

三种冻土长期强度预报方程的适用性研究

陈鑫^{1,2}, 张泽^{1†}, 马巍¹, 李东庆¹, 杜微³, 姚晓亮¹

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室,甘肃 兰州 730000;
2.中国科学院大学,北京 100049;3.兰州大学 土木工程与力学学院,甘肃 兰州 730000)

摘要:为研究不同冻土长期强度预报方程针对不同土性的适用性,以饱和冻结砂土、粉土、黏土为研究对象,采用球形模板压入仪对其长期强度进行测试,选用常用的3种冻土长期强度预报方程对3种土的长期强度进行预报.通过对比试验实测值和预测值,研究3种长期强度预报方程在不同土性中的适用性.结果表明:维亚洛夫长期强度预报方程可以较为准确地预测粉土、黏土的长期强度值;对于砂土,3种长期强度预报方程预测值都有一定的偏差,建议取3种预报方程的加权平均值作为其预测值.

关键词:冻土;长期强度;强度预报方程;球形模板压入仪;适用性

中图分类号:TU43

文献标志码:A

Study on Applicability of Long-term Strength Prediction Equations for Three Frozen Soils

CHEN Xin^{1,2}, ZHANG Ze^{1†}, MA Wei¹, LI Dongqing¹, DU Wei³, YAO Xiaoliang¹

(1.State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3.College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract:In order to study the applicability of different long-term strength prediction equations for different soils, the long-term strength of saturated frozen sandy soil, silt and clay were tested using a spherical template indenter. At the same time, the long-term strength prediction equations of three kinds of soils were used to predict their long-term strength. The applicability of the three long-term strength prediction equations for different soils was studied by comparing the measured values with the predicted values. The long-term strength prediction equation of Vyalov can accurately predict the long-term strength of silt and clay. For the sand, the prediction values of the three long-term strength prediction equations have some deviation, which recommends that the weighted average of the three predictive equations can be taken as the predictions.

Key words:frozen soil; long-term strength; strength prediction equation; spherical template indenter; applicability

* 收稿日期:2017-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41771078,41301070,41271080),National Natural Science Foundation of China(41771078,41301070,41271080);青海省交通科学研究院开放基金项目(2016-01-04),Open Fund Project of Qinghai Traffic Science Research Institute(2016-01-04)

作者简介:陈鑫(1990—),男,山西襄汾人,中国科学院西北生态环境资源研究院博士研究生

† 通讯联系人,E-mail:zhangze@lzb.ac.cn

冻土抗剪强度是冻土力学最重要的内容之一,它是确定寒区地基承载力、冻结凿井中冻结壁厚度的基本依据^[1-3]。我国自20世纪60年代以来曾先后用球形压模、楔块剪切、直接剪切和三轴压缩等试验方法对冻土抗剪强度进行了系统的研究^[4]。由于冻土中冰胶结物的存在,使其在荷载作用下表现出明显的流变性和对温度的依赖性^[5]。寒区建筑物设计年限通常为几十年甚至上百年,在工程实践中必须充分考虑冻土的流变性,把短期试验所得强度随时间下降规律扩大到建筑物运营期限内,进而预报冻土的长期抗剪强度^[6]。

所有冻土强度指标,在荷载作用下与时间的关系特征都相同^[6]。冻土长期抗剪强度的确定多以经验方法为主。一般是通过冻土的蠕变或松弛试验得到冻土的长期强度极限,以此来评价冻土的长期强度,如用应力松弛方程、应力-应变关系、塑性黏滞流动方程等方法确定冻土长期强度极限;也可通过时间比拟法直接预报冻土长期强度,如温度-时间比拟法^[7]。常用的长期强度预报方程有维亚洛夫对数方程^[8]、罗曼幂方程^[9]、吴紫汪幂方程^[7]。

冻土流变性表现的剧烈程度不仅受到冻土本身物理性质的影响,还与外界条件的变化密切相关。不同研究者提出的冻土长期抗剪强度预报方法不可能同时考虑到影响强度随时间变化的所有因素。罗曼幂方程和吴紫汪幂方程建立时都是依据某种特定土性的试验结果得到,由特定土的试验结果得到的长期强度预报方程是否适用于其它土性长期强度的预测?也就是说,某个特定的预报方程可能只适用于某种类型的土,不同预报方程对同一种土的长期强度预测结果也可能存在差异,因此有必要研究常用的长期强度预报方程针对不同土性的适用性。以饱和砂土、粉土、黏土为研究对象,采用球形模板压入仪对其长期强度变化进行测试。选用常用的三种冻土长期强度预报方程对其进行预测,通过与实测结果对比分析,得到了三种冻土长期强度预报方程在不同土性中的适用性。

