

DOI: 10.11779/CJGE202106015

# 基于空间面变化的各向异性强度变化规律研究

许萍<sup>1</sup>, 孙志军<sup>1</sup>, 邵生俊<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学土木与建筑工程学院岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 基于 SMP 准则, 研究了八面体面 6 个主应力空间域与空间滑动面、应力状态 3 者之间的关系, 考虑土材料的空间滑动面会随着主应力的夹角变化, 提出一般应力条件下的各向异性材料的强度变化规律表达式。对真三轴条件下各向异性黄土强度特性的模拟结果表明, 建立的基于空间面变化的各向异性强度变化表达能够较好地反映黄土材料在一般应力条件下的强度变化规律, 尤其是材料空间滑动面方向与应力主轴成任意角度时的强度变化具有较好的适用性。

**关键词:** 空间面变化; 各向异性; 真三轴试验; 强度变化; 黄土

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)06-1118-07

作者简介: 许萍(1986—), 女, 陕西西安人, 讲师, 主要从事岩土材料测试及土石坝灾害防治。E-mail: xuping1986@xaut.edu.cn。

## Strength characteristics based on variation of spatial mobilization plane for anisotropic geomaterials

XU Ping<sup>1</sup>, SUN Zhi-jun<sup>1</sup>, SHAO Sheng-jun<sup>2</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Based on the criterion of spatial mobilization plane (SMP), the relationship among the six principal stress spatial domains of the octahedral surface, the SMP and stress state is studied. Considering that the SMP of the soil material changes with the angle of the principal stress, a mathematical expression is proposed to reflect the strength characteristics of anisotropic materials under general stress conditions. The simulated results of the strength characteristics of anisotropic loess under true triaxial conditions show that the established expression for the variation of anisotropic strength variation based on variation of spatial plane can better reflect the strength variation law of loess materials under general stress conditions, especially the strength variation when the direction of the SMP of materials is at an arbitrary angle to the principal axis of stress.

**Key words:** spatial mobilization plane; variation; anisotropy; true traxial test; strength variation; loess

## 0 引言

自然界中的岩土类材料由于受矿物颗粒组成和外在因素的共同影响, 表现为显著的各向异性<sup>[1]</sup>。各向异性的破坏及演化发展必然对材料的强度和变形特性具有重要的影响<sup>[2-3]</sup>。

原位状态下岩土材料的力学参数、结构特性及应力应变存在不同方向的差异。由于自然沉积过程中颗粒优势排列形成的微观结构的方向性, 表现为原生各向异性; 而在外力作用下形成的颗粒在空间上的定向性排列, 表现为次生各向异性。一般而言, 对于层状水平分布的岩土材料, 由于在水平方向内颗粒间的随机分布状态, 颗粒长轴一般平行于水平沉积面, 因而形成了正交各向异性, 也可称之为横观各向同性<sup>[4]</sup>。横观各向同性是最简单的各向异性, 也是研究各向异性的基础, 其强度变化具有对称性。而自然界普遍存

在的岩土材料更多的呈现非对称的各向异性。

黄土作为中国西部地区分布范围最广的岩土类材料, 各类城市建设与改造工程、高速交通工程和大型水利工程等的黄土工程各向异性问题愈发凸显。比如土石坝工程中的黄土单元体, 在大主应力方向加载所产生的小主应力方向的侧向变形, 与小主应力方向加载引起大主应力方向的侧向应变有很大差异, 这就意味着两个方向的泊松比有很大差异, 而目前土石坝有限元计算所采用模型参数多依据常规三轴试验结果, 泊松比是大主应力方向加载测得的, 数值较大, 而在

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51808445); 陕西省自然科学基础研究计划资助项目(2018JQ5006); 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS092); 西安理工大学校博士科研启动金项目(2560816023)

收稿日期: 2020-05-15

水库蓄水时, 水荷载是在小主应力方向施加, 实际泊松比要小的多。显然, 将黄土材料视为均质、各向同性的材料, 而忽视黄土各向异性的影响, 将会得到与实际不符的计算结果, 也将导致实际工程无法容忍的灾变结果。另一方面, 从微观结构观察的角度看, 黄土颗粒在天然沉积或人工填筑过程中, 主要受到重力、地壳运动等作用, 颗粒之间相互滑动, 往往会呈现出不规则的排列状态。在宏观上形成不同方向上的排列差异材料, 通过大量的现场和室内试验测试表明, 采用各向异性土体来描述原状黄土才能真正反映材料特性<sup>[5-7]</sup>。

