

张掖地区季节冻土地震地上的地震动效应

齐吉琳¹, 马 巍¹, 孙崇绍², 王兰民²

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国地震局 兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 针对季节冻土地区一场地, 进行了现场地脉动观测, 并在观测点采集原状土样。采用动三轴试验, 取得了融土和冻土的动力学参数, 如土层的剪切模量比和阻尼比等。讨论了具有季节冻土层的场地上地震动反应分析的输入问题, 包括边界条件、地震动时程和土层参数。利用这些参数和场地地震危险性分析结果, 应用一维剪切梁模型, 计算得到场地在季节冻土层消融前后的地面强震地震动参数。进一步假定不同的冻土层厚度, 计算得到地震动峰值参数和反应谱随冻层厚度变化的规律, 以此分析了冻土层对地震动效应的影响。对场地所做的地震动计算结果表明: 地表的冻土层对强震有一定的抑制作用, 冻土层对地震安全性有正面影响, 此效应随冻结深度的增加而加大; 而场地的卓越周期随冻土层厚度的增大而减小。对于季节冻土地区的抗震设计具有一定的意义。

关键词: 土力学; 季节冻土; 地震动效应; 剪切梁模型; 反应谱

中图分类号: O 319.56

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)12-2082-07

SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF SEASONALLY FROZEN GROUND OF ZHANGYE AREA

QI Ji-lin¹, MA Wei¹, SUN Chong-shao², WANG Lan-min²

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Earthquake Research Institute of Lanzhou, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China)

Abstract: A test site in a seasonally frozen region in Zhangye City, Gansu Province, China is taken to investigate the ground motion features in different seasons. Micro-tremors are measured and analyzed. Undisturbed samples are taken from the site and triaxial dynamic tests are performed in their unfrozen and frozen states in order to obtain the dynamic parameters, such as shear modulus ratio and damping ratio of the soils. The input for the ground motion analysis, such as boundary conditions, seismic records and soil parameters are discussed. Together with the results from previous seismic risk analysis, the parameters are input into a one-dimensional shear beam model so that ground motion parameters are calculated for the site in seasons with and without frozen layer. Furthermore, different depths of the frozen layer are assumed and peak ground motion parameters and response spectra are calculated. Calculation shows that the seasonal existence of frozen layer can restrain the strong motion to some extent, therefore, the frozen layer has positive effect on the site subjected to seismicity, and the effect increases with the increase of frozen depth; at the same time, the predominant period of the ground decreases with the increase of the depth of frozen layer. The results obtained can also be applied to other regions with similar ground conditions.

Key words: soil mechanics; seasonally frozen ground; shear beam model; seismic response spectra; response spectra

收稿日期: 2004-12-09; **修回日期:** 2005-01-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目资助(KZCX1-SW-04)

作者简介: 齐吉琳(1969-), 男, 博士, 现任副研究员, 主要从事冻土力学与工程方面的研究工作, 目前在德国斯图加特大学岩土工程研究所进行合作研究。E-mail: qijilin@igs.uni-stuttgart.de.

1 引言

首先对与冻土地震动的反应分析密切相关的冻土动力学研究作一简单回顾。冻土动力学研究大约是从 20 世纪 60 年代, 随着美国在阿拉斯加大规模的开发而兴起的。最初是多年冻土地区的动力物探^[1], 后来的研究重点主要在于冻土动力学参数上, 并由 Vinson 进行了总结^[2]。试验证明, 随温度的降低, 冻土的波速和模量增大而阻尼比减小。此后, 多年以来在测试方法以及土的不同物理参数对这一规律的影响等方面展开了大量工作^[3-5]。

在季节冻土地区, 由于冻土层随季节的变化而出现或消失, 土层的力学性质发生季节性变化, 对场地的地震动效应会有一定的影响^[6]。一般场地的地震动反应分析已经有大量的成果^[7]; 季节冻土层对场地地震动效应的影响尽管早就被认识到^[8], 但迄今研究还不多, 本研究正是针对这一现状而开展的。由于在我国季节冻土地区目前尚没有系统的强震记录可供分析使用, 本项研究中采用了地脉动观测和地震动反应分析 2 种手段来研究这一问题。本文主要研究季节冻土地区地震动反应, 考察该场地非冻结和冻结期间的强震地面运动参数, 以分析冻土层对场地地震动效应的影响, 脉动问题已有另文讨论^[9]。

