

低应力水平下 CAS-1 模拟月壤力学特性 试验研究

张宇, 陈善雄, 余飞, 李剑, 高惠

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要: “月壤采样”工程中的关键问题是, 月面特殊环境条件下钻取机具与月壤之间的相互作用机制。针对 CAS-1 模拟月壤在低应力水平下的力学特性, 开展直剪、压缩、三轴试验。研究表明: (1) 低应力水平下, 当孔隙比 $e = 0.8 \sim 1.1$ 时, 黏聚力 $c = 2.8 \sim 5.0$ kPa, 内摩擦角 $\varphi = 39.84^\circ \sim 41.09^\circ$; 压缩曲线表现出先上凹、再下凹的变化特征; 当 $e = 0.9 \sim 1.1$ 时, 初始压缩模量 $E_0 = 12.647 \sim 3.923$ MPa, 应力-应变曲线分为硬化和软化阶段, 软化下降速率较快, 残余强度持续时间较长, 应力比曲线分布集中。(2) 低应力水平下, e 越小, 峰值偏应力/应力比越大, 峰值轴向应变越小, 但均在 $2\% \sim 5\%$ 范围, 残余强度/应力比越大, 持续时间越长。(3) 初始切线斜率 α 、峰值应力比 η_v 、残余应力比 η_r 均与围压 P_0 成一定对数线性关系, 但在低应力水平下, α 下降较慢, 初始切线模量 $G_i(1/\alpha)$ 变化幅度较小, 而 η_v 与 η_r 均下降较快。

关键词: 土力学; CAS-1 模拟月壤; 低应力水平; 抗剪强度特性; 压缩特性

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)01-0174-08

EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF LUNAR SOIL SIMULANT CAS-1 UNDER LOW STRESS

ZHANG Yu, CHEN Shanxiong, YU Fei, LI Jian, GAO Hui

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The interaction between the drilling machine and the lunar soil in the special environments on lunar surface has been the key issue of sampling in lunar regolith. Direct shear tests, compression tests and triaxial tests were carried out to investigate the mechanical property of lunar regolith simulant CAS-1 under the low levels of stress. The simulant was found to have the cohesion of 2.8 to 5.0 kPa and the angle of internal friction 39.84° to 41.09° when the porosity $e = 0.8 - 1.1$ at the low stress level. The compression curve was found to have a shape of concave upward firstly and then a shape of concave downward at the low stress levels. The initial compression moduli were from 12.647 to 3.923 MPa when $e = 0.9 - 1.1$. The stress-strain curve can be divided into a harden and a soften stage. The decreasing rate of the soften stage is rather fast and the duration of the residual strength is long. When the void ratio is smaller, the ratio of peak deviator stress/stress is larger, the peak axial strain is smaller and the values of peak axial strain are between 2% and 5% , the ratio of residual strength/stress is larger and the duration is longer. The initial tangent of the stress-strain curve, the peak stress ratio and the residual stress ratio vary with the compression stress logarithmically. The initial tangent decreases slowly, the initial tangent modulus changes little but the peak stress ratio and the residual stress ratio decrease rapidly.

收稿日期: 2014-01-09; **修回日期:** 2014-03-18

作者简介: 张宇(1987-), 男, 2010年毕业于西南大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事特殊土工程特性方面的研究工作。E-mail: jordanzhy@163.com。通讯作者: 陈善雄(1965-), 男, 现任研究员。E-mail: sxchen@whrsm.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.01.019

Key words : soil mechanics ; lunar regolith simulant CAS-1 ; low stress level ; shear strength characteristics ; compression characteristics

1 引 言

“月壤采样”中钻取机具与月壤的相互作用机制，将是探月三期工程的核心问题。由于我国尚无月表采样经验，且对月壤的物理力学特性缺乏系统研究，从而亟需采用模拟月壤^[1]开展与月壤力学机械特性相关的试验研究。

目前，国内外关于模拟月壤的物理力学性质的研究已取得了一定的成果^[1-14]。D. S. Mckay 等^[2-4]针对 JSC-1 模拟月壤开展了物理、机械特性等方面的研究；S. W. Perkins 和 C. R. Madson^[5]针对 2 种不同的模拟月壤，开展了力学机械特性与荷载沉降特性方面的研究；R. J. Gustafson 等^[6]则主要探讨了模拟月壤微观结构与真实月壤的差异性，并提出了相应的改进方法；H. Arslan 等^[7]针对 JSC-1 模拟月壤，开展了抗拉强度特性方面的试验研究；郑永春等^[8]基于阿波罗 14 号的月壤样品，利用火山灰研制成功了 CAS-1 模拟月壤，并开展了微量元素、矿物成分、颗粒形态、抗剪性等物理力学方面的研究；李建桥等^[9-10]研制了吉林大学模拟月壤，并探讨了模拟月壤的物理力学基本特性；蒋明镜等^[11-12]研制了 TJ-1 模拟月壤，也探讨了模拟月壤的物理力学特性；李丽华等^[13]开展了关于月壤及模拟月壤微观结构的研究；凌道盛等^[14]利用自行研制的拖曳模型试验装置，研究了着陆器足垫与模拟月壤之间的相互作用规律。以上研究大都是在地面常规应力水平下开展的，而关于在月表低重力(1/6g)环境下，月壤层采样深度(0~5 m)范围内，即应力水平在 0~25 kPa 范围的力学特性还未系统揭示。

