

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.111



平面应变条件下含孔洞土样受内压作用的 变形破坏过程

王学滨^{a,b}, 田锋^b, 董伟^b, 侯文腾^b, 余斌^b

(辽宁工程技术大学 a. 计算力学研究所; b. 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要:在不同加载速率下,利用自主研发的平面应变模型加载及观测系统对平面应变条件下含孔洞土样进行双轴压缩实验。垂压由试验机施加,土样受到的内压和侧压作用由气囊施加。在对土样施加内压和侧压后、进行位移控制加载前,操控数码相机对喷涂了散斑的土样表面图像进行拍摄,以记录土样在位移控制加载过程中的全部变形过程。利用数字图像相关方法获得土样的位移场,利用能较好滤掉位移场噪声的局部位移最小二乘拟合方法获得最大剪切应变的分布及演变规律。为了定量获得最大剪切应变且分析方便,根据清晰剪切带位置,布置曲折测线并在其两侧布置平直测线。研究发现:当加载速率较低且纵向应变达到一定值时,拉破坏导致土样的孔洞顶部和底部发展出高角度应变局部化带,而当加载速率较高时,未出现上述现象;当纵向应变较高时,在孔洞表面附近,随着向孔洞表面的逐渐靠近,大多数剪切带内测线上的最大剪切应变逐渐增加,而大多数带外测线上的最大剪切应变则逐渐下降;当纵向应变较高时,在离孔洞表面较远处,随着向孔洞表面的逐渐靠近,大多数剪切带内测线上的最大剪切应变逐渐增加,而大多数带外测线上的最大剪切应变则变化复杂。

关键词:孔洞;土样;剪切带;双轴压缩;数字图像相关方法;剪切应变;加载速率

中图分类号:TU454 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)06-0027-09

Experimental measurements of deformation and failure processes of plane strain clay specimens with holes and subjected to internal pressures

Wang Xuebin^{a,b}, Tian Feng^b, Dong Wei^b, Hou Wenteng^b, Yu Bin^b

(a. Institute of Computational Mechanics; b. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, P. R. China)

Abstract: Biaxial compressive tests of cuboid low liquid-limit clay specimens with holes under plane strain for different loading rates were conducted by use of designed loading and measuring system. The vertical pressures were applied by the testing machine, and the internal and lateral pressures were applied by gasbags. To obtain the full deformation process of clay specimens with holes during the displacement-controlled loading process, a digital camera is used to record speckle images of clay specimens with holes

收稿日期:2019-04-30

基金项目:国家自然科学基金(51574144);辽宁省百千万人才工程(2017)

作者简介:王学滨(1975-),男,博士,教授,主要从事工程材料变形、破坏及稳定性研究,E-mail:wxbbb@263.net.

Received:2019-04-30

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 51574144); Liaoning BaiQianWan Talents Program (2017)

Author brief: Wang Xuebin (1975-), PhD, professor, main research interests: deformation, failure and stability of engineering materials, E-mail: wxbbb@263.net.

after internal and lateral pressures were applied and before the displacement-controlled loading was conducted. Displacements can be obtained by use of the digital image correlation method. Distributions and evolution of the maximum shear strains were measured by use of least-square fitting of local displacements that can better eliminate noises in displacements. To obtain quantitative maximum shear strains, curve monitored lines were arranged according to positions of clear shear bands, and two straight monitored lines were arranged at both sides of each curve monitored line. The following results were obtained: when the longitudinal strain reaches a certain value, high-angle strain localization bands from the top and bottom of the hole for lower loading rates developed, due to tensile failure. While there are no high-angle strain localization bands for higher loading rates, when the longitudinal strain shear strains of most monitored lines outside shear bands have decreasing tendencies as they approach the hole surface. When the longitudinal strain is higher and monitored lines are far away from the hole surface, the maximum shear strains of most monitored lines in shear bands have decreasing tendencies as they approach the hole surface. The change of the maximum shear strains of monitored lines outside shear bands are complex as they approach the hole surface.

Keywords: hole; clay specimen; shear band; biaxial compressive; digital image correlation method; shear strain; loading rate

在土木、水利及油气存储等工程中,一些洞室常受内压作用,例如,水工涵洞表面和油气存储腔体表面^[1-2]。研究受内压作用洞室周围岩土体的变形破坏规律对于有关灾害的机理分析及预防具有重要理论及实际意义。

针对含孔洞模型或试样的室内实验是研究洞室周围岩土体变形、破坏规律的重要手段之一。这方面已经有大量文献报道,其结果通常比数值模拟和理论研究可靠性更高。

数字图像相关方法(Digital Image Correlation, DIC)是一种光测力学方法,具有实时观测、非接触、光路简单和高精度测量等优点,在室内实验研究中发挥着重要作用^[3-4]。目前,将DIC方法用于不含孔洞模型或试样的变形、破坏规律研究较为多见。然而,将DIC方法用于含孔洞模型或试样的变形、破坏规律研究的不多。马少鹏等^[5]利用DIC方法研究了单轴压缩条件下含圆孔大理岩试样最大剪切应变的分布及演变规律,发现应变局部化开始于应力-应变曲线峰值之前且接近于峰值的时刻。刘招伟等^[6]利用DIC方法研究了单轴压缩条件下含孔洞岩石试样的破坏过程,发现最大剪切应变的演变规律能较好地反映岩石试样的变形过程。王学滨等^[7]利用DIC方法研究了单轴压缩条件下含孔洞土样的位移和应变增量的分布及演变规律,发现拉伸应变局部化带的宽度为1.2~1.6 mm。

在现有针对含孔洞模型或试样的室内实验研究中,模型或试样多为单轴应力状态,孔洞通常不受内

压作用,而实际工程中受内压作用洞室周围岩土体处于三维应力状态,一般可简化为平面应变模型进行力学研究。此外,目前,基于DIC方法的针对含孔洞模型或试样的变形、破坏过程分析多为根据云图的定性、粗略分析,缺乏定量、统计分析。

