

团体标准

T/SSC XXX-20XX

超重力离心地震模拟地基土体制备技术规程

Technical code for preparation of soil foundation in hypergravity
centrifuge earthquake simulation

征求意见稿

20XX-XX-XX 发布

20XX-XX-XX 实施

中国地震学会 发布

目次

前言 II

引言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 砂土地震动力离心模型制备 2

 4.1 模型相似比 2

 4.2 试剂或材料 2

 4.3 仪器设备 3

 4.4 样品 3

 4.5 试验步骤 3

 4.6 试验数据处理 5

 4.7 模型质量检验与评价 5

 4.8 试验报告 6

5 饱和黏性土离心模型制备 7

 5.1 试剂或材料 7

 5.2 仪器设备 7

 5.3 样品 7

 5.4 试验步骤 8

 5.5 试验数据处理 11

 5.6 模型质量检验与评价 11

 5.7 试验报告 11

附录 A（资料性附录）试验过程数据记录表 13

 A.1 标定数据与结果记录表 13

 A.2 传感器信息登记表 13

 A.3 标准砂制样过程数据记录表 14

 A.4 黏性土物理力学指标测定表 14

 A.5 黏性土固结参数估算表 14

 A.6 黏性土预固结过程监测数据表 15

 A.7 离心机固结过程监测数据表 15

 A.8 黏性土模型核心性能汇总表 15

附录 B（资料性附录）试验报告范本 17

 B.1 标准砂模型制备试验报告（范本） 17

 B.2 黏性土地基离心模型制备试验报告（范本） 17

参考文献 19

前 言

文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由燕山大学提出。

本文件由中国地震学会归口。

本文件起草单位：燕山大学、中国地震局工程力学研究所、应急管理大学、北京工业大学、河北科技大学、交通运输部天津水运工程科学研究院、中交天津港湾工程研究院有限公司、中交四航工程研究院有限公司。

本文件主要起草人：兰景岩、王永志、李平、陈苏、刘晓强、王体强、汤兆光、曹海莹、王丕光、李巧燕、王苏阳、沈超、李建东、刘娟、咸甘玲、朱耀庭、刘志军、王雪奎、梁小丛、朱明星。

引 言

超重力离心地震模拟试验是研究岩土与结构地震响应的关键手段，其试验结果的可靠性高度依赖于地基土体模型的制备质量。目前，国内在该领域的模型制备尚缺乏统一的技术规程，实践中的经验化和随意性影响了试验的可重复性与结论的普适性。

为规范试验操作、保证模型质量、提升不同机构和试验间结果的可比性，特制定本文件。本文件规定了超重力离心地震模拟试验中砂土和饱和黏性土地基模型的制备方法，旨在为相关科学研究与工程验证提供标准化的技术依据。

超重力离心地震模拟地基土体制备技术规程

1 范围

本文件规定了超重力离心地震模拟试验中砂土和饱和黏性土地基模型制备的试验方法，包括试剂或材料、仪器设备、样品、试验步骤、试验数据处理和试验报告。

本文件适用于超重力离心地震模拟试验中砂土和饱和黏性土地基模型的制备，主要适用于水平自由场地或具有近似水平地层的地基模型，可用于地震液化、场地地震动效应、土体动强度与变形等方向的科学研究及工程验证试验。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T50123—2019 土工试验方法标准

DL/T 5102—2013 土工离心模型试验技术规程

JTS/T 231-7-2013 港口工程离心模型试验技术规程

3 术语和定义

GB/T 50123—2019、DL/T 5102—2013 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

超重力离心模型试验 hypergravity centrifugal model test

利用离心机产生的超重力场模拟原型应力场，遵循相似律将原型缩小为模型，使模型与原型对应点应力相等的试验方法。

3.2

相似比 Similarity ratio

模型各物理量与原型对应的物理量之间的比例关系。

3.3

模型率 scale factor

N

原型几何尺寸与模型几何尺寸的比值。

3.4

模型箱 container

用于盛放模型和安装仪器的箱体。

3.5

砂雨法 sand raining method

控制落距、出砂口径和水平移动速度，使砂粒自由下落堆积制备模型的方法。

3.6

分层预压与机载联合制备法 layered pre-loading and on-board combined preparation method

先在 1g 条件下分层预固结，再在离心机内进行机载固结的黏性土模型制备方法。

3.7

离心加速度 centrifuge acceleration

离心机转动时，沿转动半径方向所产生的加速度，其方向与向心加速度方向相反、大小相等，即等于离心机转速平方和考察点至转轴轴心距离的乘积。

4 砂土地震动力离心模型制备

4.1 模型相似比

离心模型试验应遵守模型与原型应力对应相等的相似准则。地基土体制备涉及的主要物理量相似比见表 1。

表 1 地基土体制备常用物理量相似比

名称	量纲	符号	相似比（模型/原型）
几何尺寸	L	L	$1/N$
加速度	LT^{-2}	g	N
位移	L	s	$1/N$
质量	M	m	$1/N^3$
土体密度	ML^{-3}	ρ_s	1
液体密度	ML^{-3}	ρ_f	1
应力	$ML^{-1}T^{-2}$	σ	1
时间	T	t	$1/N^2$ （固结过程）
			$1/N$ （动力学）
			1（蠕变过程）
含水率	1	w	1
孔隙比	1	e	1
饱和度	1	S_r	1
渗透系数	LT^{-1}	k	N
黏滞系数	$ML^{-1}T^{-1}$	η	1（静力试验）
			N （动力试验）

