

文章编号: 1000-7598(2009)02-0305-06

含盐量对石灰固化滨海盐渍土微结构参数的影响

柴寿喜^{1,2}, 王晓燕³, 王沛^{1,2}, 魏丽², 仲晓梅^{1,2}, 李芳²

(1. 天津城市建设学院 土木工程系, 天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;

3. 中水北方勘测设计研究有限责任公司 勘察院, 天津 300222;

摘要: 因土中含有较多的氯盐, 引起了石灰固化滨海盐渍土的微结构变化。采用 Leica QWin5000 图形处理软件对石灰固化滨海盐渍土的 SEM 照片进行统计, 证实随着含盐量的增加, 固化土颗粒的等效直径、扁圆度、面积比和充填比等微结构参数呈近线性变化。含盐量增加使得固化土颗粒的粒度分维值增加, 颗粒的均一化程度越来越差; 而颗粒定向分维则先升、后降、再逐渐趋于一个稳定值, 即固化土颗粒的排列方向保持不变。固化土颗粒级配测试结果也与上述变化规律相吻合。

关键词: 滨海盐渍土; 含盐量; 微结构; 分形维; 石灰固化土

中图分类号: TU 448; TP 317.4

文献标识码: A

Effect of salt content on microstructure indices of solidified inshore saline soil with lime

CHAI Shou-xi^{1,2}, WANG Xiao-yan³, WANG Pei^{1,2}, WEI Li², ZHONG Xiao-mei^{1,2}, LI Fang²

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Institute of Urban Construction, Tianjin 300384, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China;

3. Institute of Investigation, China Water Resources, Beifang Investigation, Design and Research Co. Ltd., Tianjin 300222, China)

Abstract: Solidifying inshore saline soil with lime, which causes the microstructure indices of saline soil change obviously because of a lot of chloride. With the help of Leica QWin5000 software it has been proved that microstructure indices, including particle diameter, particle oblate degree, and particle area ratio, increase or decrease at approximately linear relationship with the increase of salt content through analyzing SEM's photos. With the increase of salt content fractal dimension of particle granularity has been increased; and uniformity degree of particles diameter has been decreased; however fractal dimension of particle orientation rises firstly; secondly decreases, and finally is stable progressively; and orientation of particle is fixed in the some direction. And the conclusion is corresponding with the results of particle size analysis of solidified soil.

Key words: inshore saline soil; salt content; microstructure; fractal dimension; solidified saline soil with lime

1 引言

滨海盐渍土中含有较多的氯盐, 易吸湿软化, 导致强度下降, 工程上大多采用石灰固化滨海盐渍土^[1]。在固化过程中土与固化材料间发生了物理、物理化学作用和化学反应^[2]。石灰固化后, 土的微结构发生了变化, 力学强度得到提高, 微结构与强度间存在着一定的相关关系^[3]。土的微结构特征包

括固、液、气三相物质的大小、多少、形态及相互关系。其中, 固态颗粒的大小和形态是最为重要的参数, 它决定了土的颗粒连接和排列方式、孔隙大小和形态等微结构特征, 也决定着土中液相、气相物质的分布特征^[4]。固态颗粒的大小和形态、颗粒粒度分维和颗粒定向分维的变化表明土的物理力学性质也发生了相应变化^[5-7]。滨海氯盐渍土中的盐离子浓度影响着土颗粒的双电层结构, 固态盐颗粒

收稿日期: 2006-12-26

基金项目: 国家自然科学基金 (No.40772166); 天津市自然科学基金 (No.05YFSYSF00300, No.07JCYBJC12900); 天津市高等学校科技发展基金 (No.20051404); 建设部研究开发项目 (No.06-K1-5); 天津市建委科学技术发展计划 (No.2007-43)。

