

结构性黄土的剪切带及强度特性的 真三轴试验研究

邵生俊^{1,2}, 陈 菲^{1,2}, 代亚锋^{1,2}, 陆 媛^{1,2}

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学 陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘 要: 采用西安理工大学自主研发的真三轴仪, 对西安白鹿原黄土进行了不同中主应力比值、不同固结围压的试验研究, 探讨了黄土剪切带形成与峰值强度、中主应变与大主应变关系曲线、体应变与大主应变关系曲线特征点之间的联系以及子午平面、 π 平面上的强度变化规律。分析了真三轴应力条件下黄土强度变形规律和试样剪切带破坏模式和黄土在复杂应力状态下剪切带形成的判断依据和原因, 研究表明, 真三轴压缩原状黄土具有明显的剪切带, 围压和中主应力比值较小时表现为软化, 围压和中主应力比值较大时则表现为硬化; 中主应变、体应变与大主应变关系曲线较为一致的转折点反映了土变形性状发生变化; 与中主应变方向一致的剪切带两侧土结构块体产生相对滑移, 剪切带开始形成和发展; 土应变曲线的转折点可以作为土固结结构内剪切带形成的判断依据; 子午平面上强度线呈线性变化规律, π 平面上呈曲边三角形非线性变化规律, 并且与 $\sqrt{3}\sigma$ -SMP 强度准则较为接近。不同应力条件下剪切带变化复杂的破坏模式与黄土原生的结构特征和加载共同作用的变化有密切联系。

关 键 词: 黄土; 真三轴试验; 剪切带; 中主应力; 强度破坏面

中图分类号: TU 444

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598-(2015) 增 1-0066-05

Shear band mechanism and strength characteristics of structural loess tested by true triaxial apparatus

SHAO Sheng-jun^{1,2}, CHEN Fei^{1,2}, DAI Ya-Feng^{1,2}, LU Yuan^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: Presented herein is an experimental analysis result of Xi'an Bailu Tableland loess tested by true triaxial apparatus, developed by Xi'an University of Technology, with the different consolidation pressures and intermediate principal stress parameters. The occurrence of loess shear band in cubical specimen may be related to its peak strength or the process of hardening regime. Some characteristic changes of the intermediate principal strain and volume change, and strength law on the meridian plane and octahedral plane have also been explored by the measured results of true triaxial tests. Strength, failure strains and the shear failure model of loess specimens have been analyzed to investigate the judgment basis of shear band occurrence under the condition of complex stresses. The results show that the obvious shear band appear in the loess specimens under true triaxial principal stresses, the softening behavior of intact loess occurs under the smaller confining pressure and intermediate principal stress parameters; and the hardening behavior occurs under the larger confining pressure and intermediate principal stress parameters. Consistent turning points on the curve of the intermediate principal strain and volume change with large principal strain indicate the behavior of deformation changing. Structural soil mass in the side of shear band, which is responding to the intermediate principal strain turning point, has a relative sliding and development of shear band. The strength line on meridian plane is linear; and the strength curve on the octahedral plane is a curved-edge-triangle shape that approaches to $\sqrt{3}\sigma$ -SMP strength criterion. The complex changing of shear band of failure pattern is relating to the structural characteristic of natural loess and loading condition of different stresses.

Keywords: loess; true triaxial test; shear band; intermediate principal stress; strength failure surface

1 引言

黄土是一种典型的结构性土。是其物质在沉积历史过程形成的综合产物，决定着黄土的力学特性^[1]。黄土结构易遭受浸水、荷载、扰动作用而破坏^[2]，将显著地改变土粒骨架的组构和粒间联结效应，弱化其强度性质。保持黄土原状结构时，其结构具有较大的抗剪切和抗压缩性质。实际工程中，如黄土边坡、黄土隧道围岩等，土体剪切带变形的发展和强度破坏导致边坡变形和拱顶土层沉降，进而导致边坡的滑坡和隧道的塌方等。

本次利用西安理工大学真三轴仪，对西安白鹿原黄土不同围压，不同中间主应力下强度变形特性、剪切带的形成以及剪切带的形态进行了试验研究，探究结构性黄土在真三轴应力状态下的剪切带特性，试图揭示结构性黄土剪切带形成的原因，为揭示黄土工程破坏机制提供理论基础。

