

深圳市工程建设地方标准

SJG

SJG 09 – 2024

建筑基桩检测标准

Testing standard of building foundation piles

2024-01-28 发布

2024-04-01 实施

深圳市住房和建设局 发布

深圳市工程建设地方标准

建筑基桩检测标准

Testing standard of building foundation piles

SJG 09 - 2024

2024 深 圳

前 言

根据《深圳市住房和建设局深圳市住房和建设局关于发布2020年深圳市工程建设标准制订修订计划项目（第一批）的通知》（深建标〔2020〕2号）的要求，为规范基桩检测方法和标准、确保基桩检测质量、为设计和施工验收提供正确可靠的依据，由深圳市房屋安全和工程质量检测鉴定中心会同有关质检、勘察、设计、科研等多家单位，依据法律、法规、规章，在现行相关技术标准的基础上，结合深圳市实际情况，认真总结、开拓创新，对《深圳市建筑基桩检测规程》SJG 09-2020进行了修订。

修订后的标准共分十一章，即 1.总则；2.术语和符号；3.基本规定；4.单桩竖向抗压静载试验；5.单桩竖向抗拔静载试验；6.单桩水平静载试验；7.高应变法；8.低应变法；9.超声法；10.钻芯法；11.界面钻芯法。

标准主要修订的技术内容如下：

1 基本规定中，取消混凝土预制桩抽样检测方法中高应变法需要静载试验对比的要求；调整了灌注桩抽样检测方法中荷载的划分界限；

2 单桩竖向抗压静载试验中，优化了基准桩、受检桩、压重平台支墩边（或锚桩）之间距离；

3 单桩竖向抗拔静载试验中，补充了受抗裂控制桩的终止试验条件和结果判定标准；

4 单桩水平静载试验中，规定了水平荷载的最小限值；

5 高应变法中调整了使用曲线拟合法和凯司法分析的比例；

6 低应变法中细化了激振要求；

7 超声法中补充了部分检测数据缺少时桩身完整性评价的规定；

8 钻芯法中调整了钻入持力层的深度，并将沉渣厚度计算改用加权平均方法，对嵌岩端承桩单桩竖向抗压承载力特征值做符合性评价；

9 补充、修改了原附录 G《界面钻芯管制安要点》的要求，并更名为第 11 章界面钻芯法；

10 增加了附录 B《抗拔试验反力系统连接装置》和附录 G《孔内成像法检测要点》；

11 补充了各方法检测仪器宜具备数据远程实时传输功能。

本标准由深圳市住房和建设局批准发布，由深圳市住房和建设局业务归口并组织深圳市房屋安全和工程质量检测鉴定中心等编制单位负责技术内容的解释。本标准实施过程中如有意见或建议，请寄送深圳市房屋安全和工程质量检测鉴定中心（地址：深圳市南山区铁二路工程质量大厦，邮编 518052），以供今后修订时参考。

本标准主编单位：深圳市房屋安全和工程质量检测鉴定中心

本标准参编单位：深圳市建筑工程质量安全监督总站

深圳市市政工程质量安全监督总站

深圳市建设工程质量安全检测鉴定学会

深圳市福田区建设工程质量检测中心

深圳市宝安区住房和建设事务中心

深圳市盐田区工程质量安全监督中心

中冶建筑研究总院（深圳）有限公司

深圳市建筑科学研究院股份有限公司

深圳市勘察研究院有限公司

深圳市勘察测绘院（集团）有限公司
深圳市工勘岩土集团有限公司
深圳市南山区建设工程质量监督检验站
铁科院（深圳）研究设计院有限公司
铁科院（深圳）检测工程有限公司
深圳市建研检测有限公司
太科技术有限公司
深圳市盐田港建筑工程检测有限公司
深圳市罗湖区建设工程监管和住房保障中心
深圳市光明区建设工程质量安全监督站
深圳市深汕特别合作区建设工程质量安全监督站
深圳市坪山区建设工程质量安全监督站
深圳市大鹏新区建设工程质量安全监督站

