

冻土结构性研究方法初探

和礼红 , 汪 稔 , 石祥锋

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 首次提出冰率的概念, 对冻土的结构研究方法进行了初步探索, 并结合青藏铁路北麓河路基填土无侧限抗压强度试验, 对正冰率与含水量和压实度的关系作了较为浅显的分析。

关 键 词: 冻土; 结构; 结构性; 研究方法; 冰率

中图分类号: P 642.14 **文献标识码:** A

Preliminary disussion of studying methods about frozen soil structural character

HE Li-hong , WANG Ren , SHI QIANG-feng

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The conception of the ice efficiency is put forward for the first time and the studying methods of the frozen soil structural characteristics are explored primarily in this paper. And on the bas is of the unconfined compressive strength test of the Beiluhe roadbed fill of Qinghai-Tibetan Railway, the relationship between the positive ice efficiency of the frozen soils and its water content or degree of compaction is analyzed simply.

Key words: frozen soil; structure; structural characteristics; research methods; ice efficiency

1 前 言

广义地讲, 土的结构包括土的成分、组构和联结。土的结构性表征的是天然土具有结构强度的特性。土的结构强度是土的原生结构与次生结构的差异所引起的。原生结构是指构成土的最基本的物质成分在搬运、迁移、沉积和成土的演化过程中产生的与周围环境相适应的结构, 与之相对应的土体强度即为原生土体强度; 当天然土受到重塑或其它剧烈扰动时, 原生结构被相对破坏, 生成次生结构, 与之相对应的土体强度即为次生土体强度。原生土体强度与次生土体强度之差即为天然土的结构强度。土体结构概念最早是太沙基于 1925 年提出来的, 至今已有近 80 年的历史。国内关于土体结构性研究方法的思考是从 1996 年开始的^[1], 从此以后,

许多知名专家和学者都对土体结构性研究方法进行了有效的探索和研究^[2-6]。然而, 这些研究方法不能完全适用于冻土 因为它们是在建立在土是由土颗粒、土中水和土中气体组成的三相体系的基础之上, 并且通常不考虑温度的作用, 土中水仅被看作液相而发挥作用。而冻土的显著特点就是它强烈地受到温度的作用, 在负温的影响下, 土中水要部分相变为固相—冰。土中水不仅要发挥液相作用, 还要发挥固相作用, 因此, 冻土通常被看作是由土颗粒、土中水、土中气体和冰组成的四相体系。可见, 必须重新考虑新方法或对他们的方法进行改进, 才能对冻土的结构性进行有效的研究。

2 冻土结构性研究新途径

笔者认为, 可以仿效谢定义等人^[3-4]的研究方

收稿日期: 2003-03-28

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-SW-04)资助; 中国科学院武汉岩土力学研究所知识创新工程项目(C020201)资助; 中国科学院武汉岩土力学研究所领域前沿基础性研究基金项目(Q000207)资助。

作者简介: 和礼红, 男, 1974 年生, 博士生, 主要从事岩土工程方面的科研工作。

融土物理力学性质的因素也是影响冰率的因素，如压力 p 、温度 T 、密度 \bar{n} 以及含水量 \dot{u} 等。如果将土中水看作溶液，则还包括溶液浓度 C 、成分 N 等。通常忽略溶液浓度 C 、成分 N 的影响，则冰率 m 可以表示为压力 p 、温度 T 、密度 \bar{n} 以及含水量 \dot{u} 的函数，即 $m = f(p, T, \bar{n}, \dot{u})$ 。

(8) m_d, m_w, m_r 分别表示某项冻土或正冻土、未冻土以及融土或正融土的力学性质指标，可以是强度指标，也可以是变形指标。

(9) 由以上分析也能够看出，要分析冻土的结构性，必须同时分析冻土、融土及其相对应的未冻土的物理力学性质。只有对冻土的冻融过程进行动态研究，并与未冻土进行比较性分析，对冻土结构性的研究才有意义。冰率在此过程中，要发挥重要的作用。必须把未冻土在冻结和融化过程中所存在的冰率充分地表现出来，才能对未冻土或冻土在冻融过程中的结构性模型进行分析和研究。

3 正冰率与含水量和压实度的关系

笔者对青藏铁路北麓河路基填土的未冻土样和人工冻结土样的瞬时无侧限抗压强度及其破坏应变进行了试验和研究，并以此为基础，对正冰率及其与含水量和压实度的关系作了较为浅显的分析。青藏铁路北麓河路基填土基本物理性质为：比重 2.649，液限 24.8%、塑限 11.4%、塑性指数 13.4；颗粒组成如表 1 所示，粒径级配累积曲线如图 1 所示，其不均匀系数为 10.0，曲率系数为 2.8，属级配良好的土；活性指数为 3.3，属活性土。按照水利部 SL237-001-1999 规定的分类法，为含砂低液限粘土；