1 试验原理与长期强度预报方程

1.1 试验原理

冻土与融土的区别主要在于冻土中含有冰胶结物,冰胶结物内聚力使冻土强度远远高于融土。球形模板压入仪是为了确定冻土长期强度指标的专门实验方法。此仪器的试验原理是在布氏金属硬度

实验和伊世林斯基塑性理论的分析方法的基础上建立起来的,其结构在相关文献中已有详细报道^[10-11]。

此方法把球模的压入深度和试验材料黏聚力的大小联系起来,随着球模的压入,其与试验材料的接触面积增大,作用在试验材料上的应力减小,这个过程反映了强度随时间的降低(见图1)。根据球模压入深度计算土的黏聚力如下式所示^[12]:

$$C_t = K \frac{P}{\pi d S_t} \quad (1)$$

式中: C_t 为随时间变化的黏聚力(MPa); P 为作用在球形压模仪的竖向载荷(N); K 为比例系数,取值为0.18; d 为球形压板直径(mm); S_t 为随时间变化的球形压板压入深度(mm)。

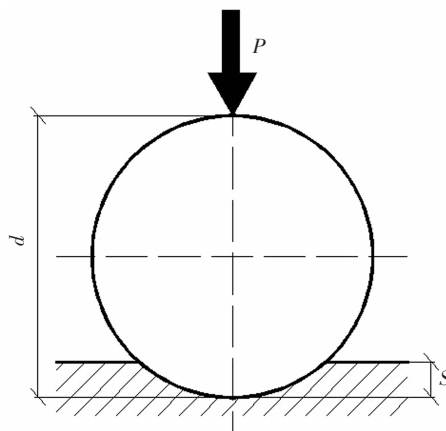


图1 球形模板压入试验示意图

Fig.1 Sketch of testing about spherical template indenter

根据已有研究可知冻土抗剪强度在一定条件下符合库仑定律,即是由黏聚力和内摩擦角两部分组成^[13]:

$$\tau = C(\theta, w, t) + \sigma' \tan \varphi(\theta, w, t) \quad (2)$$

式中: τ 为冻土抗剪强度(kPa); C 为冻土黏聚力(kPa); σ' 为法向压力(kPa); φ 为冻土内摩擦角($^{\circ}$); θ 为温度($^{\circ}\text{C}$); w 为冻土含水率; t 为时间(s)。

Chamberlain等用三轴压缩试验研究冻结粉土的抗剪强度得到冻结粉土的内摩擦角等于零^[14],也就是说冻结粉土的抗剪强度等于其黏聚力。这一重要结论说明采用球模试验确定冻结粉土抗剪强度是合理的。

对于内摩擦角不为零的冻土,根据球模的压入深度确定的黏聚力同时反映了土的摩擦力,按照崔托维奇的建议,把黏聚力 C_t 称为等效黏聚力,以等效黏聚力来作为冻土强度指标。

球模试验是专门为确定冻土强度指标的实验

方法,简单易用,在试验周期和试验效果方面均有很大的优势.

1.2 维亚洛夫对数方程

维亚洛夫分别从动力学理论、变形硬化理论两个角度出发得到了形式相同的长期强度方程. 如式(3)所示^[8]:

$$\sigma = \frac{\beta}{\ln \frac{t+t^*}{B}} \quad (3)$$

式中: t 为与长期强度 σ 对应的时间; t^* 为非常小的时间值,等于与瞬时强度对应的加载时间,为简便取其为与 t 单位相同的值 1; $\beta = \sigma_0 \ln(1/B)$; B 为参数; σ_0 为 $t = 0$ 时的相对瞬时强度值.参数 β 和 σ_0 的值取决于土体的温度.

