

月壤工程地质特性综述

黄 雨, 蒋馥鸿

(同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 根据国内外的最新研究成果, 综述了近年来月壤工程地质力学特性研究的新进展。首先简述了月壤的矿物特征与化学成分, 分析了月壤的级配、颗粒形态与孔隙率等物理性质; 然后总结了月壤的变形特性与强度特征, 阐述了目前模拟月壤的主要类别, 及其内摩擦角、弹性参数等力学参数的研究成果; 最后指出月壤研究中存在的问题, 即模拟月壤试验必须注意环境变量(如弱重力)及化学成分对于工程地质性质的影响, 同时应加强对月壤动力性质方面的研究。

关键词: 月壤; 模拟月壤; 力学性质; 工程性质

中图分类号: P642

文献标志码: A

Review of Engineering Geological Characteristics of Lunar Regolith

HUANG Yu, JIANG Fuhong

(Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Some recent advances of engineering geological properties of lunar regolith are summarized in the aspect of the influence of specific environment on the lunar regolith properties. First, the geochemical characteristics of the lunar regolith researches are outlined briefly, including mineral characteristics and chemical composition. The influences of lunar regolith size distribution, particle shape and porosity on lunar regolith properties are analyzed. Then, the mechanical properties of the lunar regolith are introduced, including the deformation characteristics and strength characteristics. The main types of lunar regolith simulation are presented, and so do mechanic parameters of the stimulation soil, such as the angle of internal friction and elastic parameters. Finally, the existing problems in the lunar regolith research are pointed out that the effects of environment variables (e. g. the weak gravity) and chemical composition for the engineering geological behavior should be taken into account in simulant test and the dynamic nature of lunar regolith also should be paid more attention.

Key words: lunar regolith; lunar regolith simulant; mechanical properties; engineering properties

月球是距离地球最近的天体, 是人类太空探测的首选。自 20 世纪 60 年代美国 Apollo 载人登月计划实施以来, 人类对于月球的探索不断深入。我国目前也开展了嫦娥探月工程, 并以载人登月为重点而进行探索^[1]。

众所周知, 月壤是月球最表面一层的风化物质, 主要由岩屑、玻璃等组成^[2]。作为月球探测器着陆的直接载体, 月壤的工程地质力学性质, 即工程地质主要物理状态与属性, 对于月球探测具有重要影响。探索月球必须首先了解月壤的基本工程地质性质^[3]。

虽然, 国内外对于月壤已经进行了较多的研究^[4-6], 但多集中在颗粒成分、颗粒形态与孔隙率等单一性质的探索, 尚缺乏对月壤工程地质力学特性的宏观分析。因此, 本文针对月壤工程地质力学问题, 根据国内外近年的最新研究成果, 首先对有关月壤基本工程性质的研究成果进行了介绍, 包括物理性质、化学组成及颗粒性质; 其次, 对模拟月壤的强度特性与变形特征的研究成果进行了分析, 讨论了弱重力下进行月壤工程地质性质研究的必要性; 最后, 提出应加强真实月面环境下月壤的动力响应特性等方面的研究。

1 月壤矿物组成

根据成因, 月壤可分为 3 类, 即月海玄武岩起源、月球高地起源、月海与高地混合源^[2]; 根据月壤中钛元素含量可分为 3 类, 即低钛玄武岩质月壤、高钛玄武岩质月壤与斜长岩质月壤^[3]。由于月壤绝大部分物质是由下伏月岩演化而成, 而月海玄武岩主要由斜长石构成, 月球高地岩石主要由辉石与钛铁

矿构成^[7-8],因此月壤包含了斜长石、辉石、钛铁矿等原生矿物成分^[6].月壤是在氧气、水、风和生命活动都不存在的独特的环境下,由陨石和微陨石撞击、宇宙射线和太阳风轰击、月表温差导致月岩热胀冷缩破碎等因素的共同作用下形成.因此,月壤中没有含水的矿物^[9](如粘土、云母、闪石等),存在较多的由于火山喷发等作用所生成的玻璃体(图 1).

