

航天返回舱着陆冲击模拟试验床建造过程控制研究

彭友君 金 淮

(北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101)

【摘 要】 应用岩土工程基本方法和手段,按照载人航天返回舱计划着陆地的土质条件,建造了返回舱着陆冲击模拟试验床,建造过程严格控制材料质量、施工技术参数和施工方法,采用轻型动力触探试验、测试土层含水量和干密度、小直径载荷板试验等主要现场测试方法,及时评价试验床的质量状况,实现了信息化控制施工,保证了模拟试验床的建造质量,对我国国防科技领域的试验研究具有重要意义。

【关键词】 载人航天;返回舱着陆;模拟试验床

【中图分类号】 TU 431

Research on Building Process Control of the Impact Imitating Test Bed of Spaceflight's Return Capsule Landing

Peng Youjun Jin huai

(Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Institute Co., Ltd. Beijing 100101, China)

【Abstract】 Based on the earth quality condition and basic method of geotechnical engineering, an impact imitating test bed of the spaceflight return capsule is built. The material quality, parameter of construction technology and construction method is strict controlled in this building process which adopts field test data such as light dynamic penetration test, water content and dry density and little diameter load board experiment. According to these methods, it can appraise the quality situation of testing bed in time, and realize informative control construction. Then the build quality of the bed is guaranteed. This research has an important meaning in science and technology field of our country national defence.

【Key Words】 manned spaceflight; landing of return capsule; bed of imitating test

0 引言

载人航天返回舱承载了宇航员和大量的科学试验精密仪器,为保证舱内人员和设备在着陆时不受伤害,必须经过一系列的模拟仿真试验,该试验通过控制仿真载人航天器返回时不同水平速度、不同垂直速度、不同姿态,进行多种组合试验,测试返回舱着陆时地面对航天器在不同速度和着陆工况下的冲击震动力,检测舱内人员和设备的安全保障程度,从而确定航天器回收着陆时的最佳速度,按照航天动力学方法,最终确定航天降落伞尺寸及开伞时机。因此在我国建造了SZ-1返回舱着陆冲击试验模拟试验床,该模拟试验床成功的应用岩土工程技术进行建造,为我国载人航天技术的发射成功做出了重要贡献。

1 返回舱着陆场地的地质条件

返回舱着陆场地按照计划选择在我国内蒙古中部地区,该地区人口密度不大,地面基本平坦,表层土含砂,无明显硬质岩石出露,是航天返回舱着陆的

理想地域。为了查明该计划着陆场地的详细地质情况,对该地域进行了专题岩土工程勘察、调查和研究工作,其调查工作包括中心瞄准点一带(简称A地区)及其附近几公里可能偏离着陆地范围(简称B地区)。工作内容包括①详细查明场区范围3~5m深度的地层分布;②详细查明各层土的主要物理力学性质和土的动力学性质。

通过典型地段的钻探工作,取土试样,测试各层土的含水量、重力密度和干密度、孔隙比等指标,并进行颗粒分析试验、相对密度试验、三轴试验和等向压缩试验等室内试验。现场试验主要为浅层土的轻型动力触探试验、地层波速测试、直径26cm载荷板载荷试验和缩比刚体模型的落体冲击特性试验。部分试验结果直接用于载人航天返回技术研究,部分勘察试验结果用于模拟试验床的建造控制。根据返回舱着陆场地地形与地质勘察研究报告,着陆场地A地区和B地区的地层分布如下:

①地表土, 粉细砂: 地表 0.2 m 厚土层较松散, 稍干, 风成, 砂质粉土为主, 有植物根、草根、有机质。0.2~1.3 m 以粉细砂为主, 密实, 稍湿。

②基层土, 胶结圆砾: 圆砾为主, 充填中粗砂, 含少量黏土, 有较强的黏结性。

③第三系黏土、粉质黏土: 褐红、灰白、绿灰, 硬塑, 稍湿, 夹有细砂, 有大量钙质结核。

地层分布情况见图 1。岩土物理力学指标见表 1。

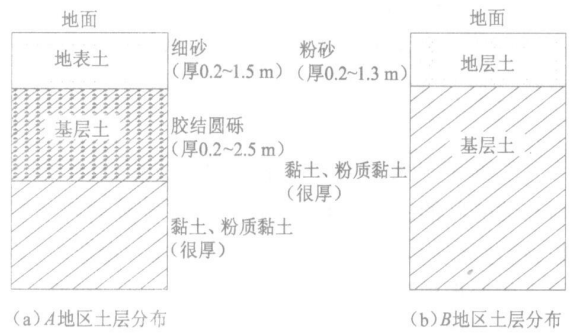


图 1 计划着陆区土层分布特征

表 1 着陆场地岩土物理力学指标

勘察地	地层部位	含水量 $w/\%$	干密度 $\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	轻型动力触探/击数	标准贯入试验/击数	土的变形模量 E_0/MPa	剪切波速 $v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
A 地区	地表土	4.5	1.56	32~58	26~50	23	221
	基层土	4.5	2.02			60	290
B 地区	地表土	4.0~9.5	1.52~1.60	57~60	32~45	19	220~300
	基层土	14.0~18.8	1.73~1.80			60	

