.88	6.74	11.11
9	I_P-e	237	45.37	3.88	6.74	11.10
10	ω_L-ρ	236	50.74	3.88	6.74	11.11
11	ω_P-ρ	232	30.28	3.88	6.75	11.11
12	I_P-ρ	233	65.29	3.88	6.75	11.11
13	ω_L-ω_P	235	167.82	3.88	6.74	11.11
14	I_P-ω_L	239	460.32	3.88	6.74	11.10
15	I_P-ω_P	236	78.56	3.88	6.74	11.11

表 6 动剪切模量比和阻尼比范围值

Table 6 Dynamic shear modulus ratio and damping ratio range

项目	参数	不同剪应变(10^{-4})下参数值						
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
最大值	G/G_{max}	0.999 0	0.998 0	0.989 0	0.977 0	0.896 0	0.812 0	0.463 0	0.301 0
	λ	0.025 2	0.034 9	0.071 8	0.093 6	0.159 6	0.185 5	0.235 0	0.254 0
最小值	G/G_{max}	0.980 0	0.960 0	0.825 0	0.710 0	0.320 0	0.200 0	0.049 3	0.025 0
	λ	0.000 2	0.000 5	0.002 8	0.005 8	0.026 7	0.045 7	0.074 0	0.075 4
平均值	G/G_{max}	0.993 4	0.986 5	0.937 2	0.884 4	0.635 4	0.487 8	0.186 3	0.108 3
	λ	0.011 7	0.015 0	0.029 7	0.041 1	0.082 7	0.104 6	0.145 3	0.155 5

表 7 动剪切模量比和阻尼比异常值列表

Table 7 Abnormal value table of dynamic shear modulus ratio and damping ratio

样本数	异常值	统计数
180	6	174

表 8 动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化的相关性列表

Table 8 Correlation table of dynamic shear modulus ratio and damping and shear strain

回归模型	拟合优度
$G/G_{max}=-0.080\ 5(\lg\gamma)^2-0.872\ 6\lg\gamma-1.365$	0.92
$\gamma=-0.011\ 3(\lg\gamma)^2+0.128\ 1\lg\gamma+0.366\ 8$	0.89

表 9　动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化的推荐值

Table 9　Recommended values of dynamic shear modulus ratio and damping ratio with shear strain

参数	不同剪应变(10^{-4})下参数值							
	0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
G/G_{max}	0.998 6	0.985 5	0.898 9	0.837 4	0.638 3	0.528 3	0.216 7	0.058 2
λ	0.005 3	0.008 8	0.024 9	0.035 2	0.067 1	0.084 2	0.131 9	0.155 8

通过计算,可以得到本文中关于柳州地区红土动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化的拟合推荐值,详见表 9。

3　剪切波速

剪切波速是土层地震反应分析的重要参数之一,同时也是场地划分的重要指标,不同的场地类别其设计反应谱的平台值和特征周期不同[18-19]。土的剪切波速一般是通过现场钻孔波速测试给出的。本文中整理地区内实测钻孔资料,统计给出柳州地区红土剪切波速和埋深的范围,详见表 10,并利用 SPSS 软件,拟合出二者之间相关性的最优模型。

表 10　剪切波速和埋深的范围列表

Table 10　The range of shear wave velocity and depth

深埋/m	剪切波速/($m \cdot s^{-1}$)			变异系数
	相关系数	范围	平均值	
1.0~31.0	0.81	189.0~384.0	287.81	0.12

由表 10 可以看出,柳州地区红土土层剪切波速变异系数为 0.12,较为稳定;剪切波速与埋深间相关系数为 0.81,属于高度相关。

3.1　拟合模型确定

对统计样本数据中异常值进行检测(表 11),剔除可能存在的异常值后,进一步分析柳州地区红土土层剪切波速 V_s 和埋深 H 间的相关性,利用 SPSS 软件,选取多个拟合方程对红土数据进行拟合分析,得到不同回归模型的拟合方程和拟合优度,详见表 12。