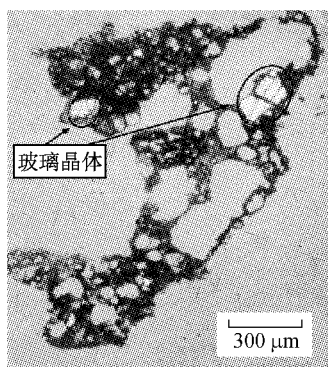


图 1 NASA 公布的月壤薄片标本图像^[10]

Fig.1 Lunar regolith wafer specimen image announced by NASA^[10]

2 月壤化学成分

月壤的化学成分主要是指矿物的化学组成.通过表 1 可知,月壤的主要化学成分包括氧化硅、氧化铝、氧化亚铁等,其中钾长石和方解石等在地球上常见的矿物,在月球上却极为稀少.另外由于月球没有大气层和水,不能产生氧化还原作用,矿物中的变价元素多为低价且不含水.

表 1 月壤主要元素列表^[11-12]

Tab.1 List of the main elements of the lunar regolith^[11-12]

样品来源	质量分数/%					
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	K ₂ O
14163	47.30	1.60	17.80	10.50	0.70	0.60
10084	42.55	7.71	13.47	15.16	0.45	0.15
A11	42.20	7.80	13.60	15.30	0.47	0.16
A14	48.10	1.70	17.40	10.40	0.70	0.55

注:14163,10084 分别指 Apollo 14 号和 Apollo 11 号宇航员采集的编号为 14163,10084 的月球样品;A11,A14 指 Apollo 11 号和 14 号登月采样点月壤的平均化学组成.

月壤中还含有非常丰富的稀有气体(如 He,Ne 等)与金属矿产(如钛、铁等).其中³He 含量极高,对已有月壤标本的研究表明,月壤中³He 资源总量可达 100~500 万 t,作为一种极具开发前景的核聚变燃料,这对未来开发利用月球能源具有重要的参考意义^[13].

3 月壤颗粒性质

颗粒组成与矿物成分是影响月壤的物理性质的主要因素^[14].月壤的颗粒组成,包括粒度分布和颗粒形态,是决定月壤的物理性质的主要因素之一^[12].粒度分布的研究成果表明:月壤分选性较差,分布范围较窄,粒度与淤沙相似.颗粒直径以小于 1 mm 为主,其中绝大部分颗粒直径在 1~30 μm 之间,中值粒径在 40~130 μm 之间^[14],约 10%~20%的颗粒直径小于 20 μm^[12](图 2).

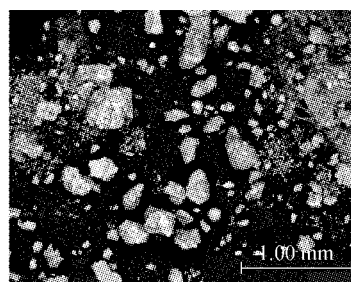


图 2 月壤颗粒微观图像^[15]

Fig.2 Microscopic photographs of lunar regolith particles^[15]

此外,通过对月壤标本的测定,得到了月壤的平均粒度参数^[15](表 2).由于缺少大气层的保护,受宇宙射线与太阳风等射线的冲蚀,月壤颗粒形态变化较大,长条状、棱角状相对常见^[12-14].

表 2 月壤平均粒度参数^[15]

Tab.2 Average particle size parameters of lunar regolith^[15]

样品编号	平均粒径/μm	有效粒径/μm
Luna 16	85.0	30.3
Luna 20	86.0	13.2
Apollo 11	87.0	35.4
Apollo 12	88.0	47.4
Apollo 14	89.0	40.9
Apollo 15	90.0	28.4
Apollo 16	91.0	19.2
Apollo 17	92.0	17.9

孔隙比 e 可以用来评价月壤的密实程度.参考文献^[12]综合了各个研究者的不同结论,认为:由于受到月球弱重力等因素影响,月壤表现出相对松散的特性;当 $e < 0.6$ 时为密实的低压缩性月壤,当 $e > 1.0$ 时是疏松的高压缩性月壤.

