

不同结构性黄土的强度规律及传统强度准则适应性分析

陈昌禄^{1,2}, 邵生俊³, 方娟², 罗爱忠^{2,3}

(1. 山西省交通科学研究院 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030006;

2. 毕节学院, 贵州 毕节 551700; 3. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:在真三轴试验基础上揭示了多种不同结构性原状黄土的强度变化规律,分析了在岩土工程实践中常用的Mohr-Coulomb准则和Matsuoka-Nakai准则对不同结构性原状黄土的适应性。结果表明:当结构性黄土的强度越大时,其在 π 平面上的破坏线越接近于抹圆曲边三角形,反之其在 π 平面上的破坏线越接近于抹圆角三角形;结构性黄土随着结构性的增大在 π 平面上的强度破坏线从抹圆角三角形逐渐向抹圆曲边三角形发展,最终趋近于Mises圆;两个强度准则所描述的强度都比结构性原状黄土的实际强度值小,Mohr-Coulomb准则的误差比Matsuoka-Nakai准则的误差大,并且随着结构性的增强其误差也逐渐增大。

关键词:结构性原状黄土;真三轴试验;强度规律;传统强度准则;适应性

中图分类号:TU411.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(2013)04-851-08

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.851

Analysis of Strength Variation of Different Kinds of Structural Loess and Adaptability of Traditional Strength Criterion

CHEN Chang-lu^{1,2}, SHAO Sheng-jun³, FANG Juan², LUO Ai-zhong^{2,3}

(1. Shanxi Provincial Research Institute of Communication, Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Ministry of Transport, Taiyuan Shanxi 030003, China; 2 Bijie University, Bijie Guizhou 551700, China;

3. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an Shaanxi 710048, China)

Abstract: Loess is distributed extensively and is considered a special kind of soil; its strength and deformation are often different from those of other soil materials. At present, studies on the strength of structural loess are insufficient and the destruction form of loess and its destructive mechanism are also far from perfect. Owing to a lack of awareness about the structure of soil and test conditions, previous theories pertaining to structural strength criteria that describe the structural strength of soil are inadequate for establishing a law for the structural strength of loess. In particular, the adaptability of these criteria theories remains to be studied in the case of loess strength under complex stress variation. Among the many available strength criteria, the ones used commonly for soil are the generalized Tresca criterion, generalized von Mises criterion, Mohr-Coulomb criterion, and Matsuoka - Nakai criterion, among others. Testing of a large number of rock and soil materials has shown that the generalized von Mises criterion and the generalized Tresca criterion have fairly good applicability despite

收稿日期:2013-04-27

基金项目:国家自然科学基金项目(41272320);黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题(KLTR-Y12-3);贵州省教育厅优秀科技创新人才项目(黔教合KY字[2012]096)

作者简介:陈昌禄(1974-),男,四川合江人,副教授,博士,从事黄土力学研究。E-mail:Changlu@139.com

the introduction of the influence of ball stress on the rock and soil materials; however, these criteria give larger errors. The Mohr - Coulomb criterion has been widely applied in the field of soil engineering on account of its clear physical meaning, ease of setting of parameters, and the rationality and applicability in describing the destruction of rock and soil materials. However, this criterion also has an obvious drawback in that it does not consider the impact of intermediate principal stress on soil strength. Although the Matsuoka - Nakai criterion, which is based on the Mohr - Coulomb criterion, considers the impact of the intermediate principal stress, it is associated with true triaxial tests of sand and its physical meaning is not sufficiently clear. Natural loess is a unique structural and collapsible soil. In this study, based on true triaxial tests of different kinds of structurally intact loess, the influence of structural changes on the strength of the intact loess is analyzed. The Mohr - Coulomb criterion and Matsuoka - Nakai criterion, which are commonly used in geotechnical engineering, are used to analyze the adaptability of different kinds of undisturbed structural loess. The results show that the strength of natural structural loess is closely related to its structure and its property index. When the moisture content is low, the influence of change in the dry density on the structural strength of undisturbed loess is greater than the influence of change in moisture content; in contrast, the influence of the change in moisture content on the structural strength of undisturbed loess is greater than that of change in dry density. In terms of the failure line of structural loess in the PI plane, the greater the strength of structural loess, the closer it is to a rounded crooked triangle. The failure line is close to the Mises circle with structural infinity. Conversely, the smaller the strength of structural loess, the closer it is to a rounded triangle. It follows that with an increase in the structural strength of loess, its failure line in the PI plane gradually changes from a rounded triangle to a rounded crooked triangle, eventually tending toward the Mises circle. For different kinds of structurally intact loess, the use of the Mohr - Coulomb criterion and Matsuoka - Nakai criterion in describing the strength of structurally undisturbed loess has certain drawbacks. Overall, the strength described by low-strength criteria is smaller than the actual strength of structurally intact loess. The Mohr - Coulomb criterion has a larger error than the Matsuoka - Nakai criterion; despite the fact that these criteria are traditionally used for describing weak structural soil, their error increases with an enhancement of structural strength?"

