

DOI: 10.11779/CJGE201508024

千枚岩碎屑土三轴试验剪切带扩展性状的 CT 研究

左永振^{1, 2}, 程展林^{1, 2}, 赵 娜^{1, 2}

(1. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 土体剪切带的产生和发展是岩土工程界一直关注的问题。对千枚岩碎屑土进行了固结排水剪切试验, 并在试验过程中采用 CT 可视化技术进行了实时监测扫描, 得到同一断面位置不同应变条件下的系列 CT 切片, 从 CT 切片中可观测到试样随应变的增加而出现的明显的剪切带。采用 CT 技术真实再现了三轴试样在轴向力作用下, 局部裂纹扩展逐渐贯穿形成完整剪切带的过程。对 CT 切片进行了 7 个区域的 CT 数平均值和 CT 数标准差统计, 分析认为, 轴向应变在 3%~10% 范围内是剪切带形成和发展的主要阶段, 在应变 3% 前试样主要被压缩, 在应变 3% 后试样在偏应力的作用下逐渐出现微裂隙, 并随应变的增加, 微裂隙越来越明显。CT 数统计值出现微裂隙的应变和宏观观测到微裂隙的应变不对等, 在判断剪切带微裂隙出现应变上建议以 CT 数统计值为准值。

关键词: 千枚岩碎屑土; 剪切带; CT 三轴试验; CT 数

中图分类号: TU 411.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)08-1524-08

作者简介: 左永振(1980-), 男, 工程师, 主要从事粗粒料力学特性试验和 CT 可视化技术研究。E-mail: zuoyongzh@163.com。

Expansion mechanism of shear bands in phyllite detritus soil by CT technology

ZUO Yong-zhen^{1, 2}, CHENG Zhan-lin^{1, 2}, ZHAO Na^{1, 2}

(1. Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: The emergence and development of soil shear bands is one of the concerned problems of geotechnical engineering. Consolidation drained shear tests on phyllite detritus soils are conducted, and the real-time monitoring scan is performed in the test process by using the CT technology. A series of CT pictures at the same section position are obtained under different strain conditions. It can be observed that the shear band obviously appears in the specimen with the increase of strain from CT slices. Using the CT technology, the process from local crack to form the complete shear bands of specimen is reproduced under the axial force. Through the analysis of the average value of CT number and standard deviation of 7 regions in the CT pictures, it can be found that the range of axial strain of 3%~10% is the main stage for formation and development of shear band. The specimen is mainly compression when the strain is below 3%, but when the strain is over 3%, the specimen gradually shows local crack under the deviatoric stress, and the crack is more and more obvious with the increasing strain. The strain is not equal between the CT statistical values and macro cracks through macroscopic observation. It is suggested that the CT statistical values should be regarded as the criterion to determine the strain of micro cracks in the shear band.

Key words: phyllite detritus soil; shear band; CT triaxial test; CT number

0 引言

土体剪切带的产生与发展, 自 20 世纪 60 年代 Skepmton^[1]和 Bjerrum^[2]提出以来, 一直是岩土工程界关注的问题, 对剪切带形成机理的研究是认识土的力学性质、强度特性、渐进破坏过程以及分析实际工程土体稳定性的基础。目前对剪切带的研究还只是初步阶段, 手段也只限于试验研究、理论分析、数值模拟等 3 种方法。在试验研究方面, 研究手段有多样性, 蒋刚等^[3]对粉土进行了普通三轴试验, 研究了剪切带

的破坏形态与影响因素。喻葭临等^[4]采用压力室模型箱对预留剪切面进行了试验研究。董建国等^[5]利用平面应变对粉黏土进行了剪切带试验研究。蒋明镜等^[6]利用电镜扫描和压汞法对软土剪切带进行了微观结构研究。吴羿辰等^[7]采用显微镜对剪切带进行了研究。

CT 技术作为目前最先进的无损探测技术, 国内

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379021, 51309024); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201039)

收稿日期: 2014-11-08

外学者在 90 年代初期将其应用到岩土力学细观结构变化, 目前已经取得了许多优异的成果。国外学者 Desrues 等^[8], Tani^[9]采用 CT 研究砂土排水条件下剪切带的发展, Finno 等^[10]采用立体摄像测量技术研究松砂试样在不排水和排水条件下剪切带的发展, Otani 等^[11]采用工业 X 射线 CT 扫描机研究无侧限压缩土的破坏。但以上的研究中都是在卸载后把试样放到 CT 机上进行扫描, 均存在循环加卸载对试样的影响, 没有达到实时 CT 扫描的目标。施斌等^[12]利用 CT 技术对直剪和水平荷载试验进行了内部裂隙发育过程的研究。文献[13~15]对粉质黏土、红黏土、冻土等进行了三轴应力状态下的 CT 研究, 文献[16~19]对原状膨胀土、黄土等采用 CT 三轴仪进行了细观结构方面的研究。但是由于仪器和当时 CT 技术的限制, 上述中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、后勤工程学院的研究均是对 CT 三轴试样的横断面进行了分析, 没有监测到试样破坏时的剪切带形状。