第一作者简介: 柴寿喜, 男, 1962年生, 博士, 教授, 从事岩土体改性加固方面的教学研究工作。E-mail: chaishouxi@eyou.com

又充当着土的骨架颗粒,参与土微结构的形态构成,所以含盐量将影响土的微结构特征参数。

用静压法制备不同含盐量的石灰固化滨海盐渍土样品,在标准养护箱中养护至规定龄期。采用液氮冷冻真空升华法干燥 SEM 试样,保持土的微结构不变^[8]。利用德国制造 LEO 场发射扫描电镜对不同养护龄期、不同含盐量的试样进行测试。统一选用放大 2 000 倍的照片,使用 Leica QWin5000 图形处理软件对照片进行测试,计算相关的微结构参数值,研究含盐量对石灰固化滨海盐渍土微结构参数值的影响规律。

2 试验用石灰和土

试验用的生石灰粉 CaO+MgO 含量为 70%,过

1 mm 筛后使用。

盐渍土中的矿物依次为:石英、长石、云母;黏土矿物依次为:蒙脱石、伊利石、少量高岭石。试验用的原始盐渍土易溶盐含量为 2.64%,首先用自来水对其洗盐 6 次,再用蒸馏水洗盐 3 次,此时土的电导率测试结果为 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$,成为素土^[9]。将土烘干、碾碎、过 1 mm 筛后备用。现场取样测试结果证实,研究区内滨海盐渍土的含盐量多为 2%~3%,一般不超过 5%。因此以 0、0.3%、1%、3%、5%、8% 的含盐量,在室内人工配制所需的各种含盐量的盐渍土,按最优含水率所需的水量拌入土中,放入塑料袋中静置 24 h,再将 12% 的石灰粉掺入素土中,按 1.70 g/cm^3 的干密度制备测试样品。洗盐后素土的部分物理性质指标见表 1。

表 1 洗盐后素土的部分物理性质指标
Table 1 Basic physical parameters of saline soil after desalting

比重	稠度指标			重型击实试验		粒度组成 /%	
	液限 ω_L /%	塑限 ω_p /%	塑性指数 I_p	最大干密度 ρ_{dmax} /(g/cm^3)	最优含水率 w_{opt} /%	0.074~0.005 mm	<0.005 mm
2.70	34.4	20.5	13.9	1.84	15.2	88.61	11.39

3 土微结构参数的选取与测试

3.1 土微结构参数的选取与计算

土的 SEM 图像中只有颗粒和孔隙两类影像,当颗粒的参数确定后,孔隙的参数也就相应地被确定了。盐分以颗粒的形式存在,盐颗粒充当着土的骨架颗粒,也影响着土的微结构形式。因此,选用颗粒形态参数来表征土的微结构特征。

3.1.1 颗粒形态特征

(1) 面积比 (area ratio): 颗粒面积占总图像面积的百分比,也称平面颗粒率。可以从面积上说明颗粒的多少。

(2) 扁圆度 (particle oblate degree): 颗粒的短轴和长轴之比,值小于 1。其值越小,说明颗粒越趋于长条形;反之,愈接近于球形。

(3) 充填比 (full ratio): 实测颗粒面积与其外接圆面积比的平方根。其值越大,说明颗粒越趋于圆形。

(4) 等效直径 (equivalent diameter): 与颗粒面积相等的等效圆直径,可近似地说明单个颗粒的大小。

以上 4 个颗粒形态参数可从 SEM 图像中直接测量并计算得出。

3.1.2 颗粒分维指标与计算方法

选择颗粒粒度分维值和颗粒定向分维值评价土

的微结构特征。

(1) 颗粒粒度分维

通常情况下,土的颗粒级配状况是以小于某一粒径 r 的颗粒累计数 $N(\leq r)$ 的变化规律来表现的,即以 $r-N(\leq r)$ 曲线的形态特征加以表征。在颗粒级配曲线上两者具有较好的幂函数关系^[10],即

$$N(\leq r) \propto r^{-D} \quad (1)$$

$$N(\geq r) = M - N(\leq r) \quad (2)$$

式中: M 为颗粒总数,为常量; $N(\geq r)$ 为大于某粒径的颗粒数。

由式 (1) 可知,对土的 SEM 图像而言, M 一定,那么 $N(\leq r)$ 与 $N(\geq r)$ 具有固定的对应关系,因此下列关系亦成立:

$$N(r) \propto r^{-D} \quad (3)$$

D 与容量维的定义在形式上完全一致,因而将其确定为颗粒粒度分维 D_{ps} 。 D_{ps} 越大,反映土中颗粒均一化程度越差。颗粒粒度分维在含义上与土的不均匀系数相当。

