

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.06.004

冻土原位旁压蠕变试验粘弹性模型分析

张 虎, 张建明, 苏 凯, 刘世伟

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘 要: 研究高温-高含冰量冻土的蠕变特性, 采用 Menard 旁压仪在青藏高原多年冻土区开展了大量的旁压蠕变试验, 利用 Merchant 粘弹性模型对蠕变曲线进行回归分析并得到模型参数。结果表明, 温度对高温冻土力学性质的影响要大于含水量。随着压力的增加, 每级压力下冻土的瞬时应变占总应变中所占的比例逐渐减小。回归分析发现, 瞬时剪切模量与负温的绝对值呈线性关系, 而延迟剪切模量和粘滞系数与负温的绝对值之间为幂函数关系; 当冻土的含水量达到 46% 时, 各参数均出现峰值, 而后缓慢减小, 此结果与低温冻土有所差别。

关键词: 青藏高原; 高温-高含冰量冻土; 旁压仪; 粘弹性

中图分类号: TU413.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2013)06-0022-06

Viscoelastic Model Analysis of In-situ Pressuremeter Creep Test in Permafrost

Zhang Hu, Zhang Jianming, Su Kai, Liu Shiwei

(Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the creep behavior of warm and ice-rich frozen soils, a number of pressuremeter tests were carried out in permafrost regions on the Qinghai-Tibetan Plateau with Menard pressuremeter. Then, the regression analysis results of the creep curves generated by Merchant model and relevant parameters were obtained. The test results indicate that the temperature plays a more important role than the water content in affecting the mechanical behavior of warm frozen soils. As pressure increases, the proportion of instantaneous strain in the total strain under each pressure decreases gradually. The regression results show that the instantaneous shear modulus increases linearly with decreasing temperature, but the delayed shear modulus as well as the viscous coefficient present a power function trend. Their peak values appear at the water content of 46%, which is rather different from the test result on lower temperature frozen soils.

Key words: Qinghai-Tibetan Plateau; warm and ice-rich permafrost; pressuremeter; viscoelasticity

高温冻土由于含有大量的未冻水, 所以物理力学性质非常的不稳定, 具有强度小, 压缩性大, 对温度非常敏感的特性^[1-2]。在青藏高原, 高温冻土的分布是非常广泛的^[3], 同时近年来高温冻土区的工程活动也在不断增加。为了保证该地区工程建筑的安

全运营, 对高温冻土尤其是高温-高含冰量冻土物理力学性质的深入研究也变得越来越重要。

旁压仪作为一种方便操作的原位试验装置在冻土力学领域已经得到了非常广泛的应用^[4-7]。利用旁压仪不仅可以得到冻土的应力-应变曲线^[8-9], 还

收稿日期: 2013-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(40971045); 冻土工程国家重点实验室自主研究课题(SKLFSE-ZY-02-6)

作者简介: 张虎(1986-), 男, 博士生, 主要从事寒区岩土工程研究, (E-mail) huzhang1986@live. cn.

张建明(通信作者), 男, 研究员, 博士生导师, (E-mail) zhangjm@lzb. ac. cn.

能得到冻土的一些蠕变参数^[10-11]。Ladanyi^[12]在冻土区开展了大量的旁压蠕变试验后提出了一种幂函数模型来描述旁压试验的衰减蠕变。Murat等^[13]采用这种幂函数模型分析了海冰中旁压蠕变的试验结果,并对此模型进行了改进。马小杰等^[14]在青藏高原冻土区开展了短期旁压蠕变试验,采用此模型进行了参数反演,分析了模型参数与温度、含水量之间的关系。

上述蠕变模型为经验模型,其参数并没有明确的物理含义。为了更方便地进行高温冻土的变形计算,从实际工程角度出发,选择一种表述简单、参数意义明确的模型成为亟待解决的问题。Merchant模型是一种能够反映一般线性粘弹性材料全部特性的模型,该模型参数较少,使用简便,在土力学中得到非常广泛的应用^[15]。本研究利用旁压仪在青藏高原冻土地区进行了原位旁压蠕变试验,并利用Merchant模型对试验结果进行了分析,得出各试验的模型参数,并得到了参数与影响因素的关系。