在着陆场地 A 地区和 B 地区的地表土和基层土均分别进行了载荷板直径为 0.26 m 的载荷试验。A 地区的试验结果为: 地表土 $P_0 = 400$ kPa, $s = 3.2$ mm, $E_0 = 23$ MPa; 基层土: $P_0 = 800$ kPa, $s = 2.5$ mm, $E_0 = 60$ MPa; 载荷实验 $P-s$ 曲线见图 2。

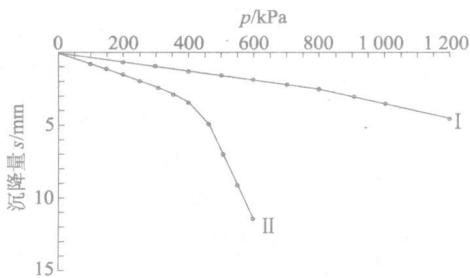


图 2 A 地区载荷试验 $P-s$ 曲线

2 模拟试验床建造方案

航天地面综合试验场位于北京市大兴区, 模拟试验床建造在 DY-20 吊高投放试验塔下, DY-20 高投放塔吊用于起吊仿真回收舱并控制不同的降落速度, 按照航天科技攻关组的要求, 模拟试验床必须按照计划着陆地的土质条件进行建造, 以得到与返回舱真实落点一致的试验状态。

2.1 试验床的规格及基本方案

根据场地条件, 模拟试验床平面尺寸确定为: $27\text{ m} \times 25\text{ m}$, 地下建造现浇钢筋混凝土全封闭结构, 地面设置自动移动式可拆卸开闭雨篷, 要求试验床内土层可按不同时期、不同的返回舱冲击试验需要进行更换不同的地层, 并容易维护; 床内土层厚度设置为

3.4 m, 土层顶面标高与场地地面标高基本一致。本次模拟试验床的建造方案依据 A 地区土质条件进行设计, 地层简化为地表土和基层土两层, 地表土厚度 1.0 m, 基层土厚度 2.4 m。除土建施工外, 模拟试验床建造的重点为床内仿真地层的填筑和控制。

2.2 模拟试验床建造的技术分析

着陆场地位于干旱区, 基层土为胶结圆砾, 地层中岩石的含水量仅为 4.5%, 地层的强度较高, 载荷试验测得的变形模量达到 60 MPa, 该地层中圆砾的颗粒大小不一致, 一般粒径为 10~30 mm, 最大粒径为 80 mm, 地层中的土呈半固结状态; 在 A 地区范围内该土层也具有一定的不均匀性, 要在综合试验场完全模拟出与现场相符合的地层, 仍然有一定的困难, 现场缩比刚体模型的落体冲击特性试验测试结果表明, 埋设于该层土的震动传感器测量到的落体冲击波响应不十分明显, 为此允许模拟试验床的建造控制测试数据有一定的变化范围。

地表土对落体冲击波响应非常明显, 现场试验结果表明, 强度高、固结好的地表土, 其变形模量也较高, 在落体模型和土层中测得的震动波振幅也越大, 振动衰减周期较长, 因此, 试验床的根本质量标准在于拟建地表土与实际着陆场地的符合性, 地表土的模拟建造是模拟试验床使用过程能不能取得精密测试数据的关键, 由于现场地表土主要为粉细砂, 而粉细砂的压实度又比较好控制, 这就使得在异地建造一个适合精密试验要求的模拟试验床成为可能。

2.3 填筑材料的选取

模拟试验床的重现性和施工过程的可控制性,材料选取是关键^[1]。经研究,对回填材料规定如下:

①地表土采用大兴区某地的风成粉细砂,该土料与着陆区的地表土基本相似,具有较多的粉土颗粒,经过压实以后,具有一定的胶结性。建造时,该层土的变形模量 E_0 按照 20~25 MPa 进行控制。

②基层土采用粒径为 5~32.5 mm 的卵石、中粗砂、胶结材料人工拌和,拌和体积比按照 75%、15%、10% 进行控制,胶结材料为场地原址的粉质黏土和粉煤灰。建造时,该层土的变形模量 E_0 按照 50~60 MPa 进行控制。

