

DOI: 10.11779/CJGE202010002

TJ-M1 模拟火壤承载特性的研究

蒋明镜^{1, 2}, 吕 雷^{1, 2}, 李立青^{1, 2}, 黄 伟³

(1. 天津大学建筑工程学院土木系, 天津 300072; 2. 天津大学水利工程仿真与安全国家重点试验室, 天津 300072; 3. 北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘 要: 火星土壤(火壤)的研究是火星表面探测活动迈出的第一步,也是火星表面探测活动的主要研究对象之一。模拟火壤的平板荷载试验可用于了解真实火壤的工程性质,为火星探测器的安全着陆提供参考。采用自行研制的 TJ-M1 模拟火壤作为试验基材,通过静力触探和静载荷原位试验的分析对比,结合已有的静力触探与静载荷试验的经验公式,研究探讨适合火壤静承载力的经验公式。首先,搭建尺寸为 6 m×6 m×1.25 m(长×宽×高)着陆试验床,分 5 层铺设至设计标高,而后在其表面对称布置 8 个静力触探试验测点和 2 个静载荷试验测点进行测试,最后基于太沙基提出的承载力修正公式及已有的 11 种适用于中密实砂土的经验公式对模拟火壤承载特性的预测进行研究探讨。结果表明:太沙基提出的修正地基承载力公式的计算结果明显偏小,而经验公式([R]=80P_s+31.8)可近似计算 TJ-M1 模拟火壤的地基承载力。

关键词: 火星土壤; TJ-M1 模拟火壤; 静力触探; 地基承载力; 着陆试验床

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)10-1783-07

作者简介: 蒋明镜(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事天然结构性黏土、砂土、非饱和土、太空土和深海能源土宏微观试验、本构模型和数值分析研究。E-mail: mingjing.jiang@tju.edu.cn。

Bearing properties of TJ-M1 Mars soil simulant

JIANG Ming-jing^{1, 2}, LÜ Lei^{1, 2}, LI Li-qing^{1, 2}, HUANG Wei³

(1. Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Beijing Institute of Space Mechanics & Electronics, Beijing 100076, China)

Abstract: The mechanical and engineering behaviors of Mars soils play an important role in Mars exploration, which is one of the main objects in Mars exploration. The plate loading tests (PLT) on Mars soil simulants can be used to investigate the engineering properties of real Mars soils, which can serve for the safe loading of Mars probe. For this aim, the TJ-M1 Mars soil simulant is developed, on which a series of cone penetration tests (CPT) and plate loading tests are carried out. The experimental data are further analyzed with the existing empirical formula which relate the data of cone penetration tests and plate loading tests on sands in order to choose a suitable empirical formulas for Mars soils. Firstly, a 6 m×6 m×1.25 m (length × width × height) testbed is constructed, and paved in five layers. Then 8 cone penetration tests and 2 plate load tests are performed symmetrically on this testbed. Finally, the bearing capacity data are compared with those predicted by the Terzaghi classical correction formula and 11 empirical formulas relating CPT and PLT results for medium-dense sand. The results show that the bearing capacity from the Terzaghi classical correction formula is obviously smaller than the experimental value, while the empirical formula ([R]=80P_s+31.8) can be used to predict the bearing capacity of Mars soils from CPT data approximately.

Key words: Mars soil; TJ-M1 Mars soil simulant; cone penetration test; bearing capacity; landing testbed

0 引 言

中国计划于 2020 年发射“火星一号”探测器进行火星探测活动,此次探测活动是中国真正意义上的行星探测,火星引力仅有地球的 38%,空气密度仅有地球的 1%,且地形地貌特殊,北半球是被熔岩填平的低原,南半球则是充满陨石坑的古老高地,南北半球之间以明显的斜坡分隔,火山地形穿插其中^[1],着陆难度

不言而喻。火星探测器于火星表面安全着陆是中国火星探测计划中的一个最重要的研究内容,它直接影响着火星探测的成败及后续科研工作能否顺利的开展。火星探测器的安全着陆研究须以火星土壤(简称火壤)的物理力学特性为基础,其中火壤的承载力特性是火

基金项目:国家自然科学基金重大项目(51890911);国家自然科学基金重点项目(51639008)

