

文章编号: 1006-544X (2006) 01-0050-04

海相软土孔隙分布的分形特征及应用

吕海波^{1,3}, 赵艳林^{1,2}, 孔令伟³, 汪 稔³

(1. 广西大学土木建筑工程学院 防灾减灾研究所, 南宁 530004 2. 桂林工学院 广西 桂林 541004
3. 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: 利用压汞试验对琼州海峡浅海区软土的孔隙尺寸分布分形特征进行分析, 发现原状土具有 2 个分形的无标度区, 根据这一特点确定了团粒内孔隙和团粒间孔隙之间的分界尺寸为 0.2 μm. 通过对固结过程孔隙分布的变化规律的研究, 发现土体结构性的损伤与一定的团粒间孔径尺寸相联系, 通过分形理论可以确定每级压力下的影响孔隙尺寸, 得出琼州海峡软土宏观结构强度丧失时对应的孔径特征值为 4 μm.

关键词: 海相软土; 孔隙; 压汞试验; 分维

中图分类号: TU411.92

文献标识码: A

土是一种多孔疏松的地质材料, 其宏观力学性质与土颗粒或集合体的大小、形状、表面特征、排列形式和粒间联结等微结构要素密切相关. 在土微观结构研究中, 孔隙的空间分布是一个很重要的因素, 它直接决定着渗透性, 对变形性能也具有重要影响, 但囿于孔隙分布形态的复杂性, 使得早期的研究只能集中于定性解释各种土体工程性质差异.

自 1970 年 Diamond 利用压汞仪研究击实土的孔隙大小分布以来, 压汞法在孔隙分布特征研究中得到了重视, 为使压汞试验成果更好地应用于土性的研究, 人们利用各种方法对孔隙尺寸分布曲线特征进行分析, 其中最为成功的是分形几何理论. 刘长礼^[1]研究了软土堆载预压过程孔隙分维与时间的关系; 刘松玉^[2]、胡瑞林^[3]、孔令伟^[4]、王清^[5]等利用分形几何研究了黄土类土、红粘土、软土的孔隙分布特征; Vallejo^[6]利用分形研究了土固结过程中孔隙粗糙度的变化; 徐永福^[7]根据孔隙分布的分形模型, 提出了水分特征曲线的通用表达式. 这些研究表明: 不同成因的土类孔隙分形特征各异, 孔隙分形特征与土的物

理力学性质有着内在联系.

本文利用压汞试验对一种结构性海相粘土的孔隙尺寸分布进行测定, 在分析孔隙尺寸分布的分形特征基础上, 探讨分形理论在土结构性损伤研究中的作用.

1 孔隙分形特征的数学描述

对于土中孔隙, 当直径大于 R 的孔隙数目为 $N(\geq R)$, 若

$$N(\geq R) = \int_R^{\infty} P(R) dR \propto R^{-D}, \quad (1)$$

则 D 就是容量维; 式中 $P(R)$ 为直径 R 的分布密度函数.

设 $V(R)$ 为直径小于 R 的孔隙体积之和, V 为土样孔隙的总体积, 若 $V(R) \propto R^b$, 则

$$dV(R) \propto R^{b-1}. \quad (2)$$

对式 (1) 求导得

$$dN(R) \propto R^{-D-1}. \quad (3)$$

又 $V(R) = (1/6)\pi R^3 N(R)$, 因此

$$dV(R) = (1/6)\pi R^3 dN(R) \propto R^3 R^{-D-1}. \quad (4)$$

比较式 (4) 和式 (2), 有

收稿日期: 2005-04-26

基金项目: 广西自然科学基金资助项目 (桂科自 0339015 桂科自 0249011); 广西大学博士科研启动基金资助项目

作者简介: 吕海波 (1973-), 男, 博士, 副教授, 岩土工程专业.

$$D = 3 - b \quad (5)$$

因此将 $V(R)$ $N - R$ 关系绘在双对数坐标系中, 若满足线性关系, 其斜率即为 b 利用式 (5) 即求得孔隙分布的分维值.

2 试验过程及结果分析

2.1 试验过程

试验土样来自琼州海峡铁路轮渡北港浅海区, 其主要物理力学指标见表 1.