注：其他物理量的相似比按 DL/T 5102—2013 第 4.0.2 条执行。 L 长度量纲； T 为时间量纲； M 为质量量纲； N 为模型率。

4.2 试剂或材料

4.2.1 砂土

T/SSC XXX-20XX

砂土的最大粒径和平均粒径应符合 DL/T 5102—2013 中 4.0.2 条的规定，其物理力学性质应与原型土相同或相似。

4.2.2 饱和溶液

砂土模型制备用饱和溶液可采用纯水。对于动荷载作用下砂土液化试验，砂土应采用降低渗透系数的措施，饱和使用的液体宜采用甲基纤维素溶液或硅油等高黏滞性液体，其黏滞系数应与模型率数值相同，详见 JTS/T 231-7 的 3.2.5 条及 DL/T5102—2013 的 9.1.8 条。

4.3 仪器设备

4.3.1 砂雨法制样装置

分为手动型和自动型。手动型包括可调支架、储砂桶、手动阀门和可更换出砂口；自动型包括伺服驱动的三维定位系统。装置应至少包括：

- a) 带高度指示的支架或悬臂；
- b) 储砂桶及可控开度的出料口；
- c) 不同孔径的出砂口；
- d) 水平移动机构。

4.3.2 标定容器（标定盒）

已知容积的刚性容器。

4.3.3 模型箱

与离心机适配，内壁光滑，侧壁宜贴附 1 mm~2 mm 厚橡胶膜以减少边界效应。

4.3.4 测量设备

- a) 电子天平：量程不小于 10 kg，感量 0.1 g；
- b) 烘箱：可控温 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ；
- c) 标准筛：孔径 0.075 mm 和 2.0 mm；
- d) 钢直尺：分度值 1 mm；
- e) 水平尺：用于模型表面平整度测量。

4.3.5 传感器

干砂模型制备过程无需传感器监测，但应按试验要求完成传感器预埋。饱和砂土模型制备过程中，应布设孔隙水压力传感器，用于验证模型饱和度。饱和度验证方法见 4.6.3。

4.4 样品

4.4.1 过筛

砂土样品应过筛，按照 3.4.1 条规定剔除超径颗粒。

4.4.2 烘干

砂土应在 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重（在 $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒重，两次称量差值不大于 0.1g），冷却至室温备用。

4.5 试验步骤

4.5.1 仪器校准

4.5.1.1 孔隙水压力传感器校准

- a) 将传感器与标准压力源（精度等级不低于 0.1 级）连接；

T/SSC XXX-20XX

- b) 在传感器量程范围内均匀选择不少于 10 个校准点（包括零点和满量程）；
- c) 从零点开始，逐级施加正压力至满量程，记录每个压力点的传感器输出值；
- d) 再从满量程逐级减压至零点，记录每个压力点的传感器输出值；
- e) 重复 c) 和 d) 步骤至少 3 次，取平均值；
- f) 以标准压力值为横坐标，传感器输出值为纵坐标，绘制校准曲线，建立校准方程；
- g) 线性相关系数应不小于 0.9999。

4.5.1.2 加速度计校准

- a) 将加速度计安装在振动台或离心机标定臂上，使其敏感轴与振动/加速度方向一致。
- b) 在传感器量程和试验预期范围内，选择不少于 10 个加速度校准点（包括零点和满量程）。
- c) 在每个校准点施加相应的正弦振动或恒定加速度，记录传感器输出值。每个点重复 3 次，取平均值。
- d) 以标准加速度值为横坐标，传感器输出值为纵坐标，绘制校准曲线，建立校准方程，线性相关系数应不小于 0.9999。
- e) 校准频率同孔隙水压力传感器（每次试验前、维修或更换后、数据异常时）。
- f) 所有校准记录应保存。