收稿日期:2019-12-11

星探测器安全着陆研究的重要指标之一，它的确定为中国探火工程有着重要作用。

迄今为止，已知成功登陆或巡视火星的探测器包括4个火星着陆器（“Viking lander 1”“Viking lander 2”^[2]、“Phoenix lander”^[3]、“InSight^[4]”）和4辆火星探测车（“Pathfinder”^[5]、“Spirit”^[6]、“Opportunity”^[7]、“Curiosity”^[8]）。这些探测活动获得了大量的火壤物理力学特性数据，例如火壤类型、密度、黏聚力和内摩擦角等基本物理力学参数，见表1。目前尚没有真实的火星土壤返回地球，因此众多学者基于上述探测器获取的真实火壤物理力学特性，研制出用于地面环境下相关试验的模拟火壤^[9-15]。这些模拟火壤根据不同的研究目的主要分为两类，一类以服务科学研究为目的的模拟火壤，如JSC Mars-1^[9-10]；另一类以服务探测工程应用为研究目的模拟火壤，如国外的MMS（Majave Mars Simulant）^[11]、Salten SKov I^[12]、ES-1、ES-2、ES-3^[13-14]、DLR-A、DLR-B^[14]以及国内的PSI HX-1/2/3/4/5/6^[15]系列模拟火壤，见表2，且部分学者在前人的基础上总结了模拟火壤物理力学特性的取值范围^[16-18]。然而，众多的模拟火壤研究成果主要是针对颗粒密度和剪切特性参数等方面，缺乏对于承载力特性研究，且该特性对于火星探测器能否安全着陆至关重要。此外基于地面环境的承载力计算方法对火壤的适用性同样也缺乏研究。

为此，本文旨在地球上进行模拟火壤静载荷试验，建立模拟火壤地基承载力与比贯入阻力的关系，再通过火壤静力触探试验资料，外推出火星探测活动中真实火壤的地基承载力，为中国火星探测工程服务。本文采用自行研制的与真实火壤力学特性相符的“天津一号”模拟火壤（TJ-M1），搭建模拟火壤着陆试验床；然后进行静载荷试验、静力触探试验^[19-20]，再结合已有的砂土中静载荷试验与静力触探试验两者的经验公式（线性型，指数型和对数型）^[21-33]在模拟火壤的适用性方面进行探讨。

1 试验概况

1.1 试验材料

表1和表2分别总结了火星表面部分原位火壤的测试结果以及典型模拟火壤的力学特性。据此本文结合已研制的“天津一号”（TJ-M1）模拟火壤，进行力学和工程特性研究。其TJ-M1模拟火壤的主要物理力学参数范围如下：密度范围为1.35~1.60 g/cm³，内摩擦角范围为35°~40°，黏聚力范围为0.24~1 kPa。TJ-M1模拟火壤主要物理力学指标如下：含水率小于0.3%，密度为1.38 g/cm³，内摩擦角37.1°，黏聚力0.45 kPa。其主要物理力学性能参数的目标范围见表3，表3

中目标值由中国空间技术研究院根据目前已有的真实火壤物理力学特性研究数据及国内外已有的模拟火壤研究数据，并结合本次探火工程需求所制定的模拟火壤目标参数。

表1 原位火星土壤物理和力学特性

Table 1 Physical and mechanical behaviors of in-situ Mars soils				
探测点	土壤类型	密度 $\rho /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$
Viking ^[2]	细砂	—	0.2~2.3	28~34
	细土	1.6	0.1~1	20~40
Pathfinder ^[5]	砂土	—	0.53	26
Spirit ^[6]	—	—	5.2	33.5
Opportunity ^[7]	—	—	5.13	33.5
Curiosity ^[8]	—	—	0.2~1.2	38

表2 典型模拟火星土壤物理和力学特性

Table 2 Physical and mechanical behaviors of typical Mars soil simulant				
模拟火壤	类型或状态	密度 $\rho /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$
JSC M-1 ^[9]	砂	0.02~0.87	1.91	47
MMS I ^[11]	砂	1.384	0.81	38
MMS II ^[11]	砂	1.341	1.96	39
Salten SKov I ^[12]	—	1.2~1.62	—	—
ES-1 ^[13]	低密度	—	1.33	29.48
	高密度	—	3.9	32.32
ES-2 ^[13]	低密度	—	-0.24	38.16
	高密度	—	-0.82	41.43
ES-3 ^[13]	低密度	—	0.26	35.76
	高密度	—	1.37	34.31
DLR-A ^[14]	—	—	0.18	24.8
DLR-B ^[14]	—	—	0.441	17.8