令 $y = 1/\sigma, x = \ln(t + 1)$,则方程(3)中的参数可用回归方程 $y = x \tan \varphi + \alpha$ 来确定.如图 2 所示,参数 β 由 $1/\sigma - \ln(t + 1)$ 坐标系中直线的倾角确定,参数 B 由直线在纵坐标轴上的截距确定.即 $\alpha = -(1/\beta) \ln B, \beta = 1/\tan \varphi$.

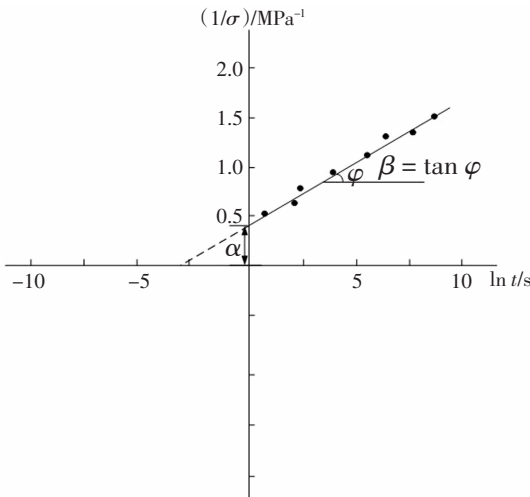


图 2 冻土的 $1/\sigma - \ln(t + 1)$ 关系图
Fig.2 The schematic diagram(Vyalov) of test data arranging of frozen soil

1.3 罗曼长期强度幂方程

罗曼在进行冻结泥炭土长期强度的实验研究时发现,强度降低过程可以用幂关系很好地表述^[9]:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{(t/t_0)^{\beta_0}} \quad (4)$$

式中: σ_0, t_0 为参数; β_0 为温度的函数.将这个方程变形为线性形式:

$$\lg \sigma = \lg \sigma_0 - \beta_0 (\lg t - \lg t_0) \quad (5)$$

对相同类型的土在相同试验方法下进行不同温度下的长期强度试验,将得到的长期强度值绘制

于双对数坐标内,如图 3 所示.可以发现对应于不同温度下的直线都经过同一点,该点的坐标确定了参数 σ_0 和 t_0 的值.参数 t_0 的值接近 10^{-13} s,即波尔茨曼理论粒子热振动的时间.参数 β_0 可以由 $\lg \sigma - \lg t$ 坐标系中直线和横坐标轴夹角的补角的正切值确定.

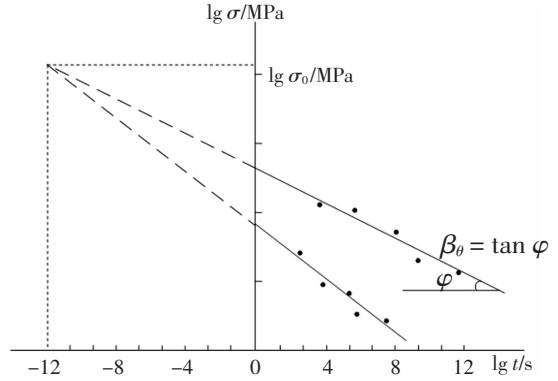


图 3 冻土的 $\lg \sigma - \lg t$ 关系图
Fig.3 The schematic diagram (Roman) of test data arranging of frozen soil

1.4 吴紫汪长期强度幂方程

吴紫汪等根据冻结红色亚黏土应力松弛试验的结果得出冻土破坏时间与应力关系在双对数坐标系中基本呈线性关系,如图 4 所示,提出式(6)所示的冻土长期强度预报方程^[7]:

$$\sigma = \frac{\sigma_H}{(t/t_H)^{\beta_\theta}} \quad (6)$$

式中: σ_H 为对应于短时间 t_H 的短时冻土强度; σ 为长期强度. β_θ 为与土温 θ 、含水量 w 有关的试验系数,即 $\beta_\theta = f(\theta, w)$.当 $w \leq w_p + 35\%$ 时,上式可近似为 $\beta_\theta = f(\theta)$; 当土温 θ 低于或等于 -1°C 时, $\beta_\theta = 0.054$; 当土温 θ 高于 -1°C 时, $\beta_\theta = 0.070$.

β_θ 也可以通过两次短时冻土强度试验用双对数坐标系中直线倾角的余切值确定.当 β_θ 值确定以后,就可以求得任何时刻的强度 σ .