1 试验场地

1.1 场地介绍

试验场地位于青藏高原腹地风火山北坡北麓河盆地,见图1。此地平均海拔4 618 m,寒冷干旱,年平均气温为 -3.8°C ,极端最高气温 23.2°C ,极端最低气温 -37.7°C ^[16]。该地区地表平坦、植被稀疏,表面多粉砂,附近多热融湖塘。据试验前钻探资料显示,该场地多年冻土厚度大于15.0 m,天然上限深度一般为2.5~3.0 m,上限以下3.0~3.5 m范围内地下冰比较发育,冻土年平均地温为 $-0.3\sim-1.2^{\circ}\text{C}$,属高温不稳定多年冻土区。

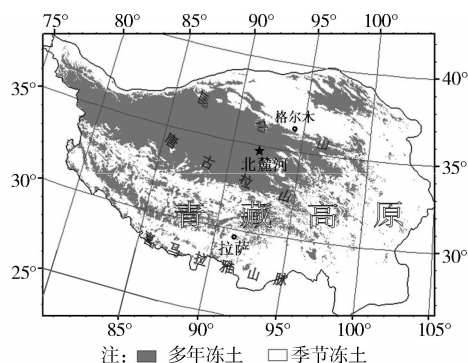


图1 试验场地位置

1.2 试验点冻土条件

由于冻土地温观测的需要,此场地内安装有很多的测温电缆,为了得到旁压试验处冻土的真实温度,我们尽量将试验孔位靠近测温电缆。除了温度

外,含水量也是影响冻土力学性质的主要因素之一。因此,为了得到冻土的含水量,我们在钻孔时将试验深度处的冻土取样、烘干,测量含水量。所有试验点的深度、土质、温度和含水量见表1。由表中可以看出,所有试验的土质均为粘土;试验深度范围为2.6~6.4 m,平均深度为4.2 m;试验点温度范围为 $-0.23\sim-1.26^{\circ}\text{C}$,平均值为 -0.59°C ;含水量范围为15.9~94.2%,平均值为34.8%。从冻土条件来看,旁压试验结果能够反映高温-高含冰量冻土的特征。

2 试验仪器与操作

2.1 试验仪器

试验所用的旁压仪为Menard预钻式旁压仪,试验时首先在土中钻一竖向钻孔,再将旁压探头下放到孔内预定的试验深度进行旁压试验。旁压仪由3部分组成:G型旁压探头、压力控制系统,压力源,如图2。本仪器的工作原理是由外部压力源提供压力,然后利用压力控制系统调节由液体介质传递到旁压探头的压力值,从而使得孔壁在压力下水平扩张。为了防止仪器中的液体在试验过程中发生冻结,传压介质采用的是稀释了一半的防冻液。

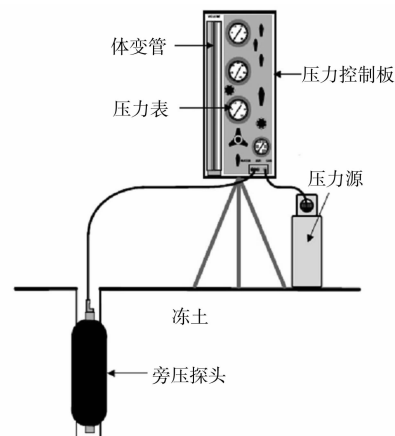


图2 旁压仪装置图

2.2 钻孔与试验操作

旁压探头外径为74 mm,高度为40 cm。在钻孔时,选取的钻头外径为76 mm,那么钻取的孔径略大于旁压探头外径而使得探头很方便放入孔中。钻孔深度一般比预定试验深度略深30 cm左右,以保证旁压探头上下两端能够同步受压膨胀。本次共开展了17个旁压蠕变试验;分为第3组和第4组(如表1中试验号所示)。试验均采用等压力加载形式,第3组加载等级为0.15 MPa,每次加载后持续约60 min。第4组加载等级为0.3 MPa,加载后持续时间各不相同,最长为420 min,最短为120 min。加

