

高有机质软土固结特性与机制分析

刘 飞, 陈俊松, 柏双友, 姚燕雅

(无锡环境科学与工程研究中心, 江苏 无锡 214000)

摘 要: 有机质中的纤维素和腐殖质会影响软土的力学性质, 有机质含量越高, 软土的力学特性就会越差。为研究高有机质软土的固结特性, 通过对不同深度高有机质软土的渗透性、固结以及微、细观结构特征进行试验, 并利用分解程度试验结果, 分析高有机质软土的特殊渗透、固结和结构特征的形成机制。研究表明, 不同埋深的高有机质软土渗透系数差别较大, 且渗透固结速度较快, 基本处于粉砂到粉质黏土数量级; 0.5~1.8 m埋深的土层垂直渗透系数小于水平渗透系数, 其余深度垂直渗透系数均大于水平渗透系数; 分解程度的研究表明, 分解程度直接影响高有机质软土的压缩固结特性, 低分解程度的土层更容易发生塑性变形。由埋藏从浅到深, 结构由絮凝结构逐渐向叠片结构转化, 最后转变为集块结构。结合土体的分解程度分析, 得出高有机质软土的分解程度高低直接影响高有机质软土的渗透、固结以及结构特性。

关 键 词: 渗透性; 固结; 结构特性; 分解程度

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Analysis of formation mechanism and consolidation characteristics of high organic soft clay

LIU Fei, CHEN Jun-song, BAI Shuang-you, YAO Yan-ya

(Wuxi Research Center of Environmental Science and Engineering, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: Cellulose organic matter and hummus will affect the mechanical properties of soft soil. The higher of the Organic matter content, the worse of the mechanical properties. To study the consolidation characteristics of high organic soft clay, the formation mechanisms of permeability, consolidation and structural characteristics are analyzed by the test of decomposition degree after the tests of permeability, consolidation, micro-meso structural characteristics at different depths. The results indicate that permeability coefficients have larger difference at different depths; and permeability and consolidation speed are faster. The value of permeability coefficient is during silt to silty clay magnitude; The vertical permeability coefficients are smaller than horizontal permeability coefficients at depths from 0.5m to 1.8m. and others are larger than horizontal coefficients. The decomposition degree studies have shown that decomposition degree will affect the consolidation characteristics directly; and lower decomposition degree will easier lead to plastic deformation. Also the structure changes from flocculated structure to laminated structure according to different depths, and transforms into massive structure finally. It proved that the characteristics of permeability, consolidation and structure have been direct effected by the degree of decomposition after the decomposition degree is analyzed.

Key words: permeability; consolidation; structural characteristics; decomposition degree

1 引 言

有机质主要为纤维素和腐殖质, 广泛存在于土壤中^[1]。腐殖质腐烂后形成的古敏酸球状颗粒包裹部分非黏土矿物颗粒^[2], 形成特殊的力学特性和结构特征。马成泽^[3]、单秀枝等^[4]就对土壤中的有机质含量对土壤的物理性质、水动力学性质进行了研究; 王秀红^[5]还讨论了我国土壤中有机质的空间变化特征。

由于有机质会减弱水泥对土的加固强度, 有机质含量的多少, 对水泥加固土层的强度有不同程度的影响, 基于实际工程的研究需要, 确保水泥加固土层的安全稳定性, 促使一部分学者开始研究有机质含量对土体的影响。荀勇^[6]通过对比试验讨论了有机质、水泥等对加固土的强度影响机制; 陈慧娥等^[7-9]在大量室内试验的基础上, 结合定量和定性分析手段, 研究了有机质含量对水泥加固软土的强度、力学特性以及土的结构特性的影响; 储诚富等^[10],

牟春梅等^[11]也对有机质对水泥土的加固强度影响、加固效果以及力学性质等方面进行了深入研究。

有机质不仅引起了国内学者的研究,在国外 Herencia 等^[12], Virto 等^[13], Nicols 等^[14]分别对有机质对硬化水泥、土壤物理性质、土壤的团粒结构以及化学结构的影响进行了详细分析。

