

复杂应力路径下人工冻砂土非线性流变本构模型 与应用研究

李栋伟¹, 崔 灏², 汪仁和¹

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 北京中煤矿山工程有限公司, 北京 100013)

摘 要: 采用应力路径试验方法, 模拟人工冻结法凿井井架地基施工变化过程, 得到了冻砂土地基的变形规律: 冻砂土轴向加载过程具有明显的剪胀性, 且体积应变不能忽略。为了全面反映冻砂土在应力路径下的变形, 以元件模型为基础, 通过推导获得冻砂土非线性流变本构力学模型。利用有限元程序的二次开发技术, 将该模型嵌入到 FEPG 有限元程序平台中, 对冻砂土三轴蠕变试验和冻结法凿井井架地基受力过程进行了数值模拟。模型能够较好地反映冻砂土的变形随时间的变化规律, 数值模拟、室内试验和实测值吻合较好, 可为冻结法凿井设计和施工提供指导。

关键词: 非线性蠕变模型; FEPG 有限元平台; 数值模拟

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2008)10-1496-06

作者简介: 李栋伟(1978-), 男, 湖南邵阳人, 讲师, 从事特殊土本构理论和岩土工程数值仿真研究。E-mail: dwli@1aust.edu.cn。

Nonlinear rheological constitutive model for frozen sand under complex stress paths and its engineering application

LI Dong-wei¹, CUI Hao², WANG Ren-he¹

(1. College of Civil Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Beijing China Coal Mine Engineering Company Ltd, Beijing 100013, China)

Abstract: By use of the testing method of stress paths, the behavior of construction of artificial freezing derrick foundation was simulated. It was shown by the results of triaxial creep experiments that the frozen soil was obviously dilatancy, and its volume strain should not be neglected. To fully reflect the creep deformation laws of frozen soil under complex stress paths, a nonlinear rheological constitutive model of frozen soil was put forward by using the basic elements. And the model was embedded in FEPG finite element program on the basis of the secondary developing technique for FEM. It was shown by the results of numerical simulation for field measurement that the deformation properties of dilatancy and volume strain of frozen soil could be reflected by the nonlinear rheological constitutive model very well, and it agreed well with the field measurement data, which could be used as references for the calculation and construction of frozen projects.

Key words: nonlinear viscoelasto-plastic rheological model; FEPG FEM; numerical simulation

0 引 言

采用冻结法凿井穿越深表土在煤矿建井工程中得到了广泛应用, 为准确分析冻结法凿井井架与人工冻土壁的相互作用, 以便进行井架和冻结壁结构性能分析及科学设计。掌握结构全过程变形、承载力及破坏形态, 就必须研究清楚井架地基土的本构模型和破坏准则。

在国内, 沈珠江提出和建立的“南水模型”^[1]是目前国内在高土石坝应力变形计算中常用的堆石体本构模型。该模型可统一反映土体的剪胀和剪缩特性, 同时对复杂应力状态和应力路径具有较好的适用性。

张丙印等^[2]在分析堆石体三轴试验成果的基础上, 探讨了堆石体的体积变形特性, 提出了形式简洁的堆石体修正 Rowe 剪胀方程。将所建立的修正 Rowe 剪胀方程引入到沈珠江院士提出的“南水模型”, 克服了该模型由于采用体变-轴向应变抛物线假设所带来的一些缺陷。殷宗泽等^[3]提出了椭圆-抛物线型双屈服面模型。这两个模型简单、参数易于确定等优点, 在岩

基金项目: 国家自然科学基金项目(50804002); 安徽省高校青年教师基金项目(2007JQ1044)

收稿日期: 2007-09-03

土工程中得到了广泛的应用。Fish^[4]提出了冻土的热力学本构方程。何平等^[5]基于热力学框架提出了冻土的黏弹塑本构方程。人们基于弹性力学理论对材料应力-应变曲线的研究方法对人工冻土的在各种应力条件下的变形特征进行了大量试验研究^[7-8]。马魏和王大雁等^[9-11]通过试验模拟人工冻结凿井中土体固结、冻结、受力的实际过程,研究了经固结后兰州冻结黄土在径向卸载状态下的应力-应变行为,并利用试验资料所建立的数学方程研究了固结后冻土的初始切线模量和主应力差渐近值与初始围压、温度的关系。汪仁和李栋伟等^[12-13]对淮南地区深表冻土进行了三轴蠕变试验,根据试验结果提出以西源模型为基础,并耦合温度自由度且应用抛物线型屈服准则对模型中的黏塑性项进行改进,建立了新的蠕变本构模型来描述复杂应力状态下冻土的蠕变特征,并在深井冻结壁开挖过程中得到了应用。笔者^[13]为了全面反映冻土在卸载状态下的蠕变变形规律,基于金属材料本构理论提出了冻结黏土卸载状态下双屈服面流变本构关系。

