

软土微结构特征的试验研究

王国欣¹, 黄宏伟¹, 肖树芳²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要: 土的结构对土的力学性质具有较大影响, 所以近年来, 土的结构研究已引起广泛的重视。其中微结构研究能有效地揭露土的受力变形本质, 对研究土的力学行为机制起着至关重要的作用。本文在对杭州海积软土进行的单向压缩试验、直剪试验及三轴固结不排水剪切试验的基础上, 测得软土在不同压力或变形条件下的微结构参数, 分析了其变化规律。研究表明, 在这3种不同试验方法下, 软土中结构单元体和孔隙的微结构参数对压力或变形的敏感度是不一样的。因此建议针对不同的试验方法, 采用不同的研究对象(结构单元体或孔隙)来进行软土微结构特征的描述, 这样能更好的从微结构角度反映土的宏观力学特性, 建立微结构参数与宏观力学参数间的关系。

关键词: 软土; 微结构; 结构单元体; 孔隙; 不同试验

中图分类号: TU411.92 **文献标识码:** A

土体具有非常复杂的非线性特征, 很难用传统的、基于线性分析之上的技术方法加以表达, 而土体宏观力学行为的复杂性、不确定性和模糊性正是土体结构复杂性的具体表现。一般来说, 土的结构性是指组成土结构的最基本要素即结构单元体(单粒、颗粒聚集体)和孔隙的大小、形状、排列以及它们之间的接触和联结关系的总称^[1]。大量事实表明, 土的工程性状在很大程度上受到其微观结构系统的控制^[2], 而现有的各种土体本构模型(弹性模型、刚塑性模型和弹塑性模型)实际上都是针对饱和扰动土和砂土发展起来的, 缺乏对土体结构特征及其演化规律的描述, 因而实际的工程计算结果难以模拟土体的实际状态, 往往会出现较大的计算误差^[3]。土力学的纵深发展关键在于土结构性问题的解决, 了解土体的内部结构变化对于研究土力学行为机制是至关重要的。从工程角度来讲, 土的微结构研究主要有两个目的: 一是定性地说明土体某些工程特性的渊源, 解释土体某些特殊的力学行为; 二是根据微结构研究资料的数学处理, 通过定量分析, 建立微结构状态参数与其对应的宏观力学参数之间的关系, 并进一步得到相应的微结构模型, 得到微结构与宏观特性之间的定量关系, 从而达到深入了解土体力学行为机制的目的^[4]。本文在对杭州海积软土进行单向压缩试验、直剪试验以及三轴固结不排水剪切试验的基础上, 分析软土在不同压力和变形条件下的微结构变化特征, 其中包括结构单元体和孔隙的微结构变化特征。从中可以发现在不同试验方法下, 结构单元体和孔隙的微结构参数对压力和变形的敏感度是不一样的, 这样就可以选择在不同试验方法下的研究对象, 从而获得更为理想的微结构参数, 更好地建立与宏观力学参数间的动态关系。

1 室内试验

1.1 土样基本物理力学性质 土样取自杭州市的某工地, 为减少对土样的扰动, 试验中所用土样采用薄壁取土器取土, 取土位置约为地下17.2m深处。此层土为全新世早期(Q₄)的海相淤泥质黏土, 在杭州地区俗称为第二软土层。此层土样的平均物理力学参数见表1^[5]。

收稿日期: 2003-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40172092); 国家博士后科学基金资助项目(2003034276)

作者简介: 王国欣(1976-), 男, 浙江武义人, 博士, 主要从事岩土工程建模和数值分析的研究。

表 1 杭州海积软土基本物理力学参数

含水量 w (%)	密度 ρ (g/cm^3)	比重 G_s	孔隙比 e_0	液限 w_L (%)	塑限 w_p (%)
42.1	1.72	2.72	1.207	37.5	20.8
液性指数 I_L	塑性指数 I_p	内聚力 C / kPa	内摩擦角 φ / (°)	压缩系数 a_{1-2} / (MPa^{-1})	压缩模量 E_s / MPa
1.28	16.7	12	11	0.70	2.0

