

冻土场地地震加速度反应谱研究

Research on earthquake acceleration response spectrum of frozen soil ground

徐学燕, 徐春华, 李晓稚
(哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 根据波动理论考虑土体的非线性, 得到地震反应谱的解答, 应用求解水平层状场地地震反应谱的等效线性化程序, 数值求解不同负温、不同覆盖层厚度多年冻土地震加速度反应谱, 季节冻土地震加速度反应谱。计算结果表明: 负温对多年冻土地震加速度反应谱的影响显著, 随着冻结温度的降低, 加速度反应谱的加速度峰值逐渐降低, 并且其峰值前移, 场地卓越周期减小; 随着冻土覆盖层厚度的增加, 反应谱峰值先增大后减小; 季节冻土地震加速度反应谱高于冬季, 但在短周期阶段也出现了反超的现象。

关键词: 冻土; 加速度反应谱; 反应谱峰值; 负温; 冻土覆盖层厚度; 季节冻土地震

中图分类号: TU 445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)06-0680-04

作者简介: 徐学燕(1946-), 女, 北京人, 哈尔滨工业大学岩土工程专业教授、博导, 主要从事岩土工程、冻土工程、地基基础工程事故机理分析与防治等方面的研究工作。

XU Xue-yan, XU Chun-hua, LI Xiao-zhi

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: According to fluctuation theory, considering soil non-linearity, earthquake response spectrum answer is obtained. By using plane stratum earthquake response equivalent linearization program, earthquake response spectrum is calculated with different temperature and different overlay thickness on permafrost site and seasonal frozen soil site. It indicates that temperature has great influence to earthquake response spectrum on permafrost site, its acceleration peak value decrease and move forward with the temperature decrease, site predominant period decrease either; its value increase first and then decrease with the overlay thick increase; earthquake response is greater in summer than that in autumn, but it also has the results in reverse in short period.

Key words: frozen soil; acceleration response spectrum; peak of response spectrum; negative temperature; depth of frozen soil covering; seasonally frozen ground

0 引言*

地震发生时, 对构筑物结构动力反应产生重要影响的因素为地震动的震幅、频谱。震幅一般指地震加速度、速度或位移的峰值, 由于加速度 a 的大小可以表示地震动的强弱, 而且与质点运动的惯性力相联系, 因此我国抗震规范均采用水平地震加速度作为衡量地震震动震幅的指标。根据大量的地震记录可知在地震的全过程中地震动加速度的振幅与频率都在迅速变化, 各种频率成分十分丰富, 各种频率出现的频度又各不相同, 因此“谱”就将含有复杂成分的东西, 分解为按某一特性值的大小, 依次排列而成的图形。地震加速度反应谱是按其地震频率(或周期)高低次序排列而成的谱^[1]。对于非冻土地震加速度反应谱的研究成果屡见报道, 但冻土地震加速度反应谱研究尚未见到相关报道。我国正在实施的西部大开发战略中, 青藏铁路工程、西线南水北调、西气东输等重大工程中都不可避免地遇到冻土地震的构筑物抗震设防问题, 因此开展该方面的研究势在必行。

1 加速度反应谱的计算

一般加速度反应谱的横坐标为构筑物的自振周期, 纵坐标为地震时产生的最大加速度, 由于加速度与震动质量的乘积为惯性力, 因而加速度大小反映地震惯性力的大小。反应谱是在给定地震震动作用期间, 单质点体系的最大位移反应、最大加速度或最大加速度反应随质点自振周期变化的曲线^[2]。即同一阻尼比下, 不同周期的场地在某地震波作用下的最大加速度反应, 加速度反应谱与场地的类别息息相关。冻土地震中, 由于土的冻结作用使场地的刚度、卓越周期发生了变化, 地震加速度反应谱也将改变。

1.1 波动理论算法

采用波传播理论的频域方法计算地震反应^[3], 可以分为下列3步: ①将输入的地震波由傅氏变换分解为一系列的简谐波; ②确定传递函数, 剪切波竖向传播仅产生水平向位移 $u = u(x, t)$, 它必须满足波动方

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40071021); 中国科学院冻土工程国家重点实验室资助项目
收稿日期: 2002-12-20