表 11　剪切波速异常值列表

Table 11　Shear wave velocity abnormal value table

样本数	异常值	统计数
246	8	238

表 12　拟合模型对比

Table 12　Comparison of fitted models

指标	线性模型	对数模型	二次函数模型	三次函数模型	幂指数函数	指数模型
拟合优度	0.803	0.771	0.804	0.810	0.813	0.753

如表 12 所示,幂指数模型拟合效果最好,故本文选取幂指数函数作为柳州地区红土土层剪切波速与埋深间相关性的推荐拟合模型,所得拟合公式为 $V_s = 215.93H^{0.1297}$,拟合优度为 0.813。

3.2　实例验证

为了验证本文中给出的推荐回归模型的精度和可靠性,故选取柳州地区某工程项目的两个实测钻孔资料为实例,来检验本节给出的推荐回归模型对剪切波速的预测结果,并给出各层相应的误差值,详见表 13。需要说明的是,文中只给出了柳州地区红土土层剪切波速 V_s 与埋深 H 间相关性的回归模型,故只选取实例钻孔中红土土层数据作为验证依据。

如表 13 和图 1 所示,对于柳州地区红土,本文中推荐模型给出的预测剪切波速与实测剪切波速间相差较小,误差均低于 5%。说明本文中的推荐模型在预测柳州地区红土剪切波速时效果较好,计算结果较为可靠,可以接受。

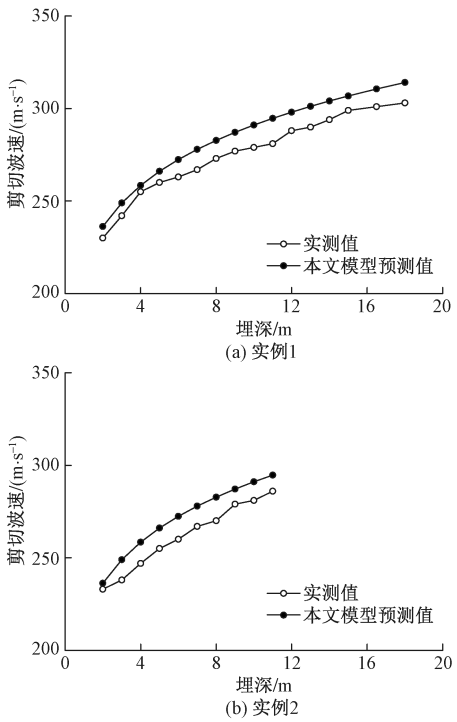

图 1　本文模型与实测数据对比图

Fig. 1　Comparison of the proposed model and measured data

表 13 剪切波速预测情况

Table 13 Shear wave velocity predicion

实例	埋深/m	土类	剪切波速/(m·s^{-1})	本文模型	
				预测值/(m·s^{-1})	误差/%
例 1	2.00	红土	230	236.2	2.7
	3.00	红土	242	249.0	2.9
	4.00	红土	255	258.5	1.4
	5.00	红土	260	266.1	2.3
	6.00	红土	263	272.4	3.6
	7.00	红土	267	277.9	4.1
	8.00	红土	273	282.8	3.6
	9.00	红土	277	287.1	3.7
	10.00	红土	279	291.1	4.3
	11.00	红土	281	294.7	4.9
	12.00	红土	288	298.0	3.5
	13.00	红土	290	301.2	3.8
	14.00	红土	294	304.1	3.4
	15.00	红土	299	306.8	2.6
	16.50	红土	301	310.6	3.2
	18.00	红土	303	314.1	3.7
例 2	2.00	红土	233	236.2	1.4
	3.00	红土	238	249.0	4.6
	4.00	红土	247	258.5	4.6
	5.00	红土	255	266.1	4.3
	6.00	红土	260	272.4	4.8
	7.00	红土	267	277.9	4.1
	8.00	红土	270	282.8	4.7
	9.00	红土	279	287.1	2.9
	10.00	红土	281	291.1	3.6
	11.00	红土	286	294.7	3.0