4 月壤力学性质

由于缺少标本,早期月壤的力学性质研究主要

通过天文望远镜等设备观测月球,基于已有的土力学理论推断月壤基本性质^[13,16-17],例如月壤的矿物组成、颗粒性质等;登月后取得了少量月壤标本,直接对标本进行力学实验取得了相应的力学参数^[16],例如月壤的压缩指标与内摩擦角参数等;现今,鉴于月壤标本的稀少,主要通过模拟月壤进行试验,更多关注月表独特环境对月壤的影响^[17],譬如弱重力对于月壤的影响。

依照土力学理论,研究人员对月壤力学性质的研究主要从变形特征与强度特性两个方面开展^[13]。压缩性是变形特征的主要指标。通过对月壤标本进行实验,发现在一般荷载下(100~600 kPa),月壤体积变形主要是颗粒间孔隙的压缩,颗粒本身并未产生变形。即月壤的压缩实际上是月壤颗粒位置重新调整排列,这与地球土压缩原理是类似的^[12,16]。由于月球不存在大气层且重力加速度只有地球的1/6,这导致月壤更易压缩。

强度问题是月壤力学性质研究的重点。未来在月球上规划、建设月球空间站等人工建筑物,都需要对月壤的强度特性有深入的研究。强度特性的研究主要集中在抗剪强度,即月壤颗粒抵抗剪应力的能力。最初,研究人员通过对已有月壤样品进行了三轴试验,发现月壤剪切破坏是颗粒间的摩擦与破碎,月壤抗剪强度主要由内摩擦角 ϕ 与内聚力 c 组成^[16], ϕ 值大小体现颗粒间摩擦的强弱, c 值则表现了颗粒间粘聚力的大小。其后,Perkins等^[17]对抗剪强度试验进行了改进,即采用立方体试样标本,得到了月壤的颗粒抗剪强度远远小于颗粒本身的强度的结论。进一步的研究认为月壤抗剪强度由内聚力 c 控制,但在月表环境的影响下,月壤内聚力不仅与月壤颗粒间的胶结作用有关,而且与颗粒之间的范德华力有关^[18-19]。一些学者基于离散元方法,提出一种简化接触模型,对月壤颗粒相互作用进行了计算模拟^[20]。

月壤的胶结是指岩石与矿物碎片等由于外部因素而产生的熔体胶结在一起而形成的集合,包括了矿物、玻璃、纳米金属铁等非常细小的颗粒^[19]。虽然最近有学者通过微波加热技术和磁控溅射技术对这方面的模拟进行了一些初步探索^[21],但总体来看,目前对月壤胶结的模拟仍然较少,亟待进一步加强研究。

5 模拟月壤

真实月壤标本极其稀少,美国拥有381.7 kg,前

苏联也只有0.321 kg,我国仅有1 g^[1]。因此,目前主要采用模拟材料进行替代。所谓模拟月壤是有着与真实月壤相似的矿物组成、化学成分与工程力学性质的人工材料^[13],也是国内外目前进行月球资源开发利用和月球科学研究的主要实验材料。例如,月球车等探月工具的开发研制均需要在模拟月壤铺设的月面实验场进行反复模拟试验,以优化设计性能参数。可见,模拟月壤研究意义重大。

模拟月壤研究主要包括人工材料的研制与相关工程力学性质实验。笔者对目前应用较广的几种模拟材料进行了分类。一是根据月壤中钛元素含量,可分为低钛玄武岩质月壤(如JSC-1)与高钛玄武岩质月壤(如MLS),由于这两种都属于玄武岩质月壤,故可简化为低钛月壤与高钛月壤^[22];因为登陆器的着陆点一般都选择月海地区^[23],故模拟月壤一般都采用月海月壤为模拟对象(如JSC-1,MLS);而斜长岩大多分布于月球高地等不适合登陆器着陆地区,故斜长岩质月壤模拟材料相对较少。二是根据登陆位置采集样品的不同,可分为Apollo 11号模拟月壤样本^[24](如MLS-1)与Apollo 14号月壤样本^[16](如MLS-2)。根据上述分类,归纳了目前工程界常用的几种模拟月壤,见表3。

