

文章编号: 1000-7598 (2009) 08-2295-05

三江平原沼泽土微观特性试验研究

李丽华^{1,2}, 陈 轮¹, 高盛焱¹, 邵庆春³, 陈国双³, 刘彩云⁴

(1. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国地质大学 工程学院 武汉 430074;
3. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 4. 中国矿业大学 土木建筑工程系, 北京 100083)

摘 要: 从微观形态、微结构特征、粒度分析、土颗粒间的排列方式、孔隙大小分布、有机质含量以及矿物成分等方面对三江平原的两种沼泽土和北京翠湖湿地土进行了一系列微观结构的对比试验。结果表明: 沼泽白土和翠湖湿地土与一般软土性质相似, 但沼泽黑土含水率、液性指数、孔隙比、孔隙数量、孔径和孔隙体积远远大于沼泽白土和翠湖湿地土, 有机质含量最大, 特性明显突出。研究成果有助于提高对沼泽土特性的认识, 可为沼泽地陷落体救助和沼泽湿地保护和合理开发等工程建设提供参考。

关 键 词: 沼泽土; 微观结构; 软土

中图分类号: TU 443 **文献标识码:** A

Study of microstructure properties of swamp soil in Sanjiang Plain

LI Li-hua^{1,2}, CHEN Lun¹, GAO Sheng-yan¹, SHAO Qing-chun³, CHEN Guo-shuang³, LIU Cai-yun⁴

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Engineering institute, China University of Geosciences, Wuhan 430074; 3. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 4. Department of Architecture Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Two typical swamp soils in Sanjiang Plain and another wetland soil in Cuihu, Beijing are tested in aspects of micromorphic, microstructure characteristic, mode arrangement of soil particles, pore-size distribution, organic content and mineral composition etc. Test results show that moisture content, liquidity index, void ratio, void number, void size, void volume and organic content of the black swamp soil are far more than that of the white swamp soil; and the wetland soil, which indicated that the properties of the swamp soil are obviously different. Study results can provide references for understanding properties of swamp soil, sinking salvage, protection, rational exploitation and engineering construction in swamp regions.

Key words: swamp soil; microstructure; soft soil

1 引 言

沼泽土是指地表多年积水或土壤处于过温状态, 主要生长着沼生植物和湿生植物, 有泥炭的形成和累积或土壤仅具有严重潜育化形成的明显潜育层。沼泽土主要分布在东北地区的三江平原, 川西北高原的松潘草地及青藏高原部分地区的积水低地等, 属水成土壤。由于沼泽土所处的特定环境使沼泽土层的成因历史与一般常见软土有很大的不同, 致使其物理化学性质与工程中常见软土有诸多差异。一般软土孔隙比最大可达到 3, 而沼泽土孔隙

比可达 3~15。沼泽土壤处于较高的地下水位和冷湿气候, 土体含水率高、压缩性大、渗透性小、抗剪强度低、触变性和流变性显著。因此, 不能简单地套用常见陆地土的评价方法及处理措施去解决沼泽土工程方面提出的许多新问题。

在对沼泽湿地保护越来越重视的同时, 沼泽地上的工程项目越来越多, 沼泽土的工程性质也因此成为国内外众多学者关注的热点问题。但目前有关沼泽土体的研究, 主要集中在化学、生物学、土壤侵蚀及水土保持等几个方向, 对沼泽土体物理力学性质和微观结构的研究还很缺乏。目前国内外有关

收稿日期: 2007-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50578086)。

第一作者简介: 李丽华, 女, 1980 年生, 博士后, 助理研究员, 从事土工合成材料和特殊土方面的研究。E-mail: lilihua466@163.com