表 1 软土的物理力学性质

Table 1 Physical properties of soft soils

项 目	指标
埋 深 h /m	5.0 ~ 5.5
天然含水率 w /%	65.0 ~ 70.0
天然重度 γ / (kN · m ⁻³)	16.0 ~ 16.5
液 限 w_L /%	65.0
塑 限 w_p /%	22.5
结构屈服应力 σ_v /kPa	100.0 ~ 125.0
无侧限抗压强度 S_u /kPa	53.4
灵敏度 S_i	14.0

试验过程如下: 土样首先进行一维固结试验, 待土样在预定压力下达到稳定时卸荷, 然后用透水石将土样从环刀里小心推出, 用细钢丝锯将土样切成体积为 1.0 cm³ 的小方块. 利用低温的制冷剂 (如液氮) 快速将土中水分冷冻, 使孔隙中的水分直接变成不具膨胀性的晶体, 抽真空使其由结晶状态直接升华, 从而保证土中孔隙不因脱水发生收缩. 最后利用压汞仪 (测量范围 300 ~ 0.06 μ m) 进行孔隙尺寸分布测试.

2.2 结果分析

试验所得的压缩曲线、原状土、压缩后土的孔隙尺寸分布曲线见图 1~图 3 根据分形理论整理后的部分 $\log(V(R)/N) - \log R$ 曲线见图 4

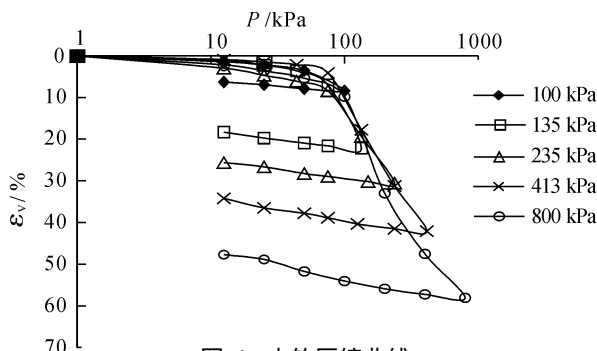


图 1 土的压缩曲线

Fig. 1. Compression curves of soils

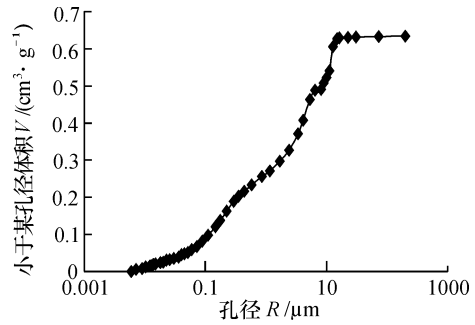


图 2 原状土的孔隙累积分布曲线

Fig. 2. Pore size distribution curves of intact soft soils

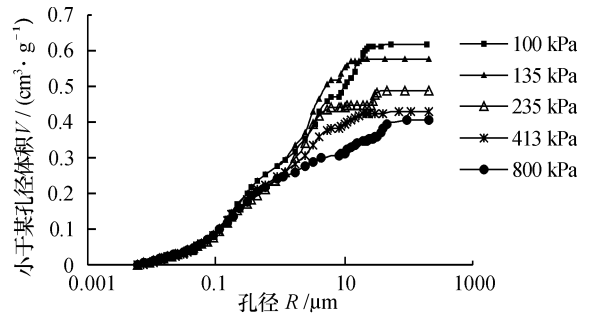


图 3 不同压力时孔隙累积分布曲线

Fig. 3. Pore size distribution curves at different pressure

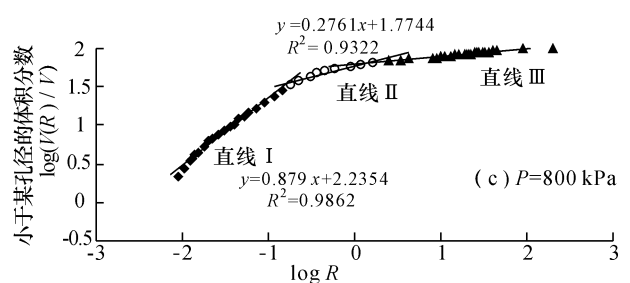
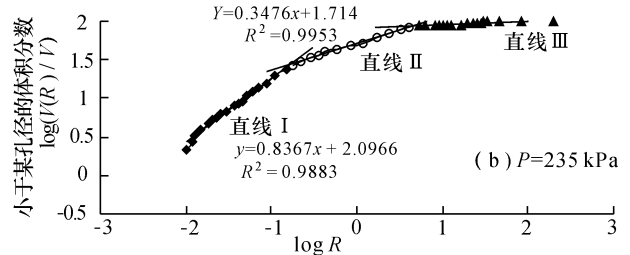
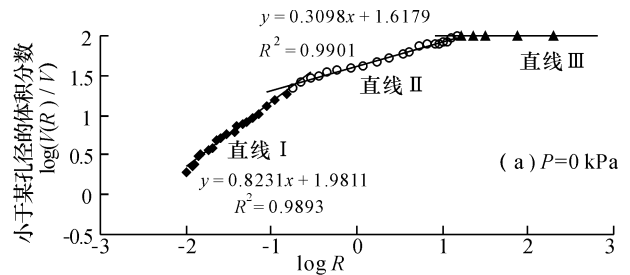