本文采用长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室的岩土力学 CT 可视化系统, 采用 CT 三轴试验仪, 对千枚岩碎屑土三轴试样进行实时扫描, 获得 CT 纵断面图像, 得到三轴试样在轴向剪切力作用下, 剪切带的起裂与发育过程, 并对剪切带的 CT 数进行统计, 得到了一些有益的结论。

1 CT 技术方法

CT技术是利用X射线穿透物体断面进行旋转扫描, 收集X射线经该层面不同物质衰减后的信息, 将信息放大和模数转换后, 由计算机在CT探测空间范围内, 与空间某点相关的各个方向射线进行空间解算, 得出与该点X射线衰减系数 μ 直接关联的CT数值, 从而形成物体层面的 μ 数字图像。

为了显著反映物质衰减系数的差别, 通常用水的衰减系数 μ_w 做参照定义CT数(用 H 表示), 据此表征物质对X射线的吸收特性, H 与衰减系数 μ 存在如下关系:

$$H_{\mu} = \frac{\mu - \mu_w}{\mu_w} \times 1000 \quad , \quad (1)$$

式中, μ , μ_w 分别为物体和水的衰减系数。当 $\mu = \mu_w$, 水的CT值为 $0H_u$; 当 $\mu = \mu_a$, $\mu_a = 0$ (μ_a 为空气的衰减系数)时, 空气的CT值为 $-1000H_u$ 。水和空气的CT值不受射线能量的影响, 因此可用它们来标定CT值。一般岩土介质的CT值为 $-1024 \sim +3071H_u$, 物质的密度越大, 其CT数也越大。

2 试验方法

试验仪器采用长江科学院水利部岩土力学与工程

重点实验室的岩土力学 CT 可视化系统(图 1), CT 机为 Sensation 40 螺旋扫描, 最大扫描直径 700 mm, 扫描最薄层厚 0.6 mm, 重建矩阵 512×512 , 可视密度分辨率 0.3%。该 CT 机通过断面扫描可获得物体任意部位、平面的高分辨率、高清晰度的图像, 并显示 3D 图像, 通过 CT 数的定量分析, 可研究剪切带扩展演化过程。

三轴试验仪器为专制配套 CT 三轴仪, 试验尺寸 $\Phi 101 \times 200$ mm, 最大围压 1.0 MPa, 最大轴向荷载 100 kN。CT 试验时在 CT 三轴仪上备样, 完成后将 CT 三轴仪放置在 CT 可视化系统移动平台, 进行应变控制式 CT 三轴试验, 当加载至对应应变时进行实时 CT 扫描, 并记录对应的轴向应变和体积应变。



图 1 岩土力学三轴试验 CT 可视化系统

Fig. 1 CT visualization system of soil mechanics triaxial tests

试验用料采用灰黑色千枚岩碎屑土, 试验用样过 20 mm 筛, 粒组中 20~5 mm 粒组含量占比为 12%, 小于 0.075 mm 的细粒组含量占比为 46.7%, 不均匀系数 $C_u=453$, 曲率系数 $C_c=0.2$, 级配曲线见图 2, 按土工试验规程^[20]命名为粉土质砂。基本物理性指标: 最大干密度为 2.19 g/cm^3 , 天然含水率为 1.33%, 比重为 2.74, 液限为 29.7%, 塑限为 13.5%。试验干密度为 2.05 g/cm^3 , 试验含水率 8.0%, 对应的饱和度 65.2%。

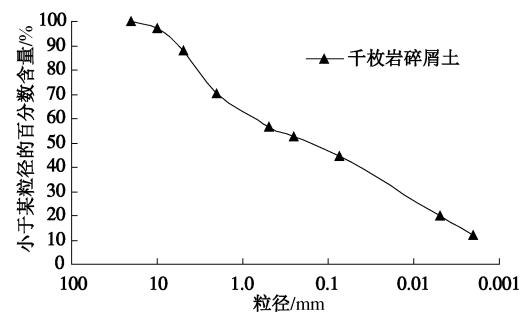


图 2 千枚岩碎屑土级配曲线

Fig. 2 Grading curve of phyllite detritus soil

3 试验成果

对千枚岩碎屑土非饱和试样进行三轴剪切试验,

围压 0.2, 0.4, 0.6 MPa 三级, 得到的宏观应力应变曲线见图 3, 各扫描点的宏观应力状态见表 1。三轴剪切试验完成后的剪切带形状见图 4, 可见不同围压下均形成了明显的剪切带。

试验得到的抗剪强度指标黏聚力 c 值为 132 kPa, 内摩擦角 φ 值为 26.3° 。

表 1 试验各扫描点对应的宏观应力状态

Table 1 Macro stress states of scanning spots

扫描 次数	$\sigma_3 = 0.2 \text{ MPa}$		$\sigma_3 = 0.4 \text{ MPa}$		$\sigma_3 = 0.6 \text{ MPa}$	
	ε_a /%	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ /MPa	ε_a /%	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ /MPa	ε_a /%	$(\sigma_1 - \sigma_3)$ /MPa
1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.6	0.371	1.1	0.767	0.9	0.835
3	1.2	0.692	2.3	0.999	2.0	1.157
4	1.9	0.739	3.2	1.037	3.1	1.292
5	2.6	0.720	4.3	1.074	4.1	1.369
6	3.2	0.680	5.3	1.018	5.3	1.376
7	3.9	0.640	6.4	0.960	6.2	1.350
8	4.5	0.591	7.6	0.928	7.8	1.302
9	5.0	0.555	8.7	0.861	8.6	1.282
10	6.3	0.515	9.8	0.828	9.5	1.245
11	7.4	0.487	10.4	0.810	10.4	1.193
12	8.4	0.458	11.0	0.782	11.2	1.162
13	9.5	0.425	12.3	0.766	12.4	1.129
14	11.0	0.395	13.6	0.749	13.4	1.110
15	12.6	0.371	14.4	0.735	14.1	1.114
16	14.2	0.358	15.2	0.735	14.9	1.095