软土微观结构方面的研究有:高国瑞^[1]、牛作民^[2]、孔令伟等^[3]、雷华阳等^[4]、李萍等^[5]、张敏江等^[6]、毛灵涛等^[7]都对海洋软土的微观机制进行了研究,蒋希雁等^[8]从黏性土微观结构的角度论述了含水率变化对工程特性的影响,Fukue等^[9]论述了由于自然矿化作用引起土体中微观结构的变化,邓津等^[10]和Wang等^[11]对湿陷性黄土的微观结构进行了分析,刘莹等^[12]对吹填土沉积后微观结构特征进行了定量研究,张留俊等^[13]论述了泥炭土的微观结构及工程性质,周旻等^[14]对湖泊底泥改性固化的强度特性和微观结构进行了研究,孟庆山等^[15]对动力排水固结前后软土微观结构进行了分析。由国内外软土微观结构研究现状可知,目前对海洋软土微观结构方面的研究较多,也有学者对黏性土、湿陷性黄土、吹填土和泥炭土等微观结构进行了探讨,但专门对沼泽土微观结构的研究还罕见报道。

针对沼泽土微观结构研究比较薄弱的现状,本文从微观形态、微结构特征、粒度分析、土颗粒间的排列方式、孔隙大小分布、有机质含量以及矿物成分等方面进行了试验研究,初步分析了沼泽土的微观机制及其与物理力学性质和工程特性之间的联系,可为沼泽土的物理力学性质和工程特性的认识以及工程建设提供参考。

2 微观结构试验

2.1 试样制备

试样取自三江平原沼泽地。三江平原是我国面积最大的平原淡水沼泽地,该区地处黑龙江与乌苏里江汇流的三角地带,属低冲积平原沼泽湿地,是全球少见的淡水沼泽地之一。区内泡沼遍布,河流纵横,自然植被以沼泽化草甸为主,并间有岛状森林分布。三江平原沼泽地属典型内陆高寒湿地,离鄂霍次克海域较近,受海洋气候影响,冬季在极地大陆性气团控制之下,夏季受副热带海洋气团的影响,因此,温度年差比同纬度内地小。在该地区选取了两种有代表性的沼泽土样,沼泽黑土和沼泽白土。另外,从北京翠湖湿地选取了一种湿地土样以作对比。文中用 S1 表示北京翠湖湿地土, S2 表示三江平原沼泽白土, S3 表示三江平原沼泽黑土。土样基本物理性质指标如表 1 所示。

2.2 粒度分析试验

试验所用激光粒度分析仪型号为 Mastor2000。试验结果如表 2 和图 1 所示。

表 1 土样物理性质指标

Table 1 Physical indexes of samples					
土样	含水率 /%	液限 /%	塑性指数	液性指数	孔隙比
S1	46.6	37.70	16.7	1.5	1.35
S2	27.2	25.96	12.2	1.1	0.68
S3	185.0	115.55	32.8	3.1	3.90

表 2 颗粒组分结果^[16]

Table 2 Particle size distribution					
试样	颗粒组分/%				
	<0.002	0.002~0.005	0.005~0.01	0.01~0.05	>0.05
	mm	mm	mm	mm	mm
S1	2.2	9.3	10.6	36.8	41.1
S2	2.5	8.7	9.6	34.2	45.0
S3	1.4	6.8	9.9	50.2	31.7

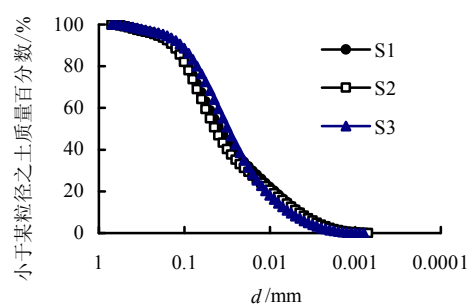


图 1 粒径级配累积曲线

Fig.1 Cumulative curve of size grading

由表 1、2 和图 1 可知,沼泽白土和翠湖湿地土孔隙比都小于 1.5,天然含水率均大于液限,处于流塑状态,黏粒含量均约为 11%,粉粒含量占 38%左右,其他较粗颗粒占 45%左右,两者颗粒大小比较接近,且与一般软土相似。但沼泽黑土黏粒占 8.2%,粉粒占 60.1%,其他较粗颗粒占 30%左右,粒径>0.05 mm 的较粗颗粒土比翠湖湿地土和沼泽白土颗粒要小。沼泽黑土含水率极高,孔隙比超过 3,流塑性最好,特征比较明显。3 种土曲率系数都在 1~3 之间,不均匀系数都大于 5。沼泽黑土粒径分布曲线坡度比沼泽白土和翠湖湿地土稍微陡些。