谢和平^[11-12]系统研究了图形的分维及相关的计算方法,提出了一种基于对 SEM 图像像素的矩阵分析,采用盒维数计算分维数的方法。采用这种方法计算颗粒分维,事先对 SEM 图像进行二值化

处理, 在分形图形上设置方形网格, 即方阵, 逐步扩大方阵的边长 l , 依次统计不同方阵中的像元素 N 。随着 l 增大到接近图形的最大尺寸, N 值将趋于饱和。作 $\ln N \sim \ln l$ 曲线, 由图中直线部分的斜率确定分维 D 。具体计算时, 在双对数坐标系中以粒径为横坐标, 大于该粒径的颗粒数为纵坐标, 作散点图, 并进行直线回归分析, 所得直线斜率即为粒度分维值 D_{ps} 。

(2) 颗粒定向分维

在 SEM 图像中, 以颗粒长弦的方位确定颗粒的定向性, 以方位角 α 表示。不同的颗粒有各自不同的方位角, 为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 中的任意值。颗粒定向方位分维值可用来评价颗粒的定向程度。

颗粒的方位角为 α , 其值域为 $[0, 180]$ 。按某一个等分量将方位角等分成 n 份, 确定一个颗粒定向于某一区间 $[i, i+1]$ 的概率为 $P_i(\alpha)$ 。相应地, 各区间的对应概率系列为 $P_1(\alpha), P_2(\alpha), P_3(\alpha), \dots$,

$P_n(\alpha)$ 。如果改变方位角等分量, 又可得到另一组对应的概率值。按式 (4) 计算颗粒定向分维值 D_{di} :

$$D_{di} = -\lim_{\ln \alpha} \frac{\sum P_i(\alpha) \ln(1/P_i(\alpha))}{\ln \alpha} \quad (4)$$

式 (4) 是基于信息维意义的分维算法。在坐标系中绘制散点图, 进行直线回归分析, 直线斜率即为颗粒定向分维值 D_{di} 。颗粒定向分维值越大, 表明土颗粒的定向性越差, 颗粒排列越杂乱。

3.2 固化土的颗粒级配与微结构参数测试

3.2.1 固化土颗粒级配测试

将不同养护龄期、不同含盐量的石灰固化滨海盐渍土试样碾碎、过 $74 \mu\text{m}$ 筛备用。用美国 Micromeritics 公司的 SediGraph 5100 型 X 射线自动粒度分析仪进行颗粒级配测试。重点研究 $10 \mu\text{m}$ 以下各粒组含量的变化规律。用六偏磷酸钠作为试样的分散剂, 试验前用超声波振荡悬液 20 min。固化土颗粒级配测试结果见表 2。

表 2 石灰固化滨海盐渍土的颗粒级配测试结果
Table 2 Particle size distribution of inshore saline soil solidified with lime

含盐量 /%	各粒组的颗粒含量 /%									
	$x \geq 10 \mu\text{m}$		$5 \mu\text{m} \leq x < 10 \mu\text{m}$		$2 \mu\text{m} \leq x < 5 \mu\text{m}$		$1 \mu\text{m} \leq x < 2 \mu\text{m}$		$x < 1 \mu\text{m}$	
	1 周	6 周	1 周	6 周	1 周	6 周	1 周	6 周	1 周	6 周
0.0	0	0	2	3	5	5	12	16	81	76
0.3	0	2	5	5	8	6	13	18	74	69
1.0	0	5	8	9	10	11	12	15	70	60
3.0	5	9	12	10	12	10	15	15	56	56
5.0	12	16	15	16	11	14	16	13	46	41
8.0	19	22	17	20	15	15	14	15	35	28