载期间每隔 1~10 min 记录一次压力和体积读数。当旁压仪体积读数达到 750 cm³ 时停止试验。

3 试验结果

在旁压蠕变试验中,蠕变应变在每级压力下的变化特征如图 3 所示(图中旁压蠕变应变 ϵ 是指孔洞的半径变化量与孔洞初始半径之比)。从曲线整体趋势来看,冻土的应变随压力增大不断增加,而且其应变速率也逐渐增大;而在每级压力下,冻土首先发生瞬时变形,然后发生蠕变,蠕变曲线均呈现衰减型。观察发现,试验开始后在前 1 或 2 级压力下的瞬时应变较后面几级压力下的瞬时应变要大得多,这说明钻孔过程中孔壁周围的原始地应力得到释放而使冻土的结构产生了一定的改变;当试验压力达到冻土的原始地应力水平时,冻土的结构才基本恢复。所以在分析试验结果时一般要将受到扰动下的数据点排除掉。

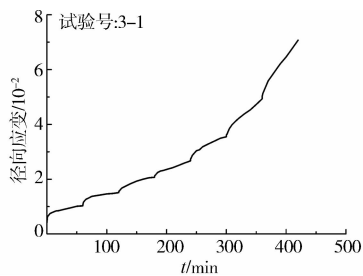


图 3 等压力加载的应变-时间曲线

3.1 不同温度、含水量下蠕变曲线对比

以 0.9 MPa 压力下的蠕变试验为例,图 4 表示不考虑冻土瞬时变形时,在温度或含水量相近的情况下冻土的蠕变曲线对比。试验 4-1 与试验 4-9 的含水量相近而温度相差较大,分别为 -1.13、-0.31℃。明显可见,在某一相同时刻前者的应变速

率及应变量均远远小于后者,这说明温度对冻土的流变性影响很大,温度越高流变性越强。试验 4-8 与试验 4-9 的温度相近,而含水量分别为 62.1% 和 28.8%。可以看出,前者的应变速率与应变量要大于后者,不过相差幅度却并不大,说明含水量对冻土流变性有一定的影响,但是影响程度不如温度显著。故可得出结论:与冻土含水量相比较,温度是影响冻土变形性质的主要因素。

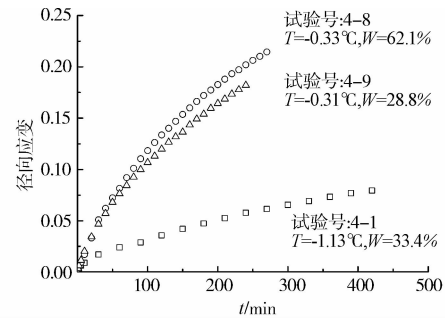


图 4 不同温度与含水量条件下冻土的旁压蠕变曲线 (压力为 0.9 MPa, T 表示温度, W 表示含水量)

3.2 瞬时应变与总应变分析

从图 5 中可以看出,将受到扰动下的数据点排除后,在较低压力时冻土的瞬时变形较小,而且每级压力下的数值基本保持不变;而当压力增加到一定数值时瞬时应变迅速增加。造成这种变化特征的原因是在压力较小时,冻土的结构虽然发生改变,但是仍在承受范围内没有发生破坏;当压力达到一定值后其结构逐渐发生破坏,导致变形急剧增加。然而,每级压力下的总应变随压力的增加一直呈现增加趋势,且增加速率不断加大。与瞬时应变趋势相对应,总应变也出现了明显的转折点,转折点之前总应变的增加速率较小,转折点之后总应变的增加速率明显增大而且几乎保持恒定。

表 1 试验点冻土条件及 0.9 MPa 压力下的蠕变模型参数

试验号	土质	深度/m	荷载持续时间/min	温度/℃	含水量	G_1 /MPa	G_2 /MPa	η /(MPa·min)	相关系数 R^2
3-1	粘土	6.2	60	-0.24	0.316	38.3	1.3	400.0	0.96
3-2	粘土	4.1	60	-0.34	0.500	55.6	3.3	320.4	0.96
3-3	粘土	5.8	60	-0.27	0.209	23.0	1.5	150.4	0.98
3-4	粘土	5.0	60	-0.23	0.306	26.6	1.0	125.4	0.97
3-5	粘土	6.4	60	-0.23	0.209	28.0	8.0	400.3	0.99
3-6	粘土	2.6	60	-0.86	0.350	57.0	3.8	500.3	0.98
3-7	粘土	3.6	60	-1.20	0.159	115.0	13.5	900.3	0.95
3-8	粘土	4.8	60	-1.19	0.242	131.2	14.0	1 400.3	0.96

