

冻土与扩大台基相互作用的有限元分析

王正中¹ 张长庆² 沙际德¹

(1 西北农业大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100) (2 中国科学院冻土工程重点实验室, 兰州 730000)

摘 要 以冻土与扩大台基作为一个整体结构, 将各向弹性模量及泊松比随温度、水分、应力变化的冻土视为正交各向异性的非线性材料; 将冻土冻胀系数作为负线膨胀系数, 按结构温度应力的计算方法, 应用结构非线性分析的有限元法, 对冻土与扩大台基之间的相互作用进行了数值计算, 获得其应力场、位移场及冻土与扩大台基之间的各种作用力; 理论分析结果与模型试验吻合, 并提出了一种求解冻土与基础相互作用的通用数值分析方法。

关键词 冻土, 扩大台基, 非线性有限元法, 结构分析

分类号 TU 445

冻土与建筑物之间的相互作用十分复杂, 也是工程设计中非常重要的问题。以往解决这一问题的方法是预先根据工程经验或现场测定粗略确定出各种冻胀力, 然后将这些力加在建筑物上进行设计。然而, 冻胀力的大小不仅与冻土本身及其冻胀条件有关, 而且与建筑物的刚度有关, 实测结果相差悬殊, 设计指标难以确定。因此, 寻求一种避开直接测定冻胀力的确切计算方法是很有理论及应用价值的。本研究将冻土与建筑物视为一个整体, 应用非线性有限单元法按大体积超静定结构温度应力的计算方法, 研究正交各向异性的冻土与各向同性的建筑物之间的相互作用, 建立一种通用的数值计算方法。

1 基本假定与计算模型

1.1 基本假定及冻土本构方程

土体的冻结变形大体可分为 3 种, 即: ① 外力变形, ② 冻胀变形, ③ 温度变形。

冻胀变形不仅取决于冻结条件, 还与冻土本身的物理性质有关。试验研究表明, 冻土属正交各向异性的非线性材料^[1,2]。如果将冻胀变形视为线膨胀系数为负值的温度变形问题, 测出正交各向异性冻土的自由冻胀系数^[1]和弹性模量及泊松比^[2], 则对处于平面应变状态下的正交各向异性冻土的广义虎克定律如下:

$$\begin{Bmatrix} X_x \\ X_z \\ V_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 - \frac{2}{hh}}{E_h} & -\frac{v_h(1 + \frac{hh}{hh})}{E_v} & 0 \\ -\frac{h_v(1 + \frac{hh}{hh})}{E_h} & \frac{1 - \frac{h_v}{v_h}}{E_v} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{hv}} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} e_y \\ e_z \\ f_{xz} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} (1 + \frac{hh}{hh})a_h \\ (a_v + \frac{h_v}{hh}a_h) \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta t \quad (1)$$