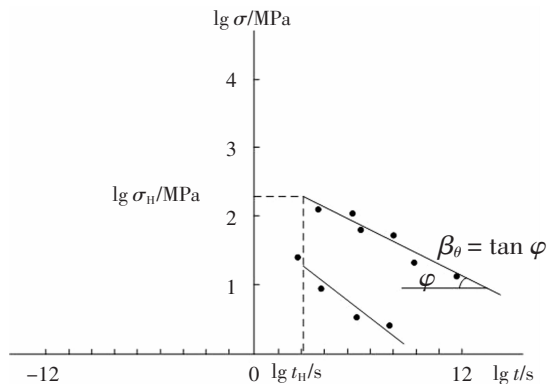


图 4 冻土的 $\lg \sigma - \lg t$ 关系图^[7]
Fig. 4. The schematic diagram of test data arranging of frozen soil^[7]

2 试验方法

试验所用的砂土、粉土、黏土分别取自兰州、陕西富平、青藏高原.冻融循环引起土强度的变化及其机理的研究尚未形成统一的结论^[15-16].已有研究表明当冻融循环达到 50 次,冻土的长期强度便趋于稳定^[17].为避免冻融循环对长期强度确定的干扰,对 3 种土样冻融循环 50 次后进行力学试验.3 种土的基本物理性质如表 1、表 2 所示.

表 1 试验土的粒径分布

Tab.1 The distribution of grain size of tested soils

土性	颗粒粒径			
	>0.5	0.5-0.075	0.075-0.005	<0.005
砂土	25.3	62.7	6.5	5.5
粉土	1.6	20.1	61.6	16.7
黏土	1.4	6.2	60.5	31.9

表 2 3 种土样的物理性质指标

Tab.2 Physical properties of three soil samples

土性	密度/(g·cm ⁻³)	含水量/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
砂土	2.01	20.20	—	—	—
粉土	1.92	32.32	29.83	20.04	9.79
黏土	1.59	58.53	65.57	44.98	20.59

2.1 制样

利用制样机制取样品,标准环刀内径为 61.8 mm,高为 20 mm.确保土样均一,土样表面水平.把试样放入饱和缸进行抽真空饱和.饱和后用保鲜膜密封试样.冻融作用会造成冻土内部水分变化^[18],为保证冻融循环过程中试样中的水分迁移不致引起试样的不均匀性,将冻结与融化温度分别设定为 -20 ℃与 +20 ℃,对试样进行快速多向冻结.每种土制取 4 个试样,1 个用于试验,其它 3 个用于对照.

2.2 用球模仪进行长期黏聚力测试

将试样放入控制温度为 -20 ℃的恒温箱中,采用球模仪进行试验(如图 5).将冻结试样放入球模仪中,使球模仪圆形压头与土样表面刚好接触.

通过砝码施加竖向恒定荷载 15 kg,采用量程为 50 mm,测量精度为 0.01 mm 的 YHD-50 型位移传感器测量随时间变化的球形压板压入深度,位移计探头置于砝码平面上.

松开球模固定栓,4 台球模仪同时进行黏聚力长期强度测试,测试时间设定为 24 h.对每个样品进

行 5 次重复试验,计算平均沉降量.

已知球的直径 d ,并测得荷载 P 下各个时刻的沉降量 S_t ,便可根据式(1)计算出不同时刻的等效黏聚力 C_t .

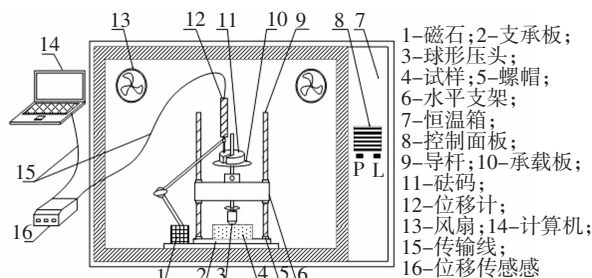


图 5 球形模板压入仪结构图

Fig.5 Device of spherical template indenter

3 试验与预报结果对比分析

3.1 试验结果

图 6 为砂土、粉土和黏土的球模试验结果.