由表 2 得知, 随着含盐量的增加, $2 \mu\text{m}$ 以上的颗粒含量逐渐增加, $1 \mu\text{m}$ 以下的颗粒含量逐渐减少, $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 的颗粒几乎没有变化。大颗粒增加的原因主要是 $1 \mu\text{m}$ 以下的颗粒, 其比表面积相对较大, 具有较强的活性, 易于优先与石灰反应, 形成粗大颗粒。另外, 土中的盐颗粒进入水溶液中, 盐溶液使细小颗粒产生絮凝作用, 导致颗粒变粗。

含盐量相同时, 随着养护龄期的增加, $10 \mu\text{m}$ 以上粒组的颗粒含量增多。此时大颗粒增多的原因

主要是石灰与土经过较长时间的反应, 形成了较多的硅铝酸钙晶体, 使颗粒间连接力进一步增强, 粗颗粒增加更多。

3.2.2 固化土微结构参数的测试

统一选用石灰固化滨海盐渍土 2 000 倍的 SEM 照片, 用 Leica QWin5000 图形处理软件进行颗粒大小与形态等微结构参数的测试计算。固化土微结构参数计算结果见表 3, 不同养护龄期固化土微结构参数随含盐量的变化曲线见图 1~4。

表 3 石灰固化滨海盐渍土的微结构参数测试结果
Table 3 Microstructure indices of inshore saline soil solidified with lime

含盐量 /%	面积比		扁圆度		充填比		等效直径 / μm	
	1 周	6 周	1 周	6 周	1 周	6 周	1 周	6 周
0.0	0.7 449	0.7 023	0.461	0.453	0.986	0.971	0.891	0.911
0.3	0.7 703	0.7 049	0.454	0.451	0.975	0.964	0.907	0.959
1.0	0.7 710	0.7 072	0.453	0.448	0.971	0.951	1.308	1.618
3.0	0.7 755	0.7 471	0.447	0.443	0.963	0.948	1.509	1.784
5.0	0.7 867	0.7 475	0.443	0.440	0.961	0.946	2.211	2.551
8.0	0.8 146	0.7 788	0.432	0.430	0.949	0.945	2.526	2.631