因此, 本文主要针对自然状态下在沉积、固结过程中形成的各向异性土材料的强度特性进行探讨, 考虑空间滑动面变化, 对各向异性土材料的三维应力空间强度变化规律进行初步探讨, 旨为实际黄土工程问题分析中考虑各向异性提供理论参考依据。

## 1 各向异性土的强度特性

各向异性土体在二维条件下剪切破坏的研究中, Casagrande 等<sup>[8]</sup>基于黏土三轴不排水试验结果建立了黏聚力随加载方向的经验公式。Lo<sup>[9]</sup>考虑了各向异性黏性土坡的影响, 修正了以往的边坡稳定性分析公式。陈越在 Mohr-Coulomb 强度准则基础上, 从土单元极限平衡的角度研究了平面应变条件下强度各向异性的规律, 并给出简便的使用表达式。然而二维的应力条件具有一定局限性, 忽略中主应力的影响, 不能完整的描述土材料的一般受力特征。因此, 应用于一般应力条件的三维各向异性强度准则不仅能合理反映中主应力的影响, 更能全面的解释土体各向异性的物理本质和破坏机理。Kirkard 等<sup>[10-11]</sup>对 San Francisco 海湾黏土进行均压固结, 分别对竖向和水平沉积向立方体试样开展横观各向同性剪切试验研究, 得到了立方体试样八面体面内的三轴试验结果, 如图 1 所示。Abelev 等对 Santa Monica Beach 砂的 37 组立方体试样进行了真三轴排水试验, 试验结果如图 2 所示<sup>[12]</sup>。若土横观各向同性方向分别定义为  $x$ ,  $y$  轴, 垂直各向同性面方向定义  $z$  轴, 对对应的应力轴分别为  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ , 在  $\pi$  平面上与主应力轴  $\sigma_3$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_1$  相对应。3 个坐标轴将  $\pi$  平面分为 6 个区间域。以上基于对横观各向同性土体的三维试验结果的分析, 土体破坏曲线沿  $z$  轴呈对称分布, 如果土体为各向同性, 其破坏曲线在 6 个区间域规律相同, 均沿 3 个主应力轴对称分布。图 1、图 2 中均给出了 M-C 和 Lade-Duncan 各向同性破坏准则, 可以看出, 2 种准则都不能反映试验结果, 在区间 I 中 M-C 准则为破坏强度的下限, 然而在区间 II 和

III, 由于原生各向异性和主应力轴发生旋转后, 各向同性准则远远偏离试验结果, 特别是在区间 III 破坏强度较常规三轴压缩条件下小, 从而接近 M-C 破坏准则。对于不同的土性试验都有类似的结论<sup>[13]</sup>。基于此结论, Abelev 等提出了绕主应力空间原点旋转的应力变换方法, 在 Lade-Duncan 强度准则基础上, 建立了适用于  $K_0$  固结的砂土与正常固结黏土材料的强度准则, 但仅适用于应力主轴与材料主轴重合的情况。Mortara 等<sup>[14]</sup>提出相应的修正角隅函数的方法来描述土体偏平面上的强度特性。但这是从数学角度对土体的各向异性进行考虑, 仅适用于应力主轴与材料主轴共轴的情况, 难以解释各向异性土体破坏的物理机制。因此, 考虑到空间滑动面 (SMP) 准则具有明确的物理意义<sup>[15]</sup>, 本文通过推广空间滑动面概念, 考虑八面体面随罗德角的变化, 提出一种适用性较强的各向异性强度变化规律的数学表达, 以此来模拟不同区间域的土体强度破坏结果。