注：*表示固结快剪试验

1.2 试验设备和试验方法 试验设备主要包括杠杆式高压固结仪，应变控制式直剪仪，南京土壤仪器厂制造的TS230-2.0型应变控制式三轴剪力仪，中科院科学仪器厂生产的KYKY-AMRAY 1000B型扫描电子显微镜，SBC-2型试样表面处理机，真空冷冻制样仪等。

在单向压缩试验中，采用6个平行样，土样面积 $32.2cm^2$ ，高2cm。分别在每级荷载下固结完成(固结时间为24h)，固结压力分别取为200kPa、250kPa、300kPa、350kPa、400kPa、800kPa。最小固结压力取值稍大于其结构屈服压力(185kPa)，这是因为考虑到在此条件下土样结构刚被破坏，其内部的结构单元体和孔隙将发生最为明显的变化。在固结完成后，将土样取出，切开并对其垂直剖面进行取样观测。

在直剪试验中，采用6个平行样，土样面积 $32.2cm^2$ ，高2cm，均在25kPa下固结完成。然后进行剪切试验，在试样达到剪切破坏位移(0.95mm)之前，即在剪位移分别达到0.20mm、0.40mm、0.50mm、0.65mm、0.80mm、0.95mm时，取出土样，切开并对其在剪切面附近的垂直面进行取样观测。

在三轴固结不排水剪切试验中，也采用6个平行样，试样尺寸为 $3.91cm \times 8cm$ ，试样均先在同一围压50kPa下固结完成，然后对平行样分别进行轴向变形为1mm、2mm、4mm、7mm、9mm、11mm(剪坏)的试验。最后取出土样，切开并对其在剪切面附近的垂直面进行取样观测。

对于取出的待观测土样，需要进行如下操作，才能获得较准确的微结构参数。(1)试样制备。将所要制备的土样小心地削成长条状，放入经液氮冷冻的异戊烷中，使土样均匀受冻，然后放入液氮中，使土样充分冷冻，这样做可使土样迅速且均匀受冻。试验表明，温度迅速达到-20以下时，土样中的水不会发生膨胀，这就可以使土样的天然结构基本不受扰动。(2)将受冻土样取出装入真空冷冻制样仪中的样品室，用酒精液氮混合物或干冰使样品室温度始终控制在-30 ~ -50 之间，在另一边用液氮作为冷井，使其产生温度差，并在真空中工作至少8h以上。这样试样就被制成了干燥样。(3)试样镀

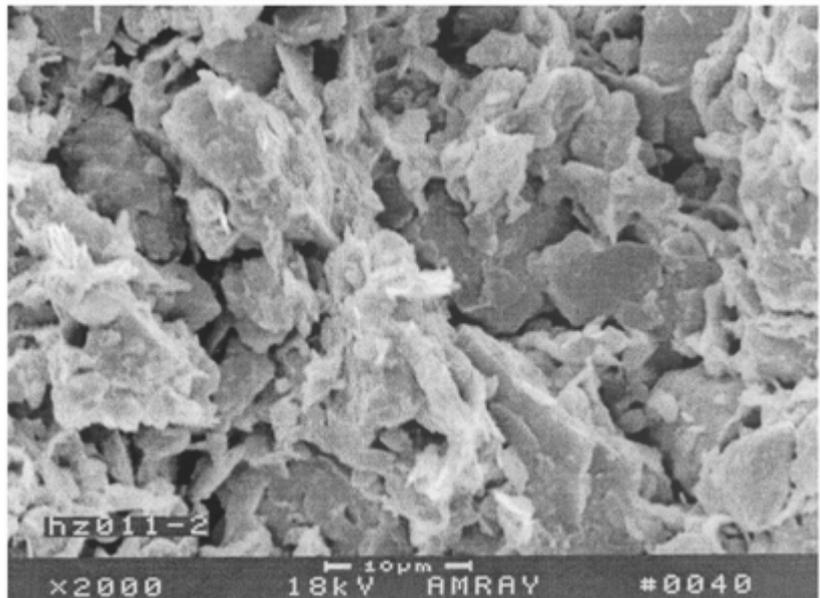


图1 单向压缩试验中200kPa下软土的SEM照片

膜。将试样放入真空溅射镀膜机中，在其表层充分镀膜(镀金或镀碳)，其目的是为了防止在拍摄过程中，由于样品受到电子束的轰击而产生放电现象。(4)将镀过膜的土样放入扫描电子显微镜的样品室中，拍摄