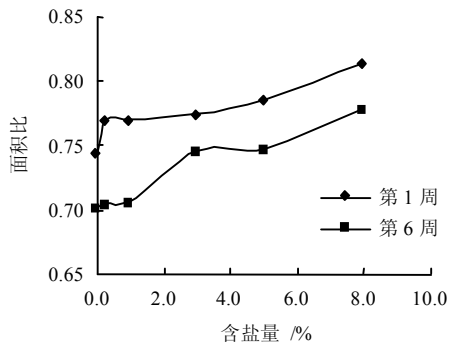


图1 面积比随含盐量变化曲线

Fig.1 Particle area ratio vs. salt content

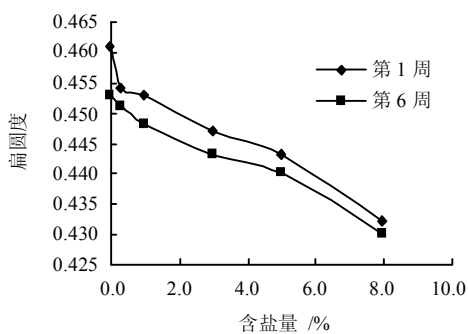


图2 扁圆度随含盐量变化曲线

Fig.2 Particle oblate degree vs. salt content

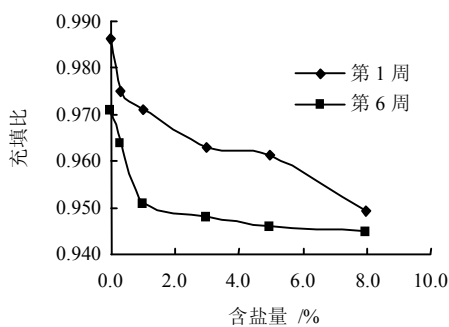


图3 充填比随含盐量变化曲线

Fig.3 Full ratio vs. salt content

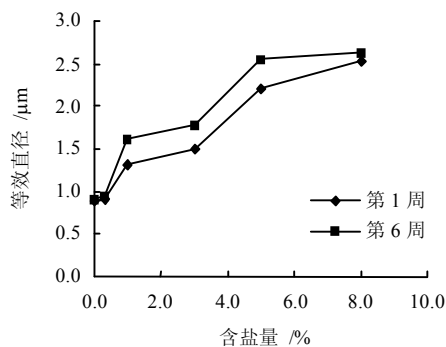


图4 等效直径随含盐量的变化曲线

Fig.4 Equivalent diameter vs. salt content

由表3和图1~4得出以下认识:

(1) 面积比与含盐量呈近似线性关系。面积比随含盐量的增加而增加。表明随着含盐量的增加,颗粒(包括盐颗粒)增多、孔隙则变少。养护6周时,由于石灰与土持续发生化学反应导致土颗粒间的连接强度进一步增强,形成的粗大颗粒较多,粗颗粒间的孔隙也随之增大。所以,含盐量相同时,6周养护龄期的面积比低于1周养护龄期的面积比。

(2) 扁圆度与含盐量呈近似线性关系。扁圆度随含盐量的增加而逐渐减小,表明颗粒越来越趋向于长条形。在含盐量相同的情况下,6周养护龄期土颗粒的扁圆度比1周养护龄期的扁圆度要小,说明养护龄期越长,石灰固化形成的颗粒越趋于长条形,而不是呈球形。石灰固化以蒙脱石为主的滨海盐渍土,石灰使得长条形的黏土矿物相互搭接成更长的长条形颗粒,而非有序的上下叠置、最终成为近似圆形的颗粒。

(3) 在1%含盐量以内,充填比随含盐量的增加而急剧下降;含盐量超过1%以后,充填比随着含盐量的增加则缓慢降低,但总的变化规律与扁圆度一致,说明随着含盐量的增加,颗粒越来越趋向于长条形。养护龄期越长,充填比越小,长条形的颗粒也就越多,形成原因同扁圆度一致。

(4) 等效直径随含盐量的增加而增加,表明大颗粒逐渐增多。含盐量相同时,6周养护龄期土的等效直径大于1周养护龄期土的等效直径。这与石灰能逐渐增强土颗粒间连接力的固土作用规律相一致,也与固化土的颗粒级配测试结果相吻合。1周和6周养护龄期固化土的等效直径随含盐量的变化规律基本一致,且两者间的差值较小,表明养护6周的固化土并未形成过多的粗大颗粒,表2中1周和6周固化土粗颗粒的粒组颗粒含量的差值也较小,同样能证实这一点。

4 含盐量对固化土颗粒粒度分维与定向分维的影响

4.1 颗粒粒度分维

含盐量对石灰固化滨海盐渍土的颗粒粒径有明显影响,对粒度分维同样也会产生影响。图5为石灰固化不同养护龄期、不同含盐量滨海盐渍土的粒度分维值和变化曲线。

随着含盐量的增加, 粒度分维值越来越大, 相当于土的不均匀系数在增大。含盐量为 0 时, 土的粒组分布主要集中在小于 $2\ \mu\text{m}$ 的区段, 随着含盐量的增加, 粗颗粒的粒组含量逐渐增多, 使得固化土的均一化程度越来越差。含盐量相同时, 养护龄期越长, 石灰的固土作用越强烈, 形成的大颗粒越多, 粒度分维值也就越大, 颗粒越来越不均一。这个结果与表 2 的测试结果相吻合。