以上研究成果均对土壤中有有机质含量不超过 10% 的土层进行的研究,然而在东北发育的沼泽沉积软土^[15]有机质含量却在 30%~50% 之间,并与典型泥炭土性质有一定区别,赵华等^[16],徐燕^[17]对吉林敦化地区土层的工程特性以及变形沉降规律进行了深入讨论。张先伟等^[18]还对天然沉积的软土结构性进行了深入研究。就研究现状来看,针对该土层的固结特性和固结机制研究成果较少,为满足研究和工程的需要,本文从试验出发,设计研究不同埋深高有机质软土的渗透固结、压缩固结以及结构特征,并从根本上讨论其形成机制,为该类土层的工程建设提供理论依据。

2 基本特性试验研究

2.1 野外取样

试验土样取自吉林敦化地区 0~3.0 m 的高有机质软土层,从地表开始以 20 cm 为一个间隔依次取样,并现场进行蜡封处理保证土样的原状性。

2.2 结果分析

通过室内一系列物理性质和化学性质的测试,利用数理统计中变异系数对数据离散程度可靠性的评价,对不同深度的 150 组土样进行变异性分析,得出 0~3.0 m 的高有机质软土层各特性指标数值上变异性较小,因此,采取算术平均值代替整个 3 m 深度各特性指标值,如表 1 所示。由表可知,该土层具有高有机质含量、高含水率、小密度、弱酸性等工程性质。

表 1 高有机质软土基本物理化学指标

Table 1 Physical and chemical indexes of high organic soft clay

土样 埋深 H / m	基本性质指标					pH
	密度 ρ / (g/cm ³)	土粒 密度 ρ_s / (g/cm ³)	含水率 ω / %	有机质 含量 / %	烧失量 / %	
0~3.0	0.888	1.307	296.1	47.3	67.80	5.56

注:各指标值为 150 个试验样本算术平均值。

3 试验方案

根据高有机质软土的特殊性,采用变水头渗透试验、固结试验以及微、细观结构观测 3 种方法,测定高有机质软土的渗透性、固结性和结构性,进而详细了解高有机质软土的工程特性。

3.1 变水头渗透试验

为研究不同深度高有机质软土的渗透性,选择 7 个不同深度土样,采用水平、垂直两个渗透方向和 7 个级别的固结压力进行试验。其中,通过不同取样方向实现水平和垂直渗透,即水平方向渗透首先利用渗透环刀在野外取回土样的水平方向上取试验样品,垂直方向渗透则在垂直方向上取试验样品;并且,水平固结压力通过侧压力系数 $K_0 = 0.66$ 计算得出(假设高有机质软土的泊松比为 0.4);第 $i+1$ 级渗透试验均在第 i 级试验结束和第 $i+1$ 级固结压力下达到饱和后进行。试验结果如表 2、3 所示。

分析每个深度试验土样在水平和垂直两个渗透方向下的渗透系数与固结压力的关系,发现大部分深度的土样在同一个固结压力作用下,垂直渗透系数均大于水平渗透系数,符合一般的渗透规律;而在 0.5~1.8 m 深度范围内的土样试验结果相反,垂直渗透系数小于水平渗透系数。基于规律的可见性,选择 0.30、1.50、2.80 m 3 个深度试验土样结果深入分析固结压力与渗透系数的变化规律。

从图 1 可以看出,同一个固结压力下,随着埋

表 2 水平渗透作用下固结压力与渗透系数试验成果表

Table 2 The values of consolidation pressures and permeability coefficients subjected to horizontal seepage

埋深 / m	不同固结压力(kPa)下的渗透系数						
	11.1	22.3	33.5	50.2	66.9	100.4	167.3
0.30	1.03×10^{-4}	1.00×10^{-4}	6.33×10^{-5}	4.28×10^{-5}	2.16×10^{-5}	7.24×10^{-6}	1.69×10^{-6}
0.50	4.46×10^{-4}	3.15×10^{-4}	3.03×10^{-4}	2.72×10^{-4}	2.69×10^{-4}	2.54×10^{-4}	1.15×10^{-4}
1.50	3.86×10^{-4}	2.77×10^{-4}	2.66×10^{-4}	2.54×10^{-4}	2.34×10^{-4}	1.30×10^{-4}	1.01×10^{-4}
1.80	1.05×10^{-4}	8.41×10^{-5}	8.04×10^{-5}	6.86×10^{-5}	5.69×10^{-5}	2.88×10^{-5}	5.44×10^{-6}
2.25	1.24×10^{-4}	8.04×10^{-5}	2.71×10^{-5}	2.62×10^{-5}	1.37×10^{-5}	5.36×10^{-6}	1.37×10^{-6}
2.55	1.86×10^{-5}	1.09×10^{-5}	9.93×10^{-6}	3.66×10^{-6}	2.01×10^{-6}	1.85×10^{-6}	3.47×10^{-7}
2.80	8.59×10^{-6}	8.00×10^{-6}	5.35×10^{-6}	5.31×10^{-6}	5.00×10^{-6}	4.02×10^{-6}	1.51×10^{-6}