国内外许多学者在人工冻结砂土的本构模型研究中获得了许多成果,但是用于冻土数值计算的本构模型中考虑应力路径下冻土剪缩变形特征还未曾报道过。本文以试验结果和岩土力学理论为基础提出了人工冻土非线性流变本构模型,便于数值计算将本构程序嵌入 FEPG 有限元程序自动生成平台上。

1 冻砂土变形特性

1.1 试件加工与试验装置

实验采用淮南某煤矿井架地基的冻砂土,为便于试验将所取土样加工成为圆柱形重塑土试件,尺寸为 $\phi 61.8 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 。试样连同模具密封并在低于 -10°C 温度下速冻 6 h 后将试样在所需试验温度下脱模,并用修土刀修整,使试样符合试验标准要求,将制备好的低温重塑土试样贴上标签装入保鲜袋内密封,置于所需试验温度下恒温养护 24~48 h 内进行试验。

试验装置采用自行研制的 W3Z-200 冻土三轴压缩蠕变试验机,试验机包括主机、制冷系统、液压稳压系统和数据采集处理系统等 4 部分组成。最大围压为 15 MPa,最低温度为 -40°C ,控温精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。围压和轴压可同步控制,最大轴压 20 t,轴向变形通过轴向位移变化由轴压系统自动测量,试验过程控制由计算机程序设定,试验结果由计算机自动采集,试验数据采集界面如图 1 所示。

1.2 试验方法及试验结果

为模拟冻结法凿井井架实际受力变化过程,采用先 K_0 固结、冻结、轴向加载的三轴条件下的冻土三轴剪切和长期蠕变试验,试验温度分别为 -5°C 、 -10°C 和

-15°C 。试验过程主要分为 3 个阶段:①使试样在无侧向变形的条件下进行 K_0 固结;②对 K_0 固结 4~6 h 后试样进行迅速冻结并恒温 24 h;③对固结并冻结后的试样进行轴向加载剪切试验(加载速率 $0.1\%/ \text{min}$)和三轴蠕变试验。通过大量的冻砂土试验获得不同固结围压下偏应力与轴向应变的关系曲线,如图 3 所示。相同温度下冻土 $p-q$ 关系曲线,如图 4 所示。冻土蠕变变形随时间的关系曲线,如图 5 所示。