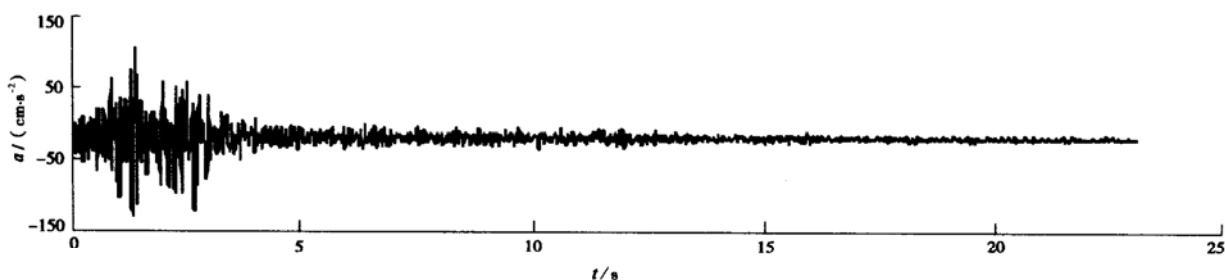


图1 Qanew 地震波加速度时程

Fig. 1 Qanew earthquake acceleration time curve

程:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^2 u}{\partial x^2 \partial t}, \quad (1)$$

式中 ρ 为质量密度; G 为剪切模量; η 为黏滞(阻尼)系数。

③考虑土的非线性, 对每一土层分别计算其中部的等效剪应变:

$$\gamma_{\max} = \frac{\ddot{u}_{\max}}{\sum_{j=0}^{N/2} |a_j|^2} \cdot \sum_{j=0}^{N/2} |\Gamma_j|^2, \quad (2)$$

式中 $\ddot{u}_{\max}$ 、 a_j 是已知的, Γ_j 为求出的传递函数。

然后, 根据试验确定的剪切模量和阻尼比随剪应变变化的曲线, 内插得与等效剪应变相应的模量和阻尼比值^[4], 它们通常与初始假定值相差甚大。可用新插得的参数重新计算传递函数和剪应变, 直到所有土层计算所采用的模量和阻尼比与按等效剪应变内插得数值之间的相对误差小于允许规定值为止。

大量低温动三轴试验结果表明冻土动力非线性参数与非冻土相关参数的根本差异是前者与土体温度、围压息息相关, 文献[4~7]详细论述了冻土的动剪切模量、动阻尼比、剪切波速与冻土温度、含水率、围压、动荷载幅值、频率之间的定量关系与数值, 篇幅有限, 本文不宜重复。

1.2 地震反应谱计算

单质点运动方程为

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = -a(t), \quad (3)$$

式中 ζ 为阻尼系数; $a(t)$ 为输入加速度。

式(3)可写成

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = -a_i - \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i}(t - t_i), \quad (4)$$

式中 $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$, $\Delta a_i = a_{i+1} - a_i$ 。

式(4)的解为

$$x = e^{-\zeta\omega(t-t_i)} \left[c_1 \sin \omega \sqrt{1-\zeta^2}(t-t_i) + c_2 \cos \omega \sqrt{1-\zeta^2} \cdot (t-t_i) \right] - \frac{a_i}{\omega^2} +$$

$$\frac{2\zeta}{\omega^3} \cdot \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i} - \frac{1}{\omega^2} \cdot \frac{\Delta a_i}{\Delta t_i}(t - t_i), \quad (5)$$

$$\bar{x}_{i+1} = A(\zeta, \omega, \Delta t_i) \bar{x}_i + B(\zeta, \omega, \Delta t_i) \bar{a}_i. \quad (6)$$

$$\text{式中 } \bar{x}_{i+1} = \begin{bmatrix} x_{i+1} \\ \dot{x}_{i+1} \end{bmatrix}; \bar{x}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ \dot{x}_i \end{bmatrix}; \bar{a}_i = \begin{bmatrix} a_i \\ \dot{a}_i \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}.$$

最后, 绝对加速度可由下式求得

$$\ddot{x}_i = \ddot{x}_i + a_i = -(2\zeta\omega\dot{x}_i + \omega^2x_i). \quad (7)$$