表 3 垂直渗透作用下固结压力与渗透系数试验成果表

Table 3 The values of consolidation pressures and permeability coefficients subjected to vertical seepage

埋深 / m	不同固结压力(kPa)下的渗透系数						
	16.7	33.5	50.2	75.3	100.4	150.6	251
0.30	1.30×10^{-3}	1.16×10^{-3}	2.22×10^{-4}	7.65×10^{-5}	3.93×10^{-5}	1.98×10^{-5}	1.54×10^{-6}
0.50	1.83×10^{-4}	1.26×10^{-4}	9.82×10^{-5}	7.28×10^{-5}	7.05×10^{-5}	6.76×10^{-5}	3.77×10^{-5}
1.50	3.55×10^{-4}	1.87×10^{-4}	1.69×10^{-4}	1.03×10^{-4}	1.73×10^{-5}	4.82×10^{-6}	2.28×10^{-6}
1.80	4.19×10^{-5}	4.07×10^{-5}	3.10×10^{-5}	1.06×10^{-5}	7.08×10^{-6}	8.43×10^{-7}	2.09×10^{-7}
2.25	3.36×10^{-4}	1.77×10^{-4}	1.60×10^{-4}	9.34×10^{-5}	7.88×10^{-6}	5.84×10^{-6}	1.06×10^{-6}
2.55	7.64×10^{-5}	7.17×10^{-5}	4.95×10^{-5}	1.73×10^{-5}	1.96×10^{-6}	1.07×10^{-6}	6.83×10^{-7}
2.80	1.96×10^{-5}	1.16×10^{-5}	1.01×10^{-5}	1.01×10^{-5}	1.00×10^{-5}	8.73×10^{-6}	5.84×10^{-6}

深的增加, 渗透系数大幅度减小; 埋深 0.30、2.80 m 试验土样的垂直渗透系数大于水平渗透系数, 而 1.50 m 土样垂直渗透系数明显小于水平方向。1.50 m 深土样在第 1 级固结压力下, 水平和垂直渗透系数差距较小, 仅 0.31×10^{-4} cm/s, 随着固结压力的增加, 两者之间的差距逐渐增大。

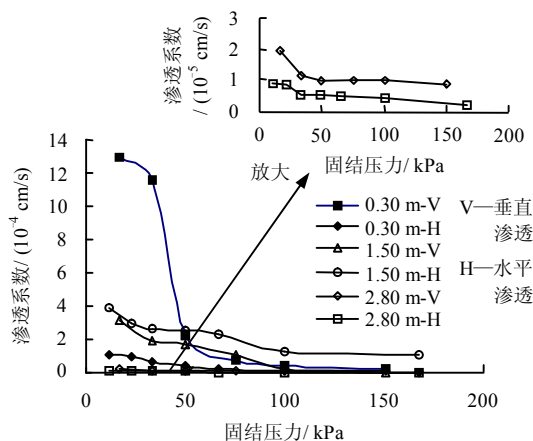


图 1 渗透系数-固结压力关系曲线

Fig. 1 Curves between consolidation pressures and permeability coefficients

埋深 0.30 m 的土样在前 3 级固结压力作用下垂直渗透系数迅速下降了一个数量级; 随着埋深的逐渐增加, 水平和垂直渗透系数差距逐渐减小。

渗透系数的变化规律, 可进而推出高有机质软土的渗透固结速度。由表 2、3 和图 1 的试验结果可知, 埋藏较浅的土层, 土体的渗透系数较大, 甚至达到粉细砂的级别, 渗透速度快, 固结时间短; 随着埋藏深度的加深, 特别是达到 2.25 m 以下土层, 土体的渗透系数大幅降低, 渗透速度变慢, 因此, 固结的时间也增长。