本文利用自主研发的平面应变模型加载及观测系统,开展了不同加载速率条件下含孔洞土样双轴压缩实验。利用DIC方法获得土样的位移场,利用能较好滤掉位移场噪声的局部位移最小二乘拟合方法^[8]获得最大剪切应变的分布及演变规律。为了定量获得最大剪切应变和分析方便,根据清晰剪切带位置,布置曲折测线和平直测线,对各测线上最大剪切应变进行统计分析,深化了对含孔洞土样变形及破坏规律的认识。

1 土样制备、实验及计算

1.1 土样制备

实验用土取自某高层建筑工地距地表5 m处,液限 $w_L=42.20\%$,塑限 $w_p=25.22\%$,为低液限黏土。含孔洞土样的制备采用固结法,其过程为:1)将土干燥后碾碎,并过孔径0.5 mm的筛子;2)将土和水按照质量比3:1进行混合,充分搅拌成塑性状态,注入模具;3)待模具中土体固结并干燥至一定程度后,拆除模具,制成约10 cm×10 cm×4.7 cm的长方体土样;4)在长方体土样的最大表面中心处沿与该面垂直的方向钻直径3 cm的通孔,制成含孔洞土样(简称为土样);5)选择一个含孔洞土样,在表面均

匀涂抹白色颜料薄层,待晾干后,在白色表面随机喷涂直径为4~10像素的黑色斑点,以满足黑色斑点直径为4~10像素时散斑图质量较好的要求^[9]。

1.2 实验过程

首先,将土样置于自主研发的平面应变模型加载装置(图1)内的中间底垫块上,在土样上方放置垂直应力加载垫块,其前、后尺寸与土样前、后尺寸一致,而左、右尺寸略小于土样左、右尺寸,并将左、右侧压加载板置于左、右底垫块之上;其次,将前、后玻璃板分别置于土样的前、后方,且玻璃板的两侧卡在侧箱内壁上,使玻璃板与土样表面贴合,以确保土样处于平面应变状态;其次,将内囊通过后玻璃板中心孔放入土样孔洞内,并将侧囊放入侧箱,安装侧箱顶板;其次,用螺栓连接侧箱与连接板,以限制侧箱的水平运动,保证侧囊施加的侧压保持水平;最后,将侧囊、内囊的气嘴与高压管线相连,通过气瓶对其充气,以实现对其左、右表面及孔洞表面施加侧压和内压。土样上、下表面的压力(垂压)由试验机施加,通过调节试验机下压头的移动速率,即加载速率,实现对不同土样进行位移控制加载。在土样变形过程中,通过操控数码相机对土样喷涂了散斑的表面图像进行拍摄,每幅图像的大小为2 112像素×

过程中的全部变形过程。为了便于DIC方法的应用,在土样表面出现明显宏观裂纹时停止实验。在相同实验条件下,进行3~5个土样实验,共进行70余个土样的实验,从中选出内压、侧压和含水率条件类似且加载速率不同的4个土样进行研究,即56[#]、17[#]、2[#]及8[#]土样,以获得剪切带发生、发展过程受加载速率的影响规律。各土样的基本参数及实验条件见表1。

表1 土样的基本参数及实验条件

Table 1 Basic parameters and experimental conditions of clay specimens

| 编号 | 内压/MPa | 侧压/MPa | 长度×宽度×厚度/(mm×mm×mm) | 加载速率/(mm·min ⁻¹) | 含水率/% |
|-----------------|--------|--------|---------------------|------------------------------|-------|
| 56 [#] | 0.161 | 0.180 | 100.42×101.39×47.15 | 2.0 | 18.69 |
| 17 [#] | 0.166 | 0.185 | 99.88×100.22×47.25 | 5.0 | 18.53 |
| 2 [#] | 0.162 | 0.181 | 100.66×100.85×47.55 | 7.5 | 17.77 |
| 8 [#] | 0.162 | 0.182 | 101.53×100.38×47.54 | 10.0 | 18.71 |

1.3 应变场的计算

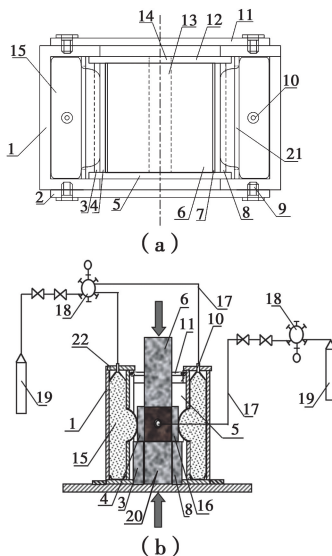
首先,利用基于Newton-Raphson迭代的DIC方法^[10]获得各测点的位移;然后,利用局部位移最小二乘拟合方法(简称为最小二乘拟合方法)获得应变。

基于Newton-Raphson迭代的DIC方法求位移的步骤为:首先,对物体变形前后的两幅散斑图像进行亚像素插值;然后,在给定位移初值后,通过反复计算Hessian矩阵的逆矩阵和Jacobian向量对位移进行更新。当相关系数满足阈值时,停止更新,此时的位移即为所求测点的位移。

最小二乘拟合方法求应变的步骤为:首先,在已知位移场的情况下,以各测点(间隔为 Δ)为中心选择一个局部子域(即应变计算窗口),见图2,对应变计算窗口的位移进行一次多项式拟合,获得位移函数;然后,对位移函数进行求导,获得各测点的应变。

有关计算参数如下:子区尺寸为31像素×31像素,测点间隔 Δ 为10像素,应变计算窗口大小为5测点×5测点($M=2$,相当于41像素×41像素),56[#]、17[#]、2[#]及8[#]土样中布置的测点数目分别为16 383(127行×129列)、16 383(127行×129列)、17 161(131行×131列)、16 002(126行×127列)个。