4.5.1.3 传感器校准频率

- a) 每次试验开始前；
- b) 传感器维修或更换关键部件后；
- c) 试验数据出现异常时。

4.5.1.3 所有校准记录应保存，包括校准日期、校准人员、校准曲线、校准方程等。

4.5.2 标定落距-相对密实度关系曲线

4.5.2.1 将标定容器清洁干燥后称取其质量 m_0 。

4.5.2.2 将砂雨装置出砂口固定于某一落距 H_a ，例如 50 mm、100 mm、200 mm、400 mm 等。

4.5.2.3 开启砂雨装置，使砂土自由落入标定容器，保持落距恒定，直至砂土表面平整且略高于容器边缘。

4.5.2.4 刮平表面，称取总质量 m_1 。

4.5.2.5 计算砂土质量，并按公式（1）计算砂土干密度

$$\rho_d = \frac{m}{V} \quad (1)$$

式中： ρ_d —— 砂土干密度，单位为克每立方厘米（g/cm³）；

m —— 砂土质量，单位为克（g）；

V —— 标定容器容积，单位为立方厘米（cm³）。

4.5.2.6 按公式（2）计算相对密实度 D_r ：

$$D_r = \frac{(\rho_d - \rho_{dmin})\rho_{dmax}}{(\rho_{dmax} - \rho_{dmin})\rho_d} \quad (2)$$

式中： D_r —— 砂土相对密实度；

ρ_{dmin} —— 砂土最小干密度，单位为克每立方厘米（g/cm³）；

ρ_{dmax} —— 砂土最大干密度，单位为克每立方厘米（g/cm³）。

T/SSC XXX-20XX

4.5.2.6 重复 4.5.2.1~4.5.2.6, 每个落距下至少进行 3 次平行试验, 取平均值作为该落距对应的 D_r 。

4.5.2.7 改变落距, 重复上述步骤, 绘制落距 H_a 与相对密实度 D_r 的关系曲线, 记录标定数据与结果于附录 A.1 标定数据与结果记录表。

4.5.3 模型制备

4.5.3.1 模型箱清理

清理模型箱内壁, 确保无杂物、油污。

4.5.3.2 分层制样

根据模型总厚度和传感器布置间距, 划分分层厚度 (不宜超过 10cm)。按照标定确定的出砂口径、落距及水平移动速度, 启动砂雨装置, 人工控制出砂口以 S 形轨迹匀速移动。

4.5.3.3 落距维持

干砂制样时, 每铺筑 2cm 厚度调整一次出砂口高度, 维持落距恒定; 饱和砂制样时, 保持水面至土样表面高度大于 5cm, 每上升 2cm 调整一次出砂口高度。

4.5.3.4 应按试验设计, 在模型制备至预定深度时暂停, 于指定分层位置准确布设传感器; 传感器的型号、校准信息、编号和布设位置要记录于附录 A.2 传感器信息登记表。

4.5.3.5 传感器布设:

- a) 孔隙水压力传感器的感压面应垂直于预期地震动主方向;
- b) 加速度计的感应端应平行于预期地震动主方向;
- c) 各层同类传感器的敏感轴正向应保持一致。
- d) 传感器应安装牢固, 其本体及引线不得扰动砂土或影响后续砂雨法堆积的均匀性, 导线应沿模型箱壁集中引出。

4.5.3.6 模型饱和 (仅对饱和砂土模型)

将模型箱安装于真空循环注液饱和装置进行饱和。

4.6 试验数据处理

4.6.1 应详细记录试验过程中的关键数据

- a) 标定试验数据: 每个落距下的 m 、 V 、 ρ_d 、 D_r 及平均值;
- b) 模型制备参数: 目标 D_r 、采用落距 H_a 、出砂口径、移动速度、分层厚度;
- c) 模型物理参数: 模型尺寸、总质量、平均干密度、平均 D_r ;
- d) 饱和模型参数: 饱和度、孔隙水压力分布。

4.6.2 相对密实度计算

按公式 (3) 计算各测点相对密实度, 统计平均值、标准差及变异系数, 变异系数计算公式如下:

$$CV = \frac{S}{\overline{D_r}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: CV —— 变异系数 (%);

S —— 相对密实度标准差;

$\overline{D_r}$ —— 相对密实度平均值 (%)。

4.6.3 饱和效果 (仅对饱和砂土模型)

模型饱和后, 可按以下方法验证:

4.6.3.1 微振响应法

T/SSC XXX-20XX

给予模型一个微弱的激励（如小型激振器或敲击模型箱），观测不同深度孔压传感器是否产生与加速度信号相似的波动响应

4.6.3.2 静孔隙水压力对比法

在离心机逐级升速的静力阶段，应记录各深度孔隙水压力传感器在不同离心加速度等级下的稳定读数，并按下列步骤判断模型饱和效果：

a) 理论静水压力计算：按公式（4）计算各测点在同一加速度等级下的理论静水压力：

$$p_{\text{theo}} = \rho_w \cdot g \cdot h_{\text{测距}} \quad (4)$$

式中： p_{theo} ——理论静水压力，单位为帕斯卡（Pa）；
 ρ_w ——水的重度（ $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ）；
 $h_{\text{测距}}$ ——测点至砂面距离，应转化为原型尺寸（m）；
 g ——重力加速度，取 9.8 m/s^2 。

按照公式（5）计算相对误差 δ 。若所有测点 $\delta \leq 5\%$ ，则饱和度合格。

$$\delta = \frac{|p_{\text{test}} - p_{\text{theo}}|}{p_{\text{theo}}} \quad (5)$$