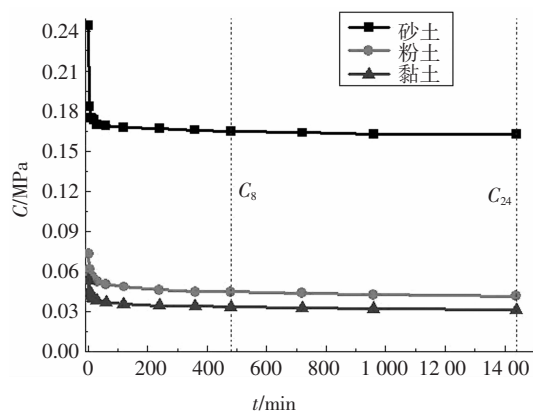


图 6 砂土、粉土和黏土等效黏聚力的长期强度曲线图

Fig.6 The long-term strength change curve of the equivalent cohesion of sand, silt and clay

随着时间的变化,球形压板压入深度增大,球形压板与土体接触面积增大,相应地传至土体的应力减小,等效黏聚力逐渐降低.等效黏聚力随时间变小也是冻土流变过程的一个表象.因为球形测试头与试样接触面积增大使得应力降低进而加速了变形的稳定.从图 6 也可以看出用球模仪试验确定长期等效黏聚力强度是相当节约时间的,24 h 后 3 种土的等效黏聚力变化很小,我们取前 24 h 试验结果与预报方程对比分析.图中 C_8 、 C_{24} 分别为第 8、24 h 等效黏聚力强度.

从试验结果可以看出冻土长期等效黏聚力强度及其随时间的变化与土的类型有很大的关系.3 种土初始含水量不同,但都没超过各自的饱和含水

量.砂土的相对瞬时等效黏聚力强度、长期等效黏聚力强度、24 h 等效黏聚力强度 (可以看做长期等效黏聚力强度极限)明显高于其它两种土,粉土次之,黏土最低.定性分析认为这种宏观表象与 3 种土的细微观结构有关.一方面由于砂土活化比表面积最小,黏土活化比表面积最大,黏土颗粒束缚水的能力最强;另一方面黏土的初始含水量最大.因此在相同负温状态下黏土中未冻水含量最大,较高的未冻水含量致使黏土等效黏聚力强度最低,但不同土性冻结状态下力学特性仍需进一步研究.

从试验开始的一段时间内,3 种土的长期等效黏聚力强度都降低,但降低幅度明显不同.砂土的长期等效黏聚力强度降低幅度最大.我们采用松弛时间 T_r 来作为表征强度降低的指标,在这个时间段内长期等效黏聚力强度降低值为相对瞬时强度 C_0 与 24 h 时等效黏聚力强度 C_{24} 之差的 $1/e$.砂土、粉土和黏土的松弛时间 T_r 分别为 3 min、5 min 和 12.5 min.

$$\frac{1}{e} = \frac{C_0 - C_t}{C_0 - C_{24}} \quad (7)$$

3.2 长期强度预报结果

用前述 3 种预报方程分别对砂土、粉土、黏土进行 24 h 内的长期等效黏聚力强度预报,并与球模仪测量值进行对比,预报方程参数取值如表 3 所示,结果如图 7~图 9 所示.

表 3 预报方程参数取值

Tab.3 The parameter of prediction equation

土性	维亚洛夫		罗曼		吴紫汪	
	B	β	σ_0	β_0	σ_H	β_0
砂土	2.9×10^{-9}	4.83	0.71	0.04	0.24	0.05
粉土	0.01	0.67	0.70	0.07	0.07	0.07
黏土	5.1×10^{-9}	1	0.48	0.06	0.05	0.05

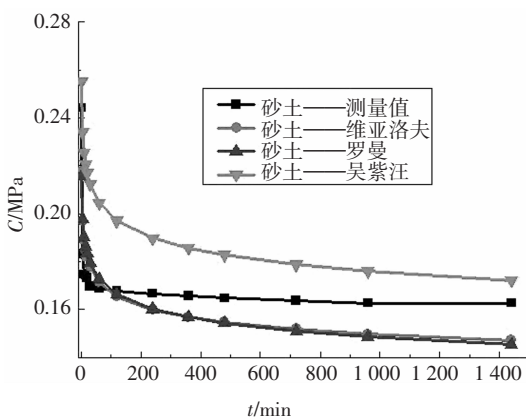


图 7 砂土等效黏聚力的长期强度预报值与实测值曲线
Fig.7 The forecast and test long-term strength curve of the equivalent cohesion of sand