最大剪切应变(γ_{\max})为标量,常用于表征应变局部化现象,其与水平线应变 ϵ_x 、垂直线应变 ϵ_y 及剪切应变 γ_{xy} 有关^[11]。



注:1.侧箱;2.前连接板;3.左底垫块;4.左侧压加载板;5.前玻璃板;6.垂直应力加载垫块;7.含孔洞土样;8.右底垫块;9.螺栓;10.气嘴;11.后连接板;12.后玻璃板;13.内囊;14.后玻璃板孔洞;15.侧囊;16.右侧压加载板;17.高压管线;18.六通阀;19.气瓶;20.中间底垫块;21.侧箱侧板;22.侧箱顶板

图1 平面应变模型加载系统示意图

Fig. 1 Schematic of the loading system under plane strain

2 112像素。在对土样施加内压和侧压后、进行位移控制加载前,操控数码相机对土样喷涂了散斑的表面图像开始进行拍摄,以记录土样在位移控制加载

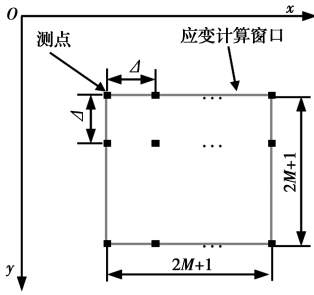


图2 测点周围的应变计算窗口

Fig. 2 Calculating window around a monitored point

2 实验结果分析

2.1 纵向应力-纵向应变曲线

图3是4个土样的平均纵向应力(σ_a)-纵向应变(ε_a)曲线,应力利用试验机施加于土样的载荷除以土样原始横截面积求得,应变利用试验机的加载速率、加载时间和土样原始高度求得。

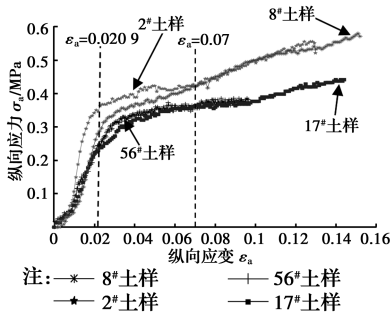
图3 土样的 ε_a - σ_a 曲线

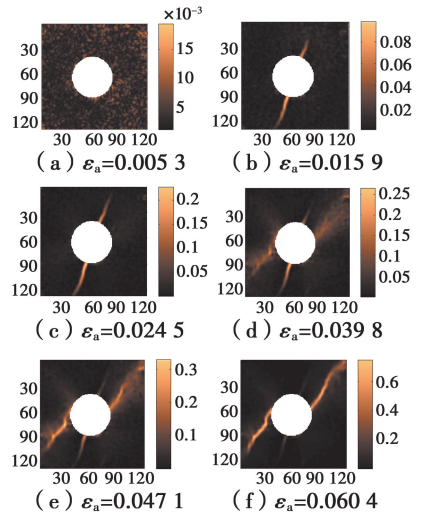
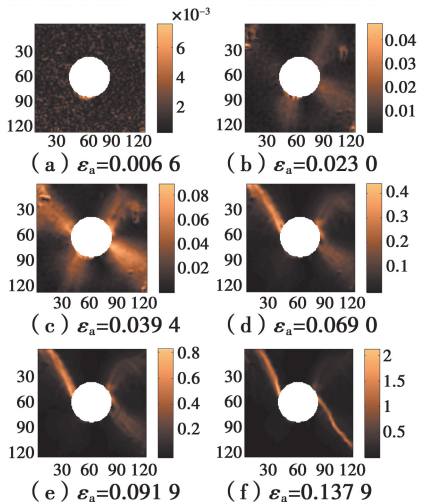
Fig. 3 Stress-strain curves of clay specimens

由图3可以发现,4个土样均经历了两个阶段:近似线性阶段和硬化阶段。由于土样表面出现明显宏观裂纹时即停止实验,所以,土样未来得及经历明显的软化阶段。在近似线性阶段,各土样的 σ_a - ε_a 曲线变化规律几乎类似,但在 ε_a 相同时,2#土样的 σ_a 较其他土样高,且在 $\varepsilon_a = 0.0209$ 时便开始进入硬化阶段,这可能与其含水率稍低有关,土样稍硬;在硬化阶段,在 ε_a 相同时,加载速率较大的土样 σ_a 较高,这与常识相符。

2.2 土样 γ_{\max} 的分布及演变规律

图4和图5给出了56#和8#土样不同 ε_a 时 γ_{\max} 的分布规律(各子图左方和下方的数字分别代表各测点的行数和列数),文中涉及的其他土样破坏过程与此类似,限于篇幅,不再赘述。可以发现:

1)随着 ε_a 的增加, γ_{\max} 的分布经历了近似均匀变形向局部化变形的转化过程。在土样加载初期, γ_{\max} 呈斑点状随机分布,且 γ_{\max} 较小(图4(a)和图

图4 56#土样不同 ε_a 时 γ_{\max} 的分布Fig. 4 Distributions of γ_{\max} for different ε_a of the clay specimen No. 56图5 8#土样不同 ε_a 时 γ_{\max} 的分布Fig. 5 Distributions of γ_{\max} for different ε_a of the clay specimen No. 8

5(a)),可以近似地认为土样变形均匀。当应变较小时,DIC的计算结果容易出现奇异点,土样中即使有应变集中,奇异点也会对此现象有所掩盖。应当指出,由于未对施加内压和侧压之前的土样进行拍摄,所以,DIC的计算结果中不包括由内压和侧压引起的应变集中。随着 ε_a 的增加,出现了多块或多条模糊、宽阔的应变不均匀分布区域(图4(b)~(d)和图5(b)~(d)),并进一步发展成1~2条清晰、狭窄的应变强烈集中区域,即剪切应变局部化带(剪切带)(图4(f)和图5(f)),导致土样发生破坏。

