

长春季节性冻土地区土体微观结构与水分迁移的关系

董宏志, 王清, 于莉, 李杨
(吉林大学建设工程学院, 长春 130026)

摘要: 利用扫描电子显微镜(SEM)技术, 从土体微观结构特征出发, 对长春—吉林公路某路段季节冻土的粒度成分、结构单元体成分、孔隙特征及结构特征进行了定量分析, 并对其与水分迁移的关系进行了讨论。从SEM图像定量分析中可以看出, 研究路段的土体, 其微观颗粒——结构单元体、孔隙的定向性均较差, 粒内微小孔隙发育, 土体尽管在粘粒含量较高的情况下, 也表现出孔隙主要在1~2μm内分布, 即毛细孔隙极发育, 说明样品具有各向同性的特点, 即在外界条件相同的情况下水分迁移的通道在水平和垂直方向上具有相同的性质。

关键词: 结构单元体; 孔隙; 季节冻土; 水分迁移

中图分类号: P642.11+6

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)02-0062-04

1 前言

随着我国国民经济的进一步发展, 我国经济发展突飞猛进, 人民生活水平显著提高, 能源、交通、通讯等许多建筑设施不得不建在冻土上, 如青藏铁路等重大工程以及水利设施、输电线路的塔(杆)基础等。但是由于我国的基础设施仍很不完善, 已不能满足经济发展和人民生活的需要, 一些已有建筑物也不同程度受到冻害影响^[1-2], 其中公路尤其是高速公路发展的相对滞后已阻碍了经济的发展。因此, 公路的大力发展已势在必行。我国多年冻土和季节冻土区面积分别占全国面积的21.5%和53.5%^[10], 季节冻土区面积超过了全国面积的一半。因此, 要发展公路就不可避免地会牵涉到冻土尤其是季节性冻土的研究^[7-9]。

微观结构是指借助于高倍显微镜(>200倍)、扫描电子显微镜等所能观察到的结构单元体的大小、形状、表面特征、结构单元体之间或单元体之内的相互排列关系、孔隙特征及其结构连结关系等特征的总和^[3-4]。

本文主要在微观理论, 即考虑土粒(结构单元体)的大小、粒间、粒内孔隙、微小裂隙、微观结构类型对土

体部分水分迁移的影响, 为了研究微观结构的变化特征, 本次试验选择了两个研究层次, 即对粘土、粉质粘土采用的放大倍数为800~2000倍加以讨论。

2 研究路段土体微观结构特征的分析

2.1 微观颗粒定量分析

本次研究主要取长春—吉林北路路基土, 研究路段不同深度样品的微观颗粒的定量分析如图1和表1所示。从图表中的数据可以看出, 在该研究路段的土体, 一般大于20μm和小于1μm的颗粒很少, 在SEM图片(图2)中基本上没有这两种粒径, 1~2μm的粒径也较少, 主要的粒径区段在2~5μm和5~10μm这两个区段, 可见颗粒的团聚性较强, 主要发育为团聚状结构单元体。

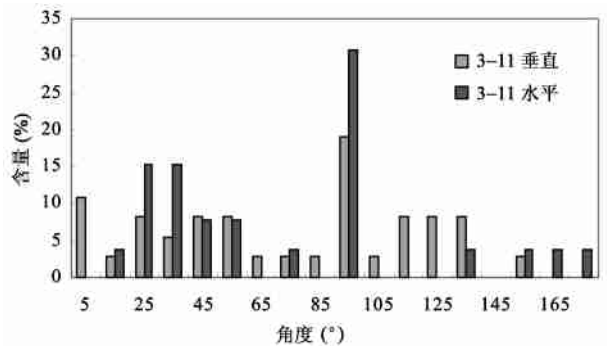


图1 颗粒定向分布直方图

Fig. 1 Histogram of orientation frequency of particles

2.2 基于SEM图片的孔隙定量分析

表2和图3是试样微观孔隙定量分析成果。从图表中数据可以看出, 样品大孔隙较少, >20μm、10~

收稿日期: 2007-10-12; 修订日期: 2007-11-23

基金项目: 国家自然科学基金(40672180); 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室开放基金(GZ2004-08); 吉林大学985计划项目(105213200500007)