本标准主要起草人员：邓涌 杨立 张道修 蔡巧灵 肖兵
刘小斌 范少峰 孟照辉 刘强 黄建辉
李浩军 郭海轮 华洪勋 舒国志 王琦玮
袁广州 陈泽广 杜红劲 刁春德 王光辉
付文光 邹学琴 吴红梅 李强 杨振东
谢凡 熊睿佳 胡荣 张建东 刘勇
罗军 刘学 江辉煌 齐明柱 王金
张晓衡 于志敏 王伟 陈小龙
本标准主要审查人员：陈凡 徐天平 杨志银 钟冬波 刘小敏
黄用军 金亚兵
本标准主要指导人员：宋延 李伟雄

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	2
3	基本规定	5
3.1	检测目的	5
3.2	检测机构、人员、仪器设备	5
3.3	检测前的准备	5
3.4	检测项目、方法和抽检数量	6
3.5	验证检测与扩大抽检	8
3.6	检测结果与报告	8
4	单桩竖向抗压静载试验	10
4.1	一般规定	10
4.2	仪器设备	10
4.3	现场检测	11
4.4	检测结果	12
5	单桩竖向抗拔静载试验	14
5.1	一般规定	14
5.2	仪器设备	14
5.3	现场检测	15
5.4	检测结果	15
6	单桩水平静载试验	17
6.1	一般规定	17
6.2	仪器设备	17
6.3	现场检测	17
6.4	检测结果	18
7	高应变法	20
7.1	一般规定	20
7.2	仪器设备	20
7.3	现场检测	20
7.4	检测结果	21
8	低应变法	26
8.1	一般规定	26
8.2	仪器设备	26
8.3	现场检测	26
8.4	检测结果	27
9	超声法	29
9.1	一般规定	29
9.2	仪器设备	29

9.3	现场检测	29
9.4	检测结果	30
10	钻芯法	33
10.1	一般规定	33
10.2	仪器设备	33
10.3	现场检测	34
10.4	检测结果	35
11	界面钻芯法	38
11.1	一般规定	38
11.2	仪器设备	38
11.3	现场检测	38
11.4	检测结果	39
附录 A	抗压试验混凝土桩桩头处理要点	40
附录 B	抗拔试验反力系统连接装置	41
附录 C	高应变法传感器的安装要点	43
附录 D	试打桩与打桩监控	44
附录 E	声测管制安要点	46
附录 F	超声法中不同样本总数对应的系数	47
附录 G	孔内成像法	48
附录 H	芯样试件制作和测量	50
	本标准用词说明	51
	引用标准名录	52
	附：条文说明	53

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	2
3	Basic Requirements	5
3.1	Test Purpose	5
3.2	Laboratory, Tester and Equipments	5
3.3	Preparation For Test	5
3.4	Test Items, Selection of Test Method and Sampling Number	6
3.5	Verification and Expanded Test	8
3.6	Test Results and Test Reports	8
4	Vertical Compressive Static Load Test on Single Pile	10
4.1	General Requirements	10
4.2	Equipments	10
4.3	Field Test	11
4.4	Test Results	12
5	Vertical Uplift Static Load Test on Single Pile	14
5.1	General Requirements	14
5.2	Equipments	14
5.3	Field Test	15
5.4	Test Results	15
6	Lateral Static Load Test on Single Pile	17
6.1	General Requirements	17
6.2	Equipments	17
6.3	Field Test	17
6.4	Test Results	18
7	High-strain Dynamic Test	20
7.1	General Requirements	20
7.2	Equipments	20
7.3	Field Test	20
7.4	Test Results	21
8	Low-strain Integrity Test	26
8.1	General Requirements	26
8.2	Equipments	26
8.3	Field Test	26
8.4	Test Results	27
9	Ultrasonic Cross-hole Test	29
9.1	General Requirements	29
9.2	Equipments	29
9.3	Field Test	29

