

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.0492

扰动后黏土强度指标与细观参数相关性初探

霍海峰¹, 雷华阳², 冯 兴¹, 王新强³, 闫晓荣¹

(1. 中国民航大学 机场学院, 天津 300300; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 3. 天津天一集团, 天津 300300)

摘 要: 受扰动后土体抗剪强度常发生衰减, 从细观尺度探讨了黏土细观参数与动后强度指标的关系。发现扭剪和单剪对土体静强度影响显著, 稳定后强度折减范围在 20%~50%, 但仍然高于重塑土静强度。随着扰动次数增加, 黏聚力与内摩擦角均表现出前期迅速衰减, 之后放缓并稳定的趋势。选取了 5 种典型细观参数进行分析, 发现扭剪作用下, 土体纵断面与横断面孔隙数增长率相近; 单剪作用下, 由于径向平面内不存在切应变, 横断面的孔隙增长率将小于纵断面。随着细观土颗粒数的增加, 黏聚力首先线性下降, 之后稳定在较低水平; 而内摩擦角未呈现收敛趋势。

关 键 词: 饱和黏土; 强度衰减; 细观参数; 孔隙数量

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)11-3949-08

Correlation analysis of microstructure parameters and strength indices of disturbed clay

HUO Hai-feng¹, LEI Hua-yang², FENG Xing¹, WANG Xin-qiang³, YAN Xiao-rong¹

(1. School of Airport Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Tianyi Construction Group, Tianjin 300300, China)

Abstract: Dynamic loading tests and mesoscopic tests were carried out to study the correlation of strength indices and mesostructure parameters, which commonly degrades for disturbed structural clay. It is found that cyclic torsional and simple shears cause a remarkable strength degradation for structural clay, in the range from 20% to 50%. The strength of silty clay after external disturbance is still greater than that of the reconstituted silty clay. Cohesion and friction angle of the disturbed silty clay degrade dramatically and then decrease to a stable value with the increasing of disturbance times. The investigation of five typical mesostructure parameters show that the growth rate of void for transverse sections subjected to the torsional shears is similar to the longitudinal profile. However, the void growth of longitudinal profile is greater than the transverse value subjected to simple shears. There is a linear attenuation between post-disturbance cohesion ratios and void number at the early period, and then the cohesion will become a constant value. By contrast, there is no convergence between friction angle ratios and void number ratios.

Keywords: saturated clay; strength attenuation; microstructure parameter; void number

1 引 言

动荷载作用下, 黏土结构性易受损伤, 强度常发生衰减, 严重的可引发灾难性后果。2002 年, 长江口深水航道某段在风浪荷载扰动下, 沉箱底黏土地基承载力大幅衰减, 并出现了较大的不均匀沉降^[1]。2004 年, 新加坡地铁环线 C824 标段一明挖区间发生隧道坍塌, 事后对事故的诱因进行调查, 发现基坑旁车道上车辆对结构性黏土的扰动不可忽略^[2]。上述灾害均是黏土地基受动荷载扰动强度丧失所

致。可见, 揭示土体强度变化机制、合理预测动后强度变化, 对于科学指导黏土地区工程设计有着重要意义。

Andersen^[3]最早利用动三轴研究了波浪荷载对 Drammen 黏土静力特性的影响, 发现当循环应变幅值小于±3%时, 不排水强度的折减小于 25%。Yasuhara 等^[4-6]探讨了动荷载对 Ariake 黏土静强度的影响, 并建立了循环荷载后土体强度变化的数学模型。Lee^[7]认为土体静强度的损失与灵敏度密切相关, 高灵敏度黏土和低灵敏度黏土在应变分别达到 4%~

收稿日期: 2017-10-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51308534, No. 51378344); 中央高校基金 B 类项目 (No. 3122014B003)。

This work was supported by the National Natural Science Fund Project(51308534, 51378344) and the Central University Fund B(3122014B003).

第一作者简介: 霍海峰, 男, 1983 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: hhf_1117@126.com

6%和2%~3%时, 会形成破坏面。

目前为止, 关于动后黏土静强度的变化规律仍未形成共识。Hyde等^[8]认为其强度变化依土性不同有所差别。国内学者王淑云等^[9]将粉质黏土的强度与扰动过程中动应变和动孔压相联系, 建立了振后强度与二者的关系表达式。汪小平等^[10]则将土体强度损失归因于结构性的破坏, 认为其与排水条件无关。黄茂松等^[11]基于 Yasuhara 的软化公式, 建立了反映黏土刚度弱化的模型, 该模型能较好地模拟出软化指数与循环次数的非线性关系。郑刚等^[12]通过施加单向循环荷载, 研究了粉质黏土的不排水强度变化规律。发现当轴向塑性应变小于3%时, 不排水强度衰减较小; 轴向应变大于3%后, 强度衰减的幅度增大, 并据此建立了强度折减模型。杨德环等^[13]也对粉质黏土的强度指标变化做了相关分析研究。

