

DOI: 10.11779/CJGE201409007

黄土各向异性强度特性的真三轴试验研究

邵生俊^{1,2}, 许萍^{1,2}, 王强¹, 代亚锋^{1,2}

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

摘要: 黄土水平面内沉积结构及其发育的竖向裂隙构造使其具有明显的各向异性特征。通过黄土竖直裂隙向及其正交方向作用三维主应力状态几何空间八面体平面上3个空间域的真三轴试验, 揭示了各空间域不同中主应力比值应力路径的剪切应力应变变化规律及抗剪强度变化规律。表明黄土竖向裂隙向作用大主应力的抗剪应力均大于水平面内正交两向作用大主应力的抗剪应力; 中主应力增强作用能够诱导黄土的各向异性结构性; 横观各向同性或者各向异性黄土八面体面上的强度破坏面随着平均球应力增大均呈椭圆、圆和曲边三角形变化, 椭圆形破坏面可分别由轴对称压缩空间滑动面强度准则或轴对称挤伸空间滑动面强度准则近似地描述。

关键词: 各向异性; 强度特性; 强度破坏面; 黄土

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)09-1614-10

作者简介: 邵生俊(1964-), 男, 甘肃武威人, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学与黄土力学研究。E-mail: sjshao@xaut.edu.cn。

True triaxial tests on anisotropic strength characteristics of loess

SHAO Sheng-jun^{1,2}, XU Ping^{1,2}, WANG Qiang¹, DAI Ya-feng^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Loess

Mechanics and Engineering, Xi'an 710048, China)

Abstract: The structure of loess consisting of horizontally deposited planes and vertically extended micro-fractures makes the anisotropic strength behavior of loess remarkable. Through triaxial tests, three principal stresses are alternatively loaded on loess specimens along the direction of vertical micro-fracture and two orthogonal directions in horizontally deposited plane, whose stress conditions are respectively corresponding to three sectors in the octahedral plane of geometric space. The experimental results reveal the laws of shear stress-strain and strength under different stress paths that the shear stress when the major principal stress is applied in the direction of vertical fracture is commonly larger than one during the major principal stress is loaded in the two orthogonal directions; the larger intermediate principal stress can induce more significant anisotropic structure of loess; the yield loci in the octahedral plane for cross-isotropic or cross-anisotropic loess appear to be elliptical, circular and triangular with curved edges changing with the increase of spherical stress, and elliptical yield locus can be approximatively expressed by the strength criterion of AC-SMP or AE-SMP.

Key words: anisotropy; strength characteristic; yield surface; loess

0 引言

天然沉积土往往具有不同方向组构和联结特征的差异及不同的构造分布, 使得土不同方向的力学性质不同, 表现为非均匀性和各向异性。不仅如此, 在荷载作用下变形发展过程, 亦可能导致土粒组构发生改变, 产生应力诱导各向异性发生。Casagrande等^[1]首先观察到了土的强度各向异性。Duncan等^[2]试验研究了黏性土不排水强度随方向的变化规律。Oda等^[3-4]发现, 在加载方向和沉积面垂直时得到的最大承载力和在加载方向与沉积面平行时得到的最小承载力差别可以达到34%。并且, 提出了描述土颗粒空间排列的

组构张量。Kirkard等^[5]在真三轴应力条件下开展了San Francisco湾淤土的强度各向异性试验研究, 通过竖向分别施加大、中、小主应力得到了应力空间的强度破坏面, 表现出来明显的横观各向同性强度变化规律。Lade等^[6-7]通过固结完成后小主应力不变, 在竖向和水平向分别施加大主应力和控制中主应力条件下开展了砂土的各向异性试验研究, 测试分析了砂土的剪切带性状和体应变与强度破坏随加载方向的变化特

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272320); 陕西省教育厅省级重点实验室项目(2010JS084)

收稿日期: 2013-11-15

性, 表明砂土具有明显的横观各向同性和竖向异性变形、强度变化规律, 提出了砂土横观各向同性强度准则。姚仰平等^[8]假定横观各向同性土的强度随 SMP 面(空间滑动面)和沉积面的夹角减小而变小, 建立了横观各向同性土的峰值强度表达式, 提出了一个关于横观各向同性土的峰值强度和应力张量函数的各向异性变换应力张量, 应用变换应力空间的方法建立了横观各向同性的三维强度准则。邵生俊等^[9]在考察不同强度准则空间剪切破坏面和真三轴应力条件下具有竖向裂隙构造土单元剪切破坏面的基础上, 认为竖向裂隙控制土单元空间剪切破坏面不随应力状态而变化, 提出了竖向轴对称压缩空间滑动面和竖向轴对称挤伸空间滑动面强度准则, 以此来描述竖向裂隙横观各向同性土的强度变化规律。本文针对具有特殊结构性质和竖向裂隙构造特征的黄土开展了真三轴试验, 揭示了其三维空间强度变化规律。

1 黄土的结构特征分析与试验研究

黄土具有显著的各向异性, 一方面有水平面内沉积的结构特征, 分布有大孔隙; 另一方面有沿铅锤向分布的微裂隙构造特征。尤其是 Q₃ 黄土, 可称为竖向裂隙正交沉积面的各向异性介质。竖向裂隙正交沉积面结构的黄土单元体, 如图 1 所示。尽管黄土具有明显的各向异性结构特征, 但为了分析问题方便, 工程实践中还是将其简化为各向同性介质来对待。一般, 黄土地基工程中, 土的应力状态可简化为大主应力作用于竖向裂隙方向, 由此来测试分析黄土的力学特性。然而, 当黄土竖直面上受到地下结构作用压力时, 则与铅锤向裂隙正交方向上也可能承受大主应力作用。鉴于此, 本文对一种黄土首先进行了竖向裂隙方向分别作用大、中、小主应力的真三轴试验, 比较了竖向裂隙方向分别作用大、中、小主应力时不同应力路径下土的抗剪强度, 进而分析了黄土各向异性强度特性。

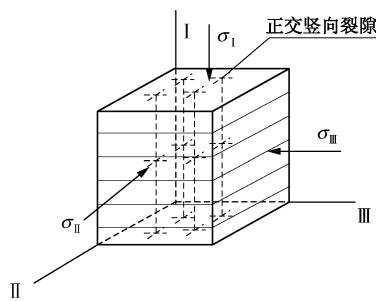


图 1 竖向裂隙构造的黄土单元体

Fig. 1 Elemental mass of loess with micro-fracture

采用原状黄土制备各向异性立方体试样, 具体步骤: 首先现场取样时标注清楚竖向和水平沉积面。然

后, 室内制备试样时需要按照沉积面和竖直裂隙向依次切削出与竖向正交的水平面及沉积面内正交两向为法向的垂直面, 构成立方体试样, 并保证 6 个面与沉积面一致或正交。真三轴试验测试黄土各向异性特性时, 按照土的沉积面分别施加大、中、小主应力, 其它两个方向施加中小、大小以及大中主应力安装试样, 从而可以实现几何空间域内坐标轴向分别作用大主应力不同空间域的强度破坏面的试验研究。

