

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.003

粗粒土在 π 平面上的真三轴试验及强度准则

施维成^{1,2}, 朱俊高³, 代国忠¹, 李雄威¹

- (1. 常州工学院常州市建设工程结构与材料性能研究重点实验室, 江苏 常州 213002;
2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;
3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 利用河海大学 TSW-40 型真三轴仪, 对粗粒土进行 π 平面上的等 p (球应力)、等 b (中主应力系数) 试验, 研究粗粒土在 π 平面上破坏应力比 M_b 与 b 的关系。试验结果表明: M_b 随着 b 的增大而减小; b 值较小时其变化对 M_b 的影响较大, b 值较大时其变化对 M_b 的影响则较小; 在相同 b 值下, M_b 随着 p 的增大而减小, 强度表现出非线性特性。将等 σ_3 面上的破坏准则、Mohr-Coulomb 破坏准则、粗粒土的应力不变量破坏准则、Lade-Duncan 破坏准则、Matsuoka-Nakai 破坏准则这 5 种破坏准则在 π 平面上的破坏线与试验结果比较, 验证其对粗粒土的适用性。结果显示, 粗粒土等 σ_3 面上的破坏准则由于考虑了中主应力的影响, 比 Mohr-Coulomb 破坏准则更符合试验结果, 且可以较方便地考虑粗粒土的强度非线性; 粗粒土的应力不变量破坏准则介于 Lade-Duncan 破坏准则和 Matsuoka-Nakai 破坏准则之间, 与试验结果较接近。

关键词: 强度准则; π 平面; 粗粒土; 真三轴试验

中图分类号: TV641.4⁺1; TU411 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2015)01-0011-05

True triaxial tests of coarse-grained soil on π -plane and its strength criterion

SHI Weicheng^{1,2}, ZHU Jungao³, DAI Guozhong¹, LI Xiongwei¹

- (1. Changzhou Key Laboratory of Structure Engineering and Material Properties, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China;
2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Several experiments in which both p (spherical stress) and b (the coefficient of intermediate principal stress) remained constant on the π -plane were performed on coarse-grained soil by the TSW-40 type true triaxial apparatus at Hohai University. The relationship between the peak value of stress ratio M_b and the value of b in these tests was studied. The test results indicate that M_b decreases with the increase of b , and the influence of b on M_b is greater when b is small, while the influence is small when b is large. The test results also show that M_b decreases with the increase of p under the same value of b , which shows that the strength of coarse-grained soil has nonlinear properties. The failure lines on the π -plane based on five failure criteria, including the failure criterion on a σ_3 -constant plane, the Mohr-Coulomb criterion, the stress-invariant failure criterion, the Lade-Duncan criterion, and the Matsuoka-Nakai criterion, were drawn and compared with the test results in order to verify the applicability of these criteria to coarse-grained soil. It is shown that the results of the failure criterion on a σ_3 -constant plane of

coarse-grained soil are closer to the test results than those of the Mohr-Coulomb criterion, owing to consideration of the influence of intermediate principal stress, and it is convenient to take strength nonlinearity into account. It is also shown that the results of the stress-invariant failure criterion of coarse-grained soil are between those of the Lade-Duncan criterion and the Matsuoka-Nakai criterion, and they fit the test results better.

Key words: strength criterion; π -plane; coarse-grained soil; true triaxial test

π 平面上的真三轴试验是研究土的力学性质的有效方法。李锦坤等^[1]对中密承德砂进行了 π 平面上的真三轴试验。Reddy 等^[2]对水泥砂土沿 π 平面上不同方向的应力路径进行了真三轴试验。尽管粗粒土的力学性质已有较多研究^[3-5],但对粗粒土进行 π 平面上不同应力路径的真三轴试验鲜有报道,笔者使用河海大学 TSW-40 型真三轴仪对粗粒土进行 π 平面上的等 p (球应力)、等 b (中主应力系数)试验,研究粗粒土在 π 平面上的强度特性。

岩土材料的破坏准则^[6-9]在岩土工程计算分析中具有很重要的地位,根据土的试验特性,学者们提出了很多破坏准则,包括 Mohr-Coulomb 破坏准则^[10]、Lade-Duncan 破坏准则^[11]、Matsuoka-Nakai 破坏准则^[12]等。笔者曾根据砾石料的真三轴试验结果提出了一个粗粒土的应力不变量破坏准则^[13],根据粗粒土的等 σ_3 、等 b 试验结果得到一个粗粒土等 σ_3 面上的破坏准则^[14]。为验证这些破坏准则对粗粒土的适用性,笔者将这 5 种破坏准则都写成 p 、 γ_b (π 平面上的破坏线与原点(即静水压力所对应点)之间的距离)、 b 的表达式,画出其在 π 平面上的破坏线,并与试验结果进行比较。