为更深入揭示土体变形、强度变化机制, 一些学者从细观结构入手, 试图通过细观参数反映宏观指标变化。如唐益群等^[14]发现地铁荷载对黏土微结构影响存在一个临界值, 临界值前后结构变化有所差异。而李顺群等^[15]通过研究64幅黏土微结构SEM图片, 发现2个关键参数可以反映6个原始参数95.28%的信息, 从而达到了降维目的。张先伟等^[16]认为蠕变后土颗粒的定向度更加有序, 且蠕变后土体存在各向异性弱化现象。王清等^[17]则利用定向度定量评价了土体结构性。

尽管前人针对动荷载对黏土静强度的影响做了部分研究, 并尝试从细观尺度建立与宏观指标联系, 但仍有大量工作尚需完善。首先, 细观试验研究过程中, 多从定性角度阐述各参数的发展规律, 并未通过量化分析, 建立土体微结构参数变化与宏观力学指标之间的关系。再则, 以往成果多针对轴向动荷载(主应力定向)进行模拟, 对于复杂应力路径较少涉及(如扭剪和单剪)。而现实中, 交通和波浪荷载作用下, 土体主应力方向将在物理空间内发生连续旋转, 土单元体不仅存在轴向和径向应力, 还承受着切向和扭剪应力的作用, 有必要对于复杂荷载作用后土体强度变化进行研究。主应力轴旋转可通过对圆柱施加扭剪作用模拟, 如图1所示^[18]。图中 σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 、 $\tau_{\theta z}$ 分别为极坐标系下土微分体所受径向正应力、切向正应力、竖向正应力和切应力; σ_1 、 σ_2 和 σ_3 为3个主应力。圆柱在扭剪作用下, σ_1 和 σ_3 的大小和方向将不断变化, 使得土单元横断面和纵断面的法向力与剪切力亦不断变化。

基于此, 针对滨海典型黏土, 通过改变扭剪角度、单剪幅度以及扰动次数研究了强度衰减规律,

同时对扰动后土体轴向和径向平面内孔隙数量变化进行分析, 探讨了孔隙数量与强度指标间的关系。试验结果为评价土体性质及合理预测强度损失提供了试验依据。本文旨在研究静强度指标与细观参数的关系, 故扰动过程中土体动力特性的变化(动应变、动孔压、动弹性模量、阻尼比)及细观土体化学变化(静电力、胶结物质破坏)不在讨论范围之内。

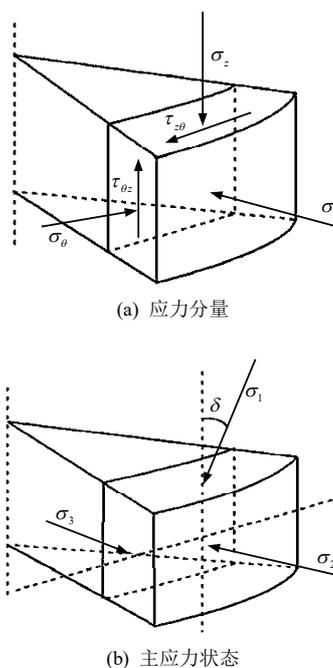


图1 扭剪状态下土单元受力状态^[18]

Fig.1 Stress condition of soil under torsional disturbance^[18]

2 土样性质及试验方案

2.1 土样性质

土样取自天津滨海新区, 地下水位为1 m, 利用薄壁取土器取土, 蜡封后保存。取土深度为6~8 m。土性黏土, 褐色, 无贝壳、泥炭等杂质。具体物理参数如下: 天然密度为1.87 g/cm³, 含水率为28%, 液限为38%, 塑限为20%, 直剪强度指标中黏聚力为12 kPa, 内摩擦角为28.4°, 灵敏度为5.2。

2.2 试验过程

(1) 动荷载采用等变形循环加载。自制单剪和扭剪设备来实现扭转角度和单剪位移的控制。图2为单剪仪, 原状土从取样桶中推出后切割成直径为100 mm, 高为160 mm的土柱, 并置于单剪设备内。土柱两端与带有针头的“帽”紧密贴合, 上部固定端约束水平位移和转动, 竖向不约束, 即允许土体发生竖向变形。土体处于可塑状态, 在无侧限约束下仍然具有自稳性。通过左右移动手柄和定位指针控制单剪位移。图中0点为平衡位置, 由平衡位置

左右移动一次为一个循环。图 3 中，扭剪仪与单剪不同之处在于通过旋转手柄实现扭剪作用。试验前，在角度控制杆与外罩相交处，切割相应角度的横向裂缝，以达到控制扭剪角度目的。