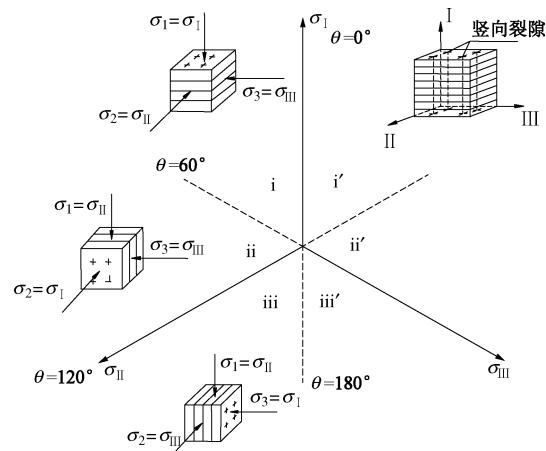


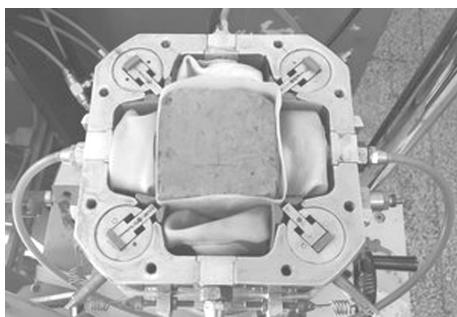
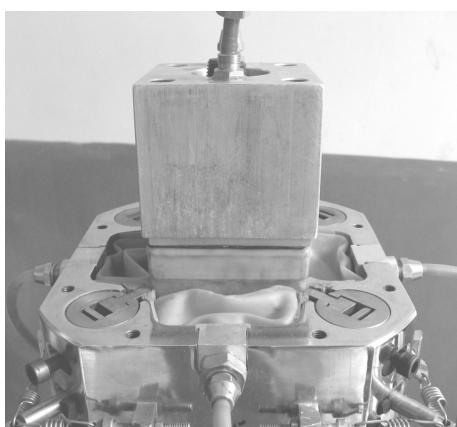
图 2 八面体面上黄土单元体的主应力状态分区图

Fig. 2 Different principal stress states of elemental mass of loess in sectors i, ii and iii of octahedral plane

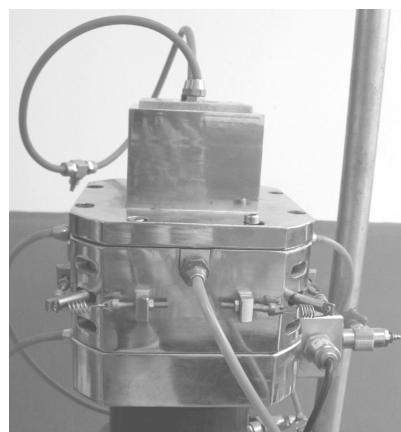
将黄土视为横观各向同性和竖向分布裂隙的异性介质, 在竖向裂隙方向的 I 轴及其水平面内正交两向的 II 轴、III 轴上作用主应力的空间内, 当竖向裂隙方向的 I 轴上分别作用大、中、小主应力时, 则对应于八面体平面上的空间域 i、ii 和 iii。八面体面上空间域 i、域 ii 和域 iii 的罗德角变化范围分别为 [0° ~ 60°]、[60° ~ 120°]、[120° ~ 180°], 如图 2 所示。在 3 个域内分别控制不同的罗德角, 对应中主应力比值变化范围为 0~1, 进行等罗德角应力路径的真三轴试验, 可以考察土的各向异性对剪切变形特性和强度特性的影响。

试样采取自西安白鹿原的黄土, 试样的平均干密度约为 1.50 g/cm³, 平均含水率约为 17.2%, 平均孔隙比约为 0.80, 平均塑性指数约为 12.0。同时, 按照黄土构度指标的确定方法^[11], 测得构度的平均值约为 6.7。真三轴试样的尺寸为 7 cm × 7 cm × 7 cm 的正方体。试验仪器为西安理工大学自行研制的真三轴仪^[10]。该仪器具有竖向刚性板加载、侧向柔性加载的一室四腔加载机构, 以及避免三向加载互相干扰的特点。它不同于目前国内外已经研制应用的三向刚性加载机构(瑞典 W.Kjellman (1936) 和英国剑桥大学研制的真

三轴仪)、三向柔性加载机构 (Ko 和 Scott (1967)、Sture 和 Desai (1979)、Sivakukan 等 (1988) 研制的真三轴仪) 和大、中主应力两向刚性-小主应力方向柔性加载机构 (Lade (1978)、Kirkgaard 和 Lade (1993) 研制的真三轴仪)，属于大主应力方向为刚性，中、小主应力方向为柔性的加载机构，如图 3 所示。试样竖向施加大主应力，采用刚性板加载；试样侧面水平面内正交两向上分别采用一对柔性液压囊加载。试验通过隔离板机构保证液压囊与土样表面贴合，通过单片机程序对试样横截面尺寸时时调用，同时对压力传感器进行定期校准等措施确保真三轴仪水平向柔性加载应力的准确性；试样水平向变形分别通过步进电机推进液压缸内活塞位移量测确定的体积变化量，依次进行试样顶盖竖向压入压力室的体变校正，以及液压囊及其连通活塞液压缸充水随液压的体变量校正而确保侧向应变的准确性。真三轴试样的固结围压依次为 50, 100, 200, 300 kPa，真三轴压缩试验过程中控制中主应力 b 值分别为 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0。试样的破坏条件为大、小主应力差随大主应变曲线的峰值点或无峰值时为大主应变达到 10% 的取值。当原状黄土竖向裂隙向作用大主应力，或者竖向裂隙向正交水平面内两个方向依次作用大主应力，且竖向裂隙方向对应的作用中主应力或者小主应力时，可以得到 σ_I , σ_{II} , σ_{III} 空间内对应 3 个域 (i, ii, iii) 的应力路径。如图 2 所示。



(a) 压力室内部结构



(b) 压力室外观

图 3 真三轴仪加载机构

Fig. 3 Loading structure of true triaxial apparatus

2 不同应力空间域的剪切变形特性和破坏模式

2.1 不同应力空间域的剪切变形特性

针对具有竖向裂隙结构的原状黄土，以竖向裂隙向为 I 轴、水平面内正交两向分别为 II 轴和 III 轴，沿正交三向作用主应力，其中竖向裂隙向的 I 轴分别作用大、中、小主应力，且控制真三轴压缩剪切过程的中主应力比值，可以在 $\sigma_I - \sigma_{II} - \sigma_{III}$ 主应力空间内得到 i、ii、iii 域不同应力路径的广义剪切应力应变关系的试验结果。如图 4 所示，分别给出了不同中主应力比值条件下，3 个应力空间域广义剪应力与大主应变之间的关系曲线。可以得到以下认识：

