

文章编号:1000-0240(2000)04-0366-06

用钻孔旁压试验原位测试冻土力学性质的探讨

喻文兵, 朱元林, 张健明, 何 平

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:首次利用钻孔旁压仪对青藏公路沿线典型地段多年冻土的力学性质进行了原位测试。利用平面弹性体理论和 Lamé 提出的无限弹性介质中的圆柱孔穴径向膨胀方程对试验曲线进行解译。结果表明,冻土的旁压模量、旁压比例界限、极限压力随着温度的降低而增大;含水量在一定范围内变化时冻土的旁压模量、旁压比例界限、极限压力与之呈正相关,当其超过一定限度时它们之间呈负相关;容重与冻土的旁压模量、旁压比例界限、极限压力呈正相关。低温冻土较高温冻土稳定。

关键词:旁压仪;原位试验;冻土力学;冻土

中图分类号:TU411.3 文献标识码:A

1 引言

作为耗资、费时、费力的冻土力学现场原位测试研究,是长期以来我国冻土力学研究中的空白之处,也是国内外致力解决的前沿课题。基础的设计、施工需要对现场的岩、土性状有透彻的了解。由于地基土的大试样室内实验,也只能是近似于现场的情况,所以原位试验在调查地基土的性状,为基础的设计、施工提供真实、可靠的依据方面具有不可替代的作用。我国冻土分布面广,多年冻土约占国土面积的 22%^[1]。在冻土区进行工程建设将面临比融土更多、更复杂的冻土力学问题,使工程施工难度加大,处理不好会造成建筑物破坏,给国家带来经济损失,使人民生命受到威胁。因此,加强冻土力学的原位试验研究具有重要意义、也是很紧迫的。

吴紫汪等^[2]曾采用埋入式试验方法对青藏高原多年冻土承载力做原位试验研究,得出了冻土强度与土温之间的定量关系式。Ladanyi *et al.*^[3,4]于 80 年代利用旁压试验对冻土的蠕变特性进行了研究,重点讨论了不同解译方法之间的对比。所有这些工作都没有建立起旁压试验结果与其它原位试验(如现场载荷试验、标准贯入试验等)之间的经验关系式。

旁压仪作为一种直接的力学试验手段发展至今

已有近 50 a 的历史。它具操作简便、省时,能原位测试出任意深度处地基土的静力学和动力学参数,在破裂或极限压力之外还可测得土的变形特征,模仿实际基础的受力性状,及以大体积土的试验为依据等优点^[5]。我们选用 TEXAM 型预钻式钻孔旁压仪,用平面弹性体理论和无限弹性介质中的圆柱孔穴径向膨胀方程对试验曲线进行解译,求出了冻土的旁压模量、旁压比例界限、极限压力等力学参数,分析了它们与土温、含水量、容重之间的定性关系。

2 验试方法

2.1 试验装置(图 1)

(1)控制箱包括量测系统和加压系统:量测系统由两个不同量程(2.5 MPa 和 10 MPa)的压力表和一个体积表(最大量程为 2 732 mL)组成;加压系统由一个带活塞的水箱和转动摇柄组成,通过人力使活塞上下移动来达到给系统加压或减压的目的。

(2)导管是控制箱把压力传给探头的通道,要求有很高的抗膨胀性。

(3)压力探头由一个两端和中间开孔的空心金属管外套橡胶膜密封而成。有胶皮护套探头和钢片护套探头两种。

收稿日期:2000-01-11;修订日期:2000-07-10

基金项目:中国科学院“九五”重点项目(KZ952-J1-216);中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新项目(210053)资助

作者简介:喻文兵(1973~),男,重庆永川人,1998年毕业于兰州大学地质系,现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在读博士,主要从事冻土工程与冻土力学学习与研究工作。E-mail:wenbingsq@163.net

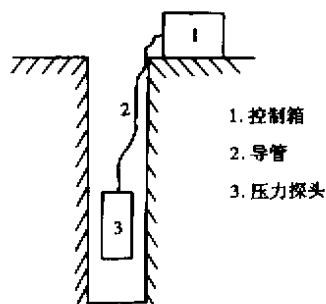
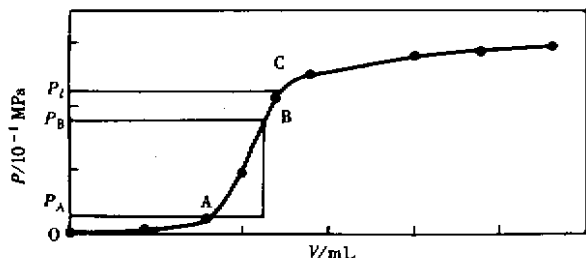


图 1 试验装置

Fig.1 Test equipment

2.2 试验原理

试验时加压系统将水充入压力探头中,探头膨胀压迫孔壁土体使之变形,通过逐级加压直至土体破坏,记录下每一步的体积 V (代表孔壁土体的变形量)和对应的压力值 P (代表作用于孔壁土体的压力),然后绘制 $P-V$ 关系曲线,据此来判断土体的变形及强度特征.典型的 $P-V$ 关系曲线形状如图 2 所示.它与一般静力载荷试验曲线很相似.