2.4 试验床的填筑控制标准

整个填筑过程采用分层回填、15 t 振动碾压机碾压压实的方法,分层厚度不大于 0.3 m,高于有关规范的标准要求^[2],填筑过程按照分层进行现场试验,将现场试验结果及时与落区测试结果进行比较,进行信息化施工。

1) 基层土分 8 层碾压回填,每层厚度为 0.30 m,碾压 5~6 遍,每层填筑完成后进行轻型动力触探试验,第 2 层、第 5 层、第 8 层填完后分别进行含水量、密度试验和平板载荷试验。

2) 地表土分 3 层碾压回填,每层厚度为 0.30 m,碾压 6~8 遍,每层填筑完成后进行现场轻型动力触探试验,完成第 2 层和全部 3.4 m 厚土层填筑完成后采用环刀法进行室内含水量和干密度试验,并进行平板载荷试验和波速试验^[3-4]。

3 过程控制的测试结果及分析

3.1 施工过程控制

施工前对回填材料进行严格的检测,对卵石材料和中粗砂取样,进行颗粒分析试验、含泥量和含水量试验,对砂质粉土和拌和材料(粉质黏土)进行含

水量和有机质含量试验,施工过程中严格按照材料拌和体积比进行拌和^[5],控制每层的回填厚度,派专人对碾压遍数进行监督。

3.2 施工过程检测控制

1) 轻型动力触探试验

轻型动力触探试验在测试中使用的工作量最大,每层填筑完成以后,均在场内均匀布置 9 个试验点,贯入深度为 0.6 m,检测本层回填土的密实程度和上次回填土经过二次碾压后的质量情况。

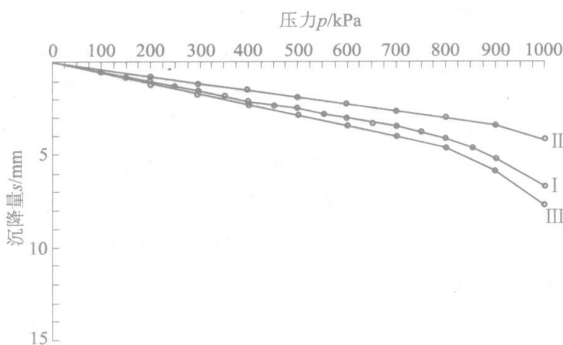
2) 含水量和干密度试验

该试验每组 6 个试样,在基层土进行了 3 组试验,在地表土进行了 2 组试验,在施工到第 7 层时,因下大雨,使填筑的土层含水量增加,含水量为 17.5~20.0,因此,采用挖出晾晒数日,恢复到基本符合要求的含水量以后,重新进行碾压施工。

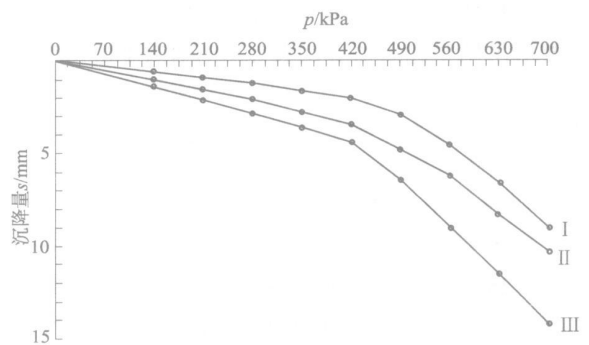
3) 平板载荷试验

模拟试验床的平板载荷试验采用与落区现场完全相同的试验方法,便于试验数据资料的对比。平板载荷试验载荷板直径 0.26 m,板面积 0.053 m²,试验加载不低于 1 000 kPa,试验分级根据土的强度确定,每级荷载的稳定标准为 2 h。有资料表明^[6],国外已有大量相同或相似的载荷试验数据结果,试验数据具有可参考性。该试验方法用于本工程的优点是试验时间比较固定和反力系统容易实现。反力配重采取箱式整体组合,现场吊车一次安装和拆卸,方便施工,但是本试验对加载系统的精度要求较高。

考虑平板载荷试验的影响深度特点,本次试验分别在填筑厚度 0.60 m、1.50 m、2.40 m、3.00 m、3.40 m 处进行,每一深度完成 2~3 个试验点,在 3.40 m 处完成 4 个点。图 3(a) 为基层土的载荷试验曲线,其中 I 为回填 0.6 m 厚的试验曲线,II 为回填 1.5 m 厚的试验曲线,III 为回填 2.4 m 厚的试验曲线;图 3b 均为回填到 3.4 m 厚的平行试验曲线。