式中： δ ——相对误差（%）；
 p_{test} ——孔隙水压力测试值（kPa）；
 p_{theo} ——孔隙水压力理论值（kPa）。

4.6.4 核心数据汇总

将关键结果填入附录 A.3 砂土模型制备过程数据记录与核心性能汇总表，便于快速查阅。

4.7 模型质量检验与评价

4.7.1 检验项目与合格标准

检验项目	检验方法	备注
相对密实度 D_r	称重-体积法样	以模型平均值计
均匀性（相对密实度变异系数）	微型贯入法	微损，表面网格布点测试贯入阻力
饱和度 S_r （仅饱和砂模型）	孔隙水压力传感器验证	无损，与理论静水压力比较
模型厚度偏差	钢直尺多点测量	与设计厚度比较

4.8 试验报告

4.8.1 试验基本信息

试验对象、试验名称、试验日期、试验人员、依据标准。

4.8.2 砂样特性

砂样名称、粒径范围、最大干密度、最小干密度、来源等。

4.8.3 试验设备

砂雨装置型号、出砂口孔径、标定容器规格、测量仪器型号及校准情况等。

4.8.4 制样参数

落距、水平移动速度、分层厚度、传感器布置情况等。

4.8.5 试验结果

核心性能汇总表数据、均匀性评价、饱和效果评价、模型质量检验与评价等。

T/SSC XXX-20XX

4.8.6 异常现象

试验过程中出现的异常现象及处理措施。

4.8.7 结论与签字确认

明确模型是否满足试验要求，由试验人员和审核人员签字。

5 饱和黏性土离心模型制备

5.1 试剂或材料

5.1.1 黏性土试样

黏土或粉质黏土，其物理力学性质应与原型土相同或相似。

5.1.2 试验用水

纯水，即蒸馏水或去离子水。

5.1.3 滤纸

中速或快速定性滤纸，孔径应小于土样最小粒径。

5.1.4 排水砂

应选用洁净粗砂。

5.2 仪器设备

5.2.1 土工离心机系统

具备逐级递增加速度加载功能，最大离心加速度满足试验要求，吊篮尺寸适配模型箱，运行稳定。

5.2.2 固结装置

可施加分级荷载。

5.2.3 真空搅拌设备

含真空搅拌机和密封搅拌罐。

5.2.4 层状模型箱

耐腐蚀材料制成，内壁尺寸适配离心机吊篮。

5.2.5 传感器

黏性土模型制备应配备孔隙水压力传感器、位移传感器和加速度计。

5.2.6 土工试验仪器

按 GB/T 50123—2019 规定配置，包括液塑限联合测定仪、比重瓶、固结仪、渗透仪等。

5.2.7 称量设备

电子天平，量程不小于 10kg，精度 0.1g。

5.2.8 测量工具

钢直尺、卷尺及水平尺。

5.2.9 烘干设备

烘箱，控温范围 50℃~200℃，控温精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ，用于土样风干或烘干处理。

5.3 样品

5.3.1 样品预处理

5.3.1.1 土样采集与风干

采集具有代表性的黏性土样，去除石块、植物根茎等杂质，风干或烘干后碾散，过 2 mm 筛。

5.3.1.2 物理力学指标测定

按 GB/T 50123—2019 测定土样的液限 (w_L)、塑限 (w_P)、土粒比重 (G_s)、压缩指数 (C_c)、固结系数 (C_α)、渗透系数 (k) 等指标，填入附录 A.4《黏性土物理力学指标测定表》，作为泥浆制备和固结方案制定的依据。

5.4 试验步骤

5.4.1 仪器校准

5.4.1.1 孔压传感器的校准见 4.5.1.1。

5.4.1.2 位移传感器校准应按以下步骤进行：

- 将传感器安装在标准位移台上；
- 在传感器量程范围内均匀选择不少于 10 个校准点；
- 从零点开始，逐级施加位移至满量程，记录每个位移点的传感器输出值；
- 再从满量程逐级返回至零点，记录每个位移点的传感器输出值；
- 重复 c) 和 d) 步骤至少 3 次，取平均值；
- 绘制校准曲线，建立校准方程。

5.4.1.4 校准频率及校准记录见 4.5.1.2 及 4.5.1.3。

5.4.2 配比确定

根据土样液限 (w_L)，确定泥浆初始含水率为 $1.2w_L \sim 1.8w_L$ ，黏粒含量较高时取 $1.5w_L \sim 1.8w_L$ ，通过预备性试验确定最优值。