图 2 $P-V$ 关系曲线Fig. 2 The relation of $P-V$

OA 段呈上凹型:较载荷试验曲线的对应段长而明显,表示探头和孔壁逐渐紧密接触的过程,刚开始时探头体积的膨胀只受探头橡胶膜的约束,后来才有土的约束反力,整个过程压力变化的速率较小,而体积变化则较快.这一过程对土体来说是应力释放后又重新压实的过程^[6].图中 A 点对应的压力 P_A 为探头克服孔壁侧压力和压密扰动土层所施加的压力,称为土体旁压试验的初始水平压力.

AB 段呈近似直线:表示土体进入弹性变形阶段,试验土层的真正变形曲线从 A 点开始.它对钻孔旁压试验来说至关重要,因为计算旁压模量及其它冻土力学指标主要是利用这一阶段给出的信息.图中 B 点对应的压力 P_B 为土体的旁压比例界限,又叫土体的临塑荷载.

BC 段呈上凸型:表示土体的塑性变形阶段,过了 C 点曲线又变成近似直线,土体进入破坏阶段.图中 C 点对应的压力 P_t 为土体的极限压力.

2.3 试验步骤

试验前先对旁压仪进行系统饱和检测和体积、压力标定.

第一步 钻孔;

第二步 把探头放入钻孔中,调整好试验深度;

第三步 记录下初始体积和初始压力,然后按 40 mL 的体积增量运行试验,每一级体积增量之后停 30 s,记下对应的体积和压力.一般做到 800 mL 即可结束试验.

钻孔过程中由于钻头与孔壁间的摩擦导致土温升高,这会降低冻土的强度.根据关系式: $P = \kappa + \alpha |t|^n$ (κ, α 为试验系数, $t < -4^\circ\text{C}$ 时, $n = 1$)^[2],可知温度的改变对冻土强度的影响强度.为此,在即将达到试验深度时,往钻孔中加入适量酒精和水的混合物,由于液体的冷却及蒸发带走热量,从而控制土温升高;钻进速度放慢,减少摩擦产生的热量.另外,试验时受力的土层的径向厚度大于 2 cm,即使土体温度升高,对试验达到弹性段时的土层的影响也是比较小的.试验结果表明这些措施是有效的.18 组试验曲线中有 16 组具有标准曲线的典型特征,曲线的 3 个阶段都很明显.同时由于钻孔时要引起孔壁土体的扰动,这会降低原位试验的意义,所以成孔方法对试验结果的影响是重要的,钻孔时要求:孔壁直径 D_H 和探头直径 D 之间要满足 $1.03 D < D_H \leq 1.2 D$ ^[7].自钻式旁压仪是解决这一问题的最佳方法.

3 资料整理及试验结果

3.1 资料整理方法

由于旁压仪系统自身具有一定的膨胀性,同时压力探头的橡胶膜、护套具有一定的约束力,所以由压力表直接读出的体积和压力并不是代表作用在孔壁土体上真实的压力值和变形值.因此须对原始试验结果进行校正后才能得到作用于土体上的真实的压力值 P_c 和变形值 V_c ,校正公式如下:

$$P_c = P_r + P_h - P_s \quad (1)$$

表 1 旁压仪系统压力损失

Table 1 Pressure loss of the pressure meter system

V_r/mL	$P_s/\times 10^{-3}\text{MPa}$	V_r/mL	$P_s/\times 10^{-3}\text{MPa}$	V_r/mL	$P_s/\times 10^{-3}\text{MPa}$	V_r/mL	$P_s/\times 10^{-3}\text{MPa}$	V_r/mL	$P_s/\times 10^{-3}\text{MPa}$
0	0	200	0.81	400	1.06	600	1.31	800	1.63
40	0.37	240	0.88	440	1.13	640	1.40		
80	0.56	280	0.93	480	1.18	680	1.40		
120	0.63	320	0.941	520	1.20	720	1.45		
160	0.75	360	1.00	560	1.25	760	1.50		

