

哈尔滨季节性冻土场地特征参数研究

师黎静¹, 陈盛扬¹, 黎明²

(1. 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; 2. 中粮集团华商国际工程有限公司, 北京 100069)

摘要: 为研究季节性冻土场地冻结期和非冻结期的动力学特征参数及地震动差异, 通过哈尔滨场地地脉动单点三分量观测, 对比分析不同季节的地脉动特征, 采用地脉动单点 H/V 谱比法研究冻结土层对场地卓越频率、放大因子、等效剪切波速以及场地类别的影响, 提出一种冻土层厚度的估算方法。结果表明: 冻结土层使地脉动水平分量卓越频率增大, 对竖向分量卓越频率的影响不明显; 冻结期场地卓越频率增大的幅度除了与覆盖层厚度呈负相关外, 还与场地表层刚度有关; 冻结土层使场地放大因子减小, 减小幅度与覆盖层厚度不相关, 与场地表层刚度有关; 通过场地剪切波速资料、地脉动 H/V 谱比卓越频率变化值, 便可估算出冻土层厚度; 冻结土层使观测场地的等效剪切波速 v_{s20} 平均增加 13%, v_{s30} 平均增加 11%; v_{s20} 的增加未引起 II 类场地类别发生变化, 使 v_{s20} 接近 250 m/s 的 III 类场地变成 II 类场地; v_{s30} 的增加没有引起 D 类场地类别发生变化。

关键词: 土力学; 季节性冻土; 地脉动; H/V 谱比; 卓越频率; 放大因子; 冻土层厚度

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2019)05 - 1053 - 11

Research on the characteristic parameters of Harbin seasonal frozen soils

SHI Lijing¹, CHEN Shengyang¹, LI Ming²

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China; 2. COFCO Corporation, Huashang International Engineering Co., Ltd., Beijing 100069, China)

Abstract: To study the difference of site dynamic parameters and seismic response between unfrozen and frozen seasons, the characteristics of microtremors in frozen and unfrozen seasons were analyzed by 3-component observation in Harbin sites. The effect of frozen soil on site predominant frequency, site amplification factor, equivalent shear wave velocity and site classification were studied by microtremors H/V method. A method for estimating the thickness of the frozen soil was proposed. The results show that the frequency of the horizontal component of microtremors increases because of the frozen soil but the increase of the vertical component is not obvious, and that the increases of the predominant frequency are different among sites even if in the same area. The increase of the site predominant frequency is correlated with both the thickness of the frozen soil and the stiffness of site surface soil. The amplification factor of the site decreases due to the frozen soil, and the decrease of the amplification factor is correlated to the stiffness of site surface soil rather than the thickness of the frozen soil. The thickness of the frozen soil can be estimated according to the shear wave velocity of the site and the predominant frequency of the H/V spectra ratio. Due to the frozen soil, the equivalent shear wave velocities, v_{s20} and v_{s30} , increase by 13% and 11% on average in six sites respectively. The increase of v_{s20} does not affect the site

收稿日期: 2018 - 09 - 30; **修回日期:** 2018 - 11 - 21

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1504601); 中国地震局工程力学所基本科研业务专项资金项目(2016A04, 2014B06)

Supported by the National Key Research and Development Program of China(Grant No. 2018YFC1504601) and Science Foundation of Institute of Engineering Mechanics, CEA(Grant Nos. 2016A04 and 2014B06)

作者简介: 师黎静(1976 -), 男, 1998年毕业于兰州大学水文地质与工程地质专业, 现任研究员, 主要从事岩土工程和防灾减灾工程方面的研究工作。
E-mail: shlj@iem.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.1115

classification of class II, but can change the site of class III into class II with v_{s20} of nearly 250 m/s. The increase of v_{s30} during the frozen season does not affect the site classification of class D.

Key words: soil mechanics; seasonal frozen soil; microtremor; H/V spectra ratio; predominant frequency; amplification factor; thickness of frozen soil

1 引言

季节性冻土场地, 冬季地表会形成坚固的冻结层, 在一定程度上改变场地的动力特性。1986年黑龙江省德都地震群及其他冻结期、非冻结期地震灾害对比都表明, 冻土对地震响应有重要影响^[1]。王大雁等^[2-3]通过钻孔、室内试验来测定季节性冻土地场地的动力特性变化, 根据土动力特性的变化研究了冻土地震响应特征; J. Qi等^[4-5]数值计算了不同地震波输入下冻土地场的反应, 结果表明冻土层的存在会降低地面加速度的幅值。

B. R. Cox等^[6]通过表面波谱分析方法, 研究了阿拉斯加地区冻结期与非冻结期场地剪切波速差异, 确定出不同场地类型的冻土层剪切波速, 按照场地分类规范对冻结期、非冻结期的场地进行分类, 结果显示16个场地中有3个场地类别发生变化。

鉴于具有简便、省时、高效等优势, 近年来地脉动法在场地动力特性勘测分析中得到了广泛应用。但采用地脉动法分析季节性冻土地场特征参数的相关研究较少。齐吉琳等^[7]以地处戈壁砂砾地区的张掖市为研究对象, 通过对夏季、冬季地脉动记录傅里叶变换, 发现冻土与非冻土地场地的地脉动卓越频率存在明显差异: 在该地区, 厚度近1 m的冻土层使得地脉动水平分量卓越频率提高了约1.9 Hz。由于直接傅里叶谱分析方法假设地脉动源是白噪声, 这与实际情况不符, 所得到的地脉动卓越频率会受到脉动源的混扰而不能代表场地卓越频率, 也无法估计场地的放大因子。大量的研究表明, 单点谱比(Nakamura)方法可以有效消除脉动源对场地动力特性分析结果的影响, 所得的卓越频率更能代表场地卓越频率^[8]。因而, 最新研究中多采用地脉动单点谱比法测定场地特征参数, 但采用地脉动单点谱比法分析计算季节性冻土地场特征参数的相关研究还未展开。

哈尔滨气温从10月份开始下降, 并出现负温, 至翌年1月份气温下降到最低, 月平均气温为 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冻土深度也达到了最大值2 m; 3月末,

气温明显回升, 开始解冻, 冻土逐渐融化。该地区冻结期长达6个月, 冬季冻土较深。本文在哈尔滨地区选取6个测试场地, 在场地冻结期与非冻结期分别进行地脉动现场测试, 利用单点谱比方法分析哈尔滨季节性冻土地脉动波场特征, 研究冻土层对场地卓越频率、放大因子、等效剪切波速等特征参数以及场地分类的影响, 为研究冻土层对地震动的影响提供参考依据。

2 测试场地与地脉动观测

2.1 测试场地

共选取了6个具有详细钻孔波速测试资料场地, 并在不同季节进行了地脉动单点三分量观测。测试场地资料及地表情况见表1。

表1 地脉动观测场地
Table 1 Microtremor observation sites

| 测试场地编号 | 覆盖层厚度/m | $v_{s20}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | $v_{s30}/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 测点地表环境 | 钻孔第一层 |
|--------|---------|--|--|--------|----------|
| 1 | 75 | 180 | 205 | 土质地面 | 回填土(2 m) |
| 2 | 45 | 215 | 240 | 土质地面 | 回填土(2 m) |
| 3 | 22 | 241 | | 土质地面 | 回填土(2 m) |
| 4 | 23 | 244 | | 沥青路面 | 回填土(2 m) |
| 5 | 58 | 165 | 194 | 土质地面 | 回填土(2 m) |
| 6 | 62 | 188 | 213 | 水泥面 | 回填土(2 m) |