(1) 当 3 个空间域 b 值均为 0，且固结围压小于 300 kPa 时，一定轴向应变条件下，空间域 i、ii、iii 的剪切应力应变曲线的抗剪应力依次减小。表明黄土竖向裂隙向和水平面内与其正交两个方向分别作用大主应力时，土的剪切变形和强度特性具有差异。

(2) 当 3 个空间域的 b 值均为 0.25，且固结围压小于 300 kPa 时，各空间域的剪切应力应变曲线也有明显的差异。一定轴向应变条件下，空间域 iii 较 ii 的抗剪应力大。表明中主应力 b 值较小，且固结围压较小时，原状黄土结构的各向异性显著；黄土竖向裂隙向为小主应力时，大、中主应力始终与竖直裂隙面正交，随着中主应力作用增大，土的抗剪应力增长较大；然而，黄土竖向裂隙向为中主应力时，大、小主应力始终作用于与竖向裂隙正交的平面内，随着中主应力作用增大，土的抗剪应力增长较小。

(3) 当 3 个空间域 b 值为 0, 0.25，且固结围压为 300 kPa 时，空间域 i、ii、iii 的剪切应力应变曲线基本一致。表明固结围压较大，且中主应力作用较小

时, 等向压缩作用破坏了原状黄土的各向异性结构特征, 土的剪切变形特性和强度特性趋于一致。

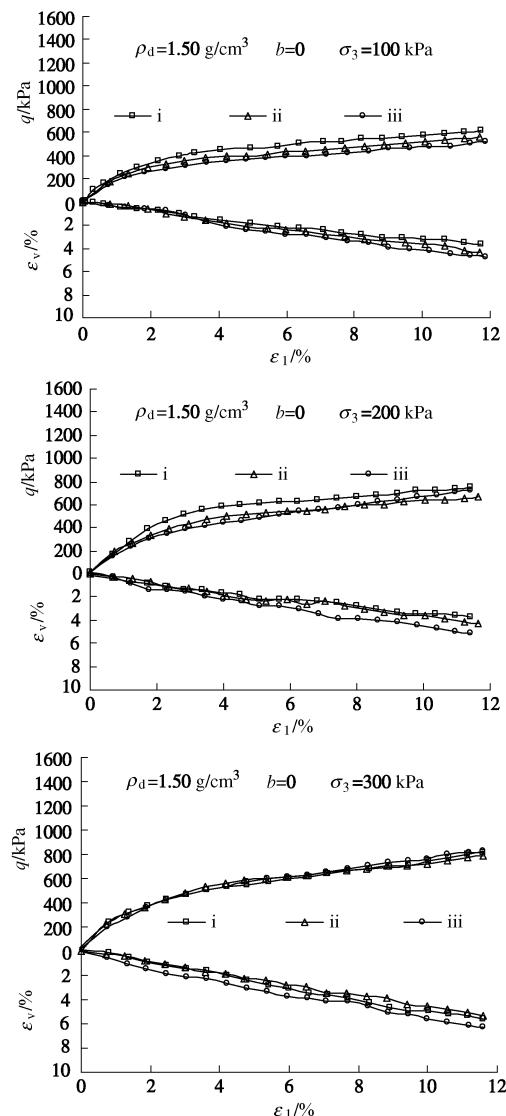
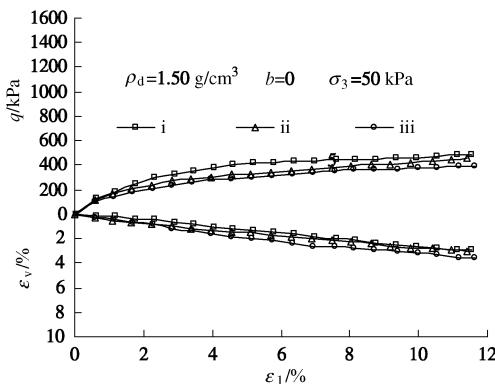
(4) 当3个空间域 b 值分别为0.5, 且固结围压分别为50, 100 kPa时, 空间域i、ii、iii的剪切应力应变曲线的差异较小。表明中主应力等于大、小主应力均值时, 尽管空间域ii的大、小主应力作用于竖向裂隙正交的水平面内, 土的抗剪应力较小, 但竖向裂隙向中主应力增大使得土的摩阻抗剪应力增长较大; 而空间域i或iii的大、小主应力作用于竖向裂隙平面内, 土的抗剪应力较小, 但水平向中主应力增大使得土的摩阻抗剪应力增长较小。综合各主应力差的作用效应, 表现为一定轴向应变条件下, 土的广义抗剪应力趋于一致。

(5) 当3个空间域 b 值分别为0.5, 且固结围压分别为200, 300 kPa时, 一定轴向应变条件下, 空间域i、ii、iii的剪切应力应变曲线的抗剪应力依次减小。表明, 随着中主应力比值和固结围压增大, 中主应力作用增强, 应力诱导黄土各向异性的结构特征进一步表现出来, 使得各空间域的抗剪应力不同。

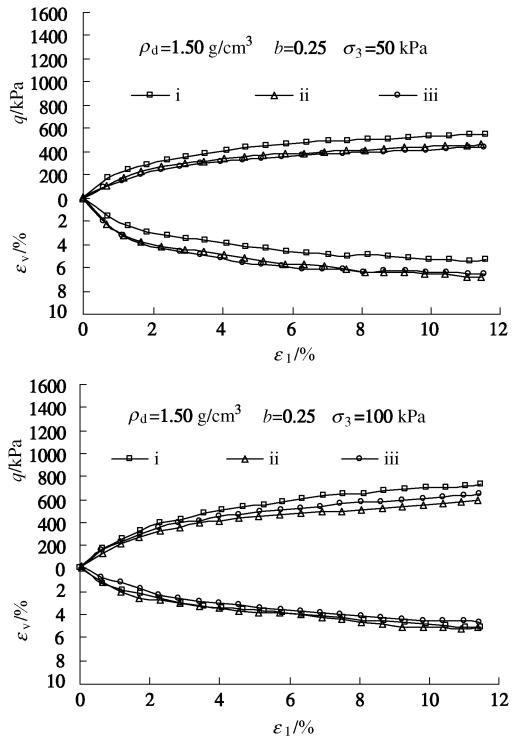
(6) 当3个空间域 b 值为0.75时, 一定轴向应变条件下, 空间域i、iii、ii的剪切应力应变曲线的抗剪应力依次减小。表明 b 值较大时, 中主应力增长作用使得与其正交的竖向裂隙面得到加固, 竖向裂隙向平面内大、小主应力差作用下的抗剪作用增强; 水平面内大、小主应力差作用下的抗剪作用较小。