表3 主要模拟月壤分类^[14,22]

Tab.3 Main lunar regolith simulation classification^[14,22]

模拟月壤类型	来源	所属国家
低钛月壤(JSC-1)	A11	美国
高钛月壤(MLS-1)	A11	美国
高钛月壤(MLS-2)	A14	美国
低钛月壤(MKS-1)	A11	日本
高钛月壤(FJS-1)	A14	日本
高钛月壤(CAS-1)	A14	中国

注: A11指的是Apollo11号带回的月壤标本; A14指的是Apollo14号带回的月壤标本。

JSC是最早研制且能大规模生产的模拟月壤,是目前应用最广的模拟月壤之一。Alshibli^[24]等通过三轴试验,得到了JSC的弹性模量 E 在不同围压 G 下的取值,见表4。

表4 弹性参数的取值^[24]

Tab.4 The values of elastic parameters^[24]

E/MPa	G/MPa	泊松比
10.3	3.5	0.47
27.6	9.5	0.45
42.1	14.8	0.42
76.6	26.6	0.43
80.8	27.9	0.43

注:样品密度为 $1.88 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,相对密度为75%。

Arslan^[25]等在前人的基础上进行了更深入的研

究,发现 JSC-1 的抗剪强度 τ 随密度的增加而变大. 在密度为 $1.6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, $\tau=0.78 \text{ kPa}$; 而当密度增大到 $1.7, 1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时, τ 的取值分为 $0.96, 1.38 \text{ kPa}$. 其次,在抗剪强度试验中,试样的高度影响了加载的围压与加载路径. 因此抗剪强度不仅与密度有关,还与试样的高度有关,几乎成线性关系. 通过这个试验,Arslan 等认为 JSC-1 具有剪胀性能且有着较高的摩擦性与刚度.

环境因素指月球所独有并且影响其工程性质的环境特征,例如弱重力、低围压等. 由于科技的限制,在早期月壤研究中并不能对这些因素进行探索;随着技术的发展,对环境因素的研究进入新的阶段. 邹猛等^[26]通过对研制的模拟月壤进行三轴试验,在地面重力环境($1g$)下,得到了内摩擦角 ϕ 与内聚力 c 的取值,其中内摩擦角 ϕ 为 35.6° ,内聚力 c 为 2.15 kPa . 而真实月壤的内摩擦角 ϕ 在 $25^\circ \sim 40^\circ$ 之间,内聚力 c 在 $0.26 \sim 1.8 \text{ kPa}$ 之间. 参考文献^[27]对 FJS-1 模拟月壤的研究表明弱重力对月壤承载力具有较大影响;Perkins 等^[28]也对一些模拟月壤进行了相关的弱重力特性研究;Hofmeister 等^[29]利用落塔装置,获得了不同重力水平下的颗粒休止角变化特点. 对弱重力状态下模拟月壤的力学特性的研究都表明重力场变化对月壤性质影响较大.

由于在空间弱重力环境中,月壤处于低有效围压状态,而月壤颗粒间的有效应力与重力环境产生的自重应力密切相关,使月壤的强度、剪胀性、刚度、变形特征及剪切形态有所改变. 已有的一些低围压砂土三轴试验表明:砂土颗粒材料在较低有效围压状态下对荷载的响应与在较高应力条件下的响应有极大的不同^[30];在较低的有效围压作用下,颗粒试样的偏应力峰值、内摩擦角等也与一般有效围压状态下的结果存在显著差异^[31-32]. 对低有效围压状态下的模拟月壤的力学特性的研究,正逐渐成为弱重力环境下材料特性的研究热点.

相对美国、日本等世界上较早开展模拟月壤研究的国家,我国在这方面起步较晚,特别是在模拟月壤动力学特性方面. 虽然近年来国内学者也取得了一定的成果^[34],但还面临不少困难.