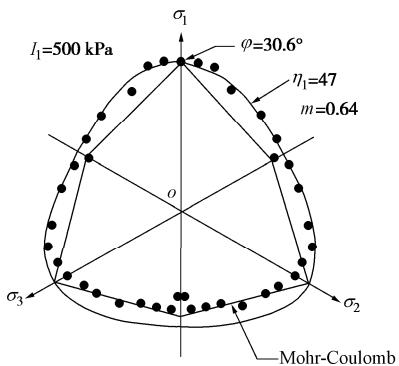


图 1 San Francisco 海湾黏土试验结果

Fig. 1 Results of tests on San Francisco Bay clay

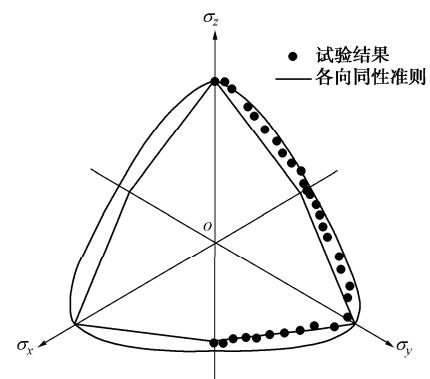


图 2 Santa Monica Beach 砂真三轴试验结果

Fig. 2 Results of true triaxial tests on Santa Monica Beach sand

## 2 各向异性参量的定义

### 2.1 应力状态与八面体应力空间域关系

如上文所述, 应力轴  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  分别对应  $\pi$  平面内的  $\sigma_3$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_1$ , 3 个坐标轴将  $\pi$  平面分为 6 个区间域。区间域 I:  $\theta \in [0^\circ, 60^\circ]$ ; 区间域 II:  $\theta \in [60^\circ, 120^\circ]$ ; 区间域 III:  $\theta \in [120^\circ, 180^\circ]$ ; 区间域 IV:  $\theta \in [180^\circ, 240^\circ]$ ; 区间域 V:  $\theta \in [240^\circ, 300^\circ]$ ; 区间域 VI:  $\theta \in [300^\circ, 360^\circ]$ 。图 3 给出区间域内的应力状态与土的天然沉积面及 Lode 角  $\theta_\sigma$  满足的关系。主应力与  $0^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $300^\circ$  这 6 个特殊点的关系, 实际上在  $\pi$  平面上分别对应  $\sigma_1$  作用于垂直沉积面  $\sigma_z$  方向的三轴压缩应力状态,  $\sigma_3$  作用于沉积面  $\sigma_x$  方向的三轴拉伸应力状态,  $\sigma_1$  作用于沉积面  $\sigma_y$  方向的三轴压缩应力状态,  $\sigma_3$  作用于垂直沉积面  $\sigma_z$  方向的三轴拉伸应力状态,  $\sigma_1$  作用于沉积面  $\sigma_x$  方向的三轴压缩应力状态、 $\sigma_3$  作用于沉积面  $\sigma_y$  方向的三轴拉伸应力状态。

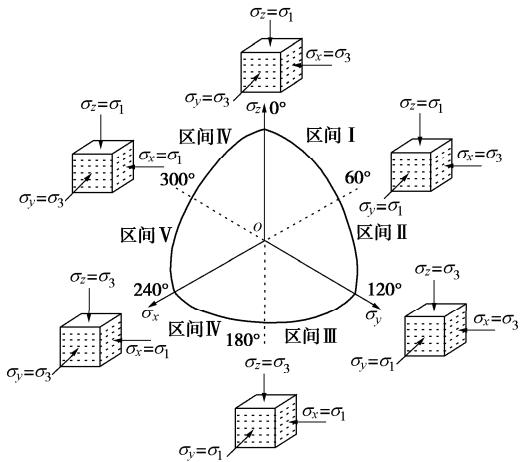


图 3 主应力状态与八面体应力空间域的关系

Fig. 3 Relationship between state of principal stress and spatial domain of octahedral stress

## 2.2 空间滑动面与应力状态关系

岩土材料强度破坏时主应力单元内存在一个潜在空间滑动面, 通过假定该面上的应力条件服从特定的规律而建立破坏准则。常见的描述各向同性材料的 Mohr-Coulomb 准则, Drucker-Prager 弹塑性模型的屈服准则, 确立的滑动面法向余弦分别为  $\cos(45^\circ + \varphi/2)$ , 0,  $\cos(45^\circ - \varphi/2)$  和  $(\sqrt{3}/3, \sqrt{3}/3, \sqrt{3}/3)$ , 可知两种准则确立的空间滑动面法向余弦分量与破坏应力  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  无关, 仅与材料抗剪强度有关。Matsuoka-Nakai 强度准则确立的滑动面法向余弦为  $\left(\sqrt{\frac{I_3}{\sigma_1 I_2}}, \sqrt{\frac{I_3}{\sigma_2 I_2}}, \sqrt{\frac{I_3}{\sigma_3 I_2}}\right)$ ,