时先用高倍找到典型的结构单元体或孔隙,再逐步降低放大倍数,以保证图像的清晰度。为了便于定量分析,对试样采用统一的放大倍数(2000倍),以得到同样条件下的统计微结构参数。拍摄的SEM照片如图1所示。(5)最后用武汉大学分析测试中心开发的WD-5电镜图像处理分析系统对拍摄的图像进行数字图像处理,获得相关结构单元体和孔隙的计算统计后的微结构参数。

从图1可以看出,图中的黑色部分表示的是各结构单元体之间的孔隙,而灰白部分表示的是结构单元体,它包括单粒或颗粒聚合体。以上孔隙和结构单元体可由WD-5电镜图像处理分析系统进行自动划分。

2 微结构定量参数的选定及其确定方法

为了进一步研究软土在力的作用下的变形机理,建立宏观力学参数与微观指标之间的动态关系,必须研究软土在变形过程中微结构的变化情况。对不同变形下软土的SEM图像进行处理可以得到众多反映软土微结构及其变化的结构参数,这些结构参数从不同方面反映了软土在变形过程中结构单元体和孔隙的大小形态特征、排列特征及其相应的变化特征。根据本文研究的对象和问题,选用以下4个典型的微结构参数作为微结构研究的量化参数。

2.1 结构单元体或孔隙的大小和形态特征参数 (1)平均直径 D 。(2)平均形状系数 $F^{[6]}$ 。其定义为

$$F = \sum_{i=1}^n F_i / n \quad (1)$$

式中: F_i 为某单元体或孔隙的形状系数, $F_i=P/S$, P 为与单元体或孔隙等面积圆的周长; S 为单元体或孔隙的实际周长。

平均形状系数反映了单元体或孔隙的形状。

2.2 结构单元体或孔隙的排列特征参数 结构单元体或孔隙的排列特征参数主要指的是定向性参数,它是表达变形过程中整个微结构变化的重要参数,其研究倍受人们的关注。

(1)定向概率熵 H_m 。施斌^[6]将现代系统论中的概率熵的概念引入到黏性土的微结构分析中,用来表示结构单元体或孔隙排列的有序性。其定义为

$$H_m = -\sum_{i=1}^n F_i(\alpha) \log_n F_i(\alpha) \quad (2)$$

式中: α 为在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 划分成 n 个等份区位后,每个区位的角度,即 $\alpha=180^\circ/n$; $F_i(\alpha)$ 为在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内第 i 个区位中结构单元体或孔隙的定向频率^[7],其计算公式为

$$F_i(\alpha) = \frac{m_i}{M} \times 100\% \quad (3)$$

式中: m_i 为结构单元体或孔隙的长轴方向在第 i 个区位内的个数; M 为结构单元体或孔隙的总数。

上式中改变 n 数值,即可以改变划分区位的个数,可得到不同的频率分布情况。

显然, H_m 的取值在 $[0, 1]$ 区间。 H_m 可以有效的表示单元体或孔隙排列的有序性,其值越大,结构单元体或孔隙的排列越混乱,有序性越差,反之就越好。

(2)定向分维数 $D_f^{[8]}$ 。软土的微观结构是一种混沌体,是一种具有统计自相似性的分形结构体。微结构的自相似性,具体可理解为在某一标度范围内粗视化尺度(如某一方向范围或某一粒径范围)与其观测数目(结构单元体数或孔隙数)之间具有明显的幂函数关系。其计算公式为

$$D_f = - \frac{\sum_{i=1}^n F_i(\alpha) \ln[1/F_i(\alpha)]}{\ln \alpha} \quad (4)$$