由于月壤的密实和松散程度在广度和深度上的分布存在差异性，且这也是影响其力学性质的主要因素之一^[15]。因此，本文采用 CAS-1 模拟月壤(国家标准样品)，配置一系列不同孔隙比的试样，在地面低应力水平下开展直剪、压缩、三轴试验，探究模拟月壤在低应力水平下的力学机械基本特性及其变化规律，并将其应力-应变特性与常规应力水平下的情况进行对比研究。这是认识月壤钻取采样过程中“壤-具”相互作用的有效途径和重要环节，也为顺利实现月壤采样奠定一定的力学基础。

2 力学试验方案

2.1 试验材料

CAS-1 模拟月壤是以长白山龙岗火山群金顶子火山喷发的四海火山渣为原料，由中国科学院地球化学研究所与国家天文台合作研制成功的国家标准样品^[8]。CAS-1 模拟月壤颗粒富含尖锐的棱角^[8]，其颗粒相对密度 $G_s = 2.66$ ，属粉细砂范畴，颗粒级配与粒径区间分布分别见图 1 和表 1。

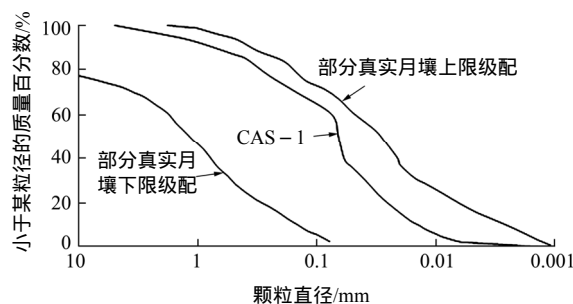


图 1 CAS-1 模拟月壤与月壤^[6,9]的粒径级配曲线

Fig.1 Grain size curves for lunar soil simulant CAS-1 and real lunar regolith^[6,9]

表 1 各类模拟月壤^[4-9]的粒径区间分布

Table 1 Particle distributions of lunar soil simulant^[4-9]

模拟月壤	有效粒径 $d_{10}/\mu\text{m}$	中值粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$	限制粒径 $d_{60}/\mu\text{m}$	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
JSC-1	20	120	150	7.50	1.20
MLS-1	20	91	170	8.50	0.65
FJS-1	10	120	160	16.00	2.25
吉林大学	25	97	129	5.20	0.94
TJ-1	20	260	431	21.50	0.94
CAS-1	14	66	75	5.36	1.45

由图 1 与表 1 可知，CAS-1 模拟月壤的颗粒级配与粒径区间分布属真实月壤级配范畴，且粒径区间分布居中。

2.2 试样制备

月壤的密实程度和松散状态是影响其力学性质的主要因素之一。试验前将模拟月壤试样烘干，并在室温条件下干燥冷却。按照控制模拟月壤孔隙比的方法，设置了 4 种不同松散状态的试样，见表 2。

表2 4种不同试样

Table 2 Properties of 4 kinds of samples

试样编号	相对密度 G_s	孔隙比 e	干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$
1	2.66	0.8	1.48
2	2.66	0.9	1.40
3	2.66	1.0	1.33
4	2.66	1.1	1.27

直剪试样是直接将干燥的模拟月壤置于烘干的剪切盒内,采用插捣砂雨法配置成标准的环刀样($\phi 61.8$ mm);压缩试样是在环刀里直接装样而成的;三轴试样是在三轴仪的底座上原位成型的,其直径为39.10 mm、高度为80.00 mm,具体制作方法参见张宇等^[16]的研究,制备好的试样如图2所示。



图2 三轴试样

Fig.2 Triaxial sample

3 低应力水平下的力学特性分析

3.1 低应力水平下的抗剪强度特性

通过直剪快剪试验,获得了CAS-1模拟月壤在地面低竖向压力 $P = 20, 40, 60, 80$ kPa 下的抗剪强度,结果见图3和表3。

根据图3和表3可知,在20, 40, 60, 80 kPa低竖向压力水平下,当CAS-1模拟月壤的孔隙比 e 为0.8~1.1时,黏聚力 c 在2.8~5.0 kPa 范围内波动,而内摩擦角 ϕ 在39.84~41.09范围波动,得到的 c, ϕ 均属于真实月壤样品的变化范围^[17]。由于CAS-1模拟月壤颗粒较细、具有大量棱角、表面粗糙,所以在剪切过程中,毛细吸力使颗粒间产生正压力以及剪切过程中颗粒之间的相互咬合,带来了一定的摩擦强度,从而表现出一定的黏聚力,同时这也间接地反映了真实月壤由于其微观结构存在某种胶结物质从而具有一定黏聚力的特点^[11]。