所选定的场地条件在文[9]中已作了详细说明, 这里再作简单介绍。工作场地选在张掖市区的东北部, 场地地下水位较高。场地土性以细粒土为主, 每年有 4~5 个月具冻土覆盖。冬季观测时自地表起有 0.95 m 的冻土覆盖层, 接近当地的最大冻结深

度 1.2 m。场地土层参数见表 1。

张掖市区地形平坦, 土层基本上水平展布, 对于此种场地条件, 可采用一维多质点剪切梁模型计算地面的地震动参数。计算时选用了时域内的逐步积分方法, 对土的非线性性质用等效线性方法处理。一维模型的方法和程序都是成熟的, 本文重点讨论计算中输入地震动的边界条件和模型的其他参数输入问题。

为取得冻土的动力学参数, 在观测地点采集原状土样, 进行了室内动三轴试验, 取得了融土和冻土的动力学参数, 如阻尼比和剪切模量等。利用这些数据, 根据张掖市的地震危险性分析结果, 计算得到本场地的非冻结和冻结期间的地面强震地震动参数, 以此分析冻土层对地震动的影响。

2 水平土层问题的剪切梁模型简介

假设场地各土层(包括冻结层)的厚度基本均匀, 层间界面展布近水平, 且满足水平土层展布长度远大于土层总厚度的条件, 此时可用一端固定支承(基底), 一端自由(地表)的剪切梁模型来模拟地震动的作用, 并把这个剪切梁用一离散的剪切质点系来替代。模型采用凯尔文(Kelvin)流变体, 即用剪切弹簧描述土的剪切弹性, 及与之并联的阻尼器描述水平土层的阻尼特性。处理的方法为根据土质将土层分为若干个自然分层, 为提高计算精度, 又按各分层的厚度再将其均分为若干子层。将全部质点的运动方程联立, 得出体系的运动微分方程组:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{R\} \quad (1)$$

表 1 场地土分层及主要物理指标和剪切波速

Table 1 Physical parameters and shear wave velocity of soil layers on the working site

土层深度/m	土类	取样深度/m	容重/(kN·m ⁻³)	含水量/%	塑限/%	液限/%	剪切波速/(m·s ⁻¹)
0.0~1.0	素填土	-	-	-	-	-	220
1.0~3.6	粉土	2.54~2.74	19.8	24.94	17.76	28.74	180
3.6~5.2	淤泥质土	4.05~4.25	19.5	29.73	24.20	43.37	170
5.2~8.9	粘土	6.45~6.65	19.8	30.08	-	-	250
8.9~10.2	淤泥质土	9.78~9.98	21.7	24.04	17.97	30.65	230
10.2~12.4	粉土	-	-	-	-	-	250
12.4~14.4	粉砂	-	-	-	-	-	250
14.4~17.3	粉土	-	-	-	-	-	330
17.3~28.0	砂卵石	-	-	-	-	-	350~650

注: 冻结层融化状态的物性与素填土和粉土相同。

式中： $[M]$ ， $[C]$ ， $[K]$ 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵； $\{u\}$ ， $\{\dot{u}\}$ ， $\{\ddot{u}\}$ 分别为位移向量、相应的速度向量和加速度向量； $\{R\}$ 为一表征结构的外荷载列向量。

取得地面运动的加速度时程之后，计算反应谱时，就是对某一单质点、单自由度模型的输入。针对一个单质点体系，在水平方向的地震动作用下，沿该方向作单自由度强迫振动。此时体系的运动方程为

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \tag{2}$$

式中： m ， c 和 k 分别为体系的质量、阻尼和刚度。此即式(1)的最简单形式。

如果只考虑线性振动，则 c 和 k 都为常量而不依赖于位移 u 。于是，式(2)即为一个常系数二阶微分方程，其初始条件为

$$\left. \begin{aligned} u_{t=0} &= 0 \\ \dot{u}_{t=0} &= 0 \\ \ddot{u}_{t=0} &= \ddot{u}_{g,0} \end{aligned} \right\}$$