6个测试场地的覆盖层厚度为22~75 m, 非冻结期场地表层20 m土的等效剪切波速 v_{s20} 为165~244 m/s, 场地表层30 m土的等效剪切波速 v_{s30} 为194~240 m/s(场地3和4的钻孔深度未达到30 m), 其中II类和III类场地各3个; 场地地表面介质不同, 场地1, 2, 3和5为土质地面, 场地4和6分别为沥青和水泥路面; 测试场地地表面下第一层均为回填土, 厚度为2 m。

2.2 地脉动观测分析

对上述6个场地分别于冻结期和非冻结期进行2次地脉动观测, 第一次为7月份, 该月平均气温是 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 为一年中最高月平均气温, 土层中冻土完全融化; 第二次为1月份, 该月温度最低达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$,

为一年中最低月平均气温, 冻土厚度达到最大值。

地脉动测试仪器除了满足低频性能好、信噪比高、工作稳定性可靠等条件外, 还应满足工作环境耐低温的要求。本次地脉动测试使用的仪器为 TAG-33M 一体化力平衡加速度仪, 该仪器传感器与采集器一体化, 适合野外流动观测等场合, 采样频率范围为 0.001~200 Hz, 工作温度为 -40 °C~60 °C, 满足哈尔滨冬季低温要求。

为了保障得到稳定可靠的地脉动记录, 同一测点放置了 2 台仪器, 测试时去掉表层浮土以及积雪, 对仪器进行调平、调方向操作。测试时长为 30 min~1 h 不等, 对于场地外界干扰较多的测点, 测试时间稍长, 如果测试场地外界干扰较少, 测试时长为 30 min。

3 冻结期与非冻结期场地地脉动特性

3.1 冻结期与非冻结期三分向地脉动频谱特征对比

采用 20.48 s 的窗长把连续的地脉动记录分成若干时窗, 计算每个时窗地脉动记录的傅里叶谱, 最后取平均值作为该场地地脉动傅氏谱。即按照下式计算 6 个场地不同季节的地脉动三向(NS, EW, UD)傅里叶谱:

$$F_{(NS, EW, UD)} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{i(NS, EW, UD)}}{n} \quad (1)$$

式中: $f_{i(NS, EW, UD)}$ 为第 i 时间窗的傅里叶谱, $n = \text{时长} / 20.48$ 。

图 1 给出了 6 个测试场地冻结期、非冻结期地脉动三分向傅氏谱对比图, 表 2 给出了冻结期、非冻结期地脉动三分向傅氏谱的卓越频率和峰值。由表 2 和图 1 可知, 冻土层对地脉动三分向傅氏谱有重要影响。

(1) 冻结土层使 6 个测试场地地脉动水平、竖向分量的卓越频率不同程度增大, 水平分量的卓越频率平均提高了 19%, 竖向分量的卓越频率平均提高了 5%, 水平分量卓越频率变化明显大于竖向分量卓越频率的变化。表明冻结土层使场地地脉动水平分量卓越频率增大, 对竖向分量卓越频率的影响不明显。

(2) 冻土结层使 6 个测试场地地脉动水平、竖向分量的峰值均不同程度减小, 水平分量的峰值平均减小 32%, 竖向分量的峰值平均减小 27%, 水平分量峰值变化与竖向分量峰值变化无明显的差距。表明冻结土层对地脉动水平、竖向分量的峰值影响无明显差别。

(3) 哈尔滨地区 6 个测试场地的覆盖层厚度均大于 20 m, 厚度接近 2 m 的冻土层使地脉动水平分量卓越频率平均增加了 0.58 Hz。而齐吉琳等^[7]研究的张掖地区戈壁砂砾场地, 大部分覆盖层厚度小于 20 m, 厚度接近 1 m 的冻土使地脉动水平分量卓越频率增加 1.93 Hz 左右。表明, 由于场地覆盖层厚度、土质等条件不同, 冻结土层对不同地区地脉动卓越频率影响存在较大差别。

3.2 冻结期与非冻结期场地地脉动 H/V 谱比特征对比

单点地脉动谱比法(Nakamura 法), 利用地脉动水平分量与竖向分量的谱比值来估计场地传递函数和放大效应。目前公认, 相比傅氏谱, 单点地脉动谱比法可以得到更加精确的场地卓越频率。为了研究冻土对场地卓越频率和放大效应的影响, 进一步考察了 6 个测试场地冻结期和非冻结期的地脉动 H/V 谱比。

已有研究结果表明^[9], 首先通过对水平和竖向地脉动信号施加 20.48 s 的汉宁窗、相邻窗间重叠一半进行谱分析, 得到的傅氏谱采用 5 点光滑函数平滑后, 根据下式计算得到的地脉动谱比卓越频率较稳定、清晰, 利于识别:

$$\frac{H}{V} = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{H_{EW(i)}^2 + H_{NS(i)}^2}{2V_i^2}}}{m} \quad (2)$$

式中: m 为时间窗的个数, $m = 2 \times \frac{\text{时长}}{20.48} - 1$; $H_{EW(i)}$ 为第 i 时间窗 EW 方向的傅里叶谱; $H_{NS(i)}$ 为第 i 时间窗 NS 方向的傅里叶谱; V_i 为第 i 时间窗竖向的傅里叶谱。本文按照上述方法得到 6 个测试场地的地脉动 H/V 谱比。

图 2 给出了 6 个测试场地冻结期与非冻结期的地脉动 H/V 谱比, 表 3 给出了冻结期与非冻结期 H/V 谱比的峰值和卓越频率。由图 2 和表 3 可知, 冻结土层对地脉动 H/V 谱比同样有重要影响。

冻结期 6 个场地地脉动 H/V 谱比卓越频率均大于非冻结期, 冻土增加了场地的刚度, 使场地卓越频率增大, 但 6 个测试场地卓越频率增大的幅度不同。采用式(3)的形式, 对场地覆盖层厚度和卓越频率增大值进行拟合, 得到了二者的相关关系, 如式(4)所示:

$$\Delta f = ah^b \quad (3)$$

$$\Delta f = 325.6h^{-2.13} \quad (4)$$

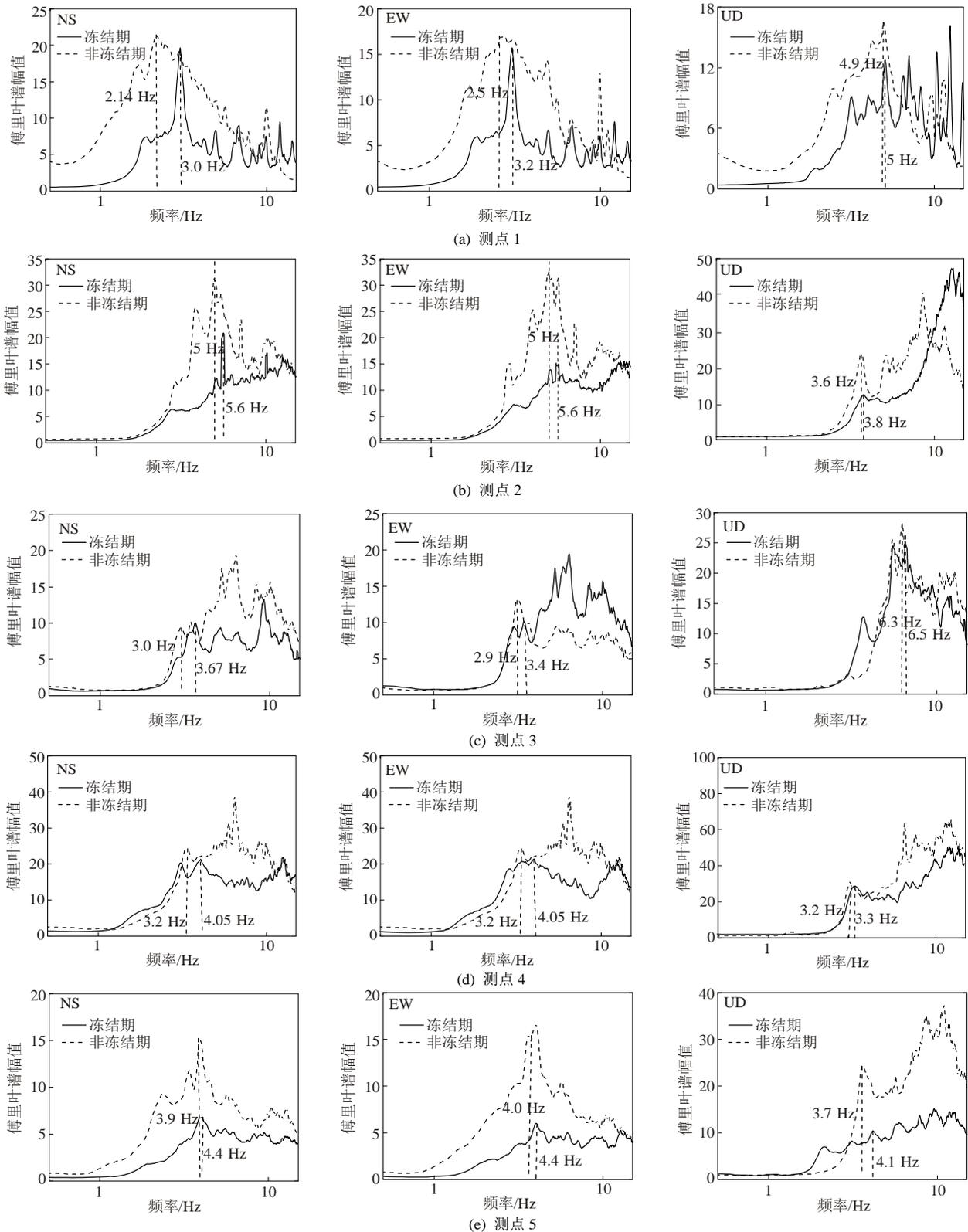
图 3 给出了场地覆盖层厚度与卓越频率增大值的拟合关系。相关系数为 $0.96 (> r(6-2)_{0.01} =$

0.917(相关系数临界表))。表明,场地覆盖层厚度与卓越频率增大值之间的相关性较强,拟合程度较高,卓越频率增大值随着场地覆盖层厚度的增加而减小。

场地3和场地4的覆盖层厚度接近,第一层都是回填土。场地3地表面为土质路面,场地4为沥青路面,二者冻结期场地卓越频率增大值分别为0.5

和0.35,相对偏差为43%,卓越频率增大幅度存在明显的差异;同样,场地5和场地6的覆盖层厚度相差也较小,第一层也都是回填土,场地5地表为土质路面,场地6地表为水泥路面。二者的冻结期场地卓越频率增大值分别为0.08和0.05,相对偏差为60%,卓越频率增大幅度也存在明显的差异。

从地脉动H/V谱比峰值看,冻结期场地谱比峰



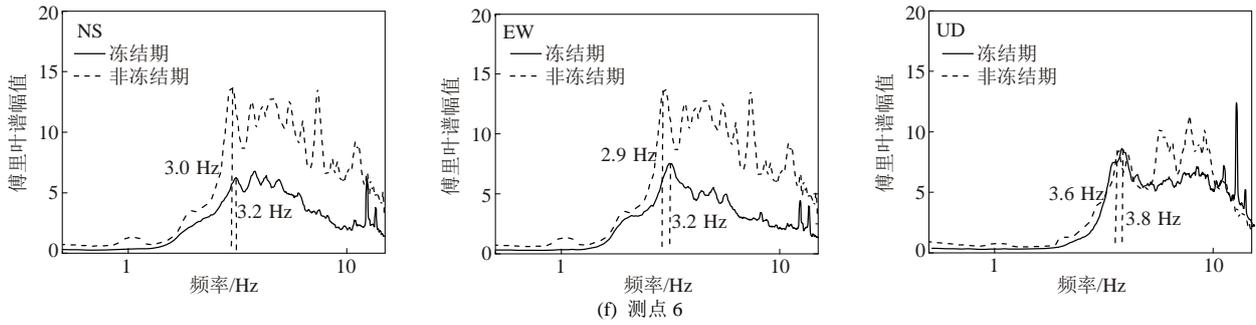


图 1 测试场地的地脉动三分向傅氏谱

Fig.1 Microtremor 3-component Fourier spectrum of test site

表 2 冻结期、非冻结期地脉动测试结果对比

Table 2 Comparison of Microtremor test results in different seasons

| 测点编号 | 方位 | 卓越频率 f_0 | | | | 峰值 A_0 | | | |
|------|----|------------|--------|-------------|--------------|----------|-----|----------|--------------|
| | | 非冻结期/Hz | 冻结期/Hz | f_0 差值/Hz | f_0 增大比例/% | 非冻结期 | 冻结期 | A_0 差值 | A_0 减小比例/% |
| 1 | NS | 2.1 | 3.0 | 0.9 | 43 | 24 | 19 | 5 | 21 |
| | EW | 2.5 | 3.2 | 0.7 | 28 | 18 | 15 | 3 | 17 |
| | UD | 4.9 | 5.0 | 0.1 | 2 | 17 | 13 | 4 | 24 |
| 2 | NS | 5.0 | 5.6 | 0.6 | 12 | 32 | 20 | 12 | 38 |
| | EW | 5.0 | 5.6 | 0.6 | 12 | 33 | 15 | 18 | 55 |
| | UD | 3.6 | 3.8 | 0.2 | 6 | 25 | 13 | 12 | 48 |
| 3 | NS | 3.0 | 3.6 | 0.6 | 20 | 10 | 9 | 1 | 10 |
| | EW | 2.9 | 3.4 | 0.5 | 17 | 12.5 | 10 | 2.5 | 20 |
| | UD | 6.3 | 6.5 | 0.2 | 3 | 27.5 | 25 | 2.5 | 9 |
| 4 | NS | 3.2 | 4.0 | 0.8 | 25 | 13 | 7 | 6 | 46 |
| | EW | 3.2 | 4.0 | 0.8 | 25 | 24 | 20 | 4 | 17 |
| | UD | 3.2 | 3.3 | 0.1 | 3 | 24 | 20 | 4 | 17 |
| 5 | NS | 3.9 | 4.4 | 0.5 | 13 | 31 | 29 | 2 | 6 |
| | EW | 4.0 | 4.4 | 0.4 | 10 | 16.5 | 5.2 | 11.3 | 68 |
| | UD | 3.7 | 4.1 | 0.4 | 11 | 24 | 10 | 14 | 58 |
| 6 | NS | 3.0 | 3.2 | 0.2 | 7 | 13 | 7 | 6 | 46 |
| | EW | 2.9 | 3.2 | 0.3 | 10 | 13.5 | 7.0 | 6.5 | 48 |
| | UD | 3.6 | 3.8 | 0.2 | 6 | 8.5 | 8.0 | 0.5 | 6 |

