

文章编号: 1000-7598 (2013) 04-1058-05

软着陆足垫与模拟月壤界面特性研究

钟世英^{1,2}, 黄根清¹, 戚顺超¹, 凌道盛¹, 杨建中³

(1. 浙江大学 软弱土与环境土工教育部重点实验室, 杭州 310058; 2. 深圳市工勘岩土工程有限公司, 广东 深圳 518026;
3. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘 要: 软着陆机构与模拟月壤滑移性能是影响月球探测器月面软着陆稳定性的重要因素。针对缓冲机构所用足垫材料-硬铝, 通过直剪仪开展界面直剪试验, 研究不同法向应力和剪切速率下不同相对密度模拟月壤和光滑铝板间的接触面变形、强度特性。试验结果表明, 稍密时接触面无明显剪应力峰值, 近理想弹塑性变形; 密实条件下接触面破坏时呈现应变软化现象; 法向压力增加接触面强度增加, 接触面强度随剪切速率增加而降低, 接触面摩擦角取 $26.8^{\circ} \sim 31.4^{\circ}$ 之间。

关 键 词: 摩擦系数; 足垫; 滑移特性; 摩擦角; 剪切速率; 相对密度

中图分类号: V 476

文献标识码: A

Interface property between soft landing foot pad and simulant lunar soil

ZHONG Shi-ying^{1,2}, HUANG Gen-qing¹, QI Shun-chao¹, LING Dao-sheng¹, YANG Jian-zhong³

(1. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Shenzhen Expressway Engineering Consultants Company Limited, Shenzhen, Guangdong 518034, China
3. Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: Slip behavior between soft landing mechanisms and simulant lunar soil is one of the most important factors, which influence the stability of lunar explorer landing. Duralumin was the material of cushioning mechanism foot pad. A series of simulant lunar soil - aluminum plate shear tests are performed by direct shear apparatus. The shear deformation and strength of interface between simulant lunar soil-smooth aluminum plate under different relative densities, different shear velocities and different normal stresses are studied. Interface under slightly dense soil presents ideal elastoplastic deformation, accompanied with strain-softening. The interface strength increases with the normal stress increase accompanied with shear velocity; interface friction angle is $26.8^{\circ} - 31.4^{\circ}$.

Key words: friction coefficient; foot pad; slip behavior; friction angle; shear velocity; relative density

1 引 言

月球探测器安全平稳着陆月面, 是月面软着陆成功的标志。软着陆机构在月壤中的滑移特性是影响着陆稳定性、保证探测器不翻滚的重要因素之一^[1]。在月球弱重力环境下, 着陆冲击过程中着陆腿刺入月壤深度有限, 足垫处月壤自重压力较小, 不同接触速率下足垫与模拟月壤间的接触面特性是着陆速度选取的重要参考因素之一。

接触面特性主要是指土与结构接触界面的强度特性、变形分布规律和破坏机制等方面的力学特性。试验是接触面力学特性研究的主要途径, 倍受

国内外学者重视。Clough 等^[2]针对砂与混凝土进行直剪试验结果表明, 其剪应力-剪切位移关系曲线符合双曲线形式。殷宗泽等^[3]采用直剪试验研究土与混凝土接触面剪切变形特性, 建议采用刚-塑性变形模型。张嘎等^[4]采用大型土与结构接触面循环加载剪切仪, 研究了钢板不同粗糙度对粗粒土与钢板接触界面特性的影响。吴梦喜^[5]采用单调与循环剪切试验研究钙质砂与光滑钢板接触面, 基本满足摩擦接触关系。袁运涛等^[6]通过界面静动单剪试验, 研究了不同法向应力、不同剪切应力幅值对淤泥质黏土与钢板接触面的影响。龚辉等^[7]采用大型直剪仪, 研究了应力历史对黏土-混凝土界面剪胀规律的

收稿日期: 2012-02-08

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No. 51278451); 浙江省自然科学基金资助 (No. LZ12E09001)。

第一作者简介: 钟世英, 女, 1982 年生, 博士, 工程师, 从事土动力学方面的研究工作。E-mail: syzhong@zju.edu.cn

通讯作者: 凌道盛, 男, 1968 年生, 教授, 博士生导师, 从事土动力学、基础工程和地基处理方面的教学和科研工作。E-mail: dsling@zju.edu.cn

影响。朱俊高等^[8]通过对土-混凝土接触面的研究,认为单剪比环剪试验得到抗剪强度低 30%~40%,单剪试验更适用于较低应力水平情况。直剪试验也被用于土与土工织物接触面摩擦特性的研究^[9-11]。研究表明,不同的接触面类型其剪切变形机制和力学特性不同,模拟月壤与结构物接触面的试验研究国内外未见报道。