2 试验方法

2.1 试验用土和试验仪器

本试验用土取自西安东郊白鹿原一个边坡，取土深度为 8~10 m。取样之前到现场进行勘察，观察土的均匀程度和孔隙分布特征，并采集样本进行室内试验，判断土的基本物理性质指标，选取符合要求采样点。采样点尽量避开碎石、钙质结核、蚁穴、树根等影响，并考虑边坡土的卸荷效应，保持天然含水率及原状黄土的结构及其各向异性。现场采取成土块，标注沉积方向及走向方向，并用黑色塑料薄膜包裹密封，避免水分丧失。密封包装外注明所取土样的地点和序号，描述土性，装箱小心搬运至实验室。原状黄土的基本物性指标的测定见表 1。

表 1 白鹿原黄土的主要物性指标

Table 1 Physical character indices of loess of Bailuyuan

土粒相对 密度 G_s	天然含水 率 $\omega/\%$	干密度 ρ_d /(g/cm ³)	液限 ω_l /%	塑限 ω_p /%	塑性 指数 I_p	初始孔 隙比 e_0
2.70	17.30	1.50	40.50	23.96	16.54	0.80

本次试验使用了西安理工大学自主研制的 XGT-3 新型真三轴仪，是在 XGT-1 型真三轴仪^[3]基础上对数据采集系统集成化处理，压力室内两个方向柔性囊之间隔板的径向伸缩和环向转动的改进而开发的。

2.2 试验方案

考虑到原状黄土的原生各向异性，进行真三轴

试验时加载方向都是按照沉积的方向进行的。本次试验对西安白鹿原原状黄土的进行了 4 个围压、7 个 b 值的等 σ_3 等 b 试验，其中 $\sigma_3 = 50、100、200、300$ kPa， b 值为 0、0.2、0.4、0.5、0.6、0.8、1.0。试验中在大主应力 σ_1 方向采用等应变速率加载，加载速率为 0.05 mm/min，直到试样破坏，破坏标准取轴向 ε_1 达到 12% 作为破坏应变，可以测试得到土样在不同围压、不同中主应力参数 b 条件下剪切破坏时 3 个主应力及 3 个主应变。

3 黄土的真三轴剪切特性分析

3.1 应力-应变关系

依据试验过程中采集的主应力状态和主应变状态，得到广义剪应力 q 与平均球应力 p 比值、体积应变 ε_v 、中主应变 ε_2 随大主应变 ε_1 的变化规律。

图 1 为天然含水率原状黄土不同围压及中主应力参数的 $q/p-\varepsilon_s$ 的关系曲线。在较小围压和 b 值条件下，结构性黄土出现了应变软化的现象。较小围压使得在加荷过程中黄土结构强度突然丧失使得应力-应变关系曲线均出现了软化的现象；较大围压作用下固结作用破坏了土的结构，则表现为硬化的特性。 b 值较大时，加载过程土承受的中主应力增长较大，中、小主应力作用平面内的剪切作用突出，

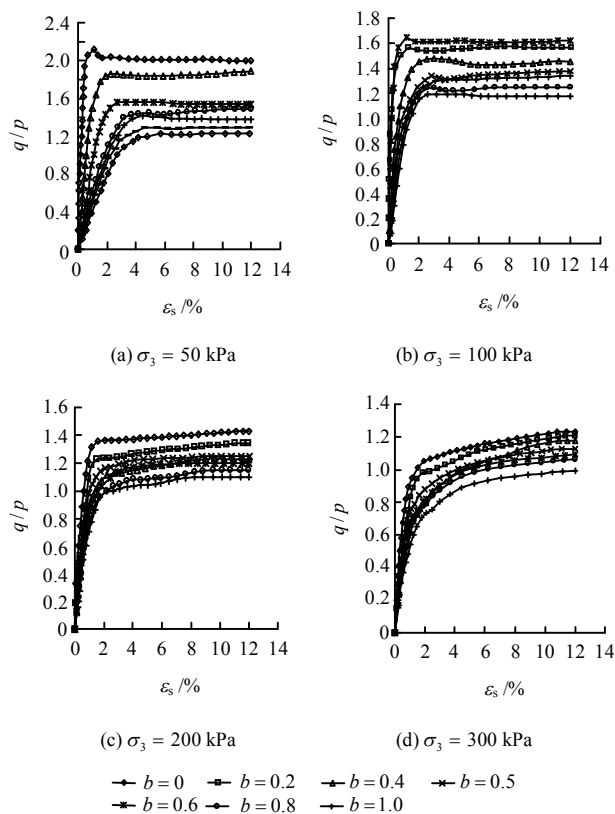


图 1 原状黄土不同围压下 $q/p-\varepsilon_s$ 关系曲线
Fig.1 Relationships of $q/p-\varepsilon_s$ of undisturbed loess with different confined pressures