9.4	Test Results	30
10	Core Drilling Method.....	33
10.1	General Requirements	33
10.2	Equipments	33
10.3	Field Test	34
10.4	Test Results	35
11	Interface Coring Method	38
11.1	General Requirements	38
11.2	Equipments	38
11.3	Field Test	38
11.4	Test Results	39
Appendix A	Treatment of Head of Concrete Pile for Compressive Test	40
Appendix B	Connection Device of Reaction Force System for Uplift Test	41
Appendix C	Installation of Sensors for High-strain Dynamic Test	43
Appendix D	Trial Driven Pile and Monitoring in Driving	44
Appendix E	Installation of Preformed Access Yube.....	46
Appendix F	The Correlation Coefficient Table of The Sample Number for Ultrasonic Cross-hole Test	47
Appendix G	Key Points of Borehole Television Logging.....	48
Appendix H	Processing and Measurement of Core Specimens	50
	Explanation of Wording in This Specification	51
	List of Quoted Standards	52
	Addition: Explanation of Provisions.....	53

1 总 则

1.0.1 为了规范检测方法、确保检测质量，做到安全适用、技术先进、数据准确、评价正确，为施工验收及设计提供依据，制订本标准。

1.0.2 本标准适用于深圳市建筑工程、市政工程、城市轨道交通工程的基桩检测。水利等其他类型工程可参照执行。

1.0.3 基桩检测应考虑工程地质条件、桩型及施工质量可靠性、使用要求等因素，合理选择及搭配检测方法、确定检测数量，正确评价检测结果。

1.0.4 基桩检测除应符合本标准规定外，尚应符合国家、省、市的现行有关规范、标准的规定。

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 桩身缺陷 pile defects

桩身断裂、裂缝、缩颈、夹泥（杂物）、沟槽、空洞（蜂窝）、松散、破碎等现象的统称。

2.1.3 桩身完整性 pile integrity

对桩身的截面尺寸相对变化、材料密实性和连续性综合性状的反映。

2.1.4 承载力检测值 test-determined bearing capacity

对静载试验现场实测数据判读确定的承载力值，或对高应变法现场检测数据综合分析判定的承载力值。

2.1.5 静载试验 static load test

在桩顶部逐级施加向下的竖向荷载、向上的竖向荷载或水平荷载，测量桩顶部随时间发生与荷载作用方向同向的位移，确定单桩竖向抗压承载力、竖向抗拔承载力或水平承载力的检测方法。包括竖向抗压静载试验、竖向抗拔静载试验和水平静载试验。