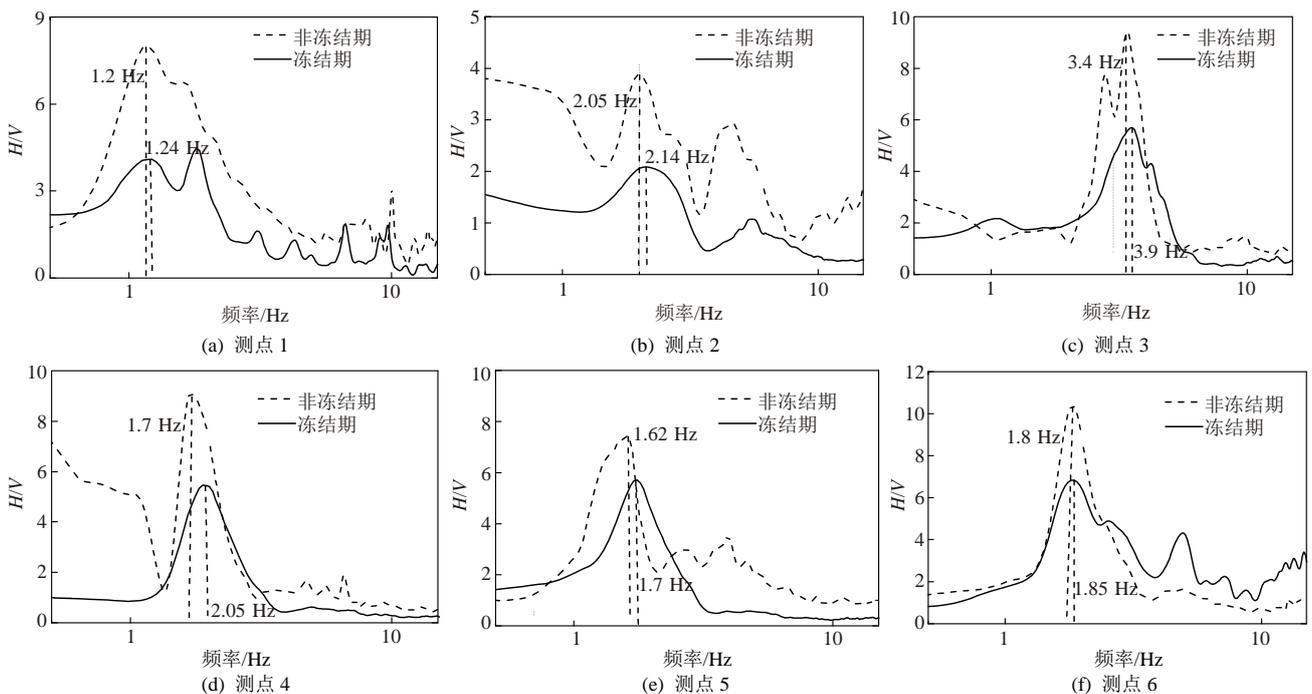


图 2 冻结期、非冻结期地脉动 H/V 谱比对比

Fig.2 Comparison of the H/V spectral ratio during frozen and unfrozen seasons

表 3 冻结期与非冻结期场地地脉动 H/V 谱比结果对比

Table 3 Comparisons of the H/V spectral ratio during frozen and unfrozen seasons

| 场地参数 测点编号 | 覆盖层厚度/m | 卓越频率 f_0 /Hz | | | 峰值 A_0 | | |
|--------------|---------|----------------|------|----------|----------|-----|----------|
| | | 非冻结期 | 冻结期 | f_0 差值 | 非冻结期 | 冻结期 | A_0 差值 |
| 1 | 75 | 1.20 | 1.24 | 0.04 | 8.0 | 2.7 | 5.3 |
| 2 | 45 | 2.05 | 2.14 | 0.09 | 3.9 | 2.1 | 1.8 |
| 3 | 22 | 3.40 | 3.90 | 0.50 | 9.4 | 5.8 | 3.6 |
| 4 | 23 | 1.70 | 2.05 | 0.35 | 9.0 | 5.5 | 3.5 |
| 5 | 58 | 1.61 | 1.70 | 0.08 | 6.5 | 5.8 | 0.7 |
| 6 | 62 | 1.80 | 1.85 | 0.05 | 10.8 | 7.8 | 3.0 |

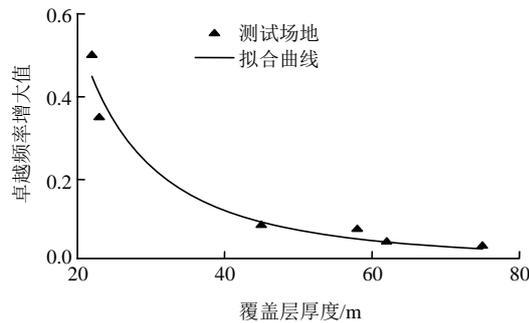


图 3 覆盖层厚度与卓越频率增大值拟合关系

Fig.3 Fitting curve of the sediment thickness and the increase of the predominant frequency

值明显小于非冻结期，峰值减小比例最大值为 66%，最小值为 11%。

地脉动 H/V 谱比一定程度上反映了场地的放大特征。Y. Nakamura^[10]在总结分析直接利用地脉动谱比法得到场地放大因子偏小的原因基础上，给出了基于地脉动谱比法估算场地放大的方法。Y. Nakamura^[10]假设场地覆盖层由一层土组成，则基岩振动与地表振动的关系为

$$B(t) = [S(t + h/V_s) + S(t - h/V_s)] / 2 \quad (5)$$

式中： $S(\cdot)$ 为地表振动； $B(t)$ 为基岩振动； h ， V_s 分别为覆盖层厚度以及等效剪切波速。 h/V_s 则可用下

式计算得到：

$$h/V_s = 1/(4f) \quad (6)$$

式中： f 为场地卓越频率，可由地脉动谱比求得。

场地传递函数是场地表层与基岩振动的比值，计算方法如下：

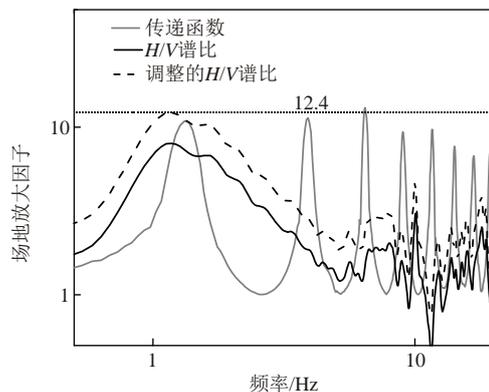
$$T(f) = F[S(t)](f) / F[B(t)](f) \quad (7)$$