D_f 实际上就是 $\ln \alpha - \sum_{i=1}^n F_i(\alpha) \ln[1/F_i(\alpha)]$ 曲线的斜率,这个斜率在一定的标度范围内值不变,在这个标度范围内研究对象具有分形几何特征。一般定向分维数的值越低,单元体或孔隙的定向性越好,反之就越差,混乱度越大。

3 软土微结构定量参数的获取

3.1 单向压缩试验中软土微结构定量参数的获取 根据图像处理结果,结构单元体和孔隙的微结构参数如表2所示。

表2 单向压缩试验中结构单元体和孔隙的微结构参数

压力P/kPa	研究对象	D/μm	F	H _n	D _f	压力P/kPa	研究对象	D/μm	F	H _n	D _f
200	结构单元体	4.926	0.540	0.984	0.785	350	结构单元体	3.030	0.372	0.941	0.674
	孔隙	2.128	0.478	0.972	0.737		孔隙	1.562	0.476	0.960	0.662
250	结构单元体	4.078	0.521	0.959	0.723	400	结构单元体	3.103	0.439	0.935	0.659
	孔隙	2.091	0.432	0.966	0.698		孔隙	1.613	0.393	0.949	0.643
300	结构单元体	3.390	0.406	0.951	0.681	800	结构单元体	3.156	0.313	0.920	0.648
	孔隙	2.079	0.373	0.953	0.675		孔隙	1.437	0.386	0.938	0.683

