



T/CECS -

中国工程建设标准化协会标准

螺旋板载荷试验标准

Technical standard for screw plate load test

中国 XX 出版社

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2021 年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字（2021）20 号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本标准。

本标准共分 8 章和 5 个附录，主要技术内容包括：总则、术语与符号、基本规定、设备、设备标定、现场试验、资料整理和成果应用等。

本标准的某些内容可能直接或间接涉及专利，本标准的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由中国工程建设标准化协会勘测专业委员会归口管理，由中国铁路设计集团有限公司负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给中国铁路设计集团有限公司（地址：天津市自贸试验区（空港经济区）东七道 109 号，邮编：300308）。

主编单位：中国铁路设计集团有限公司

参编单位：上海勘察设计研究院（集团）有限公司

中交公路规划设计院有限公司

黄河勘测规划设计研究院有限公司

东南大学

中国科学院武汉岩土力学研究所

安徽建筑大学

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总则.....	1
2 术语与符号.....	2
3 基本规定.....	4
4 设备.....	5
4.1 加载系统.....	5
4.2 测试系统.....	6
5 设备标定.....	9
5.1 一般规定.....	9
5.2 压力传感器的标定.....	9
5.3 位移传感器的标定.....	11
6 现场试验.....	14
6.1 一般规定.....	14
6.2 试验准备.....	14
6.3 试验方法.....	15
6.4 试验要点.....	17
6.5 数据采集.....	17
7 资料整理.....	19
7.1 测试数据处理.....	19
7.2 特征值的确定.....	20
8 成果应用.....	23
8.1 地基承载力的确定.....	23
8.2 地基土力学指标的计算.....	24
附录 A 深层无缆螺旋板载荷试验系统.....	27
附录 B 压力传感器的率定表.....	29
附录 C 位移传感器的率定表.....	30
附录 D 螺旋板载荷试验现场记录表.....	31
附录 E 螺旋板载荷试验成果表.....	34
附录 D 螺旋板载荷试验现场记录表.....	错误!未定义书签。
附录 E 试验成果表.....	错误!未定义书签。
用词说明.....	35
引用标准名录.....	36

Contents

1	General provisions	错误!未定义书签。
2	Terms and symbols	错误!未定义书签。
3	Basic requirements.....	错误!未定义书签。
4	Equipments.....	错误!未定义书签。
4.1	Loading system.....	错误!未定义书签。
4.2	Test system.....	错误!未定义书签。
5	Sensor calibration	9
5.1	Rules.....	错误!未定义书签。
5.2	Pressure sensors calibration.....	错误!未定义书签。
5.3	Displacement sensors calibration.....	错误!未定义书签。
6	Field test.....	错误!未定义书签。
6.1	Rules.....	错误!未定义书签。
6.2	Test preparation.....	错误!未定义书签。
6.3	Test method	错误!未定义书签。
6.4	Test points.....	错误!未定义书签。
6.5	Data acquisition.....	错误!未定义书签。
7	Data process.....	错误!未定义书签。
7.1	Raw data processing	错误!未定义书签。
7.2	Characteristic value	错误!未定义书签。
8	Data application	错误!未定义书签。
8.1	Bearing capacity of foundation	错误!未定义书签。
8.2	Soil mechanical index.....	错误!未定义书签。
Appendix A Uncabled deep screw plate loading test system.....		错误!未定义书签。
Appendix B Rating table of pressure sensors.....		错误!未定义书签。
Appendix C Rating table of displacement sensors		错误!未定义书签。
Appendix D Record sheet of screw plate loading test.....		错误!未定义书签。
Appendix E Test results table		错误!未定义书签。
Word explanation.....		错误!未定义书签。
List of quoted standards.....		错误!未定义书签。

1 总 则

1.0.1 为规范岩土工程勘察中螺旋板载荷试验方法，做到安全适用、技术先进、经济合理、成果准确可靠，制定本标准。

1.0.2 本标准适用于岩土工程勘察中确定地基土的承载力、压缩模量及不排水抗剪强度等物理力学参数所进行的螺旋板载荷试验。

1.0.3 螺旋板载荷试验除应执行本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语与符号

2.1 术 语

2.1.1 螺旋板载荷试验 screw plate loading test (SPLT)

将规定螺距的单片螺旋形承压板（简称螺旋板）旋入地层中预定深度，通过传力杆件向螺旋板逐级施加荷载，直至地基出现破坏状态或接近破坏状态，同时测记在各级荷载下地基随时间而沉降变形的试验方法。

2.1.2 临塑压力 temporary plastic pressure

为 p - s 曲线前直线段终点压力，相当于土的临塑压力或结构强度。

2.1.3 极限压力 limit pressure

为 p - s 曲线后直线段起点压力。

2.1.4 容许承载力 allowable bearing capacity

确保地基不产生剪切破坏而失稳，同时又保证建筑物的沉降不超过允许值的最大荷载（强度）。

2.1.5 极限承载力 ultimate bearing capacity

地基能承受的最大荷载强度。

2.1.6 地基承载力特征值 characteristic value of subsoil bearing capacity

由载荷试验测定的地基土压力变形曲线线性变形段内规定的变形所对应的压力值。

2.1.7 基床系数 coefficient of subgrade reaction

文克尔假设中压力与沉降的比例系数，又称基床反力系数或文克尔系数。

2.2 符 号

2.2.1 螺旋板载荷试验参数

d —承压板直径或边长；

D_{sc} —螺旋承压板直径（cm）；

N —加荷级数；

p —承压板单位面积上所受的壓力；

p_0 —原位有效自重壓力（kPa）；

p_f —臨塑壓力；

p_L —極限壓力；

s —測試的沉降量；

s_n —採用外推法確定的第 n 級荷載下沉降達到相對穩定標準時的沉降量；

t_n —採用外推法確定的第 n 級荷載下沉降達到相對穩定標準時所需時間；

t_w —沉降速率達到相對穩定標準的時間增量（ $t_w=60\text{min}$ ）；

s_w —沉降速率達到相對穩定標準的沉降增量（ $s_w=0.1\text{mm}$ ）；

t_{90} —固結度達 90% 所需時間。

a_n —第 n 級荷載下 $s-\ln t$ 曲線上的截距；

β_n —第 n 級荷載下 $s-\ln t$ 曲線上的斜率。

2.2.2 土性參數

C_h —徑向固結係數（ cm^2/s ）；

c_u —不排水抗剪強度；

E_{sc} —螺旋板荷載試驗土的壓縮模量；

ν —泊松比。

2.2.3 地基參數

f_{ak} —地基承載力特徵值；

K_{va} —螺旋板荷載試驗基床係數（ kN/m^3 ）；

K_{v1} —螺旋板荷載試驗基準豎向基床係數（ kN/m^3 ）；

p_u —地基極限承載力。

3 基本规定

3.0.1 螺旋板载荷试验适用于测试深层地基土或地下水位以下不同深度处的黏性土、粉土、砂土及风化岩的承载力和变形模量等参数。

3.0.2 螺旋板载荷试验应布置在场地有代表性的位置，不同地层应进行分层试验；同一地层螺旋板载荷试验数量不宜少于 3 个，土体不均匀时，应适当增加试验点数量。

3.0.3 螺旋板载荷试验同一试验孔在垂直方向上的试验点应在了解地层剖面后布置。同一试验孔在垂直方向上的试验点应结合土层变化和均匀性布置，试验点间距宜为 1.00m，特殊情况不应小于 0.75m；当土质均匀、厚度较大时，试验点间距可适当增加，但应不大于 3.00m。

3.0.4 螺旋板载荷试验孔附近已有其他勘探孔时，应距原勘探孔 30 倍探头直径以上；对比试验时，测试孔间距不宜大于 2m。

3.0.5 螺旋板载荷试验时应保持螺旋板下试验地层的原状结构和天然湿度。

3.0.6 螺旋板载荷试验使用的千斤顶、载荷传感器、压力表或压力传感器、百分表或位移传感器等仪表应定期进行检验和标定。试验所用的仪器设备必须在计量检定或校准周期的有效期内。

3.0.7 螺旋板载荷试验方法有应力法和应变法，应力法应采用沉降相对稳定法，有地区经验时，可采用沉降非稳定法。

3.0.8 螺旋板载荷试验加荷、卸荷应分级进行。加荷等级应将预估的极限压力分为 8 级~12 级，最大加荷量应使试验地层达到破坏；每级卸荷量为加荷分级荷载的 2 倍；当加荷等级为奇数时，第一级卸荷量可取分级荷载的 3 倍。

3.0.9 螺旋板载荷试验过程中，现场应对原始数据进行检查、核对，绘制荷载与沉降 ($p-s$) 曲线草图，及时了解试验情况。按本标准附录 D 的格式记录。

4 设 备

4.1 加载系统

4.1.1 螺旋板载荷试验加载系统由螺旋承压板、传力杆、加卸荷装置、反力系统组成。

4.1.2 螺旋承压板应符合下列要求：

- 1 应采用耐腐蚀、耐磨损的钢质或铸铁材料制造，有足够的强度和刚度，其表面粗糙度不宜大于 $12.5\mu\text{m}$ ；表面光滑，无碰伤和制造缺陷；
- 2 螺旋承压板结构见图 4.1.1，其规格和几何尺寸应符合表 4.1.1 的规定；

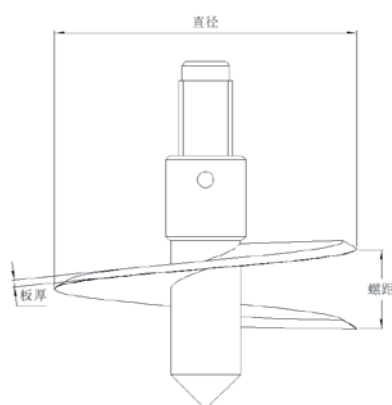


图 4.1.1 螺旋承压板的结构示意图

表 4.1.1 螺旋承压板规格和几何尺寸

直径 (mm)	113	160	252
承压板投影面积 (cm^2)	100	200	500
螺距 (mm)	25	40	60
板厚 (mm)	≤ 2.8	≤ 4.0	≤ 6.3

3 应根据土层的软硬程度选用不同规格的螺旋承压板，软土可选用 500cm^2 的螺旋承压板，软塑黏性土可选用 200cm^2 的螺旋承压板，可塑黏性土及密实砂土可选用 100cm^2 的螺旋承压板。

4.1.3 传力杆采用探杆，或者探杆、套管组合系统，应符合下列要求：

- 1 应采用高强度无缝管材，不得有裂纹和损伤；
- 2 其屈服强度不宜小于 600MPa ，工作截面尺寸必须与加荷装置的额定加荷载力相匹配；
- 3 传力杆平直，弯曲度不得大于 0.05% ；

- 4 与接头的连接应具有良好的互换性；
- 5 圆柱形螺纹连接的传力杆，拧紧后丝扣之根、肩应能密贴；锥形螺纹连接的探杆，连接后不得有晃动现象；
- 6 传力杆采用探杆、套管组合系统，除满足上述要求，还应符合下列要求：
 - 1) 探杆、套管规格应与螺旋板载荷试验探头总成规格相匹配；
 - 2) 采用内置导线特制探杆时，探杆需具有较强的防水性能，耐水压不得小于 20MPa；探杆连接处要做好防水、防尘保护；要确保探杆间的电气连接。