注: σ_3 为周围压力, $\sigma_1 - \sigma_3$ 为轴向偏应力, ε_a 为轴向应变。

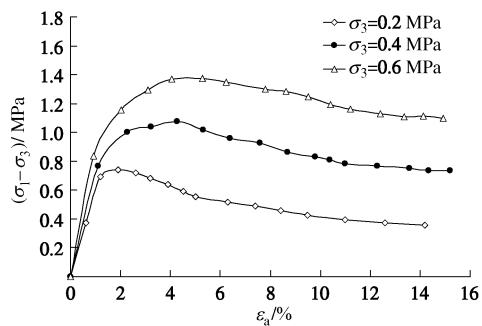


图 3 千枚岩碎屑土的应力 - 应变曲线

Fig. 3 Relationship between stress and strain of phyllite soil

为描述三轴剪切试验过程中剪切带的扩展性状, 以围压 0.2 MPa 的试验为例详细说明, 围压 0.2 MPa 的各应力状态扫描得到的 CT 切片见图 5。图 5 是试样的同一纵断面位置处不同轴向应变条件下的切片图。

从试验过程可以看出, 随着应变的增加, 试样的中部逐渐鼓起, 使试样整体形成圆鼓形状。分析发现, 由于受到端部的约束, 端部侧向位移最小, 试样中部

颗粒侧向位移最大, 向两端部逐渐递减, 导致试样破坏时呈鼓形。

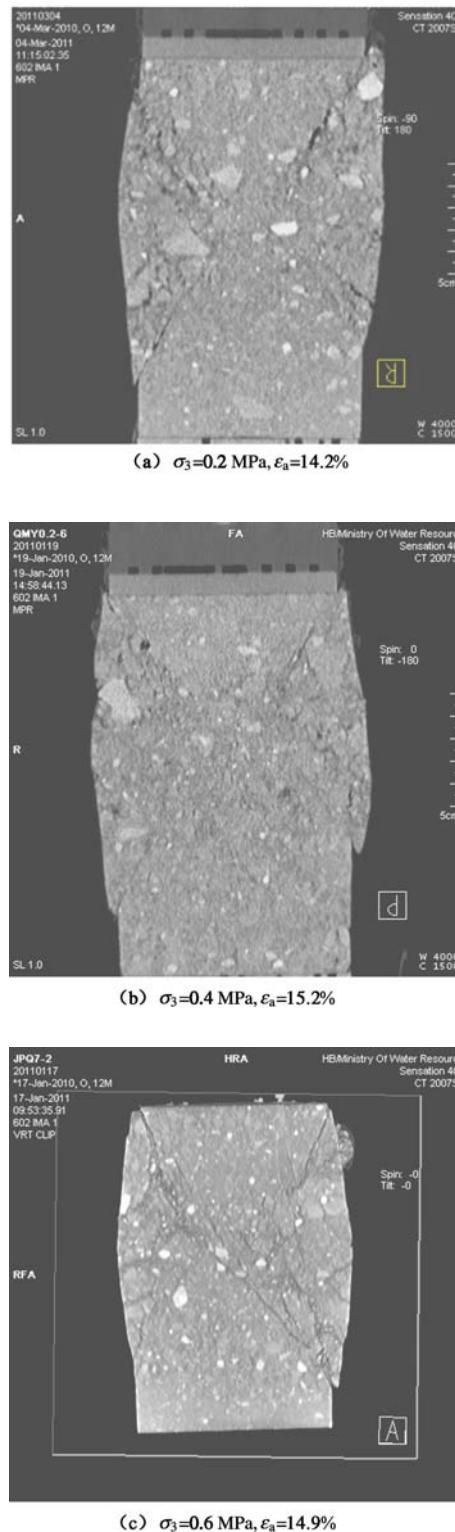


图 4 三轴剪切试验后的剪切带形状

Fig. 4 Shapes of shear band after triaxial shear tests

试样随着轴向应变的增加逐渐出现了明显的剪切带。轴向应变开始达到 3.2% 时, 试样微微鼓出, 应变 5.0% 时, 试样中上部开始出现微裂隙, 应变 7.4% 时,