表3 TJ-M1 模拟火壤物理力学性能参数的目标范围

Table 3 Target ranges of physical and mechanical behaviors of TJ-M1 Mars soil simulant			
物理参数	密度 $\rho /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$
目标值	1.35~1.60	0.24~1	35~40
TJ-M1 模拟火壤	1.38	0.45	37.1
符合度/100%	100	100	100

1.2 试验场地

模拟火星地表区主要由基础场地、排水系统、模拟火石、模拟火坑等设施组成，试验过程中工期紧，任务重，且受篇幅所限，仅对着陆试验床做简要介绍。着陆试验床尺寸为6 m×6 m×1.25 m（长×宽×高），位于基础场地中心位置。着陆试验床边界采用木质模板与木质支撑及刚性支撑相结合的支挡结构，木质及刚性支撑与地面倾角为45°，交替布置。木质模板高1.5 m，采用表面光滑的聚乙烯薄膜覆盖于木质模板的内侧和底部，防止模拟火壤的渗漏及受潮，同时降低侧边的摩擦阻力，减小对试验结果的影响。模拟火壤着陆试验床共分5层填筑，每层25 cm。铺设过程中，

每层干密度控制为 1.38 g/cm^3 。搭设好的着陆试验床如图1所示。

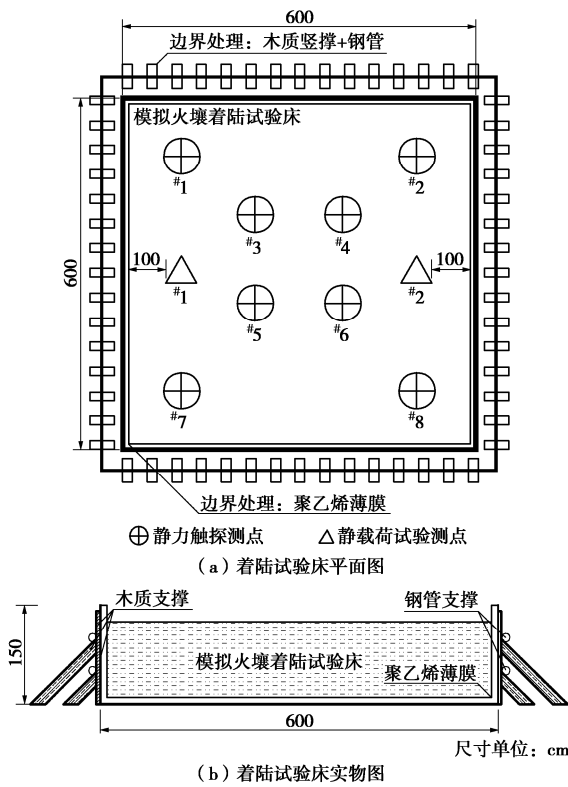


图 1 着陆试验床布置图
Fig. 1 Landing testbed

1.3 试验简介

根据《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2011)^[23]建议, 载荷板试验采用圆形承压板进行。圆形承压板既可以有效避免边角效应又可以按轴对称的弹性理论进行分析。本次静载荷试验采用的圆形载荷板直径为0.3 m, 距场地侧边1 m处分别布置#1、#2测点, 测点布置图如图1所示。根据《岩土工程勘察规范》(GB50021—2009)^[24]规定, 反力装置的支撑点平行于左右两侧板, 且距离载荷板边缘1 m处。采用两个百分表对称放置测量读数, 对载荷板进行逐级加载后, 间隔5, 5, 10, 10, 15, 15 min测读一次, 此后每间隔30 min测读一次沉降, 当连续两小时每小时沉降等级小于0.1 mm时, 可认为沉降达到稳定即可停止加载, 当载荷板周边土体出现明显侧向挤出或隆起时停止试验, 上一级荷载即为极限承载力。现场静载荷试验如图2所示。

本次静力触探试验在着陆试验床区域内均匀布置了8个测点, 着陆床中心区4个测点, 着陆床边角区4个测点, 测点布置图如图1(a)所示。根据Bolton等^[25]拟合的锥尖距底部边界最小安全范围公式得出本次试验应预留的安全范围至少为18 cm, 因此本次试验为进一步减小边界效应的影响, 将预留的厚度提高至25 cm。现场试验采用的单桥探头截面积为 10 cm^2 , 锥角