4 地震反应分析

4.1 单一均匀土层剖面

本文中建立一个单一红土土层模型,同时选择对 EL Centro 波进行调幅,将地震波的幅值调整至 0.05g、0.1g、0.2g 和 0.4g(地震波 A、B、C 和 D,g 为重力加速度),分别对应地震烈度为Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ和Ⅸ度地震强度的加速度时程,持时截取包含地震动较强的前 15 s,利用 SOILQUAKE 程序进行计算,定量分析出动剪切模量比、阻尼比、剪切波速对设计反应谱特征周期和平台值的影响程度。根据土层地震反应计算的需要,表 14 和表 15 给出了计算所需要的土层参数。

选取柳州地区红土动剪切模量比、阻尼比和剪切波速变化范围内由最大值到最小值依次等差变化的 7 组数值代替表 15 中的相应数值,进行计算,图 2 为动剪切模量比和阻尼比的分组示意图,表 16 为剪切波速的分组列表。

表 14 土层物理力学参数列表

Table 14 List of soil physical and mechanical parameters

参数	红土	基岩
埋深/m	10	
剪切波速/(m·s^{-1})	280	500
密度/(g·cm^{-3})	1.74	2.20

表 15 土层动剪切模量比和阻尼比列表

Table 15 List of dynamic shear modulus ratio and damping ratio

土类	参数	不同剪应变(10^{-4})下参数值							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
红土	G/G_{max}	0.998 6	0.985 5	0.898 9	0.837 4	0.638 3	0.528 3	0.216 7	0.058 2
	λ	0.005 3	0.008 8	0.024 9	0.035 2	0.067 1	0.084 2	0.131 9	0.155 8
基岩	G/G_{max}	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	λ	0.004 0	0.008 0	0.010 0	0.051 0	0.021 0	0.030 0	0.036 0	0.046 0

利用 SOILQUAKE 土层反应分析软件进行分组计算,时间步长选取 0.02 s,输入加速度峰值调幅为比例调幅的一半,计算所得的地震反应谱通过差分进化算法进行标定,最终得到设计反应谱特征周期 T_g 和平台值 β_{max},计算结果见图 3 ~ 图 5。

通过图 3 ~ 图 5,可以发现以下规律:当输入地震动强度一定时,红土设计反应谱的特征周期与动剪切模量比和剪切波速呈反比,而对阻尼比的变化反应不敏感,平台值方面,与动剪切模量比和剪切波速成正比,与阻尼比成反比;当地震动参数相同时,红土的特征参数与输入地震动强度是呈正比的关系,即强度越大,特征周期和平台值越大。

表 16 剪切波速分组列表

Table 16 List of special soil shear wave velocity grouping

分组	波速/(m·s^{-1})						
	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	第六组	第七组
红土	220	240	260	280	300	320	340

4.2 实际土层剖面

为了进一步开展黄土场地动力反应的研究,本文中选取了海原地区和柳州地区典型场地的实测钻孔资料,建立土层地震反应分析计算模型,表 17 和表 18 给出了计算所需要的土层参数。

表 17 土层物理力学指标列表

Table 17 List of soil physical and mechanical parameters

指标	素填土	红土	灰岩
土层厚度/m	3.2	14.8	
埋深/m	3.2	18	
剪切波速/(m·s^{-1})	255	329	645
密度/(g·cm^{-3})	1.80	1.75	2.40