4.1.4 加卸荷装置采用千斤顶，应符合下列要求：

- 1 千斤顶的各部件灵活，无损伤；
- 2 千斤顶的额定量程应大于预计极限载荷的 1.5 倍；
- 3 千斤顶的行程不小于 110mm。

4.1.5 反力系统可使用压重平台、地锚、反力梁或斜撑装置等，应符合下列要求：

- 1 采用压重平台提供反力时，总堆载量不应小于最大加荷量的 1.5 倍，堆载应在试验前一次加足，并均匀稳固地放置于平台上，应对加荷反力装置的主要受力构件和压重平台支墩下的地基土进行强度和变形验算。压重平台支墩施加于地基土的压力不应大于地基土承载力特征值的 1.3 倍；
- 2 采用地锚提供反力时，地锚的总抗拔力应大于最大荷载的 1.5 倍，且每个地锚的反力应基本相等；
- 3 使用反力梁时，其刚度应与千斤顶量程相匹配；
- 4 采用斜撑装置或平硐顶板提供反力时，坑壁或平硐顶板应稳固，可提供的反力应大于最大加荷的 1.5 倍。

4.2 测试系统

4.2.1 螺旋板载荷试验测试系统由测力装置、沉降观测装置、电缆线组成。

4.2.2 测力装置由载荷探头和测力仪器组成，应满足下列要求：

- 1 载荷探头采用电阻应变式时，并应满足下列要求：
 - 1) 在额定载荷作用下，载荷探头精度应符合表 4.2.1 的要求；

表 4.2.1 载荷探头精度

误差类型	精度要求	误差类型	精度要求
非线性误差	$\leq 0.5\%FS$	滞后误差	$\leq 0.5\%FS$
重复性误差	$\leq 0.5\%FS$	归零误差	$\leq 0.5\%FS$

- 2) 最大加载压力不应大于额定压力的 1.5 倍;
- 3) 具有良好的防水性能, 静水压力为 200kPa 时, 在 150h 内探头桥路绝缘电阻应大于 300M Ω ;
- 4) 传感器标定与工作环境温度的差值不宜大于 20 $^{\circ}C$

2 测力装置采用芯片数字化处理技术时, 模数转换器应满足下列要求:

- 1) 分辨率不应低于 16 位;
 - 2) 采样频率不应低于 1Hz。
- 3 测力装置有效最小分度值应小于 0.06%FS, 测力误差应不大于 $\pm 0.5\%FS$;
 - 4 测力装置标定应符合 5.2 要求。

4.2.3 沉降观测装置可采用百分表或其他位移传感器及配套仪器, 应满足下列要求:

- 1 一般要求量程 0~30mm, 特殊要求可配 0~50mm;
- 2 测量误差应不大于 $\pm 0.1\%FS$, 分辨力不低于 0.01mm;
- 3 当百分表或位移传感器不能居中置于载荷轴心时, 所用百分表或位移传感器不得少于 2 只;
- 4 位移传感器及配套仪器标定应符合 5.3 要求。

4.2.4 当量测仪器深入地下, 在试验点位附近进行量测时, 应满足下列要求:

- 1 要保证量测仪器封装的气密性, 防尘、防水, 保障仪器正常工作;
- 2 量测仪器电池续航不宜小于 72 小时。

4.2.5 采用深层无缆螺旋板载荷试验探头总成进行载荷、沉降一体量测时, 需与相关仪器设备进行配套使用, 总成规格详见附录 A, 压力传感器标定应符合 5.2 要求, 位移传感器标定应符合 5.3 要求。

4.2.6 自动化测试系统宜包括载荷、位移测量传感器、伺服加荷装置、数据采集装置、数据传输和相关供电设置等自动化测试装置, 以及数据管理和数据发布系统。自动化测试应符合下列规定:

- 1 自动化测试装置应能在温差大、潮湿、电磁干扰、震动等不利条件下连

续稳定运行；

- 2 自动化系统供电系统应包含备用电源，稳压装置、防雷设施；
- 3 试验前应对仪器及传感器检查调试，试验过程中应加强检查；
- 4 实施自动化监测应具备自校或人工校核措施，宜建立人工监测体系，确保自动化设备发生故障时能获取测试值；
- 5 数据采集装置宜具备足够存储空间，宜同时具备无线和有线数据采集功能，采集的原始数据应及时导出备份并加以保护；
- 6 自动化测试装置的数据管理和数据发布系统应基于通用的操作环境，具有图文并茂的用户界面，以及随计算机操作环境和系统工具软件的版本升级而更新等功能。

4.2.7 所用仪器仪表都应具备调零复位功能。

4.2.8 所用仪器仪表应能在 $-10^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ 的环境中正常工作。

4.2.9. 仪器仪表预热后其时漂应小于 $0.1\%\text{FS}/\text{h}$ 、温漂应小于 $0.01\%\text{FS}/^{\circ}\text{C}$ 。

4.2.10 试验所用仪器仪表应定期按有关规定进行检校和标定。

4.2.11 电缆线应采用屏蔽电缆，屏蔽网合理接地，且有良好的防水性和绝缘性，绝缘电阻不应小于 $500\text{M}\Omega$ ，接头处应密封，表皮破损的电缆不得使用。

5 设备标定

5.1 一般规定

5.1.1 螺旋板载荷试验传感器标定包括压力传感器和位移传感器的标定。未经标定的，严禁在生产中使用，亦不得事后补做标定。使用中发现测试数据异常，应及时重新标定。

5.1.2 传感器标定宜在实际工作相近温度下进行，应连同实际使用的仪器一起参加标定。

5.1.3 传感器标定宜采用压力、位移联合标定架，标定架应符合下列要求：

- 1 传感器标定达到满量程时，标定架的各部杆件稳定；
- 2 标定架作为力的传递机构，其力的传递误差应小于 0.5%；
- 3 在工作状态下，标定架的压力作用线应与被标定的传感器组同轴，其同轴度公差为 $\phi 0.5\text{mm}$ 。

5.1.4 用于传感器标定的计量设备，包括标准测力仪、百分表等，必须按国家计量管理规定定期送计量部门鉴定并取得合格证。计量设备的要求如下。

表 5.1-2 计量设备性能要求

项目	标准测力仪	百分表
外观	合格	合格
分辨力	1kN	0.01mm
测量范围	0-60kN	0-100mm

5.1.5 标准测力仪精度不得低于Ⅲ等标准测力计的精度，其公称量程不宜大于探头额定量程的 2 倍。

5.1.6 百分表示值漂移量、最大允许误差、回程误差等满足计量检定标准要求，其公称量程不宜大于探头额定量程的 1.2 倍。

5.2 压力传感器的标定

5.2.1 压力传感器的标定方法按固定桥压法：固定仪器的供桥电压，标定施加于探头的荷载与仪表输出值之间的对应关系。

5.2.2 用固定桥压法标定探头时，应符合下列要求：

- 1 在固定的供电桥压下，对探头加荷和卸荷应逐级进行。每级荷载增量可

取探头最大加载量的 1/10~1/7;

2 每级加荷或卸荷均应记录仪表输出值;

3 每次标定, 其加、卸荷不得少于 3 个循环。压力传感器与顶柱或传力垫可以相对转动的探头, 每加、卸荷一个循环后, 应转动顶柱或传力垫 90°~120°, 再进入下一个加、卸荷循环过程。

5.2.3 在分级加荷(或卸荷)过程中, 当出现加荷(或卸荷)过量时, 应将荷载恢复到预定荷载的前一级荷载, 再加(或卸)至预定荷载。

5.2.4 压力传感器标定系数应按下列公式计算:

$$\xi = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i P_i) / \left[A \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i)^2 \right] \quad (5.2.4-1)$$

$$\bar{x}_i = (x_i^+ + x_i^-) / 2 \quad (5.2.4-2)$$

式中: ξ ——标定系数;

P_i ——第 i 级荷载 (kN);

A ——探头的工作面积 (cm²);

$\bar{x}_i$ ——第 i 级荷载下, 仪表的平均输出值;

x_i^+ ——第 i 级荷载加上后, 仪表的输出值;

x_i^- ——卸至第 i 级荷载时, 仪表的输出值。

5.2.5 压力传感器各项检测误差计算, 应符合下列要求:

1 由式 (5.2.5-1) 确定的直线可定为“最佳直线”;

2 探头的检测误差统一采用极差值, 以满量程输出值的百分数表示, 见图 5.2.5;

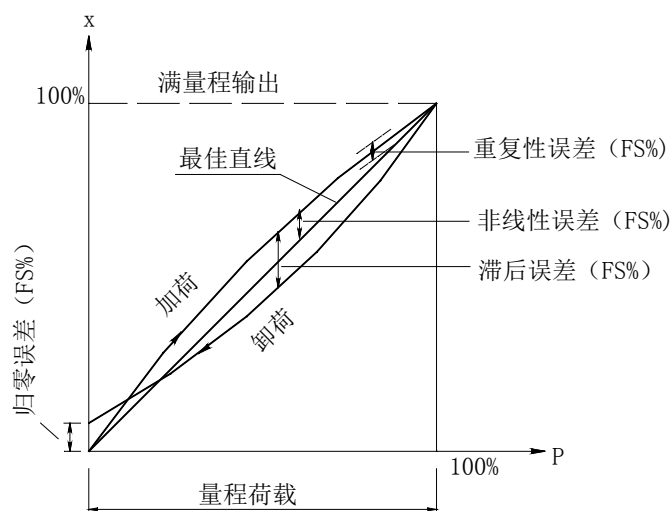


图 5.2.5 探头标定曲线及其误差

3 按公式 (5.2-1~4) 计算探头的各项误差:

$$\text{非线性误差 } \delta_1 = \frac{|x_i^{\pm} - \bar{x}_i|_{\max}}{FS} \times 100\% \quad (5.2.5-1)$$

$$\text{重复性误差 } \delta_r = \frac{(\Delta x_i^{\pm})_{\max}}{FS} \times 100\% \quad (5.2.5-2)$$

$$\text{滞后误差 } \delta_s = \frac{|x_i^{+} - x_i^{-}|_{\max}}{FS} \times 100\% \quad (5.2.5-3)$$

$$\text{归零误差 } \delta_0 = \frac{|x_0|}{FS} \times 100\% \quad (5.2.5-4)$$

式中: $x_i^{\pm}$ —— 加荷 (或卸荷) 至第 i 级荷载时仪表的输出值;

$\Delta x_i^{\pm}$ —— 重复加荷 (或卸荷) 至第 i 级荷载时仪表输出值的极差;

x_0 —— 卸荷归零时仪表的平均不归零值;

FS —— 在额定荷载下仪表的满量程输出值。

5.2.6 压力传感器满足下述条件应判定为合格, 反之则不合格: 非线性误差、重复性误差、滞后误差和归零误差均小于 0.5%FS, 总误差小于 1.0%FS。

5.3 位移传感器的标定

5.3.1 位移传感器的标定方法按接触式直接法测量, 可参照国家计量检定标准相关要求执行。

5.3.2 当位移传感器采用数显式百分表时,示值漂移量应满足如下要求:开机后,将示值设定在任一数值上,至少每 0.5h 读数一次,取 1h 内示值最大漂移量;示值漂移量应不大于 0.01mm/h。

5.3.3 位移传感器示值误差应按下列公式计算:

$$\delta_i = L_i - L_s \quad (5.3.3-1)$$

式中: δ_i ——示值误差;

L_i ——位移传感器示值;

L_s ——百分表示值。

5.3.4 用百分表标定位移传感器时,应符合下列要求:

- 1 位移传感器移动方向与百分表移动方向应成一条直线或平行;
- 2 调整位移传感器至合适位置,置零后开始测量,(0~10)mm 测量段内,每隔 0.2mm 测量一点,(10~100)mm 测量段内,每隔 2mm 测量一点,直至测量范围终点,然后继续压缩位移传感器 0.2mm,再反方向测量各受检点,直至回到零位;
- 3 在测量过程中,中途不得改变移动方向,也不得对仪器设备做任何的调整;
- 4 任意 0.2mm 示值误差由正行程所有 0.2mm 间隔的受检点中的相邻误差的最大值确定;任意 2mm 示值误差由正行程所有 2mm 间隔受检点中的相邻误差的最大值确定;
- 5 全量程示值误差由正行程中所有受检点中的误差最大值与最小值之差确定;
- 6 测量完后,取正、反行程同一受检点误差值之差的极大值作为受检表的回程误差。