平均球应力增长的压缩作用增强,使得真三轴压缩过程中黄土的原生结构破坏迅速,伴随着次生结构的形成,且次生结构生成的速率大于原生结构的损伤速率,表现为相同平均球应力时土的强度较小 b 值的强度小。随着围压增大, $q/p-\varepsilon_s$ 关系曲线反映的硬化性更加显著。

图2为原状黄土不同围压及中主应力参数 b 的 $\varepsilon_2-\varepsilon_1$ 关系曲线。当 $b=0$ 时,中、小主应力均为围压保持不变,试样产生侧胀变形,即 ε_2 为负;当 $b=0.2\sim 1$ 时,真三轴压缩过程的中主应力随大主应力而增大,中主应力作用方向产生了压缩变形,即 ε_2 为正。与应力-应变关系曲线变化不同的是,不同围压下 ε_2 的变化趋势比较统一, $\varepsilon_2-\varepsilon_1$ 关系曲线都出现了转折点,此后 ε_2 随 ε_1 的变化趋缓。 $\varepsilon_2-\varepsilon_1$ 关系曲线的转折点说明土的剪切变形性质产生了显著的变化,出现了应变局部化的剪切带,改变了土的剪切性状。但是,剪切带的出现,并不一定代表出现了剪切强度峰值点。在较小围压或者 b 值时,强度峰值和 ε_2 的转折点出现在土不同变形状态,且差异较大。

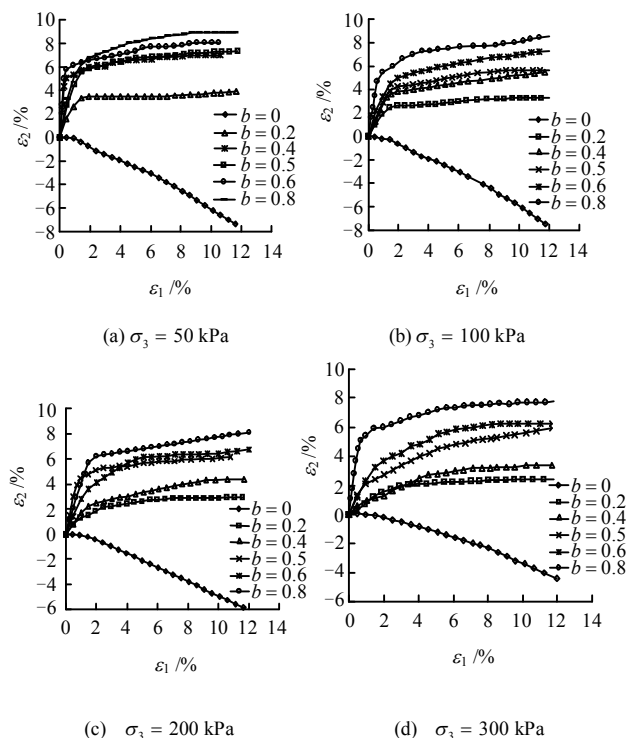


图2 原状黄土中主应变 ε_2 与轴向应变 ε_1 的关系
Fig.2 Relationships between principal strains vs. axial strain of undisturbed loess

图3为不同围压、不同中主应力参数 b 条件下原状黄土的体应变 ε_v 与轴向应变 ε_1 关系曲线。从图中可知, $\sigma_3 = 50$ kPa 时 ε_v 随着 ε_1 增大而先增大后减

小,出现了明显的转折点; $\sigma_3 = 100$ kPa, $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ 关系曲线近似呈双曲线; $\sigma_3 = 200$ 、300 kPa 围压的规律基本一致。在较大固结围压作用下 ε_v 在真三轴压缩中呈压缩体应变逐渐增长的发展规律; $\varepsilon_v-\varepsilon_1$ 关系曲线形态总体上都有转折点的存在,这主要是剪切带形成后剪切变形局部化发展的结果。真三轴压缩初始,土单元均匀变形,均匀承担附加作用荷载,随着剪切变形发展逐渐演变为应变局部化剪切带,土单元的细观结构体非均匀承担荷载, ε_v 的变化趋向一个细观尺度结构体的体积变形。文中没有给出 $b=1.0$ 的试验结果,只是由于固结围压较大时, σ_2 主应力增长较大,真三轴压缩初始试样即产生较大的压缩变形,易产生中、小主应力平面内的剪切破坏,没有得到完整地变形测试结果。