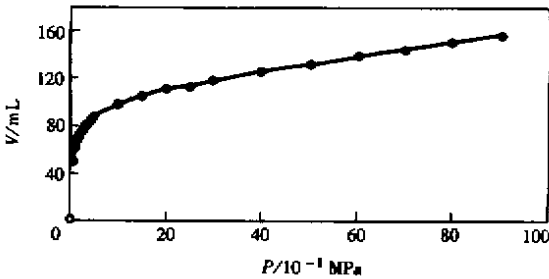


图 3 压力探头体积标定曲线
Fig. 3 The volume calibration curve of the pressure probe

$$V_c = V_r - V_s \quad (2)$$

式中： P_r 、 V_r 为由压力表和体积表直接读出的结果(MPa, mL)； P_h 为导管中的静水压力(MPa)； P_s 为损失的压力，由探头本身具有的约束力产生，它不作用在土体上，由压力标定曲线求得(表 1)； V_s 为损失的体积，由系统本身的膨胀性决定，不是土体的变形，由体积标定曲线求得(图 3)。

由体积标定曲线上的点作回归分析，得出线性回归方程(体积损失方程)：

$$V_s = 0.0069P_r - 3.2904 \quad (P_r > 1 \text{ MPa}) \quad \text{相关系数 } r = 0.94$$

3.2 算例

利用平面弹性体理论和 Lamé 提出的无限弹性介质中的圆柱孔穴径向膨胀方程对试验曲线进行解译。以可可西里的试验资料为例，说明计算的方法：

图 4 是经过校正后的真实 $P - V$ 关系曲线。

解：由圆柱孔穴径向膨胀方程： $G_m = V \times \Delta P / \Delta V$ 和 $G_m = E_p / (1 + \nu)$ ； $V = V_0 + V_m$ 导出：

$$E_p = 2 \times (1 + \nu) \times (V_0 + V_m) \times \Delta P / \Delta V \quad (3)$$

式中： ν 为泊松比，本试验建议取值 0.3； V_0 为探头初始体积，本试验取 200 mL； V_m 为图 4 中 AB 段中点对应的体积(mL)； ΔP 为图 4 中 AB 段压力的变化(MPa)； ΔV 为图 4 中 AB 段体积的变化(mL)。首

先从曲线上直接求得 $P_A = 0.36 \text{ MPa}$ ， $P_B = 1.2 \text{ MPa}$ ， $P_l = 2.18 \text{ MPa}$ 。

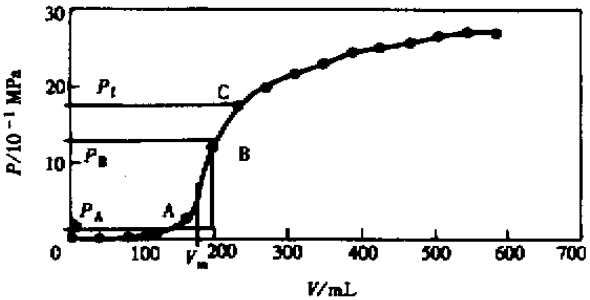


图 4 可可西里 $P - V$ 关系曲线
Fig. 4 The relation curve of $P - V$ at Hoh Xil

将数据代入式(3)中求得旁压模量(E_p)：

$$\begin{aligned} E_p &= 2 \times (1 + 0.33) \times (200 + 179.26) \times \\ &\quad (1.2 - 0.36) / (194.8 - 63.64) \\ &= 27.31 \text{ (MPa)} \end{aligned}$$

3.3 试验结果

试验条件及结果参见表 2~6。

4 分析与讨论

旁压仪作为一种力学试验手段，其试验结果可用来推求基础承载力、基础沉降、土的抗剪强度等^[8]，为工程建设服务。但值得注意的是，它是在钻孔中以平面轴对称的加压方式进行工作，试验的全部过程和所得数据都是水平方向的力学关系，而天然沉积的土层经常具有各向异性。大量试验表明：很多土的水平模量 E_h 大约等于垂直模量 E_v ^[5]。冻土作为一种具特殊性质类土，由于冰的存在使其各向异性表现得非常明显，晶体的主轴方向强度大，负轴方向小。所以冻土旁压模量 E_p 表示的是土体水平方向上的强度特征，它与杨氏模量不同，是介于压缩模量 E_s 和拉伸模量之间的一种模量。旁压比例界限 P_B 和极限压力 P_l 是求基础承载力的重要参数，它