续表 1

试验号	土质	深度/m	荷载持续时间/min	温度/℃	含水量	G_1 /MPa	G_2 /MPa	η /(MPa·min)	相关系数 R^2
4-1	粘土	2.6	420	-1.13	0.334	107.0	7.5	1 321.3	0.93
4-2	粘土	3.6	240	-1.26	0.225	107.8	7.9	1 000.1	0.99
4-3	粘土	4.9	210	-1.22	0.187	125.0	11.9	1 226.1	0.99
4-4	粘土	3.2	180	-0.33	0.393	58.4	2.3	381.2	0.97
4-5	粘土	4.4	180	-0.30	0.265	58.0	10.0	1 079.3	0.98
4-6	粘土	4.0	210	-0.31	0.942	32.4	1.5	223.3	0.96
4-7	粘土	2.6	120	-0.316	0.369	46.7	1.8	117.3	0.98
4-8	粘土	3.3	270	-0.33	0.621	42.0	1.7	281.2	0.98
4-9	粘土	4.0	240	-0.31	0.288	38.0	2.0	300.6	0.99

在压力较小时,瞬时应变在此级压力下总应变中所占的比例较大,随着压力的增加此比例逐渐减小。旁压试验研究表明:每级压力下瞬时应变在总应变中所占的平均比例为 4%。此比例与蠕变持续时间密切相关,持续时间越长此比例越小;当蠕变趋于稳定时,此比例也逐渐接近某一个最终数值。在温度相同时该比例随含水量的增大而减小,在含水量相同时该比例随温度的升高而增大^[14]。在高温冻土区,对建筑物进行长期沉降变形计算时可将瞬时变形忽略不计。

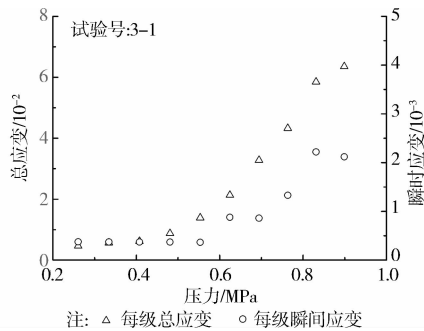


图 5 各级压力下的瞬时应变与总应变

4 旁压试验的粘弹性模型分析

4.1 孔洞扩张粘弹性理论

该模型由一个 Klevin 体和一个弹簧串联而成,如图 6。该模型在恒定压力下会产生一个瞬时变形,然后变形随时间不断增加最后趋近于一个定值。

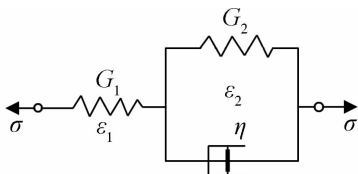


图 6 Merchant 模型

在平面应变孔洞扩张条件下 Merchant 材料的本构方程为^[15]

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} = q_0 \epsilon + q_1 \dot{\epsilon} \quad (1)$$

$$\text{式中: } p_1 = \frac{\eta}{G_1 + G_2}; q_0 = \frac{2G_1 G_2}{G_1 + G_2}; q_1 = \frac{2G_1 \eta}{G_1 + G_2};$$

G_1 表示瞬时剪切模量; G_2 为延迟剪切模量; η 为粘滞系数。假设孔洞扩张时材料整体不发生体积变化,将式(1)作拉普拉斯变换后可写成

$$\bar{P}'(s)\bar{\sigma} = \bar{Q}'(s)\bar{\epsilon} \quad (2)$$

$$\text{式中: } \bar{P}'(s) = 1 + p_1 s; \bar{Q}'(s) = q_0 + q_1 s$$

根据弹性理论,厚壁圆筒平面应变情形的径向位移为:

$$u_r = \frac{\sigma(t)}{b^2 - a^2} \frac{1 + \nu}{E} \left[(1 - 2\nu)r + \frac{b_2}{r} \right] \quad (3)$$

