维普资讯 http://www.cqvip.com

第23卷第4期 合肥工业大学学报(自然科学版) Vol. 23№4
2000年8月 JOURNAL OF HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Aug. 2000

(10)

500-504

粉质土直接剪切变形过程中的组构特征

TU432

张 军[1], 高大钊[2], 陈剑杰[2]

(1.同济大学 工程建设监理公司,上海 200092; 2.同济大学 地下建筑与工程系,上海 200092)

摘 要:采用直接剪切试验中的剪切带土样,利用电子探针进行定向表面的微观扫描,研究了粉质土在剪切变形过程中的组构特征。发展和完善了土的微观结构的实验方法,编制了实用的土颗粒图象处理软件和组构量概率统计程序,建立了各定向组构量的概率模型,提出角度组构量应该用二阶张量或四阶张量描述,给出了剪切变形过程中各组构量的统计分布变化的一般趋势。

关键词:粉质土;微结构;组构;电子探针;直剪试验

直接剪切变形

中图分类号:TU432 **文献标识码**:A **文章编号**:1003-5060(2000)04-0500-05

组构特征

Fabric characteristics of silty soil during direct shearing deformation

ZHANG Jun[1], GAO Da-zhao[2], CHEN Jian-jie[2]

(1. Construction Project Management and Consulting Company, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Dept. of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to establish microscopic mechanical model of soil, samples from shearing band in direct shear test of the silty soil in Shanghai are collected, and the fabric characteritics are studied during direct shearing deformation by scanning directional microscopic surfaces with an electric probe. The experimental methodology on microstructure of soil is improved, and a practical software for processing images of soil particles and a probabilistic statistical program for calculating fabric quantities are developed. The probability models for directional fabric quantities are established, and the distribution changes of fabric quantities are analyzed as the shearing deformation advances. It is suggested that normal or beta distribution is not proper to describe the probabilistic statistical model of soil's directional fabric quantities while tensor distribution of the second rank or fourth rank is rational instead. When shearing displacement increases, the orientation of partical long axis changes and comes to close to the macroscopic shear direction.

Key words: silty soil; micostructure; fabrics; electric probe; direct shear experiment

收稿日期:1999-12-29
基金项目:国家自然科学基金资助项目(1880348)
作者简介:张 军(1969—),男,湖北荆州人,硕士,同济大学工程师;
高大钊(1935—),男,浙江平湖人,同济大学教授,博士生导师.

维普资讯 http://www.cqvip.com

0 引　言

土是一种多相介质的颗粒材料，其微观结构如材料颗粒的大小、形状及其在空间上的排列组合方式、颗粒的矿物成分、颗粒的表面性质等因素决定着土的力学性质。传统的基于宏观连续介质力学的理论方法不能理想地解释离散的土颗粒体所表现的力学响应。从土的微观结构出发来研究土的力学性质，建立土的力学性质的微观模型将有助于从本质上了解土的力学性质。在微结构量化的基础上，分析土体宏观物理力学性质的微结构效应，将微结构研究成果纳入实际的工程性质分析与评价，对于解决土体工程性状的非线性问题、提高工程勘察和设计质量均具有十分重要的意义。

微观结构的定量研究，包括量测土的某些结构参数[1,2]、观察在应力作用下土的微观结构的反应[3]、土的微观结构的数值模拟[4]、考虑微结构的土的应力应变关系[5]、土体工程性质的微结构效应[6,7]及组构特征对土体动力性质的影响[8]等。组构是从土的微观结构中获取的能真实地反映土的结构情况（确定土微结构的“自由度”）的参数。具有相同组构参数的土微结构具有相同的宏观力学响应。组构用颗粒半径及其分布密度函数、枝向量的分布密度函数、颗粒间接触力大小和方向的分布密度函数等组构量以及组构张量来描述。观察土体在应力作用下组构变化的进程是目前国内外土的微观结构研究的主要方向。已有的研究主要是针对模拟离散材料和砂土[3,9]，而对于在渗透变形和地震液化中起重要作用的真实粉质土在剪切变形过程中的组构特征的研究成果至今尚未见报道。本文结合国家自然科学基金资助项目《上海软土细观结构的组构分析及试验研究》，采用直剪试验利用电子探针扫描的方法开展了这方面的探索性研究。