Key words: structurally intact loess; true triaxial test; strength rule; traditional strength criterion; adaptability

0 引言

人类活动和岩土体材料密切相关。自从 Coulomb 在 1773 年提出首个强度准则以来,人们对强度问题进行了大量的理论研究和试验验证,已经提出了上百个模型或准则,关于强度理论的研究论文更是数以万计,形成“百花齐放,百家争鸣”^[1-2]。

尽管许多学者在土的强度理论方面做了大量的工作,取得了很多成果,沈珠江就认为关于岩土材料的屈服和破坏的研究已经可以画上句号^[3]。然而这些强度准则基本上都是基于一定性状的土(如砂土、重塑土)或一定的试验仪器(如直剪)而建立起来的。对于结构性黄土的强度问题研究还远非如此。在众多强度准则中,针对结构性土的强

度准则很少^[4-7],而对于结构性黄土的则是更少^[8-13]。

黄土作为一种分布较为广泛的特殊土,由于其具有水敏性、结构性等特殊性质,其强度和变形往往不同于一般岩土体材料^[14-17],其工程性质也有所不同^[18-19]。目前对于结构性黄土的强度研究本来就不足,对于黄土的破坏形式和破坏机理研究也很不完善。以往的强度准则对于土结构性认识和试验条件的缺乏使得这些强度理论在描述结构性土的强度规律时就显得有些不足。特别是对于黄土在复杂应力条件下的强度变化规律,这些强度准则的适应性情况都是有待研究的内容。

在众多强度准则中,常用于土材料的主要有广义 Tresca 准则、广义 Mises 准则、Mohr-Coulomb 准则和 Matsuo-

ka-Nakai 准则等。大量岩土体材料试验证明广义 Tresca 准则和广义 Mises 准则虽然引入了球应力的影响,对岩土体材料有一定的适用性,但误差也较大^[12];Mohr-Coulomb 准则在土工程领域得到了广泛应用,其物理意义明确,参数简单易定,在描述岩土体材料破坏时也基本能够保持较好的合理性和适用性,但该准则的缺陷也很明显,即没有考虑中主应力对土强度的影响;而 Matsuoka-Nakai 准则虽然在 Mohr-Coulomb 准则基础上考虑了中主应力的影响,但该准则是根据砂土的真三轴试验和 Mohr-Coulomb 准则提出的,且该准则的物理含义不够明确。

综上所述,一方面尽管传统强度准则所建立的基础就存在一定的不足,而现有工程实际中大量运用的还是传统的 Mohr-Coulomb 准则和 Matsuoka-Nakai 准则;另一方面天然黄土均具有不同的结构性,其强度随着结构性的不同也呈现不同变化。故本文在利用自行研制的真三轴仪分析不同结构性原状黄土的强度变化规律基础上,针对这两个常用的传统强度准则对于结构性黄土的适应性进行分析。为结构性黄土工程实践提供理论参考,并为进一步研究结构性黄土强度准则奠定基础。

