

天津市工程建设标准



DB/T 29-38-2025

备案号: J10198-2025

天津市建筑基桩检测技术规程

Technical specification for testing of building
foundation piles in Tianjin

2025-10-20 发布

2026-04-01 实施

天津市住房和城乡建设委员会 发布

天津市工程建设标准

天津市建筑基桩检测技术规程

Technical specification for testing of building
foundation piles in Tianjin

DB/T 29-38-2025

J10198-2025

主编单位：天津市勘察设计院集团有限公司

批准部门：天津市住房和城乡建设委员会

实施日期：2026 年 04 月 01 日

2025 天 津

天津市住房和城乡建设委员会文件

津住建设函[2025]149号

市住房城乡建设委关于发布《天津市建筑基桩检测技术规程》的通知

各有关单位：

根据《市住房城乡建设委关于公布 2020 年度天津市工程建设地方标准复审结果的通知》（津住建设函〔2021〕21 号）要求，天津市勘察设计院集团有限公司等单位修订完成了《天津市建筑基桩检测技术规程》，经市住房城乡建设委组织专家评审通过，现批准为天津市工程建设地方标准，编号为 DB/T29-38-2025，自 2026 年 4 月 1 日起实施。原《建筑基桩检测技术规程》（DB/T29-38-2015）同时废止。

各相关单位在实施过程中如有意见和建议，请及时反馈给天津市勘察设计院集团有限公司。

本规程由天津市住房和城乡建设委员会负责管理，天津市勘察设计院集团有限公司负责具体技术内容的解释。

天津市住房和城乡建设委员会

2025 年 10 月 20 日

前 言

根据《市住房城乡建设委关于公布 2020 年度天津市工程建设地方标准复审结果的通知》（津住建设函〔2021〕21 号）要求，经过广泛调研，认真总结我市工程建设领域基桩检测技术实践经验，并参考国内行业及省市标准的修编情况，修订本规程。

在修订过程中，广泛征求国内相关领域意见，经多次反复修改完善。

本规程修订的主要技术内容：

- 1、静载荷试验部分增加了关于快速卸荷的规定。
- 2、对高应变法的应用范围作出了相应规定。
- 3、明确了钻芯法及声波透射法的检测数量及适用条件。
- 4、对各方法的检测数量作出详细规定，包括试验桩工程检测数量、工程桩验收检测数量，同时明确了低应变完整性检测的数量及数量统计标准。
- 5、增加了自平衡法的相关内容，并规定了其应用范围。
- 6、增加了钻孔灌注桩成孔检测、地下连续墙成槽检测、锚杆抗拔试验、桩身内力测试的相关内容。
- 7、增加了预制混凝土桩破坏性检测、焊缝质量检测、孔内成像法的相关内容。
- 8、原规程（DB/T 29-38-2015）附录B磁测井法内容编入正文；增加旁孔法、管波法的相关内容。
- 9、附录A：桩端岩土载荷试验要求。
- 10、对传统检测方法的部分内容进行了修订。

本规程由天津市住房和城乡建设委员会负责管理，由天津市勘察设计院集团有限公司负责具体技术内容的解释。各使用单位在执行本规程过程中，注意总结经验，积累资料，及时将使用过程中发现的问题和修改完善的意见或建议，反馈给天津市勘察设计院集团有限公司（天津市南开区红旗南路 428 号。邮政编码：300191），以便今后修编时参考。

本规程主编单位：天津市勘察设计院集团有限公司

本规程参编单位：天津港滨科技发展有限公司
交通运输部天津水运工程科学研究所
天津市地质工程勘测设计院有限公司
天津市建筑科学研究院有限公司
天津大学
天津华勘基础工程检测有限公司
中交天津港湾工程研究院有限公司
天津市交通科学研究院
天津科鉴基础工程检测有限公司
天津原位物探科技有限公司
天津市贰拾壹站检测技术有限公司
天津天大建设工程科技有限公司
北京智博联科技股份有限公司
天津市博川岩土工程有限公司

本标准主要起草人员：蔡克俭 关 磊 孟 静 杨 军
徐 磊 李越松 贺占海 陈小娟
徐 燕 韩 亮 殷亚斌 张 民
刘秀凤 胡朝彬 曹淑洪 刁 钰
田梦飞 管 钧 傅 超 张二龙
杜一鸣 蔡 军 孙 应 房 跃
杨金瑞 宫喜庆 王杰亭 许 洁
何 晶 曹 颖 王海英 詹 斌

卢 奕 徐满意 王 哲 刘月辉
邓雷飞 吴宇豪 胡清华 张耀镭

本标准主要审查人员：丁永君 王成华 宋昭煌 左克伟
任彦华 刘永超 刘文彬 孙云文
李志华 张建新 张建根

目 次

1	总 则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	6
3	基本规定	9
3.1	一般规定	9
3.2	检测方法	9
3.3	检测数量	12
3.4	检测桩位的确定	15
3.5	检测前的准备	15
3.6	确认检测与扩大检测	16
3.7	检测结果评价	17
3.8	检测报告	17
4	静载荷试验	19
4.1	一般规定	19
4.2	单桩竖向抗压静载荷试验	20
4.3	单桩竖向抗拔静载荷试验	25
4.4	单桩水平静载荷试验	28
5	高应变法	34
5.1	一般规定	34
5.2	检测仪器设备	34
5.3	现场检测	35
5.4	检测数据的处理和分析	38
6	低应变法	44
6.1	一般规定	44
6.2	检测仪器设备	44
6.3	现场检测	44
6.4	检测数据的处理和分析	45
7	声波透射法	49
7.1	一般规定	49
7.2	检测仪器设备	49
7.3	现场检测	50

7.4	检测数据的处理和分析	53
8	钻芯法	61
8.1	一般规定	61
8.2	芯样钻取与加工设备	61
8.3	芯样抗压强度试验设备	62
8.4	现场钻芯	62
8.5	芯样试件截取与加工	64
8.6	芯样试件抗压强度试验	66
8.7	检测数据的处理和分析	66
9	钻孔灌注桩成孔、地下连续墙成槽检测	70
9.1	一般规定	70
9.2	检测仪器设备	71
9.3	现场检测	72
9.4	检测数据的处理和分析	77
10	自平衡法	84
10.1	一般规定	84
10.2	检测仪器设备	84
10.3	现场检测	86
10.4	检测数据的处理和分析	89
11	桩身内力测试	92
11.1	一般规定	92
11.2	检测仪器设备	92
11.3	现场检测	92
11.4	检测数据的处理	94
12	锚杆抗拔试验	97
12.1	一般规定	97
12.2	检测仪器设备	98
12.3	现场检测	101
12.4	检测数据的处理与分析	106
13	预制混凝土桩破坏性检测	111
13.1	一般规定	111
13.2	检测仪器设备	111
13.3	现场检测	111
13.4	检测数据的处理	113
14	焊缝质量检测	114

14.1	一般规定	114
14.2	焊缝表面质量渗透检测	114
14.3	焊缝内部质量超声法探伤	117
15	孔内成像法	119
15.1	一般规定	119
15.2	检测仪器设备	119
15.3	现场检测	120
15.4	检测数据的处理与分析	122
16	磁测井法	123
16.1	一般规定	123
16.2	检测仪器设备	123
16.3	现场检测	123
16.4	检测数据的处理和分析	125
17	旁孔法	127
17.1	一般规定	127
17.2	检测仪器设备	127
17.3	现场检测	127
17.4	检测数据的处理和分析	129
18	管波法	131
18.1	一般规定	131
18.2	检测仪器设备	131
18.3	现场检测	132
18.4	检测数据的处理和分析	133
附录 A	桩端岩土载荷试验要求	140
附录 B	混凝土桩桩头处理要点	142
附录 C	试打桩与打桩监控	143
附录 D	钻芯法检测记录表	145
附录 E	自平衡法静载荷试验记录表	147
附录 F	自平衡法静载荷试验荷载位移等效转换方法	149
附录 G	常用内力测试设备性能指标	152
附录 H	锚杆补偿荷载整体张拉方法	155
附录 J	锚杆抗拔试验曲线	159
附录 K	锚杆抗拔试验记录表	162
附录 L	磁测井法检测现场记录表	165

本规程用词说明	166
引用标准名录	167
条文说明	169

Contents

1 General provisions	1
2 Terms and symbols	2
2.1 Terms	2
2.2 Symbols	6
3 Basic requirements	9
3.1 General requirements	9
3.2 Test method	9
3.3 Number of Test Piles	12
3.4 Determination of detection pile position	15
3.5 Preparation before testing	15
3.6 Confirmation test and expanded test	16
3.7 Evaluation of test results	17
3.8 Test Report	17
4 Static load test	19
4.1 General requirements	19
4.2 Vertical compressive static load test on single pile	20
4.3 Vertical Uplift Static Load Test on Single Pile	25
4.4 Lateral Static Load Test on Single Pile	28
5 High strain dynamic test	34
5.1 General requirements	34
5.2 Testing instruments and equipment	34
5.3 Field Testing	35
5.4 Processing and analysis of test data	38
6 Low strain integrity test	44
6.1 General requirements	44
6.2 Testing instruments and equipment	44
6.3 Field Testing	44
6.4 Processing and analysis of test data	45
7 Cross hole sonic logging	49
7.1 General requirements	49
7.2 Testing instruments and equipment	49
7.3 Field Testing	50
7.4 Processing and analysis of test data	53

8 Core drilling method	61
8.1 General requirements	61
8.2 processing equipment	61
8.3 Test on compressive Strength of Core drilling	62
8.4 Field core drilling	62
8.5 Interception and processing of core specimen	64
8.6 Compressive Strength Testing of Core Specimen	66
8.7 Processing and analysis of test data	66
9 Detection of bored pile hole formation and diaphragm wall trenching	70
9.1 General requirements	70
9.2 Testing instruments and equipment	71
9.3 Field testing	72
9.4 Processing and analysis of test data	77
10 Test of self-balanced method	84
10.1 General requirements	84
10.2 Testing instruments and equipment	84
10.3 Field Testing	86
10.4 Processing and analysis of test data	89
11 Pile shaft internal force testing	92
11.1 General requirements	92
11.2 Testing instruments and equipment	92
11.3 Field Testing	92
11.4 Processing and analysis of test data	94
12 Pull out test of anchor	97
12.1 General requirements	97
12.2 Testing instruments and equipment	98
12.3 Field Testing	101
12.4 Processing and analysis of test data	106
13 Destructive test of precast concrete pile	111
13.1 General requirements	111
13.2 Testing instruments and equipment	111
13.3 Field testing	111
13.4 Processing and analysis of test data	113
14 Weld quality inspection	114
14.1 General requirements	114
14.2 Penetrant testing of weld surface quality	114
14.3 Ultrasonic flaw detection for internal quality of welds	117
15 Imaging testing through the hole	119

15.1 General requirements	119
15.2 Testing instruments and equipment	119
15.3 Field Testing	120
15.4 Processing and analysis of test data	122
16 Magnetic logging method	123
16.1 General requirements	123
16.2 Testing instruments and equipment	123
16.3 Field testing	123
16.4 Processing and analysis of test data	125
17 Parallel seismic test	127
17.1 General requirements	127
17.2 Testing instruments and equipment	127
17.3 Field testing	127
17.4 Processing and analysis of test data	129
18 Borehole tube wave detection	131
18.1 General requirements	131
18.2 Testing instruments and equipment	131
18.3 Field testing	132
18.4 Processing and analysis of test data	133
Appendix A Pile end geotechnical load test	140
Appendix B Key points of concrete pile head's treatment	142
Appendix C Test piling and dynamic piling monitoring	143
Appendix D Record table of core drilling test	145
Appendix E Record form of self-balanced static load test	147
Appendix F Load displacement equivalent conversion method for self-balanced static load test	149
Appendix G Performance index of common internal force testing equipment	152
Appendix H Overall tensioning method for anchor compensating load	155
Appendix J Pull out test curve of anchor	159
Appendix K Record table of anchor pull out test	162
Appendix L Field record table of testing the length of reinforcement cage of bored pile by magnetic logging method	165
Explanation of wording in this standard	166
List of quoted standards	167
Addition: Explanation of provisions	169

1 总 则

1.0.1 为了规范天津市基桩检测工作，使基桩检测符合技术先进、安全适用的特点，为工程设计和验收提供可靠依据，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于天津市建筑和市政工程基桩承载力、桩身完整性及基桩施工过程质量的检测与评价，其他行业可参照执行。

1.0.3 基桩检测应在了解场地工程地质条件、设计资料、施工资料等的基础上，合理选择检测方法，并结合各种影响因素客观、准确地判定检测结果。

1.0.4 基桩检测工作应优先采用新技术、新方法。

1.0.5 基桩检测除应按本规程执行外，尚应符合国家和本市现行有关标准中的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 基桩 foundation pile

桩基础中的单桩。

2.1.2 静载荷试验 static loading test

在试桩顶部逐级施加竖向或水平荷载，观测桩顶部随时间推移而产生的竖向位移或水平位移，以确定或判定其单桩竖向或水平承载力的试验方法。

2.1.3 高应变法 high strain dynamic testing

在桩顶施加高能量冲击荷载，实测桩顶部的力和速度时程曲线，通过波动理论分析以判定单桩竖向抗压承载力和桩身完整性的检测方法。

2.1.4 低应变法 low strain integrity testing

在桩顶施加低能量冲击荷载，实测桩顶部的速度（或加速度）时程曲线，运用一维波动理论的时域分析和频域辅助分析，对桩身完整性进行评判的检测方法。

2.1.5 声波透射法 cross hole sonic logging

在预埋声测管之间向桩身混凝土发射并接收超声波，通过实测并分析超声波（简称声波）在混凝土介质中传播的声速、波幅衰减和频率等参数的相对变化来判定桩身完整性的检测方法。

2.1.6 钻芯法 core drilling method

用钻机钻取芯样以评价桩身（墙体）混凝土强度、连续性、缺陷、桩（墙）长、沉渣厚度和桩（墙）底土层性状的检测方法。

2.1.7 超声波法成孔（槽）检测 slurry trench test with ultrasonic method

通过超声波探头连续测量各深度不同水平方向的孔径（槽宽），根据由记录仪同步绘制出各方向孔（槽）壁形态的记录图，检测孔径（槽宽）、孔（槽）深、孔（槽）壁垂直度的检测方法。

2.1.8 接触式仪器法 contact instrument method

通过仪器设备探头在桩孔（墙槽）内升降时与桩孔孔壁、孔（槽）底的接触，检测钻孔灌注桩成孔孔径、孔深、孔垂直度及孔（槽）沉渣厚度的检测方法。

2.1.9 自平衡法 self balanced static loading test

将荷载箱埋置于预估桩身平衡点处，利用桩身自重、桩周土阻力相互提供反力，通过荷载箱逐级施加荷载，观测桩身位移，以确定或判定试桩单桩竖向承载力的一种试验方法。

2.1.10 桩身内力测试 pile shaft internal force testing

通过桩身应变、位移的测试，计算荷载作用下桩侧阻力、桩端阻力或桩身弯矩的试验方法。

2.1.11 桩身完整性 pile integrity

反映桩身截面尺寸相对变化、桩身材料密实性和连续性的综合定性指标。

2.1.12 桩身缺陷 pile defects

桩在制作、施工或使用过程中，因材料、工艺、地质条件等因素导致桩身结构完整性受到破坏，出现影响其承载能力、耐久性或正常使用功能的异常情况。

2.1.13 基础抗拔锚杆 foundation anchor

一种设置于基础结构中，用于抵抗结构物在自重不足、水浮力、上拔力等作用下产生向上位移的受力构件，通过将结构受到的上拔力传递到稳定的地基土层或岩层中，从而保证基础及上部结构的稳定性和安全性。

2.1.14 锚杆抗拔试验 anchor pull out test

用于测试锚杆的抗拔性能的试验，通过试验以确定其在受到拉力时的承载能力和稳定性。

2.1.15 锚杆基本试验 anchor basic test

为确定锚杆设计参数和施工工艺，在现场进行的锚杆极限抗拔试验。

2.1.16 锚杆验收试验 anchor acceptance test

为检验工程锚杆抗拔承载力是否符合设计要求而进行的锚杆抗拔试验。

2.1.17 锚杆持有荷载试验 anchor load retention test

在锚杆施工完成并达到规定养护期后，通过对锚杆施加一定的恒定荷载（通常为设计荷载的某一比例，如 50%~80%）并持续一段时间（一般为数小时至数天），监测锚杆在持荷过程中的位移变化及荷载保持稳定性，以检验锚杆在长期持有荷载作用下的工作性能。

2.1.18 预制混凝土桩破坏性检测 destructive testing of precast concrete piles

采用破损方法，对预制混凝土桩表观质量、尺寸、桩身混凝土质量、钢筋性能、保护层厚度、混凝土抗压强度等进行检测的方法。

2.1.19 孔内成像法 imaging testing through the hole

采用孔内成像设备形成的数字图像对孔壁质量进行检测和评价的方法。

2.1.20 磁测井法 magnetic testing method

通过在基桩的桩中或桩侧的钻孔（或桩身内部通道）中测量磁场强度变化，来确定桩内钢筋笼长度或桩长的技术方法。

2.1.21 旁孔法 parallel seismic method

在基桩顶部或与基桩相连的刚性结构上激振产生应力波，利用在被测桩旁平行被测桩的钻孔内置的检波器，接收从钻孔底向上以一定距离经由桩身或桩底以下土层传播的应力波，通过分析应力波在激发点和接收点间传播时间的变化，判定桩长的检测方法。

2.1.22 管波法 borehole tube wave detection

通过在桩孔内激发振动产生沿桩身与周围土层界面传播的管波，利用传感器接收管波信号的传播特征，来分析判断桩身完整性及缺陷情况的检测方法。

2.2 符号

2.2.1 抗力和材料性能

c —桩身内应力波纵向传播速度（简称桩身波速）

c_i —第 i 根完整桩的波速

c_m —桩身混凝土应力波纵向平均波速

E —桩身材料弹性模量

E_p —桩身材料弹性模量

m —地基土水平抗力系数的比例系数

ρ —桩身材料质量密度

Q_u —单桩竖向极限承载力

R_a —单桩竖向抗压承载力特征值

R_c —由凯司法判定的单桩竖向抗压承载力

R_u —土的极限静阻力估算值

Z —桩身截面力学阻抗

2.2.2 作用及作用效应

δ —桩上拔位移量

$\Delta\delta_i$ —竖向抗拔静载荷试验第 i 级荷载作用下的上拔量，简称
上拔增量

E_n —锤击实际传递给桩的能量

F —锤击力

H_0 —单桩水平静载荷试验中作用于桩顶的水平力

σ_p —桩身最大锤击压应力

σ_t —桩身最大锤击拉应力

Q —单桩竖向抗压静载荷试验中施加的竖向荷载

Δs_i —竖向抗压静载荷试验第 i 级荷载作用下的沉降量，简称
沉降增量

U —单桩竖向抗拔静载荷试验中施加的上拔荷载

V —质点振动速度

Y_0 —水平力作用点的水平位移

2.2.3 几何参数

A —桩截面积

A_h —荷载箱的面积

A_p —桩身截面面积

b_0 —桩身计算宽度

B —矩形桩的边宽

I —桩身换算截面惯性矩

l' —每个检测剖面相应两声测管外壁间的净距离

L —桩长，测点下桩长

L_1 —缺陷离桩顶的距离

L_u —上段桩长度

l —换能器中心距

X —缺陷位置至传感器安装点的距离

Z_i —第 i 个测点的深度

2.2.4 其他

A_D —声波波幅临界值

A_m —声波波幅平均值

A_{pi} —第 i 个测点的声波波幅值

α —桩的水平变形系数

β —桩身结构完整性系数
 Δf —完整桩两相邻谐振峰的频差
 G_1 —荷载箱上部桩的自重;
 E_n —设计桩顶以上超灌高度的重量、空桩段泥浆或回填土自重及桩顶配重
 h_i —第 i 段测斜点距;
 I —接触式仪器法恒定电流源电流;
 J_c —凯司法阻尼系数
 K —桩孔(墙槽)垂直度;滑动测微计的率定系数;
 k —触式仪器法仪器常数;
 K_s —蠕变率
 L —实测孔(槽)深;
 θ —测斜顶角;
 ϕ —测斜探头或扶正器外径;
 ρ_z —荷载箱有效面积比
 γ_1 —受检桩的抗压摩阻力转换系数
 γ_2 —受检桩的抗拔摩阻力转换系数
 S_x —声速标准差
 t —声时;反射波到达时间;沉降观测时间
 t' —声时修正值
 t_{pi} —第 i 个测点的声时
 Δt —速度波第一峰与桩底反射波峰间的时间差
 Δt_x —速度波第一峰与缺陷反射波峰间的时间差
 t_i —超声波声时测量值;
 ΔV —接触式仪器法信号电位差。
 Z —地磁场垂直分量
 Z_0 —测区地磁场垂直分量背景值

3 基本规定

3.1 一般规定

- 3.1.1** 桩基工程应进行单桩承载力和桩身完整性的检测工作。
- 3.1.2** 用于试验检测的计量器具应经检定或校准合格，且在有效期内，其性能应符合相应检测方法的技术要求。
- 3.1.3** 试验检测机构应评估场地环境、外部干扰等因素对现场检测的影响，采取有效应对措施，确保人员安全和检测工作正常开展。

3.2 检测方法

3.2.1 基桩检测应根据检测目的及内容，考虑工程设计要求、地质条件、基础类型、施工质量可靠性等因素，按表 3.2.1 合理选择检测方法。单一检测方法不能满足工程需求或检测结论无法明确时，应选用两种或两种以上方法进行检测。

表 3.2.1 检测方法

检测方法	检测目的及内容
单桩竖向抗压静载荷试验	确定单桩竖向抗压极限承载力； 判定单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求； 通过桩身应变、位移测试，计算桩侧、桩端阻力； 验证高应变法的单桩竖向抗压承载力检测结果。
单桩竖向抗拔静载荷试验	确定单桩竖向抗拔极限承载力； 判定单桩竖向抗拔承载力是否满足设计要求； 通过桩身应变、位移测试，计算桩侧抗拔阻力。
单桩水平静载荷试验	确定单桩水平临界荷载和极限承载力，推定土抗力参数； 判定水平承载力或水平位移是否满足设计要求； 通过桩身应变、位移测试，计算桩身弯矩。

表 3.2.1 检测方法（续表）

检测方法	检测目的及内容
高应变法	判定单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求；检测桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别；分析桩侧和桩端土阻力；进行打桩过程监控。
低应变法	检测桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别。
声波透射法	检测钻孔灌注桩（地下连续墙）缺陷及其位置；判定桩身完整性类别或地下连续墙墙体质量。
钻芯法	检测钻孔灌注桩桩长、地下连续墙墙深；桩身（墙体）混凝土强度、桩（墙）底沉渣厚度；桩身（墙体）缺陷及位置，判定桩身完整性类别或墙体质量，判定或鉴别桩端持力层岩土性状。
钻孔灌注桩成孔检测、地下连续墙成槽检测	检测孔（槽）壁垂直度、孔径（槽宽）、孔（槽）深及沉渣厚度是否满足设计要求。
自平衡法	确定单桩竖向抗压极限承载力；判定单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求；确定单桩竖向抗拔极限承载力；判定单桩竖向抗拔承载力是否满足设计要求。
桩身内力测试	结合竖向抗压静荷载试验，可得到桩侧各土层的分层抗压侧阻力和桩端支承力；结合竖向抗拔静荷载试验，可得到桩侧土的分层抗拔侧阻力；结合水平静荷载试验，可求得桩身弯矩分布，最大弯矩位置等；对打入式预制混凝土桩或钢桩，可得到打桩过程中桩身各部位的锤击拉、压应力。
锚杆抗拔试验	检测基础锚杆的抗拔承载力与位移、表观自由长度、持有荷载与位移、锚杆的锁定力等。
预制混凝土桩破坏性检测	主要检测项目为外观质量、尺寸偏差、钢筋/钢棒的抗拉强度、数量、直径、保护层厚度及箍筋直径、间距等。
焊缝质量检测	检测多节预制混凝土桩或钢桩焊接的外观质量及内部质量探伤。
孔内成像检测法	检测桩（墙）缺陷及其位置。

表 3.2.1 检测方法（续表）

检测方法	检测目的及内容
磁测井法	检测钻孔灌注桩（地下连续墙）钢筋长度、预制空心桩接桩位置、桩长是否满足设计要求。
旁孔法	检测桩身长度或地下连续墙深度。
管波法	检测桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别，判定或鉴别桩端持力层岩土性状。

3.2.2 桩基极限承载力标准值应通过静载荷试验确定。

3.2.3 对单位工程内同条件下的工程桩，当满足下列条件之一时，应采用静载荷试验方法进行承载力验收检测：

- 1 地基基础设计等级为甲、乙级的桩基；
- 2 地质条件复杂、桩施工质量可靠性低；
- 3 采用新桩型或新工艺。

3.2.4 有下列情况之一的桩基工程，可采用高应变法对工程桩单桩竖向抗压承载力进行检测：

- 1 本规程第 3.2.3 条规定条件以外的桩基；
- 2 地基基础设计等级为甲、乙级的建筑桩基静载荷试验的辅助检测。

3.2.5 钻孔灌注桩施工过程中，应对桩孔孔径、孔深、孔的垂直度和孔底沉渣厚度进行检测；地下连续墙施工过程中，应对成槽槽宽、槽深、垂直度、沉渣厚度进行检测。

3.2.6 打入式预制混凝土桩有下列条件之一时，宜采用高应变法进行试打桩的打桩过程监测：

- 1 控制打桩过程中的桩身应力；
- 2 选择沉桩设备和确定工艺参数；
- 3 选择桩端持力层。

3.2.7 既有建筑基桩的检测与评价，宜优先选择无破损或微破损的检测方法。

3.3 检测数量

3.3.1 基桩检测数量的确定应以单位工程同规格、同桩型且桩端进入同一持力层的基桩总数为计算依据。

3.3.2 为设计提供依据的承载力检测，应根据设计确定的基桩受力状态，采用相应的静载荷试验方法。试验桩位置应符合设计要求及地质条件要求，检测数量应满足设计要求，且在同一条件下同一类型基桩不应少于 3 根。

3.3.3 采用单桩静载荷试验进行承载力验收检测时，检测数量不应少于同一单位工程相同条件的同一类型基桩总桩数的 1%，且不应少于 3 根。

3.3.4 采用高应变法进行单桩竖向抗压承载力检测时，其检测数量不应少于同一单位工程相同条件下同一类型基桩总数的 5%，且不应少于 5 根。

3.3.5 锚杆抗拔试验数量应符合下列规定：

- 1 基本试验，同类型锚杆试验数量不应少于 6 根；
- 2 验收试验，锚杆检验数量不应少于锚杆总数的 5%，且同类型的锚杆不应少于 6 根；
- 3 持有荷载试验，锚杆检验数量不应少于锚杆总数的 5%，试验数量不应少于 6 根。

3.3.6 混凝土桩桩身完整性的检测数量应符合下列规定：

- 1 每个承台的检测桩数不应少于 1 根。
- 2 对地基基础设计等级为甲、乙级、地质条件复杂或成桩质量可靠性较低的灌注桩，检测数量不应少于总桩数的 50%，且不应少于 20 根；其他桩基工程的灌注桩检测数量不应少于总桩数的 30%，且不应少于 20 根。
- 3 两节及两节以上预制混凝土桩，检测数量不应少于总桩数的 30%，且不应少于 10 根，应抽取不小于总桩数的 5% 进行高应变法检测，且不应少于 5 根；单节预制混凝土桩，检测数量不应少于总桩数的 10%，且不应少于 10 根。

4 桩长超过 45m 的大直径灌注桩、嵌岩灌注桩、地基基础设计等级为甲级灌注桩，应抽取不小于 10% 数量的基桩进行声波透射法或钻芯法检测；逆作法、上下同步施工时，单桩单柱竖向支承桩应 100% 采用声波透射法检测。

5 市政桥梁基础灌注桩应 100% 进行检测，其中采用声波透射法的检测数量不应少于总桩数的 50%。

6 采用高应变法或钻芯法进行桩身完整性检测时，检测数量不宜少于总桩数的 5%，且不应少于 5 根。

7 采用孔内成像法检测疑似缺陷桩时，检测数量宜根据实际情况确定，不宜少于 3 根。检测结果作为桩身完整性验收依据时，检测数量应根据工程的具体情况，按下列要求综合确定并满足评价要求。

1) 当完整性检测的其他方法均不适用，仅能采用孔内成像法检测时，检测数量不应少于总数量的 20%，且不应少于 10 根；

2) 当部分采用其他方法检测，部分需要采用孔内成像法进行复核时，检测数量应根据工程具体情况，由有关各方确定；

3) 当孔内成像检测结果与预期或已有检测结果差异较大时，应扩大检测，检测数量应得到工程建设相关方的确认；

4) 需要采用填芯法对有缺陷的空心桩补强时，补强前应全数进行孔内成像检测；

3.3.7 钻孔灌注桩成孔检测数量应符合下列规定：

1 试成孔及静载荷试验桩孔应 100% 进行成孔质量检测；

2 每个承台的检测孔数不应少于 1 个；

3 对地质条件复杂或成桩质量可靠性较低的灌注桩、非等直径灌注桩，检测数量不应少于总桩孔数的 40%，且不应少于 20 个孔；其他灌注桩的检测数量不应少于总桩孔数的 20%，且不应少于 10 个孔。

3.3.8 地下连续墙成槽检测数量应符合下列规定：

1 试成槽、异型槽（非矩形槽）应 100% 进行成槽质量检测；

2 地下连续墙作为永久结构，成槽应 100% 检测；

3 地下连续墙作为临时结构，成槽检测比例不应少于总槽段数的 20%，且不应少于 10 个槽段；

4 每个槽段检测数量不应少于 3 个断面。

3.3.9 进入施工场地的预制混凝土桩应进行随机见证抽样检测，且应符合下列规定：

1 沉桩前，每个厂家生产的每一种桩型随机抽取 3 节桩节进行破坏性检测；

2 检测项目为外观质量、尺寸偏差、端板厚度、钢筋/钢棒的抗拉强度、数量、直径、布置、保护层厚度、混凝土抗压试验；机械连接的抗拉强度等。

3.3.10 多节桩接头焊接质量检测数量不宜少于总桩数的 1%，且不应少于 3 根。

3.3.11 磁测井法检测混凝土桩钢筋笼长度检测数量不宜少于总桩数的 1%，且不宜少于 3 根。

3.3.12 旁孔法检测数量不宜少于总桩数的 5%，且不宜少于 3 根。

3.3.13 管波法检测预制混凝土空心桩的桩身完整性检测数量不应少于总桩数的 10%，且不宜少于 10 根，其中单桩单柱每 4 根单桩不宜少于 1 根。

3.3.14 混凝土灌注桩的检测遇到下列情况之一，可采用管波法进行检测：

1 单桩有效钻芯孔数量不满足本规范要求的数量时或对钻芯法检测结果有疑问时；

2 钻芯法发现桩端持力层存在岩溶、破碎带或软弱夹层时；

3 桩端持力层经过加固补强的桩。

3.3.15 打入式预制混凝土桩，当采用高应变法进行打桩监控时，在相同施工工艺和相近地质条件下，监控数量不应少于 3 根。

3.3.16 灌注桩排桩，检测方法及数量应符合下列规定：

1 桩身完整性检测比例应为 100%，其中超声波透射法检测比例不应低于总桩数的 20%，且不应少于 5 根。

2 当对排桩的竖向承载力有要求时，可对其进行静载荷试验，检测比例不宜低于总桩数的 1%，且不应少于 3 根。

3.3.17 地下连续墙，墙体质量检测方法及数量应符合下列规定：

1 在成墙后采用超声波透射法检测墙体混凝土质量，检测墙段数不宜少于总墙段数的 20%，且不应少于 3 幅。

2 宜采用钻孔取芯法检测墙体混凝土质量和强度，检测墙段数不宜少于总槽段数的 1%，且不应少于 3 幅；单幅墙体钻孔取芯数量不应少于 2 个。

3.4 检测桩位的确定

3.4.1 检测桩位的选择宜均匀分布并随机抽样，并考虑下列因素：

- 1 施工质量有问题或有疑问的桩；
- 2 结构受力较大部位或荷载差异较大部位；
- 3 地基土工程性能较差部位或土层变化复杂地段；
- 4 不同施工工艺以及不同施工机组的桩；
- 5 设计方、委托方认为必须选取的。

3.4.2 检测桩位的选择应事先确定，检测过程中如需要调整位置，应经过建设单位、设计单位、监理单位的确认。

3.5 检测前的准备

3.5.1 检测机构在接受检测委托后，应及时调查、搜集下列资料：

- 1 岩土工程勘察资料、桩基设计资料或图纸、基桩施工原始记录及平面位置图；施工工艺和施工中出现的异常情况；
- 2 委托方和设计单位的检测要求；
- 3 检测项目现场实施的可行性。

3.5.2 检测机构应根据调查结果和检测目的，选择检测方法，制定检测实施方案。

3.5.3 检测前应对检测所需要的设备仪器仪表检查调试，确认其工作状态良好。

3.5.4 检测开始时间的确定应符合下列规定：

1 采用钻芯法检测时，被检桩（墙体）的混凝土龄期应达到 28d 或预留同条件养护试块强度达到设计强度；仅进行桩身完整性、桩长度检测的，混凝土抗压强度不宜小于 15MPa；

2 采用低应变法或声波透射法检测时，被检桩（墙体）的混凝土抗压强度应达到设计强度的 70%，且不宜小于 15MPa；

3 承载力检测前，桩身混凝土应达到设计强度。泥浆护壁钻孔灌注桩休止时间不宜少于 28 天，预制混凝土桩休止时间不宜少于表 3.5.4 的规定。

表 3.5.4 休止时间（天）

土的种类	休止时间(天)
砂土	7
粉土、黏性土	15
饱和软黏土	25

3.6 确认检测与扩大检测

3.6.1 高应变法无法判定桩承载力、低应变法不能判定桩身完整性类别时，应进行确认检测。承载力可用静载荷试验，完整性可用钻芯法等进行确认检测。

3.6.2 在桩身完整性检测中，桩身或接头存在裂隙的预制混凝土桩可采用高应变法进行确认检测。具备条件的空心预制混凝土桩也可采用孔内成像法进行确认。

3.6.3 采用低应变法检测桩身完整性时，发现有Ⅲ、Ⅳ类桩存在，且不能为补强或设计变更方案提供可靠依据时，应以原检测比例加倍扩大检测，直至 100%检测为止；低应变法检测中的Ⅲ、Ⅳ类桩，工程处理后应进行确认检测，并评价是否满足设计要求。

3.6.4 桩身完整性为Ⅰ、Ⅱ类，承载力不满足要求的，可采用高应变对其他桩进行承载力确认检测。

3.6.5 单桩承载力或钻芯法结果不满足设计要求时，应分析原因并经各方协商认定后扩大检测，采用高应变法检测单桩承载力扩大检测比例不小于总桩数 10%且不少于 10 根，以判定单桩承载力值

的范围；采用钻芯法扩大检测比例不小于总桩数 10%且不少于 10 根，以确定桩身完整性类别分布情况。

3.6.6 采用磁测井法检测钢筋笼长度不满足设计要求时，应扩大比例检测，检测比例不小于总桩数的 10%，且不少于 10 根，以确定钢筋笼长度的分布情况。

3.7 检测结果评价

3.7.1 桩身完整性评价，应给出每根被检桩的桩身完整性类别。桩身完整性分类应符合表 3.7.1 的规定及本规程第 5、6、7、8、18 章的相关技术要求。

表 3.7.1 桩身完整性分类表

桩身完整性分类	分类原则
I 类桩	桩身结构完整
II 类桩	桩身结构基本完整或有轻微缺陷，承载能力极限状态下不会影响桩身结构承载力的正常发挥
III 类桩	桩身存在明显缺陷，对桩身结构承载力有影响
IV 类桩	桩身有严重缺陷或断桩

3.7.2 工程桩承载力的评价，应给出每根被检桩的承载力实测值，并评价单桩承载力是否满足设计要求。

3.7.3 单位工程工程桩验收按本规程 3.3 节规定要求进行检测时，仅对被检桩进行桩身完整性评价与分类，当工程桩进行 100%验收检测时，应给出单位工程的桩身完整性评价及类别占比。

3.8 检测报告

3.8.1 检测报告应包括下列内容：

- 1 概况（包括拟建物的结构类型、基础形式、建设规模和座落位置等，设计要求和检测目的）；
- 2 地质情况，附典型的取样钻孔柱状图和土的物理力学指标；

3 所采用的检测方法、检测数量，检测日期，所使用的仪器设备、传感器类型及编号、所用检测方法原理（包括示意图），所依据的检验标准；

4 检测时的检测作业条件；

5 检测结果及分析（包括检测数据表和必须的图件）；

6 结论；

7 附图附表（包括桩位平面图和每根桩的测试曲线、数据表）；

8 责任表（包括现场检测、报告编写、审核、批准人员的签名以及建设、勘察、设计和施工等单位的名称）。

4 静载荷试验

4.1 一般规定

4.1.1 静载荷试验适用于检测单桩的竖向抗压、竖向抗拔承载力和水平承载力。

4.1.2 为设计和施工验收提供依据的静载荷试验应分别符合下列规定：

1 竖向抗压静载荷试验：为设计提供依据的试验桩，应加载至桩侧及桩端岩土阻力达到极限状态或达到桩身材料的设计强度；工程桩验收检测时，最大加载量不应小于设计要求单桩竖向抗压承载力特征值的 2.0 倍；当桩的承载力以桩身强度控制时，可按设计要求的最大加载量进行。

2 竖向抗压静载荷试验：为设计提供依据的试验桩，应加载至桩侧及桩端岩土阻力达到极限状态或达到桩身材料的设计强度，或者按照设计要求的最大加载量或桩顶沉降量进行控制；工程桩验收检测时，最大加载量不应小于设计要求单桩竖向抗压承载力特征值的 2.0 倍。

3 水平静载荷试验：为设计提供依据的试验桩，宜加载至桩顶出现较大水平位移或桩身结构破坏。工程桩验收检测时，可按设计要求的水平位移允许值控制加载。

4.1.3 在静载荷试验前应检测试桩以及锚桩的桩身完整性，在试验后宜检测试桩和锚桩的完整性，其结果用于对试验结果的辅助分析评价；试桩类型为混凝土钻孔灌注桩时，宜在试桩施工时进行成孔质量检测。

4.1.4 当桩身埋设有传感器或位移杆进行桩身内力测试时，应按本规程第 11 章的规定执行。

4.1.5 桩身有明显扩径且不具有代表性的灌注桩不应作为试桩，接桩质量有明显缺陷的多节预制混凝土桩不应作为抗拔试桩。

4.1.6 为设计提供依据的试验桩，在距离试验桩 3m~10m 范围内应具有工程地质钻孔资料。

4.1.7 利用抗压试验桩进行竖向抗拔静载荷试验时，抗压试验结束至抗拔试验开始的间歇时间应不少于 7 天；利用已完成竖向静载荷试验的桩进行水平静载荷试验时，间歇时间不宜少于 3 天。不得在抗压静载荷试验的同时利用锚桩进行抗拔静载荷试验。

4.1.8 桩端岩土载荷试验可按本规程附录 A 执行，检测数量不宜少于 3 点，且不应少于同一单位工程相同条件下同一类型基桩总桩数的 1%。

4.2 单桩竖向抗压静载荷试验

4.2.1 试桩应满足下列要求：

1 试桩的桩型尺寸、成桩工艺和质量控制标准应与工程桩一致，并具有代表性。

2 试桩顶部露出试坑地面的距离应大于 200mm，试坑地面宜与桩承台底设计标高一致。试桩桩顶标高高于工程桩桩顶时，试验时应考虑富余桩身段的桩侧阻力。

3 混凝土桩的桩头加固按本规程附录 B 执行。

4.2.2 试验加载设备应采用液压千斤顶。当采用两台或两台以上千斤顶加载时，应并联同步工作，且应符合下列规定：

1 采用的千斤顶型号、规格应相同；

2 千斤顶的合力中心应与被检桩的横截面形心重合。

4.2.3 反力装置可根据现场条件，选择锚桩反力装置、压重平台反力装置、锚桩压重联合反力装置、地锚反力装置等，且应符合下列规定：

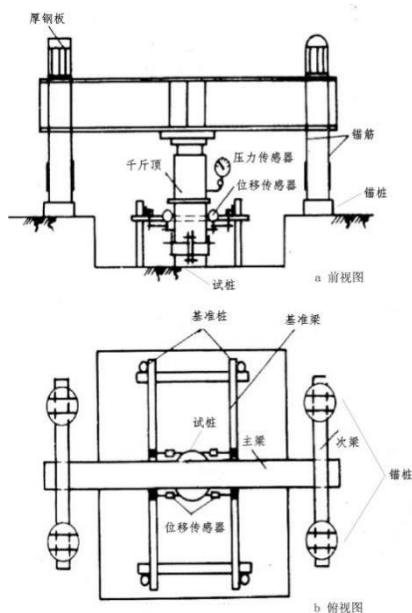


图 4.2.3 - 1 锚桩横梁反力装置

1 加载反力装置提供的反力不应小于预估最大试验荷载的 1.2 倍。

2 工程桩作锚桩时，锚桩数量不宜少于 4 根，且应对锚桩上拔量进行监测；上拔量测读点应在锚桩桩顶的中心位置，并能反映桩顶的实际上拔状况，不应安置在锚桩的钢筋上；每一级加荷前后均应记录各锚桩桩顶的上拔量，试验中桩顶上拔量应趋于稳定或不宜大于锚桩的最大弹性拉伸变形量。

3 压重荷载在试验前应一次加足，并均匀稳固放置在平台上，且压重荷载通过支撑平台作用于地基的压应力不宜大于地基承载力特征值的 1.5 倍。

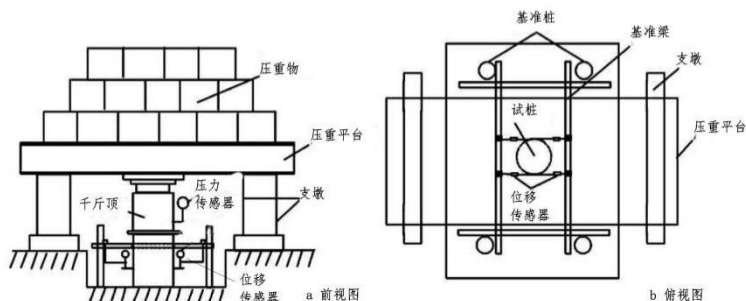


图 4.2.3—2 压重平台反力装置

4.2.4 试桩、锚桩或压重平台支墩边和基准桩之间的中心距离应符合表 4.2.4 的规定。

表 4.2.4 试桩、锚桩和基准桩之间的中心距离

反力系统	试桩与锚桩（或压重平台支墩边）	试桩与基准桩	基准桩与锚桩（或压重平台支墩边）
锚桩横梁反力装置	$\geq 4(3)D$ 且 $>2.0\text{m}$	$\geq 4(3)D$ 且 $>2.0\text{m}$	$\geq 4(3)D$ 且 $>2.0\text{m}$
压重平台反力装置	$\geq 4D$ 且 $>2.0\text{m}$	$\geq 4(3)D$ 且 $>2.0\text{m}$	$\geq 4D$ 且 $>2.0\text{m}$
锚桩压重联合反力装置	$\geq 4(3)D$ 且 $>2.0\text{m}$	$\geq 4(3)D$ 且 $>2.0\text{m}$	$\geq 4(3)D$ 且 $>2.0\text{m}$

注：1 D —试桩或锚桩的设计直径或边宽，取其较大者（如试桩或锚桩为扩底桩或多支盘桩时，试桩与锚桩的中心距尚不应小于 2 倍扩大端直径）。

2 括号内数值可用于工程桩验收检测时多排桩设计桩中心距离小于 $4D$ 的情况。

4.2.5 量测仪表性能技术要求应符合下列规定：

1 位移测试仪表测量误差不应大于 $0.1\%FS$ ，分辨力应优于或等于 0.01mm ，宜采用大量程的位移传感器或百分表。

2 荷重传感器、压力传感器或压力表的准确度应优于或等于 0.5 级。试验用压力表、油泵、油管在最大加载时的压力不应超过额定工作压力的 80%。

4.2.6 荷载与沉降的量测应符合下列规定：

1 宜优先选用放置于千斤顶上的测力传感器直接测定荷载；当采用并联于千斤顶油路上的压力表或测压传感器测定油压时，应根据千斤顶率定曲线换算荷载。

2 不能直读的电子式位移计、测力或测压传感器，宜用机械式百分表、油压表同步观测，以便校核。

3 直径或边宽大于 500mm 的试桩应在其 2 个正交直径方向对称安置 4 个位移量测仪表，直径小于等于 500mm 的试桩可对称安置 2 个位移量测仪表。

4 沉降测定平面应在桩顶平面以下 200mm~500mm 之间，测点应固定在桩身；基准梁应具有足够刚度，梁的一端应固定在基准桩上，另一端应简支于基准桩上。

5 固定和支承位移量测仪表的夹具和基准梁应避免气温、振动和其他外界因素影响。

6 大吨位静载荷试验的荷载与沉降量测应选用自动测量记录设备。

7 大直径试桩静载荷试验的沉降量测可采用静力水准、电子水准仪等设备，其测量精度不应低于 4.2.5 的规定。

4.2.7 单桩竖向抗压静载荷试验应采用慢速维持荷载法进行。

4.2.8 慢速维持荷载法试验加载卸载及沉降观测应符合下列规定：

1 等量分级加载，每级荷载宜为单桩预估极限荷载的 1/10，第一级可按 2 倍分级荷载加荷。

2 每级加载后，第一小时内按第 5min、15min、30min、45min、60min 各测读一次桩顶沉降量，以后每隔 30min 测读一次，每级荷载在维持荷载过程中的变化幅度不应超过分级荷载的 $\pm 10\%$ 。

3 沉降相对稳定标准：每级荷载作用下每一小时内的沉降增量不超过 0.1mm，并连续出现两次（从每级荷载施加后的第 30min 开始，由三次或三次以上每 30min 的沉降观测值计算）。

4 最后一级荷载完成后，应分级卸荷至零，每级卸载量为加载量的 2 倍。

5 卸载时，每级荷载维持 1h，按第 15min、30min、60min 各测读一次桩顶沉降量；卸载至零后，应测读桩顶残余沉降量，维持时间不应少于 3h。

6 工程桩验收检测时，每级卸载可维持 15min，按第 5min、15min 测读桩顶沉降量后，即可卸下一级荷载；卸载至零后，应测读桩顶残余沉降量，维持时间不应少于 1h，测读时间为第 5min、15min、30min、60min。

4.2.9 满足下列条件之一时，可终止加载：

1 某级荷载作用下，桩顶沉降量大于前一级荷载作用下的沉降量的 5 倍，且桩顶总沉降量超过 40mm。

2 某级荷载作用下，桩顶沉降量大于前一级荷载作用下的沉降量的 2 倍，且在 24h 内未达到相对稳定标准。

3 荷载-沉降曲线呈缓变型时，可加载至桩顶总沉降量 60mm~80mm（大直径桩或桩身弹性压缩较大时取高值），当桩端阻力尚未充分发挥时，可加载至桩顶总沉降量超过 80mm。

4 已达到设计要求的最大加载量或变形式。

5 已达到反力装置的最大加载量。

6 工程桩作锚桩时，锚桩上拔量已达到最大弹性拉伸变形式。

4.2.10 测试桩身应变和桩身截面位移时，数据的测读时间宜符合本规程第 4.2.8 条的规定。

4.2.11 单桩竖向抗压静载荷试验检测数据的整理应符合下列规定：

1 单桩竖向抗压静载荷试验数据处理应绘制荷载-沉降（ $Q-s$ ）关系曲线、沉降-时间对数（ $s-\lg t$ ）关系曲线；也可绘制其他辅助分析曲线。

2 同一工程同一类型的各试桩曲线横坐标和纵坐标的比例尺宜相同。

3 当进行桩身应变和桩身截面位移测定时，按本规程第 11 章的规定，整理测试数据，绘制桩身轴力分布图，计算不同土层的桩侧阻力和桩端阻力。

4.2.12 单桩竖向抗压极限承载力应按下列方法综合分析确定：

1 陡降型曲线：

1) 取 $Q-s$ 曲线上陡降起始点所对应的荷载值;

2) 取 $s-\lg t$ 曲线尾部出现明显向下弯曲的前一级荷载值。

以上述两点标准综合分析确定单桩竖向抗压极限承载力。

2 缓变型曲线:

满足第 4.2.9 条第 3 款的终止加载条件时,可取 $s=40\text{mm}$ 相对应的荷载作为单桩竖向抗压极限承载力;对直径不小于 800mm 的桩,可取 $s=0.05D$ (D 为桩端直径)对应的荷载值;桩长大于 40m 时,宜考虑桩身的弹性压缩。

3 出现本规程第 4.2.9 条第 2 款情况,取前一级荷载值。

4 按本条 1~3 款确定桩的竖向抗压承载力未达极限时,取最大试验荷载作为单桩竖向抗压极限承载力。

4.2.13 为设计提供依据的单桩竖向抗压极限承载力的标准值,应符合下列规定:

1 参加统计的试桩结果,当极差不超过平均值的 30% 时,取平均值为单桩竖向抗压极限承载力标准值。

2 极差超过平均值的 30% 时,应分析原因,结合桩型、施工工艺、地基条件、基础形式等工程具体情况,综合确定极限承载力,不能明确极差过大原因时,应增加试桩数量。

3 试验桩数量小于 3 根或桩基承台下的桩数不大于 3 根时,应取低值。

4.2.14 单桩竖向抗压承载力特征值应按单桩竖向抗压极限承载力标准值的 50% 取值。

4.3 单桩竖向抗拔静载荷试验

4.3.1 抗拔试桩应满足下列要求:

1 试桩的桩型尺寸、成桩工艺和质量控制标准应与工程桩一致。试桩桩顶标高高于工程桩桩顶标高时,试桩时应考虑富余桩身段的桩侧阻力。

2 钢筋主筋应为通长,且露出桩顶至少 30 倍钢筋直径,并不得有影响钢筋抗拉强度的损伤。

3 预制混凝土桩应有用于施加抗拔力连接主筋或装置，预埋锚固钢筋时，锚固抗拉力不应小于抗拔试验最终加荷值的 1.2 倍。

4 桩身中、下部位出现明显扩径的桩，不宜作为抗拔试验桩；对有接头的预制混凝土桩，应复核接头强度。

4.3.2 试验加载设备应采用液压千斤顶，加载方式应符合本规程第 4.2.2 条的规定。

4.3.3 试验反力系统宜采用反力桩提供支座反力，反力桩可采用工程桩；也可根据现场情况，采用地基提供支座反力。反力架的承载力应具有 1.2 倍最大试验荷载的安全系数，并应符合下列规定：

1 采用反力桩提供支座反力时，桩顶面应平整并具有足够的强度；

2 采用地基提供反力时，施加于地基的压应力不宜超过地基承载力特征值的 1.5 倍；反力梁的支点重心应与支座中心重合。

4.3.4 试桩、支座与基准桩之间的最小中心距离应按表 4.2.4 确定。(图 4.3.4)

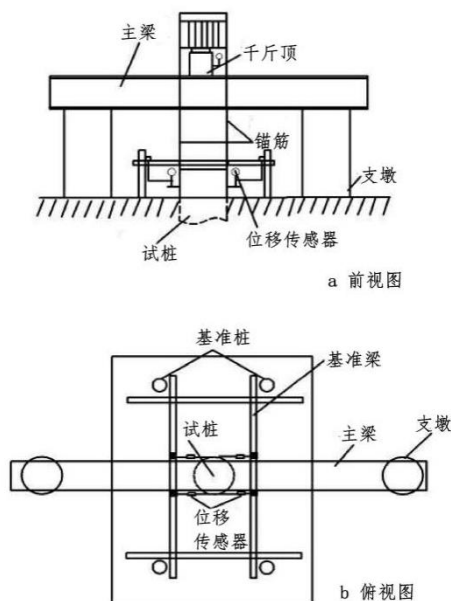


图 4.3.4 竖向抗拔静载荷试验装置

4.3.5 量测仪表应符合本规程第 4.2.5 条的规定。

4.3.6 荷载与上拔量测除应符合本规程第 4.2.6 条的规定外，对大直径灌注桩，上拔量测量点可设置在钢筋笼内侧的桩顶面混凝土上。

4.3.7 单桩竖向抗拔静载荷试验应采用慢速维持荷载法进行。

4.3.8 试验加载卸载及上拔观测应符合本规程第 4.2.8 条的规定。

4.3.9 满足下列条件之一时，可终止加载：

- 1 某级荷载作用下，桩顶上拔量大于前一级荷载作用下的上拔量的 5 倍；
- 2 按桩顶上拔量控制，累计桩顶上拔量超过 100mm；
- 3 按钢筋抗拉强度控制，钢筋应力达到钢筋强度设计值，或某根钢筋拉断；

4 对于工程桩验收检测，达到设计或抗裂要求的最大上拔量或上拔荷载值。

4.3.10 测试桩身应变和桩端上拔位移时，数据的测读时间应符合本规程第 4.2.8 条的规定。

4.3.11 单桩竖向抗拔静载荷试验检测数据的整理应符合下列规定：

- 1 单桩竖向抗拔静载荷试验数据处理应绘制荷载-桩顶上拔量（ $U-\delta$ ）关系曲线和桩顶上拔量-时间对数（ $\delta-\lg t$ ）关系曲线。
- 2 当进行桩身应变和桩端上拔位移测定时，按本规程第 11 章的规定，整理测试数据，绘制桩身轴力分布图，计算不同土层的桩侧抗拔阻力。

4.3.12 单桩竖向抗拔极限承载力应按下列方法综合判定：

- 1 取 $U-\delta$ 曲线明显陡升起始点荷载为极限荷载；
- 2 取 $\delta-\lg t$ 曲线斜率明显变陡或曲线尾部显著弯曲的前一级荷载为极限荷载。
- 3 在某级荷载作用下抗拔钢筋断裂时，取其前一级荷载为该桩的抗拔极限承载力。

4 当受检桩在最大上拔荷载作用下，未出现前三款情况时，其取值应按照设计要求最大上拔量控制值对应的荷载、施加的最大荷载或钢筋应力达到设计强度值时对应的荷载确定。

4.3.13 单桩竖向抗拔极限承载力标准值的确定应符合本规程第 4.2.13 条的规定。

4.3.14 单桩竖向抗拔承载力特征值应按单桩竖向抗拔极限承载力标准值的 50%取值。当工程桩不允许带裂缝工作时，应取桩身开裂的前一级荷载作为单桩竖向抗拔承载力特征值，并与按极限荷载 50%取值确定的承载力特征值相比，取低值。

4.4 单桩水平静载荷试验

4.4.1 水平试桩应满足下列要求：

- 1 试桩的桩型尺寸、成桩工艺和质量控制标准应与工程桩一致，试桩的竖向垂直度偏差不宜大于 1%。

2 当水平力荷载作用点处的混凝土不密实或不平整时，应对其进行补强或补平处理。

3 试桩顶部露出试坑地面的距离应大于 200mm，试坑地面宜与桩承台底设计标高一致。

4.4.2 采用卧式千斤顶顶推或采用牵引法施加水平力，加载能力不应小于最大试验加载量的 1.2 倍。

4.4.3 力作用点与试桩接触处宜安设球形铰，并要求千斤顶作用力能水平通过桩身轴线。施加水平作用力的作用线宜与实际工程承台底面标高一致。（图 4.4.3）。

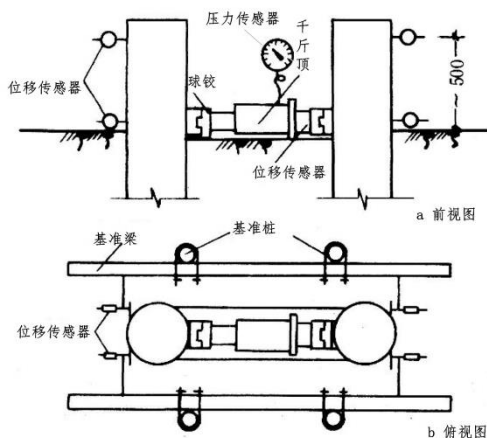


图 4.4.3 水平静荷载试验装置

4.4.4 加载反力结构装置应符合下列要求：

1 水平试验的反力可由相邻桩或现有结构物提供，也可专门设置；反力结构装置的承载能力应大于最大试验荷载的 1.2 倍，且应具有足够的刚度。

2 当采用顶推法施加荷载时，反力结构与被检桩之间的净距不应小于 3 倍桩径（或边长）；当采用牵引法施加荷载时，反力结构与被检桩之间的净距不应小于 10 倍桩径（或边长）。