$\sqrt{\frac{I_3}{\sigma_2 I_2}}, \sqrt{\frac{I_3}{\sigma_3 I_2}}$ , 随破坏应力  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  变化而变化, 而与材料特性无关。

而各向异性岩土材料强度破坏时空间滑动面不仅与材料特性和破坏应力  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  均相关, 同时破坏应力还会随应力域的应力状态而变化。例如: 轴对称

压缩条件下滑动面与主应力夹角为  $45^\circ + \varphi/2$ , 轴对称挤伸条件下滑动面与主应力夹角改变为  $45^\circ - \varphi/2$ , 当滑动面与主应力夹角为  $45^\circ$  为八面体面, 因此空间滑动面与主应力夹角并非定值, 而是在  $45^\circ + \varphi/2 \sim 45^\circ - \varphi/2$  范围内变化。

依据 M-C 强度理论给出的土材料的剪切破坏形态, 定义空间滑动面与大主应力作用面之间的夹角均为  $45^\circ - \varphi/2$ ,  $\Phi$  为反映应力条件和材料特性的综合参量:

$$\Phi_i = \cos \theta / 3 \cdot \varphi_i \quad (i = z, x, y) \quad (1)$$

式中  $\varphi_i$  即为土的内摩擦角, 可通过垂直于沉积面方向  $\sigma_z$ 、平行于沉积面方向  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  分别作用大主应力  $\sigma_1$  的常规三轴试验直接获得;  $\theta$  为所述应力空间域内与应力状态和 Lode 角  $\theta_\sigma$  相关的径向偏角,  $\cos \theta$  为反映土应力条件的参数, 可通过几何坐标换算确定。将通过综合反映应力条件和材料特性的参量  $\Phi_i$  反映材料空间滑动面变化这一特性。

## 2.3 各向异性参量的确定方法与分析

### (1) 各向异性参量与破坏应力的关系

应力轴  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  构成的坐标系  $(\sigma_z, \sigma_y, \sigma_x)$ , 将其投影至二维坐标  $(X, Y)$ , 可得空间中一点可表示为 (图 4)

$$\left. \begin{aligned} x &= \sigma_z - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y), \\ y &= \frac{\sqrt{3}}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

矢径为

$$r = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2} \quad (3)$$

此时  $\cos \theta$  可表示为

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{2}}{2} \frac{2\sigma_z - (\sigma_x + \sigma_y)}{\sqrt{(\sigma_z - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2}} \quad (4)$$

由此可知,  $\Phi_i$  的取值范围为  $\Phi_i \in [-\varphi, \varphi]$ , 故  $45^\circ + \varphi/2$  表示土体处于压缩应力状态,  $45^\circ - \varphi/2$  表示土体处于挤伸应力状态。

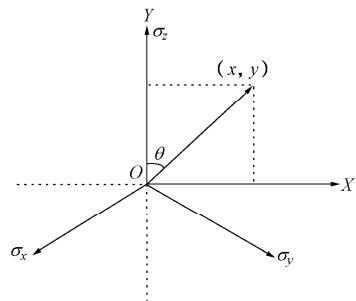


图 4 应力空间示意图

Fig. 4 Diagram of space of principal stress

应力轴  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  分别对应  $\pi$  平面上的  $\sigma_3$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_1$ , 3 个坐标轴将  $\pi$  平面分为 6 个区间域内所示应力条件不同, 具体地, 区间域 I:  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ; 区间域 II:  $\sigma_2 > \sigma_1 > \sigma_3$ ; 区间域 III:  $\sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_1$ ; 区间域 IV:  $\sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$ ; 区间域 V:  $\sigma_3 > \sigma_1 > \sigma_2$ ; 区间域 VI:  $\sigma_1 > \sigma_3 > \sigma_2$ 。