5.3.5 位移传感器合格标准判定。

位移传感器满足下述条件应判定为合格,反之则不合格:

表 5.3.5 位移传感器合格标准

测量范围上限 S	示值最大允许误差 (绝对值)				回程误差
	任意 0.2mm	任意 1mm	任意 2mm	全量程	
$10 < S \leq 30$	0.01	0.02	-	0.03	0.01
$30 < S \leq 100$	0.01	-	0.02	0.03	0.01

注:任意 0.2mm 是指(0~0.2)mm, (0.2~0.4)mm,, (9.8~10)mm 等一系列 0.2mm 测量段。

任意 1mm 是指(0~1)mm, (1~2)mm,, (9~10)mm 等一系列 1mm 测量段。

任意 2mm 是指(10~12)mm, (12~14)mm,, (98~100)mm 等一系列 2mm 测量段。

6 现场试验

6.1 一般规定

6.1.1 试验点的选择应根据建筑特点、基础埋深、技术要求、地基土条件及勘察阶段等因素综合确定，并符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021的有关规定。

6.1.2 螺旋板载荷试验现场作业安全管理应符合现行国家标准《岩土工程勘察安全标准》GB/T50585的有关规定。

6.2 试验准备

6.2.1 试验前，应检查以下试验仪器设备是否符合要求：

1 检查测试仪器、传感器是否配套，工作性能及灵敏度，传感器标定记录应在有效期内；

2 检查螺旋板的规格、几何尺寸、刚度是否符合设计要求，板面是否光滑，有无损伤；

3 检查千斤顶、传力杆等设备的规格、完好性。

6.2.2 将螺旋板的方樨插入压力传感器下端的方孔中，上下活动自如后，用一根约 $\Phi 3\text{mm}$ 的软金属丝插入连接好的销孔中，使螺旋板与传感器连成一体。

6.2.3 根据场地情况，选择合适的反力装置，平整场地、安装反力装置及相应的组装件，加压装置应保证竖直，测量装置托板均应保证水平。

6.2.4 螺旋板载荷试验的设备安装应符合下列要求：

1 调整好传力杆顶部至荷载横梁的垂直距离，使其恰好能安装千斤顶、顶座等部件，千斤顶的作用力中心应与传力杆在同一铅锤线上；

2 采用两台或两台以上千斤顶加荷时，应并联同步工作；千斤顶型号、规格应相同；

3 沉降测量仪表安装不应少于两个，应在传力杆垂直方向对称安装；

4 采用深层螺旋板载荷试验探头总成时，应符合下列要求：

1) 应在地上用夹板卡紧套管，夹板下应垫木板或枕木等以确保稳定；

2) 套管管口与探杆之间应放置两半瓦导向套；

- 3) 沉降测量仪垂直对称安装在套管上;
- 4) 地面最上部一根探杆应套装侧开口尼龙套, 下部与套管上端紧贴, 利用不锈钢喉箍来调节紧固力, 使探杆的重量与尼龙套箍紧产生摩擦力相等。

6.2.5 螺旋板旋入土中应符合下列要求:

- 1 使用人力或机械力将螺旋板头旋入土层中时, 应每转一圈下入一个螺距, 尽可能减小对土体的扰动程度, 并保持传力杆垂直, 直到试验深度;
- 2 当使用深层螺旋板载荷试验探头总成时, 应旋转套管, 由套管带动探杆和螺旋板板头旋入, 并保持每转一圈下入一个螺距;
- 3 当在钻孔中进行螺旋板载荷试验时, 钻孔钻进时应在距离试验深度 20~30cm 处停钻, 清除孔底受压或受扰动土层。螺旋板头入土时, 应符合 6.2.6.1 要求。

6.3 试验方法

6.3.1 根据加荷方式不同, 螺旋板载荷试验方法可分为应力法和应变法(等沉降速率法), 应力法包括慢速法(沉降相对稳定法)和快速法(沉降非稳定法)。试验方法选择应符合下列规定:

- 1 测定和计算地基土的变形模量、固结系数及承载力时, 应采用慢速法试验, 慢速法主要用于饱和软黏性土及对变形有明确要求的建筑物;
- 2 仅需测定地基承载力时, 可使用快速法试验, 快速法一般适用于可塑~坚硬状黏性土、粉土、砂土及全风化岩;
- 3 测定地基土不排水抗剪强度和不排水模量时, 可采用应变法, 应变法适用于土质相对较软或以塑性变形为主的土体。

6.3.2 采用应力法, 施加荷载 p 后, 应按时观测相应实测沉降量 s' 。每级荷载下的沉降观测时间 t 及其稳定标准和试验终止条件应符合下列规定:

1 慢速法

自加荷开始接 5 min、5 min、10 min、10 min、15 min、15 min 间隔, 以后每隔 30min 记录沉降一次, 直至连续 2h 内 1h 的沉降量小于 0.1 mm 时, 可施加下一级荷载;

2 快速法

每施加一级荷载后，隔 15 min 观测一次沉降，累积观测达 2h 时，再施加下一级荷载。

6.3.3 采用应变法，以控制承压板等沉降速率来控制加载速率，连续加载，直至试验达到破坏状态，并同时按等沉降量间隔测记所施加的荷载。加载速率及测读压力标准应符合下列规定：

1 对灵敏度高的压缩性软黏土宜采用 0.25~0.50mm/min 加荷速率，每下沉 0.25mm 测读压力一次；

2 对一般黏性土、软黏土可采用 0.50~1.00mm/min 加荷速率，每下沉 0.50mm 测读压力一次；

3 对中低压缩性砂类土、粉土可采用 1.00~2.00mm/min 加荷速率，每下沉 1.00mm 测读压力一次。

6.3.4 试验荷载应分级施加，加荷等级不应小于 8 级，最大加载量不宜小于荷载设计值的 2 倍。施加荷载时应保持静力条件及荷载对承压板中心的竖向传递。各级荷载增量应按下列方法确定：

- 1 加压开始前，要确保地基土受到的荷载等于上覆土的有效自重压力；
- 2 后续各级荷载增量可取预估极限荷载的 1/7 ~ 1/10；当极限荷载不易估计时，可按表 6.3.4 取值。

表 6.3.4 荷载增量取值

试验土层及特性	荷载增量 (kPa)
淤泥、流塑黏性土、松散砂土	<15
软塑黏性土、新近沉积黄土、稍密粉土与砂土	15~25
可塑~硬塑黏性土、新黄土 (Q ₄)、中密粉土与砂土	25~50
坚硬黏性土、密实粉土与砂土、老黄土、新黄土 (Q ₃)	50~100
风化岩	100~200

6.3.5 出现下列情况之一时，可终止试验：

- 1 荷载增加不大，沉降急骤增大，荷载-沉降曲线出现陡降段；
- 2 在某级荷载下，24h 沉降速率不能达到稳定标准 (<0.1mm/h)；
- 3 相对沉降值 $s/b > 0.10$ ；
- 4 当持力层土层坚硬，沉降量很小时，总加荷量已达到设计值的 2 倍及以

上。

6.3.6 当需观测卸荷回弹时，每级卸荷量可取每级加荷量的 2 倍或 3 倍，每级卸荷后每隔 15min 观测一次回弹量，1h 后再卸下一级荷载，荷载全部卸除后宜继续观测 2~3h。

6.4 试验要点

6.4.1 一般应在静力触探了解地层剖面后布置试验点，同一试验孔在垂直方向上的试验点间距宜为 1m，特殊情况下，不应小于 0.75m，土质均匀、厚度较大时，点间距可取 2~3m。

6.4.2 使用电测仪表，需按规定预热、调零，然后量测。仪器应置于干燥地点，严禁曝晒与碰撞。

6.4.3 测量某级荷载条件下的沉降时，应保证荷载稳定，可人工稳压或使用伺服千斤顶。

6.4.4 当试验深度超过 10m 时，应采用消除传力杆变形影响的沉降测量方法。

6.4.5 当土体破坏后，卸除加荷和沉降观测装置，再将螺旋板旋至下一个预定深度进行试验。

6.4.6 试验孔测试完成后，将传力杆和传感器拔出地面，弃螺旋板于孔内。

6.5 数据采集

6.5.1 螺旋板载荷试验测试数据的采集包括人工读数采集和自动数据采集。

6.5.2 人工读数采集应符合下列规定：

1 根据不同的试验方法，选用相应的记录表，可参考本标准附录 D，对工程名称、工点名称、试验位置（里程或坐标）、试验深度、试验地层、承压板参数、仪器型号等进行记录；

2 根据不同的试验方法的观测记录标准，对观测时间、荷载及沉降值实时记录，不得后补。

6.5.3 自动数据采集应符合下列规定：

1 自动数据采集装置应能在温差大、潮湿、电磁干扰、震动等不利条件下连续稳定运行；

- 2 自动数据采集装置应包含备用电源，稳压装置、防雷设施；
- 3 宜建立人工监测体系，确保自动化设备发生故障时能获取测试值；
- 4 自动数据采集装置宜具备足够存储空间，宜同时具备无线和有线数据采集功能；
- 5 自动数据采集装置的数据管理和数据发布系统应基于通用的操作环境，具有图文并茂的用户界面，以及随计算机操作环境和系统工具软件的版本升级而更新等功能。

7 资料整理

7.1 测试数据处理

7.1.1 螺旋板载荷试验数据应进行检查、校对及修正，整理荷载 p 与沉降值 s 、时间 t 与沉降值 s 汇总表，绘制 $p-s$ 曲线，必要时绘制 $s-t$ 或 $s-\lg t$ 等曲线。

7.1.2 沉降相对稳定法（慢速法）资料整理应符合下列要求：

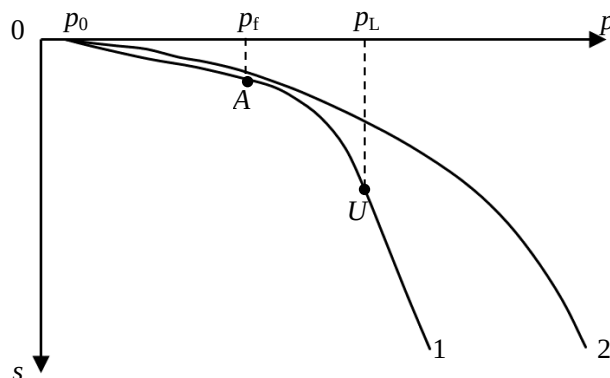


图 7.1.2 荷载-沉降曲线

根据数据绘制 $p-s$ 曲线（图 7.1.2），必要时可绘制 $\lg p-\lg s$ 、 $p-\Delta s/\Delta p$ (Δp 为荷载增量， Δs 为沉降增量)、 $s-\sqrt{t}$ 或 $s-\lg t$ 等曲线。