60° , 有效侧壁长度5.7 cm。试验开始前进行调试设备, 试验过程中保持探杆匀速压入, 通过JM3840静态应变仪采集记录数据。

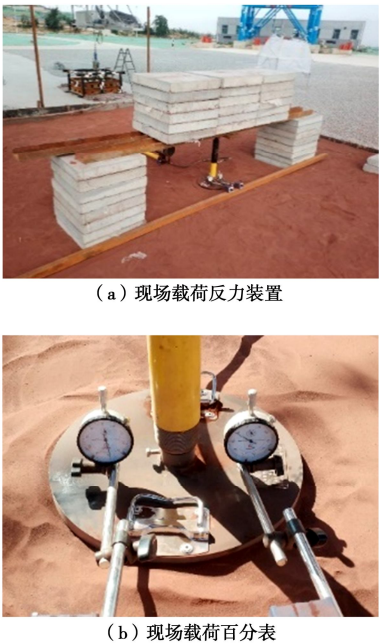


图 2 现场静载荷试验照片
Fig. 2 Photos of plate loading tests

2 试验结果及分析

2.1 静载荷试验结果及分析

图3为两组静载荷试验的 $P-S$ 曲线。可以看出加载过程中 $P-S$ 曲线变化趋势基本相同, 最终测得的地基极限承载力也较为接近, 分别为69.8 kPa和75.3 kPa。为减小试验的误差, 本文采用两次试验的平均值作为模拟火壤地基的极限承载力标准值即72.55 kPa。

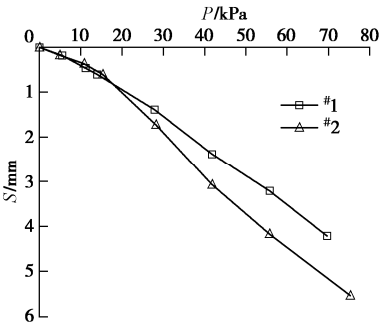


图 3 平板静载荷 $P-S$ 曲线

Fig. 3 $P-S$ curves of TJ-M1 Mars soil simulant obtained from plate loading tests

圆形或方形基础属于三维问题, 至今尚未能推导出极限承载力的分析解。因此, 针对本次试验所用的圆形基础, 采用太沙基半经验极限荷载公式:

$$p_u = 0.6\gamma RN_\gamma + qN_q + 1.2cN_c \quad (1)$$

式中 p_u 为地基极限承载力 (kPa); γ 为模拟火壤重

度; R 为荷载板半径; q 为均布荷载; c 为黏聚力; N_γ , N_q , N_c 为承载力系数, 可通过查表获取。

对于太沙基极限荷载半经验公式只适用于地基土为整体剪切情况, 即土体的密实程度较高且 $P-S$ 曲线有明显拐点^[26]。而本次试验根据模拟火壤参数建设的着陆床为中密实土, 且 $P-S$ 曲线没有明显拐点。对于此情况, 太沙基建议对黏聚力和内摩擦角按下式折减:

$$\tan \bar{\varphi} = 2/3 \tan \varphi, \quad \bar{c} = 2/3 c \quad (2)$$

着陆试验床所制备的 TJ-M1 模拟火壤内摩擦角为 37.1° , 黏聚力为 0.45 kPa , 通过式 (1), (2) 计算得到修正极限承载力为 52.4 kPa 。

综上可知, 针对本次模拟火壤着陆床试验, 通过太沙基修正公式得到的地基极限承载力相对于静载荷试验值明显偏小。仅用太沙基修正公式计算地基极限承载力是与实际值有所出入的, 故而结合静载荷试验值进行适当的修正才能更加准确地确定 TJ-M1 模拟火壤的地基极限承载力, 本次静载荷试验值 72.55 kPa 作为 TJ-M1 模拟火壤的极限承载力值。

2.2 静力触探试验结果及分析

将现场静力触探点 (共 8 个) 沿着着陆床环形方向分为 2 组, 每 4 个测点为 1 组。对 2 组的静力触探试验数据进行处理绘制 P_s-h 曲线, 如图 4, 5 所示。