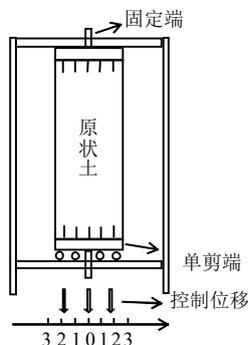


图 2 单剪仪
Fig.2 Simple shear

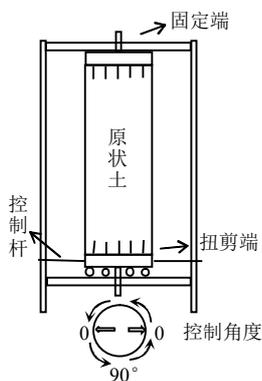


图 3 扭剪仪
Fig.3 Torsional shear

(2) 扰动结束后，将土柱取出横向放置。由于与针头接触部位受扰动过大，故将土柱两端土体切除。按照规范从中间部位取 4 个土样（环刀内径为 61.8 mm，高为 20 mm），放置于四联直剪仪中快剪破坏，剪切速率为 0.8 mm/min。法向压力分别为 50、100、200、300 kPa。强度指标获得需做两组平行试验，取平均值。对原状土（直径为 80 mm）直接进行扰动，之后用环刀（内径为 61.8 mm）取样剪切，可最大程度上保证土体不受其他因素的影响，如制样、装样和水份蒸发。

(3) 扰动后选取土样中间部位切取 15 mm 的立方体，采用冷冻干燥法脱水以保证细观结构不受破坏。使用德国 LEO 场发射扫描电子显微镜下对土体细观结构进行观察，拍摄时先用高倍找到典型的结构单元体，再逐步降低倍数至 2 000 倍。采用 Leica Qwin5000 对图像进行二值化处理，之后利用 MATLAB 自带测量图像工具函数 regionprops，编制

调取命令，对土体细观参数进行统计。细观试验确定需做 3 组平行试验，取平均值。

2.3 试验方案

根据扰动形式的不同，将试验方案分为扭剪和单剪两部分（见表 1）。

表 1 试验方案
Table 1 Experimental program

扰动方式	控制指标	变量
扭剪	50 次	扭剪角度：10°、15°、20°、25°、30°、35°、40°
扭剪	20°	扭剪次数：10、50、100、200、500、1 000、2 000 次
单剪	50 次	单剪位移：10、20、30、40、50、60 mm
单剪	20 mm	单剪次数：10、50、100、200、500 次

需要指出的是：①试验方案中的角度和位移均为循环荷载的振幅，通过人工读表控制振动频率为 0.5 Hz。②单剪次数超过 500 次时，轴向塑性变形过大，圆柱体呈“鼓”状。若继续单剪，轴向方向剪应变变化过大，故单剪次数控制在 500 次。而扭剪过程中，不存在较大轴向变形的现象。③对于饱和土，液相占据土中所有孔隙，由于扰动对于土体骨架的压缩非常有限，故孔隙比的变化只与土中水的流失量有关。鉴于黏土渗透系数很小，且扰动过程作用时间较短，可忽略土中水的排出，即扰动对于饱和黏土孔隙比的影响不大。

3 试验结果

3.1 动后强度指标

首先将原状土完全重塑（天然含水率），得到不同法向压力下重塑土直剪强度分别为 13、17、24、32 kPa，而原状土相应的强度为 36、66、125、172 kPa。可以看出，高法向压力下，强度折减率最大。

图 4(a)为扭剪 50 次后直剪强度变化，图中 τ 为抗剪强度。不同法向压力下，随扭剪角度的增加，直剪强度呈线性衰减。300 kPa 下，强度折减明显，由未扰动时的 172 kPa 变为扭剪角度 40° 时的 132 kPa，减小了 40 kPa；法向压力为 50 kPa 时，强度由 36 kPa 衰减到 23 kPa。图 4(b)为单剪扰动的影晌，法向压力为 300 kPa 时，直剪强度由 172 kPa 降为 87 kPa；法向压力为 200 kPa 时直剪强度由 125 kPa 降为 48 kPa；法向压力为 50 kPa 时直剪强度衰减到 22 kPa。与扭剪相比，单剪扰动作用后强度衰减幅度较大，这与 2.3 节中所述扰动后产生较大的轴向塑性变形相对应。即单剪更容易引起土体强度和刚度的衰减。