### (2) 各向异性参量与应力状态的关系

土体复杂应力状态下发生主应力轴旋转, 且旋转对强度的影响非常显著, 体现在不同空间域内强度破坏点显著差异, 通过采用各向异性综合参量可以很好得模拟土体各向异性强度特性。如图 3 所示, 对于空间域 I, II, III 为垂直于沉积面方向  $\sigma_z$  分别作用  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  所对应的应力状态, 随着  $\theta$  从  $0^\circ$  到  $180^\circ$  变化, 分别经历轴对称压缩应力状态 ( $\theta=0^\circ$ )、纯剪应力状态 ( $\theta=90^\circ$ ) 以及挤伸状态 ( $\theta=180^\circ$ ) 等。对于空间域 III, IV, V 为平行于沉积面方向  $\sigma_y$  分别作用  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , 对于空间域 V, VI, I 为平行于沉积面方向  $\sigma_x$  分别作用  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , 其分别所对应的应力状态亦然。对于黄土真三轴试验结果, 图 5 表示了不同方向作用大主应力条件下各向异性综合参量  $\Phi_i$  随  $\theta$  角的变化规律,  $\Phi_i$  随  $\theta$  角的增大而减小, 然而并非表示空间域破坏强度越低, 而是代表空间域内不同应力状态。空间域 III, V, I 获得的主应力状态不同径向偏角对应的主应力状态的不唯一性说明不同方向作为大主应力时与实际黄土结构和结构面作用不同而导致的土的强度出现差异, 也恰恰说明不同主应力方向黄土结构强度变化特征。

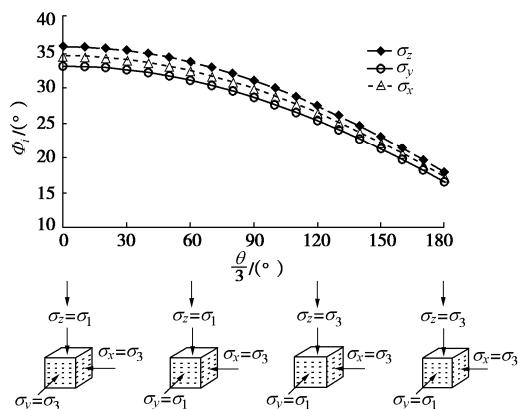


图 5 不同方向作用大主应力条件下各向异性参量  $\Phi_i$  随径向偏角  $\theta$  变化

Fig. 5 Variation of anisotropic parameters  $\Phi_i$  with radial declination  $\theta$  under large principal stress acting in different directions

## 3 空间滑动面变化的 AC-SMP 各向异性强度表达探讨

基于以上分析, 考虑垂直于土体沉积面方向  $\sigma_z$  分

别作用大、中、小主应力时, 在中主应力比  $b=0$  时满足  $\sigma_z > \sigma_x = \sigma_y$ , 在此时轴对称压缩作用下, 土样单兀体可能在  $\sigma_z - \sigma_x$  作用平面内发生滑动破坏, 也可能在  $\sigma_z - \sigma_y$  作用平面内发生滑动破坏, 依据 Mohr-Coulomb 准则, 它们的破坏面与大主应力作用面之间的夹角均为  $45^\circ + \frac{\Phi_i}{2}$ 。同时考虑以上两个主应力平面内出现滑动破坏, 则如图 6 (a) 所示的空间滑动面, 简称 AC-SMP 滑动面<sup>[16]</sup>。同理, 可以得到  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  方向分别作用大、中、小主应力所对应的轴对称压缩空间滑动面, 见图 6 (b) 和 (c)。

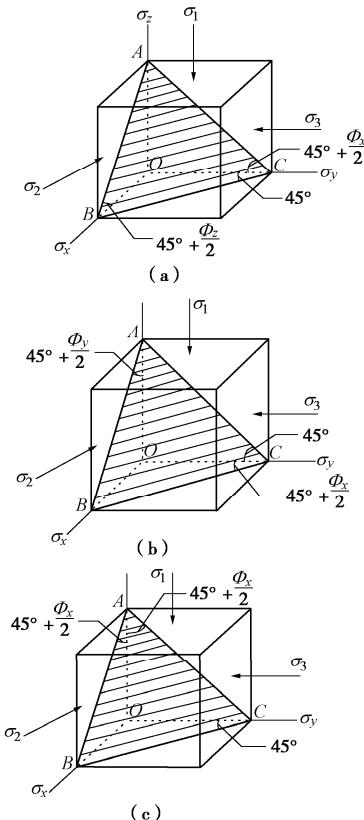


图 6 空间滑动面

Fig. 6 Spatial mobilization planes

由此对于不存在竖向裂隙和卸荷裂隙的均质体空间滑动面进行几何空间应力分析, 基于 Mohr-Coulomb 准则, 该破坏面与大主应力作用面之间的夹角均为  $45^\circ + \frac{\Phi_i}{2}$ 。即