式中: r 为半径; u_r 为 r 处的径向位移; $\sigma(t)$ 为内壁压力; a 为内径; b 为外径; E, ν 为弹性模量与泊松比。那么,在外径 b 趋向于无穷大时,即在无限大弹性体的情况下

$$u_r = \frac{\sigma(t)a^2}{r} \frac{1 + \nu}{E} \quad (4)$$

把弹性常数 E, ν 、荷载 $P(t)$ 换为粘弹性材料函数和荷载的 Laplace 变换式 $\bar{E}(s), \bar{\nu}(s), \bar{\sigma}(s)$, 这样就有无限大粘弹性体孔洞径向位移的 Laplace 变换式

$$u_r = \frac{\bar{\sigma}(s)a^2}{r} \frac{\bar{P}'(s)}{\bar{Q}'(s)} \quad (5)$$

将 $\bar{P}'(s), \bar{Q}'(s)$ 的表达式以及 $\bar{\sigma}(s) = \frac{\sigma_0}{s}$ 代入式(5)中得

$$u_r = \frac{\sigma_0(s)a^2}{2rs} \left(\frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2 + \eta s} \right) \quad (6)$$

逆变换后得孔洞内壁 ($r = a$) 径向应变

$$\epsilon = \frac{u_r}{a} = \frac{\sigma_0}{2G_1} + \frac{\sigma_0}{2G_2} (1 - e^{-\frac{G_2}{\eta}t}) \quad (7)$$

4.2 旁压蠕变试验参数反演

为了得到不同冻土条件下的 Merchant 模型参数,那么需要利用式(7)对试验数据进行曲线拟合。应注意的是,由于冻土具有高度的非线性,所以某一压力下的蠕变曲线不能简单地由之前每一级压力下的蠕变响应叠加而成^[17],而利用“陈宗基法^[18]”对蠕变应变进行处理是比较合理的方法^[19],即将此压力(包含此级压力)之前每一级压力下持续到相同时刻时的应变进行叠加。通过这种方法,便可从分级旁压试验中得到某一压力时冻土的蠕变应变曲线,然后针对公式(7)利用 Origin 软件进行参数回归。以 0.9 MPa 压力下的数据为例,本文得到了各个试验的回归参数,见表 1。由表中可以看出,回归的相关系数均大于 0.93,这说明回归结果具有较高的可信性。瞬时剪切模量 G_1 变化范围为 23.0~131.2 MPa,平均值为 65.5 MPa;延迟模量 G_2 范围为 1.0~14.0 MPa,平均值为 5.7 MPa;粘滞系数 η 范围为 117.3~1 400.3 MPa·min,平均值为 612.9 MPa·min。

G_2 能够反映材料在恒定荷载作用下最终应变的大小, G_2 越大,最终应变量越小;反之,最终应变量越大。 η 用于描述粘弹性材料的阻尼性能, η 越大,阻尼性能越好,冻土蠕变速率越小;反之,蠕变速率越大。

由于试验所遇到的土质均为粘土,而且试验深度相差不大,那么拟合参数主要与冻土的温度和含水量有关。图 7 表示在含水量相近的情况下($W = 15.9\% \sim 39.3\%$) 3 个参数与温度之间的关系。 G_1 大体上和负温的绝对值呈线性正相关关系,而 G_2 和 η 与负温的绝对值表现为一种幂函数的关系。总体上来说,随着温度的升高,冻土强度减小,蠕变速率增大,变形量增大。其主要原因是温度升高会导致未冻水含量升高,使得颗粒间的胶结作用减弱,这与崔托维奇^[1]所得的结论是相近的。

图 8 表示在温度相近的情况下($T = -0.23 \sim -0.34^\circ\text{C}$) 3 个参数与含水量之间的关系。 G_1 、 G_2 和 η 均呈现随含水量先增后减的趋势,即首先随含水量增加而逐渐增大直到一个峰值,之后随着含水量的继续增大而慢慢减小至一个稳定值。 G_1 、 G_2 的峰值含水量分别为 47%、48%,而 η 的峰值含水量为 43%,平均为 46%。也就是说,在 $-0.23 \sim -0.34^\circ\text{C}$ 的温度区间内,当含水量达到 46% 左右时冻土强度最大,抵抗变形的能力最强。崔托维奇^[1]、何平^[20] 分析得到冻土强度达到峰值时含水量都约为 20%,这与本文的结果有着很大的差异。究其原因是与温度有关,上述作者所针对的对象都是低温冻土,而本文