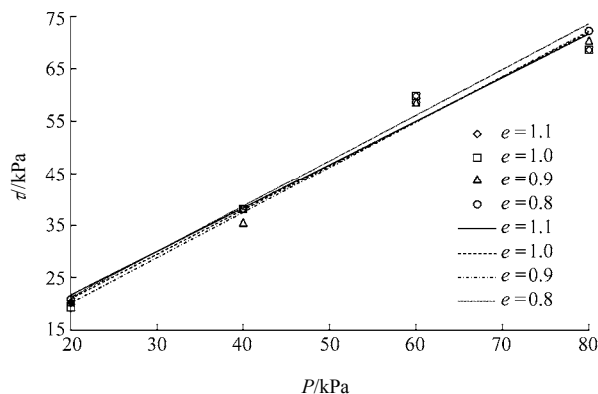


图3 低竖向压力 P 与剪应力 τ 的关系

Fig.3 Relationships between the low vertical pressure P and the shear stress τ

表3 不同孔隙比下的内摩擦角 ϕ 和黏聚力 c

Table 3 Internal friction angle ϕ and cohesion c with different porosities

孔隙比 e	c/kPa	$\phi / (^\circ)$
1.1	5.00	39.84
1.0	4.00	40.35
0.9	2.80	40.97
0.8	3.90	41.09

3.2 低应力水平下的压缩特性

采用第2~4组试样,在0~100 kPa的地面竖向压力 P 下,分8级加载开展压缩试验,试验结果见图4。

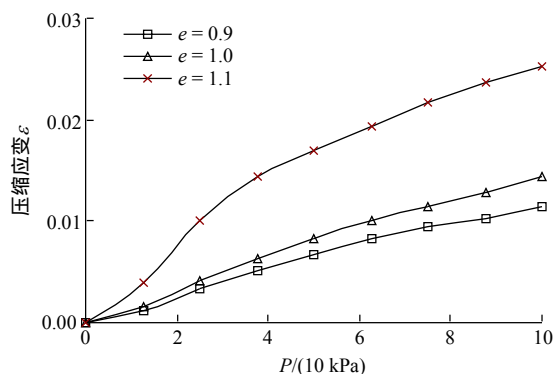


图4 压缩应变 ϵ 与竖向压力 P 的曲线

Fig.4 Curves of compressive strain ϵ versus vertical pressure P

由图4可知,相同压力 P 下,孔隙比越大,压缩应变 ϵ 越大,且 $e = 1.0 \sim 1.1$ 时,压缩应变 ϵ 变化较大。在地面0~20 kPa的低竖向压力范围内,压缩应变 ϵ 的变化速率逐渐增大,曲线呈上凹特征,载荷卸除后变形可完全恢复,属于完全弹性阶段。

之后，压缩应变 ε 变化速率随着压力的增加而逐渐减小，曲线逐渐呈下凹特征。这说明 CAS-1 模拟月壤在低竖向压力下的压缩特性并不完全符合双曲线模型^[18-19]。因此，在 $(P/\varepsilon)-P$ 坐标系中，压缩曲线中各压力下的压缩模量 E_c 并不只有一条直线，如图 5 所示。

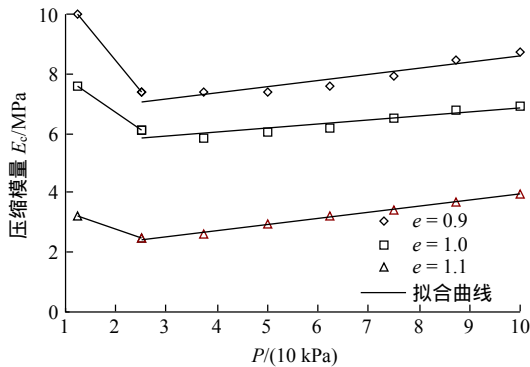


图 5 E_c-P 关系曲线

Fig.5 Curves of E_c versus P

由图 5 可知，0 ~ 25 和 25 ~ 100 kPa 两组压力区间内，3 种试样的压缩模量 E_c 均与 P 具有良好的线性关系，两段区间内的表达式均可用下式表示：

$$E_c = A + BP \tag{1}$$

式中： A 为直线的截距， B 为直线的斜率。 A ， B 的取值如表 4 所示。

表 4 不同应力水平下的拟合参数值

Table 4 Fitting parameters of different samples under different kinds of stress levels