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = K_\phi \quad , \quad (5)$$

$$K_\phi = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\Phi_i}{2} \right) \quad . \quad (6)$$

同样认为 3 种压缩条件下滑动面上的剪应力和法向应力之比达到某一常数时, 认为材料发生了强度破坏, 可以得到该滑动面的强度准则表达式:

$$\frac{\tau_N}{\sigma_N} = \sqrt{\frac{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 K_\phi + \sigma_3^2 K_\phi)(1 + 2K_\phi)}{(\sigma_1 + \sigma_2 K_\phi + \sigma_3 K_\phi)^2}} - 1 = k_f \quad , \quad (7)$$

$$\frac{\tau_N}{\sigma_N} = \sqrt{\frac{(\sigma_1^2 K_\phi + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 K_\phi)(1+2K_\phi)}{(\sigma_1 K_\phi + \sigma_2 + \sigma_3 K_\phi)^2}} - 1 = k_f, \quad (8)$$

$$\frac{\tau_N}{\sigma_N} = \sqrt{\frac{(\sigma_1^2 K_\phi + \sigma_2^2 K_\phi + \sigma_3^2)(1+2K_\phi)}{(\sigma_1 K_\phi + \sigma_2 K_\phi + \sigma_3)^2}} - 1 = k_f. \quad (9)$$

其中破坏参数表示为

$$k_f = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{K_\phi - 1}{\sqrt{K_\phi}}. \quad (10)$$

需要指出的是, 这里的  $K_\phi$  为垂直于土体沉积面方向  $\sigma_z$  以及平行于沉积面方向  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  分别作用大主应力时, 轴对称压缩条件下的土体应力条件的参数  $\theta$  和内摩擦角  $\varphi_i$ , 该条件下  $\theta$  的余弦值为 1, 故

$$K_\phi = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi_i}{2} \right).$$

该空间滑动面随主应力夹角改变而变化, 实际上反映了应力空间域内土的各向异性特性。当土单元中的空间滑动面受介质内的微观结构控制, 不随主应力变化而变化时, 则不同应力条件下空间滑动面形态有所不同, 对应不同应力空间域有不同应力条件, 反映应力条件和材料特性的综合参量  $\Phi$  随之改变, 由此建立了能够反映空间滑动面变化的各向异性强度特性表达式。

该准则同样可以延伸到预测黏聚特性的材料, 对于  $c \neq 0$  的情况通过坐标平移进行转化, 即

$$\hat{\sigma}_j = \sigma_j + \frac{c}{\tan \varphi} \quad (j=1,2,3).$$

## 4 各向异性强度表达式的试验验证

### 4.1 各向异性强度表达式的参数讨论

本文采用的各向异性强度表达式中有 3 个参数, 即土体内摩擦角  $\varphi_i$ , 径向偏角  $\theta$ , 各向异性综合参量  $\Phi_i$ 。其中第一个参数  $\varphi_i$  通过垂直于沉积面方向  $\sigma_z$ 、平行于沉积面方向  $\sigma_y$  和  $\sigma_x$  分别作用大主应力  $\sigma_1$  的常规三轴试验可以确定,  $\varphi_i$  为三轴压缩时的内摩擦角。对于各向同性土体,  $\varphi_i$  为同一个常数, 对于横观各向同性土体, 平行于沉积面方向  $\sigma_y$  和  $\sigma_x$  作用大主应力的轴对称压缩条件摩擦角  $\varphi_y$  和  $\varphi_x$  为同一常数。其中径向偏角  $\theta$ , 用来表征空间域位置, 是主应力的函数。

若区间域 I:  $\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$ , 则

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{3}b}{2-b}. \quad (11)$$

根据罗德角定义, 有:

$$\tan \theta_\sigma = \frac{\sqrt{3}}{3}(2b-1), \quad (12)$$

式中,  $b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 。

联立式 (11), (12), 可以建立径向偏角  $\theta$  和罗德角  $\theta_\sigma$  关系式:

$$\tan \theta = \frac{\sqrt{3} + 3 \tan \theta_\sigma}{3 - \sqrt{3} \tan \theta_\sigma}. \quad (13)$$