1 技术路线

本着理论与实践相结合、宏观与微观相结合、定性与定量相结合的原则，遵循图 1 所示的技术路线开展粉质土在剪切变形过程中的组构特征研究。

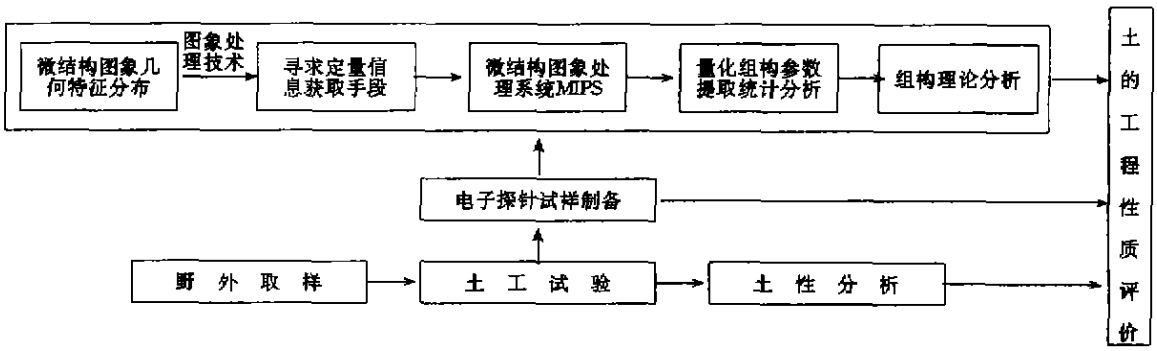


图 1　土的组构研究技术路线

2 组构参数的实验

2.1 土工实验

对于以颗粒作为骨架的粉质土，通常更加关心剪切带上的组构变化。但是，在一般的三轴试验中，很难发现其剪切带的位置，而在显微镜下寻找剪切带更是很困难的工作。基于此，在土工实验中选用了固定剪切带的直剪试验方式，并作了改进。改装了常规的直剪实验仪，以千分表测量剪切位移 δ。

由于材料的离散性质和电子探针试样的要求限制，无法直接在显微镜下对土样加载和进行全过程

维普资讯 http://www.cqvip.com

观察。采用的方法是对多个平行土样施加不同级别的载荷,忽略土样的弹性变形,从直剪仪中取出加载后变形了的土样,然后进行显微实验。土样一次成型,然后分割成若干试样,分别进行直剪试验,结果剪力-位移曲线吻合得很好,表明平行土样具有相同的宏观剪力-位移反应特征。由于它们的颗粒和级配是一样的,可以认为具有相同的初始微观结构。于是,对不同级别荷载作用后的试样,就可观测微观结构的变化情况。

2.2 试样切割与制备

直剪试样变形后的剪切带较清晰,假设试样中部小区域的应力状态如图2a所示,割取如图2b所示小块试样,大小约为2 cm×2 cm×1 cm,并按图2c所示的坐标定义切割面x、y、z,分别观察这3个面在剪切力作用下的微结构反应。

在微结构研究时,必须采用专门的样品制备方法,以保持土的天然结构。本文研究和探讨了制备粉质土微观样品的有效方法。对于粉质土,由于含有一定的粘粒形成其结构联结,干燥方法对土样所产生的最大扰动在于粘土矿物的收缩变形。经实验研究,在多种干燥方法中,经液氮快速冻结后用真空升华,使其干燥的方法效果最佳。

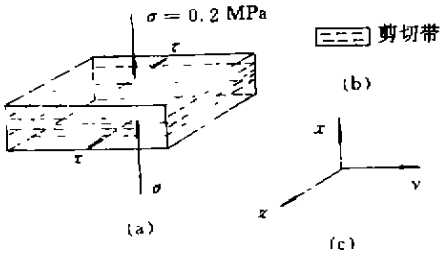


图2 剪切带示意图

本实验中主要研究枝向量、颗粒接触法向、颗粒定向等组构参数,对显微照片的景深要求较高,样品制备中直接采用刀片切断的方法。先将干燥的土样表面磨去0.5 mm左右,再将表面的松动颗粒除掉,然后样品表面喷金,注意标好试验的应力和变形方向。

2.3 扫描电镜拍照

采用电子探针扫描拍照,电子探针设备由同济大学测试中心提供。由测试中心人员编制扫描自动控制程序,选择放大倍数为500倍,扫描面积为1.05 mm×1.08 mm。作了4个土样的x、y、z共12个面的扫描照片。典型的照片组如图3所示。

2.4 计算机图象处理

在同济大学测试中心的协助下,编制了一套颗粒材料图象处理计算机程序。该程序能测量以下各组构量:枝长和枝定向、接触法向、长轴及定向、短轴及定向、颗粒周长和面积、颗粒圆度、孔隙比。