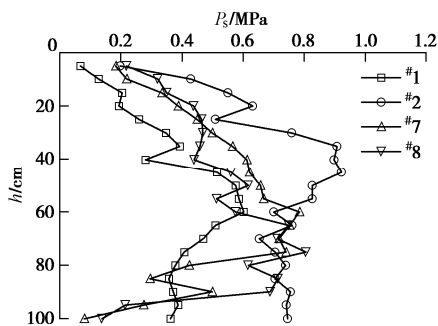


图 4 测点 1#、2#、7#、8# 静力触探试验 P_s-h 曲线

Fig. 4 P_s-h curves of cone penetration tests (points No. 1, 2, 7 and 8)

通过图 4, 图 5 的 P_s-h 曲线分析可以得出以下结论: 8 个测点均出现波峰和波谷, 且比贯入阻力的转折点都出现在 30 cm 和 80 cm 深度附近, 中间部位测点的波动明显大于四周的测点。笔者分析原因在于: 着陆床面积较大, 整体上难以控制均匀程度, 且试验过程中试验人员踩踏, 使得部分土体变得密实, 于着陆床内部形成硬壳层, 从而使得锥尖到达该深度时比贯入阻力突然增大。单独对每组测点进行分析, 不难发现比贯入阻力值虽有些许差别, 但是总体上在深 $30 \sim 80 \text{ cm}$ 处出现比贯入阻力增大的趋势基本一致。通过以上 8 个测点 P_s-h 曲线分析可得出结论: 铺设地基并非绝对均匀, 这一现象在其它原位试验测试中同样时常遇

见。但基于本次已经获取的 TJ-M1 模拟火壤静力触探现场试验结果分析, 可以发现, 就着陆床局部分析而言, 四周测点与中部测点的比贯入阻力随贯入深度的变化规律基本是一致的, 有较好的相关性, 说明铺设的地基是相对均匀的。

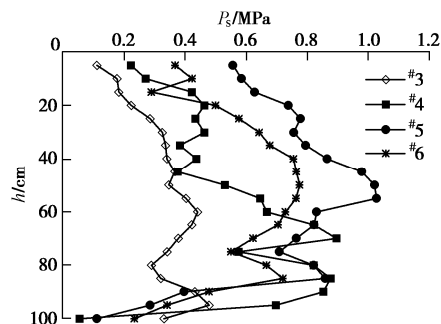


图 5 测点 3#、4#、5#、6# 静力触探试验 P_s-h 曲线

Fig. 5 P_s-h curves of cone penetration tests (points No. 3, 4, 5 and 6)

目前 “Viking lander 1”^[2] 探测器在仅有地球重力 38% 及空气密度仅有地球 1% 的火表环境下测试平坦砂土区的贯入阻力, 但考虑到探测器着陆区火星表面不平整且存在 20% 的倾斜坡度等因素, 使测得的贯入阻力值受到降低的影响。相比之下, 地表环境下的模拟火壤无倾角着陆区测得的贯入阻力稍大于火表测得的贯入阻力值。

3 承载力与比贯入阻力的关系

地面环境下众多学者通过大量的原位试验已建立了较精确的砂土承载力与比贯入阻力的经验公式且相对完善, 但对于模拟火壤的原位试验数据较少, 提出一个较精确的经验公式相对困难。而 TJ-M1 模拟火壤可归为砂土类别。因此, 基于 TJ-M1 模拟火壤的静力触探试验和静载荷试验, 并结合国内外学者针对砂土已提出的相关经验公式应用于模拟火壤, 尝试找到一个能较准确联系静载荷试验和静力触探试验的经验公式。

目前计算地基极限承载力的经验公式主要分为线性公式和指数公式两大类, 且有少量对数公式形式。

线性公式有^[28-31]

$$[R] = 80P_s + 31.8 \quad (3)$$

$$[R] = 104P_s + 26.9 \quad (4)$$

$$[R] = 36P_s + 76.6 \quad (5)$$

$$[R] = (25 \sim 33)P_s \quad (6)$$

式中, $[R]$ 为地基极限承载力 (kPa), P_s 为静力触探比贯入阻力 (MPa)^[31]。

$$[R]=\left(\frac{P_s}{12.2}\right)(B)\left(1+\frac{D}{B}\right), \quad (7)$$

式中, B 为载荷板直径, D 为载荷板的沉降量^[32]。

$$[R]=0.1849P_s\left(\frac{B}{D}\right)^{-0.5093}\left(1+F\beta\frac{B}{D}\right), \quad (8)$$