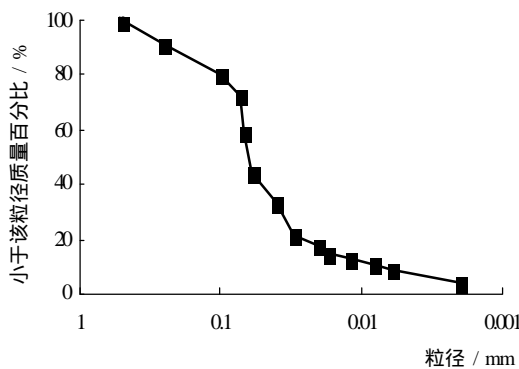


图 1 北麓河路基填土粒径级配曲线
Fig.1 The grain size gradation curve of Beiluhe roadbed fill

表 1 北麓河路基填土颗粒组成

Table 1 Particle constitution of Beiluhe roadbed fill

颗粒类型及大小 / mm	砂粒 0.05 ~ 2	粉粒 0.005 ~ 0.05	粘粒 < 0.005	胶粒 < 0.002
百分率 / %	61.45	30.69	7.86	4.09

按照建筑地基基础设计规范(GBJ7-89)分类法，为粉质粘土。进行瞬时无侧限抗压强度试验的未冻土样和人工冻结土样均为按照一定的压实度和含水量配制成高 5 cm，直径 5 cm 的圆柱体土样。试验采用恒应变速率控制方式加载，恒应变速率为 2 %/min。冻结土样是指在 -13 C 的低温环境下冻结 24 h 的土样。

青藏铁路北麓河路基填土的无侧限抗压强度试验数据如表 2 所示，其冻结土样无侧限抗压强度 q_u 、破坏应变 $\dot{\epsilon}$ 以及正冰率 m_z 与含水量 \dot{u} 和压实度 ζ 的关系如图 2 ~ 7 所示。

表 2 青藏铁路北麓河路基填土无侧限抗压强度 q_u 试验数据

Table 2 The data of unconfined compressive strength of Beiluhe roadbed fill

含水量 / %	压实度 / %	未冻土样 q_u / kPa	冻结土 q_u / kPa	冰率 m	冻结土样破坏应变 / %
7.75	85	148	1137	7.7	2.45
7.75	90	262	1785	6.8	3.24
7.75	95	416	2805	6.7	4
7.75	100	649	3590	5.5	4.8
9.9	85	80	1554	19.4	3.4
9.9	90	148	2157	14.6	4.04
9.9	95	274	3019	11	4.7
9.9	100	357	3671	10.3	5.2
11.25	85	48	1735	36.1	4.4
11.25	90	90	2400	26.7	5.7
11.25	95	115	3145	27.3	6.73
11.25	100	180	3835	21.3	7.25
14.02	85	25	2430	97.2	5.6
14.02	90	55	3107	56.5	6.11
14.02	95	92	3870	42.1	7.16
14.02	100	143	5121	35.8	7.9
15.39	85	18	3210	178.3	6.9
15.39	90	38	3525	92.8	7.4
15.39	95	65	4175	64.2	8.2
15.39	100	109	5455	50	9.5

冻土的无侧限抗压强度是衡量冻土强度的重要指标之一，由图 2, 3 可以看出，北麓河路基填土的无侧限抗压强度 q_u 随含水量 \dot{u} 或压实度 ζ 的增大而增大，且大体呈线性关系。破坏应变 $\dot{\epsilon}$ 是指与无

侧限抗压强度 q_u 相对应的应变,反映的是当冻土强度达到最大值时,其变形量的大小,它是表征冻土压缩破坏的重要指标之一。由图 4,5 能够看出,破坏应变 \hat{a} 随冻土含水量 \hat{u} 或压实度 ζ 的增大而增大,且基本呈线性关系;而且含水量对破坏应变的影响程度要大于压实度对破坏应变的影响程度,这也可以从图 4,5 中用来表示与散点相对应的拟合直线的斜率大小看出。图 4 中的斜率比图 5 中的斜率大 3~4 倍,表明含水量是影响破坏应变的主要因素。

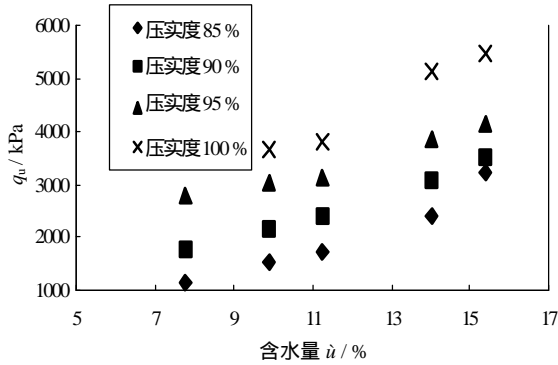


图 2 冻结土样 q_u 与含水量 \hat{u} 的关系
Fig.2 The relationship between q_u of frozen soil samples and \hat{u}