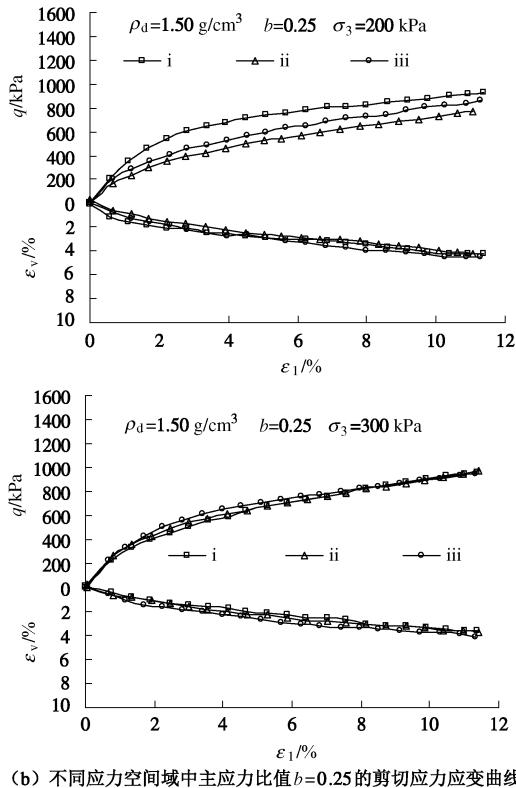
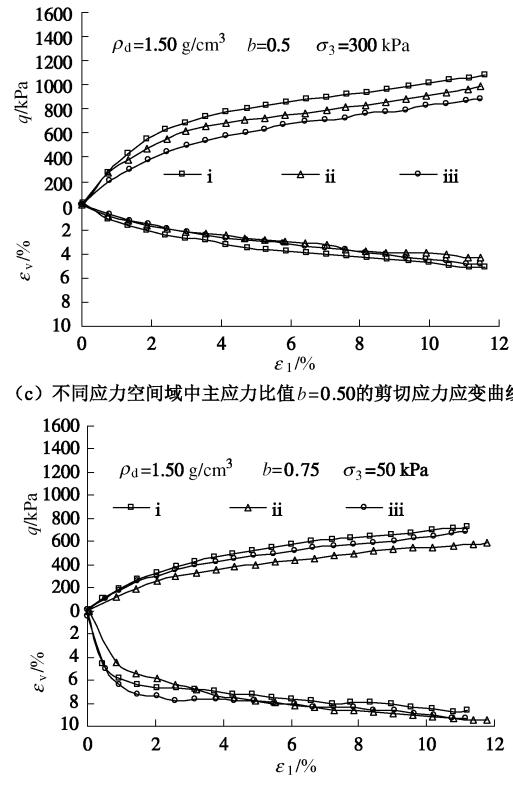
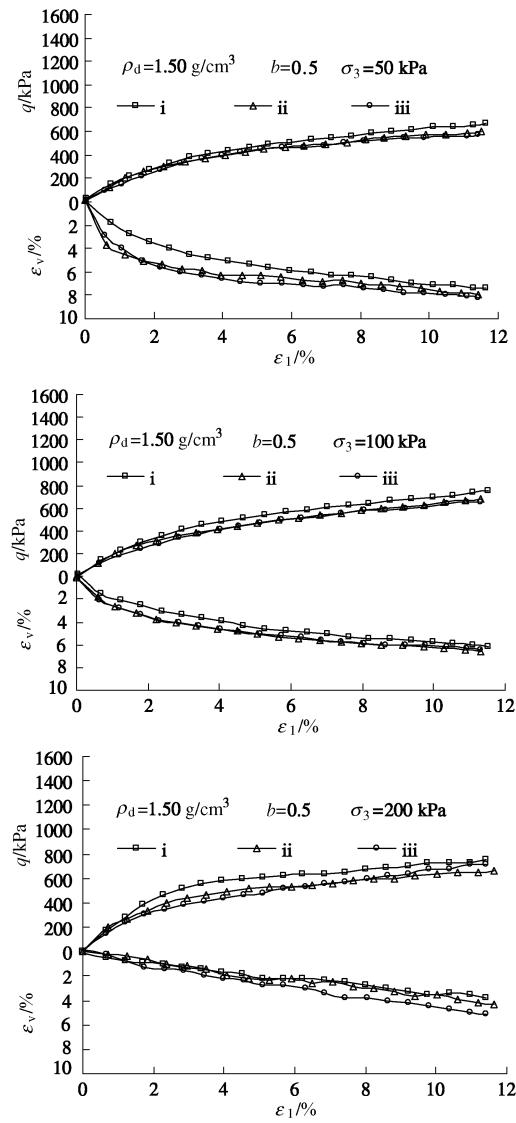
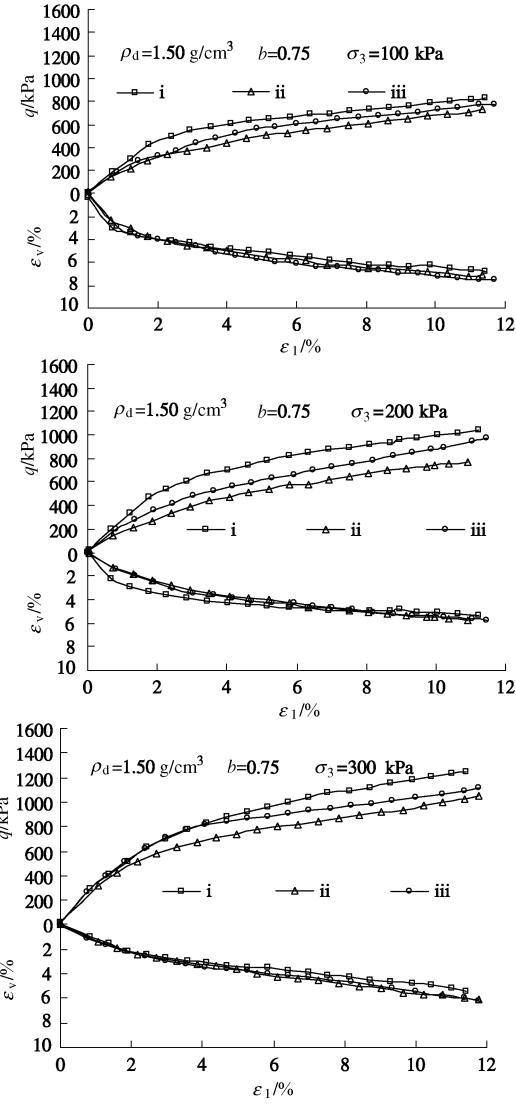
(7) 当3个空间域 b 值为1.0时, 不同固结围压条件下空间域i、iii的剪切应力应变曲线趋于一致, 一定轴向应变条件下, 空间域ii的剪切应力应变曲线的抗剪应力较小。表明, 竖向裂隙向竖直面内作用大、小主应力差, 与该面正交方向作用中主应力时, 土的抗剪强度近似相等; 水平面内大、小主应力差作用下的抗剪强度较小。