将任意一个地震加速度记录进行数据处理后，代入式(2)的右端，对左端确定的一组 m ， c 和 k 值，计算出位移、速度和加速度反应的最大绝对值，便得到该地震动对一定结构物的影响。

令

$$\begin{aligned} c &= 2\alpha m \\ \alpha &= \lambda\omega \\ \omega &= (k/m)^{-2} \end{aligned}$$

则式(2)可改写为

$$\ddot{u} + 2\lambda\omega\dot{u} + \omega^2u = -\ddot{u}_g \tag{3}$$

于是，确定体系的独立参数实际上只有 2 个，即 λ 和 ω 。 λ 与结构物的种类及其构成材料有关。对不同的 ω 值(或周期 $T = 2\pi/\omega$)计算出地震作用期间的上述最大值构成的一个序列，即为地震反应谱。详细推导请参考文[10]。

模型的程序是用 Fortran 77 编写的^[10]，下面主要讨论模型的输入。

3 地震动输入的问题

3.1 有关地震动输入基底的选取

关于地震动的输入基底(又称地震基盘)，理论上所要求的是一个弹性体的输入界面。从工程应用角度出发，有两种类型的基底可选用：一类为坚硬的基岩基底(常直接称基岩)；另一类为所谓“假想

基底”(常称为基底)。

严格来说，输入基底的刚度越大越好，2 种介质刚度相差越大，作为输入界面来说，效果越好。但客观情况有时不能满足这种要求。经验表明，满足下列条件之一者可作为计算输入界面：下部介质的剪切波速等于或超过上部介质的 2 倍；或者土层剪切波速超过 500 m/s，且下部不再出现波速小于 500 m/s 的软弱夹层。

张掖市城区卵石层基本满足上述 2 个条件，表 1 中所列出卵石层剪切波速自顶板以下 4~5 m 处(即地面以下 20~21 m 处)已达到 600 m/s 左右。且上面的土层波速较小，一般不足 300 m/s，因此，对于本场地，选定卵石层的顶板以下 4 m 作为输入基底，力学条件可以满足。

3.2 土层波速

兰州地震研究所对张掖地区已进行过地震危险性分析。在张掖市城区工作区范围内共选择 7 个点进行了钻孔内原位土层波速测试，发现张掖市范围内的各类土的剪切波速在相当大的范围内变动，工作场地位于张掖市城区的东部，其场地土的各项参数见表 1。

3.3 输入地震动时程

由于当地未曾取得相应的强震加速度纪录，计算时所用的输入地震动时程是根据地震危险性分析的结果拟合得到的人工合成地震波。根据危险性分析结果，对应 50 a 的 10%超越概率主要地震动参数为：基岩场地峰值加速度(PGA)为 0.13 g，地震动反应谱特征周期为 0.2 s。影响张掖市区的主要震源是榆木山断层，距张掖市平均 60 km，相应的震级为 7.2，波及到张掖市的地震动强度相当于 VII 度。根据上述基本参数，求得输入地震动的持续时间为 18.5 s，然后，采用三角级数叠加方法共拟合了 4 条人造地震波，这些地震波包含了当地未来强震的震动信息，符合本地的情况，可作为计算地面地震动参数的输入波。

3.4 非线性处理

土的动力特性具有明显的非线性，因此，在处理强地震问题时，土层的非线性反应是不可忽视的。一般采用 Seed 等提出的等效线性化迭代法。所谓等效线性化，包含有两层含义：一为二类特性曲线，即剪切模量 G 曲线和阻尼比 λ 曲线；二为通过一系列土壤应力-应变关系试验曲线获得的，其方法是将塑性应力滞回线的面积所表征的能量损耗化为某个当量粘性阻尼比所产生的能量损耗。这两类曲线

都与土质有关，但前者随着剪应变 γ 的增大而减小，后者随着剪应变 γ 的增大而增大。因此，剪切弹簧的抗剪刚度和内外阻尼器的阻尼在体系运动过程中都不是常数，从而使整个问题具有非线性性质。若对上述问题作进一步处理，即指体系在整个地震作用期间的对应某一应变，反应可用一平均意义下不变的剪切模量和阻尼比来计算。取得这 2 项数值，须用迭代法，具体迭代过程如下所述。