2.3 微孔结构分析试验

为测得的微观结构结果能真实地反映土样的天然结构形貌,本试验采用冷冻真空升华干燥法进行样品制备。如采用风干法或烘干法制样,土样将产生显著的收缩变形,用该样品进行微结构试验所得结果将严重失真。为此,采用的试样制备方法是事先将原状土样切成 1.0 cm³ 左右的土块,将其在液氮(沸点-196℃)中快速冷冻 15 min,使土中液体成为不具膨胀性的非结晶态冰,然后在 -50℃ 状态下抽真空 8 h 以上使土中非结晶的冰升华。通过蒸汽抽走,从而达到土样既干燥又不变形的目的。所得试验结果如表 3 和图 2~4 所示。

表 3 孔隙大小分布结果
Table 3 Pore size distribution

土样	总孔体积 /(mm^3/g)	体积平均孔径 / μm	孔隙分布体积 /(mm^3/g)			
			大孔隙	中孔隙	小孔隙	微孔隙
S1	297	0.090 8	117.3	115.3	44.3	20.2
S2	218	0.058 2	40.2	97.1	22.5	58.5
S3	1 635	0.113 0	717.8	636.8	172.6	108.1

注：大孔隙指孔径大于 $10.0 \mu\text{m}$ ，中孔隙指孔径在 $10.0 \sim 1.0 \mu\text{m}$ ，小孔隙指孔径在 $1.0 \sim 0.1 \mu\text{m}$ ，微孔隙指孔径小于 $0.1 \mu\text{m}$ 。

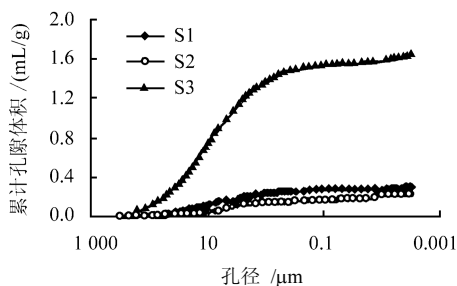


图 2 累积孔隙体积结果^[16]
Fig.2 Accumulated void volume

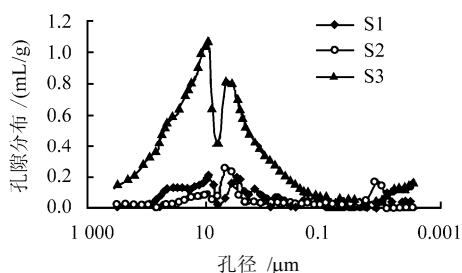


图 3 孔隙分布结果^[16]
Fig.3 Pore distribution

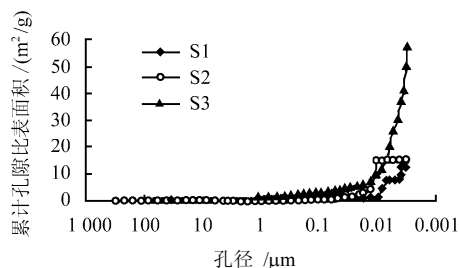


图 4 累积孔隙比表面积结果
Fig.4 Accumulated void specific area

由压汞试验结果可知，沼泽黑土干密度最小，孔隙体积比沼泽白土和翠湖湿地土都要大很多，以大孔隙和中孔隙为主；翠湖湿地土次之，主要是大孔隙和中孔隙，小孔隙次之，最少的是微孔隙体积；沼泽白土则孔隙体积和尺寸最小，主要是中孔隙和微孔隙，较少的是大小孔隙。翠湖湿地土和沼泽白

土孔径大小和孔隙体积整体差别较小，但沼泽黑土差别极大，这与物理性质试验得出的沼泽黑土含水率最大、液性指数和孔隙比最高、颗粒最小、不同于一般软土的规律比较相似。

2.4 扫描电镜试验

试验所用扫描电镜规格 $30 \text{ kV}/3 \text{ nm}$ 。与压汞试验一样，首先对样品冷冻抽真空。另外，为了防止拍摄过程中由于样品受到电子束的轰击而产生放电现象，对样品进行了镀金处理。试验放大倍数选取了 500、1 000、3 000、10 000，在低倍率下观察全貌，对有代表性的部位作进一步的放大。电镜结果如图 5 所示。