不同中主应力比值条件下, 3个应力空间域剪切体应变变化特性有以下认识:



(a) 不同应力空间域中主应力比值 $b=0$ 的剪切应力应变曲线



(b) 不同应力空间域中主应力比值 $b=0.25$ 的剪切应力应变曲线(c) 不同应力空间域中主应力比值 $b=0.50$ 的剪切应力应变曲线(d) 不同应力空间域中主应力比值 $b=0.75$ 的剪切应力应变曲线

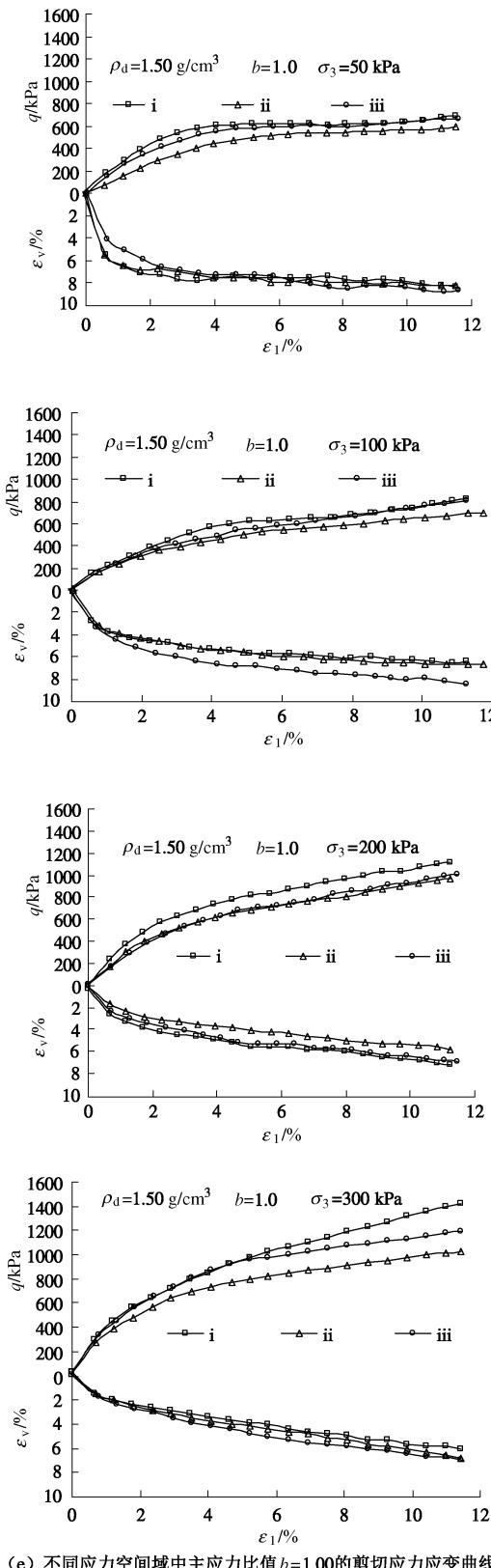


图4 原状黄土不同应力空间域的应力应变关系

Fig. 4 Stress-strain curves of intact loess under different stress paths and in stress spaces of sectors i, ii and iii

(1) 由于黄土的孔隙比较大, 含水率较大, 结构性不强, 处于欠压密状态, 因此, 在真三轴压剪作用下易产生压密和剪缩变形。不同固结围压、不同中主

应力比值的真三轴压缩剪切过程均呈体缩变化特性。

(2) 尽管方形试样真三轴压缩应力作用下其中两向主应力均采用了柔性液囊加载, 但大主应力方向的刚性板加载仍然对试样具有约束作用。大主应力向加载板对试样端部的约束影响, 增强了土的真三轴作用下的压缩变形。

(3) 在较大中主应力比值应力路径条件下, 当试样由初始的均压固结转变为给定中主应力比值的真三轴压缩作用时, 中、小主应力之间的剪切作用较大, 土的初始剪缩变形更加突出。

3 不同应力空间域的强度变化规律

在应力空间域i、ii、iii内均可得到不同中主应力比值应力路径上的强度破坏线, 如图5所示。表明各应力空间域内不同中主应力比值的强度破坏线呈线性关系。按照各向同性介质强度破坏面在 π 平面内关

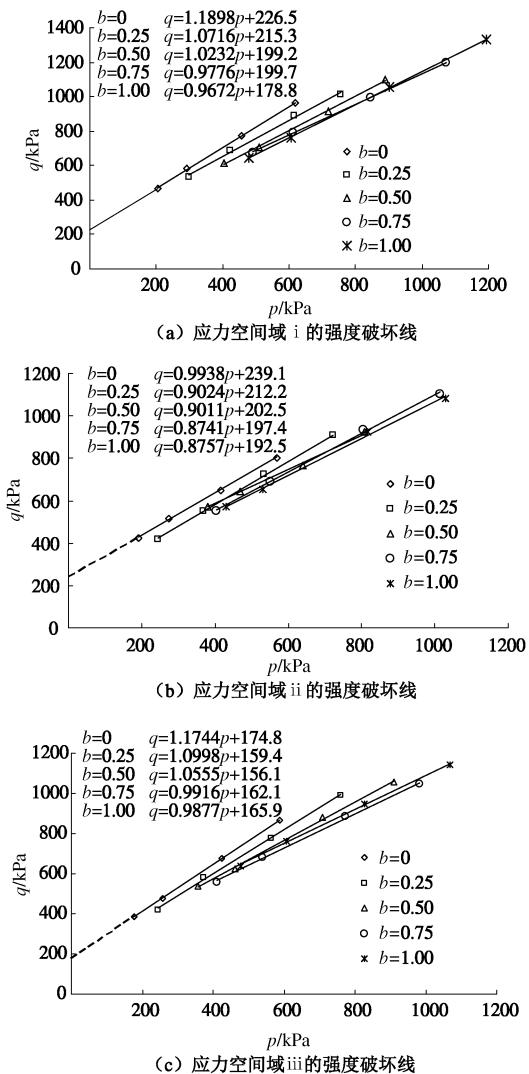
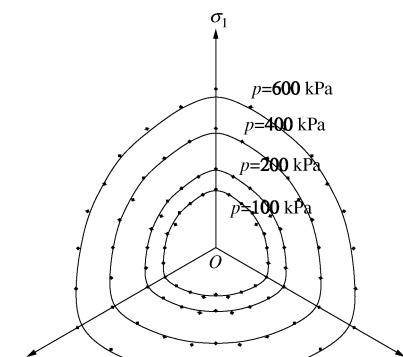


