

冻融循环作用下边坡地震动稳定性研究¹

王文丽^{1,2)} 王兰民^{1,2)} 郑龙¹⁾

1) 中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000

2) 兰州大学土木工程与力学学院, 兰州 73000

摘要 季节冻土区和多年冻土区边坡在经历冻融循环后其力学性质产生较大变化, 边坡稳定性随之改变, 在地震动荷载作用下存在着巨大的安全隐患。本文基于 FLAC 数值软件, 将考虑冻土相变的显热熔算法引入热学计算模块, 并结合静态边界动力计算模块, 建立了适用于冻融循环条件下的边坡地震动稳定性分析平台。研究了冻融循环对边坡土体地震动稳定性的影响。结果表明, 在发生冻融循环的季节冻土区或多年冻土已经退化的区域, 地震动后边坡的塑性破坏形式主要取决于发生冻融循环的活动层的范围。

关键词: 冻融循环 边坡 地震动稳定性

引言

随着我国在寒冷地区大规模工程建设的深入开展, 由工程扰动诱发的冻土退化与冻融循环所引起的工程稳定性, 以及构筑物病害等工程问题日益突出(王兰民等, 2007)。尤其在季节性冻土区, 新修边坡会经历剧烈的冻融循环, 其力学性质会产生相应变化。在此前提下, 边坡地震动稳定性也会随之改变(孟庆生, 2011)。冻融循环正是通过改变土体强度参数来影响边坡稳定性的。因此需要准确掌握岩土强度在冻融前后的变化规律, 来研究冻融作用对地震动稳定性的影响。

根据前人的研究, 对于不同物理性质的土体, 冻融作用对土体强度的影响结果存在较大的差异(Swan 等, 1998; Aoyama 等, 1985; Ogata 等, 1985; 齐吉琳等, 2003)。不同地区的土体, 其物理性质存在较大差异, 在不同试验条件下会产生差异性较大的研究结果。因此在对具体的边坡稳定性计算分析时, 需要根据实际研究区域的土体性质来获取相关强度参数, 并借鉴已有的关于冻融循环后土体强度变化的研究成果, 来研究冻融后土体地震动稳定性的变化规律。

目前在岩土工程问题的计算中, 广为使用的是有限元方法(李晶岩等, 2011)。在融土地区, 土体的力学性质不会随地温的变化而发生较大改变, 因此进行岩土工程问题的有限

1 基金项目 中国地震局兰州地震研究所地震科技发展青年基金“2011Q05”资助

[收稿日期] 2012-12-28

[作者简介] 王文丽, 女, 生于 1981 年。助理研究员, 兰州大学在读博士研究生。主要从事地震动工程安全稳定性的研究。E-mail: tywangwenli_2005@163.com

元计算时不需要考虑温度场影响。在季节冻土区或多年冻土区，浅层土体随着季节的交替变化会经历反复的冻融作用，其力学性质也会随之发生较大改变（Leroueil 等，1991；Eigenbrod 等，1996；Ono 等，1997）。因此，在计算寒冷地区的相关岩土工程问题时，需要考虑温度场变化的影响，以此来确定土体内发生冻融循环的范围（即：活动层）。地震动作用下的边坡稳定问题一直是岩土工程难题之一，边坡在动力作用下的稳定性研究仍处于探索阶段（赵涛等，2012）。在前人的边坡地震动稳定性的研究中，大多并未考虑活动层范围的影响（Chuvilin 等，1988），这将在很大程度上影响到数值计算的准确性，增加边坡工程的潜在危险。

本文基于 FLAC 软件开发，考虑到经历冻融循环边坡的地震动稳定性分析平台，将冻土相变的显热熔法引入热学计算模块，并结合动力学计算原理，揭示出不同初始条件下冻融循环对边坡地震动稳定性的影响规律，可为季节冻土区和多年冻土区的边坡工程建设提供有力的技术支持。

1 热-动力分析模型的建立及数值实现

冻融循环会极大地改变土体的物理力学性质，由此引起边坡土体对地震动作用不同的响应。本文所建立的模型将首先通过热学计算确定经历冻融循环边坡土体的范围（即活动层范围），并在此基础上对不同区域土体采用相应力学参数，以此反应冻融循环对土体强度参数的影响。通过动力计算，研究冻融循环条件下边坡土体对地震动的响应。