在试样中上部出现呈 70° 的局部主倾斜裂纹, 次生裂纹不明显; 当应变达到 9.5% 时, 侧向鼓出变大, 两条主裂纹交叉贯通, 随着应变继续增大, 伴随着两条交叉主裂纹的发展, 周围出现许多次生微裂纹, 当达到 11.0% 时, 形成明显的 X 型剪切带, 此时试样发生塑性剪切破坏。这是一个局部裂纹扩展逐渐贯穿形成完整滑面的过程, 在贯穿过程中, 由于千枚岩碎屑土成分及其非均匀性, 有时还伴随着多条次生裂纹贯穿的现象。

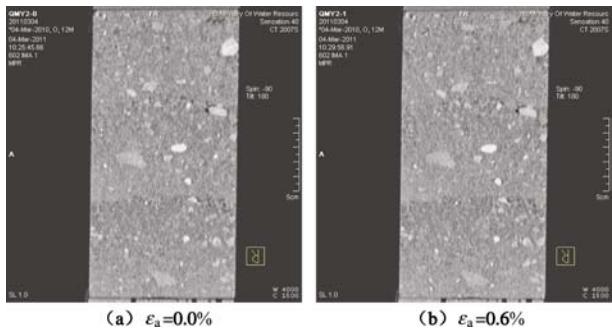
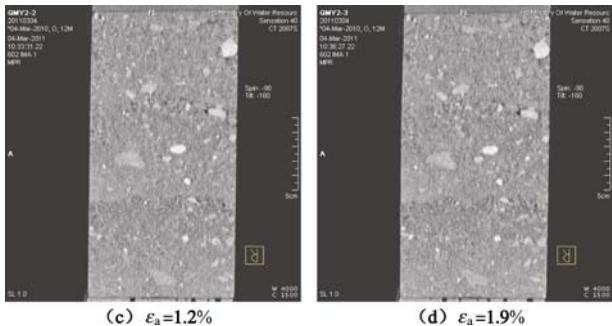
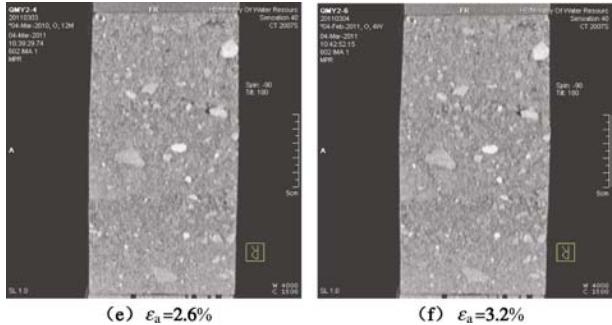
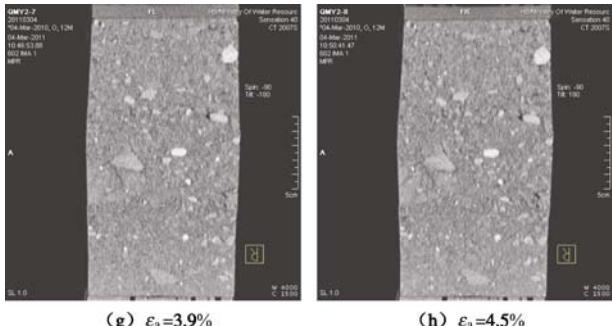
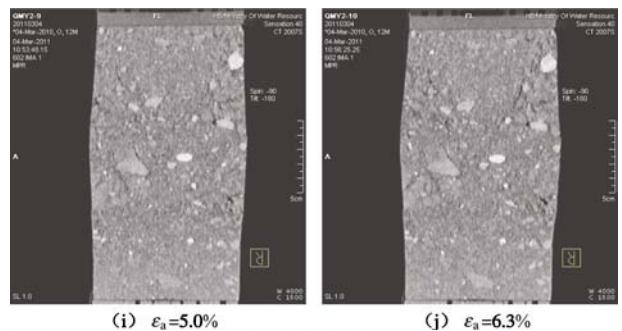
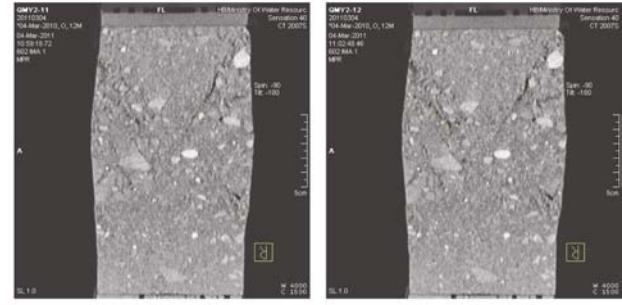
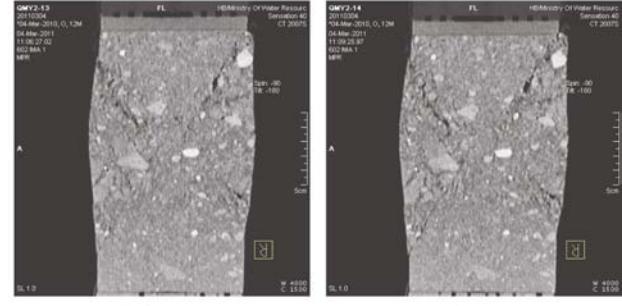
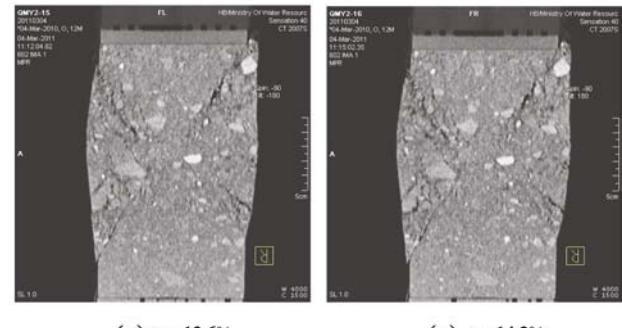
(a) $\varepsilon_a=0.0\%$ (b) $\varepsilon_a=0.6\%$ (c) $\varepsilon_a=1.2\%$ (d) $\varepsilon_a=1.9\%$ (e) $\varepsilon_a=2.6\%$ (f) $\varepsilon_a=3.2\%$ (g) $\varepsilon_a=3.9\%$ (h) $\varepsilon_a=4.5\%$ (i) $\varepsilon_a=5.0\%$ (j) $\varepsilon_a=6.3\%$ (k) $\varepsilon_a=7.4\%$ (l) $\varepsilon_a=8.4\%$ (m) $\varepsilon_a=9.5\%$ (n) $\varepsilon_a=11.0\%$ (o) $\varepsilon_a=12.6\%$ (p) $\varepsilon_a=14.2\%$