中的试验对象都是高温冻土,这种差别从马小杰^[21] 开展的高温冻土的单轴压缩试验结论中也有所体现。冻土中总是含有一定数量的未冻水,温度越高未冻水含量越高。在恒定温度的情况下,总含水量越小,未冻水在总含水量中所占的比例越高,冻土的胶结能力越弱,从而其剪切模量等参数也较小;随着总含水量的增加,未冻水的比例减小,冰的比例增加,当这一比例最优时土颗粒与冰之间的胶结能力最强,从而强度也最大;当总含水量超过一定数值后,土颗粒的体积在冻土中所占的比例变得很小,使得冻土的性质逐渐接近纯冰,从而强度又缓慢下降,逐渐接近于纯冰的强度。

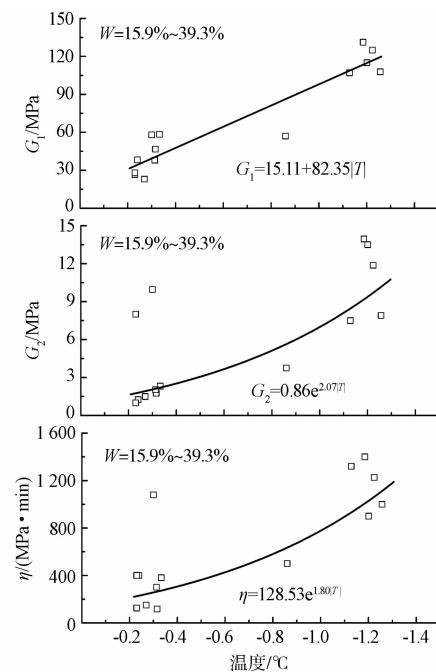


图 7 模型参数与温度的关系

5 结 论

通过对高温-高含冰量冻土开展原位旁压试验,得出以下结论:

1) 含水量相近时温度越高冻土的流变性越大;温度相近时含水量越高冻土的流变性越大,然而其对冻土流变性的影响不如温度显著。

2) 当压力较小时,冻土大体表现为弹性变形,其应变随压力按比例增加;当压力超过一定值后,其结构逐渐发生破坏,导致变形加速增长。在每级压力下冻土的瞬时应变在总应变中所占的比例平均为 4%,此比例随着压力持续时间的延长而减小。

3) 利用 Merchant 粘弹性模型对试验曲线进行回归分析得到了模型中的力学参数。分析发现, G_1 与负温的绝对值呈线性关系,而 G_2 和 η 与负温的绝