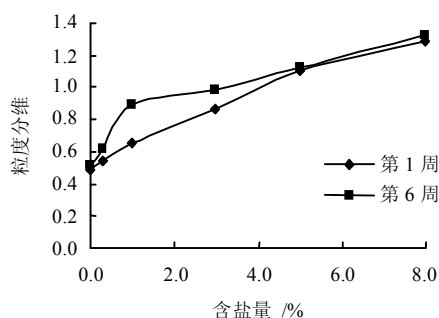


图 5 颗粒粒度分维随含盐量变化曲线

Fig.5 Fractal dimension of particle granularity vs. salt content

4.2 颗粒定向分维

盐分的存在影响着土颗粒的双电层结构, 也影响着土颗粒间的固化联结作用和颗粒的排列形式。图 6 为石灰固化不同养护龄期、不同含盐量滨海盐渍土的颗粒定向分维值的变化曲线。

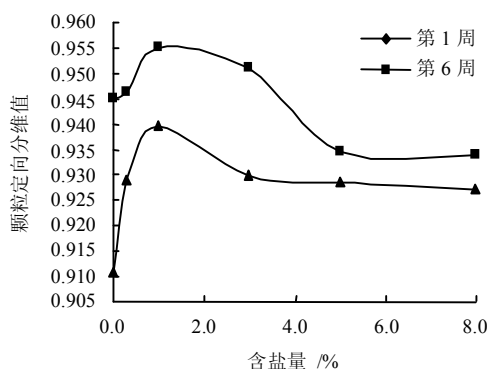


图 6 颗粒定向分维值随含盐量变化曲线

Fig.6 Fractal dimension of particle orientation vs. salt content

含盐量小于 1 %, 随着含盐量的增加, 颗粒定向分维值逐渐增大, 颗粒的定向性较差, 分布杂乱; 含盐量大于 1 % 以后, 随着含盐量的增加, 颗粒定向分维值逐渐减小, 颗粒的定向性越来越好; 含盐量超过 5 % 以后, 定向分维值趋于稳定。含盐量相

同时, 养护龄期越长, 颗粒定向分维值越大, 定向性较差, 颗粒排列越杂乱。

5 结 论

(1) 颗粒是土微结构的基本组成单元, 颗粒的大小和形态决定了土的微结构形式。颗粒粒度分维、颗粒定向分维、面积比、扁圆度、充填比和等效直径成为适宜表征土微结构的特征参数。

(2) 随含盐量增加, 固化土的面积比、扁圆度、充填比和等效直径呈近线性变化。微结构参数变化规律同固化土颗粒级配测试结果相吻合。

(3) 随含盐量的增加, 粒度分维值逐渐增大, 相当于土的不均匀系数增大, 固化土的均一化程度越来越差。随含盐量的增加, 颗粒定向分维值表现出先升、后降、再趋于稳定的变化规律。随养护龄期的增加, 固化土颗粒的定向性越来越差, 排列较为杂乱、颗粒间相互嵌固咬合, 使得固化土的强度增高, 反映了石灰的固土作用在逐步增强。

参 考 文 献

- [1] 刘付华, 郭英, 曹权, 等. 滨海盐渍土改良与利用新途径试验研究[J]. 天津城市建设学院学报, 2005, 11(4): 254—257.
LIU Fu-hua, GUO Ying, CAO Quan, et al. Experimental research on new method of improving and using inshore saline soil[J]. *Journal of Tianjin Institute of Urban Construction*, 2005, 11(4): 254—257.
- [2] 汤连生. 水-土化学作用的力学效应及机理分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2000, 39(4): 104—109.
TANG Lian-sheng. Mechanical effect of chemical action of water on soil and analysis on its mechanism[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2000, 39(4): 104—109.
- [3] 周翠英, 林春秀, 刘祚秋, 等. 基于微观结构的软土地基加固效果评价[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(5): 20—23.
ZHOU Cui-ying, LIN Chun-xiu, LIU Zuo-qiu, et al. Effect evaluation of the reinforcement of soft ground based on microstructure[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2004, 43(5): 20—23.
- [4] 徐永福, 田美存. 土的分形微结构[J]. 水利水电科技进展, 1996, 16(1): 25—29.