3.2 固结试验

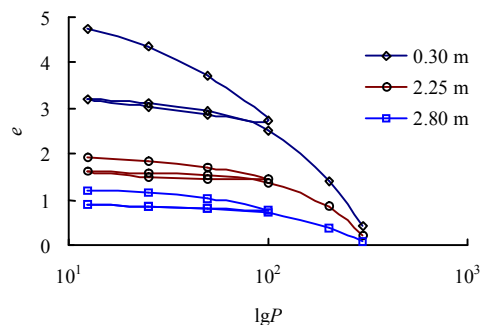
利用固结试验手段, 对不同深度高有机质软土的孔隙性、压缩性、回弹性进行讨论。测试成果如

表 4 和图 2 所示。

表 4 高有机质软土力学性质指标

Table 4 Mechanical properties indexes of high organic soft clay

埋深 / m	初始孔隙比 e_0	压缩指数 C_c	回弹指数 C_e	压缩系数 a_{1-2} / MPa^{-1}
0.30	4.816	0.573	11.600	11.30
1.50	6.049	0.810	17.808	10.00
2.00	2.386	0.288	4.927	6.35
2.25	1.989	0.244	5.118	6.20
2.80	1.378	0.105	2.325	8.60

图 2 高有机质软土 e - $\lg P$ 关系曲线Fig. 2 Relations between e and $\lg P$ of high organic soft clay

由表 4 可知, 0~1.5 m 土样的初始孔隙比较大, 压缩性较大, 回弹指数也较高; 埋深 2.0 m 以下的土样初始孔隙比减小了 2~3 倍, 压缩指数、回弹指数和压缩系数也有 1~2 倍的减小。而 1.50 m 埋深的土样的初始孔隙比最大, 压缩指数和回弹指数都较高, 然而压缩系数比 0.30 m 小 1.3 MPa^{-1} 。

从图 2 e - $\lg P$ 关系曲线可以看出, 随着埋深增加, 土样的压缩和回弹曲线逐渐减缓, 压缩指数和回弹指数随之减小; 对比 3 个深度土样的变形特征可知, 0.30 m 土样的残余变形较大, 并随埋深增加而减小。由表 5 可知, 0.30 m 试验土样的残余变形量是 2.25m、2.80 m 的 5 倍左右, 弹性变形量是 2.25m、2.80 m 的 3 倍左右, 而 2.25m、2.80 m 的弹性变形量和残余变形量相差较小。

表 5 变形量与埋深指标值
Table 5 Values of deformations and buried depths

埋深 / m	总变形 /cm	弹性变形 /cm	残余变形 /cm
0.30	1.99	0.45	1.54
2.25	0.50	0.18	0.32
2.80	0.45	0.16	0.29

3.3 微细观结构试验

不同的土类型以及结构类型均影响着土的物理和力学性能, 因此, 研究高有机质软土的结构特征是分析其独特物理力学特性的关键。针对上述力学特性的土样埋藏深度, 采用 0.30、2.80 m 两组微观试验以及 0.30、1.50、2.25 m 3 组微观试验研究高有机质软土的结构特性。

细观结构试验采用实体光学显微镜放大 30 倍对天然高有机质软土的水平面结构特征进行观测, 如图 3(a)、(b)所示; 微观结构试验采用扫描电子显微镜 (SEM) 放大 1 000 倍对高有机质软土的孔隙大小、结构类型等进行观测, 如图 3(c)~(e)所示。

实体光学显微镜观测图片显示, 浅层天然高有机质软土含水率很高, 2.80 m 左右含水率大幅下降; 孔隙较大且孔隙连通性较好; 图 3(b)中还可以看出, 有许多未分解完全的植物根茎缠绕于土中, 形成疏松大孔隙结构。