作者简介: 董宏志(1974), 男, 博士研究生, 从事岩土工程研究。

表 1 研究路段微观结构颗粒直径分析成果(%)

Table 1 Results of micro-structure unit particle diameter of all samples (%)

编号	取样 深度(m)	< 1	1~ 2	2~ 5	5~ 10	10~ 20	> 20
		μm	μm	μm	μm	μm	μm
3- 2 垂直	0.85	0	5.1	51.3	38.5	5.1	0
3- 2 水平		0	14.3	51.8	30.4	3.6	0
3- 4 垂直	1.35	0	8.9	55.4	33.9	1.8	0
3- 9 垂直	2.15	0	3.0	36.4	48.5	9.1	3.0
3- 10 垂直	2.4	0	3.2	38.7	48.4	9.7	0
3- 10 水平		0	0	47.2	44.4	8.3	0
3- 11 垂直	2.55	0	7.9	55.3	23.7	13.2	0
3- 11 水平		0	0	26.9	53.8	19.2	0
3- 12 垂直	2.7	0	0	45.9	40.5	13.5	0
3- 12 水平		0	0	41.9	48.4	9.7	0
3- 13 垂直	2.85	0	0	40.7	37.0	22.2	0
3- 13 水平		0	0	32.0	28.0	36.0	0

注:垂直、水平为不同深度样品的剖面、平面的观察表面。

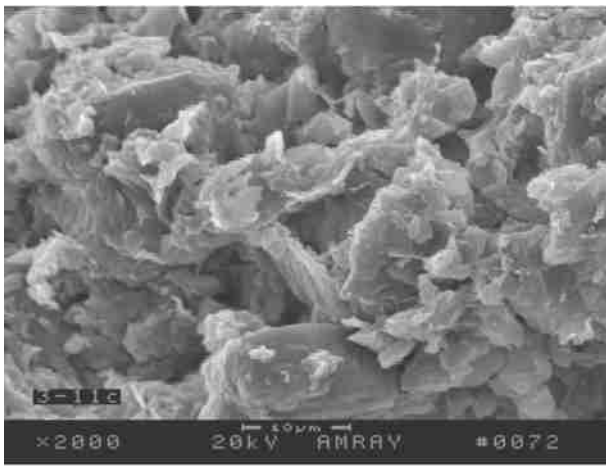


图 2 土样 SEM 图片

Fig. 2 SEM pictures of the soil sample

表 2 土样微观孔隙直径分析成果表(%)

Table 2 Results of diameter of micro-pores of soil samples (%)

编号	取样 深度(m)	< 1	1~ 2	2~ 5	5~ 10	10~ 20	> 20
		(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)	(μm)
3- 2 垂直	0.85	26.6	39.1	18.8	14.1	1.6	0
3- 2 水平		48.0	28.6	17.3	5.1	1.0	0
3- 4 垂直	1.35	39.1	39.1	17.4	4.3	0	0
3- 9 垂直	2.15	43.9	29.3	24.4	2.4	0	0
3- 10 垂直	2.4	44.0	34.0	10.0	10.0	2.0	0
3- 10 水平		50.0	30.0	16.3	2.5	1.3	0
3- 11 垂直	2.55	34.4	31.1	24.6	8.2	1.6	0
3- 11 水平		35.1	22.8	35.1	7.0	0	0
3- 12 垂直	2.7	34.0	30.2	24.5	7.5	3.8	0
3- 12 水平		41.2	26.5	23.5	5.9	2.9	0
3- 13 垂直	2.85	28.9	23.7	34.2	13.2	0	0
3- 13 水平		6.5	38.7	48.4	6.5	0	0