5.4.3 确定初始孔隙比

5.4.3.1 真空搅拌

按 4.7.2 配比将土样与脱气水倒入真空搅拌罐。密封后抽真空至 100 kPa，搅拌 4 h~5 h。

5.4.3.2 泥浆检验

搅拌完成后取样测定初始含水率和初始孔隙比，按公式 (7) 计算。

$$e_0 = \frac{\rho_w G_s (1 + 0.01w_0)}{\rho_0} - 1 \quad (7)$$

式中： w_0 —— 泥浆初始含水率 (%)；

e_0 —— 泥浆初始孔隙比；

G_s —— 土粒比重；

ρ_0 —— 泥浆湿密度 (g/cm³)。

5.4.4 固结方案制定

5.4.4.1 分层原则

根据 1g 条件下模型固结完成后的目标总厚度，结合传感器竖向布设间距，将模型划分为若干分层，单层厚度控制在 5~10cm 范围内。

5.4.4.2 加载等级确定

根据 4.1 中表 1 常用物理量相似比计算原型条件下各土层中点处的有效自重应力 (p)，作为该土层最终需施加的最大固结应力。加载等级按表 2 划分，当分级固结应力超过 50kPa 后，参照常规固结试验标准执行。

表 2 加载等级划分

序号	压等级	预应力/kPa
p_1	1	1
p_2	2	4
p_3	3	6
p_4	4	8
p_5	5	16
p_6	6	26
p_7	7	38
p_i	.....	.....
p_n	n	p

5.4.4.3 物理参数估算

固结过程中孔隙比、含水率及固结时间按下列公式估算：

b) 固结过程孔隙比与含水率的关系：

$$G_s = \frac{S_r e}{w} \quad (8)$$

式中： G_s ——土粒比重；
 e ——孔隙比；
 S_r ——饱和度(对于饱和土 $S_r = 1$)。

c) 孔隙比变化（压缩指数法）：

$$e_{endi} = e_{0i} - C_c \times \log(p_{i+1} / p_i) \quad (9)$$

式中： C_c —— 压缩指数；
 p_i —— 第 i 级固结应力（kPa）；
 p_{i-1} —— 第 $i-1$ 级固结应力（kPa）；
 e_{0i} —— 每层软黏土模型 p_i 下的初始孔隙比；
 e_{endi} —— 第 i 级加载完成后的孔隙比（也是加载 p_{i+1} 前此层软黏土模型的初始孔隙比）。

d) 厚度变化：

$$H_{endi} = \frac{1 + e_{endi}}{1 + e_{0i}} H_{0i} \quad (10)$$

式中： H_{0i} —— 第 i 级加载前的土层初始厚度（mm）；
 H_{endi} ——第 i 级加载完成后的土层厚度（mm）（也是加载 p_{i+1} 前此层软黏土模型的初始厚度）。

e) 固结时间估算（双面排水）：

$$T_v = -\frac{4}{\pi^2} \ln(1 - \bar{U}_z) \frac{\pi^2}{8} \quad (11)$$

$$t_{vi} = \frac{T_v H_{dr}^2}{C_v} \quad (12)$$

式中： $\bar{U}_z$ —— 平均固结度；
 T_v —— 竖向固结时间因数；
 t_{vi} —— p_i 下所需要的固结时间；
 C_v —— 固结系数（视为常数）；
 H_{dr} —— 土层厚度（双面排水时，由土层中心分别向上下两方向排水， H_{dr} 应为土层厚度之半）。

T/SSC XXX-20XX

估算结果作为参考，实际固结时间以稳定判定条件为准。

5.4.5 模型箱与排水通道设置

5.4.5.1 模型箱清理

模型箱内壁粘贴橡胶膜，平整无褶皱。

5.4.5.2 底部排水层铺设

应在模型箱底部铺设厚度不小于 3cm 的排水砂，铺平压实，确保透水性均匀。

5.4.5.3 两侧砂带设置

宜在模型箱两侧内壁铺设排水砂带，与底部排水层连通。

5.4.5.4 滤纸铺设

在底部排水砂层表面铺设滤纸，滤纸边缘与模型箱内壁之间应采取密封措施，防止泥浆渗入排水砂层。

5.4.6 泥浆铺设

5.4.6.1 泥浆制备

根据 5.4.2 进行制备。制备好的泥浆应密封保存，存放时间不超过 24 h。使用前重新搅拌均匀。

5.4.6.2 分层铺设

将制备好的泥浆缓慢倒入模型箱，按 5.4.4.3 条估算的初始厚度控制每层铺设量，用刮板刮平表面，确保厚度均匀。

5.4.6.3 顶面处理

每层泥浆铺设完成后，在表面铺设一层定性滤纸，然后铺设 3cm 厚的排水砂作为顶面排水层。

5.4.6.4 传感器的布设

传感器按照 4.5.3.5 条规定进行布设。

5.4.7 预固结

5.4.7.1 分级预压

a) 初始加压：加压前布设竖向位移传感器和孔隙水压力传感器。若固结装置最小压力大于 1kPa，应先采用配重块预压不少于 6h；待竖向沉降和孔隙水压力均趋于稳定后，改用固结装置分级加压。

b) 逐级加载：固结装置分级加压，按表 2 规定的加载等级逐级施加荷载。每级荷载施加后，持续监测孔隙水压力和竖向位移，待两者均趋于稳定后，再施加下一级荷载。监测数据记入附录 A.6。