1 试验方法及加荷方式

1.1 试验方法

试验使用的真三轴仪为河海大学 TSW-40 型真三轴仪。该仪器由长春市朝阳试验仪器有限公司与河海大学联合研制,主要由加载系统、控制器、主机、显示器组成。该仪器可分别对 3 个方向的主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 单独控制,且互不干扰,实现三维应力空间中不同应力路径的试验。其中,竖直方向的主应力采用刚性板加压;两对水平方向的主应力中,一对采用柔性水囊加压,另一对采用刚性板和橡皮圈相间组成的复合加压块加压。

试验所用粗粒土为双江口心墙堆石坝的堆石料。试验土料中,粒径 10~5 mm 的颗粒质量分数为 70%,粒径小于 5 mm 的颗粒质量分数为 30%,级配曲线如图 1 所示。试验土料最小干密度为 1.54 g/cm³,最大干密度为 1.96 g/cm³,试样为 120 mm×60 mm×120 mm 的长方体。

制样时在橡皮膜里 4 个侧面上各放一块土工布,防止在制样击实及试验加压时土颗粒棱角把橡皮膜刺破。土样分 5 层击实,控制干密度 $\rho_d = 1.91$ g/cm³,相对密度为 0.90。为简单起见,制样和试验时的试样都为干样。试样制完后放到仪器上,用真空泵从橡皮膜里面抽真空,使其气压小于外界大气压,从而在试样内外形成压差。在试样施加到一定的初始应力状态(本文 3 个方向的主应力都等于 20 kPa)之前要保持这个压差,避免试样坍塌。试验时,在复合加压块与试样之间放置一层较薄的软玻璃和薄土工布。

1.2 加荷方式

分别进行了 $p=400$ kPa、800 kPa 下的等 p 、等 b 加荷试验, b 分别取 0、0.25、0.50、0.75、1.00。加荷时保持 p 、 b 不变, q (偏应力,或称广义剪应力)增加,直至试样破坏。其中, p 、 q 、 b 的表达式分别为

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$
$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$
$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

(1)

$p=400$ kPa、800 kPa, b 等于 0、0.25、0.50、0.75、1.00 情况下,粗粒土等 p 、等 b 试验在 π 平面上实测的应力路径见图 2。很明显,等 p 、等 b 试验的应力路径为 π 平面上应力罗德角相等的直线。

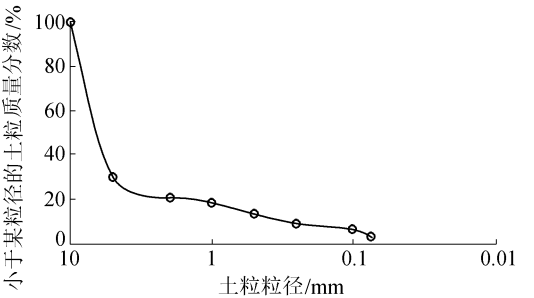


图1 粗粒土的级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve for coarse-grained soil

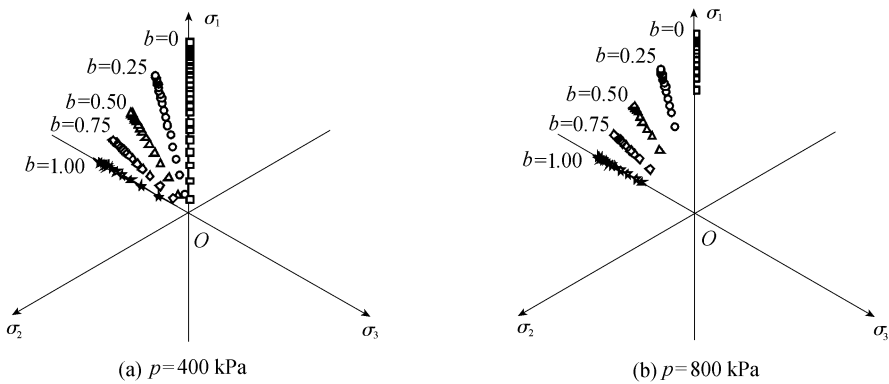


图 2 粗粒土等 p 、等 b 试验在 π 平面上的应力路径
Fig. 2 Stress paths on π -plane for tests on coarse-grained soil in which both p and b remain constant