足垫材料与模拟月壤间的接触问题影响到软着陆机构与月壤的相互作用,是关系软着陆安全的一个重要研究课题。为研究模拟月壤与足垫材料接触面界面特性,本文采用直剪仪进行了系统的模拟月壤与足垫材料的接触面力学特性试验,分析了接触面力学特性的基本规律及其影响因素。

2 试验材料

模拟月壤由文献[12]提供的颗粒级配(见图1)和其组分材料配制而成,中值粒径 d_{50} 为 300 μm 。模拟月壤的最小和最大干密度分别为 1.02 g/cm^3 和 1.64 g/cm^3 ,颗粒相对密度为 2.7,孔隙比为 0.65~1.65,含水率为 0.12%。

图2为本文配制的模拟月壤照片,模拟月壤颗粒属多棱角、多孔结构。

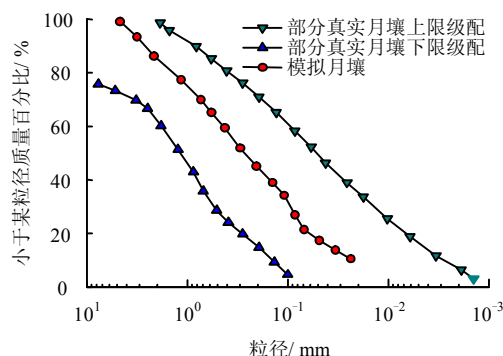


图1 颗粒分布曲线

Fig.1 Grain size distribution

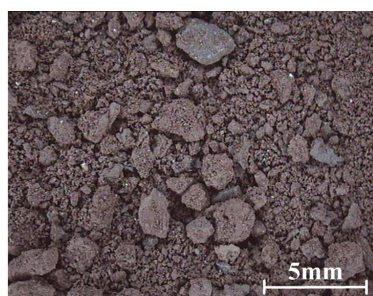


图2 模拟月壤

Fig.2 Simulant lunar soil

比图。比较发现,两种颗粒存在较大的不同,砂土颗粒较圆滑,模拟月壤颗粒内部具有孔洞,表面更粗糙、多凸起,且多棱角、勾角、锯齿等结构。因此,多锯齿结构的模拟月壤具有很强的啮合作用^[13]。



图3 相同粒径下砂土与模拟月壤颗粒对比图

Fig.3 Grain size distribution

足垫材料选取航空常用硬铝材料的光滑铝板,以下简称铝板。Morimichi 等^[14]进行的干砂与钢板接触面试验表明,钢板存在临界粗糙度。当钢板粗糙度小于临界粗糙度时可以认为钢板表面光滑。设定取样长度为 $L = d_{50} = 300 \mu\text{m}$,铝板的粗糙度 R :

$$R = R_{\max} / d_{50} \quad (1)$$

式中: $R_{\max}$ 为取样长度内的最大峰谷距。试验用铝板的 $R_{\max} = 10 \mu\text{m}$,其粗糙度 $R = 0.03$,远小于文献[14-15]给出的砂与结构物接触面的临界粗糙度 $R_{\text{cr}} = 0.1$,笔者认为模拟月壤与铝板接触面为光滑接触面。

3 试验内容

干砂与光滑钢板接触时,接触面附近无砂粒滚动。剪切过程中法向位移为0。颗粒沿剪切方向相对位移发生在很小的范围内,接触面几乎无厚度,可以近似认为,剪切错动位移只发生在接触面上^[14-15]。故可以采用结构简单、操作方便的直剪仪测试干砂与光滑结构物接触面的接触面特性。

表层月壤的相对密度随深度急剧增加,着陆过程中随着足垫刺入月壤的深度不同,足垫与不同相对密度月壤作用。为研究模拟月壤密实状态对足垫与模拟月壤接触面的接触面特性的影响,本文进行了3种相对密度模拟月壤与铝板接触面单剪试验,即稍密(0.4)、中密(0.6)和密实(0.8)3种密实度。

为了研究不同剪切速率对模拟月壤与铝板接触面的接触特性的影响,本次进行了0.2、1.0、2.0 mm/min 三种剪切速率的接触面试验。各种情况下都进行了三种法向压力为12.5、25、50 kPa 剪切试验。