式中, F 为形状影响系数, $\beta=N_\gamma/N_q$ ^[21]。

$$[R]=a\beta P_s+\alpha b, \quad (9)$$

式中, α , β 为修正系数, 取值参见文献[21], a , b 为回归系数。

指数公式有^[23, 28, 30]

$$[R]=23.5P_s^{0.97}+500, \quad (10)$$

$$[R]=162P_s^{0.63}+144, \quad (11)$$

$$[R]=214P_s^{0.63}-66。 \quad (12)$$

对数公式有^[33]

$$[R]=249\lg P_s+157.8。 \quad (13)$$

通过以上整理可发现指数型及对数型经验公式相对较少, 原因在于这两种经验公式主要是基于数学的方法对大量试验数据统计而来, 相对缺乏理论基础。而国内外众多学者认为地基承载力与静力触探比贯入阻力用线性方程表达较为合适^[21], 一则考虑到土质因素, 密实因素, 结构特性因素等, 二则方便计算且较符合土(同类土)的基本变化规律。

目前国内外学者为了减少锥尖比贯入阻力的变异性而造成试验结果误差较大变化的现象, 通常根据地基土层的均匀程度对比贯入阻力 P_s 进行加权平均计算取值, 而对于相对较均匀的地基, 则取算数平均值^[9]。据此, 可得本次试验的比贯入阻力 P_s 值通过算数平均值进行计算, 并将所得的 P_s 值带入到经验公式(3)~(13), 计算结果如表4所示。

表 4 TJ-M1 模拟火壤通过经验公式计算得到的承载力值

Table 4 Bearing capacities of TJ-M1 Mars soil simulant from empirical formula (kPa)

公式 编号	测点							
	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
(3)	77	61	60	76	87	77	71	72
(4)	86	65	64	84	99	86	78	79
(5)	97	90	89	96	102	97	94	95
(6)	14~	9~	9~	14~	17~	14~	12~	13~
	19	12	12	18	23	19	16	17
(7)	18	12	11	17	22	18	15	16
(8)	36	23	22	34	43	35	31	31
(9)	57	37	36	55	70	57	49	50
(10)	514	509	509	513	517	513	512	512
(11)	258	231	229	255	273	257	247	248
(12)	88	54	52	85	107	88	75	77
(13)	97	50	46	92	119	96	81	83

由表4可知,地基承载力与静力触探比贯入阻力的线性经验公式计算的结果大体上能较好符合现场试验测试的结果, 且计算值基本集中在30~90 kPa范围, 但对于现场试验实测值72.55 kPa相对比, 个别测点的计算值仍有一定偏离。指数型与对数型的经验公式计算值相对于实际值离散性较大, 且出现最大值514 kPa情况。综上所述, 通过对线性经验公式计算值与试验值对比分析, 发现式(3), (4)的计算值与试验值较为接近。其中式(4)的计算值在试验值两侧波动较大, 而式(3)的结果在试验值两侧较为均匀分布且波动较小。为了进一步探究式(3)是否能够准确作为模拟火壤地基承载力的经验公式, 将其8个测点的计算值与试验值进行比较, 误差分析见表5。

表 5 经验公式(3)的误差分析

Table 5 Differences between experimental data and predicted results of Eq. (3)

测点编号	误差/%	测点编号	误差/%
#1	6	#5	20
#2	16	#6	6
#3	17	#7	2
#4	5	#8	1

通过表5分析可以看出, 经验公式(3)的计算误差不超过20%, 计算结果离散性较小, 且与试验值较符合。经验公式(3)相对更适用于模拟火壤的地基承载力计算。故建议TJ-M1模拟火壤的地基承载力与静力触探比贯入阻力的关系式如下:

$$[R]=80P_s+31.8。$$

4 结 论

本文通过已研制的“天津一号”模拟火壤(TJ-M1), 制备了模拟火壤着陆试验床; 然后通过试验床的静载荷试验、静力触探试验, 并参考以往学者总结的静载荷试验与静力触探试验两者结果相互联系的经验公式, 探讨出适用于模拟火壤条件下承载力的计算公式, 并以此推广到火星土壤静承载力的计算。主要结论如下:

(1) TJ-M1模拟火壤是火星土壤在地球上的模拟产物, 对着陆器安全可靠的着陆有着十分重要的实际意义。本次试验所获得的模拟火壤静承载力为72.55 kPa, 在合理范围之内, 能够为将来需进行承载特性方面的研究提供参考。

