

岩土介质中局部化变形研究的一些新进展*

鲁晓兵[†] 王淑云 矫滨田 王义华

中国科学院力学研究所, 北京 100080

摘要 岩土中的剪切带产生通常是断裂和失稳的前兆, 常引起滑坡等地质灾害, 对油气或水合物等矿藏的开采容易导致压实带形成. 压实带的产生使岩土孔隙减小, 颗粒破碎, 从而导致沉陷、对油气的挤压等. 本文重点对剪切带的宽度和压实带的研究现状作综述, 阐述在该问题的研究上从微观观测到宏观表述的重要性. 通过分析, 认为还有如下问题值得研究: 怎样准确得出局部化变形带的宽度和方向? 局部化变形带形成后孔隙水和油气的渗流会发生什么变化? 颗粒层次的微结构特性是通过什么方式影响宏观表现的等等.

关键词 岩土介质, 剪切带, 压实带, 带宽, 微结构.

1 引言

岩土局部化变形的形成与演化是当前国内外力学界和土工界共同关心的问题. 饱和土的局部化变形一般是指薄的剧烈变形的局部化带. 由于很多岩土体的变形特征是由剪切带内岩土特性控制的, 故对该问题的研究具有重要的实际意义^[1]. 一般地将岩土中的局部化变形视为连续介质的分岔问题. 对剪切带的系统的研究已开展了 30 年左右, 对压实带的研究仅 10 年左右. 对该问题研究的广度和深度可以从几次国际专题会议中反映出来^[2~7].

人们研究较多的是剪切带的起始条件. 为分析剪切带产生的条件, 人们基于不同的假设提出了多种模型^[8~16]. 研究了不同因素对剪切带产生的影响^[17~31]. 本文对这些研究结果不作阐述. 一般地认为剪切带的产生起始于材料的分岔, 其关键决定于材料的本构. 但是产生后剪切带如何演化? 变形模式、剪切带宽度和方向由那些因素确定? 极限值是多少? 这些问题仍然困扰着人们. 本文重点对剪切带的宽度和压实带的研究现状作综述.

2 剪切带宽度、方向及内部结构

虽然在剪切带区域之外介质的行为也非常丰

富^[32], 但人们更关心剪切带内的演化情况. 为了模拟剪切带宽度, 需要有一个内部尺度. 影响剪切带宽度和方向的主要因素有: 内摩擦角、剪胀角、平均粒径、颗粒形状、温度和围压等. 基于率无关弹塑性本构理论的模型不具有内部长度量纲, 在用这些理论进行分析时, 不能得到有关剪切带宽度的任何信息. 于是出现了 Cosserat 理论、非局部化理论、应变梯度理论等. Muhlhaus^[33] 将 Cosserat 理论引入土颗粒介质, 假定颗粒为圆形, 在应力 - 应变分量中, 分别引入与颗粒半径有关的力偶项和旋转项. 非局部化理论是建立一点的应力与特征长度范围内的平均应变的关系^[34,35]. 应变梯度塑性理论是在应力 - 应变关系中引入塑性应变梯度, 即在流动应力的本构方程和剪胀条件里引入高阶应变梯度进行剪切带的分析, 从而引入了一个长度量纲, 可以分析剪切带宽度的演化^[36~41].

引入应变梯度可以解决分析带宽等所需的内部长度, 并可较好地避免有限元在局部化模拟时的网格依赖性, 并能分析剪切带宽度. 但是对于土颗粒介质来说, 由于土颗粒尺度与变形带宽度相比几乎为同一尺度, 带宽一般只相当于几个到十几个颗粒直径, 应变梯度难以实际刻划和量测, 甚至用连续介质理论描述剪切带内的材料运动和变形也值得怀疑. 到目前为止, 应变梯度项的系数没有确定的物理意义, 无法

收稿日期: 2004-09-20, 修回日期: 2005-07-25

* 国家自然科学基金 (10202024) 资助项目

[†] E-mail: xblu@imech.ac.cn

用实验进行测量,故引入应变梯度是否符合实际,值得探讨。也许将带外材料作为连续介质是合适的,但是对带内材料,应该考虑颗粒层次的特性,如颗粒排列的方向角、颗粒级配及形状等。然后建立从颗粒旋转、滑移、颗粒间力的传递等微观特性到宏观层次特性的联系。目前关于这方面的研究还很缺乏。

在基于考虑颗粒层次特性的局部化发展的理论和数值分析方面,人们开展了一些工作。Cundall^[42]进行了两种类型的数值模拟以分析摩擦材料的局部化问题。一是用基于连续介质的应变硬化模型进行计算,表明当强度参数在空间自由分布时会发生局部化。二是用离散单元法进行模拟,分析了剪切带的宽度、颗粒之间的接触力等。Bardet等^[43]假设颗粒材料为圆盘形的颗粒,用离散元方法研究了剪切带的结构。对剪切带内的位移、体变和颗粒的转动进行了研究。观测到剪切带宽度为平均颗粒粒径的15~18倍,带内的孔隙不稳定,颗粒之间的接触方向与剪切带方向相同,带内有强烈的转动梯度。有人研究了颗粒形状、级配等因素对剪切带发展的影响^[44~48],提出基于微结构因素,如颗粒旋转和相对滑移的本构方程,从而分析剪切带的发生和演化。如Vardoulakis提出基于Cosserat理论的二维本构关系,分析剪切带的最大宽度,得到剪切带宽度为颗粒平均粒径的16倍。基于Cosserat理论的分析,可以解决内部尺度问题和部分颗粒层次的特征,但是仍然存在如下的问题:提出的模型仍然是理想化的,如颗粒大小常假设为相等大小的;从微观的颗粒运动(旋转和相对滑移)到宏观量(应力、应变)之间的关系是通过一定的统计平均实现的,不同的统计平均假设得到的结果也有一定的差别,哪一种统计方法更合适,还没有足够的试验来检验;在用有限元进行分析时,刚度矩阵是不对称的,从而大大增加了分析的难度。