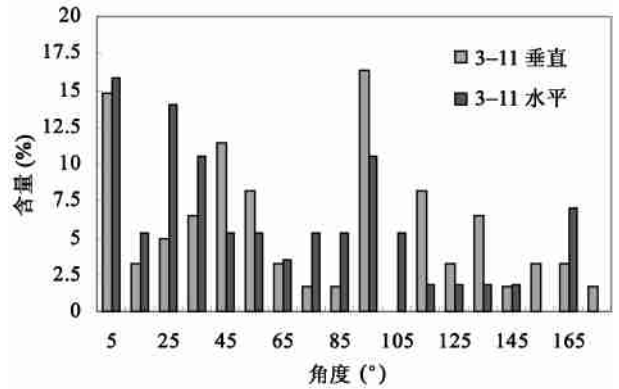


图 3 孔隙定向分布直方图

Fig. 3 Histogram of orientation frequency of pores

20μm 的孔隙几乎为零, 5~ 10μm 的孔隙较少量, 而主要的孔隙主要集中在 < 1μm 和 1~ 2μm 两个区段, 说明微孔隙发育, 颗粒间的接触多为边-面形式, 且孔隙的连通较好, 可能提供较好的水分迁移通道。这与直接从图 2 SEM 照片上观察到的现象基本一致。

从图 4 中的土样 SEM 图像分析来看, 样品均呈絮聚状结构。粘土矿物以伊利石和伊蒙混层矿物为主, 主要结构类型为絮凝体和团聚体, 胶结物多位于结构单元体之间以“桥”的形式胶结颗粒, 胶结物主要有粘土矿物, 且一些粘土矿物晶体结晶不好, 结构连结形式主要是接触连结和结合水连结, 相对来讲, 这种连结方式比较牢固, 所产生的结构强度比较大。这种连结类型可以随着含水率的变化而转变, 从而使土的结构强度也随之增长或者减弱。结构类型主要以絮凝状、团聚状、絮凝-团聚状结构为主。从孔隙总体上分析, 结构连结好, 且连通性好, 颗粒均无明显的定向性, 可见颗粒基本上呈现均匀性。由于样品的团聚性较高, 小孔隙相对不十分发育, 中孔隙和大孔隙较多。纵、横向样品分析可见, 其微观结构是均匀的, 土体基本上不具有各向异性。即在外界条件相同情况下水分迁移的通道在水平和垂直方向均具有相同的性质。

3 微观结构对土体水分迁移的影响

3.1 粒度及结构单元体对土体水分迁移的影响

通过对长吉北线路段冻、融土进行颗粒分析试验, 研究区季节性冻土的粒径主要以粉粘粒为主, 这正是引起毛细水上升和水分迁移的主要粒径, 且通过分散试验发现, 该路段土体含有一部分由粘粒与粉粒结合形成的具有一定抗水性能的“假粉粒”^[2], 按粒度成分分类定名为粉质轻亚粘土、粉质重亚粘土-粘土。同样, 经过 SEM 图片分析, 发现长春各路段的土体基本