7.1.3 沉降非稳定法（快速法）资料整理应符合下列要求：

1 按外推法推算出各级荷载下沉降速率达到慢速法相对稳定标准时所需要的时间和相应的沉降；

1) 沉降速率达到相对稳定标准时所需要的时间应按下式计算：

$$t_n = \frac{t_w}{1 - e^{-s_w/\beta_n}} \quad (7.1.3-1)$$

式中： t_n ——第 n 级荷载下，沉降达到相对稳定标准时所需的时间（min）；当

t_n 值不足为 30 倍数时，可增大至 30 的倍数；

t_w ——沉降速率达到相对稳定标准的时间增量（ $t_w=60\text{min}$ ）；

s_w ——沉降速率达到相对稳定标准的沉降增量（ $s_w=0.1\text{mm}$ ）；

e ——自然对数的底；

β_n ——第 n 级荷载下， $s-\ln t$ 曲线的斜率。

2) 沉降速率达到相对稳定标准时相应的沉降量应按下式计算：

$$s_n = \alpha_n + \beta_n \cdot \ln(t_n + 1) \quad (7.1.3-2)$$

式中： s_n ——第 n 级荷载下，沉降达到相对稳定标准时的沉降量（mm）；

α_n ——第 n 级荷载下， $s-\ln t$ 曲线的截距（mm）。

2 各级荷载下累计沉降量应按下式计算：

$$s = \sum_{i=1}^n s_i \quad (7.1.3-3)$$

式中： s ——第 n 级荷载外推后的累计沉降量（mm）；

s_i ——第 i 级荷载下，沉降达到相对稳定标准时的沉降量（mm），按式（7.1.3-2）计算。

7.1.4 应变法（等速加荷法）资料整理应绘制 $p-s$ 曲线，另外，为了确定极限承载力值，也可绘制压力—沉降量与板径之比的百分数的关系曲线（ $\lg p-s/d\%$ ）。

7.2 特征值的确定

7.2.1 螺旋板载荷试验的特征值主要有初始压力 p_0 、临塑压力 p_f 和极限压力 p_L ，根据数据绘制 $p-s$ 曲线（图 7.1.2），必要时可绘制 $\lg p-\lg s$ 、 $p-\Delta s/\Delta p$ （ Δp 为荷载增量， Δs 为沉降增量）、 $s-\sqrt{t}$ 或 $s-\lg t$ 等曲线，通过曲线可确定其特征值。

7.2.2 $p-s$ 曲线存在拐点时（如图 7.1.2 曲线 1），曲线上各特征值应按下列方法确定：

1 初始压力 p_0 ： $p-s$ 曲线初始直线与 p 轴的交点； $p-s$ 曲线上无明显直线段时，为过曲率最大点所作前段曲线的切线与 p 轴的交点； p_0 可视为土层原位上覆压力；

2 临塑压力 p_f ： $p-s$ 曲线的初始直线段终点（即第一拐点 A）所对应的荷载；

3 极限压力 p_L ： $p-s$ 曲线末尾直线段起点（即第二拐点 U）对应的荷载；

4 固结度达 90% 所需时间 t_{90} ：以 $s-\sqrt{t}$ 曲线初始直线段与沉降坐标（纵坐标）的交点作为理论零点，其延长段交于沉降稳定值的渐近线（横坐标）上，见图（7.2.1）的 x 段，再作与初始直线斜率 1.13 倍的直线，该直线与 $s-\sqrt{t}$ 曲线的交点所对应的时间为 t_{90} 。

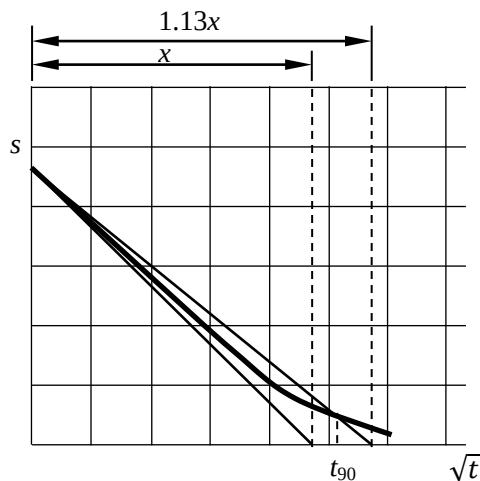


图 7.2.1 $s-\sqrt{t}$ 曲线

7.2.3 $p-s$ 曲线呈圆弧形时（如图 7.1.2 曲线 2），曲线上各特征值应按下列方法确定：

- 1 初始压力 p_0 按 7.2.2-1 款确定；
- 2 临塑压力 p_f 可按下面方法确定：
 - 1) 在 $\lg p - \lg s$ 曲线上，曲线急剧转折点的所对应的荷载（图 7.2.3-1）；
 - 2) 在 $p - \Delta s / \Delta p$ 曲线上，第一转折点所对应的荷载（图 7.2.3-2）；
 - 3) 在 $s - \lg t$ 曲线族中，曲线向上凹折或急剧转折的点所对应的荷载（图 7.2.3-3）。

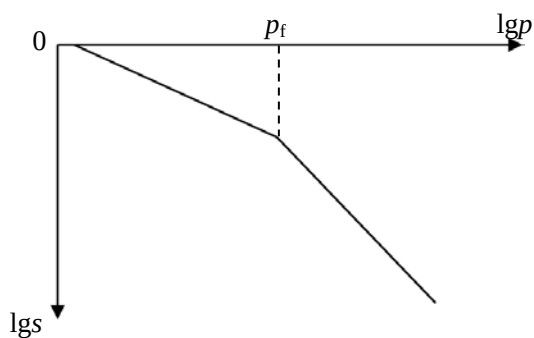


图 7.2.3-1 $\lg p - \lg s$ 曲线

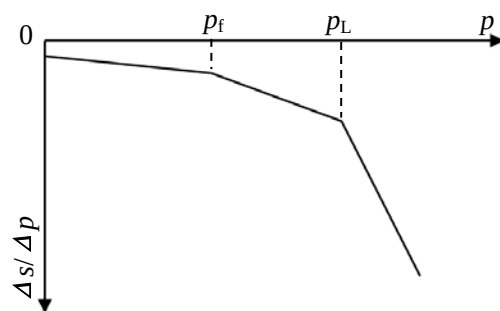


图 7.2.3-2 $p - \Delta s / \Delta p$ 曲线

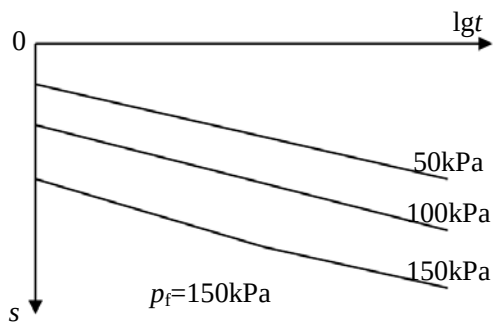


图 7.2.3-3 $s-lgt$ 曲线

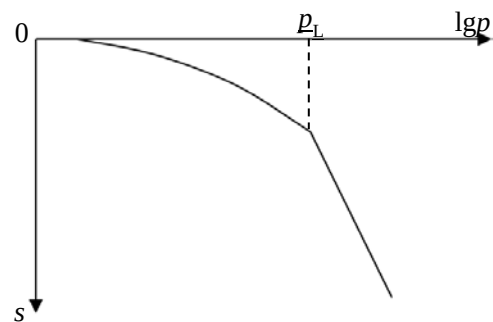


图 7.2.3-4 $lgp-s$ 曲线

3 极限压力 p_L 可按下面方法确定:

- 1) 在 $p-\Delta s/\Delta p$ 曲线上, 第二转折点所对应的荷载 (图 7.2.3-2);
- 2) 在 $lgp-s$ 或 $lgs-p$ 曲线上, 曲线直线段的起点所对应的荷载 (图 7.2.3-4)。

4 固结度达 90%所需时间 t_{90} : 同本标准 7.2.2 条第 4 款。

8 成果应用

8.1 地基承载力的确定

8.1.1 地基承载力特征值 f_{ak} 可按下列方法确定：

1 拐点法：具有初始直线段的 $p-s$ 曲线（如图 7.1.2 曲线 1），取临塑压力 p_f 为地基承载力特征值 f_{ak} ；

2 相对沉降法：圆弧形 $p-s$ 曲线（如图 7.1.2 曲线 2），在 $p-s$ 曲线上取 s/b 值所对应的荷载值为地基承载力特征值 f_{ak} 。对低压缩性土和砂土，可取 $s/b=0.015$ ；对中、高压压缩性土可取 $s/b=0.02$ ；

3 极限荷载法：由 $p-s$ 曲线上所得的极限承载力 p_u 除以安全系数为地基承载力特征值 f_{ak} ， $f_{ak}=p_u/F$ （ F 为安全系数），可视地基工程性质取 F 为 2~3。

8.1.2 地基极限承载力 p_u 可按下列方法确定：

1 第二拐点法：用 $p-s$ 曲线或 $\lg p-lgs$ ， $s-lgp$ 等曲线的第二拐点压力 p_L 确定为 p_u ；

2 相对沉降法：取 $s/b=0.10$ 所对应的压力为 p_u ；

3 双曲线法：以双曲线法拟合的 $p-s$ 曲线应按下列公式确定地基极限承载力：

$$p_u = R_f p_f \quad (8.1.2-1)$$

$$p_f = 1/b \quad (8.1.2-2)$$

式中， p_f —破坏荷载（kPa）；

b —螺旋板载荷试验双曲线拟合回归直线斜率；

R_f —破坏比，可按表 8.1.1 取值。

表 8.1.1 破坏比取值

土名	软土、稍密粉土、松散砂类土	软~硬塑黏性土、中密粉土、稍密~中密砂类土	坚硬黏性土、密实粉土与砂类土	风化岩
R_f	0.90~0.80	0.85~0.75	0.80~0.70	0.75~0.65

8.1.3 承载力特征值 f_{ak} 和极限承载力标准值的确定应符合下列规定：

1 同一土层参加统计的试验点数不应少于 3 个；

2 试验点的 f_{ak} 或 p_u 值的极差不大于其平均值 30%时，可采用平均值；当

极差大于其平均值 30%时，应查找、分析出现异常值原因，并按粗差剔除准则补充试验和剔除异常值。

8.2 地基土力学指标的计算

8.2.1 螺旋板载荷试验结果可确定土的压缩模量、地基竖向基床系数、黏性土不排水抗剪强度、径向固结系数等参数。

8.2.2 压缩模量可按下列公式计算：

$$E_{sc} = mp_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^{1-a} \quad (8.2-1)$$