Lesniewska等^[49,50]通过实验和理论分析探讨了剪切带模式(pattern)的演化。Borst^[51]分析了土中剪切带的动力特性,对强和弱非连续模式及其相互作用进行了讨论。Lesniewska等^[52]分析了平面应变条件下柔性挡墙后干土中剪切带产生的条件,他们认为墙后多剪切带出现的原因是由于土体的软化,以及分析了剪切带以规则型排列的原因。剪切带的产生强烈地影响浅基础的破坏模式和临界条件^[53]。Ronaldo等^[54]用强非连续有限元分析了主动和被动载荷下局部化的起始和发展。对于挡墙问题,局部化起始于地表而以依赖于局部化出现处的应力状态的角度向下发展。总的来说,虽然目前的计算能定性计算出剪切带地位置、方向、带宽等,见图1。但离真正解决实际情况还较远,主要原因是对其本构,尤其是失稳后的本构没有完全弄清楚。

由于从理论分析和数值模拟较难得到岩土局部化变形的细节,人们希望从试验中观测局部化变形中颗粒层次的变形和演化特性,并由此解释宏观现象,建立宏观层次的模型。如采用立体摄像技术、CCD(计算机数字图像)技术、岩土CT技术等。立体摄像技术是将以一定时间间隔拍摄的图片重叠而形成一种立体的效果,观测试样变形的演化过程。原理是当给一个人的两只眼睛分别看有微小区别的图片时,人脑中反映出来的就是一幅有立体感的图片。当变形过程中的两幅图片叠成立体时,变形区就显得高,且高度正比于变形^[55]。

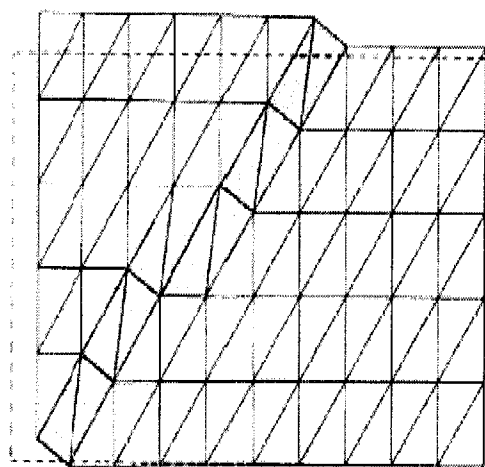
由于剪切带是一狭窄的区域,实验中或实验后土试样不能取出(除非冷冻,否则取出后立即变形甚至散架),由边界测量的应力、应变和孔压等数据只是名义值,不能反映带内外的非均匀性,因此需要特制精细的量测仪器和观测设备如立体摄像技术等测量土样整体变形和局部变形,以及带内的孔隙等。Alshibli等^[56]用数字图像分析方法研究了平面应变条件下颗粒介质中剪切带的方向和宽度。观察表明,剪切带宽度随着颗粒尺寸的增加和密度的减小而减小,而且与砂土的剪胀角有关。Oda等^[57,58]用X光和光学方法研究了剪切带的微结构,观察到实际的剪切带内微结构变形有如下特征:(1)剪切带边界不是直线,而是一段一段地与最大主应力成不同的角度。(2)剪切带内有很大的孔隙,导致局部孔隙率比用标准方法确定的最大孔隙率大。(3)颗粒的方向在剪切带边界上变化剧烈,使得高的颗粒转动梯度在相对窄的区域内在剪切带发展过程中形成。(4)平均的颗粒转动与连续介质意义上的宏观转动是平行的。(5)剪切带的宽度约是平均颗粒直径的7~8倍。Finno等^[59]研究饱和的松散粉砂在平面应变不排水条件下剪切带的产生,用立体摄像技术跟踪局部化应变的发展,发现稳态条件在剪切带内只有平均的意义,三轴条件下得到的稳态线较平面应变条件下的保守,因为此时的不排水强度低。Nemat-Nasser等^[60]用X光和显微镜研究了颗粒介质在排水和不排水条件下剪切变形中局部的响应。发现在排水实验中,单调变形引起剪切带;在不排水条件下,观测到循环剪切条件下液化区域内的局部化变形。虽然总的名义剪切应变只有10%,但是剪切带中部的剪应变超过500%;剪切带的宽度约为平均颗粒粒径的10~15倍。Desrues等^[61]用三轴仪研究了砂土中的应变局部化,得到了局部化的变形模式及带内孔隙率的演化。李蓓等^[62]采用自制的可测量局部侧向应变的平面应变仪,对上海原状粉质黏土进行了固结不排水平面应变压缩实验,研究了剪切带倾角随固结压力的变化情况,认为剪切带的形成与孔隙水的运动密切相

关。

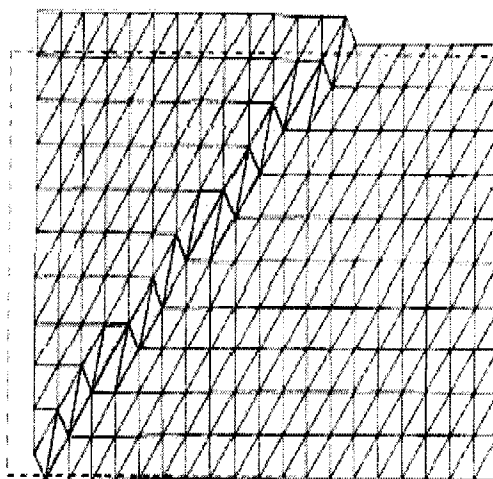
关于剪切带宽度的理论分析工作较少。鲁晓兵等^[63]的初步分析发现，剪切带的宽度可以近似用式 $\delta = (u_*/(C_1\dot{\gamma}_*Kn))^{0.5}$ 估算，其中 u_* 为带中心孔压， $\dot{\gamma}_*$ 为应变率， K 为渗透率， n 为孔隙率， C_1 为塑性功产生孔压的系数。