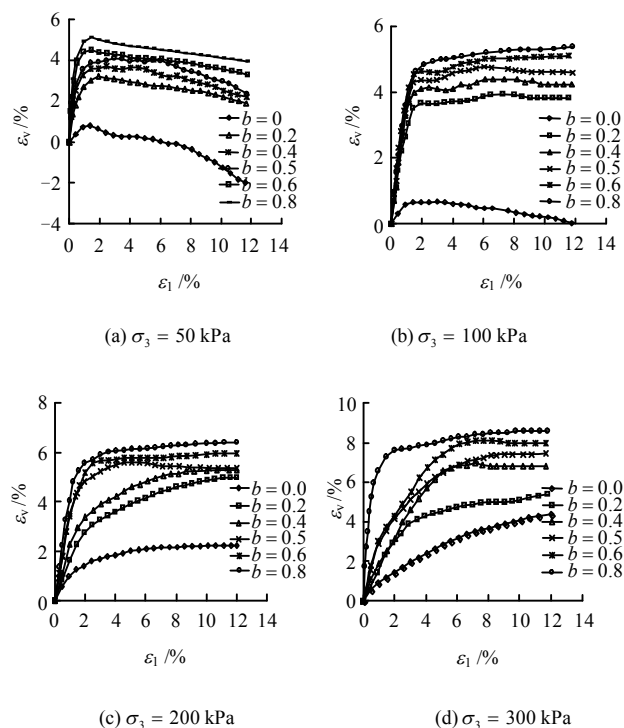


图3 原状黄土体应变 ε_v 与轴向应变 ε_1 之间的关系
Fig.3 Relationships between principal strain vs. axial strain of undisturbed loess

Lade^[4-7]在改进的三轴仪器上对圣塔莫尼卡海滩砂等进行了小围压条件下3个相对密度的试验,研究了不同中间主应力条件下破坏时剪切带的效应,试验结果显示,砂土应力比 $\sigma_1/\sigma_3-\varepsilon_1$ 的关系曲线的峰值点和中间主应变 $\varepsilon_2-\varepsilon_1$ 关系曲线的转折点几乎是同时发生的,与本文得到的试验结果相似。然而,不同的是围压较大时,结构性黄土的 $q/p-\varepsilon_s$ 曲线表现为硬化型曲线,没有上述的规律性。尽管如此,在真三轴压缩试验结束后,大部分试样都出

现了明显的剪切带, 说明黄土硬化机制条件下也伴随着产生应变局部化剪切带。不同围压和等中主应力参数 b 值条件下, ε_2 、 ε_v 的曲线形态出现了一个共同的特征点, 即压缩变形发展变缓的转折点, 剪切过程中试样变形性状发生了变化, 由原结构逐渐损伤后持续的压缩塑性变形转变为应变局部化剪切带产生和发展, 即原生结构损伤过程以及次生结构的形成过程。

3.2 破坏应力状态与破坏应变状态

从图 4 中可以看出, 相同围压作用下破坏应力比 η_f 随着中主应力参数 b 的增大而减小。当 b 值较小时, 随着 b 的变化 η_f 变化较大; 当 b 值较大时, 随着 b 的变化 η_f 变化较小。相同的 b 值条件下, η_f 随着 σ_3 的增大而减小, 且 b 值较小时, 随着 σ_3 的增大, η_f 随 b 值的变化较为显著。原状黄土围压 50 kPa 时破坏的最大轴向应变 ε_{1max} 随着 b 值的增大先减小, 后趋于稳定; 围压增大后并没有出现相似的破坏大主应变变化规律, 说明峰值强度不能描述剪切带的产生, 主要原因是较大围压限制了部分变形的发展。

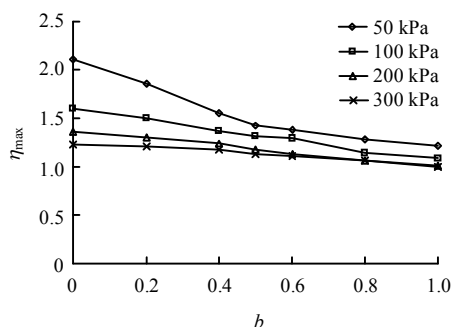


图 4 不同围压下的 η_f - b 关系曲线
Fig.4 Relationships between η_f and b with different confined pressures