2.1.6 高应变法 high-strain dynamic test

用重锤冲击桩顶，采集桩顶部的力和速度信号，通过波动理论分析、判定单桩竖向抗压承载力及桩身完整性的检测方法。

2.1.7 低应变法 low-strain integrity test

在桩顶施加低能量的冲击力，采集桩顶部速度信号，通过波动理论分析、判定桩身完整性的检测方法。

2.1.8 超声法 ultrasonic cross-hole test

在桩身混凝土中安装的声测管之间发射并接收超声波，通过分析超声波在混凝土传播中声学参数的相对变化，判定桩身完整性的检测方法。

2.1.9 钻芯法 core drilling method

用钻机钻取芯样，检测灌注桩桩身缺陷及位置、混凝土强度、桩长、沉渣厚度，鉴定桩端岩土层性状、判定桩身完整性的检测方法。

2.1.10 界面钻芯法 interface coring method

通过安装在钢筋笼上、短于钢筋笼的钢管，将钻具下放至管底钻进取样，检测桩端部分的混凝土性状、桩长、沉渣厚度，鉴定桩端岩土层性状的检测方法。

2.1.11 孔内成像法 borehole television logging method

采用成像设备对孔壁状态形成的数字图像进行判读，检测和评价桩身质量的方法。

2.2 符 号

2.2.1 抗力及材料性能

c ——桩身波速；

E ——桩身材料弹性模量；

EI ——桩身抗弯刚度；
 f_{cu} ——混凝土芯样试件抗压强度；
 f_{ru} ——岩石芯样试件单轴抗压强度；
 R_c ——凯司法判定的单桩竖向抗压承载力检测值；
 v ——混凝土中测线的声速；
 Z ——桩身截面力学阻抗；
 Z_x ——缺陷处的桩身截面力学阻抗；
 ΔR ——缺陷以上部位土阻力的估计值；
 ρ ——桩身材料质量密度；
 σ_p ——最大桩身锤击压应力；
 σ_t ——桩身锤击拉应力。

2.2.2 作用及作用效应

E_n ——桩锤实际传递给桩的能量；
 F ——锤击力；
 F_{max} ——实测的最大锤击力；
 H ——作用于地面的水平力；
 P ——混凝土、岩石芯样试件抗压试验测得的破坏荷载；
 Q ——单桩竖向抗压静载试验中的桩顶竖向荷载；
 s ——单桩竖向抗压静载试验中的桩顶竖向沉降；
 U ——单桩竖向抗拔静载试验中的桩顶上拔荷载；
 V ——质点运动速度；
 Y_0 ——水平力作用点的水平位移；
 ΔH ——水平力增量；
 ΔY_0 ——水平位移增量；
 δ ——单桩竖向抗拔静载试验中的桩顶上拔量。

2.2.3 几何参数

A ——桩身截面积；
 B ——支墩宽度；
 b ——矩形桩的边宽；
 b_0 ——桩身计算宽度；
 D ——桩端直径；
 D_c ——两根声测管外壁间的净距；
 d ——受检桩、锚桩的直径；芯样试件的平均直径；
 L ——测点下桩长；桩长；
 x ——桩身缺陷至传感器安装点的距离；桩身缺陷位置；
 z ——测线的深度；
 δ ——桩底沉渣厚度。

2.2.4 计算系数

J_c ——凯司法阻尼系数；
 K ——安全系数；
 m ——地基土水平抗力系数的比例系数；
 α ——桩的水平变形系数；
 β ——桩身完整性系数；
 λ_1 ——样本中不同样本总数对应的系数；
 ν_y ——桩顶水平位移系数；
 ξ ——混凝土芯样试件抗压强度换算系数；
 ψ ——岩石芯样试件高径比换算系数。

2.2.5 其他

- A_{cr} —— 声波波幅临界值；
 A —— 测线的声波波幅值（分贝值）；
 a_0 —— 声波 0dB 波幅值；
 a —— 测线的声波波幅值（电压值）；
 C_v —— 各测面声速、波幅或主频的变异系数；
 \bar{c} —— 桩身波速平均值；
 f_{cr} —— 声波主频临界值；
 k —— 相邻两测线声时的斜率；
 s_x —— 各测面声速、波幅或主频的标准差；
 t_1 —— 速度信号第一峰对应的时刻；
 t_x —— 缺陷反射波峰对应的时刻；
 t_r —— 速度信号第一峰与桩底反射峰间的时间差；速度波第一峰的上升时间；
 t_{rx} —— 速度信号第一峰与缺陷反射峰间的时间差；
 t_c —— 混凝土中测线的声时；
 t —— 测线的总声时；
 t_0 —— 系统延时；
 t' —— 耦合层延时；
 v_{cr} —— 声速临界值；
 X_a —— 声速、波幅或主频异常小值判断值；
 X_{cr} —— 声速、波幅或主频临界值；
 X —— 测线的声速、波幅或主频值；
 \bar{X} —— 各测面声速、波幅或主频的平均值；
 Δf —— 幅频曲线上整桩导致的相邻谐振峰间频差；
 $\Delta f'$ —— 幅频曲线上缺陷导致的相邻谐振峰间频差；
 Δt —— 相邻两测线声时的差值。