剪切带的发展演化是一个跨空间尺度和时间

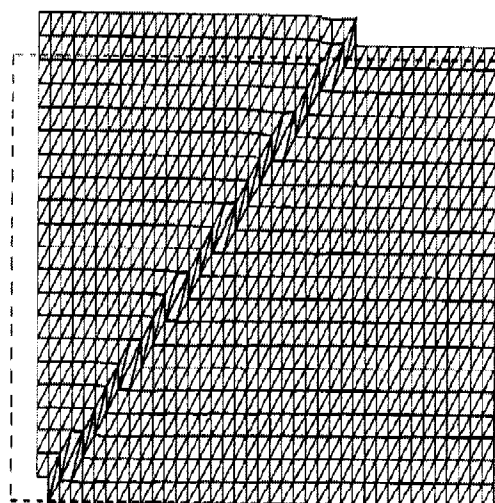
尺度的问题。时间尺度有： $1/\dot{\gamma}_*$ ， $L/(\tau^*/\rho)^{0.5}$ ， $\rho\dot{\gamma}_*\delta^2/\tau^*$ ， $\delta^2\rho g/kp^*$ ；空间尺度有： d ， δ^* ， L 。其中 $\dot{\gamma}_*$ 为应变率， L 为试件特征长度， τ^* 为特征应力， ρ 为土体密度， g 为重力加速度， k 为达西渗透系数， p^* 为特征孔压， d 为颗粒直径。因此建立这些宏观量与局部化带产生与演化的关系不能准确反映实际情况。



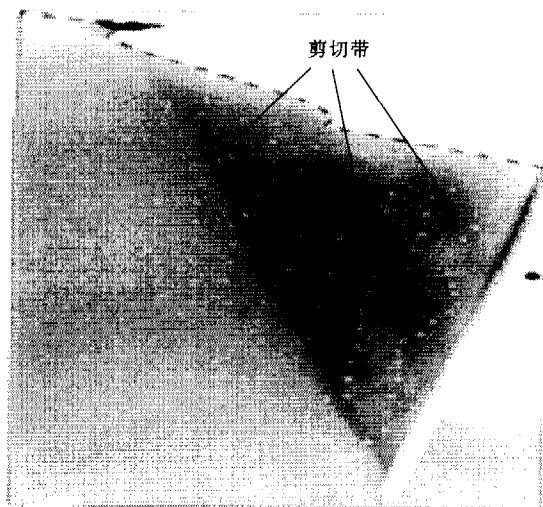
(a) 网格数 20 × 10



(b) 网格数 40 × 20



(c) 网格数 80 × 40



(d) 实验结果

图 1 剪切带数值计算结果及与实验的对比^[54]

3 岩土介质的压实带

在高围压下，在岩土介质中除了剪切带，还可能出现张裂带和压实带等局部化变形带。当较深部的油气或水合物等矿藏被开采后，原来由矿物承受的力将转移到由岩土骨架承受，这种情况下压实带就容易形成，在其他一些情况下，如钻探、射孔驱油，

高坝、深埋隧洞等，压实带也容易出现。Mollema 和 Antonelli^[64] 1994 年在天然岩层中观察到高孔隙砂岩中的两种压实带，一种是带间呈间隔分布的薄的纯压实变形带，这种变形带可使油气或水陷于带之间，不利于开采，而有利于防渗；一种是逐渐传播的有一定宽度的压实带，这种变形带可将岩石中的油气或水挤压出去，有利于开采，有利于防渗。压实带

内有明显的孔隙减小(从20%~25%减小到百分之几)。由于孔隙减小,这些压实带可成为烃类的聚集地或成为流体流动的障碍。压实带的产生在石油和天然气工业、水库渗漏等方面有重要的意义。压实带的产生可以将石油和天然气/水等挤压到孔隙中,明显降低储油层的渗透性而减低产出。当颗粒被挤碎时,还可以使含砂量增加。在受压或钻孔条件下均可以产生压实带。压实带是由于颗粒边界滑移、颗粒转动和颗粒压碎引起的。

针对压实带的产生与演化,人们一般进行3类实验:常规高压三轴实验,钻孔实验和开槽的单轴压实实验。是否产生压实带,与岩性、围压和应变条件密切相关。压实带分为传播而宽的和分离而薄的两种。实验发现,传播型压实带前峰的传播速度是加载头速度的8.3倍。压实带的产生会导致流体射流和孔隙压力的局部增加,以及渗透性的空间变化。压实带峰后为低渗透区,峰前为高渗透区,前者比后者低2~3个数量级。

Olsson^[65,66]对干燥的Castlegate砂岩进行了多组常规三轴实验。试样直径50.8mm,高127mm,与基床面(沉积面)平行切割制样,这样可消除基床面(沉积面)对压实带产生条件的影响。加载应变率 $10^{-5}/s$ 。试样是采用空气干燥且与大气相通。实验观测到在围压69MPa以下时,产生剪切带;大于150MPa时,产生均匀的压实;在69~100MPa之间时,在试样的一端或两端产生压实区,约占试样总长度的1/3。在围压69MPa条件下,当应变是2%时,试样一端微鼓,且有与最大主应力成 36° 的剪切带;当应变是25%时,试样中部有10mm宽的压实带穿过2/3直径,从压实带端部发出两条与最大主应力呈 65° 的剪切带。在100MPa围压下,当应变为2.5%时,有一宽25mm的变形带有明显的压实和剪切,带外的直径保持不变,带内的直径有0.5~1.0mm的增加。带的角度为 14° 。当应变为5%时,一端有38mm宽的压实带,见图2。图2中左图为右图中曲线上黑点对应状态的测量结果。Klein等^[68]用Bentheim砂岩进行了实验。试样在真空中干燥,在室温下以 $2 \times 10^{-5}/s$ 的应变率加载。先进行各向等压压实,低压时,岩石响应是高度非线性的,210MPa时声发射开始出现,在390MPa时声发射大量发生,意味着颗粒破碎和孔隙崩溃。在三轴压缩实验中,一直到60MPa, Bentheim砂岩表现为脆性变形,加载到峰值后,偏应力下降到残余应力。在围压90~300MPa间,在90MPa时破坏显示为似脆性特征;在120~300MPa时,破坏表现为延展性特征,硬化趋势被间断的应力降打断,应力降为30MPa;在围压300MPa时,一些离散的压实带产生于试样两端(图3),孔隙从16%~23%变为百分之几,压力降与压实局部化并不完全对应,压实