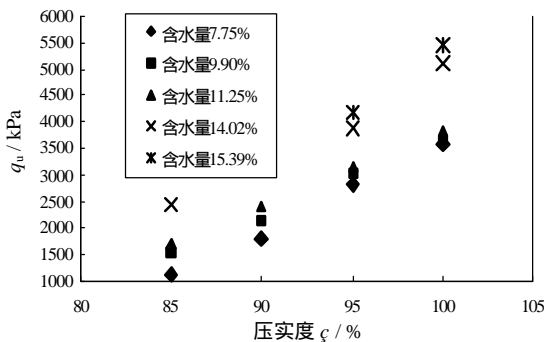


图 3 冻结土样 q_u 与压实度 ζ 的关系
Fig.3 The relationship between q_u of frozen soil samples and ζ

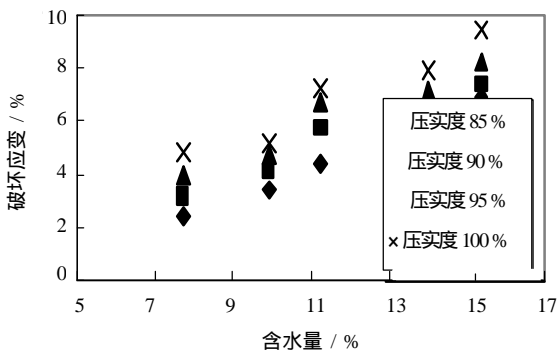


图 4 冻结土样 \hat{a} 与 \hat{u} 的关系
Fig.4 The relationship between \hat{a} of frozen soils and \hat{u}

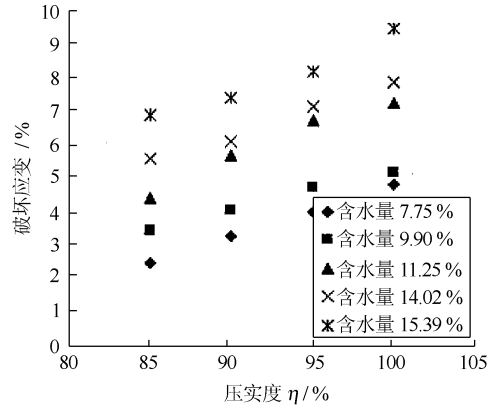


图 5 冻结土样 q_u 与压实度 ζ 的关系
Fig.5 The relationship between q_u of frozen soil samples and ζ

由图 6 可以看出,当压实度在 85%~100% 之间时,正冰率 m_z 随含水量 \hat{u} 的增大而增大。当压实度 ζ 减小时,这种增大趋势越来越明显,且呈非线性。 m 与 \hat{u} 的关系式可以写成如下形式:

$$m = a\hat{u}^2 + b\hat{u} + c \quad (1)$$

式中 a, b, c 随压实度 ζ 而变,如表 3 所示。

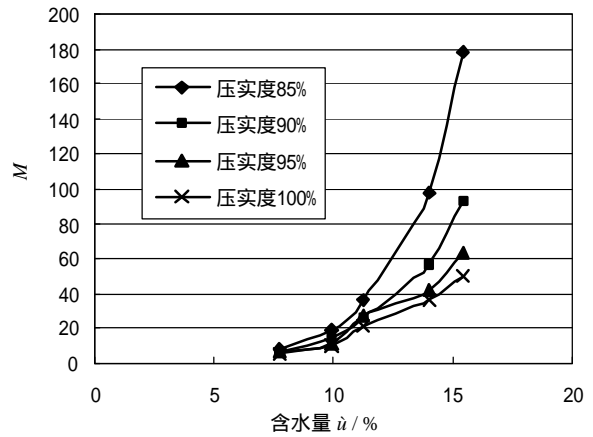


图 6 M 与 \hat{u} 的关系
Fig.6 The relationship between M and \hat{u}

表 3 方程(1)之参数 a, b, c 值
Table 3 The values of the parameters of equation (1)

压实度 / %	a	B	c
85	3.56	-61.66	275.02
90	1.46	-23.2	99.73
95	0.67	-8.29	30.24
100	0.46	-4.81	15.01

由图 7 可以看出,当含水量 < 11.25% 时(此值应稍 > 11.25%,姑且认为是 11.25%),正冰率 m_z 随压实度 h 的增大而略有减小,个别有增大现象,基