式中： $F[\cdot]$ 为傅里叶变换。

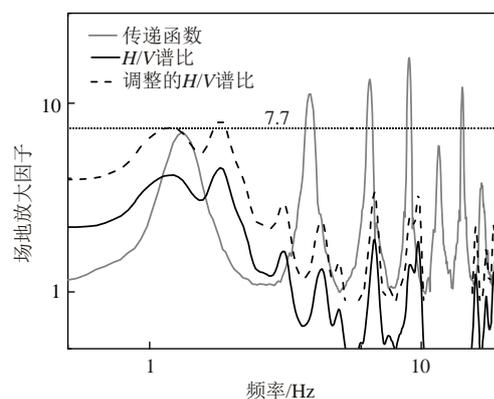
Y. Nakamura^[10]估算场地放大因子的修正方法步骤如下：

- (1) 计算地脉动 H/V 谱比，确定出场地卓越频率；
- (2) 通过式(5)并结合地表水平向地脉动记录计算基岩地脉动 $B(t)$ ；
- (3) 对地表地脉动记录 $S(t)$ ，基岩地脉动 $S(t)$ ，分别求傅里叶谱；
- (4) 按照式(7)计算传递函数 $T(f)$ ；
- (5) 计算出场地传递函数后，上下调整地脉动 H/V 谱比，使地脉动 H/V 谱比与传递函数峰值相重合，此时，调整后的谱比曲线的峰值就是所要估算的场地放大因子。

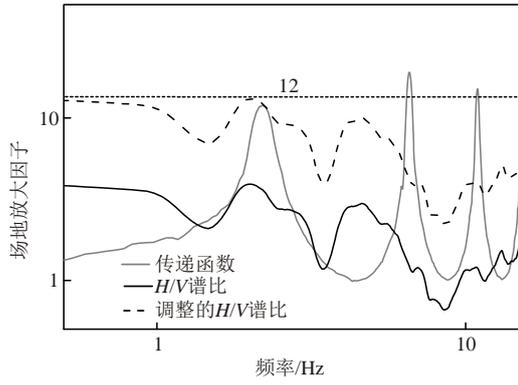
按照上述步骤，通过调整地脉动 H/V 谱比，得到了 6 个场地的传递函数，如图 4 所示。



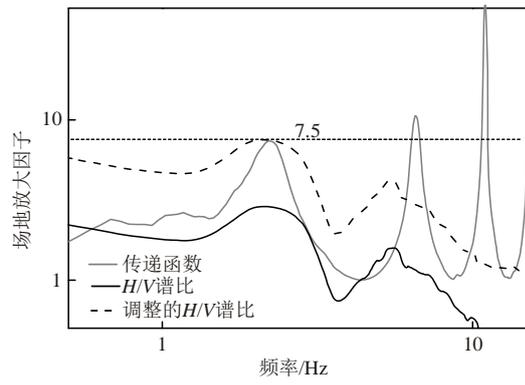
(a) 测点 1 (非冻结期)



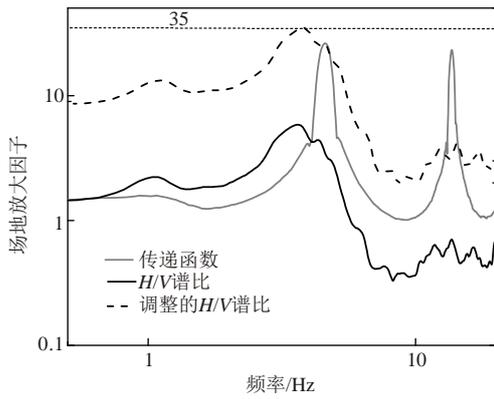
(b) 测点 1(冻结期)



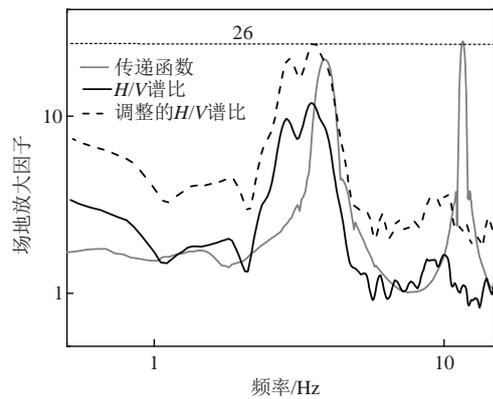
(c) 测点 2(非冻结期)



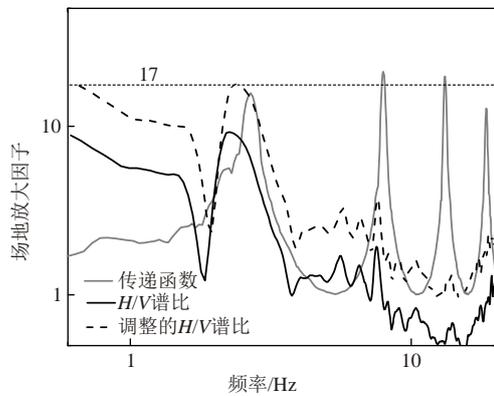
(d) 测点 2(冻结期)



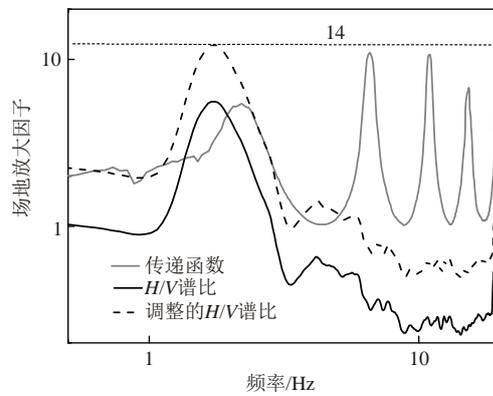
(e) 测点 3(非冻结期)



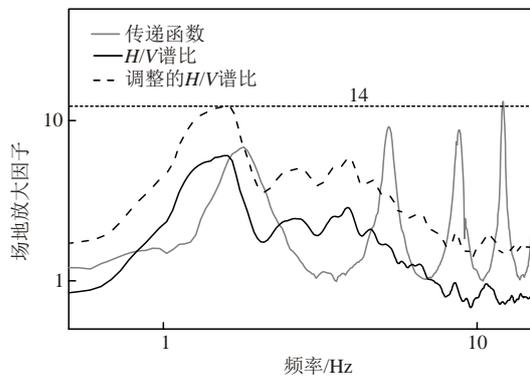
(f) 测点 3(冻结期)