2) γ_{\max} 的演变规律较为复杂,最终的1~2条清晰的剪切带是由多块或多条应变不均匀分布区域通过竞争发展而成的,有时难以事先判断出来。

56# 土样剪切带的发展演化过程如图 4 所示,当 $\epsilon_a=0.0053$ 时, γ_{\max} 的分布呈斑点状随机分布,且 γ_{\max} 较小,土样的变形基本上是均匀的。由图 4 可以发现,当 $\epsilon_a \leq 0.0304$ 时,土样处于近似线性阶段。当 $\epsilon_a=0.0159$ 时,由孔洞顶部偏右和底部偏左各发展出了一条高角度应变局部化带,相比之下,孔洞底部偏左的较长,土样仍处于近似线性阶段。随着 ϵ_a 的增加,上述两条高角度应变局部化带进一步发展,土样仍处于近似线性阶段。当 $\epsilon_a=0.0398$ 时,孔洞顶部偏右的高角度应变局部化带变得不清晰,在孔洞左帮偏上、右帮偏上和左帮偏下各发展出了一条模糊的且较宽阔的应变不均匀区域。此时,土样已进入硬化阶段。当 $\epsilon_a=0.0471$ 时,孔洞的顶部偏右和底部偏左的高角度应变局部化带变得更不清晰。当 $\epsilon_a=0.0604$ 时,孔洞右帮偏上的应变不均匀区域发展成通过土样右上角的剪切带,孔洞左帮偏下的应变不均匀区域发展成另一条剪切带,并导致土样最终发生“/”形剪切破坏。

8# 土样剪切带的发展演化过程如图 5 所示。土样处于近似线性阶段及之前的现象不再赘述。当 $\epsilon_a=0.0230$ 时,在孔洞左帮偏上、右帮偏上、左帮偏下及右帮偏下发展出了较不清晰的应变不均匀区域,土样仍处于近似线性阶段。当 $\epsilon_a=0.0394$ 时,上述 4 块应变不均匀区域的应变进一步发展。此时,土样已进入硬化阶段。当 $\epsilon_a=0.0690$ 时,孔洞左帮偏上的应变不均匀区域发展成通过土样左上角的剪切带,孔洞右帮偏下的应变不均匀区域发展成另外一条剪切带。当 $\epsilon_a=0.0919$ 时,上述两条剪切带的应变进一步发展。当 $\epsilon_a=0.1379$ 时,两条剪切带变得更清晰,并导致土样最终发生“\”形剪切破坏。

应当指出,由图 4 和图 5 仅能定性地描述剪切带的发展演化规律。为此,下文将通过布置测线的方式进一步揭示剪切带的发展演化规律。

2.3 测线的布置

由图 4(f)和图 5(f)可以发现,狭长且最终导致土样发生剪切破坏的剪切带并非笔直。为了能捕捉到剪切带发展过程中剪切带行进路线上不同位置的 γ_{\max} ,有必要布置曲折测线。同时,为了比较剪切带内、外 γ_{\max} 的不同,有必要在上述曲折测线之外布置测线。

分别选择 56# 土样孔洞顶部偏右的高角度应变局部化带 A、17# 土样右帮偏上的剪切带 B、2# 土样左帮偏上的剪切带 C 及 8# 土样右帮偏下的剪切带

D 布置测线(图 6)。平直测线与曲折测线的线性拟合结果平行。同时,建立直角坐标系 sos' , s 轴与一条平直测线重合, s 轴正向指向孔洞。应当指出,曲折测线是根据狭长剪切带的最终位置确定的。56#、17#、2# 及 8# 土样中的曲折测线分别命名为 A_0 、 B_0 、 C_0 及 D_0 , 两侧的平直测线分别命名为 A_1 和 A_2 、 B_1 和 B_2 、 C_1 和 C_2 及 D_1 和 D_2 。

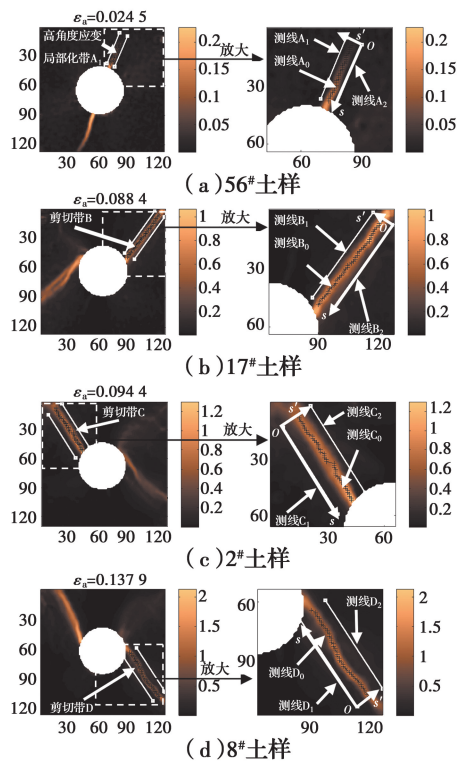


图 6 剪切带内外测线的位置

Fig. 6 Positions of monitored lines in shear bands and outside

2.4 测线上 γ_{\max} 的分布、演变规律及统计

图 7~图 10 分别给出了 4 个土样不同 ϵ_a 时各测线上 γ_{\max} - s 曲线。图 11 给出了 56# 土样不同 ϵ_a 时测线 A_0 上 ϵ_x - s 、 ϵ_y - s 及 γ_{xy} - s 曲线。

对于 56# 土样(图 7),当 $\epsilon_a=0.0053$ 时,测线 A_0 及两侧测线 A_1 和 A_2 上 γ_{\max} 的分布较均匀,且 γ_{\max} 较小。当 $\epsilon_a=0.0159$ 时,测线 A_0 、 A_1 及 A_2 上 γ_{\max} 的均值分别为 0.0285、0.0100 及 0.0065。显然,测线 A_0 上 γ_{\max} 远大于测线 A_1 和 A_2 ,这说明孔洞顶部偏右的高角度应变局部化带已经形成。此时,离孔洞表面越近(s 越大离孔洞表面越近),测线 A_0 上 γ_{\max} 越大,这说明孔洞顶部偏右的高角度应变局部化带是从孔洞表面向外发展的。当 $\epsilon_a=0.0245$ 时,与 $\epsilon_a=0.0159$ 时相比,测线 A_0 上 γ_{\max} 有所增加。当 $\epsilon_a=0.0398$ 时,与 $\epsilon_a=0.0245$ 时相比,测线 A_0 上 γ_{\max} 下降,这说明在上述过程中高角度应变局部化带上的应变正在释放。由图 11 可以发现,当 $\epsilon_a =$