(a) 模拟基层土的载荷试验



(b) 模拟地表土的载荷试验

图 3 试验床载荷试验 P-s 曲线

4) 波速试验

波速试验采用单孔法^[7], 测点间距 0.5 ~ 1.0 m, 在试验床内选取了两个试验点, 人工成孔, 试验完成后用回填材料采用柱锤分层夯实回填。

3.3 变形模量的计算

根据平板载荷试验结果, 土的变形模量在着陆现场和试验床建造过程控制均按下式计算^[8]:

$$E_0 = (1 - \mu^2) \frac{P}{s \cdot d} \quad (1)$$

式中: E_0 为土的变形模量, MPa; P 为承压板上的总荷载, kN, $P = \pi r^2 p$; s 为与荷载相对应的沉降量, mm; d 为承压板的直径, m; μ 为土的泊松比, 对于基层土(胶结圆砾)取 0.25, 地表土(砂土)取 0.30。

上述 4 种过程控制的测试结果列于表 2 中。

表 2 各种试验测试结果

试验部位	试验深度 / m	轻型动力触探 / 击数	含水量 w%	干密度 $\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	变形模量 E_0 / MPa	剪切波速 $v_s / (m \cdot s^{-1})$
地表土	3.4	52	9.7~14.7	1.66~1.72	18.1~36.2	222~226
	3.0	62	8.9~10.9	1.70~1.74		
	2.7	77				
地基土	2.4	57	12.1~13.0	1.58~1.76	34.0	422~433
	2.1	48				
	1.8	80				
	1.5	95				
土	1.2	108	7.0~9.0	1.65~1.88	53.7	422~433
	0.9	76				
	0.6	87	5.0~8.0	1.67~1.87		
	0.3	99				

从表 2 中可以看出, 模拟试验床建造时回填材料的含水量稍高于着陆现场地层的含水量, 基层土的变形模量在回填到 1.5 m 时符合建造设计要求, 但是, 回填到 2.4 m 时由于下雨, 土的含水量经晾晒后仍然偏高, 变形模量实测为 34.0 MPa。由于工期较紧, 分析认为该土层随时间推移, 土的含水量会逐渐减少, 下步工作的二次碾压对本层土起加固作用^[9], 土的密实度和变形模量可以满足技术要求, 决定继续回填地表土, 模拟地表土的实测变形模量分别为 18.1 MPa、22.6 MPa 和 36.2 MPa, 平均为 25.5 MPa, 完全满足技术要求。

4 结论

1) 返回舱着陆冲击模拟试验床的建造, 是国内独一无二的工程, 是岩土工程技术应用于航天高科技领域的一次有益的尝试, 载人航天返回舱着陆设计是该项目的最后一道工序, 也是一项比较重要的设计工序, 时间紧、要求高, 设计建造该模拟试验床是一项重要的政治任务, 成功的完成了这次岩土工程任务是全体岩土工程师的光荣。

2) 模拟试验床建造方案基于岩土工程施工和检测经验的积累, 精心选择填筑材料品种及规格, 严格控制材料配合比, 过程控制采用了信息化施工方法, 逐层施工、逐层检测、逐层验收, 保证了建造质量。直径 0.26 m 的载荷板载荷试验安装容易实现, 试验

方法简单, 试验数据可靠, 试验结果明确, 可以作为试验床建造质量的重要控制依据。

3) 本工程回填土含水量以落区实测土层的含水量作为控制依据, 实际上是按照压实回填需要的最优含水量适当降低 2~3 个百分点进行控制的, 为了达到需要的质量密度, 当含水量偏高时进行了晾晒处理和重新碾压, 并适当增加回填碾压遍数和控制分层厚度。

参 考 文 献

- [1] 袁从华, 杨明亮, 章光. 粤连电厂拦灰坝土石混合料碾压试验研究[J]. 岩土力学, 2004(4): 640-645.
- [2] GB 50307-1999 建筑地基处理技术规范[S].
- [3] 范云. 填土压实质量检测技术的发展与评析[J]. 岩土力学, 2002(8): 524-529.
- [4] 王广月, 王登杰. 土压实标准的研究[J]. 中外公路, 2003(6): 78-80.
- [5] GB 50202-2002 建筑地基基础工程施工质量验收规范[S].
- [6] 向军, 冯玉勇, 等. 平板载荷试验中存在的若干问题[J]. 铁道建筑技术, 2001(6): 34-38.
- [7] GB 50021-2001 岩土工程勘察规范[S].
- [8] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册(第三版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1992.
- [9] H. F. 温特科恩, 方晓阳主编. 基础工程手册[M]. 钱鸿缙, 叶书麟, 等. 译校. 北京: 中国建筑工业出版社, 1985.

收稿日期: 2006-12-18