图 4 土的 $\log(V(R)/N) - \log R$ 曲线

Fig. 4. $\log(V(R)/N) - \log R$ curves of soft soils

由原状土的分形曲线可以发现, 具有 3 段直线: I、II 和 III。根据分析, 直线段 III 由于土样卸荷 (取样卸荷) 产生^[8], 因此原始孔隙分布具有 2 个无标度区: I 和 II, 在无标度区内孔隙的大小分布具有自相似性, 不同标度区的孔隙具有不同的性质。

在粘性土的微观组构研究中, 常把土中由粘土颗粒与粘土颗粒、粘土颗粒与碎屑颗粒相互聚集连接而成的独立的结构单元称为微团粒, 它是天然软土的基本结构单元。微团粒的存在把土中孔隙分为两类: 团粒间孔隙和团粒内孔隙。团粒内孔隙较小, 并且由于团粒的连结强度高, 即使在重塑作用下这部分孔隙也难以发生破坏。根据前人的研究成果, 两无标度区的分界点, 即直线 I 和直线 II 的交点就是团粒内孔隙和团粒间孔隙的界限 R_0 。通过该方法确定的孔隙界限见表 2 可见琼州海峡软土团粒内 - 团粒间 R_0 在 $0.2 \mu\text{m}$ 左右, 这与通过二次注汞试验测试出来的界限值一致^[8]。而根据直线斜率所计算出来的孔隙分布的分维值见表 2 可见团粒间孔隙的分维在 $2.6 \sim 2.7$ 团粒内孔隙在 $2.1 \sim 2.2$ 两种孔隙分维值的差异源于沉积过程形成孔隙结构的不同, 但如何从机理上解释这一现象目前仍缺少研究, 因此土

体不同分形的地质成因将是今后的研究重点。

土在受荷后结构性丧失在微观上必然伴随孔隙的破损, 因此确定各级荷载所造成破损的孔隙尺寸具有重要的意义, 但由于试验手段的局限, 目前尚无法动态地测得加载过程的孔径分布曲线, 只能在其卸荷后才进行测试, 这就不可避免地产生卸荷孔隙, 卸荷产生的孔隙将丧失原有的级配特征, 朝均匀化发展, 当孔隙发生破损后分形特征必然发生变化, 在 $\log(V(R)/N) - \log R$ 图 (图 4) 上表现为直线段 II 的长度变短, 而近似水平的直线段 II 长度则变长, 直线段 II 和 III 交点对应的孔隙尺寸就是相应荷载的影响范围。通过这样确定的荷载影响尺寸 R_i 见表 2

将表 2 的 $P - R$ 关系绘于图 5 中, 结果发现两者的关系与结构性土的压缩曲线 ($e - p$ 曲线) 具有明显的相似性: 即在荷载超过结构屈服应力后, 曲线都经历一个结构性急剧破坏的陡降段 (从 135 kPa 到 235 kPa), 然后随荷载的增大逐渐变缓, 这表明宏观结构强度主要与孔径大于 $4 \mu\text{m}$ 的孔隙有关, 与结构屈服应力一样, $R = 4 \mu\text{m}$ 是微观结构变化的一个重要特征值, 如小于该值的孔隙被破坏, 则土的宏观结构强度基本丧失。

从表 2 中还可以发现, 利用受压后的孔径分

表 2 软土孔隙分维值及荷载影响尺寸

Table 2 Pore fractal dimension and load influence size of soft soils

荷载 P /kPa	直线方程		分维 D		团粒内 - 团粒间孔隙界限 R_0 / μm	荷载影响尺寸 R_i / μm
	直线 I	直线 II	团粒内	团粒间		
0	$y = 0.8231x + 1.9811$ $R^2 = 0.9893$	$y = 0.3096x + 1.6179$ $R^2 = 0.9901$	2.18	2.69	0.20	
100	$y = 0.8752x + 2.0583$ $R^2 = 0.9913$	$y = 0.2783x + 1.6492$ $R^2 = 0.981$	2.13	2.72	0.21	10.0
135	$y = 0.8646x + 2.0781$ $R^2 = 0.9969$	$y = 0.3259x + 1.6966$ $R^2 = 0.9898$	2.13	2.67	0.20	6.4
235	$y = 0.8367x + 2.0966$ $R^2 = 0.9833$	$y = 0.3476x + 1.714$ $R^2 = 0.9953$	2.16	2.65	0.17	4.0
413	$y = 0.8936x + 2.2098$ $R^2 = 0.9915$	$y = 0.2723x + 1.7623$ $R^2 = 0.9702$	2.11	2.73	0.19	3.3
800	$y = 0.879x + 2.2354$ $R^2 = 0.9862$	$y = 0.2761x + 1.7744$ $R^2 = 0.9322$	2.12	2.72	0.17	2.0