4.4.5 量测仪表技术要求应符合本规程第 4.2.5 条的规定。

4.4.6 位移测量系统除应符合本规程第 4.2.6 条的有关规定外，尚应符合下列规定：

1 在水平力作用平面的受检桩两侧应对称安装两个位移测试仪表。

2 桩顶转角应在水平荷载作用点以上部位测试。当采用固定式测斜仪时，可将仪器安设在桩顶顶面或桩的侧面，测试方向应与桩的位移方向一致；当采用位移计时，两层位移计的间距宜为 50cm。

3 固定位移测试仪表的基准桩应设置在与作用力方向垂直且与位移方向相反的试桩侧面，与试桩净距不应小于 1 倍桩径且不宜小于 2m。

4 测量桩身应变时，各测试断面的测量传感器应沿受力方向对称布置在远离中性轴的受拉和受压主筋上；埋设传感器的纵剖面与受力方向之间的夹角不应大于 10° 。地面下 10 倍桩径或桩宽的深度范围内，桩身的主要受力部分应加密测试断面，断面间距不宜超过 1 倍桩径；超过 10 倍桩径或桩宽的深度，测试断面间距可以加大。桩身内传感器的埋设应符合本规程第 11 章的规定。

5 桩的挠曲变形可通过在桩内预埋测斜管，采用活动式测斜仪逐段对桩身斜率变化进行测试，预埋测斜管的测斜方向应与桩身挠曲变形方向一致。

4.4.7 单桩水平静载荷试验宜采用单向多循环加卸载试验法，当需要测量桩身应力或应变时宜采用慢速维持荷载法。

4.4.8 试验加、卸载方式和水平位移测量应符合下列规定：

1 单向多循环加载时，荷载分级宜取设计或预估极限水平承载力的 $1/10 \sim 1/15$ 。每级荷载施加后，恒载 4min 测读桩的水平位移值，然后卸载至零，停 2min 测读水平残余位移，至此完成一个加卸载循环；如此循环 5 次完成一级荷载的试验观测；试验不得中途停歇。

2 慢速维持荷载法应符合本规程第 4.2.8 条的规定。

4.4.9 试验出现下列情况之一时，即可终止加载：

1 桩身折断。

2 水平位移超过 30mm~40mm（软土中的桩或大直径桩时可取高值）。

3 水平位移达到设计要求的水平位移允许值。

4.4.10 测试桩身横截面弯曲应变时，数据的测读应与水平位移测量同步。

4.4.11 单桩水平静载荷试验数据处理应符合下列规定：

1 采用单向多循环加载法时，绘制水平力 H_0 与时间 t 及水平位移 Y_0 的关系曲线和水平力 H_0 与位移梯度 $\Delta Y_0/\Delta H_0$ 的关系曲线(图 4.4.11)。

2 采用慢速维持荷载法时，绘制水平力 H_0 与水平位移 Y_0 的关系曲线、水平力 H_0 与位移梯度 $\Delta Y_0/\Delta H_0$ 的关系曲线、水平位移 Y_0 与时间对数 $\lg t$ 的关系曲线和水平力对数 $\lg H_0$ 与水平位移对数 $\lg Y_0$ 的关系曲线。

3 绘制水平力 H_0 、水平位移 Y_0 - m （地基土水平抗力系数的比例系数）的关系曲线。

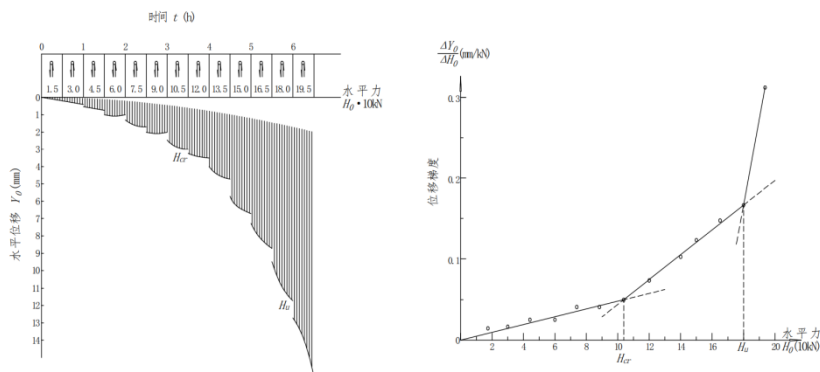


图 4.4.11 H_0 - t - Y_0 关系曲线和 H_0 - $\Delta Y_0/\Delta H_0$ 关系曲线

4.4.12 当桩顶自由且水平力作用位置位于地面处时， m 值应按下列公式确定：

$$m = \frac{(v_x H_0)^{\frac{5}{3}}}{b_0 Y_0 (EI)^{\frac{2}{3}}} \quad (4.4.12-1)$$

$$\alpha = \left(\frac{mb_0}{EI} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (4.4.12-2)$$

式中：

- m ——地基土水平抗力系数的比例系数（ kN/m^4 ）；
- α ——桩的水平变形系数（ m^{-1} ）；
- v_x ——桩顶水平位移系数，由式（4.4.12-2）试算 α ，
当 $\alpha h \geq 4.0$ 时（ h 为桩的入土深度）， $v_x = 2.441$ ；
- H_0 ——作用于地面的水平力（ kN ）；
- Y_0 ——水平力作用点的水平位移（ m ）；
- EI ——桩身抗弯刚度（ kNm^2 ），对于钢筋混凝土桩，
 $EI = 0.85 E_c I_0$ ；其中 E_c 为混凝土弹性模量， I_0 为桩身换算
截面惯性矩； $I_0 = W_0 b_0 / 2$ ；
- b_0 ——桩身计算宽度（ m ）。
对于圆形桩：当桩径 $D \leq 1\text{m}$ 时， $b_0 = 0.9 (1.5D + 0.5)$
当桩径 $D > 1\text{m}$ 时， $b_0 = 0.9 (D + 1)$
对于矩形桩：当边宽 $B \leq 1\text{m}$ 时， $b_0 = 1.5B + 0.5$
当边宽 $B > 1\text{m}$ 时， $b_0 = B + 1$

4.4.13 对进行桩身横截面弯曲应变测定的试验，按本规程第 11 章的规定，应绘制下列曲线，且应列表给出相应的数据：

- 1 各级水平力作用下的桩身弯矩分布图。
- 2 水平力-最大弯矩截面钢筋拉应力 $H_0-\sigma_s$ 曲线。

4.4.14 单桩水平临界荷载 H_{cr} 可按下列方法综合确定：

- 1 取单向多循环加载法时的 H_0-t-Y_0 曲线或慢速维持荷载法时的 H_0-Y_0 曲线出现拐点的前一级水平荷载值。

2 取曲线 $H_0 - \Delta Y_0 / \Delta H_0$ 或 $\lg H_0 - \lg Y_0$ 曲线上第一拐点对应的水平荷载值。

3 取 $H_0 - \sigma_s$ 曲线第一拐点对应的水平荷载值。

4.4.15 单桩水平极限承载力 H_u 可按下列方法综合确定：

1 取单向多循环加载法时的 $H_0 - t - Y_0$ 曲线产生明显陡降的前一级水平荷载值，或慢速维持荷载法时的 $H_0 - Y_0$ 曲线发生明显陡降的起始点对应的水平荷载值。

2 取慢速维持荷载法时的 $Y_0 - \lg t$ 曲线尾部出现明显弯曲的前一级水平荷载值。

3 取 $H_0 - \Delta Y_0 / \Delta H_0$ 或 $\lg H_0 - \lg Y_0$ 曲线上第二拐点对应的水平荷载值；

4 取桩身折断或受拉钢筋屈服时的前一级水平荷载值。

4.4.16 为设计提供依据的单桩水平极限承载力 H_u 和水平临界荷载 H_{cr} 统计取值应符合本规程第 4.2.13 条的规定。

4.4.17 单桩水平承载力特征值的确定应符合下列规定：

1 桩身不允许开裂或灌注桩的桩身配筋率小于 0.65% 时，取水平临界荷载标准值的 0.75 倍为单桩水平承载力特征值。

2 当桩身允许开裂或灌注桩的桩身配筋率大于 0.65% 时，可取单桩水平极限承载力的 1/2 作为单桩水平承载力特征值，且桩身裂缝宽度应满足相关规范要求。

3 预制混凝土桩、钢桩和桩身配筋率不小于 0.65% 的灌注桩，取设计桩顶高程处水平位移为 10mm（对水平位移敏感建筑物取 6mm）所对应荷载的 0.75 倍为单桩水平承载力特征值。

4 同时满足桩身抗裂要求时，可将按设计要求的水平允许位移限值对应的荷载作为单桩水平承载力特征值。

5 高应变法

5.1 一般规定

5.1.1 高应变法适用于检测基桩的单桩抗压承载力和桩身完整性；分析桩侧和桩端土阻力分布状况；监测打入桩沉桩过程中的桩身应力和锤击能量，为沉桩工艺参数及桩长的选择提供依据。

5.1.2 进行单桩抗压承载力检测时，宜具有现场实测经验和本地区相近条件下的可靠对比验证资料。灌注桩的承载力计算应采用实测曲线拟合法。

5.2 检测仪器设备

5.2.1 检测仪器应具有现场显示、记录、保存实测力与加速度信号的功能，其主要技术性能指标不应低于现行行业标准《基桩动测仪》JG/T 518 中表 1 规定的 2 级标准。

5.2.2 检测用传感器应符合下列规定：

1 力传感器宜采用工具式应变传感器，在 $1000\mu\text{E}$ 测量范围内的非线性误差不应大于 $\pm 2\%$ ；

2 加速度传感器能承受最大冲击加速度宜为 $30000\text{m/s}^2 \sim 50000\text{m/s}^2$ ，冲击加速度在 10000m/s^2 （钢桩为 20000m/s^2 ）范围内幅值非线性误差应小于 $\pm 5\%$ 。

5.2.3 锤击设备应采用具有稳固导向装置的打桩机械或类似装置，但不宜采用导杆式柴油锤、振动锤。

5.2.4 重锤应质量均匀，形状对称，锤底平整，高径（宽）比不应小于 1.0。

5.2.5 采用自由落锤时，锤的重量不应小于预估单桩抗压极限承载力的 1%，桩径大于 800mm 或桩长大于 35m 时宜适当增加锤重。

5.2.6 桩的贯入度宜采用精密水准仪等仪器测定。

5.3 现场检测

5.3.1 对于不满足休止时间的预制混凝土桩，应根据本地区经验，合理安排复打时间，确定承载力的时间效应。

5.3.2 桩顶面应平整，桩顶高度应满足锤击装置的要求，桩锤重心应与桩顶对中，锤击装置架立应垂直。

5.3.3 对不能承受锤击的桩头应进行加固处理，混凝土桩的桩头处理应符合本规程附录 B 的规定。

5.3.4 现场试验参数设定应符合下列要求：

1 桩头测点处的桩截面积、桩身波速、桩材质量密度和弹性模量应按测点处桩的实际情况确定。

2 测点下桩长和截面积的设定依据应符合下列规定：

1) 测点下桩长应取传感器安装点至桩端的距离；

2) 截面积应为测点处桩身实际横截面积。

3 桩身波速可结合本地经验或按同场地同类型已检桩的平均波速初步设定，现场检测完成后应按第 5.4.3 条调整。

4 桩材质量密度可按表 5.3.4 取值：

表 5.3.4 桩身材料质量密度(kg/m³)

钢桩	非预应力预制混凝土桩	预应力混凝土桩	混凝土灌注桩
7850	2450~2550	2550~2600	2300~2500

5 采样时间间隔宜为 50~200μs，信号采样点数不宜少于 1024 个点，采样时间长度应满足数据分析使用。

6 桩材弹性模量设定值应按下式计算：

$$E=\rho c^2 \quad (5.3.4)$$

式中：

E ——桩材弹性模量(kPa)；

c ——桩身内应力波传播速度(m/s)；

ρ ——桩材质量密度(kg/m³)。

7 力传感器和加速度传感器的率定数值应采用计量检定或校准结果。

5.3.5 传感器的安装应符合下列规定：

1 两对传感器应分别对称安装在桩身两侧，传感器与桩顶之间的垂直距离，对于一般中小桩，不宜小于桩径的 2 倍。对于大直径桩，不应小于 1 倍桩径。对于超大直径桩，可适当增加传感器数量。传感器的安装位置见图 5.3.5。

2 安装传感器的桩身表面应平整，且其周围不得有缺损或断面突变。安装面范围内的材质和截面尺寸应与原桩身等同。

3 应变传感器的中心与加速度传感器中心应位于同一水平面上，两者之间的水平距离不宜大于 10cm。

4 安装完毕后的传感器固定面应紧贴桩身表面，测试过程中不得产生相对滑动。安装应变式传感器时，应对其初始应变值进行监视。

5 进行连续锤击检测时，宜先将传感器引线 with 桩身固定牢靠。

5.3.6 检测时应按下列要求进行：

1 检测前应对仪器、电源、传感器、连线及设定参数等进行全面检查，调试，确认检测系统处于正常状态后方可进行检测。

2 采用自由落锤为锤击设备时，应以重锤低击为原则，最大锤击落距不宜大于 1.50m。

3 钢筋混凝土桩桩顶应设置桩垫，并根据使用情况及时更换。桩垫可采用 10mm~30mm 厚的湿润中粗砂、胶合板、木板和纤维板等材质均匀的材料。

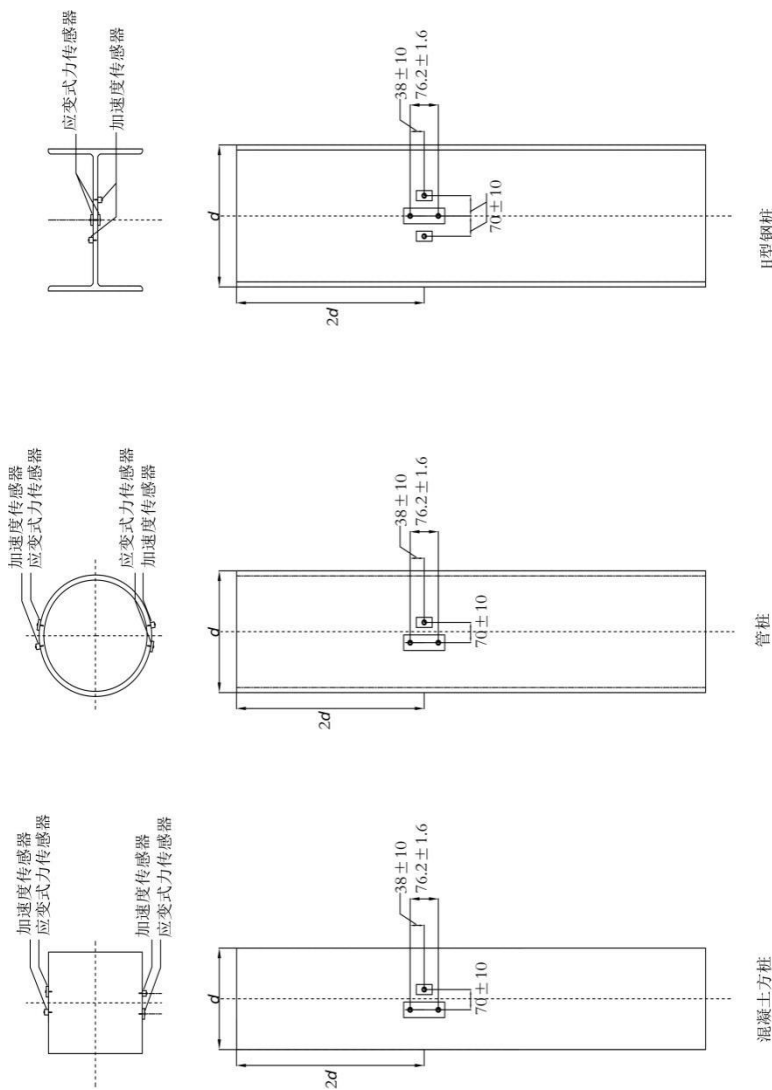


图5.3.5 测点处传感器安装

4 检测时应实测每一锤击力作用下桩的贯入度，单击贯入度宜在 2mm~6mm 范围内。

5 每根受检桩的有效锤击次数，应根据实测信号质量以及桩顶最大动位移、实测贯入度、桩身最大压、拉应力、缺陷程度及其发展状况等综合确定。

6 有缺陷的桩，应先对实测曲线作定性分析，找出桩身缺陷位置，观察其在连续锤击下，缺陷的扩大或逐渐闭合的发展趋势。

7 在检测目的是确定预制混凝土桩打桩过程中的桩身应力、沉桩设备匹配能力和选择桩长时，应按本规程附录 C 进行。

5.3.7 检测时应及时检查信号的质量，发现下列情况之一时应分析原因、进行检查调整直至停止检测：

1 信号出现异常，或同一根桩进行多锤测试时，测试信号无规律、离散性较大。

2 发现测试系统出现问题，传感器安装不良或出现故障、锤击偏心或测点处混凝土开裂、桩身有明显缺陷并在多锤作用下缺陷程度加剧。

3 力或速度时程曲线尾部不归零。

5.4 检测数据的处理和分析

5.4.1 检测单桩竖向抗压承载力时，锤击信号宜选取锤击能量较大的击次。

5.4.2 锤击后出现下列情况之一时，其信号不得作为承载力分析计算依据：

1 传感器安装处混凝土开裂或有严重塑性变形致使力的时程曲线尾部不归零；

2 严重偏心锤击，两侧力信号幅值相差超过 1 倍；

3 四通道测试数据不全。

5.4.3 桩身波速应根据实测信号按下列方法确定：

1 桩底反射信号明显时,可根据实测信号的下行波波形起升沿的起点到上行波下降沿的起点之间的时差与已知桩长值确定(图 5.4.3)。

2 桩底反射信号不明显时,可根据桩长、混凝土波速的合理取值范围以及邻近桩的桩身波速值综合判定。

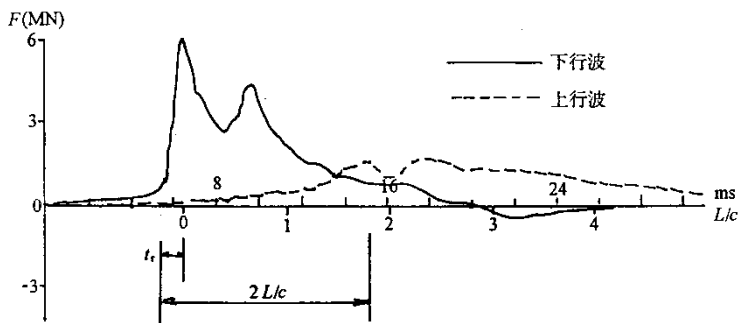


图 5.4.3 桩身波速的确定

F —锤击力; L —测点下桩长; c —桩身波速

5.4.4 高应变实测的力和速度曲线第一峰起始比例失调时,不得进行比例调整。

5.4.5 承载力分析计算前,应结合工程地质条件、设计参数和施工工艺,对实测波形特征进行定性检查:

- 1 实测曲线特征反映出桩的荷载传递性状。
- 2 观察桩身缺陷程度和位置以及连续锤击时缺陷的逐渐扩大或闭合情况。

5.4.6 出现下列情况之一时,应采用静载荷试验方法进一步确认:

- 1 桩身存在明显或严重缺陷,无法判定桩的竖向抗压承载力;
- 2 桩身缺陷对水平承载力有影响;
- 3 触变效应的影响,预制混凝土桩在多次锤击下承载力下降;
- 4 单击贯入度大,桩端同相反射强烈且反射峰较宽,侧阻力波、端阻力波反射弱,即波形明显表现出竖向承载性状与地质资料不符时;

5 嵌岩桩桩底同向反射强烈，且在时间 $2L/c$ 后无明显端阻力反射；也可采用钻芯法校核。

5.4.7 采用凯司法判定单桩竖向抗压承载力应符合下列规定：

- 1 只限于中、小直径桩。
- 2 桩身材质、截面应基本均匀。

3 阻尼系数 J_c 值应通过静动对比试验结合实测曲线拟合法、桩底岩土层的性状综合确定。在无静载荷试验的情况下，应采用实测曲线拟合法确定阻尼系数 J_c 值，拟合计算的桩数不应少于被检桩数的 30%，并不应少于 5 根。

4 在同一场地、地基条件相近和桩型及其截面积相同情况下，阻尼系数极值与平均值之差不应大于平均值的 30%。

5.4.8 凯司法判定单桩竖向抗压承载力 R_c 的基本计算公式如（5.4.8-1）所示，其计算结果不宜直接使用，应根据受检桩的实际受力状况而定。

$$R_c = \frac{1}{2}(1-J_c)[F(t_1)+ZV(t_1)] + \frac{1}{2}(1+J_c)[F(t_1+2L/c)-ZV(t_1+2L/c)] \quad (5.4.8-1)$$

$$Z = AE/c \quad (5.4.8-2)$$

式中：

R_c ——由凯司法判定的单桩竖向抗压承载力（kN）。

J_c ——凯司法阻尼系数。

t_1 ——速度第一峰对应的时刻（ms）。

$F(t_1)$ —— t_1 时刻测点处实测的锤击力（kN）。

$V(t_1)$ —— t_1 时刻的质点振动速度（m/s）。

Z ——桩身截面力学阻抗（kN s/m）。

A ——桩的截面积（m²）。

L ——测点下桩长（m）。

5.4.9 对于土阻力在 (t_1+2L/c) 时刻之后发挥或者在 (t_1+2L/c) 时刻之前出现卸载的情况，宜分别采用下列方法对式（5.4.8-1）的计算值进行补偿修正：

- 1 将 t_1 延时计算，确定 R_c 的最大值。

2 考虑卸载导致的土阻力损失，对 R_c 值进行补偿。

5.4.10 采用实测曲线拟合法分析计算单桩竖向抗压承载力时应符合下列规定：

1 实测曲线拟合法所采用的力学模型应能反映桩土体系的实际工作性状，模型参数的取值范围应能限定。

2 曲线拟合时间段长度，应在 (t_1+2L/c) 时刻后延续时间不小于 20ms；对于柴油锤打桩信号，在 (t_1+2L/c) 时刻后延续时间不应小于 30ms。

3 拟合分析选定的参数，应在岩土工程的合理范围之内。各单元所选用的土的最大弹性位移 S_q 值不得超过相应桩单元的最大计算位移值。

4 拟合完成时土阻力响应区段的计算曲线应与实测曲线吻合，其他区段的曲线应基本吻合。

5 桩贯入度的计算值应与实测值相近。

5.4.11 高应变法判定桩身完整性应符合下列规定：

1 灌注桩、有浅部缺陷的桩、扩径桩、力与速度曲线比例失调或锤击力波上升缓慢的桩，其完整性评价应采用实测曲线拟合法或其他检测方法，并根据施工工艺、场地地质条件等综合判定。

2 采用实测曲线拟合法所选用的桩土参数应符合第 5.4.10 条的规定。

3 桩身缺陷位置应按下式计算：

$$x=c(t_x-t_1)/2 \quad (5.4.11-1)$$

式中：

x ——缺陷位置与传感器安装点的距离（m）。

t_1 ——速度第一峰所对应的时刻（ms）。

t_x ——缺陷反射峰所对应的时刻（ms）。

4 等截面桩且缺陷深度 x 以上部位土阻力未出现卸载时，桩顶下第一个缺陷的完整性系数 β 值应按下式计算：

$$\beta = \frac{F(t_1) + F(t_x) + Z[V(t_1) - V(t_x)] - 2R_x}{F(t_1) - F(t_x) + Z[V(t_1) + V(t_x)]} \tag{5.4.11-2}$$

式中：

β ——桩身完整性系数，其值等于缺陷 x 处桩身截面阻抗与 x 以上桩身截面阻抗的比值。

R_x ——缺陷以上部位土阻力的估计值，等于缺陷反射波起始点的力与速度乘以桩身截面力学阻抗之差值（图 5.4.11）。

5 用 β 法评价桩身完整性时，可按照表 5.4.11 的规定进行。

5.4.12 桩身最大锤击拉、压应力和桩锤实际传递给桩的能量应按本规程附录 C 中的相应公式计算。

表 5.4.11 高应变法桩身完整性判定表

类别	β
I	$\beta = 1.0$
II	$0.8 \leq \beta < 1.0$
III	$0.6 \leq \beta < 0.8$
IV	$\beta < 0.6$

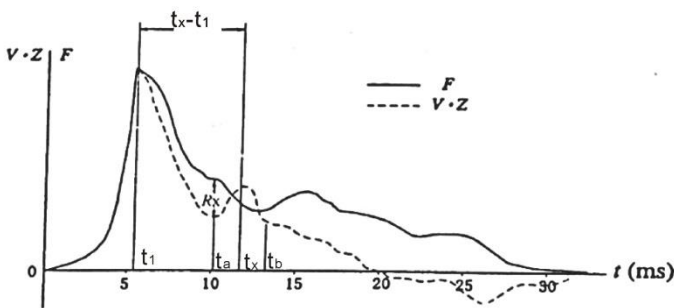


图 5.4.11 桩身结构完整性系数计算

5.4.13 高应变法检测报告应包括本规范相关规定的内容外，尚应包括下列内容：

- 1 实测的力和速度时程曲线；
- 2 实测贯入度；
- 3 凯司法计算中实际采用的桩身波速值和 J_c 值；
- 4 实测曲线拟合法所选用的各单元桩和土的模型参数、拟合曲线、计算的 $Q-s$ 曲线、土阻力沿桩身分布曲线；
- 5 拟合质量系数等；
- 6 试打桩和打桩监控所需的桩锤型号、桩垫类型、锤击数以及计算得到的桩侧和桩端静阻力、桩身锤击拉应力和压应力、桩身完整性、能量传递比等参数随入土深度的变化。

6 低应变法

6.1 一般规定

6.1.1 低应变法适用于检测混凝土桩的桩身完整性，判定桩身缺陷程度及其位置。

6.1.2 低应变法有效检测桩长范围应通过试验确定；桩长大于 40m 时，宜采用其他方法共同判定。

6.1.3 对桩身截面多变且变化幅度较大的桩型，应采用其他方法辅助验证低应变法检测的有效性。

6.1.4 对两节及两节以上的预制混凝土桩，除采用本方法进行桩身完整性检测外，应按一定比例进行高应变法检测验证。

6.2 检测仪器设备

6.2.1 检测系统应包括基桩检测仪、传感器和激振设备等。

6.2.2 检测仪器应具有信号采集、显示、储存、滤波、放大和信号分析功能，其主要技术性能指标应符合现行行业标准《基桩动测仪》JG/T 518 中的有关规定。

6.2.3 瞬态激振设备应能够激发出不同宽度的脉冲信号。

6.3 现场检测

6.3.1 检测前的桩顶处理应符合下列要求：

1 被检测桩应平整桩头、凿去浮浆及破损部分，顶面露出坚硬密实的混凝土。

2 传感器安装位置和激振位置的混凝土表面应磨平。

3 桩头的材质、强度应与桩身相同，桩头的截面尺寸不宜与桩身有明显差异。

4 桩顶外露钢筋不应影响检测信号的采集和分析。

6.3.2 传感器安装和激振操作要求，应符合下列规定：

- 1 传感器安装应与桩顶面垂直；用耦合剂粘结时，应具有足够的粘结强度。
- 2 激振点与测量传感器安装位置应避开钢筋笼的主筋影响。
- 3 激振方向应沿桩轴线方向，瞬态激振时应短促有力。
- 4 瞬态激振应通过现场敲击试验，选择合适重量的激振力锤和软硬适宜的锤垫。

6.3.3 检测参数应通过现场测试设定并符合下列规定：

- 1 时域信号分析的时间段长度应在 $2L/c$ 时刻后延续不少于 5ms。
- 2 设定桩长应为桩顶测点至桩底的施工桩长，设定桩身截面积应为施工截面积。
- 3 桩身波速可根据本地区同类型桩的测试值初步设定。
- 4 采样时间间隔或采样频率应根据桩长、桩身波速等合理选择；时域信号采样点数不宜少于 1024 个点。

6.3.4 信号采集和筛选，应符合下列规定：

- 1 根据桩径大小，沿桩中心对称布置 2 个~4 个安装传感器的检测点；实心桩的激振点宜选择在桩中心，检测点宜在距桩中心 $2/3$ 半径处；空心桩的激振点和检测点宜为桩壁厚的 $1/2$ 处，激振点和检测点与桩中心连线形成的夹角宜为 90° 。
- 2 检测波形应有良好的一致性，每根桩的各检测点保留的有效测试信号的数量不应少于 3 个。
- 3 对有缺陷的桩应改变激振点、传感器安装点位置和激振脉冲宽度进行多次检测，以相互验证。
- 4 检测中应随时检查所采集波形的质量，如有异常应及时检查检测系统，排除故障后重新检测。

6.4 检测数据的处理和分析

6.4.1 桩身波速可按下列规定进行判定：

1 应力波在桩内的传播速度 c 可根据实测波形按下列公式计算：

$$c=2L/\Delta t \quad (6.4.1-1)$$

$$c=2L\Delta f \quad (6.4.1-2)$$

式中：

L ——测点下桩长 (m)。

Δt ——速度波第一峰与桩底反射波峰间的时间差 (s)。

Δf ——完整桩两相邻谐振峰的频差 (Hz)。

2 当桩长已知、桩底反射信号明确时，应在地基条件、桩型、成桩工艺相同的基桩中，选取不少于 5 根 I 类桩的桩身波速值，按下列公式计算其场地桩身波速平均值 c_m ：

$$c_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (6.4.1-3)$$

式中：

n ——选取的完整桩根数， $n \geq 5$ 。

c_i ——第 i 根完整桩的波速，且 $|c_i - c_m|/c_m$ 不宜大于 5%。

6.4.2 桩身缺陷位置应按下列公式计算：

$$L_1 = \frac{1}{2} c_m \Delta t_x \quad (6.4.2)$$

式中：

L_1 ——缺陷距传感器安装位置的距离(m)。

Δt_x ——速度波第一峰与缺陷反射波峰间的时间差 (s)。

6.4.3 桩身完整性类别应根据实测波形图中入射波和反射波的相位、振幅、频率等特征结合施工、地质条件与被测桩型等情况按本规程表 3.7.1 的规定和表 6.4.3（灌注桩、预制混凝土桩桩身完整性判定表）所列实测时域或幅频信号特征进行综合分析判定。

表 6.4.3-1 灌注桩桩身完整性判定表

类别	时域信号特征	幅频信号特征
I	2L/c时刻前无缺陷反射信号，有桩底反射	桩底谐振峰基本等间距排列，相邻频差 $\Delta f \approx c/2L$
II	2L/c时刻前有轻微的缺陷反射波，有桩底反射	桩底谐振峰基本等间距排列，相邻频差 $\Delta f \approx c/2L$ ，轻微缺陷产生的谐振峰与桩底谐振峰之间频差 $\Delta f' \approx c/2L$
III	有明显缺陷反射波，其他特征介于 II 类和 IV 类之间	
IV	缺陷反射强烈，常出现二次以上反射，无桩底反射；或因桩身浅部严重缺陷使波形呈现低频大幅衰减振动，无桩底反射	缺陷谐振峰基本等间距排列，相邻频差 $\Delta f' \approx c/2L$ ，无桩底谐振峰；或因桩身浅部严重缺陷只出现单一谐振峰，无桩底谐振峰

注：同一场地、地质条件相近、桩型和成桩工艺相同的基桩，由于桩端处桩身阻抗与持力层阻抗相近导致实测信号无桩底反射波，此时可参照本场地同条件下有桩底反射波的其他桩实测信号判定桩身完整性类别。对于长大灌注桩因桩端阻抗与持力层阻抗相匹配，导致实测信号无桩底反射波时，可适当增加高应变方法进行辅助判别。

6.4.4 出现下列情况之一，桩身完整性判定宜结合其他检测方法进行：

- 1 实测信号复杂，无规律，无法准确判断。
- 2 桩身截面渐变或多变，且变化幅度较大的混凝土灌注桩。
- 3 超长桩，桩长超出有效检测长度范围，实测信号不能明确反映桩身下部和桩端的情况。
- 4 时域曲线在接桩处有明显反射的预制混凝土桩，且又无法判定其类别。
- 5 对于嵌岩桩，当桩底反射信号为单一反射波且与锤击信号同向时，应采取钻芯法、孔内成像法、静载荷试验或高应变法核验桩底嵌岩情况。

表 6.4.3-2 预制混凝土桩桩身完整性判定

完整性类别	时域信号特征	幅频信号特征
I	对于单节桩， $2L/c$ 时刻前无缺陷反射波，有桩底反射波；对于双节及多节桩，桩身及接桩部位均无缺陷反射波，高应变测试曲线在 $2L/c$ 时刻有明显桩底反射特征	桩底谐振峰排列基本等间距，其相邻频差 $\Delta f \approx c/2L$ ，无接桩部位谐振峰
II	桩身部位无缺陷反射波，接桩部位有轻微缺陷反射波，高应变测试曲线在 $2L/c$ 时刻有明显桩底反射特征	桩底谐振峰排列基本等间距，其相邻频差 $\Delta f \approx c/2L$ ，接桩部位产生的谐振峰与桩底谐振峰之间的频差 $\Delta f' > c/2L$
III	桩身部位有轻微缺陷反射波；其他特征介于II类与IV类之间	
IV	桩身或接桩部位有明显缺陷反射波，高应变测试曲线在 $2L/c$ 时刻没有桩底反射特征； 因浅部严重缺陷使波形出现低频大振幅衰减振动，无桩底反射波	桩身缺陷或接桩部位谐振峰排列基本等间距，相邻频差桩 $\Delta f' > c/2L$ ，无桩底谐振峰； 或因桩身浅部严重缺陷只出现单一谐振峰，无桩底谐振峰

注：II类桩仅限于双节及多节桩接桩部位存在轻微缺陷的情况。

6.4.5 低应变检测报告除应符合本规程第 3.8 节规定外，尚应包括下列内容：

- 1 桩身波速取值；
- 2 桩身完整性描述、缺陷的位置及桩身完整性类别；
- 3 时域信号时段所对应的桩身长度标尺、指数或线性放大的范围及倍数；或幅频信号曲线分析的频率范围、桩底或桩身缺陷对应的相邻谐振峰间的频差。

7 声波透射法

7.1 一般规定

7.1.1 声波透射法适用于检测直径 $\geq 600\text{mm}$ 的混凝土灌注桩桩身完整性，判定混凝土缺陷位置、范围和程度。

7.1.2 当出现下列情况之一时，可对测试区域混凝土质量进行评价，不得对整桩的完整性进行评定：

- 1 声测管未沿桩身通长配置。
- 2 声测管堵塞导致检测数据不全。
- 3 声测管埋设不符合本规程第 7.2.3 条的规定。

7.1.3 地下连续墙的声波透射法检测可参照本章执行。

7.2 检测仪器设备

7.2.1 声波检测仪应符合下列规定：

- 1 发射波形为阶跃脉冲或矩形脉冲，脉冲电压幅值为 $200\text{V}\sim 1000\text{V}$ ，且分档可调。
- 2 具有信号自动采集功能，且宜一发双收或一发多收。
- 3 具有实时显示和记录接收信号波形的功能，可进行频率测量或频谱分析。
- 4 具有首波实时显示功能和自动记录声波发射与接收换能器位置功能。
- 5 声时测量分辨率应优于 $0.5\mu\text{s}$ ，声波幅值测量相对误差应小于 2%，系统频带宽度应为 $1\text{kHz}\sim 200\text{kHz}$ ，系统最大动态范围不小于 100dB 。

7.2.2 换能器应符合下列规定：

- 1 圆柱状，径向水平面无指向性，其谐振频率为 $30\text{kHz}\sim 60\text{kHz}$ ，外径小于声测管内径，有效工作面轴向长度不应大于 150mm 。
- 2 换能器的水密性应满足在 1MPa 水压下不漏水。

3 换能器连接导线上应有深度标记，换能器应配置扶正器。

7.2.3 预埋声测管应符合下列规定：

1 桩径小于等于 0.8m 时应埋设双管；桩径大于 0.8m 时应埋设三根管；桩径大于 1.5m 时应埋设四根管（图 7.2.3）。当桩径大于 2.5m 时宜增加预埋声测管数量。

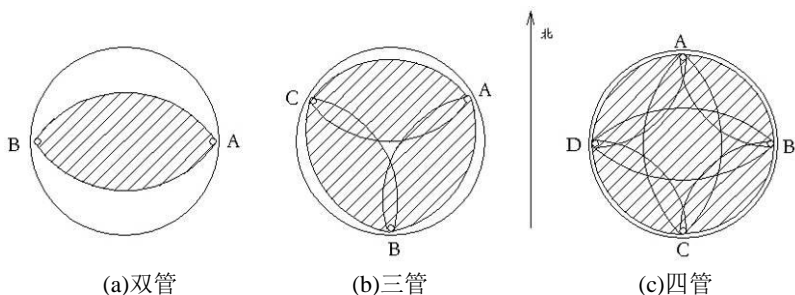


图 7.2.3 超声检测埋管编组

2 声测管应有足够径向刚度，宜采用金属管，壁厚不应小于 2mm，其内径应比换能器外径大 15mm~25mm。

3 声测管应下端封闭、上端加盖、管内无异物；声测管连接处应光滑过渡，管的连接宜采用螺纹连接或套管焊接，且不得漏水。

4 声测管应牢固焊接或绑扎在钢筋笼内侧，且相互平行定位准确，固定点间距不大于 2m。

5 声测管应埋设至桩底，管口高出混凝土顶面 100mm 以上，且各声测管管口高度一致。

6 声测管随钢筋笼下沉时，应及时向声测管内注入清水。

7.2.4 钻芯孔或预埋管钻芯法中的预埋管若满足 7.2.3 中的要求可作为声测通道。

7.3 现场检测

7.3.1 现场检测前准备工作应符合下列规定：

1 准确量测声测管内、外径和相邻声测管外壁间净距离，内、外径的测量精度为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，外壁间净距离的测量精度为 $\pm 1\text{mm}$ 。

2 将各声测管内注满清水，检查声测管畅通情况，换能器应在声测管全程范围内正常升降，必要时对声测管进行冲洗、清理。

3 采用率定法测定仪器系统延迟时间，方法如下：

将发、收换能器平行置于清水中的同一高度，其中心间距从 400mm 左右、以 100mm 的间距开始逐次加大两换能器之间的距离，同时测量与之相应的声时；再分别以纵、横轴表示间距和声时作图，在声时横轴上的截距即为 t_0 ，也可用线性回归的方法计算出 t_0 。为保证测试精度，两换能器间距的测量误差不大于 0.5% ，测量点不少于 5 个点。

$$t = t_0 + bl \quad (7.3.1-1)$$

式中：

b ——直线斜率（ $\mu\text{s}/\text{mm}$ ）；

l ——换能器表面净距离（ mm ）；

t ——声时（ μs ）；

t_0 ——仪器系统延迟时间（ μs ）。

4 声测管及耦合水层声时修正值按下式计算：

$$t' = \frac{d_1 - d_2}{v_t} + \frac{d_2 - d'}{v_w} \quad (7.3.1-2)$$

式中：

d_1 ——声测管外径（ mm ）；

d_2 ——声测管内径（ mm ）；

d' ——换能器外径（ mm ）；

v_t ——声测管材料声速（ km/s ），对钢质声测管，波速一般可取 $6000\text{m}/\text{s}$ ）；

v_w ——水的声速（ km/s ）， 20°C 时水的声速可取 $1480\text{m}/\text{s}$ ；

t' ——声测管及耦合水层声时修正值（ μs ）。

7.3.2 现场平测和斜测应符合下列规定：

1 将发射与接收声波换能器按照深度标记分别置放于待测检测剖面的两个声测管中，声测线间距不应大于 100mm。

2 平测时，发射与接收声波换能器始终保持相同深度；斜测时，发射与接收声波换能器始终保持固定高差。

3 检测过程中，应使发射与接收声波换能器同步升降，并及时校核换能器的深度。

4 检测时应从桩底开始向上同步提升发射与接收声波换能器，提升过程中应确保测试波形的稳定性，提升速度不宜超过 0.5m/s。

5 同一检测剖面的声测线间距、声波发射电压应保持不变。

6 检测中应实时显示和记录接受信号的时程曲线，读取首波声时、幅值并保存检测数据同时应保存波列图信息。在需要采用信号主频值作为异常点辅助判据时，还应读取信号主频值。

7.3.3 在桩身质量可疑的声测线附近，应采用增加声测线、交叉斜测及扇形扫测（如图 7.3.3 所示）等方式，进行复测和加密测试，确定缺陷的位置和空间分布范围。也可用声波层析成像技术（CT 技术）进行扫测和数据分析。

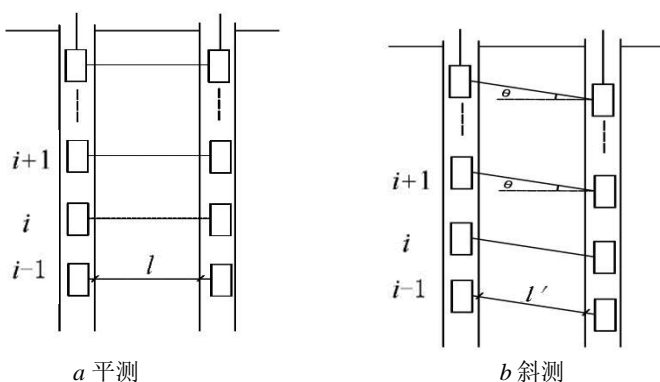


图 7.3.2 平测、斜测示意图

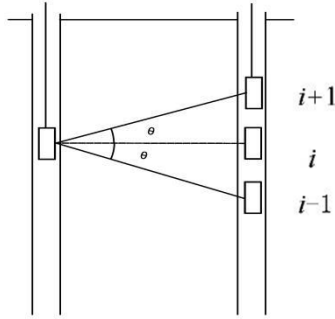


图 7.3.3 扇形扫测示意图

7.4 检测数据的处理和分析

7.4.1 当声测管倾斜、变形导致声速数据明显偏离正常值时，且无法进行合理修正，检测数据不得作为评价桩身完整性的依据。

7.4.2 平测时各声测线的声时、声速、波幅及主频，应根据现场检测数据按下列公式计算，并绘制声速-深度曲线和波幅-深度曲线，也可绘制辅助的主频-深度曲线以及能量-深度曲线。

$$t_{ci}(j) = t_i(j) - t_0 - t' \quad (7.4.2-1)$$

$$v_i(j) = \frac{l_i(j)}{t_{ci}(j)} \quad (7.4.2-2)$$

$$A_{pi}(j) = 20 \lg \frac{a_i(j)}{a_0}$$

(7.4.2-3)

$$f_i(j) = \frac{1000}{T_i(j)} \quad (7.4.2-4)$$

式中：

i ——声测线编号，应对每个检测剖面自下而上（或自上而下）连续编号；

j ——检测剖面编号，按本规程第 7.2.3 条编组；

$t_{ci}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声时（ μs ）；

$t_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声时测量值（ μs ）；

t_0 ——仪器系统延迟时间 (μs) ;

t' ——声测管及耦合水层声时修正值 (μs) ;

$l_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线的两声测管的外壁间净距离 (mm) ; 平测时, 为两声测管管口的外壁间净距离; 斜测时, 为声波发射和接收换能器各自中点对应的声测管外壁处之间的净距离, 可由桩顶面两声测管的外壁间净距离和发射接收声波换能器的高差计算得到;

$v_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声速 (km/s) ;

$A_{pi}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线的首波幅值 (dB) ;

$a_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线信号首波幅值 (V) ;

a_0 ——零分贝信号幅值 (V) ;

$f_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线信号主频值 (kHz) , 可经信号 频谱分析得到;

$T_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线首波周期 (μs) 。

7.4.3 当采用平测或斜测时, 第 j 检测剖面的声速异常判断概率统计值应按下列方法确定:

1 将第 j 检测剖面各声测线的声速值 $v_i(j)$ 由大到小依次按下列式排序:

$$v_1(j) \geq v_2(j) \geq \dots v_k'(j) \geq \dots v_{i-1}(j) \geq v_i(j) \geq v_{i+1}(j) \geq \dots v_{n-k}(j) \geq \dots v_{n-1}(j) \geq v_n(j) \quad (7.4.3-1)$$

式中:

$v_i(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线声速, $i=1, 2, \dots$;

n ——第 j 检测剖面的声测线总数;

k ——拟去掉的低声速值的数据个数, $k=0, 1, 2, \dots$;

k' ——拟去掉的高声速值的数据个数, $k'=0, 1, 2, \dots$ 。

2 对逐一去掉 $v_i(j)$ 中 k 个最小数值和 k' 个最大数值后的其余数据, 按下列公式进行统计计算:

$$v_{01}(j) = v_m(j) - \lambda_{S_x}(j) \quad (7.4.3-2)$$

$$v_{02}(j) = v_m(j) + \lambda_{S_x}(j) \quad (7.4.3-3)$$

$$v_m(j) = \frac{1}{n-k-k'} \sum_{i=k+1}^{n-k} v_i(j) \quad (7.4.3-4)$$

$$s_x(j) = \sqrt{\frac{1}{n-k-k'-1} \sum_{i=k+1}^{n-k} (v_i(j) - v_m(j))^2} \quad (7.4.3-5)$$

$$C_v(j) = \frac{s_x(j)}{v_m(j)} \quad (7.4.3-6)$$

式中：

$v_{01}(j)$ ——第 j 剖面的声速异常小值判断值；

$v_{02}(j)$ ——第 j 剖面的声速异常大值判断值；

$v_m(j)$ —— $(n-k-k')$ 个数据的平均值；

$s_x(j)$ —— $(n-k-k')$ 个数据的标准差；

$C_v(j)$ —— $(n-k-k')$ 个数据的变异系数；

λ ——由表 7.4.3 查得的与 $(n-k-k')$ 相对应的系数。

3 按 $k=0$ 、 $k'=0$ 、 $k=1$ 、 $k'=1$ 、 $k=2$ 、 $k'=2$ ……的顺序，将参加统计的数列最小数据 $v_{n-k}(j)$ 与异常小值判断值 $v_{01}(j)$ 进行比较，当 $v_{n-k}(j) \leq v_{01}(j)$ 时剔除最小数据；将最大数据 $v_{k'+1}(j)$ 与异常大值判断值 $v_{02}(j)$ 进行比较，当 $v_{k'+1}(j) \geq v_{02}(j)$ 时剔除最大数据；每次剔除一个数据，对剩余数据构成的数列，重复式（7.4.3-2）～（7.4.3-5）的计算步骤，直到下列两式成立：

$$v_{n-k}(j) > v_{01}(j) \quad (7.4.3-7)$$

$$v_{k'+1}(j) < v_{02}(j) \quad (7.4.3-8)$$

4 第 j 检测剖面的声速异常判断概率统计值，按下式计算：

$$v_0(j) = \begin{cases} v_m(j)(1-0.015\lambda) & \text{当 } C_v(j) < 0.015 \text{ 时} \\ v_{01}(j) & \text{当 } 0.015 < C_v(j) < 0.045 \text{ 时} \\ v_m(j)(1-0.045\lambda) & \text{当 } C_v(j) > 0.045 \text{ 时} \end{cases} \quad (7.4.3-9)$$

式中：

$v_0(j)$ ——第 j 检测剖面的声速异常判断概率统计值。

表 7.4.3 统计数据个数($n-k-k'$)与对应的 λ 值

$n-k-k'$	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
λ	1.28	1.33	1.38	1.43	1.47	1.50	1.53	1.56	1.59	1.62
$n-k-k'$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
λ	1.64	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.91	1.94
$n-k-k'$	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
λ	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.05	2.07	2.09	2.10	2.11
$n-k-k'$	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
λ	2.13	2.14	2.15	2.17	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23
$n-k-k'$	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
λ	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.29	2.30	2.31	2.32
$n-k-k'$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
λ	2.33	2.34	2.36	2.38	2.39	2.41	2.42	2.43	2.45	2.46
$n-k-k'$	150	160	170	180	190	200	220	240	260	280
λ	2.47	2.50	2.52	2.54	2.56	2.58	2.61	2.64	2.67	2.69
$n-k-k'$	300	320	340	360	380	400	420	440	470	500
λ	2.72	2.74	2.76	2.77	2.79	2.81	2.82	2.84	2.86	2.88
$n-k-k'$	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
λ	2.91	2.94	2.96	2.98	3.00	3.02	3.04	3.06	3.08	3.09
$n-k-k'$	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000
λ	3.12	3.14	3.17	3.19	3.21	3.23	3.24	3.26	3.28	3.29

7.4.4 受检桩的声速异常判断临界值 v_c 应按下列方法确定：

1 根据预留同条件混凝土试件或钻芯法获取芯样试件的抗压强度与声速对比试验，结合本地经验，分别确定桩身混凝土声速的低限值 v_L 和混凝土试件的声速平均值 v_p 。

2 当 $v_L < v_0(j) < v_p$ 时

$$v_c(j) = v_0(j) \quad (7.4.4)$$

式中：

$v_c(j)$ ——第 j 检测剖面的声速异常判断临界值；

$v_o(j)$ ——第 j 检测剖面的声速异常判断概率统计值。

3 当 $v_0(j) \leq v_L$ 或 $v_0(j) \geq v_p$ 时, 应分析原因, $v_c(j)$ 的取值可参考同一桩的其他检测剖面的声速异常判断临界值或同一工程相同类型且混凝土质量较稳定的其他桩的声速异常判断临界值综合确定。

4 当不具备本条第 1 款条件时, 剖面的声速临界值可按下列方法确定:

1) 桩混凝土质量较稳定, 同一检测剖面内声速值符合正态分布规律时, 可按式 (7.4.4) 判定;

2) 桩身混凝土质量较差, 同一检测剖面内声速值不符合正态分布规律或声速值整体明显偏低时, $v_c(j)$ 的取值可参考同一桩(墙)的其他检测剖面的声速异常判断临界值或同一工程相同类型桩(墙)的声速异常判断临界值综合确定。

5 对只有单个检测剖面的桩, 其声速异常判断临界值 v_c 等于检测剖面声速异常判断临界值 $v_c(j)$; 对具有三个及三个以上检测剖面的桩, 应取各个检测剖面声速异常判断临界值 $v_c(j)$ 的算术平均值, 作为该桩各声测线的声速异常判断临界值 v_c 。

7.4.5 声速 $v_i(j)$ 异常应按下式判定, 满足式 (7.4.5) 的声速值可判定为异常。

$$v_i(j) \leq v_c \quad (7.4.5)$$

7.4.6 波幅异常判断的临界值, 应按下列公式计算:

$$A_m(j) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n A_{pi}(j) \quad (7.4.6-1)$$

$$A_c = A_m(j) - 6 \quad (7.4.6-2)$$

波幅 $A_{pi}(j)$ 异常应按下式判定, 满足式 (7.4.6-3) 的波幅值可判定为异常。

$$A_{pi}(j) < A_c(j) \quad (7.4.6-3)$$

式中:

$A_m(j)$ ——第 j 检测剖面各声测线的波幅平均值 (dB);

$A_{pi}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线的波幅值;

$A_c(j)$ ——第 j 检测剖面波幅异常判断的临界值;

n ——第 j 检测剖面的声测线总数。

7.4.7 当采用信号主频值作为辅助异常声测线判据时, 主频-深度曲线上主频值明显降低的声测线可判定为异常。

7.4.8 当采用接收信号的能量作为辅助异常声测线判据时, 能量/幅值-深度曲线上接收信号能量/幅值明显降低可判定为异常。

7.4.9 采用斜率法作为辅助异常声测线判据时, 声时-深度曲线上相邻两点的斜率与声时差的乘积 PSD 值应按式(7.4.9)计算。当 PSD 值在某深度处突变时, 宜结合波幅变化情况进行异常声测线判定。

$$PSD(j,i) = \frac{[t_{ci}(j) - t_{ci-1}(j)]^2}{z_i - z_{i-1}} \quad (7.4.9)$$

式中:

PSD ——声时-深度曲线上相邻两点连线的斜率与声时差的乘积 ($\mu s^2/m$);

$t_{ci}(j)$ ——第 j 检测剖面第 i 声测线的声时 (μs);

$t_{ci-1}(j)$ ——第 j 检测剖面第 $i-1$ 声测线的声时 (μs);

z_i ——第 i 声测线深度 (m);

z_{i-1} ——第 $i-1$ 声测线深度 (m)。

7.4.10 采用声波层析成像法分析判定桩身完整性时, 应符合下列规定:

1 反演分析的数学模型应科学、合理, 能反映声波在混凝土中的传播性状。

2 网格单元的几何尺寸应与测点间距一致。

3 当埋设两根声测管时,可采用二维网格;当埋设三根及以上声测管时,宜采用三维网格,也可采用二维网格分别对每个检测剖面进行分析。

4 反演计算得到的声速值应在合理区间范围内。

5 宜以声时分析为主。

7.4.11 桩身完整性类别根据各剖面的可疑缺陷区的空间分布范围、可疑缺陷区域测点的声学参数偏离正常值的程度和接收波形变化情况,结合桩类型、地质情况、施工工艺等因素,按本规程表 3.7.1 的规定和表 7.4.11 的特征进行综合判定。

表 7.4.11 声波透射法桩身完整性判定表

完整性类别	声学特征
I	所有声测线声学参数正常,接收波形正常; 个别声测线的多个声学参数轻微异常,但此类声测线离散,在深度上未形成一定的区域,接收波形基本正常或个别测点波形轻微畸变; 多个声测线的个别声参量轻微异常,其他声参量正常,但空间分布范围小,接收波形基本正常或个别测点波形轻微畸变。
II	一个或多个剖面上多个声测线的多个声学参数轻微异常,在深度和径向形成较小的区域,多个声测线接收波形存在明显畸变;其中个别声测线的声速低于低限值; 一个或多个剖面上多个声测线的个别声参量明显异常,其他声参量轻微异常,在深度和径向形成较小的区域,多个声测线的接收波形存在明显畸变,其中个别声测线的声速低于低限值。
III	某一深度范围内,一个或多个剖面上多个声测线的多个声学参数明显异常,在深度或径向形成较大的区域,多个声测线接收波形存在严重畸变或个别测点无法检测到首波,其中多个声测线的声速低于低限值; 一个或多个剖面上多个声测线的个别声学参数异常严重,其他声学参数明显异常,在深度或径向形成较大的区域,多个声测线接收波形存在严重畸变或个别测点无法检测到首波,其中多个声测线的声速低于低限值。
IV	某一深度范围内,多个剖面上的多个声测线的个别或多个声学参数异常严重,在深度或径向形成很大区域,波形严重畸变或无法检测到首波,较多声测线的声速低于低限值。