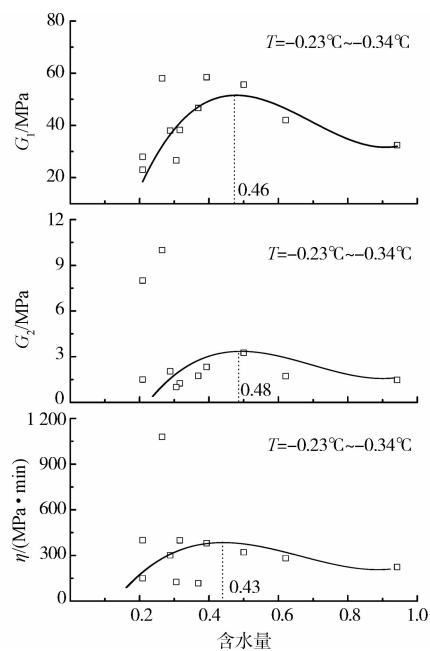


图8 模型参数与含水量的关系

对值为幂函数关系;当含水量增加到46%时,各参数均出现峰值,而后缓慢减小,此结果与低温冻土有所差别。

4)本文是对原位试验数据结果的一个定性分析,将模型中各参数与影响因素之间的关系量化是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] 崔托维奇. 冻土力学[M]. 张长庆, 朱元林. 译. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] 朱元林, 张家懿. 冻土的弹性变形及压缩变形[J]. 冰川冻土, 1982, 4(3): 29-40.
Zhu Y L, Zhang J Y. Elastic and compressive deformation of frozen soils [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, 4(3): 29-40.
- [3] 程国栋. 青藏高原多年冻土区路基工程地质研究[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 134-141.
Cheng G D. Research on engineering geology of the roadbed in permafrost regions of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 134-141.
- [4] Ladanyi B, Melouki M. Determination of creep properties of frozen soils by means of the borehole stress relaxation test [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30: 170-186.
- [5] Kjartanson B H, Shields D H, Domaschuk L, et al. The creep of ice measured with the pressuremeter [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25: 250-261.
- [6] Murat J R, Ladanyi B, Huneault P. In situ determination of creep properties of sea ice with the pressuremeter [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26: 575-594.
- [7] Yu W B. Study on the borehole pressuremeter test in permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 3: 287-291.
- [8] Palmer A C. Undrained plane-strain expansion of a cylindrical cavity in clay: a simple interpretation of the pressuremeter test [J]. Geotechnique, 1972, 22(3): 451-457.
- [9] Ladanyi B. In-situ determination of undrained stress-strain behavior of sensitive clays with the pressuremeter [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1972, 9: 313-319.
- [10] Yu W B, Zhu Y L, Zhang J M, et al. Study on the borehole pressuremeter test in permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 287-291.
- [11] 马小杰, 张建明, 郑波, 等. 青藏铁路路基下高温-高含冰量冻土旁压试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 765-768.
Ma X J, Zhang J M, Zheng B, et al. Study on warm and ice-rich permafrost beneath Qinghai-Tibet Railway embankment with pressuremeter [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 765-768.
- [12] Ladanyi B. Interpretation of pressuremeter test results in frozen soils [R]. Internal Report No. 401 of the Division of Building Research, Ottawa, 1972.
- [13] Murat J R, Ladanyi B, Huneault P. In situ determination of creep properties of sea ice with the pressuremeter [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26: 575-594.
- [14] 马小杰, 张建明, 郑波, 等. 青藏高原高温冻土旁压蠕变试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 1-5.
Ma X J, Zhang J M, Zheng B, et al. Experimental study on the lateral pressure creep of warm permafrost in Qinghai-Tibet Plateau [J]. China Railway Science, 2008, 29(6): 1-5.
- [15] 杨挺青. 粘弹性力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- [16] 牛富俊, 张建明, 张钊. 青藏铁路北麓河试验段冻土工程地质特征及评价[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 264-269.
Nu F J, Zhang J M, Zhang Z. Engineering geological characteristics and evaluations of permafrost in Beiluhe testing field of Qinghai-Tibetan Railway [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 3: 264-269.
- [17] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1081-1106.

- and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(4): 307-316.
- [13] Li K S, Lumb P. Probabilistic design of slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(4):520-535.
- [14] 吕大刚,贾明明,李刚. 结构可靠度分析的均匀设计响应面法[J]. 工程力学, 2011, 28(7):109-116.
- Lyu D G, Jia M M, Li G. Uniform design response surface method for structural reliability analysis [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7):109-116.
- [15] 李亮,王玉杰,王秋生,等. 土坡稳定分析中模拟任意滑动面的新策略及其效率分析[J]. 水利学报, 2008, 39(5):535-541.
- Li L, Wang Y J, Wang Q S, et al. New procedure for simulating arbitrary slip surface of soil slope in stability analysis [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(5):535-541.
- [16] Geem Z W, Kim J H, Loganathan G V. Harmony search [J]. Simulation, 2001, 76(2):60-68.
- [17] 李亮,于广明,褚雪松. 边坡临界滑动场方法的优化算法实现[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6):827-831.
- Li L, Yu G M, Chu X S. The Simulation of critical slip field method of slopes based on optimization algorithm [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 31(6): 827-831.

(编辑 胡 玲)

(上接第 27 页)

- Sun J. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(6): 1081-1106.
- [18] 陈宗基,康文法. 岩石的封闭应力、蠕变和扩容及本构方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4): 299-312.
- Tan T T, Kang W F. On the locked in stress, creep and dilatation of rocks, and the constitutive equations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1991, 10(4): 299-312.
- [19] 张先伟,王常明,张淑华. 软土蠕变数据处理方法的对比分析[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2010, 40(6): 1404-1408.
- Zhang X W, Wang C M, Zhang S H. Comparative analysis of soft clay creep data processing method [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(6):1404-1408.
- [20] 何平,程国栋,杨成松,等. 非饱和冻土的强度分析 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 260-263.
- He P, Cheng G D, Yang C S, et al. Analysis of strength of unsaturated frozen soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 260-263.
- [21] 马小杰,张建明,常小晓,等. 高温-高含冰量冻结黏土强度试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2498-2502.
- Ma X J, Zhang J M, Chang X X, et al. Experimental research on strength of warm and ice-rich frozen clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(9): 2498-2502.

(编辑 胡 玲)