$$e_x = -\frac{hh}{hh} e_y + \frac{E_h}{E_v} e_z - a_v E_t \Delta t \quad (2)$$

收稿日期 1997-09-29

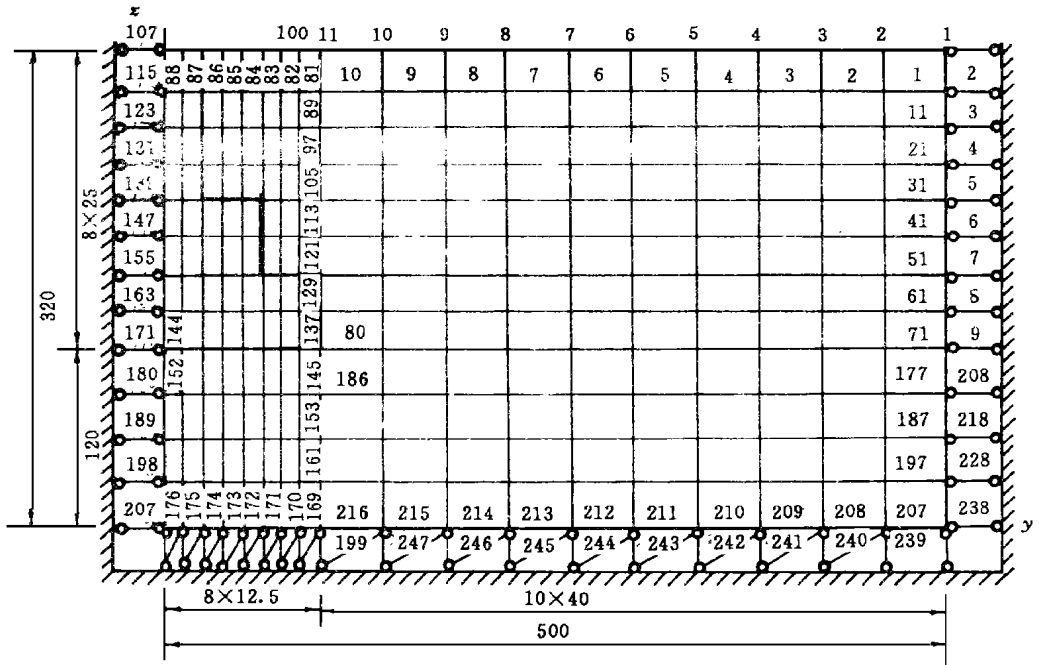
课题来源 中科院冻土工程重点基金资助项目, DT298003

作者简介 王正中, 男, 1963 年生, 教授

式中: X, X 分别为冻土在垂直和平行温度梯度方向的应变; ϵ_y, ϵ 分别为冻土在垂直和平行温度梯度方向的法向正应力; T_h, T 分别为冻土在垂直和平行温度梯度方向的自由冻胀系数,即无荷载条件下单位温降的冻胀率,单位为 $1/^\circ\text{C}$; E_h, E_v 分别为冻土在垂直和平行温度梯度方向的弹性模量; μ_{hh} 为冻土在垂直温度梯度方向加载时,在垂直温度梯度方向的横向变形系数(泊松比); μ_{hv} 为冻土在垂直温度梯度方向加载时,在平行温度梯度方向的横向变形系数; μ_{vh} 为冻土在平行温度梯度方向加载时,在垂直温度梯度方向的横向变形系数

1.2 模型试验及计算简图

为便于验证按结构温度应力计算方法应用有限元法分析冻土与建筑物相互作用的方案和思路的可靠性,作者进行了扩大台基模型试验(张长庆.扩大台基在封闭单向冻结系统中的验证试验.冻土工程重点实验室.1997年 1月) 试验土体为兰州粉土,封闭系统单向冻结,扩大台基为钢筋混凝土,其尺寸如图 1 所示。其顶端及土表设有位移传感器测位移,在填土中均匀埋设 32个热敏电阻测定温度场,填土四周及底部用表面涂黄油的加气混凝土固定,用塑料泡沫板保温。初始含水量 $W=19.9\%$,顶面控制气温为 -3°C ,顶面盖一层塑膜,四周为刚性绝热不透水边界;扩大台基顶端及填土顶面无竖向荷载及约束,也无水分外逸;底温设置为 2.5°C ,底面边界也为刚性不透水边界。因模型的对称性,仅取一半作为计算简图如图 1。



知道冻土与扩大台基的温度场 为与模型试验一致按稳态热传导计算温度场。此时可近似认为冻土内没有吸热和吸热现象,只有恒定热流沿温度梯度方向流动,这种流动仅与导热系数 λ 有关,并近似取 $\lambda=2.3\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ (混凝土表面)^[3]和 $\lambda=1.2\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ (冻土)^[4]。图 1 的两侧面是对称面,它与温度梯度方向平行,没有热流穿越该面,可视为隔热面。顶面为自由面,为避免冻结时水分外逸,试验时在顶面上覆盖一层塑料薄膜;环境温度控制为 -30°C ;考虑到冷凉箱内空气对流很弱,加之塑料薄膜的覆盖,故对流换热系数按低限选用 $3.5\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ (混凝土)和 $1.0\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$ (冻土表面)^[4]。

按热传导理论应用有限元法求温度场,单元划分如图 1.用 Super sap 程序(武汉大学译,美国 ALGOR 软件公司研制, Super sap 程序使用手册. 1990)进行稳态热传导计算,根据计算结果绘出等温线图(图 2),并与实测值比较,可见二者比较吻合。只是实测值在远离扩大台基处等温线有下降趋势。这可能与冷冻箱内冻土侧面的环境温度尚难分层确切设定有关。