1 不同结构性黄土的强度分析

1.1 不同结构性黄土的真三轴试验

本研究采用西安理工大学新研制的真三轴仪(XGT-1)^[19]进行排水剪切试验。试验首先在一定围压下完成固结,再在一定中主应力比 b 值下进行剪切试验。试验所采用的天然原状黄土均采自现场。为了便于后文的分析,在这里对这四种结构性原状黄土进行编号:①西安南郊原状黄土;②西安南郊原状黄土;③西安白鹿塬原状黄土;④西安南郊航天城原状黄土。

表1和表2分别给出了几种原状黄土的物性指标和真三轴试验参数。

表1 几种原状黄土的物性指数

Table 1 The physical constants of intact loess				
物性指数	原状黄土①	原状黄土②	原状黄土③	原状黄土④
含水率/%	5.0	10.0	14.2	24.2
干密度/(g·cm ³)	1.273	1.273	1.55	1.65
液限/%	35.3		37.8	40.0
塑限/%	16.9		22.6	23.0

表2 几种原状黄土的试验参数

Table 2 The test parametres of intact loess				
黄土类别	原状黄土①	原状黄土②	原状黄土③	原状黄土④
围压 σ_3 /kPa	100, 200, 300			
中主应力比 b	0.00, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00			

从表1可以看出,四种黄土具有不同的组构,因此也具有不同的结构性。

1.2 不同结构性原状黄土的强度比较分析

为了方便比较不同结构性黄土的强度变化规律,图1给出了几种不同结构性原状黄土的真三轴试验结果在 p - q 平面上的强度破坏线。其中 p 为广义球应力, q 为广义剪切应力。

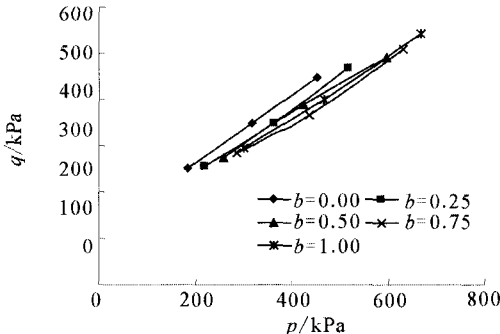
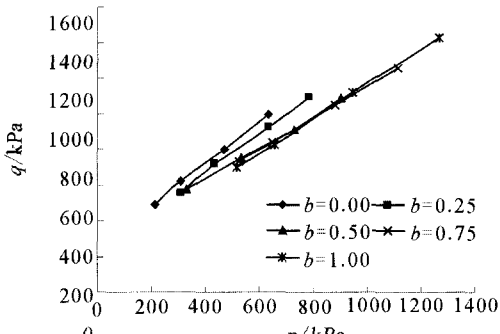
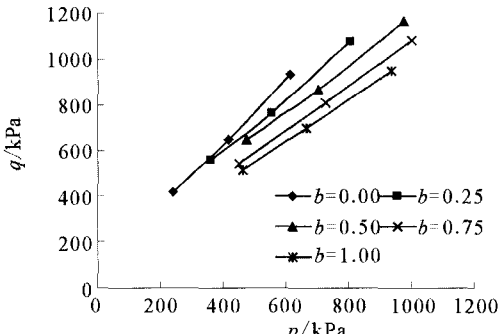
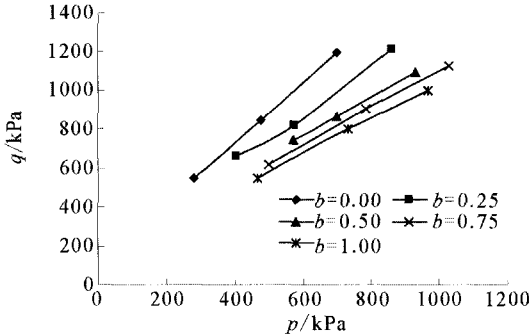


图1 几种结构性黄土的 p - q 破坏线
Fig.1 Failure line of several structural loess (p - q plane)