孔隙比 e	$P = 0 \sim 25$ kPa		$P = 25 \sim 100$ kPa	
	A	B	A	B
0.9	12.647	- 2.118	6.586	0.198
1.0	9.054	- 1.183	5.478	0.138
1.1	3.923	- 0.574	1.913	0.206

从图 5 和表 4 可知，25 kPa 以后的压缩模量 E_c 随竖向压力 P 的增加呈线性增大，说明该阶段的压

缩曲线符合双曲线模型，且在相同压力下，孔隙比越大，压缩模量越小。但在 0 ~ 25 kPa 压力范围，压缩模量却随竖向压力的增大而减小。这是由于 CAS-1 模拟月壤颗粒的棱角丰富，颗粒间的相互接触多于圆形，因此在加载初期需要克服颗粒间相互错动的能量较大。根据表 4 可知，孔隙比对 CAS-1 模拟月壤压缩特性的影响较大，当孔隙比 $e = 0.9 \sim 1.1$ 时，CAS-1 模拟月壤的初始压缩模量 $E_0 = 12.647 \sim 3.923$ MPa。

3.3 低应力水平下的应力-应变特性

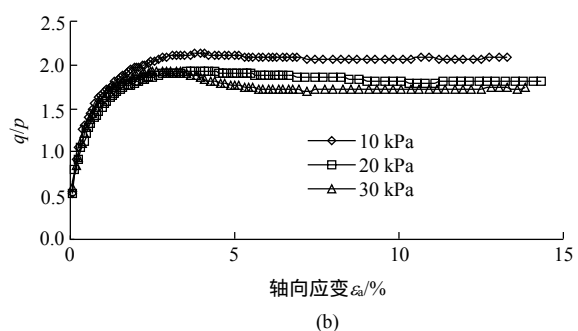
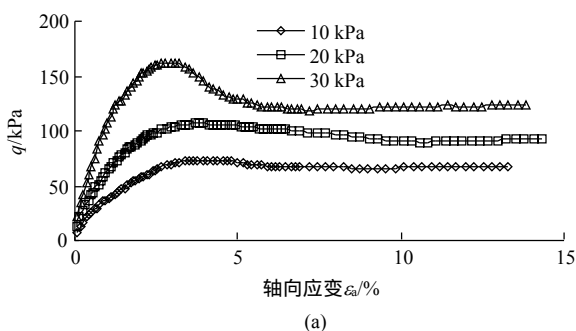
为了近似地模拟月面微重力环境条件，以保证试验数据的准确性和可靠性，围压 P_0 以月表采样深度(0 ~ 5 m)的自重应力为主控范围，采用孔隙比 e 为 0.8 和 1.0 的 2 种试样，围压为 10 ~ 30 和 50 ~ 150 kPa 两组，采用常规的应变式三轴试验仪开展不固结不排水的三轴试验研究(UU 剪)。偏应力 q 、应力比 $\eta(q/p)$ 与轴向应变 ε_a 的关系分别见图 6，7，其中偏应力 q 、平均主应力 p 的计算公式分别为

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \tag{2}$$

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \tag{3}$$

相关试验结果详见表 5。

由图 6，7 可知，可采用二分法^[20]对所有的应力-应变曲线进行描述。不同围压下的偏应力(应力比)与轴向应变曲线，均以峰值点为标记，简单地分为 2 段：应变硬化阶段和应变软化阶段。硬化阶段的曲线具有 3 个特征：初始压缩闭合阶段(曲线上凹)、线弹性变形阶段(直线上升)、弹塑性变形阶段(曲线下凹)。且硬化阶段主要是以线弹性变形阶段为主，围压越高，初始切线模量越大，峰值偏应力越大。软化阶段下降速率较快，残余强度持续时间较长，且围压越高，残余强度越大。整个应力-应变曲线具有非线性弹性特征。不同围压下的应力比与轴向应变曲线分布较为集中，围压越大，线弹性阶段的初始切线斜率 α 、峰值应力比 η_k 、残余应力比 η_r 越小，以上特性便于利用统一的数学模型进行研究分析。



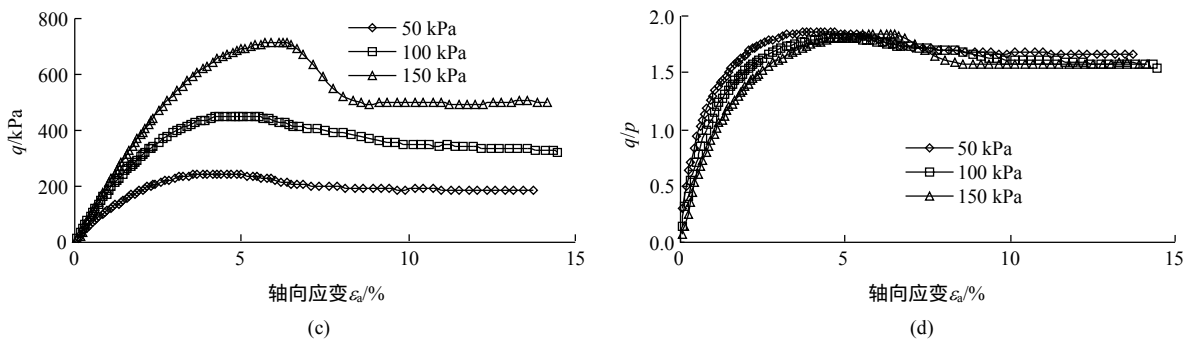


图 6 不同围压下的应力-应变关系曲线($e = 0.8$)