(2)通过折减内摩擦角和黏聚力的太沙基修正公式计算出的模拟火壤着陆试验床的承载力较为偏小, 为能准确计算地基极限承载力需结合静力触探原位试验技术加以弥补。

(3)现场静力触探原位试验测得的比贯入阻力有

一定误差, 但通过算数平均处理及整理的经验公式计算值对比后, 得出 $[R]=80 P_s+31.8$ 经验公式的计算结果误差在20%之内, 是可接受的范围。建议TJ-M1模拟火壤的地基承载力采用 $[R]=80 P_s+31.8$ 推算。

致 谢: 同济大学吴晓峰老师指导现场采样及奚邦禄博士参与部分现场试验, 天津大学石安宁博士及尹福顺硕士参与现场模拟火壤试验场地建设工作, 沈振义、庞红星、李双宝、张仕伟等研究生对试验工作给予了支持与帮助, 北京机电空间研究所隋毅、黎光宇及其他现场工作人员在试验中给予了协助, 在此一并表示由衷感谢!

参考文献:

- [1] 耿 言, 周继时, 李 莎, 等. 中国首次火星探测任务[J]. 深空探测学报, 2018, **5**(5): 399 - 405. (GENG Yan, ZHOU Ji-shi, LI Sha, et, al. Review of first Mars exploration mission in China[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, **5**(5): 399 - 405. (in Chinese))
- [2] MOORE H J, CLOW G D, HUTTON RE. A summary of Viking sample-trench analyses for angles of internal friction and cohesions[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1982, **87**(B12): 10043 - 10050.
- [3] SHAW A, ARVIDSON R E, BONITZ R, et, al. Phoenix soil physical properties investigation[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2009, **114**(E1): 1 - 19.
- [4] 季江徽, 黄秀敏. “洞察号”启程探索火星内部世界[J]. 科学通报, 2018, **63**(26): 2678 - 2685. (JI Jiang-hui, HUANG Xiu-min. Insight probe set out to explore the inner world of Mars[J]. Science China Press, 2018, **63**(26): 2678 - 2685. (in Chinese))
- [5] MOORE H J, BICKLER D B, CRISP J A, et, al. Soil-like deposits observed by Sojourner, the Pathfinder rover[J]. Journal of Geophysical Research, 1999, **104**(E4): 8729 - 8746.
- [6] ARVIDSON R E. Localization and physical properties experiments conducted by Spirit at Gusev Grater[J]. Science, 2004, **305**(5685): 821 - 824.
- [7] ARVIDSON R E, ARVIDSON R C, BARTLETT P B, et, al. Localization and physical property experiments conducted by Opportunity at Meridiani Planum[J]. Science, 2005, **306**(5702): 1730 - 1733.
- [8] GROTZINGER J P, JOY C, ASHWIN R, et, al. Mars Science laboratory mission and science investigation[J]. Space Science Reviews, 2012, **170**(1/2/3/4): 5 - 56.
- [9] GROSS F B, SASHA B, CARLOS I, et al. JSC Mars-1 Martian regolith simulant particle charging experiments in a low pressure environment[J]. Journal of Electrostatics, 2001, **53**(4): 257 - 266.
- [10] GROSS F B. JSC Mars-1 Martian regolith simulant particle-charging experiments in the presence of AC and DC corona fields[J]. Journal of Electrostatics, 2003, **58**(S1/2): 147 - 156.
- [11] PETERS G H, WILLIAM A, GREGORY H, et, al. Mojave Mars simulant-characterization of a new geologic Mars analog[J]. Icarus, 2008, **197**(2): 470 - 479.
- [12] NORBERG P, GUNNLAUHSSON H P, MERRISON J P, et, al. Salten SkovI: a Martian magnetic dust analogue[J]. Planet Space Science, 2009, **57**(5/6): 628 - 631.
- [13] BRUNSKILL C, PATEL N, GOUACHE T P, et, al. Characterisation of Martian soil simulants for the ExoMars rover testbed[J]. Journal of Terramechanics, 2011, **46**(6): 419 - 438.
- [14] ELLERY A, PATEL N, RICHTER L, et, al. ExoMars rover chassis analysis and design[C]// Proceedings of the 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, ESTEC, 2005, The Netherlands.
- [15] 刘汉生. PSI HX 系列模拟火星土壤的制备和特性[C]// 中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集 2019, 杭州. (LIU Han-sheng. PSI HX series the preparation and properties of Mars soil simulants[C]// Abstracts of the 17th annual meeting papers of Chinese Society for Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2019, Hang Zhou. (in Chinese))
- [16] 党兆龙, 陈百超. 火星土壤物理力学特性分析[J]. 深空探测学报, 2016, **3**(2): 129 - 133, 144. (DANG Zhao-long, CHEN Bai-chao. Analysis on physical and mechanical properties of Martian soil[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, **3**(2): 129 - 133, 144. (in Chinese)).
- [17] ZENG Xiao-jia, LI Xiong-yao, WANG Shi-jie, et, al. JMSS-1: a new Martian soil simulant[J]. Earth Planets & Space, 2015, **67**(1): 72.
- [18] 刘兴杰, 苏 波, 江 磊, 等. 火星表面土壤力学性能参数研究[J]. 载人航天, 2016, **22**(4): 459 - 465. (LIU Xing-jie, SU Bo, JIANG Lei, et, al. Research on soil mechanical properties of Martian surface soil[J]. Manned Spaceflight, 2016, **22**(4): 459 - 465. (in Chinese))
- [19] 蒋明镜, 戴永生, 张 焱, 等. TJ-1 模拟月壤承载特性的现场试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1529 - 1535. (JIANG Ming-jing, Dai Yong-sheng, ZHANG He, et, al.