图 1 W3Z-200 冻土蠕变试验机控制面板

Fig. 1 Control panel of W3Z-200 testing machine

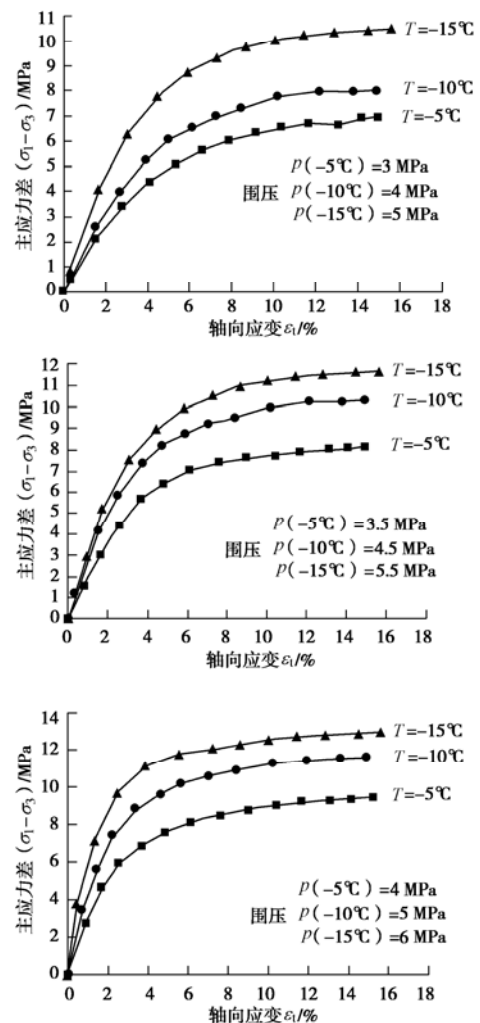
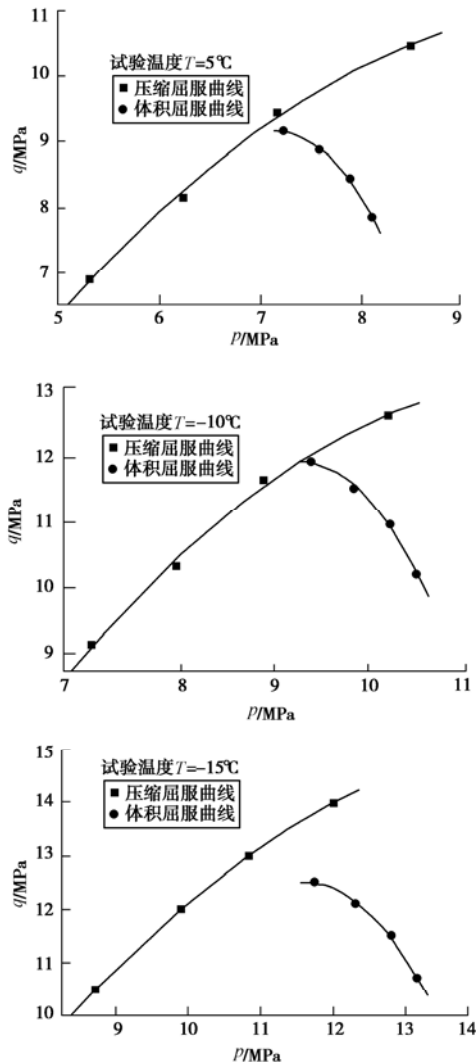


图 2 不同固结围压下偏应力与应变的关系

Fig. 2 Variation of stress and axial strain of frozen soil under different confining pressure

图3 不同温度下 $p-q$ 曲线Fig. 3 $p-q$ curves of frozen soil under different temperature

1.3 试验结果分析

冻土三轴试验结果表明:

(1) 从图2得到: 当偏应力不大时冻土应力-应变呈直线, 说明冻土是弹性体; 当偏应力水平较大时冻土应力-应变呈明显的非线性, 冻土为塑性体。

(2) 从图3可以看出: 冻土 $p-q$ 压缩关系曲线为抛物线分布, 为全面反映冻土剪切变形规律可以用抛物线屈服函数来表示^[14]。

$$F = \frac{\tan \varphi}{2p_m} \times p^2 - \tan \varphi \times p + q - c \quad , \quad (1)$$

$$\begin{cases} p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad , \\ q = \frac{1}{\sqrt{2}}[(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{1/2} \quad . \end{cases} \quad (2)$$

式中 c 为冻土的黏聚力 (MPa); φ 为冻土的内摩擦角 ($^\circ$); p_m 为冻土剪切强度到达最大值时的平均法向应力 (MPa); σ_i 为 3 个方向的主应力 $i=1, 2,$

3。

由图3可以得到, 在 $p-q$ 应力平面内冻砂土体积屈服函数为椭圆形状, 可以采用如下关系式进行拟合:

$$F_2 = \frac{q}{p} \quad . \quad (3)$$

(3) 从图4冻土蠕变曲线获得: 在较小的恒力作用下冻土蠕变出现非稳定蠕变和稳定蠕变阶段, 即出现第I和第II阶段的蠕变现象, 当蠕变应力高于某一临界值时出现蠕变第III阶段。