带的产生是岩石内在的一种失效模式,而不是实验条件造成的,因为在端部加与不加润滑油,以及在低的应变率 $1.3 \times 10^{-5}/s$ 加载条件下,以及饱和试样在围压250MPa和孔隙压力10MPa时,都产生类似的结果。Wong^[69~71]用常规三轴仪对Bentheim, Berea, Darley Dale砂岩在孔隙为13%, 21%, 23%时,进行了实验。对Berea, Darley Dale砂岩用蒸馏水饱和且保持常孔隙压力10MPa。Bentheim砂岩在正常干燥条件下进行,实验表明,当围压不超过257.5MPa时,发生剪切强化的压实,且显示集中的颗粒挤碎和孔隙崩溃。当有效压力为10MPa时产生 30° 的剪切带;80MPa时,产生 45° 的剪切带;当有效压应力在90~95MPa时,发生与水平面成高角度的剪切带和压实带;在100MPa时,为非局部化的延展性的破坏模式。Berea砂岩在40~150MPa呈现复杂的高角度的压实带和剪切带的混合。Bentheim砂岩在120~300MPa时,只有压实带;在90MPa时,为压实带和剪切带的混合型。在Wong等的实验中没有观测到传播的压实带,而是类似波状的薄的压实带,压实带分布在离端部1/3的区域内。

除了在轴对称压缩实验中观测到压实带,在钻孔实验中也观测到压实带的产生。Haimson^[72]对孔隙率为25%的Berea砂岩进行了真三轴实验,在尺寸为 $152\text{mm} \times 152\text{mm} \times 229\text{mm}$ 的试样中钻23mm的孔。3个方向的压力分别施加,水平方向 σ_h, σ_H ,垂直方向 σ_v ,且 $\sigma_v > \sigma_h > \sigma_H$, σ_v, σ_h 在20~60MPa间变化, σ_v 在50~100MPa间变化。发现孔周围与最大主应力垂直方向产生薄的长缝,类似压实带,带内颗粒卸载且破碎,被钻孔的液体冲走,这个过程不断重复,可以使缝延伸到并孔直径的好几倍的距离。Bessinger等^[73]用直径为100~200 μm 的玻璃球制成长宽高之比为4.5:3:1的砖,制成3种试样:A,加热到 675°C 保持30min;B,加热到 670°C 保持90min;C,加热到 680°C 保持90min。然后进行单轴压实实验。由于加热温度越高,时间越长,颗粒间融合面积越大,孔隙越小,模量和强度越大,因此A有最低的强度和模量,B有中等的强度和模量,C有最大的强度和模量。实验中在2MPa时,A和B均出现与压力方向垂直的裂缝(约5颗粒直径宽,贯穿试样,)并扩展,未发现颗粒破碎,只是颗粒连接断开。67MPa时试样C沿孔边出现圆锥形的洞,颗粒发生破碎(图4)。这与射孔压实带类似^[74]。

Vajdova^[75]在Bentheim砂岩试样中部外侧开“V”形槽环,然后在300MPa围压下进行三轴压实实验。初始孔隙率为23%,试样直径为18.4mm,长38.1mm,轴向应变率为 $1 \times 10^{-5}/s$ 。实验发现,压实带起始于槽尖以“反裂纹”(anti-crack)方式传播。传播速度比加载头速度高两个数量级。Holcomb

等^[76]对 Castlegate 砂岩在 45 MPa 围压下的压实实验表明, 压实带内的渗透系数较初始值降低两个数量级, 压实前锋宽度为 20 mm。

Baud^[77]的实验表明, 砂岩中孔隙水的存在会导致压实屈服强度低 20%~70%。为比较水在脆断和塑性流中的弱化效应的区别, 对 Bera, Boise, Darley Dale 砂岩(初始孔隙率从 11%~35%, 在干燥和饱和条件下)进行了三轴压实实验。干燥和饱和条件下的非弹性行为和失效模式定性上一致。水弱化效应是

由于有水时的表面能较空气时的大。

为了分析压实带的产生条件, 人们开展了一些理论分析工作。Issen 等^[78~80], Rudnicki^[81]等提出了一种“帽子”模型, 基于 RR 理论^[11]分析了轴对称压实条件下各向同性和横观各向同性岩石材料中压实带的产生条件。Besuelle 等^[82]基于 RR 理论分析了张拉带、剪切带和压实带的连续过渡, 并与实验结果进行了对比。Olsson^[83]用间断的 Hugoniot 方程分析了压实带由试样两端向中心传播的过程。鲁晓