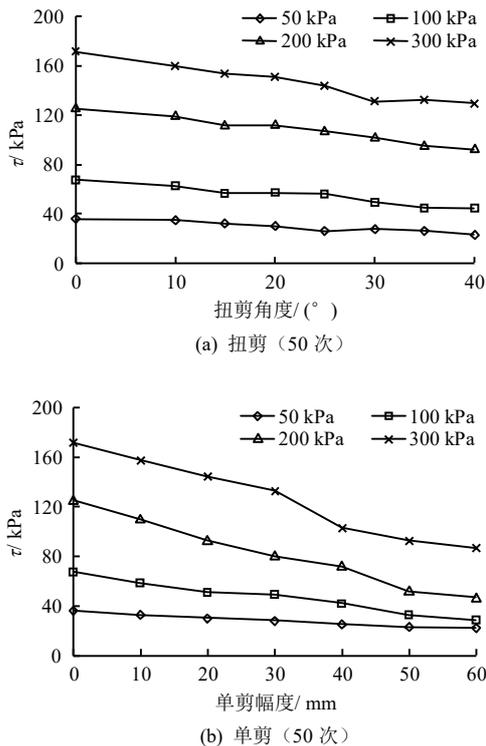


图4 扰动后直剪强度变化
Fig.4 Variation of direct shear strength after disturbance

图5为强度随扰动次数的变化。扭剪作用下，强度前期衰减较快，扰动100次后发生转折，强度下降放缓。单剪在较大循环次数下，强度亦有稳定趋势，但衰减程度更严重（见图5(b)）。对比两图可发现，稳定后直剪强度衰减保持在20%~50%之间。扭剪作用强度折减到一定程度后不再变化，可承受高振次的扰动；单剪作用强度衰减较快，高法向压力下未有收敛趋势。若将强度与剪切过程中产生的轴向变形相关联，会发现折减率较大时，往往产生较大的轴向变形。这与文献[12]中将强度折减度表达为与轴向塑性变形有关的单变量函数较为一致。

图6(a)为不同扭剪角度下强度指标的衰减情况，图中 c 为黏聚力， ϕ 为内摩擦角。随着扭剪角度的增加，黏聚力与内摩擦角均有减小。黏聚力由未扰动的12 kPa降为2 kPa；内摩擦角由 28.4° 降为 24.6° ；单剪作用下内摩擦角衰减更严重，为 14.2° （见图6(b)）。