由电镜结果可以看出，翠湖湿地土和沼泽黑土可以明显见到管状的植物根茎和藻类植物的遗骸。沼泽黑土呈现出蜂窝状的微结构类型，孔隙不仅数量很多而且尺寸很大，土颗粒体积小于孔隙体积。另外的两种沼泽土和湿地土孔隙大小和形状没有明显规律，也没有沼泽黑土特征显著，翠湖湿地土比沼泽白土孔隙稍大。沼泽黑土特征最明显，区别最大，翠湖湿地土特征次之，沼泽白土最小。沼泽黑土管片状颗粒且孔隙大，孔隙体积超过土颗粒体积的微观结构决定了其含水率高、变形大这种特殊的工程性质。

2.5 矿物成分分析试验

试验所用 X 射线荧光光谱仪型号 XRF-1800，功率 4 kW ，用于元素的定性、定量分析。X 射线衍射仪型号为日本理学 D/max-RB， 12 kW 转靶，用于物相分析。试验所得衍射物相如图 6 所示。

由荧光分析结果和衍射结果可知，沼泽白土主要是伊利石、钠钾长石、叶腊石和石英，其他含量很少，伊利石含量最高。沼泽黑土矿物成分与沼泽白土相近，钠钾长石含量较少。翠湖湿地土原生矿物以石英为主，波峰不明显，其他成分比较复杂，且含量都很少。原生矿物，如石英，一般是粉粒组的主要成分，黏土矿物则是黏粒的主要矿物成分，