图3为模拟月壤颗粒与相同粒径的河沙颗粒对

本次选用直剪仪测定模拟月壤与铝板接触面的界面特性。直剪试验试样直径为 61.8 mm, 高 20 mm。下剪切盒采用铝板代替, 模拟月壤与铝板接触面剪切试验前, 预先找平, 控制接触面水平。上剪切盒采用分层称量制样法, 分 4 层每层土样根据配比分别称取各种粒径模拟月壤质量, 混合均匀, 以保证试样的均匀性。大剪切速率下采用摄像机拍摄测力计量表的读数, 保证计量结果的取样个数足够。

4 试验结果与分析

4.1 接触面变形特性

对 3 种相对密度模拟月壤与铝板接触面, 分别在 3 种剪切速率、3 种法向压力下进行了 27 组接触面直剪试验。图 4 为不同相对密度、不同剪切速率、不同法向应力下模拟月壤与铝板接触面直剪试验的剪应力-剪位移关系曲线。

分析发现, 稍密时模拟月壤与足垫材料接触面无明显剪应力峰值呈理想弹塑性。密实条件下接触面呈现软化现象, 但软化不强烈。这可能由于模拟月壤颗粒存在锯齿结构, 越密实则大颗粒间的接触越紧密, 颗粒间的啮合作用越强。同时, 由于模拟月壤与足垫材料属光滑接触, 接触面厚度有限则剪切过程中发生相对变形的颗粒有限, 故密实条件下接触面虽呈现一定的应变软化特性, 但经过很小的剪切位移 (< 0.5 mm) 曲线迅速进入残余段, 峰值剪应力与残余剪应力相差不大。

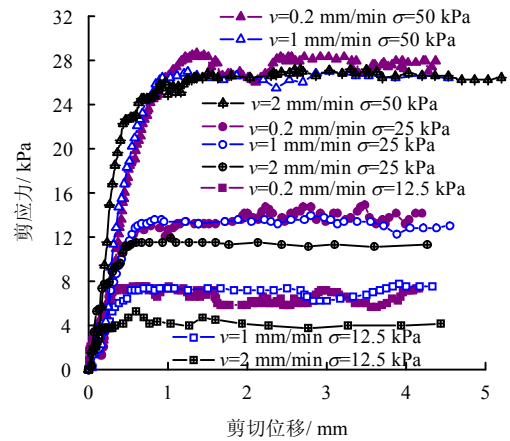
通过比较发现, 随法向应力增加接触面软化特性增强。中密模拟月壤与铝板接触时 50 kPa 法向应力下, 接触面呈现软化特性; 12.5 kPa 时几乎不呈现软化特性。

剪切速率对接触面软化影响不明显。比较密实状态下 $\bar{\tau}$ - $\bar{s}$ 曲线表明, 剪切速率越大, 接触面峰值到残余段对应的剪切位移越短。

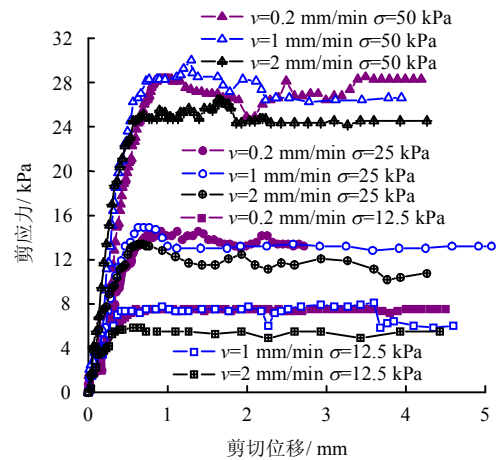
4.2 接触面强度

表 1 为各种情况下接触面的抗剪强度。分析发现, 相同剪切速率、法向应力下相对密度增加, 接触面峰值强度略有增加, 残余强度略有减少, 但变化幅值不大。接触面峰值强度各种情况下相差最大为 2.1 kPa, 残余强度最大相差 5.8 kPa。在密实状态下, 各种接触面的残余强度能达到接触面峰值强度的 80% 左右。

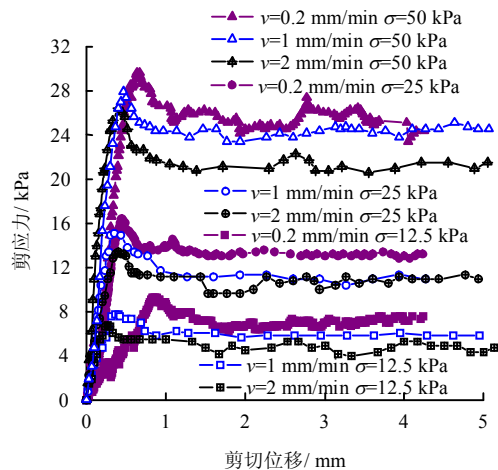
法向应力增加可明显提高接触面强度, 由 12.5 kPa 到 25 kPa 再到 50 kPa 法向应力成比例增加, 接触面峰值强度和残余强度亦成比例增加。