在表征土壤非线性特性的上述试验曲线上，任意选取对应于某一个剪应变 γ 的剪切模量比 G/G_m (G_m 为最大剪切模量)和阻尼比 λ ，作为初次迭代用数据，进行反应的线性计算。然后求出体系振动的每一计算时刻的土层剪应变。用此平均剪应变值按试验曲线查找新的 G/G_m 值和 λ 值，作下一次迭代用数据。如此重复进行反应的线性计算，直到前后两次迭代计算所得的剪切模量和阻尼比均相差甚微，满足事先给定的误差要求时为止。值得注意的是，对于所研究的土层中的每一子层都要进行上述迭代过程。

剪切模量曲线 G/G_m 可根据试样的试验结果得出，在本项工作中，该曲线是借助大量的土动力学试验结果统计得到的，特别是冻土的曲线，是在实验室内通过较多样品的试验得到的，砾石土的曲线取自经验数值。因此，只要知道极小剪应变(达 $10^{-5} \sim 10^{-6}$)下测到的最大剪切模量 G_m ，问题即得到解决。在用地震波勘测法进行现场测量的情况下，即

$$G_m = \rho V_s^2 \tag{4}$$

式中： ρ 为土的密度， V_s 为测得的剪切波速度。

3.5 土动力学参数：剪切模量比和阻尼比

本文对在研究场地采集了最上层(即冬季可能冻结的)粉质土的原状样，进行了冻土和融土的动三轴试验，结合兰州地震研究所做的“张掖市小区划”中的研究成果，得到土的剪切模量和阻尼比随剪应变的变化。

现场采集到的是未冻土样，在实验室按照仪器的要求，将其制备成合适尺寸的原状样；装到试样模中，置于 -5 的低温环境。等到土样完全冻结后，装到 MTS 试验机上。试验温度为 -5 ；起始动应力为 0.5 MPa，并以 0.5 MPa 为步长依次增加动应力。每一级动应力下循环 30 次。由于原状试样的不均一，考虑到试验结果可能存在一定的随机性，本文进行了 5 次平行试验。5 次试验得到的数据吻合比较好。采用同样的方法，对于融土进行了 5 个平行的动三轴试验。图 1, 2 分别为各类土的剪切模