Fig.6 Stress-strain curves under different confining pressures($e = 0.8$)

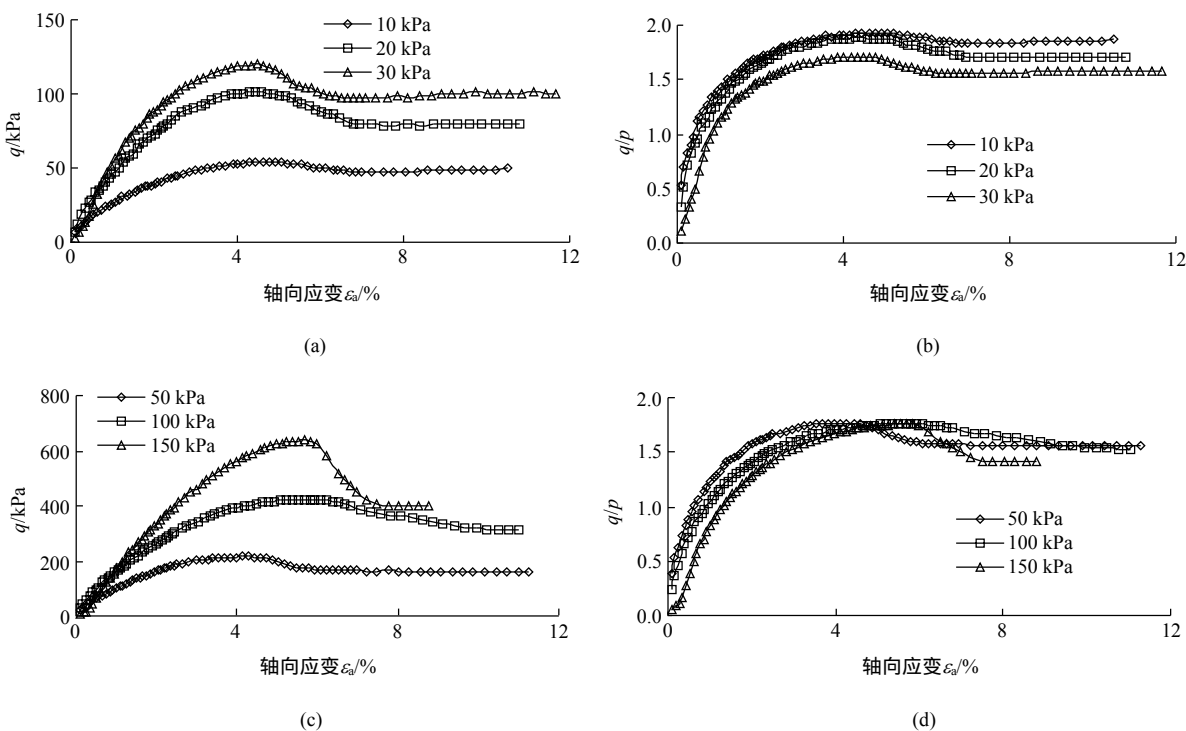


图 7 不同围压下的应力-应变关系曲线($e = 1.0$)

Fig.7 Stress-strain curves under different confining pressures($e = 1.0$)

表 5 不同围压下 CAS-1 模拟月壤的试验结果

Table 5 Experimental results of lunar soil simulant under different stress levels

围压 P_0 /kPa	$e = 0.8(\rho_d = 1.48 \text{ g/cm}^3)$				$e = 1.0(\rho_d = 1.33 \text{ g/cm}^3)$				
	初始切线斜率	峰值剪应变	峰值应力比	残余应力比	初始切线斜率	峰值剪应变	峰值应力比	残余应力比	
	α	$\varepsilon_{st}/\%$	η_i	η_r	α	$\varepsilon_{st}/\%$	η_i	η_r	
低围压	10	4.963	3.768	2.125	2.079	2.052	4.448	1.934	1.868
	20	3.579	3.665	1.965	1.821	1.973	4.293	1.862	1.700
	30	3.287	2.794	1.930	1.733	1.892	4.463	1.778	1.580
常规围压	50	2.547	4.253	1.860	1.676	1.778	4.120	1.767	1.552
	100	1.673	4.931	1.804	1.613	1.202	5.804	1.759	1.531
	150	0.955	6.090	1.790	1.574	0.808	5.681	1.738	1.496