6 结语

综上所述,目前对于月壤的研究,取得了一些成果,并对月壤的一些环境因素进行了探索. 但这些研究大多基于传统土力学理论,仅针对某单一特征,缺

乏宏观上的理论分析,还不能完全解释月壤工程地质特性.

当前月球探测的主要目的是建立月球空间站,开发月球资源,并将月球作为外太空探测的补给基地,而这些目标的顺利实施,将在很大程度上依赖于月壤工程地质特性的研究成果. 笔者认为今后研究应注意以下几点:

(1) 模拟月壤的研制. 作为月壤的模拟物,不仅应从化学性质方面进行模拟,也应该从工程性质方面进行相对完全的模拟.

(2) 注重环境因素的影响. 月壤实验的环境因素(如弱重力)对月壤性质非常重要,而对于环境因素的研究目前仍然比较欠缺,这也是月壤研究取得突破的一个瓶颈.

(3) 应当重视月壤化学成分的研究. 月壤的研究不能仅局限于月壤的物理性质方面,月壤元素的化学成分对月壤性质也有影响. 国外对于月球空间物理的探测已经进行了不少研究,譬如对月壤元素分布图的测定,国内在这一方面比较欠缺.

(4) 进一步深入对月壤动力性质的探索. 缺乏动力性质的研究将会影响月球着陆探测计划的顺利进行.

参考文献:

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京:中国宇航出版社, 2005. OUYANG Ziyuan. Introduction of lunar sciences[M]. Beijing: China Aerospace Publishing House, 2005.
- [2] 贺小兵,周少奇. 模拟月壤研制及其性质初探[J]. 应用化工, 2010, 39(8):1218. HE Xiaobing, ZHOU Shaoqi. Research on preparation and property of lunar regolith stimulant[J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(8): 1218.
- [3] 王世杰,李雄耀,唐红,等. 月面环境与月壤特性研究的主要问题探讨[J]. 地球化学, 2010, 39(1):73. WANG Shijie, LI Xiongyao, TANG Hong, et al. Lunar surface environment and properties of lunar soil: a review [J]. Geochimica, 2010, 39(1):73.
- [4] 肖龙,曾佐勋. 月球科学的过去、现在和未来——参加第39届月球与行星科学大会有感[J]. 地质科技情报, 2008, 27(5): 107. XIAO Long, ZENG Zuoxun. Impressions from the 39th Lunar and Planetary Science Conference[J]. Geological Science and Technology Information, 2008, 27(5): 107.
- [5] Massironi M, Giacomini L, Ferrari S, et al. Benefits of the proposed magia mission for lunar geology[J]. Earth Moon Planets, 2010, 107(2):267.
- [6] Shkuratov Y G, Bondarenko N V. Regolith layer thickness mapping of the moon by radar and optical data[J]. Icarus 2001, 149(2):329.