c) 卸载处理：预固结完成后，逐级卸载。每级卸载后监测竖向回弹和孔隙水压力恢复情况，待两者均趋于稳定后，再卸除下一级荷载。

5.4.8 模型逐层预固结

按 5.4.6 至 5.4.7 重复操作，逐层完成预固结直至设计总高度。

5.4.9 模型饱和

5.4.9.1 铺设顶面排水砂层后，将预固结后的模型箱安置于离心机吊篮内，采用水中沉积法饱和。

5.4.9.2 通过漏斗将纯水从低于土面 10cm 的高度缓慢注入模型箱，直至高出黏土层顶面 5cm。

5.4.9.3 静置浸泡 24h 以上，至无可见气泡逸出时，判定模型饱和完成。

5.4.10 离心机固结

5.4.10.2 离心机启动

T/SSC XXX-20XX

启动离心机，逐级提升加速度，每级加速度下持续监测孔隙水压力和地表竖向位移，待孔隙水压力消散速率和地表竖向沉降速率均趋于稳定后，再提升至下一级加速度。将监测数据记入附录 A. 7。

5.4.10.3 稳定判定

当离心机达到目标加速度后，持续监测孔隙水压力和位移，满足稳定条件后，判定模型固结完成，可进行后续动力试验。

5.5 试验数据处理

5.5.1 总则

试验所涉及的数据应包括土样物理力学指标、过程数据和分析结果。应系统记录、计算和整理的内容如下：

5.5.1.1 输入参数

- a) 土样基本物理指标：土粒比重 G_s 、塑限 w_L 、压缩指数 C_c 、固结系数 C_v 、渗透系数 k ；
- b) 泥浆设计参数初始含水率 w_0 、初始密度。

5.5.1.2 过程数据（试验中记录与观测）

- a) 预压固结过程：级荷载、稳定沉降量、稳定时间、稳定孔隙水压力；
- b) 离心固结过程：每级加速度 a 、对应稳定时间、最终沉降量、最终孔隙水压力分布。

5.5.1.3 分析结果（基于过程数据与理论计算）

- a) 预压阶段各荷载下的固结度；
- b) 模型最终状态参数：各土层（或取样点）的含水率、干密度、孔隙比。

5.5.2 应绘制以下曲线

- a) 预压沉降-时间曲线；
- a) 孔隙水压力消散曲线；
- c) 离心固结过程中加速度与沉降关系曲线。

5.6 模型质量检验与评价

5.6.1 检验项目与合格标准

检验项目	检验方法	备注
固结度 U	沉降法（无损）	以模型最终稳定沉降计算
饱和度 S_r	预埋孔压传感器验证	无损，对比实测与理论孔压
含水率均匀性	微损取样（钻孔后回填）或边缘取样	至少 9 个测点（3 层×3 水平）
干密度/孔隙比均匀性	与含水率同步取样计算	同一批样品
模型厚度偏差	钢直尺多点测量	无损

5.7 试验报告

5.7.1 试验基本信息

试验对象、试验名称、试验日期、试验人员、依据标准（GB/T 20001.4-2015、GB/T 50123—2019

T/SSC XXX-20XX

等)。

5.7.2 土样特性

土样名称、来源、物理力学指标（液限、塑限、土粒比重、压缩指数、固结系数等）。

5.7.3 试验设备

离心机型号、固结装置型号、传感器型号及校准情况、模型箱尺寸等。

5.7.4 制备参数

泥浆初始含水率、搅拌时间、分层厚度、加载等级及荷载值、排水通道设置情况、离心机加速度等级及停留时间等。

5.7.5 试验数据

预固结过程中的沉降量、孔隙水压力变化数据，离心机固结稳定数据，模型检验数据（含水率、干密度、孔隙比、固结度、饱和度）及统计结果。

5.7.6 关键数据曲线

固结时间 - 沉降曲线、固结时间 - 孔隙水压力曲线、加速度 - 沉降曲线等。

5.7.7 模型质量评价

固结度、饱和度、均匀性是否满足试验要求。

5.7.8 异常情况

试验过程中出现的异常现象及处理措施。

5.7.9 结论与建议

附录 A
(资料性附录)
试验过程数据记录表

A.1 标定数据与结果记录表

表 A.1 标定数据与结果记录表

试验编号：_____ 试验日期：年 月 日

砂样名称：_____ 试验人员：_____

砂样粒径范围（mm）：_____ 仪器校准情况：☐ 已校准 ☐ 未校准

最大干密度 ρ_{dmax} ：_____（g/cm³） 最小干密度 ρ_{dmin} ：_____（g/cm³）

序号	制样参数		落距 (mm)	总质量 (g)	标定 容器 质量(g)	砂样 质量 (g)	砂土干 密度（g/cm ³ ）	砂土相对密 实度 D_r	平均值 (%)
	出砂口 孔径 (mm)	水平移 动速度 (mm/s)							