本次的真三轴剪切试验是在一定围压条件下随着大主应力增大, 控制中主应力比值 b 为常数进行的。剪切过程中试样承受的平均球应力不断增大, 剪切破坏时可以得到对应的平均球应力和广义剪应力。不同围压作用下, 控制相同的中主应力比值, 即可得到同一 b 值条件下子午平面内的强度破坏线, 控制不同的中主应力比值就可以得到子午平面内一组强度破坏线, 如图 5 所示。其反映了原状黄土在子午平面下的规律特性, 其变化规律可用线性拟合近似描述。相同平均球应力条件下破坏时广义剪应力随着中主应力比值的增大而增大, 即中主应力的增加使得土样破坏时相同球应力的广义剪应力而减小; 小围压作用下原状黄土原生结构中的

黏聚力起主导作用, 提高了黄土的抗剪强度; 较大围压作用下, 土的摩擦强度逐渐得到发挥, 提高了压损作用下次生结构土的抗剪强度。同一平均球应力 ($p = 200, 400, 600$ kPa) 条件下土的广义剪应力强度随中主应力比值的变化如图 6 所示, π 平面上黄土的强度破坏线呈光滑的曲边三角形, 极限线表现为明显的非线性特性; 随着球应力的增大, 破坏面性状相似, 且不断增大, 反映了黄土原生结构损伤显著, 次生结构黄土的压硬性显著增强。与 Mohr-Coulomb 强度准则和 $\sqrt[3]{\sigma}$ -SMP 强度破坏准则^[8]描述的强度破坏线比较 (图 6 中实线), π 平面上试验点更加接近 $\sqrt[3]{\sigma}$ -SMP 强度破坏准则, 进一步验证了 $\sqrt[3]{\sigma}$ -SMP 强度准则的对结构性黄土的适用性。

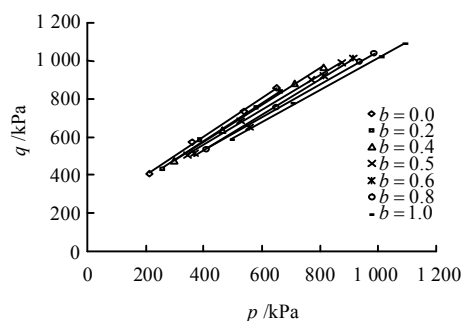


图 5 不同中间主应力参数 b 下的 p - q 关系
Fig.5 Relationships between of p - q with different b -values

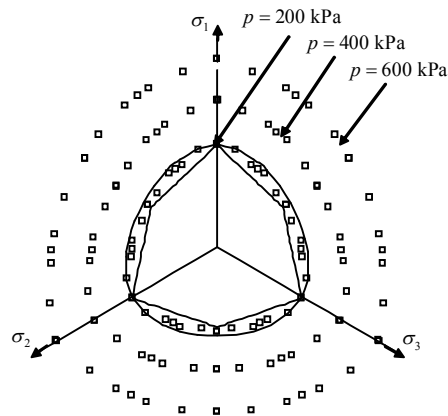


图 6 不同球应力下的 π 平面上的破坏面
Fig.6 Surface shapes on π plane with different mean normal stress

3.3 真三轴应力状态下试样的剪切带形式

室内土工抗剪强度试验中, 试样的破坏模式与土样的均匀性、边界约束、加载速率、仪器加载轴向的偏心等因素有关, 本文分析了上述原因后, 在试样的上、下端部涂抹凡士林, 以便消除上下底板的摩擦作用。装样过程中, 以压力室底板中心为基准, 将试样放入压力室中央, 使试样能够均匀受荷; 加荷速率按照慢速剪切速率, 使得变形的发展能够

充分^[9]。从图 7 的中主应力方向正交侧面试样的破坏模式（试样尺寸为 70 mm×70 mm×70 mm）可以看出，不同应力条件下试样的破坏模式比较复杂，主要分为四种类型，（1）单一剪切带破坏模式：在 ε_2 方向正交面上产生了一条倾斜裂缝，并沿 ε_3 方向正交面侧向挤出。（2）锥型剪切带破坏模式：由试样的上边界下侧面产生两条斜裂缝，形成 V 型破裂面；下边界端部形成锥形形体，刺入上边界面下 V 型裂缝内。（3）X 型剪切带破坏模式：试样在 ε_2 方向正交面上形成明显的 X 型剪切带， $b=0.4$ 的剪切带较 $b=0.2$ 的更加明显；随着 b 值增大，破坏形式由锥形破坏模式逐渐过渡 X 型剪切带破坏模式。（4）单一倾向多剪切带破坏模式：随着 b 值增大，试样破坏时产生多条单一倾向剪切带裂隙，出现了整体被压碎的状况。