根据表2的结果,作出结构单元体和孔隙的大小和形态参数随压力变化的直方图,如图2~图5所示。

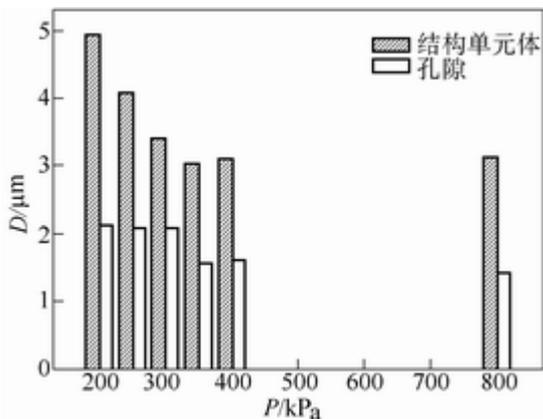


图2 结构单元体与孔隙的平均直径和压力关系

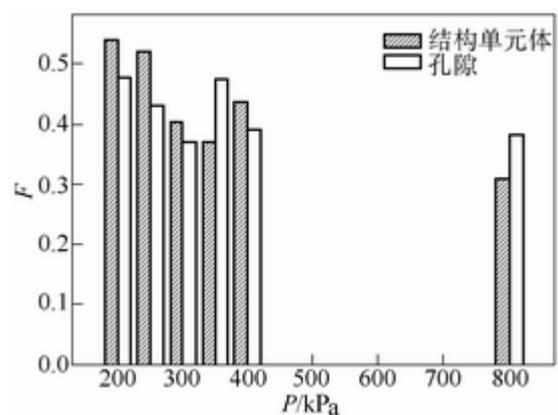


图3 结构单元体与孔隙的平均形状系数和压力关系

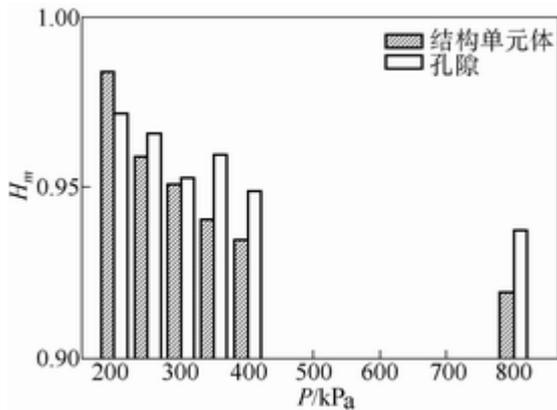


图4 结构单元体与孔隙的定向概率熵和压力关系

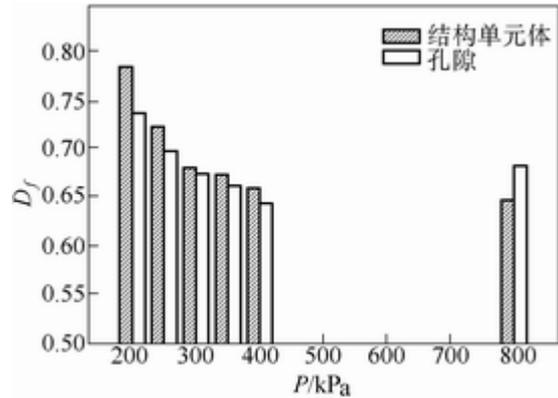


图5 结构单元体与孔隙的定向分维数和压力关系

从图2中可以看出，随着压力的增大，结构单元体和孔隙的平均直径有逐渐变小的趋势。因为随着压力的增大，有部分大的结构单元体压碎成小的结构单元体，从而使结构单元体的平均直径变小；对于孔隙，其必然随着压力的增大而逐渐变小。

从图3中可以看出，随着试验压力的增加，结构单元体和孔隙的平均形状系数呈不断减小的趋势，说明压力的增加使结构单元体和孔隙的形状趋于复杂化，其中结构单元体的变化更具规律性。

从图4中可以看出，结构单元体和孔隙的定向概率熵随压力的增加而不断减少，但随着压力的变大，其变化的速率减小。根据定向概率熵的定义，说明随着压力的提高，结构单元体和孔隙排列的有序性越来越高。

从图5中可以看出，结构单元体的定向分维数随压力的增加呈变低趋势，而孔隙的定向分维数在压力200kPa到400kPa之间呈降低趋势，800kPa时其分维数反而变高，这可能是因为在压力较高时，圆形孔隙数量较多而造成的结果。

从以上分析可以看出，在单向压缩试验中，结构单元体微结构定量参数较孔隙随压力的变化更为明显。

3.2 直剪试验中软土微结构定量参数的获取 根据图像处理结果，直剪试验下结构单元体和孔隙的微结构参数随剪位移的变化如表3所示。

表3 直剪试验中结构单元体和孔隙的微结构参数

剪位移U/mm	研究对象	D/μm	F	H _m	D _f	剪位移U/mm	研究对象	D/μm	F	H _m	D _f
0.20	结构单元体	4.658	0.546	0.859	0.313	0.65	结构单元体	4.032	0.559	0.918	0.535
	孔隙	3.344	0.618	0.909	0.603		孔隙	2.889	0.494	0.854	0.514
0.40	结构单元体	4.244	0.612	0.879	0.483	0.80	结构单元体	3.753	0.620	0.887	0.553
	孔隙	2.900	0.586	0.876	0.536		孔隙	3.059	0.480	0.851	0.484
0.50	结构单元体	4.109	0.538	0.917	0.517	0.95	结构单元体	3.218	0.532	0.958	0.536
	孔隙	3.097	0.451	0.863	0.518		孔隙	2.828	0.520	0.842	0.434

根据表3的结果，作出结构单元体和孔隙的大小和形态参数随剪位移变化的直方图，如图6~图9所示。

从图6中可以看出，随着剪位移的增加，结构单元体和孔隙的平均直径有逐渐变小的趋势，但结构单元体的变化更明显。这也从微观上说明了，海积软土在低压力(固结压力小于结构屈服压力)时剪切具有剪