(a) 相对密度为 0.4



(b) 相对密度为 0.6



(c) 相对密度为 0.8

图 4 不同相对密度下各接触面 $\bar{\tau}$ - $\bar{s}$ 曲线

Fig.3 $\bar{\tau}$ - $\bar{s}$ curves of different relative density interfaces

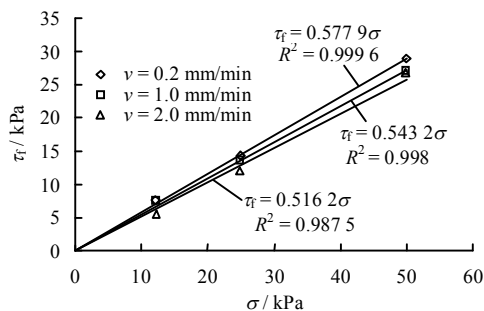
随剪切速率增加, 接触面强度呈降低趋势。这可能是由于光滑接触面的颗粒运动以切向滑移为主, 故剪切速率对接触面的强度影响不大。但剪切速率越快, 颗粒变位接触发挥越不充分, 由颗粒变位引起的接触面强度偏低, 故接触面强度随剪切速率增加略有降低。

表1 各接触界面抗剪强度
Table 1 Shear strengths of interfaces

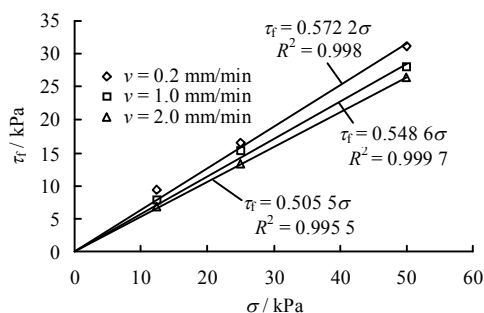
相对密度	剪切速率 / (mm/min)	法向压力 / kPa					
		峰值强度			残余强度		
		12.5	25.0	50.0	12.5	25.0	50.0
0.4	0.2	7.5	14.3	28.9	7.2	13.8	27.9
	1.0	7.4	13.6	27.0	7.2	13.4	26.6
	2.0	5.3	11.9	26.6	4.2	11.9	26.4
0.6	0.2	7.6	14.7	28.3	7.5	13.4	27.0
	1.0	7.3	14.9	28.1	7.2	13.0	26.4
	2.0	5.9	13.4	25.0	5.5	11.7	24.3
0.8	0.2	9.2	16.4	29.6	7.2	13.2	24.9
	1.0	7.7	15.1	27.9	5.9	11.2	23.8
	2.0	6.8	13.4	26.4	5.3	10.7	21.1

4.3 接触面强度指标

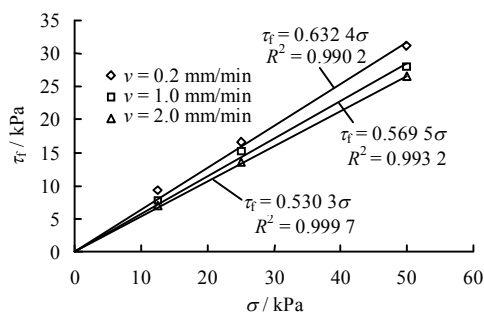
图5为各相对密度下模拟月壤与足垫材料接触面的峰值抗剪强度与法向应力的关系及线性拟合结果。



(a) 相对密度为 0.4



(b) 相对密度为 0.6



(c) 相对密度为 0.8

图5 各相对密度下峰值抗剪强度与法向应力关系

Fig.5 Relationships between shear strength and different relative density interfaces

研究结果表明,在本次试验的法向应力范围内,接触面峰值强度与法向应力呈现较好的线性关系。因此,接触面抗剪强度可采用 Mohr-Coulomb 准则中的摩擦角描述,接触面黏聚力为 0。

模拟月壤与足垫材料接触面峰值摩擦系数随剪切速率增加而略有减小。相对密度为 0.4 时,接触面峰值摩擦系数在 0.52~0.58 之间;相对密度为 0.6 时,接触面峰值摩擦系数在 0.51~0.57 之间;相对密度为 0.8 时,接触面峰值摩擦系数在 0.53~0.63 之间。