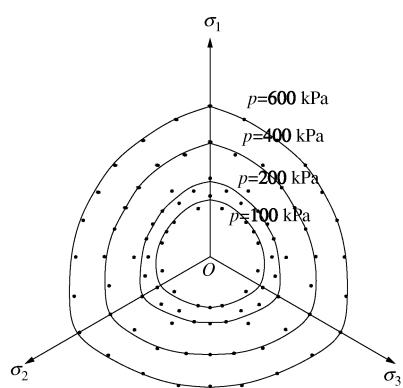
图5 不同应力空间域的子午平面强度破坏线

Fig. 5 Shear failure surfaces in p - q plane under different stress paths and in stress spaces of sectors i, ii and iii

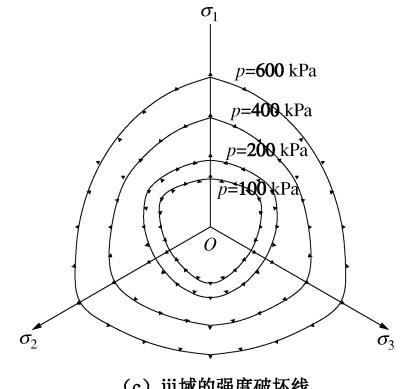
于主应力轴对称分布的条件,由不同应力空间域不同中主应力比值的线性强度线可得到平均球应力为 100, 200, 400, 600 kPa 时不同 π 平面上的不同强度破坏线,如图 6 所示。



(a) i 域的强度破坏线



(b) ii 域的强度破坏线



(c) iii 域的强度破坏线

图 6 不同应力空间域 π 平面上的强度破坏线

Fig. 6 Yield loci under different spherical stresses in stress spaces of sectors i, ii and iii

依据图 6 可知, π 平面上的强度破坏线变化规律表明, 平均球应力为 100, 200 kPa 时, 应力空间域 i、ii 和应力空间域 iii 的强度破坏面有显著差异, 前者为正曲边三角形, 后者为反向曲边三角形; 平均球应力 400, 600 kPa 时, 应力空间域 i、ii、iii 的强度破坏面形态相似, 三者均为正曲边三角形。可见, 平均球应

力较小时, 真三轴压缩作用过程初始的固结围压较小, 对天然黄土各向异性结构的压缩损伤作用较弱, 土的强度变化规律因其原生各向异性而不同。同一平均球应力条件下, 不同应力空间域的强度破坏线比较如图 7 所示。表明当土承受的应力状态处于空间域 i、ii 时, 土单元竖向裂隙方向作用大主应力, 轴对称压缩条件下黄土的抗剪强度较大, 且强度破坏面形态与 AC-SMP 强度准则^[9]近似一致(图 8(a)、(b))。当土承受的应力状态处于空间域 iii 时, 土单元竖向裂隙方向作用小主应力, 轴对称挤伸条件下黄土的抗剪强度最大, 且强度破坏面形态与 AE-SMP 强度准则^[9]近似一致(图 8(c))。随着平均球应力的增大, 真三轴压缩作用过程中初始的固结围压增大, 伴随着的剪切作用, 土原生的各向异性结构作用效应显著降低, 新生各向同性结构作用效应起主导作用, 各应力空间域 i、ii、iii 内的强度破坏线变化特征趋于一致。黏性土的 AC-SMP 强度准则和 AE-SMP 强度准则如下^[9]:

轴对称三轴压缩空间滑动面 (AC-SMP) 强度准则:

$$\frac{(\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_2)^2 + (\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_3)^2 + (\hat{\sigma}_2 - \hat{\sigma}_3)^2 K_p}{(\hat{\sigma}_1 + \hat{\sigma}_2 K_p + \hat{\sigma}_3 K_p)^2} \cdot \frac{9K_p^2}{2(K_p - 1)^2} = 1, \quad (1)$$

式中, $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$, $\hat{\sigma}_i = \sigma_i + c_i \cdot \cot \varphi_i$, $i = 1, 2, 3$ 。

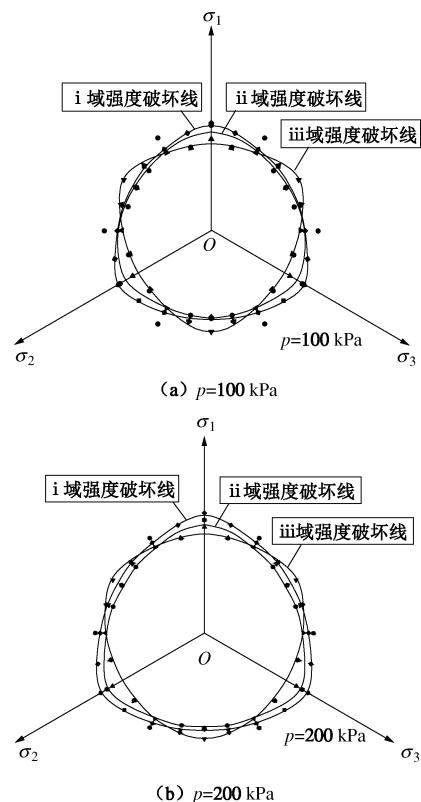
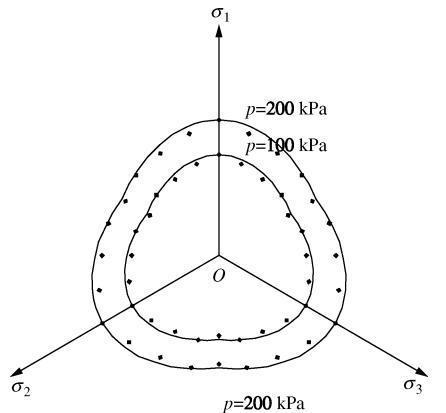
图 7 不同应力空间域 π 平面上黄土强度破坏线的比较

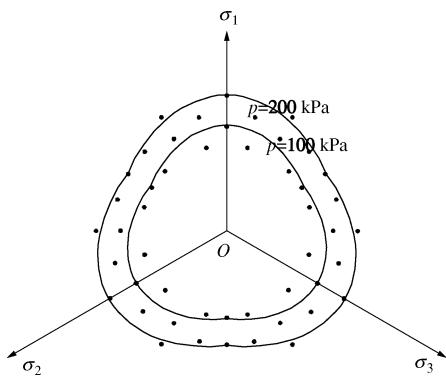
Fig. 7 Comparison of yield loci in the stress spaces of sectors i, ii and iii