由表 5 可知，低围压下，孔隙比 e 越小，试样越密实，进入软化时的峰值偏应力越大，残余强度

越大，且持续时间越长，发生峰值偏应力时的轴向应变越小，但均在 2% ~ 5% 范围。常规围压下，2

种密实度下的峰值偏应力、残余应力相差不大，峰值轴向应变在 3%~6%范围。

低围压下，试样的孔隙比越小，峰值应力比、残余应力比越大；常规围压下，2 种密实度下的峰值应力比、残余应力比相差不大，而应力比曲线的分布较低围压下更集中。

3.4 初始切线斜率 α 的变化规律

分析上述试验结果可知，CAS-1 模拟月壤在 2 种密实状态下的初始切线斜率 α 均与围压 P_0 呈良好的对数线性关系，如下式所示：

$$\lg \alpha = \lg \alpha_0 + \alpha_1 \lg(P_0 / P_a) \quad (4)$$

式中： α_0 为直线的截距， α_1 为直线的斜率， P_a 为大气压力。

拟合结果详见图 8 和表 6。由图 8 和表 6 可知，CAS-1 模拟月壤在不同密实度下的初始切线斜率 α 均随围压 P_0 的升高而逐渐减小；初始斜率 α 在 30~150 kPa 范围内较 10~30 kPa 范围内下降更快，说明在 10~30 kPa 的低围压范围内，曲线的初始切线模量 $G_f(1/\alpha)$ 变化幅度较小；相同围压范围内，孔隙比越小，试样越密实，初始斜率 α 下降地越快。

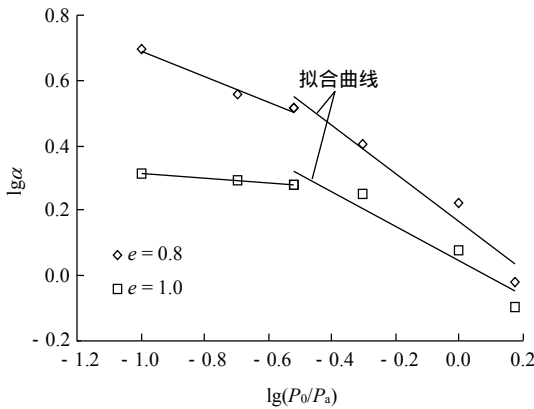


图 8 初始切线斜率 α 随围压 P_0 的变化关系

Fig.8 Relationships between initial tangent α and confining pressure P_0

表 6 α 拟合结果

Table 6 Fitting results of α

围压/kPa	α_0		α_1	
	$e=0.8$	$e=1.0$	$e=0.8$	$e=1.0$
10~30	2.010	1.744	-0.386	-0.072
30~150	1.453	1.105	-0.736	-0.528

3.5 峰值应力比 η_f 的变化规律

分析应力比与应变关系曲线可知，CAS-1 模

拟月壤在 2 种密实状态下的峰值应力比 η_f 均与围压 P_0 呈良好的对数线性关系，如下式：

$$\lg \eta_f = \lg \eta_{f0} + \eta_{f1} \lg(P / P_a) \quad (5)$$

式中： η_{f0} 为直线的截距， η_{f1} 为直线的斜率， P_a 为大气压力。

拟合结果详见图 9 和表 7。由图 9 和表 7 可知，CAS-1 模拟月壤的峰值应力比 η_f 均随围压 P_0 的升高而逐渐减小； η_f 在 10~30 kPa 范围内较 30~150 kPa 范围内下降得更快，说明在 10~30 kPa 的低围压范围内， η_f 的分布较为分散；相同围压范围内，试样孔隙比越小，峰值应力比 η_f 下降地越快。

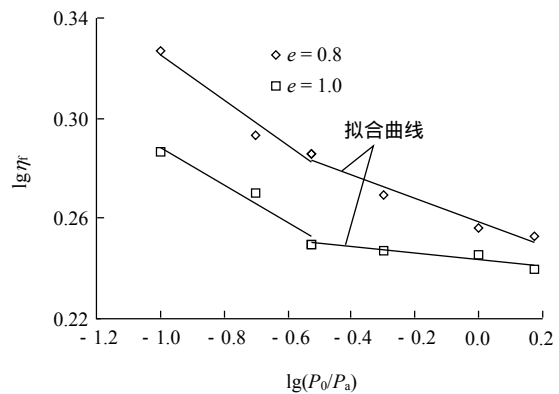


图 9 峰值应力比 η_f 随围压 P_0 的变化关系

Fig.9 Relationship between the peak stress ratio η_f and the confining pressure P_0

表 7 η_f 拟合结果

Table 7 Fitting results of η_f

围压/kPa	η_{f0}		η_{f1}	
	$e=0.8$	$e=1.0$	$e=0.8$	$e=1.0$
10~30	1.720	1.637	-0.090	-0.074
30~150	1.813	1.752	-0.047	-0.013