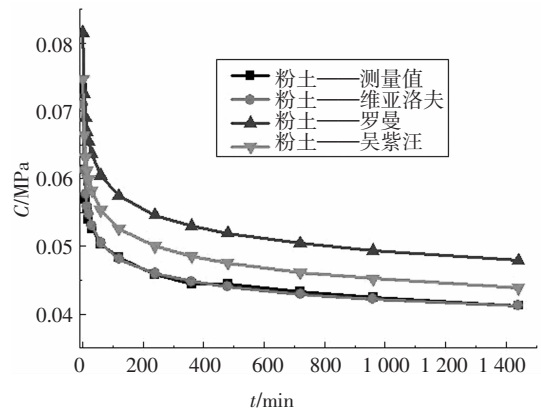


图 8 粉土等效黏聚力的长期强度预报值与实测值曲线
Fig.8 The forecast and test long-term strength curve of the equivalent cohesion of silt

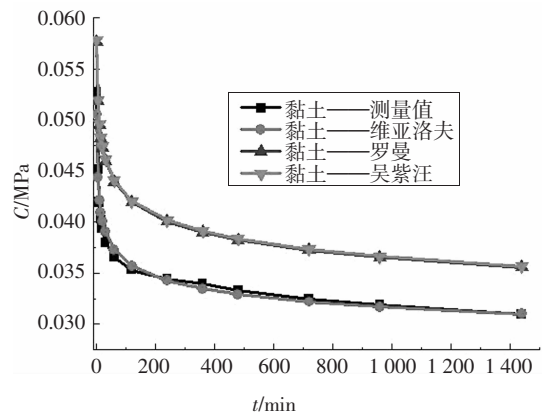


图 9 黏土等效黏聚力的长期强度预报值与实测值曲线
Fig.9 The forecast and test long-term strength curve of the equivalent cohesion of clay

从图 7 可以看出 3 种长期强度预报方程对砂土长期等效黏聚力强度的预测结果与实测值偏差较大.尤其在初始阶段吴紫汪预报方程与实测值之间偏差较大,相对误差最大为 29%.分析原因认为砂土材料与球模试验所假设的内摩擦角等于零偏差较大,使得试验结果本身就有一定的偏差.维亚洛夫预报方程和罗曼预报方程的长期强度预测值非常接近.球模试验实测值介于 3 种长期强度预报方程预测值之间.对于砂土,建议取 3 种长期强度预报方程的加权平均作为长期强度预报值.

从图 8 可以看出 3 种长期强度预报方程对粉土的长期强度都可以进行较精确的预测,不同时间对应的长期强度预测结果最大偏差不超过 10 kPa.维亚洛夫长期强度预报方程对粉土长期强度的预测结果与实测值吻合最好.罗曼长期强度预报方程预测结果比实测值偏大,吴紫汪长期强度预报方程

预测结果介于其它两种预报方程预测结果之间.建议根据维亚洛夫长期强度预报方程对粉土长期强度值做预测,可获得更准确和偏于安全的长期强度预测结果.

从图 9 可以看出维亚洛夫长期强度预报方程对黏土长期强度的预测结果与实测值吻合较好.罗曼长期强度预报方程预测结果和吴紫汪长期强度预报方程预测结果吻合较好,预测值略高于实测值,最大偏差大约为 7 kPa 左右.建议根据维亚洛夫长期强度预报方程对黏土长期强度值做预测.

3.3 3 种长期强度预报方程对比

表 4 为 3 种长期强度预报方程汇总.冻土长期强度的确定仍以经验方法为主.影响冻土长期强度的因素众多,即使是经过严格理论推导的维亚洛夫对数方程对长期强度预报的精度在很大程度上也取决于不同温度下参数 β 和 σ_0 的取值.罗曼长期强度预报方程和吴紫汪长期强度预报方程具有相同的形式,但方程中参数的确定方法不同.罗曼长期强度预报方程对粉土和黏土长期强度的预测结果比实测值偏大,对砂土长期强度的预测结果比实测值偏小.方程中参数是通过用不同温度下 $\lg\sigma - \lg t$ 坐标系中直线外推的交点坐标来确定.由于该外推交点较远,精确确定其值比较困难,其取值对预报结果影响较大.吴紫汪长期强度预报方程是统计多组冻土应力松弛试验的结果绘制在双对数坐标系后得到的经验方程.当试验系数 β_0 值确定后,只要进行一次短时强度试验,分别确定时间 t_H 及所对应的强度 σ_H ,就可求得任何时刻对应的长期强度,试验系数 β_0, t_H, σ_H 取值对预报结果影响较大.