$$m = \frac{A(p-p_0)}{s \cdot p_0} \cdot D \quad (8.2-2)$$

式中： E_{sc} —螺旋板载荷试验土的一维压缩模量（kPa）；

p —取 p - s 曲线上直线段的任一压力值（kPa）；

s —与 p 对应的沉降量（mm）；

p_0 —原位有效自重压力（kPa）；

p_a —标准压力，取一个大气压力 $p_a=100\text{kPa}$ ；

D —螺旋板直径（mm）；

a —应力指数，超固结饱和黏土取 1，砂与粉土取 0.5，正常固结饱和黏土、

极细砂与粉砂取 $a=0$ ；

A —无量纲沉降系数，与 p_0 、 $(p-p_0)$ 有关，查图 8.1，当 $a=1$ 时，可取

$A=0.72$ ；

m —螺旋板模量系数。

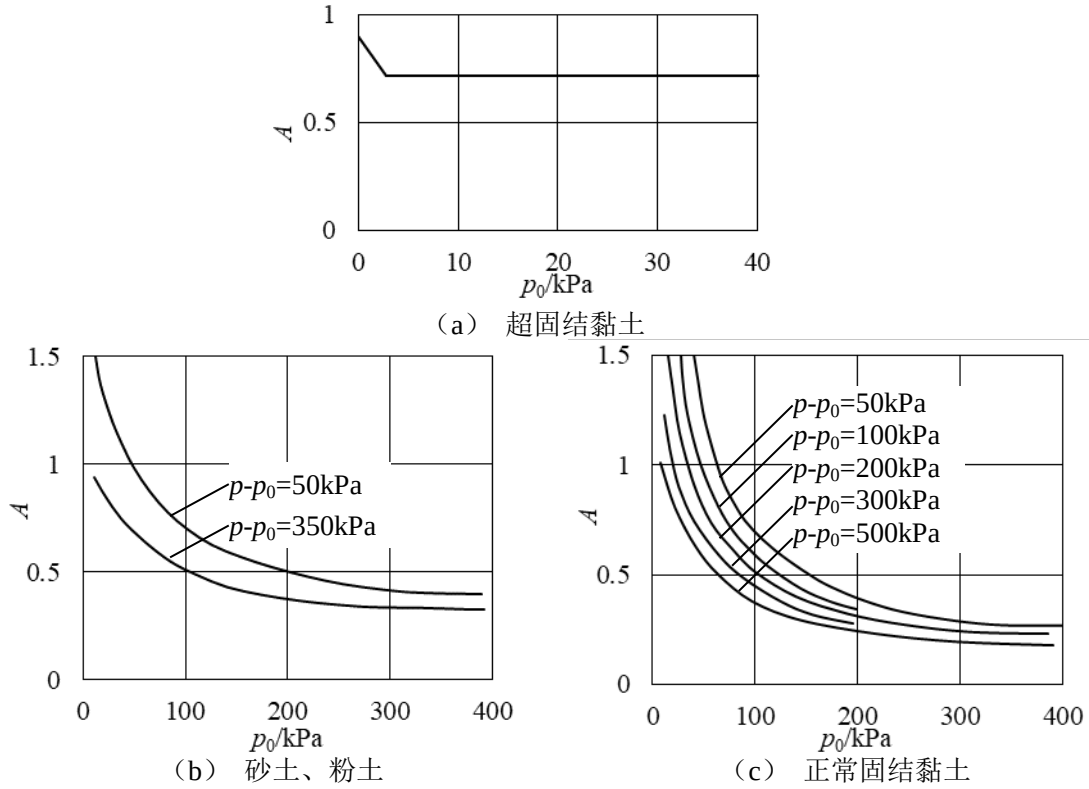


图 8.1 沉降系数 A 与 p 、 p_0 的关系

8.2.3 地基竖向基床系数应按下列要求计算：

- 1 螺旋板载荷试验基床系数 K_{va} 可由下式确定：

$$K_{va} = p_a / s_a \quad (8.2.3-1)$$

- 2 在同一场地对同一土层使用不同面积的载荷板试验时，应按下式统一修正为基准竖向基床系数 K_{v1} ：

$$K_{v1} = K_{va} \cdot \sqrt{A_a} / \sqrt{A_1} \quad (8.2.3-2)$$

式中： K_{va} ——螺旋板载荷试验基床系数 (kN/m^3) ；

K_v ——基准竖向基床系数 (kN/m^3)，即方形承压板面积 $A_1=0.0929\text{m}^2$ (1 平方英尺) 时的基床系数；

A_a ——实际使用的螺旋板的投影面积 (m^2) 。

- 3 设计计算时，应根据基础设计面积置换式 (8.2.3-2) 中的 A_a ，计算出实际使用的竖向基床系数。

8.2.4 黏性土不排水抗剪强度应按下列计算：

$$c_u = p_L / (8 \sim 11.35) \quad (8.2.4)$$

式中： c_u ——不排水抗剪强度（kPa）；
 p_L ——螺旋板载荷试验极限压力（kPa）。

8.2.5 径向固结系数可按下式估算：

$$C_h = T_{90} \frac{R_{sc}^2}{t_{90}} = 0.335 \frac{R_{sc}^2}{t_{90}} \quad (8.2.5)$$

式中： C_h ——为径向固结系数（ cm^2/s ）；
 T_{90} ——为相应于 90%固结度的时间因数， $T_{90}=0.335$ ；
 R_{sc} ——为螺旋承压板半径（cm）；
 t_{90} ——为固结度达 90%的所需时间（s）。

附录 A 深层无缆螺旋板载荷试验系统

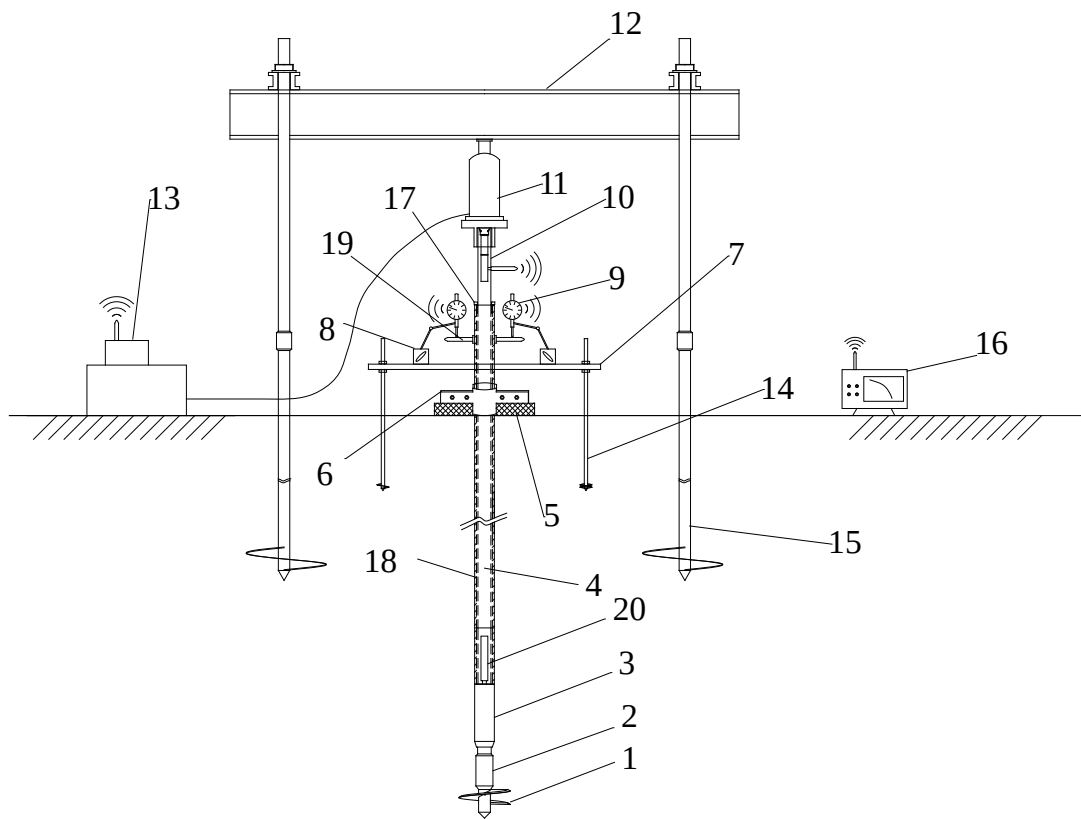


图 A.1 深层无缆螺旋板载荷试验系统

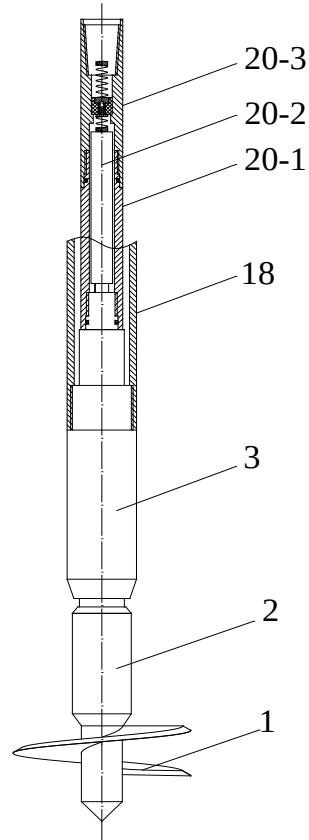


图 A.2 深层无缆螺旋板载荷试验探头总成

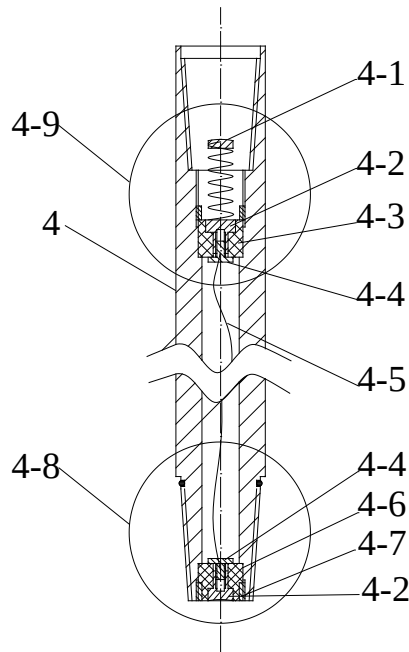


图 A.3 内置导线探杆

1.螺旋板头；2.螺旋板压力传感器；3.螺旋板相对位移传感器；4.触点式通信探杆；4-1.接触弹簧；4-2.管状螺母；4-3.绝缘橡胶；4-4.螺丝；4-5.内部电缆；4-6.阶梯内孔；4-7.卡环；4-8.触点插头；4-9.触点插座；5.垫木；6.套管管夹；7.基准梁；8.磁吸支架；9.位移百分表；10.通信传力杆地上接头；11.油压千斤顶；12.反力梁；13.加压控制设备；14.基准梁地锚；15.反力梁地锚；16.主机控制设备；17.导向卡瓦；18.套管；19.检测板；20.通信传力杆地下接头；20-1.地下接头外管；20-2.地下接头电子杆；20-3.地下接头连接帽。

附录 B 压力传感器的率定表

压力传感器标定记录表													
探头名称		探头编号		通道编号		探头规格							
电缆规格		电缆长度		荷载级差		质量评定							
序号	各级荷载 P_i	仪器读数						读数平均			运算		最佳值
		加荷 X_i^+			卸荷 X_i^-			加荷	卸荷	加卸荷	$(X_i)^2$	$X_i P_i$	
		1	2	3	1	2	3						
0													
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
标定系数		$k = \Sigma(X_i P_i) / A \Sigma(X_i)^2 =$								Σ			
序号	偏差性												
	重复性		非线性						滞后				
	ΔX_i^+	ΔX_i^-	$ X_{i+} - X_{i-} $										
0													
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
max													
非线性误差		$ X_{i+} - X_{i-} \max / FS =$						标定曲线图					
重复性误差		$ \Delta X_{i\pm} \max / FS =$											
滞后误差		$ X_{i+} - X_{i-} \max / FS =$											
归零误差		$ X_0 \max / FS =$											

标定：
复核：
标定日期：

附录 C 位移传感器的率定表

探头名称 _____

探头编号 _____

探头规格 _____

时间			0		0.5h			1.0h		1.5h			2.0h	
示值														
示值漂移														
测量点	正行程	反行程	示值误差	回程误差	测量点	正行程	反行程	示值误差	回程误差	测量点	正行程	反行程	示值误差	回程误差
0.0					6.8					46				
0.2					7.0					48				
0.4					7.2					50				
0.6					7.4					52				
0.8					7.6					54				
1.0					7.8					56				
1.2					8.0					58				
1.4					8.2					60				
1.6					8.4					62				
1.8					8.6					64				
2.0					8.8					66				
2.2					9.0					68				
2.4					9.2					70				
2.6					9.4					72				
2.8					9.6					74				
3.0					9.8					76				
3.2					10					78				
3.4					12					80				
3.6					14					82				
3.8					16					84				
4.0					18					86				
4.2					20					88				
4.4					22					90				
4.6					24					92				
4.8					26					94				
5.0					28					96				
5.2					30					98				
5.4					32					100				
5.6					34					示值误差 任意 0.2mm: 任意 2mm: 全量程: 回程误差: 判断结论:				
5.8					36									
6.0					38									
6.2					40									
6.4					42									
6.6					44									

附录 D 螺旋板载荷试验现场记录表

表 D.1 螺旋板载荷试验应力法慢速记录表

任务单号			试验者			计算者			校核者		
工程及工点名称			试验编号			试验位置			试验深度		
试验地层			承压板面积 (cm ²)			试验方法			仪器型号		
探头编号			百分表 (位移计) 编号			① _____ ② _____	试验日期	____年____月____日			
荷载级别	测读时间	时间间隔 (min)	荷载 (kN)	单位面积荷载 (kPa)	位移测量 (mm)		平均沉降量 (mm)	累计沉降量 (mm)	备注		
					读数 1	读数 2					

表 D.2 螺旋板载荷试验应力法快速记录表

任务单号		试验者		计算者		校核者			
工程及工点名称		试验编号		试验位置		试验深度			
试验地层		承压板面积 (cm ²)		试验方法		仪器型号			
探头编号		百分表 (位移计) 编号	① _____ ② _____			试验日期	____ 年 ____ 月 ____ 日		
荷载级别	荷载 (kN)	单位面积荷载 (kPa)	观测时间 (min)	地下位移测量仪读数	地表位移测量 (mm)		本级沉降量 (mm)	累计沉降量 (mm)	备注
					读数 1	读数 2			
1			15						
			30						
			45						
			60						
			75						
			90						
			105						
			120						
.....									