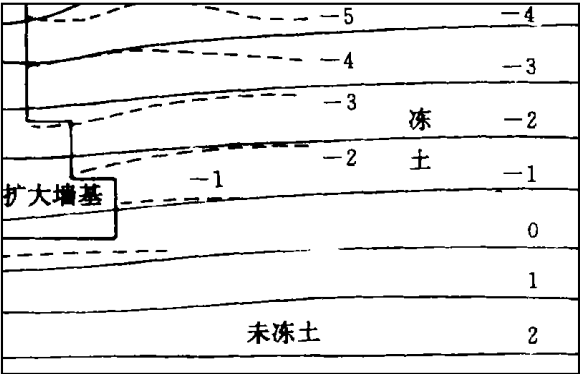


图 2 等温线图
— 计算值;... 实测值

3 冻土内水分重分布

模型试验时,填土初始含水量为 19.9%,试验结束后所测各层平均含水量发生明显重分布。最大含水量 26.6%,在表层紧切扩大台基处;从上往下含水量依次减少,最小含水量 14.0%,在温度场的 1°C 线处;台基内折角处含水量 14.6%,比周围都小,在台基底面中心部位含水量比两端稍高一点。

4 冻土与扩大台基的位移场和应力场

4.1 计算过程简介

计算简图及单元划分如图 1.边界结点的约束为:左右边界, y 向位移为零, z 向位移不限制;底部边界 y 向, z 向位移都限制为零;顶面为自由面, y 向, z 向位移都不限制。因是平面应变问题,所有结点的 x 向位移和绕三轴的角位移,按惯例都被限制。

扩大台基为各向同性的混凝土,计算时取线膨胀系数 $\alpha_c=0.000011^\circ\text{C}^{-1}$, $E_c=24\,000\text{ MPa}$, $\nu_c=0.167$.冻土为正交各向异性的弹塑性材料,其力学参数随应力和温度而变。根据阶段报告^[2]并参考文献[5],以及验证试验的具体情况,变形模量 E_v, E_h 可按表 1 选用。至于横向变形系数 ν_{hv}, ν_{vh} 和 ν_{hh} 因试验资料较少,且对冻土应力影响不太大,故根据实测资料暂定为 0.2~0.6,且应力越大值越大。为满足冻土内任一点的静力平衡条件和刚度矩阵的对称性,取 $\nu_{vh}=E_v\times \nu_{hv}/E_h$,抗剪变形模量:

$$G_{vh} = G_{vy} = G_{vx} = \frac{E_h E_v}{E_h (1 + \nu_{vh}) + E_v (1 + \nu_{hv})} = G_{hv} = G_{yz} = G_{zx} \tag{3}$$

$$G_{hh} = G_{xy} = G_{yx} = \frac{E_h}{2(1 + \mu_{hh})} \tag{4}$$

其中 (3)式是一个足够精确的近似式. 因这里是平面应变问题, 显然 $V_{xy} = V_{xz} = 0$, 因此计算时不需要 G_{hh} 和 G_{xz} .

表 1 冻土的弹性模量表

$T / ^\circ C$	E / MPa	σ / MPa									
		- 0.5	- 1.0	- 1.5	- 2.0	- 2.5	- 3.0	- 3.5	- 4.0	- 5.0	- 6.0
- 5	E_h	9600	4990	1680	703	466	360	266	216	158	130
	E_v	9600	4970	1268	413	240	188	141	126	78	60
- 3	E_h	6831	3300	1326	568	367	261	201	163	131	101
	E_v	6831	3480	969	343	206	143	172	86	66	50
- 2	E_h	5450	2901	1186	476	261	197	152	129	104	70
	E_v	5450	2817	905	249	140	106	86	60	47	35
- 1	E_h	3950	2061	790	330	230	166	129	101	74	56
	E_v	3950	2050	607	204	102	74	56	43	32	24
- 0.5	E_h	2736	1390	540	249	176	186	74	54	43	30
	E_v	2736	1348	397	160	84	50	37	29	23	16
0.0	E	36									
1.0	E	36									

冻土冻胀系数根据文献 [1],并结合验证试验选用. 因模型试验中的水分补给和冻胀情况,与文献 [1]中的上两段土柱一致,故取上两段土柱的纵横向平均自由冻胀率 $Z_{vp}, Z_{\underline{p}}$ 来换算冻土的纵横向冻胀系数:

$$\left. \begin{aligned} T_v &= Z_{vp} / T = 2.63 / T \\ T_h &= Z_{\underline{p}} / T = 1.41 / T \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

其中, T 为负温度值(以负值带入);冻胀系数都为负值(说明是冻胀),而线膨胀系数都为正值(说明是冷缩). 这是二者的主要区别. 当然,如果冻胀率各层相关很大,也可按公式 (5)分层计算冻胀系数.