由图 3(c)~(e)可得, 高有机质软土的微观结构从埋藏浅到深, 结构由絮凝结构逐渐向叠片结构转化, 最后转变成集块结构; 0.30 m 土样分解程度较高, 土体主要以黏粒为主的絮凝体存在, 孔隙连通性较好; 1.50 m 土样分解程度较低, 土体与草茎随意叠放, 各向异性较大, 存在大孔隙; 2.25 m 土样分解程度较高, 土体凝结成块状, 具有一定的抗变形能力, 孔隙较小。

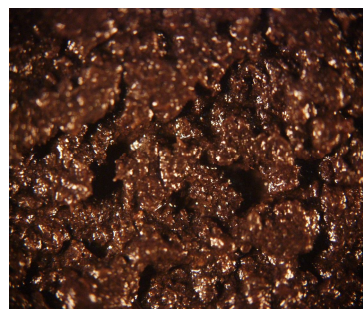
4 试验结果讨论与机制分析

4.1 分解程度试验

通过微、细观结构观测可得出, 高有机质软土的分解程度随着深度的不同, 呈现出不同的状态并势必会影响其物理力学性质。

分解程度的测定方法有很多, 俄罗斯学者提出很多测定分解程度的物理和化学方法。在此, 根据中央泥炭试验站提出的流水冲洗法^[19]对高有机质软土的分解程度进行测定。冲洗法主要利用流水的机械力分离腐殖质和纤维, 进而测定试验样本的分解程度。试验结果如表 6 所示。

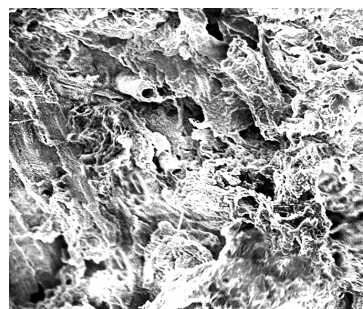
试验结果显示, 高有机质软土的分解程度基本处在 30%~72%之间, 在 0.9~1.8 m 埋深的土样分



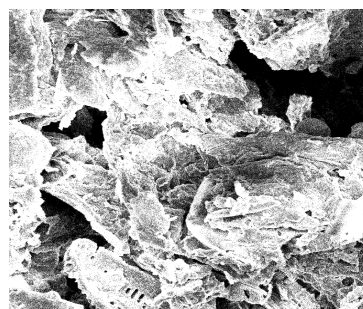
(a) 0.3 m (放大 30 倍)



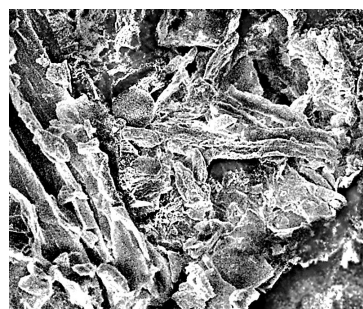
(b) 2.8 m (放大 30 倍)



(c) 0.3 m (放大 1 000 倍)



(d) 1.5 m (放大 1 000 倍)



(e) 2.25 m (放大 1 000 倍)

图 3 高有机质软土的微、细观结构

Fig.3 Micro-meso structures of high organic soft clay

表 6 高有机质软土分解程度值
Table 6 Values of decomposition degree
of high organic soft clay

埋深 / m	试验前土样体积 / cm ³	试验后土样体积 / cm ³	分解程度 / %
0.30	64.3	18	72
0.90		35	46
1.45		38	41
1.80		45	30
2.25		18	72
2.80		28	65

解程度较低, 主要在 30%~46%之间; 其余深度土样分解程度较高, 基本分解总体积的 2/3 以上。

4.2 机制分析

有机质主要为纤维素和腐殖质, 高有机质对土体的压缩等性能影响较大。在物理化学性质相似的前提下, 通过上述渗透固结、固结以及微、细观试验的结果讨论, 发现 0~1.80 m 埋藏的土样性质与 1.80 m 以下的土样性质差异较大。通过对高有机质软土分解程度的分析来验证这一结论是否正确。