由于得到的组构扫描照片具有较大的景深,很难由计算机自动判断颗粒边界。为此,用透明纸描出颗粒边界,如图4所示,用于组构量统计分析。专门设计了自动统计分析用的颗粒长短轴、边长、周长的算法和枝向量的算法。

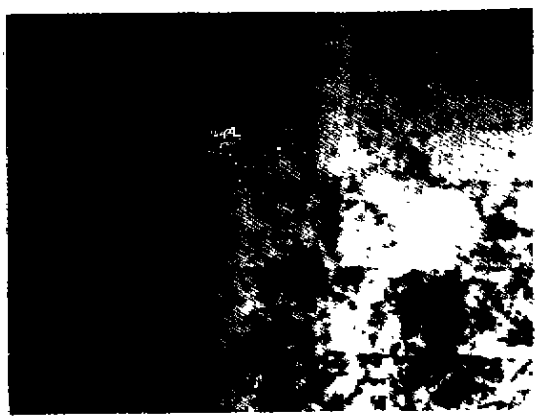


图3 z_p面显微扫描照片(δ = 1.711 mm)

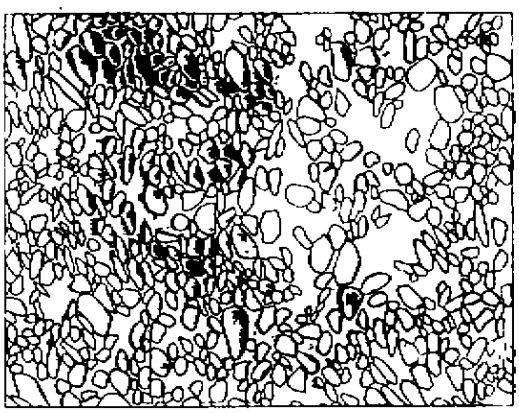


图4 y_q面显微扫描照片描绘(δ = 1.711 mm)

维普资讯 http://www.cqvip.com

3　直剪变形中的组构特征

3.1　组构量的分布型式

对土颗粒长轴定向角、短轴定向角、枝定向角、颗粒接触法向定向角给出了真实统计分布，并采用自行编制的统计程序，用正态分布和 Beta 分布的理论分布曲线对它们进行了拟合。计算结果表明：用正态分布及 Beta 分布来拟合角度组构量是不合适的。为此，采用了二阶张量和四阶张量来表达枝定向 l、法向 n 和颗粒长短轴定向的分布，并定义了各组构量的分布函数。

根据实测数据，分别拟合了土样变形各个阶段各组构量的分布密度函数。典型分布密度函数分别如图 5～图 7 所示，表现了当剪切位移 δ 分别为 0 mm、0.420 mm、1.096 mm 和 1.711 mm（自上向下）时 y 面上的各组构量分布，其中左边为实测分布函数，中间的曲线为二阶张量拟合，右边的曲线为四阶张量拟合。