1.1 几何模型及计算参数

模型的计算断面尺寸为宽 100m，高 60m，边坡坡脚位距模型左边界 40m，边坡斜坡坡率为 1:1，如图 1 所示。该断面整体为青藏粘土，为研究不同初始条件下冻融循环对边坡地震动稳定性的影响，土体采用 5 级不同初始干密度，相应的物理力学参数见表 1。

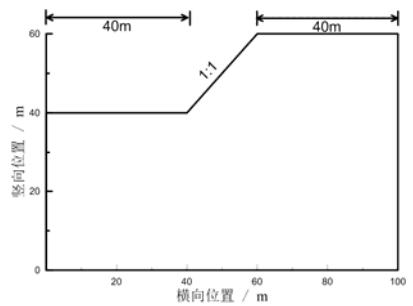


图 1 数值计算模型示意图
Fig.1 Schematic diagram of numerical calculation model

表 1 土体计算参数

Table 1 Soil parameters used in calculation

初始干密度 (kg/m^3)	实验条件	饱和含水量	C	ϕ	压缩模量	泊松比
		%	kPa	$^\circ$	MPa	
1770	未融冻	20.8	89	22.3	22.5	0.35
	-10 $^\circ\text{C}$ 冻, 20 $^\circ\text{C}$ 融		37	32.1	6.1	0.32
1700	未融冻	23.1	78	16.1	19.8	0.35
	-10 $^\circ\text{C}$ 冻, 20 $^\circ\text{C}$ 融		22	27.1	5.5	0.33
1650	未融冻	24.9	38	11.2	7.9	0.35
	-10 $^\circ\text{C}$ 冻, 20 $^\circ\text{C}$ 融		9	17.2	6.05	0.33
1600	未融冻	26.8	10.5	7.2	3.5	0.36
	-10 $^\circ\text{C}$ 冻, 20 $^\circ\text{C}$ 融		16	9.8	5.1	0.33
1550	未融冻	28.8	6.4	6.4	3.1	0.37

	- 10℃冻, 20℃融		8.9	8.5	4.5	0.35
--	--------------	--	-----	-----	-----	------

根据前人的研究 (Cheng, 2003), 天然地表及边坡的温度随时间的变化遵循正弦变化规律, 即: $T = T_0 + l \sin(2\pi \frac{t}{365} + n\pi)$, 其中, T_0 为年平均温度; l 为温度振幅。本文所采用的具体数值如表 2 所示。土体初始温度取为 10℃。相应干密度条件下土体的热学参数如表 3 所示。

表 2 年平均温度和振幅

Table 2 Annual average temperature and amplitude

振幅/°C	年平均温度/°C
4.93	-1.52

表 3 土体热学参数 (徐学祖等, 2001)

Table 3 Soil thermal parameters (after Xu et al., 2001)

干密度 kg/m ³	比热容 J/kg·°C		导热系数 W/m·°C	
	融土	冻土	融土	冻土
1550	2093	1384	1.18	1.93
1600	1953	1337	1.24	1.89
1650	1794	1283	1.28	1.80
1700	1611	1221	1.30	1.75
1770	1397	1149	1.32	1.70

1.2 考虑相变的温度场计算

为了准确判断土体经历冻融循环活动层的位置, 本文采用考虑相变的热传导方程进行温度场计算, 具体计算公式为:

$$-q_{i,i} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

其中: $q_i = -\lambda T_i$, 为土体密度 (kg/m^3); c ($\text{J/kg}\cdot\text{°C}$) 和 ($\text{W/m}\cdot\text{°C}$) 分别为土体的比热容和热传导系数。