从高有机质软土不同深度分解程度值的分布特征, 验证各个研究成果的特殊性。

由渗透性研究结果可知, 在同一固结压力作用下, 0.50~1.80 m 深度范围内的土样垂直渗透系数小于水平渗透系数, 不符合一般垂直渗透系数大于水平渗透系数的渗透规律。而 0.50~1.80 m 深度的土样分解度较低, 大量未分解的根茎穿插于土壤中, 层层堆积; 在受到外部压力作用时, 根茎和土壤被同时压密, 成层压密, 以致在水平向形成较好的水流路径, 进而增大了水平向的渗透系数, 导致 0.50~1.80 m 深度范围内的土样垂直渗透系数小于水平渗透系数。并且当固结压力较小时, 根茎和土壤的混合体压密程度较小, 定向性也较小, 使得在第 1 级固结压力作用下垂直和水平向的渗透系数差距较小, 随着固结压力逐渐增大, 土体结构被改变, 垂直和水平向的渗透系数也发生改变。

由固结研究结果可知, 0.30 m 的土样由于沉积时间较短, 未曾有固结发生, 因此, 土样的初始孔隙比较大, 压缩回弹指数均较大, 压缩系数较高, 容易被压缩; 2 m 以下土层分解程度较高, 集块结构有助于提高土体的力学性能。每个集块体之间由粒间连接力作用, 形成较为稳定的结构体, 具有一定的抗变形能力, 工程性质较好。1.5 m 埋深的土样由于分解度较低, 其初始孔隙比最大, 然而压缩系数比 0.30 m 土样小 1.3 MPa^{-1} 的情况下, 回弹指数却大 6.2, 这一现象说明, 分解程度较低的土壤容

易发生不可恢复的变形。

微、细观结构观测结果, 进一步证实了分解程度的试验结果。不同埋深的土样均有不同程度的分解, 而 1.50 m 左右的土样分解度较低, 土体与草茎随意叠放, 各向异性较大, 土样存在大孔径孔隙、大量未分解度的草根茎。同样, 客观的证实了这一深度土层性质反常的根本原因。

5 结 论

(1) 不同埋深的高有机质软土渗透系数差别较大, 基本处于粉砂到粉质黏土数量级内, 渗透速度较快, 达到相应固结度的时间短; 除了 0.50~1.80 m 埋深的土层垂直渗透系数小于水平渗透系数, 其余深度垂直渗透系数均大于水平渗透系数。

(2) 分解程度的大小, 直接影响高有机质软土的压缩固结特性, 分解程度低的土层容易发生塑性变形。

(3) 微、细观结构的观测, 客观给出了高有机质软土的结构特性, 从埋藏浅到深, 结构由絮凝结构逐渐向叠片结构转化, 最后转变成集块结构。

(4) 土体的分解程度影响高有机质软土的渗透、固结以及结构特性, 是出现特殊性质表现的原因所在。

参 考 文 献

- [1] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [2] 蒋忠信. 滇池泥炭土[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1994.
- [3] 马成泽. 有机质含量对土壤几项物理性质的影响[J]. 土壤通报, 1994, (2): 65—67.
MA Cheng-ze. Influence research of several physical properties according to organic matter content in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1994, (2): 65—67.
- [4] 单秀枝, 魏由庆, 严慧峻, 等. 土壤有机质含量对土壤水动力学参数的影响[J]. 土壤学报, 1998, (1): 1—9.
SHAN Xiu-zhi, WEI You-qing, YAN Hui-jun, et al. Influence of organic matter content on soil hydrodynamic parameters[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, (1): 1—9.
- [5] 王秀红. 我国水平地带性土壤中有机质的空间变化特征[J]. 地理科学, 2001, 21(1): 19—23.
WANG Xiu-hong. Spatial variation of organic matter in horizontal zonal soils in china[J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(1): 19—23.
- [6] 荀勇. 有机质含量对水泥土强度的影响与对策[J]. 四川建筑科学研究, 2000, 26(3): 58—60.
XUN Yong. The anti-influences and in influences of