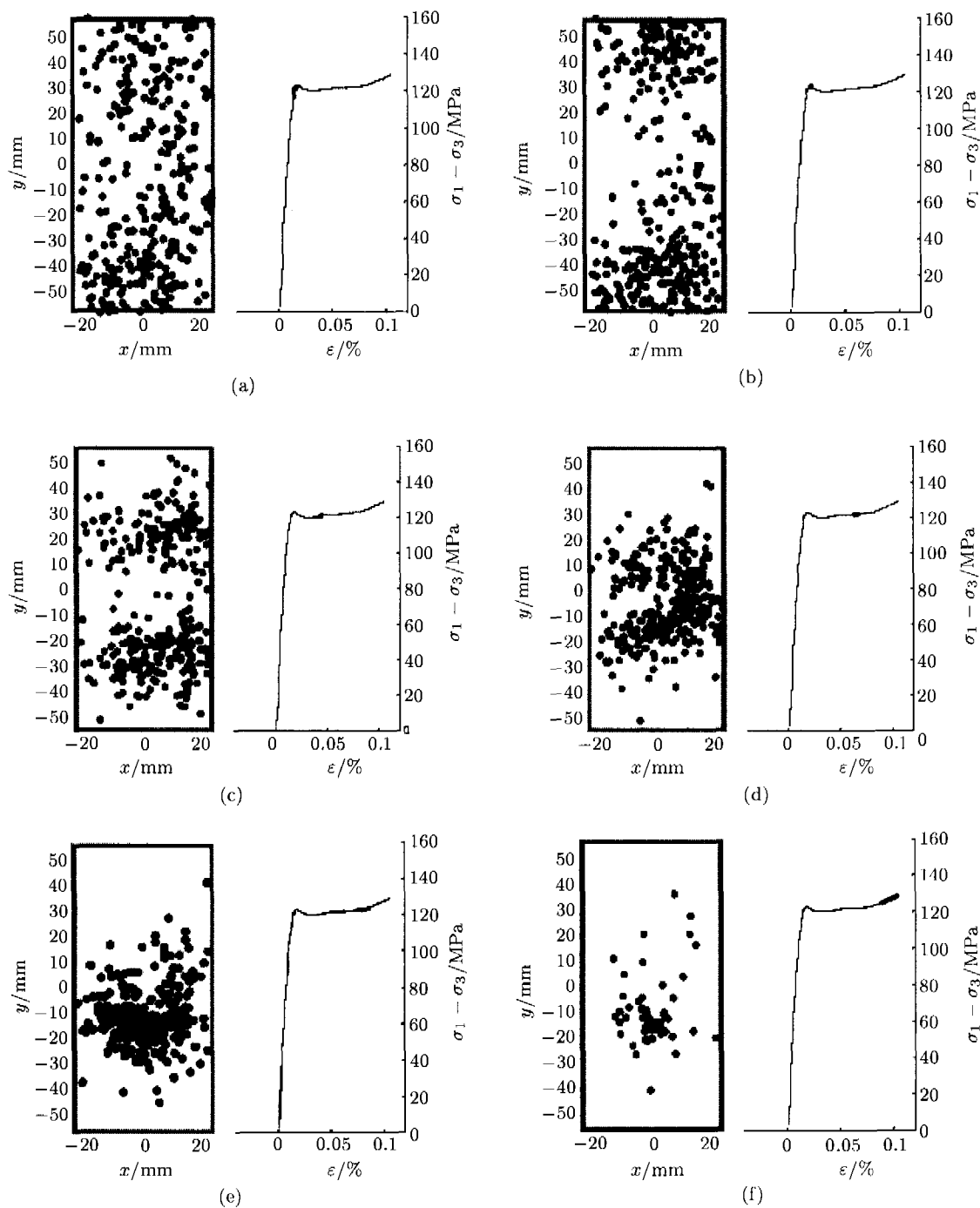


图 2 轴对称压缩实验中压实带的发展

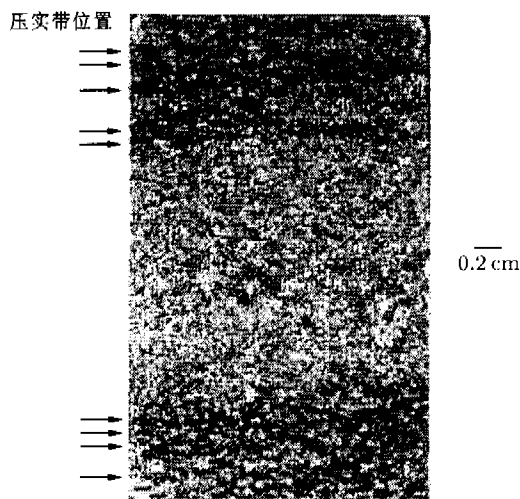


图3 薄的离散分布的压实带

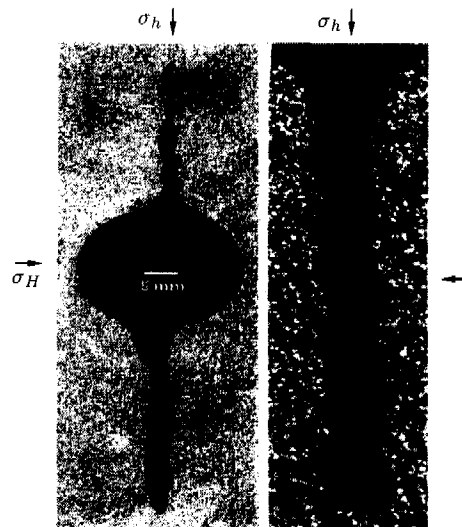


图4 钻孔条件下的压实带

兵等^[84]根据建立的一维两相介质模型,分析了压实带发展的控制因素及演化规律。

在小围压下,土体的压实是孔隙减小导致的,但是在高围压下,土体压实除了孔隙减小,还伴随着颗粒的破碎,这就使得高围压下不仅有更大的压缩量,而且还表现为压实过程中强度降低和升高的交替变化、侧限压实过程中侧压力系数 K_0 发生变化等特性。实验表明,在 2~8 MPa 时,小土颗粒开始压碎,压碎特性与颗粒大小、颗粒棱角、颗粒强度、不均匀系数等相关。在不排水三轴压缩实验中发现,在高围压下,大量颗粒破碎,导致孔压增加,有效应力减小,向失效的方向发展,并且失效区或压实区逐渐发展。在排水三轴实验中发现,当围压超过一定值时,颗粒开始破碎,轴向应变、体变增加;在更高的应力水平,如达到 350 MPa,由于压实区已发展到整个试件,轴向应变、体变增加速度变慢,表现为弹性压实。该方面的结果可用于预测油库中油气被采空后由于流体压力减小和有效应力增加而产生的压实和孔隙变化情况^[85~91]。

一般来说,高围压下的压实伴随着颗粒在狭窄区域内的破碎,孔隙崩溃等,这些都与岩土体的微结构形态(颗粒层次)有关,而且区域的尺度与颗粒几乎为同一个量级,完全用连续介质力学方法进行研究,必然会与实际情况有较大误差。要弄清其产生机理及演化特性,必须从微观特性研究出发,研究其颗粒压缩强度、颗粒间胶接强度、颗粒级配等;然后建立这种微观特性与宏观现象之间的联系。