在土体相变区间内, 随着土体温度的降低 (升高), 土中水 (冰) 会随之转变为冰 (水), 土体会释放 (吸收) 大量的热。相应的, 土体的热学参数 (比热容和导热系数) 也会随之剧烈变化。在冻土的热学计算中, 通常采用两种方法来反映相变对比热容和导热系数的影响: 第一种方法为热焓法 (ANSYS 软件中采用此法); 第二种方法为显热容法。其中显热容法将土体热参数作为温度函数即: $c=f(T)$ 和 $\lambda=g(T)$ 来反映热参数在相变区间随温度的变化 (徐学祖等, 2001)。

在 FLAC 软件的热学模块中, 土体热参数一般作为常数直接使用。要反映相变对热参数的影响, 还需要将热参数和温度联系起来 (Yao 等, 2012)。Yao 等 (2012) 还进一步使用线性插值的方法, 将热参数和温度间的关系进行了数值变化, 并使用 FISH 语言将其引入了热学计算模块, 以此反映冰-水相变对热参数的影响, 具体公式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} c = (1 - \frac{T - T_m}{T_{m+1} - T_m})c_m + \frac{T - T_m}{T_{m+1} - T_m}c_{m+1}, (T_m \leq T \leq T_{m+1}, m = 1, 2, 3, \dots, 8) \\ \lambda = \lambda_f + \frac{\lambda_u - \lambda_f}{T_p - T_b}(T - T_b) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中, u 和 f 分别为融土和冻土的导热系数; T_p 和 T_b 分别为冻土相变区的上、下界温度值($^{\circ}\text{C}$); T_m 为相变区间内的温度插值点; c_m 为对应温度点处的比热容。

在相变区间内, 土体比热容对温度的变化非常敏感, 微小的温度变化会引起比热容的剧烈改变(图 2), 这主要是冰-水相变时所产生的相变潜热的影响所致(安维东, 1989)。

因此, 在相变区间内所取的温度插值点越多, 式(2)的插值精度越高。与比热容相比, 热传导系数受温度的影响较小, 在相变区间内可以采用线性函数描述其与温度的变化关系。

在每一步温度计算后, FLAC 计算程序将调用式(2)对土体比热容和导热系数重新赋值。

1.3 动力分析模型及参数选取

在震动动的计算中, 人们通常采用两种方法来模拟土层对震动动的响应: 第一种方法为等效线性法, 这种方法常用来模拟一维条件下波在多层土体中的传播以及土-结构的相互作用, 由于采用了完全线性化的假定, 该方法无法直接得到土体在震动过程中产生的塑性变形; 第二种方法为完全非线性法, 这种方法的优势在于可以自由地选择不同的本构关系和屈服准则来反映震动荷载下土的力学响应, 进而分析可能产生的塑性破坏和土体液化情况, 这也是目前大多数岩土工程软件所采用的方法(胡聿贤, 2007)。

本文采用 FLAC 软件中内嵌的完全非线性法, 来研究不同条件下土体塑性变形对震动荷载的响应, 进而揭示冻融循环对震动动稳定性的影响。使用线弹性本构关系来描述土体对震动荷载的力学反映, 屈服准则采用莫尔-库仑破坏准则:

$$\sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} = 0$$

其中: $N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$, ϕ 为土体内摩擦角; c 为粘聚力。

大量的震害现象表明(赵涛等, 2012), 水平方向的地震作用是引起边坡破坏的主要原因, 为此本文只考虑水平地震作用, 旨在研究冻融循环对边坡震动动稳定性的影响规律。为了简化计算, 在模型底面的水平施加简化的正(余)弦震动动加速度边界条件, 其数学描述

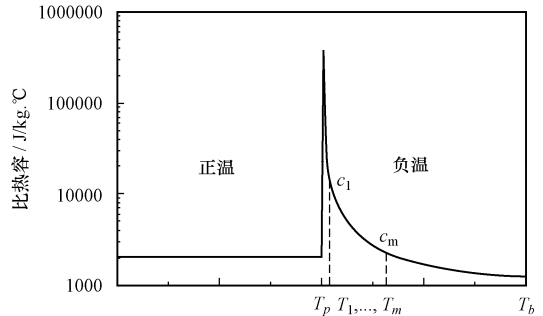


图 2 比热容随温度的变化关系

Fig.2 Relationship between specific heat and temperature

具体为: $\alpha = A \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{t}{T} \right) \right) \sin(2\pi ft)$, 其中: A 为加速度振幅 (0.5g); T 为输入加速度波的持续时间; 频率 f 为 2Hz。