- XU Yong-fu, TIAN Mei-cun. Fractal and microstructure of soil[J]. **Technical Development of Water Engineering and Hydropower**, 1996, 16(1): 25—29.
- [5] 王俊超, 贾永刚, 史文军, 等. 差异水动力导致黄河口粉质土微结构分形特征变化实例研究[J]. **海洋科学进展**, 2004, 22(2): 177—183.
- WANG Jun-chao, JIA Yong-gang, SHI Wen-jun, et al. Case study on the fractal characteristics variations of silty soil microstructure due to differential hydrodynamics in the Yellow River Estuarine Area[J]. **Advances in Marine Science**, 2004, 22(2): 177—183.
- [6] 杨书燕, 刘春原. 高液限黏土微结构分析与强度机理的研究[J]. **河北工业大学学报**, 2002, 31(5): 116—118.
- YANG Shu-yan, LIU Chun-yuan. Microstructural analysis and strength study about highly plastic clay[J]. **Journal of Hebei University of Technology**, 2002, 31(5): 116—118.
- [7] 周宏伟, 于广明. 土体物理参数与空间构形的分形研究[J]. **阜新矿业学院学报(自然科学版)**, 1997, 16(6): 645—648.
- ZHOU Hong-wei, YU Guang-ming. Fractal studies on the physical parameters and spatial variability of soil mass[J]. **Journal of Fuxin Mining Institute (Natural Science)**, 1997, 16(6): 645—648.
- [8] 柴寿喜, 韩文峰, 王沛, 等. 用冻干法制备微结构测试用土样的试验研究[J]. **煤田地质与勘探**, 2005, 33(2): 46—48.
- CHAI Shou-xi, HAN Wen-feng, WANG Pei, et al. Experiment on artificially-prepared clay samples by freeze-drying for SEM [J]. **Coal Geology & Exploration**, 2005, 33(2): 46—48.
- [9] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [10] 刘松玉, 方磊. 试论黏性土粒度分布的分形结构[J]. **工程勘察**, 1992, (2): 1—4.
- LIU Song-yu, FANG Lei. Discussion on fractal of grain size curve of clay[J]. **Engineering Investigation**, 1992, (2): 1—4.
- [11] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 15—28.
- [12] 彭瑞东, 谢和平, 鞠杨. 二维数字图像分形维数的计算方法[J]. **中国矿业大学学报**, 2004, 33(1): 19—24.
- PENG Rui-dong, XIE He-ping, JU Yang. Computation method of fractal dimension for 2-D digital image[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2004, 33(1): 19—24.

《岩土力学》恭祝作者、审稿专家、读者新春快乐

在过去的一年里,《岩土力学》在作者、审稿专家以及读者的大力支持下,顺利地完成了全年的出刊计划。2008 年收到作者投稿 1547 篇,发表正刊论文 638 篇, 3470 页;发表增刊论文 140 篇, 686 页。根据中国科学技术信息中心引证报告,《岩土力学》2007 年的被引频次和影响因子分别为 2060 和 0.645,分别位居力学学科排名的第 1 名和第 2 名。

在此,编辑部同仁要感谢作者,感谢你们为《岩土力学》输送了大量的优质稿件;我们还要感谢审稿专家,感谢你们百忙之中抽出时间为编辑部审稿,为《岩土力学》严把质量关;我们同样要感谢读者,你们的支持是《岩土力学》前进的动力。

新春之际,请接受《岩土力学》编辑部全体同志的祝福,祝愿作者学习、工作蒸蒸日上!祝愿审稿专家事业腾飞、身体健康!祝愿读者心想事成、万事如意!

愿我们共同努力,为岩土力学与工程的发展贡献自己的力量!

《岩土力学》编辑部

2009 年 1 月