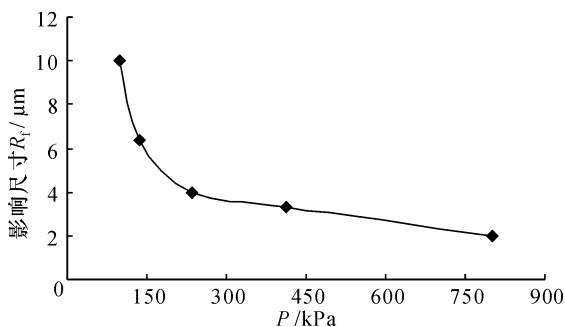


图 5 $P - R_i$ 曲线

Fig 5 $P - R_i$ curve

布曲线确定出来的团粒内 - 团粒间孔隙的界限 R_0 也在 $0.2 \mu\text{m}$ 左右, 可见试验压力并未影响到团粒内孔隙, 通过分形理论能较准确地确定 R_0 。

3 结 论

(1) 琼州海峡软土的孔隙大小分布具有多重分形特征, 团粒间孔隙的分维在 $2.6 \sim 2.7$ 团粒内孔隙在 $2.1 \sim 2.2$ 团粒内 - 团粒间孔隙的界限为 $0.2 \mu\text{m}$ 。

(2) 提出利用分形特征确定软土各级荷载影

响的孔隙尺寸范围的方法, 并通过试验结果验证了方法的可行性.

(3) 琼州海峡软土的 $P-R$ 曲线与 $e-p$ 曲线具有相似性, 表明微观孔隙变化也有特征值, 一旦小于该值的孔隙被破坏, 土的宏观结构强度基本丧失.

参考文献:

- [1] 刘长礼, 王秀艳. 预压下软土孔隙成分分维特征及其实用意义 [J]. 工程勘察 1993 (5): 6-11
- [2] 刘松玉, 张继文. 土中孔隙分布的分形特征研究 [J]. 东南大学学报 1997 27 (3): 127-130
- [3] 胡瑞林, 官国琳, 李向东, 等. 粘性土微观结构定量模型及其工程地质特征研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1995
- [4] 孔令伟, 罗鸿禧. 红粘土孔隙的分形特征研究 [A]. 西南交通大学. 全国第一届膨胀土会议文集 [C]. 成都: 西南交通大学出版社, 1988 276-279
- [5] 王涛, 王剑平. 土孔隙的分形几何研究 [J]. 岩土工程学报 2000 22 (4): 296-298
- [6] Vallejo L E. Fractal analysis of the fabric changes in a consolidation clay [J]. Engineering Geology 1996 43 (4): 281-290
- [7] 徐永福, 史春乐. 用土的分形结构确定土的水份特征曲线 [J]. 岩土力学 1997 18 (2): 40-43
- [8] 吕海波, 汪稔, 赵艳林, 等. 软土结构性破损的孔径分布试验研究 [J]. 岩土力学, 2003 24 (4): 573-578

Fractal feature of pore size distribution of a marine soft soil and its application

LU Hai bo^{1,3}, ZHAO Yan lin^{1,2}, KONG Ling wei³, WANG Ren³

(1. Research Institute of Preventing and Mitigating Disasters College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004 China; 2. Guilin University of Technology, Guilin 541004 China; 3. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics Institute of Rock and Soil Mechanics Chinese Academy of Sciences Wuhan 430071, China)

Abstract Mercury intrusion test is applied to measure pore size distribution of a marine soft soil sample from Qiongzhou Strait. Based on the test result two non-scale zones are found in the soft soil by fractal theory and the demarcation point between intra aggregate pore and extra aggregate pore is $0.2\mu\text{m}$. The change of pore size distribution of the soft soil during one dimension consolidation is found and indicates that the degree of structural damage is related to the crash of certain size extra aggregate pores. The pore size of influence under consolidation press can be determined by fractal theory, and the characteristic value of Qiongzhou Strait soft soil is $4\mu\text{m}$, when macro-strength is completely lost.

Key words marine soft soil; pore; mercury intrusion test; fractal dimension