7.4.12 声波透射法检测报告除应符合本规程第 3.8 节规定外，尚应包括下列内容：

1 被检桩（墙）各剖面的声速、深度、波幅、深度和 PSD 值、深度等曲线，并标记各自的临界值，整桩（墙）波速、波幅的平均值；

2 缺陷状况和性质的分析说明；

3 对于Ⅲ、Ⅳ类桩的报告还应附其缺陷区域的双向斜测或扇形测试结果的声阴影图。

8 钻芯法

8.1 一般规定

8.1.1 钻芯法适用于混凝土灌注桩的质量检测，判定混凝土的缺陷程度、位置及混凝土的强度，评价其桩身完整性，判定或鉴别桩底部的岩土层性状。

8.1.2 未进行通长钻芯、钻芯孔偏出桩外或遇钢筋无法继续钻进时，仅对钻取芯样部分桩身进行评价，且不得进行桩身完整性分类。

8.1.3 地下连续墙的钻芯法检测可参照本章节执行。

8.2 芯样钻取与加工设备

8.2.1 芯样钻取应采用液压操纵钻机，钻机设备参数应符合下列规定：

- 1 额定最高转速不低于 790 转/min。
- 2 转速调节范围不少于 4 档。
- 3 额定配用压力不低于 1.5MPa。
- 4 钻机立轴径向晃动不超过 0.1mm。

8.2.2 钻具的选取符合下列规定：

1 应采用单动双管钻具钻取芯样，并配备相应的孔口管、扩孔器、卡簧、扶正稳定器和可捞取松软渣样的钻具；不宜使用单动单管钻具。

2 钻杆应顺直，直径不宜小于 50mm。

8.2.3 应根据混凝土设计强度等级选用粒度、浓度、胎体硬度适合的金刚石钻头，且外径不宜小于 101mm。

8.2.4 应选用排水量为 50L/min～160L/min、泵压为 1.0MPa～2.0MPa 的水泵。

8.2.5 锯切芯样的锯切机应具有冷却系统和夹紧固定装置。芯样试件端面的补平器和磨平机，应满足芯样制作的要求。

8.3 芯样抗压强度试验设备

8.3.1 压力试验机应符合下列规定：

1 试件破坏荷载宜大于压力机全量程的 20%且宜小于压力机全量程的 80%。

2 示值相对误差应为 $\pm 1\%$ 。

3 应具有加荷速度指示装置或加荷速度控制装置，并应能均匀、连续地加荷。

4 试验机上、下承压板的平面度公差不应大于 0.04mm；平行度公差不应大于 0.05mm；表面硬度不应小于 55HRC。

5 板面应光滑、平整，表面粗糙度 Ra 不应大于 0.80 μm ；球座应转到灵活。

6 球座宜置于试件顶面，并凸面朝上。

7 其他要求应符合现行国家标准《液压式万能试验机》GB/T3159 和《试验机通用技术要求》GB/T2611 的有关规定。

8.3.2 当压力试验机的上、下承压板的平面度、表面硬度和粗糙度不符合 8.3.1 条中第 4 项要求时，上、下承压板与试件之间应各垫以钢垫板，钢垫板应符合下列规定：

1 钢垫板的平面尺寸不应小于试件的承压面积，厚度不应小于 25mm。

2 钢垫板应机械加工，承压面的平面度、平行度、表面硬度和粗糙度应符合 8.3.1 条中要求。

8.3.3 游标卡尺的量程不应小于 150mm，分度值宜为 0.02mm。

8.3.4 塞尺最小叶片厚度不应大于 0.02mm。

8.3.5 游标量角器的分度值应为 0.1°。

8.4 现场钻芯

8.4.1 混凝土灌注桩的钻芯孔数、钻孔位置和钻探深度应符合下列规定：

1 桩径小于 1.2m 的桩，不应少于 1 孔；桩径为 1.2m~1.6m 的桩，不应少于 2 孔；桩径大于 1.6m 的桩，不应少于 3 孔。

2 选择钻芯法对桩长、桩底沉渣、桩端持力层进行检测时，被检桩的钻芯孔数可为 1 孔。

3 当钻芯孔为一个时，宜在距桩中心 10cm~15cm 的位置开孔；当钻芯孔为两个或两个以上时，开孔位置宜在距桩中心 $0.15D \sim 0.25D$ 内均匀对称布置。

4 对竖向抗压桩，桩底持力层的钻探应符合下列规定：

1) 每根受检桩不应少于一孔，其钻探深度应满足设计要求，当设计无明确要求时，桩底持力层的钻探深度不应小于 3 倍桩径；

2) 对桩底持力层有夹层、岩溶或桩底注浆的工程，每根受检桩的每个钻芯孔对桩底持力层的钻探深度均不应小于 3 倍桩径，且不应少于 5m；

3) 当岩土工程勘察资料和已进行的超前钻结果表明，桩底持力层为单一的稳定岩土层，没有夹层或互层的情况时，每个钻芯孔对桩底持力层的钻探深度可为 0.5m，当需要对岩石芯样取样时，钻探深度应满足取样要求；

4) 桩底岩土层除钻孔取芯外，还可进行标准贯入、圆锥动力触探等原位试验。

5 对于仅承受抗拔荷载和水平荷载的工程桩，桩底持力层的钻探深度宜为 0.5m。

8.4.2 钻进前应测量钻机底盘的水平度和立轴的垂直度，确保钻机在钻芯过程中不发生倾斜、移位，钻芯孔的垂直度偏差不应大于 0.5%。

8.4.3 钻进过程中，钻孔内的循环水流不得中断，并应根据回水含砂量及颜色调整钻进速度。

8.4.4 提钻卸取芯样时，应拧卸钻头和扩孔器，严禁敲打卸芯。

8.4.5 正常钻进时，对胶结良好的混凝土每回次进尺宜控制在 1.5m 内；胶结不良层、断桩层等，回次进尺宜控制在 0.5m 左右；开孔钻进、桩底持力层面以上 1.0m 以内及持力层钻进，回次进尺

宜不超过 1.0m。钻至桩底时，宜采取减压、慢速钻进、干钻等适宜的方法和工艺，钻取沉渣并测定沉渣厚度。

8.4.6 钻取的芯样应由上而下按回次顺序放进芯样箱中，芯样侧面上宜清晰标明回次数、块号、本回次总块数，并应及时按照本规程附录 D 的格式记录钻进情况和钻进异常情况，对芯样质量做初步描述。

8.4.7 芯样全貌应在截取芯样前进行拍照，并应包含工程名称、检测对象编号、钻芯孔号、芯样试件拟截取位置、桩长、孔深、检测单位名称等信息。

8.4.8 当混凝土质量评价满足设计要求时，应对钻芯孔回灌封闭；当混凝土质量评价不满足设计要求时，应封存钻芯孔，留待处理。取样完毕剩余的芯样可根据需要移交委托单位妥善保管。

8.5 芯样试件截取与加工

8.5.1 截取混凝土抗压芯样试件应符合下列规定：

1 当桩长为 10m~30m 时，每孔至少截取 3 组芯样（上中下各一组）；当桩长小于 10m 时，至少截取 2 组；当桩长大于 30m 时，至少截取 4 组；每组芯样应制作 3 个芯样抗压试件。

2 上部芯样位置距桩顶设计标高不宜大于 1 倍桩径或 1m，下部芯样位置距桩底不宜大于 1 倍桩径或 1m，中间芯样宜等间距截取。

3 缺陷位置能取样时，应截取一组芯样进行混凝土抗压试验。

4 同一基桩的钻芯孔数超过 1 个时，如第一孔在某深度发现缺陷，则应在其他孔的相同深度处取芯进行混凝土抗压试验。

8.5.2 应采用双面锯切机加工芯样试件，加工时应固定芯样，锯切平面与芯样轴线垂直。

8.5.3 锯切后的芯样试件在不满足平整度及垂直度要求时，应选用下列方法进行端面加工：

1 在磨平机上磨平。

2 用水泥砂浆（或水泥净浆）或硫磺胶泥等材料在专用补平装置上补平。水泥砂浆（或水泥净浆）补平厚度不宜大于 5mm，硫磺胶泥补平厚度不宜大于 1.5mm。

8.5.4 试验前应对芯样试件的几何尺寸做如下测量：

1 平均直径：采用游标卡尺在芯样上部、中部和下部取 3 个截面分别测量，每个截面在相互垂直的两个位置上测量，取两次测量的平均值作为该截面的平均直径，取直径偏小截面的直径平均值为芯样平均直径，精确至 0.5mm。

2 芯样高度：采用钢卷尺或钢板尺进行测量，精确至 1mm。

3 垂直度：采用游标量角器测量两个端面与母线的夹角，取最大值作为芯样的垂直度，精确至 0.1°。

4 平整度：采用钢板尺或角尺紧靠在芯样端面上，一面转动钢板尺，一面用塞尺测量与芯样端面之间的缝隙，取最大缝隙作为芯样试件的平整度。

8.5.5 出现下列情况之一，试件不得用作抗压强度试验：

- 1 试件有裂缝或有其他较大缺陷；
- 2 芯样试件内含有钢筋；
- 3 试件尺寸偏差超过下列数值：
 - 1) 芯样试件高度小于 $0.95d$ 或大于 $1.05d$ 时（ d 为芯样试件平均直径）；
 - 2) 沿试件高度任一直径与平均直径相差达 1.5mm 以上时；
 - 3) 试件端面的不平整度在每 100mm 内长度内超过 0.1mm 时；
 - 4) 试件端面与轴线的不垂直度超过 1°时；
 - 5) 芯样试件平均直径小于 2 倍表观混凝土粗骨料最大粒径时。

8.6 芯样试件抗压强度试验

8.6.1 混凝土芯样试件的抗压强度试验的操作应符合现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 中对抗压强度试验的规定。

8.6.2 混凝土芯样试件宜在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ 清水中浸泡 40h~48h, 从水中取出后应立即进行抗压强度试验。

8.6.3 在混凝土芯样试件抗压强度试验中, 当发现试件内混凝土粗骨料最大粒径大于 0.5 倍芯样试件平均直径, 且强度值异常时, 该试件的强度值不得参与统计平均。

8.6.4 混凝土芯样试件抗压强度应按下式计算:

$$f_{cu} = \xi \frac{4P}{\pi d^2} \quad (8.6.4)$$

式中:

f_{cu} ——混凝土芯样试件抗压强度(MPa), 精确至 0.1MPa;

P ——芯样试件抗压试验测得的破坏荷载(N);

d ——芯样试件的平均直径(mm)。

ξ ——混凝土芯样试件抗压强度折算系数, 应考虑芯样尺寸效应、钻芯机械对芯样扰动和混凝土成型条件的影响, 通过试验统计确定; 无试验统计资料时, 宜取为 1.0。

8.6.5 桩底岩芯单轴抗压强度试验以及岩石单轴抗压强度标准值的确定, 宜按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 执行。

8.7 检测数据的处理和分析

8.7.1 桩身混凝土芯样试件抗压强度的确定应符合下列规定:

1 取一组 3 块试件强度值的平均值, 作为该组混凝土芯样试件抗压强度代表值。

2 同一受检桩同一深度部位有两组或两组以上混凝土芯样试件抗压强度代表值时，取其平均值作为该桩该深度处混凝土芯样试件抗压强度代表值。

3 被检桩中不同深度位置的混凝土芯样试件抗压强度代表值中的最小值为该桩的混凝土芯样试件抗压强度代表值。

8.7.2 桩端持力层性状应根据持力层芯样特征，并结合岩石芯样单轴抗压强度检测值、动力触探或标准贯入试验结果，进行综合判定或鉴别。

8.7.3 桩身完整性类别应结合钻芯孔数、现场混凝土芯样特征以及芯样抗压强度，按桩身混凝土芯样试件抗压强度和表 8.7.3 的特征进行综合判定。

1 当混凝土出现分层现象时，宜截取分层部位的芯样进行抗压强度试验。当混凝土抗压强度满足设计要求时，可判为Ⅱ类；当混凝土抗压强度不满足设计要求或无法制作芯样试件时，应判为Ⅳ类。

2 多于三个钻芯孔的基桩桩身完整性可类比表 8.7.3 的三孔特征进行判定。

表 8.7.3 钻芯法桩身完整性判定表

类别	特征		
	单孔	两孔	三孔
Ⅰ	混凝土芯样连续、完整、胶结好，芯样侧表面光滑、骨料分布均匀，芯样呈长柱状、断口吻合。		
	芯样侧表面仅见少量气孔。	局部芯样侧表面有少量气孔、蜂窝麻面、沟槽，但在另一孔同一深度部位的芯样中未出现，否则应判为Ⅱ类。	局部芯样侧表面有少量气孔、蜂窝麻面、沟槽，但在三孔同一深度部位的芯样中未同时出现，否则应判为Ⅱ类。

表 8.7.3 钻芯法桩身完整性判定表（续表一）

类别	特征		
	单孔	两孔	三孔
II	混凝土芯样连续、完整、胶结较好，芯样侧面较光滑、骨料分布基本均匀，芯样呈柱状、断口基本吻合。有下列情况之一：		
	1 局部芯样侧面有蜂窝麻面、沟槽或较多气孔； 2 芯样侧面蜂窝麻面严重、沟槽连续或局部芯样骨料分布极不均匀，但对应部位的混凝土芯样试件抗压强度检测值满足设计要求，否则应判为Ⅲ类。	1 芯样侧面有较多气孔、严重蜂窝麻面、连续沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀，但在两孔同一深度部位的芯样中未同时出现； 2 芯样侧面有较多气孔、严重蜂窝麻面、连续沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀，且在另一孔同一深度部位的芯样中同时出现，但该深度部位的混凝土芯样试件抗压强度检测值满足设计要求，否则应判为Ⅲ类； 3 任一孔局部混凝土芯样破碎段长度不大于 10cm，且在另一孔同一深度部位的局部混凝土芯样的外观判定完整性类别为Ⅰ类或Ⅱ类，否则应判为Ⅲ类或Ⅳ类。	1 芯样侧面有较多气孔、严重蜂窝麻面、连续沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀，但在三孔同一深度部位的芯样中未同时出现； 2 芯样侧面有较多气孔、严重蜂窝麻面、连续沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀，且在任两孔或三孔同一深度部位的芯样中同时出现，但该深度部位的混凝土芯样试件抗压强度检测值满足设计要求，否则应判为Ⅲ类； 3 任一孔局部混凝土芯样破碎段长度不大于 10cm，且在另两孔同一深度部位的局部混凝土芯样的外观判定完整性类别为Ⅰ类或Ⅱ类，否则应判为Ⅲ类或Ⅳ类。
III	大部分混凝土芯样胶结较好，无松散、夹泥现象。有下列情况之一：		
	1 芯样不连续、多呈短柱状或块状； 2 局部混凝土芯样破碎段长度不大于 10cm。	1 芯样不连续、多呈短柱状或块状； 2 任一孔局部混凝土芯样破碎段长度大于 10cm 但不大于 20cm，且在另一孔同一深度部位的局部混凝土芯样的外观判定完整性类别为Ⅰ类或Ⅱ类，否则应判为Ⅳ类。	1 芯样不连续、多呈短柱状或块状； 2 任一孔局部混凝土芯样破碎段长度大于 10cm 但不大于 30cm，且在另两孔同一深度部位的局部混凝土芯样的外观判定完整性类别为Ⅰ类或Ⅱ类，否则应判为Ⅳ类； 3 任一孔局部混凝土芯样松散段长度不大于 10cm，且在另两孔同一深度部位的局部混凝土芯样的外观判定完整性类别为Ⅰ类或Ⅱ类，否则应判为Ⅳ类。

表 8.7.3 钻芯法桩身完整性判定表（续表二）

类别	特征		
	单孔	两孔	三孔
IV	有下列情况之一：		
	1 因混凝土胶结质量差而难以钻进； 2 混凝土芯样任一段松散或夹泥； 3 局部混凝土芯样破碎长度大于 10cm。	1 任一孔因混凝土胶结质量差而难以钻进； 2 混凝土芯样任一段松散或夹泥； 3 任一孔局部混凝土芯样破碎长度大于 20cm； 4 两孔同一深度部位的混凝土芯样破碎。	1 任一孔因混凝土胶结质量差而难以钻进； 2 混凝土芯样任一段松散或夹泥段长度大于 10cm； 3 任一孔局部混凝土芯样破碎长度大于 30cm； 4 其中两孔在同一深度部位的混凝土芯样破碎、松散或夹泥。

8.7.4 成桩质量评价应按单根受检桩进行。当桩基设计资料未作具体规定时，应按国家现行标准判定成桩质量。当出现下列情况之一时，应判定该受检桩不满足设计要求：

- 1 混凝土芯样试件抗压强度检测值小于混凝土设计强度等级；
- 2 桩长、桩底沉渣厚度不满足设计要求；
- 3 桩底持力层岩土性状（强度）或厚度不满足设计要求。

8.7.5 检测报告除应包括本规程第 3.8 节规定的内容外，尚应包括下列内容：

- 1 钻芯设备情况；
- 2 检测桩数、钻孔数量、开孔位置，架空高度、混凝土芯进尺、持力层进尺、总进尺，混凝土试件组数、岩石试件个数、圆锥动力触探或标准贯入试验结果；
- 3 按照本规程附录 D 规定的格式绘制钻孔柱状图，且应标注取样位置、强度代表值等信息；
- 4 芯样单轴抗压强度试验结果；
- 5 芯样全长彩色照片及局部缺陷照片特写及位置说明；
- 6 异常情况说明。

9 钻孔灌注桩成孔、地下连续墙成槽检测

9.1 一般规定

9.1.1 钻孔灌注桩成孔检测、地下连续墙成槽检测项目见表 9.1.1。

表 9.1.1 钻孔灌注桩成孔检测、地下连续墙成槽检测项目

检测项目 基础形式	孔径\槽宽	孔深\槽深	垂直度	沉渣厚度
钻孔灌注桩	+	+	+	-
地下连续墙	+	+	+	-

注：表中“+”代表主控项目，“-”代表一般项目。

9.1.2 钻孔灌注桩成孔检测、地下连续墙成槽检测方法和适用范围可按表 9.1.2 选用。

表 9.1.2 成孔成槽检测方法和适用范围

序	检测项目	检测方法	适用范围
1	孔深\槽深	深度编码法	适用于所有孔（槽）
		测绳法	适用于所有孔（槽）
2	孔径\槽宽	超声波法	孔径小于 0.6m 的桩孔不宜选用
		接触式仪器法	孔径大于 2.5m 的桩孔不宜选用
3	垂直度	超声波法	孔径小于 0.6m 的桩孔不宜选用
		顶角测量法	孔径大于 2.5m 的桩孔不宜选用，地下连续墙不应选用
		圆心拟合法	
4	沉渣厚度	电阻率法	地下水含盐量高时不宜选用
		探针法	孔径小于 0.6m 的桩孔不宜选用
		重锤法	适用于所有孔（槽）

9.1.3 钻孔灌注桩成孔检测、地下连续墙成槽检测时，距孔（槽）底部 1.0m 内泥浆性能应符合表 9.1.3 中的各项要求。

表 9.1.3 泥浆性能指标

序号	项目	单位	指标	检测方法
1	重度	kN/m ³	<12.5	比重计
2	粘度	s	≤28	粘度计
3	含砂量	%	≤8	洗砂瓶

9.1.4 钻孔灌注桩成孔检测、地下连续墙成槽检测的各项参数指标应符合设计要求，并应符合国家现行标准《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202 的有关规定。

9.2 检测仪器设备

9.2.1 超声波法应符合下列规定：

- 1 孔径检测精度不应超过 $\pm 0.2\%FS$ ；
- 2 孔深度检测精度不应超过 $\pm 0.3\%FS$ ；
- 3 超声波仪器的探头应能同时对正交的 4 个方向进行检测；
- 4 超声波仪器应具有自校功能；
- 5 超声波探头遇到护筒或孔底时应有自动控制停机功能；
- 6 检测过程中，超声波探头升降速度应可调节。

9.2.2 接触式仪器法应符合下列规定：

- 1 被测孔径小于 1.2m 时，孔径检测误差不应超过 $\pm 15\text{mm}$ ，被测孔径大于等于 1.2m 时，孔径检测误差不应超过 $\pm 25\text{mm}$ ；
- 2 机械臂不应少于 4 支，机械臂应能同时张开，张开时应具备足够的长度、强度和张力，以确保末端能接触孔壁；
- 3 非等直径桩检测应增加可以进入扩径最深处的辅助装置。

9.2.3 测绳法孔深检测设备应符合下列规定：

- 1 测绳宜采用钢丝绳；
- 2 测绳的长度应定期进行校准；
- 3 与测绳相连的锥状重物，质量不宜小于 2kg，锥角不宜大于 45°。

9.2.4 深度编码法孔深检测设备应符合下列规定：

- 1 检测设备应由深度编码器和滑轮组成；
- 2 检测设备应进行标定，深度编码器和滑轮应同步工作。

9.2.5 顶角测量法测斜仪应符合下列规定：

- 1 测量范围： $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ；
- 2 测量误差：不应超过 $\pm 0.1^{\circ}$ ；
- 3 分辨率：不应低于 0.05° 。

9.2.6 沉渣检测重锤应符合下列规定：

- 1 重锤宜采用质量 $2\text{kg}\sim 5\text{kg}$ 的平底金属锤，锤底面宜为圆形，直径宜为 $9\text{cm}\sim 13\text{cm}$ ；
- 2 重锤高度和直径之比宜为 $1.5:1\sim 2:1$ ；
- 3 重锤悬挂绳宜为钢丝绳。

9.2.7 电阻率法沉渣测定仪应符合下列规定：

- 1 电极系绝缘电阻不宜小于 $50\text{M}\Omega$ ；
- 2 探头总质量不宜小于 5kg ，探头直径不宜大于 10cm ，探头总长度不宜小于 80cm ；
- 3 探头微电极长度不宜大于 5cm ，电阻率测量误差应小于 5% ；
- 4 仪器应具备实时显示功能，倾角传感器角度误差不宜超过 $\pm 1^{\circ}$ 。

9.2.8 探针法沉渣测定仪应符合下列规定：

- 1 探针最大伸出长度不宜小于 20cm ；
- 2 探头重量、探针刚度和截面尺寸应根据泥浆性状等确定，探针行程范围内，应具有刺穿沉渣能力。

9.3 现场检测

9.3.1 孔（槽）深检测

1 孔（槽）深检测应在清孔（槽）完毕后立即进行。可采用测绳单独检测或在孔径（槽宽）、垂直度检测时，利用深度编码法同步进行检测。

2 孔（槽）深检测起算标高应与成孔（成槽）施工起算标高一致，孔（槽）深测量指示误差应 $\leq 3\%$ 。

3 测绳法孔（槽）深检测应符合下列规定：

- 1) 测绳应对准桩孔中心部位下放；
- 2) 锥状重物下放到孔底后应反复上下提升，提升高度宜为 1m，让锥状重物穿过沉渣，直到下落后深度不再增加为止，读取测绳刻度，即为检测孔深。

4 深度编码法孔（槽）深检测应符合下列规定：

- 1) 具有深度编码器的仪器，当电缆上特殊标志下到成孔施工起算标高时，停止下放，将特殊标志至探头底端的距离作为孔（槽）深检测起始深度，并输入仪器；
- 2) 测试时，开动绞车，均匀下放探头，探头下放速度不宜大于 6m/min，探头触到孔底后，孔深记录应同时停止记数，仪器保存孔深数据。

9.3.2 孔径（槽宽）检测

1 试成孔完成后，孔径应进行多次跟踪检测，跟踪检测时间宜为 12h~24h，检测间隔宜为 3h~4h。

2 非等直径钻孔灌注桩的试成孔或最初施工的 2 个工程桩孔，宜在成孔后 1h 内等间隔检测，检测频率不宜少于 3 次。

3 超声波法孔径检测应符合下列规定：

1) 检测应在清孔完毕，孔中泥浆内气泡基本消散后、安放钢筋笼之前进行；

2) 检测前应利用护筒直径作为标准距离，使用超声波法成孔检测仪的自校程序测出当前泥浆的声速并验证仪器系统，验证应至少进行 2 次。自校验证完成后应及时锁定相关参数设置，在该孔的检测过程中不应变动；

3) 仪器探头应对准护筒中心轴线；

4) 检测宜自孔口至孔底或自孔底至孔口连续进行；

5) 检测方向应为正交四个方向，直径大于 4m 的桩孔、试成孔及静载荷试桩孔应增加检测方位；

6) 检测剖面的走向与实际方位的关系应标明；

7) 检测时应保证超声波信号清晰有效，探头升降应保持匀速，且不宜大于 10m/min。

4 超声波法槽宽检测应符合下列规定：

1) 地下连续墙成槽质量检测应在第一次清槽完毕，施工接头部位洗刷完毕，槽中泥浆内气泡基本消散后、安放钢筋笼之前进行；

2) 检测前应利用导墙作为标准距离按本规程 9.3.2 条第 3 款规定对仪器系统进行自校；

3) 仪器探头宜对准导墙中心轴线，用于检测的一组探头超声发射面应与导墙平行；

4) 单元槽段中间断面宜做二方向检测，槽段端头连接部位宜做三方向检测；

5) 检测宜自槽口至槽底或自槽底至槽口连续进行；

6) 检测时应保证超声波信号清晰有效，探头升降应保持匀速，且不宜大于 10m/min。

5 超声波法检测记录图应符合下列规定：

1) 记录图应标记检测时间、设计孔径（槽宽）、检测方向及孔（槽）底深度；

2) 记录图应有明显的刻度标记，能准确显示任何深度截面的孔径（槽宽）及孔（槽）壁的形状；

3) 记录图纵横比例尺，应根据设计孔径（槽宽）及孔（槽）深合理设定，并应满足分析精度需要；

6 接触式仪器法现场检测灌注桩成孔应符合下列规定：

1) 接触式仪器进入现场检测前应进行标定，标定完毕后恒定电流源电流和量程，仪器常数及起始孔径在检测过程中不得变动。

2) 检测应在钻孔清孔完毕后，安放钢筋笼之前进行。

3) 检测前应校正自动记录仪与孔口滑轮的同步关系。

4) 检测前深度起算标高应与成孔施工起算标高一致。

5) 孔径检测应自孔底向孔口连续进行，提升速度不宜大于 10m/min；孔径变化较大处，应降低探头提升速度。

6) 检测结束时，应根据孔口护筒直径的检测结果，复核仪器的测量误差，必要时应重新标定后再次检测。

7 接触式仪器法检测记录图应满足下列要求:

- 1) 记录图应标记检测时间、设计孔径及孔底深度;
- 2) 记录图应有明显孔径及深度的刻度标记,能准确显示任何深度截面的孔径;
- 3) 记录图应有设计孔径基准线、基准零线及同步记录深度标记;
- 4) 记录图纵横比例尺,应根据设计孔径及孔深合理设定,并应满足分析精度需要。

9.3.3 垂直度检测

1 钻孔灌注桩成孔垂直度检测可采用顶角测量法、圆心拟合法、超声波法。

2 顶角测量法成孔垂直度检测应符合下列规定:

- 1) 顶角测量法测斜仪进入现场检测前应进行标定;
- 2) 顶角测量法垂直度检测可在清孔完毕后,在未提钻的钻具内进行或直接放入桩孔内进行;
- 3) 顶角测量法孔内直接进行垂直度检测应外加扶正器,宜在孔径检测完成后进行。扶正器的直径应根据孔径检测结果合理选择,并需满足测量精度要求;
- 4) 顶角测量法成孔垂直度检测应避开明显扩径段;
- 5) 检测自孔口开始向下逐点进行,相邻测点的间距不宜大于 5m,在顶角变化较大处宜加密检测点数,在接近孔底位置检测最后一个测点。

3 采用圆心拟合法进行成孔垂直度检测时,应按本规程 9.4.3 条第 2 款的规定在孔径检测时同步进行,并按本规程 9.4.3 条中 9.4.3-3 式计算垂直度。

4 超声波法进行垂直度检测应符合本规程 9.4.3 条第 3 款、第 4 款规定,检测数据应在孔径(槽宽)检测时同时产生。

9.3.4 沉渣厚度检测

1 沉渣厚度检测,宜在清孔(清槽)完毕后,灌注混凝土前进行。

2 钻孔灌注桩桩每个桩孔沉渣厚度检测应至少进行 3 次，测点位置宜呈品字型，地下连续墙每个单元槽段沉渣厚度检测应选槽段的两端和中间各进行 1 次。

3 沉渣厚度检测可选用重锤法、电阻率法或探针法。

4 重锤法沉渣厚度检测步骤应符合下列规定：

1) 重锤应对准孔中心部位，下放重锤到桩孔底；

2) 重锤触碰到孔底后应进行二次提升，提升高度宜为 1m~2m，应根据孔深、泥浆性状等确定；

3) 提升后让重锤自由下落到沉渣顶面，拉直测绳，以成孔施工起算标高为基准，读取测绳读数，测绳读数与孔深测试深度之差，即为沉渣厚度。

5 电阻率法沉渣厚度检测步骤应符合下列规定：

1) 将沉渣测定仪探头对准桩孔中心部位，下放沉渣测定仪探头直到桩孔底，下放探头时观察电阻率值变化范围，选取合适的测量量程或放大倍数；

2) 将沉渣测定仪探头提升 1m~2m，再让测定仪探头自由下落，穿透沉渣层达到原状土层；

3) 将沉渣测定仪探头匀速缓慢地提升，沉渣测定仪自动记录桩孔底不同深度的泥浆电阻率，并绘制出“泥浆电阻率-深度”曲线，直到将测定仪探头提升至距离桩孔底约 2m 高度停止；

4) 泥浆电阻率-深度曲线上的突变点以下部分可判断为沉渣，其厚度由深度坐标量取。

6 探针法沉渣厚度检测步骤应符合下列规定：

1) 沉渣探头下放到桩孔（槽）底部沉渣层上表面时，探头内的探针应归于初始位置；

2) 主机读取探头状态，当探头倾斜超过一定范围时提示调整探头位置直至探头近似直立；

3) 主机控制探针缓慢伸出，同时测定探针各伸出长度对应的探头倾斜角度或探针压力；

4) 当探针穿过沉渣到达孔（槽）底部原状土层时，探针运动受阻，探头发生倾斜，探针压力也发生突变，主机上同步绘制

“探针长度-倾斜角度”曲线或“探针长度-探针压力”曲线，曲线开始发生变化时对应的探针伸出长度即为当前位置沉渣厚度；

- 5) 探针全部伸出后自动停止，并保存数据；
- 6) 主机控制探针回收，并上提沉渣探头，结束检测。

9.4 检测数据的处理和分析

9.4.1 孔深（槽深）检测数据处理和分析应符合下列规定：

- 1 测绳法所测孔深（槽深）数值即为孔深（槽深）检测值。
 - 2 深度编码法孔（槽）深检测值应通过孔深系数进行修正。
- 孔深系数应按下列式计算：

$$\delta = l_r / l_d \quad (9.4.1)$$

式中：

- δ ——孔深系数；
 l_r ——实际深度（m）；
 l_d ——显示深度（m）。

9.4.2 孔径（槽宽）检测数据处理和分析应符合下列规定：

- 1 超声波在泥浆介质中传播速度，可根据已知的孔口（槽）尺寸和孔口（槽）所测的声时值，按下式计算：

$$c = 2(d_0 - d) / (t_1 + t_2) \quad (9.4.2-1)$$

式中：

- c ——超声波在泥浆介质中传播的速度(m/s)；
 d_0 ——护筒直径或导墙宽度（m）；
 d ——探头直径（m）；
 t_1 、 t_2 ——互为反向的换能器实测的声时值（s）。

- 2 超声波法钻孔灌注桩孔径检测数据处理应符合下列规定：

- 1) 探头中心与孔壁的净距离可按下列式计算：

$$l_i = c \times \frac{t_i}{2} + \frac{d}{2} \quad (9.4.2-2)$$

式中：

l_i ——第*i* (*i*=1, 2, 3, 4)方向探头中心与孔壁的距离 (m) ;

t_i ——第*i* (*i*=1, 2, 3, 4)方向上孔壁反射信号的声时值 (s) 。

2) 成孔孔径 (如图 9.4.2-1) 应按下列方法计算:

$$d=r_1+r_2 \quad (9.4.2-3)$$

$$r_1=\frac{\sqrt{(l_3-l_4)^2+(l_1+l_2)^2}}{2} \quad (9.4.2-4)$$

$$r_2=\frac{\sqrt{(l_1-l_2)^2+(l_3+l_4)^2}}{2} \quad (9.4.2-5)$$

式中:

d ——测点位置的孔径 (m) ;

r_1 、 r_2 ——测点位置的桩孔半径 (m) ;

l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 ——测点位置现场实测探头中心至孔壁的水平距离 (m) 。

3 接触式仪器探头张角采用电位差检测时, 孔径可按下式计算:

$$d=d_0+k\times\frac{\Delta V}{I} \quad (9.4.2-6)$$

式中:

d_0 ——起始孔径 (m) ;

k ——仪器常数 (m/Ω) ;

ΔV ——信号电位差 (V) ;

I ——恒定电流源电流 (A) 。

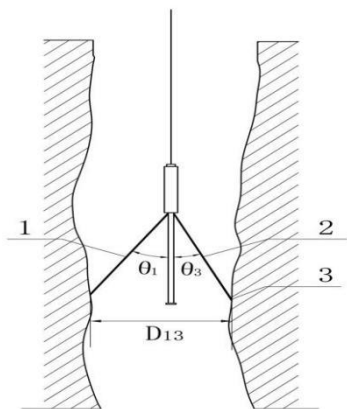


图 9.4.2-2 机械臂倾角检测时孔径计算示意图

1—机械臂 1；2—机械臂 3；3—孔壁

5 超声波法检测槽宽应按下式计算：

$$d = d' + c(t_1 + t_2) / 2 \quad (9.4.2-10)$$

式中：

d ——实测槽宽 (m)；

c ——超声波在泥浆介质中传播的速度(m/s)；

d' ——探头直径 (m)；

t_1 、 t_2 ——探头对称位置槽壁反射信号的实测声时值 (s)。

9.4.3 垂直度检测数据处理和分析应符合下列规定：

1 顶角测量法桩孔垂直度 K 可按本规程式 (9.4.3-1) 计算：

$$K = (E/L) \times 100\% \quad (9.4.3-1)$$

$$E = d/2 - \phi/2 + \sum h_i \times \sin[(\theta_i + \theta_{i-1})/2] \quad (9.4.3-2)$$

式中：

E ——桩孔偏心距(m)；

d ——孔径或钻具内径(m)；

ϕ ——测斜探头或扶正器外径(m)；

h_i ——第 i 段测点距(m)；

——第 i 测点实测顶角(°)；
 θ_i ——第 $i-1$ 测点实测顶角(°)。
 θ_{i-1} ——桩孔垂直度(%)；
 K ——实测孔深(m)。

2 圆心拟合法桩孔垂直度 K 可按本规程式(9.4.3-3)计算：

$$K = \sqrt{\left(\frac{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{n \sum x_i z_i - \sum x_i \sum z_i} \right)^2 + \left(\frac{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}{n \sum y_i z_i - \sum y_i \sum z_i} \right)^2} \quad (9.4.3-3)$$

式中：

x_i, y_i ——每个深度截面的圆心的位置的横、纵坐标；
 z_i ——代表圆心所在截面的深度。

3 超声波法桩孔垂直度检测数据处理应符合下列规定：

1) 偏心距(图 9.4.3-1)应按本规程式(9.4.3-8)计算：

$$X_0 = (l_{10} - l_{20}) / 2 \quad (9.4.3-4)$$

$$Y_0 = (l_{30} - l_{40}) / 2 \quad (9.4.3-5)$$

$$X_i = (l_{1i} - l_{2i}) / 2 \quad (9.4.3-6)$$

$$Y_i = (l_{3i} - l_{4i}) / 2 \quad (9.4.3-7)$$

$$E_i = \sqrt{|X_0 - X_i|^2 + |Y_0 - Y_i|^2} \quad (9.4.3-8)$$

式中：

X_0, Y_0 ——第 1 测点孔口处声波探头中心相对于桩孔中心点的坐标(m)；

x_i, y_i ——第 i 测点处声波探头中心相对于桩孔中心点的坐标(m)；

$l_{10}, l_{20}, l_{30}, l_{40}$ ——第 1 测点处声波探头中心距离孔壁四个方向的水平距离(m)；

$l_{1i}, l_{2i}, l_{3i}, l_{4i}$ ——第 i 测点处声波探头中心距离孔壁四个方向

的水平距离 (m) ;
 E_i ——桩孔在第 i 测点处的偏心距 (m) 。

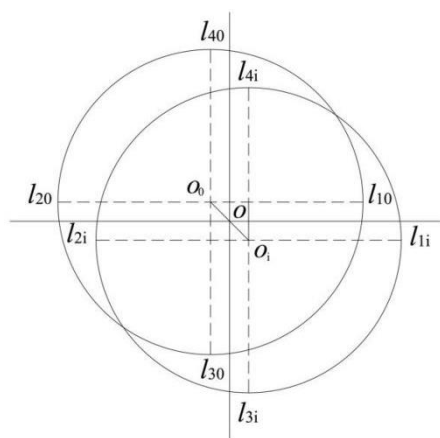


图 9.4.3-1 超声波法桩孔偏心距计算示意图
 O —探头中心点； O_0 —第 1 测点孔口的桩孔中心点；
 O_i —第 i 测点处的桩孔中心点

2) 垂直度应按本规程式 (9.4.3-9) 计算：

$$K_i = (E_i / L_i) \times 100\% \quad (9.4.3-9)$$

式中：

K_i ——桩孔在第 i 测点处的垂直度 (%)， i 为全长时 K_i 为全孔的垂直度；

L_i ——桩孔在第 i 测点的深度(m)。

4 超声波法地下连续墙垂直度检测数据处理应符合下列规定：

1) 偏心距应按本规程式 (9.4.3-10) 计算：

$$E_i = |Y_0 - Y_i| \quad (9.4.3-10)$$

式中：

E_i ——第 i 测点处的偏心距；

Y_0 、 Y_i ——分别为第 1 和第 i 测点处超声波探头与槽壁的垂直距离(m)。

2) 垂直度 K 应按本规程式 (9.4.3-9) 计算。

9.4.4 每个孔 (槽) 沉渣厚度检测值应取检测数据的平均值。

9.4.5 检测报告除应符合本规程第 3.8 节规定外，尚应包括下列内容：

- 1 桩孔编号；
- 2 孔设计参数；
- 3 检测方法；
- 4 检测仪器设备型号及编号、现场仪器校准结果；
- 5 各项检测内容的检测结果及偏差；
- 6 成孔质量评定。

10 自平衡法

10.1 一般规定

10.1.1 自平衡法适用于传统静载荷试验条件受限情况下的基桩竖向承载力检测。

10.1.2 自平衡法试验前，应先采用声波透射法检测桩身完整性，再进行承载力检测。

10.1.3 试验桩宜加载至桩土体系达到极限状态，工程桩最大试验荷载不应小于受检桩设计承载力特征值的 2.0 倍。

10.1.4 工程桩承载力检测应给出受检桩的承载力检测值，并应评价单桩承载力是否满足设计要求。

10.1.5 为设计提供依据的自平衡法试验桩桩身宜设置两组荷载箱；采用工程桩进行自平衡法抗拔承载力试验时，荷载箱可设置在桩的有效使用长度外。

10.1.6 工程桩承载力试验完毕后应在荷载箱位置处进行注浆处理。

10.2 检测仪器设备

10.2.1 基桩自平衡静载荷试验装置由下列系统组成（图 10.2.1）：

1 荷载箱、高压油管、高压加载泵、液压测量仪表组成的加压测试系统；

2 位移传递装置、位移测量仪表、位移基准装置组成位移测试系统；

3 对加载进行控制，并采集压力和位移数据的压力控制和数据采集系统。

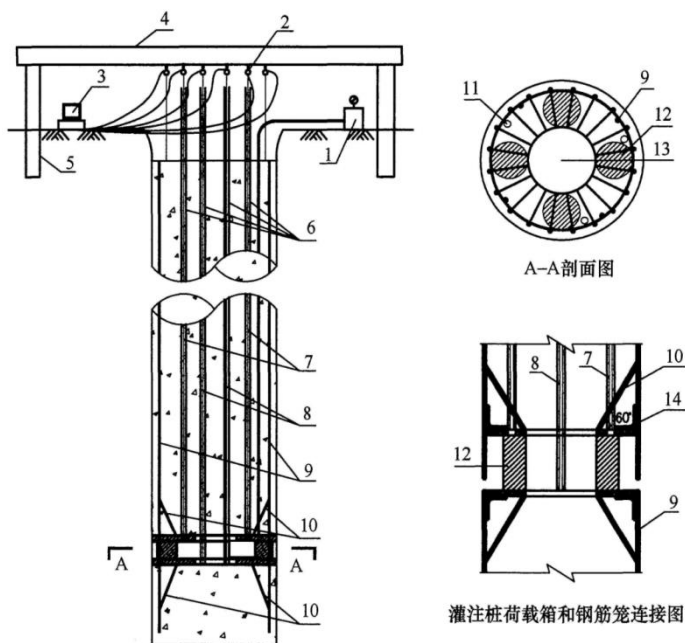


图 10.2.1 试验装置示意图

1—加压系统；2—位移传感器；3—静载荷试验仪；4—基准梁；5—基准桩；6—位移杆（丝）护筒；7—上位移杆（丝）；8—下位移杆（丝）；9—主筋；10—导向筋（喇叭筋）；11—声测管；12—千斤顶；13—导管孔；14—L 型加强筋

10.2.2 荷载箱应按基桩类型、施工工艺及检测要求正确选择，技术要求应符合下列规定：

1 荷载箱应经法定计量单位检定或校准，检定（校准）证书上应注明荷载箱最大加载能力及待应用的工程名称。荷载箱宜进行整体检定（校准），加载分级数不宜少于五级，当无法进行整体检定（校准）时，可对组成荷载箱的液压缸逐一进行检定（校准），液压缸规格型号必须相同，且相同液压时的液压缸出力相对误差应小于 3%；

2 荷载箱检定或校准示值重复性不应大于 3%；

3 荷载箱空载启动压力不应小于额定压力的 4%；

4 荷载箱在 1.2 倍额定压力下持荷时间不应小于 30min，在额定压力下持荷时间不应小于 2h，持荷过程中荷载箱不应出现泄漏、压力减小值大于 5%等异常现象；

5 荷载箱有效面积比应按下式计算。钻孔灌注桩荷载箱放置于桩端以上时，有效面积比应为 $45\% < \rho_z < 60\%$ ；荷载箱放置于桩端时，有效面积比应为 $45\% < \rho_z \leq 100\%$ 。

$$\rho_z = \frac{A_h}{A_p} \times 100\% \quad (10.2.2)$$

式中：

A_h ——荷载箱的面积（m²）；

A_p ——桩身截面面积（m²）。

6 荷载箱预估最大加载值对应的压力值不应超过 50MPa，最大双向加载值不应小于预估单桩最大加荷值的 1.2 倍，荷载箱缸体行程不应小于 120mm。

10.2.3 荷载的测量可通过并联于加载管路的压力表或压力传感器测定压力，根据校准结果换算为荷载，压力表或压力传感器精度应优于或等于 0.5 级，量程不小于 60MPa，压力表或压力传感器、高压泵、管路在最大试验荷载时的工作压力不应超过额定工作压力的 80%。

10.2.4 位移传感器宜采用百分表或位移计，量程不应小于 50mm，测量误差不应大于 0.1%FS，分辨率不应低于 0.01mm。

10.2.5 测试桩侧阻力、桩端阻力时，应埋设桩身应力传感器。

10.3 现场检测

10.3.1 荷载箱的埋设位置应符合下列规定：

1 当受检桩为抗压桩，预估极限端阻力小于预估极限侧摩阻力时，应将荷载箱置于桩身平衡处；

2 当受检桩为抗压桩，预估极限端阻力大于预估极限侧摩阻力时，可将荷载箱置于桩端，并在桩顶采取一定量的配重措施；

3 对抗压桩，当桩底存在扩大头时，荷载箱宜埋设于扩大头之上；

4 当受检桩为抗拔桩时，荷载箱应置于桩端；下部提供的反力不够维持加载时，可采取加深桩长或后注浆措施；

5 有特殊需要时，可布置双荷载箱或多荷载箱，埋设位置根据检测具体需要确定。

10.3.2 荷载箱和钢筋笼的连接应符合下列规定：

1 荷载箱中心与钢筋笼中心重合，荷载箱位移方向与桩身轴线夹角不应大于 1° ；

2 对于灌注桩，上部桩、下部桩的钢筋笼在荷载箱附近处应有加强措施，一般包括箍筋加密、设置喇叭筋等措施，喇叭筋的一端与主筋焊接，一端焊在环形荷载箱盖板内圆边缘处，其数量和直径宜与主筋相同。喇叭筋与荷载箱平面的夹角应大于 60° ，上部桩钢筋笼与下部桩钢筋笼之间的连接强度不应大于荷载箱预估最大加载值的 $1/10$ 。

10.3.3 位移杆（丝）和护管应符合下列规定：

1 位移杆（丝）应有护管进行保护，护管不得漏浆；

2 位移杆（丝）与引测部位及位移杆（丝）中间的接头应连接可靠，不得在试验前或试验过程中脱开；

3 位移杆应具有一定的刚度，宜采用直径 $25\text{mm}\sim 30\text{mm}$ 的钢管；位移丝引测时应使用足够的配重使位移丝绷紧；

4 等待试验期间应对外露油管、位移杆（丝）进行妥善保护，不得损坏，护管顶部应封堵；

5 对桩顶外露的位移杆（丝）应做好标识，区分上位移与下位移；

6 在保证精度的前提下，也可采用其他形式的位移测量系统。

10.3.4 位移测量装置安装应符合下列规定：

1 应同时对上部桩向上位移、下部桩(或桩端持力层)向下位移及桩顶位移三组位移数据进行测量, 每组应布置不少于 2 个测点且各测点应对称布置。

2 基准梁应具有足够的刚度, 梁的一端应有效固定在基准桩上, 另一端应简支在基准桩上。

3 固定和支承位移量测仪表的夹具及基准梁应避免受气温、振动及其他外界因素的影响, 当基准梁暴露在阳光下时, 应采取遮挡措施。

4 试桩和基准桩之间的中心距离不应小于 3 倍的受检桩直径, 且不应小于 2.0m, 基准桩应打入地面以下足够的深度, 不宜小于 1.0m。

10.3.5 基桩检测用仪器设备应在检定或校准的有效期内, 检测前应对测试及采集系统进行检查调试, 确认其工作状态正常。

10.3.6 检测开始时间应符合下列规定:

1 承载力检测前, 桩身混凝土强度应达到设计要求, 从成桩到开始试验的休止时间不应少于 25 天;

2 基桩采用后注浆施工工艺时, 注浆后休止时间不应少于 20 天, 当浆液中掺入早强剂时休止时间不应少于 15 天。

10.3.7 基桩自平衡法静载荷试验应采用慢速维持荷载法。

10.3.8 试验加载卸载及位移观测应符合本规程第 4.2.8 条的规定。

10.3.9 试验满足下列条件之一时, 可终止加载:

1 某级荷载作用下, 荷载箱上段或下段位移增量超过前一级荷载作用下位移增量的 5 倍, 且位移总量超过 40mm;

2 某级荷载作用下, 荷载箱上段或下段位移增量超过前一级荷载作用下位移增量的 2 倍, 且经 24h 尚未达到相对稳定标准;

3 已达到设计要求的最大加载量, 且荷载箱上段和下段位移达到相对稳定标准;

4 当荷载-位移曲线呈缓变型时, 向上或向下位移总量可加载至 40mm~60mm;

5 荷载已达荷载箱加载极限, 或荷载箱上、下段桩的位移已超过荷载箱行程。

10.3.10 检测数据宜按规程附表 E 的格式记录。

10.4 检测数据的处理和分析

10.4.1 检测数据的整理应符合下列规定：

- 1 应提供竖向静载荷试验结果汇总表；
- 2 应绘制荷载与位移量的关系曲线 $Q_{uu}-s_u$ 、 $Q_{ud}-s_d$ ；
- 3 应绘制位移量与加荷时间的单对数曲线 $s_u-\lg t$ 、 $s_d-\lg t$ ；
- 4 抗压桩宜绘制等效转换曲线 $Q_{zu}-s$ ；
- 5 抗拔桩可只绘制曲线 Q_u-s_u 、 $s_u-\lg t$ ；

6 当进行桩身应变和桩身截面位移测定时，还应绘制桩身轴力分布图，计算不同土层的桩侧阻力和桩端阻力。

10.4.2 上段桩极限加载值 Q_{uu} 和下段桩极限加载值 Q_{ud} 应按下列方法综合确定：

- 1 根据位移随荷载的变化特征确定时，对于陡变型曲线，应取曲线发生明显陡变的起始点对应的荷载值；
- 2 根据位移随时间的变化特征确定极限加载值，应取位移与加载时间的单对数曲线尾部出现明显弯曲的前一级荷载值；
- 3 当出现本规程第 10.3.9 条第 1、2 款情况时，宜取前一级荷载值；

4 缓变型曲线可根据位移量确定，上段桩极限加载值取对应位移为 40mm 时的荷载，当上段桩长大于 40m 时，宜考虑桩身弹性压缩量；下段桩极限加载值取位移为 40mm 对应的荷载值，对直径大于等于 800mm 的桩，可取荷载箱向下位移量为 0.05D（D 为桩端直径）对应的荷载值。

5 按本条第 1~4 款不能确定时，宜分别取向上、向下两个方向的最大试验荷载作为上段桩极限加载值和下段桩极限加载值。

10.4.3 自平衡静载荷试验测得的荷载-位移曲线宜等效转换为传统静载荷试验的荷载-位移曲线，转换方法宜符合附录 F 的规定。

10.4.4 单桩竖向抗压极限承载力应按下列公式计算：

单荷载箱：

$$Q_u = \frac{Q_{uu} - G_1 - G_2}{\gamma_1} + Q_{ud} \quad (10.4.4-1)$$

双荷载箱：

$$Q_u = \frac{Q_{uu} - G_1 - G_2}{\gamma_1} + Q_{um} + Q_{ud} \quad (10.4.4-2)$$

式中：

Q_u ——单桩竖向极限承载力（kN）；

Q_{uu} ——上段桩极限加载值（kN）；

Q_{um} ——中段桩极限加载值（kN）；

Q_{ud} ——下段桩极限加载值（kN）；

G_1 ——荷载箱上部桩的自重，地下水位以下应取浮重度计算（kN）；

G_2 ——设计桩顶以上超灌高度的重量、空桩段泥浆或回填土自重及桩顶配重，地下水位以下应取浮重度计算（kN）；

γ_1 ——受检桩的抗压摩阻力转换系数（无量纲）；根据荷载箱上部土的类型确定：黏性土、粉土取 0.8；砂土取 0.7；对于岩石取 1.0；若上段桩周有不同类型的土层，按厚度取加权平均值。

10.4.5 单桩竖向抗拔极限承载力应按下式确定

$$Q_u = \frac{Q_{uu} - G_2}{\gamma_2} \quad (10.4.5)$$

式中：

γ_2 ——受检桩的抗拔摩阻力转换系数；应根据实际情况通过相近条件的比对试验确定，但不应小于 1.1。

10.4.6 为设计提供依据的单桩竖向抗压极限承载力的统计取值应根据受检桩位置、地质条件、施工情况等综合确定，当各受检桩条件基本相同时，应符合 4.2.13 规定。

10.4.7 单桩竖向抗压（抗拔）承载力特征值应按单桩竖向抗压（抗拔）极限承载力的 50%取值。

10.4.8 检测报告除应符合本规程第 3.8 节规定外，尚应包括荷载箱参数、荷载箱位置。

11 桩身内力测试

11.1 一般规定

11.1.1 桩身内力测试适用于桩身横截面尺寸基本恒定或已知的桩。对于混凝土桩，全桩的材质、配筋率应保持相同。

11.1.2 桩身内力测试宜与单桩静载荷试验同步进行。

11.1.3 桩身内力测试的加载量应根据测试目的确定。

11.2 检测仪器设备

11.2.1 桩身内力测试宜根据测试目的、试验桩型及施工工艺选用电阻应变式传感器、振弦式传感器、滑动测微计或光纤式应变传感器。常用内力测试设备性能指标可参照本规程附录 G。

11.2.2 应变测量所用的仪器，宜具有多点自动测量功能，仪器的分辨率应优于或等于 $1\mu\epsilon$ 。

11.2.3 弦式钢筋计应按主筋直径大小选择，并采用与之匹配的频率仪进行测量。频率仪的分辨率应优于或等于 1Hz，仪器的可测频率范围应大于桩在最大加载时的频率的 1.2 倍。

11.3 现场检测

11.3.1 传感器测量断面应设置在两种不同性质土层的界面处，当土层较厚时可适当增加测量断面，且距桩顶和桩底的距离不宜小于 1 倍桩径。在地面处或地面上应设置一个测量断面作为传感器标定断面。传感器标定断面处应对称设置 4 个传感器，其他测量断面处可对称设置 2~4 个传感器，当桩径较大或试验要求较高时取高值。

11.3.2 应变传感器安装，可根据不同桩型选择下列方式：

1 钢桩可将电阻应变计直接粘贴在桩身上，振弦式和光纤式传感器可采用焊接或螺栓连接固定在桩身上；传感器应有足够的

抗锤击能力，且安装后应采取可靠的防护措施保证传感器在成桩后的存活率。

2 混凝土桩可采用焊接或绑扎工艺将传感器固定在钢筋笼上；对采用蒸汽养护或高压蒸养的预制混凝土桩，应选用耐高温的电阻应变计，粘贴剂和导线。

11.3.3 电阻应变式传感器及其连接电缆，应有可靠的防潮绝缘防护措施；正式测试前，传感器及电缆的系统绝缘电阻不应低于200M Ω 。

11.3.4 使用弦式钢筋计前，应对钢筋计逐个标定，得出压力(拉力)与频率之间的关系。

11.3.5 带有接长杆的弦式钢筋计宜焊接在主筋上，不宜采用螺纹连接。

11.3.6 滑动测微计测管的埋设应确保测标同桩身位移协调一致，并保持测标清洁。测管安装可根据下列情况采用不同的方法：

1 对钢桩，可通过安装在测管上的测标与钢桩的焊接，将测管固定在桩壁。

2 对非高温养护预制混凝土桩，可将测管预埋在预制混凝土桩中；预制空心桩可在沉桩后将测管放入中心孔中，用含膨润土的水泥浆充填测管与桩壁间的空隙。

3 对灌注桩，可在浇筑混凝土前将测管绑扎在主筋上，并采取防止钢筋笼扭曲的措施。

11.3.7 采用滑动测微计时，可在桩身内通长埋设 1 根或 1 根以上的测管，测管内宜每隔 1m 设测标或测量断面一个。

11.3.8 滑动测微计测试前后，应进行仪器标定，获得仪器零点和标定系数。

11.3.9 采用光纤式传感器进行内力测试时，应符合下列规定。

1 光纤式传感器应用到灌注桩和预制混凝土桩中，应至少布设 1 条沿桩身中心对称的 U 形回路测线；有条件时，宜布设多条对称 U 形回路测线。

2 光纤式传感器应用到钢桩中, 植入光纤构成 U 形回路风险较大时, 应沿桩身轴线对称布设两条单独的测线; 有条件时, 宜布设多条对称的测线。

3 测试光纤植入过程中, 应采用成熟的布设工艺和保护工艺, 保证传感器的成活率。受检桩需要进行桩头处理时, 应提前做好桩头光纤引线的保护措施。

11.3.10 桩身位移测量应与桩顶位移测量同步, 当桩身应变与桩身位移需要同时测量时, 桩身位移测试应与桩身应变测试同步。

11.3.11 指定桩身断面的沉降以及两个指定桩身断面之间的沉降差, 可采用位移杆测量。位移杆应具有一定的刚度, 宜采用内外管形式: 外管固定在桩身, 内管下端固定在需测试断面, 顶端高出外管 100mm~200mm, 并能与测试断面同步位移。

11.4 检测数据的处理

11.4.1 测试数据整理应符合下列规定:

1 采用电阻应变式传感器测量, 但未采用六线制长线补偿时, 应按下列公式对实测应变值进行导线电阻修正:

$$\text{采用半桥测量时: } \varepsilon = \varepsilon' \left(1 + \frac{r}{R} \right) \quad (11.4.1-1)$$

$$\text{采用全桥测量时: } \varepsilon = \varepsilon' \left(1 + \frac{2r}{R} \right) \quad (11.4.1-2)$$