4 结 语

剪切带的产生常常是断裂和失稳的前兆,常引起滑坡、泥石流等地质灾害;在确定岩土材料参数的

实验中,由于剪切带出现时,试样变形和应力不再均匀,因此对结果产生明显的影响。目前关于这方面的研究较少,故剪切带的结果用于实际工程问题还较少。目前对其演化过程及后效的研究需要作深入地工作。

压实带的产生将导致以下效果:(1)由于孔隙减小,间隔分离的压实带可阻止烃类的聚集或流动;(2)逐渐发展的压实带的产生可以将石油和天然气/水等挤压到孔洞中,明显降低储油层的渗透性而减低产出;(3)当颗粒被挤碎时,还可以使含砂量增加;(4)当压实明显,较大的岩土表面沉降会导致上部结构物如平台、管线、大坝等的破坏。因此还需要针对这些问题开展深入研究,加以利用或防止事故的发生。

虽然对岩土体内局部化的研究进行了多年,但是还没有达到将其成果应用于实际工程的程度,这是由于其中还有许多问题没有真正解决,如怎样准确得出局部化变形带的宽度和方向?局部化变形带形成后孔隙水和油气的渗流会发生什么变化?最关键的是颗粒层次的微结构特性是通过什么方式影响宏观表现的?目前看来,我们应该从试验中颗粒层次的变形、演化等观测出发,建立微观特性,提炼出规律,然后建立其与宏观表现之间的联系。

参 考 文 献

- 1 赵锡宏,张启辉,上的剪切带实验与数值模拟.北京:机械工业出版社,2003
- 2 University of Karlsruhe, Int Workshop on Limit Analysis and Bifurcation Theory, Ingenieur- Archiv, 1989, 59, Special Issue
- 3 Dembicki E, Gudehus G and Sikora Z. Numerical Methods for Localization Bifurcation of Granular Bodies. Geotechnical Department, Technical University of Gdansk, 1989
- 4 Chambon R, Desrues J, Vardoulakis I. Localisation and Bi-

- furcation theory for Soils and Rocks. Balkema: Rotterdam, 1994
- 5 Adachi T, Oka F, Yashima A. Localisation and Bifurcation Theory for Soils and Rocks. Balkema: Rotterdam, 1998
 - 6 Muhlhaus HB, Dyskin A. Bifurcation and Localization Theory in Geomechanics. Swets: Zeitlinger, 2001
 - 7 Labuz J, Drescher A. Bifurcations and Instabilities in Geomechanics. Swets: Zeitlinger, 2003
 - 8 Roscoe K H, The influence of strains I soil mechanics. *Geotech*, 1970, 20(2): 129~170
 - 9 Arthur J R F, Dunstan T, Ai-Ani Qalt et al. Plastic deformation and failure in granular media. *Geotech*, 1977, 27(1): 53~74
 - 10 Bardet J P. A comprehensive review of strain localization in elastoplastic soils. *Computers and Geotechnics*, 1990, (10): 163~188
 - 11 Hill R, Hutchinson J W. Bifurcation phenomena in the plane tension test. *J Mech Phys Solids*, 1975, 23: 239~264
 - 12 Chau K T, Rundichi J W. Bifurcation of compressible pressure-sensitive materials in plane strain tension and compression. *J Mech Phys Solids*, 1990, 38(6): 875~898
 - 13 Rudnicki, J W, Rice, J R. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials. *J Mech Phys Solids*, 1975, 23: 371~394
 - 14 Pietruszczak S, Niu X. On the description of localized deformation. *Int J Numer Analy Methods Geotech*, 1993, 17: 791~805
 - 15 沈珠江. 应变软化材料的广义孔隙压力模型. *岩土工程学报*, 1997, 19(3): 14~21
 - 16 黄茂松, 钱建固, 吴世明, 饱和土体应变局部化的复合体理论. *岩土工程学报*, 2002, 24(1): 22~25
 - 17 Alshibli K A, Sture S. Shear band formation in plane strain experiments of sand. *J Geotech Geoenviron Engrg, ASCE*, 12000, 26(6): 495~503
 - 18 Zhang H W, Schrefler B A. Uniqueness and localization analysis of elastic-plastic saturated media. *Int J for Numer And Meth Geomech*, 2001, 25: 29~48
 - 19 张启辉, 赵锡宏. 黏性土局部化剪切带变形的机理研究. *岩土力学*, 2002, 23(1): 31~35
 - 20 Vardoulakis I. Deformation of water-saturated sand: i. uniform undrained deformation and shear banding. *Geotech*, 1996, 46(3): 441~456
 - 21 Vardoulakis I. Stability and bifurcation of undrained, plane rectilinear deformations on water-saturated granular soils. *Int J Numer Analy Methods Geomech*, 1985, 9: 399~414
 - 22 Vardoulakis I. Deformation of water-saturated sand: ii. effect of pore water flow and shear banding. *Geotech*, 1996, 46(3): 457~472
 - 23 Mooney M A, Finn R J, Viggian M G. A unique critical state for sand. *J Geotech Geoenviron Engrg, ASCE*, 1998, 124(11): 1100~1108
 - 24 Oka F, Yashima A, Sawada K, Aifantis E C. Instability of gradient-dependent elastoviscoplastic model for clay and strain localization analysis. *Comp Methods Appl Mech Engrg*, 2000, 183: 67~86
 - 25 Lu Xiaobing. The thermo-visco-plastic instability analysis of saturated soil. *Int J Nonlinear Mech*, 2001, 36(4): 687~692
 - 26 Bauer E, Huang W. Effect of initial anisotropy on shear banding in granular materials. In: Pande G N, Pietruszczak S, eds. Numerical models in geomechanics-NUMOG VII, 1999, Balkema: Rotterdam, 121~126
 - 27 Loret B, Prevos J H. Dynamic strain localization in fluid-saturated porous media. *J Engrg Mech, ASCE*, 1991, 117(4): 907~923
 - 28 Rice J R. On the stability of dilatant hardening for saturated rock masses. *J Geophysical Research*, 1975, 80(11): 1531~1536
 - 29 Rudnicki J W, Rice, J R. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant material. *J Mech Phys Solids*, 1975, 23: 371~394
 - 30 Lu, X B, Yang Z S, Zhang J H. The evolution of shear bands of saturated soil. *Int J Nonlinear Mechanics*, 2000 (35): 21~26
 - 31 Bauer E, Huang W X, Wu W. Investigation of shear banding in an anisotropic hypoplastic material. *International Journal of Solids and Structures*, 2004, 41: 5903~5919
 - 32 Chambon G, Schmittbuhl J, Corfdir A et al. Shear with comminution of a granular material: microscopic deformations outside the shear band. *Phys Rev E*, 2003, 68: 011304
 - 33 Muhlhaus H B, Vardoulakis I. The thickness of shear bands in granular materials. *Geotech*, 1987, 37(3): 271~283
 - 34 Bazant Z P, Pijandier-Cabot G. Non-local continuum damage localization instability and convergence. *J Appl Mech ACSE*, 1988, 55: 193~287
 - 35 Schanz T. A constitutive model for cemented sands. In: Proc 4th Int Workshop Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, Gifu, Japan, 1998. 165~172
 - 36 Ikeda K, Yamakawa Y, Tsutsumi S. Simulation and interpretation of diffuse mode bifurcation of elastoplastic solids. *J Mech Phys Solids*, 2003, 51 (9): 1649~1673
 - 37 Al Hattamleh O, Muhunthan B, Zbib H M. Gradient plasticity modelling of strain localization in granular materials. *Int J Numer Analy Methods Geomech*, 2004, 28 (6): 465~481
 - 38 Vardoulakis I, Aifantis E C. Gradient dependent dilatancy and its implications in shear banding and liquefaction. *Ingenieur-Archiv*, 1989, 59: 197~208
 - 39 李锡夔, Cescotto S. 梯度塑性的有限元分析及应变局部化模拟. *力学学报*, 1996, 28(5): 575~583
 - 40 赵吉东, 周维垣, 刘元高. 基于应变梯度的损伤局部化研究及应用. *力学学报*, 2002, 34(3): 445~452
 - 41 Zbib H M, Aifantis E C. A gradient-dependent flow theory of plasticity: application to metal and soil instabilities. *Appl Mech Rev*, 1989, 42(11): S295~S304
 - 42 Cundall P A. Numerical experiments on localization in frictional materials. *Ingenieur-Archiv*, 1989, 59: 148~159
 - 43 Bardet J P, Proubet J. A numerical investigation of the structure of persistent shear bands in granular media. *Geotech*, 1992, 42: 599~613
 - 44 Vardoulakis I. Shear-banding and liquefaction in granular materials on the basis of a Cosserat continuum theory. *Ingenieur-Archiv*, 1989, 59: 106~113
 - 45 Tordesillas A, Peters J F, Gardiner B S. Shear band evolution and accumulated microstructural development in Cosserat media. *Int J Numer Analy Methods Geomech*, 2004, 28: 981~1010