2 试验结果

图 3 为试验得到的 $M_b \sim b$ 关系曲线,其中, $M_b = (q/p)_f$ 为破坏应力比。由图 3 可以看出,在 p 一定的情况下, M_b 随着 b 的增大而减小,且 $M_b \sim b$ 曲线的坡度随着 b 的增大而变缓,即 b 值较小时其变化对 M_b 的影响较大, b 值较大时其变化对 M_b 的影响较小。从图 3 亦可看出,在相同 b 值下, M_b 随着 p 的增大而减小,强度表现出非线性特性。

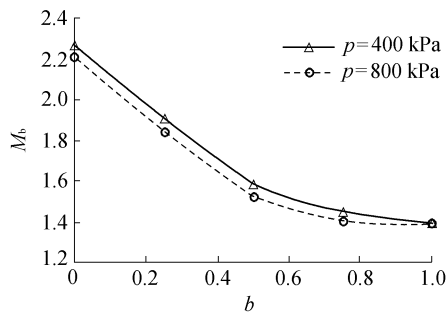


图 3 不同 p 值下 M_b 与 b 的关系
Fig. 3 Variation of M_b with b under different values of p

3 用 p 、 q 、 b 表示破坏准则的基本变量

为研究破坏准则在 π 平面上的破坏线形状,可先推导破坏准则在 π 平面上的 $\gamma_b \sim b$ 关系式,然后画出破坏准则在 π 平面上的破坏线。 γ_b 的表达式为

$$\gamma_b = \sqrt{\frac{2}{3}} q \tag{2}$$

要画出破坏准则在 π 平面上的破坏线,只需将破坏准则用 p 、 q (γ_b)、 b 这 3 个变量来表示。由式(1)可以得到主应力用 p 、 q 、 b 表示的表达式:

$$\sigma_1 = p + \frac{2-b}{3\sqrt{b^2-b+1}} q \quad \sigma_2 = p + \frac{2b-1}{3\sqrt{b^2-b+1}} q \quad \sigma_3 = p - \frac{1+b}{3\sqrt{b^2-b+1}} q \tag{3}$$

很多破坏准则中使用第一应力、第二应力、第三应力不变量 I_1 、 I_2 、 I_3 ,这 3 个应力不变量用主应力 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 表示的表达式为

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 \quad I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3 \tag{4}$$

式(3)代入式(4),可以得到 3 个应力不变量用 p 、 q 、 b 表示的表达式

$$I_1 = 3p \quad I_2 = 3p^2 - \frac{q^2}{3} \quad I_3 = \left(p + \frac{2-b}{3\sqrt{b^2-b+1}} q \right) \left(p + \frac{2b-1}{3\sqrt{b^2-b+1}} q \right) \left(p - \frac{1+b}{3\sqrt{b^2-b+1}} q \right) \tag{5}$$

4 用 p 、 γ_b 、 b 表示 5 种破坏准则

4.1 破坏准则 1

Shi 等^[14]根据粗粒土的等 σ_3 、等 b 试验结果得到一个粗粒土等 σ_3 面上的破坏准则:

$$\frac{q}{p} = M_c \frac{1}{1+k-k(b-1)^2} \tag{6}$$

其中 $M_c = \frac{6\sin\varphi_{ic}}{3-\sin\varphi_{ic}}$ $k = 1.462\sin\varphi_{ic} - 0.5232$ $\varphi_{ic} = \varphi_i - \Delta\varphi \lg \frac{\sigma_3}{P_a}$

式中: M_c ——等 σ_3 面上 $b=0$ 的破坏应力比; k ——与土的性质有关的参数; φ_{ic} —— $b=0$ 时小主应力为 σ_3 的

内摩擦角; φ_i —— $\sigma_3=P_a$ 时的内摩擦角; $\Delta\varphi$ ——反映内摩擦角随 σ_3 而降低的参数; P_a ——大气压力。