由此可知, 罗德角  $\theta_\sigma$  和文中定义径向偏角  $\theta$  均是与中主应力相关的参数, 若在区域 I 中, 其变化范围为  $-30^\circ \leq \theta_\sigma \leq 30^\circ$ ,  $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$  和  $0 \leq b \leq 1$ 。且在三轴压缩 ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) 时,  $b = 0$ ,  $\theta_\sigma = -30^\circ$ ,  $\theta = 0^\circ$ ; 且在三轴拉伸 ( $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ ) 时,  $b = 1$ ,  $\theta_\sigma = -30^\circ$ ,  $\theta = 60^\circ$ 。

第 3 个各向异性综合参量  $\Phi_i$ , 为上两参数的关系式, 用于反映应力条件和材料特性, 由此可见并非定值。

### 4.2 Q<sub>3</sub> 黄土真三轴试验验证

本文所选土样取自陕西西安白鹿原的天然黄土, 取土深度约为 6.5~8.0 m, 该类土样广泛分布于关中盆地, 用作地基、边坡、坝体等填筑材料。原状黄土试样比重 2.7, 初始孔隙比 0.862, 天然含水率 17.0%, 天然干密度 1.45 g/cm<sup>3</sup>, 塑性指数 15.43%。试验时采用规格标准为 70 mm × 70 mm × 140 mm 的长方体原状试样, 见图 7。试验开展主要依托改进和更新后的西安理工大学真三轴仪, 总计对 120 个长方体试样进行了真三轴固结排水剪切试验。试验控制小主应力分别为 50, 100, 150, 200 kPa, 中主应力比分别为 0, 0.25, 0.5, 0.75 和 1.0, 以及八面体面 6 个区域。



图 7 取土环境及实验室制备原状三轴试样

Fig. 7 Site of circumstance and undisturbed samples in laboratory

特别需要对原状土样取样和制样进行严格控制, 现场人工取样时每块试样都严格标注方向, 室内制备试样时按标注的几何方向依次按照三维空间坐标轴进行六个正交面的切削, 具体地, 垂直于土体沉积面方向  $\sigma_z$  对应土层上-下, 平行于沉积面方向  $\sigma_y$  对应卸荷边坡走向, 平行于沉积面方向  $\sigma_x$  对应边坡倾向, 从而构成 70 mm × 70 mm × 140 mm 立方体试样。其次, 按照切削完成的立方体试样面垂直于土体沉积面方向  $\sigma_z$  以及平行于沉积面方向  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  分别作用大、中、小三向主应力, 实现不同空间域的强度破坏面的试验研究, 参见图 8。

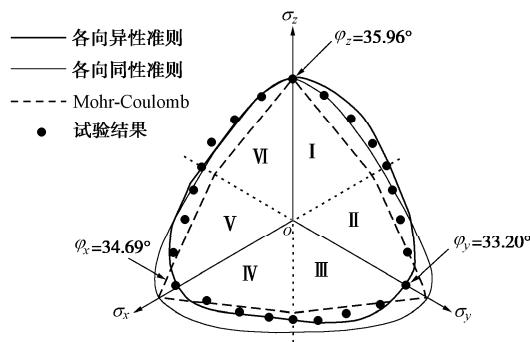


图 8 各向异性黄土试验结果与破坏准则比较

Fig. 8 Comparison of test results and failure criteria for anisotropic loess

已知当垂直于土体沉积面方向  $\sigma_z$  以及平行于沉积面方向  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  分别作用大主应力时, 3 种轴对称压缩条件下得到的摩擦角  $\varphi_z = 35.96^\circ$ ,  $\varphi_y = 33.20^\circ$ ,  $\varphi_x = 34.69^\circ$ 。对比 Mohr-Coulomb 准则、各向同性 SMP 准则以及本文所建立的基于空间面变化的各向异性准则, 可以得出如下认识: ①在八面体面上的 6 个域呈非对称分布; ②III, IV 域, 即垂直于土体沉积面方向  $\sigma_z$  作用小主应力时, 各向同性 SMP 准则由于没有考虑黄土各向异性特性, 高估了材料的抗剪强度; ③I 和 II, III 和 IV, V 和 VI 域相交处, 即平行于沉积面方向  $\sigma_y$ ,  $\sigma_x$  和垂直于沉积面方向  $\sigma_z$  分别作用小主应力时, Mohr-Coulomb 准则、各向同性 SMP 准则同样没有考虑各向异性特性, 高估了材料挤压状态下的抗剪强度, 而本文所述的各向异性强度变化规律的数学表达能更好地描述这些特性。