从图1中可以看出,由于几种黄土的基本物性和结构性的不同,其强度变化规律也呈现不一样。

(1) 在不同中主应力比 b 值下,原状黄土③的强度最高,其次是原状黄土①和原状黄土②。比较原状黄土①②③的基本物性,原状黄土③的干密度最大,而其含水率又高于原状黄土①和②。干密度和含水率对强度的贡献却是相反的,而原状黄土③表现在破坏强度方面则最大。究其原因可以认为是土体颗粒之间的摩擦强度和结构强度综合表现的结果。一方面,原状黄土③的干密度相对于原状黄土①要大,干密度越大说明土的密实度越高,而密实度越高土颗粒之间的紧密程度也就越强,这体现在剪切过程中土颗粒之间的摩擦强度就高。而另一方面,原状黄土③的含水率相对于原状黄土①也要大,随着含水率的增大土颗粒之间的粘结强度就会降低,从而使土的整体强度降低。综合两种黄土的摩擦强度和粘结强度,原状黄土③的整体强度高于原状黄土①,这也说明对于原状黄土③在摩擦强度和粘结强度两者之间摩擦强度起到了主导作用。这既反映了摩擦强度的作用,也反映了与结构强度相关的粘聚强度作用。

(2) 四种原状黄土中,原状黄土④的干密度最大,其强度反而是最低的,主要是因为④号原状黄土虽然其密实度较大,但其含水率却较高,达到了26.2%,已经接近饱和状态,这时整体体现出该黄土的强度就比较低。

(3) 比较几种不同结构性原状黄土的强度可以看出,几种原状黄土中,原状黄土③的强度最大,黄土①、黄土②,黄土④的强度依次降低。从表1可以看出,在几种结构性黄土中,一方面尽管黄土③的干密度比黄土①、黄土②的干密度大,但另一方面黄土③的含水率也较大,仅低于黄土④,结合表1的物性指标和图1的强度破坏值可以看出,当原状黄土的含水率不大时(本试验约为15%),这时干密度对原状黄土的强度影响要大于含水率。反之,则含水率的影响大于干密度。

在同一球应力 p 值下,可得出不同结构性黄土在 π 平面上的强度破坏线,如图2所示($p=200$ kPa, 600 kPa)。图2坐标系为 π 平面的极坐标系,极轴为广义剪应力 q ,下同。

对于不同结构性黄土在 π 平面上的破坏曲线形态,在含水率较小时(如原状黄土①),其 π 平面上的破坏曲线近似为抹圆形,随着含水率的增大,破坏曲线逐渐变为抹圆角三角形(如④号原状黄土)。显示出随着土结构性的增强,土在 π 平面上破坏曲线抹圆的程度越高;而随着结构性的减弱,破坏曲线越接近于抹圆角三角形。

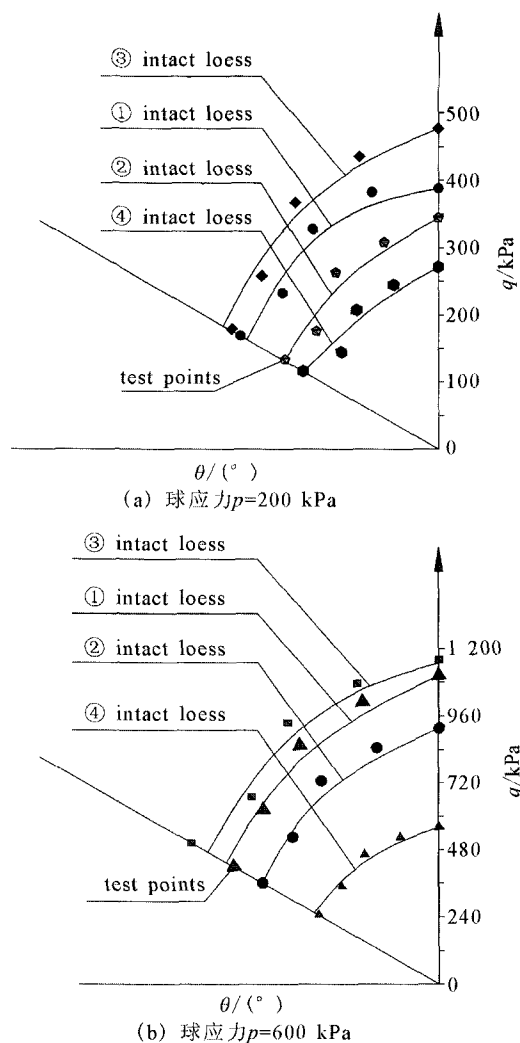


图2 几种结构性黄土的 π 平面破坏线

Fig.2 The failure line of structural loess (π plane)