本呈线性关系；当含水量 > 11.25 %，正冰率 m_z 随压实度 h 的增大而明显减小，且呈非线性关系。总的变化趋势随压实度 h 的增大而减小，随含水量 w 的增大而增大。当含水量 $w < 11.25\%$ 时， m 与 h 的关系式可写成以下形式：

$$m = ah + b \tag{2}$$

而当含水量 $w > 11.25\%$ 时，正冰率 m_z 与 ζ 的关系式可写成以下形式：

$$m = a'h^2 + b'h + c \tag{3}$$

式中 a, b, a', b', c 随 w 而变，如表(4)所示。

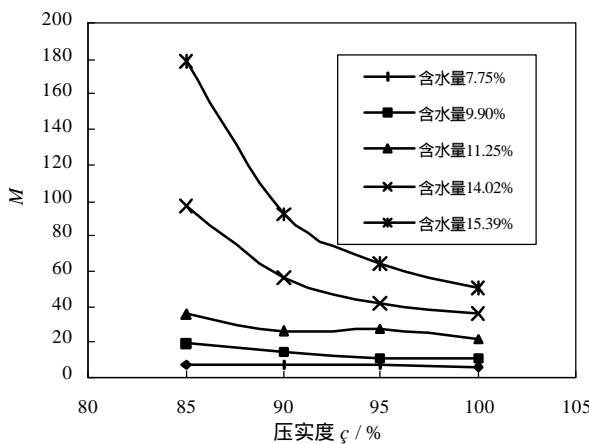


图 7 M 与 ζ 的关系

Fig.7 The relationship between M and ζ

表 4 方程(2)、(3)之参数 a, b, a', b', c 值

Table 4 The values of the parameters of equation (2) and (3)

含水量 / %	a	b	a'	b'	c
7.75	-0.134	319.07			
9.90	-0.618	70.99			
11.25	-0.876	108.88			
14.02			0.344	-67.6	3358
15.39			0.713	-140.2	6940

由图 6, 7 可以看出，当含水量小于或等于某一值时，含水量以及压实度的变化对正冰率 m_z 的影响较小；含水量大于某一值时，含水量以及压实度的变化对正冰率 m_z 的影响较大。表明在一定的负温条件下，含水量对正冰率 m_z 的影响作用要大于并制约着压实度对正冰率 m_z 的影响作用。

综上所述，对于这种路基填土，在试验所约束的范围内(压实度为 85% ~ 100%，含水量为 7.75% ~ 15.39%，温度为 -13℃)，不管是无侧限抗压强度 q_u ，破坏应变 e ，还是正冰率 m_z ，含水量始终是影响其大小的决定性因素。同时也表明，这三项指

标随含水量变化的程度是不同的， q_u 和 e 随 w 的增大基本呈线性增大；而 m_z 随 w 的增大呈非线性增大。表明仅用冻土的无侧限抗压强度指标不能准确地表示正冰率，两者有着本质的区别。无侧限抗压强度指标可以反映冻土含冰量的大小，但无法反映冰对强度作用的贡献，或者说，不能反映冰对于土体结构的改造作用，而正冰率 m_z 能够较好地反映这一点。 m_z 随含水量的增大而呈非线性增大，表明在一定的负温条件下，当含水量增大，土中水冻结成冰时，对土体结构改造、强化作用和土体整体强度增强作用的速率越大。反之，则越小。

4 结 语

鉴于冻土力学性质的特殊性以及冰对冻土物理力学性质影响的重要性，笔者对冻土的结构研究方法进行了尝试性探索。为此，本文首次提出冰率的概念，并结合青藏铁路北麓河路基填土无侧限抗压强度试验，对正冰率与含水量和压实度的关系作了较为浅显的分析。

参 考 文 献

- [1] 沈珠江. 土体结构性的数学模型—21 世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97.
- [2] 沈珠江. 现代土力学的基本问题[J]. 力学与实践, 1998, 20(6): 1-6.
- [3] 谢定义, 齐吉林. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.
- [4] 谢定义, 齐吉林, 张振中. 考虑土结构性的本构关系[J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35-40.
- [5] 胡瑞林, 王思敬, 李向全等. 土体微结构力学—概念观点 核心[J]. 地球学报, 1999, 20(2): 150-156.
- [6] 周萃英. 土体微观结构研究与土力学的发展方向——若干进展与思考[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2000, 25(2): 215-220.
- [7] 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.
- [8] 张立新, 徐学祖, 张招祥等. 冻土未冻水含量与压力关系的实验研究[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 124-127.
- [9] 沈忠言, 吴紫汪. 冻土三轴强度破坏准则的基本形式及其与未冻水含量的相关性[J]. 冰川冻土, 1999, 21(1): 22-26.