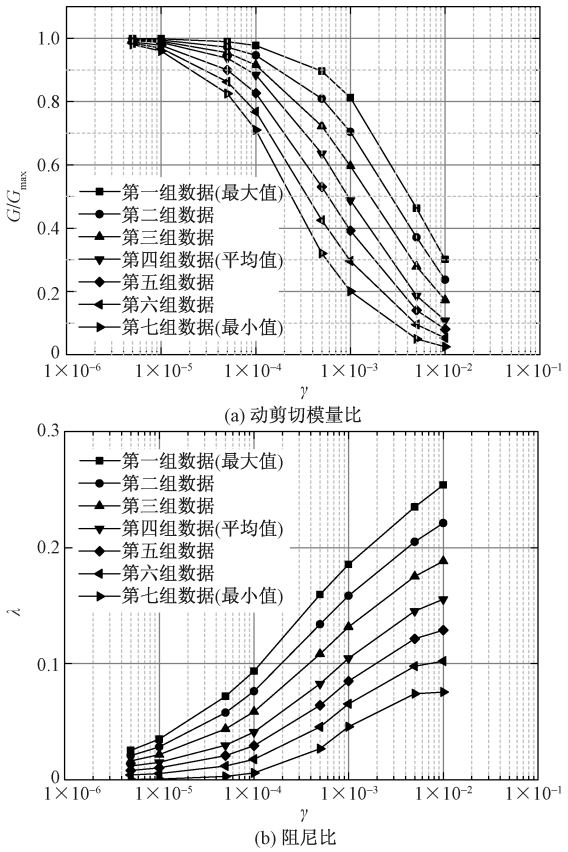

图 2　分组曲线

Fig. 2　Grouping curve

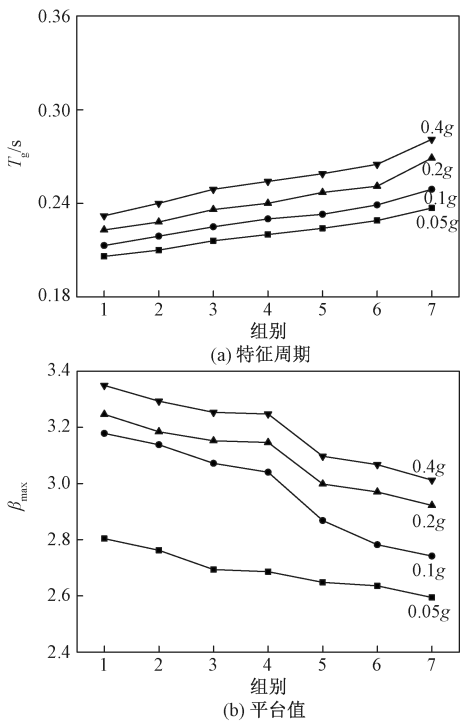

图 3　不同动剪切模量比条件下的特征周期和平台值

Fig. 3　Characteristic period and platform value for different dynamic shear modulus ratios