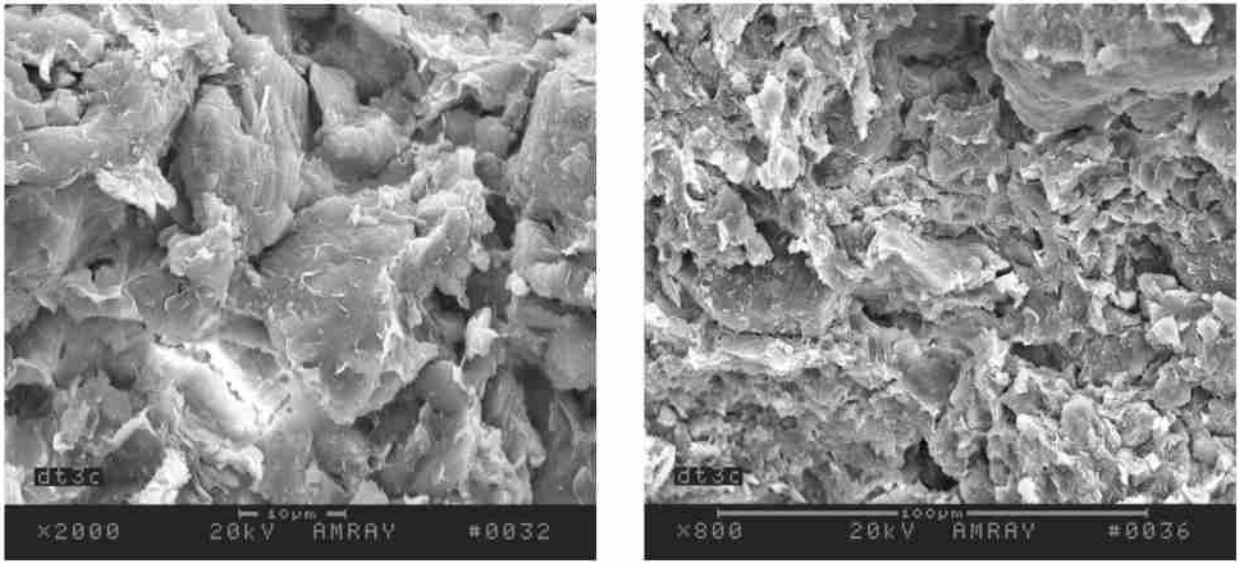


图4 土样 SEM 图片

Fig.4 SEM pictures of soil samples

上粒径在 $> 20\mu\text{m}$ 和 $< 1\mu\text{m}$ 的颗粒很少, 在 SEM 图片中基本上没有这两种粒径, $1\sim 2\mu\text{m}$ 的粒径也较少, 主要的粒径区段在 $2\sim 5\mu\text{m}$ 和 $5\sim 10\mu\text{m}$ 这两个区段, 可见颗粒的团聚性较强, 主要发育为团聚状结构单元体。由于这种假粉性的粒径的存在^[3-6], 使得土体粒间存在一定量的结合水和毛细水, 正是结构单元体内的结合水量是产生水分迁移的主要水量的来源, 这就再度引发了水分的迁移。

从野外监测数据中可以看到^[2], 长吉北线的高粘粒含量同样引起毛细上升较高, 产生水分迁移量较大的原因是由于这些假粉粒的存在, 使得粒间(结构单元体间)的毛细孔隙较多, 而粒内(结构单元体内)的孔隙较小, 且主要以结合水为主, 这就为水分迁移提供了物质来源, 而结构单元体间的孔隙则为水分迁移提供了方便通道。

3.2 微观孔隙对土体水分迁移的影响

由表2和图3可知各土体的各级孔隙发育, 且连通性较好, 经过微观孔隙定量分析可知土体中大孔隙较少, $> 20\mu\text{m}$ 、 $10\sim 20\mu\text{m}$ 几乎为零, $5\sim 10\mu\text{m}$ 的中孔隙也不发育, 但是孔隙主要集中在 $< 1\mu\text{m}$ 和 $1\sim 2\mu\text{m}$ 两个区段, 说明微孔隙发育, 可见颗粒间的毛细孔隙较多, 从 SEM 图片上可见粒间的接触多为边-面形式, 且孔隙的连通较好, 所以研究路段大部分土体中毛细性较强, 为水分迁移提供较好的通道, 这种现象产生的结果是土体的毛细上升高度较高^[2,12]。它是引发冻胀的主要因素, 因此, 为了有效地减少冻胀的发生, 对地基土