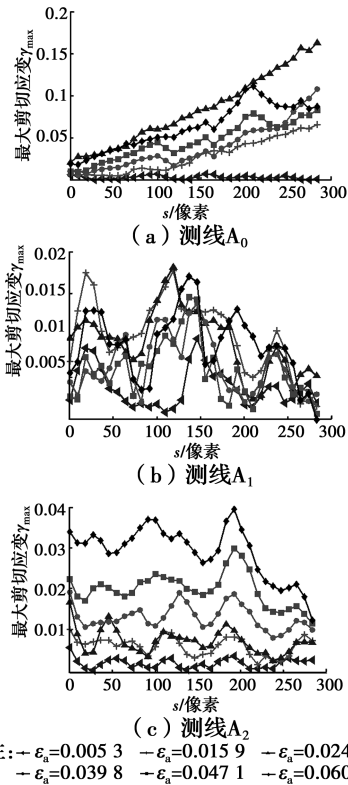


图 7 56[#] 土样不同 ε_a 时测线 A₀、A₁ 及 A₂ 上 γ_{\max} -s 曲线

Fig. 7 γ_{\max} -s curves at monitored lines A₀, A₁ and A₂ for different ε_a of the clay specimen No. 56

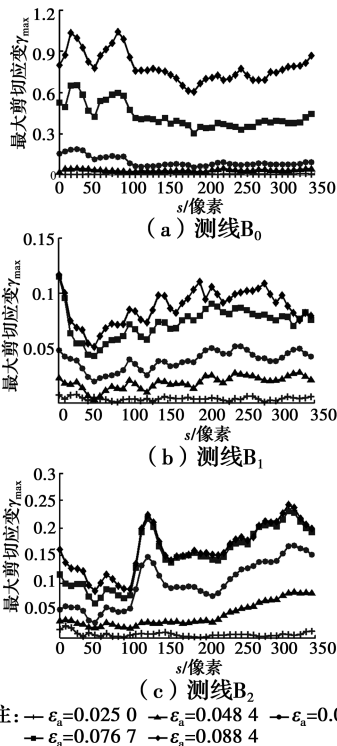


图 8 17[#] 土样不同 ε_a 时测线 B₀、B₁ 及 B₂ 上 γ_{\max} -s 曲线

Fig. 8 γ_{\max} -s curves at monitored lines B₀, B₁ and B₂ for different ε_a of the clay specimen No. 17

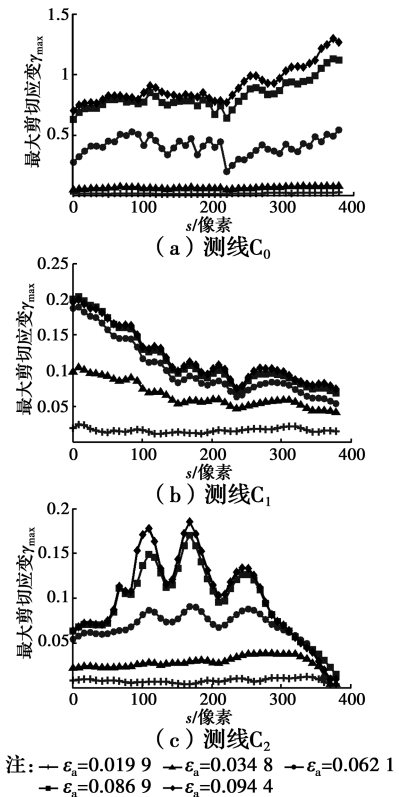


图 9 2[#] 土样不同 ε_a 时测线 C₀、C₁ 及 C₂ 上 γ_{\max} -s 曲线

Fig. 9 γ_{\max} -s curves at monitored lines C₀, C₁ and C₂ for different ε_a of the clay specimen No. 2

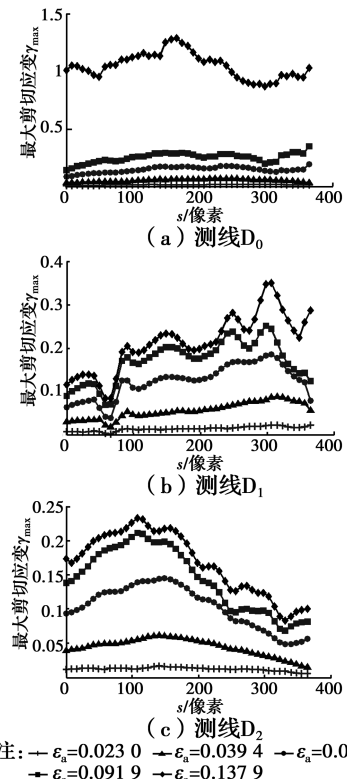


图 10 8[#] 土样不同 ε_a 时测线 D₀、D₁ 及 D₂ 上 γ_{\max} -s 曲线

Fig. 10 γ_{\max} -s curves at monitored lines D₀, D₁ and D₂ for different ε_a of the clay specimen No. 8

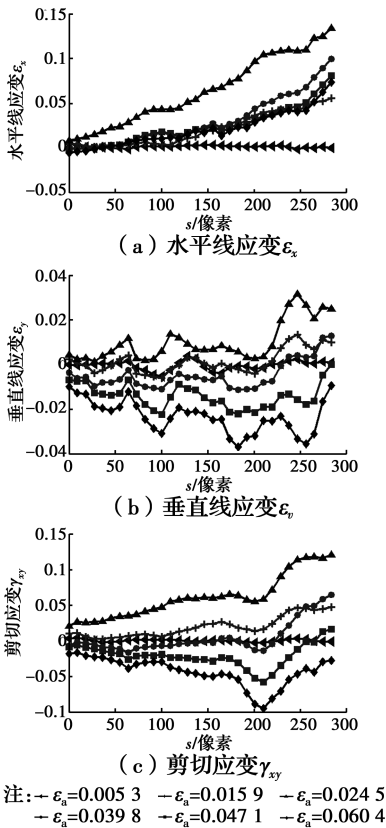


图 11 56# 土样不同 ϵ_a 时测线 A_0 上 ϵ_x-s 、 ϵ_y-s 及 $\gamma_{xy}-s$ 曲线
 Fig. 11 ϵ_x-s curve, ϵ_y-s curve and $\gamma_{xy}-s$ curve at the monitored line A_0 for different ϵ_a of the clay specimen No. 56