由式(2)、式(3) 和式(6) 可以得到破坏准则 1 用 p, γ_b, b 表示的表达式。

4.2 破坏准则 2

假定黏聚力为 0, 则 Mohr-Coulomb 破坏准则可表示为

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin\varphi_{ic} \tag{7}$$

由式(2)、式(3)、 k 和 M_e , 可得到用 p, γ_b, b 表示的 Mohr-Coulomb 破坏准则:

$$\gamma_b = \frac{2\sqrt{6} \sqrt{1 - b + b^2} \sin\varphi_{ic}}{3 - (1 - 2b) \sin\varphi_{ic}} p \tag{8}$$

考虑强度非线性时, 将 φ_{ic} 代入式(8), 并考虑式(3)、式(2), 可得到 Mohr-Coulomb 破坏准则在考虑强度非线性时用 p, γ_b, b 表示的表达式。

4.3 破坏准则 3

施维成等^[13] 根据砾石料真三轴试验结果提出一个粗粒土的应力不变量破坏准则, 表达式为

$$\frac{I_1^3 + 4I_1I_2}{I_3} = k_f \tag{9}$$

式中: k_f ——材料参数。

将式(5)代入式(9), 并考虑式(2), 可得破坏准则 3 用 p, γ_b, b 表示的形式为

$$63p^3 - 6p\gamma_b^2 - k_f \left(p + \frac{2 - b}{\sqrt{b^2 - b + 1}} \frac{\gamma_b}{\sqrt{6}} \right) \left(p + \frac{2b - 1}{\sqrt{b^2 - b + 1}} \frac{\gamma_b}{\sqrt{6}} \right) \left(p - \frac{1 + b}{\sqrt{b^2 - b + 1}} \frac{\gamma_b}{\sqrt{6}} \right) = 0 \tag{10}$$

4.4 破坏准则 4

Lade-Duncan 破坏准则表达式为

$$\frac{I_1^3}{I_3} = k_f \tag{11}$$

将式(5)代入式(11), 并考虑式(2), 可得 Lade-Duncan 破坏准则用 p, γ_b, b 表示的形式为

$$27p^3 - k_f \left(p + \frac{2 - b}{\sqrt{b^2 - b + 1}} \frac{\gamma_b}{\sqrt{6}} \right) \left(p + \frac{2b - 1}{\sqrt{b^2 - b + 1}} \frac{\gamma_b}{\sqrt{6}} \right) \left(p - \frac{1 + b}{\sqrt{b^2 - b + 1}} \frac{\gamma_b}{\sqrt{6}} \right) = 0 \tag{12}$$

4.5 破坏准则 5

Matsuoka-Nakai 破坏准则表达式为

$$\frac{I_1I_2}{I_3} = k_f \tag{13}$$

将式(5)代入式(13), 并考虑式(2), 可得 Matsuoka-Nakai 破坏准则用 p, γ_b, b 表示的形式为

$$9p^3 - \frac{3}{2}p\gamma_b^2 - k_f \left(p + \frac{2 - b}{\sqrt{b^2 - b + 1}} \frac{\gamma_b}{\sqrt{6}} \right) \left(p + \frac{2b - 1}{\sqrt{b^2 - b + 1}} \frac{\gamma_b}{\sqrt{6}} \right) \left(p - \frac{1 + b}{\sqrt{b^2 - b + 1}} \frac{\gamma_b}{\sqrt{6}} \right) = 0 \tag{14}$$

5 5 种破坏准则在 π 平面上的比较

5.1 破坏准则 1 和破坏准则 2

破坏准则 1(粗粒土等 σ_3 面上的破坏准则)和破坏准则 2(Mohr-Coulomb 破坏准则)在考虑粗粒土的强度非线性特性时都使用公式 $\varphi_{ic} = \varphi_i - \Delta\varphi \lg(\sigma_3/P_a)$, 对本文粗粒土^[18], 取 $\varphi_i = 55.6, \Delta\varphi = 9.2$ 。将破坏准则 1 和破坏准则 2 在 π 平面上与试验结果进行比较, 发现破坏准则 1 由于考虑了中主应力对强度的影响, 与试验结果更加吻合。

5.2 破坏准则 3、破坏准则 4 和破坏准则 5

破坏准则 3(粗粒土的应力不变量破坏准则)、破坏准则 4(Lade-Duncan 破坏准则)和破坏准则 5(Matsuoka-Nakai 破坏准则)都使用应力不变量来表示。将这 3 个破坏准则在 π 平面上与试验结果进行比较, 发现破坏准则 3 介于破坏准则 4 和破坏准则 5 之间, 与试验结果较接近。