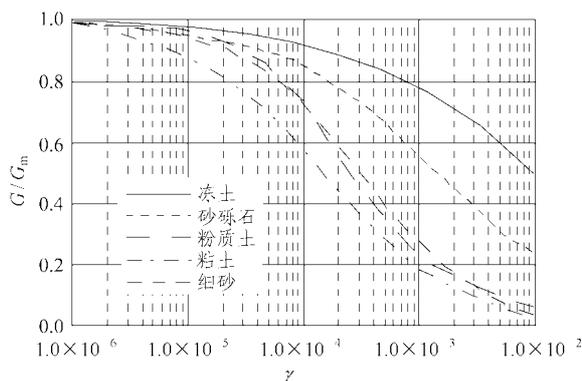


图 1 场地各类土的剪切模量比 - 剪应变曲线

Fig.1 Shear modulus ratio vs. shear strain for soils on the working site

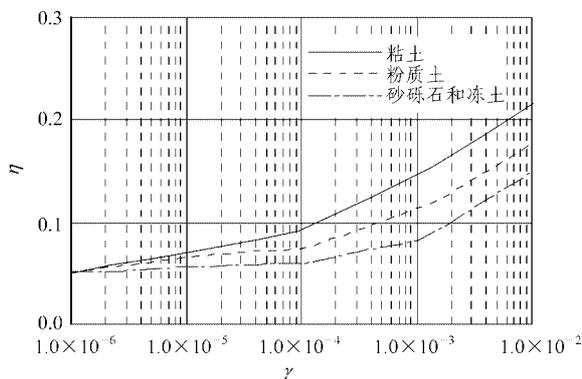


图 2 场地各类土的阻尼比 - 剪应变曲线

Fig.2 Damp ratio vs. shear strain for soils on the working site

量比和的阻尼比随剪应变的变化曲线。

4 季节冻土地震动的地震动效应计算及分析

采用上面介绍的一维模型计算了观测场地的冻结和融冻季节的地震动参数。为便于比较分析，本文计算得到峰值位移、峰值速度、峰值加速度以及加速度反应谱，同时给出了绝对谱和动力放大系数 (β 谱)。计算使用了 4 条输入地震波，它们都是根据地震危险性分析结果合成的人造地震动。对张掖市所作的地震危险性分析计算结果表明，当地的 50 a 超越概率 10% 的地面峰值加速度为 0.13 g，即对应的地震烈度为 VII 度。采用一维模型计算时，理论上由基岩输入的加速度峰值应为地面峰值加速度的 50%，但在西北地区的经验表明，对于本场地的具体条件，输入峰值宜取基岩地面峰值加速度的 65%，即输入的峰值加速度为 0.086 g。4 条输入波所得的反应谱与目标谱的形状相近，各参数的离散程度不大，说明这 4 条人造地震动时程符合本地的情况。为分析冻土深度对地震动反应的影响，将冻

土的深度扩大，假定最大达到 6 m。图 3 所示为加速度随冻土层厚度的变化趋势，详细的计算结果见表 2。

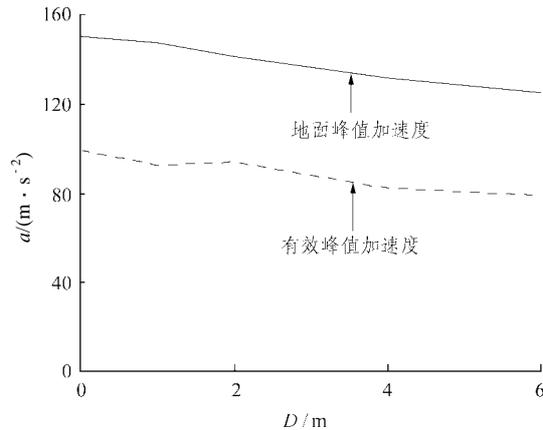


图 3 地面峰值加速度随冻土厚度的变化趋势
Fig.3 Ground peak acceleration vs. frozen depth

由图 3 可知，冻结的表层由于其刚度的增加，对强地震动有一定的抑制作用。由表 2 可知，当地表土层冻结时，不论是峰值位移、速度还是峰值加速度，都有某种程度的降低，而且，随着冻土层厚度增加，峰值加速度有逐渐降低的趋势。当冻结厚度为 1 m 时，峰值加速度的平均值降低了 2%，有效峰值加速度平均值降低了 7%；当假定的冻结厚度达到 6 m 时，峰值加速度的平均值降低了 17%，有效峰值加速度平均值降低了 21%。图 4, 5 所示为计算得到的融冻季节和冻结深度为 1 m 时的场地反应谱可由图 4, 5 可知，冻结层对反应谱的形状也有一定的改变，主要是反应谱的峰点略微向短周期方向移动；当冻土层厚度达到 6 m 时，反应谱变得更加尖锐一些，如图 6 所示。由于冻结层的厚度不大，故计算结果在谱形上的差异也很小。在图 4~6

表 2 场地的地震动计算结果

Table 3 Calculation results for seismic response on the site

冻结情况	输入波编号	D_{max} / cm	$V_{max} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$A_{max} / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$	$EPA / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$
无冻土层	1	0.115	3.48	148	96
	2	0.151	4.30	170	105
	3	0.098	2.90	116	84
	4	0.140	3.96	167	113
	平均值		0.126	3.66	150
地表冻结厚 1 m	1	0.106	3.77	140	84
	2	0.121	3.79	177	101
	3	0.110	3.85	154	105
	4	0.084	2.87	118	81
	平均值		0.105	3.57	147
地表冻结厚 2 m	1	0.101	3.15	139	90
	2	0.137	3.86	159	100
	3	0.090	2.73	110	79
	4	0.121	3.56	157	107
	平均值		0.112	3.33	141
地表冻结厚 4 m	1	0.085	3.24	136	79
	2	0.086	2.96	146	88
	3	0.089	3.22	136	92
	4	0.070	2.46	109	70
	平均值		0.083	2.97	132
地表冻结厚 6 m	1	0.080	3.06	126	75
	2	0.079	2.64	138	85
	3	0.083	3.05	128	88
	4	0.065	2.28	108	68
	平均值		0.077	2.76	125