0.039 8 时,与 $\epsilon_a=0.024 5$ 时相比,测线 A_0 上各测点的 ϵ_x 、 ϵ_y 及 γ_{xy} 均下降了,相比之下, ϵ_x 下降得更明显,说明上述高角度应变局部化带是由拉破坏导致。当 $\epsilon_a \geq 0.039 8$ 时,随着 ϵ_a 的增加,测线 A_0 上大部分测点的 γ_{max} 有上升趋势。对于测线 A_1 ,随着 ϵ_a 的增加,不同 ϵ_a 时测线 A_1 的 γ_{max} 波动均较大,变化复杂。对于测线 A_2 ,随着 ϵ_a 的增加,测线 A_2 上大部分测点的 γ_{max} 逐渐增加。例如,当 ϵ_a 从 0.039 8 增至 0.060 4 时,测线 A_2 上 $s=192.1$ 像素处 γ_{max} 从 0.019 05 增至 0.039 56。

对于 17# 土样(图 8),当 $\epsilon_a=0.025 0$ 时,测线 B_0 及两侧测线 B_1 和 B_2 上 γ_{max} 的分布较均匀,且 γ_{max} 较小。当 $\epsilon_a=0.048 4$ 时,与 $\epsilon_a=0.025 0$ 时相比,测线 B_0 、 B_1 和 B_2 上 γ_{max} 的分布不均匀。此时,随着向孔洞表面的靠近,测线 B_2 上 γ_{max} 有增大的趋势。此时,随着向孔洞表面的靠近,测线 B_1 上 γ_{max} 先下降后上升;在离孔洞较远位置,测线 B_1 与土样右上角的应变不均匀区域相交,因受该区域的影响较大,导致离孔洞较远位置的 γ_{max} 较大;对于孔洞附近的测点($s \geq 330$ 像素),随着向孔洞表面的靠近,测线 B_1 上 γ_{max} 有下降趋势,这应与剪切带外弹性应变

降低(卸荷)有关。当 $\epsilon_a=0.059 2$ 时,测线 B_0 上 γ_{max} 分布不均匀,此时,测线 B_0 上 γ_{max} 几乎都比测线 B_1 和 B_2 上的大;在离孔洞较远位置,测线 B_0 上 γ_{max} 较大,这应与土样右上角的破坏有关,剪切带 B 由土样右上角向孔洞发展;随着向孔洞表面的靠近,测线 B_2 上 γ_{max} 先下降后有上升趋势,在离孔洞较远位置,测线 B_2 与剪切带 B 相交,测线 B_2 上 γ_{max} 受剪切带 B 的影响较大,导致离孔洞较远处的 γ_{max} 较大;在 $s=120.7$ 像素处 γ_{max} 出现了高峰,这应与该测点附近出现的剪切带分叉现象有关;对于孔洞附近测点($s \geq 313.9$ 像素),随着向孔洞表面的靠近,测线 B_2 上 γ_{max} 有下降趋势,这应与剪切带外弹性应变降低(卸荷)有关。当 $\epsilon_a=0.076 7$ 时,对于孔洞附近测点($s \geq 281.7$ 像素),随着向孔洞表面的靠近,测线 B_0 上 γ_{max} 有上升趋势,这可能是由于越靠近孔洞表面, γ_{max} 集中越严重。此时,与 $\epsilon_a=0.059 2$ 时相比,剪切带有变陡趋势,在离孔洞较远的位置,剪切带位置变化不大,而在离孔洞较近的位置,剪切带位置变化很大。随着 ϵ_a 的增加,各测线上 γ_{max} 逐渐增加。

对于 2# 土样(图 9),当 $\epsilon_a=0.019 9$ 时,测线 C_0 及两侧测线 C_1 和 C_2 上 γ_{max} 的分布较均匀,且 γ_{max} 较小。当 $\epsilon_a=0.034 8$ 时,与 $\epsilon_a=0.019 9$ 时相比,测线 C_0 、 C_1 和 C_2 上 γ_{max} 的分布较不均匀。此时,随着向孔洞表面的靠近,测线 C_1 上 γ_{max} 有下降趋势;在离孔洞较远位置,测线 C_1 与土样左上角的应变不均匀区域相交,因受该区域的影响较大,导致离孔洞较远位置的 γ_{max} 较大。随着向孔洞表面的靠近,测线 C_2 上 γ_{max} 呈先上升后下降趋势。当 $\epsilon_a=0.062 1$ 时,测线 C_0 上 γ_{max} 分布不均匀,在相同坐标情况下,测线 C_0 上 γ_{max} 比测线 C_1 和 C_2 上的都大。此时,随着向孔洞表面的靠近,测线 C_0 上 γ_{max} 先上升,再波动式下降,后上升。对于孔洞附近测点($s \geq 286.5$ 像素),随着向孔洞表面的靠近,测线 C_0 上 γ_{max} 有上升趋势,这可能是由于越靠近孔洞表面, γ_{max} 集中越严重,这说明剪切带 C 是从孔洞表面向外发展的。此时,对于孔洞附近测点($s \geq 278$ 像素),随着向孔洞表面的靠近,测线 C_1 上 γ_{max} 有下降趋势,这应与剪切带外弹性应变降低(卸荷)有关。此时,测线 C_2 上 γ_{max} 先上升再波动,后有下降趋势,在测线 C_2 上 $s=109.5$ 、 168.5 和 252 像素处 γ_{max} 出现了高峰,这应与这些测点附近出现的剪切带分叉现象有关。此时,对于孔洞附近测点($s \geq 320.2$ 像素),随着向孔洞表面的靠近,测线 C_2 上 γ_{max} 有下降趋势,其原因与测线 C_1 上的类似。随着 ϵ_a 的增加,各测线上大部分测点的 γ_{max} 逐渐增加。对于测线 C_2 ,当 $\epsilon_a=0.094 4$