6 结 语

a. 利用河海大学 TSW-40 型真三轴仪,对粗粒土进行 π 平面上的等 p 、等 b 试验,研究粗粒土在 π 平面上的破坏规律。破坏应力比 M_b 随着 b 的增大而减小; b 值较小时其变化对 M_b 的影响较大, b 值较大时其对 M_b 的影响则较小;在相同 b 值下, M_b 随着 p 的增大而减小,强度表现出非线性特性。

b. 将粗粒土等 σ_3 面上的破坏准则、Mohr-Coulomb 破坏准则、粗粒土的应力不变量破坏准则、Lade-Duncan 破坏准则、Matsuoka-Nakai 破坏准则这 5 种破坏准则表示为 p 、 γ_b 、 b 的表达式,画出这 5 种破坏准则在 π 平面上的破坏线,验证其对粗粒土的适用性。结果显示,粗粒土等 σ_3 面上的破坏准则由于考虑了中主应力的影响,比 Mohr-Coulomb 破坏准则更符合试验结果,且可以较方便地考虑粗粒土的强度非线性;粗粒土的应力不变量破坏准则介于 Lade-Duncan 破坏准则和 Matsuoka-Nakai 破坏准则之间,与试验结果较接近。

参考文献:

- [1] 李锦坤,张清慧. 应力劳台角对孔隙压力发展的影响[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(4): 17-23. (LI Jinkun, ZHANG Qinghui. The effects of Lode's angle of stress on pore pressure development[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 16(4): 17-23. (in Chinese))
- [2] REDDY K R, SAXENA S K, BUDIMAN J S. Development of a true triaxial testing apparatus[J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, 15(2): 89-105.
- [3] XIAO Yang, LIU Hanlong, ZHU Jungao, et al. A 3D bounding surface model for rockfill materials[J]. Science China Technological Sciences, 2011, 54(11): 2904-2915.
- [4] XIAO Yang, LIU Hanlong, ZHU Jungao, et al. Dilatancy equation of rockfill material under the true triaxial stress condition [J]. Science China Technological Sciences, 2011(Sup1): 175-184.
- [5] 史江伟,朱俊高,王平,等. 一个粗粒土的非线性弹性模型[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2011, 39(2): 154-160. (SHI Jiangwei, ZHU Jungao, WANG Ping, et al. Nonlinear elastic model for coarse-grained soils[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(2): 154-160. (in Chinese))
- [6] 杨杰,蔡新,郭兴文. 基于强度试验的胶凝堆石材料破坏准则[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(2): 47-50. (YANG Jie, CAI Xin, GUO Xingwen. The failure criterion of cemented sand and gravel material based on strength test[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(2): 47-50. (in Chinese))
- [7] 姚仰平,孔玉侠. 横观各向同性土强度与破坏准则的研究[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 43-50. (YAO Yangping, KONG Yuxia. Study on strength and failure criterion of cross-anisotropic soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 43-50. (in Chinese))
- [8] 赵春风,杨砚宗,张常光,等. 考虑中主应力的常用破坏准则适用性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 327-334. (ZHAO Chunfeng, YANG Yanzong, ZHANG Changguang, et al. Investigation on applicability of common failure criteria considering intermediate principal stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 327-334. (in Chinese))
- [9] 苏栋. 一种适用于各向异性土体的破坏准则[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1681-1686. (SU Dong. A failure criterion for anisotropic soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1681-1686. (in Chinese))
- [10] 殷宗泽. 土工原理[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [11] LADE P V, DUNCAN J M. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(10): 1037-1053.
- [12] NAKAI T, MATSUOKA H, OKUNO N, et al. True triaxial tests on normally consolidated clay and analysis of the observed shear behavior using elastoplastic constitutive models[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4): 67-78.
- [13] 施维成,朱俊高,刘汉龙. 中主应力对砾石料变形和强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(10): 1449-1453. (SHI Weicheng, ZHU Jungao, LIU Hanlong. Influence of intermediate principal stress on deformation and strength of gravel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(10): 1449-1453. (in Chinese))
- [14] SHI Weicheng, ZHU Jungao, ZHAO Zhonghui, et al. Strength and deformation behaviour of coarse-grained soil by true triaxial tests[J]. Journal of Central South University of Technology, 2010, 17(5): 1095-1102.