表2为各接触面的摩擦角。一般来说,随着模拟月壤密度增加,接触面峰值摩擦角略有增大,同一剪切速率下3种相对密度接触面摩擦系数最大相差 0.04。接触面残余摩擦角随着相对密度增大稍有减小,剪切速率 0.2 mm/min 时接触面摩擦角相差 2.2°。接触面的峰值摩擦角和残余摩擦角皆随剪切速率增加而减小,峰值摩擦角随着剪切速率增加降低 2.7°~3.5°,残余摩擦角降低 2.7°~3.5°。

表2 各接触界面摩擦角
Table 2 Frictional angle indexes of interfaces

相对密度	剪切速率 / (mm/min)					
	峰值摩擦角 / (°)			残余摩擦角 / (°)		
	0.2	1.0	2.0	0.2	1.0	2.0
0.4	30.0	28.5	27.3	29.1	28.1	27.0
0.6	29.8	29.7	26.8	28.5	27.9	25.7
0.8	31.4	29.7	27.9	26.9	25.2	22.9

5 结 论

(1) 中密和稍密条件下模拟月壤与足垫材料接触面呈理想弹塑性,密实条件下接触面具有软化特性,但软化程度不大。

(2) 随模拟月壤密度增加接触面峰值摩擦角略有增大,残余摩擦角略有减少。

(3) 随着剪切速率增加,接触面强度和摩擦系数呈下降趋势,但剪切速率对接触面变形特性影响不明显。

参 考 文 献

- [1] 曾福明, 杨建中, 朱汪, 等. 月球着陆器着陆缓冲性能研究[J]. 航天器工程, 2010, 19(5): 43—49.
ZENG Fu-ming, YANG Jian-zhong, ZHU Wang. Research on landing impact attenuation performance of lunar lander[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(5): 43—49.
- [2] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis

- of retaining wall behavior[J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, 1971, 97(12): 1657—1672.
- [3] 殷宗泽, 朱泓, 许国华. 土与结构材料接触面的变形及其数学模拟[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(3): 14—22.
YIN Zong-ze, ZHU Hong, XU Guo-hua. Numerical simulation of the deformation in the interface between soil and structural material[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(3): 14—22.
- [4] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 21—25.
ZHANG Ga, ZHANG Jian-ming. Experimental study on monotonic behavior of interface between soil and structure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 24(3): 369—371.
- [5] 吴梦喜, 楼志刚. 钙质砂与钢板接触面力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 369—371.
WU Meng-xi, LOU Zhi-gang. Experimental study on mechanical behavior of calcareous sand-steel interfaces[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 369—371.
- [6] 袁运涛, 施建勇. 土与结构界面位移特性静动力单剪试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1707—1712.
YUAN Yun-tao, SHI Jian-yong. Study of displacement behavior of interface between soil and structure by static and dynamic simple shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(6): 1707—1712.
- [7] 龚辉, 赵春风, 陶帼雄, 等. 应力历史对黏土-混凝土界面剪切特性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1712—1719.
GONG Hui, ZHAO Chun-feng, TAO Guo-xiong. Research on effect of stress history on shear behavior of interface behavior clay and concrete[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(8): 1712—1719.
- [8] 朱俊高, SHAKIR R R, 杨有莲, 等. 土-混凝土接触面特性环剪单剪试验比较研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 692—696.
ZHU Jun-gao, SHAKIR R R, YANG You-lian, et al. Comparison of behaviors of soil-concrete interface from ring-shear and simple shear tests[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(3): 692—696.
- [9] ANUBHAV P K. Modeling of soil-woven geotextile interface behavior from direct shear test results[J]. **Geotextiles and Geomembranes**, 2010, 28: 403—408.
- [10] 刘文白, 周健. 土工格栅与界面作用特性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 965—970.
LIU Wen-bai, ZHOU Jian. Experimental research on interface friction of geogrids and soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(4): 965—970.
- [11] 高俊丽, 张孟喜, 张文杰. 加肋土工膜与砂土界面特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3225—3230.
GAO Jun-li, ZHANG Meng-xi, ZHANG Wen-jie. Interface property between sand and reinforced geomembrane[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3225—3230.
- [12] 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 Ming-jing, LI Li-qing. Development of TJ-1 lunar soil simulant[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(2): 209—214.
- [13] 孔亮, 彭仁. 颗粒形状对砂类土力学性质影响的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2112—2119.
KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particles shape on mechanical properties of quasi-sands[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(10): 2112—2119.
- [14] MORIMICHI U, HIDEAKI K, YASUNORI T. Behavior of sand particles in sand-steel friction[J]. **Soils and Foundations**, 1988, 28(1): 107—118.
- [15] 胡黎明, 濮家骊. 土与结构物接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431—435.
LIU Wen-bai, ZHOU Jian. Experimental research on interface friction of geogrids and soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(4): 431—435.