式中:

ε ——修正后的应变值;

ε' ——修正前的应变值;

r ——导线电阻 (Ω);

R ——应变计电阻 (Ω)。

2 采用弦式钢筋计测量时, 应根据率定系数将钢筋计的实测频率换算成力值, 再将力值换算成与钢筋计断面处混凝土应变相等的钢筋应变值。

3 采用滑动测微计测量时, 应按下列公式计算应变值:

$$e = (e' - z_0)K \quad (11.4.1-3)$$

$$\varepsilon = e - e_0 \quad (11.4.1-4)$$

式中:

e ——仪器读数修正值;

e' ——仪器读数;

z_0 ——仪器零点;

K ——率定系数;

ε ——应变值;

e_0 ——初始测试仪器读数修正值。

4 数据处理时, 应删除异常测点数据, 求出同一断面有效测点的应变平均值, 并按下式计算该断面处的桩身轴力:

$$Q_i = \bar{\varepsilon}_i E_i A_i \quad (11.4.1-5)$$

式中:

Q_i ——桩身第 i 断面处轴力(kN);

$\bar{\varepsilon}_i$ ——第 i 断面处应变平均值, 长期监测时应消除桩身徐变影响;

A_i ——第 i 断面处桩身截面积 (m^2);

E_i ——第 i 断面处桩身材料弹性模量 (kPa); 当混凝土桩身测量断面与标定断面两者的材质、配筋一致时, 应按标定断面处的应力与应变的比值确定;

5 每级试验荷载下, 应将桩身不同断面处的轴力值制成表格, 并绘制轴力分布图。桩侧土的分层摩阻力和桩端阻力应分别按下列公式计算:

$$q_{si} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{ul_i} \quad (11.4.1-6)$$

$$q_p = \frac{Q_n}{A_0} \quad (11.4.1-7)$$

式中:

q_{si} ——桩第 i 断面与 $i+1$ 断面间侧阻力(kPa);

q_p ——桩的端阻力(kPa);

i ——桩检测断面的顺序号, $i=1, 2, \dots, n$, 并自桩顶以下从小到大排列;

u ——桩身周长 (m);

l_i ——第 i 断面与 $i+1$ 断面之间的桩长 (m);

Q_n ——桩端的轴力(kN);

A_0 ——桩端面积 (m^2) ;

6 桩身第 i 断面处的钢筋应力应按下式计算:

$$\sigma_{si} = E_s \cdot \varepsilon_{si} \quad (11.4.1-8)$$

式中:

σ_{si} ——桩身第 i 断面处的钢筋应力(kPa);

E_s ——钢筋的弹性模量(kPa);

ε_{si} ——桩身第 i 断面处的钢筋应变。

12 锚杆抗拔试验

12.1 一般规定

12.1.1 锚杆抗拔试验主要包括锚杆抗拔承载力的基本试验、验收试验、持有荷载试验。

12.1.2 试验锚杆的设计参数、材料、施工工艺及参数、所处的工程地质及水文地质条件等应与工程锚杆基本相同；试验加载装置的安装，应采取措施确保试验锚杆及锚固结构与垫层、反力装置等有效隔离，并使其处于独立受力状态，避免受支撑构件、垫层或混凝土面层的影响。

12.1.3 锚杆基础试验检测内容应根据岩土锚杆工程阶段、设计条件和任务目的确定，对检测方法的一般要求应符合下列规定：

1 基本试验主要适用于设计阶段，确定锚杆极限抗拔承载力、验证并选择锚杆设计参数和施工工艺；

2 验收试验适用于工程锚杆施工后的验收阶段，试验可用于确定验收荷载作用下锚杆的工作性状，判定锚杆抗拔性能是否满足设计要求，为工程验收提供依据；

3 试验应采用分级维持荷载法，也可采用多循环加卸载法；荷载分散型锚杆应采用多循环加卸载法；试验结果可提供试验锚杆的抗拔极限承载力、相应的位移量和表观自由长度；

4 持有荷载试验，适用于测定预应力锚杆的锚杆锁定力与锚杆工作状态下杆体的工作持有荷载和位移等。

12.1.4 基础锚杆的开始检测时间与养护条件应符合下列规定：

1 锚杆施工过程中，应预留注浆材料试块，试块数量同批次不少于 3 组，每组 3 块，锚杆施工完成后应将试块与锚杆进行同条件养护，在试验前、养护 28 天龄期与确认注浆材料实际强度时，应以试块的抗压强度试验确定；

2 锚固体及锚固结构强度在试验时应达到设计强度；基础锚杆基本试验、锚杆验收试验，可在锚固段注浆体实际强度达到设

计强度的 90% 以上进行；土层基础锚杆验收试验，试验时注浆体强度在 10MPa 以上，且不低于设计强度的 70%；

3 试验锚杆的施工休止时间可根据地区经验确定；当无成熟的地区经验时，按表 3.5.4 确定；

4 采用持有荷载试验测定预应力锚杆锁定力，应在张拉锁定后 12h 内完成试验。

12.1.5 基础锚杆检测位置的选择应按下列要求确定：

1 基本试验，选择有代表性工程区段，且设计参数应与工程锚杆一致；基本试验的锚杆不得选用工程锚杆，且全长粘结型锚杆宜设置 0.5m~1.0m 的自由段；

2 验收试验，施工质量有疑问的锚杆应全部进行验收试验；局部地质条件复杂部位的锚杆、设计方认为重要部位的锚杆应优先选取；委托方认为必须选取的锚杆也应纳入检测范围；其余受检锚杆宜随机选取；

3 持有荷载试验，当设计阶段需要确定锁定力与锁定工艺的锚杆；当临时性锚杆已超过安全使用期、工程竣工 3 年后的永久性土层锚杆和工程竣工 5 年后的永久性岩石锚杆、工程中出现异常的锚杆、监测过程中出现异常的锚杆等情况，需要确定杆体持有荷载时预应力锚杆；工作状态下需要确定杆体持有荷载的锚杆；其他需要采用持有荷载试验测定预应力锚杆锁定力的锚杆；

4 锚杆基础的检测各部位的检测应随机抽样。当发现检测锚杆数量不足或检测数据出现异常情况时，应补充检测或扩大检测。

12.1.6 锚杆基础检测确认与扩大检测，对于验收试验结果出现异常或不合格锚杆的情况，应扩大检测，扩大检测的数量应为异常或不合格锚杆数量的 2 倍。

12.2 检测设备

12.2.1 检测设备性能指标应符合下列规定：

1 荷重传感器、压力传感器或压力表的准确度应优于或等于 0.4 级；

2 试验用油泵、油管在最大加载时的工作压力不应超过额定工作压力的 80%；

3 荷重传感器、千斤顶、压力表或压力传感器的量程应与测量范围相适应，测量值宜控制在满量程的 25%~80%；

4 位移测量仪表的测量误差不应大于 0.1%FS，分辨力应优于或等于 0.01mm；

12.2.2 荷载量测可采用放置在千斤顶上的荷重传感器直接测定，或采用并联于千斤顶油路的压力表或压力传感器测定油压，根据千斤顶校准结果换算荷载。

12.2.3 锚头位移宜采用位移传感器或百分表测量，且应符合下列规定：

1 位移测量方向应与锚杆的轴向变形方向平行；

2 应安装 1~2 个位移测量仪表；对采用并联千斤顶同步张拉法进行试验的荷载分散型锚杆，每组单元锚杆应安装 1 个位移测量仪表；

3 位移测量系统应设置基准桩和基准梁，位移测量仪表的基座应固定在基准梁上，不得使用千斤顶作为位移测量基准点；

4 基准桩应优先设置在与试验加载装置不同标高的下一台阶的岩土层中；

5 基准桩、基准梁和固定位移测量仪表的夹具应避免太阳照射、振动及其他外界因素的影响。

12.2.4 锚杆试验加载反力装置应符合下列规定：

1 加载反力装置提供的反力不应小于最大试验荷载的 1.2 倍；

2 加载反力装置的构件应满足承载力和变形的要求。

12.2.5 锚杆试验加载反力装置可根据试验条件选择支座横梁反力装置、支撑凳式反力装置，加载反力装置的选择应符合下列规定：

1 基础锚杆应采用支座横梁反力装置(图 12.2.5-1)；

2 持有荷载试验应采用支撑凳式反力装置(图 12.2.5-2)。

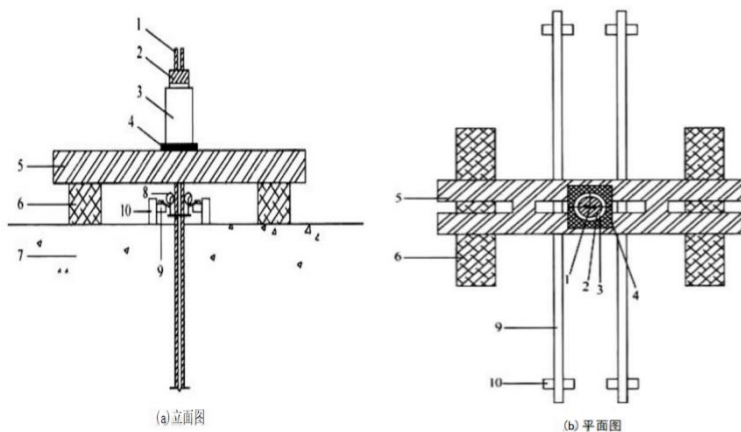


图 12.2.5-1 支座横梁反力装置示意图

1—试验锚杆；2—工具锚；3—穿心式千斤顶；4—垫板；5—主梁；
6—反力支座；7—垫层；8—位移测量仪表；9—基准梁；10—基准桩。

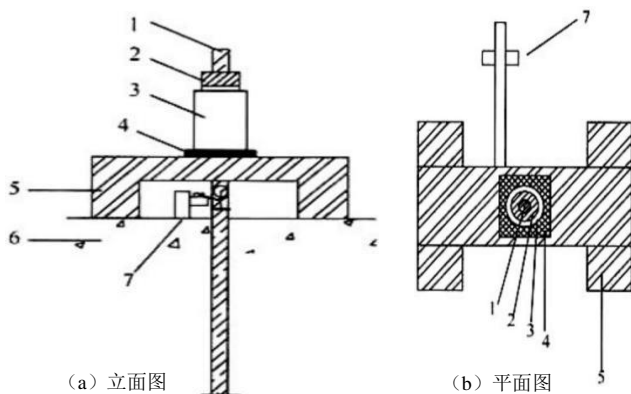


图 12.2.5-2 支撑凳式反力装置示意图

1 一试验锚杆或土钉；2 一工具锚；3—穿心式千斤顶；4 一垫板；
5 一支撑凳；6 喷射混凝土面层、岩土层；7—基准梁与基准桩。

12.2.6 锚杆中心、支座边、基准桩中心之间的距离应符合表 12.2.6-1 的规定。

表 12.2.6-1 锚杆中心、支座边(承压板边)、基准桩中心距离

反力装置类型	距离		
	两支座净距	基准桩中心与锚杆中心	基准桩中心与支座边
支座横梁反力装置	$\geq 4B$ 且 $\geq 6D$ 且 ≥ 2.0	$> 2.0\text{m}$	$\geq 1.5B$ 且 $> 2.0\text{m}$
支撑凳式反力装置	$\geq 3.0D$	$> 1.0\text{m}$	$\geq 1B$ 且 $> 1.0\text{m}$

注： B 为支座边宽； D 为锚杆钻孔直径。

12.3 现场检测

12.3.1 现场检测前应做好下列准备：

1 试验前应先检查锚头等锚杆与锚固体体系的完好性，并采取无损检测或可靠的技术方法对锚固体的锚固质量进行检测。

2 试验前应对同条件养护的试块进行无侧限抗压强度试验，根据试验结果判定锚固体的强度是否满足 12.1.4 的要求；同时锚杆施工的休止时间，尚应满足 12.1.4 的要求。

3 清理试验场地，并确保现场试验工作面能满足 12.2.4～12.2.6 的安装要求。

12.3.2 基本试验与验收试验现场检测

1 钢绞线锚杆应在试验前对钢绞线进行预紧，预紧应符合下列规定：

1) 单束(单组)钢绞线的预紧荷载宜为 $(0.1\sim 0.2)\text{kN/束}$ （组），当连续两遍预紧伸长增量不超过 3mm 时，可终止预紧；

2) 整束或各组钢绞线宜共同进行预紧，预紧荷载宜为最大试验荷载的 15%，荷载施加完成后，持荷 5min；卸荷并退出全部工具锚夹片。

- 2 基础锚杆试验中初始荷载 Q 的选取宜取 0。
- 3 试验中加荷速度宜为 $(0.05 \sim 0.10) \text{ kN/min}$ ，卸荷速度宜为加荷速度的 2 倍。
- 4 试验中锚头位移基准值的确定应符合下列规定：
 - 1) 在初始荷载作用下，应每间隔 5min 测读一次锚头位移；
 - 2) 当相邻两次锚头位移增量不大于 0.01mm 时，可视为锚头位移稳定，取最后一次读数值作为锚头位移基准值。
- 5 荷载分散型锚杆张拉方法的选择，应符合下列规定：
 - 1) 宜采用本规程附录 H“锚杆补偿荷载整体张拉方法”；
 - 2) 当设计认可时，可采用单元锚杆逐组张拉方法，且应从最短单元锚杆至最长单元锚杆的顺序对各组单元锚杆进行逐组张拉试验；
 - 3) 当采用并联千斤顶组对全部单元锚杆进行同步张拉试验时，千斤顶组施加于单元锚杆的作用力方向应与其单元锚杆的轴线重合。
- 6 试验的锚头位移相对稳定标准应符合下列规定：
 - 1) 多循环加卸载法、单循环加卸载法：在 0min~30min 观测时间内，当岩石锚杆/土层锚杆相邻两次锚头位移增量分别不大于 0.05mm/0.10mm 时，可视为位移稳定；当 30min 内锚头位移仍不稳定时，则应延长观测时间，当岩石锚杆/土层锚杆出现 1h 内锚头位移增量分别不大于 0.50mm/1.00mm 时，可视为位移稳定。
 - 2) 分级维持荷载法：当岩石锚杆/土层锚杆 30min 内的锚头位移增量不大于 0.05mm/0.10mm 时，可视为锚头位移达到相对稳定。
- 7 锚头位移相对收敛标准：当后 5min 的位移增量小于前 5min 的位移增量时，可视为锚头位移达到相对收敛标准。
- 8 试验的多循环加卸载法应符合下列规定：
 - 1) 荷载分级和锚头位移观测时间应根据初始荷载取值按表 12.3.2-1 的规定确定；
 - 2) 在每一循环的非最大荷载作用下，基本试验每级荷载加载或卸载完成后持荷 5min，并在第 0min、5min 测读锚头位移；

基本试验每级荷载加载或卸载完成后持荷 1min，并在第 0min、1min 测读锚头位移；

3) 在每一循环的最大荷载作用下，加载完成后，应每间隔 5min 测读一次锚头位移；基本试验当锚头位移达到本条第 6 款的相对稳定标准时、验收试验当锚头位移达到本条第 7 款的相对收敛标准时，该循环方可卸载；

表 12.3.2-1 试验的多循环加卸载法的荷载分级和锚头位移观测时间

循环次数	试验荷载值与最大试验荷载预估值的比例（%）											
	初始荷载	加载过程							卸载过程			
第一循环	10	30	—	—	—	—	—	50	—	—	30	10
第二循环	10	30	50	—	—	—	—	60	—	—	30	10
第三循环	10	30	50	—	—	—	60	70	—	50	30	10
第四循环	10	30	50	—	—	60	70	80	—	50	30	10
第五循环	10	30	50	—	60	70	80	90	70	50	30	10
第六循环	10	30	50	60	70	80	90	100	70	50	30	10
观测时间(min)	5	5	5	5	5	5	5	≥10	5	5	5	5

注：1 基本试验当初始荷载取最大试验荷载预估值的 30%时，从第二循环开始验，共进行五个循环的加卸载试验，每个循环均卸载至最大试验荷载预估值的 30%；

2 验收试验每个循环的初始荷载和最终卸载均取最大试验荷载预估值的 30%，试验应按六个循环进行。

4) 当试验符合本条第 11 款规定的终止加载情况时，应终止加载试验。

9 试验的单循环加卸载法应符合下列规定：

1) 荷载分级和锚头位移观测时间应根据初始荷载取值按表 12.3.2-2 的规定确定；

表 12.3.2-2 试验的单循环加卸载法的荷载分级和锚头位移观测时间

试验荷载值与最大试验荷载预估值的比例(%)											
初始荷载	加载过程							卸载过程			
10	30	50	60	70	80	90	100	70	50	30	10

观测时间(min)	≥ 10	5
-----------	-----------	---

注：验收试验或基本试验的初始荷载取最大试验荷载预估值的 30% 时，从最大试验荷载预估值的 50% 开始试验，并卸载至最大试验荷载预估值的 30%。

2) 每级荷载施加完成后，应每间隔 5min 测读一次锚头位移；

3) 基本试验锚头位移达到本条第 6 款的相对稳定标准时，验收试验的锚头位移达到本条第 7 款的相对收敛标准时，可继续施加下一级荷载；

4) 当试验符合本条第 11 款规定的终止加载情况时，应终止加载试验。

5) 卸载时，每级荷载持荷 5min，并在第 0min、5min 测读锚头位移；

10 试验的分级维持荷载法应符合下列规定：

1) 加载应分级进行，采用逐级等量加载，分级荷载宜为最大试验荷载预估值的 1/10，其中，第一级加载量可取分级荷载的 2 倍；卸载应分级进行，每级卸载量可取分级荷载的 2 倍；

2) 每级荷载施加完成后，应每间隔 5min 测读一次位移；

3) 锚头位移达到本条第 6 款的相对稳定标准时，可继续施加下一级荷载；

4) 卸载时，每级荷载维持 15min，按第 0min、5min、10min、15min 测读锚头位移；

5) 当试验符合本条第 11 款规定的终止加载情况时，应终止加载试验。

11 试验终止条件，当出现下列情况之一时，应终止加载：

1) 锚杆杆体破坏；

2) 多循环加卸载法中，本次循环荷载产生的单位荷载下的锚头位移增量达到或超过前一循环荷载产生的单位荷载下的位移增量的 5 倍；

3) 单循环加卸载法和分级维持荷载法中, 本级荷载产生的单位荷载下的锚头位移增量达到或超过前一级荷载产生的单位荷载下的位移增量的 5 倍;

4) 土层锚杆在 3h 内、岩石锚杆在 2h 内, 锚头位移未达到本条第 6) 款的相对稳定标准;

5) 基本试验已加载至最大试验荷载预估值, 并未出现本条款第 1) ~4) 项规定的终止加载情况, 宜按最大试验荷载预估值 10% 的荷载增量继续进行(1~2)级加载试验, 且锚头位移观测达到位移相对稳定标准;

6) 验收试验已加载至最大试验荷载值, 并未出现本条款第 1) ~4) 项规定的终止加载情况, 且锚头位移观测达到位移相对稳定标准。

12 锚杆抗拔试验数据可按本规程表 K.0.1 的格式进行记录。

12.3.3 持有荷载试验现场检测应符合下列要求:

1 试验中加卸荷速度、锚头位移基准值的测读应符合本规程第 12.3.2 条第 3、4 款的规定。

2 加载方式应符合下列规定:

1) 初始荷载宜为锚杆设计锁定力值的 30%;

2) 加载应分级进行, 采用逐级等量加载, 分级荷载宜为锚杆设计锁定力值的 5%;

3) 每级荷载施加完成后, 应维持荷载 5min, 宜在第 0min、5min 测读锚头位移。

4) 位移观测期间, 荷载变化幅度不应超过分级荷载量的 $\pm 10\%$;

5) 当出现锚头位移突变或锚具松动时, 应继续(2~4)级加载后终止试验;

6) 当试验荷载加载至验收荷载, 且未出现锚头位移突变或锚具松动时, 应终止试验。

3 锚杆试验完成后应按设计要求进行重新锁定。

4 持有荷载试验数据可按本规程表 K.0.2 的格式进行记录。

12.4 检测数据的处理与分析

12.4.1 基本试验与验收试验数据的处理与分析，应符合下列要求：

1 试验结果应按每级荷载对应的锚头位移列表整理。多循环加卸载法应绘制锚杆的荷载-位移($Q-s$)曲线、荷载-弹性位移($Q-s_e$)曲线和荷载-塑性位移($Q-s_p$)曲线；单循环加卸载法与分级维持荷载法应绘制锚杆的荷载-位移($Q-s$)曲线；也可绘制其他辅助分析曲线。示例见本规程附录 J。

2 单根锚杆的极限抗拔承载力 Q_u 与锚杆抗拔承载力检测值 T_y 应按下列方法分析确定：

1) 符合第 12.3.2 条第 11 款 1) ~4) 情况之一时，单循环加卸载法、分级维持荷载法，取前一级荷载值；多循环加卸载法，取前一循环最大试验荷载值；

2) 符合第 12.3.2 条第 11 款 5)、6) 情况时，取最大试验荷载值。

3 荷载分散型锚杆的极限抗拔承载力 Q_u 与锚杆抗拔承载力检测值(T_y)应按下列方法分析确定：

1) 当采用补偿荷载整体张拉方法试验时，应按本条第 2 款规定取值；

2) 当采用单元锚杆逐组张拉方法、并联千斤顶组同步张拉方法进行试验时，单元锚杆的极限抗拔承载力 Q_u 与锚杆抗拔承载力检测值 T_y 应按本条第 2 款规定取值，锚杆极限抗拔承载力 Q_u 与锚杆抗拔承载力检测值 T_y 应取单元锚杆极限抗拔承载力最小值与其单元锚杆组数之乘积。

4 锚杆极限抗拔承载力 Q_u 与锚杆抗拔承载力检测值 T_y 的统计数据中，当其试验结果满足极差小于等于 30% 平均值时，该批锚杆极限抗拔承载力 Q_u 与锚杆抗拔承载力检测值 T_y 可取其平均值；当极差大于 30% 平均值时，宜增加试验数量，并分析极差过大的原因，结合工程实际情况确定该批锚杆极限抗拔承载力 Q_u 与锚杆抗拔承载力检测值 T_y 。

12.4.2 基本试验结果的判定应符合下列要求:

1 基础锚杆抗拔承载力特征值 R_t 应按极限抗拔承载力 Q_u 的 50% 取值。

2 预应力支护锚杆弹性变形验算应符合下列规定:

1) 实测弹性位移量可取为锚头总位移与卸载至初始荷载时的锚头位移之差;

2) 杆体自由段长度的理论弹性伸长值, 可按式 (12.4.2) 计算:

$$\Delta L_1 = \frac{(Q_{max} - Q_0)L_{tf}}{EA_s} \quad (12.4.2)$$

式中:

ΔL_1 ——从初始荷载至最大试验荷载, 杆体自由段长度的理论弹性伸长值(mm);

Q_{max} ——最大试验荷载(kN);

Q_0 ——初始荷载(kN);

L_{tf} ——杆体自由段长度(m);

E ——杆体弹性模量(MPa);

A_s ——杆体横截面积(m²)。

3) 实测弹性位移量应大于该荷载下杆体自由段长度的理论弹性伸长值 ΔL_1 的 80%。

3 对预应力荷载分散型锚杆, 每组单元锚杆均应按本规程 12.4.2 第 2 款的规定逐组进行弹性变形验算。当采用补偿荷载整体张拉方法进行试验时, 其单元锚杆初始荷载可按本规程附录 H 的规定取值。

4 预应力锚杆弹性变形不满足本规程 12.4.2 第 2、3 款的规定时, 应建议设计单位和施工单位调整设计参数、施工工艺。

12.4.3 验收试验结果的合格判定应符合下列要求:

1 锚杆抗拔承载力检测值不小于锚杆验收荷载;

2 锚杆弹性变形验算应符合下列规定:

1) 实测弹性位移量可取为锚头总位移与卸载至初始荷载时锚头位移之差。

2) 杆体自由段长度的理论弹性伸长值可按本规程式(12.4.2)计算。

3) 拉力型锚杆杆体自由段长度与 1/3 预应力锚杆 (或 1/2 非预应力锚杆) 杆体锚固段长度之和的理论弹性伸长值, 可按本规程式 (12.4.3) 计算:

$$\Delta L_2 = \frac{(Q_{\max} - Q_0)(L_{tf} + L_{tb}/3)}{EA_s} \quad (2) \quad (12.4.3)$$

式中:

ΔL_2 ——从初始荷载至最大试验荷载, 杆体自由段长度与 1/3 预应力锚杆 (或 1/2 非预应力锚杆) 锚固段长度之和的理论弹性伸长值(mm);

Q_{\max} ——最大试验荷载(kN);

Q_0 ——初始荷载(kN); L_{tb} ——杆体锚固段长度(m);

L_{tf} ——杆体自由段长度(m);

E ——杆体弹性模量(MPa);

A_s ——杆体横截面积(m²)。

4) 拉力型或拉力分散型锚杆实测锚头弹性位移量不应小于杆体自由段长度理论弹性伸长值 ΔL_1 的 80%, 且不应大于杆体自由段长度与 1/3 预应力锚杆 (或 1/2 非预应力锚杆) 杆体锚固段长度之和的理论弹性伸长值 ΔL_2 。

5) 压力型或压力分散型锚杆实测锚头弹性位移量不超过杆体自由段长度理论弹性伸长值(ΔL_1)的 $\pm 20\%$ 。

3 对荷载分散型锚杆, 每组单元锚杆均应按本条第 2 款的规定逐组进行弹性变形验算。当采用补偿荷载整体张拉方法进行试验时, 其单元锚杆初始荷载可按本规程附录 H 的规定取值。

4 在最大试验荷载作用下,规定持荷时间内锚杆位移量小于等于 1mm,或持荷 60min 时锚杆位移量小于等于 1.8mm。

5 当设计对锚杆的变形和位移量有要求时,应满足设计要求。

6 系统锚杆承载力检测值宜采用统计评价,当满足下列条件时,可判定所检测的工程锚杆验收试验结果满足设计要求:

1) 锚杆抗拔承载力检测值的平均值不应小于锚杆验收荷载;

2) 锚杆抗拔承载力检测值的最小值不应小于锚杆验收荷载的 0.9 倍;

3) 锚杆变形应符合本条中 2、3、4、5 款的规定;

12.4.4 持有荷载试验数据分析与判定应符合下列要求:

1 持有荷载试验数据宜按荷载与对应的锚头位移列表整理,并应绘制荷载-位移($P-s$)关系曲线。示例见本规程附录 J。

2 杆体持有荷载应按下列方法分析确定:

1) 当荷载-位移($P-s$)关系曲线上位移突变明显时,应取其陡升起始点所对应的荷载值;

2) 当荷载-位移($P-s$)关系曲线难以准确确定其陡升起始点时,应取曲线两侧拟合直线的交汇点所对应荷载值的前一级荷载;

3) 当按本款第 1)、2) 项难以确定持有荷载时,可按本规程第 12.3.3 条第 2 款第 5) 的规定进行操作,宜取试验锚松动时对应荷载的前一级荷载。

4) 当出现本规程第 12.3.3 条第 2 款中的第 6) 项情况时,取最大试验荷载;

3 持有荷载试验的合格判定应符合下列要求:

1) 杆体持有荷载应满足设计要求。

2) 在各级加荷、卸载作用下所测锚头变形值、回缩值满足设计要求;

12.4.5 检测报告除应符合本规程第 3.8 节的规定外,尚应包括下列内容:

1 锚杆类型、编号、位置、尺寸(孔径、长度、角度、杆体直径或面积、锚杆锚固段长度、锚杆自由段长度、杆体自由段长度、杆体粘结段长度等)、杆体材料、材料强度;

- 2 锚杆施工日期和相关施工情况；
- 3 试验检测过程与异常情况描述；
- 4 试验检测数据、结果与计算分析图表。

13 预制混凝土桩破坏性检测

13.1 一般规定

13.1.1 破坏性检测适用于预制混凝土桩成品桩质量检测。

13.1.2 破坏性检测项目主要为外观质量、尺寸偏差、钢筋/钢棒的抗拉强度、数量、直径、保护层厚度及箍筋直径、混凝土抗压试验；机械连接的抗拉强度等。

13.2 检测仪器设备

13.2.1 钢卷尺分度值 1mm，钢直尺分度值 1mm，游标卡尺及 20 倍读数放大镜分度值 0.01mm，深度游标卡尺及塞尺分度值 0.02mm。

13.2.2 拉力机最小分辨力 1N，示值相对误差 $\pm 1\%$ 。

13.3 现场检测

13.3.1 外观质量

1 粘皮和麻面

用钢直尺或钢卷尺测量粘皮和麻面的尺寸并计算其面积；用游标卡尺测量粘皮和麻面的深度，精确至 1mm。

2 桩身合缝及桩与端板结合面漏浆

漏浆长度：用钢卷尺测量，精确至 1mm；漏浆深度：用钢丝插入漏浆处孔隙，然后用游标卡尺测量钢丝的深度，精确至 1mm。

3 混凝土局部磕损

用钢直尺或钢卷尺测量混凝土局部磕损处的尺寸并计算其面积；用游标卡尺测量混凝土局部磕损处的深度，精确至 1mm。

4 内外表面漏筋、桩端面平整度、断筋、脱头、内表面混凝土塌落、桩与端板结合面空洞和蜂窝。

5 表面裂缝

用 20 倍读数放大镜测量，精确至 0.01mm。

6 桩箍（钢裙板）凹陷

用钢卷尺测量，精确至 1mm。

13.3.2 尺寸偏差

1 长度

用钢卷尺测量，精确至 1mm。

2 外径（边长）

用卡尺或钢直尺在同一断面测定相互垂直的两直径（边长），取其平均值，精确至 1mm。

3 壁厚

用卡尺或钢直尺在同一断面相互垂直的两直径上测定四处壁厚（对于方桩，每边选择壁厚最薄处测量），取其平均值，精确至 1mm。

4 桩端部倾斜

将直角靠尺的一边紧靠桩身，另一边与端板紧靠，用钢直尺测其最大间隙处，精确至 1mm。

5 桩身弯曲度

将拉线紧靠桩的两端部，用钢直尺测量其弯曲处的最大距离，精确至 1mm。

6 端板端面平面度

用钢直尺立起横放在端板上缓慢旋转，用塞尺测量最大间隙，精确至 0.1mm。

7 端板厚度

用游标卡尺测定 3 处厚度，取其平均值，精确至 1mm。

13.3.3 钢筋/钢棒的抗拉强度、数量、直径、保护层厚度

1 抗拉强度

截取一段钢筋/钢棒，依据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》GB/T228.1 测得抗拉强度，钢筋精确至 1MPa，钢棒精确至 10MPa。

2 数量 目测

3 直径用游标卡尺测定 3 处直径，取其平均值，精确至 1mm。

4 保护层厚度

用深度游标卡尺或钢直尺在钢筋预制混凝土桩中部同一断面的三处不同部位测量，精确至 0.1mm。

13.3.4 机械连接的抗拉强度，依据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法》GB/T228.1 测得抗拉强度。

13.3.5 箍筋直径用游标卡尺测定 3 处直径，取其平均值，精确至 0.1mm。

13.3.6 预制混凝土桩混凝土抗压强度试验参照本规程第 8 章。

13.4 检测数据的处理

13.4.1 各项的检测结果应符合其相应产品标准或图集中的质量要求。

13.4.2 检测报告除应符合本规程第 3.8 节规定外，尚应包括下列内容：

- 1 抽样单位、见证单位名称及抽样人、见证人姓名。
- 2 破碎前、后的桩彩色照片。

14 焊缝质量检测

14.1 一般规定

14.1.1 预制混凝土桩或钢桩的接桩焊缝质量检测应采用无损探伤法检测，检测内容包括表面质量检验及内部质量探伤。

14.1.2 焊缝表面质量检验方法可采用渗透法，焊缝内部质量探伤宜采用超声法检测，焊缝质量检测应符合现行国家标准《钢结构焊接规范》GB 50661 的相关规定。

14.1.3 焊缝检验抽样方法应符合下列规定：

- 1 抽样检验除设计指定焊缝外应采用随机取样方式取样；
- 2 取样中应覆盖到该批焊缝中包含的所有钢材类别、焊接位置 and 焊接方法。

14.1.4 焊缝无损检测报告签发人员必须持有现行国家标准《无损检测人员资格鉴定与认证》GB/T 9445 规定的 2 级或 2 级以上资格证书。

14.2 焊缝表面质量渗透检测

14.2.1 焊缝表面质量检测应符合下列规定：

- 1 所有焊缝应冷却到环境温度后方可进行表面质量检测；
- 2 表面质量检测中，裂纹的检查应辅以 5 倍放大镜并在合适的光照条件下进行。

14.2.2 渗透检测的环境及被检测部位的温度宜在 10℃~50℃范围内。当温度低于 10℃或高于 50℃时，应按现行行业标准《承压设备无损检测 第 5 部分：渗透检测》NB/T 4730.5 的规定进行灵敏度的对比试验。

14.2.3 渗透剂、清洗剂、显像剂等渗透检测剂的质量应符合现行行业标准《无损检测 渗透检测用材料》JB/T 7523 的有关规定。

14.2.4 现场检测宜采用非荧光着色渗透检测，渗透剂宜采用成品套装喷罐式的水洗型或溶剂去除型，显像剂可采用快干式的湿显像剂。同一检测部位应使用同一厂家、同一系列配套渗透检测剂，不得将不同种类的检测剂混合使用。

14.2.5 渗透检测应配备铝合金试块（A 型对比试块）和不锈钢镀铬试块（B 型灵敏度试块），其技术要求应符合现行行业标准《无损检测 渗透检测用试块》JB/T 6064 的有关规定。

14.2.6 试块的选用应符合下列规定：

1 当进行不同渗透检测剂的灵敏度对比试验、同种渗透检测剂在不同环境温度条件下的灵敏度对比试验时，应选用铝合金试块（A 型对比试块）；

2 当检验渗透检测剂系统灵敏度是否满足要求及操作工艺正确性时，应选用不锈钢镀铬试块（B 型灵敏度试块）。

14.2.7 试块灵敏度的分级应符合下列规定：

1 当采用不同灵敏度的渗透检测剂系统进行渗透检测时，不锈钢镀铬试块（B 型灵敏度试块）上可显示的裂纹区号应符合表 14.2.7-1 的规定：

表 14.2.7-1 不同灵敏度等级下显示的裂纹区号

检测系统的灵敏度	低	中	高
显示的裂纹区号	2~3	3~4	4~5

2 不锈钢镀铬试块（B 型灵敏度试块）裂纹区的长径显示尺寸应符合表 14.2.7-2 的规定。

表 14.2.7-2 不锈钢镀铬试块裂纹区的长径显示尺寸

裂纹区号	1	2	3	4	5
裂纹长径(mm)	5.5~6.5	3.7~4.5	2.7~3.5	1.6~2.4	0.8~1.6

14.2.8 焊缝及热影响区应采用“中灵敏度”检测，使其在不锈钢镀铬试块（B 型灵敏度试块）中可清晰显示“3~4”号裂纹。

14.2.9 渗透检测应按照预处理、施加渗透剂、去除多余渗透剂、干燥、施加显像剂、观察与记录、后处理等步骤进行。

14.2.10 预处理应符合下列规定：

1 对检测面上的铁锈、氧化皮、焊接飞溅物、油污以及涂料应进行清理。清理时应从检测部位边缘向外扩展 30mm 的范围；机加工检测面的表面粗糙度 (Ra) 不宜大于 $12.5\mu\text{m}$ ，非机械加工面的粗糙度不得影响检测结果；

2 对清理完毕的检测面应进行清洗；检测面应充分干燥后，方可施加渗透剂。

14.2.11 施加渗透剂时，可采用喷涂、刷涂等方法，使被检测部位完全被渗透剂所覆盖。在环境及工件温度为 $10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ 的条件下，保持湿润状态不应少于 10min。

14.2.12 去除多余渗透剂时，可先用无绒洁净布进行擦拭。在擦除检测面上大部分多余的渗透剂后，再用蘸有清洗剂的纸巾或布在检测面上朝一个方向擦洗，直至将检测面上残留渗透剂全部擦净。

14.2.13 清洗处理后的检测面，经自然干燥或用布、纸擦干或用压缩空气吹干。干燥时间宜控制在 5min~10min 之间。

14.2.14 宜使用喷罐型的快干湿式显像剂进行显像。使用前应充分摇动，喷嘴宜控制在距检测面 300mm~400mm 处进行喷涂，喷涂方向宜与被检测面成 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的夹角，喷涂应薄而均匀，不应在同一处多次喷涂，不得将湿式显像剂倾倒至被检面上。

14.2.15 迹痕观察与记录应按下列要求进行：

1 施加显像剂后宜停留 7min~30min 后，方可在光线充足的条件下观察迹痕显示情况；

2 缺陷的迹痕可采用照相、绘图、粘贴等方法记录。

14.2.16 检测完成后，应将检测面清理干净。

14.2.17 出现裂纹时，应对其进行返修处理。返修处理后应进行复核检测。返修复检部位应在检测报告的检测结果中标明。

14.3 焊缝内部质量超声法探伤

14.3.1 超声波法检测仪器设备应符合下列规定：

- 1 仪器设备包括超声波探伤仪、探头、耦合剂；
- 2 超声波探伤仪应符合现行国家标准《钢结构超声波探伤及质量分级法》JG/T 203 第 4.3 条的相关要求；
- 3 探头应符合现行国家标准《钢结构超声波探伤及质量分级法》JG/T 203 第 4.4 条的相关规定，并尽量选择短前沿、高频率的小晶片斜探头；
- 4 耦合剂应符合现行国家标准《钢结构超声波探伤及质量分级法》JG/T 203 第 4.6 条的相关规定，采用透声性好，具有良好润湿特性，且不损伤检测表面的耦合剂。

14.3.2 超声波法现场操作应符合下列规定：

- 1 检测时焊缝及其母材温度应在 $0^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 之间；
- 2 预制混凝土桩焊接接头焊缝余高应高出母材 $3\text{mm}\sim 5\text{mm}$ ，然后将余高修磨至与端板母材齐平，且修磨后必须使被检区域光滑，焊缝表面不得有气孔、夹渣、焊渣、飞溅等缺陷；
- 3 预制混凝土桩焊接接头焊缝检测因端板形状问题无法从焊缝两侧进行探伤，因此不指定检验等级，采用斜探头在焊缝上作平行扫查，做横向缺陷检测，在满足探伤灵敏度的情况下，宜使用 5MHz 、短前沿、小晶片斜探头为主；
- 4 钢桩对接焊缝一般采用 B 级检验；
- 5 焊缝探伤 DAC 曲线的绘制均应符合《钢结构超声波探伤及质量分级法》JG/T 203 表 5 中 B 级的规定。

14.3.3 超声波焊缝不允许缺陷及缺陷评定应符合《钢结构超声波探伤及质量分级法》JG/T 203 第 9.6 条和 9.7 条的相关规定。

14.3.4 检测结果判定及处理

- 1 对于预制混凝土桩接桩焊缝抽样检验结果判定，当焊缝检出不合格时，应加倍抽检，对不合格的焊缝进行返修，返修后进行复检。返修复检部位应在检测报告的检测结果中标明；

2 对于钢桩焊接焊缝抽样应按检验结果判定，应符合《钢结构焊接规范》GB50661-2011 第 8.1.8 条的相关规定，所有检出的不合格焊缝应按《钢结构焊接规范》GB50661-2011 第 7.12 节的相关规定予以返修至检测合格，返修复检部位应在检测报告的检测结果中标明。

14.3.5 技术资料整理与报告的编制，应符合国家现行行业标准《钢结构超声波探伤及质量分级法》JG/T 203 的有关规定。

15 孔内成像法

15.1 一般规定

15.1.1 孔内成像检测法可用于预应力混凝土桩及钻有竖向孔的灌注桩桩身完整性或地下连续墙墙体质量检测。

15.1.2 孔内成像法适用情况及范围：

- 1 验收标准、检测规范或设计要求时；
- 2 对不允许带裂缝工作构件的微裂缝进行检测时；
- 3 对灌注桩、地下连续墙钻芯结果进行验证时；
- 4 对灌注桩进行注浆补强前；
- 5 对预制空心桩长度进行验证时；
- 6 对预制空心桩进行填芯法补强前；
- 7 采用其他方法不足以明确判断，而孔内成像法可以判断时；
- 8 对预制空心桩进行质量检测时；
- 9 采用钻芯法检测，但取芯率较低时；
- 10 采用间接法检测，无法明确判断缺陷时。

15.1.3 检测数量应符合本规程 3.3.6 条的规定，桩身完整性验收检测以外的检测数量宜按设计方、委托方的要求确定。

15.1.4 抽样检测的受检孔应符合下列规定：

- 1 设计方认为重要的基桩或地下连续墙墙体；
- 2 施工或检测中异常的基桩或地下连续墙墙体；
- 3 除以上规定外，其他受检孔宜均匀分布或随机抽取。

15.1.5 超声成像及红外成像可参照本规程执行。

15.2 检测仪器设备

15.2.1 孔内成像检测仪器设备应具备全孔壁成像、深度测量及图像存储功能，宜具备倾斜测试功能，且宜配置扶正器。

15.2.2 检测仪器设备应能稳定工作，具备防尘、防震、绝缘、防水防潮等性能，其成像组件水密性应满足 1MPa 水压不渗水，且应符合下列规定：

- 1 检测仪器设备所配置的摄像头视角应能全覆盖孔壁内侧全周；
- 2 检测仪器设备宜具备照明强度调节和变焦的功能，具体性能要求如表 15.2.2 所示：

表 15. 2. 2 孔内成像检测仪器设备性能

使用情况	性能参数	性能指标
不允许带裂缝工作构件的微裂缝检测	在最大可测孔径时，孔壁的轴向及环向成像光学分辨率	不应低于 100pix/cm
其他情况检测	在最大可测孔径时，孔壁的轴向及环向成像光学分辨率	不宜低于 20pix/cm
	在最大可测孔径时，孔壁照度	不宜低于 150LX
	孔壁照度均匀偏差	不宜大于 20%
	在最大可测孔径时，缺陷宽度误差	± 10%，当缺陷宽度小于 2mm 时，宜为 ±20%
	缺陷角度	± 2°
	校正后环向偏移范围	-10mm~10mm/-50mm~50mm
	检测深度误差	±1%检测深度

3 进行定量检测前，应对检测仪器设备测得的缺陷宽度和深度进行校准，宜对缺陷角度进行校准。

15.3 现场检测

15.3.1 检测前期准备，应符合下列规定：

- 1 宜对检测孔内干扰成像的附着物进行清理；
- 2 检测孔宜清理至检测要求深度以下不小于 0.5m；
- 3 宜检查孔内的畅通情况；

4 对于需要进行孔内成像检测的钻芯孔，钻芯后宜利用钻机对钻孔清洗并封口。

15.3.2 检测孔清理应符合下列规定：

- 1 可选用高压水、高压气或接触式中的一种或几种方法进行清理；
- 2 当附着物无法用高压水、高压气清理时，宜采用接触式清理；
- 3 接触式清理采用的接触工具硬度及力度不应损坏孔壁原表面；
- 4 接触式清理后宜采用高压水或高压气对孔壁进行进一步清理；
- 5 高压水清理时的水压宜为 0.5MPa~2.0MPa，产生的浊水宜采用清水置换；
- 6 高压气清理时的气压宜为 0.5MPa~0.8MPa。

15.3.3 现场检测应符合下列规定：

- 1 全面检测时应自孔的一端向另一端单方向进行；
- 2 照度应根据孔内环境确定，且在同一孔检测中应保持相近；
- 3 摄像头的移动速度不应超过仪器使用说明书规定的最大移动速度；
- 4 重点或可疑部位，可在全面检测后，根据全面检测时观察的目标深度进行多次检测；
- 5 对不允许带裂缝工作构件的微裂缝进行检测时应在目标深度暂停摄像头的移动，采集图像的曝光时间不应长于 1/60s；
- 6 现场应详细记录所观察到的异常部位的深度、方位、形态等信息。

15.3.4 现场检测应填写现场检测记录表。记录表应包括下列内容：

- 1 工程名称及检测孔编号；
- 2 地基基础设计参数；
- 3 检测方法；
- 4 检测仪器型号、编号；
- 5 每检测孔的检测开始、结束时间；
- 6 每检测孔的检测深度范围；
- 7 现场观察到的缺陷或异常部位的深度、方位等信息。

15.4 检测数据的处理与分析

15.4.1 影像处理不应针对缺陷尺寸进行调整；当需要进行缺陷性状判断时，不宜进行色彩调整；局部放大图不宜进行图像长宽比例的调整。

15.4.2 缺陷的定量分析宜按下列步骤进行：

- 1 将检测图像展开为孔壁展开图，环向转换为平面图的水平向，轴向转换为平面图的竖向；
- 2 计算环向缺陷占比，用环向缺陷的长度除以孔壁周长；
- 3 计算轴向缺陷平均宽度，将孔壁成像展开图水平向划分为20个等分格，取图像每个格中间缺陷轴向宽度的总和，除以20。

15.4.3 检测报告除应符合本规程第3.8节规定的内容外，尚应包括下列内容：

- 1 工程概况、地质情况，施工工艺；
- 2 检测仪器型号、编号、仪器工作原理；
- 3 检测依据的标准；
- 4 现场检测的起止日期、时间；
- 5 检测孔编号、检测孔布置平面图；
- 6 检测区域、范围；
- 7 检测孔的孔壁成像展开图；
- 8 检测孔可视性状的文字描述；
- 9 存在缺陷时，尚应包括缺陷位置附近局部放大图、缺陷最大宽度、轴向缺陷平均宽度及环向缺陷占比；

15.4.4 当检测对象为混凝土桩的钻芯成孔时，可按照本规程第8.7.3条中有关钻芯法检测桩身完整性进行综合判定；当检测对象为水泥土桩的钻芯成孔时，可按照行业标准《建筑地基检测技术规范》JGJ 340中有关钻芯法试验的桩身均匀性描述进行分类。

15.4.5 检测孔的原始实测影像应作为报告附件提交，提交的影像格式宜为通用格式。

16 磁测井法

16.1 一般规定

16.1.1 磁测井法适用于桩中或桩周除钢筋笼以外无连续铁磁性体干扰时的钻孔灌注桩钢筋笼长度或预制混凝土桩桩长的检测。

16.1.2 检测的目标体需含有铁磁性物质且与其处在的周围环境存在明显的磁场异常。

16.2 检测仪器设备

16.2.1 井中磁力仪技术性能应符合下列要求:

- 1 测量范围-99999nT~99999nT;
- 2 磁敏元件转向差 ≤ 300 nT;
- 3 数字输出更新速度 ≥ 3 次/秒;
- 4 工作环境温度-10℃~55℃;
- 5 应具有连续记录或点测记录并实时存储的功能;
- 6 应具有实时显示并存储深度-垂直 Z 分量磁场强度曲线的功能。

16.2.2 井下探头应符合下列要求:

- 1 耐压 >1.0 MPa。
- 2 井下仪器适应孔斜 0-20°。

16.3 现场检测

16.3.1 钻孔布置应符合下列规定:

- 1 钻孔宜设置在距离灌注桩外侧边缘不大于 0.5m 的土中,且应远离相邻桩,钻孔竖向中心线应平行于桩身纵轴线,钻孔垂直度偏差 $\leq 1\%$;或设置在灌注桩的中心位置,钻孔竖向中心线应与

桩身纵轴线吻合，保证钻孔垂直度偏差 $\leq 1\%$ 。对于预制空心桩，钻孔宜设置在空心内。

2 钻孔内径宜为 60mm~90mm，钻孔深度宜大于钢筋笼底设计深度 5m。

3 钻孔周围存在软弱土层、砂、卵砾石层时，为防止塌孔，宜在钻孔中设置 PVC 管护孔，其内径应大于 60mm。

4 测试结束后灌注桩桩身钻芯孔应采用水泥浆从孔底往上回灌封闭。

16.3.2 检测前应检查钻孔或 PVC 管的通畅情况，探头应能在全程范围内升降顺畅。

16.3.3 现场检测步骤应符合下列规定：

1 探头在钻孔或 PVC 管内，或从上往下或从下往上进行检测。下放或提升应匀速，且不超过 20cm/s。

2 探头在钻孔或 PVC 管内的测点间距宜在 10cm~50cm 范围内。

3 进行垂直 Z 分量磁场强度检测，并记录相关数据。

4 每根受检桩测试次数不少于 2 次，各测试曲线应有良好的重复性，波形基本一致，一致性较差时，应分析原因，排除不良因素后增加检测次数。

16.3.4 现场应能记录及显示深度-垂直分量（H-Z）数据曲线。

16.3.5 发现钢筋笼长度与设计长度不符时，应进行复测，并确认钢筋笼底端位置。

16.3.6 现场检测记录主要记录下列内容：

1 桩类、桩号、桩规格尺寸；

2 设计的钢筋笼总长度、各节钢筋笼连接点、规格等；

3 钻孔位置、钻孔深度、孔径等；

4 检测依据的标准；

5 所使用的仪器名称、型号、编号；

6 所发现的问题记录以及处置措施；

7 检测人员、检测日期和检测结论。

16.3.7 现场检测记录格式见附录 L。

16.4 检测数据的处理和分析

16.4.1 根据实测垂直 Z 分量曲线下端平坦的 Z 值，结合本地地磁图判断测区的垂直 Z 分量背景值 Z_0 。

16.4.2 垂直 Z 分量明显低于或高于背景值 Z_0 时，可判定有钢筋笼存在。

16.4.3 钢筋笼底端位置应按下列方法综合判定：

1 根据深度-垂直分量 ($h-Z$) 数据曲线，取深度-垂直分量 ($h-Z$) 数据曲线深部小于背景场值的极小值转变为大于背景场值的拐点 (斜率最大处) 所对应的深度位置。

2 根据深度-磁场垂直分量梯度 ($h - \frac{dZ}{dh}$) 曲线确定时，取深度-磁场垂直分量梯度 ($h - \frac{dZ}{dh}$) 曲线最深的明显极值点所对应的深度位置；见图 16.4.3。

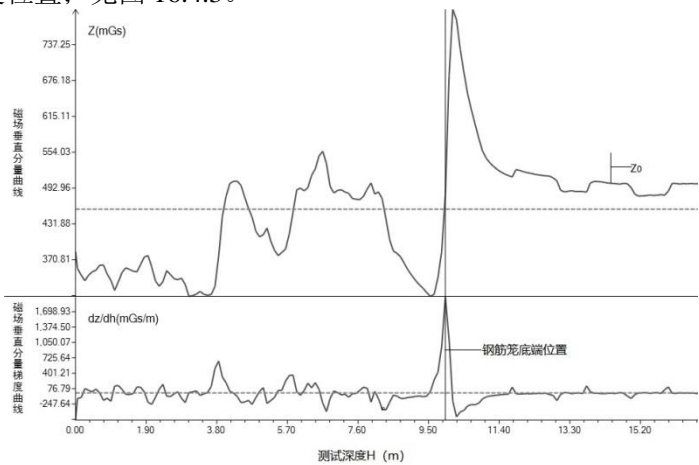


图 16.4.3 磁测桩法测试曲线示意图

16.4.4 检测报告除应符合本规范第 3.8 节规定外，尚应包括下列内容：

1 设计的钢筋笼总长度、各节钢筋笼连接点、规格等；

- 2 钻孔位置、钻孔深度、孔径等；
- 3 所使用的仪器名称、型号、编号；
- 4 所发现的问题记录以及处置情况；
- 5 实测桩钢筋笼长度的数据和曲线、检测过程的说明及结果分析；
- 6 检测结论；
- 7 检测桩位平面示意图。

17 旁孔法

17.1 一般规定

17.1.1 旁孔法适用于检测桩头隐蔽、桩体无法开挖、桩周附近可钻孔情况下的基桩桩长。

17.1.2 旁孔法成孔应采用工程钻机，避开地下管线，宜全孔安装塑料套管。

17.2 检测仪器设备

17.2.1 检测仪器应实时显示和记录测试信号、测试数据。

17.2.2 检测仪器的孔中换能器应选择多道水听器，主机不应少于4通道。

17.2.3 宜使用锤击震源并激发出高频振动。

17.3 现场检测

17.3.1 旁孔应符合下列规定(图 17.3.1):

1 钻孔直径宜为 75mm~130mm，深度宜超过预估桩长 5m，倾斜度偏差不应大于 1%；

2 钻孔与被检测桩之间的距离不应大于 1.5m；

3 钻孔宜泥浆护壁，测试时孔内应充水，并保持孔内水面与桩顶面基本一致。

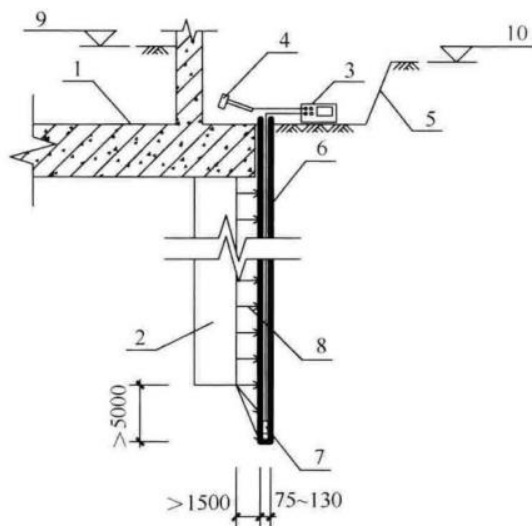


图 17.3.1 旁孔法检测示意图

1—既有建筑基础； 2—基桩； 3—信号分析仪； 4—同步触发装置； 5—试坑壁； 6—测管； 7—检波器； 8—透射波； 9—室内地坪； 10—室外地坪

17.3.2 现场工作应符合下列规定：

1 测试前，应检查套管内的通畅情况，清除障碍，且应在套管内注满清水；因套管管径小于钻孔孔径而出现套管外空间时，宜在套管与钻孔之间的间隙及套管内注满清水；

2 激振点宜布置在与待测基础相连的承台表面；承台浅埋时，宜使用钢钎打入地下并接触承台顶面，钢钎直径不宜小于 4cm；无承台或承台埋藏较深时，激振点可在与待测基础相连的柱体底部布置，激振点应为密实混凝土；

3 水听器接收排列底端应沉放至管底，向上逐点移动，至接收排列顶端到达孔口结束；每次移动前激发、接收一次；排列移动间隔宜为水听器间距的 1/2；

4 应根据现场情况，设定滤波通带；

5 应准确记录激振点与测试钻孔之间空间关系。

17.3.3 测试参数的选择应符合下列规定：

- 1 采样时间间隔不宜大于 50 μ s；
- 2 时域信号记录的时间段长度应在 L/c 时刻后延续不少于 20ms；
- 3 测试宜自下而上按预定深度进行，测试点间距不宜大于 0.5m；
- 4 接收信号应完整、清晰。