- [7] 胡中为,徐伟彪. 行星科学[M]. 北京:科学出版社,2008.
HU Zhongwei, XU Weibiao. Planetary science[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [8] 中国科学院贵阳地球化学研究所. 月质学研究进展[M]. 北京: 科学出版社,1977.
Guiyang Institute of Geochemistry of Chinese Academy of Sciences. Study progress on quality[M]. Beijing: Science Press, 1977.
- [9] Ray C S, Reis S T, Sen S, et al. JSC-1A lunar soil simulant: characterization, glass formation, and selected glass properties [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2010, 356:2369.
- [10] McKay D S, Heiken G, Basu A, et al. The evolution of the lunar regolith [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1991, 5(1): 449.
- [11] 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.
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.
- [12] 郑永春,王世杰,刘建忠,等. 模拟月壤研制初步设想[J]. 空间科学学报, 2005, 25(1): 70.
ZHENG Yongchun, WANG Shijie, LIU Jianzhong, et al. A review and prospect for developing of lunar soil simulants[J]. Chinese Journal of Space Science, 2005, 25(1):70.
- [13] 邹永廖,欧阳自远,徐琳,等. 月球表面的环境特征[J]. 第四纪研究, 2002, 22(6):533.
ZOU Yongliao, OUYANG Ziyuan, XU Lin, et al. Lunar surface environmental characteristics[J]. Quaternary Sciences, 2002, 22(6):533.
- [14] Arslan H, Batiste S, Sture S. Engineering properties of lunar soil simulant JSC-1A [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2010, 23(1):70.
- [15] Gromov V. Physical and mechanical properties of lunar and planetary soils[J]. Earth, Moon and Planets, 1999, 80:51.
- [16] Gustafson R J, Gustafson M A, French R A, et al. Simulants for testing and verifying exploration surface activity[C]//AIAA Space 2006 Conference. Jose: AIAA, 2006:2887-2894.
- [17] Perkins S W. Modeling of regolith structure interaction in extraterrestrial constructed facilities[D]. Boulder: University of Colorado, 1991.
- [18] Chang C S, Hicher P Y. Model for granular materials with surface energy forces[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2009, 22(1): 43.
- [19] Gustafson R J, White B C, Gustafson M A. Development of a high fidelity lunar soil simulant[J]. Space Technology and Applications International Forum, 2008, 6: 213.
- [20] 郑敏,蒋明镜,申志福. 简化接触模型的月壤离散元数值分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1):766.
ZHENG Min, JIANG Mingjing, SHEN Zhifu. Discrete element numerical analysis of lunar soil with a simplified contact model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Supplement 1):766.
- [21] 唐红,李雄耀,王世杰,等. 月壤中纳米金属铁的太空风化成因及模拟方法分析[J]. 地球科学进展, 2011, 26(5):507.
TANG Hong, LI Xiongyao, WANG Shijie, et al. The origin and simulation of nanophase iron in lunar soil [J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(5):507.
- [22] 刘春茹,王世杰,冯俊明,等. 我国低钛月海型模拟月壤初始物质选择的地球化学依据[J]. 矿物岩石, 2007, 27(3): 28.
LIU Chunru, WANG Shijie, FENG Junming, et al. The geochemistry evidence for selecting the suitable raw material in china to simulate the low titanium lunar soil from luna-sea basalt[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2007, 27(3): 28.
- [23] Willman B M, Boles W W, McKay D S, et al. Properties of lunar soil simulant JSC-1 [J]. Journal of Aerospace Engineering, 1995, 8:77.
- [24] Alshibli K A, Hasan A. Strength properties of JSC-1A lunar regolith simulant [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(5):673.
- [25] Arslan H, Sture S, Batiste S. Experimental simulation of tensile behavior of lunar soil simulant JSC-1 [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 478(1/2): 201.
- [26] 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.
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.
- [27] Bui H H, Kobayashi T, Fukagawa R, et al. Numerical and experimental studies of gravity effect on the mechanism of lunar excavations [J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46 (3):115.
- [28] 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.
- [29] Hofmeister P G, Blum J, Heigelmann D. The flow of granular matter under reduced-gravity conditions [J]. Earth and Planetary Astrophysics, 2009, 1145: 71.
- [30] Macari-Pasqualino E J, Runesson K, Sture S. Response prediction of granular materials at low effective stresses[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(7): 1252.
- [31] Gallage C P K, Towhata I, Nishimura S. Laboratory investigation on rate-dependent properties of sand undergoing low confining effective stress [J]. Soils and Foundations, 2005, 45(4):43.
- [32] 章伟,林霖,冯秀丽,等. 饱和粉土在低围压下剪切特性的试验研究[J]. 海洋科学, 2006, 30(8):94.
ZHANG Wei, LIN Lin, FENG Xiuli, et al. Laboratory investigation on shear properties of silt under low confining pressure [J]. Marine Science, 2006, 30(8):94.
- [33] 蒋明镜,李立青,刘芳,等. 基坑开挖过程中 TJ-1 模拟月壤变形特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7):1176.
JIANG Mingjing, LI Liqing, LIU Fang, et al. Deformation behaviors of TJ-1 lunar soil simulant during excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1176.