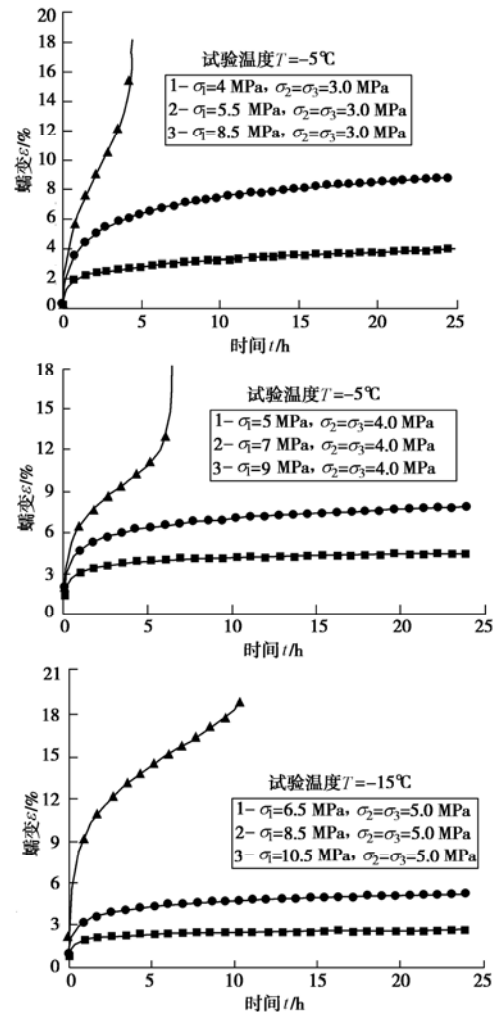


图4 不同温度和应力下冻土蠕变试验曲线

Fig. 4 Creep curves of frozen soil under different temperatures and stresses

2 冻砂土流变本构模型

2.1 冻土流变本构方程

西源模型^[15]能反映岩土材料最基本的黏弹塑变形性质, 根据试验, 选用该模型对其中的黏塑性项进行改进, 以适用冻土的复杂变形性质。根据以上的分析, 采用本文提出的抛物线-椭圆双屈服面代替圣维南体, 提出了一个新的适合冻土的非线性黏弹塑性本

构模型^[13]。

$$\{\varepsilon\} = \left\{ \frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} \right) \right\} \{\sigma\} + \left(\left\langle \frac{F_1}{F_0} \right\rangle + \left\langle \frac{F_2}{F_0} \right\rangle \right) \frac{t}{\eta_2} \{\sigma\} \quad (4)$$

式中 E_0 、 E_1 为材料的弹性模量 (MPa); η_1 、 η_2 为材料的黏滞系数 (MPa·min); t 为作用的时间 (h)。 F_1 、 F_2 为屈服函数, 见式 (1) 和式 (3)。式 (4) 即为非线性流变本构方程。

2.2 黏弹塑性数值计算矩阵

根据经典流变力学计算理论: 非线性连续体介质中总应变 ε 可以分成弹性应变分量 ε_i^e 和塑性应变分量 ε_i^p 计算。因此, 总应变可以表示为^[15]

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_i^e\} + \{\varepsilon_i^p\} \quad (5)$$

冻土的黏弹性质可以作为弹性来处理, 黏弹性柔度矩阵 $[C^e]$ 可由下式直接给出:

$$[C^e] = \frac{1}{E_i} \begin{bmatrix} 1 & -\mu & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & 1 & -\mu & 0 & 0 & 0 \\ -\mu & -\mu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\mu) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中

$$E_i = \frac{1}{\frac{1}{E_0} + \frac{1}{E_1} \left(1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}} \right)} \quad (7)$$

由式 (4) 亦可得到黏塑性应变的表达式:

$$\varepsilon_i^p = \left\langle \frac{F_1 + F_2}{F_0} \right\rangle \left(\frac{t}{\eta_2} \right) \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \quad (8)$$

式中, F_1 、 F_2 由式 (1) 和式 (3) 确定, 为方便对冻土材料常取 $F_0 = 1$ 。

计算非线性黏塑性柔度矩阵常采用隐式积分法, 其思路如下: 假设在 t^n 时刻, 以求得节点位移 $\{\delta^n\}$ 和应力 $\{\sigma^n\}$, 确定 $\Delta t = t^{n+1} - t^n$ 时间间隔内产生的蠕变增量:

$$\{\Delta \varepsilon^n\} = \Delta t^n [\{\dot{\varepsilon}^n\} + [C^n]^p \{\Delta \sigma^n\}] \quad (9)$$

其中

$$[C^n]^p = \left\{ \frac{\partial \dot{\varepsilon}^p}{\partial \{\sigma\}} \right\} \quad (10)$$