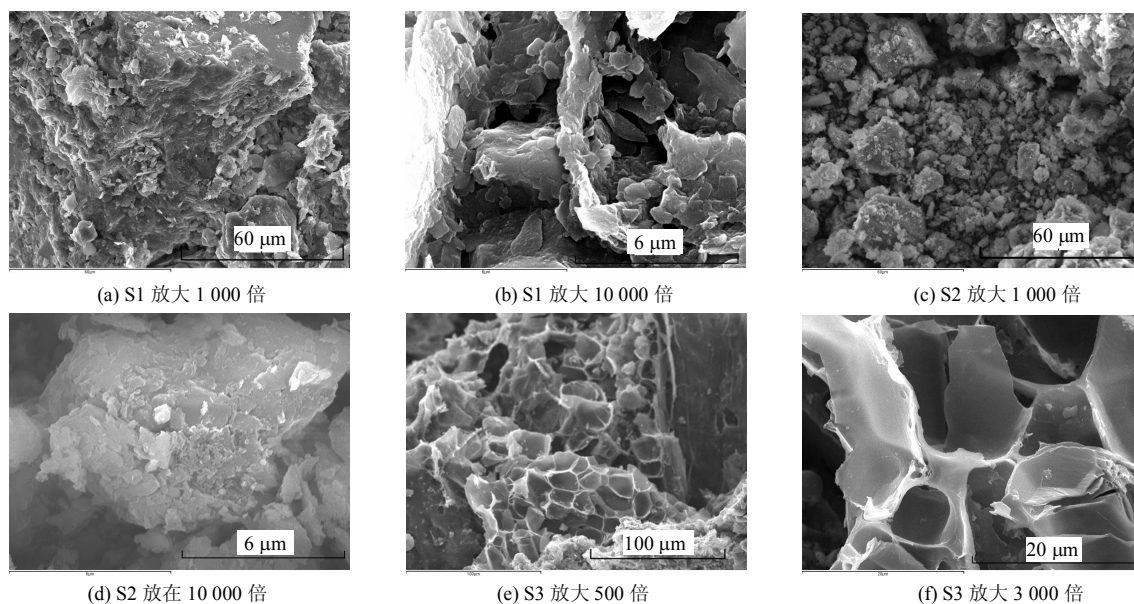


图 5 电镜扫描图

Fig.5 Stereoscan results

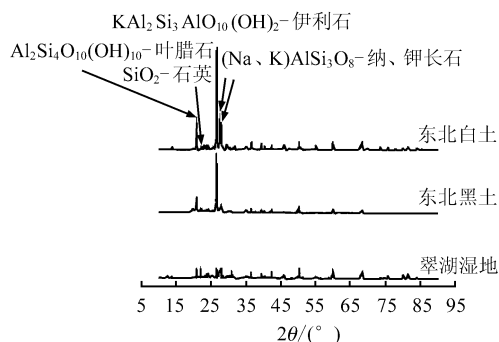


图 6 X 射线衍射图

Fig.6 X-ray diffraction

吸附性较强,具亲水性。有机质粒径很小,一般呈凝胶状,具有表面活性和黏滞性。当土中含有 1%~2% 有机质时,其对土的工程性质影响就比较大,会对土的分散性、含水率与干密度等物理性质产生影响,分别测定沼泽白土、沼泽黑土、翠湖湿地土的烧失率,结果为 3 种土中东北沼泽黑土烧失率最大为 7.6%;沼泽白土最小,为 1.3%;翠湖湿地土介于两者之间,为 2.5%。烧失率与有机质及结合水的含量密切相关,沼泽黑土有机质含量高,吸附结合水的能力最强。这也是含水率大、干密度小、渗透系数很小的主要原因。

3 结 语

本文对东北三江平原的沼泽黑土、沼泽白土和北京翠湖湿地土进行的基本物理性质试验、激光粒度分析、压汞、电镜扫描、荧光光谱分析以及衍射等一系列的微观结构试验,其结果表明:沼泽黑土明显不同于沼泽白土和翠湖湿地土。

(1) 沼泽白土和翠湖湿地土液性指数都大于 1,孔隙比都不超过 1.5,天然含水率均大于液限,处于流塑状态,两者颗粒大小比较接近。东北沼泽黑土比翠湖湿地土和东北沼泽白土颗粒要小,含水率极高,液性指数和孔隙比都超过 3,流塑性最大。3 种土都属于级配良好的土。

(2) 沼泽黑土干密度最小,孔隙体积最大,主要为大孔隙和中孔隙,孔隙远大于沼泽白土和翠湖湿地土。翠湖湿地土次之,沼泽白土孔隙最小,两者孔径大小和孔隙体积较为接近。

(3) 电镜分析表明,沼泽黑土特征最明显,微结构类型呈蜂窝状,明显孔隙很大,数量很多,孔隙体积超过了土颗粒体积。

(4) 沼泽黑土矿物成分主要是伊利石、叶腊石和石英,其他含量很少,伊利石含量最高,有机质含量最大。沼泽白土矿物成分与沼泽黑土相近,钠钾长石含量大于沼泽黑土。翠湖湿地土以石英为主,其他成分较复杂且每种成分含量都很少。

(5) 一系列试验结果一致表明,沼泽白土、翠湖湿地土特性与一般软土较为接近。但沼泽黑土特征差别极大,含水率、液性指数、孔隙比、孔径和孔隙体积大都超过一般软土,有机质含量也高。沼泽黑土的这些微观结构特征可能是解释其压缩性大、抗剪强度低、触变性和流变性显著等工程特性的主要原因。