在 FLAC 软件的动力分析中, 其边界条件有别于静力分析。使用静力分析的边界条件将会导致向模型外部传播的波被静力边界重新反射回模型内部, 这将造成结果的失真 (Itasca, 1999)。鉴于此, FLAC 提供了静力边界, 用以消除能量波在边界的反射。静力边界通过在模型边界的切向和法向, 设置独立阻尼器提供的粘性法向和切向力来吸收模型内部的入射波。对于本文中动力源在模型底部的情况, 静力边界应施加于模型的底部。在模型的两侧施加自由场边界来模拟模型两侧的自由场运动。

对于使用摩尔—库伦模型的岩土材料, 由于其塑性流动会极大地吸收和耗散地震波所产生的能量, 因此对阻尼参数的选取并不像完全弹性模型那样敏感。因此可选用局部阻尼系数 $\alpha_L = \pi D$ 进行计算 (Itasca, 1999), 其中, D 为临界阻尼的比例系数, 对于岩土材料 D 的取值范围一般在 2%—5% 之间 (Biggs, 1964)。在本文的计算中, D 取为 5%, 则局部阻尼系数为 $\alpha_L = 0.157$ 。

1.4 计算流程

对于未经历冻融循环的土体, 在 FLAC 程序中直接采用表 1 中相应干密度土体的力学参数进行计算。对考虑冻融循环的土体, 其计算步骤为 (图 3): ①进行热学计算; ②在相应热学边界条件下, 待土体经历冻融循环的活动层范围稳定后, 对该范围内土体材料参数重新赋值 (采用表 1 中经过冻融的参数); ③进行动力学计算并输出计算结果。

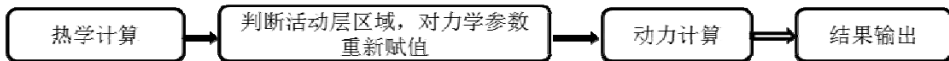


图 3 计算步骤

Fig.3 Calculation steps

2 结果分析

图 4 为 5 级不同初始干密度条件下, 冻融循环前后塑性滑移线的变化比较。从图 4 中可以看出, 对于未冻融的土体, 随着干密度和土体强度的增大, 其边坡稳定性呈逐渐增强的趋势。当干密度较小时, 由于其强度较低, 在地震动过程中主要表现为局部破坏。主要破坏形式为边坡表面范围内的局部塑性滑移 (图 4 (a) — (c))。当干密度较大时, 其边坡稳定性明显增大, 主要表现为坡脚及坡体范围内的整体滑移破坏, 且其破坏范围会随着土体整体强度的提高而进一步增大 (图 4 (d) 和 (e))。这表明未经冻融的土体其地震稳定性仅取决于边坡土体的强度。

对冻融后的土体, 由图 4 可以看出, 由地震动所引起的塑性滑移线均位于经历冻融循环影响的活动层范围内, 表现为坡体表面的局部塑性滑移破坏。对于初始干密度较小的土体, 其塑性滑移线位置相较于冻融前的位置并未有明显变化 (图 4 (a) — (c))。对于干密度较大的土体, 相较于冻融前, 其塑性滑移线位置发生了明显的变化 (图 4 (d) 和 (e)), 由未冻融前的整体塑性滑移转变为冻融后活动层范围内的局部滑移破坏。这是由于边坡活动层范围内土体在经过冻融循环后, 其力学性质发生了变化, 而活动层范围以外土体其强度并未改变

所致。这种土体强度的空间差异导致的不同区域土体对地震动响应特性的不同，会在活动层与未冻融土体的交界处（活动层下边界）产生较大的变形差异（塑性滑移），边坡的塑性破坏以局部塑性滑移为主。这表明边坡对地震动的响应，在很大程度上会受到冻融循环所发生的范围的影响。因此，准确分析和预测经历冻融循环的活动层的范围，采取适当的工程措施，对预防季节冻土区或多年冻土区边坡地震动所引起的工程病害至关重要。