由式(6)可见, 已知 $t = t_i$ 时刻的位移 x_i 和速度 $\dot{x}_i$, 则可由该式求出时刻 $t = t_{i+1}$ 的 x_{i+1} 和 $\dot{x}_{i+1}$, 再由式(7)求 $\ddot{x}_{i+1}$ 。由于地震开始时地面是静止的, 即 $x_0 = 0$, $\dot{x}_0 = 0$, 因此可重复利用式(6)和(7)逐步计算单质点的地震反应。

2 Qanew 地震波作用下冻土地加速度反应谱的分析

2.1 不同负温条件下多年冻土地场的加速度反应谱

多年冻土地场随着当地年平均气温的变化, 场地冻土的温度也将有所变化。冻土温度的变化使冻土的物理、力学性质产生显著的改变^[8], 对冻土地场的地震反应也必然产生影响。本次计算采用黑龙江省图里河多年冻土区的冻土物理力学参数^[9], 冻土深度为 12 m。

输入基岩地震动采用 Qanew 地震波加速度记录, 该地震波的采样时间间隔为 0.01 s, 卓越周期为 0.11 s, 最大加速度值为 150.322 cm/s²。其加速度时程如图 1 所示。将计算参数输入程序, 分别计算 -2℃、-5℃、-10℃3 种负温条件下黑龙江省图里河多年冻土地场的加速度反应谱如图 2 所示。可以看出, 冻土地场的加速度反应谱形状呈尖峰形, 卓越周期大约 0.1 s 左右。随着冻土温度的降低, 冻土地场加速度反应谱的峰值逐渐降低, 并且其峰值前移, 这主要是因为随着冻土的冻结温度的降低, 冰晶体密度增大, 冰晶体硬

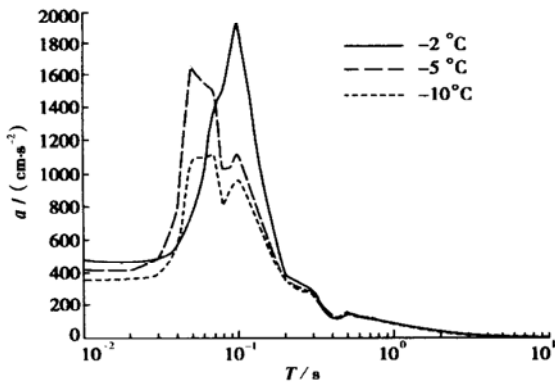


图2 不同负温多年冻土场地的加速度反应谱

Fig. 2 Acceleration response spectrum of perennally frozen ground in the condition of different temperature

度提高,其动模量明显增大,随着冻土地地的刚度增大,其卓越周期减小,因而加速度反应谱的峰值提前,幅值降低。而且,随着冻结温度的降低,这种变化是显著的,在场地类型划分时与非冻土地地类型划分的因素相比较,增加冻土负温这一指标是十分重要的。

2.2 不同冻土覆盖层厚度多年冻土地地的加速度反应谱

分别计算覆盖层厚度为 8, 12, 40 m 三种条件下多年冻土地地的加速度反应谱结果如图 3, 4。由计算结果可以看出,覆盖层厚度对冻土地地加速度反应谱的影响是非常显著的。覆盖层厚度由 8 m 增加到 12 m,反应谱的峰值略有增大,这是因为随冻土地地覆盖层厚度的增加,对地震波的放大作用增强而引起的;随着冻土覆盖层厚度的增加,冻土地地加速度反应谱的形状由窄变宽,整个场地的卓越周期变长,反应谱的峰值后移。这两点与非冻土地地的结论是一致的。然而当覆盖层厚度由 12 m 增加到 40 m 时,该冻土地地的反应谱峰值下降,这是与非冻土地地不同的反应,这种现象主要是由于下部多年冻土剪切波速增大,多年冻土地地的刚度增加的缘故。

2.3 季节冻土地地加速度反应谱

季节冻土地地剖面数据取自哈尔滨工业大学 16[#]楼场地^[10],场地土基本上都是粉质黏土,季节冻深为 2.3 m。

分别计算冬夏两季季节冻土地地的加速度反应谱如图 5 所示。可以看出,季节冻土地地冬夏两季的反应谱存在着很大的不同,冬季地表土层的冻结,明显的改变着冻土地地的刚度和周期特性,季节冻土层在冬季使得冻土地地地基刚度增大,加速度反应谱的峰值有所降低,反应谱的频率影响范围变小,反应谱形状变窄。季节冻土层冬季的冻结使得场地的卓越周期与夏季相比有所减小,这就导致了冬季加速度反应谱的峰