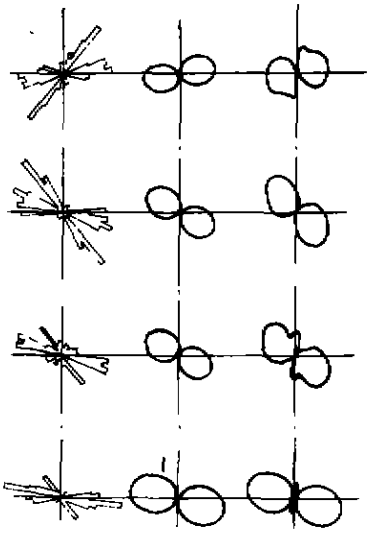


图 5　y 面长轴定向分布密度函数

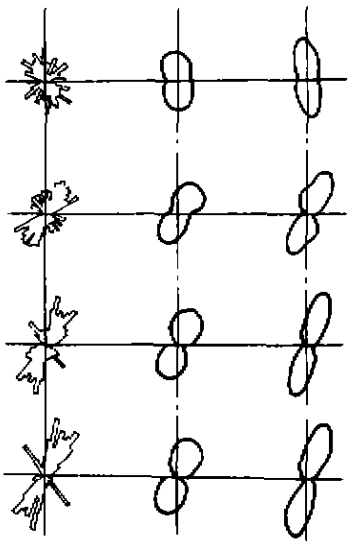


图 6　y 面法向定向分布密度函数

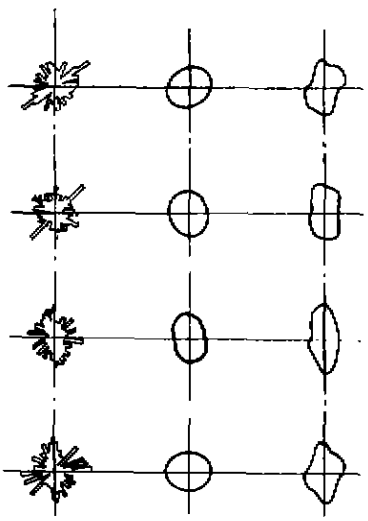


图 7　y 面枝向量定向分布密度函数

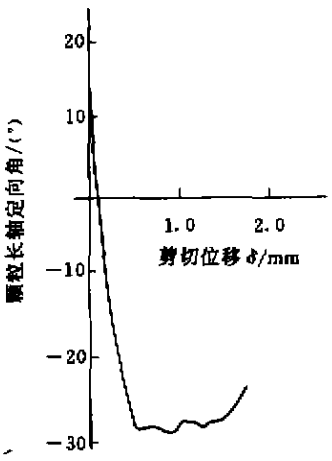


图 8　y 面颗粒长轴定向偏转

维普资讯 http://www.cqvip.com

3.2 剪切变形与组构的关系

尽管直剪试验中土样应力状态较复杂,很难建立直观的剪切变形量与组构变化的定量关系,但实验成果仍反映出明显的规律性特征。

土颗粒长轴的定向是最为敏感的组构量,在剪切变形的初期就发生了较大的偏转并且随即主值固定在剪切方向上,以后在剪切方向上定向的颗粒的百分数随剪切过程而逐渐增大。图 8 为 y 面颗粒定向的旋转情况,可见其最终定向与剪切方向一致,在剪切过程中沿剪切方向的颗粒的百分数逐渐变大。

颗粒接触法向和枝向量也表现出相似的规律。在整个变形过程中,颗粒接触法向主值基本与土应力方向一致。在剪切过程中,与正应力方向一致的接触法向百分数逐渐增大。枝向量分布主值在变形过程中发生偏转,主值方向基本上与接触法向的主值一致。

4 结论与展望

本文采用直剪试验剪切带试样电子探针扫描的方法研究了粉质土在剪切变形过程中的组构特征。本研究在宏观力学实验方法、宏观和微观土样制备、微观扫描图象处理等方面发展和完善了土的微观结构的实验方法。建立了各定向组构量的概率模型,提出角度组构量不宜用正态分布及 Beta 分布来拟合,而应该用二阶张量或四阶张量描述。分析得到各组构量在变形过程中分布的变化情况,能够说明变形过程中组构量分布发展的一般趋势,为进一步建立粉质土微观-宏观相结合的力学模型提供了基础。

在已知 3 个正交平面的组构量分布后,将来准备用计算机模拟颗粒体的三维结构,已经对此问题的算法进行了推导。为了对宏观变形有一个更精确的对比,需要改进宏观力学实验方法,选用单剪试验更合理些,因其土样的各点均处于同一个应力状态,同时还可以测量其体积变化和应变。更深入的研究还需要考虑颗粒的形状和颗粒连接力的影响,而这正是目前的土微结构理论所忽视的。另外,正在进行组构变化的分形几何研究,将是土体微结构研究成果应用于工程实践的一条重要途径。

[参 考 文 献]

[1] 高国瑞. 黄土显微结构分类与湿陷性[J]. 中国科学,1980,30(12):1 203—1 208.

[2] 谭罗荣,张梅英. 一种特殊土的微观结构特性的研究[J]. 岩土工程学报,1982,5(2):26—35.

[3] Oda M. The mechanism of fabric changes during compressional deformation of sand[J]. Soils and Foundations,1972,12(2):1—18.

[4] 吴为义. 颗粒材料组构与本构关系的研究[D]. 武汉:武汉水利电力学院水利系,1988.

[5] 钟晓雄,袁建新. 不同微观组构的颗粒体应力应变关系[J]. 岩土力学,1992,12(2/3):14—23.

[6] 胡瑞林,官园林,李向全,等. 黄土湿陷性的微观结构效应[J]. 工程地质学报,1999,7(2):161—167.

[7] 李小军,张登良. CT 技术在土体结构特性分析中的应用初探[J]. 岩土力学,1999,20(2):62—66.

[8] 王明洋,钱七虎. 爆炸应力波通过颗粒介质的试验与理论的对比研究[J]. 防护工程,1994,14(4):41—47.

[9] 钟晓雄. 颗粒材料力学模型的理论研究及试验验证——微观组构与本构关系[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,1991.

(责任编辑 张淑艳)