- Field experimental research on bearing properties of TJ-1 lunar soil simulant[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, **34**(6): 1529 – 1535. (in Chinese))
- [20] JIANG Ming-jing, XI Bang-lu, BLASIO F V, et al. Physical model tests of the bearing behavior of Tongji-1 Lunar soil simulant[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, **32**(2): 04018150.
- [21] 梁允尚. 对静力触探地基承载力公式的分析研究[J]. *岩土工程学报*, 1987, **9**(4): 78 – 83. (LIANG Yun-shang. The study of the bearing capacity formula of CPT[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 1987, **9**(4): 78 – 83. (in Chinese))
- [22] 王传焕. 用静力触探确定天然地基的极限承载力[J]. *铁道勘察*, 2006(3): 34 – 36. (WANG Chuan-huan. The determination of the ultimate bearing capacity of natural subsoil by cone penetration test[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2006(3): 34 – 36. (in Chinese))
- [23] 建筑地基设计规范: GB50007—2011[S]. 2011. (Code for Design of Building Foundation: GB50007—2011[S]. 2011. (in Chinese))
- [24] 岩土工程勘察规范: GB50021—2009[S]. 2009. (Code for Investigation of Geotechnical Engineering: GB50021—2009[S]. 2009. (in Chinese))
- [25] BOLTON M D, GUI M W. The Study of Relative Density and Boundary Effect for Cone Penetration Tests in Centrifuge Modeling[R]. Cambridge: Department of Engineering, Cambridge University, 1987.
- [26] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999. (GAO Da-zhao. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1999. (in Chinese))
- [27] 静力触探使用技术暂行规定(试用)[S]. 1980. (Interim Provisions on Cone Penetration Technology (Trial)[S]. 1980. (in Chinese))
- [28] 唐贤强, 叶启民. 静力触探[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1981: 7 – 9. (TANG Xian-qiang, YE Qi-min. *Cone Penetration Test*[M]. Beijing: China Railway Press, 1981: 7 – 9. (in Chinese))
- [29] 工业与民用建筑工程地质勘察规范(试行): TJ21—77[S]. 1978. (Code for Investigation of Civil Engineering Geological and Industrial (Trial): TJ21—77[S]. 1978. (in Chinese))
- [30] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006. (《Geological Engineering Handbook》. *Geological Engineering Handbook*[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese))
- [31] MEYERHOF G G. Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 1956, **82**(SM1): 1 – 19.
- [32] ESLAAMIZAAD S, ROBERTSON P K. Cone penetration test to evaluate bearing capacity of foundations in sands[C]// *Proceedings of 49th Canadian Geotechnical Conference*, 1996, NF: St: 429 – 438.
- [33] 李君韬. 基于旁压试验和静力触探估算地基承载力和压缩模量[D]. 北京: 中国地质大学, 2016. (LI Jun-tao. *Estimate Bearing Capacity and Compression Modulus of Soils by Pressuremeter Test and Cone Penetration Test*[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016. (in Chinese))