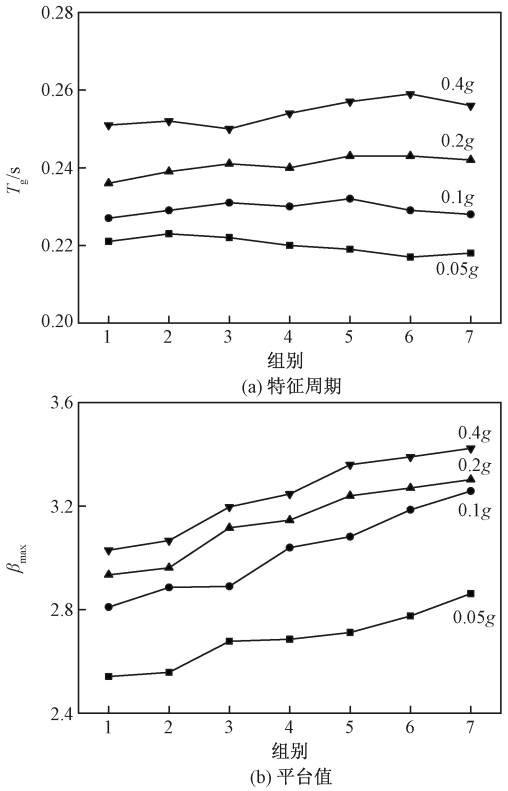

图 4　不同阻尼比条件下的特征周期和平台值

Fig. 4　Characteristic period and platform value for different damping ratios

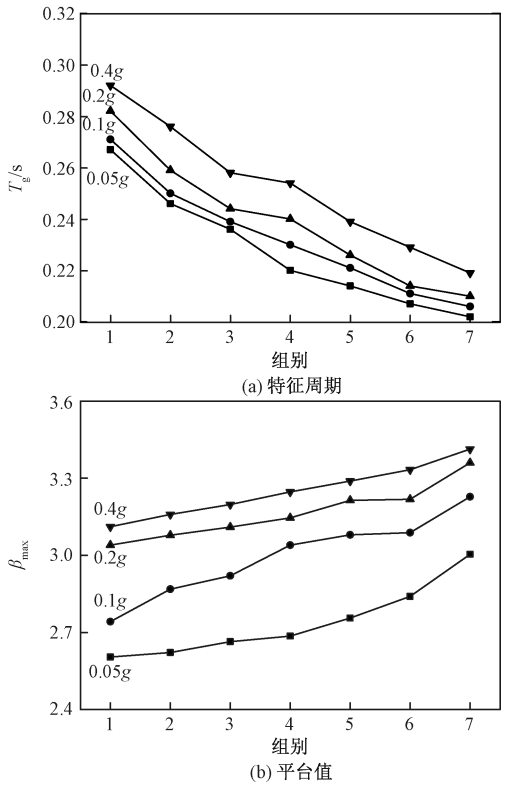

图 5　不同剪切波速条件下的特征周期和平台值

Fig. 5　Characteristic period and platform value for different shear wave velocities

本文中以实际土层剖面为计算模型,以不同强度的 EL Centro 波作为输入地震动,将红土动剪切模量比和阻尼比的最大值、最小值、平均值、推荐值(是指在表9中根据大量统计拟合给出的动剪切模量比和阻尼比值,以下简称“推荐值”)和实测值(是指在选取实际钻孔剖面土层的实测动剪切模量比和阻尼比值,简称“实测值”)进行对比,从峰值加速度、设计反应谱特征参数等方面进行对比分析,最终给出关于柳州地区红土动剪切模量比和阻尼比的建议值,表19是特殊土动剪切模量比和阻尼比的取值列表。

表18 土层动剪切模量比和阻尼比列表

Table 18 List of dynamic shear modulus ratio and damping ratio

土类	参数	不同剪应变(10^{-4})下参数值							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
素填土	G/G_{max}	0.960 0	0.950 0	0.800 0	0.700 0	0.300 0	0.200 0	0.150 0	0.100 0
	λ	0.025 0	0.028 0	0.030 0	0.035 0	0.080 0	0.100 0	0.110 0	0.120 0
红土	G/G_{max}	0.993 1	0.986 2	0.935 2	0.879 0	0.600 5	0.433 6	0.136 2	0.073 5
	λ	0.011 9	0.016 3	0.033 4	0.044 9	0.080 2	0.095 2	0.117 2	0.121 3
灰岩	G/G_{max}	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
	λ	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0	0.050 0