本文物理性质和微观结构的研究工作,可提高对沼泽土特性的认识,并为沼泽陷落体救助和沼泽地工程建设提供参考。

参考文献

- [1] 高国瑞. 中国海相沉积土微结构研究和工程性质[J]. 中国科学, 1984, (9): 849—860.
GAO Guo-rui. Studied on the microstructure and engineering properties of marine sedimentary soil of China[J]. **Science in China**, 1984, (9): 849—860.
- [2] 牛作民. 海洋细粒沉积物工程地质性质的研究[J]. 中国科学, 1992, (4): 434—442.
NIU Zuo-min. Studied on the engineering geology of the marine fine deposit[J]. **Science in China**, 1992, (4): 434—442.
- [3] 孔令伟, 吕海波, 汪稔, 等. 海口某海域软土工程特性的微观机制浅析[J]. 岩土力学, 2002, 3(1): 36—40.
KONG Ling-wei, LÜ Hai-bo, WANG Ren, et al. Preliminary analysis of micro-mechanism of engineering properties for soft soil in a sea area of Haikou[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 3(1): 36—40.
- [4] 雷华阳, 肖树芳. 天津海积软土微观结构与工程性质初探[J]. 地质与勘探, 2002, 38(6): 81—85.
LEI Hua-yang, XIAO Shu-fang. Primary exploration on engineering properties of marine soft soil microstructure in Tianjin region[J]. **Geology and Prospecting**, 2002, 38(6): 81—85.
- [5] 李萍, 李培英, 徐兴永, 等. 南黄海油气资源区粘性土物理力学性质及微结构特征[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(4): 482—486.
LI Ping, LI Pei-ying, XU Xing-yong, et al. Physicomechanical properties and microstructure features of cohesive soil in the Southern Yellow sea oil and gas resource area[J]. **Advances in Marine Science**, 2005, 23(4): 482—486.
- [6] 张敏江, 阎婧, 初红霞. 结构性软土微观结构量化参数的研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2005, 21(5): 455—460.
ZHANG Min-jiang, YAN Jing, CHU Hong-xia. The quantitative analysis of microstructure parameter of soft soil[J]. **Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)**, 2005, 21(5): 455—460.
- [7] 毛灵涛, 薛茹, 安里千, 等. 软土孔隙微观结构的分形研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(5): 600—604.
MAO Ling-tao, XUE Ru, AN Li-qian, et al. Fractal approach on soft soil porosity microstructure[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2005, 34(5): 600—604.
- [8] 蒋希雁, 张志红, 屈建平. 从黏性土微观结构的角论述含水率变化对土的工程特性的影响[J]. 河北建筑工程学院学报, 2002, 20(3): 14—16.
JIANG Xi-yan, ZHANG Zhi-hong, QU Jian-ping. The analysis of the water content's effects on soil engineering properties from microcosmic structure[J]. **Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering**, 2002, 20(3): 14—16.
- [9] MASAHARU FUKUE, YOSHIO SATO, MITSUAKI YAMASHITA, et al. Change in microstructure of soils due to natural mineralization[J]. **Applied Clay Science**, 2003, 23(1—4): 169—177.
- [10] 邓津, 王兰民, 张振中, 等. 甘肃永登湿陷性新近堆积黄土的微观结构分析[J]. 西北地震学报, 2005, 27(3): 267—271.
DENG Jin, WANG Lan-min, ZHANG Zhen-zhong, et al. Analysis on microstructure of the recently cumulated collapsible loess in Yongdeng County, Gansu Province[J]. **Northwestern Seismological Journal**, 2005, 27(3): 267—271.
- [11] WANG Mei, BAI XIAOHONG. Collapse property and microstructure of loess[J]. **Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics**, 2007, 6(7): 111—118.
- [12] 刘莹, 王清. 吹填土沉积后微观结构特征定量化研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, (3): 124—128.
LIU Ying, WANG Qing. Quantitative study of microstructure characteristics of dredger fills after sediment[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2006, (3): 124—128.
- [13] 张留俊, 黄晓明, 王攀, 等. 泥炭的微观结构及工程性质[J]. 中国公路学报, 2007, 20(1): 47—52.
ZHANG Liu-jun, HUANG Xiao-min, WANG Pan, et al. Microstructure and engineering properties of peat[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2007, 20(1): 47—52.
- [14] 周旻, 侯浩波, 张大捷, 等. 湖泊底泥改性固化的强度特性和微观结构[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1010—1014.
ZHOU Min, HOU Hao-bo, ZHANG Da-jie, et al. Strength characteristics and microstructure of solidified lake sludge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(4): 1010—1014.
- [15] 孟庆山, 杨超, 许孝祖, 等. 动力排水固结前后软土微观结构分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1759—1763.
MENG Qing-shan, YANG Chao, XU Xiao-zu, et al. Analysis of microstructure of soft clay before and after its improvement with dynamic consolidation by drainage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1759—1763.
- [16] 李丽华, 陈轮, 高盛焱. 沼泽土物理力学性质和微观结构的研究[J]. 工业建筑, 2008, (10): 61—64.
LI Li-hua, CHEN Lun, GAO Sheng-yan. Study on physicomchanical properties and microstructure of swamp soil[J]. **Industrial Construction**, 2008, (10): 61—64.