A.2 传感器信息登记表

表 A.2 传感器信息登记表

传感器 编号	传感器 型号	测量物 理量	量程	精度/灵敏度	出厂 编号	最近校 准日期	有效 期限	布设位置	备注

注：测量物理量包括但不限于加速度、孔隙水压力、土压力、位移等。

A.3 标准砂制样过程数据记录表

表 A.3 砂土模型制备过程数据记录与核心性能汇总表

模型箱尺寸（长 × 宽 × 高，mm）：			分层厚度（cm）：			
饱和过程与效果评价	真空度 (MPa)	饱和时间 (h)	注水速度 (cm/h)	孔隙水压力测试值 (kPa)	孔隙水压力理论值 (kPa)	相对误差 (%)
测点 1						
测点 2						
测点 3						
.....						
模型检验数据	测点 编号	相对密实度 (%)	变异系数 (%)	饱和度 (%)	均匀性评价	
异常现象记录						
处理措施及结果						

注 1：“相对误差 (%)”的计算公式为： $|(\text{测试值} - \text{理论值})| / \text{理论值} \times 100\%$ 。该指标用于评价模型饱和效果的均匀性。

注 2：“饱和过程与效果评价”部分，每一行可记录一个孔隙水压力测点的数据。

A.4 黏性土物理力学指标测定表

表 A.4 黏性土物理力学指标测定表

试验编号：_____ 试验日期：年 月 日

土样名称：_____ 土样来源：_____

液限 w_L (%)	塑限 w_p (%)	塑性 指数 IP	土粒比重 G_s	压缩指数 C_c	固结系数 C_v (cm^2/s)	渗透系数 k (cm/s)
备注						

A.5 黏性土固结参数估算表

表 A.5 黏性土固结参数估算表

第____层		共____层								
预压应力 / kPa	C_c	H_{end} / mm	H_0 / mm	e_{end}	e_0	w_0 / %	C_v / ($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	T_v	H_{dr} / mm	t_v / h
p_1					填入固结前初始孔隙比	填入固结前初始含水率				
p_2										
p_3										
p_4										
p_5										
p_6										
p_7										
p_i		.....	.....	.....	.....	.....		.....	.....	.....
p_n		填入固结完成后的目标厚度								

注：表中符号含义见正文相关章节。

A. 6 黏性土预固结过程监测数据表

A. 6 黏性土预固结过程监测数据表

加载等级	加载压力 (kPa)	加载时间 (h)	沉降量 (mm)	沉降速率 (mm/h)	孔隙水压力 (kPa)	孔隙水压力消散速率 (kPa/h)	稳定状态
							☐ 稳定 ☐ 不稳定
							☐ 稳定 ☐ 不稳定
							☐ 稳定 ☐ 不稳定
							☐ 稳定 ☐ 不稳定
							☐ 稳定 ☐ 不稳定
卸载记录	卸载等级	卸载时间 (h)	回弹量 (mm)	回弹速率 (mm/h)	孔隙水压力恢复值 (kPa)	孔隙水压力恢复速率 (kPa/h)	回弹稳定状态
							☐ 稳定 ☐ 不稳定
							☐ 稳定 ☐ 不稳定
							☐ 稳定 ☐ 不稳定
							☐ 稳定 ☐ 不稳定
							☐ 稳定 ☐ 不稳定

A. 7 离心机固结过程监测数据表

表 A. 7 离心机固结过程监测数据表

离心机型号：_____ 目标加速度 (g)：						
加速度等级 (g)	停留时间 (h)	孔隙水压力 (kPa)	孔隙水压力消散速率 (kPa/h)	沉降量 (mm)	沉降速率 (mm/h)	稳定状态
						☐ 稳定 ☐ 不稳定
						☐ 稳定 ☐ 不稳定
						☐ 稳定 ☐ 不稳定
						☐ 稳定 ☐ 不稳定
						☐ 稳定 ☐ 不稳定
最终固结状态评价	☐ 合格 (U≥95%) ☐ 不合格					