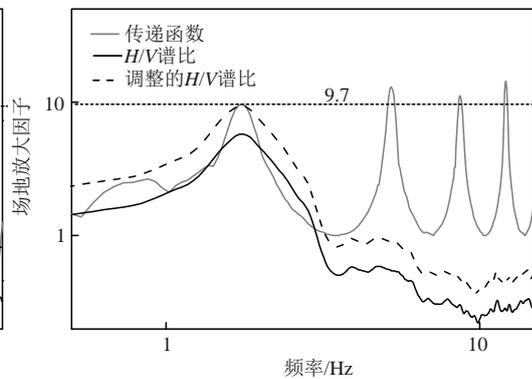
(g) 测点 4(非冻结期)



(h) 测点 4(冻结期)



(i) 测点 5(非冻结期)



(j) 测点 5(冻结期)

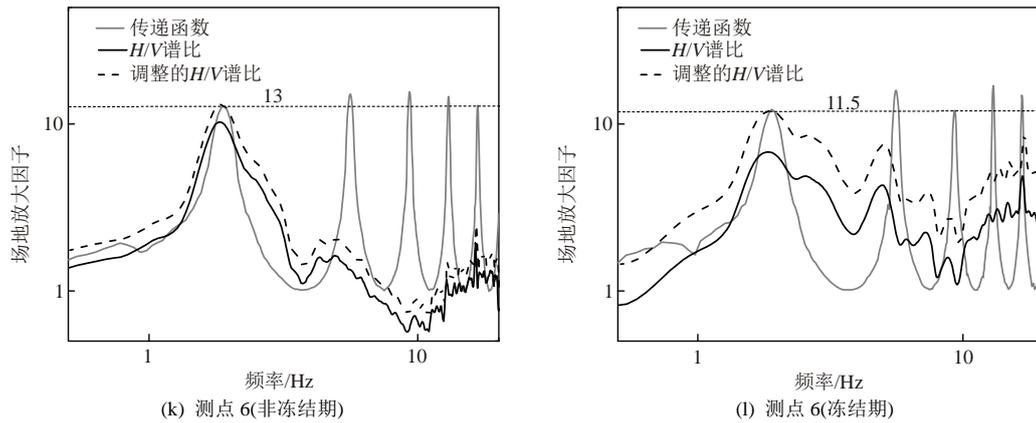


图4 原始和调整后的地脉动 H/V 谱比

Fig.4 Original and modified H/V curves

表 4 给出了冻结期、非冻结期测试场地放大因子。由图 4 和表 4 可知，地表为土质路面的场地，放大因子减小明显，4 个场地平均减小了 34%；地表为连续水泥面和沥青路面的场地，放大因子减小相对不明显，2 个测点平均减小了 14%。

表 4 场地放大结果对比

Table 4 Results of site amplification

| 场地参数 测点编号 | 测点地表 环境 | 场地放大 A_0 | | | |
|--------------|------------|------------|------|----------|--------------|
| | | 非冻结期 | 冻结期 | A_0 差值 | A_0 减小比例/% |
| 1 | 地面 | 12.4 | 7.7 | 4.7 | 38 |
| 2 | 地面 | 12 | 7.5 | 4.5 | 38 |
| 3 | 地面 | 35 | 25 | 10 | 29 |
| 4 | 沥青路面 | 17 | 14 | 3 | 17 |
| 5 | 地面 | 14 | 9.7 | 4.3 | 30 |
| 6 | 水泥面 | 13 | 11.5 | 1.5 | 11 |

同样采用式(3)的形式，对场地覆盖层厚度和场地放大减小值进行拟合，得到二者的相关关系：

$$\Delta A = 43.35h^{-0.61} \quad (8)$$

图 5 给出了场地覆盖层厚度与场地放大减小幅度的拟合曲线，相关系数为 $0.08 (< r(6-2)_{0.1} = 0.73$ (相关系数临界表))，表明，场地覆盖层厚度与场地放大减小值之间没有明显的相关性。

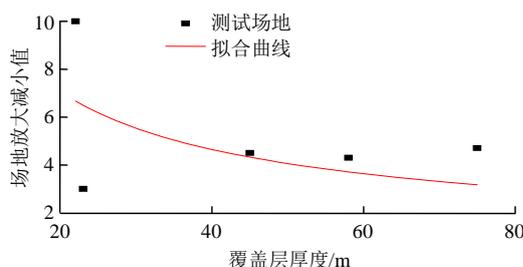


图 5 覆盖层厚度与场地放大减小值拟合关系

Fig.5 Fitting curve of the sediment thickness and the decrease of the magnification factor

综上，冻结期场地卓越频率增大幅度不仅与覆盖层厚度有关，还与场地表层刚度有关：场地覆盖层薄，卓越频率增大的幅度大，场地覆盖层厚，卓越频率增大的幅度小；当覆盖层厚度相近时，表层刚度小的场地(比如土质地面)，卓越频率增大幅度大于地表刚度大的场地(比如水泥、沥青路面)。冻结期场地放大因子降低幅度与场地表层刚度有关，与覆盖层厚度无关：表层刚度小的场地(比如土质地面)，场地放大因子降低幅度大于地表刚度大的场地(比如水泥、沥青路面)。

4 基于地脉动的冻土层厚度估算方法

冻土层厚度是冻土地震反应数值分析的重要参数。为探讨基于地脉动测定冻土层厚度的途径，进一步推导和建立了地脉动单点 H/V 谱比与冻土层厚度的关系。

冻结期、非冻结期场地的覆盖层厚度不变，通下列公式即可根据地脉动单点谱比卓越频率计算冻结期、非冻结期场地等效剪切波速 v_{sd} 和 v_{sx} ：

$$v_{sd} = 4f_{0d}H \quad (9)$$

$$v_{sx} = 4f_{0x}H \quad (10)$$

式中： f_{0d} 为冻结期场地卓越频率， f_{0x} 为非冻结期场地卓越频率， H 为测试场地覆盖层厚度。

v_{sd} 与 v_{sx} 之差则表示冻土层对场地等效剪切波速的影响。冻结期、非冻结期场地通过钻孔波速实测的场地等效剪切波速用 v_{sdz} 和 v_{sxz} 表示，则有

$$v_{sd} - v_{sx} = v_{sdz} - v_{sxz} \quad (11)$$

假设冻土层厚度为 H_f (m)，冬季地脉动测试时，哈尔滨最大冻土深度为 2.0 m，且测试场地第一层的厚度均为 2.0 m，所以剪切波在冻土层内传播的时间为 H_f / v_{d1} ，在覆盖层内传播的时间为 $\left(\frac{H_f}{v_{d1}} + \right.$

$$\frac{H_1 - H_f}{v_1} + \sum_{i=2}^n \frac{H_i}{v_i}, \text{ 则为覆盖层剪切波速为}$$

$$v_{sdz} = \frac{H}{\left(\frac{H_f}{v_{d1}} + \frac{H_1 - H_f}{v_1}\right) + \sum_{i=2}^n \frac{H_i}{v_i}} \quad (12)$$