3.6 残余应力比 η_r 的变化规律

分析应力比与应变关系曲线可知，CAS-1 模拟月壤在 2 种密实状态下的残余应力比 η_r 均与围压 P_0 呈良好的对数线性关系，如下式所示：

$$\lg \eta_r = \lg \eta_{r0} + \eta_{r1} \lg(P_0 / P_a) \quad (6)$$

式中： η_{r0} 为直线的截距，参数 η_{r1} 为直线的斜率。

拟合结果详见图 10、表 8。由图 10、表 8 可知，CAS-1 模拟月壤的残余应力比 η_r 随围压 P_0 的升高而逐渐减小； η_r 在 10~30 kPa 范围内较 30~150 kPa 范围内下降得更快；相同围压范围内，试样孔

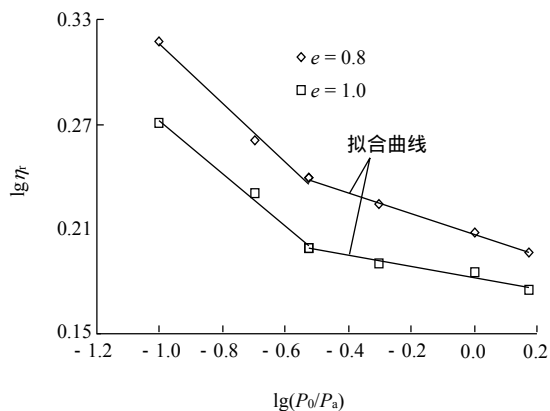


图 10 残余应力比 η_r 随围压 P_0 的变化关系

Fig.10 Relationship between residual stress ratio η_r and confining pressure P_0

表 8 η_r 拟合结果

Table 8 Fitting results of η_r

围压/kPa	η_{r0}		η_{r1}	
	$e = 0.8$	$e = 1.0$	$e = 0.8$	$e = 1.0$
10 ~ 30	1.405	1.324	- 0.168	- 0.151
30 ~ 150	1.612	1.522	- 0.059	- 0.031

隙比越小，残余应力比 η_r 下降越快。

4 结 论

(1) 通过与真实月壤以及国内外著名模拟月壤对比研究，CAS-1 模拟月壤在颗粒形态与颗粒组成属部分真实月壤范畴。

(2) 在 20 ~ 80 kPa 的地面低竖向压力水平下，CAS-1 模拟月壤的黏聚力 $c = 2.8 \sim 5.0$ kPa，内摩擦角 $\varphi = 39.84 \sim 41.09^\circ$ 。

(3) CAS-1 模拟月壤在 0 ~ 100 kPa 的低竖向压力下的压缩特性，并不完全符合双曲线模型，压缩曲线表现出先上凹、再下凹的变化特征。孔隙比 e 对 CAS-1 模拟月壤压缩特性的影响较大，当孔隙比为 $e = 0.9 \sim 1.1$ 时，CAS-1 模拟月壤的初始压缩模量 $E_0 = 12.647 \sim 3.923$ MPa。

(4) 在试验条件下，CAS-1 模拟月壤的应力-应变曲线均分为硬化和软化阶段；围压越高，初始切线模量越大，峰值偏应力越大，残余强度越大；软化下降速率较快，残余强度持续时间较长；不同围压下的应力比曲线分布较为集中，而围压越大，初始切线斜率、峰值应力比、残余应力比越小。

(5) 低围压下，孔隙比对 CAS-1 模拟月壤强度的影响较常规围压下更显著；孔隙比 e 越小，试样越密实，进入软化时的峰值偏应力/应力比越大，发生峰值偏应力时的轴向应变越小，且均在 2% ~ 5% 范围；孔隙比 e 越小，残余强度/应力比越大，且持续时间越长。

(6) CAS-1 模拟月壤在不同密实度下的初始切线斜率 α ，峰值应力比 η_f ，残余应力比 η_r 均与围压 P_0 成一定对数线性关系；10 ~ 30 kPa 的低围压范围内， α 下降地较慢，初始切线模量 $G_i(1/\alpha)$ 变化幅度较小，而 η_f ， η_r 下降地较快；相同围压范围内，孔隙比越小， α ， η_f ， η_r 下降地越快。

上述研究提供了大量的关于 CAS-1 模拟月壤在低应力水平下的力学试验数据，对月面钻取采样机具的研发具有一定的参考意义，并为顺利实现我国探月三期工程中的月壤采样奠定了一定的力学基础。

参考文献(References) :