们同样是表示土体水平方向的力学性质， P_B 是土体弹性变形和塑性变形的转折点，这同载荷试验的情况是一致的。此外，为了与我国有关设计规范中沉降计算公式相匹配，还应进行旁压试验和室内压缩试验的对比工作，寻求 E_p 和 E_s 之间的关系。虽然旁压试验与平面载荷试验(公认的测求地基土承载力的可靠方法)不能等同看待，但出于实用目的，应该加强这两种原位试验的对比研究，以期建立起它们的

地基土的变形模量、容许承载力的经验统计关系，从而达到用旁压试验代替笨重费时的载荷试验的目的。

目前，解译旁压曲线的理论有弹性理论和弹塑性理论，它们与冻土的特性都不完全相符，如能用一种适合冻土特性的理论及其本构方程来解译试验结果，将会使试验结果更具说服力。

表 2 清水河孔 1 旁压试验结果

Table 2 The results of BPT in Qingshui River Borehole 1

编号	深度 / m	含水量 / %	土温 / ℃	容重 / g·m ⁻³	E_p / MPa	P_A / MPa	P_B / MPa	P_l / MPa	冻土上限 / m
Q1-1	3.25	22.8	-0.8	1.85	4.24	0.10	0.60	0.96	1.50
Q1-2	4.65	24.2	-1.0	1.54	5.45	0.24	0.74	1.50	

表 3 清水河孔 2 旁压试验结果

Table 3 The results of BPT in the Qingshui River Borehole 2

编号	深度 / m	含水量 / %	土温 / ℃	容重 / g·m ⁻³	E_p / MPa	P_A / MPa	P_B / MPa	P_l / MPa	冻土上限 / m
Q2-1	3.15	42.65	-0.9	1.44	15.30	0.60	1.18	1.48	2.00
Q2-2	4.55	47.81	-1.1	1.33	11.92	0.40	1.45	2.10	
Q2-3	10.80	47.47	-1.3	1.35	17.79	0.36	1.68	1.78	
Q2-4	13.95	65.18	-1.5	1.67	28.23	0.20	1.80	1.85	

表 4 风火山试验场旁压试验结果

Table 4 The results of BPT in Fenghuo Shan Site

编号	深度 / m	含水量 / %	土温 / ℃	容重 / g·m ⁻³	E_p / MPa	P_A / MPa	P_B / MPa	P_l / MPa	冻土上限 / m
F1-1	2.25	47.36	-3.0	1.63	26.72	0.30	1.80	2.83	1.45
F1-2	3.25	50.00	-3.1	1.50	50.20	0.60	4.60	6.60	
F1-3	4.75	130.19	-3.1	1.02	34.78	0.52	1.83	3.66	
F1-4	5.85	140.32	-3.3	1.12	50.06	0.60	1.85	2.50	

表 5 昆仑山垭口旁压试验结果

Table 5 The results of BPT in Kunlun Pass

编号	深度 / m	含水量 / %	土温 / ℃	容重 / g·m ⁻³	E_p / MPa	P_A / MPa	P_B / MPa	P_l / MPa	冻土上限 / m
K1-1	2.05	34.60	-2.8	1.47	3.73	0.03	0.31	0.54	1.55
K1-2	3.25	64.23	-2.9	1.61	8.45	0.18	0.55	0.96	
K1-3	4.45	44.64	-3.1	1.56	11.71	0.15	0.92	1.66	

表 6 可可西里旁压试验结果
Table 6 The results of BPT in Hoh Xil

编号	深度 / m	含水量 / %	土温 / °C	容重 / g·m ⁻³	E_p / MPa	P_A / MPa	P_B / MPa	P_l / MPa	冻土上限 / m
X1-1	2.45	65.35	-1.9	1.41	27.31	0.36	1.20	2.18	
X1-2	3.35	67.08	-2.0	1.47	30.07	0.60	1.78	2.95	1.70
X1-3	4.55	83.66	-2.1	1.99	95.90	0.71	3.00	5.20	

5 结论

温度、含水量、容重等是影响冻土力学性质的基本因素,对 16 组试验结果进行影响因素分析,得到如下结论:

(1)含水量在一定范围内增加时冻土的旁压模量 E_p 、旁压比例界限 P_B 和极限压力 P_l 随之增加,当其超过一定限度时它们之间就呈负相关;容重和 E_p 、 P_B 、 P_l 之间呈正相关的关系.

(2) E_p 、 P_B 、 P_l 随着温度的降低而升高.
(3)高温区冻土(年平均地温高于 -1.0 °C)的 E_p 、 P_B 、 P_l 普遍比低温区冻土(年平均地温低于 -1.5 °C)小,说明低温区冻土较高温区冻土稳定.