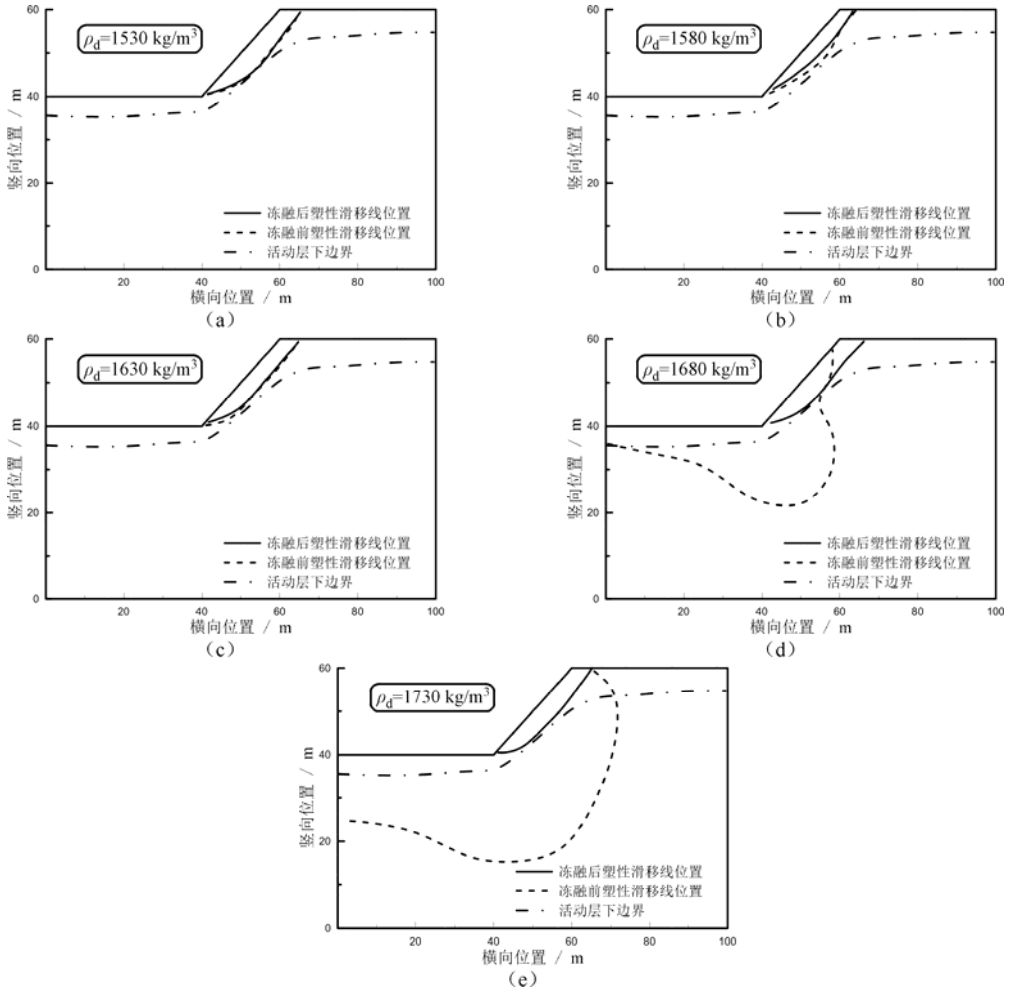


图 4 不同初始干密度条件下冻融循环前后塑性滑移线的对比

Fig.4 Comparison of plastic slip lines before and after the freeze-thaw cycle under different initial dry densities

3 结论

本文基于 FLAC 数值程序，将考虑冻土相变的显热熔算法引入热学计算模块，并结合静态边界动力计算模块，建立了适用于冻融循环条件下的边坡地震动稳定性分析平台。研究了 5 级不同初始干密度条件下，土体冻融循环前后对地震动作用的稳定性响应，得到了以下结论：

(1) 未冻融边坡其地震动稳定性主要受控于土体的强度, 随着土体强度的增大, 其地震动稳定性也随之增强。

(2) 经历冻融循环的土体, 其地震动后的破坏形式主要取决于活动层的范围。在季节冻土区或者多年冻土已经退化的区域, 其地震动后的主要破坏形式为活动层范围内的局部塑性滑移。