由此可见,当结构性黄土的强度越大时,该结构性黄土在 π 平面上的破坏线越接近于抹圆曲边三角形,当结构性无限大时,破坏线接近为Mises圆;反之,当结构性黄土的强度越小时,结构性黄土在 π 平面上的破坏线越接近于抹圆角三角形。

2 传统强度准则简析

2.1 Mohr-Coulomb 准则

在土工领域中,Mohr-Coulomb 准则是应用最为广泛的一个强度准则。该理论认为土的抗剪强度和滑动面上受到的正应力成正比:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

或

$$q = p \tan \bar{\varphi} - \bar{c} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\tan \bar{\varphi} &= \frac{3 \sin \varphi}{\sqrt{3} \cos \theta_{\sigma} + \sin \theta_{\sigma} \sin \varphi} \\ \bar{c} &= \frac{3c \cos \varphi}{\sqrt{3} \cos \theta_{\sigma} + \sin \theta_{\sigma} \sin \varphi}\end{aligned}\quad (3)$$

式中, τ_f 为抗剪强度; c 和 φ 为强度参数凝聚力和内摩擦角; σ 为滑动面上的正应力; p 、 q 分别为广义球应力和广义剪应力; θ_{σ} 为罗德角。

2.2 Matsuoka-Nakai 准则

Matsuoka 和 Nakai 等人在 Mohr-Coulomb 准则的基础上提出空间滑动面的概念,在该面基础上提出了一种适用于无粘性土的强度准则,即 Matsuoka-Nakai 准则。该理论认为 SMP(Spatially Mobilized Plane)空间滑动面上的正应力和剪应力的比值为一常数时,材料即屈服。如式(4)、(5)所示:

$$\frac{\tau_{\text{SMP}}}{\sigma_{\text{SMP}}} = k \quad (4)$$

或

$$\begin{aligned}&\left(\frac{16}{27} \tan^2 \varphi + \frac{2}{3}\right) \frac{3 \tan^2 \theta_{\sigma} - 1}{(\tan^2 \theta_{\sigma} + 1)^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{q}{p}\right)^3 + \left(\frac{8}{3} \tan^2 \varphi + 2\right) \left(\frac{q}{p}\right)^2 \\ &- 8 \tan^2 \varphi = 0\end{aligned}\quad (5)$$

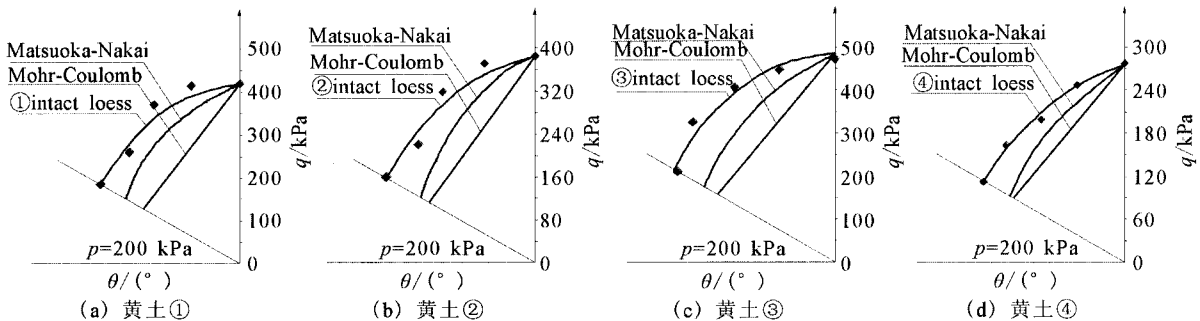


图3 传统强度准则和不同结构性黄土的强度对比(π 面)

Fig.3 The comparative analysis of traditional strength criterion and structural loess (π plane)

验研究表明中主应力对土强度的影响较大。一般来讲中主应力的增大会导致土强度比没有考虑中主应力时土的强度要大;另一方面 Mohr-Coulomb 准则在建立的时候也没有充分考虑土的结构性,这也导致该准则在描述结构性黄土的强度时偏小。