注：表中 D_{max} , V_{max} , A_{max} , EPA 分别为计算求得的峰值位移、峰值速度、峰值加速度和有效峰值加速度。

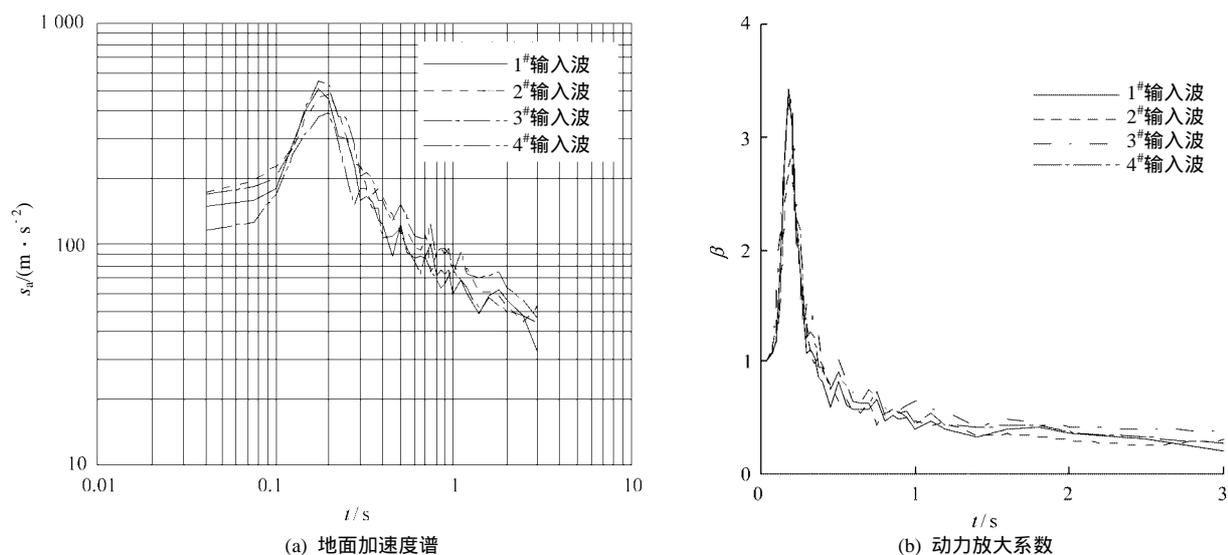


图 4 未冻结时场地的反应谱
Fig.4 Ground response spectra without frozen layer

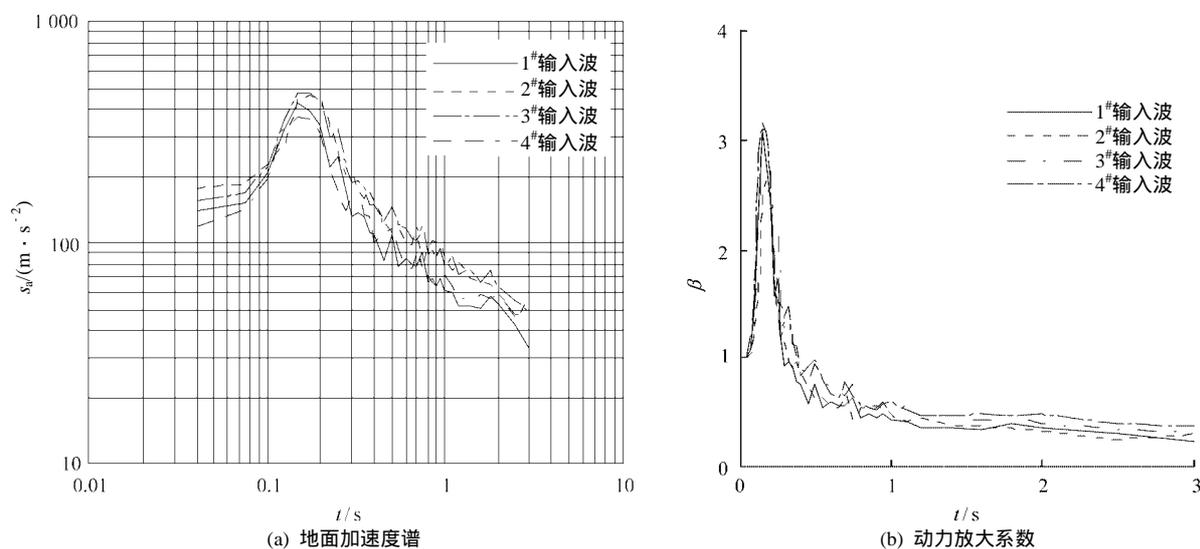


图 5 冻结深度 1 m 时场地的反应谱
Fig.5 Ground response spectra with frozen depth of 1 m