轴对称三轴挤伸空间滑动面 (AE-SMP) 强度准则:

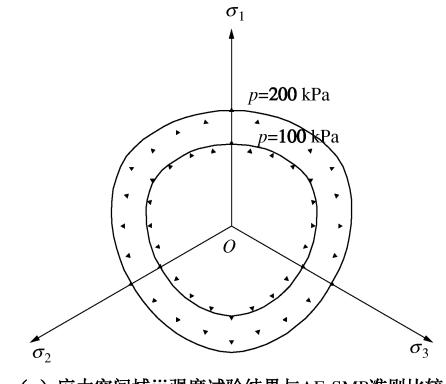
$$\frac{(\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_2)^2 K_p + (\hat{\sigma}_2 - \hat{\sigma}_3)^2 + K_p(\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_3)^2}{(\hat{\sigma}_1 K_p + \hat{\sigma}_2 + \hat{\sigma}_3)^2} \cdot \frac{9K_p}{2(K_p - 1)^2} = 1. \quad (2)$$



(a) 应力空间域 i 强度试验结果与AC-SMP准则比较



(b) 应力空间域 ii 强度试验结果与AC-SMP准则比较



(c) 应力空间域 iii 强度试验结果与AE-SMP准则比较

图 8 不同应力空间域强度试验结果与准则的比较

Fig. 8 Comparison of yield loci between experimental and theoretical results

4 黄土的各向异性强度变化规律

黄土竖向裂隙向分别作用大、中、小主应力时, 真三轴试验测试黄土抗剪强度的差异, 充分表明了其各向异性强度特性。黄土中竖向裂隙结构的存在, 一

方面使得竖向裂隙向作用不同主应力的破坏状态不同, 另一方面对土单元内的潜在空间滑动面起到控制作用。当黄土竖向裂隙作用大主应力压缩破坏时, 相对于竖向裂隙向形成轴对称压缩空间滑动面; 相反, 当黄土竖向裂隙作用小主应力压缩破坏时, 相对于竖向裂隙向形成轴对称挤伸空间滑动面。当土单元裂隙向为竖轴的几何空间内主应力变换时, 假定相对于竖线向裂隙向的轴对称压缩空间滑动面, 或者轴对称挤伸空间滑动面保持不变, 则分别建立了各向异性强度准则。因此, 当黄土竖向微裂隙向作用大主应力时, 选取轴对称压缩空间滑动面, 且空间滑动面不随大、中、小主应力变化而改变; 当黄土竖向微裂隙向作用小主应力时, 选取轴对称挤伸空间滑动面, 该空间滑动面亦不随大、中、小主应力的变化而改变。

为了研究黄土的各向异性强度特性, 在几何空间三向作用主应力条件下, 通过真三轴试验结果来分析各向异性强度变化规律。将黄土视为横观各向同性介质时, 在正交三向分别作用大主应力, 且竖向裂隙向依次作用大、中、小主应力条件下, 可以得到八面体平面的强度破坏面, 如图 9 所示。表明, 随着平均球应力增大, 八面体面上的强度破坏线由竖向为长轴的椭圆发展为圆, 再发展为曲边三角形; 平均球应力 100 kPa 时, 真三轴试验测试强度与 AC-SMP 各向异性准则^[9]强度破坏线比较如图 10 所示, 可以用 AC-SMP 各向异性强度准则近似描述。AC-SMP 各向异性强度准则表述如下:

$$\frac{(\hat{\sigma}_I - \hat{\sigma}_{II})^2 + (\hat{\sigma}_I - \hat{\sigma}_{III})^2 + (\hat{\sigma}_{II} - \hat{\sigma}_{III})^2 K_p}{(\hat{\sigma}_I + \hat{\sigma}_{II} K_p + \hat{\sigma}_{III} K_p)^2} \cdot \frac{9K_p^2}{2(K_p - 1)^2} = 1, \quad (3)$$

式中, $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$, $\hat{\sigma}_i = \sigma_i + c_i \cdot \cot \varphi_i$, $i = I, II, III$ 。

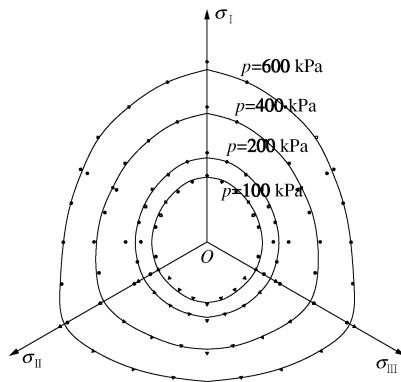


图 9 横观各向同性黄土八面体面上的强度破坏面

Fig. 9 Yield loci in octahedral plane for cross-anisotropic loess under different spherical stresses

如将黄土视为各向异性介质, 认为竖直裂隙对应的 I 轴向作用大主应力时, 水平面内相互正交的 II 轴、 III 轴可能分别作用中主应力或者小主应力, 竖直裂隙对应的 I 轴向作用中主应力时, 水平面内 II 轴向作用大主应力, III 轴向作用小主应力, 竖直裂隙对应的 I 轴向作用小主应力时, 水平面内 II 轴向作用中主应力, III 轴向作用大主应力, 则在八面体平面上可以得到如图 11 所示分布的空间域 i 、 ii 、 iii。

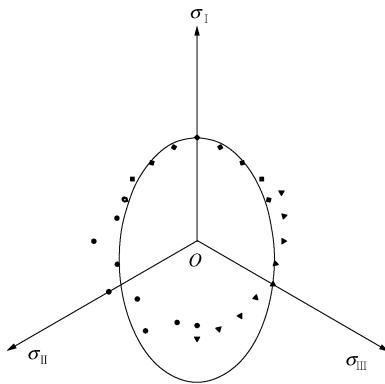


图 10 平均球应力 100 kPa 八面体面上的强度破坏面

Fig. 10 Yield locus in octahedral plane under $p=100 \text{ kPa}$

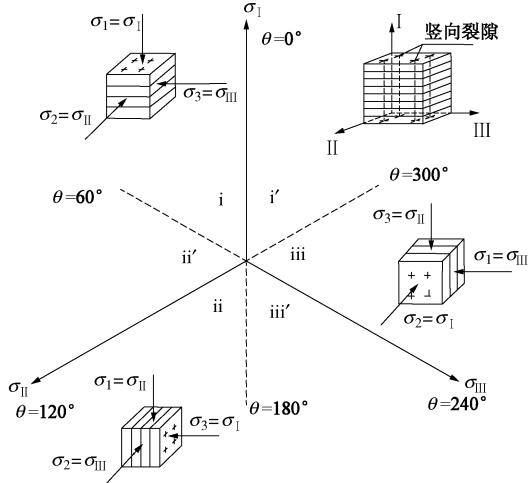


图 11 各向异性黄土八面体面上应力空间域的分布

Fig. 11 Different stress states for anisotropic loess in sectors i, ii and iii of octahedral plane