随着扭剪、单剪次数的增加，两个强度指标均存在先下降后稳定的趋势（见图7）。

3.2 动后细观参数

将冷冻脱水后的土体放在显微镜下观察，并对二值化后细观图像进行定量分析。所谓二值化是通过设定阈值将图像分为两个灰度级，阈值的大小直

接影响到孔隙和颗粒形态参数的提取。而目前对于处理前后相似度的评价主要还是主观评价，本次试验阈值采用动态调整法，范围在160~170之间。并

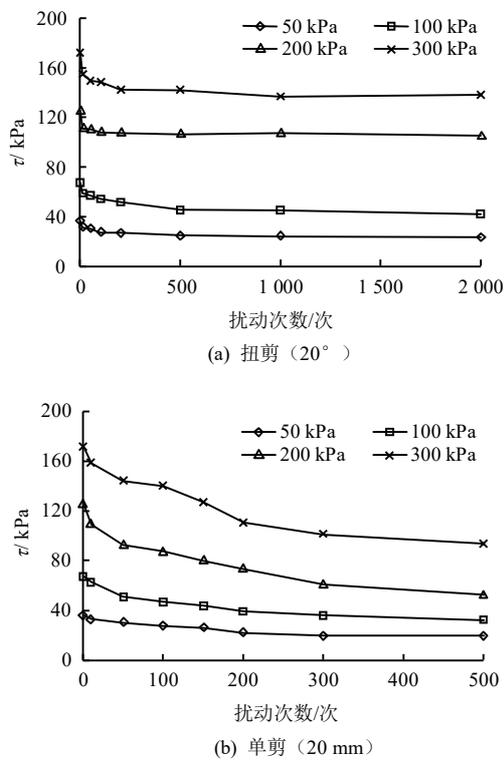


图5 扰动后直剪强度随扰动次数变化
Fig.5 Relationship between disturbed strength and cycle number

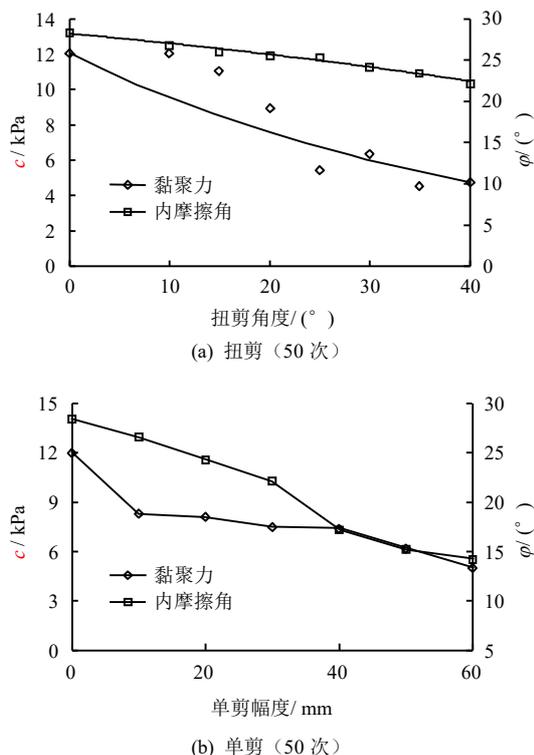


图6 扰动后强度指标变化
Fig.6 Variation of strength indexes after disturbance

对处理前后图片进行对比，二值化后的图片应有效反映土体细观结构。同一截面取 3 组土样，孔隙数最大差值不应超过平均值 15%。如图 8 所示，黑色代表孔隙、白色代表土颗粒。可以看出，扰动后不论是孔隙还是颗粒分布更加均匀，原状土中土体的针状棒状形态在扰动后明显消失。选取 5 个导出参数表征孔隙的大小、形态，分别为孔隙数量、等效直径、面积比、形态比及圆度，各参数的意义如表 2 所示。将 5 种参数与动后强度做 Pearson 相关性分析，会得到细观参数与宏观指标的线性相关系数，考虑到剪切强度分别在 4 种法向压力下得到，相关系数可取其平均值。由表 3 可以看出，与原状土相比，扰动后土体 SEM 图中的孔隙均出现不同程度的增长，这反映了扰动过程中颗粒间摩擦与断裂，较少大颗粒向较多小颗粒转化的过程。鉴于宏观尺度上土体抗剪强度有所衰减，可以发现二者呈负相关性。数据处理后发现，扰动后孔隙数量变化较大（孔隙数量与颗粒数量一般具有相同变化规律），最大提高 50%~60%，其与动后强度的相关系数为 -0.49；等效直径 D 有所下降，下降率控制在 10%，相关系数为 0.23；面积比 A_F 有所提高，相关系数为 -0.18，颗粒面积的提高可能与制样过程中少部分孔隙水流失及阈值选取时的波动有关；形态比 A_r 一直控制在 1.6~1.7，变化率在 2%以内，相关系数为 0.17，说明长宽比基本未有变化，且与强度相关性较小；圆度增长率控制在 40%以内，相关系数为 -0.38，表明土体由未扰动时少量较规则的大孔隙，被扰动后较多不规则的小孔隙所替代。可以看出，5 种细观参数中，孔隙数量与强度的相关程度最大，之后为圆度，而等效直径、面积比和形态比的相关程度均较小。

鉴于此，以下针对动后孔隙数量进行讨论。扰动后孔隙数量的变化如表 3 所示，其中横断面代表圆柱体径向平面，纵断面代表轴向平面。在扭剪与单剪 4 个断面中，单剪纵断面孔隙数量增长最大，单剪横断面增长最小。鉴于单剪扰动下土体轴向塑性变形较大，可做以下假设，土体轴向变形可能与纵断面孔隙数量增加有关。

为更合理表述孔隙数量与强度指标之间的关系，定义孔隙数量比为 n_d/n_u ，其中， n_d 为扰动后单位面积内的孔隙数量， n_u 为未扰动原状土单位面积内的孔隙数量；黏聚力比为 c_d/c_u ， c_d 为扰动后土体的黏聚力， c_u 为未扰动原状土的黏聚力；相应的还可定义内摩擦角比 ϕ_d/ϕ_u ，意义同前。

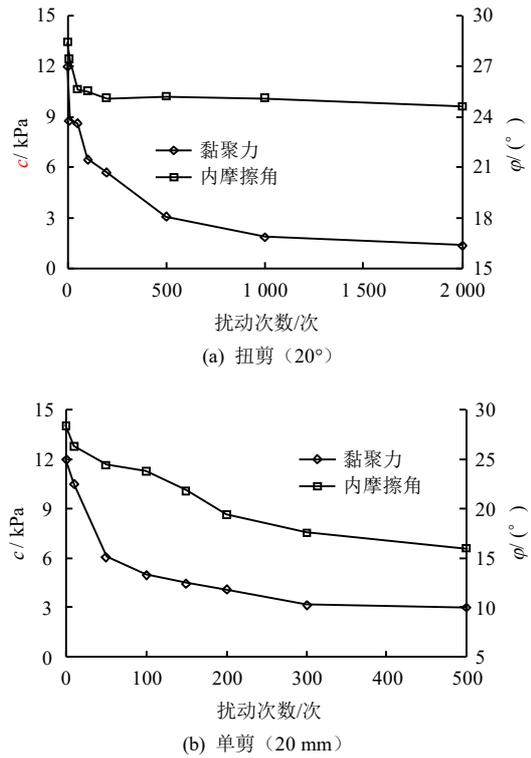


图 7 扰动后强度指标随扰动次数变化
Fig.7 Relationship between disturbed strength indexes and cycle numbers