表19 动剪切模量比和阻尼比输入列表

Table 19 Moving modulus ratio and damping ratio input list

指标	参数	不同剪应变(10^{-4})下参数值							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
实测值	G/G_{max}	0.993 1	0.986 2	0.935 2	0.879 0	0.600 5	0.433 6	0.136 2	0.073 5
	λ	0.011 9	0.016 3	0.033 4	0.044 9	0.080 2	0.095 2	0.117 2	0.121 3
最大值	G/G_{max}	0.999 0	0.998 0	0.989 0	0.977 0	0.896 0	0.812 0	0.463 0	0.301 0
	λ	0.025 2	0.034 9	0.071 8	0.093 6	0.159 6	0.185 5	0.235 0	0.254 0
平均值	G/G_{max}	0.993 4	0.986 5	0.937 2	0.884 4	0.635 4	0.487 8	0.186 3	0.108 3
	λ	0.011 7	0.015 0	0.029 7	0.041 1	0.082 7	0.104 6	0.145 3	0.155 5
最小值	G/G_{max}	0.980 0	0.960 0	0.825 0	0.710 0	0.320 0	0.200 0	0.049 3	0.025 0
	λ	0.000 2	0.000 5	0.002 8	0.005 8	0.026 7	0.045 7	0.074 0	0.075 4
推荐值	G/G_{max}	0.998 6	0.985 5	0.898 9	0.837 4	0.638 3	0.528 3	0.216 7	0.058 2
	λ	0.005 3	0.008 8	0.024 9	0.035 2	0.067 1	0.084 2	0.131 9	0.155 8

利用 SOILQUAKE 土层反应分析软件进行分组计算,时间步长为 0.02 s,加速度单位为 g,输入地震动加速度峰值调幅为比例调幅的一半,所得的地震反应谱通过差分进化算法进行标定,计算结果见表20。

根据表20,可以发现,不同动力学参数取值条件下,红土的峰值加速度和设计反应谱特征参数的偏差多为 -10% ~10%,与实测值的最大偏差多出现在最小值处,因此,建议在缺少实测资料的情况下,该区域实际工程不宜选取红土动力学参数统计范围的最小值进行计算;随着输入地震动强度的增加,偏差值也随之增大,如果实际工程所在地区,抗震设防烈度较高(Ⅷ和Ⅸ度)且区域内存在黄土层,红土土层动力学参数不宜采用统计值,应通过实验得到相应数值。

根据红土在不同动力学参数取值条件下的峰值加速度和设计反应谱特征参数与实测值的偏差,本文给出关于柳州地区红土动剪切模量比和阻尼比的建议值,详见表21和图6。

表20 不同动力学参数与测量值之间的偏差列表

Table 20 List of deviations between the values of different kinetic parameters and the results given by the measured values

参数	地震动强度	平均值	最大值	最小值	推荐值
特征周期/s	0.05g	0.00	0.03	0.07	0.00
	0.1g	0.00	-0.03	0.03	0.00
	0.2g	0.00	0.03	0.21	0.03
	0.4g	0.13	0.20	0.17	0.17
平台值	0.05g	0.00	-0.16	-0.02	0.17
	0.1g	0.03	-0.20	-0.06	0.01
	0.2g	0.01	-0.24	-0.11	-0.01
	0.4g	0.04	0.14	-0.10	-0.03
峰值加速度/g	0.05g	0.02	-0.08	0.08	0.03
	0.1g	-0.02	-0.03	-0.08	-0.07
	0.2g	0.02	0.09	-0.04	0.02
	0.4g	0.00	0.03	0.02	-0.01

表 21　动力学参数建议值列表

Table 21　List of recommended kinetic parameters

参数	不同剪应变(10^{-4})下参数值							
	0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
G/G_{max}	0.993 4	0.986 5	0.937 2	0.884 4	0.635 4	0.487 8	0.186 3	0.108 3
λ	0.011 7	0.015 0	0.029 7	0.041 1	0.082 7	0.104 6	0.145 3	0.155 5

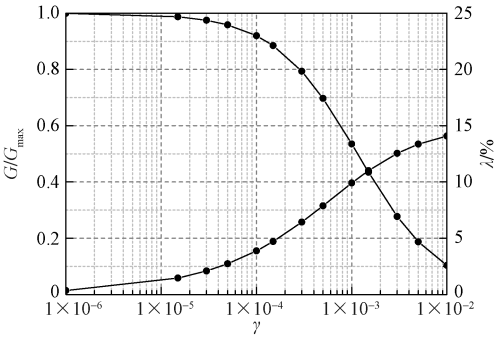

图 6　动剪切模量比和阻尼比随剪应变变化建议曲线

Fig. 6　Suggested curves of dynamic shear modulus ratio and damping ratio with shear strain