## 5 结语

大多数天然沉积土都具有各向异性, 本文在分析各向异性土的强度特性的基础上, 研究了八面体面上 6 个主应力空间域抗剪强度变化, 分析了八面体应力空间域与空间滑动面、应力状态三者之间关系, 定义了一个能综合反映应力条件和材料特性的各向异性参数, 进一步对空间滑动面变化的 AC-SMP 各向异性强度进行了探讨, 提出了一种考虑土材料的空间滑动面会随着主应力的夹角变化的轴对称压缩各向异性强度变化规律数学表达。该表达式意义明确, 参数易获得, 且适用于天然沉积土的一般应力状态。对比黄土各向异性试验结果, 表明该准则可较好地反映各向异性土在一般应力状态下的变化规律, 对各向异性研究具有一定的借鉴价值。

## 参考文献:

[1] 路德春, 梁靖宇, 王国盛, 等. 横观各向同性土的三维强度

准则[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 54–62. (LU De-chun, LIANG Jing-yu, WANG Guo-sheng, et al. Three-dimensional strength criterion for transversely isotropic soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 54–62. (in Chinese))

- [2] 张坤勇. 考虑应力各向异性土体本构模型及其应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (ZHANG Kun-yong. Study and Application on Soil's Constitutive Model with the Consideration of Stress-induced Anisotropy[D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [3] DAFALIAS Y F, PAPADIMITROU A G, LI X S. Sand plasticity model accounting for inherent fabric anisotropy[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(11): 1319–1333.
- [4] 万征, 宋琛琛, 赵晓光. 一种横观各向同性强度及变换应力空间[J]. 力学学报, 2018, 50(5): 1168–1184. (WAN Zheng, SONG Chen-chen, ZHAO Xiao-guang. A transversely isotropic strength and transformation stress space[J]. Journal of Mechanics, 2018, 50(5): 1168–1184. (in Chinese))
- [5] 姚仰平, 孔玉侠. 横观各向异性土强度与破坏准则的研究[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 1107–1111. (YAO Yang-ping, KONG Yu-xia. Study on strength failure criterion of cross-anisotropic soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 1107–1111. (in Chinese))
- [6] GAO Z W, ZHAO J D, YAO Y P. A generalized anisotropic failure criterion for geomaterials[J]. International Journal of Solids and Structures, 2010, 47(22/23): 3166–3185.
- [7] 李学丰, 黄茂松, 钱建国. 宏细观结合的砂土各向异性破壞准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1885–1891. (LI Xue-feng, HUANG Mao-song, QIAN Jian-guo. Failure criterion of anisotropic sand with method of macro-meso incorporation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1885–1891. (in Chinese))
- [8] CASAGRANDE A, CARILLO N. Shear failure of anisotropic materials[J]. Boston Soc Civ Eng, 1944, 31(4): 74–87.
- [9] LO K Y. Stability in anisotropic soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1965, 91(S4): 85–104.
- [10] KIRKGARD M, LADE P V. Anisotropy of normally consolidated San Francisco Bay Mud[J]. Geotech Test J, 1991, 14(3): 231–246.
- [11] LADE P V. Failure criterion for cross-anisotropic soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2008, 134(1): 117–124.

- [12] ABELEV A V, LADE P V. Characterization of failure in cross-anisotropic soils[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004, **130**(5): 599 – 606.
- [13] 张连卫, 张建民, 张 嘎. 基于 SMP 的粒状材料各向异性强度准则 [J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(8): 1107 – 1111. (ZHANG Lian-wei, ZHANG Jian-min, ZHANG Ga. SMP-based anisotropic strength criteria of granular materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(8): 1107–1111. (in Chinese))
- [14] MORTARA G A hierarchical single yield surface for frictional materials[J]. Computers and Geotechnics, 2009, **36**(6): 960 – 967.
- [15] MASUOKA H, NAKAI T. Stress-deformation and strength characteristics of soil under three different principal stresses[C]// Proceedings of the Japan Society of Civil Engineering, 1974.
- [16] 陈昌禄, 邵生俊, 罗爱忠, 等. 土的静态空间滑动面及其强度准则适应性研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2015, **11**(5): 1185 – 1192. (CHEN Chang-lu, SHAO Sheng-jun, LUO Ai-zhong, et al. Study on static space sliding surface of soil and adaptability of its strength criterion[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, **11**(5): 1185 – 1192. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要的项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)