致谢:试验得到刘永智高级工程师,吴青柏副研究员,盛煜博士的现场帮助以及马巍研究员的热忱指导.在此衷心的感谢.

参考文献(References):

[1] Cheng Guodong. Glaciology and Geocryology of China in the past 40 years: progress and prospect[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(3): 213 ~ 226. [程国栋. 中国冰川学和冻土学研究 40 年进展和展望 J]. 冰川冻土, 1998, 20(3): 213

~ 226.]
[2] Wu Ziwan ,Liu Yongzhi ,Xie Xiande. Field experiments of bearing capacity of frozen soils[A]. Professional Papers on Permafrost Studies of Qinghai - Xizang Plateau[C]. Beijing : Science Press , 1983. 112 ~ 119. [吴紫汪,刘永智,谢先德.冻土承载力的现场原位试验研究 A].青藏冻土研究论文集[C].北京:科学出版社,1983. 112 ~ 119.]
[3] Ladanyi B. Stress and strain rate controlled borehole dilatometer tests [A]. Proceeding of Workshop on Permafrost Engineering [C]. Ottawa : ACGR - National Reseach Council of Canada , 1980. 57 ~ 69.
[4] Ladanyi B ,Melouki M. Determination of creep properties of frozen soils by means of the borehole stress relation test [J]. Canadian Geotechnical Journal , 1992 , 30 : 170 ~ 186.
[5] Baguelin F ,Jiequel J F ,Xueyide D H.(Translated by Lu Shishen , et al.). The Presuremeter and Foundation Engineering[M]. Bei-jing : People Communication Press ,1978. 34 ~ 526. [弗.巴居兰,耶.弗.杰塞格尔,德.赫.薛义德(卢世深等译).旁压仪和基础工程 M].北京:人民交通出版社,1978. 34 ~ 526.]
[6] Chu Huadong ,Zhang Zhenlong. Interpretation of the pressure test results and application on determining the deformation of soil mass [J]. Roadbed and Foundation, 1991 , 1(1): 41 ~ 42. [楚华栋,张振龙. 旁压试验成果的解译与在确定土体变形性质方面的应用 [J]. 路基与地基, 1991 , 1(1): 41 ~ 42.]
[7] ASTM Committee on Standards. ISO9001. TEXAM Pressuremeter Instruction Manua[S]. Quebec : Roctest Ltd. , 1996. 88 ~ 99.
[8] Wang Zhongqi. Selfboring presuremeter and its introduce [J]. Geotechnical Investigation and Survering , 1980 , 1(3): 63 ~ 66. [王钟琦.自钻式横压仪及其简述.工程勘察,1980,1(3):63 ~ 66.]

Studied on Using a Preboring Pressuremeter Test to Determine the Mechanical Properties of Frozen Soils

YU Wen-bing , ZHU Yuan-lin , ZHANG Jian-ming , HE Ping

(*State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering , CAREERI CAS , Lanzhou Gansu 730000 , China*)

Abstract : In this article , the authors suggested , first in China , how to determine the mechanical properties of frozen soils along the Tibetan Highway by using a preboring pressuremeter test(BPT) , and how to use the plain π plastic theory and the radial expansive equation of cylinder cave in infinite elastic medium provided by Lamé to interpret the results of the BPT. How to deal with the initial data got from the test can be described as follows. First , correcting the initial volume values got from the volume gauge directly. Secondly , correcting the initial pressure values got from the pressure gauge directly by using the results got from the pressure correction table. Thirdly , drawing the relative curves of volume versus pressure by using the corrected data. These curves could give a lot of useful information of the frozen soils , which were tested on. The mechanical properties of frozen soils , such as the pressuremeter proportional limitation , the limited pressure , etc. , could be gained from the curves. At

last , the pressuremeter modulus and the shear modulus of the frozen soils can be calculated.

Analysis shows that both the pressuremeter modulus and other mechanical parameters (including pressuremeter proportional limitation and limited pressure) of frozen soils increase with decreasing temperature ; the mechanical parameters of frozen soils increase when water content of frozen soils increasing in a certain range , but decrease when a limited water content is exceeded ; the mechanical parameters of frozen soil increase with density of frozen soil increasing ; frozen soils in low temperature area with an annual mean temperature lower than $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ is more stable than that in temperate area with an annual mean temperature higher than $-1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. At the same time , some inevitable problems met in the in situ test are discussed , and the physical meanings of the pressuremeter modulus and the pressuremeter proportional limitation are analyzed too.

Key words : pressuremeter ; in situ test ; mechanics of frozen soil ; frozen soil