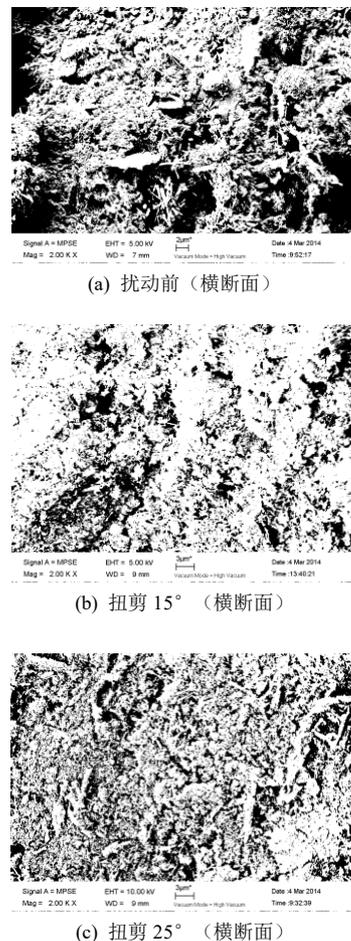


图 8 二值化后土体细观结构
Fig.8 Binary image of soil mesostructure

表 2 微结构参数具体定义
Table 2 Definition of microstructure parameters

微结构参数名称	定义	符号意义
数量	孔隙或颗粒数量 n 变化是由颗粒挤压破碎和大小颗粒重新结合引起。从侧面反映颗粒分布及相互间的关系。	数量 n 为是评估细观变化的直接参数
等效直径	$D = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$	A 为孔隙实际的面积
面积比	$A_f = \frac{A'}{A_1}$	A' 为颗粒的面积, A_1 为颗粒和孔隙的面积之和。
形态比	$A_R = \frac{L}{B}$	L 、 B 分别为孔隙（或颗粒）长轴和短轴的长度。其值能直观反映颗粒的延长性。
圆度	$R = \frac{P \times P}{4 \times \pi \times A \times 1.064}$	P 为颗粒的实际周长。1.064 为校正系数。 R 值越大, 表示其形状越不规则; R 值越趋近 1, 表示其形状越趋近于圆。

表 3 扰动后孔隙数量
Table 3 Void number after disturbance

角度/(°) (位移/cm)	扭剪		单剪		扰动次数	扭剪		单剪	
	纵断面	横断面	纵断面	横断面		纵断面	横断面	纵断面	横断面
0	2 114	2 322	2 114	2 322	0	2 114	2 322	2 114	2 322
10 (1)	2 120	2 401	2 562	2 510	10	2 631	2 409	2 604	2 429
15 (2)	2 639	2 464	2 735	2 612	50	2 712	2 692	2 735	2 612
20 (3)	2 712	2 692	2 993	2 704	100	2 763	2 850	3 005	2 924
25 (4)	2 775	2 698	3 240	2 721	200	3 267	3 210	3 482	3 103
30 (5)	2 891	2 643	3 198	2 872	500	3 298	3 213	3 654	3 108
35 (6)	2 943	3 097	3 386	2 916	1 000	3 337	3 271	/	/
40	3 268	3 276	/	/	2 000	3 393	3 403	/	/

图 9 为扰动后孔隙数量比与扭剪角度（单剪位移）的关系。总体上看，孔隙数量比随扰动幅度的增加呈近似线性增长。扭剪增长曲线起伏较大，单剪较平缓。

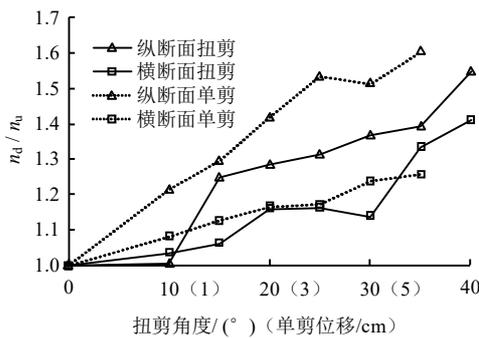


图 9 孔隙数量比与扰动幅度关系
Fig.9 Relationship between void numbers and disturbance amplitude

两种扰动形式均表现出纵断面孔隙数量比大于横断面的性质。除 10° 和 30° 外，扭剪作用下纵断面与横断面的 n_d/n_u 相差不大，近似平行发展。而单剪作用下，纵断面 n_d/n_u 与横断面差距不断加大，且未有收敛趋势。这一方面是由于未扰动纵断面 n_u 较横断面相比其值较小（2 114 比 2 332），相

同孔隙增长量下， n_d/n_u 将大于横断面；另一方面，较高振幅或较高振次作用下，纵断面孔隙数有超越横断面的趋势。具体来说，扭剪角度大于 20° 后，纵断面与横断面的孔隙数基本相当，这是由于扭剪过程中，圆柱体轴向和径向分别作用扭剪应变和切应变，两个面同时扰动使得纵断面和横断面的孔隙数持续积累，单位面积内孔隙数也不断接近；而单剪作用下，圆柱体只有轴向产生剪应变，纵断面受到的扰动远强于横断面。导致土体颗粒破损、胶体断裂现象更严重，最终出现孔隙数大于横断面的情况。

图 10 为孔隙数量比与扰动次数的关系。总体上看，4 组曲线均表现出扰动初期快速增长，之后增长放缓并有稳定的趋势。扭剪作用下，扰动后期两个断面的曲线几乎平行，相同扰动次数下，孔隙数量比相差 0.15 左右。单剪作用下，纵断面孔隙数量比增长迅速，扰动 500 次后，增长到 1.73；而横断面则稳定在 1.34。随着扰动次数增加，两断面间孔隙数量比的差距在不断加大。由表 2 可发现，扰动 200 次后，扭剪作用下两个面的孔隙数量基本一致，说明扭剪在一定程度上可强化土体的各向同性；而单剪作用下两个断面的孔隙数量却进一步加大，说明单剪在一定程度上强化了各向异性。