式中: H_i 为第 i 层土的厚度; v_i 为第 i 层土的剪切波速; v_{d1} 为冻土层剪切波速; H_1 表示第一层土的厚度, 本文为 2 m。

B. R. Cox 等^[6]给出了场地地质单元以填土、黏土为主的场地, 冻结期与非冻结期场地剪切波速相对误差, 见图 6。由图 6 可知, 表层冻土的剪切波速是表层融土的 7 倍, 随着冻土深度的增加, 二者之间的差异呈线性减小, 在最大冻土深度范围内, 二者之间的误差逐渐趋向于 0, 剪切波在冻土层传递的时间 H_f / v_{d1} 由下式计算:

$$\frac{H_f}{v_{d1}} = \int_0^{H_f} \frac{dy}{\frac{7v_1 y}{H_f} + v_1} = \ln 8 \frac{H_f}{7v_1} \quad (13)$$

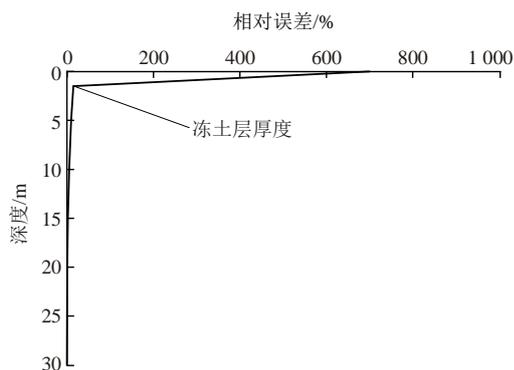


图 6 冻土地与非冻土地剪切波相对误差^[6]

Fig.6 Relative error of the shear wave between frozen and unfrozen sites^[6]

结合式(9)~(13)得冻土层厚度 H_f :

$$H_f = \frac{7}{5} v_1 \left[\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{v_i} - \frac{H}{4H(f_{0d} - f_{0x}) + v_{sz}} \right] \quad (14)$$

式(14)给出了冻土层厚度与场地卓越频率变化值之间的关系, 由式(14)可知, 同一场地, 场地的冻土层厚度与卓越频率增大幅度正相关; 对于不同场地而言, 由于场地剪切波速、覆盖层厚度的不同, 不能仅仅依靠卓越频率变化值来比较冻土层厚度的大小, 反之也不能通过冻土层的厚度来比较场地卓越频率的变化值。

结合测试场地非冻结期剪切波速和地脉动卓越

频率 f_{0d} , f_{0x} , 根据式(14), 即可得到冻土层厚度。根据地脉动单点谱比推算的 6 个地脉动测试场地的冻土层厚度, 如表 5 所示, 6 个测试场地冻土层厚度最大值为 1.97 m, 最小值为 1.65 m。哈尔滨冬季冻土的最大深度不超过 2 m, 所计算的冻土层厚度与实际冻土层厚度相符。

表 5 根据地脉动 H/V 谱比计算的冻土层厚度

Table 5 Frozen soil thickness estimated by microtremors H/V spectra

| 场地参数 测点编号 | 卓越频率 f_0/Hz | | | 冻土层 厚度/m |
|--------------|----------------------|------|----------|-------------|
| | 非冻结期 | 冻结期 | f_0 差值 | |
| 1 | 1.20 | 1.24 | 0.04 | 1.84 |
| 2 | 2.05 | 2.14 | 0.09 | 1.71 |
| 3 | 3.40 | 3.90 | 0.50 | 1.89 |
| 4 | 1.70 | 2.05 | 0.35 | 1.65 |
| 5 | 1.62 | 1.70 | 0.08 | 1.97 |
| 6 | 1.80 | 1.85 | 0.05 | 1.91 |

5 季节性冻土对场地分类的影响

场地类别是对场地地震动放大效应简化估计的基础, 不同类别场地的设计地震动参数有很大差别。冻土层的存在使场地地表的剪切波速增大, 这一改变是否会引起场地类别划分的改变值得进行深入考察。本节通过哈尔滨 6 个测试场地, 研究了冻土层对哈尔滨场地类别划分的影响。

等效剪切波速是中、美规范中场地类别划分的首要参数。根据下列公式计算了 6 个测试场地冻结期、非冻结期的等效剪切波速 v_{s20} 和 v_{s30} :

$$v_{s20} = \frac{d_0}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i}} \quad (15)$$

$$v_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i}} \quad (16)$$

式中: d_0 为覆盖层厚度与 20 m 中的小者, d_i 为第 i 层厚度, v_i 为第 i 层剪切波速。按照规范^[11-12]对 6 个测试场地进行分类, 分类结果见表 6。

分析表 6 可知, 冻土使场地等效剪切波速 v_{s20} 平均增大 13%; v_{s30} 平均增大 11%。无论按照中国规范还是美国规范, 测试场地非冻结期的场地类别与冻结期的场地类别一致。为了更加深入研究冻土层对哈尔滨场地分类的影响, 另外还收集了 28 个哈尔滨其他场地的钻孔资料, 其中 6 个场地属于 II

表 6 场地分类对比
Table 6 Site classification comparison

| 场地参数 测点编号 | v_{s20} | | | | v_{s30} | | | | | |
|--------------|-------------------------------|----------|------------------------------|----------|----------------------|-------------------------------|----------|------------------------------|----------|----------------------|
| | 非冻结期/ ($m \cdot s^{-1}$) | 场地 分类 | 冻结期/ ($m \cdot s^{-1}$) | 场地 分类 | v_{s20} 增大 比例/% | 非冻结期/ ($m \cdot s^{-1}$) | 场地 分类 | 冻结期/ ($m \cdot s^{-1}$) | 场地 分类 | v_{s30} 增大 比例/% |
| 1 | 180 | III类 | 200 | III类 | 11 | 205 | D | 221 | D | 8 |
| 2 | 215 | II类 | 238 | II类 | 10 | 240 | D | 259 | D | 8 |
| 3 | 241 | II类 | 278 | II类 | 15 | | | | | |
| 4 | 244 | II类 | 290 | II类 | 19 | | | | | |
| 5 | 165 | III类 | 185 | III类 | 12 | 194 | D | 227 | D | 17 |
| 6 | 188 | III类 | 212 | III类 | 13 | 213 | D | 233 | D | 9 |

类场地，22个场地属于 III 类场地^[9]。

冻结期，测试场地的 v_{s30} 平均增加了 11%，假设哈尔滨其他场地的 v_{s30} 也增加了 11%。图 7 给出了 B. R. Cox 等^[6]中 Alaska 地区以及哈尔滨地区不同季节等效剪切波速 v_{s30} 对比图。由图 7 可知，哈尔滨夏季场地的 v_{s30} 较小，最大值为 290 m/s，Alaska 地区 v_{s30} 相对而言较大，最大值为 326 m/s。哈尔滨场地冻结期仍旧是 D 类场地，而 Alaska 地区则有 3 个测点由非冻结期的 D 类场地变成 C 类场地，这 3 个测点的非冻结期 v_{s30} 均大于 300 m/s。