表 4 3 种长期强度预报方程

Tab.4 Three long-term strength prediction equations

类型	方程形式	附注
C.C.维亚洛夫	$\sigma = \frac{\beta}{\ln \frac{t+t^*}{B}}$	当 $t \rightarrow 0$ 时, $\sigma \rightarrow \sigma_0$; 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\sigma \rightarrow 0$. 广泛应用于冻土、融土、金属
罗曼	$\sigma = \frac{\sigma_0}{(t/t_0)^{\beta_0}}$	至少需要 2 条不同温度下直线的交点坐标才能确定参数 σ_0 和 t_0 的值; 冻结泥炭土中应用较多
吴紫汪	$\sigma = \frac{\sigma_H}{(t/t_H)^{\beta_0}}$	当 β_0 值确定后, 只需在短时间 t_H 进行一次强度试验确定 σ_H , 就可计算任何时刻对应的长期强度. 参数取自试验段的初期, 测量精度对预报影响较大

4 结论

采用球形模板压入仪对饱和砂土、粉土、黏土的长期强度进行测试,选用常用的 3 种冻土长期强度预报方程对 3 种土的长期强度进行预测,通过对比试验实测值和预测值,研究 3 种长期强度预报方程在不同土性中的适用性.初步结论如下:

1) 球模试验方法简单,测试周期短,适用于确定内摩擦角接近于零的冻结粉土的长期强度,对于冻结砂土所测结果为等效黏聚力强度.由球模仪所测 3 种土的长期等效黏聚力强度曲线可知砂土的长期等效黏聚力强度和长期等效黏聚力强度极限最大,粉土次之,黏土最小.

2) 从试验开始的一段时间内,3 种土的长期等效黏聚力强度都降低,但降低幅度和降低快慢明显不同.砂土的长期等效黏聚力强度降低幅度最大,松弛时间短,在很短的时间后长期强度基本稳定.这点根据球模试验的原理也可得到,即砂土中初始一段时间内球形压板压入深度占最终稳定后的压入深度比例大.

3) 对比 3 种土的长期等效黏聚力强度实测值和不同预报方程预测值可知: $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 时 3 种预报方程对 3 种土的长期等效黏聚力强度值预测比较准确,最大相对误差不超过 29%.

4) 对于砂土,维亚洛夫预报方程和罗曼预报方程的长期强度预测值非常接近,球模试验实测值介于 3 种长期强度预报方程预测值之间,建议取 3 种长期强度预报方程预测值的加权平均作为其长期强度预测值.对于粉土,建议取维亚洛夫长期强度预报方程对其长期强度值做预测,可以获得较为准确的预测结果.对于黏土,罗曼长期强度预报方程预测结果和吴紫汪长期强度预报方程预测结果吻合较好,预测值略高于实测值,同样建议取维亚洛夫长期强度预报方程对黏土长期强度值做预测.

5) 由于只进行了 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 下 3 种常用的长期强度预报方程针对不同土性的长期强度预测的适用性研究,更多温度条件下长期强度预报方程的适用性研究有待于进一步开展.