- containing organic matter on cement soil strength[J]. **Building Science Research of Sichuan**, 2000, 26(3): 58—60.
- [7] 陈慧娥, 王清. 有机质对水泥加固软土效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 544—549.
CHEN Hui-e, WANG Qing. Influences of organic matter on the effects of consolidating soft soil with cement[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp. 2): 544—549.
- [8] 陈慧娥, 王清. 水泥加固不同地区软土的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 423—426.
CHEN Hui-e, WANG Qing. Laboratory study of consolidation effect different area soft soils stabilized with cement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(2): 423—426.
- [9] 陈慧娥, 王清, 许晓慧. 不同有机质含量水泥加固土微观结构分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2009, 28(6): 945—948.
CHEN Hui-e, WANG Qing, XU Xiao-hui. Analysis on microstructure of cement stabilized soil with different organic content[J]. **Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)**, 2009, 28(6): 945—948.
- [10] 储诚富, 邵俐, 刘松玉, 等. 有机质含量对水泥土强度影响的室内定量研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1613—1616.
CHU Cheng-fu, SHAO Li, LIU Song-yu, et al. Laboratory study quantitatively on effect of organic content on strength of cement-mixed clays[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(9): 1613—1616.
- [11] 牟春梅, 李佰锋. 有机质含量对软土力学性质影响效应分析[J]. 水文地质工程地质, 2008, (3): 42—46.
MU Chun-mei, LI Bai-feng. Influence of organic matter on mechanical of soft soil[J]. **Hydrogeology and Engineering Geology**, 2008, (3): 42—46.
- [12] HERENCIA J F, GARCIA-GALAVIS P A, MAQUEDA C. Long-term effect of organic and mineral fertilization on soil physical properties under greenhouse and outdoor management practices[J]. **Pedosphere**, 2011, (4): 33—43.
- [13] VIRTO I, GARTZIA-BENGOETXEA N, FERNANDEZ-UGALDE O. Role of organic matter and carbonates in soil aggregation estimated using laser diffractometry[J]. **Pedosphere**, 2011, (5): 20—26.
- [14] NICOLS C, MASCIANDARO G, HERNANDEZ T, et al. Chemical-structural changes of organic matter in a semi-arid soil after organic amendment[J]. **Pedosphere**, 2012, (3): 13—23.
- [15] 王晶. 海相软土地区水泥土搅拌桩复合地基沉降特性研究[M]. 南京: 东南大学, 2007.
- [16] 赵华, 仵磊, 梁兵. 吉林敦化地区草炭土的工程性质[J]. 岩土工程技术, 2004, (6): 43—46.
ZHAO Hua, NAI Lei, LIANG Bing. Geotechnical character of turf soil in dunhua area, Jilin province[J]. **Geotechnical Engineering Technique**, 2004, (6): 43—46.
- [17] 徐燕. 季冻区草炭土工程地质特性及变形沉降研究[M]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [18] 张先伟, 王常明. 软土结构性对次固结系数的影响[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 476—482.
ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming. Effect of soft clay structure on secondary consolidation coefficient[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(2): 476—482.
- [19] 利什特方 И И, 科罗利 Н Т. 泥炭的基本性质及其测定方法[M]. 戴国良, 译. 北京: 科学出版社, 1989.

上接第 3452 页

- GONG Jian, CHEN Ren-peng, CHEN Yun-min, et al. Prototype testing study on micropiles under lateral loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(20): 3541—3546.
- [8] 蒋楚生, 周德培. 微型桩抗滑复合结构设计理论探讨[J]. 铁道工程学报, 2009, (2): 39—43.
JIANG Chu-sheng, ZHOU De-pei. Exploration on the design theory for anti-sliding composite structure of micro-piles[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2009, (2): 39—43.
- [9] 肖世国, 鲜飞, 王唤龙. 一种微型桩组合抗滑结构内力分析方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2553—2564.
XIAO Shi-guo, XIAN Fei, WANG Huan-long. Analytical method of internal forces of a combining micropiles structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2553—2564.
- [10] 冯君, 周德培, 江南, 等. 微型桩体系加固顺层岩质边坡的内力计算模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 284—288.
FENG Jun, ZHOU De-pei, JIANG Nan, et al. A model for calculation of internal force of micropile system to reinforce bedding rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(2): 284—288.
- [11] 刘小丽, 李白. 微型钢管桩用于岩石基坑支护的作用机制分析[J]. 岩土力学, 2012, 33 (增刊 1): 217—222.
LIU Xiao-li, LI Bai. Analysis of supporting mechanism of micro-steel-pipe piles in rock foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(Supp.1): 217—222.
- [12] 周景星, 王洪瑾, 虞石民, 等. 基础工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.