17.3.4 检波器长度不宜大于 0.2m，且应顺直。泥浆浮力较大时，可在检波器端部增加配重。

17.4 检测数据的处理和分析

17.4.1 桩身波速可按下列式计算：

$$c = \frac{\Delta L}{\Delta t} \quad (17.4.1)$$

式中：

c ——受检桩的桩身波速（m/s）；

ΔL ——两测点之间的距离（m）；

Δt ——两测点初至波分别到达时间的差值（s）。

17.4.2 旁孔法应通过拟合深度—时间直线，并识别拟合直线的拐点的方法确定桩长（图 17.4.2）。

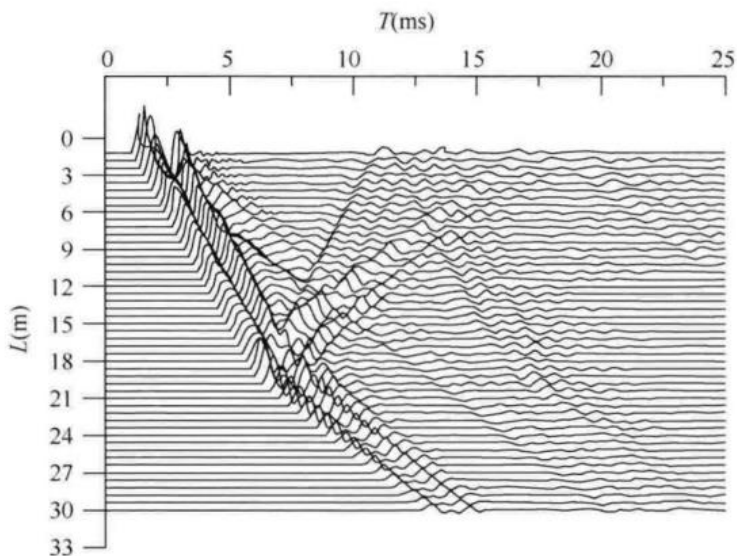


图 17.4.2 旁孔法检测桩长示意图

17.4.3 检测报告除应符合本规程第 3.8 节规定外，尚应包括下列内容：

- 1 激振点与测试钻孔之间空间关系；
- 2 钻孔与被检测桩之间的距离及钻孔深度；
- 3 旁孔法拟合深度—时间直线图；
- 4 检测基桩桩长。

18 管波法

18.1 一般规定

18.1.1 管波法可应用于施工、验收阶段的成桩质量检测，也可作为其他基桩完整性检测方法的补充或验证方法。

18.1.2 管波法适用于检测预制空心桩或灌注桩桩身完整性及灌注桩桩底沉渣厚度、桩端持力层岩土性状等。

18.2 检测仪器设备

18.2.1 管波法使用的仪器设备应包括测试主机和孔内换能器。

18.2.2 测试主机应符合下列规定：

- 1 实时显示和记录接收信号时程曲线及时间剖面；
- 2 最小采样时间间隔不应大于 0.02ms，系统通频带宽度应宽于 100Hz~3000Hz，A/D 转换器不应小于 16bit；
- 3 信号幅值量程不应小于 $\pm 5V$ ，幅值测量相对误差应小于 10%；
- 4 能自动记录测点深度位置，深度误差不应大于 0.5%。

18.2.3 孔内换能器应包括发射换能器、接收换能器和井下电缆，并应符合下列规定：

- 1 发射换能器与接收换能器应距离恒定，其有效中心之间间距应为 0.6m。深度 0.00m 应为发射换能器有效中心与接收换能器有效中心连线的中点；
- 2 发射换能器与接收换能器应固定在井下电缆上，最大外直径应小于 45mm。井下电缆应有深度标志，间隔应为 0.1m，深度误差不应大于 0.5%；
- 3 发射换能器应采用低频孔中换能器，单次发射能量不应小于 10J，发射的管波峰值频率应处于 500Hz~1000Hz；
- 4 接收换能器应采用灵敏度不小于 100 $\mu V/Pa$ 的水听器；

5 发射换能器、接收换能器、井下电缆水密性应满足 1.0 MPa 水压条件下不渗水。

18.3 现场检测

18.3.1 检测预制空心桩时，可利用中心孔作为检测通道；检测灌注桩时，可利用钻芯孔作为检测通道，也可利用在桩中预埋的塑料管；检测未成桩持力层时，可利用超前钻探孔作为检测通道。孔内可放置塑料套管，塑料套管内径不应小于 50mm。待检测深度段内应有水或泥浆。

18.3.2 混凝土灌注桩检测宜利用钻芯孔，检测未成桩持力层宜利用超前钻孔，对于端承型大直径桩，当桩端采用易溶岩作为持力层时，管波法检测孔数量应符合下列规定：

- 1 桩径 $D \leq 1.6\text{m}$ 的桩，不应少于 1 孔；
- 2 桩径 $1.6\text{m} < D \leq 2.4\text{m}$ ，不应少于 2 孔；
- 3 桩径 $2.4\text{m} < D \leq 3.2\text{m}$ ，不应少于 3 孔；
- 4 桩径 $D > 3.2\text{m}$ ，不应少于 4 孔。

18.3.3 检测灌注桩及未成桩持力层时每根受检桩的检测孔位置和深度应符合下列规定：

- 1 当检测孔数量为 1 个时，宜在距桩中心 10cm~20cm 位置布孔；当检测孔数量为 2 个~4 个时，检测孔宜在距桩中心 $0.15D \sim 0.25D$ 处均匀对称布置；当检测孔数量为 5 个及以上时，其中一个检测孔应布置在桩中心附近，其他检测孔按探测范围均匀布置在周围（可参考图 18.3.4）。

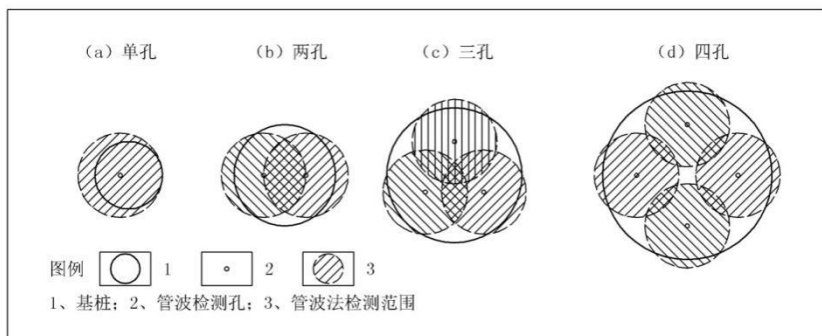


图 18.3.4 灌注桩管波法检测孔布置示意图

2 检测孔深度应满足达到设计要求的桩端持力层深度；当设计无明确要求时，达到桩端以下 3 倍桩身设计直径，且不小于 5m。

18.3.4 现场检测工作应符合下列规定：

1 检测前应先采用外直径大于 45mm 的吊锤检查检测孔或钻探孔的通畅情况，测量孔深；

2 发现桩底沉渣时，宜对桩底沉渣段进行加密检测，加密检测的测点间距不大于 0.05m；

3 应以收发换能器有效中心连线的中点作为记录点，宜自下而上逐点进行检测；

4 检测记录的采样时间间隔不应大于 $20\mu\text{s}$ ，记录长度不应小于 50ms。当有塑料套管时记录长度不应小于 100ms；

5 检测未成桩持力层时，当钢套管屏蔽段内有厚度超过 2m 的完整基岩或较完整基岩时，宜拔除该段钢套管后对该段进行重复测试；

6 数据采集时，应对采集的管波信号进行实时监控，所采集的波形应初至清晰、波形正常。发现波形畸变应查明原因、排除干扰后立即进行重复测试，并在外业班报中详细记录处置过程。

18.4 检测数据的处理和分析

18.4.1 现场检测数据应进行数据处理，并应符合下列规定：

1 数据处理时，不得进行道间振幅平衡处理（即不同接收道的振幅均衡处理）。可进行去除直流零漂、频率滤波等处理。频率滤波通频带宜为 300Hz～2000Hz；

2 各测点的时程曲线应采用相同的显示增益，宜采用伪彩色形式显示成时间剖面；

3 同一个孔的多次检测时间剖面应绘制在同一成果图件中。

18.4.2 应根据处理后数据计算直达管波能量值，并将直达管波能量曲线绘制在时间剖面中。计算应符合下列规定：

1 计算每个测点直达管波能量原值，方法按下式：

$$e_i = \sum_{m=1}^k a_m^2 \quad (18.4.2-1)$$

式中：

e_i ——第 i 个测点的直达管波能量原值；

a_m ——第 m 个采样点的采样值；

k ——直达管波的延续长度（样点数）；

2 求取直达管波能量原值的最大值 e_{max} ；

3 计算各测点直达管波能量值，方法按下式：

$$E_i = 100\% \quad e_i / e_{max} \quad (18.4.2-2)$$

式中：

E_i ——第 i 个测点的直达管波能量值（%）；

e_i ——第 i 个测点的直达管波能量原值；

e_{max} ——每次测试直达管波能量原值最大值。

18.4.3 应根据直达管波能量值计算 PSD 值，并将 PSD 曲线绘制在时间剖面中。计算应符合下列规定：

$$PSD_i = (E_i - E_{i-1})^2 / (h_i h_{i-1}) \quad (18.4.3)$$

式中：

PSD_i ——第 i 个测点的 PSD 值；

E_i ——第 i 个测点直达管波能量值（%）；

E_{i-1} ——第*i-1*个测点直达管波能量值(%)；

h_i ——第*i*个测点的深度(m)；

h_{i-1} ——第*i-1*个测点的深度(m)。

18.4.4 检测结果评价应先确定分层界面，再对桩身完整性分类、桩底沉渣、桩端持力层岩土性状分类进行判定，并应符合下列规定：

1 确定分层界面，应选取直达管波的能量突变点或反射管波的出发点作为分层界面，并对缺陷段的顶、底界面深度作偏移校正。直达管波的能量突变点宜选取 *PSD* 曲线的极大值点。界面深度偏移校正方法为层顶界面深度宜为 *PSD* 曲线极大值点深度增加 0.3m，层底界面深度宜为 *PSD* 曲线极大值点深度减去 0.3m。

2 对分层的判定宜综合直达管波和反射管波的波速、能量、频率、相位等管波特征。

18.4.5 桩身混凝土完整性类别应按表 18.4.5 进行判定。

18.4.6 当同一受检桩的管波法检测孔为两个及以上时，桩身混凝土完整性类别宜按加权平均的计算方法确定。加权平均法计算应符合下列规定：

1 按表 18.4.5 确定各检测孔每个测点的桩身混凝土完整性类别，用 $d_{i,j}$ 表示第 *j* 检测孔第 *i* 测点的类别。完整混凝土取值为 1，轻微缺陷混凝土取值为 2，明显缺陷混凝土取值为 3，严重缺陷混凝土取值为 4；

2 对相同标高的不同检测孔各个测点的类别，按下式从小到大依次排序：

$$d_{i,1} \leq d_{i,2}, \dots \leq \dots d_{i,n} \quad (18.4.6-1)$$

3 按下式计算该标高的类别加权平均值：

$$d_i = \text{int} \left(\frac{d_{i,1} + 2d_{i,2} + \dots + nd_{i,n}}{1 + 2 + \dots + n} + 0.618 \right) \quad (18.4.6-2)$$

式中：

d_i ——受检桩第 *i* 点的类别；

$d_{i,1}$ ——受检桩第 1 检测孔、第 i 点的类别；
 $d_{i,n}$ ——受检桩第 n 检测孔、第 i 点的类别；
 n ——同一受检桩的管波法检测孔数；
 int ——取整运算。

表 18.4.5 桩身混凝土完整性判定

类别	桩身混凝土完整性	管波特征
1	完整混凝土	1、直达管波波速高，能量不低于最大能量值的 75%； 2、段内无反射界面； 3、有顶底界面反射波组时，向内的一支能量强、波速高，在段内无能量消散现象。
2	轻微缺陷混凝土	1、直达管波波速较高，能量为完整混凝土的 50%至 75%之间； 2、有顶底界面反射波组时，向内的一支能量较弱、波速较高。 3、顶底界面以外出现的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，能量、频率、波速稍微变低。 4、段外为完整混凝土时，界面处出现向外的反射波组，能量较弱。
3	明显缺陷混凝土	1、直达管波波速较低，能量为完整混凝土的 25%至 50%之间； 2、有顶底界面反射波组时，向内的一支能量弱、波速较低。 3、顶底界面以外出现的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，能量、频率、波速显著变低。 4、段外为完整混凝土时，界面处出现向外的反射波组，能量较强。
4	严重缺陷混凝土	1、直达管波波速低，能量为完整混凝土的 25%以下； 2、有顶底界面反射波组时，向内的一支能量很弱、波速低。 3、顶底界面以外出现的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，能量、频率、速度突然变低，甚至消失。 4、段外为完整混凝土时，界面处出现向外的反射波组，能量强。

4 根据该标高的类别加权平均值查表 18.4.5 判定全桩各测点的桩身混凝土完整性类别。相邻测点的类别相等时，应归并为一

段。

18.4.7 每根受检桩的桩身完整性类别应按表 3.7.1 判定，并应符合下列规定：

1 桩身完整性类别按混凝土缺陷最不利类别确定；

2 当预制空心桩接桩位置存在缺陷反射波时,可结合管波特征、工程地质条件和工程整体检测情况,对该桩的完整性类别进行综合判定;

3 当桩身多处存在 II 类缺陷或 III 类缺陷时,桩身完整性类别可降低一个级别。

18.4.8 混凝土灌注桩桩底以上为明显缺陷混凝土或严重缺陷混凝土时可判定为桩底沉渣。

18.4.9 混凝土灌注桩应给出每根受检桩的桩底沉渣厚度及检测结果评价。当同一受检桩有两个及以上检测孔时,桩底沉渣厚度宜采用加权平均值,计算方法应符合下列规定:

将管波法判定的各检测孔的桩底沉渣厚度从小到大依次按下式排序:

$$\delta_1 \leq \delta_2, \dots \leq \dots \leq \delta_n \quad (18.4.9-1)$$

按下式计算桩底沉渣厚度加权平均值:

$$\delta = \frac{\delta_1 + 2\delta_2 + \dots + n\delta_n}{1 + 2 + \dots + n} \quad (18.4.9-2)$$

式中:

δ ——受检桩的桩底沉渣厚度;

δ_i ——第 i 检测孔的桩底沉渣厚度;

n ——同一受检桩的管波法检测孔数。

18.4.10 成桩前桩位的桩端持力层岩土性状分类应按表 18.4.10 进行判定。

表 18.4.10 桩端持力层岩土性状分类判定

序号	桩端持力层岩土性状分类	管波特征	端承桩持力层适宜性
1	完整基岩	1、直达管波波速高，能量不低于最大能量值的 75%。 2、段内无反射界面。 3、有顶底界面反射波组时，向内的一支能量强、波速高，在段内无能量消散现象。	可作为端承桩持力层
2	较完整基岩 (节理裂隙发育)	1、直达管波波速较高，能量为完整基岩段的 50%至 75%之间。 2、有顶底界面反射波组时，向内的一支能量较弱、波速较高。 3、顶底界面以外出现的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，能量、频率、波速稍微变低。 4、段外为完整基岩时，界面处出现向外的反射波组，能量较弱。	在抗压强度达到设计要求时，可作为端承桩持力层
3	较破碎基岩 (溶蚀裂隙发育)	1、直达管波波速较低，能量为完整基岩段的 25%至 50%之间。 2、有顶底界面反射波组时，向内的一支能量弱、波速较低。 3、顶底界面以外出现的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，能量、频率、波速显著变低。 4、段外为完整基岩时，界面处出现向外的反射波组，能量较强。	不宜作为端承桩持力层
4	破碎、极破碎基岩 (软弱夹层)	1、直达管波波速低，能量为完整混凝土的 25%以下。 2、有顶底界面反射波组时，向内的一支能量很弱、波速很低。 3、顶底界面以外出现的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，能量、频率、速度突然变低，甚至消失。 4、段外为完整基岩时，界面处出现向外的反射波组，能量强。	不应作为端承桩的桩端持力层
5	岩溶发育段	1、基岩为易溶岩。 2、直达管波波速低，能量为完整基岩段的 25%以下，甚至不可见。 3、段内无顶底界面反射波组。 4、顶底界面以外出现的反射波组穿过本段顶底界面进入本段后，能量、频率、速度突然变低，甚至消失。 5、段外为完整基岩时，界面处出现向外的反射波组，能量强。	不得作为端承桩的桩端持力层

表 18.4.10 桩端持力层岩土性状分类判定（续表）

序号	桩端持力层岩土性状分类	管波特征	端承桩持力层适宜性
6	土层	1、直达管波波速低，能量为完整基岩段的 25% 以下，甚至不可见； 2、反射波组在段内能量弱、波速很低。 3、底界面以外出现的反射波组穿过本段项底界面进入本段后，能量、频率、速度突然变低，甚至消失。 4、段下为完整基岩时，界面处出现向外的反射波组，能量强。	不得作为端承桩的桩端持力层

18.4.11 检测报告除应符合本规程第 3.8 节规定外，尚应包括下列内容：

- 1 检测过程叙述及异常情况描述；
- 2 实测与计算分析图表和检测数据汇总结果；
- 3 每个检测桩/孔的成果图；
- 4 与检测内容相应的检测结论。

附录 A 桩端岩土载荷试验要求

A.0.1 桩端岩土载荷试验应采用直径为 0.8m 圆形刚性承压板；大直径桩端岩层的载荷试验应采用直径为 0.3m 圆形刚性承压板。

A.0.2 土层载荷试验承压板应置于桩端持力层上，试井直径宜等于承压板直径，当试井直径大于承压板直径时，紧靠承压板周围外侧的土层高度不应小于 0.8m；承压板上用直径小于试井直径的钢管连接，延伸至地面进行加荷；可利用井壁护圈作反力加荷，沉降观测宜直接在底板上进行。岩层载荷试验承压板应置于桩端持力层上，当岩石埋藏深度较大时，可采用钢筋混凝土桩。延伸至地面的钢桩或钢筋混凝土桩需采取措施以消除桩身与土之间的摩擦力。

A.0.3 加荷等级可按预估极限端承载力的 1/15~1/10 分级施加，最大荷载宜达到破坏。

A.0.4 土层载荷试验在加每级荷载后的第一小时内，每隔 10min、10min、10min、15min、15min 观测一次，以后每隔 30min 观测一次。岩层载荷试验每隔 10min 观测一次。

A.0.5 土层载荷试验在每级荷载作用下，当连续 2h，每小时的沉降量小于 0.1mm 时，则认为已经稳定，可施加下一级荷载。岩层载荷试验连续三次读数之差均小于 0.01mm，则认为已经稳定，可施加下一级荷载。

A.0.6 土层载荷试验符合下列条件之一时可终止加载：

1 当荷载沉降曲线上，有可判定极限端阻力的陡降段，且沉降量超过 $(0.04 \sim 0.06)d$ (d 为承压板直径) 时，压缩性小的岩土取小值，反之取大值；

2 本级沉降量大于前一级沉降量的 5 倍；

3 某级荷载作用下经 24h 沉降量尚不能达到稳定标准；

4 当持力层土层坚硬，沉降量很小时，最大加载不应小于设计端阻力的 2 倍。

A.0.7 岩层载荷试验符合下列条件之一时可终止加载：

- 1 沉降量读数不断变化, 在 24h 内, 沉降速率有增大的趋势;
- 2 压力加不上去或勉强加上而不能维持稳定。

注: 若限于加载能力, 荷载也应增加到不少于设计端阻力的 2 倍。

A.0.8 卸载观测应符合下列规定:

- 1 卸载的每级荷载为加载每级荷载的 2 倍;
- 2 每级卸载后, 隔 15、15、30min 观测一次, 即可卸下一级荷载;
- 3 全部卸载后隔 3h 应测读承压板残余沉降量;
- 4 岩层载荷试验每级卸载后, 应隔 10min 测读一次, 测读三次后可卸下一级荷载。全部卸载后, 当测读 0.5h 回弹量小于 0.01mm 时, 即认为稳定, 终止试验。

A.0.9 桩端承载力特征值的确定应符合下列规定:

1 当满足本附录第 A.0.6 条第 1~3 款之一时, 土层载荷试验其对应的前一级压力定为极限端承载力。当满足本附录第 A.0.7 条第 1~2 款之一时, 岩层载荷试验其对应的前一级压力定为极限端承载力。

2 土层载荷试验当 $p-s$ 曲线有明显的比例界限时, 取比例界限所对应压力为桩端承载力特征值, 但其值不应大于最大加载量或极限桩端承载力的一半。岩层载荷试验当 $p-s$ 曲线有明显的比例界限时, 取比例界限所对应压力为桩端承载力特征值, 但其值不应大于最大加载量或极限桩端承载力的 1/3。

3 土层载荷试验当 $p-s$ 曲线无明显的拐点时, 可取 $s=(0.01\sim0.015)d$ 所对应的 p 值, 作为桩端承载力特征值, 但其值不应大于最大加载量或极限桩端承载力的一半。岩层载荷试验当 $p-s$ 曲线无明显的拐点时, 取极限桩端承载力的 1/3 作为桩端承载力特征值。

A.0.10 同一岩土层参加统计的试验点不应少于 3 点, 当试验实测值的极差不超过平均值的 30% 时, 取此平均值作为极限桩端承载力值或桩端承载力特征值。

附录 B 混凝土桩桩头处理要点

B.0.1 混凝土桩应先凿掉桩顶部分的破碎层和软弱混凝土。

B.0.2 桩头顶面应水平、平整，桩头中轴线与桩身上部中轴线应重合，桩头截面积应与原桩身截面积相同。

B.0.3 桩头主筋应全部直通至桩顶混凝土保护层之下，各主筋应在同一高度上。

B.0.4 距桩顶 1.5 倍桩径范围内，宜用 3mm~5mm 钢板围裹，或设置箍筋，其间距不宜大于 50mm。桩顶应设置钢筋网片 2~3 层，间距 60mm~100mm。桩身主筋应与网片搭焊。

B.0.5 桩头混凝土强度等级应比原桩身强度提高 1~2 个等级。

B.0.6 接完桩头后应进行养护，达到本附录 B.0.5 条规定的强度后可进行检测，冬季施工时应注意对混凝土的保温养护。

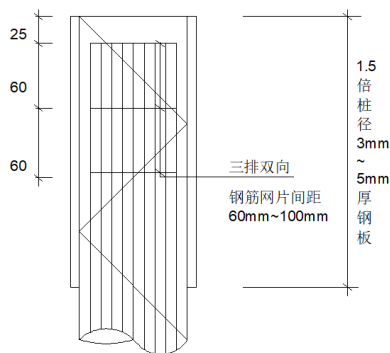


图 B.0.1 混凝土桩桩头处理示意图

附录 C 试打桩与打桩监控

C.1 试打桩

C.1.1 试打桩应符合下列规定：

- 1 试打桩所在位置的工程地质条件应具有代表性。
- 2 试打桩过程中，应按桩端进入的土层逐一进行测试；当持力层较厚时，应在同一土层中进行多次测试。

C.1.2 桩端持力层的选择应根据试打桩结果承载力与贯入度的关系，结合场地岩土工程勘察报告综合判定。

C.1.3 采用试打桩判定桩的承载力时，应符合下列规定：

- 1 判定的承载力值应小于或等于试打桩时测得的桩侧和桩端静土阻力值之和与桩在地基土中的时间效应系数的乘积，并应进行复打校核。
- 2 复打至初打的休止时间应符合表 3.5.4 的规定。

C.2 桩身锤击应力监测

C.2.1 桩身锤击应力监测应符合下列规定：

- 1 被监测桩的桩型、材质应与工程桩相同；施打机械的锤型、落距和垫层材料及状况应与工程桩施工时相同。
- 2 应包括桩身锤击拉应力和锤击压应力两部分。

C.2.2 为测得桩身锤击应力的最大值，监测时应符合下列规定：

- 1 桩身锤击拉应力宜在预计桩端进入软土层或桩端穿过硬土层进入软夹层时测试。
- 2 桩身锤击压应力宜在桩端进入硬土层或桩周土阻力较大时测试。

C.2.3 最大桩身锤击拉应力可按下式计算：

$$\sigma_t = \frac{1}{2A} \left[F \left(t_1 + \frac{2L}{c} \right) - ZV \left(t_1 + \frac{2L}{c} \right) + F \left(t_1 + \frac{2L-2x}{c} \right) \right]$$

$$+ZV\left(t_1+\frac{2L-2x}{c}\right)] \quad (\text{C.2.3})$$

式中:

- σ_t ——最大桩身锤击拉应力 (kPa) ;
 ——传感器安装点至计算点的距离 (m) ;
 x
 A ——桩身截面面积 (m²) 。

C.2.4 最大桩身锤击压应力可按下式计算:

$$\sigma_p = F_{\max} / A \quad (\text{C.2.4})$$

式中:

- σ_p ——最大桩身锤击压应力 (kPa) ;
 F_{\max} ——实测的最大锤击力 (kN) 。

打桩过程中突然出现贯入度骤减甚至拒锤时, 应考虑与桩端接触的硬层对桩身锤击压应力的放大作用。

C.2.5 桩身最大锤击应力控制值应符合现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ94 中有关规定。

C. 3 锤击能量监测

C.3.1 锤击实际传递给桩的能量应按下式计算:

$$E_n = \int_0^{t_e} FVdt \quad (\text{C.3.1})$$

式中:

- E_n ——锤击实际传递给桩的能量 (kJ) ;
 t_e ——采样结束的时刻 (s) 。

C.3.2 锤击最大动能宜通过测定锤芯最大运动速度确定。

C.3.3 锤击传递比应按锤击实际传递给桩的能量与锤击额定能量的比值确定; 锤击效率应按实测的锤击最大动能与锤击的额定能量的比值确定。

附录 D 钻芯法检测记录表

D.0.1 钻芯法检测的现场操作记录和芯样编录应分别按表 D.0.1-1、D.0.1-2 的格式记录；检测芯样综合柱状图应按表 D.0.1-3 的格式记录和描述。

表 D.0.1-1 钻芯法检测现场操作记录表

桩号		孔号			工程名称			
时间		钻进 m			芯样 编号	芯样长度 m	芯样 取芯率	芯样初步描述及 异常情况记录
自	至	自	至	计				
检测日期					机长：	记录：	页次：	

表 D.0.1-2 钻芯法检测芯样编录表

工程名称				日期		
桩号/钻芯孔号		桩径		混凝土设计强度等级		
项 目	分段 (层) 深度 m	芯样描述			取样编号 取样深度	备注
桩身 混凝土		混凝土钻进深度，芯样连续性、完整性、胶结情况、表面光滑情况、断口吻合程度、混凝土芯是否为柱状、骨料大小分布情况，以及气孔、空洞、蜂窝麻面、沟槽、破碎、夹泥、松散的情况				
桩底沉渣		桩端混凝土与持力层接触情况、沉渣厚度				
持 力 层		持力层钻进深度，岩土名称、芯样颜色、结构构造、裂隙发育程度、坚硬及风化程度； 分层岩层应分层描述			(强风化或土层时的动力触探或标贯结果)	

检测单位：

记录员：

检测人员：

表 D.0.1-3 钻芯法检测芯样综合柱状图

桩号 / 孔号			混凝土设计强度等级			桩顶标高		开孔时间	
施工桩长			设计桩径			钻孔深度		终孔时间	
层序号	层底 标高 m	层底 深度 m	分层 厚度 m	混凝土/岩 土芯 柱状图 (比例尺)	桩身混 凝土、 持力 层描述	芯样强度 序号—— 深度 m		备注	
				□ □ □					

编制:

校核：

注: □代表芯样试件取样位置。

附录 E 自平衡法静载荷试验记录表

E.0.1 自平衡法静载荷试验宜按表 E.0.1 的格式记录。

表 E.0.1 自平衡法静载荷试验记录表

[illegible]

记录:

校核:

E.0.2 自平衡法静载荷试验荷载-位移汇总表宜按表 E.0.2 的格式记录。

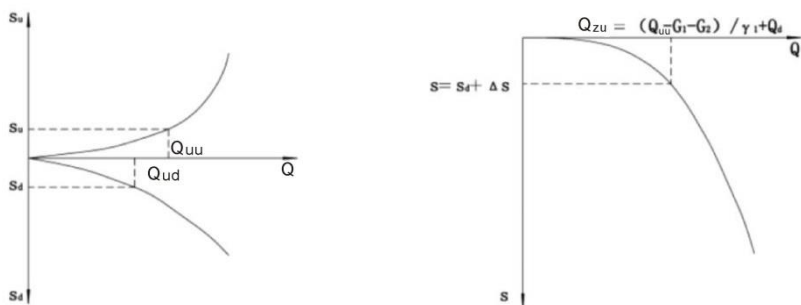
表 E.0.2 自平衡法静载荷试验汇总表

工程名称			桩号		桩型尺寸		试验日期		
序号	荷载 kN	历时 min	向上位移 mm		向下位移 mm		桩顶位移 mm		
		本级	累计	本级	累计	本级	累计	本级	累计
		</							

记录：校核：

附录 F 自平衡法静载荷试验荷载位移等效转换方法

F.0.1 桩身无内力测试元件时，桩顶等效荷载、位移应按下列公式转换计算（图 F.0.1）：



(1) 基桩自平衡法静载荷试验曲线

(2) 等效转换曲线

图 F.0.1 自平衡法静载荷试验结果转换示意

$$Q_u = \frac{Q_{uu} - G_1 - G_2}{r_1} + Q_{ud} \quad (\text{F.0.1-1})$$

$$s = s_d + \Delta s \quad (\text{F.0.1-2})$$

$$\Delta s = \frac{[(Q_{uu} - G_1 - G_2) / r_1 + 2Q_{ud}] L_u}{2E_p A_p} \quad (\text{F.0.1-3})$$

式中：

Q_{zu} ——桩顶等效荷载（kN）；

Q_{ud} ——下段桩的加载值（kN），可直接测定；

Q_{uu} ——对应于自平衡法 $Q-s_u$ 曲线上段桩位移绝对值等于 s_u 时的上段桩荷载（kN）；

s ——桩顶等效位移（m）；

s_d ——荷载箱处向下的位移（m），可直接测定；

Δs ——桩身压缩量 (m) ;
 L_u ——上段桩长度 (m) ;
 E_p ——桩身弹性模量 (kPa) ;
 A_p ——桩身截面面积 (m²) ;
 G_1 ——荷载箱上部桩的自重;
 G_2 ——设计桩顶以上超灌高度的重量、空桩段泥浆或回填土自重及桩顶配重, 地下水位以下应取浮重度计算 (kN) ;
 r_1 ——转换系数, 根据荷载箱上部土的类型确定: 黏性土、粉土取 0.8, 砂土取 0.7; 岩石取 1.0; 若上部有不同类型的土层, 按厚度取加权平均值。

F.0.2 桩身有内力测试元件时的计算应符合下列规定:

- 1 桩身内力测试依据本规程第九章执行;
- 2 将荷载箱以上部分分割成 n 个单元, 任意一单元 i 的桩轴向力 $Q(i)$ 和变位量 $s(i)$ 可用下式表示 (示意图见图 F.0.2)。

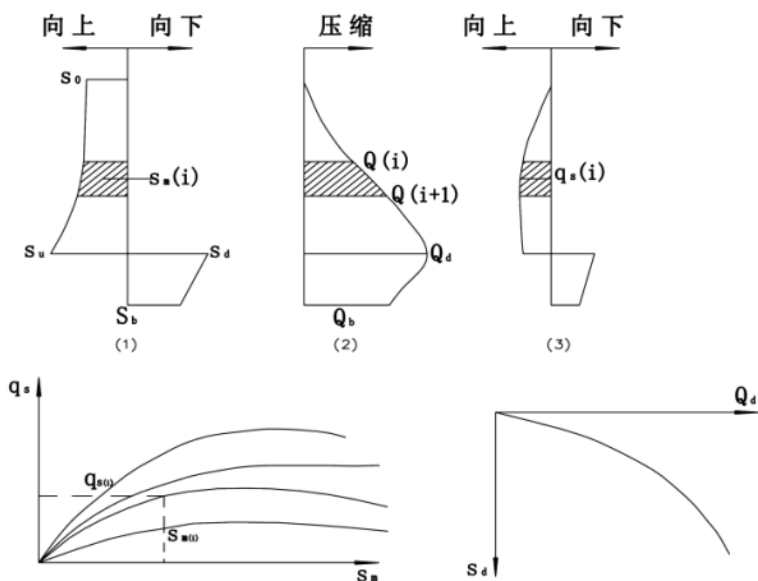


图 F.0.2 自平衡法的轴向力、桩侧摩阻力与变位量的关系

s_0 —桩顶变位； s_u 、 s_d —荷载箱处的向上和向下变位量； s_b —桩端变位量； Q_d —荷箱荷载； Q_b —桩端轴向力； $s_m(i)$ — i 单元中点的变位量； $q_s(i)$ — i 单元的桩侧摩阻力

$$Q(i)=Q_d+\frac{1}{2}\sum_{m=i}^n q_s(m)\{U(m)+U(m+1)\}L(m) \quad (\text{F.0.2-1})$$

$$s(i)=s_d+\sum_{m=i}^n \frac{Q(m)+Q(m+1)}{A_p(m)E_p(m)+A_p(m+1)E_p(m+1)}L(m) \quad (\text{F.0.2-2})$$

式中：

Q_d ——荷载箱荷载（kN）；

s_d ——荷载箱处的向下变位量（m）；

$q_s(m)$ —— m 点（ $i \sim n$ 之间的点）的桩侧摩阻力（假定向上为正值）（kPa）；

$U(m)$ —— m 点处桩周长（m）；

$A_p(m)$ —— m 点处桩截面面积（m²）；

$E_p(m)$ —— m 点处桩弹性模量（kPa）；

$L(m)$ ——分割单元 m 的长度（m）。

3 基桩自平衡法静载荷试验测出的桩侧摩阻力 $q_s(i)$ 与单元中点变位量 $s_m(i)$ 的曲线可转换为传统桩顶加载的桩侧摩阻力与位移的曲线，通过荷载传递法进行迭代计算可获得等效桩顶荷载及桩顶位移。对于荷载还没有传到荷载箱处时，直接采用荷载箱上段桩 Q_u - s_u 曲线进行转换。

F.0.3 对于双层荷载箱，宜按本规程第 F.0.1 或 F.0.2 条的方法将每层荷载箱从下往上依次进行转换。

附录 G 常用内力测试设备性能指标

G.0.1 数据采集设备的主要技术指标应符合下列规定：

1 电信号数据采集设备的主要技术指标应符合表 G.0.1-1 规定。

表 G.0.1-1 电信号数据采集分析仪技术指标

项 目	技术指标
每通道采样率 (<i>sps</i>)	1~1000
<i>A/D</i> 位数	不低于 16 位 (有效位数不低于 14 位)
采样方式	采集通道同步, 每通道使用单独 <i>A/D</i>
动态范围 (<i>dB</i>)	≥60
接口	<i>BNC</i> 、 <i>USB</i> 接口、 <i>LAN</i> 接口或其他

2 光信号数据采集设备的主要技术指标应符合表 G.0.1-2 的规定。

表 G.0.1-2 光信号数据采集分析仪技术指标

项 目	技术指标
波长解调带宽	≥40nm
精度	1pm
重复性	±2pm
动态范围 (<i>dB</i>)	≥25
采样方式	采集通道同步
通道接口	<i>FC/APC</i> 或其他

3 光电信号数据同步采集设备的主要技术指标应符合表表 G.0.1-3 的规定。

表 G.0.1-3 光电信号数据同步采集分析仪技术指标

项 目	光信号采集模块技术指标	电信号采集模块技术指标
波长解调带宽	$\geq 40nm$	/
精度	1pm	A/D 位数不低于 16 位
重复性	$\pm 2pm$	/
动态范围 (dB)	≥ 25	≥ 60
信号类型	光信号	IEPE、电压、电流、桥路、数字 I/O
采样方式	采集通道同步	
接口	FC/APC 或其他	BNC、LAN 接口或其他

4 振弦式数据采集设备的主要技术指标应符合表 G.0.1-4 的规定。

表 G.0.1-4 振弦式数据采集分析仪技术指标

项 目	技术指标
频率采集范围	400-6000Hz
频率采集精度	$\pm 0.1Hz$
采样方式	每通道都可采集温度信号
数据传输	有线或无线传输

G.0.2 传感器的主要技术指标应符合下列规定：

1 电阻式应变传感器的主要技术指标应符合表 G.0.2-1 规定。

表 G.0.2-1 电阻式应变传感器的主要技术指标表

工作特性	说明			级别		
				A	B	C
应变计电阻	对平均值的允差	单栅	$\pm\%$	0.3	0.5	0.8
		双栅		0.7	1.0	1.5
		多栅		0.8	1.0	1.5
	对标称值的偏差		$\pm\%$	1.0	1.5	2.0
灵敏系数	对平均值的分散		$\pm\%$	1	2	3
工作温度范围			℃	-30~60		

注：其他指标应符合《金属粘贴式电阻应变计》（GB/T 13992）要求。

2 振弦式应变传感器的主要技术指标应符合表 G.0.2-2 规定。

表 G.0.2-2 振弦式应变传感器的主要技术指标表

项 目	技术指标
灵敏度 ($\mu\epsilon$)	1.0
精度 (%FS)	≤ 0.5
工作温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)	-20~80
材质	不锈钢

3 光纤光栅式应变传感器的主要技术指标应符合表 G.0.2-3 规定。

表 G.0.2-3 光纤光栅式应变传感器的主要技术指标表

项 目	技术指标
分辨率 ($\mu\epsilon$)	$1\mu\epsilon$
精度 (%FS)	≤ 0.2
工作温度范围	-30~120 $^{\circ}\text{C}$
连接方式	熔接或 FC/APC 连接器连接

附录 H 锚杆补偿荷载整体张拉方法

H.0.1 本方法可用于荷载分散型锚杆，为实现在最大试验荷载状态下各组单元锚杆理论荷载相等，而进行的各组单元锚杆的差异荷载补偿张拉，包括补偿荷载计算、补偿荷载张拉步骤和补偿荷载张拉管理。

H.0.2 由 n 组单元锚杆组成的荷载分散型锚杆，补偿荷载整体张拉应从最长(第一组)单元锚杆开始，依次分别对各组单元锚杆进行差异荷载张拉。

H.0.3 第 k 组单元锚杆安装工具锚夹片前，对第 $1\sim(k-1)$ 组单元锚杆施加的第 k 级补偿荷载值 ΔQ_k ，可按下列公式计算：

压力型锚杆：

$$\Delta Q_k = \sum_{i=1}^k \left(\frac{L_{yfi} - L_{yfk}}{L_{yfi}} \right) \bar{Q} \quad (\text{H.0.3-1})$$

$$\bar{Q} = \frac{Q_{max}}{n} \quad (\text{H.0.3-2})$$

拉力型锚杆：

$$\Delta Q_k = \sum_{i=1}^k \left(\frac{L_{yfi} - L_{yfk}}{L_{yfi} + L_{tbi}/2} \right) \bar{Q} \quad (\text{H.0.3-3})$$

式中： ΔQ_k ——第 k 组单元锚杆安装工具锚夹片前，对第 $1\sim(k-1)$ 组单元锚杆施加的第 k 级补偿荷载值(kN)； $k=1, 2, \dots, n$ ，且当 $k=1$ 时，取 $\Delta Q_1=0$ kN；

L_{yfi} ——第 i 组单元锚杆的杆体自由段长度(m)；

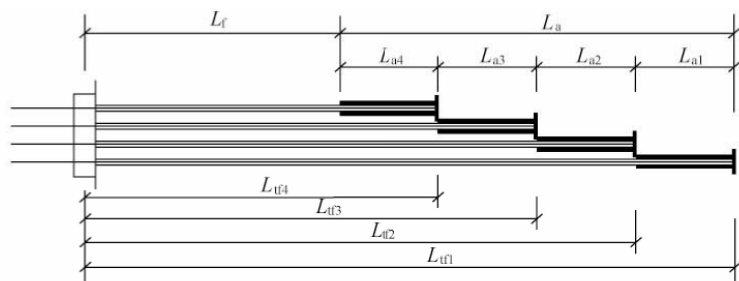
L_{tbi} ——第 i 组单元锚杆的杆体粘结段长度(m)；

\bar{Q} ——最大试验荷载状态下各单元锚杆的理论荷载(kN)；

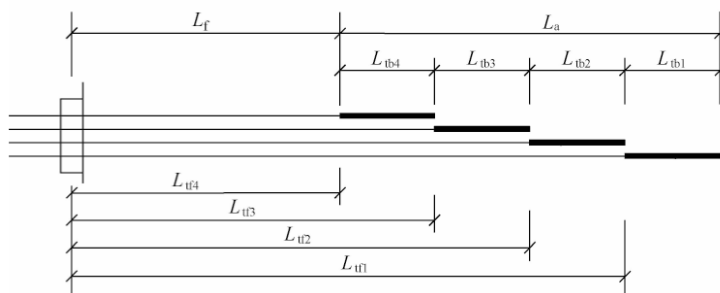
Q_{max} ——最大试验荷载(kN)；

n ——荷载分散型锚杆的单元锚杆组数。

H.0.4 由 n 组单元锚杆组成的荷载分散型锚杆（图 H.0.4-1），补偿荷载张拉实施步骤（图 H.0.4-2）应符合下列规定：



(a) 压力型



(b) 拉力型

图 H.0.4-1 荷载分散型锚杆示意图

L_f —锚杆自由段长度； L_a —锚杆锚固段长度； L_{fi} —拉力型锚杆第 i 单元锚杆杆体自由段长度；

L_{bi} —第 i 单元锚杆杆体粘结段长度； L_{ai} —压力型锚杆第 i 单元锚杆锚固段长度 ($i=1\sim4$)。

1 第 1 级补偿张拉荷载 ($\Delta Q_1=0$)，安装第一组单元锚杆工具锚夹片；

2 第一组单元锚杆张拉至第 2 级补偿张拉荷载 (ΔQ_2)，安装第二组单元锚杆工具锚夹片；

3 第 1~2 组单元锚杆共同张拉至第 3 级补偿张拉荷载 (ΔQ_3)，安装第三组单元锚杆工具夹片；

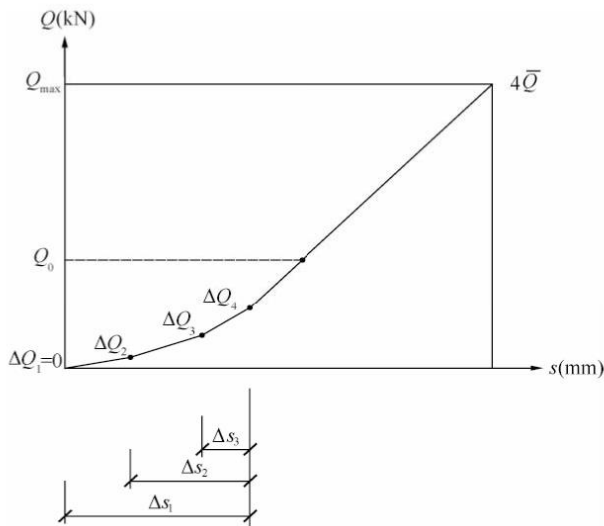


图 H.0.4-2 荷载分散型锚杆补偿荷载张拉实施步骤示意图

Q_{max} —锚杆的最大试验荷载； Q_0 —锚杆的初始荷载；

Q —最大试验荷载状态下各单元锚杆的理论荷载；

ΔQ —第 k ($k=1\sim 4$) 级补偿张拉荷载； Δs_k —第 k ($k=1\sim 3$) 组单元锚杆的差异伸长量。

4 第 1~3 组单元锚杆共同张拉至第 4 级补偿张拉荷载 (ΔQ_4)，安装第四组单元锚杆工具夹片；

5 依次将第 1~($n-1$) 组单元锚杆共同张拉至第 n 级补偿张拉荷载 (ΔQ_n)，安装第 n 组单元锚杆工具夹片。

6 将 1~ n 组单元锚杆整体张拉至初始荷载 (Q_0)。

H.0.5 按本规程第 H.0.3 条和第 H.0.4 条的规定进行补偿荷载张拉，且整体张拉至锚杆初始试验荷载时，其单元锚杆初始荷载可按下列公式计算：

拉力分散型锚杆：

$$\Delta Q_{0i} = \left(\frac{L_{tft} - L_{tfn}}{L_{tft} + L_{tbi}/2} \right) \bar{Q} + \frac{Q_0 - \Delta Q_n}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{L_{tft} + L_{tbi}/2}{L_{tfk} + L_{tbk}/2} \right)} \quad (\text{H.0.5-1})$$

压力分散型锚杆:

$$\Delta Q_{0i} = \left(\frac{L_{tft} - L_{tfn}}{L_{tft}} \right) \bar{Q} + \frac{Q_0 - \Delta Q_n}{\sum_{i=1}^k \frac{L_{tft}}{L_{tfk}}} \quad (\text{H.0.5-2})$$

式中:

Q_{0i} ——第 i ($i=1, 2, \dots, n$) 组单元锚杆的初始荷载(kN)。

H.0.6 荷载分散型锚杆补偿荷载张拉测试数据可按表 K.0.3 的格式进行记录。

附录 J 锚杆抗拔试验曲线

J.0.1 锚杆多循环加卸载法可绘制荷载-位移曲线图(图 J.0.1-1)、荷载—弹性位移与荷载—塑性位移曲线图(图 J.0.1-2)。

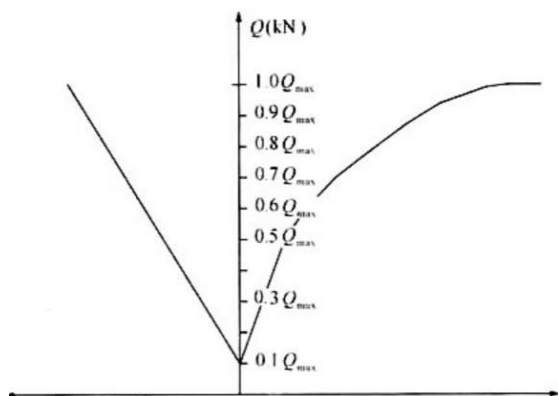
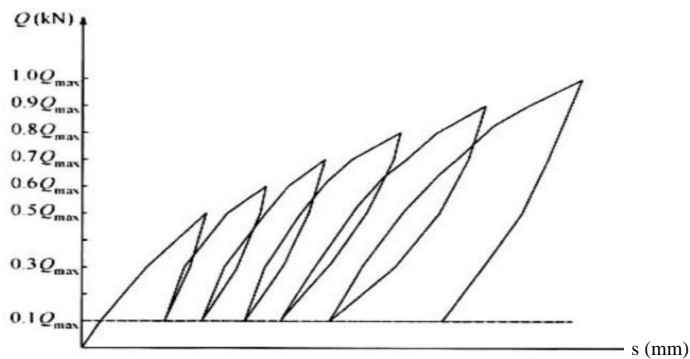


图 J.0.1-1 多循环加卸载法荷载—位移曲线示意图

弹性位移 s_e (mm) 塑性位移 s_p (mm)
图 J.0.1-2 多循环加卸载法的荷载—弹性位移与荷载—塑性位移曲线示意图

J.0.2 单循环加卸载法可绘制荷载-位移曲线图(图 J.0.2-1)，分级维持荷载法可绘制荷载-位移曲线图(图 J.0.2-2)。

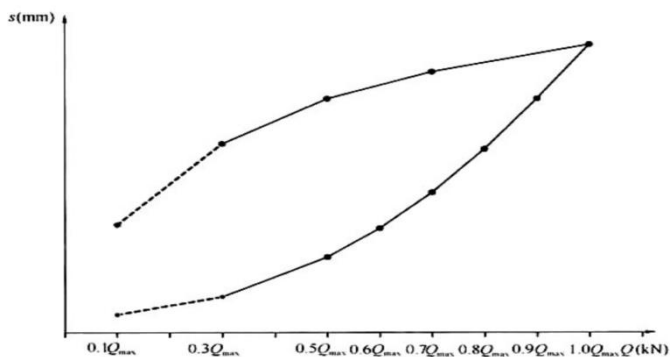


图 J.0.2-1 单循环加卸载法的荷载—位移曲线示意图

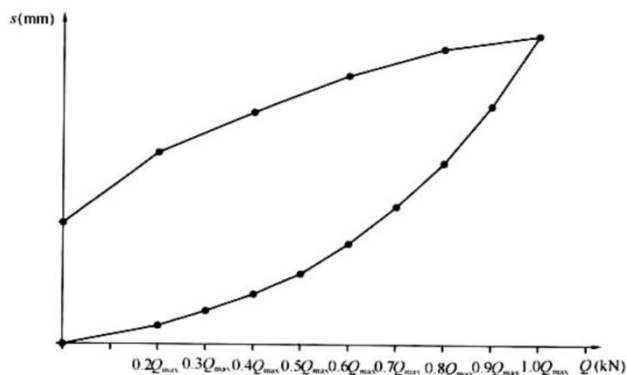
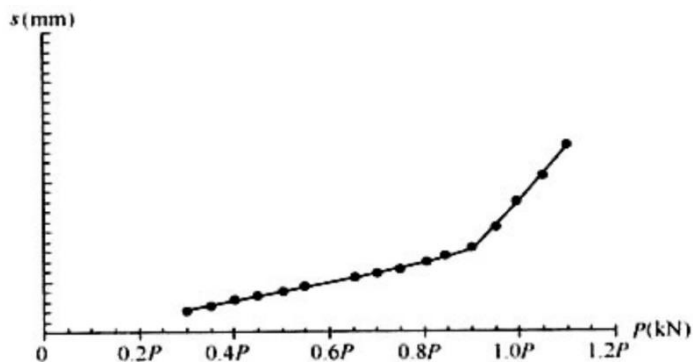
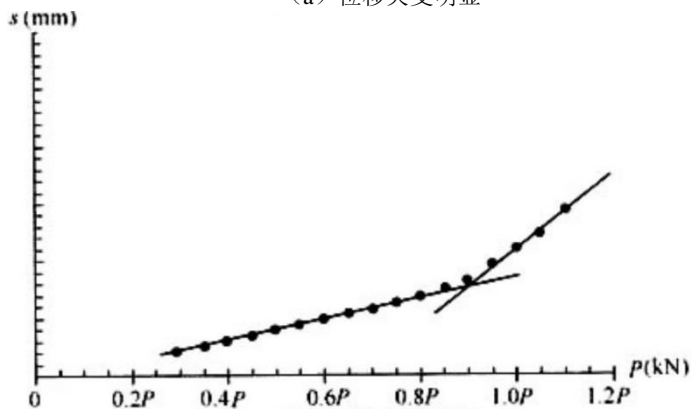


图 J.0.2-2 分级维持荷载法的荷载—位移曲线示意图

J.0.3 持有荷载试验应绘制荷载-位移(P - s)关系曲线(图 J. 0. 3)。



(a) 位移突变明显



(b) 位移突变不明显

图 J.0.3 持有荷载试验荷载-位移(P - s)关系曲线示意图

附录 K 锚杆抗拔试验记录表

K.0.1 锚杆抗拔试验数据可按表 K.0.1 的格式记录。

表 K.0.1 锚杆抗拔试验数据记录表

工程名称：									
序 号：		锚杆编号：		检测日期：		年 月 日			
锚杆类型：				加载反力装置：					
<input type="checkbox"/> 锚杆轴向拉力标准值				<input type="checkbox"/> 锚杆承载力特征值（kN）：					
最大试验荷载（kN）：									
<input type="checkbox"/> 基本试验 <input type="checkbox"/> 验收试验 <input type="checkbox"/> 多循环加卸载法 <input type="checkbox"/> 单循环加卸载法 <input type="checkbox"/> 分级维持荷载法									
千斤顶编号及型号：			压力表编号：			位移表编号：			
级 别	荷载 kN	油压 MPa	测读 时间 min	位移表读数 mm			位移 mm		备注
				表 1	表 2	平均	增量	累计	

记录：

校对：

第 页 共 页

K.0.3 补偿荷载张拉数据可按表 K.0.3 的格式记录。

表 K.0.3 补偿荷载张拉数据记录表

工程名称：					
序 号： 补充荷载张拉日期 年 月 日					
锚杆类型： 单元锚杆组数： 加载反力装置： 最大试验荷载 kN： 初始荷载 kN： 分级补偿张拉荷载 kN： 千斤顶编号及型号： 压力表编号： 钢板尺编号：					
锚杆编号	分级补偿 荷载 kN	油压表 读数 MPa	测读时间 min	分级位移 mm	备注

记录: 校对: 第 页 共 页

附录 L 磁测井法检测现场记录表

桩号		桩类	<input type="checkbox"/> 钻孔灌注桩； <input type="checkbox"/> 后压浆钻孔灌注桩； <input type="checkbox"/> 挤扩支盘灌注桩； <input type="checkbox"/> 预制空心桩			
工程名称				委托单位		
施工单位				钢筋笼规格	ϕ （直径） \times （根数） \times （总长度），单位：m。	
钻孔位置	<input type="checkbox"/> 桩侧 0.5m 以内； <input type="checkbox"/> 桩侧 0.5~1.0m 以内； <input type="checkbox"/> 桩中心；				孔深 m	
仪器设备			型号		出厂编号	
背景磁场值 n T			实测最大磁场值 n T			
测孔深 m	背景场深度段（ m ~ m ）		磁异常拐点所对应的深度（m）	实测钢筋笼长度（m）		备注
钻孔位置示意图						
检测人			记录人		年 月 日	

本规程用词说明

1 为便于执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

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 条文中指明必须按其他有关标准和规范执行时，写法为“应按……执行”或“应符合……的要求（或规定）”。

引用标准名录

- 1 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 2 《工程勘察通用规范》GB 55017
- 3 《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202
- 4 《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003
- 5 《建筑与市政工程施工质量控制通用规范》GB 55032
- 6 《岩土工程勘察规范》GB 50021
- 7 《混凝土结构设计规范》GB 50010
- 8 《指示表》GB/T 1219
- 9 《液压式万能试验机》GB/T 3159
- 10 《试验机通用技术要求》GB/T 2611
- 11 《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081
- 12 《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》GB/T 228.1
- 13 《承压设备无损检测 第5部分:渗透检测》NB/T4730.5
- 14 《无损检测人员资格鉴定与认证》GB/T 9445
- 15 《金属粘贴式电阻应变计》GB/T 13992
- 16 《建筑桩基技术规范》JGJ94
- 17 《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106
- 18 《建筑地基检测技术规范》JGJ 340
- 19 《建筑工程抗浮技术标准》JGJ 476
- 20 《锚杆检测与监测技术规程》JGJ 401
- 21 《钻芯法检测混凝土强度技术规程》JGJ/T 384
- 22 《基桩动测仪》JG/T 518
- 23 《无损检测 渗透检测用材料》JB/T 7523
- 24 《无损检测 渗透检测用试块》JB/T 6064
- 25 《钢结构超声波探伤及质量分级法》JG/T 203
- 26 《城市工程地球物理探测规范》CJJ/T 7
- 27 《天津市岩土工程勘察规范》DB/T 29-247
- 28 《天津市岩土工程技术规范》DB/T 29-20

天津市工程建设标准

天津市建筑基桩检测技术规程

DB/T 29-38-2025

J10198-2025

条文说明

2025 天 津

修 订 说 明

本规程是在《建筑基桩检测技术规程》DB/T 29-38-2015 的基础上修订而成的。本规程修订过程中，修编组进行了广泛而深入的调查研究，总结了我市基桩检测的实际经验，同时参考了国家、行业和外省市先进技术法规、技术标准制订了本规程。

本次修订的主要技术内容是：静载荷试验增加快速卸荷的规定；对高应变法的应用范围进行了相应的规定；明确了钻芯法及声波透射法检测数量及适用条件；对各方法的检测数量进行详细规定，对试验桩工程检测数量、工程桩验收检测数量进行规定，说明了低应变完整性检测的数量及数量统计标准；增加了工程上已广泛应用的自平衡法，并规定了应用范围；增加了桩身内力测试、孔内成像法、锚杆抗拔试验等；增加钻孔灌注桩成孔检测、地下连续墙成槽检测，增加预制混凝土桩破坏性检测、焊缝表面质量检测；原规程附录 B 磁测井法编入正文；增加旁孔透射波法、管波法；编制附录：大直径桩端阻力载荷试验要求，对传统方法进行了部分修订。

为便于广大勘察、设计、施工、检测、科研等单位有关人员在使用本规程时能够正确理解和执行条文规定，《天津市建筑基桩检测技术规程》修编组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据及执行中需注意的有关事项进行了说明和解释。

目 次

1	总 则	176
2	术语和符号	177
2.1	术语	177
3	基本规定	178
3.1	一般规定	178
3.2	检测方法	178
3.3	检测数量	179
3.4	检测桩位的确定	180
3.5	检测前的准备	181
3.6	确认检测与扩大检测	181
3.7	检测结果评价	182
3.8	检测报告	182
4	静载荷试验	183
4.1	一般规定	183
4.2	单桩竖向抗压静载荷试验	184
4.3	单桩竖向抗拔静载荷试验	189
4.4	单桩水平静载荷试验	190
5	高应变法	194
5.1	一般规定	194
5.2	检测仪器设备	195
5.3	现场检测	197
5.4	检测数据的处理和分析	197
6	低应变法	204
6.1	一般规定	204
6.2	检测仪器设备	206
6.3	现场检测	206
6.4	检测数据的处理和分析	208
7	声波透射法	212
7.1	一般规定	212
7.2	检测仪器设备	212
7.3	现场检测	214
7.4	检测数据的处理和分析	216