- 46 Antony S J, Kuhn M R. Influence of particle shape on granular contact signatures and shear strength: new insights from simulations. *Int J Solids Struct*, 2004, 41: 5863~5870
- 47 Manzari M T. Application of micropolar plasticity to post failure analysis in geomechanics. *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 2004, 28: 1011~1032
- 48 Gardiner B S, Tordesillas A. Micromechanics of shear bands. *Int J Solids Struct*, 2004, 41: 5885~5901
- 49 Lesniewska D, Mroz Z. Study of evolution of shear band systems in sand retained by flexible wall. *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 2001, 25: 909~932
- 50 Lesniewska D, Mroz Z. Limit equilibrium approach to study evolution of shear band systems in soils. *Geotech*, 2000, 50(5): 521~536
- 51 de Borst R. Embedded discontinuity approaches for shear band analysis. In: Pande, Pietruszczak, Schweiger, eds. *Numerical Models in Geomechanics—NUMOG VII*, 1999, Balkema: Rotterdam, 103~108
- 52 Lesniewska D, Mroz Z. Limit equilibrium approach to study the evolution of shear band systems in soils. *Geotech*, 2000, 50(5): 521~536
- 53 吴雄志, 王育德. 局部剪切破坏模式下地基极限承载力的研究. *工业建筑*, 2003, 33(2): 41~43
- 54 Ronaldo I, Borja T, Lai Y. Propagation of localization instability under active and passive loading. *J Geotech Geoenviron Engrg*, ASCE, 2002, 128(1): 64~75
- 55 Desrués J, Viggiani G. Strain localization in sand: an overview of the experimental results obtained in Grenoble using stereophotogrammetry. *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 2004, 28: 279~321
- 56 Alshibli K A, Sture S. Sand shear band thickness measurements by digital imaging techniques. *J Computing in Civil Engrg*, ASCE, 1999, 13(2): 103~109
- 57 Oda M, Kazama H. Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils. *Geotechnique*, 1998, 48(4): 465~481
- 58 邵龙潭, 王助贫, 刘永录. 三轴上样局部化变形的数字图像测量方法. *岩土工程学报*, 2002, 24(9): 159~163.
- 59 Finno R J, Harris W W, Mooney M A et al. Strain localization and undrained steady state of sand. *J Geotech Engrg*, 1996, 122(6): 462~473
- 60 Nemat-Nasser S, Okada N. Radiographic and microscopic observation of shear bands in granular materials. *Geotechnique*, 2001, 51(9): 753~765
- 61 Desrués J, Chambon R, Mokni M, mazerolle F. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Geotech*, 1996, 46(3): 529~546
- 62 李蓓, 赵锡宏, 董建国. 上海黏性土剪切带倾角的实验研究. *岩土力学*, 2002, 23(4): 423~427
- 63 Lu X B, Wang S Y, Wang Y H, et al. An approximate method for evaluating the shear band thickness in saturated soils. *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 2004, 28: 1533~1541
- 64 Mollema, P N, Antonelli, M A. Compaction bands: a structural analog for anti-mode I cracks in aeolian sandstone. *Tectonophysics*, 1996, 267: 209~228
- 65 Olsson W A. Theoretical and experimental investigation of compaction bands in porous rock. *J Geophys Res*, 1999, 104(B4): 7219~7228
- 66 Olsson, W A, Holcomb, D J, Rudnicki, J W. Compaction localization in porous sandstone: implications for reservoir Mechanics. *Oil & Gas Science and Technology- Rev IFP*, 2002, 57(5): 591~599
- 67 Olsson, W A, Holcomb D J. Compaction localization in porous rock. *Geophys Res Letters*, 2000, 27(21): 3537~3540
- 68 Klein E, Baud P, Reuschle T, Wong T F. Mechanical behaviour and failure mode of Bentheim sandstone under triaxial compression. *Phys Chem Earth(a)*, 2001, 26(1-2): 21~25
- 69 Wong T F. Localized failure modes in a compactant porous rock. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(13): 2521~2524
- 70 Wu X Y, Baud P, Wong T F. Micromechanics of compressive failure and spatial evolution of anisotropic damage in Darley Dale sandstone. *Int J Rock Mech Mining Sci*, 2000, 37: 143~160
- 71 Wong T F, David D, Zhu W L. The transition from brittle faulting to cataclastic flow in porous sandstones: Mechanical deformation. *J Geophys Res*, 1997, 102(B2): 3009~3025
- 72 Haimson, B C. Fracture-like Borehole breakouts in high porosity sandstone: are they caused by compaction bands. *Phys Chem Earth(A)*, 2001, 26(1-2): 15~20
- 73 Bessinger B A, Liu Z, Cook, N G W et al. A new fracturing mechanism for granular media. *Geophys Res Lett*, 1997, 24(21): 2605~2608
- 74 李东传, 孙新波, 姜国庆. 射孔压实带研究. *测井与射孔*, 2001, 4: 79~82
- 75 Vajdova V, Wong T F. Incremental propagation of discrete compaction bands: acoustic emission and microstructural observations on circumferentially notched samples of Bentheim. *Geophys Res Lett*, 2003, 30(14): 1775~1778
- 76 Holcomb D J, Olsson W A. Compaction localization and fluid flow. *J Geophys Res*, 2003, 108(B6): 2290~2302
- 77 Baud P, Zhu W L, Wong T F. Failure mode and weakening effect of water on sandstone. *J Geophys Res*, 2000, 105(B7): 16371~16389
- 78 Issen, K A, Rudnicki J W. Conditions for compaction bands in porous rock. *J Geophys Res*, 2000, 105: 21529~21536
- 79 Challa V, Issen K A. Conditions for compaction band formation in porous rock using a two-yield surface model. *J Engrg Mech-ASCE*, 2004, 130 (9): 1089~1097
- 80 Issen, W A. Theoretical and experimental investigation of compaction bands. *J Geophys Res*, 1999, 104: 7219~7228
- 81 Rudnicki, J W. Conditions for compaction and shear bands in a transversely isotropic material. *Int J Solids and Struct*, 2002, 39: 3741~3756
- 82 Besuelle P. Compacting and dilating shear bands in porous rock: theoretical and experimental conditions. *J Geophys Res*, 2001, 106(B7): 13435~13442
- 83 Olsson, W A. Quasistatic propagation of compaction fronts in porous rocks. *Mechanics of Materials*, 2001, 33: 659~668
- 84 鲁晓兵, 王义华, 王淑云. 高孔隙岩石中压实带的产生和演化. 第八次全国岩石力学与工程学术大会论文集: 西部大开发中的岩石力学与工程问题. 北京: 科学出版社, 2004. 132~135
- 85 Hardin B O. Crushing of soil particles. *J Geotech Engrg*, ASCE, 1985, 111(10): 1177~1193