缩的现象。原因可能是随着剪位移的增加，部分结构单元体破碎而使其平均直径变小，而孔隙必然随结构的破损而逐渐变小。

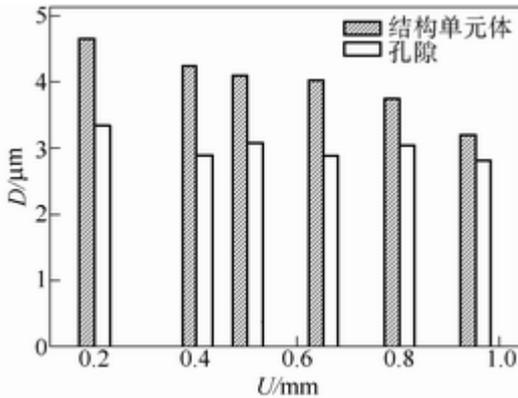


图6 结构单元体与孔隙的平均直径和剪位移关系

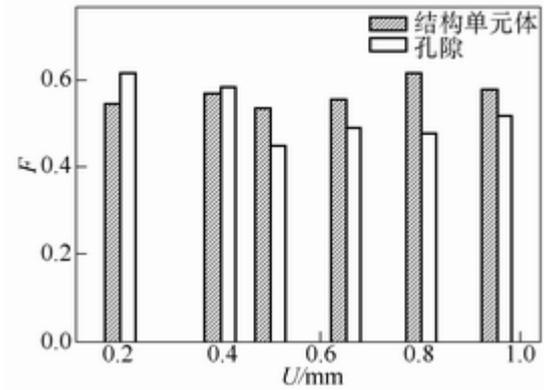


图7 结构单元体与孔隙的平均形状系数和剪位移关系

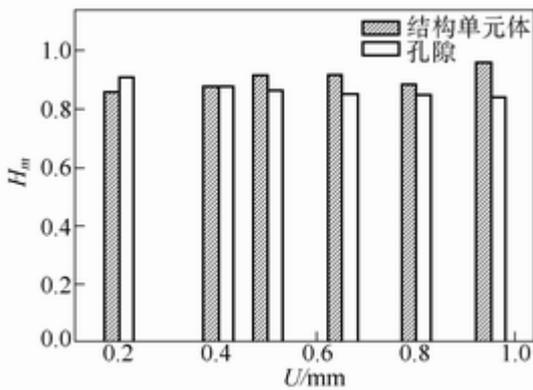


图8 结构单元体与孔隙的定向概率熵和剪位移关系

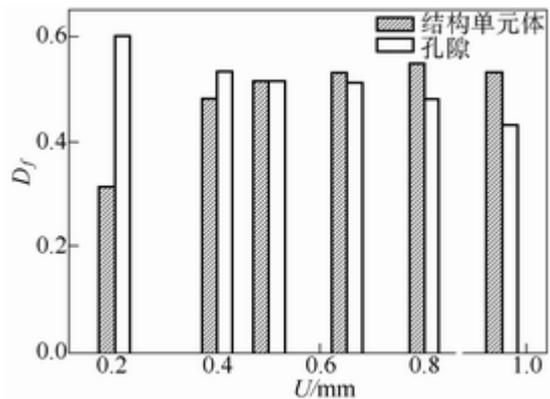


图9 结构单元体与孔隙的定向分维数和剪位移关系

从图7可以看出随着剪位移的增加，结构单元体和孔隙的平均形状系数呈有缓慢增加的趋势，说明剪位移的增加使结构单元体和孔隙的形状趋于规则，而孔隙平均形状系数的变化恰好相反。

从图8可以看出，结构单元体的定向概率熵随剪位移的增加而略有增加，而孔隙的定向概率熵则随剪位移增加而减小。根据定向概率熵的定义，随着剪位移的增加，结构单元体排列的有序性变差，而孔隙排列的有序性则越来越好。