因此, 在季节冻土区或者多年冻土已经退化的区域, 对涉及到边坡工程问题时, 需要准确勘察和预测活动层的影响范围, 采取适当工程措施, 减少工程安全隐患。

参考文献

- 安维东, 1989. 冻土的温度水分应力及其相互作用. 兰州: 兰州大学出版社.
- 胡聿贤, 2007. 地震安全性评价技术教程. 北京: 地震出版社.
- 李晶岩, 付丽, 2011. 边坡稳定性分析方法. 山西建筑, **37** (4): 65—66.
- 孟庆生, 2011. 边坡稳定性影响因素分析. 科技风, (3): 154—155.
- 齐吉琳, 张建明, 朱元林, 2003. 冻融循环对土结构性的影响及其土力学意义. 岩石力学与工程学报, **22** (增2): 2690—2694.
- 王兰民, 孙军杰, 2007. 特殊土动力学的发展战略与展望. 西北地震学报, **29** (1): 92.
- 徐学祖, 王家澄, 张立新, 2001. 冻土物理学. 北京: 科学出版社.
- 赵涛, 折学森, 2012. 基于地震力的边坡优化设计. 广西大学学报, **37** (4): 707.
- Aoyama K.S., Ogawa and M. Fukuda, 1985. Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing. See: Proceedings of the 4th International Symposium on Ground Freezing Sapporo, Japan (S. Kinoshita and M. Fukuda, Ed.), Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema Publishers: 217—222.
- Biggs J.M., 1964. Introduction to Structural Dynamics. New York: McGraw-Hill.
- Chuvilin, Ye M. and Yazynin O.M., 1988. Frozen soil macro- and microstructure formation. See: 5th Int. Conf. on Permafrost, Trondheim: 320—323.
- Cheng G.D., 2003. The impact of local factors on permafrost distribution and its inspiring for design Qinghai-Xizang railway. Science in China (Series D), **33** (6): 602—607.
- Eigenbrod K.D., 1996. Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils. Canadian Geotechnical Journal, **33** (4): 529—537.
- Itasca, 1999. Flac manual: theoretical background. Itasca Consulting Group, Minneapolis.
- Leroueil S., Tardif J., Roy M. et al., 1991. Effects of frost on the mechanical behaviour of Champlain Sea clays. Canadian Geotechnical Journal, **28** (5): 690—697.
- Ogata N., Kataoka T. and Komiya A., 1985. Effect of freezing– thawing on the mechanical properties of soil. See: Proc. Proc. 4th Int. Symp. Ground Freezing, Sapporo, Japan: 201—207.
- Ono T. and Mitachi T., 1997. Computer controlled triaxial freeze–thaw–shear apparatus. See: Proc. 8th Int. Symp. Ground Freezing. A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands: 335—339.
- Swan, 1998. Christopher and Greene, Christopher, Freeze-thaw effects on Boston Blue clay. Journal of Engineering and Applied Science, Soil Improvement for Big Digs. **81**: 161—176.
- Yao Xiaoliang, Qi Jilin, Wu Wei, 2012. Three dimensional analysis of large strain thaw consolidation in permafrost. Acta Geotechnica, **7** (3): 193—202.

The Freeze-thaw Cycling Effects on Slope Stability in Earthquake

Wang Wenli^{1,2)}, Wang Lanmin^{1,2)} and Zheng Long¹⁾

1) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

2) School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract In seasonal and permanent permafrost region, the soil mechanical properties may be changed considerably in construction work, which is potentially threat to the stability of infrastructure during earthquakes. This paper develops an analysis platform for the slope earthquake stability considering freeze-thaw cycling based on FLAC. The platform embedded an explicit specific heat algorithm to reflect the ice-water phase change effect. The effects of freeze-thaw cycling on slope earthquake stability are analyzed. The results indicate that the range of active layer is a main factor influencing the plastic destroying form.

Key words: Freeze-thaw cycling; Slope; Earthquake stability