表 D.3 螺旋板载荷试验应变法记录表

任务单号		试验者		计算者		校核者		
工程及工点名称		试验编号		试验位置		试验深度		
试验地层		承压板面积(cm ²)		试验方法		仪器型号		
探头编号		百分表(位移计)编号	①_____②_____			试验日期		
沉降速率	时间间隔(min)	位移测量(mm)		本级沉降量(mm)	累计沉降量(mm)	荷载(kN)	单位面积荷载(kPa)	备注
		读数1	读数2					

附录 E 螺旋板载荷试验成果表

螺旋板载荷试验成果

任务单号				试验编号			
试验者				计算者		校核者	
工程名称及 工点名称				里程		试验孔号	
孔口高程				试验 深度		试验日期	
载荷 p (kPa)							
沉降 s (mm)							
$p-s$ 曲线 压力p (kPa) $lgp-s$ 曲线 lgp $s/p-s$ 曲线 s/p $\Delta s-\sqrt{t}$ 曲线 $\sqrt{t}$							
初始压力 p_0 (kPa)		临塑压力 p_F (kPa)		极限压力 p_L (kPa)			
承载力特 征值(kPa)		压缩模量(MPa)					
备注							

用词说明

1 执行本标准条文时，对于要求严格程度的用词说明如下，以便在执行区别对待。

1) 表示很严格，非这样做不可的用词：

正面词采用“必须”；反面词采用“严禁”；

2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：

正面词采用“应”；反面词采用“不应”或“不得”；

3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的用词：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的用词，采用“可”。

2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《建筑地基基础设计规范》GB50007
- 《岩土工程勘察规范》GB50021
- 《城市轨道交通岩土工程勘察规范》GB50307
- 《土工试验方法标准》GB / T50123
- 《公路工程地质原位测试规程》JTG3223
- 《土工原位测试专用仪器校验方法》SL 756
- 《铁路工程地质勘察规范》TB10012
- 《铁路工程地质原位测试规程》TB10018
- 《铁路工程不良地质勘察规范》TB10027
- 《岩土静力载荷试验规程》YS/T5218

中国工程建设标准化协会标准

螺旋板载荷试验标准

T/CECS xx-2023

条文说明

1 总 则

1.0.1 近年来，螺旋板载荷试验的仪器设备、试验方法等方面都有了较大发展，特别是中国铁路设计集团有限公司研发的深层螺旋板载荷试验系统，通过无缆螺旋板载荷试验探头总成将传统螺旋板载荷试验地面变形量测提升为地下变形量测，解决了深层螺旋板载荷传力杆挠曲问题，提高螺旋板头压力和变形测试精度。因此有必要对螺旋板载荷试验的仪器设备、试验方法、资料整理等做出统一要求，便于新技术应用推广，使该技术试验标准化、规范化，以便其成果资料的对比分析，并积累工程经验。

3 基本规定

3.0.1 螺旋板载荷试验不受地下水位的影响,而且对于难以取得不扰动土样的土层,可直接测定其承载力特征值和变形模量等参数。该试验方法在岩土工程勘察中应用已比较成熟,传统试验测试深度可达到 10~15m,近年来新研发的新型螺旋板载荷试验技术试验深度可达 40~50m。

一般认为,螺旋板载荷试验在各种原位测试中较为可靠,可作为其他原位测试的对比依据。但这一认识的正确性有前提条件,即基础影响范围内的土层应均一。实际土层往往是非均质土或多层土,当土层变化复杂时,由于螺旋板载荷试验探头的承压板影响范围有限,试验反映的地基土的性状与实际基础下地基土的性状有一定的差异。因此,在进行螺旋板载荷试验时,应充分考虑尺寸效应。

试验点附近宜取土试验提供土工试验指标,或其他原位测试资料,试验后应在承压板中心向下开挖取土试验,并描述 2 倍承压板直径或宽度范围内土层的结构变化。

3.0.3 载荷试验是一项投入比较大的测试手段,为保证试验结果可靠,工程技术人员应充分掌握试验影响深度范围内的准确地层,即使试验前已对场地地层岩性、分布有一定资料,试验结束后在条件许可时仍应从承压板中心向下开挖探井或钻探,详细描述压缩层深度内的岩土特征,检查试验点位置处地层有无异常,并采取不扰动土样进行室内试验,以便对载荷试验结果与压板下地基土的物理力学性质指标进行对比分析,同时将地基土压前与压后土性指标的变化进行比较分析,这有利于不断积累工程经验。

3.0.5 试验地层应保证其原状结构和天然湿度,试坑开挖和仪器设备安装过程中如果扰动试验地层的原状结构或因降雨而未采取防水措施等原因造成试验地层含水量的变化,最终均会引起地基土承载力和变形模量的变化,影响试验结果的准确性和代表性。

3.0.6 载荷试验所用的千斤顶、荷重传感器、压力表或压力传感器、百分表或位移传感器等仪表应定期送至法定计量检测单位进行检定,使用时必须在计量检定的有效期内,这是《中华人民共和国计量法》的要求,以保证试验数据的可靠性。

3.0.7 应力法是根据各级荷载下沉降是否要求达到稳定可分为沉降相对稳定法

和沉降非稳定法。沉降相对稳定法就是我们常说的慢速法，要求各级压力下沉降达到相对稳定标准，该方法应用最广。沉降非稳定法即快速法，指按规定的时间进行加荷观测，不考虑中间加荷沉降是否稳定，该法由于缺少成熟的理论和计算公式，一般应用很少，在没有经验的地区，靠外推法得到的每级荷载下的最终沉降量是不可靠的，因此本标准规定在有地区经验时，方可采用沉降非稳定法。有地区经验指的是在该地区有充分的沉降相对稳定法和沉降非稳定法载荷试验对比资料，并通过沉降相对稳定法和沉降非稳定法载荷试验数据的对比分析找到两种方法之间的规律性。沉降非稳定法载荷试验只能用来确定土的承载力，不能用来确定土的变形模量。

应变法又称等沉降速率法，它是连续加荷，控制沉降速率恒定，一般为1mm/30s，直至破坏，具体见 6.3.3 条。

3.0.8 加荷等级应将预估的极限压力分为 8 级~12 级，第一级荷重应包括承压板和千斤顶以下部分设备的自重。

载荷试验的目的是在岩土工程勘察过程中较准确地查明地基土的承载力，为充分挖掘利用地基土的承载力，使建筑物地基设计既安全又经济，勘察工作中均应加荷至岩土极限状态，获得地基土完整的 $p-s'$ 曲线。

为使试验顺利进行，试验前应预估地基土的极限承载力，按预估地基土极限承载力进行荷载分级，配置相适应的试验仪器设备，并对加荷反力装置、传力装置进行设计和强度及变形方面的验算。

3.0.9 本条规定载荷试验过程中，应在现场对原始数据进行检查、核对，并绘制荷载与沉降（ $p-s'$ ）曲线草图，以了解试验进行情况，及时发现可能存在的问题，分析原因采取应对措施。载荷试验记录表是在原铁路原位测试规程载荷试验记录表的基础上，参照了多家勘察单位使用的载荷试验记录表取长补短综合而成，使表格记录内容全面，方便实用。

4 设备和仪器

4.1 设备

4.1.1 螺旋板载荷试验是将螺旋板头旋入地下试验深度,通过传力杆对螺旋板头施加荷载,通过沉降观测装置记录板头沉降值,可进行地面观测,也可进行地下观测;但是,由于传力杆受力变形,会随着试验深度的增加,误差越来越大,所以一般测试深度 10m 以内时,可采用地面沉降观测,10m 以上时,建议采用地下沉降观测,减少沉降测量误差。

4.1.2 螺旋板头旋入土中会引起土体的扰动,但如适当选择板径(b)、轴径(c)、螺距(a)、板厚(t),使 $c/b=0.15$ 、 $a/b=0.25$ 、 $t/b=0.025$,并保持螺旋板头旋转一周的入土深度与螺距一致,可使土体扰动大为减小。螺距比(螺距与螺旋板直径之比)一般采用 $1/4\sim 1/5$,板厚比(螺旋板厚度与螺旋板直径之比)为 $1/25$,本标准板厚比取 $1/40$ 。据 Selvadurai 的研究,螺旋板头旋入引起的土体扰动量并不比扰动最小的自钻式旁压仪严重。

4.1.3 在进行浅层螺旋板载荷试验时,可采用地面沉降观测,可采用单独的探杆连接作为传力杆;在进行深层螺旋板载荷试验时,建议采用地下沉降观测,应采用探杆、套管组合系统作为传力杆。目前可进行地下沉降观测的仪器设备是由中国铁设研制的深层无缆螺旋板载荷试验系统;深层螺旋板载荷试验是在传统螺旋板载荷试验的原理基础上,采用地下沉降观测方式记录试验数据,有效解决了因传力杆受力变形而产生的测量误差大的问题,现场试验最大测试深度达 45m。

内置导线特制探杆是一种同轴承插连接的触点式通信探杆,其内部为导电电线,多根连接使用,可代替电缆线进行试验数据的传输。应用于无缆螺旋板载荷试验,取代电缆线的功能,可极大提高劳动效率,减轻劳动强度。该探杆需与中国铁设研制的成套无缆螺旋板载荷试验仪器设备配套使用。

4.2 仪器

4.2.2 仪器显示的最小确定读数,称为有效分度值,本标准要求小于 $0.06\%FS$,对数字显示仪而言,满量程不应小于 $3\frac{1}{2}$ 位;对刻度式仪器,满量程不应小于 2000 个刻度。

4.2.6 深层无缆螺旋板载荷试验探头总成及相关配套仪器设备是由中国铁设针研发的一套试验设备仪器，可实现对螺旋板载荷试验载荷及沉降的地下测量，并无线传输至地表，为实现深层无缆螺旋板载荷试验提供技术保障；整套仪器设备包括：螺旋板载荷试验探头总成，测力及沉降观测器，由内置导线特制探杆与套管组成的传力杆，信号转换器，以及数据显示仪。



图 4.1 无缆螺旋板载荷试验数据采集仪

1. 测力及沉降观测器、2. 信号转换器、3. 数据显示仪、4. 地面位移百分表

5 设备率定

5.1 一般规定

5.1.1 对于新的探头，其标定参数（标定系数、标定桥压）随时间常有所改变，主要是弹性元件残余应力和应变计胶膜及粘贴材料性能变化所致。本条规定了探头重新标定的周期要求。在重要工程使用过程中，也应检查探头的标定参数是否产生影响测试质量的变动。

5.1.2 探头的标定参数与使用的仪器、电缆有关。探头标定应与实际使用的仪器、电缆一道进行，以保证标定参数的稳定性。当备有多台同型号、规格的仪器，且存在调换使用可能性时，应对它们进行对比性检测，以确定它们之间的相对误差，便于对测试结果进行修正或互换使用。