从图9可以看出，结构单元体的定向分维数随压力的增加呈变高的趋势，而孔隙则明显有变低趋势，孔隙的定向性变好，这得到的结果与定向概率熵具有较好的相关性。

从以上4图中还可总结出，结构单元体微结构参数随压力变化的变化规律不是很明显，而孔隙的微结构参数随压力变化的变化规律相对来说更为明显。

3.3 三轴固结不排水剪切试验中软土微结构定量参数的获取 根据图像处理结果，三轴固结不排水剪切试验下结构单元体和孔隙的微结构参数随轴向位移的变化如表4所示。

根据表4的结果，作出结构单元体和孔隙的大小和形态参数随轴向位移变化的直方图，如图10~图13所示。

从图10可以看出,随着轴向位移的增加,结构单元体和孔隙的平均直径均逐渐变小,这同样也从微观角度反映了此海积软土在低围压(围压小于结构屈服压力)下的剪缩现象。

从图11可以看出,结构单元体和孔隙的圆形度和平均形状系数均随轴向位移的增加而减少。说明轴向位移的增加使结构单元体和孔隙的形状越来越复杂。

表 4 三轴固结不排水剪切试验中结构单元体和孔隙的微结构参数

剪位移U/mm	研究对象	D/μm	F	H _m	D _f	剪位移U/mm	研究对象	D/μm	F	H _m	D _f
1	结构单元体	3.701	0.592	0.940	0.611	7	结构单元体	3.159	0.502	0.877	0.506
	孔隙	2.986	0.551	0.946	0.637		孔隙	2.460	0.491	0.886	0.537
2	结构单元体	3.846	0.523	0.920	0.572	9	结构单元体	3.022	0.506	0.871	0.495
	孔隙	2.708	0.540	0.911	0.600		孔隙	2.367	0.515	0.884	0.512
4	结构单元体	3.053	0.558	0.895	0.540	11	结构单元体	2.587	0.501	0.867	0.465
	孔隙	2.651	0.533	0.896	0.568		孔隙	2.252	0.423	0.88	0.487