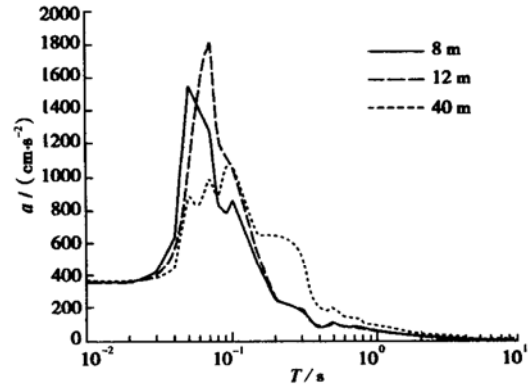


图3 不同冻土覆盖层厚度冻土地地的冬季加速度反应谱

Fig. 3 The winter acceleration response spectrum of perennally frozen ground in the condition of different covering

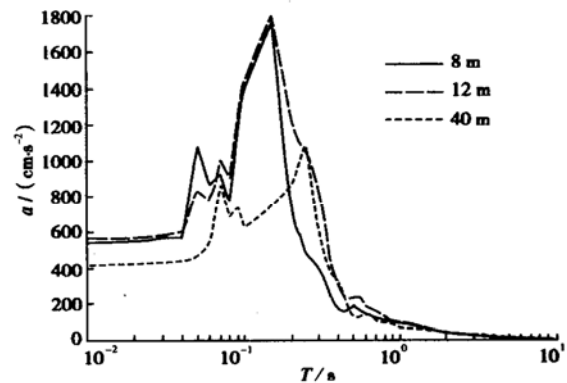


图4 图4 不同冻土覆盖层厚度冻土地地的夏季加速度反应谱

Fig. 4 The summer acceleration response spectrum of perennally frozen ground in the condition of different covering

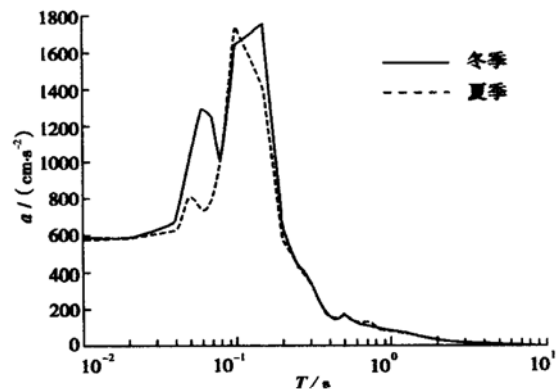


图5 季节冻土地地的冬、夏两季加速度反应谱

Fig. 5 The winter and summer acceleration response spectrum of seasonally frozen ground

值提前。因而,对于同一季节冻土地地上的建筑物,在冬季和夏季分别发生地震时,由于共振效应,在夏季,长周期柔性结构震害严重,在冬季,则短周期刚性结构震害严重,这一结果与黑龙江省德都地区的震害现象^[3]正好相符合。

3 结 论

(1) 加速度反应谱的计算结果表明, 冻土地地的加速度反应谱与非冻土地地相比, 反应谱峰值降低, 形状呈尖峰形, 由所选地震波得到的加速度反应谱的卓越周期为 0.1 s 左右。

(2) 负温对多年冻土地地加速度反应谱的影响显著, 随着冻土温度的降低, 冻土地地加速度反应谱的峰值逐渐降低, 并且其峰值前移, 场地卓越周期减小。

(3) 冻土地地冻土覆盖层厚度增加的数值较小时, 冻土地地对地震波的放大作用增强, 加速度反应谱的峰值增大, 与非冻土地地的反应趋势相同; 但当冻土覆盖层厚度大幅度增加时, 冻土地地的加速度反应谱峰值下降。

(4) 季节冻土地地冬季的加速度反应谱峰值和夏季相比呈降低的趋势, 并且峰值前移。因而在冬季短周期刚性结构震害严重, 夏季反而是长周期柔性结构震害严重, 与非季节冻土地地的震害不相同。