3 本构模型检验及数值算例

3.1 冻土三轴蠕变试验的数值仿真

为了全面反映冻土的剪切变形和体变性质, 采用压缩屈服函数和体积屈服函数替代线性牛顿体, 得到

应力路径下的非线性流变本构模型。通过编制相关的有限元本构程序, 将非线性流变模型本构程序嵌入到大型非线性有限元程序 FEPG 中。对淮南某煤矿冻结砂土在三轴加载条件下进行了蠕变试验, 获得冻土轴向蠕变与数值模拟结果, 如图 5 所示; 冻土体积应变实测值和数值模拟结果, 如图 6 所示。

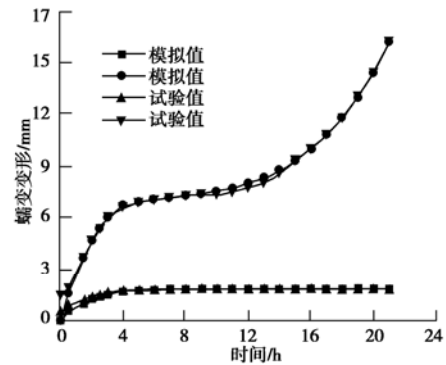


图 5 冻土三轴蠕变实测值和数值模拟值

Fig. 5 Observed and calculated creep values of frozen soil

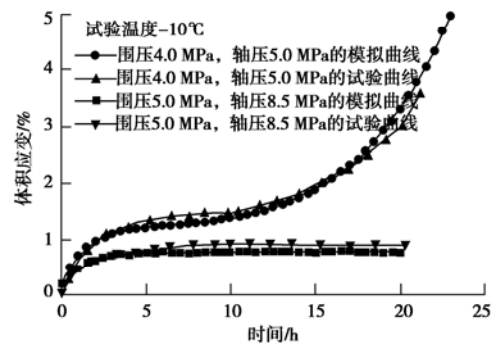


图 6 冻土三轴蠕变体积应变实测值和模拟值

Fig. 6 Observed and calculated creep volume strains of frozen soil

冻土在应力路径下的蠕变试验和模拟值吻合较好, 蠕变试验和数值模拟误差不大, 表明用非线性蠕变本构模型描述冻砂土地基的变形是科学的。从体积应变图看出, 冻土的体积应变和蠕变曲线变化规律一致, 各个阶段比较明显; 冻土的体积应变较大, 最大达到总蠕变变形的 25% 以上, 进一步说明体积应变是不能忽略的。

3.2 井架地基数值模拟

模拟以淮南某煤矿副井为计算模型, 该井筒在冻结施工中, 采用三圈孔和另加一圈防片帮孔进行冻结施工。冻结深度为 460 m, 井筒内径为 5.0 m, 井筒外径为 12 m。

考虑到工程的对称性, 取 1/4 的三维井筒模型进行数值模拟, 并以东侧基础为计算模型, 由于基础埋深浅需考虑外界环境温度和冻结温度场共同作用的影响, 因此需要建立热力耦合计算模型。通过数值模拟可以获得整个井架与基础共同作用下的应力场和位移

场, 井架基础中心点下冻胀力随时间的分布, 将数值模拟结果和实测比较, 如图 7 所示。基础竖向位移分布, 如图 8 所示。

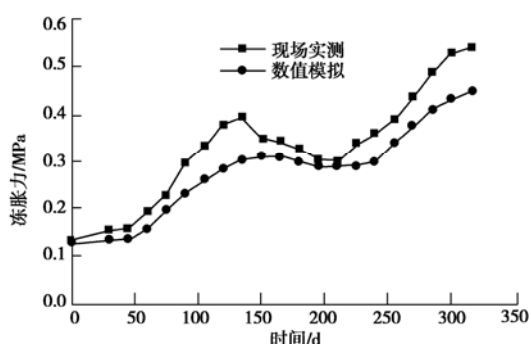


图 7 基础底部冻胀力数值模拟与实测比较

Fig. 7 Comparison between the calculated and measured values of the frozen-heaving forces beneath the foundation