在中主应力比 b 值较小时, Mohr-Coulomb 准则和原状黄土真三轴试验结果之间的误差还相对较小,随着中主应力比 b 值的增大其误差逐渐增大。

对于具有同一组构的黄土①和黄土②, Mohr-Coulomb 准则对于黄土②的整体误差比黄土①的误差稍小。这主要是黄土①和黄土②之间的结构性差异造成的。含水率高的土结构性较弱,也就是原状黄土②比原状黄土①结构性弱。体现在强度参数上则主要表现为原状黄土②的凝聚力值比原状黄土①的凝聚力值要小。可以预见,随着土结构强度的降低 Mohr-Coulomb 准则在描述时的适应性更

其中 τ_{SMP} 和 σ_{SMP} 分别表示 SMP 面上的剪应力和正应力; k 为材料常数。

比较式(2)和式(5)可以看出, Matsuoka-Nakai 准则是 Mohr-Coulomb 准则向三维空间的推广,是三个主应力作用下平均化了的 Mohr-Coulomb 准则。亦即 Matsuoka-Nakai 准则是将 Mohr-Coulomb 准则的两个主动平面下的应力在三维空间三个主应力的均化,是二维的 Mohr-Coulomb 准则在三维空间中的延伸。

3 传统强度准则的适应性分析

根据四种原状黄土的真三轴试验以及两个传统强度准则的表达式(如式(2)、(5)所示),图3给出了四种原状结构性黄土的真三轴试验强度和两种传统强度准则所描述的强度在 π 平面上破坏曲线之间的比较。

3.1 Mohr-Coulomb 准则

从图1的对比分析可以看出,对于多种不同结构性原状黄土, Mohr-Coulomb 准则所描述的强度都比结构性黄土的真三轴试验结果偏小。这一方面是由于 Mohr-Coulomb 准则没有考虑中主应力的影响,而人们通过大量的试

好。

黄土③的强度变化规律与 Mohr-Coulomb 准则描述的强度破坏面也存在不小的误差。尽管黄土③的含水率和干密度都高于黄土①、②,但其干密度大,其粘聚强度也较大,与结构一起发挥抗力效应较好。

黄土④尽管其含水率较大,已经接近于饱和黄土,但由于其干密度大,超压密作用下的粘聚力也较大, Mohr-Coulomb 准则在描述该黄土时也存在一定的误差。但其误差相比前述的原状黄土①②③的误差都要小。其误差主要是随中主应力比 b 值变化时粘聚力效应的反映。

对于黄土④,在三轴压缩($b=0$)和三轴挤伸($b=1$)时的强度差异明显比前述的三种结构性黄土要小,这主要是因为原状黄土④的含水率较高,结构性弱所致。在中主应力比 b 值变化时,其结构性方面所表现出来的强度(压损性)受中主应力比 b 值变化不大,而摩擦强度(压硬性)方

面影响却比较大。故该土体总体上的强度随中主应力比 b 值变化比前述三种结构性土的变化值要小。

综合分析以上四种结构性原状黄土,可以看出,Mohr-Coulomb 准则在描述这几种结构性黄土时均存在一定的误差。Mohr-Coulomb 准则所描述的强度比实际土的强度值偏小。而在误差方面,对于结构性较好的黄土,如黄土①②③,Mohr-Coulomb 准则所描述强度和这些结构性黄土的真三轴试验结果之间的误差较大;对于含水率较高、结构性较弱黄土,如原状黄土④,Mohr-Coulomb 准则和该结构性黄土的真三轴试验结果之间的误差较小。也就是说,Mohr-Coulomb 准则在描述结构性较好的黄土时误差较大,在描述结构性较弱的黄土时误差较小。