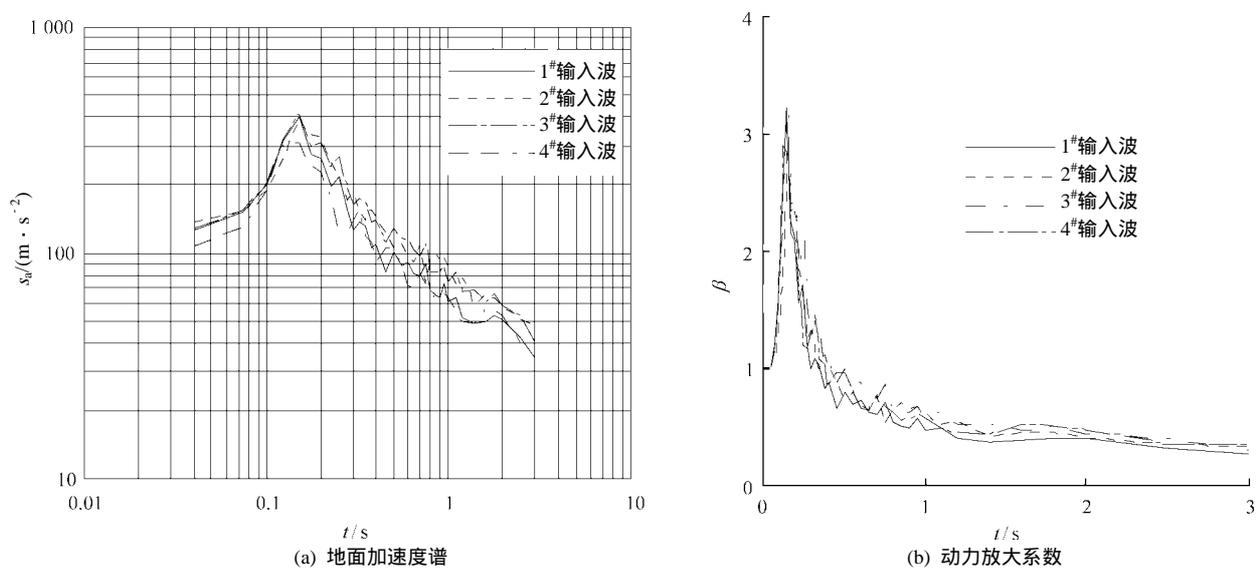


图 6 冻结深度 6 m 时场地的反应谱
Fig.6 Ground response spectra with frozen depth of 6 m

中,不容易直接看出反应谱峰值周期的变化,但是通过计算的数值,还是可知其中微小的变化:未冻结时,峰值点周期为 1.75~2.00 s;冻结深度为 1 m 时,峰值点周期为 1.50~1.75 s;冻结深度为 2 m 时,峰值点周期为 1.75~2.00 s;冻结深度为 4 m 时,峰值点周期为 1.50 s 左右。