8	钻芯法	222
8.1	一般规定	222
8.2	芯样钻取与加工设备	222
8.3	芯样抗压强度试验设备	223
8.4	现场钻芯	223
8.5	芯样试件截取与加工	225
8.6	芯样试件抗压强度试验	226
8.7	检测数据的处理和分析	227
9	钻孔灌注桩成孔、地下连续墙成槽检测	229
9.1	一般规定	229
9.2	检测仪器设备	229
9.3	现场检测	231
9.4	检测数据的处理和分析	234
10	自平衡法	236
10.1	一般规定	236
10.2	检测仪器设备	237
10.3	现场检测	237
10.4	检测数据的处理和分析	241
11	桩身内力测试	244
11.1	一般规定	244
11.2	检测仪器设备	244
11.3	现场检测	245
12	锚杆抗拔试验	246
12.1	一般规定	246
12.2	检测仪器设备	247
12.3	现场检测	248
12.4	检测数据的处理与分析	251
13	预制混凝土桩破坏性检测	252
13.3	现场检测及数据处理	252
13.4	检测结果的评价	252
14	焊缝质量检测	253
14.1	一般规定	253
15	孔内成像法	254
15.1	一般规定	254
15.2	检测仪器设备	254

15.3	现场检测	255
15.4	检测数据的处理与分析	255
16	磁测井法	256
16.1	一般规定	256
16.2	检测仪器设备	256
16.3	现场检测	256
16.4	检测数据的处理和分析	257
17	旁孔法	258
17.1	一般规定	258
17.3	现场检测	259
18	管波法	260
18.1	一般规定	260
18.2	检测仪器设备	260
18.3	现场检测	260
18.4	检测数据的处理和分析	260

1 总 则

1.0.1 由于天津市地处九河下游，濒临渤海湾，特定的岩土工程地质环境决定了在建设中大量使用各种类型的桩基础，为了保证桩基础的质量，规范检测行为，需要有一个针对天津地区特点的统一的技术标准，因此，制定本规程。

1.0.2 在天津市域内，房屋建筑工程的各类基桩（包括新型桩、非等直径异型桩）都应按本规程进行检测。市政基础设施工程、支护结构质量检测参照执行。

1.0.3 本条是确定基桩检测方法和检测数量时需要考虑的基本因素。如果进行基桩检测时不考虑这些因素的作用和影响，不是造成安全隐患就是形成不必要的浪费。由于各种检测方法在可靠性或经济性方面存在不同程度的局限性，多种方法配合使用时又有一定的灵活性，所以，应根据不同的检测目的（为设计或是为施工验收提供依据）、检测方法的适用范围，综合考虑各种相关因素合理选择检测方法和确定检测数量，使各种检测方法相互之间互为补充或佐证。

1.0.4 天津市的岩土工程地质环境，尤其是滨海新区等地地层和土质性状，十分特殊，考虑到天津市城乡建设的百年大计，为保证基础建设的质量，在天津市辖范围内进行基桩检测，强调首先应按照本规程的规定严格实施，除此而外尚应符合现行强制性标准中的规定。对于属于推荐性标准中的要求和规定，在服从上述强制性标准的前提下可以根据实际情况考虑。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.9 桩身完整性是一个综合定性指标，并非严格的定量指标。其类别是按缺陷对桩身结构承载力的影响程度划分的。需要说明：

1 连续性包含了桩长不够的情况。在本规程所列入的检测方法中，动测方法只能估算桩长，而钻芯法可以准确测定桩长。

2 桩身截面尺寸相对变化意味着在实际判定时需要有一个相对衡量尺度。在检测中，对桩径是否减小的判断可能会参照下列条件之一：

1) 按设计桩径；

2) 根据设计桩径,并对不同成桩工艺的桩按施工验收规范考虑桩径的允许负误差；

3) 考虑充盈系数后的平均施工桩径。

在判断灌注桩是否缩径时必须有一个参考基准。以往在动测法检测并采用开挖验证时，说明动测结论与开挖结果是否符合通常是按第一个条件。但是，严格地讲，应按施工验收规范（即第二个条件）才是合理的。

2.1.10 桩身缺陷有三个指标：位置、类型（性质）和程度。不管缺陷的类型如何，动测法检测时分析的仅仅是阻抗变化。阻抗变小可能是任何一种或多种缺陷类型及其程度大小的表现。因此，仅根据阻抗变小不能判断缺陷的具体类型，如有必要，应结合地质资料、桩型、成桩工艺和施工记录等进行综合判断。阻抗变大所对应的扩径，应在分析判定时说明，由于扩径对桩的承载力有利，所以不作为缺陷考虑。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 基桩的承载力和桩身完整性（或桩身质量）是现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202 桩基验收中的主控项目，也是现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 和现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 以强制性条文形式规定的必检项目。

3.1.2 在投入检测前应经国家或省市级质量监督检验检疫部门指定认可的计量机构检定或校准合格；二是按规定的检定或校准周期进行检定或校准。

3.1.3 有效应对措施，由委托方负责实施。

3.2 检测方法

3.2.1 本条强调检测方法合理选择搭配，目的是提高检测结果的可靠性和检测过程的可操作性。表 3.2.1 所列方法是基桩检测中最常用的检测方法。对于钻孔灌注桩以及预制混凝土桩等桩型，可采用其中多种甚至全部方法进行检测；但对异型桩、组合型桩，表 3.2.1 中的部分方法就不能完全适用（如高、低应变动测法）。因此在具体选择检测方法时，应根据检测目的、内容和要求，结合各检测方法的适用范围和检测能力，考虑设计、地基条件、施工因素和工程重要性等情况确定，不允许超适用范围滥用。同时也要兼顾实施中的经济合理性，即在满足正确评价的前提下，做到快速经济。

3.2.3 本规程所述设计等级应根据《建筑桩基技术规范》JGJ 94 中的有关规定确定。单位工程一般指桩基分项工程同条件下一次性验收单元的工程。

3.2.5 基桩检测严格来讲都是成桩之后进行检测，系事后检验，有时发现问题后的补救处理非常麻烦，费时费力，影响工期，还要投入相当大的资金。因此，对大直径钻孔灌注桩成孔后的成孔质量进行检测，及时了解孔形、孔径、孔壁垂直度和孔底沉渣等情况，以便对存在问题的桩孔在浇灌混凝土之前采取补救处理措施，这要比成桩后发现问题再进行处理简便易行，有事半功倍之效，为事先预防性检验，并体现过程控制的思想，应当大力提倡。

3.2.6 进行打桩监控可以减少桩的破损率、选择合理的入土深度，进而提高沉桩效率。

3.3 检测数量

3.3.1~3.3.2 同一类型是指基桩规格、桩型相同，桩端进入持力层相同的基桩。由于基桩检测是抽样检测而且要对拟建场地内的桩基情况进行评价，所以严格规定如何确定检测数量是必要的，只有在满足抽样原则、抽样比例和检测数量的前提下，才能够对桩基做出正确的评价，同一规格，桩端进入同一持力层的基桩可按同一类型进行评价。

3.3.3 单桩静载荷试验包含单桩竖向抗压静载荷试验、单桩竖向抗拔静载荷试验、单桩水平静载荷试验、自平衡静载荷试验，依据设计要求的基桩受力状态选择相应的静载荷试验方法。静载荷试验的检测数量没有考虑拟建场地内基桩数目较少的情况（例如 50 根以内），这是因为，1、静载荷试验检测的数量本来就很少，不宜再减少；2、采用最少 3 根的奇数，在出现异常情况时可以有一个多数与少数的基本判断，而不至于出现两根试桩时的各 50% 的尴尬局面。自平衡静载荷试验的检测数量应满足设计要求，不应少于同一单位工程相同条件下同一类型基桩总桩数的 1%，且不应少于 3 根。

3.3.5 检测比例定为 5% 的原因是，天津市岩土地质条件复杂，局部变化很大，需要适当增加数量和比例，以能有效控制及合理评

价。当发现桩基工程存在质量问题，需要对桩基施工质量做出总体评价时，检测比例和数量宜适当增加。

3.3.6 桩身完整性检测主要采用低应变反射波法。大直径灌注桩是指桩径不小于 800mm 的桩。非等直径异型桩的出现适应了桩基市场的需求，但由于施工技术和施工管理的相对滞后，其施工质量存在不稳定性，在推广应用逐渐成熟的过程中，宜按成桩质量可靠性较低考虑检测数量。

采用钻芯法检验灌注桩的桩身完整性，应结合设计要求、施工记录和其他检测方法的检测结果，经过综合分析，对质量确有怀疑或质量较差的、有代表性的桩进行检测。

3.3.8 地下连续墙每单幅墙体，具有桩的承载性能，符合壁板桩的特征，对于壁板桩、矩形桩及异形桩可参照本条执行。

3.4 检测桩位的确定

3.4.1 本条的制定是基于，在检测数量、比例确定后按照一定原则事先确定桩位再进行检测，其检测结果及其分析具有代表性和真实性，可信度高。

3.4.2 基桩检测系抽样检测，所以应当有一定的原则。如果设计或监理方有另外的抽样原则，应按设计或监理方的书面要求进行，并在检测报告中予以说明。另外，本条所述的抽样原则是有先后顺序的，应依次考虑，不应颠倒。

对于本条第一款情况的检测应为 100%，且不应包括在正常的检测数量比例之内。换句话说，就是每个检测工程的检测数量应为对施工质量有问题或有疑问的桩进行 100% 的检测，再加上 3.3 节中所规定的检测数量比例。

3.5 检测前的准备

3.5.1 所搜集的各种资料应为委托方提供或检测机构直接搜集的各勘测设计单位的有效（有公章、有责任人签字）报告图件，设计单位的检测要求应为书面有效文本或在有效图件上文字注明。基础资料不齐全、试验检测所需数据不是书面有效文本或图件、检测场地不具备进场条件，不应组织进测。

3.5.2 检测实施方案是检测机构对建设方在技术质量、仪器设备、人员组织、检测周期以及其他多方面的承诺，应当认真编写并遵照实施。如需变更应及时与建设方协商，取得其谅解和同意。

检测实施方案宜包括下列内容：工程概况、建设方的委托要求、所选用的检测方法及依据的检验标准、抽样原则、拟投入的仪器设备、检测时间进度安排、准备提交的成果资料以及其他应当说明的事项等。

3.5.3 如果工作状态不正常，其检测结果肯定失真，因此检测机构应当建立并保存每项基桩检测工程前的仪器仪表工作状态情况记录。

3.5.4 本条第三款所指的休止时间，首先应满足桩身强度的要求，其次应根据桩侧主要土质情况确定，适当考虑桩端土质情况。当桩身强度满足设计要求，可根据工程地质条件及地区经验适当缩短休止时间。

3.6 确认检测与扩大检测

3.6.1~3.6.4 这四条内容系针对检测中出现缺乏依据或难以定论的情况，规定了可行的确认检测原则。确认检测的目的是，采用更为适宜的检测方法对原检测方法发现而又不能认定的问题进行进一步的检测，用以解决下列问题：1、桩身完整性分类的定论；2、某个被检桩可否正常使用。需要指出的是，尽管在基桩质量检测中承载力和完整性这两项内容缺一不可，但实际上桩身完整性不符合要求和单桩承载力不满足设计要求是相互独立的两个概念。

有可能完整性为Ⅰ、Ⅱ类而承载力达不到设计要求；有可能竖向抗压承载力满足设计要求而完整性为Ⅲ类或Ⅳ类；另外，如桩身出现水平裂缝或断裂，其完整性为Ⅲ类或Ⅳ类，可能竖向抗压承载力尚满足设计要求，但是水平承载力肯定不能满足要求。因此，通过确认检测进一步查明桩基在结构安全和耐久性是否存在隐患，是十分必要的。

3.6.5～3.6.6 扩大检测数量宜根据地质条件、设计等级、桩型、施工质量等因素合理确定，并应经有关各方确认。

3.7 检测结果评价

3.7.1 桩身完整性分为四类，与现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 保持一致，同时也符合天津市的基桩检测实际情况。基桩完整性检测中，由于使用的检测方法不同，有可能出现对同一根桩，不同检测方法得到桩身完整性的类别不一致，此时，首先应尽可能多选用几种检测方法进一步检测判断，在得不到一致判定的情况下，应取较保守的判定结果。

3.8 检测报告

3.8.1 应根据不同检测方法，例如静载荷（竖向抗压、竖向抗拔、水平）试验、高应变法、低应变法、声波透射法、钻芯法、磁测井法、旁孔法、管波法等检测的特性、检测目的和检测作业条件，详细叙述确定主体（哪个机构或单位）、确定原则（随机或是均匀分布抑或根据结构特点等）、确定时间（是施工前确定、施工后确定或是基坑开挖后确定）。

4 静载荷试验

4.1 一般规定

4.1.1 基桩按承受荷载的性质可分为抗压桩、抗拔桩和水平荷载桩,静载荷试验是检测基桩竖向抗压承载力、竖向抗拔承载力和水平承载力最直观、最可靠的传统方法。本章涉及的静载荷试验是指在桩的顶部施加竖向或水平荷载,并观测桩在受荷状态下的变形情况。

确定单桩竖向承载力的方法除了静载荷试验外,还有高应变动力测试法、静力触探试验、标准贯入试验、经验参数法等,而静载荷试验得到的单桩承载力与上述其他几种方法的结果比较,具有数据可靠、精度高、外界干扰小等特点。

4.1.2 桩承载力检测按要求不同,可区分为在桩基工程施工前为设计提供依据的试验检测和施工后的验收检测两种方式。在设计阶段因布桩需要,为确定单桩承载力而做的静载荷工作才是传统意义上的载荷试验;在工程桩施工完毕后为检验施工质量和承载力是否达到设计要求而做的静载荷工作,严格说来是静载荷检测。但是,为了延续和简化起见,仍然统称静载荷试验。

4.1.3 静载荷试验的承载力不能满足设计要求,单从载荷试验曲线上有时很难准确判断其原因,在载荷试验前后检测桩身的完整性并观察载荷试验前后的桩身完整性变化情况,有助于正确分析判断由于桩身结构问题造成承载力不满足设计要求的现象。另外,亦可事先发现锚桩桩身质量问题,避免贸然试验检测。

静载试桩本身要有代表性,试验前对静载荷试验试桩进行成孔检测,可有效避免由于成孔质量而影响试验结果的现象,并可对异常试验结果进行分析。

4.1.4 通过在桩身埋设测试元件,并与桩的静载荷试验同步进行的桩身内力测试,是充分了解桩周土层侧阻力和桩底端阻力发挥特征的主要手段。对于优化桩基设计,积累土层侧阻力和端阻力与土性指标关系的资料具有十分重要的意义。

4.1.5 如果在工程场地普遍存在由于设计、施工工艺、地质条件等原因形成的桩身明显扩径，该类型桩应作为该场地试验桩代表。

预制混凝土桩接桩质量不好会影响下节桩身抗拔力的发挥。

4.1.7 如果抗压或抗拔试验对桩身造成了破坏，利用该桩再进行抗拔或水平静载荷试验时应进行评估，根据评估结果确定是否可以利用。

4.2 单桩竖向抗压静载荷试验

4.2.1 考虑到如果试桩的桩型尺寸、成桩工艺和质量控制标准都高于工程桩，试桩的试验结果亦可能偏高，会影响设计人员布桩时的取值，有可能造成桩基的安全储备不够，因此，在这里予以强调。

为便于沉降测量仪表安装，试桩顶部宜高出试坑地面；为使试桩受力条件与设计条件相同，试坑底面宜与桩承台底标高一致。在桩基施工前的场外试桩，试验时的地表往往与设计桩承台底标高不一致，此时应根据地质情况核算设计桩承台底标高至试桩桩顶的桩身侧阻力，在试验时应进行增减；桩身埋设传感器时，也可以实测此段桩身的侧阻力。

4.2.2 大吨位静载荷试验时，往往采用多个千斤顶并联加载，由于现阶段不大可能在每个千斤顶各放一个测力传感器分别进行力的测量，一般均是在某一千斤顶上放置测力传感器，然后在观测仪器的系数输入上进行调整。当千斤顶的合力未能通过被检桩横截面的形心或合力方向不垂直时，或者各千斤顶实际受力不等，观测仪器所显示的数值并非实际桩顶受力；或者容易使桩顶、桩头部分损坏。因此，多个千斤顶的合力是否通过被检桩横截面的形心应严格计算和测量，并应保存实际测量的记录备查。

千斤顶型号规格不一致，会造成相同油压下不同千斤顶出力不同，受检桩会偏心受荷。

4.2.3 无论采用哪种加载装置，都应当保证整个装置的横平竖直，使竖向荷载全部作用于与水平面垂直的桩轴线方向上。根据天津

市的实际情况，对于较大承载力的基桩（极限承载力大于 2000 吨）宜采用锚桩横梁反力装置。

采用工程桩做锚桩时，应监测其上拔量，可以有效监控整个加载装置在试验过程中的变化情况，一是可以防止出现锚桩上拔超量，无法在工程中使用；二是根据上拔量可以判断试验装置是否出现倾斜现象，及早采取预防或补救措施。另外，即便是单独进行试桩，其锚桩的上拔量亦应监测。此外，当锚桩还受水平力时，尚应在试验中监测锚桩水平位移。锚桩的弹性拉伸变形量计算符合胡克定律 $\Delta L_{max} = \psi_c \frac{f_t L}{E}$ （ ΔL_{max} 锚桩的最大弹性拉伸变形量； f_t 锚桩的轴心抗拉强度设计值； L 锚桩的计算桩长； E 锚桩的弹性模量； ψ_c 锚桩的成桩工艺系数，取值参见《建筑桩基技术规范》JGJ94）。

加载反力装置的构件应进行验算，需满足承载力和变形的要求；锚桩抗拔力由锚桩桩周岩土的性质和桩身材料强度决定，抗拔力验算时应分别计算桩周岩土的抗拔承载力及桩身材料的抗拉承载力，结果取两者的小值。当工程桩作锚桩且设计对桩身有特殊要求时，应征得有关方同意。

对于利用静力压桩机进行抗压静载荷试验的情况，由于压桩机支腿尺寸的限制，试验场地狭小，如果压桩机支腿（视为压重平台支墩）、试桩、基准桩三者之间的距离不满足本规范表 4.2.4 的规定，则不得使用压桩机作为反力装置进行静载荷试验。

4.2.4 在试桩加卸载过程中，荷载将通过锚桩（地锚）、压重平台支墩传至试桩、基准桩周围地基土并使之变形。随着试桩、基准桩和锚桩（或压重平台支墩）三者间相互距离缩小，地基土变形对试桩、基准桩的附加应力和变位影响加剧。

对软土地基压重平台堆载重量较大或大直径桩静载荷试验，当基准梁长度达到 12m，但基准桩和试桩、锚桩、压重平台支墩之间的距离仍不能满足表 4.2.4 的规定时，此时宜采用静力水准法等方法进行桩顶位移量测；不具备静力水准法等方法条件时基准梁长度可取 12m，应同时对基准桩竖向位移进行监测。

4.2.5 这里规定的是量测仪表的最低技术要求，在试验检测工作中不得擅自降低标准。本条第 1 款对于位移计的规定源于现行国家标准《指示表》GB/T 1219 中的规定。

4.2.6 静载荷试验是目前基桩检测中一项基准性的工作，更应当强调所得数据的准确与精确。

试验装置以及出力系统（千斤顶）的安放是否符合试验要求是关系到观测记录数据是否准确的一个重要原因，应当在试验过程中注意避免在竖向加载过程中产生较大的水平分力。只测定油路压力，并不能完全代表桩顶的实际受力状况，因此应优先选用直接置放于千斤顶上的测力传感器。

本条第 2 款所规定的对不能直接读取数值的电子式位移计、测力或测压传感器应用机械式百分表、油压表同步校核，是考虑到静载荷试验用时较长、场地情况复杂因受外界影响，采用不易受干扰的机械式百分表、油压表进行校核是为了保障检测数据的准确性、连续性。

本条第 3 款将直径或边宽 500mm 的试桩的位移量测仪表数量由 4 个改为 2 个，实践中直径或边宽 500mm 试桩试验加载时不均匀沉降现象较少，同时也是和行标 JGJ 106 的规定保持一致。

本条第 4 款的规定，目的是直接得到桩顶在荷载作用下的实际沉降数值，避免由于种种原因或理由而未将测定平面安置在桩顶平面以下，从而带来非检测需要的附加沉降。

各款规定的目的都是为了保证试验检测数据真实、准确、可靠，使各种人为或外界的影响降到最低限度。

4.2.7 竖向静载荷试验的加荷方法有很多种，都可以在科学试验或实验室模型试验中研究使用，检验理论假设，摸索规律。快速法试验得到的极限承载力一般略高于慢速法，其中黏性土中桩的承载力提高要比砂土中的桩明显。在本市按本规程进行的竖向静荷载试验只能采用慢速维持荷载法，不得采用其他加荷方法。

为了更准确地确定桩的极限承载力，可以根据现场试验曲线的变化趋势和桩顶沉降的情况以及设计人员的要求，在最后 1~2 级按半级加荷。

4.2.8 为设计提供依据的试验桩，为了得到试桩的实际极限承载力，其预估最大试验荷载不宜低于预估极限承载力 1.5 倍并同时考虑桩身材料强度要求，对于试验桩来说，分级按照单桩预估极限承载力为 10 级，试验加载可能会超过 10 级。

我市大部分地区为软土地质，为保证工程建设安全试桩加载只能采用慢速维持荷载法；另外为了缩短试验周期、降低试桩安全风险，工程桩验收静载荷试验的卸载可以采用第 6 款的快速卸载法。

4.2.9 终止试验条件中容易忽略的是第 3 款，往往沉降刚一超过 40mm 就停止试验，这样做是不符合要求的，必须区别不同的检测目的严格按照本规程的规定继续试验。

当桩身存在水平整合型缝隙、桩端有沉渣或吊脚、预制混凝土桩出现上浮、桩端持力层出现软化现象时，可能会出现本级荷载沉降超过上一级荷载对应沉降 5 倍的陡降，当缝隙闭合或桩端与硬持力层接触后，随着持载时间或荷载增加，变形梯度往往逐渐变缓；当桩身强度不足桩被压断时，也会出现陡降，但与前者相反，随着沉降增加，荷载不能维持甚至大幅降低。所以，出现陡降后不宜立即卸荷，而应使桩下沉量超过 40mm，以大致判断造成陡降的原因。

非嵌岩的长（超长）桩和大直径（扩底）桩的 $Q-s$ 曲线一般呈缓变型，在桩顶沉降达到 40mm 时，桩端阻力一般不能充分发挥。前者由于长细比大、桩身弹性压缩量大，桩顶沉降较大时，桩端位移还很小；后者虽桩端位移较大，但尚不足以使端阻力充分发挥。因此，放宽桩顶总沉降量控制标准是合理的。

4.2.11 除 $Q-s$ 、 $s-lgt$ 曲线外，还可绘制 $s-lgQ$ 曲线及其他分析曲线，如为了直观反映整个试验过程情况，可给出连续的荷载-时间（ $Q-t$ ）曲线和沉降-时间（ $s-t$ ）曲线，并为方便比较绘制于一图中。同一工程的一批试桩曲线应按相同的沉降纵坐标比例绘制，满刻度沉降值不宜小于 40mm，当桩顶累计沉降量大于 40mm 时，可按总沉降量以 10mm 的整模数倍增加满刻度值，使结果直观、便于比较。

4.2.12 太沙基和 ISSME 指出：当沉降量达到桩径的 10% 时，才可能出现极限荷载；黏性土中端阻充分发挥所需的桩端位移为桩径的 4%~5%，而砂土中可能高到 15%。故本条第 2 款对缓变型 $Q-s$ 曲线，按 $s=0.05D$ 确定直径大于等于 800mm 桩的极限承载力大体上是保守的；且因 $D \geq 800\text{mm}$ 时定义为大直径桩，当 $D=800\text{mm}$ 时， $0.05D=40\text{mm}$ ，正好与中、小直径桩的取值标准衔接。应该注意，世界各国按桩顶总沉降确定极限承载力的规定差别较大，这和各国安全系数的取值大小、特别是上部结构对桩基沉降的要求有关。因此当按本规范建议的桩顶沉降量确定极限承载力时，尚应考虑上部结构对桩基沉降的具体要求。

关于桩身弹性压缩量：当进行桩身应变或位移测试时是已知的；缺乏测试数据时，可假设桩身轴力沿桩长倒梯形分布进行估算，或忽略端承力按倒三角形保守估算，计算公式为($s=QL/2EA$)。

4.2.13 本条只适用于为设计提供依据时的竖向抗压极限承载力试验结果的统计，统计取值方法按《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的规定执行。前期静载荷试验的桩数一般很少，而影响单桩承载力的因素复杂多变。为数有限的试验桩中常出现个别桩承载力过低或过高，若恰好不是偶然原因造成，简单算术平均容易造成浪费或不安全。因此规定极差超过平均值的 30% 时，首先应分析、查明原因，结合工程实际综合确定。当低值承载力的出现并非偶然原因造成时，例如施工方法本身质量可靠性较低，但能够在之后的工程桩施工中以加以控制和改进，出于安全考虑，可依次去掉高值后取平均，直至满足极差不超过 30% 的条件，此时可取平均值为极限承载力。

4.2.14 《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定的单桩竖向抗压承载力特征值是按单桩竖向抗压极限承载力除以安全系数 2 得到的，综合反映了桩侧、桩端极限阻力控制承载力特征值的低限要求。

4.3 单桩竖向抗拔静载荷试验

4.3.1 对有接头的预制混凝土桩应进行接头抗拉强度验算。对电焊接头的预制混凝土桩除验算其主筋强度外，还要考虑主筋墩头的折减系数以及管节端板偏心受拉时的强度及稳定性。墩头折减系数可按有关规范取 0.92，而端板强度的验算则比较复杂，可按经验取一个较为安全的系数。

对于预制混凝土桩抗拔试验，存在预应力钢棒连接的问题，可通过在桩管中放置一定长度的钢筋笼并浇筑混凝土来解决。

4.3.2 因拔桩试验时千斤顶安放在反力架上面，当采用二台以上千斤顶加载时，应采取一定的安全措施，防止千斤顶倾倒或其他意外事故发生。

4.3.3 加载反力装置应首先考虑利用工程桩作反力，一般能满足上拔荷载要求。为保证反力梁的稳定性，应注意反力桩顶面直径（或边长）不小于反力架的梁宽。当无法利用工程桩而采用天然地基作反力时，两边支座处的地基土强度应相近，且两边支座与地面的接触面积宜相同，避免加载过程中两边沉降不均造成受检桩偏心受拉，可采用简单地基处理或调整支座两边受力面积来满足要求。

4.3.6 （1）桩顶上拔量测量平面应在桩身位置，严禁在混凝土桩的受拉钢筋上设置位移观测点，避免因钢筋变形导致上拔量观测数据失实；（2）为防止混凝土桩保护层开裂对上拔量测试的影响，上拔量观测点应避开混凝土明显破裂区域设置。（3）考虑到大直径灌注桩受拉钢筋变形对桩中心混凝土影响较小，可在远离受拉钢筋位置桩顶面混凝土设置上拔量观测点。

4.3.9 本条规定出现所列四种情况之一时，可终止加载。但若在较小荷载下出现某级荷载的桩顶上拔量大于前一级荷载下的 5 倍时，应综合分析原因，有条件加载时可继续加载，因混凝土桩当桩身出现多条环向裂缝后，桩顶位移可能会出现小的突变，而此时并非达到桩侧土的极限抗拔力。

对工程桩的验收检测，当设计对桩顶最大上拔量或裂缝控制

有明确的荷载要求时，应按设计要求执行。

4.3.12 本条前两款确定的抗拔极限承载力是土的极限抗拔阻力与桩（包括桩向上运动所带动的土体）的自重标准值两部分之和。第 3 款所指的“断裂”是因钢筋强度不够情况下的断裂，属于桩自身材料破坏。如果因抗拔钢筋受力不均匀，部分钢筋因受力太大而断裂，应视该桩试验无效并进行补充试验。不能将钢筋断裂前一级荷载作为极限荷载。

工程桩验收检测时，混凝土桩抗拔承载力可能受抗裂或钢筋强度制约，而土的抗拔阻力尚未充分发挥，只能取最大试验荷载或上拔量控制值所对应的荷载作为极限荷载，不能轻易外推。当然，在上拔量或抗裂要求不明确时，试验控制的最大加载值就是钢筋强度的设计值。

4.4 单桩水平静载荷试验

4.4.3 球形铰支座的作用是在试验过程中，保持作用力的方向始终水平和通过桩轴线，不随桩的倾斜或扭转而改变。若水平力作用点位置高于基桩承台底标高，试验时在相对承台底面处产生附加弯矩，影响测试结果，也不利于将试验成果根据实际桩顶的约束予以修正。

对于场外试桩，如果做不到施加水平作用力的作用线与实际工程承台底面标高一致，建议在桩身埋设传感器、测斜管，实测工程承台底面标高位置的桩身变形，推算相应位置的水平承载力。

4.4.4 顶推法施加荷载，试桩运动方向与反力装置相反，受反力装置影响较小；牵引法则相反，因此对顶推法和牵引法规定了不同的反力结构与被检桩之间的净距。

4.4.6 当采用位移计测试桩的转角时，应在水平力作用平面以上 50cm 的受检桩两侧对称再安装两个位移测试仪表。

为保证各测试断面的应力最大值及相应弯矩的测量精度，试桩设置时应严格控制测点的纵剖面与力作用方向之间的偏差。对承受水平荷载的桩而言，桩的破坏是由于桩身弯矩引起的结构破

坏。因此对中长桩而言，浅层土的性质起了重要作用，在这段范围内的弯矩变化也最大。为找出最大弯矩及其位置，应加密测试断面。

4.4.7 单向多循环加卸载法主要是模拟实际结构的受力形式。当需要考虑长期水平荷载作用影响时，宜采用慢速维持荷载法。由于单向多循环荷载的施加会给内力测试带来不稳定因素，为保证桩身应力或应变测试质量，应采用慢速维持荷载法。

4.4.9 对抗弯性能较差的长桩或中长桩而言，承受水平荷载桩的破坏特征是弯曲破坏，即桩身发生折断，此时试验自然终止。在工程桩水平承载力验收检测中，终止加荷条件可按设计要求或标准规范规定的水平位移允许值控制。考虑软土的侧向约束能力较差以及大直径桩的抗弯刚度大等特点，终止加载的变形限可取上限值。

4.4.12 本条中的地基土水平抗力系数随深度增长的比例系数 m 值的计算公式仅适用于水平力作用点至试坑地面的桩自由长度为零时的情况。按桩、土相对刚度不同，水平荷载作用下的桩-土体系有两种工作状态和破坏机理，一种是“刚性短桩”，因转动或平移而破坏，相当于 $\alpha h < 2.5$ 时的情况；另一种是工程中常见的“弹性长桩”，桩身产生挠曲变形，桩下段嵌固于土中不能转动，即本条中 $\alpha h \geq 4.0$ 的情况。在 $2.5 \leq \alpha h < 4.0$ 范围内，称为“有限长度的中长桩”。《建筑桩基技术规范》JGJ94 对中长桩的 ν_y 变化给出了具体数值（见表 6-1）。因此，在按式（4.4.12-1）计算 m 值时，应先试算 αh 值，以确定 αh 是否大于或等于 4.0。试算时开始时先假定 $\alpha h \geq 4.0$ ， ν_y 按表 4.4.12 取值为 2.441，按式（4.4.12-1）计算出 m 值，再按（4.4.12-2）计算 α 值，根据桩的入土深度 h 得到的 αh 值若在 2.5~4.0 范围以内，应调整 ν_y 值重新计算 m 值（有些行业标准不考虑）；当 $\alpha h < 2.5$ 时，式（4.4.12-1）不适用。

表 4.4.12 桩顶水平位移系数 ν_y

桩的换算埋深 ah	4.0	3.5	3.0	2.8	2.6	2.4
桩顶自由或铰接时的 ν_y 值	2.441	2.502	2.727	2.905	3.163	3.526
注：当 $ah > 4.0$ 时取 $ah = 4.0$ 。						

试验得到的地基土水平抗力系数的比例系数 m 不是一个常量，而是随地面水平位移及荷载而变化的曲线。

4.4.14 对于混凝土长桩或中长桩，随着水平荷载的增加，桩侧土体的塑性区自上而下逐渐展开扩大，最大弯矩断面下移，最后形成桩身结构的破坏。所测水平临界荷载为桩身产生开裂前所对应的水平荷载。由于只有混凝土桩才会产生开裂，所以只有混凝土桩才有临界荷载。

4.4.15 单桩水平极限承载力对应于两种情况：一是试验桩曲线出现明显陡降或拐点的情况，其相当于桩侧浅部土体破坏；二是桩身折断或桩身钢筋应力达到屈服。单桩水平极限承载力为出现此两种情况之一的前一级水平荷载；当按 4.4.9 条第 3 款终止试验时，并不一定能得到单桩水平极限承载力，只能得到满足设计要求的单桩水平承载力检测值。

4.4.17 水平承载力特征值除与桩的材料强度、截面刚度、入土深度、土质条件、桩顶水平位移允许值有关外，还与桩顶边界条件（嵌固情况和桩顶竖向荷载大小）有关。

桩顶自由的单桩水平静载荷试验得到的承载力和弯矩仅仅代表试桩条件的情况，欲得到符合实际工程桩嵌固条件下的受力特性，需将试桩结果转化，而转化的关键是求得地基土水平抗力系数的比例系数 m 值。考虑到水平荷载-位移关系的非线性且 m 值随荷载或位移的增加而减小，有必要给出 H_0-m 和 Y_0-m 曲线并按以下考虑确定 m 值：

1 可按设计给出的实际荷载或桩顶位移确定 m 值。

2 设计未作具体规定的，可取水平承载力特征值对应的 m 值。

与竖向抗压、抗拔桩不同，混凝土桩在水平荷载作用下的破坏模式一般为弯曲破坏，极限承载力由桩身强度控制。因此，在

单桩水平承载力 H_a 的确定上，不采用水平极限承载力除以安全系数的方法，而是将桩身强度、开裂或允许位移等条件作为控制因素。不过，也正是因为水平承载桩的承载能力极限状态主要受桩身强度制约，通过水平静载荷试验给出的极限承载力和极限弯矩对强度控制设计非常必要。

抗裂要求不仅涉及到桩身强度，也涉及桩的耐久性，本条第 3 款虽然可以按照设计要求的水平允许位移确定水平承载力，但根据《混凝土结构设计规范》GB 50010，只有裂缝控制等级为三级的构件，才允许出现裂缝，而且桩所处的环境类别至少是二级以上（含二级），裂缝宽度限值为 0.2mm。因此，当裂缝控制等级为一、二级时，水平承载力特征值就不应超过水平临界荷载。

5 高应变法

5.1 一般规定

5.1.1 由于桩土体系相互作用关系十分复杂，需要检测人员对其理论基础以及桩的受力状况、荷载传递机理等有比较充分的了解和认识，而且高应变动力检测的数学模型以及其分析计算中的假定还不能精确地反映实际桩土体系受力状态，在我市实践的经验表明，高应变动力检测分析计算过程中尚有许多不定因素，不仅需要动静对比试验数据，而且在较大程度上还要依赖检测人员的经验和分辨能力，这项检测技术仍然处在发展、完善之中，因此，高应变动力检测目前只能判定而不是确定基桩的承载力。换句话说，当对高应变检测出的承载力数值有所怀疑时，其验证手段只能是静载荷试验。此外，高应变检测要得到桩的极限承载力，必须使桩侧和桩端的土阻力充分发挥，否则得不到桩承载力的极限值，只能得到桩承载力的实测值。

高应变动力检测桩身完整性，是在判定基桩承载力同时，根据所计算出桩身完整性系数、力与速度曲线的特征以及彼此之间的相互关系分析得出的，尤其在判定桩身水平整合型缝隙、预制混凝土桩接头等缺陷时有其明显的优势。如果是按一定数量比例普查检测拟建场地内的桩身完整性，宜采用较为快捷、方便的反射波法。

高应变检测技术是从打入式预制混凝土桩发展起来的，试打桩和打桩监控是其特有功能，静载荷试验无法做到。

5.1.2 “相近条件”系指在天津市范围内同类场地土质情况下所做的动静对比验证，当然最好是有本场地的动静对比试验资料。

灌注桩的截面尺寸和材质的非均匀性、施工的隐蔽性（干作业成孔桩除外）及由此引起的承载力变异性普遍高于打入式预制混凝土桩，导致灌注桩检测采集的波形质量低于预制混凝土桩，波形分析中的不确定性和复杂性又明显高于预制混凝土桩，灌注桩的桩身与桩周岩土的结合受桩身状况、泥浆形成的泥皮、桩底

沉渣等影响较大，凯司法计算承载力的模型较简单，难以较为准确的反应灌注桩实际情况，所以灌注桩的高应变检测计算承载力应采用实测曲线拟合法。

5.2 检测仪器设备

5.2.3 导杆式柴油锤荷载上升时间过于缓慢，容易造成速度响应信号失真。

5.2.4~5.2.5 锤击设备的导向和锤体形状直接关系到信号质量与现场试验的安全。

扁平状锤如分片组装式锤的单片或混凝土浇筑的强夯锤，下落时不易导向且平稳性差，容易造成严重锤击偏心，影响测试质量。因此规定锤体的高径（宽）比不应小于 1。

无导向锤的脱钩装置多基于杠杆式原理制成，操作人员需在离锤很近的范围内操作，缺乏安全保障，且脱钩时会不同程度地引起锤的摇摆，更容易造成锤击严重偏心而产生垃圾信号。另外，如果采用汽车吊直接将锤吊起并脱钩，因锤的重量突然释放造成吊车吊臂的强烈反弹，对吊臂造成损害。因此稳固的导向装置的另一个作用是：在落锤脱钩前需将锤的重量通过导向装置传递给锤击装置的底盘，使吊车吊臂不再受力。

锤的重量大小直接关系到桩侧、桩端岩土阻力发挥的高低，只有充分包含土阻力发挥信息的信号才能视为有效信号，也才能作为高应变承载力分析与评价的依据。锤重不变时，随着桩横截面尺寸、桩的质量或单桩承载力的增加，锤与桩的匹配能力下降，试验中直观表象是锤的强烈反弹，锤落距提高引起的桩顶动位移或贯入度增加不明显，而桩身锤击应力的增加比传递给桩的有效能量的增加效果更为显著，因此轻锤高落距锤击是错误的做法。个别检测机构，为了降低运输（搬运）、吊（安）装成本和试验难度，一味采用轻锤进行试验，由于土阻力（承载力）发挥信息严重不足，遂随意放大调整实测信号，导致承载力虚高；有时，轻锤高击还引起桩身破损。

本条规定了保证信号有效性规定的最低锤重要求，也是体现高应变法“重锤低击”原则的最低要求。未规定锤重增加范围的上限值，一是体现“重锤低击”原则，二是考虑下列情况：

1 桩较长或桩径较大时，一般使侧阻、端阻充分发挥所需位移大；

2 桩是否容易被“打动”取决于桩身“广义阻抗”的大小。广义阻抗与桩身截面波阻抗和桩周土岩土阻力均有关。随着桩直径增加，波阻抗的增加通常快于土阻力，而桩身阻抗的增加实际上就是桩的惯性质量增加，仍按承载力极限值的 1% 选取锤重，将使锤对桩的匹配能力下降。

因此，不仅从土阻力，也要从桩身惯性质量两方面考虑提高锤重是更科学的做法。当桩径或桩长明显超过本条低限值时，例如，1200mm 直径灌注桩，桩长 20m，设计要求的承载力极限值较低，仅为 4000kN，即使将锤重与承载力极限值的比值提高到 1.5%，即采用 60kN 的重锤仍感锤重偏轻。

5.2.6 实测桩的贯入度可以增加分析计算的可靠度，对提高高应变动力检测精度很有帮助，应当对每一锤均进行实测。

由于落锤时对桩的冲击使桩周土产生振动，按照静载荷试验设置基准梁、基准桩的方法测量桩的贯入度会有较大误差和干扰，因此宜采用精密水准仪、激光变形仪等仪器测定。

采用加速度信号二次积分得到的最终位移作为贯入度，操作最为简便，但加速度计零漂大和低频响应差（时间常数小）时将产生明显的积分漂移，且零漂小的加速度计价格很高；另外因信号采集时段短，信号采集结束时若桩的运动尚未停止（以柴油锤打桩时为甚）则不能采用。

5.3 现场检测

5.3.1 承载力时间效应因地而异，以沿海软土地区最显著。成桩后，若桩周岩土无隆起、侧挤、沉陷、软化等影响，承载力随时间增长。工期紧休止时间不够时，除非承载力检测值已满足设计要求，否则应休止到满足表 3.5.4 规定的时间为止。

5.3.2 如果桩头制作形状不符合要求，会直接影响检测信号质量，对检测结果分析和计算带来麻烦和误差。

5.3.3 除了桩头完好的预制混凝土桩外，一般均应对桩头进行处理和加固，从而使桩头经受 3~5 次锤击后仍然保持完好，不仅保证锤击力正常传递，更重要的是易于得到较为理想的测试信号。

5.3.5~5.3.6 有关力和加速度传感器的安装、锤击落距、桩垫、有效锤击次数等项规定的目的都是为了保证测试信号真实、可靠、有效，从而使测得的承载力数值最大限度的反映客观实际状况。

5.3.7 出现异常信号后，应分析查找原因，排除故障后方可继续检测。在现场必须确认所采取信号的质量，如不符合本规程规定，必须重做，直到获得合格信号为止。

5.4 检测数据的处理和分析

5.4.1 从一阵锤击信号中选取分析用信号时，除要考虑有足够的锤击能量使桩周岩土阻力充分发挥外，还应注意下列问题：

- 1 连续打桩时桩周土的扰动及残余应力；
- 2 锤击使缺陷进一步发展或拉应力使桩身混凝土产生裂隙；
- 3 在桩易打或难打以及长桩情况下，速度基线修正带来的误差；
- 4 对桩垫过厚和柴油锤冷锤信号，因加速度测量系统的低频特性造成速度信号出现偏离基线的趋势项。

5.4.2 高质量的信号是得出可靠分析计算结果的基础。除柴油锤施打的长桩信号外，力的时程曲线应最终归零。对于混凝土桩，高应变测试信号质量不但受传感器安装好坏、锤击偏心程度和传感

器安装面处混凝土是否开裂的影响，也受混凝土的不均匀性和非线性的影响。这些影响对采用应变式传感器测试、经换算得到的力信号尤其敏感。混凝土的非线性一般表现为：随应变的增加，割线模量减小，并出现塑性变形，使根据应变换算到的力值偏大且力曲线尾部不归零。本规范所指的锤击偏心相当于两侧力信号之一与力平均值之差的绝对值超过平均值的 33%。通常锤击偏心很难避免，因此严禁用单侧力信号代替平均力信号。

5.4.3 桩身波速 c 的大小直接影响到计算的力和速度值，对动测计算结果影响很大。从桩身弹性模量计算公式 $E = \rho \cdot c^2$ 也可以看出， E 和 c^2 成正比，而桩身力 $F = A \cdot E \cdot \varepsilon$ ，也就是由实测应变推算的力大小与 c^2 成正比。例如波速 c 增加 10%，力就要增加 21%，因此准确的确定波速就成为计算桩身力和承载力的关键，无论是凯斯法还是实测曲线拟合法都是一样。

桩底反射明显时，平均波速也可根据速度波形第一峰起升沿的起点和桩底反射峰起点间的时差与已知桩长值来确定。对桩底反射峰变宽或有水平裂缝的桩，不应根据峰与峰间的时差来确定平均波速。桩较短且锤击力波上升缓慢时，可采用低应变反射波法确定平均波速。

测点处原设定波速需进行调整时，应对相应的桩身弹性模量按式（5.3.4-6）重新计算。通常，当平均波速按实测波形改变后，测点处的原设定波速也按比例线性变化，模量则按平方关系改变。当采用应变式传感器测力时，多数仪器未直接保存实测应变值，如有些仪器是以速度的单位存储。如果模量随波速改变后，仪器不能自动修正以速度为单位存储的力值，则应对原始实测力信号进行修正。

还需要补充说明的是，不能用低应变或超声波法检测得出的波速去替代高应变实测值，因为低应变和超声波测出的波速都比高应变测出的波速要大。

5.4.4 通常情况下，如正常施打的预制混凝土桩，力和速度信号在第一峰处应基本成比例，即第一峰处的 F 值与 VZ 值基本相等。但在下列几种不成比例（比例失调）的情况下属于正常：

- 1 桩浅部阻抗变化和土阻力影响;
- 2 采用应变式传感器测力时, 测点处混凝土的非线性造成力值明显偏高;
- 3 锤击力波上升缓慢或桩很短时, 土阻力波或桩底反射波的影响;
- 4 桩身材料弹性模量、截面积值输入错误导致比例失调。

信号随意比例调整均是对实测信号的歪曲, 并产生虚假的结果。如通过放大实测力或速度进行比例调整的后果是计算承载力不安全。因此, 为保证信号真实性, 禁止将实测力或速度信号重新标定。这一点必须引起重视, 因为有些仪器具有比例自动调整功能。

5.4.5 高应变分析计算结果的可靠程度取决于所使用的仪器、分析软件和检测人员的素质三个要素。其中, 起决定作用的是具有坚实理论基础和丰富实践经验的高素质检测人员。因此, 使用高应变法进行承载力分析计算前, 应由具备高素质检测人员对信号做出定性检查和正确判断。

5.4.6 出现本条所述情况时, 由于高应变法难以分析判定承载力和预见桩身结构破坏的可能性, 故应进行确认检测, 并宜采用静载荷试验方法。

5.4.7~5.4.8 凯司法的计算公式(式 5.4.8-1 和式 5.4.8-2)有下列三个假设前提: 1. 桩身阻抗基本恒定; 2. 动阻力只同桩端的质点运动速度成正比, 即全部动阻力集中于桩端; 3. 土阻力在 $t_1 + 2L/c$ 时刻已充分发挥。因此, 凯司法只适用于中、小直径预制混凝土桩和截面较均匀的灌注桩, 对于天津这样以摩擦型桩为主的地区比较适宜。

公式中的唯一未知数——凯司法无量纲阻尼系数 J_c 定义为仅与桩端土性有关, 一般遵循随土中细粒含量增加阻尼系数增大的规律。 J_c 的取值是否合理在很大程度上决定了计算承载力的准确性。所以, 缺乏同条件下的静动对比校核、或大量相近条件下的对比资料时, 将使其使用范围受到限制。当贯入度达不到规定值或不满足上述三个假定时, J_c 值实际上变成了一个无明确意义的

综合调整系数。特别值得一提的是灌注桩，也会在同一工程、相同桩型及持力层时，可能出现 J_c 取值变异过大的情况。为防止凯司法的不合理应用，规定应采用静动对比或实测曲线拟合法校核 J_c 值。

表 1 天津地区高应变法阻尼系数 J_c 参考取值

桩端土类	阻尼系数 J_c 参考取值
中粗砂	0.15~0.20
粉细砂	0.20~0.30
粉土	0.30~0.35
黏性土	0.40~1.00

阻尼系数 J_c 值宜通过下列两种途径确定：

(1)对同一根桩或者同一工程中边界条件相同(指桩型尺寸、成桩工艺、地质条件、休止时间等)的桩进行动、静对比试验,用静载荷试验得出的单桩极限承载力代入公式(5.4.8-1)可求出 J_c 值，然后将该 J_c 值用到同一工程边界条件相同的其余动测桩的计算中去。由动、静对比方法求出的 J_c 值可靠性较高。

(2)当工程不具备上述动、静对比试验条件时，也可以通过同一工程中相同边界条件下桩的实测曲线拟合，得出一批桩的 J_c 平均值。曲线拟合的桩数不应少于同一工程相同边界条件下动测桩总数的 30%，且不应少于 3 根，这是为了保证 J_c 值的代表性。

5.4.9 由于式（5.4.8-1）给出的 R_c 值与位移无关，仅包含 $t_2 = t_1 + 2L/c$ 时刻之前所发挥的土阻力信息，适用于在 $t_1 + 2L/c$ 时刻桩侧和桩端土阻力已得到充分发挥的桩，此时的 R_c 即为桩的极限承载力。通常除桩长较短的摩擦型桩外，土阻力在 $2L/c$ 时刻不会充分发挥，尤以端承型桩显著。所以需要采用将 t_1 延时求出承载力最大值的最大阻力法（RMX 法），对与位移相关的土阻力滞后 $2L/c$ 发挥的情况进行提高修正。

桩身在 $2L/c$ 之前产生较强的向上回弹，使桩身从顶部逐渐向下产生土阻力卸载（此时桩的中下部土阻力属于加载），这对于桩较长、侧阻力较大而荷载作用持续时间相对较短的桩较为明显，

因此需要采用将桩中上部卸载的土阻力进行补偿提高修正的卸载法（*RSU*法）。

*RMX*法和*RSU*法判定承载力，体现了高应变法波形分析的基本概念——应充分考虑与位移相关的土阻力发挥状况和波传播效应，这也是实测曲线拟合法的精髓所在。另外凯司法还有几种子方法可在积累了成熟经验后采用：

1 在桩尖质点运动速度为零时，动阻力也为零，此时有两种与 J_c 无关的计算承载力“自动”法，即*RAU*法和*RA2*法。前者适用于桩侧阻力很小的情况，后者适用于桩侧阻力适中的场合。

2 通过延时求出承载力最小值的最小阻力法（*RMN*法）。

5.4.10 实测曲线拟合法是通过波动问题数值计算，反演确定桩和土的力学模型及其参数值。从原理上讲，这种方法是客观唯一的，但由于桩、土以及它们之间的相互作用等力学行为的复杂性，实际运用时还不能对各种桩型、成桩工艺、地基条件，都能达到十分准确地求解桩的动力学和承载力问题的效果。所以本条针对该法应用中的关键技术问题，作了具体阐述和规定：

1 关于桩与土模型：(1) 目前已有成熟使用经验的土的静阻力模型为理想弹-塑性或考虑土体硬化或软化的双线性模型；模型中有两个重要参数——土的极限静阻力 R_u 和土的最大弹性位移 s_q ，可以通过静载荷试验（包括桩身内力测试）来验证。在加载阶段，土体变形小于或等于 s_q 时，土体在弹性范围工作；变形超过 s_q 后，进入塑性变形阶段（理想弹-塑性时，静阻力达到 R_u 后不再随位移增加而变化）。对于卸载阶段，同样要规定卸载路径的斜率和弹性位移限。(2) 土的动阻力模型一般习惯采用与桩身运动速度成正比的线性粘滞阻尼，带有一定的经验性，且不易直接验证。(3) 桩的力学模型一般为一维杆模型，单元划分应采用等时单元（实际为特征线法求解的单元划分模式），即应力波通过每个桩单元的时间相等，由于没有高阶项的影响，计算精度高。(4) 桩单元除考虑 A 、 E 、 c 等参数外，也可考虑桩身阻尼和裂隙，另外也可考虑桩底的缝隙、开口桩或异形桩的土塞、残余应力影响和其他阻

尼形式。(5) 所用模型的物理力学概念应明确, 参数取值应能限定; 避免采用可使承载力计算结果产生较大变异的桩-土模型及其参数。

2 本款考虑两点原因: 一是自由落锤产生的力脉冲持续时间通常不超过 20ms (除非采用很重的落锤), 但柴油锤信号在主峰过后的尾部仍能产生较长的低幅值延续; 二是与位移相关的总静阻力一般会不同程度地滞后于 $2L/c$ 发挥, 当端承型桩的端阻力发挥所需位移很大时, 土阻力发挥将产生严重滞后, 因此规定 $2L/c$ 后延时足够的时间, 使曲线拟合能包含土阻力响应区段的全部土阻力信息。

3 拟合时应根据波形特征, 结合施工和地基条件合理确定桩土参数取值。因为拟合所用的桩土参数的数量和类型繁多, 参数各自和相互间耦合的影响非常复杂, 而拟合结果并非唯一解, 需通过综合比较判断进行参数选取或调整。正确选取或调整的要点是参数取值应在岩土工程的合理范围内。为防止土阻力未充分发挥时的承载力外推, 设定的 s_q 值不应超过对应单元的最大计算位移值。若桩、土间相对位移不足以使桩周岩土阻力充分发挥, 则给出的承载力结果只能验证岩土阻力发挥的最低程度。

4 土阻力响应区是指波形上呈现的静土阻力信息较为突出的时间段。所以本条特别强调此区段的拟合质量, 避免只重波形头尾, 忽视中间土阻力响应区段拟合质量的错误做法, 并通过合理的加权方式计算总的拟合质量系数, 突出土阻力响应区段拟合质量的影响。

5 贯入度的计算值与实测值是否接近, 是判断拟合选用参数、特别是 s_q 值是否合理的辅助指标。

5.4.11 高应变检测桩身完整性实际上是检测桩身阻抗变化, 难以准确判别缺陷的性质(变径、松散、蜂窝、空洞等)。高应变方法的长处在于, 1、信号能量大; 2、可以对缺陷程度作定量计算; 3、连续锤击可以观察缺陷的扩大和逐步闭合情况, 等等。

但是, 高应变方法锤击的荷载上升时间一般不小于 2ms, 因此对桩身浅部缺陷的判断存在盲区。在这种情况下, 不能根据式 (5.4.11-1) 来判定缺陷程度, 也不能定量给出缺陷的具体位置,

只能根据力和速度曲线的比例失调程度来估计浅部缺陷程度，尤其是锤击力波上升非常缓慢时，还大量耦合有土阻力的影响。

式（5.4.11-1）适用于截面基本均匀桩的桩顶下第一个缺陷的程度定量计算。

当满足本条第 4 款“等截面桩”和“土阻力未卸载回弹”的条件时， β 值计算公式为解析解，即 β 值测试属于直接法，在结果的可信度上，与属于半直接法的高应变法检测判定承载力是不同的。“土阻力未卸载回弹”限制条件是指：当土阻力 R_x 先于 t_1+2x/c 时刻发挥并产生桩中上部明显反弹时， x 以上桩段侧阻提前卸载造成 R_x 被低估， β 计算值被放大，不安全，因此公式（5.5.11-1）不适用。此种情况多在长桩存在深部缺陷时出现。

5.4.12 桩身锤击拉应力是预制混凝土桩施打抗裂控制的重要指标。在深厚软土地区，打桩时侧阻和端阻虽小，但桩很长，桩锤可以正常启动起跳，桩底反射回来的上行拉力波的头部（拉应力幅值最大）与下行传播的锤击压应力波尾部叠加，在桩身某一部位产生净的拉应力。当拉应力强度超过混凝土抗拉强度时，引起桩身开裂。开裂部位一般发生在桩的中上部，且桩越长或锤击力持续时间短，最大拉应力部位越向下移。

有时，打桩过程中会突然出现贯入度骤减或拒锤现象，一般是遇到硬层（基岩、孤石、漂石等）。继续施打会造成桩身压应力过大，导致桩身破坏。此时，最大压应力部位不一定出现在桩顶，而是接近桩端的部位。

6 低应变法

6.1 一般规定

6.1.1 低应变法检测系根据桩身阻抗变化所造成测试曲线波形形态、相位以及波幅的特征来进行判断分析的，所以该方法的长处是在正常情况下能够比较准确地判断桩身缺陷及其所在位置，但对于缺陷的性质（缩径、夹泥、裂缝、松散等）只能是推断分析。此外对灌注桩而言，具体到每根桩的波速很难准确确定，只能根据场地内的平均波速来计算桩长，因此随着所选择的平均波速与被测桩真实波速的差异大小，其计算出的桩长与实际桩长可能有较大的出入，只能作为参考；另外，波速与混凝土强度之间的相关关系十分复杂，不是简单的一一对应关系，故根据波速的数值只能大致估计推测混凝土强度等级，而且这个强度等级是桩身平均强度概念，而不是桩身混凝土真正意义的混凝土强度等级。