5.1.3 传感器标定宜采用压力、位移联合标定架。联合标定架主要包括：基座、导向支架组、减速齿轮组、套管夹、基座等。

标定架的结构图如下。

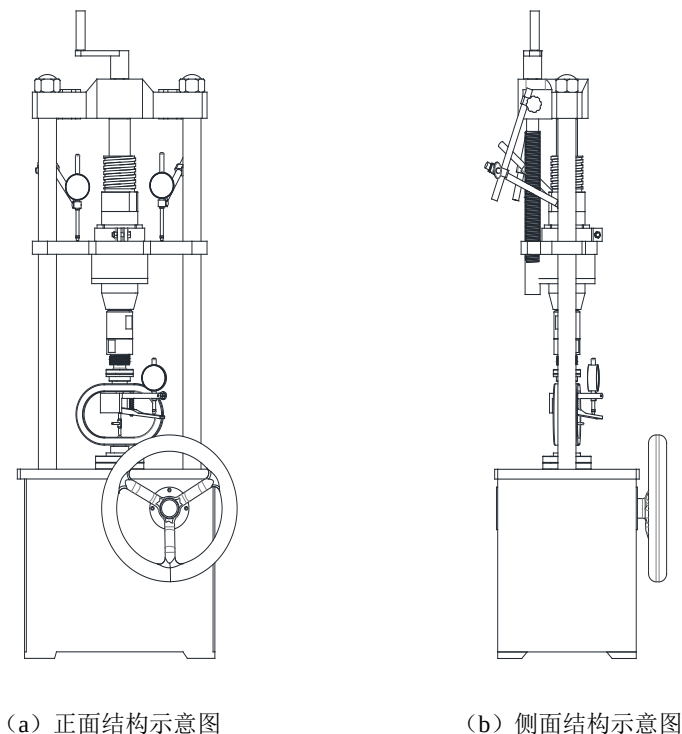


图 5.1 标定架结构图

标定架各项参数要求如下。

表 5.1 标定架性能要求

标定架最大净空	额定负载	减速齿轮组行程	位移调节杆行程	套管夹夹持直径
≥600mm	≥30KN	100mm	100mm	60mm

5.1.5 要求探头力学指标的检测误差不大于 1%，则必须用允许误差为 $\pm(0.3\sim 0.5)\%$ 的Ⅲ等标准测力计予以标定。

5.2 压力传感器的标定

5.2.2 对压力传感器加、卸荷的级数过少，不利于对检测精度作出可靠评定；要求标定时其加、卸荷不得少于 3 个循环，是因为每个循环过程值可能不同，特别是顶柱式传感器或传感器与传力垫可以相对转动的探头，各个过程值互异的可能性更大，其差值（%）的小与大，可直接反映出探头性能的好坏。

探头传感器所用的应变计粘贴材料、粘贴工艺和探头的标定设备，都具有不同程度的滞后特性。为减少这种滞后性对探头检测精度的影响，除改善材料弹性、改进粘贴工艺、提高标定设备性能等之外，在标定操作上作出相应规定，有利消除滞后性的影响。

5.2.4、5.2.5 探头标定与现场测试在参数计算上是两个互逆的过程。本条规定用过原点的最小二乘公式（5.2-1、5.2-2）确定探头的标定系数，前提是认为在额定荷载范围内，探头受力变形是服从虎克定律的，而应变计的变形量与信号输出的关系也是成正比的。

5.3 位移传感器的标定

5.3.1 螺旋板载荷试验常用位移传感器，多为数显式、指针式大量程百分表，其标定方法与计量检定方法原理相同，故参照国家计量检定标准《大量程百分表》（JJG379-2009）相关规定制定本节。因位移传感器采用一体化封装结构，故不再采用计算标定系数判定合格和修正处理结果的方法，按照前述标准要求，仅提供判定合格的标准，不合格位移传感器不能使用。

6 现场试验

6.2 试验准备

6.2.1 使用深层无缆螺旋板载荷试验探头总成时,还应检查以下试验仪器设备是否符合要求:

1 检查探头总成密封性,采用无缆深层螺旋板载荷试验时,应检查内置导线特制探杆接头处密封胶圈完好性;

2 检查地下载荷沉降探头总成、地下数据采集器、地上试验数据显示分析仪连接稳定性,确保电池电量充足,数据传输正常,探头总成进入地下时,应开启地下载荷沉降探头总成电源开关。

6.2.5 本条第 4 款规定采用深层无缆螺旋板载荷试验探头总成进行深层旋板载荷试验的设备安装应符合的要求。

- 1) 关于套管应在地表用夹板卡紧的作用,一是作为参考系,测量探杆的相对位移;二是通过夹板与地表固定,消除套管自重对孔内土层的影响;
- 2) 套管管口与探杆之间应放置两半瓦导向套,是防止探杆加压过程中在套管端口晃动;
- 3) 采用深层无缆螺旋板载荷试验探头总成进行深层旋板载荷试验时,假定套管不动,测的是探杆和套管的相对沉降,所以在实际试验室工程中,还需监测套管的沉降,以便修正螺旋板沉降值;
- 4) 该项是为了消除探杆自重对螺旋板的压力。

6.2.6 螺旋板载荷试验的旋入螺旋板深度宜与螺距相协调,应按每转一圈下入一个螺距操作,减少螺旋板探头旋入对土的扰动。螺距过大时,竖向荷载作用大,可能会发生螺旋板本身的旋进,造成螺旋板周围土体产生较大的扰动,影响测试结果。根据 Selvadurai 研究,螺旋板旋入的扰动不比扰动最小的自钻式旁压仪严重。

当使用深层无缆螺旋板载荷试验探头总成时,应将地上探杆用侧开口尼龙卡套卡紧,尼龙卡套下端与套管紧贴,防止旋转套管,由套管带动探杆和螺旋板板头旋入地层过程中,探杆和套管发生相对位移,总成位移轴超前伸出。

6.3 试验方法

6.3.1 关于加荷方式和等级。载荷试验的加载方式有等级加荷相对稳定法（慢速法）、沉降非稳定法（快速法）和等沉降速率法。加载方式取决于载荷试验的目的。若仅确定地基承载力，可以采用沉降非稳定法（快速法）或等沉降速率法，它所反映的是不排水或不完全排水条件的变形特性，但必须有比对的资料。

如试验目的是确定土的变形特性，则快速法的结果只反映不排水条件的变形特性，不反映排水条件的固结变形特性。试验方法按表 6.1 原则选择。

表 6.1 选择试验方法的原则

序号	试验目的		应力法		应变法
			相对稳定法	非稳定法	
1	确定地基土的应力、应变与时间的关系		√		
2	确定地基土的承载力		√	√	√
3	求地基土的模量	排水模量	√		
		不排水模量		√	√
4	求不排水抗剪强度			√	√

6.3.2 6.3.4 加荷等级从整理分析 $p-s$ 曲线的需要来看，一般情况下，一个试验有 8 级~10 级，便能较好的反映 $p-s$ 特征，同时，也可有 4~5 点在似弹性变形段内。载荷试验应做到破坏，获得完整的 $p-s$ 曲线，以便确定承载力特征值。只有试验目的为检验性质时，加荷至设计要求的二倍时即可终止。现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 规定：“加荷等级宜取 10~12 级，并不应少于 8 级”。

沉降观测：定时进行沉降观测的目的在于获得沉降随时间发展过程，以便确定加荷时间。

6.4 试验要点

6.4.1 螺旋板载荷试验时，应特别注意承压板影响深度范围内土层的不均匀性，否则会影响对载荷试验成果的分析应用，降低试验成果的使用价值。

6.4.3 对液压荷载源来说，要求具有良好的稳压效果。因此压力稳定性必须考虑液压系统的密封性、液压脉冲及迟滞爬行等因素的影响。

7 资料整理

7.1 测试数据处理

7.1.3 α_n 、 β_n 值应按下列公式计算：

$$\alpha_n = \frac{\sum s'_i \cdot \sum [\ln(t'_i + 1)]^2 - \sum \ln(t'_i + 1) \cdot \sum s'_i \cdot \ln(t'_i + 1)}{N \cdot \sum [\ln(t'_i + 1)]^2 - [\sum \ln(t'_i + 1)]^2} \quad (7.1)$$

$$\beta_n = \frac{N \cdot \sum s'_i \cdot \ln(t'_i + 1) - \sum s'_i \cdot \sum \ln(t'_i + 1)}{N \cdot \sum [\ln(t'_i + 1)]^2 - [\sum \ln(t'_i + 1)]^2} \quad (7.2)$$

式中： α_n ——第 n 级荷载下， s — $\ln t$ 曲线的截距（mm）；

β_n ——第 n 级荷载下， s — $\ln t$ 曲线的斜率；

N ——每级荷载下下沉观测次数， $N=8$ ；

t'_i ——第 n 级荷载下观测时间（min）；

s'_i ——第 n 级荷载下 t'_i 时的净沉降量（mm）（实际观测值扣除前几级荷载下的剩余沉降量）；

s_w ——沉降速率达到相对稳定标准的沉降增量（ $s_w=0.1\text{mm}$ ）；

e ——自然对数的底；

3) 每级荷载下，各观测值中应扣除的剩余量应按下式计算：

$$\Delta s_{k,n}^{(i)} = \sum_{k=1}^{n-1} \beta_k \{ \ln[N \cdot (n - k) + i] \Delta t + 1 \} - \ln[N(n - k) \Delta t + 1] \quad (7.3)$$

式中： $\Delta s_{k,n}^{(i)}$ ——第 n 级荷载下的第 i 次观测值中应扣除的剩余沉降量（mm）；

k ——第 n 级前的荷载级数（ $k=1, 2, \dots, n-1$ ）；

Δt ——沉降观测时间间隔（min）， $\Delta t = 15\text{min}$ ；

N ——每级荷载下沉降观测的次数；

n ——荷载级数。

采用沉降非稳定法外推沉降达到相对稳定标准时的沉降量和所需时间，具体方法如下。

配置各级荷载下 s — $\ln t$ 的回归方程

$$s'_a = a_n + B_n \ln(t+1) \quad (7.4)$$

计算沉降达到稳定标准所需的时间

$$T_w = \frac{60}{1 - e^{-\frac{\Delta s_n}{B_n}}} \quad (7.5)$$

计算 T_w 时的沉降量

$$s_n = a_n + B_n \ln T_w \quad (7.6)$$

式中, s'_a 、 t' 分别为某级荷载下各次观测沉降量及观测时间; s_n 、 T_w 分别为某级荷载达到稳定时的沉降量及时间; a_n 、 B_n 分别为沉降与时间的对数呈线性时的截距及斜率; e 为自然对数的底; Δs_n 为沉降稳定的标准, 取 0.01。

沉降观测时是在上一级荷载施加后的沉降基础上继续采集沉降数据, 因此每次数据处理时需扣除前一级荷载施加后的沉降值。

7.2 特征值的确定

7.2.1 为了确定极限压力, 除了用本条介绍的曲线形式外, 还有将试验中的压力值用对数坐标, 而将沉降量与板直径的百分比 (即 $s/d\%$) 取算术坐标绘制 p - $s/d\%$ 曲线图, 取 p - $s/d\%$ 曲线的峰值或曲线斜率突变点所对应的压力值做为极限压力值 p_L 。如图 7.1。