- 86 Yamamuro J A, Bopp P A, Lade P V. One dimensional compression of sands at high pressures. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1994, 122(2): 147~154
- 87 Hagerty M M, Hite D R, Ullrich C R et al. One dimensional high-pressure compression of granular media. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1993, 119(1): 1~18.
- 88 Yamamuro J A, Lade P V. Drained sand behaviour in axisymmetric tests at high pressures. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1996, 122(2): 109~119
- 89 Lade P V, Yamamuro J A. Undrained sand behaviour in axisymmetric tests at high pressures. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1996, 122(2): 120~129
- 90 Hardin B O. Crushing of soil particles. *J Geotech Engrg, ASCE*, 1985, 111(10): 1177~1193
- 91 Chuhan F A, Kjeldstad A, Bjorlykke K et al. Experimental compression of loose sands: relevance to porosity reduction during burial in sedimentary basins. *Can Geotech J*, 2003, 40: 995~1011

SOME ADVANCES IN STUDIES ON LOCALIZATION OF GEOMATERIALS*

LU Xiaobing[†] WANG Shuyun JIAO Bingtian WANG Yihua

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

Abstract The researches on shear band width and the development of compaction band are summarized. The importance of the relations between micro- and macro-scopic characteristics is emphasized. The shear banding is often the precursor of failure and fracture, which may cause geologic disasters, such as landslide. The exploitation of the oil and gas or the gas hydrate may cause the formation of compaction band, which may reduce porosity and lead to the fragmentation, which, in turn, causes the settlement and the extrusion of oil and gas. In that respect, some questions must be answered. How to obtain the band width and deformations of localization precisely? What changes of the penetration of oil and gas will the localized band bring about? How do the micro-scopic characteristics on the grain level affect the macro-scopic behavior?

Keywords geomaterial, shear band, compaction band, band width, micro-scopic structure

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (10202024)

[†] E-mail: xblu@imech.ac.cn