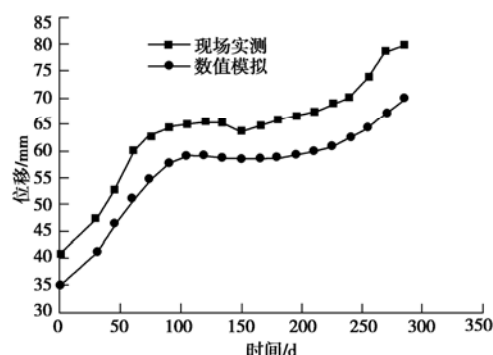


图 8 基础竖向位移数值模拟与实测比较

Fig. 8 Comparison between the calculated and measured values of the vertical displacements of the foundation

从数值模拟结果看: 基础底部冻胀力数值模拟和现场应力盒实测的应力变化规律完全一致, 且相对误差小; 从冻胀力的空间位置分布看, 温度低的地方由于冻土冻胀强, 井架基础受到的冻胀力大, 最大值达到 0.60 MPa, 远离冻结壁的基础底部冻结压力较小。井架基础在冻胀力作用发生抬升位移, 从图看位移随时间的变化关系和冻土蠕变变形规律一致, 在冻结壁处冻胀位移较大, 基础抬升达 82 mm。

4 结 论

通过实测、试验和数值模拟获得如下结论:

(1) 用基本流变元件和冻土的不同屈服准则组合能很好地描述冻土这种强流变材料在应力路径下的非线性变形规律, 克服了单一屈服面模型和元件模型存在的缺陷; 通过简单试验即可获取冻土非线性流变本构模型计算参数, 且模型具有参数少易于确定等优点。

(2) 通过冻砂土三轴蠕变试验和数值模拟、井架

基础数值模拟和现场实测比较, 得到它们的蠕变变形规律一致, 值较吻合, 从而证明了用非线性流变本构方程描述冻土在复杂应力路径下的变形是可行的。

(3) 非线性流变模型本构方程的建立为进一步研究现场的冻土结构物力学行为提供了有效的研究途径, 对冻土结构物长期稳定性分析与工程预测具有十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 沈珠江. 土体应力应变分析中的一种新模型[C]//第五届土力学及基础工程学术讨论会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 101 - 105. (SHEN Zhu-jiang. A new constitutive model for soils[C]// Proceedings of the 5th Chinese Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Beijing: China Architecture & Building Press, 1990: 101 - 105. (in Chinese))
- [2] 张丙印, 贾延安, 张宗亮. 堆石体修正 Rowe 剪胀方程与南水模型[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(10): 1443 - 1448. (ZHANG Bing-yin, JIA Yan-an, ZHANG Zong-liang. Modified Rowe's dilatancy law of rockfill and Shen Zhujiang's double yield surfaces elastoplastic model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(10): 1443 - 1448. (in Chinese))
- [3] 殷宗泽, 卢海华, 朱俊高. 土体的椭圆 - 抛物双屈服面模型及其柔度矩阵[J]. 水利学报, 1996, 27(12): 23 - 28. (YING Zong-ze, LU Hai-hua, ZHU Jun-gao. The elliptic-parabolic yield surfaces model and its softness matrix[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(12): 23 - 28. (in Chinese))
- [4] FISH A A. Kinetic nature of the long-term strength of frozen soils[C]// Proceedings of the Second International Symposium on Grounding Freezing. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1980: 95 - 108.
- [5] 何平, 朱元林, 王文斌. 饱和冻结粉土扭转状态下应力应变分析[J]. 兰州铁道学院学报, 1998, 17(3): 29 - 33. (HE Ping, ZHU Yuan-lin, WANG Wen-bing. Constitutive relation of saturated frozen silt in torsion[J]. Journal of Lanzhou Railway Institute, 1998, 17(3): 29 - 33. (in Chinese))
- [6] CHAMBERLAIN E, GROVES C, PERHAM R. The mechanical behavior of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions[J]. Geotechnique, 1972, 22(3): 469 - 483.
- [7] LADANYI B, SGAOULA J. Sharp cone testing of creep properties of frozen sand[J]. Can Geotech J, 1992, 29: 757 -