时,与 $\epsilon_a = 0.0869$ 时相比,当 $s \leq 50.5$ 像素和 $s \geq 278$ 像素时,这些测点的 γ_{\max} 发生下降,这可能与带外弹性应变降低较大有关。

对于8#土样(图10),当 $\epsilon_a = 0.0230$ 时,测线 D_0 及两侧测线 D_1 和 D_2 上 γ_{\max} 的分布较均匀,且 γ_{\max} 较小。当 $\epsilon_a = 0.0394$ 时,测线 D_0 上 γ_{\max} 的分布仍较均匀,而对于测线 D_1 和 D_2 ,随着向孔洞表面的靠近, γ_{\max} 有增大的趋势。当 $\epsilon_a = 0.0394$ 时,随着向孔洞表面的靠近,测线 D_0 上 γ_{\max} 先有上升趋势后下降。此时,对于孔洞附近测点($s \geq 306.5$ 像素),随着向孔洞表面的靠近,测线 D_1 上 γ_{\max} 有下降趋势,在 $s = 306.5$ 像素附近,测线 D_1 上 γ_{\max} 较大,其两边 γ_{\max} 都较小,这与该区域附近出现的应变不均匀区域有关。此时,对于孔洞附近测点($s \geq 140.8$ 像素),随着向孔洞表面的靠近,测线 D_2 上 γ_{\max} 有下降趋势,在 $s = 140.8$ 像素附近,测线 D_2 上 γ_{\max} 较大,其两边 γ_{\max} 都较小,这与该区域附近出现的应变不均匀区域有关。当 $\epsilon_a = 0.0690$ 时,测线 D_0 上 γ_{\max} 分布不均匀,测线 D_0 的 γ_{\max} 比测线 D_1 和 D_2 上的大。此时,随着向孔洞表面的靠近,测线 D_0 上 γ_{\max} 先上升至基本不变,再下降,后上升。当 $\epsilon_a = 0.0690$ 时,测线 D_0 上中部区域的 γ_{\max} 较大,高达0.1779,这说明剪切带D启动于测线 D_0 中部某一位置,逐渐向外发展。此时,对于孔洞附近测点($s \geq 314.8$ 像素),随着向孔洞

表面的靠近,测线 D_0 上 γ_{\max} 有上升趋势,这与孔洞表面一定程度的 γ_{\max} 集中有关。当 $\epsilon_a = 0.0690$ 时,剪切带D与当 $\epsilon_a = 0.0394$ 时出现的应变不均匀区域相比,剪切带较陡。当 $\epsilon_a = 0.0690$ 时,对于孔洞附近测点($s \geq 306.5$ 像素),随着向孔洞表面的靠近,测线 D_1 上 γ_{\max} 有下降趋势,这应与剪切带外弹性应变降低(卸荷)有关。此时,对于孔洞附近测点($s \geq 331.3$ 像素),随着向孔洞表面的靠近,测线 D_2 上 γ_{\max} 有上升趋势,这应与孔洞表面附近出现的应变不均匀区域有关。

表2给出了4个土样不同 ϵ_a 时各条测线上 γ_{\max} 的平均值。可以发现,对于56#土样,测线 A_0 上 γ_{\max} 远大于带外测线 A_1 和 A_2 ,测线 A_0 上 γ_{\max} 的均值是带外的2.15~10.78倍;当 $\epsilon_a = 0.0245$ 时,其倍数最大;随着 ϵ_a 的增加,测线 A_0 上 γ_{\max} 的均值先下降再增加;测线 A_1 上 γ_{\max} 有类似的演变规律,而测线 A_2 上 γ_{\max} 的均值一直增加,这应与孔洞右帮偏上发展出的剪切带有关。对于17#土样,测线 B_0 上 γ_{\max} 的均值是带外的0.81~9.02倍; ϵ_a 越大,其倍数越大;在测线 B_0 上 γ_{\max} 快速增加的同时,两侧测线 B_1 、 B_2 上 γ_{\max} 也在变化,但变化不大。2#土样和8#土样表现出与17#土样相类似的规律,不再赘述。

表2 土样不同 ϵ_a 时不同测线上 γ_{\max} 的平均值

Table 2 Mean of γ_{\max} at different monitored lines for different ϵ_a of clay specimens

| 测线 | 56# 土样 ϵ_a 值 | | | | 测线 | 17# 土样 ϵ_a 值 | | | | 测线 | 2# 土样 ϵ_a 值 | | | | 测线 | 8# 土样 ϵ_a 值 | | | |
|-------|-----------------------|------|------|------|-------|-----------------------|------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|-------|-------|----------------------|-------|-------|--------|
| | 2.45 | 3.98 | 4.71 | 6.04 | | 4.84 | 5.92 | 7.67 | 2.93 | | 3.48 | 6.21 | 8.69 | 9.44 | | 3.94 | 6.90 | 9.19 | 13.79 |
| A_0 | 8.30 | 3.86 | 4.61 | 6.29 | B_0 | 3.31 | 9.55 | 42.71 | 78.41 | C_0 | 5.99 | 40.29 | 82.13 | 90.51 | D_0 | 5.50 | 14.58 | 25.09 | 126.31 |
| A_1 | 0.93 | 0.64 | 0.59 | 0.90 | B_1 | 1.84 | 3.83 | 7.25 | 8.69 | C_1 | 6.54 | 10.19 | 11.54 | 11.92 | D_1 | 5.67 | 12.42 | 17.12 | 21.52 |
| A_2 | 0.77 | 1.34 | 2.01 | 2.93 | B_2 | 4.07 | 9.83 | 14.95 | 16.13 | C_2 | 2.78 | 6.60 | 9.49 | 10.02 | D_2 | 4.44 | 10.32 | 14.35 | 16.86 |