低应变法不能用于基桩承载力的检测，也不适用于如水泥土搅拌桩、碎石桩、薄壁钢桩和类似于 H 型钢桩的桩身完整性检测。

6.1.2 由于受桩周土约束、激振能量、桩身材料阻尼和桩身截面阻抗变化等因素的影响，应力波从桩顶传至桩底再从桩底反射回桩顶的传播为一能量和幅值逐渐衰减过程。若桩过长（或长径比较大）或桩身截面阻抗多变或变幅较大，往往应力波尚未反射回桩顶甚至尚未传到桩底，其能量已完全衰减或提前反射，致使仪器测不到桩底反射信号，而无法评定整根桩的完整性。在我国，若排除其他条件差异而只考虑各地区地基条件差异时，桩的有效检测长度主要受桩土刚度比大小的制约。具体工程的有效检测桩长，应通过现场试验，依据能否识别桩底反射信号，确定该方法是否适用。

灌注桩本身材质不如预制混凝土桩均匀，桩身与桩周岩土相互作用复杂，当桩长超过一定长度时，低应变法不易检测到桩底部的信号。即使有反射信号，由于受桩身材料、桩周岩土影响，

信号分辨力低，往往对缺陷漏判、误判，因此对于超长桩建议低应变法宜和其他方法共同判定桩身完整性。

对于最大有效检测深度小于实际桩长的长桩、超长桩检测，尽管测不到桩底反射信号，但若有效检测长度范围内存在缺陷，则实测信号中必有缺陷反射信号，因此低应变方法仍可用于查明有效检测长度范围内是否存在缺陷。

6.1.3 本条要求对桩身截面多变且变化幅度较大的灌注桩的检测有效性进行辅助验证，主要考虑下列几点：

1 阻抗变化会引起应力波多次反射，且阻抗变化截面离桩顶越近，反射越强，当多个阻抗变化截面的一次或多次反射相互叠加时，造成波形难于识别；

2 阻抗变化对应力波向下传播有衰减，截面变化幅度越大引起的衰减越严重；

3 大直径灌注桩的横向尺寸效应，桩径越大，短波长窄脉冲激励造成响应波形的失真就越严重，难以采用；

4 桩身阻抗变化范围的纵向尺度与激励脉冲波长相比越小，阻抗变化的反射就越弱，即所谓偏离一维杆波动理论的“纵向尺寸效应”越显著。

因此承接这类灌注桩检测前，应在积累本地区经验的基础上，了解工艺和施工情况（例如充盈系数、护壁尺寸、何种土层采用何种施工工艺更容易出现塌孔等），使所选用的验证方法切实可行，降低误判几率。

6.1.4 通过对天津市大量的预制混凝土桩低应变及高应变检测资料进行分析，发现下列现象：

1 单节预制混凝土桩的低应变法桩身完整性检测曲线多数能看到明显的桩底反射，但大部分经过接桩的预制混凝土桩（两节及两节以上）桩底反射不明显，尤其桩长超过 20m 的多节预制混凝土桩。

2 利用高应变法检测的速度曲线能很好的分析全桩身的完整性。

这表明低应变法在两节或多节预制混凝土桩的完整性检测方面有一定的局限性，不能可靠地反映出第二节以下桩身的完整性情况。采用高应变方法测试，在取得基桩承载力参数的同时，利用高应变测试的速度曲线分析桩身完整性，可以有效的弥补低应变法的不足。

6.2 检测仪器设备

6.2.3 瞬态激振操作应通过现场试验选择不同材质的锤头或锤垫，以获得低频宽脉冲或高频窄脉冲。除大直径桩外，冲击脉冲中的有效高频分量可选择不超过 2000Hz（钟形力脉冲宽度为 1ms，对应的高频截止分量约为 2000Hz）。目前激振设备普遍使用的是力锤、力棒，其锤头或锤垫多选用工程塑料、高强尼龙、铝、铜、铁、橡皮垫等，锤的质量为几百克至几十千克不等。

6.3 现场检测

6.3.1 处理目的是得到理想的测试信号，便于分析解释。此外，本条所列的三款处理要求都应当满足，否则，会造成信号不好或失真，容易判断错误。

6.3.2 本条是为保证响应信号质量而提出的基本要求：

1 传感器安装底面与桩顶面之间不得留有缝隙，安装部位混凝土凹凸不平时应磨平，传感器用耦合剂粘结时，粘结层应尽可能薄。

2 激振点与传感器安装点应远离钢筋笼的主筋，其目的是减少外露主筋对测试产生干扰信号。若外露主筋过长而影响正常测试时，应将其割短。

3 激振方向应沿桩轴线方向的要求是为了有效减少敲击时的水平分量。

4 瞬态激振通过改变锤的重量及锤头材料，可改变冲击入射波的脉冲宽度及频率成分。锤头质量较大或硬度较小时，冲击入

射波脉冲较宽，低频成分为主；当冲击力大小相同时，其能量较大，应力波衰减较慢，适合于获得长桩桩底信号或下部缺陷的识别。锤头较轻或硬度较大时，冲击入射波脉冲较窄，含高频成分较多；冲击力大小相同时，虽其能量较小并加剧大直径桩的尺寸效应影响，但较适宜于桩身浅部缺陷的识别及定位。

6.3.3 桩长参数应以实际记录的施工桩长为依据，按测点至桩底的距离设定。测试前桩身波速可根据本地区同类桩型的测试值初步设定，实际分析时应按桩长计算的波速重新设定或按本规范第 6.4.1 条确定的波速平均值 c_m 设定。

对于时域信号，采样频率越高，则采集的数字信号越接近模拟信号，越有利于缺陷位置的准确判断。一般应在保证测得完整信号（时段 $2L/c+5ms$ ，1024 个采样点）的前提下，选用较高的采样频率或较小的采样时间间隔。但是若要兼顾频域分辨率，则应按采样定理适当降低采样频率或增加采样点数。

6.3.4 本条主要是对激振点和检测点位置进行了规定，以保证从现场获取的信息尽量完备：

1 本条第 1 款有两层含义：

第一是减小尺寸效应影响。相对桩顶横截面尺寸而言，激振点处为集中力作用，在桩顶部位可能出现与桩的横向振型相对应的高频干扰。当锤击脉冲变窄或桩径增加时，这种由三维尺寸效应引起的干扰加剧。传感器安装点与激振点距离和位置不同，所受干扰的程度各异。理论研究表明：实心桩安装点在距桩中心约 $2/3$ 半径 R 时，所受干扰相对较小；空心桩安装点与激振点平面夹角等于或略大于 90° 时也有类似效果，该处相当于横向耦合低阶振型的驻点。传感器安装点、激振（锤击）点布置见图 6-1。另应注意：加大安装与激振两点距离或平面夹角将增大锤击点与安装点响应信号时间差，造成波速或缺陷定位误差。

第二是使同一场地同一类型桩的检测信号具有可比性。因不同的激振点和检测点所测信号的差异主要随桩径或桩上部截面尺寸不规则程度变大而变强，因此尽量找出同一场地相近条件下各桩信号的规律性，对复杂波形的判断有利。

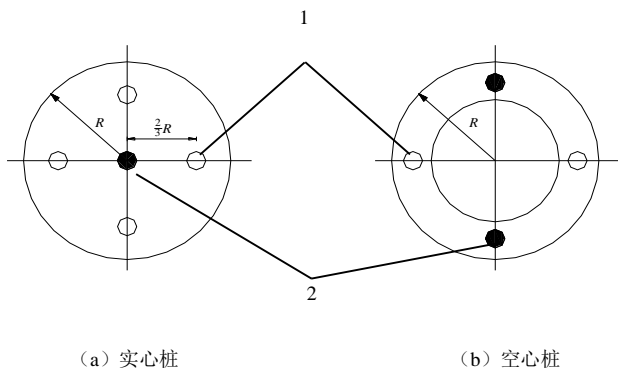


图 6-1 传感器安装点、激振（锤击）点布置示意图
1—传感器安装点；2—激振锤击点

当预制混凝土桩桩顶高于地面很多，或灌注桩桩顶部分桩身截面很不规则，或桩顶与承台等其他结构相连而不具备传感器安装条件时，可将两支测量响应传感器对称安装在桩顶以下的桩侧表面，且宜远离桩顶。

2 每个检测点有效信号数不宜少于 3 个，通过叠加平均可提高信噪比。

3 本条第 2 款所述“适当改变激振点和检测点的位置”是指位置选择可不受第 1 款的限制。

4 对现场检测人员的要求绝不能仅满足于熟练操作仪器，因为只有通过检测人员对所获波形在现场的合理、快速判断，才有可能决定下一步激振点、检测点以及敲击方式（锤重、锤垫等）的选择。

6.4 检测数据的处理和分析

6.4.1 为分析不同时段或频段信号所反映的桩身阻抗信息、核验桩底信号并确定桩身缺陷位置，需要确定桩身波速及其平均值。波速除与桩身混凝土强度有关外，还与混凝土的骨料品种、粒径级

配、密度、水灰比、成桩工艺（导管灌注、振捣、离心）等因素有关。

虽然波速与混凝土强度二者并不呈一一对应关系，但考虑到二者整体趋势上呈正相关关系，且强度等级是现场最易得到的参考数据，故对于超长桩或无法明确找出桩底反射信号的桩，可根据本地区经验并结合混凝土强度等级，综合确定波速平均值，或利用成桩工艺、桩型相同且桩长相对较短并能够找出桩底反射信号的桩确定的波速，作为场地桩身波速平均值。此外当某根桩露出地面且有一定的高度时，可沿桩长方向间隔可测量的距离段安置两个测振传感器，通过测量两个传感器的响应时差，计算该桩段的波速值，以该值代表整根桩的波速值。

6.4.2 本方法确定桩身缺陷的位置是有误差的，原因是：缺陷位置处 Δt_x 和 $\Delta f'$ 存在读数误差；采样点数不变时，提高采样频率降低了频域分辨率；波速确定的方式及用抽样所得平均值 c_m 替代某具体桩身段波速带来的误差。其中，波速带来的缺陷位置误差 $\Delta x = x \Delta c / c$ ($\Delta c / c$ 为波速相对误差) 影响最大，如波速相对误差为 5%，缺陷位置为 10m 时，则误差有 0.5m；缺陷位置为 20m 时，则误差有 1.0m。

对瞬态激振还存在另一种误差，即锤击后应力波主要以纵波形式直接沿桩身向下传播，同时在桩顶又主要以表面波和剪切波的形式沿径向传播。因锤击点与传感器安装点有一定的距离，接收点测到的入射峰总比锤击点处滞后，考虑到表面波或剪切波的传播速度比纵波低得多，特别对大直径桩或直径较大的预制混凝土桩，这种从锤击点起由近及远的时间线性滞后将明显增加。而波从缺陷或桩底以一维平面应力波反射回桩顶时，引起的桩顶面径向各点的质点运动却在同一时刻都是相同的，即不存在由近及远的时间滞后问题。严格地讲，按入射峰-桩底反射峰确定的波速将比实际的高，若按“正确”的桩身波速确定缺陷位置将比实际的浅；另外桩身截面阻抗在纵向较长一段范围内变化较大时，将引起波的绕行距离增加，使“真实的一维杆波速”降低。基于以上两

种原因，按照目前的锤击方式测桩，不可能精确地测到桩的“一维杆纵波波速”。

6.4.3 对于低应变法的桩身完整性分类，历来争议较多，实际应用也有个人不同的理解和认识，有时让用户无所适从。由于目前还不可能做到对桩身完整性进行量化分析解释，因此，只能作下列较为详细的定性解释说明，帮助检测人员在定性分类时参考。

1 根据反射波波幅形态特征和有关资料进行桩身完整性判断分类，与桩的施工质量分类出发点不一样，所依据的判断目标或参数不一样，检测分类与施工质量分类之间不存在必然联系，不能将检测分类代替施工质量分类。

2 在正常情况下，I、II类桩的承载力是能够满足设计要求的（也有例外情况）。对于III类桩，尽管其桩身存在明显缺陷，但其竖向抗压承载力不一定不满足设计要求，需要采用进一步的检测方法予以确认。IV类桩由于其缺陷严重甚至断桩，所以一般来说承载力不能满足设计要求，但是也有特例，比如素混凝土桩，桩身水平裂缝至断桩，但只要裂缝宽度不大（几个毫米），其竖向抗压承载力几乎不受影响，当然，该桩的水平承载力不能满足要求。考虑到虽然有的建筑物按照规范不进行地震荷载验算，但是在天津地区地震作用的水平力肯定存在，而反射波法判定为IV类断桩，又不能进一步确定断裂的角度，因此，出于安全考虑，本规程主张对III、IV类桩都应进行工程处理。

3 扩径桩从检测技术角度讲属于缺陷桩，但扩径缺陷对桩的承载力和使用一般不产生不良影响。

4 对于桩身缺陷程度的认识和判断，应充分考虑缺陷所在深度对缺陷反射波形形态和幅值的影响。同时，对地层从软变硬或反之所带来的测试曲线相应部位形态变化也应给予足够的重视。

5 目前，尚没有比较合适的波速与混凝土强度的对照表，因为本来波速和混凝土强度之间就没有一个简单对应关系，但是仍然可以有一个经验范围，例如对于混凝土强度 C20 的混凝土，其波速就不大可能在 4000m/s 以上。

6 桩身完整性分类的类别确定还应参考施工、设计等方面的资料。例如，接桩位置、钢筋笼的长度、施工有否中断或掉入杂物等等。此外，也应考虑桩的类型（灌注桩、预制混凝土桩、扩短桩等）的影响。

6.4.4 对嵌岩桩，桩底沉渣和桩端下存在的软弱夹层、溶洞等是直接关系到该桩能否安全使用的关键因素。虽然本方法不能确定桩底情况，但理论上可以将嵌岩桩桩端视为杆件的固定端，并根据桩底反射波的方向判断桩端端承效果，也可通过导纳值、动刚度的相对高低提供辅助分析。采用本方法判定桩端嵌固效果差时，应采用钻芯、孔内成像法、静载或高应变等检测方法核验桩端嵌岩情况，确保基桩使用安全。

7 声波透射法

7.1 一般规定

7.1.1 声波透射法是利用声波的透射原理对桩身混凝土介质状况进行检测，适用于桩在灌注成型时已经预埋了两根或两根以上声测管的情况。当桩径小于 0.6m 时，声测管的声耦合误差使声时测试的相对误差增大，因此桩径小于 0.6m 时应慎用本方法；基桩经钻芯法检测后（有两个以及两个以上的钻孔）需进一步了解钻芯孔之间的混凝土质量时也可采用本方法检测。

由于桩内跨孔测试的测试误差高于上部结构混凝土的检测，且桩身混凝土纵向各部位硬化环境不同，粗细骨料分布不均匀，因此该方法不宜用于推定桩身混凝土强度。

7.1.2 本规程对基桩桩身完整性的评价是针对全桩身，如果不能对全桩身混凝土质量就行检测，不能按照本规程规定的评价标准对该桩进行完整性分类。

7.2 检测仪器设备

7.2.1 基桩声波测试仪器应具有实时显示波形和分析功能，是为了提高现场检测及室内数据处理的工作效率，保证检测结果的准确性和科学性。具有自动采集和一发双收或一发多收功能，可以极大提高现场采集效率和数据精度。

由于混凝土灌注桩的声波透射法检测没有涉及桩身混凝土强度的推定，因此系统的最小采样时间间隔放宽至 $0.5\mu\text{s}$ 。首波自动判读可采用阈值法，亦可采用其他方法，对于判定为异常的波形，应人工校核数据。

发射电压仅影响信号穿透距离，不宜做强制性要求。

7.2.2 采用径向振动水平面无指向性换能器是为满足振幅测试需要，以便于相对比较。柱状径向振动换能器有圆管式和增压式两种，

增压式换能器因其增压管沿轴向有两条缝，在 360° 水平方向上表面振幅不均匀，有指向性，故不宜采用。

声波换能器有效工作面长度指起到换能作用的部分的实际轴向尺寸，该长度过大将夸大缺陷实际尺寸并影响测试结果。

换能器的谐振频率越高，对缺陷的分辨率越高，但高频声波在介质中衰减快，有效测距 变小。选配换能器时，在保证有一定的接收灵敏度的前提下，原则上尽可能选择较高频率的换能器。本规范规定用 $25\text{kHz}\sim 60\text{kHz}$ 谐振频率范围的换能器，在混凝土中产生的声波波长约 $8\text{cm}\sim 15\text{cm}$ ，能探测的缺陷尺度约在分米量级。当测距较大接收信号较弱时，宜选用带前置放大器的接收换能器，也可采用低频换能器，提高接收信号的幅度，但后者要以牺牲分辨力为代价。本规范虽然规定宜用 $30\text{kHz}\sim 60\text{kHz}$ 谐振频率范围的换能器，是属于常规要求，鼓励采用更高频率的换能器。

换能器在 1MPa 水压下不渗水也就是在 100m 水深能正常工作，这可以满足一般的工程桩检测要求。对于超长桩，宜考虑更高的水密性指标。

7.2.3 在声波透射法检测中，超声波特征值仅与发射与接收检测管间连线两边窄带区域（声测剖面）的混凝土质量密切相关。当灌注桩的直径增大时，每组声测管间超声波的混凝土检测范围占桩截面积比例减小，不能反映桩身截面混凝土的整体质量状况，因此，声测管的数量及布置方法决定了桩身混凝土实际的检测面积和检测范围，对直径大的桩必须增加声测管的数量。声测管布置，三管应按等边三角形均匀布置（构成三个声测剖面），四管则应按正方形均匀布置（构成六个声测剖面）。

钢质声测管的连接接头形式一般采用外套管焊接连接；声波透射法检测多数情况是开挖前在地面检测，故规定声测管应出露“检测工作面”的高度，意指实际应将声测管接至地面以上连同桩的混凝土浇筑一起。

声测管在随钢筋笼下沉时，如果管内不注水，中空，当管底与接头密封不好时，泥浆或砂浆在很大的内外压差作用下会渗入

管内，导致声测管全部或部分报废。而及时注入清水，则会有效地防止这一现象的出现。

7.2.4 进行钻芯作业时如果使用泥浆，当钻芯孔作为声测通道时，应对钻芯孔采用清水冲洗。

7.3 现场检测

7.3.2 径向换能器在径向无指向性，但在垂直面上有指向性，且换能器的接收响应随着发、收换能器中心连线与水平面夹角 θ 的增大而非线性递减，夹角越大接收响应效果越差。斜测主要用于确定缺陷的径向范围，夹角过小导致准确程度变差，在不影响穿透能力的前提下要求越大越好。因此关于斜测角度，最佳方式是不规定具体的角度，从对缺陷的分辨能力来说，斜测角度越大越好，但是对设备的发射能量、接收灵敏度有很高的要求。不同品牌的设备，差异也很大，有的设备能以较大角度做斜测；设备的发展也很快，几年就有新变化，今后设备可能会以更大的斜测角度进行斜测。虽然目前国内大部分规范都规定斜测时夹角不大于 30° ，扇形扫测时夹角不大于 40° ，但是从斜测的原理和技术发展的角度来讲，规范不应对斜测角度硬性规定，因此本规范对斜测的夹角不做要求，建议在不影响接受信号灵敏度情况下角度尽量大一些。

声测线间距将影响桩身缺陷纵向尺寸的检测精度，间距越小，检测精度越高。一般混凝土灌注桩的缺陷在空间有一定的分布范围，规定声测线间距不大于 100mm ，可满足工程检测精度的要求。当采用自动提升装置时，声测线间距还可进一步减小。

自动记录声波发射与接收换能器位置时，提升过程中电缆线带动编码器卡线轮转动，编码器计数卡线轮转动值换算得到换能器位置。电缆线与编码器卡线轮之间滑动、卡线轮直径误差等因素均会导致编码器位置计数与实际传感器位置有一定误差，因此每隔一定间距应进行一次高差校核。此外，自动记录声波发射与接收换能器位置时，如果同步升降声波发射与接收换能器的速度

过快，会导致换能器在声测管中剧烈摆动，甚至与声测管管壁发生碰撞，对接受的声波波形产生不可预测的影响。因此换能器的同步升降速度不宜过快，应保证测试波形的稳定性。

非匀速下降的换能器在由静止（或缓降）变为向下运动（或快降）时，由于存在不同程度的失重现象，使电缆线出现不同程度松弛，导致换能器位置不准确。因此一般宜从桩底开始同步提升换能器进行检测来保证记录的换能器位置的准确性。采用下降方式检测时，必须保持下降的匀速性。

不仅要求同一检测剖面、最好是一根桩各检测剖面，检测时都能满足各检测剖面声波发射电压和仪器设置参数不变的条件，使各检测剖面的声学参数具有可比性，利于综合判定。但应注意：4管6剖面时，若采用四个换能器同步提升并自动记录则属例外，此时对角线剖面的测距比边线剖面的测距大1.41倍，而长测距会增大声波衰减。

7.3.3 对可疑缺陷的细测有水平加密、等差同步和扇形扫测三种方法。其中水平加密细测是基本方法，而目前因自动深度记录及声参量采集的设备大量应用，水平同步测试的测点间距调节方面，而且可以用较小的间距而不影响测试效率；而双向斜测或扇形扫测主要用于确定缺陷在径向的位置和大小，对于桩身完整性分类的判定十分重要，在平测后对平测数据异常的区域进行初步分析，如初步判断该桩有可能判为Ⅲ类、Ⅳ类或在Ⅱ类、Ⅲ类之间时，应做双向斜测或扇形扫测（桩底沉淀和桩头低强区除外），以便为后续判断提供准确依据；其发、收换能器连线的水平夹角越大，斜测法对缺陷径向范围的分辨力越高，但考虑到换能器在深度方向的指向性存在，一般为 30° 以上即可。扇形测试操作复杂且声参量（尤其是幅度）的对比性较差，建议少使用。

CT技术的应用需要专门的分析软件，虽然不作强制推行，但提倡有条件的检测单位将其作为桩身缺陷定量分析的方法使用。

目前部分改进型的声波层析成像技术支持用平测加斜测的数据来实现，扇形测试操作复杂且声参量（尤其是幅度）的对比性

较差，建议少使用。声波层析成像法的特点是测试工作量大，采集数据信息量多。说明如下：

1 确保声波层析成像法的检测效果，首先应保证测线位置的准确性；

2 考虑到换能器有效工作段长度和工程质量验收对缺陷大小的要求，相邻发射点的深度间距不宜小于 5cm；

3 一般来说，多次重复斜测的方式获得所需要的全部检测分析数据（发射与接收声波换能器同步提升）的工作效率要比多次重复扇形扫测的方式获得所需要的全部检测分析数据（发射声波换能器不动，提升接收声波换能器）更高一些。

7.4 检测数据的处理和分析

7.4.1 当声测管倾斜时，声测管弯曲部分各测点测距将偏离在桩头的测量值，导致声速值偏离混凝土声速正常取值，一般这种变化沿深度方向有一定规律，表现为仅有声速值有规律地偏离（高或低）混凝土正常取值，此时一般采用曲线拟合等方法对各条测线测距作合理修正，然后重新计算各测点的声速。如果不对声测管倾斜进行合理的修正，将严重影响声速的临界值的合理取值，因此本条规定声测管倾斜时可作测距修正。但是，对于各测点声速值的偏离沿深度方向无变化规律的，不得随意修正。

当无法进行合理修正但各声测线的波幅及主频正常无畸变时，此时可以按照波幅、主频对混凝土质量进行判定。

当声测管倾斜到一定程度而导致发射或接受换能器无法顺利下放时，不应勉强或强力冲击下放，仅提供可测深度范围内的桩身完整性情况。

7.4.3 1 同一批次混凝土试件在正常情况下，其强度值的波动是服从正态分布规律，这已被大量的实测数据证实。由于混凝土构件的声速与其强度存在较显著的相关性，所以其声速值的波动也近似地服从正态分布规律。灌注桩作为一种混凝土构件，可认为在正常情况下其各条声测线的声速测试值也近似服从正态分布规律。

这是用概率法计算混凝土灌注桩各剖面声速异常判断概率统计值的前提。

2 如果某一剖面有 n 个声测线，相当于进行了 n 个试件的声速试验。在正常情况下，这 n 个声测线的声速值的波动可认为服从正态分布规律。但是，由于桩身混凝土在成型过程中，环境条件或人为过失的影响或测试系统的误差等都将会导致 n 个测试值中的某些值偏离正态分布规律，在计算某一剖面声速异常判断概率统计值时，应剔除偏离正态分布的声测线，通过对剩余的服从正态分布规律的声测线数据进行统计计算就可以得到该剖面桩身混凝土在正常波动水平下可能出现的最低声速，这个声速值就是判断该剖面各声测线声速是否异常的概率统计值。

3 本规范在计算剖面声速异常判断概率统计值时采用了“双边剔除法”。一方面，桩身混凝土硬化条件复杂、混凝土粗细骨料不均匀、桩身缺陷、声测管耦合状况的变化、测距的变异性（将桩顶面的测距设定为整个检测剖面的测距）、首波判读的误差等因素可能导致某些声测线的声速值向小值方向偏离正态分布。另一方面，混凝土离析造成的局部粗骨料集中、声测管耦合状况的变化、测距的变异、首波判读的误差、以及部分声测线可能存在声波沿环向钢筋的绕射等因素也可能导致某些声测线声速测值向大值方向偏离正态分布，这也属于非正常情况，在声速异常判断概率统计值的计算时也应剔除，否则两边的数据不对称，加剧剩余数据偏离正态分布，影响正态分布特征参数 v_m 和 s_x 的推定。

双剔除是按照下列顺序逐一剔除：（1）异常小，（2）异常大，（3）异常小，……，每次统计计算后只剔一个，每次异常值的误判次数均为 1，没有改变原规范的概率控制条件。

在实际计算时，先将某一剖面 n 个声测线的声速测试值从大到小排列为一数列，计算这 n 个测试值在正常情况下（符合正态分布规律下）可能出现的最小值 $v_{01}(j)=v_m(j)-\lambda \cdot S_x(j)$ 和最大值 $v_{02}(j)=v_m(j)+\lambda \cdot S_x(j)$ ，依次将声速数列中大于 $v_{02}(j)$ 或小于 $v_{01}(j)$ 的数据逐一剔除（这些被剔除的数据偏离了正态分布规律），再对剩余数据构成的数列重新计算，直至式（7.4.3-2）和式（7.4.3-3）

同时满足,此时认为剩余数据全部服从正态分布规律。 $v_{01}(j)$ 就是判断声速异常的概率法统计值。

由于统计计算的样本数是 10 个以上,因此对于短桩,可通过减小声测线间距获得足够的声测线数。。

桩身混凝土均匀性可采用变异系数 $C_v(j)=S_x(j)/v_m(j)$ 评价。

4 当桩身混凝土质量稳定,声速测试值离散小时,由于标准差 $S_x(j)$ 较小,可能导致异常判断概率统计值 $v_{01}(j)$ 过高从而误判;另一方面当桩身混凝土质量不稳定,声速测试值离散大时,由于 $S_x(j)$ 过大,可能会导致异常判断概率统计值 $v_{01}(j)$ 过小从而导致漏判。为尽量减小出现上述两种情况的机率,对变异系数 $C_v(j)$ 作了限定。

通过大量工程桩检测剖面统计分析,发现将 $C_v(j)$ 限定在 $[0.015, 0.045]$ 区间内,声速异常判断概率统计值的取值落在合理范围内的机率较大。

7.4.4 1 低限值 v_L 的合理确定是大量既往检测经验的体现。声速低限值相对应的混凝土强度不宜低于 $0.9R$ (R 为混凝土设计强度),若试件为钻孔芯样,则不宜低于 $0.85R$ 。当桩身混凝土未达到龄期而提前检测时,应对 v_L 、 v_p 的取值作适当调整。

2 概率法从本质上说是一种相对比较法,它考察的只是各条声测线声速与相应检测剖面内所有声测线声速平均值的偏离程度。当声测管倾斜或桩身存在多个缺陷时,同一检测剖面内各条声测线声速值离散很大,这些声速值实际上已严重偏离了正态分布规律,基于正态分布规律的概率法判据已失效,此时,不能将概率法临界值 $v_o(j)$ 作为该检测剖面各声测线声速异常判断临界值 $v_c(j)$,式(7.4.4)就是对概率法判据值作合理的限定。实际检测中常遇到不具备采用预留试件或芯样获得声速低限值和声速平均值情况,概率法作为一种相对比较法,同一检测剖面内声速值符合正态分布规律时,同样符合式(7.4.4)。

3 同一类型是指施工工艺相同、混凝土的设计强度和配合比相同。此类情况下,声速的测试值受非缺陷因素影响小,测试值较稳定,不同剖面间的声速测试值具有可比性。取各检测剖面声

速异常判断临界值的平均值作为该桩各剖面内所有声测线声速异常判断临界值可减小各剖面间因为用概率法计算的临界值差别过大造成的桩身完整性判别上的不合理性。另一方面，对同一根桩，桩身混凝土设计强度和配合比以及施工工艺都是一样的，应该采用一个临界值标准来判定各剖面所有声测线对应的混凝土质量。当某一剖面声速临界值明显偏离合理取值范围时，应分析原因，计算时应剔除。

7.4.7 在使用主频判据时，应保持声波换能器具有单峰的幅频特性和良好的耦合一致性，接收信号不应超量程，否则削波带来的高频谐波会影响分析结果。若采用 *FFT* 方法计算主频值，还应保证足够的频域分辨率。

7.4.8 波幅判据没有采用如声速判据那样的各检测剖面取平均值的办法，而是采用单剖面判据，这是因为不同剖面间测距差别较大，使波幅不具有可比性。此外，波幅的衰减受桩身混凝土不均匀性、声波传播路径和点源距离的影响，故应考虑声测管间距较大时波幅分散性而采取适当的调整。

因波幅的分贝数受仪器、传感器灵敏度及发射能量的影响，故应在考虑这些影响的基础上再采用波幅临界值判据。当波幅差异性较大时，应与声速变化及主频变化情况相结合进行综合分析。

7.4.9 在缺陷的边缘，声时将发生突变，桩身存在缺陷的声测线对应声时—深度曲线上的突变点。经声时差加权后的 *PSD* 判据图更能突出桩身存在缺陷的声测线，并在一定程度上减小了声测管的平行度差或混凝土不均匀等非缺陷因素对数据分析判断的影响。实际应用时可先假定缺陷的性质（如夹层、空洞、蜂窝等）和尺寸，计算临界状态的 *PSD* 值，作为 *PSD* 临界值判据，但需对缺陷区的声速作假定。

7.4.10 采用声波层析成像法分析判定桩身完整性时，应重点关注声速明显异常区域和声速严重异常区域。目前声波层析成像法的分析技术只能采用声速参数进行分析。

7.4.11 综合考虑桩身（墙身）缺陷的分布（深度及径向尺寸大小）、声参量偏离正常范围的程度、接收波形的变化，对桩身完

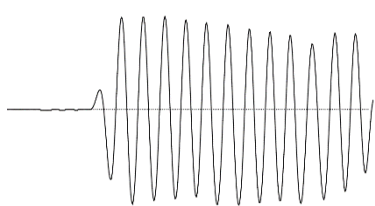
整性类别进行判定，体现了超声波法的定性研究成果的特点。其中空间分布范围大小的判定是一个相对的概念，是缺陷的几何尺寸与桩径、桩长等几何参数相比较的结果。声参量偏离程度也是和该桩所用原材料、配合比、管距、检测设备类似的无缺陷桩的声参量相比较，因此经验数据的统计，对于评判被检桩（墙）十分重要。结合桩（墙）类型、地质情况和施工工艺等因素综合判定，目的使检测的结果更能符合表 3.7.1 的要求，同时对归类于Ⅲ类桩、Ⅳ类桩，充分考虑其现状是否能满足设计的要求，避免过严或过松。

声速的异常程度可参考下表：

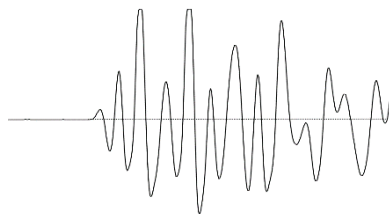
声速异常程度判定表

声速 (m/s)	声速异常程度
$v_i(j) > v_c$	无异常
$0.85v_c < v_i(j) \leq v_c$	轻微异常
$0.75v_c < v_i(j) \leq 0.85v_c$	较明显异常
$0.65v_c < v_i(j) \leq 0.75v_c$	明显异常
$v_i(j) \leq 0.65v_c$	严重异常

声波接收波形畸变程度示例见图 7-4.11。



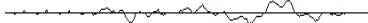
(a) 正常接收波形



(b) 轻微畸变波形



(c) 明显畸变波形



(d) 严重畸变波形

图 7-4. 11 接收波形畸变程度示意

8 钻芯法

8.1 一般规定

8.1.1 钻芯法是检测混凝土灌注桩的成桩质量的一种有效手段，不受场地条件的限制，特别适用于大直径混凝土灌注桩的成桩质量检测。钻芯法检测的主要目的有四个：

- 1 检测桩身混凝土质量情况，如混凝土胶结状况、有无气孔、松散或断桩等，混凝土强度是否符合设计要求；
- 2 沉渣厚度是否符合设计或规范的要求；
- 3 持力层的岩土性状（强度）和厚度是否符合设计或规范要求；
- 4 施工记录是否真实。

受检桩长径比较大时，成孔的垂直度和钻芯孔的垂直度很难控制，钻芯孔容易偏离桩身，当桩径小于 800mm、长径比大于 40 时，宜慎重采用钻芯法。

8.2 芯样钻取与加工设备

8.2.1～8.2.2 本条对钻芯机械设备参数的规定是防止用性能较差的钻机钻具，影响钻芯取样的质量。

8.2.3 为了获得比较真实的芯样，要求钻芯法检测应采用金刚石钻头，钻头胎体不得有肉眼可见的裂纹、缺边、少角喇叭型磨损。此外，还需注意金刚石钻头、扩孔器与卡簧的配合和使用的细节：金刚石钻头与岩芯管之间必须安有扩孔器，用以修正孔壁；扩孔器外径应比钻头外径大 0.3mm～0.5mm，卡簧内径应比钻头内径小 0.3mm 左右；金刚石钻头和扩孔器应按外径先大后小的排列顺序使用，同时考虑钻头内径小的先用，内径大的后用。

芯样试件直径不宜小于骨料最大粒径的 3 倍，在任何情况下不应小于骨料最大粒径的 2 倍，否则试件强度的离散性较大。目前，钻头外径有 76、91、101、110、130mm 几种规格，从经济合

理的角度综合考虑，应选用外径为 101mm 和 110mm 的钻头；当受检桩采用商品混凝土、骨料最大粒径小于 30mm 时，可选用外径为 91mm 的钻头；如果不检测混凝土强度，可选用外径为 76mm 的钻头。

8.2.5 芯样制作分两部分，一部分是锯切芯样，另一部分是对芯样端部进行处理。锯切芯样时应尽可能保证芯样不缺角、两端面平行，可采用单面锯或双面锯。当芯样端部不满足要求时，可采取补平或磨平方式进行处理。

8.3 芯样抗压强度试验设备

8.3.1~8.3.5 芯样试件抗压破坏时的最大压力值与混凝土标准试件明显不同，芯样试件抗压强度试验时应合理选择压力机的量程和加荷速率，以保证试验精度。参照现行国家标准《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081 对压力试验机技术要求作出规定。其中游标卡尺考虑实际芯样尺寸，由 GB/T50081 中规定的 200mm 调整为 150mm。

8.4 现场钻芯

8.4.1 对于验证桩身混凝土强度、桩长、桩端持力层、桩底沉淀的检测，钻芯孔数能满足需要即可；对缺陷桩的验证，一般不能少于规定的孔数。

同时考虑到成桩垂直度和钻芯孔垂直度很难控制，规程给出了钻芯取样的孔位布置。钻芯孔位置要考虑混凝土桩在浇筑时浇捣不均匀、不同深度或同一深度的不同位置混凝土浇捣质量可能不同、水下浇筑的混凝土在导管附近的混凝土质量相对较差不具有代表性等情况，需合理布置孔位，才能客观反映桩身混凝土的实际情况。对于验证检测的桩，宜开孔在有疑问的部位。单孔钻芯检测发现桩身混凝土质量问题时，需在同一基桩增加钻孔验证。

为准确确定桩的中心点，保证开孔位置，桩头一般开挖裸露，来不及开挖或不便开挖的桩，由全站仪测定桩位中心。

对设计未有明确桩端持力层的钻孔深度，本规程规定有 1 孔取样深度不宜小于 3 倍桩径，主要考虑岩溶、地下采空区等不良地质条件设计的端承桩，验证基桩桩端持力层情况；对于摩擦桩，钻孔深度进入桩端不小于 0.5m 即可。

8.4.2 钻芯设备应精心安装，钻机立轴中心、天轮中心（天车前沿切点）与孔口中心必须在同一铅垂线上。设备安装后，应进行试运转，在确认正常后方能开钻。钻进初始阶段应对钻机立轴进行校正，及时纠正立轴偏差，确保钻芯过程不发生倾斜、移位。

桩较长时，应使用扶正稳定器确保钻芯孔的垂直度。桩顶面与钻机塔座距离大于 2m 时，宜安装孔口管，孔口管应垂直且牢固。

当出现钻芯孔与桩体偏离时，应立即停机记录，分析原因。当有争议时，可进行钻孔测斜，以判断是受检桩倾斜超过规范要求还是钻芯孔倾斜超过规定要求。

8.4.5 钻至桩身缺陷位置时，为检测桩身缺陷位置及程度，采用减压、慢速钻进，若遇钻具突降，立即停钻，及时测量机上余尺，准确记录孔深及有关情况；钻至桩底时，为检测桩底沉淀厚度或桩端持力层为强风化岩层或土层时，一般采用干钻等适宜的钻芯方法和工艺钻取沉淀并测量厚度，对桩端持力层为中、微风化岩石时，将桩底 0.5m 左右的混凝土芯样与 0.5m 左右的持力层以及沉淀纳入同一个回次。对缺陷部位的验证取芯，一般取至缺陷位置下不少于 1.0m。对中、微风化岩层的桩端持力层，直接钻取芯样鉴别；对强风化岩层或土层，采用动力触探、标准贯入试验等方法鉴别，试验一般在距桩底 0.5m 内进行。

8.4.8 芯样取出后，钻机操作人员应由上而下按回次顺序放进芯样箱中，芯样侧表面上应清晰标明回次数、块号、本回次总块数（宜写成带分数的形式，如 $2\frac{3}{5}$ 表示第 2 回次共有 5 块芯样，本块芯样为第 3 块）。及时记录孔号、回次数、起至深度、块数、总块数、芯样质量的初步描述及钻进异常情况。

对桩身混凝土芯样的描述包括桩身混凝土钻进深度，芯样连续性、完整性、胶结情况、表面光滑情况、断口吻合程度、混凝土芯样是否为柱状、骨料大小分布情况，气孔、蜂窝麻面、沟槽、破碎、夹泥、松散的情况，以及取样编号和取样位置。

对持力层的描述包括持力层钻进深度，岩土名称、芯样颜色、结构构造、裂隙发育程度、坚硬及风化程度，以及取样编号和取样位置，或动力触探、标准贯入试验位置和结果。分层岩层应分别描述。

8.5 芯样试件截取与加工

8.5.1 一般来说，蜂窝麻面、沟槽等缺陷部位的强度较正常胶结的混凝土芯样强度低，无论是严把质量关，尽可能查明质量隐患，还是便于设计人员进行结构承载力验算，都有必要对缺陷部位的芯样进行取样试验。因此，缺陷位置能取样试验时，应截取一组芯样进行混凝土抗压试验。

如果同一基桩的钻芯孔数大于一个，其中一孔在某深度存在蜂窝麻面、沟槽、空洞等缺陷，芯样试件强度可能不满足设计要求，在其他孔的相同深度部位取样进行抗压试验是非常必要的，在保证结构承载能力的前提下，减少加固处理费用。

8.5.4 钻芯过程中，由于钻机振动、钻具摆动等，致使芯样的直径在各个方向不十分均匀，所以只能采用平均直径表示，但因直径对芯样试验结果影响较大，为使截面面积误差控制在 0.1% 范围内，故平均直径应精确至 0.5mm。考虑芯样直径在不同截面上的差异，为了更准确的测量芯样平均直径，本次修订为在芯样上部、中部和下部分别测量，并取直径偏小的部位的直径作为平均直径。

考虑到芯样垂直受压的均匀性，对芯样垂直度进行规定。

8.5.5 芯样试件的直径、高度、垂直度、平整度均会对抗压强度试验结果产生影响，进行抗压强度试验之前，对芯样几何尺寸进行测量，符合相应精度和偏差范围的方能进行抗压强度试验。为了避免在对芯样试件高径比进行修正，规定有效芯样试件的高度

在 $0.95\sim 1.05d$ (d 为芯样平均直径)。参考现行国家行业标准《钻芯法检测混凝土强度技术规程》JGJ/T384, 并考虑市面现有芯样加工设备性能, 提高了芯样平均直径沿高度方向的变化与芯样的不垂直度的要求, 保证了芯样的加工质量。为了避免芯样试件强度离散性偏大, 观察芯样侧面的情况, 要求所选芯样试件不能有裂缝或有其他较大缺陷, 芯样试件内不得含有钢筋; 同时尽量确保芯样试件平均直径大于 3 倍表观混凝土骨料最大粒径。

8.6 芯样试件抗压强度试验

8.6.1~8.6.5 混凝土芯样试件的强度值不等于在施工现场取样、成型、同条件养护试块的抗压强度, 也不等于标准养护 28 天的试块抗压强度。芯样试件抗压强度与同条件试块或标养试块抗压强度之间存在差别, 其原因主要是成型工艺和养护条件的不同。

根据桩的工作环境状态, 试件宜在 $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 的清水中浸泡段时间后进行抗压强度试验。但考虑到钻芯过程中诸因素影响均使芯样试件强度降低, 同时也为方便起见, 允许芯样试件加工完毕后, 立即进行抗压强度试验。

当有可靠试验依据时, 芯样试件强度换算系数可根据混凝土原材料和施工工艺情况通过试验确定。

大部分实测数据表明桩身混凝土芯样抗压强度低于控制混凝土材料质量的立方体试件抗压强度, 但降低幅度存在较大的波动范围, 也有一些实测数据表明桩身混凝土芯样抗压强度并不低于控制混凝土材料质量的立方体试件抗压强度。当排除龄期和养护条件(温度、湿度)差异时, 尽管普遍认同芯样强度低于立方体强度, 尤其是在桩身混凝土中钻芯更是如此, 但上述结果表明, 尚不能采用一个统一的折算系数来反映芯样强度与立方体强度的差异。为了安全起见, 本规范不推荐采用某一个统一的折算系数, 对芯样强度进行修正。

与工程地质钻探相比, 桩端持力层钻芯的主要目的是判断或鉴别桩端持力层岩土性状, 因单桩钻芯所能截取的完整岩芯数量

有限，当岩石芯样单轴抗压强度试验仅仅是配合判断桩端持力层岩性时，检测报告中可不给出岩石单轴抗压强度标准值，只给出单个芯样单轴抗压强度检测值。

8.7 检测数据的处理和分析

8.7.1 混凝土芯样试件抗压强度的离散性比混凝土标准试件要大，应取平均值作为检测值。

同一根桩有两个或两个以上钻芯孔时，应综合考虑各孔芯样强度来评定桩身承载力。取同一深度部位各孔芯样试件抗压强度（每孔取一组混凝土芯样试件抗压强度检测值参与平均）的平均值作为该深度的混凝土芯样试件抗压强度检测值，是一种简便实用方法。

虽然桩身轴力上大下小，但从设计角度考虑，桩身承载力受最薄弱部位的混凝土强度控制。因此，规定受检桩中不同深度位置的混凝土芯样试件抗压强度检测值中的最小值为该桩混凝土芯样试件抗压强度检测值。

8.7.2 桩底持力层的判定或鉴别应有岩土工程地质专业人员参与，并应符合《岩土工程勘察规范》GB 50021的有关规定。

8.7.3 虽然桩身完整性和混凝土芯样试件抗压强度是两个不同的概念，但为了充分利用钻芯法的有效检测信息、更客观地评价成桩质量，完整性判断应根据混凝土芯样表观特征和缺陷分布情况，并结合局部芯样强度检测值进行综合判定，同时关注缺陷部位能否取样制作芯样试件以及缺陷部位的芯样试件强度的高低。当混凝土芯样的外观完整性介于Ⅱ类和Ⅲ类之间时，利用出现缺陷部位的“混凝土芯样试件抗压强度检测值是否满足设计要求”这一辅助手段，加以区分。

桩长精度应考虑桩底锅底型的影响。按连续性含义，实测桩长小于施工记录桩长应被判为Ⅳ类。

当存在水平裂缝时，可结合水平荷载设计要求和水平裂缝深度进行综合判断：当桩受水平荷载较大且水平裂缝位于桩上部时

应判为Ⅳ类桩；当设计对水平承载力无要求且水平裂缝位于桩下部时可判为Ⅱ类桩；其他情况可判为Ⅲ类。

当上一缺陷的底部位置标高与下一缺陷的顶部位置标高的差小于 30cm 时，可认定两缺陷处于同一深度部位。

8.7.4 限于目前测试技术水平，尚不能将桩身混凝土强度是否满足设计要求与桩身完整性类别直接联系起来，虽然钻芯法能检测桩身混凝土强度，但并非是本规范中桩身完整性评价的要求。此外，钻芯法的桩身完整性Ⅰ类判据中，也未考虑混凝土强度问题，因此，如没有对芯样抗压强度检测的要求，有可能出现完整性为Ⅰ类但混凝土强度却不满足设计要求。

判定受检桩是否满足设计要求除考虑桩长和芯样试件抗压强度检测值外，当设计有要求时，应判断桩底的沉渣厚度、持力层岩土性状（强度）或厚度是否满足设计要求，否则，应判断是否满足相关规范的要求。另外，钻芯法属于直接法，桩身完整性类别是通过芯样及其外表特征观察得到的。根据表 8.7.3 关于Ⅳ类桩判据的描述，Ⅳ类桩肯定存在局部的、且影响桩身结构承载力的低质混凝土，即桩身混凝土强度不满足设计要求。因此，对于完整性评价为Ⅳ类的桩，可以明确该桩不满足设计要求。

9 钻孔灌注桩成孔、地下连续墙成槽检测

9.1 一般规定

9.1.2 接触仪器法检测成孔孔径，通过探头四机械臂紧贴孔壁，测试四机械臂的电阻值变化来探测孔径大小。目前国内接触式仪器一般测量范围为 $\Phi 500\text{mm}\sim 1600\text{mm}$ ，通过定制，最大测量范围可以达到 2500mm 。

根据天津市超声波法成孔检测的应用情况，孔径小于 600mm 时，超声波法成孔检测实际操作有难度，测试效果也不好控制。故规定被检测孔径不宜小于 0.6m 。对于最大检测孔径未作规定，按照目前的仪器性能，最大检测孔径可以达到 12.0m ，但实际最大检测能力受现场检测环境的影响，应由现场实测确定。

9.1.4 因新设备、新工艺的应用发展及实际工程需要，设计要求的合格标准往往要高于规范要求的合格标准，成孔（槽）质量检测结果应首先满足设计要求，其次是符合《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202 及现行各标准中的相关规定。

9.2 检测仪器设备

9.2.2 目前，接触式仪器法孔径检测设备为伞型孔径仪，天津地区所用伞型孔径仪采用 4 支机械臂，对十字正交方向的孔径进行同步测量，从多年工程案例看，应用效果不错。采用伞型孔径仪对孔径的测量误差，主要产生原因来自 3 个方面：一是随着孔径变大，机械臂挠度引起的误差；二是桩孔壁土层的强度不同，在同一张力下末端嵌入的程度不同引起的误差；三是后期数据处理转化为孔径时的孔径算法误差。对可能产生的误差，需要检测人员根据情况合理评估。

机械臂的挠度取决于机械臂材质，通过合理地选择机械臂材质，可将挠度引起的误差控制在允许范围之内，如选择钛合金机械臂，挠度变化基本可忽略不计。

机械臂末端弹力取决于弹簧，选择合适的弹簧可以合理的控制机械臂末端的弹力，经研究和分析测试，机械臂张角最大时弹簧对应的机械臂末端的弹力在 3N~5N 时，能使机械臂在泥浆中打开并和孔壁轻微贴合而不会对孔壁产生较大的影响。

9.2.3 测绳变形主要是测绳长期受拉长度伸长，使测量孔深小于实际孔深，可能造成孔深超规范要求的允许偏差值，故应注意测绳材质的选择及定期对测绳进行校准。与测绳连接的重物应有一定的重量和尖锐度，才能穿过沉渣层，到达持力层表面。

9.2.6 重锤法沉渣检测采用的重锤偏轻，当成孔工艺采用旋挖成孔、地质情况较坏时，孔底泥浆较稠，对重锤产生一定的浮阻力，将不能准确地测量沉渣厚度。另外，大多数施工单位用长 20cm~30cm 的 2 根或 4 根钢筋捆绑在一起代替重锤，由于其端部面积较小，在一定条件下，它可以穿入沉渣层一定深度，也不能准确测量出沉渣厚度。高度和直径比例合理，才有一定冲击力，可以克服泥浆浮力，同时保证重锤底面能停留在沉渣顶面。

悬挂重锤的测绳宜采用钢丝绳，不宜采用尼龙测绳，由于重锤的重量较大，尼龙绳容易被拉伸，产生较大变形，使测量出的沉渣厚度偏小，与真实值可能存在较大差距。

9.2.7 探头电极带电裸露在泥浆中工作，需要具有良好的绝缘性能，且与泥浆电阻率相差较大；质量太轻不易刺到孔底，直径太大时，在导管壁内检测时易碰到管壁，长度要大于导管到孔底的距离，否则探头倾倒有卡住的可能；电极距长度过大，分辨率低，且两点间电阻大了不易测出信号；倾角传感器实时掌握探头是否铅直，若倾斜会造成沉渣厚度检测值偏大。

9.2.8 探针法沉渣测定仪用于检测沉渣厚度的探头必须具有一定的重量，探针应具有一定的刚度、长度和截面尺寸，否则无法穿透沉渣；探头面积过大，可能造成探头落在沉渣顶面，无法进入沉渣下面的真正原状土持力层。

9.3 现场检测

9.3.1 本条规定孔（槽）深检测在清孔完毕后立即进行是为了减小孔内泥浆中包裹的砂粒及泥屑随时间不断沉淀对孔深产生的影响。测绳法工作原理是将悬挂锥形重物的带标尺的测绳沿孔中心下探到孔底，读取孔口测绳标尺读数即为孔深。深度编码器法是通过滑轮及光电脉冲法计数的装置，在探头下行时带动滑轮转动，由转动圈数与滑轮周长的乘积计算出孔深。超声波检测仪及接触法成孔检测仪均集成了深度编码器，因此在孔径（槽宽）和垂直度检测时可同时完成孔深检测。

从孔（槽）中心部位下放测绳可保证下放过程中测绳悬挂的锥状重物与孔（槽）壁有一定距离，避免锥状重物与孔（槽）壁的碰撞，影响孔（槽）壁稳定和测绳下放到孔底。测绳下放时间段内，孔内可能已经产生的沉渣，因此锥状重物下放到孔底后要反复提升，让锥状重物穿过沉渣。

9.3.2 通过对试成孔成孔后孔径的跟踪检测，可以分析出孔径随时间的变化情况，施工单位可依据孔径变化规律，对成孔后钢筋笼下放、二次清孔、混凝土灌注工序所用时间进行合理控制，在最佳时间段内灌注成桩，保证桩的质量。

超声波在不同的泥浆中传播速度不完全相同，通过对已知距离的校准，实测当前泥浆声速，可以使仪器参数的设置适合于所测桩孔情况，使实测声时值和计算测距数据符合实际情况。为避免出现不真实的检测结果，自校验证完成后应及时锁定相关参数设置，在检测过程中不得变动。

探头若偏离护筒中心轴线，一般情况下实际检测的是桩孔二个正交弦断面的弦长。所以检测中探头越接近中心，孔径检测误差越小。另外，超声波探头发射面外侧 200mm 距离范围内为超声波法检测盲区，对于小直径钻孔灌注桩桩孔检测，探头若偏离护筒中心较远，可能会因为桩孔较小的偏斜，导致探头进入盲区而无法检测。

标明检测剖面的走向与实际方位的目的是一旦发现非轴对称缺陷，可以通过检测方向与实际方位的关系，确定缺陷的具体位置。

检测中，有时会出现记录信号模糊断续及空白，原因有多种，可能是仪器升降速度过快，因为超声波探头每分钟重复频率是固定的，探头行进过快，相当于拉长了测点的间距，降低了分辨精度；可能局部深度范围内泥浆过稠，而探头超声波发射功率小，或灵敏度低造成反射信号弱；可能泥浆中气泡屏蔽了超声波；可能泥浆中存在悬浮物导致超声波的散射等等。因此，可以采用降低探头升降速度，或增大灵敏度及发射功率，检查不同深度泥浆的性能指标等手段，保证检测精度。

从槽口至槽底检测时，由于泥浆浮托作用信号出现漂移或局部信号异常时，应放慢下放速度，并在槽底返回时进行检测，用于对比验证分析。

地下连续墙施工中施工接头非常重要，若接头拔出过早，混凝土未完全凝固，容易侧向鼓出，造成相临槽段施工困难事故，所以必要时应对槽段端头部位进行检测。接头拔出后，便于和槽段体前后一起检测。

9.3.3 顶角测量法垂直度检测在钻具内进行，应在清孔完毕后，提钻前，顺钻具内管将测斜探头放至钻头上部的某一相对固定的位置，通过提升钻头，在不同孔深位置进行检测直至孔口。

顶角测量法测斜探头外径很小，在钻孔内直接测斜时应外加扶正器。在孔径检测完成后，了解了实际孔径的变化情况，可以合理选择扶正器，避免出现扶正器过小或过大。另外由于无法对桩孔明显扩径段进行测斜，通过孔径检测结果就可以避开，避免出现虚假的测斜结果。

模拟式测斜仪为电桥平衡式读数，先要检查电缆补偿，再孔口校零，下放测量过程中，注意检查刻度盘红线，如果漂移，则应检查绝缘性，重新检测。数字式测斜仪也应孔口校零，只有待其稳定后才能取值，不然检测过程会出现负值或影响检测数据的准确性。

顶角测量法测斜应自桩孔口向下进行检测，反之就有可能因探头受到电缆的牵引而无法完全接触桩孔壁，使顶角检测值偏小而产生误差。测点宜等间距均匀布置，测点间距过大会影响测试的全面性。提出“在接近桩孔底位置检测最后一个测点”，是为了避免现场测试时沉渣过厚，可能造成测斜装置发生偏斜，使测得的角度不真实；如果在钻杆内倾斜，测斜装置完全进入钻头时可能会卡在钻头中无法提升，因此，本条并不强求必须把最深的测点放在桩孔最底部。桩孔的垂直度以最后一个测点的顶角值为桩孔底顶角值进行计算。

若桩孔垂直度检测超标，为保证检测精度，应重复检测，二次检测结果误差应小于 1%，否则应查明原因，再次检测，可以取其中二次误差小于 1% 的检测结果的平均值作为最终检测结果。三次检测结果误差均大于 1%，仪器设备应重新标定。

9.3.4 泥浆和沉渣的界面并非泾渭分明，常常泥浆裹夹着沉渣，从下到上颗粒由粗到细，由稠到稀逐步过渡渐变，沉渣的界面较模糊。因此，即使使用仪器测量，也带有一定的误差和经验性。