体进行处理的主要方法之一是打散假粉粒、减少孔隙, 进行最有效的压实地基土。

3.3 土体微观结构类型对土体水分迁移的影响

从 SEM 图像分析来看, 研究区季节性冻土的微观结构均呈絮凝状结构, 构成粘粒的粘土矿物以伊利石和伊蒙混层矿物为主, 这种呈现片状的矿物以絮凝体和团聚体的形式存在于土体中, 胶结物多位于结构单元体之间以“桥”的形式胶结颗粒, 且胶结物主要有粘土矿物, 且一些粘土矿物晶体结晶不好, 结构连结形式主要是接触连结和结合水连结, 这种连结方式相对来讲, 比较牢固, 所产生的结构强度比较大。这种连结类型可以随着含水率的变化而发生不同程度的转变, 从而使土的结构强度也随之增长或者减弱, 由于团聚性的结构存在, 且结构单元体的排列不具有定向性, 粒内微小孔隙发育, 土体尽管在粘粒含量较高的情况下, 表现出孔隙主要在 $1\sim 2\mu\text{m}$ 内分布, 即毛细孔隙极发育, 因此, 这种孔隙不仅提供了土体的毛细水上升的通道, 也使得大量的结合水具有存在的空间。

4 结论

研究路段主要以粉粘粒为主, 且主要的粒径区段在 $2\sim 5\mu\text{m}$ 和 $5\sim 10\mu\text{m}$ 这两个粒径区段, 土体的团聚性较强, 粒间孔隙发育。因此, 粘粒是提供结合水及水分迁移的物质条件, 而团聚体中的孔隙提供了水分迁移的空间条件, 这就使得在冻结情况下, 即使在较低地下水位的情况下, 土体中仍然存在大量的可供迁移的

水量和迁移的通道,即研究区季冻土土体的水分迁移特性在含水率不高的情况下,仍然能产生冻害。

参考文献:

- [1] 马巍,朱元林,徐学祖. 冻土工程国家重点实验室的回顾与展望[J]. 冰川冻土, 1998, 20(3): 264-272.
- [2] 赵安平,王清,李杨. 季节冻土区路基粒度成分的分形特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(4): 583-587.
- [3] 王清,王凤艳,肖树芳. 土微观结构特征的定量研究及其在工程应用的新观点[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 148-153.
- [4] Huie Chen, Qing Wang. The Behavior of Organic Matter in the Process of Soft Soil Stabilization Using Cement [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006, 65: 445-448.
- [5] 李振,王清,范建华,等. 固化软土微观结构效应[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2004, 34(4): 587-591.
- [6] 王清,刘莹. 结构性土的先期固结压力力学效应[C]//全国岩土与工程学术大会论文集, 2003: 345-349.
- [7] Xu Xiaozu, Deng Yousheng, Gao Weiyue. Water and solute migration of freezing soils in closed system under temperature gradients[C]//Proceedings of 6th International Symposium on Ground Freezing. Rotterdam: A. A. Balkema; Publishers, 1991, 1: 93-97.
- [8] 郑秀清,樊贵盛,赵生义. 水分在季节性冻土中的运动[J]. 太原理工大学学报, 1998, 29(1): 62-66.
- [9] 高永,胡春元,董智,等. 冻土冻结过程中水分迁移动向的研究[J]. 林业科学, 2000, 36(4): 126-128.
- [10] 徐学祖,王家澄,张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 11.

The relationship between the moisture content translocation and the microstructure of seasonal frozen soil

DONG Hong-zhi, WANG Qing, YU Li, LI Yang

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: In this paper the microstructure of seasonal frozen soil of the road between Changchun City and Jilin City is studied with the technique of SEM. Quantitative analysis which is about the granularity composition, the characteristic of structure units and pores is carried out, also the relationship between moisture content translocation and microstructure is discussed. It is shows that in the microscopic level the microscopic particles and structure unit have the following features, such as the directionality is not obviously, much more pores is developed in it, and even in the condition of clay content higher, the pore aperture is mainly distributed in the 1-2 μ m, i. e. the capillary pore is abundant. The resultant shows that the characteristics of soil sample is isotropy, namely the moisture content translocation behavior is same both in horizontal and vertical direction under the same external conditions.

Key words: structure units; pores; seasonal frozen soil; moisture content

责任编辑: 张明霞