5　结论

通过对柳州地区红土数据的整理,分别对区域内红土的物理力学性质、动力学特性及地震反应特征等方面进行分析研究,所得结论如下。

(1)对柳州地区红土的物理力学性质进行统计分析,各项指标基本符合已有对红土的认识。除液性指数外,各项物理性质指标的变异系数较小,较为稳定,各项力学性质的变异系数较大,较为离散。

(2)对柳州地区红土各项物理力学性质间相关性进行分析,研究结果发现,物理性质方面,天然含水量、孔隙比、密度、液限、塑限五项指标之间存在较为显著的相关性,其中天然含水量、孔隙比、密度三者之间的相关系数的绝对值均在 0.95 以上,属于高度相关,且根据散点图可以看出三者之间存在明显的线性相关性,塑性指数与天然含水量、孔隙比、密度、液限、塑限之间存在带状的变化趋势,液限和塑限之间的相关系数为 0.804,属于高度相关,其余情况下,各项物理力学指标间的相关系数 r 均在 0.5 以下,属于低度相关,甚至不相关;力学性质方面,压缩模量、黏聚力、内摩擦角三者之间相关系数的绝对值在 0.3 左右,属于低度相关,甚至不相关。

(3)通过统计给出了柳州地区红土动剪切模量比和阻尼比的范围值和平均值,并给出了推荐值。

(4)通过统计分析,给出了柳州地区红土土层剪切波速与埋深间相关系的推荐拟合模型,并选取区域内两个实测钻孔资料来验证推荐模型的精度和可靠度。结果表明,本文推荐模型的预测剪切波速结果与实测剪切波速相接近,误差均小于 5%。

(5)建立一个单一红土土层模型,利用 SOILQUAKE 程序,对比不同动剪切模量比、阻尼比、剪切波速以及不同强度地震动对设计反应谱特征周期和平台值的影响。结果表明:特征周期与动剪切模量比、剪切波速成反比,与输入地震动强度成正比,对阻尼比的变化不敏感;平台值与动剪切模量比、剪切波速、输入地震动强度成正比,与阻尼比成反比。

(6)以柳州地区典型红土场地实测钻孔资料为基础建立计算模型,利用 SOILQUAKE 程序进行土层地震反应分析计算,对比不同动力学参数取值条件下,峰值加速度、设计反应谱形状和特征参数之间的差异,选取其中与实测值之间偏差最小的动力学参数取值为本文的建议值,并给出对应的变化曲线。

参　考　文　献

[1] 廖义玲, 秦　刚. 对贵阳地区红粘土成分结构的研究及红粘土特殊性本质的分析[J]. 贵州科学, 1989(2): 39-51.
Liao Yiling, Qin Gang. A study of composition and structure of red clay inGuiyang and analysis of special properties[J]. Guizhou Science, 1989(2): 39-51.

[2] 廖义玲, 朱要强, 赵　坤, 等. 对贵州红粘土成因的再探讨[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2006 (4): 361-365.
Liao Yiling, Zhu Yaoqiang, Zhao Kun, et al. To discuss the origion of Guizhou red clay agaion[J]. Journal of Guizhou University, 2006(4): 361-365.

[3] 王毓华. 中国红土及红粘土分布特征[C]//中国工程地质新进展论文集. 成都: 成都科技大学出版社, 1989: 199-204.
Wang Yuhua. Distribution characteristics of red clay and red clay in China[C]//Collection of New Advances in Engineering Geology in China. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1989: 199-204.