- [1] KIRKICI H, ROSE M F, CHALOUKPA T. Experimental study of simulated lunar soil : high voltage breakdown and electrical insulation characteristics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(1) : 119-125.
- [2] MCKAY D S, CARTER J L, WOLES W W. JSC-1 : a new lunar soil stimulant[C]// Engineering ,Construction ,and Operations in Space IV. New York : [s.n.] , 1994 : 857-866.
- [3] WILLMAM B M ,BOLES W W ,MCKAY S ,et al. Properties of lunar soil stimulant JSC-1[J]. Journal of Aerospace Engineering , 1994 , 8(2) : 77-87.
- [4] KLOSZY J L ,STURE S ,KO H Y ,et al. Mechanical properties of JSC - 1 lunar regolith simulant[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Space 96 Albuquerque. New York : [s.n.] , 1996 : 680-688.
- [5] PERKINS S W , MADSON C R. Mechanical and load-settlement characteristics of two lunar soil simulants[J]. Journal of Aerospace Engineering , 1996 , 9(1) : 1-9.
- [6] GUSTAFSON R J , GUSTAFSON M A , FRENCH R A , et al. Simulants for testing and verifying exploration surface activity[C]// American Institute of Aeronautics and Astronautics. San Jose : [s.n.] , 2006 : 375-380.
- [7] ARSLAN H , STURE S , BATISTE S. Experimental simulation of tensile behavior of lunar soil stimulant JSC-1[J]. Materials Science and Engineering , 2008 , 478(1) : 201-207.
- [8] 郑永春, 王世杰, 冯俊明, 等. CAS-1 模拟月壤[J]. 矿物学报,

- 2007, 27(3/4): 571-578. (ZHENG Yongchun, WANG Shijie, FENG Junming, et al. CAS-1 lunar soil simulant[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2007, 27(3/4): 571-578. (in Chinese))
- [9] 李建桥, 邹猛, 贾阳, 等. 用于月面车辆力学试验的模拟月壤研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1557-1561. (LI Jianqiao, ZOU Meng, JIA Yang, et al. Lunar soil simulant for vehicle-terramechanics research in labortory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1557-1561. (in Chinese))
- [10] 邹猛, 李建桥, 刘国敏, 等. 模拟月壤地面力学性质试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1057-1061. (ZOU Meng, LI Jianqiao, LIU Guomin, et al. Experimental study of terra-mechanics characters of simulant lunar soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1057-1061. (in Chinese))
- [11] 蒋明镜, 李立青. TJ-1 模拟月壤的研制[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 209-214. (JIANG Mingjing, LI Liqing. Development of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 209-214. (in Chinese))
- [12] 蒋明镜, 李立青, 刘芳, 等. 含水率和颗粒级配对 TJ-1 模拟月壤力学性能影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1921-1925. (JIANG Mingjing, LI Liqing, LIU Fang, et al. Effects of moisture content and gradation on mechanical properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 1921-1925. (in Chinese))
- [13] 李丽华, 唐辉明, 刘数华. 月壤及模拟月壤微观结构的研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(1): 31-34. (LI Lihua, TANG Huiming, LIU Shuhua. Microstructure of lunar soil and lunar soil simulant[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 31-34. (in Chinese))
- [14] 凌道盛, 蒋祝金, 蔡武军, 等. 模拟月壤中着陆器足垫滑移受力的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1847-1853. (LING Daosheng, JIANG Zhujin, CAI Wujun. Experimental study of sliding forces of lander footpad in simulant lunar soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1847-1853. (in Chinese))
- [15] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 12-22. (OUYANG Ziyuan. Introduction to lunar science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005: 12-22. (in Chinese))
- [16] 张宇, 余飞, 陈善雄, 等. CAS-1 模拟月壤动剪切模量与阻尼比的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 74-82. (ZHANG Yu, YU Fei, CHEN Shanxiong, et al. Experimental study of dynamic shear modulus and damping ratio of CAS-1 lunar soil simulant[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 74-82. (in Chinese))
- [17] 郑永春, 欧阳自远, 王世杰, 等. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石, 2004, 24(4): 14-19. (ZHENG Yongchun, OUYANG Ziyuan, WANG Shijie, et al. Physical and mechanical properties of lunar regolith[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2004, 24(4): 14-19. (in Chinese))
- [18] 魏汝龙. 整理压缩试验资料的一种新方法[J]. 水利水运科学研究, 1980, (3): 90-93. (WEI Rulong. New method for dealing with results of odometer test[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1980, (3): 90-93. (in Chinese))
- [19] 刘保健, 张军丽. 土工压缩试验成果分析方法与应用[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 37-41. (LIU Baojian, ZHANG Junli. Application and analyzing method for soil compression test[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12(1): 37-41. (in Chinese))
- [20] 刘传孝. 砂岩全应力-应变曲线二分阶段特征的 Lyapunov 定性分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1884-1888. (LIU Chuanxiao. Analyzing staged features of complete stress-strain curves divided by dichotomy of sandstone qualitatively with Lyapunov theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1884-1888. (in Chinese))