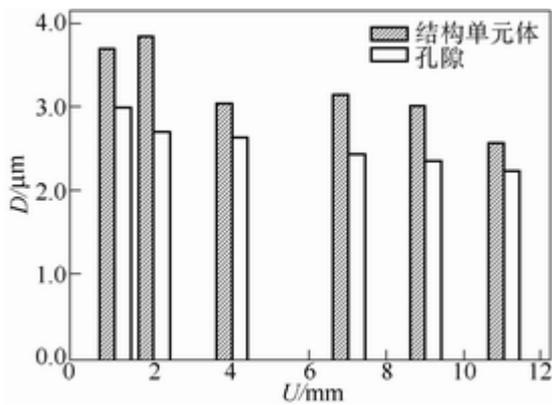


图10 结构单元体与孔隙的平均直径和轴向位移关系

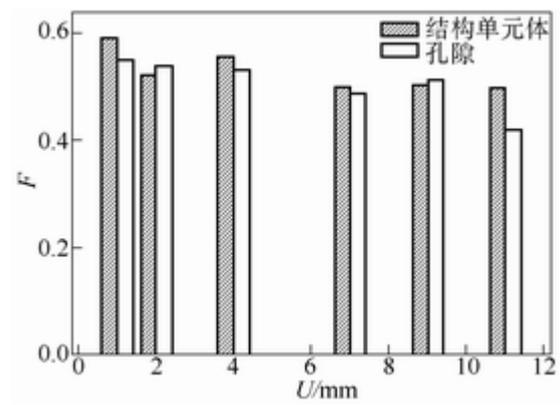


图11 结构单元体与孔隙的平均形状系数和轴向位移关系

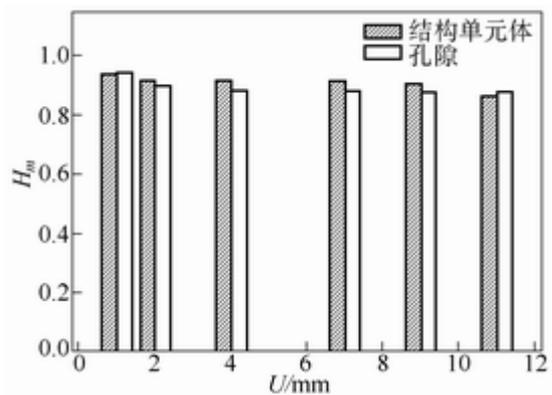


图12 结构单元体与孔隙的定向概率熵和轴向位移关系

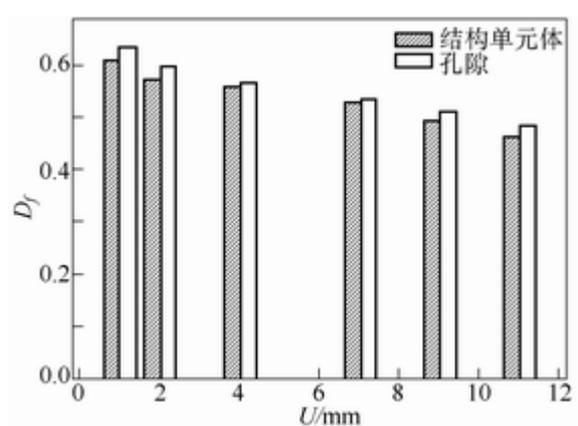


图13 结构单元体与孔隙的定向分维数和轴向位移关系

从图12可以看出,结构单元体和孔隙的定向概率熵随轴向位移的增加而缓慢减少,说明结构单元体和孔隙排列的有序性增强。

从图13可以看出,结构单元体和孔隙的定向分维数随轴向位移的增加呈不断降低趋势,同样说明了结构单元体和孔隙的定向性越来越好。

与单向压缩试验和直剪试验对比,三轴固结不排水剪切试验中的结构单元体和孔隙微结构参数的变化规律均较为明显。

4 结论

综合上述研究成果,可以得到以下结论。(1)从微结构参数的变化可以看出,杭州海积软土在低围压下只出现剪缩现象,并没有出现典型应变软化型结构性土的剪胀性^[9,10]。(2)在单向压缩试验中,随着压力的增加,结构单元体和孔隙的直径变小,结构单元体形态越来越狭长,定向性越来越好,而孔隙的变化规律并不明显;在直剪试验中,随着剪位移的增加,孔隙的变化规律比结构单元体的变化规律更为明显,在直剪条件下,软土中大的结构单元体的破碎引起其定向性变差,孔隙则随剪位移的增加,形成沿一特定方向的微裂纹,使其定向性越来越好,具有较高的统计意义;在三轴固结不排水剪切试验中,随着轴向位移的增加,结构单元体和孔隙的变化规律都比较明显,其直径变小,定向性越来越明显,两者表现出较强的一致性。(3)根据上述分析,建议针对不同的试验方法,采用不同的研究对象来进行微结构特征的描述。如单向压缩试验宜采用结构单元体作为研究对象,直剪试验宜采用孔隙作为研究对象,而三轴试验中,两者都适合作为研究对象。

参考文献:

- [1] 齐吉琳, 谢定义, 石玉成. 土结构性的研究方法及其现状[J]. 西北地震学报, 2001, 23(1): 99-103.
- [2] 胡瑞林, 王思敬, 李向全, 等. 21世纪工程地质学生长点: 土体微结构力学[J]. 水文地质工程地质, 1999, (4): 5-8.
- [3] 沈珠江. 土体结构性的数学模型—21世纪土力学的核心问题[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(1): 95-97.
- [4] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其定量化参数研究的新途径[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.
- [5] 徐伟. 新湖·北国之春1#、2#楼岩土工程勘察报告[R]. 杭州: 杭州市勘测设计研究院, 2001.
- [6] 施斌. 粘性土击实过程中微观结构的定量评价[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 57-62.
- [7] 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中的应用[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(2): 148-153.
- [8] 李向全, 胡瑞林, 张莉. 粘性土固结过程中的微结构效应研究[J]. 岩土工程技术, 1999, (3): 52-56.
- [9] 龚晓南, 熊传祥, 项可祥. 粘土结构性对其力学性质的影响及形成原因分析[J]. 水利学报, 2000, (10): 43-47.
- [10] 沈珠江. 软土工程特性和软土地基设计[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(1): 100-111.

Experimental study on micro-structural characteristics of soft soil

WANG Guo-xin¹, HUANG Hong-wei¹, XIAO Shu-fang²

(1. Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: The micro-structural parameters of soft clays in Hangzhou coastal area under different conditions of

pressure and deformation are obtained by means of uniaxial compression test, direct shear test and undrained triaxial consolidated shear test respectively. The results show that the sensitiveness of structural unit and micro-structural parameters of pore to pressure and deformation is not always the same. So that the subject to be investigated (structural unit body or pore) for describing the characteristics of soft clay must be carefully selected. The study on appropriate subject can better reflect the macro mechanical characteristics of soft clay from the view point of micro-structure and correctly establish the relationships between micro-structure parameters and macro-mechanical parameters.

Key words: soft clay; micro-structure; structural unite body; pore; different kinds of test