至此就可以应用有限元程序 Super sap进行冻土与扩大台基之间相互作用的结构非线性分析. 由于作为正交各向异性材料的冻土,材料力学参数试验数据有限,目前无法得到它们随温度 T 及应力 ϵ 变化的函数关系或数据库,因而无法直接应用有关物理非线性有限元系统进行直接计算,只好采用人工协助迭代法进行,即初选一套 E, μ 值,初算出 ϵ , 然后根据计算出的 ϵ 和相应的温度按表 1选用 E 和 μ 值(若选用的 E 值大,算出的 ϵ 值大,于是下次就根据大的应力选出较小的 E 值,则算出的 ϵ 就小些),如此反复迭代直到 E 与 ϵ 正好符合为止. 为了满足各单元不同情况的要求,可采用较多的材料编号. 经过以上数值计算即可求出各结点的位移数和各单元的各种应力,从而得到应力场和位移场.

4.2 位移场

求出各点位移后,连接位移相等的各点即可得到位移等值线. 由图 1可以看出,水平位移最大值发生在过台基顶点 45° 线与扩大台基底侧面铅垂线交点处;台基与折线围成区域内 y 向位移为正,且变化梯度较大; 45° 线以上,其变化梯度更大,地表附近 y 向位移很大且为负值,这都是符合工程实践的. 另外顶面隆起曲线与实测隆起曲线比较,可看出

二者不仅在数值上非常吻合,最大误差不到 4.9% (例如扩大台基顶面的冻胀变形实测为 2.29 mm,计算为 2.40 mm),而且在规律上也很接近。另外冻土两侧面冷冻箱内壁间的切向冻胀力,对该处冻土的 Z 向冻胀变形有一定限制,造成实测值靠侧边减少的现象。

4.3 应力场

将研究范围内的正应力及剪应力求出后即可得到应力场,其特点如下:① 正应力 σ_y 在墙基及其周围的冻土中均为压应力,其最大值与 y 向位移最大值发生在同一点,而且台基内折角附近有较小的拉应力存在。② 正应力 σ_z 在墙基中基本为拉应力,最大值在内折角处;而冻土中基本为压应力,内折角附近为拉应力。③ 剪应力 τ_{yz} 在台基及冻土中的上部直墙上为正,下部台基则为负。

图 3 据各应力分布绘出的冻胀力图,由图可知,在封闭系统的单向冻结情况下,水平冻胀力和切向冻胀力呈上大下小规律分布,而冻胀反力则呈三角形分布。图 3a、b 所示的规律为许多研究资料及工程实践所证实^[6,7]。图 3c 的规律,与工程中常用的达尔马托夫理论不符(三角形分布),与铁道部第三设计院实测冻胀反力分布规律一致^[8]。实际上,在靠近墙基处的冻土因受扩大台基侧面的制约,对其底板顶面施加的冻胀反力必须减小,不会像达氏理论那样反而加大。至于在台基内折角处各冻胀力出现负值,主要是由于上部填土冻胀量大,牵制台基整体上移,而下部填土冻胀量小,产生相对台基向下的位移,致使下部切向冻胀力向下。同理由于在该处填土冻胀量较周围都小,因而受上部及右侧冻胀量大的填土的牵制同步位移,而产生负值水平冻胀力和负值冻胀反力。