下面,对孔洞表面附近和离孔洞较远处测线上 γ_{\max} 的演变规律进行综合分析。

首先,对孔洞表面附近测线上 γ_{\max} 的演变规律进行分析。对于剪切带内而言,当 ϵ_a 较高时,土样测线上 γ_{\max} 随着向孔洞表面的靠近而增加,这应与孔洞表面附近的应变集中现象有关。例如,当 $\epsilon_a \geq 0.0767$,且 $s \geq 281.7$ 像素时,17#土样的测线 B_0 ,当加载速率较低时,土样中的一些原生缺陷或裂隙能够得到发展,而当加载速率较高时,这些内部缺陷来不及发展。对于剪切带外而言,大多数测线上 γ_{\max} 随着向孔洞表面的靠近而逐渐下降,这应与剪切带内损伤导致带外弹性应变降低(卸荷)有关。离孔洞表面越近,带外卸荷程度越大。

然后,对离孔洞较远处测线上 γ_{\max} 的演变规律进行分析。对于剪切带内而言,除了17#土样,当 ϵ_a 较高时,其他土样测线上 γ_{\max} 随着向孔洞表面的靠近而增加,这与越靠近孔洞 γ_{\max} 的集中程度越大有关。对于17#土样中的剪切带B,随着向孔洞表面的靠近,测线 B_0 上 γ_{\max} 先上下波动,再下降,这应与剪切带B由土样右上角向孔洞表面发展有关。对于剪切带外而言,测线上 γ_{\max} 随着向孔洞表面的靠近,变化规律较为复杂。例如,随着向孔洞表面的靠近,当 $\epsilon_a \geq 0.0484$,且 $s \leq 48.29$ 像素时,17#土样的测线 B_2 上 γ_{\max} 有下降的趋势,当 $\epsilon_a \geq 0.0348$,且 $s \leq 109.5$ 像素时,2#土样的测线 C_2 上 γ_{\max} 有上升的趋势,当 $\epsilon_a \geq 0.0394$,且 $s \leq 140.8$ 像素时,8#土样的

测线 D_2 上 γ_{\max} 有上升的趋势。

3 结论

1) 当加载速率较低,且纵向应变达到一定值时,在含孔洞土样的孔洞顶部和底部发展出的高角度应变局部化带是由拉破坏导致的,而当加载速率较高时,未出现上述现象。

2) 含孔洞土样剪切带内测线上最大剪切应变的均值往往大于带外测线,最大可达 10 倍,通常,纵向应变越高,剪切带内测线上最大剪切应变的增速越大,大于带外测线。

3) 当纵向应变较高时,在孔洞表面附近,随着向孔洞表面的靠近,大多数剪切带内测线上最大剪切应变逐渐增加,而大多数带外测线上最大剪切应变逐渐下降,这与带内损伤导致带外弹性应变降低有关。当纵向应变较高时,在离孔洞表面较远处,随着向孔洞表面的靠近,大多数剪切带内测线上最大剪切应变逐渐增加,而带外测线上最大剪切应变变化复杂。

参考文献:

- [1] 宋力,宋万增,高玉琴,等. 引黄涵闸引水涵洞地基竖向应力分布规律[J]. 人民黄河, 2015, 37(1): 126-129.
- SONG L, SONG W Z, GAO Y Q, et al. Preliminary study about foundation vertical stress distribution on diversion culvert of the Yellow River sluice [J]. Yellow River, 2015, 37(1): 126-129. (in Chinese)
- [2] 魏建军. 考虑剪胀和软化的巷道围岩弹塑性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(3): 7-11.
- WEI J J. Elastic-plastic analysis of surrounding rocks considering material dilatancy and softening [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(3): 7-11. (in Chinese)
- [3] VITONE C, VIGGIANI G, COTECCHIA F, et al. Localized deformation in intensely fissured clays studied by 2D digital image correlation [J]. Acta Geotechnica, 2013, 8(3): 247-263.
- [4] ALIKARAMI R, TORABI A. Micro-texture and petrophysical properties of dilation and compaction shear bands in sand [J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2015, 3: 1-10.
- [5] 马少鹏,周辉. 岩石破坏过程中试件表面应变场演化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1667-1673.
- MA S P, ZHOU H. Surface strain field evolution of rock specimen during failure process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1667-1673. (in Chinese)
- [6] 刘招伟,李元海. 含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J]. 工程力学, 2010, 27(8): 133-139.
- LIU Z W, LI Y H. Experimental investigation on the deformation and crack behavior of rock specimen with a hole undergoing uniaxial compressive load [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(8): 133-139. (in Chinese)
- [7] 王学滨,杜亚志,潘一山,等. 大位移 DIC 方法及含孔洞砂土试样拉伸局部化带宽度观测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(5): 908-917.
- WANG X B, DU Y Z, PAN Y S, et al. A digital image correlation method for large displacement and measurements of the localized tensile strain band width of a sand specimen with a hole [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2013, 21(5): 908-917. (in Chinese)
- [8] 潘兵,谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量[J]. 光学学报, 2007, 27(11): 1980-1986.
- PAN B, XIE H M. Full-field strain measurement based on least-square fitting of local displacement for digital image correlation method [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(11): 1980-1986. (in Chinese)
- [9] ZHOU P, GOODSON K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation [J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [10] BRUCK H A, MCNEILL S R, SUTTON M A, et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction [J]. Experimental Mechanics, 1989, 29(3): 261-267.
- [11] 王学滨,张楠,潘一山,等. 单轴压缩湿土样最大剪切应变场数字图像相关方法结果的统计分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(6): 996-1003.
- WANG X B, ZHANG N, PAN Y S, et al. Statistical analyses of maximum shear strain fields for wet soil specimens in uniaxial compression using digital image correlation method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(6): 996-1003. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)