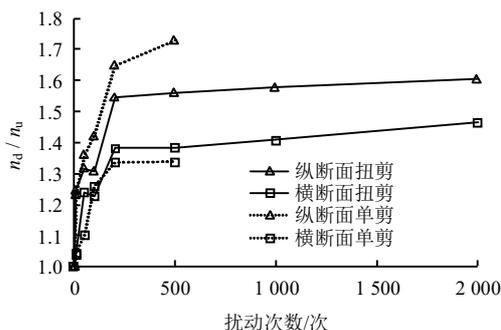


图 10 孔隙数量比与扰动次数关系
Fig.10 Relationship between void numbers and disturbance numbers

3.3 强度指标与孔隙数量相关性

本节将探讨孔隙数量与强度指标的关系。鉴于土体纵、横面孔隙数有所不同，为使取值更具代表性。将两断面的孔隙数相加的一半作为平均孔隙数，以综合反映土体状况。图 11 建立了平均孔隙数量比与动后黏聚力比的关系。数据基本分布在图中所示直线两侧，两者之间呈现良好的线性拟合，随 n_d/n_u 的增加， c_d/c_u 不断减小，并在 n_d/n_u 接近 1.6 时，降为 0.1。鉴于黏聚力非负值，可以预测，当 n_d/n_u 大于 1.6 后，黏聚力将稳定在较低水平。

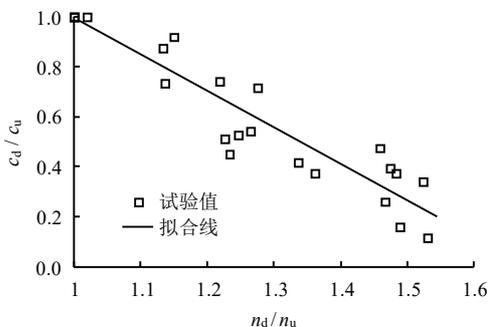


图 11 黏聚力比与平均孔隙数量比关系
Fig.11 Relationship between cohesion ratio and average void number ratio

图 12 为平均孔隙数量比与内摩擦角比的关系。当孔隙数量比大于 1.3 后，在相同孔隙数量比下，内摩擦角变化范围较大。

土体黏聚力主要来源于土颗粒间的胶结物质。内部结构在受扰动过程中，较少发生土颗粒本身的破坏，更多是颗粒间相互滑移，即胶结物质的断裂和胶结力的丧失。而颗粒或孔隙数量可在较大程度上反映胶体断裂、土颗粒破损程度，故土颗粒数量增长前期与黏聚力比之间有良好的线性关系；而当结构破损到一定程度，黏聚力将保持较低水平不再变化。

内摩擦角的大小受制于土颗粒间的滑动和咬合摩擦^[19]，其不仅与土颗粒数量、形态、分布有关，更与颗粒间接触面状态联系密切。从总体上看，尽管内摩擦角随孔隙数量比的增加有所减小，但二者并未表现出一一对应关系（见图 12）。

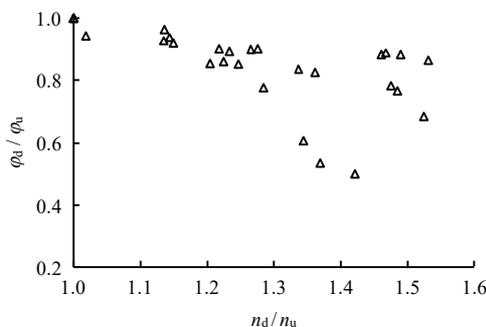


图 12 内摩擦角比与孔隙数量比关系
Fig.12 Relationship between friction angle ratios and void number ratios

4 结 论

(1) 扭剪和单剪对饱和黏土强度有显著影响，强度衰减范围为 20%~50%，但未衰减至重塑土水平。随着扰动次数的增加，黏聚力和内摩擦角均表现出前期下降迅速，之后放缓并有稳定的趋势。

(2) 5 种细观参数与强度的相关性中：颗粒数量、圆度均为负相关，其中颗粒数量的相关程度最大，而等效直径、面积比和形态比相关度较小。

(3) 扭剪作用下，纵断面与横断面孔隙增长率相近，这主要是由于土柱轴向与径向分别存在扭剪应变和切应变；而单剪过程中，土柱只在轴向作用剪应变，使得纵断面的孔隙增长速率大于横断面。

(4) 土体颗粒增长前期，其与动后黏聚力比呈现良好的线性拟合关系，可以预测的是，当土体颗粒数量继续增加时，黏聚力不再变化；孔隙数较大时，内摩擦角未呈现出收敛的趋势。

本文仍有一些问题值得深入探讨，如图像处理中噪声、光照对细观参数可靠性的影响；另外本文仅选取了 5 个细观参数做归纳，今后的工作中，可选取其他参数，如定向度等做更深入研究。