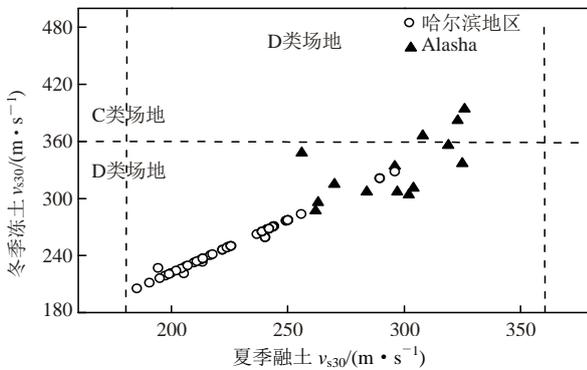


图 7 不同地区冻结期与非冻结期 v_{s30} 对比图

Fig.7 Comparisons of frozen and unfrozen v_{s30} in different regions

冻结期，测试场地的 v_{s20} 平均增加了 13%，同样假设哈尔滨其他场地的 v_{s20} 也增加了 13%。图 8 为哈尔滨非冻结期、冻结期场地按照中国场地分类规范分类对比图，由图 8 可知，对于 II 类场地，其场地覆盖层厚度为 5~50 m，等效剪切波速的增加不影响场地分类；对于 III 类场地，大多数场地等效剪切波速增加 13% 之后也 < 250 m/s，只有 4 个场地的等效剪切波速 > 250 m/s，场地类别由 III 类变成 II 类。

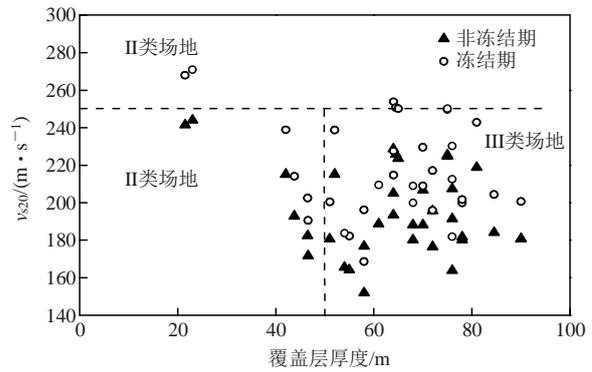


图 8 哈尔滨场地分类

Fig.8 Harbin site classification

综上所述，哈尔滨非冻结期场地的等效剪切波速 v_{s30} 较小，冻结期 v_{s30} 增加后依旧小于 360 m/s，由美国场地分类规范所规定的场地分类阈值可知，冻结期与非冻结期场地分类结果一致。哈尔滨非冻结期场地以 II，III 类场地为主，由于 II 类场地的覆盖层厚度 > 5 m，冻结期场地等效剪切波速 v_{s20} 的增加不影响 II 类场地分类，对于 v_{s20} 接近 250 m/s 的 III 类场地，冻结期 v_{s20} 增加会使该场地类别变成 II 类场地。

6 结 论

本文对比分析了不同场地冻结期和非冻结期地脉动特征，采用地脉动单点 H/V 谱比法研究了冻结土层对场地卓越频率、放大因子、等效剪切波速等特征参数以及场地分类的影响，提出了一种冻土层厚度的估算方法，得出如下结论：

- (1) 冻结土层使地脉动水平分量卓越频率增大，对竖向分量卓越频率的影响不明显；冻结土层使地脉动水平、竖向分量峰值减小，并且水平、竖

向峰值减小比例无明显差别。

(2) 冻结土层使场地卓越频率增大, 场地放大因子减小。冻结期场地卓越频率增大的幅度除了与覆盖层厚度呈负相关外, 还与场地表层刚度有关, 当覆盖层厚度相近时, 地表刚度小的场地卓越频率增大的幅度大于地表刚度大的场地。冻结期场地放大因子降低的幅度与覆盖层厚度无关, 与场地地表刚度密切相关, 地表刚度小的场地, 其放大因子降低的幅度大于地表刚度大的场地。

(3) 通过理论分析建立了冻土层厚度与地脉动谱比卓越频率变化值之间的关系, 结合场地剪切波速资料以及冻结期与非冻结期地脉动谱比卓越频率变化值, 便可估算出冻土层厚度。

(4) 冻结土层使地脉动观测场地的等效剪切波速 v_{s20} 平均增加 13%, v_{s30} 平均增加 11%。在哈尔滨地区, 非冻结期场地以 II, III 类场地为主, 冻结期 v_{s20} 的增加未引起 II 类场地类别发生变化, 对于 v_{s20} 接近 250 m/s 的 III 类场地, v_{s20} 增加会使该场地类别变成 II 类; 冻结期 v_{s30} 的增加未引起 D 类场地类别发生变化。

参考文献(References):

- [1] 陈卓识, 孟上九, 袁晓铭. 中等强度地震下季冻区场地响应影响研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增 1): 166 - 171.(CHEN Zhuoshi, MENG Shangjiu, YUAN Xiaoming. The impact of parameters in seasonal frozen area response under moderate intensity earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(Supp.1): 166 - 171.(in Chinese))
- [2] 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]. 岩石力学与工程学报, 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 Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1 837 - 1 840.(in Chinese))
- [3] LEBLANC A M, FORTIER R, ALLARD M, et al. Seismic cone penetration test and seismic tomography in permafrost[J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 2004, 41(5): 796 - 813.
- [4] QI J, MA W, SUN C, et al. Ground motion analysis in seasonally frozen regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 44(2): 111 - 120.
- [5] 高峰, 陈兴冲, 严松宏. 季节性冻土和多年冻土对场地地震反应的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(8): 1 639 - 1 644.(GAO Feng, CHEN Xingchong, YAN Songhong. Influence of permafrost and seasonally frozen soil in seismic responses of sites[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1 639 - 1 644.(in Chinese))
- [6] COX B R, WOOD C M, HAZIRBABA K. Frozen and unfrozen shear wave velocity seismic site classification of Fairbanks, Alaska[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2015, 26(3): 118 - 145.
- [7] 齐吉琳, 李海鹏, 赖远明, 等. 季节冻土地上的地脉动特征[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4): 449 - 453.(QI Jilin, LI Haipeng, LAI Yuanming, et al. Characteristics of microtremor in seasonally frozen ground[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(4): 449 - 453.(in Chinese))
- [8] JUNG H O, KIM H J, JO B G, et al. The microtremor HVSRs in the SW Korean Peninsula I: characteristics of the HVSR peak frequency and amplification[J]. Science, 2010, 327(327): 94 - 97.
- [9] 刘宇实, 师黎静. 基于地脉动谱比法的场地特征参数快速测定[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13): 235 - 242.(LIU Yushi, SHI Lijing. Site characteristic parameters quick measurement based on micro-tremor's H/V spectra[J]. Journal of Vibration and shock, 2018, 37(13): 235 - 242.(in Chinese))
- [10] NAKAMURA Y. A modified estimation method for amplification factor of ground and structures using the H/V spectral ratio[J/OL]. <http://www.sdr.co.jp>, 2012 - 03 - 01.
- [11] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.(The National Standards Compilation Group of the People's Republic of China. GB50011—2010 Code for seismic design of building[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.(in Chinese))
- [12] Building Seismic Safety Council(BSSC). NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures[S]. Washington, D C: Federal Emergency Management Agency, 2003.