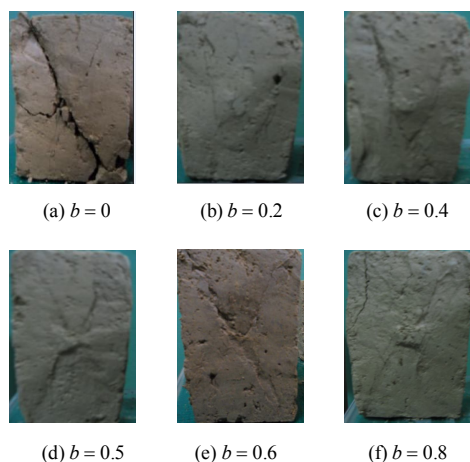


图 7 原状黄土试样不同 b 值的破坏模式
Fig.7 Failure mode of undisturbed loess sample with different b -values

综上所述，绝大多数试样都出现了明显的剪切带，与中主应力作用面正交，破坏模式变化比较复杂。上述剪切带形成的原因可归结为三方面：（1）黄土的细观结构可能为架空结构、镶嵌胶结式结构等，竖向裂隙或大空隙发育，使得黄土土粒骨架结构分布极为不均匀，具有原生的各向异性。黄土的特殊沉积作用及其形成的物质结构是其剪切带产生、发展的内因。（2）原状试样制备的过程中的扰动、以及加载边界条件的变化是剪切带形成的外部条件。原状黄土的在切削过程中或多或少的扰动了土的结构；长方体试样上、下断面刚性加载板的约束作用，试样侧面柔性液压囊之间的隔离板对侧棱边的弹性约束作用，形成了特定的边界条件。本次试验中采用的一定围压条件下等中主应力比值的试验应力路径，此加载边界与剪切带发展有着密切的关系。（3）在外部受荷的条件下天然黄土的结

构性的固化联结键遭到破坏，使得土的力学性质发生了显著的变化。强度出现弱化必然伴随着应变局部化的变形。原来定向排列的颗粒因剪应力的作用将会发生旋转和移动，黄土剪切带的形成是局部化原生结构损伤和次生结构愈合综合作用的结果。

4 结 论

（1）不同围压等中主应力比值应力路径下，结构性黄土试样大部分都形成了剪切带，中主应变和体应变随大主应变的关系曲线都出现了明显的转折点，真三轴压缩剪切过程土的变形性状发生了变化，与应变局部化剪切带的产生有密切的联系。抗剪强度峰值可能出现在应变软化机制中，也可能出现在应变硬化机制中。围压较小时，压缩作用未导致原状黄土的结构发生破损，剪切过程应变局部化导致剪切带产生，应力-应变关系曲线呈软化型；围压较大时，压缩作用已引起原状黄土结构发生破损，但剪切过程应变局部化导致剪切带进一步发展及次生结构形成，应力-应变曲线呈硬化型。变形曲线上出现转折点能够揭示剪切带的发生，黄土的软化特性和应变局部化没有必然的联系。

（2）真三轴应力条件下黄土破坏比 η_f 随着 b 值的增大而减小，子午破坏线极限平面内近似为线性， π 极限平面上呈非线性曲边三角形。

（3）真三轴应力条件下黄土的剪切带模式主要为单一倾斜剪切带破坏模式、锥形剪切带破坏模式、X 型剪切带破坏模式，单一倾向多剪切带破坏模式。原状黄土产生多种剪切带破坏模式的根本原因在于土骨架结构中竖向裂隙、空隙发育、原生各向异性及欠压密性状内因，以及复杂应力条件外因的共同作用。

参 考 文 献

- [1] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
- [2] 谢定义. 论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3—13.
XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loesssoil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3—13.
- [3] 邵生俊, 罗爱忠, 邓国华, 等. 一种新型真三轴仪的研制与开发[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(8): 1172—1179.
SHAO Sheng-jun, LUO Ai-zhong, DENG Guo-hua. Development of a new true triaxial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8): 1172—1179.