从整体上看,一般天然土体大部分都存在一定的结构性,利用 Mohr-Coulomb 准则来描述这些天然结构性黄土的实际工程时,总体上偏于保守。

3.2 Matsuoka-Nakai 准则

从以上几种结构性黄土的真三轴试验结果和 Matsuoka-Nakai 准则的对比分析可以看出,对于各个原状黄土的真三轴试验,Matsuoka-Nakai 准则描述的强度和真三轴试验结果之间也存在一定的差异,但这种差异整体上比 Mohr-Coulomb 准则描述的误差要小,这主要是因为 Matsuoka-Nakai 准则在描述强度时考虑了中主应力对土强度的影响。

如果假定中主应力比 $b=0$ 时几种结构性黄土的强度与强度准则所描述的强度一致,则当 b 值增大时,结构性黄土的强度总是大于 Mohr-Coulomb 准则和 Matsuoka-Nakai 准则所描述的强度。对于几种原状黄土,在不同球应力下,两个准则所描述的强度破坏线和试验破坏线近似平行。亦即两个强度准则所描述的误差在不同球应力下基本保持一致。

综上所述,不管是 Mohr-Coulomb 准则还是 Matsuoka-Nakai 准则,在描述结构性黄土时强度均小于结构性黄土的强度。这是因为传统强度准则在建立之初并没有考虑土的结构性,且 Mohr-Coulomb 准则没有考虑中主应力对强度的影响,Matsuoka-Nakai 准则只是对 Mohr-Coulomb 准则的三维拓展,虽然考虑了中主应力对土强度的影响,但也没有考虑应力对结构性本身的影响及结构强度的响应。

4 结语

本文利用真三轴试验对多种不同结构性黄土的试验结果,首先分析了不同结构性黄土的强度变化规律,进而对实际岩土工程中常用的两个传统强度准则 Mohr-Cou-

lomb 准则和 Matsuoka-Nakai 准则对不同结构性黄土的适应性进行了分析。

(1) 结构性黄土的强度与其天然结构和物性指标密切相关。试验表明,当含水率较低时,干密度变化对结构性原状黄土的强度影响较大于含水率的变化,反之,含水率变化对结构性原状黄土的影响大于干密度的变化。

(2) 从不同结构性黄土的 π 平面上破坏线可以看出,当结构性黄土的强度越大时,该结构性黄土在 π 平面上的破坏线越接近于抹圆曲边三角形,当结构性无限大时,破坏线接近为 Mises 圆;反之,当结构性黄土的强度越小时,结构性黄土在 π 平面上的破坏线越接近于抹圆角三角形。因此可以认为,结构性黄土随着结构性的增大,在 π 平面上的强度破坏线从抹三角形逐渐向抹圆曲边三角形发展,最终趋近于 Mises 圆。

(3) Mohr-Coulomb 准则和 Matsuoka-Nakai 准则在描述结构性原状黄土的强度时都存在一定的不足。整体上两种强度准则所描述的强度都比结构性原状黄土的实际强度值小。而 Mohr-Coulomb 准则的误差比 Matsuoka-Nakai 准则的误差大;两个传统强度准则在描述结构性较弱的土时其误差较小,随着结构性的增强其误差也逐渐增大。

参考文献(References)

- [1] 俞茂宏. 强度理论百年总结[J]. 力学进展, 2004, 34(4): 529-560.
YU Mao-hong. Advances in Strength Theories for Materials Under Complex Stress State in the 20th Century [J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(4): 529-560. (in Chinese)
- [2] 俞茂宏, M Yoshimine, 强洪夫, 等. 强度理论的发展和展望[J]. 工程力学, 2004, 21(6): 1-20.
YU Mao-hong, MYoshimine, QIANG Hong-fu, et al. Advances and Prospects for Strength Theory[J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6): 1-20. (in Chinese)
- [3] 沈珠江. 关于破坏准则和屈服函数的总结[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(1): 1-8.
SHEN Zhu-jiang. Summary on the Failure Criteria and Yield Function[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(1): 1-8. (in Chinese)
- [4] 齐吉琳, 谢定义, 石玉成. 土结构性的研究方法及其现状[J]. 西北地震学报, 2001, 23(1): 99-103.
QI Ji-lin, XIE Ding-yi, SHI Yu-cheng. Status Quo and Method of Quantitative Study on Soil Structure[J]. Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(1): 99-103. (in Chinese)
- [5] 谢定义. 黄土力学特性与应用研究的过去、现在与未来[J]. 地下空间, 1999, 19(4): 273-284.
XIE Ding-yi. The Past, Present and Future of the Research on Mechanical Characteristics and Application of Loess[J]. Under-