参 考 文 献

[1] 冯军. 长江口软黏土地基在波浪循环荷载作用下的弱化分析[J]. 中国海洋平台, 2005, 20(1): 18-21.
FENG Jun. Degradation study of the soft clay foundation of Yangtze Estuary waterway[J]. China offshore Platform, 2005, 20(1): 18-21.
[2] 肖晓春, 袁金荣, 朱雁飞. 新加坡地铁环线 C824 标段

- 失事原因分析(一)工程总体情况及事故发生过程[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(5): 66—72.
- XIAO Xiao-chun, YUAN Jin-rong, ZHU Yan-fei. Causation analysis of the collapse on Singapore MRT circle line Lot C824(Prat 1)-project background and process of collapse[J]. **Modern Tunnelling Technology**, 2009, 46(5): 66—72.
- [3] ANDERSEN K H. Effect of cyclic loading on clay behavior[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1978, 15(4): 73.
- [4] YASUHARA K, HIRAO K, HYDE A F L. Effects of cyclic loading on undrained strength and compressibility of clay[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 32(1): 100—116.
- [5] YASUHARA K. Post-cyclic Undrained strength for cohesive soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1994, 120(11): 1961—1979.
- [6] YASUHARA K. Postcyclic undrained strength for cohesive soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 120(11): 1961—1979.
- [7] LEE K L. Cyclic strength of a sensitive clay of Eastern Canada[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1979, 16(1): 163—176.
- [8] HYDE A F L, WARD S J. The effects of cyclic loading on the undrained shear strength of silty clay[J]. **Marine Geotechnology**, 1986, 6(3): 299—324.
- [9] 王淑云, 鲁晓兵, 赵京, 等. 粉质黏土周期荷载后的不排水强度衰化特性[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 2991—2995.
- WANG Shu-yun, LU Xiao-bing, ZHAO Jing, et al. Post-cyclic loading undrained strength degradation characteristics of silty clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(10): 2991—2995.
- [10] 汪小平, 刘厚平, 周晖, 等. 循环荷载作用后饱和和软黏土抗剪强度变化规律的试验研究[J]. 铁道建筑, 2006, (4): 56—58.
- WANG Xiao-ping, LIU Hou-jun, ZHOU Hui, et al. Experimental study on alteration law of shear strength of saturated soft-clay after cyclic loading[J]. **Railway Engineering**, 2006, (4): 56—58.
- [11] 黄茂松, 李帅. 长期往复荷载作用下近海饱和和软黏土强度和刚度的弱化特性[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1491—1498.
- HUANG Mao-song, LI Shuai. Degradation of stiffness and strength of offshore saturated soft clay under long-term cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(10): 1491—1498.
- [12] 郑刚, 霍海峰, 雷华阳. 循环荷载后原状与重塑饱和粉质黏土不排水强度性状研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 32(3): 400—408.
- ZHENG Gang, HUO Hai-feng, LEI Hua-yang. Undrained strength characteristics of saturated undisturbed and remolded silty clay after cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 32(3): 400—408.
- [13] 杨德环, 颜荣涛, 韦昌富, 等. 粉质黏土强度指标的水化学敏感性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(12): 3529—3536.
- YANG De-huan, YAN Rong-tao, WEI Chang-fu, et al. A study of water chemical sensitivity of strength indices of silty clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(12): 3529—3536.
- [14] 唐益群, 张晓晖, 赵书凯, 等. 地铁荷载下软黏土微结构与宏观变形的相关性[J]. 同济大学学报, 2009, 39(7): 872—877.
- TANG Yi-qun, ZHANG Xiao-hui, ZHAO Shu-kai, et al. Correlatability of microstructure change and macroscopical deformation of soft clay under subway load[J]. **Journal of Tongji University**, 2009, 39(7): 872—877.
- [15] 李顺群, 郑刚, 赵瑞斌, 等. 黏土微结构参数的相关分析和主成分分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(7): 1120—1126.
- LI Shun-qun, ZHAO Rui-bin, et al. Correlation analysis and principal component analysis on microstructure parameters of clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(7): 1120—1126.
- [16] 张先伟, 王常明. 一维压缩蠕变前后中软土微观结构变化[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1688—1694.
- ZHANG Xian-wei, WANG Chang-ming. Microstructural change of soft clay before and after one-dimensional compression creep[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(11): 1688—1694.
- [17] 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.
- WANG Qing, WANG Feng-yan, XIAO Shu-fang. A quantitative study of the microstructure characteristics of soil and its applicaton to the engineering[J]. **Journal of Chengdu University of Technology**, 2001, 28(2): 148—153.
- [18] 钱建国, 王永刚, 张甲峰, 等. 交通动载下饱和和软黏土累计变形的不排水循环扭剪试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10): 1790—1798.
- QIAN Jian-gu, WANG Yong-gang, ZHANG Jia-feng, et al. Undrained cyclic torsion shear tests on permanent deformation responses of soft saturated clay to traffic loadings[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(10): 1790—1798.
- [19] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 116—121.
- LI Guang-xin. *Advanced soil mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 116—121.