将黄土视为各向异性介质时, 在正交三向分别作用大主应力, 且竖向裂隙向依次作用大、中、小主应力条件下, 可以得到八面体平面的强度破坏面, 如图 12 所示。表明, 随着平均球应力增大, 八面体面上的强度破坏线由横向为长轴的椭圆发展为圆, 再发展为曲边三角形; 平均球应力 100 kPa 时, 真三轴试验测试强度与 AE-SMP 各向异性强度准则^[9]破坏线比较如图 13 所示, 表明可以用 AE-SMP 各向异性强度准则近似描述。AE-SMP 各向异性强度准则表述如下:

$$\frac{(\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_{II})^2 K_p + (\hat{\sigma}_{II} - \hat{\sigma}_{III})^2 + K_p (\hat{\sigma}_1 - \hat{\sigma}_{III})^2}{(\hat{\sigma}_1 K_p + \hat{\sigma}_{II} + \hat{\sigma}_{III})^2} \cdot \frac{9K_p}{2(K_p - 1)^2} = 1.$$
(4)

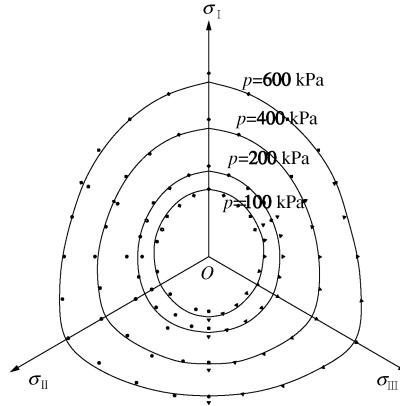


图 12 各向异性黄土八面体面上的强度破坏面

Fig. 12 Yield loci of anisotropic loess under different spherical stresses in octahedral plane

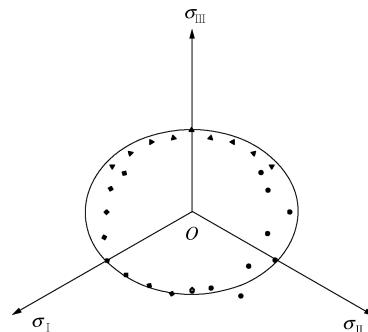


图 13 平均球应力 100 kPa 八面体面上的强度破坏面

Fig. 13 Yield locus under $p=100 \text{ kPa}$ in octahedral plane

5 结 论

通过黄土竖直裂隙向及其正交方向作用三维主应力状态几何空间八面体平面上 3 个空间域的真三轴试验, 得到了各空间域不同中主应力比值应力路径的剪切应力应变曲线, 以及对应的抗剪强度变化规律。得到了如下认识:

(1) 同一应变条件下, 黄土竖向裂隙向作用大主应力的抗剪应力均大于水平面内与竖向裂隙正交两向作用大主应力的抗剪应力; 中主应力比值较小, 且固结围压较大时, 压缩作用能够消除黄土的各向异性结构性; 随着中主应力比值增大, 中主应力作用与大、小主应力差剪切作用能够诱导黄土的各向异性结构性。

(2) 黄土竖直裂隙向分别作用大主应力、中主应力和小主应力, 且中主应力比值为零时, 其抗剪强度

依次减小。随着中主应力比值增大, 中主应力作用增强, 应力诱导黄土原生各向异性, 黄土竖直裂隙向作用小主应力的抗剪强度可能大于作用中主应力的抗剪强度。

(3) 将黄土视为横观各向同性介质时, 八面体平面上土的强度破坏面由竖向为长轴的椭圆发展为圆, 再发展为曲边三角形; 平均球应力较小时, 黄土原生各向异性结构性强, 强度破坏面可以近似用 AC-SMP 各向异性强度准则描述。

(4) 将黄土视为各向异性介质时, 八面体平面上土的强度破坏面可由横向为长轴的椭圆发展为圆, 再发展为曲边三角形; 平均球应力较小时, 原生各向异性结构黄土的强度破坏面可以近似用 AE-SMP 各向异性强度准则描述。

参考文献:

- [1] CASAGRANDE A, CARILLO N. Shear failure of anisotropic materials[J]. *J Boston Soc Civ Eng*, 1944, **31**(4): 74 - 87.
- [2] DUNCAN J M, SEED H B. Anisotropy and stress reorientation in clay[J]. *J Soil Mech Found Div*, 1966, **92**(5): 21 - 50.
- [3] ODA M, KOISHIKAWA I, HIGUCHI T. Experimental study of anisotropic shear strength of sand by plane strain test[J]. *Soils and Foundations*, 1978, **18**(1): 25 - 38.
- [4] ODA M. Fabric tensor for discontinuous geological materials[J]. *Soils and Foundations*, 1982, **22**(4): 96 - 108.
- [5] KIRKGARD M M, LADE P V. Anisotropy three-dimensional behavior of a normally consolidated clay[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, **30**(5): 848 - 858.
- [6] ABELEV A V, LADE P V. Effects of cross-anisotropy on three-dimensional behavior of sand I: Stress-strain Behavior and Shear Banding[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2003, **129**(2): 160 - 166.
- [7] LADE P V, ABELEV A V. Effects of cross-anisotropy on three-dimensional behavior of sand. II: Volume change behavior and failure[J]. *J Eng Mech*, 2003, **129**(2): 167 - 174.
- [8] 姚仰平, 孔玉侠. 横观各向同性土强度与破坏准则的研究. *水利学报*, 2012, **43**(1): 43 - 50. (YAO Yang-ping, KONG Yu-xia. Strength and characterization of failure in cross-anisotropic soils[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, **43**(1): 43 - 50. (in Chinese))
- [9] 邵生俊, 许萍, 陈昌禄. 土的剪切空间滑动面分析及各向异性强度准则研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(3): 422 - 435. (SHAO Sheng-jun, XU Ping, CHEN Chang-lu. Several shear spatially mobilized planes and anisotropic strength criteria of soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(3): 422 - 435. (in Chinese))
- [10] 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, et al. Development of a new true tri-axial apparatus[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, **31**(8): 1172 - 1179. (in Chinese))
- [11] 邵生俊, 郑文, 王正泓, 等. 黄土的构度指标及其试验确定方法[J]. *岩土力学*, 2010, **31**(1): 15 - 20. (SHAO Sheng-jun, ZHENG Wen, WANG Zheng-hong, et al. Structural index of loess and its testing method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, **31**(1): 15 - 20. (in Chinese))