图 5 CT 三轴断面扫描成果

Fig. 5 CT scan results of triaxial tests

4 结果分析

为了对剪切带的扩展进行量化分析, 在 CT 纵断面上选择试样边界内的所有区域, 标记为 3D1, 见图 6 所示。选择剪切带扩展明显的 4 个区域 (见图 6 所示), 分别标记为 3D2, 3D3, 3D4, 3D5。同时, 在试样上下端部选择 2 个区域, 标记为 3D6, 3D7。对每个区域前后 16 个 CT 切片进行 CT 数平均值和 CT 数标准差的统计, 见表 2 所示。

表 2 断面扫描 CT 数统计成果
Table 2 Statistics of CT number of section scan

应变 /%	3D1		3D2		3D3		3D4		3D5		3D6		3D7	
	平均值	标准差												
0.0	1475.0	322.1	1483.6	308.1	1433.4	320.4	1469.8	280.6	1470.9	397.7	1421.2	269.9	1506.7	291.0
0.6	1482.9	319.4	1486.1	304.0	1437.9	311.7	1466.0	270.5	1474.8	394.6	1413.1	281.7	1490.1	273.7
1.2	1479.2	316.4	1472.3	302.2	1439.6	329.9	1475.8	276.1	1476.2	385.5	1418.8	266.4	1506.1	267.3
1.9	1471.8	320.6	1470.7	322.3	1442.5	320.0	1448.0	270.3	1476.7	389.6	1406.6	255.4	1514.0	258.5
2.6	1464.6	326.0	1450.3	340.4	1431.3	328.3	1435.5	276.3	1450.2	385.9	1407.9	258.6	1486.6	264.9
3.2	1458.1	328.0	1441.4	328.5	1423.9	327.7	1438.6	301.0	1445.3	388.0	1398.4	268.7	1499.4	269.3
3.9	1446.4	337.1	1413.8	341.0	1409.5	338.4	1417.3	297.6	1434.0	388.1	1392.9	260.4	1538.6	283.1
4.5	1438.4	338.3	1394.1	367.4	1388.8	350.8	1403.3	315.1	1411.1	400.1	1389.3	257.8	1526.8	277.4
5.0	1428.8	348.7	1377.3	372.7	1357.1	365.2	1406.6	341.6	1416.8	394.7	1397.5	275.9	1508.6	286.2
6.3	1419.2	353.7	1303.5	420.8	1300.4	394.8	1371.4	330.7	1388.5	382.4	1425.6	283.8	1533.2	282.0
7.4	1406.8	366.3	1249.1	433.7	1258.2	450.7	1367.5	355.6	1380.4	425.2	1429.7	279.2	1535.9	273.3
8.4	1409.0	373.8	1219.9	455.4	1260.1	465.2	1360.8	388.5	1332.7	409.3	1449.5	281.5	1552.2	286.4
9.5	1407.2	390.1	1197.0	480.7	1272.2	508.8	1354.4	391.2	1339.6	419.8	1436.0	283.7	1555.6	280.4
11.0	1395.7	386.9	1177.5	493.8	1251.6	541.0	1327.9	414.6	1317.0	412.1	1423.6	282.1	1538.4	289.1
12.6	1392.7	395.8	1199.9	478.3	1260.5	557.0	1305.7	434.8	1315.1	415.0	1446.3	291.8	1536.7	290.3
14.2	1392.7	399.9	1176.4	481.9	1249.7	565.5	1312.9	430.9	1300.9	439.7	1448.1	284.4	1568.8	301.3