A. 8 黏性土模型核心性能汇总表

表 A. 8 黏性土模型核心性能汇总表

T/SSC XXX-20XX

模型编号：_____ 制备日期：年 月 日

土样名称：_____ 试验人员：

模型尺寸（长×宽×高，mm）：_____

平均固结度 U (%)	平均含水率 (%)	饱和度 (%)	质量评价	备注
			☐ 合格 ☐ 不合格	

附录 B
(资料性附录)
试验报告范本

B.1 标准砂模型制备试验报告（范本）

表 B.1 砂土地基离心模型制备试验报告

章节	填写区（报告内容）
B.1.1 试验基本信息	试验名称：砂土地基离心模型制备（砂雨法） 试验日期：____年____月____日至____年____月____日 试验人员：____ 试验地点：____ 依据标准：GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》；本文件。
B.1.2 砂样特性	砂样名称：____砂样来源：____ 粒径范围：____mm ~ ____mm 最大干密度 ρ_{dmax} ：____g/cm ³ （依据 GB/T 50123—2019 测定） 最小干密度 ρ_{dmin} ：____g/cm ³ （依据 GB/T 50123—2019 测定）
B.1.3 试验设备	1. 砂雨装置 型号：____；出砂口径：____mm 2. 标定容器 规格（长×宽×高）：____mm 3. 测量仪器 • 传感器清单及校准信息：详见附录 A.2《传感器信息登记表》。 • 其他仪器（电子秤、标尺等）校准状态： ☐ 全部已校准 ☐ 部分未校准（说明：____）
B.1.4 制样参数	1. 核心参数 落距：____mm；水平移动速度：____mm/s；分层厚度：____cm；模型箱尺寸：____mm 2. 传感器布置概况 共布设____个传感器（类型及数量：____），具体位置详见附录 A.2。
B.1.5 试验结果	1. 核心性能数据：详见附录 A.7《标准砂模型核心性能汇总表》。 2. 均匀性评价 相对密度变异系数：____%，评价： ☐ 均匀 ☐ 基本均匀 ☐ 不均匀。 3. 饱和： ☐ 饱和 ☐ 饱和 3. 饱和效果评价（针对饱和模型） 各测点孔隙水压力相对误差：____% ~ ____%，平均____%。评价： ☐ 良好 ☐ 合格 ☐ 不合格。
B.1.6 异常现象	异常现象描述 可能原因 处理措施 处理结果
B.1.7 结论与签字	试验结论： ☐ 制备的砂土离心模型各项指标符合本文件要求，质量合格，可用于后续试验。 ☐ 模型制备不合格，原因：____。 签字确认： 试验人员：____日期：____年____月____日 审核人员：____日期：____年____月____日

B.2 黏性土地基离心模型制备试验报告（范本）

表 B.2 黏性土地基离心模型制备试验报告

章节	填写区（报告内容）
B.2.1 试验基本信	试验名称：饱和黏性土地基离心模型制备（分层预压与机载联合法） 试验日期：____年____月____日至____年____月____日

息	试验人员：____ 试验地点：____ 依据标准：GB/T 20001.4-2015《标准编写规则 第4部分：试验方法标准》；GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》；本文件。
B.2.2 土样特性	土样名称：____ 土样来源：____ 物理力学指标：详见附录 A.3《黏性土物理力学指标测定表》。 液限 w_L ：____%；塑限 w_p ：____%；土粒比重 G_s ：____；压缩指数 C_c ：____； 固结系数 C_v ：____；渗透系数 k ：____
B.2.3 试验设备	1. 主要设备 • 离心机型号：____；目标加速度：____g • 固结装置型号：____ • 模型箱尺寸：____ mm 2. 测量系统 • 传感器清单及校准信息：详见附录 A.2《传感器信息登记表》。
B.2.4 制备参数	1. 泥浆制备 初始含水率：____%；搅拌时间：____ h 2. 分层预压 分层厚度：____ cm；加载等级及荷载值：详见附录 A.4 记录。 3. 离心机固结：加速度等级及停留时间：详见附录 A.5 记录。
B.2.5 试验数据	1. 过程监测数据 • 预固结过程：详见附录 A.4《黏性土预固结过程监测数据表》。 • 离心机固结过程：详见附录 A.5《离心机固结过程监测数据表》。 2. 模型检验数据 • 核心性能统计结果：详见附录 A.8《黏性土模型核心性能汇总表》。
B.2.6 试验曲线	应附以下曲线图（作为本报告附图）： 1. 固结时间-沉降量曲线 2. 固结时间-孔隙水压力消散曲线 3. 离心加速度-沉降量曲线 （注：曲线图应编号，如“图 C.1”，并配有图题和必要的说明。）
B.2.7 质量评价	1. 固结度：平均____%， ☐ $\geq 95\%$ ☐ $< 95\%$ 2. 饱和度：平均____%， ☐ $\geq 95\%$ ☐ $< 95\%$ 3. 均匀性（基于检验数据）： ☐ 均匀 ☐ 基本均匀 ☐ 不均匀 总体评价： ☐ 满足试验要求 ☐ 不满足试验要求
B.2.8 异常情况	异常现象描述 可能原因 处理措施 处理结果
B.2.9 结论与建议	试验结论： ☐ 制备的饱和黏性土离心模型各项指标符合本文件要求，质量合格，可用于后续试验。 ☐ 模型制备不合格，主要原因：____。 建议：____ 签字确认： 试验人员：____ 日期：____年____月____日 审核人员：____ 日期：____年____月____日

参 考 文 献

- [1] GB/T 1.1—2020 标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则[S].
- [2] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].
- [3] GB/T 20001.4—2015 标准编写规则 第4部分：试验方法标准[S].
- [4] DL/T 5102—2013 土工离心模型试验技术规程[S].
- [5] JTS/T 231-7—2013 港口工程离心模型试验技术规程[S].