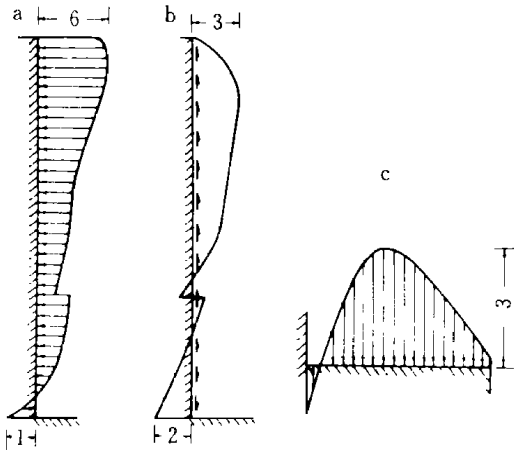


图 3 冻胀力 (MPa) 分布图

a. 水平冻胀力; b. 切向冻胀力; c. 冻胀反力

5 结 语

- 1) 将冻土视为正交各向异性材料,并将冻土与扩大台基作为统一整体,利用结构非线性分析的有限元程序,按大体积超静定结构系统温度应力的计算方法,来研究冻土与扩大台基之间的相互作用,其结果与实测结果吻合。说明本文提出的方法是可靠的。
- 2) 按有限元理论在应力梯度大的部位,单元划分应该小而密。本文在计算时有所考虑,但仍显不够。因此,这些地方的计算结果精度会差一些。
- 3) 如果有足够的试验研究资料,得到正交各向异性冻土的力学参数随温度和应力而变的函数关系,就可以直接利用有限元物理非线性分析程序,不必人工协助迭代计算,会使计算更加方便,结果更加精确。有关这方面的研究尚处于初始阶段,许多条件尚未完善,建议今后对正交各向异性冻土的各种力学参数进行全面系统的测定,求出这些力学参数的各种函数关系或建立有关参数的数据库。

4) 冻土的蠕变对建筑物有减载作用,本文在计算中未作考虑,这从工程角度看是偏于安全的。为避免过于保守,建议测定力学参数时的加荷速率在 $\times 10^{-6}/s$ 以下,文献[7]指

出,这时的力学参数随加荷速率变化很小或不再变化。

致谢: 本试验得到于志秋教授精心指导; 冻土工程国家重点实验室陈峰峰、浙江农业大学曹保山参加了该项研究工作, 特表谢忱。

参 考 文 献

- 1 沙际德, 张长庆, 王正中, 等. 粉土自由冻胀参数的实验研究. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 第五届全国冻土学术会议文集. 北京: 科学出版社, 1996. 1201~ 1207
- 2 张长庆, 于志秋. 正交各向异性冻土的力学参数实验. 冰川与冻土, 1996(增刊): 40~ 46
- 3 水工混凝土与钢筋混凝土结构设计规范 (SDT20-78). 北京: 水利出版社, 1979
- 4 苏 Γ.М. 费里德·曼. 土温度状况计算方法. 徐学祖译. 北京: 科学出版社, 1982
- 5 Zhu Y L, David L C. Tensile strength of frozen silt. CRREL, 1987, 15(8): 241~ 266
- 6 隋铁龄, 那文杰. 季节冻土区挡土墙水平冻胀力的研究. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 第三届全国冻土学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1989. 161~ 174
- 7 隋铁龄, 李大倬. 国外挡土墙抗冻技术研究概况. 工程冻土, 1989(1): 2~ 19
- 8 崔成汉, 周开炯. 冻胀反力的试验研究. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 第二届全国冻土学术会议论文集. 北京: 科学出版社, 1983. 102~ 109

A Finite Element Analysis of the Coaction between Frozen Ground and Spread Wall Foundation

Wang Zhengzhong¹ Zhang Changqing² Sha Jide¹

(1 College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwestern

Agricultural University, Yangling, Shaanxi 712100)

(2 Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, Lanzhou 730000)

Abstract In this paper, frozen ground and spread wall foundation are regarded as a whole structure. The frozen ground, whose various chord modulus and Poisson's Ratio change with temperature, moisture and stress, is regarded as orthotropic nonlinear material. The heaving coefficient is regarded as negative linear expansion coefficient. According to the calculation procedure of structural thermal stress, the numerical calculation of the coaction between frozen ground and spread wall foundation is made by means of finite element method of constructional nonlinear analysis, and the stress field, displacement field of this system and other various acting forces between frozen ground and spread wall foundation are obtained. The theoretic analytic result conforms with the model experiment, hence a universal and accurate numerical analytic method to seek the coaction between frozen ground and wall foundation is put forward for reference and application in production and design.

Key words frozen ground, spread wall foundation, finite element method, structural analysis