- groundspace, 1999, 19(4):273-284.(in Chinese)
- [6] 郑建国, 张苏民. 湿陷性黄土的结构强度特性[J]. 水文地质工程地质, 1990, (4):22-25.
ZHENG Jian-guo, ZHANG Su-min. Loess Structural Strength Characteristics[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1990, (4):22-25.(in Chinese)
- [7] 邵生俊, 周飞飞, 龙吉勇. 原状黄土结构性及其定量参数研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 531-536.
SHAO Sheng-jun, ZHOU Fei-fei, LONG Ji-yong. Structural Properties of Loess and Its Quantitative Parameter[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 531-536.(in Chinese)
- [8] 邵生俊, 邓国华. 原状黄土的结构性强度特性及其在黄土隧道围岩压力分析中的应用[J]. 土木工程学报, 2008, 41(11): 93-98.
SHAO sheng-jun, DENG guo-hua. The Strength Characteristics of Loess with Different Structures and Its Application in Analyzing the Earth Pressure on Loess Tunnel[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(11):93-98.(in Chinese)
- [9] 陈昌禄, 邵生俊, 余芳涛. 土结构性变化对开挖边坡稳定性的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (12): 1938-1944.
CHEN Chang-lu, SHAO Sheng-jun, SHE Fang-tao. Impact of Structural Change of Soils on Stability in Slope Excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (12): 1938-1944.(in Chinese)
- [10] 陈昌禄, 邵生俊, 邓国华. 土的结构性参数与强度的关系及其在边坡稳定性分析中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(1): 328-334.
CHEN Chang-lu, SHAO Shen-jun, DENG Guo-hua. Relationship between the Soil Structural and Strength and Its Application in Slope Stability Analysis[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(1):328-334.(in Chinese)
- [11] 刘恩龙, 沈珠江. 结构性土的强度准则[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10):1248-1252.
LIU En-long, SHEN Zhu-jiang. Strength Criterion for Structured Soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10):1248-1252.(in Chinese)
- [12] 陈宗基, 吴海青. 我国西北黄土的基本性质及其工程建议[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(6):9-24.
CHEN Zong-ji, WU Hai-qing. Fundamental Properties of Loess from Northwestern China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 11(6):9-24.(in Chinese)
- [13] 刘祖典, 张伯平. 关于黄土和黄土状上湿陷性评价问题[J]. 岩土工程学报, 1989, 2(4):23-33.
LIU Zu-dian, ZHANG Bo-ping. Concerning the Evaluation of Hydroconsolidation Characterization of Loess and Loessal Soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1989, 2(4): 23-33.(in Chinese)
- [14] 王永焱, 林在贯. 黄土的结构与物理力学性质[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
WANG Yong-yan, LIN Zai-guan. Loess Structure and Physical and Mechanical Properties[M]. Beijing: Science Press, 1990.(in Chinese)
- [15] 刘红玫, 钟秀梅. 黄土抗剪强度的三轴试验[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增):243-245.
LIU Hong-mei, ZHONG Xiu-mei. Triaxial Test on the Shearing Strength of Loess[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33 (Supp):243-245.(in Chinese)
- [16] 王兰民, 袁中夏, 汪国烈. 饱和黄土场地液化的工程初判和详判指标与方法研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35(1): 1-8.
WANG Lan-min, YUAN Zhong-xia, WANG Guo-lie. Study on Method for Preliminary and Detailed Evaluation on Liquefaction of Loess Sites[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(1): 1-8.(in Chinese)
- [17] 李荣建, 郑文, 王莉平, 等. 非饱和土边坡稳定性分析方法研究进展[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增):2-9.
LI Rong-jian, ZHENG Wei, WANG Li-ping, et al. Progress and Developing Trend on Stability Analyses of Unsaturated Soil Slope[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33 (Supp): 2-9.(in Chinese)
- [18] 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 Tri-axial apparatus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(8):1172-1179.(in Chinese)