[4] 王毓华. 中国红粘土特征及建筑地基工程处理方法[C]//第五届全国工程地质大会文集. 北京: 中国地质学会工程地质专业委员会, 工程地质学报编辑部, 1996: 325-329.
Wang Yuhua. The characteristics of red clay in China and the treatment method of building foundation engineering[C]//Proceedings of the Fifth National Conference on Engineering Geology. Beijing: The Engineering Geology Committee of the Geological Society of China, Editorial Office of Journal of Engineering Geology, 1996: 325-329.

[5] 方　薇. 残积层红黏土路堑边坡稳定性分析方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.

Fang Wei. Research on stablilty analysis method of cutting slope of residual red clay[D]Changsha: Central South Unviersity, 2011.

[6] 刘 忠. 昆明新机场西跑道北端高填方边坡稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
Liu Zhong. Research on the stability of the high fill slope at the north of the Kunming new airport`s west runway[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.

[7] 张 祎, 李 恒, 徐利军, 等. 地震作用下库区堆积层滑坡失稳机制[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(5): 1982-1988.
Zhang Yi, Li Heng, Xu Lijun, et al. Instability mechanism of accumulation layer landslide under earthquake action[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(5): 1982-1988.

[8] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西原状红粘土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 568-572.
Zhao Yingwen, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Mechanical behaviors and water-sensitive properties of intact Guangxi laterite[J]. Rockand Soil Mechanics, 2003, 24(4): 568-572.

[9] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 广西红粘土击实样强度特性与胀缩性能[J]. 岩土力学, 2003, 25(3): 369-373.
Zhao Yingwen, Kong Lingwei, Guo Aiguo, et al. Strength properties and swelling-shrinkage behaviors of compacted lateritic clay in Guangxi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(3): 369-373.

[10] 阳卫红. 南昌地区红土的动力特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
Yang Weihong. Research on dynamic properties of Nanchang laterite[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.

[11] 冯钰洁, 汪峻峰, 李光范, 等. 海口红黏土大型单剪试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13): 5276-5282.
Feng Yujie, Wang Junfeng, Li Guangfan, et al. Large simple shear test of red clay in Haikou area[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(13): 5276-5282.

[12] 陈学军, 丁 翔, 宋 宇, 等. 木质素对红黏土物理力学特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(14): 5922-5928.
Chen Xuejun, Ding Xiang, Song Yu, et al. Effect of lignin on physical and mechanical properties of red clay[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(14): 5922-5928.

[13] 乔建伟, 郑建国, 刘争宏, 等. “一带一路”沿线特殊岩土分布与主要工程问题[J]. 灾害学, 2019, 34(S1): 65-71.
Qiao Jianwei, Zheng Jianguo, Liu Zhenghong, et al. The distribution and major engineering problems of special soil and rock along One Belt One Road[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(S1): 65-71.

[14] 贾俊平, 何晓群, 金勇进. 统计学[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2014.
Jia Junping, He Xiaoqun, Jin Yongjin. Statistics[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2014.

[15] 李炳钊. 概率统计[M]. 上海: 同济大学出版社, 1994.
Li Bingzhao. Probability and statistics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1994.

[16] 张克恭, 刘松玉. 土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Zhang Kegong, Liu Songyu. Soil mechanics[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.

[17] 刘汉生. 应用数理统计基础[M]. 太原: 山西科学教育出版社, 1987.
Liu Hansheng. Fundamentals of applied mathematical statistics[M]. Taiyuan: Shanxi Science Education Press, 1987.

[18] 廖振鹏. 地震小区划: 理论与实践[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
Liao Zhenpeng. Seismic microzonation: theory and practic[M]. Beijing: Earthquake Press, 1989.

[19] 兰景岩, 薄景山, 吕悦军. 剪切波速对设计反应谱的影响研究[J]. 震灾防御技术, 2007, (1): 19-24.
Lan Jingyan, Bo Jingshan, Lü Yuejun. Study on the effect of shear wave velocity on the design spectrum[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2007(1): 19-24.