- 764.
- [8] 马 巍, 吴紫汪, 马文婷. 冻结黏性土的变形分析[J]. 冰川冻土, 2000, 12(1): 43 - 47. (MA Wei, WU Zi-wang, MA Wen-ting. Analysis of deformation in frozen clay soil[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 12(1): 43 - 47. (in Chinese))
- [9] 王大雁, 马 巍, 常小晓, 等. 深部人工冻土抗变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(4): 418 - 421. (WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao, et al. Study on resistance to deformation of artificially frozen soil in deep alluvium[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 418 - 421. (in Chinese))
- [10] 王大雁, 马 巍, 常小晓. K_0 固结后卸载状态下冻土应力 - 应变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1252 - 1256. (WANG Da-yan, MA Wei, CHANG Xiao-xiao. Study on behavior of stress-strain for frozen soils subjected to K_0 consolidation by unloading triaxial shear tests[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1252 - 1256. (in Chinese))
- [11] 李栋伟, 汪仁和, 赵颜辉, 等. 抛物线型屈服面人工冻土蠕变本构模型研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1943 - 1948. (LI Dong-wei, WANG Ren-he, ZHAO Yan-hui, et al. Research on parabolic yield-surface creep constitutive model of artificial frozen soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1943 - 1948. (in Chinese))
- [12] 汪仁和, 李栋伟, 王秀喜. 改进的西原模型及其在 ADINA 程序中的实现[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1954 - 1958. (WANG Ren-he, LI Dong-wei, WANG Xiu-xi. Improved Nishihara model and realization in ADINA FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 1954 - 1958. (in Chinese))
- [13] 李栋伟, 汪仁和, 胡 璞, 等. 冻结黏土卸载状态下双屈服面流变本构关系研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2337 - 2342. (LI Dong-wei, WANG Ren-he, HU Pu, et al. Study on two yield-surface rheological model of frozen soil by unloading state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2337 - 2342. (in Chinese))
- [14] 马 巍. 围压作用下冻土的强度与变形分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2000. (MA Wei. Studying strength and deformation laws of frozen soils under action of confining pressure[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2000. (in Chinese))
- [15] 孙 钧. 岩土工程材料流变理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (SUN Jun. Rheology of geomaterial and its engineer application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))

第五届全国建筑振动学术会议今年 10 月 23~25 日将在西安召开

为交流总结近四年来我国在建筑抗震及振动控制、动力机器基础、土动力学等领域取得的最新成果和经验, 进一步推动其工程应用和学科发展, 由中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会主办, 中国振动工程学会土动力学专业委员会、中国振动工程学会结构抗振控制专业委员会、中国建筑学会抗震防灾分会结构减振与控制委员会、上海市力学学会等协办的第五届全国建筑振动学术会议将于 2008 年 10 月 23~25 日在西安市军安王朝大酒店召开。已征集的学术论文由《防灾减灾工程学报》(增刊) 在会前正式出版, 会上还将安排多名国内专家做特邀报告。会议主办、协办各方及会议承办单位(机械工业勘察设计研究院、上海交通大学、中国中元国际工程公司)热忱期望全国相关专家、学者、工程技术人员和管理人员参加本次学术会议, 并欢迎有关企业在会议期间举办新技术、新产品展览。

本次会议后续会务工作主要由在西安的机械工业勘察设计研究院承办。会议期间统一安排餐住, 费用自理。会场军安王朝大酒店位于西安市莲湖区大庆路 1 号(玉祥门西北角),

住宿费两人标间 350 元/天。会务费 900 元/人(家属、研究生 600 元/人)。2008 年 10 月 22 日全天为会议报到时间(晚上 8:00~10:00 中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会委员会议), 23~24 日学术交流(具体内容安排在报到时发送), 25 日安排重要工程参观。会务组还将协助联系旅行社安排 10 月 26~27 日西安北线二日游(黄帝陵、壶口瀑布、延安等), 与会者自愿自费参加。

为便于会议筹备和预订宾馆住房, 敬请各单位拟参加会议的代表于今年 10 月 10 日前依次将所在单位名称、与会人员姓名、性别、职称(务)、住房和会上学术报告要求、计划何日到达等有关信息告知会务组。

会务组通讯地址: 710043 西安市咸宁中路 51 号机械工业勘察设计研究院; 传真: 029-83231354(传真上请注明收件人); 联系人: 张洁(zhangjie1406@qq.com, 029-83281225, 13571912329), 钱春宇(qian.cy@163.com, 13572016623), 郑建国(zhengjig@jk.com.cn), 陈龙珠(lzchen@sjtu.edu.cn)。

(上海交通大学安全与防灾工程研究所 陈龙珠 供稿)