参考文献:

- [1] 刘惠珊, 张在明. 地震区的场地与地基基础[M]. 北京: 中国工业出版社, 1994.
- [2] JGJ/T 97—95, 工程抗震术语标准[S]. 北京: 中国工业出版社, 1995.
- [3] 廖振鹏, 李小军. 地表土层地震反应的等效线性化解法[A]. 地震小区划—理论与实践[C]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [4] 徐春华, 徐学燕, 等. 循环荷载下冻土的动阻尼比试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(6): 22–25.
- [5] 徐学燕, 仲丛利. 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.
- [6] 凌贤长, 徐学燕, 徐春华. 冻结哈尔滨粉质黏土超声波速测定试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 456–459.
- [7] Li Xiaozhi, Xu Xueyan, Xu Chunhua. The influence on ground seismic hazard of frozen soil shear-wave velocity[A]. Proceedings of 5th International Symposium on Permafrost Engineering[C]. Yakutsk, Russia, 2002. 43–47.
- [8] Puzrin A M, Shiran A. Effects of the constitutive relationship on seismic response of soil[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19: 305–318.
- [9] 黑龙江省图里河多年冻土岩土勘察报告书[R]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2001.
- [10] 哈尔滨工业大学 16# 楼岩土工程勘察报告书[R]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学建筑设计研究院岩土工程所, 2000.

国际环境振动高级论坛 ISEV' 2003 总结

由浙江大学岩土工程研究所和日本岩土工程学会环境振动新技术委员会主办的“国际环境振动高级论坛 ISEV' 2003”, 于 2003 年 10 月 16~18 日在浙江大学举行。这次论坛总结了国际上现阶段在环境振动及相关领域方面的研究成果, 是新世纪检阅、推动和发展环境振动及相关学科领域的一次盛会。

论坛得到国家自然科学基金会大力支持和国内外广大科研工作者和工程技术人员的积极响应。经学术委员会审查, 有 45 篇论文收入专集《Environmental Vibration: Prediction, Monitoring, and Evaluation》(陈云敏, Hirokazu Takemiva 主编, 交通出版社出版)。内容包括土体中波传播的基本问题; 地基和结构振动引起的环境问题; 地基和结构振动分析; 桥梁结构振动的检测和评估; 环境振动的评估和减灾; 铁路技术中的环境问题; 高速铁路等, 反映了国内外在环境振动及相关桥梁、高速铁路等领域的最新进展。所收录的论文理论水平高、实用性强, 可供从事设计、施工、管理和科研的科技人员和大专院校有关专业的师生参考。

开幕式由本次论坛组委会主席陈云敏教授主持。出席这次论坛的有浙江大学副校长倪明江教授, 美国工程院院士包亦

兴教授, 日本岩土工程学会环境振动新技术委员会、日本冈山大学教授 Hirokazu Takemiva, 中国工程院院士、浙江大学建筑工程学院院长董石麟教授, 浙江大学曾国熙教授。来自美国、日本、中国台湾、中国香港和国内知名高校、科研和设计单位的 63 位正式代表出席会议。另有约 50 位学生代表参加了会议。这些专家、学者的到来使本次论坛充分体现了我国及国际上在环境振动领域的发展水平。16, 17 日, 到会的专家和代表们按照土体中波传播的基本问题, 地基和结构振动引起的环境问题, 地基和结构振动分析, 桥梁结构振动的检测和评估, 环境振动的评估和减灾, 铁路技术中的环境问题, 高速铁路等 7 个专题作了水平报告与分组报告。通过交流和讨论, 对环境振动的内涵有了进一步的理解。其中 15 个水平报告充分反映了国内外相关领域的最新进展。

论坛在热烈的气氛中闭幕。为了进一步推动环境振动方面的研究和加强国际合作, 大会筹委会决定下一届国际环境振动高级论坛 (ISEV) 将于 2005 年在日本举办。

如需要购买大会论文集, 请汇款 95 元 (含邮费) 至: 杭州浙江大学建筑工程学院岩土工程研究所王常晶, 邮编: 310027。

(浙江大学岩土工程研究所 供稿)