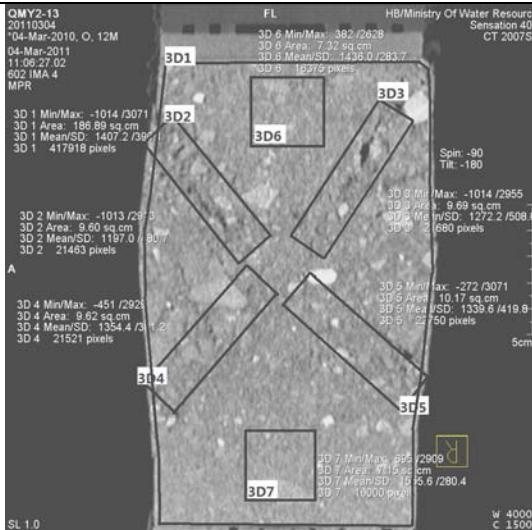


图 6 CT 数提取区域示意图

Fig. 6 Sketch for CT number of selected region

区域 3D2~3D5 每个长度 6.5 cm, 宽度 1.5 cm, 面积约 9.7 cm^2 , 区域 3D6~3D7 每个长度宽度均为 2.7 cm, 面积约 7.3 cm^2 。因纵断面上试样高度被压缩, 选择区域时尽量保证该区域在前后 CT 切片上是相同位置, 以减小误差。

区域 3D1 的 CT 数平均值与应变的关系见图 7, CT 数标准差与轴向应变的关系见图 8。区域 3D2~3D5 的 CT 数平均值与应变的关系见图 9, CT 数标准差与应变的关系见图 10。区域 3D6~3D7 的 CT 数平均值与应变的关系见图 11, CT 数标准差与应变的关系见

图 12。

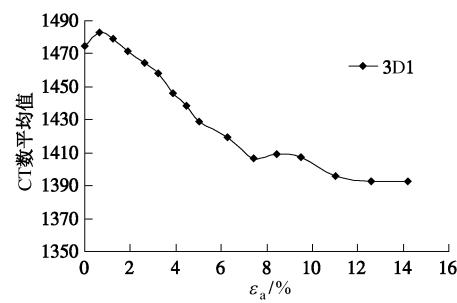


图 7 实时扫描 CT 平均值与应变关系

Fig. 7 Relationship between average CT number and strain

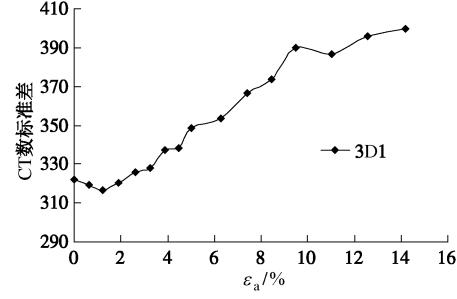


图 8 实时扫描 CT 标准差与应变关系

Fig. 8 Relationship between standard deviation of CT number and strain

结合表 2 和图 7, 8 可以看出, 区域 3D1 的 CT 数平均值随着应变的增加, 在应变 2% 范围内先略有增加, 在应变 2%~10% 范围内逐渐降低, 应变超过 10% 后又基本保持不变或降低较小, 而 CT 数标准差

在应变 2% 范围内先稍微降低, 在应变 2%~10% 范围内逐渐增加, 应变超过 10% 后又基本保持不变或增加较小。上述 CT 数统计值的规律, 与宏观应力应变曲线(图 3)相对应, 在轴向应变 1.9% 时达到峰值, 其后偏应力值逐渐降低, 在应变达到 11% 后降低速率变缓。

结合表 2 和图 9, 10 可以看出, 剪切带扩展明显区域 3D2~3D5 的 CT 数平均值和标准差表现出与区域 3D1 相同的规律。随着应变的增加, CT 数平均值在应变 3% 范围内略有增加或基本保持不变, 应变在 3%~10% 范围内随应变逐渐降低, 应变超过 10% 后又基本保持不变或降低较小。与此对应, CT 数标准差在应变 3% 范围内略有降低或基本保持不变, 应变在 3%~10% 范围内时随应变逐渐增大, 应变超过 10% 后又基本保持不变或增加较小。

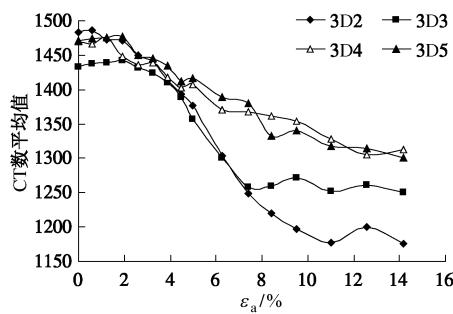


图 9 实时扫描 CT 平均值与应变关系

Fig. 9 Relationship between average CT number and strain

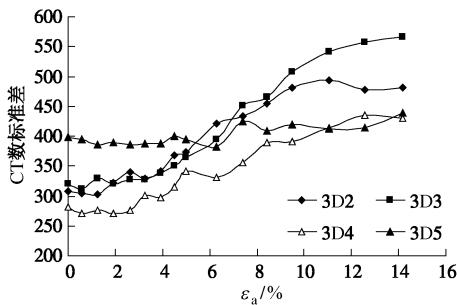


图 10 实时扫描 CT 标准差与应变关系

Fig. 10 Relationship between standard deviation of CT number and strain

分析认为, 在三轴剪切过程中, 由于试验偏应力的增加, 在试样内部试样首先被压缩, 表现为 CT 数平均值增加, 标准差降低, 宏观上表现出剪缩状态; 然后随着偏应力的增加, 试样内部逐渐出现微裂隙, 导致 CT 数平均值逐渐降低, 标准差增加, 直至试样出现明显的 X 型剪切带, CT 数平均值和标准差趋于稳定值, 宏观上表现出剪胀状态。