类似张掖地区的这种场地条件下,冻结层的影响主要是对峰值加速度的削减,而反应谱形状的微小变化对建筑物的抗震设计没有实质性的影响。我国季节冻土的最大冻结深度不过 2 m,超过 2 m 的冻结深度只有在多年冻土地区才会出现(多年冻土地区的活动层),更厚的冻土层对地震动参数应有较大的影响,但冻土的影响不仅和冻结深度有关,同时还与冻土下面的整个土层的厚度及性质有关。比如,由于冬季冻土层作为不透水层的存在,在地震动作用下,下部土层液化的可能性就会大大提高;此外,春季冻土层尚未完全融化时,2 层软土之间会出现冻土夹层。对此类问题需要进行进一步的专门研究。本次研究中根据一个场地的观测和计算结果,只对冻土影响的趋势做初步的探讨,未能涉及更多复杂的问题。

4 结 论

由于季节冻土地区冬季具有冻土层覆盖,致使场地的地震动特性发生变化。通过对特定场地的分析发现:

(1) 对场地所做的地震动计算表明,地表的冻土层对强震有一定的抑制作用,其主要表现为地震峰值加速度有所降低,且降低的幅度随冻结深度的增加而加大,冻土层对地震安全性有正面地影响。同样强度的地震作用下,冻结期间的震害预计相对较轻。

(2) 计算结果同时表明,地表的冻土层对强震的频谱特性也有一定的影响,但影响的程度有限,反应谱的峰点仅有略微向短周期方向移动的趋势,反应谱的形状不发生大的改变。

(3) 我国季节冻土的深度最大不超过 2~3 m,冻土的厚度继续增大时,地震动特性还与冻土下面的土层的性质和厚度有关,以上说到的地震动变化趋势的普遍性还有待今后进一步的研究。

(4) 进一步的研究对于季节冻土地区的地震小

区划和建筑物的抗震设计都具有一定的意义。作者建议在季节冻土地区进行地震小区划和震害预测工作时,应当充分考虑冻土层给场地带来的影响。

参考文献(References):

- [1] Roethlisberger H. Applicability of seismic refraction soundings in Permafrost near Thule[R]. [s. l.]: U. S. Army Cold Regions Research Engineering Laboratory, 1961.
- [2] Vinson T S. Response of Frozen Ground to Dynamic Loading[M]. New York: McGraw-Hill Inc., 1978. 405-458.
- [3] 徐学燕, 仲丛利, 陈亚明, 等. 冻土的动力特性研究及其参数确定[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(5): 77-81.(Xu Xueyan, Zong Congli, Chen Yaming, et al. Research on dynamic characters of frozen soil and determination of its parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(5): 77-81.(in Chinese))
- [4] Al-Hunaidi M O, Chen P A, Rainer J H, et al. Shear moduli and damping in frozen and unfrozen clay by resonant column tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33: 510-514.
- [5] 王大雁, 朱元林, 马 巍, 等. 冻土超声波波速与冻土物理力学性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 22(11): 1 837-1 840.(Wang Dayan, Zhu Yuanlin, Ma Wei, et al. Testing study on relationship between ultrasonic wave velocities and physico-mechanical property of frozen soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 22(11): 1 837-1 840.(in Chinese))
- [6] 刘鸿绪, 孙彦福, 陈亚明, 等. 季节冻土层对房屋地震破坏的影响[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 46-50.(Liu Hongxu, Sun Yanfu, Chen Yaming, et al. Influence of seasonally frozen ground on seismic damages of building[J]. Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1): 46-50.(in Chinese))
- [7] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.(Hu Yuxian. Earthquake Engineering[M]. Beijing: Earthquake Press, 1988.(in Chinese))
- [8] Finn W D L, Yong R N. Seismic response of frozen ground[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1978, 104(10): 1 225-1 241.
- [9] 齐吉琳, 李海鹏, 赖远明, 等. 季节冻土地上的地脉动观测和分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4): 449-453.(Qi Jilin, Li Haipeng, Lai Yuanming, et al. Micro-tremor measurement and analysis of seasonally frozen ground[J]. Glaciology and Geocryology, 2004, 26(4): 449-453.(in Chinese))
- [10] 首培然. 地震波在工程中的应用[M]. 北京: 地震出版社, 1982.(Shou Peixiu. The Application of Seismic Wave to Engineering[M]. Beijing: Earthquake Press, 1982.(in Chinese))