参考文献

[1] JGJ 118-1998 冻土地区建筑地基基础设计规范[S].北京:中

- 国建筑工业出版社,1999:46—49.
- JGJ 118—1998 Foundation design code for building foundation in frozen soil region [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,1999:46—49.(In Chinese)
- [2] 姚直书,程桦,张国勇,等.特厚冲积层冻结法凿井外层井壁受力实测研究[J].煤炭科学技术,2004,32(6):49—52.
- YAO Z S,CHENG H,ZHANG G Y,*et al.*Reearch on situ measurement of outer shaft wall in freezing sinking shaft in special thick alluvium[J].Coal Science and Technology,2004,32(6):49—52.(In Chinese)
- [3] 吴紫汪.冻结凿井冻土壁的工程性质[M].兰州:兰州大学出版社,1988:8—30.
- WU Z W.Engineering behavior of frozen wall in artificial freezing sinking [M]. Lanzhou:Lanzhou University Press,1988:8—30. (In Chinese)
- [4] 朱元林.我国冻土强度与蠕变研究[J].冰川冻土,1988,10(3):332—337.
- ZHU Y L.Studies of strength and creep behaviour of frozen soils in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,1988,10 (3):332—337.(In Chinese)
- [5] 马巍,王大雁.冻土力学[M].北京:科学出版社,2014:2—4.
- MA W,WANG D Y.Frozen soil mechanics [M]. Beijing: Science Press,2014:2—4.(In Chinese)
- [6] 张长庆,张泽.冻土力学[M].北京:科学出版社,2016:148—149.
- ZHANG C Q,ZHANG Z.Frozen soil mechanics [M].Beijing:Science Press,2016:148—149.(In Chinese)
- [7] 吴紫汪,马巍.冻土强度与蠕变[M].兰州:兰州大学出版社,1994:74—78.
- WU Z W,MA W. Strength and creep of frozen soil [M].Lanzhou: Lanzhou University Press,1994:74—78.(In Chinese)
- [8] VYALOV S S.Rheological properties and bearing capacity of frozen soils [M].Translated by USA Cold Regions Research Engineering Laboratory.Moscow:USSR Academy Science Press,1965:74.
- [9] ROMAN L T. Effect of salinity on the failure kinetics of permafrost [J].Soil Mechanics and Foundation Engineering,2007,44 (5):182—185.
- [10] 张泽,马巍,张中琼,等.球形模板压入仪在冻土长期强度测试中的应用[J].岩土力学,2012,33(11):3516—3520.
- ZHANG Z,MA W,ZHANG Z Q,*et al.*Application of spherical template indenter to long-term strength tests for frozen soil [J].Rock and Soil Mechanics,2012,33(11):3516—3520.(In Chinese)
- [11] 周泓,张豫川,张泽,等.冻融作用下冻结黄土黏聚力长期强度变化规律[J].岩土力学,2014,35(8):2241—2246.
- ZHOU H,ZAHNG Y C,ZHANG Z,*et al.*Changing rule of long-term strength of frozen loess cohesion under impact of freeze-thaw cycle [J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(8):2241—2246.(In Chinese)
- [12] 刘建坤,刘尧军.冻土流变学[M].北京:中国铁道出版社,2005:75—77.
- LIU J K,LIU Y J.Rheological property of frozen soil [M].Beijing: China Railway Press,2005:75—77.(In Chinese)
- [13] 马世敏.冻土抗剪强度的实验研究[C]//青藏冻土研究论文集.北京:科学出版社,1983:106—111.
- MA S M.Experiment study on shear strength of frozen soils [C]// Professional Papers on Permafrost Studies of Qinghai-Xizang Plateant. Beijing:Science Press,1983:106—111.(In Chinese)
- [14] CHAMBERLAIN E,GROVES C,PERHAM R.The mechanical behaviour of frozen earth materials under high pressure triaxial test conditions[J].Geotechnique,1972(22):469—483.
- [15] ROMAN L T,ZHANG Z E.Effect of cycles of freezing and thawing on the physical and mechanical properties of moraine loam [J]. Foundation and Soil Mechanics,2010,47(3):96—101.
- [16] 宋春霞,齐吉琳,刘奉银.冻融作用对兰州黄土力学性质的影响 [J].岩土力学,2008,29(4):1077—1080.
- SONG C X,QI J L,LIU F Y. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess [J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(4):1077—1080.(In Chinese)
- [17] 周泓.冻融循环作用下冻结黄土长期强度的变化规律[D].兰州:兰州大学土木工程与力学学院,2015:29—32.
- ZHOU H.The change rule of frozen loess long-term strength under freeze-thaw cycle [D]. Lanzhou:School of Civil Engineering and Mechanics,Lanzhou University,2015:29—32.(In Chinese)
- [18] 肖东辉,马巍.冻融与静荷载双重作用下土体内部孔隙水压力、水分场变化规律研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(1):125—135.
- XIAO D H,MA W.Research on changing laws of pore water pressure and moisture and field in soil subjected to the combination of freeze-thaw and static load actions [J].Journal of Hunan University (Natural Sciences),2017,44(1):125—135.(In Chinese)