沉渣厚度的测量误差，与沉渣和原状土的差异有关，沉渣和持力层强度差距较大，相对检测误差较小；而沉渣和持力层强度差距较小，相对检测误差较偏大。对可能产生的误差，需要检测人员根据情况合理评估。

天津地区钻孔灌注桩成孔沉渣检测有重锤法、电阻率法、探针法。施工单位沉渣检测基本采用重锤法，检测单位主要应用电阻率法，少数也在应用近几年发展起来的探针法。

当孔底泥浆较稠时，重锤在下沉到一定深度后，钢丝绳因其自重因素，还会不断下滑，会使操作者错误判断沉渣已符合规范要求。在这种情况下，应注意测绳下滑的刻度，若达到孔深量测数值时，应二次提升重锤到一定高度，并用力上下抖动，当有较强的沉坠感时，让重锤自由下落到沉渣顶面，拉直测绳，对照测绳读数。重锤法通过孔深测试深度减去平底锤下落至沉渣顶面的深度间接推算沉渣厚度的方法，只有沉渣测试起算标高与孔深测试起算标高一致，才能保证推算出的沉渣厚度正确。

电阻率法检测沉渣厚度时，将沉渣探头提升后自由下落，目的是使探头能够穿过沉渣层，同一场地内同一持力层的前 1~2 个孔沉渣检测时，可反复按不同落距提升探头，宜从 1.0m 开始，以后按 30cm~50cm 逐级增加落距，直到落距增加时，进入沉渣的深度基本不再增加为止，以此确定同一条件下，沉渣测定仪自由下落高度。另外，倾角传感器在检测过程中应基本铅直，如果开始倾角过大，可拉动连接线，纠正其倾角。

探针法沉渣测定仪在一个探头上集成了探针伸缩装置、探针压力传感器（或电流表）和探头倾角传感器。检测时，其底部的浮盘被沉渣层的顶面阻止，在主机中的程序控制下，机械探针将从浮盘中心处的圆孔中伸出，并穿过沉渣层，到达原状土层表面，此时探针受阻，压力值增大，探头的倾角暂时变化很小；当探头倾角值逐渐增大，压力值会逐渐减小。综合压力曲线和探头倾斜角度曲线的变化来给出沉渣厚度的检测结果。

9.4 检测数据的处理和分析

9.4.1 孔口滑轮经过一段时间的使用后会因磨损造成轮径变小，垂吊探头的电缆因长期张拉会变形，均给深度检测带来误差，为此应定期将井口滑轮、电缆及记录仪组成的深度检测系统送交计量检测机构进行系统检定，修正采集系统中的孔深系数，以保证检测精度。

9.4.2 接触式仪器法的检测结果是各个机械臂各自检测结果的平均值，对孔径非轴对称变化的桩孔检测时存在一定的误差。

9.4.3 圆心拟合法的工作原理：采用接触式仪器法进行孔径检测时，记录各机械臂的方位及角度，在桩孔中各深度进行拟合、插值形成一条由拟合成的圆心连成的空间曲线；再将该空间曲线拟合成空间直线，通过此直线相对重力方向的倾斜角度推算垂直度（如图 1 所示）。

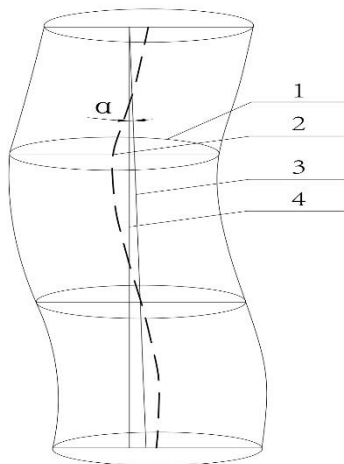


图1 圆心拟合法计算垂直度原理示意图

1—孔径轮廓线；2—孔径中心线；3—中心拟合线；4—铅垂线
圆心拟合法计算垂直度的简要原理如下：

灌注桩桩孔在每个深度下的截面可以看作是一个圆，若圆的圆心为 O ，则在空间坐标系中，圆心的集合可以表达为下式：

$$O, (x_i, y_i, z_i) \quad (i=1, 2, 3 \dots n) \quad (1)$$

对于空间坐标系中的离散点集 $(x_i, y_i, z_i) \quad (i=1, 2, 3 \dots n)$ ，可以根据最小二乘原理拟合一条空间直线 l ，若该直线与铅垂线的夹角为 α ，其相对于铅垂线的斜率为 k ，则 $k = \tan \alpha$ 。

9.4.4 沉渣厚度检测时，取检测数据的平均值为最终检测结果，可避免偶然误差，真实反映孔（槽）底的沉渣状况。

9.4.5 钻孔灌注桩成孔、地下连续墙成槽检测属施工过程检测，其结果是否达到规范或设计要求关系到下一工序能否进行，因此需要现场及时提交检测结果，作为最终检测结果的检测结果表中，应该有现场检测人员的亲笔签字，以代表检测机构对检测结果负责，否则无效。为了保证检测结果的准确无误，检测结果表除了有一名检测人员签字以外，需要有其他检测人员校核签名。

10 自平衡法

10.1 一般规定

10.1.1 自平衡法适用于传统静载荷试验条件受限时的基桩竖向承载力检测。“传统静载荷试验条件受限”是指传统静载荷试验方法难以实施的大直径、大吨位、狭窄场地、基坑底部、逆作法、水上等基桩检测情况。

10.1.2 自平衡静载荷试验中,有时会因桩身缺陷、桩身截面突变处应力集中或桩身强度不足造成桩身结构破坏,故对于大直径灌注桩,建议在检测前后对试验桩进行声波透射法完整性检测,为分析桩身结构破坏的原因提供证据。

10.1.4 因初次抽样检测数量有限,当抽样检测中发现承载力不满足设计要求时,应会同有关各方分析和判断桩基整体的质量情况,如果不能得出准确判断、为补强或设计变更方案提供可靠依据时,应扩大检测。扩大检测数量宜根据地基条件、桩基设计等级、桩型、施工质量变异性等因素合理确定。倘若初次检测已基本查明质量问题的原因所在,则不宜盲目扩大检测,对于没有条件采用自平衡扩大检测时,可按现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 相关条款进行。

10.1.5 采用两组荷载箱,一组放在近桩端处,一组放在桩身平衡点以上处,将桩分成三段,可分别测出下端极限端阻力和中、上段桩的极限侧摩阻力。试验时,组成荷载箱的千斤顶缸套和活塞之间产生相对滑移,荷载箱处的混凝土被拉开,会对桩身结构有所损伤,荷载箱宜设置在桩的有效使用长度以下。

10.1.6 对于在工程桩上完成的试验,由于抗压桩荷载箱埋设在设计桩端标高以上,为确保测试后桩正常使用,施工单位应对抗压桩测试时荷载箱部位产生的缝隙进行注浆处理。荷载箱处进行注浆后的强度应满足设计要求。

10.2 检测仪器设备

10.2.2 荷载箱是一种特制的加荷装置，是基桩自平衡法静载荷试验的关键设备，需按基桩类型、截面尺寸、检测要求、施工工艺、加载能力等进行订制生产，使用前应经法定计量单位进行系统检定，现场不得拆卸或重新组装。本条从荷载箱的生产、检定及耐压性等方面做了基本的规定，目的是为保证荷载箱的使用质量。荷载箱最大双向加荷值不应小于预估单桩最大加荷值的 1.2 倍是为了保证荷载箱在加至最大加荷值时仍处于荷载最优发挥区间，不至于在最大加荷时出现加压费力现象。对荷载箱的行程规定是为了保证桩身位移能达到本规程要求的终止加载条件的最大位移。

10.2.3 本条对荷载测量所用仪表的准确度做了要求，目的是为了保证试验中压力值真实、可靠。当油路工作压力较高时，有时会出现油管爆裂、接头漏油、油泵加压不足造成荷载箱加压受限、压力表在超过其 3/4 满量程时的示值误差增大等现象。所以，应当控制最大加荷时的油压，选用耐高压、工作压力大和量程大的油管、油泵和压力表。

10.2.4 对试验过程中位移观测系统所采用的仪器、仪表的性能、测量误差、分度值/分辨力做了要求，目的是为了保证位移检测数据真实、可靠，使各种人为或外界的影响降到最低限度。

10.3 现场检测

10.3.1 荷载箱埋设位置应根据岩土工程勘察报告进行估算。为保证平衡点估算的准确性，应选择距试验桩最近的勘察孔资料进行计算，并根据剖面反映的地层起伏做适当调整。

荷载箱埋设位置：受检桩为抗压桩，极限端阻力小于预估极限侧阻力，荷载箱放置在桩身平衡点处，使上、下段桩的极限承载力基本相等，以维持加载；极限端阻力大于预估极限侧阻力时，荷载箱置于桩端，根据上段桩和下段桩反力的相差值采取桩顶配重；受检桩为抗拔桩时，荷载箱直接置于桩端，桩端处无法提供

需要的反力，应通过加深桩长增加侧摩阻力或利用桩端后注浆工艺增大桩端阻力及侧摩阻力。

荷载箱的埋设位置是一个重要的关键技术，埋设位置可根据下列公式计算：

$$Q_{uu}=Q_{ud} \quad (10.3.1-1)$$

$$Q_{uu}=\sum \lambda_i \psi_{si} q_{si} u l_i+G_1+G_2 \quad (10.3.1-2)$$

$$Q_{ud}=u \sum \psi_{si} q_{sik} l_i+\psi_p q_{pk} A_p \quad (10.3.1-3)$$

下段桩桩身范围内的土层厚度之和，即为荷载箱距桩端的距离。

式中：

Q_{uu} ——上段桩极限加载值(kN)；

Q_{ud} ——下段桩极限加载值(kN)；

q_{sik} ——桩侧第 i 层土极限侧阻力标准值，对扩底桩变截面以上 $2d$ 长度范围不计侧阻力(kPa)；

q_{pk} ——极限端阻力标准值(kPa)；

u ——桩身周长(m)；

l_i ——桩周第 i 层土的厚度(m)；

G_1 ——荷载箱上部桩的自重(kN)；

G_2 ——设计桩顶以上超灌高度的重量、空桩段泥浆或回填土自重及桩顶配重，地下水位以下应取浮重度计算(kN)；

ψ_{si} 、 ψ_p ——大直径桩侧阻力、端阻力尺寸效应系数，按表 10.3.1 取值；

根据天津市已完成十几个工程实例上百根桩的检测数据分析，黏性土、粉土取 0.8，砂土取 0.7 计算出的平衡点位置，在最终加载条件下，可以保证约 90% 的试验桩上、下段桩的承载力充分发挥，能较准确地反映桩的极限承载力。

表 10.3.1 大直径灌注桩侧阻力尺寸效应系数 ψ_{si} 、端阻力尺寸效应系数 ψ_p

土类型	黏性土、粉土	砂土、碎石土
ψ_{si}	$(0.8/d)^{1/5}$	$(0.8/d)^{1/3}$
ψ_p	$(0.8/D)^{1/4}$	$(0.8/D)^{1/3}$

注：当为等直径桩时，表中 $D = d$ 。

λ_i —抗拔系数，黏性土、粉土取 0.8，砂土取 0.7。

10.3.2 荷载箱必须埋设在桩的截面中心，以防产生偏心轴向力。当荷载箱位移方向与桩身轴线方向夹角小于 1° 时，可以保证荷载箱所发出力的 99.9% 作用在桩身轴线上，其偏心影响很小，可忽略不计。

灌注桩钢筋笼在荷载箱位置断开，上段钢筋笼的主筋与荷载箱的上部顶面或上部加强箍牢固焊接在一起，下段钢筋笼的主筋与荷载箱的底面或下部加强箍牢固连接在一起，连接必须满足强度要求，以避免施工过程中荷载箱脱落。当荷载箱和下段钢筋笼重量较大，仅仅靠钢筋笼主筋与荷载箱顶底面或加强箍的连接强度不能承受荷载箱和下段钢筋笼重量时，可分别在顶底面主筋焊接位置设 L 型加强筋。

设置喇叭状导向钢筋的作用是为了保证灌注成桩时导管能顺利通过荷载箱，避免导管上下移动对荷载箱产生碰撞，从而影响荷载箱的工作质量。

上部桩钢筋笼与下部桩钢筋笼之间的连接强度过大的话会导致荷载箱无法打开，根据以往工程经验，连接强度小于荷载箱预估最大加载值的 1/10 能够保证荷载箱正常工作。

10.3.3 位移杆（丝）是基桩自平衡法静载荷试验中重要的位移传递系统，目的是将位移传递到地面，以便检测人员安装仪表进行记录。为保证测量达到足够精度，对位移杆（丝）进行了规定。位移杆（丝）设置在护套管中，护套管宜采用内径不小于 50mm 的钢管或镀锌管。护套管应与钢筋笼焊接牢固并保证垂直，且分

别与荷载箱焊接，焊缝应满足强度要求，护管应密封，确保不渗漏。

10.3.4 对位移测量仪表的最少数量进行了规定，当桩径较大时宜增加位移测量仪表。每组 2 个时采用对称布置，每组 3 个时采用品字型布置，每组 4 个时采用按钢筋笼周长平均布置。在桩顶布置一组位移测量仪表，起到辅助监测荷载箱工作状态的作用。

为了保证位移检测数据真实、可靠，应减少外界因素对位移测量结果的影响。自平衡法静载荷试验检测过程中，地面变形远小于锚桩法静载荷试验，因此试桩和基准桩之间的中心距离按行业现行标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 中锚桩法静载荷试验要求执行。

10.3.5 如果仪器设备工作状态不正常，其检测结果肯定失真，因此检测机构应保证检测所用仪器设备在有效检定期内，检测前，检测人员应对检测所用仪器设备进行检查调试，确认其工作状态正常方可进行相应的检测工作。

10.3.6 桩身混凝土强度不足，试验时可能引起桩身损伤或破坏，为分清责任，承载力检测前桩身混凝土强度应达到设计强度。桩基施工过程中不可避免地扰动桩周土，降低土体强度，引起桩的承载力下降，以高灵敏度饱和黏性土中的摩擦桩最明显。随着休止时间的增加，土体重新固结，土体强度逐渐恢复提高，桩的承载力也逐渐增加。成桩后桩的承载力随时间而变化的现象称为桩的承载力时间效应，软土地区这种效应尤其突出。时间效应的变化规律一般是初期增长较快，随后渐慢，待达到一定时间后趋于相对稳定，其增长快慢和幅度除与土性和类别有关，还与桩的施工工艺有关。

天津地区主要以黏性土、粉土、粉砂组成，滨海地区还分布有大量软土，基桩是典型的摩擦桩，根据天津市静载荷试验经验，灌注桩从成桩到开始试验休止时间不应少于 25 天是比较合理的。对采用后注浆施工工艺的桩，应同时满足注浆后的休止时间。

10.3.7 慢速维持荷载法，是我国公认且已沿用至今的基桩静载荷试验方法，在本市进行基桩自平衡法静载荷试验只能采用慢速维持荷载法。

10.3.8 试验加载卸载及位移观测参考了本规程中第 4 章单桩竖向抗压静载荷试验加卸载及位移观测的规定。

10.3.9 在试验过程中，运用终止加载条件分别对上、下两段桩的测试情况进行判断，只要满足其中一个终止加载条件之一，即可终止加载。对于抗拔桩的自平衡法静载荷试验终止加载情况，按本条上段桩位移的规定进行判定。

10.4 检测数据的处理和分析

10.4.1 绘制各类曲线是为了方便帮助判定极限承载力。同一工程中，同型试桩曲线纵坐标和横坐标的绘制比例应相同，这样可以使曲线图结果直观，便于比较。

10.4.2 上段桩极限加载值 Q_{uu} 和下段桩极限加载值 Q_{ud} 的确定参考了本规程中第 4 章单桩竖向抗压（抗拔）极限承载力的确定方法。

10.4.4 单桩竖向抗压试验时，荷载箱埋设在设计桩端标高以上，自平衡法静载荷试验时荷载箱上部桩身自重和有效桩顶以上空桩段内的物体自重方向与桩侧阻力方向一致，故在判定桩侧阻力时应当扣除。本法测出的上段桩摩阻力方向是向下的，与常规摩阻力方向相反。传统加载时，侧阻力将使土层压密，而该法加载时，上段桩侧阻力将使土层减压松散，故该法测出的摩阻力小于常规摩阻力，国内外大量的对比试验已证明了该点。

目前国外对该法测试值如何得出抗压桩承载力的方法也不相同。有些国家将上、下两段实测值相迭加作为单桩抗压极限承载力，这样偏于安全、保守。有些国家将上段摩阻力乘以 1.5 再与下段桩迭加而得单桩抗压极限承载力。

我国将向上、向下摩阻力根据土性划分，对于黏性土，向下摩阻力的 0.6~0.8 为向上摩阻力；对于砂土，向下摩阻力的 0.5~0.7 为向上摩阻力。

根据天津地区工程实践经验，对于黏性土，向下摩阻力的 0.8 为向上摩阻力；对于砂土，向下摩阻力的 0.7 为向上摩阻力较适宜。

泥浆比重宜选择现场实测值，当无实测值时，泥浆比重按 1.1~1.25 选取。

10.4.5 抗拔试验桩，荷载箱埋设在设计桩端处，测出的上段桩极限加载值应扣除设计桩顶以上超灌高度的重量、空桩段泥浆或回填土自重。

自平衡法静载荷试验加载方式是桩底托桩，传统抗拔静载荷试验是桩顶拔桩，两种加载方式中，桩顶拔桩摩阻力最小。应根据实际情况通过相近条件的比对试验确定 γ_2 ，根据相关论文中室内单桩渗水力模型试验结果，表明不同的加载部位和加载方向对于桩的侧阻力的大小、分布和发展过程有重要的影响，试验中桩底托桩与桩顶拔桩的侧摩阻力之比为 1.1。因此，为保证安全，对于抗拔桩， γ_2 取值不应小于 1.1。

10.4.6 施工后为验收提供依据的工程桩检测的单桩竖向抗压承载力的统计方法基本按《建筑地基基础设计规范》（GB50007）的规定执行，因为验收检测本身是通过小样本来推断总体，样本容量愈小，可靠度愈低，则给工程使用带来的风险越大。而影响单桩承载力的因素复杂多变，当一批受检桩中有一根桩承载力过低，若恰好不是偶然原因造成，则该验收批一旦被接受，就会增加风险。因此规定极差超过平均值的 30%时，首先应分析、查明原因，结合工程实际综合确定。

例如：同一条件下 5 根试桩的承载力检测值依次为 800、950、1000、1100、1150kN，平均值为 1000kN。单桩承载力最低值和最高值的极差为 350kN，超过平均值的 30%，此时不得将最低值 800kN 去掉后面 4 个值取平均，也不得同时去掉最低和最高值后取中间 3 个值的平均。应查明是否出现桩的质量问题或场地条件变异。若低值承载力出现的原因并非偶然的施工质量造成，按照本例建议采用下列方法进行统计：

- 1、计算 n 根试桩实测极限承载力平均值 $Q_{um}=1000\text{kN}$ ；

$$Q_{um} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{ui} \quad (10.4.6-1)$$

2、计算标准差 $\sigma_f = 137\text{kN}$;

$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{ui} - Q_{um})^2 / (n-1)} \quad (10.4.6-2)$$

3、计算变异系数 $\delta = 0.137$;

$$\delta = \sigma_f / Q_{um} \quad (10.4.6-3)$$

4、计算统计修正系数 $\gamma_s = 0.87$;

$$\gamma_s = 1 - (1.704 / \sqrt{n} + 4.678 / n^2) \quad (10.4.6-4)$$

5、计算标准值 $Q_{uk} = 870\text{kN}$;

$$Q_{uk} = \gamma_s Q_{um} \quad (10.4.6-5)$$

此外，对桩数小于或等于 3 根的柱下承台，或试桩数量仅为 2 根时，应采用低值，以确保安全。对于仅通过少量试桩无法判明极差大的原因时，可增加试桩数量。

10.4.7 单桩竖向抗压承载力特征值是按单桩竖向抗压极限承载力标准值除以安全系数 2 得到的，综合反映了桩侧、桩端极限阻力控制承载力特征值的低限要求。

11 桩身内力测试

11.1 一般规定

11.1.1 通过内力测试可解决如下问题:对竖向抗压静载荷试验桩,可得到桩侧各土层的分层抗压侧阻力和桩端支承力;对竖向抗拔静荷载试验桩,可得到桩侧土的分层抗拔侧阻力;对水平静荷载试验桩,可求得桩身弯矩分布,最大弯矩位置等;对需进行负摩阻力测试的试验桩,可得到桩侧各土层的负摩阻力及中性点位置;对打入式预制混凝土桩和钢桩,可得到打桩过程中桩身各部位的锤击拉、压应力。灌注桩桩身轴力换算准确与否与桩身横截面尺寸有关,成孔工艺对不同地层条件的适应性不同,因此对成孔质量无把握或预计桩身将出现较大变径时,应进行灌注前的成孔质量检测。

11.2 检测仪器设备

11.2.1 测试方案选择是否合适,一定程度上取决于检测技术人员对试验要求、施工工艺及其细节的了解,以及对振弦、光纤和电阻应变式传感器的测量原理及其各自的技术、环境性能的掌握。对于灌注桩,传感器的埋设难度随埋设数量的增加而增大,为确保传感器埋设后有较高的成活率,重点需要协调成桩过程中与传感器及其电缆固定方式相关的防护问题;为了确保测试结果可靠,检测前应针对传感器的防水、温度补偿、长电缆及受力状态引起的灵敏度变化等实际情况,对传感器逐个进行检查和自校。当需要检测桩身某断面或桩端位移时,可在需检测断面设置位移杆,也可通过滑动测微计直接测量。

11.3 现场检测

11.3.8 滑动测微计测管的体积较大，其埋设数量一般根据桩径的大小以及桩顶以上的操作空间决定:对灌注桩，宜对称埋设不少于 2 根；对预制混凝土桩，当埋设 1 根测管时，宜将测管埋设在桩中心轴上。对水平静荷载试验桩，宜沿受力方向在桩两侧对称埋设 2 根测管，测管可不通长埋设，但应大于水平力影响深度。

12 锚杆抗拔试验

12.1 一般规定

12.1.1 此条对本章的“锚杆抗拔试验”的试验检测内容与适用范围进行了明确的规定，对后续各节的内容与范围提出了统一的要求，也是为后续各节条款奠定了基础。首先确定了本章的“锚杆抗拔试验”，主旨就是针对“基础锚杆”的抗拔试验与锚固质量检测，因此为了便于描述，本规程将“基础锚杆”统一简称为“锚杆”，这是和其他标准中的“锚杆”术语与“锚杆抗拔试验”含义所不同的地方；规程中的“锚杆抗拔试验”主要包括了基本试验、验收试验、持有荷载试验，并与现行的国家与行业标准同样都是一致的。蠕变试验和锚固质量检测可按照国家与行业标准执行，锚固质量检测通常也都是优先采用了方便快捷和无损的声波反射法，实际上关于锚固质量检测还有一个较可靠的方法是钻探取芯法，鉴于钻探取芯法对锚固体有一定的破坏性，实际应用不多，并且与本规程第十章的钻芯法基本一致，故本章没有单列为一节，但根据实际工程项目的试验检测需要，也可以参照本规程第十章或国家与行业的相关方法标准作为辅助检测手段使用。

12.1.2~12.1.4 中对试验条件、仪器设备、基础锚杆试验的一般要求做出了规定，总体内容与方法与 JGJ401 中的规定基本一致，也有部分内容还参考了 GB50007、JGJ476 等相关标准，体现了各个标准之间的融合性。在 12.1.2 条中的锚杆的试验检测分岩石锚杆与土层锚杆两大类，当锚固段设置在强风化、全风化岩时的锚杆应按土层锚杆进行试验检测；在 12.1.4 条中，为了确保试验的安全与可靠性，同时考虑到各个工程所处的环境差异，不便于制定出统一的标准去机械的执行，所以，在此增加了同条件养护试块实测强度满足要求作为开始试验检测的依据之一，使开始试验的时间更具有科学性和精准性；预留试块 3 组的目的是在标准养护达到 28 天时取一组试块进行抗压强度试验，通过同条件养护试块的抗压强度试验，了解锚固体的强度是否满足抗拔试验的要求。

在工程实践中，往往现场同条件的试块养护与室内的标准养护会存在一定的差异，因此，由于养护条件的差异，会造成恢复强度的不同，相差较大时容易引起误判，给试验操作与结果都会带来很不利的影响，这样可以通过强度试验得以避免；第二组试块用于在抗拔加载试验前进行的抗压强度试验，以掌握锚固体在现场试验前实际所达到的强度，便于指导试验与加载的控制；第三组试块属于预留样品，在锚固体强度发生争议或纠纷时，可以启用预留的备用样品进行评价与判定。在土层基础锚杆验收试验中，考虑到土层的强度与锚杆锚固体的强度相差甚远，所以在本规程中对土层基础锚杆的强度进行了适当的下调，改为“试验时注浆体强度在 10MPa 以上，且不低于设计强度的 70%和锚固段土层的总体极限抗拉强度”，与其他标准中的土钉锚杆试验条件相比，还是相对保守而合理的。

12.1.5~12.1.6 对试验检测测点的抽取位置和扩大检测等条件做出了规定，主要是参考了 JGJ401、国家与地方的现行标准，也是对前人工作的总结和积累，但在实际工程项目中可以结合的具体情况，与各方协商确定，但本规程中的扩大检测数量应属于最低数量要求，执行时应符合本条规定。

12.2 检测仪器设备

12.2.1 锚杆试验宜采用油压表读数或专用测力计计量荷载，采用百分表、千分表或位移传感器计量位移，所选用计量仪器的精度，必须满足本规程 12.2.1 条的要求。锚杆试验加荷装置一般采用高压油泵和空心千斤顶，加荷装置的额定压力和精度应满足本规程 12.2.1 条的要求。

加载反力装置的承载力和刚度应满足最大试验荷载的要求，加载时千斤顶施加在锚杆上的作用力方向应与锚杆同轴。本条属于基础锚杆抗拔试验与检测有关仪器的通用要求，与现有国家、行业与地方标准基本一致，都是对荷载、位移与声波反射的动测仪器

性能与参数特性提出了要求，工作中除了遵循本规定以外，还应与其他有关仪器设备的专有计量技术标准相结合使用。

12.2.2~12.2.6 该条主要是对仪器与设备的安装提出了明确的要求，由于现场安装对试验的过程与结果都会有很大的影响，为了保持试验的规范性与数据结果的一致性，所有国内的相关规范标准，都在大量计算与实践的基础上，对此做出了明确的规定，本章也同样进行了详细的规定，现场试验检测须严格执行。由于试验所需的反力是通过支座下的地基所提供的，所以在试验前的现场安装布置过程中，应考虑到施加于支座下的地基应力不宜大于地基承载力特征值的 1.5 倍。12.2.6 条在仪器设备的安装与拆卸中还需要有锚杆的张拉锁定与卸锚装置，锚杆张拉锁定装置与卸锚装置参照《锚杆检测与监测技术规程》JGJ401 的相关规定或中的 4.2.9 条执行。

12.3 现场检测

12.3.1 现场检测前的准备

1 要求在试验前须对锚杆、锚头的表观与内部锚固质量进行检查、检测和确认，以明确是否满足试验要求，并且，要具有足够的统计样本，能够使其具有试验的代表性。对于锚头表观与内部锚固质量有明显缺陷的锚杆，或因缺陷而不能满足试验条件或不具有代表性的锚杆，应予以替换不作为正常锚杆参与试验和结果评价；锚杆的锚固质量检测宜采用声波反射法进行，对检测有质量缺陷的锚杆，应对其进行 100%验收试验，以确认有缺陷锚杆的抗拔承载能力是否满足设计要求。

2 要求试验前应对锚固体养护的强度和施工对锚杆周围岩土扰动的恢复强度必须同时满足试验要求，其中，锚固体养护的强度应以同条件养护的试块无侧限抗压试验强度为准，施工对锚杆周围岩土扰动的恢复强度，按照以往施工与检测的对比统计经验，结合岩土的不同性质，以施工后各个岩土层的休止时间确定。

3 重点是对现场试验的作业面提出了准备要求,要求试验前需要对试验场地的作业面进行整理,以保证现场试验设备的安装能够顺利进行,这些准备工作是否充分将决定着试验能否顺利进行,也是现场试验过程中必不可少的环节,应满足试验的条件和要求。

12.3.2 本条主要对基本实验与验收试验的现场操作进行了详细的规定,由于基本试验与验收试验的操作方法基本相同,所以,为了避免过多的文字重复,本条将基本试验与验收试验的操作方法合在了一起进行编制,有特殊要求或不一致的地方,在条文中都进行了明确的区分,基本试验与验收试验总体的操作方法与国家、行业标准等都是是一致的,不影响数据结果和操作的统一性。

1 锚杆张拉和锁定是预应力锚杆施工的最后一道工序,也是检验锚杆性能最直观的方式。因此,基本试验中也应重视锚杆的张拉预紧工序。对张拉预紧、锚具的选型等方面进行控制,可满足锚杆张拉的要求。正式张拉前,取 $0.1\sim 0.2$ 倍设计拉力值对各钢绞线预紧十分重要,有利于减轻张拉过程中各钢绞线的受力不均匀性以及减小锚杆的预应力损失。当锚杆的钢绞线束数或组数为 n ,锚杆轴向拉力标准值为 N 时,单束(组)钢绞线的预紧荷载宜取 kN/n 的 $10\%\sim 20\%$ 。

2~4 款是关于初始荷载取值、加卸荷速度、锚头位移基准值测读的规定。

关于初始荷载的取值,钢筋锚杆宜取最大试验荷载预估值的 10% ;对钢绞线预应力锚杆,考虑到在解除预应力后钢绞线可能存在扭曲变形,需在更大的荷载作用下才可能基本消除钢绞线可能存在的扭曲变形,因此,将初始荷载增加至最大试验荷载预估值的 30% ,以确保钢绞线预应力锚杆试验数据的有效性。

5 补偿荷载整体张拉方法,优点是在最大试验荷载状态下,各组单元锚杆的理论荷载相等,有利于锚杆处于最佳受力状态,缺点是操作步骤多,要进行补偿荷载计算,当各单元锚杆的设计参数不同时,补偿荷载计算比较复杂。

6 关于锚杆位移相对稳定标准与第 7 款锚杆位移相对收敛标准,在现有行业与地方标准中有的偏松有的偏严,本规程结合本地区实际工程特点进行了调整。基本试验与验收试验多循环加卸载法的加载分级情况基本相同均按表 12.3.2-1 列出,二者的主要区别是:初始荷载与卸荷的首尾荷载不同,基本试验取最大试验荷载预估值的 10%,收试验取最大试验荷载预估值的 30%;另外就是观测时间和分级加荷的判定标准不同,基本试验是按第 6 款执行的是锚杆位移相对稳定标准,在每一循环的非最大荷载作用下,每级荷载持荷 5min,需要判稳,在每一循环的最大荷载作用下,判断位移变化达到稳定标准后,该循环方可卸载;验收试是按第 7 款锚杆位移相对收敛标准,在每一循环的非最大荷载作用下,每级荷载持荷 1min,不需要判稳,在每一循环的最大荷载作用下,判断位移变化达到收敛标准后,该循环方可卸载。

10 现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB50007 附录 M 规定岩石锚杆应连续 4 次(每次间隔 5min)测读的锚头位移增量均小于 0.01mm 才达到相对稳定标准,0.01mm 是百分表的读数精度,在现场试验时难以操作。本规程采用 30min 时间间隔的位移增量作为判别位移稳定标准的依据,有利于现场操作。

在实际工程中,锚杆抗拔试验终止加载一般对应下列三种情况:

1) 千斤顶的油压明显下降,即使油泵继续供油但荷载无法恢复到试验荷载水平,无法继续加载。

2) 千斤顶的油压基本稳定或通过油泵持续供油能保证千斤顶的油压基本稳定,在这过程中,锚头位移持续增加,随着时间的变化,或位移增量满足本条第 2)、3) 款的规定,或本级持荷时间满足本条第 4) 款的规定。

3) 实现了试验目的,如本条第 5) 款的情形,从而终止加载、开始卸载。

另一种特殊情况是千斤顶漏油等试验装置出现故障,终止试验,出现这种情况时,应重新试验。

12.3.3 2 规定初始荷载宜为锚杆设计锁定力值的 30%,目的是避免锚杆的实际持有荷载偏低,而难以测出其持有荷载;分级荷载宜为锚杆设计锁定值的 5%,目的是保证测得的持有荷载有较高的准确性。当采用本规程第 12.4.4 条第 2 款第 3) 项确定杆体持有荷载时,宜采用 0.5mm~1.0mm 塞尺插入锚具与承压板之间的间隙,判断锚头是否松动。

12.4 检测数据的处理与分析

12.4.3 提出的锚杆验收试验合格标准,主要参考《建筑工程抗浮技术标准》JGJ 476、《锚杆检测与监测技术规程》JGJ/T 401 的内容,结合天津地区实际情况与抗浮结构的变形特点,对拉力型或拉力分散型锚杆实测锚头弹性位移量上限值采取了从严的要求。

6 对系统锚杆的评价要求,由于本规程的第 12 章针对的基础锚杆,基础锚杆属于系统锚杆的一种主要基本形式,所以,本条编入该款后为通过试验数据对基础锚杆进行评判提供了必要的依据。

13 预制混凝土桩破坏性检测

13.3 现场检测及数据处理

13.3.3、13.3.4 钢筋/钢棒的抗拉强度、数量、直径、保护层厚度及螺旋筋直径，可利用先施工的 2m 以上长度的余桩经人工破碎后进行检测；若工地无余桩可利用，则应在工地上随机选取 3 节桩经人工破碎后检测。

13.4 检测结果的评价

13.4.1 目前预制混凝土桩种类较多，如方桩、管桩、竹节桩等；预应力、非预应力；所以破坏性检测项目及符合性判定宜按照预制混凝土桩进场质量证明文件中相应的产品标准要求或图集进行。

14 焊缝质量检测

14.1 一般规定

14.1.1 目前，预制混凝土桩接头多采用焊接方式，各节桩端板焊接的部位包括焊缝、熔合区和热影响区。多节预制混凝土桩接桩焊缝若出现不饱满等严重缺陷或偷工减料，轻则影响桩身完整性，低应变时域曲线会出现强烈反射，重则影响基桩承载能力。在工程事故中出现过接桩处点焊的案例，加强对多节预制混凝土桩接头焊缝质量的检测是非常必要的。

14.1.2 渗透法可用于检测预制混凝土桩焊接接头表面开口不连续缺陷，现场检测宜采用非荧光着色渗透检测；焊缝表面的开口不连续缺陷包括裂纹、重皮、折叠、气孔和未熔合等。

超声波法适用于母材壁厚不小于 4mm 的碳素结构钢和低合金高强度结构钢的钢板对接全熔透焊接钢桩对接接头的检测和先张法预应力管桩端板的焊接接头检测。

采用超声波法必须满足下列要求：

1 板厚大于 4mm 或需检测桩基焊接焊缝内部缺陷的焊缝；

2 焊缝表面修磨后不得有气孔，夹渣，焊渣，飞溅等缺陷。若焊缝及热影响区修磨光滑后被检表面有以上缺陷，则不符合超声波检测的要求，可采用表面检测。

15 孔内成像法

15.1 一般规定

15.1.3 有些标准中提出使用孔内成像法进行辅助验证或判断。

《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 要求“对设计等级高、地基条件复杂、施工质量变异性大的桩基，或低应变完整性判定可能有技术困难时，鼓励采用静载荷试验、钻芯、开挖、孔内摄像等直接法进行验证；对多节预制混凝土桩，接头质量缺陷等较常见的问题，在无可靠验证对比资料和经验时，低应变法对不同形式的接头质量判断尺度较难掌握，所以对接头质量怀疑时，宜采用低应变法与高应变法或孔内摄像相结合的方式进行检测验证；桩身或接头存在裂隙的预制混凝土桩可采用高应变法验证；预制空心桩可采用孔内摄像法验证；有条件时，可采用孔内摄像法辅助判断混凝土质量。”

15.1.4 一般情况下，初次抽样检测数量有限，孔内成像检测作为直接法，当检测条件满足，能够清晰成像，其结果与预期或已有检测方法相差较大时，说明施工中有预期之外的情况，或其他检测方法在此种条件下检测不适宜或有局限性，此时应扩大检测数量，具体检测数量宜根据设计登记、地基基础形式、地基条件、施工过程等因素综合确定。

15.2 检测仪器设备

15.2.2 孔内摄像设备精度差别比较大，精度高的仪器，有更高的分辨率、清晰度和更小的检测误差；精度低的仪器往往便携性较好，对于缺陷的定性观察也是较为直观、有效的辅助方式。需要对细微裂缝检测时，设备需要采用高精度定量检测设备。

孔内成像仪的标定宜在标定筒中进行，标定筒内部应标记已知宽度和间距的环状模拟缺陷。

15.3 现场检测

15.3.2 检测前的清孔是保证成像清晰准确的重要工作。但保护较好的钻芯孔不需要清洗，一些遇水软化土层中的钻孔不可清洗。

15.3.3 只有停止移动，并快速采集图像才能获得高清晰度的图像，因此对高精度成像，应暂时停止移动，并采用高速快门。

15.3.4 在现场记录中详细记录现场观察到的第一手情况，有助于后期定性地分析异常情况。

15.4 检测数据的处理与分析

15.4.1 影像处理主要是进行清晰度、畸变的调整。进行土层性状判断是，不建议进行色彩调整。缺陷尺寸、标尺比例等是反应缺陷尺寸的定量标准，不能进行调整。

15.4.2 对缺陷的定量，重点关注环向缺陷的占总周长的比例、平均宽度、最大宽度。其中平均宽度的计算，需要进行离散化，将缺陷划分若干个各自并取格子中间的宽度的总和，除以划分的格子数，即为平均宽度。

15.4.5 提交的视频文件格式包括：AVI、MP4、RA、RAM、MPEG、MPG、DAT 等；图像文件格式有：JPG、JPEG、TIF、GIF 等。

16 磁测井法

16.1 一般规定

16.1.1 磁测方法是由地球物理探测手段发展而来，它是以磁性体磁场的空间分布理论为基础，研究磁性体周围的磁场变化特征和分布规律，从而对磁性体空间分布性状作出分析判断。

钢筋笼、含有钢筋的建构筑物以及其他铁磁性物体均是铁磁性物质，在其周围均形成很强的磁异常。这是进行检测的地球物理前提条件。在测井中，每一个观测点所测得的磁场分量（无论是水平分量或是垂直分量）均是各种物质磁异常叠加的结果。

对于以研究钢筋笼长度为目的的磁测井法，钢筋笼形成的磁异常是检测的主要对象，而其他铁磁性物体等的磁异常均是检测时的干扰因素。如果干扰磁异常接近钢筋笼磁异常或比其更强时，目标磁异常被干扰磁异常掩盖，就不能用此种方法来确定钢筋笼长度。

16.2 检测仪器设备

16.2.1 每一观测点的磁场是由该点地磁场以及磁性物体磁化场叠加的结果。仪器测量范围 $-99999\text{nT}\sim+99999\text{nT}$ 能够满足我国任何一个地区的磁测工作要求。磁敏元件转向差小于 300nT 是保证磁测工作精度的最低要求。

16.2.2 本条是对井下探管的基本要求。

16.3 现场检测

16.3.1 钻孔布置要求同 16.3.2 条说明，注意只做磁测工作时 PVC 管上可以不打孔，在流砂层很厚的地区此点很重要。在流砂层很厚的地区流砂通过 PVC 管壁上小孔很快流入钻孔中，造成观测孔很快被淤填而不能完成计划的测试工作。用测试钻孔作为检测剖

面，测试孔离钢筋笼的远近显著影响磁异常形态，只有保持测试孔和钢筋笼相互平行，也即测试孔和钢筋笼的距离保持不变，且距离控制在 1m 之内，才有可能测得较理想的钢筋笼异常。因此，测试孔开孔位置尽量接近所测桩桩侧，并保证其垂直度。

16.3.2 检查钻孔或 PVC 管的畅通情况很有必要。磁测井法探头造价较高，钻孔或 PVC 管不畅通可能会卡管，一旦卡管就有可能造成不必要的经济损失，耽搁时间延误工期。

16.3.3 初步测量如发现钢筋笼长度与设计长度不符时，应分析原因并进行复测，以确认所测结果是客观、真实、可靠的，消除人为疏忽或仪器设备工作状态异常造成的不真实数据。只有测量数据是可靠的，分析结果才能正确。

16.4 检测数据的处理和分析

16.4.1 区域背景磁场值可从区域地磁图上查得，第四系一般无磁性或极弱磁性。钢筋笼长度检测的背景场应通过现场实测获得。现场检测时，施工现场堆放的各类建筑金属材料都会影响对于背景场的判断，因此现场检测的背景场值应为孔底无钢筋笼段的实测场值。

16.4.2 磁场深度与垂直分量（H-Z）数据曲线拐点位置对应的深度应为钢筋笼底端埋深，结合相关资料可确定钢筋笼长度。

17 旁孔法

17.1 一般规定

17.1.1 在实际工程中，常因工程管理原因未能及时对单桩进行低应变检测，导致承台和建筑物底板已灌注；也有需进一步查明既有建筑物、大桥墩台下桩的质量及完整性的情况。因此，在无法直接在桩头激震时，可利用与桩头相连的混凝土体（承台、混凝土台板）所激发的应力波，通过激发桩顶上方的承台，利用承台与桩产生的纵波透射至桩侧，由旁侧孔中的逐点向下移动的传感器接收，以此检测既有建筑物下基桩桩身长度，并可根据旁孔中检测到的透射波波速异常，对桩身缺陷部位和性质做出判断和描述，此方法称为旁孔法。

旁孔法，是利用在既有建筑物下混凝土灌注桩侧土中成检测孔，并在孔中利用传感器检测由桩顶既有结构体激发所产生的纵波沿桩身向桩底传播，在波的传播过程中除了在桩身遇到波阻抗和桩底反射外，同时有部分应力波向桩侧土进行透射，利用应力波在桩身传播和波透射的特征规律和异常，从而通过旁孔井中传感器来检测桩身透射波首波的时间规律判断桩身完整性的井中物探方法。

由于既有建筑基桩是隐蔽体，只能在桩顶上方的混凝土承台、柱或板处来激发应力波，被激发的应力波直接向桩身传至桩底，在桩身完整的条件下波到达桩身某一深度与其时间是波速的函数，当应力波在桩身中传至存在波阻抗的缺陷部位时，由于应力波在缺陷处波能量的吸收和损耗使之透射波到过井中传感器时间较正常混凝土慢，反映在首波往后移，而当应力波传至桩底向地层或嵌岩桩的沉渣透射时，由于土层波速远低于混凝土波速低而反映在波列图中的首波波列引成明显的拐点，由此可以根据波列的陡缓及拐点确定桩底的部位和嵌岩桩桩底的属性。由于旁孔法检测桩身完整性还不够成熟，尚需不断实践总结经验，所以本规程只

规定：“旁孔法适用于检测桩头隐蔽、桩体无法开挖、桩周附近可钻孔的基桩桩长”。

17.3 现场检测

17.3.1 要求旁孔与桩身平行，主要为减少计算实际桩长的误差角度考虑的，因此要求钻孔单位严格控制钻孔的垂直度，但在实际钻进过程中，钻孔垂直度难以完全达到规程要求，会在计算桩长时造成一定解释误差。

17.3.2 现场检测是旁孔法的关键环节，需确保信号的真实可靠，因其直接关系到成果的判断，因此首要有效激发应力波，现场往往没有较好的条件，如桩头与桩身在接近地表承台处，那就要有目的地选择激振最佳点，如开挖表土，在承台顶部或在主柱以及梁板桩顶中心投影点等。在测试过程中，正常的完整桩波形初至及斜率规律性好，因此对长桩可放宽到 0.5m~1.0m 一个测点，而对短桩、或者发现有异常的部位，桩端沉渣处应加密采样，减小采样间距，一般把测点加密到 0.2m~0.3m。而实时显示是为了现场可以对测试数据质量和检测结果进行初步评判。初步测量如发现基桩桩身长度与设计长度不符时，应分析原因，进行复测，主要是确认所测结果是客观、真实、可靠的，消除人为疏忽或仪器设备工作状态有问题造成的不真实数据。只有测量数据是可靠的，分析结果才能正确。

18 管波法

18.1 一般规定

18.1.1 本条规定了管波法的应用范围。

18.2 检测仪器设备

18.2.2 测试主机具备实时显示和记录接收信号时程曲线及时间剖面功能，能自动记录测点深度位置，可以实现实时记录、现场初判测试结果是否符合要求。

18.3 现场检测

18.3.1 管波法需要孔液耦合。孔液可为清水、浑浊水，及比重小于 1.1 的稀泥浆。孔内有套管时，测试段套管内外空间均应有孔液。当孔液比重大于 1.1 时，较稠的孔液可能影响检测效果，可冲稀孔液后再次进行检测。

18.3.6 检测前采用吊锤对中心孔进行检查目的是检查孔内是否有异物堵塞，便于提前对检测孔进行清理，防止检测过程中发现异常而影响检测。

18.4 检测数据的处理和分析

18.4.1 管波法实测数据为各个测点振动时程曲线组成的时间剖面。管波法采用波幅、波速、相位等动力学特征进行判断，故数据处理时，为避免损失动力学特征，不得进行测点记录道之间的振幅平衡处理。当存在直流零漂、低频或高频干扰时，可进行去除直流零漂、频率滤波等处理。

各测点的时程曲线采用相同的显示增益可保证不损失振幅变化等动力学特征。采用伪彩色时间剖面的显示形式可保证有较大的动态范围，在保证显示大信号的同时显示小信号。

18.4.2 管波法是透射法与反射法的叠加，其中的直达管波就是透射波。透射波能量是评价桩身质量、桩底沉渣和持力层岩土性状的重要指标。

根据 18.4.2-2 计算的直达波能量值 E_i 可能受反射波的影响，使用时可将不受反射波影响的测点的能量值作为 100%，其余测点的直达波能量值 E_i 可按乘以一个比例系数相应调整。这个比例系数大于 1.0。

例如下图中，处理软件自动计算的能量值为 100%的测点位于深度约 26.5m 处（横标对应 12.5ms），在直达管波的延续长度内，该处还叠加了孔底反射波，导致计算的能量值较大。考察本桩的时间剖面可以发现，深度 13m 至 22m 的测试段不受反射波影响，能量值稳定。这时，宜采用这一段的能量值平均值（横标对应 9.5ms）作为 100%。根据新的 100%值的横标（9.5ms），计算比例系数等于 $12.5\text{ms} \div 9.5\text{ms} = 1.32$ 。则其余测点的直达波能量值按乘以 1.32 计算，再判定的桩身混凝土缺陷。

18.4.3 *PSD* 值的大小可直观地反映能量值的变化速度。*PSD* 值越大，能量值随深度的变化越快。*PSD* 曲线的极值点对应能量值的突变点。

18.4.4 管波法确定的分层界面，其物理意义是垂直方向存在波阻抗差异的界面，包括突然变化界面和缓慢变化界面两种。突然变化界面往往会同时出现反射管波，是反射管波的出射点，同时也是直达波能量突变点，对应的 *PSD* 曲线出现一个极值点。缓慢变化界面往往不会出现反射管波，但其他界面来的反射管波穿过此界面时能量会发生变化，同时直达波能量也会发生变化。*PSD* 值的物理意义为直达波能量变化率，*PSD* 曲线的极值点就是直达波能量变化最快的点。

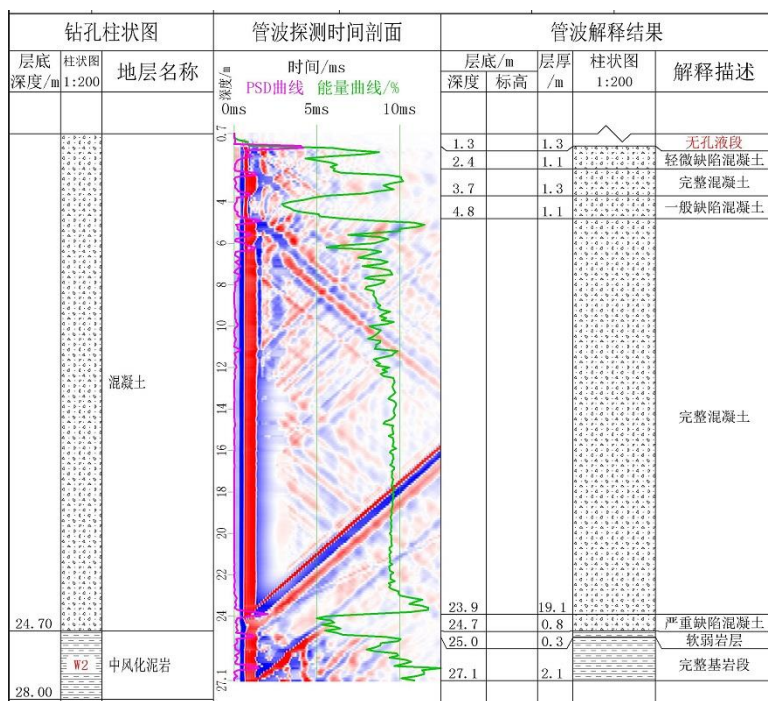
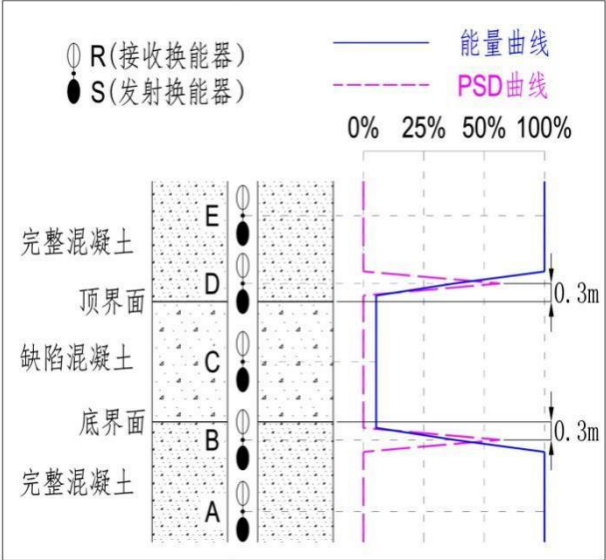


图 18.4.2 直达波能量值受反射波影响的记录实例

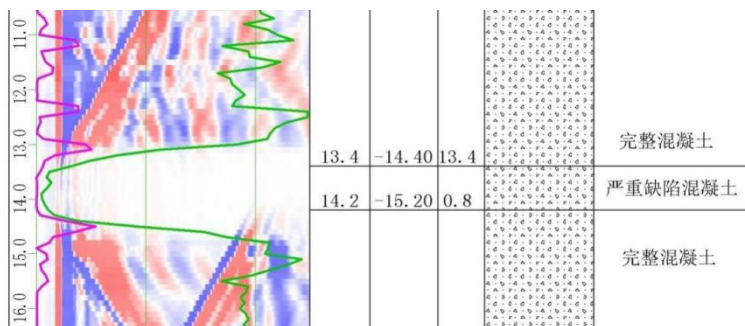
目前管波法采用固定测点间距、固定收发探头间距的自激自收观测系统，收发探头间距 0.6m，其记录点为发射换能器有效中心与接收换能器有效中心连线的中点。在这种条件下采集的管波探测时间中，波阻抗差异界面与 PSD 曲线极值点之间就有一个深度方向的偏移量，偏移量为收发探头间距 0.6m 的一半，即 0.3m。采用 PSD 曲线极值点进行偏移校正，就可准确求取分层界面深度。下图可说明这个偏移量。

自下而上逐点进行测试，在 A 点，发射、接收换能器均处于完整混凝土中，直达波能量强。在 B 点，发射换能器处于完整混凝土中，接收换能器处于分层界面处，直达波能量显著变弱，约为完整混凝土和缺陷混凝土直达波能量的平均值，PSD 值出现极

值点，缺陷混凝土的底界面位于 PSD 值极值点的上方 0.3m 处。在 C 点，发射、接收换能器均处于缺陷混凝土中，直达波能量弱。在 D 点，发射换能器分层界面处，接收换能器回到完整混凝土中，直达波能量显著变大，约为完整混凝土和缺陷混凝土直达波能量的平均值， PSD 值再次出现极值点，缺陷混凝土的顶界面位于 PSD 值极值点的下方 0.3m 处。在 E 点，发射、接收换能器均处于完整混凝土中，直达波能量回到正常值。



下图为灌注桩实测结果。自下而上测试， PSD 曲线在 14.5m 和 13.1m 处出现极值点。进行偏移校正后，严重缺陷混凝土的底界面深度为 14.2m ，顶界面深度为 13.4m 。顶底界面之间，直达波的能量为完整混凝土能量值的 25% 以下，故判定该段为严重缺陷混凝土。



18.4.5 按表 18.4.5 判定的是桩身混凝土完整性类别，用 1、2、3、4 类表示。这个类别不是桩身完整性类别。

18.4.7 按表 18.4.7 判定的结果是每根受检桩的桩身完整性类别，用 I 类桩、II 类桩、III 类桩、IV 类桩表示。单桩有两个及以上检测孔时，类别判定已经综合了多孔的结果。

按照行业惯例，桩身完整性为 I 类、II 类的桩满足验收要求；III 类桩应进一步确定桩身缺陷对桩身结构承载力的影响程度，也可直接进行工程处理；IV 类桩不满足验收要求，应进行工程处理。

本条仅判定 IV 类桩不满足验收要求，并不意味着 III 类桩满足验收要求。对于 III 类桩，应进一步确认桩身缺陷对桩身结构承载力的影响程度。

18.4.8 灌注桩桩底以上段存在轻微缺陷混凝土可不判定为桩底沉渣，但宜归入桩身缺陷。

18.4.9 同一受检桩有两个及以上检测孔时，桩底沉渣厚度采用加权平均值，可用一个数值来评价整根桩。从第 2 个厚度值开始加大权值，是考虑越厚的沉渣沉降越大。

《建筑桩基技术规范》JGJ94 和《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB50202 对混凝土灌注桩桩底沉渣厚度有明确规定，故要求管波法应给出每根受检桩的桩底沉渣厚度及检测结果评价。

行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ94 第 6.3.9 条规定：钻孔达到设计深度，灌注混凝土之前，孔底沉渣厚度指标应符合下列

规定：对端承型桩，不应大于 50mm；对摩擦型桩，不应大于 100mm；对抗拔、抗水平力桩，不应大于 200mm。

国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202 规定：端承桩沉渣厚度不应大于 50mm，摩擦桩沉渣厚度不应大于 150mm。

18.4.10 桩端持力层岩土性状分类依据《建筑地基基础设计规范》GB50007、《城市工程地球物理探测标准》CJJ/T 7 和管波法检测能力共同确定。表 18.4.10 中端承桩持力层适宜性判断依据来自《建筑地基基础设计规范》GB 50007。《建筑地基基础设计规范》GB50007 规定，嵌岩灌注桩要求按端承桩设计，桩端嵌入完整及较完整的硬质岩中，桩端以下 3 倍桩直径且不小于 5m 范围内应无溶洞、断裂破碎带和软弱夹层，且在桩底应力扩散范围内应无岩体临空面。

18.4.11 成桩前的桩端持力层岩土性状分类主要用于为桩基础设计和施工提供资料。

18.4.12 成桩质量评价应按单根受检桩进行，是指综合本受检桩的所有检测孔的管波检测结果。如有钻芯法资料可综合利用。如管波检测结果与钻芯检测结果存在矛盾时，宜在管波优先的前提下综合判定。

18.4.13 检测报告应根据管波法和相应的检测内容，出具检测结论。

为使报告内容完整和具有较强的可读性，报告中应包括基本工程信息、仪器设备信息、检测对象参数、地质资料、检测方法描述等常规内容的叙述，还应包含检测数据、图表和检测过程及异常情况描述等，出具与检测内容相应的检测结论。实际工作中，检测单位可根据需要适当调整报告内容。