3 基本规定

3.1 检测目的

3.1.1 当对基桩采用本标准规定的静载试验、高应变法、低应变法、超声法、钻芯法和界面钻芯法检测，其检测结果应作为桩基施工质量验收的依据，也可作为桩基设计或工程质量问题处理的依据。

3.2 检测机构、人员、仪器设备

3.2.1 从事基桩检测的机构和人员，应具有规定的从业资质和任职资格。

3.2.2 用于基桩检测工作的仪器设备应定期进行计量检定或校准，并确保其使用时在有效的检定或校准周期内。

3.2.3 用于基桩检测工作的仪器设备应具有抗外界环境干扰的功能，使用时宜具有防止检测过程意外中断时的应急装置和措施。

3.3 检测前的准备

3.3.1 检测前应收集岩土工程勘察报告、桩基施工图、桩基施工记录及委托方的具体要求。

3.3.2 检测前应根据检测目的、现场条件和检测工作的可行性编制检测方案，内容应包括：工程概况、工程地质条件、设计要求、施工工艺、检测目的、依据的标准及检测方法、受检桩选取原则和检测数量、所用仪器设备、检测人员配置、检测程序、进度安排、所需的机械或人工、安全管理措施等。

3.3.3 工程桩验收检测时，受检桩的选取除应符合随机、均匀分布原则外，尚应符合以下规定：

- 1 施工过程中出现异常情况可能影响质量的桩；
- 2 位于建筑结构重要部位或设计有特殊要求的桩；
- 3 工程地质条件复杂多变区域的桩；
- 4 采用不同施工工艺或由不同施工单位施工的桩；

5 检测承载力时，应选取桩长较短、桩端持力层变形模量较小、桩端持力层岩石芯样单轴抗压强度较低、桩端存在软弱下卧层、桩身有缺陷的桩。

3.3.4 现场检测开始时间应符合下列规定：

1 当对灌注桩采用低应变法或超声法检测时，受检桩的混凝土强度或同条件养护试块强度不应低于设计强度的 70%，且不应低于 20MPa；

2 当对灌注桩采用钻芯法及界面钻芯法检测，受检桩的混凝土应达到 28d 龄期或同条件养护试块强度达到设计强度，当不需要检测混凝土强度时不应低于设计强度的 70%，且不低于 20MPa；

3 当对预制桩采用静载试验或高应变法检测单桩承载力时，受检桩从沉桩到开始检测的休止时间宜符合：砂土不少于 7d，非饱和黏性土不少于 15d，饱和黏性土不少于 25d，桩端风化土层具有遇水软化性时不应少于 25d；