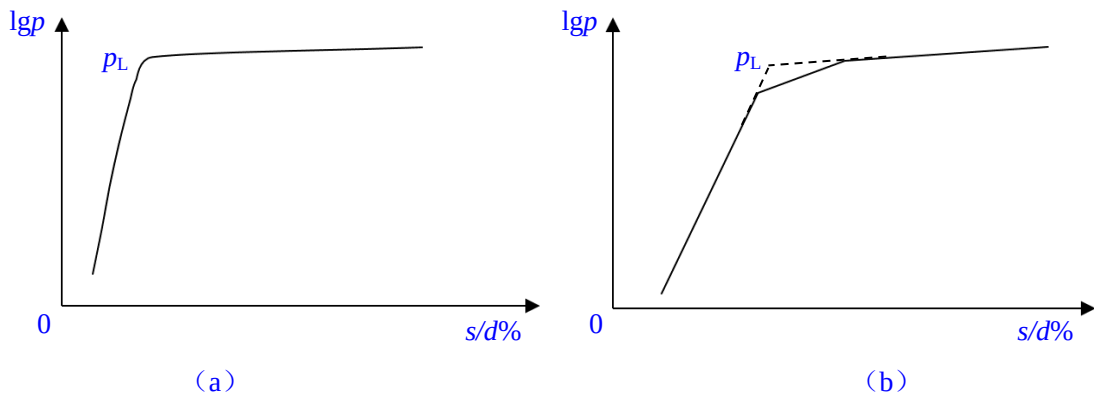


图 7.1 p_L 图解法

8 成果应用

8.1 地基承载力的确定

8.1.1-8.1.3 螺旋板载荷试验为特殊的深层载荷试验，可反映所测试土体在测试点埋深处的应力水平，具有“深层试验”和“分层试验”优点，操作简便、数据直观、省时省钱，特别在成层土地基中，结合平板载荷试验和室内土样试验及其它原位测试，可深化对成层土地基承载力及界面效应的认识；在均质地基中可逐步掌握模量随深度增加的规律，无论是对工程设计、或是理论研究都是有益的。通过京沪高速、新荷线、济邯线、朔黄线、保霸线及上海、福州等地共 25 处 131 个实测点的资料分析表明螺旋板载荷试验所获得的地基承载力是试验深度处原位状态下所测得的，它已经包含了上覆压力的影响因素。

8.2 地基土力学指标的计算

8.2.2 在地层内部用螺旋板载荷试验的结果计算压缩模量的理论模型如图 8.2.2-1 所示。由图 8.2.2-1 可知：在螺旋板处于某一深度，该处的上覆有效自重压力为 p_0 ，作用在螺旋板上的附加压力 p_n 。在该种压力条件下，螺旋板下一直径为 D 、厚度为 d_z 土体的压缩模量（即螺旋板的沉降量） s 应是有效上覆压力 p_0 、附加压力 $p_n = (p - p_0)$ 、螺旋板直径 D 和土体压缩模量 E_{sc} 的函数，即：

$$s = \frac{A}{m_{sc}} \frac{(p' - p'_0)}{p_a} D = \frac{A}{m_{sc}} \frac{p_n}{p_a} D \quad (8.1)$$

或

$$m_{sc} = \frac{A}{s} \frac{(p' - p'_0)}{p_a} D = \frac{A}{s} \frac{p_n}{p_a} D \quad (8.2)$$

式中： m_{sc} —无因次的模量系数；

A —无因次的沉降系数，与 p_0 、 p_n 有关，可查标准图 8.1。

由于土的压缩模量与土的类别、应力状态和应力水平 有关，因而用一系数 A 来统一沉降表达式；同时，用理想化的应力条件来定义模量而用无因次的模量系数 m_{sc} 来表示。这样，变形模量的普遍表达式即为：

$$E_{sc} = m_{sc} p_a \left(\frac{p}{p_a} \right)^{1-a} \quad (8.3)$$

一定的应力指数 a 对应于一定的土类和土的状态。若将应力指数 a 取值为 1、

1/2、0 三个值，则相应的土类和土的状态为：

(1) $a=1$ ，则 $E_{sc} = m_{sc}p_a$ 。这意味着沉降系数 A 近似常数，约等于 0.72。常模量的概念显示土体具有弹性性质。这类土包括岩石、硬冰渍土、超固结土以及饱和黏性土的初始不排水条件；

(2) $a=1/2$ ，相应于模量 $E_{sc} = m_{sc}\sqrt{p_ap}$ 。从图 8.1 (b) 中可看出：沉降系数 A 随着 p_n 和 p'_0 的增加而减小，这种模量很大程度上相应于砂质土和粉质土。模量系数 m_{sc} 从 50 开始达到几百；

(3) $a=0$ ，则 $E_{sc} = mp$ 。从图 8.1 (c) 中看出：沉降系数 A 随着 p_0 的增加而急速减小。这种线性模量相应于正常固结的饱和黏土和很细的粉质土。模量系数 m_{sc} 可从 5 变化到 50。。

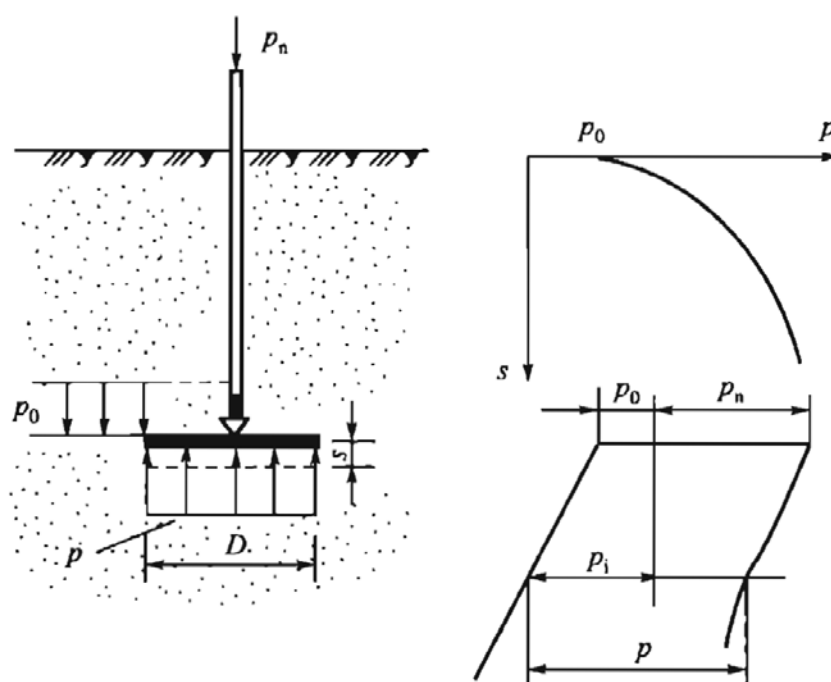


图 8.1 地层内圆盘沉降计算模式

上述三种典型土类的模量与应力状态的关系如图 8.2 所示。

根据地层内螺旋板载荷试验，测得载荷 p_n 与螺旋板的沉降值 s ，再依据土类从图 8.1 中查得沉降系数 A ，即可求得地层的压缩模量系数 m_{sc} ，最后利用 m_{sc} 求得压缩模量 E_{sc} 。

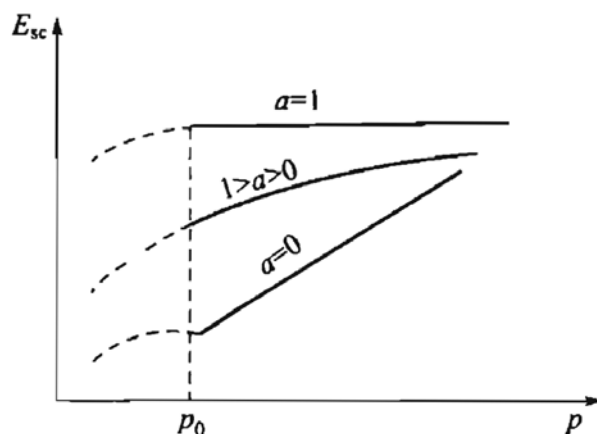


图 8.2 典型土类状态与模量关系

8.2.4 螺旋板载荷试验成果可用于评估黏土的不排水抗剪强度，主要借鉴于 Selvadurai 等的研究，相关公式如下。

$$c_u = p_L / (8 \sim 11.35) \quad (8.4)$$

表 8.1 p_L/c_u 研究成果表

p_L/c_u 值	研究来源	说明
5.69	Shield	刚性板，半空间，接触面光滑
6.05	Shield	刚性板，半空间，接触面粗糙
9.00	Skempton	圆基础，无限空间，经验解
9.34	Meyerhof	圆基础，无限空间，接触面粗糙，近似解
10.97	Selvadurai	圆板，无限空间，接触面光滑
11.35	Selvadurai	圆板，无限空间，接触面粗糙
10.00	华东电力设计院	适用软粘土等沉降速率法的经验参数
9.00	华东电力设计院	适用软粘土快速法的经验参数
8.0~9.5	温州市勘察院	适用软粘土等沉降速率法的经验参数

华东电力设计院对淤泥质亚黏土用应变法测得的极限压力 p_L 与十字板抗剪强度 c_u 比较，其 p_L/c_u 为 10~11，多为 10。

温州市勘察测绘处在温州地区的流塑软黏土中得到的破坏强度 p_L 与十字板强度 c_u 的关系为 $p_L = (8 \sim 9.5) c_u$ 。

8.2.5 关于固结系数的计算。利用螺旋板载荷试验所观测的沉降随时间变化的曲线计算固结系数，是根据径向固结理论中所定义的时间因数 T_r ，即：

$$T_r = \frac{C_h}{R^2} t \quad \text{或} \quad C_h = \frac{T_r}{t} R^2 \quad (8.5)$$

式中： T_r —径向排水时间因数，无因次数；

C_h —水平向固结系数 (cm^2/s)；

R —为螺旋承压板半径 (cm)；

T —荷载增加后的历时 (s)。

径向固结微分方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_h \left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) \quad (8.6)$$

假定承压板下的土层上下界面不排水，侧向排水，则对固结微分方程进行求解得到固结度 U_r 和径向排水时间因数 T_r 的关系。由于 T_r 和 U_r 都是无因次系数，将 U_r 和 T_r 的理论关系曲线筒试验所得沉降与时间曲线相比较，即可得 T_r 和 t 的相应值，从而求得 C_h 。

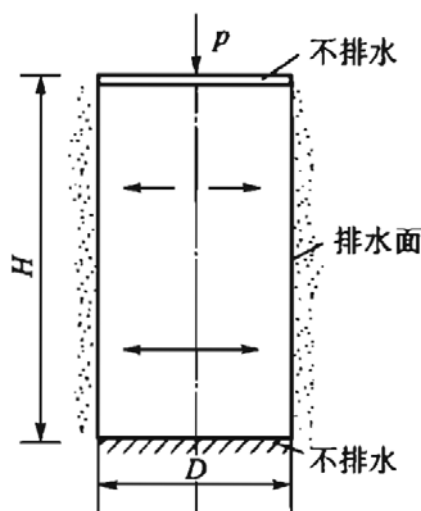


图 8.3 试验土层边界条件

U_r 和 T_r 的理论关系在固结度达到 60% 之前近似于抛物线，其表达式为：

$$U_r^2 = CT_r \quad (8.7)$$

固结度大于 60% 时，时间因数 T_r 与固结度 U_r 的关系为

$$U_r = 1 - 0.692e^{-5.78T_r} \quad (8.8)$$

当固结度 $U_r=90\%$ 时， $T_r=0.335$ ，即

$$C_h = T_{90} \frac{R_{sc}^2}{t_{90}} = 0.335 \frac{R_{sc}^2}{t_{90}} \quad (8.8)$$

式中， C_h 为径向固结系数 (cm^2/s)； T_{90} 为相应于 90%固结度的时间因数， $T_{90}=0.335$ ； R_{sc} 为螺旋承压板半径 (cm)； t_{90} 为固结度达 90%的所需时间 (s)。