结合表 2 和图 11, 12 可以看出, 试样上下端部区域 3D6~3D7 的 CT 数平均值整体趋势上略有增加,

CT 数标准差基本保持不变, 数据的起伏跳跃主要是由于区域跟踪时位置选择的不完全相同带来的差异。这验证了在三轴剪切过程中, 试样上下端部存在一个“弹性核”^[21], 在此区域内, 在剪切过程中试样只被压缩。

此“弹性核”区域外的试样中部区域, 在竖向压缩的同时, 在偏应力的作用下逐渐形成剪切带, 试样的宏观应变主要由该区域的变形调整引起。

从 CT 数平均值和 CT 数标准差与应变的关系曲线看, 应变超过 3% 后, 试样在偏应力的作用下逐渐出现微裂隙, 导致 CT 数平均值降低, CT 数标准差增加。而从 CT 切片图中看, 肉眼可见出现微裂隙的应变为 6.3% (图 5 (j))。两者出现微裂隙的应变不对等, 这说明在肉眼可观测到的微裂隙出现前, 通过 CT 数平均值和 CT 数标准差已经可以监测试样内部的微裂隙的产生。在对试样剪切带的扩展研究时, 建议采用 CT 数统计值变化幅度较大时为微裂隙起裂点。

围压为 0.4, 0.6 MPa 下的 CT 数统计值表现出相同的规律。

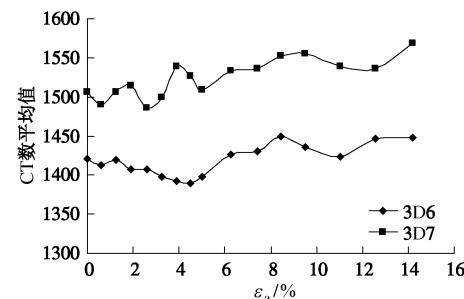


图 11 实时扫描 CT 平均值与应变关系

Fig. 11 Relationship between average CT number and strain

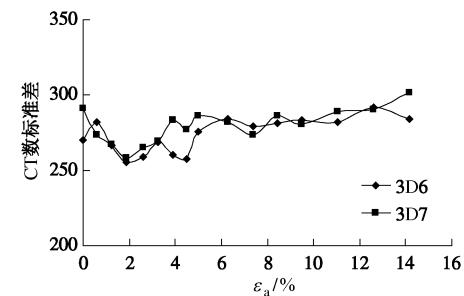


图 12 实时扫描 CT 标准差与应变关系

Fig. 12 Relationship between standard deviation of CT number and strain

5 结 论

本文重点介绍了将 CT 技术应用到千枚岩碎屑土三轴剪切试验剪切带扩展性状研究取得的成果, 旨在说明这是一种行之有效的研究方法, 在试验技术上较

本世纪初中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、后勤工程学院进行的三轴 CT 实时细观试验^[13-19]有了较大的进步。

采用目前先进的 CT 技术, 对千枚岩碎屑土非饱和样进行了固结排水剪切试验, 并在试验过程中进行了实时 CT 扫描, 得到了试验过程中一系列不同轴向应变条件下的 CT 切片。通过对 CT 切片进行分析可知:

(1) CT 切片清晰, 可明显观测到试样随应变的增加逐渐出现的明显的剪切带, 这是一个局部裂纹扩展逐渐贯穿形成完整滑面的过程。

(2) 采用 CT 数平均值和 CT 数标准差的统计值可以定量的描述试样内部的剪切带的产生与扩展过程。

(3) 轴向应变在 3%~10% 范围内是剪切带形成和发展的主要阶段, 在应变 3% 前试样主要被压缩, 在应变 3% 后试样在偏应力的作用下逐渐出现微裂隙, 并随应变的增加, 微裂隙越来越明显, 最终形成完整的剪切带。

(4) CT 数统计值出现微裂隙的轴向应变和宏观观测到微裂隙的轴向应变不对等, 在判断剪切带微裂隙出现轴向应变上建议以 CT 数统计值为准值。

参考文献:

- [1] SKEPMTON A W. Long-term stability of clay slopes[J]. *Géotechnique*, 1964, **14**(2): 77~102.
- [2] BJERRUM L. Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1967, **93**(5): 3~49.
- [3] 蒋刚, 李苏春. 南京粉土与粉质黏土的剪切带三轴试验与性状分析[J]. 南京工业大学学报, 2008, **30**(5): 7~11. (JIANG Gang, LI Su-chu. Performance analysis on shear band under triaxial test of silt and silty clay in Nanjing[J]. *Journal of Nanjing University of Technology*, 2008, **30**(5): 7~11. (in Chinese))
- [4] 喻葭临, 孙逊, 于玉贞, 等. 结构性土中剪切带扩展的模型试验研究[J]. 清华大学学报, 2010, **50**(3): 367~371. (YU Jia-lin, SUN Xun, YU Yu-zhen, et al. Experimental study of the evolution of shear bands in structured soil[J]. *Journal Tsinghua University*, 2010, **50**(3): 367~371. (in Chinese))
- [5] 董建国, 李蓓, 袁聚云, 等. 上海浅层褐黄色粉质黏土剪切带形成的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 23~27. (DONG Jian-guo, LI Bei, YUAN Ju-yun, et al. Study of test on the formation of shear bands in Shanghai yellowish dark brown silty clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, **23**(1): 23~27. (in Chinese))
- [6] 蒋明镜, 彭立才, 朱合华, 等. 珠海海积软土剪切带微观结构试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(7): 2017~2024. (JIANG Ming-jing, PENG Li-cai, ZHU He-hua, et al. Microscopic investigation on shear band of marine clay in Zhuhai[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(7): 2017~2024. (in Chinese))
- [7] 吴羿辰, 杨在峰, 马玉周, 等. 哈密地区夹白山韧性剪切带显微构造特征[J]. 新疆地质, 2010, **28**(2): 154~156. (WU Yi-chen, YANG Zai-feng, MA Yu-zhou, et al. Micaostructure characteristics and dynamic analysis of the Jilabaishan ductile Shear Zone Xingjiang Hami District[J]. *Xingjiang Geology*, 2010, **28**(2): 154~156. (in Chinese))
- [8] DESRUES J, CHAMBON R, MOKNI M, et al. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography[J]. *Géotechnique*, 1996, **46**(3): 529~546.
- [9] TANI K. X-ray computed tomography technique to observe shear banding in dense sands[C]// Proc of Int Symp on Deformation and Progressive Failure in Geomechanics. Nagoya, 1997: 315~320.
- [10] FINNO R J, HARRIS W W, MOONEY M A, et al. Shear bands in plane strain compression of loose sand[J]. *Géotechnique*, 1997, **47**(1): 149~165.
- [11] OTANI J, MUKUNOKI T, OBARA Y. Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils[J]. *Soils and Foundations*, 2000, **40**(2): 111~118.
- [12] 施斌, 姜洪涛. 在外力作用下土体内部裂隙发育过程的 CT 研究[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(5): 537~541. (SHI Bin, QIANG Hong-tao. A study on the development of failures inside soil under the external force using CT technique[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, **22**(5): 537~541. (in Chinese))
- [13] 孙红, 葛修润, 牛富俊, 等. 上海粉质黏土的三轴 CT 实时细观试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(24): 4559~4664. (SUN Hong, GE Xiu-run, NIU Fu-jun, et al. Real-Time CT meso-testing on Shanghai silty clay subjected to Trilaxial Loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, **24**(24): 4559~4664. (in Chinese))
- [14] 刘增利, 李洪升, 朱元林, 等. 冻土初始与附加细观损伤的 CT 识别模型[J]. 冰川冻土, 2002, **24**(5): 676~680.

- (LIU Zeng-li, LI Hong-sheng, ZHU Yuan-lin, et al. A distinguish model for initial and additional micro-damages on frozen soil[J]. Journal Ournal of Glaciology and Geocryology, 2002, **24**(5): 676 - 680. (in Chinese))
- [15] 黄质宏, 朱立军, 蒲毅彬, 等. 三轴应力条件下红黏土力学特性动态变化的 CT 分析[J]. 岩土力学, 2004, **25**(8): 1215 - 1219. (HUANG Zhi-Hong, ZHU Li-Jun, PU Yi-bin, et al. CT analysis of dynamic change of mechanical properties of red clay under triaxial stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(8): 1215 - 1219. (in Chinese))
- [16] 卢再华, 陈正汉, 蒲毅彬. 原状膨胀土损伤演化的三轴 CT 试验研究[J]. 水利学报, 2002, **6**: 106 - 112. (LU Zai-hua, CHEN Zheng-han, PU Yi-bin. Study on damage evolution of natural expansive soil with computerized tomography during triaxial shear test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, **6**: 106 - 112. (in Chinese))
- [17] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201 - 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 201 - 272. (in Chinese))
- [18] 陈正汉, 方祥位, 朱元青, 等. 膨胀土和黄土的细观结构及其演化规律研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(1): 1 - 11. (CHEN Zheng-han, FANG Xiang-wei, ZHU Yuan-qing, et al. Research on meso-structures and their evolution laws of expansive soil and loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(1): 1 - 11. (in Chinese))
- [19] 方祥位, 申春妮, 陈正汉, 等. 原状 Q2 黄土 CT-三轴浸水试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(10): 98 - 106. (FANG Xiang-wei, SHEN Chun-ni, CHEN Zheng-han, et al. Triaxial wetting tests of intact Q2 loess by computed tomography[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(10): 98 - 106. (in Chinese))
- [20] SL237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL237—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [21] 程展林, 吴良平, 丁红顺. 粗粒土组构之颗粒运动研究[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊): 29 - 33. (CHENG Zhan-lin, WU Liang-ping, DING Hong-shun. Research on movement of particle of fabric of granular material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S0): 29 - 33. (in Chinese))