4 当对灌注桩采用静载试验确定单桩承载力时，受检桩的混凝土应达到 28d 龄期或同条件养护试块强度达到设计强度。

3.3.5 工程桩宜先进行桩身完整性检测，再进行单桩承载力检测。

3.3.6 桩身完整性检测宜开挖至桩顶设计标高后进行。

3.4 检测项目、方法和抽检数量

3.4.1 工程桩验收检测应进行单桩承载力和桩身完整性抽样检测。

3.4.2 应根据表 3.4.2 规定的检测目的，结合各检测方法的适用范围和检测能力，考虑设计、工程地质条件、施工因素和工程重要性等情况合理选择基桩检测方法。

表 3.4.2 检测目的及检测方法

检测目的	检测方法
确定单桩承载力； 判定单桩承载力是否满足设计要求； 结合桩身应力（应变）测试测定桩侧、桩端阻力； 判定地基土水平抗力系数的比例系数； 验证高应变法的单桩竖向抗压承载力检测结果	静载试验
判定单桩竖向抗压承载力； 分析桩侧和桩端土阻力； 检测桩身缺陷及位置； 判定桩身完整性类别； 打桩监控	高应变法
检测桩身缺陷及位置； 判定桩身完整性类别	低应变法
检测灌注桩桩身缺陷及位置； 判定桩身完整性类别	超声法
检测灌注桩桩身缺陷及位置、混凝土强度、桩长、桩底沉渣厚度； 鉴定桩端岩土层性状； 判定桩身完整性类别	钻芯法
检测灌注桩桩端混凝土性状、桩长、桩底沉渣厚度； 鉴定桩端岩土层性状	界面钻芯法
辅助验证钻芯法或界面钻芯法检测结果的桩身缺陷及位置、桩长、桩底沉渣厚度和桩端岩土层性状； 检测管桩的桩身缺陷及位置	孔内成像法

3.4.3 试验桩的单桩竖向极限承载力标准值应通过单桩静载试验确定。当出现下列情况之一时，试验桩单桩承载力静载试验宜同时测试桩身应力（应变）：

1 设计要求；

2 场地工程地质条件复杂多变；桩端持力层设置在残积土、砂卵石层，或在泥岩、炭质页岩等软质岩以及破碎带，或在强风化（或全风化）的硬质岩层；

3 采用新桩型、新工艺；

4 承受上拔荷载的桩。

3.4.4 试验桩的单桩承载力静载试验数量应按设计要求或相关规范确定，且同类型桩不应少于 3 根；当工程桩总数小于 50 根时，不应少于 2 根。

3.4.5 单位工程混凝土预制桩、钢桩和灌注桩抽样检测使用的方法和抽检数量应分别按照表 3.4.5-1 和表 3.4.5-2 的规定执行。当分区、分段验收时，每个验收区段中各方法的最少检测数量均应符合表 3.4.5-1 和表 3.4.5-2 的规定。

表 3.4.5-1 混凝土预制桩、钢桩抽样检测方法及数量

检测方法	抽检数量
1 静载试验和（或）高应变法	静载试验（抗压、抗拔、水平）不应少于同类型桩总数的 1%，且不应少于 3 根（总数小于 50 根时，不应少于 2 根）； 高应变法不应少于同类型桩总数的 5%，且不应少于 5 根
2 低应变法	除钢桩外每承台不应少于本承台总桩数的 30%，且不应少于 1 根； 市政工程、城市轨道交通工程不应少于本承台总桩数的 50%，且不应少于 1 根

注：1 高应变法不适用于以下情况的桩基验收检测：地基基础设计等级为甲级、地质条件较为复杂的乙级、施工中产生上浮或偏位、未按第 3.4.3 条规定进行试验桩的单桩竖向抗压静载试验的工程。当现场无条件实施静载试验时，应由建设方组织各责任主体对检测方案进行论证；

2 混凝土预制管桩低应变法检测报告中宜附不少于 3 根桩的孔内成像法验证资料。

表 3.4.5-2 灌注桩抽样检测方法及数量

桩径 (mm)	荷载	检测方法	抽检数量
<800	\	1 静载试验	不应少于同类型桩总数的 1%，且不应少于 3 根（总数小于 50 根时，不应少于 2 根）
		2 低应变法和（或）超声法	每承台不应少于本承台桩总数的 30%，且不应少于 1 根； 长径比大于 30 的桩应采用超声法； 市政工程、城市轨道交通工程的桩应全数检测
≥800	承受上拔荷载、或承受水平荷载、或抗压承载力特征值 ≤20000kN	1 静载试验	不应少于同类型桩总数的 1%，且不应少于 3 根（总数小于 50 根时，不应少于 2 根）
		2 钻芯法	不应少于桩总数的 8%，且不应少于 5 根（总数小于 30 根时，不应少于 3 根）
		3 界面钻芯法	长径比大于 30 的抗压桩不应少于该类桩总数的 8%，且不应少于 3 根； 岩溶场地的抗压桩不应少于桩总数的 22%
		4 低应变法和（或）超声法	每承台不应少于本承台桩总数的 30%，且不应少于 1 根； 桩径大于 1600mm 的桩应采用超声法； 长径比大于 30 的桩应采用超声法； 市政工程、城市轨道交通工程的桩应全数检测并采用超声法
	抗压承载力特征值 >20000kN	1 钻芯法	不应少于桩总数的 15%，且不应少于 10 根
		2 界面钻芯法	长径比大于 30 的桩不应少于该类桩总数的 15%，且不应少于 5 根； 岩溶场地的抗压桩不应少于桩总数的 15%
3 低应变法和（或）超声法		每承台不应少于本承台桩总数的 30%，且不应少于 1 根； 桩径大于 1600mm 的桩应采用超声法； 长径比大于 30 的桩应采用超声法； 市政工程、城市轨道交通工程的桩应全数检测并采用超声法	

注：1 当桩径 ≥800mm 且抗压承载力特征值 ≤20000kN，现场无条件实施单桩竖向抗压静载试验时，可按桩径 ≥800mm 且抗压承载力特征值 >20000kN 的规定执行，应由建设方组织各责任主体对检测方案进行论证；

2 桩径大于 1600mm 或者长径比大于 30 的桩应全部安装声测管；

3 界面钻芯管应按不少于抽检数量的 1.5 倍安装。

3.4.6 对桩基工程中部分桩径大于 800mm、有效长度小于 6.0m 或长径比小于 5 的墩，应采用钻芯法检测，钻芯法抽检不应少于墩总数的 10%，且不应少于 5 个。

3.4.7 当大直径嵌岩端承桩现场无条件或受设备限制无法检测单桩竖向抗压承载力时，可采用钻芯法或界面钻芯法检测沉渣厚度和钻取桩端持力层岩石芯样，核验桩端承载力。检测报告应根据建设方组织各责任主体对检测方案作出的论证意见和桩端承载力核验结果，结合桩身完整性检测结果，给出单桩竖向抗压承载力特征值是否满足设计要求的结论。

3.5 验证检测与扩大抽检

3.5.1 当对检测结果需进一步确认时，可选择以下的方法进行验证检测：

- 1 桩身浅部缺陷可开挖验证；
- 2 预制桩的低应变法检测结果可采用高应变法验证，或采用孔内成像法验证；
- 3 灌注桩的低应变法或超声法检测结果可采用钻芯法验证；对难以钻进至预定位置的小桩径或大长径比桩宜采用静载试验验证；
- 4 钻芯法检测结果中的桩身完整性、沉渣厚度宜采用孔内成像法验证，也可在同一受检桩中增加钻孔验证，或采用静载试验验证；
- 5 高应变法检测结果中的单桩竖向抗压承载力可采用抗压静载试验验证。

3.5.2 验证检测后应对被验证的受检桩进行综合评价。

3.5.3 当基桩的检测结果不满足验收规范和设计要求时，建设单位应组织有关各方分析原因，根据综合质量评估和质量问题处理的需要制定扩大抽检方案。完成扩大抽检后，应给出各受检桩的综合判定结果。对存在严重缺陷的桩和静载试验后破坏的桩应按程序进行处理。

3.5.4 扩大抽检应符合下列规定：

- 1 可采用原抽检用的检测方法，或可靠性更高的检测方法；
- 2 低应变法或超声法应按检出的Ⅲ、Ⅳ类桩数量的3倍扩大抽检；
- 3 当静载试验、高应变法、钻芯法或界面钻芯法的检测结果不满足验收规范和设计要求时应扩大抽检，扩大抽检的数量不宜少于不满足设计要求桩数的2倍。当严重不满足时，扩大抽检的倍数不宜少于3倍。

3.6 检测结果与报告

3.6.1 当工程桩承载力检测采用静载试验、高应变法应给出单桩承载力检测值是否满足验收规范和设计要求的结论。

3.6.2 桩身完整性检测所采用的各检测方法应按各自规定进行桩身完整性类别判定，判定应符合表3.6.2的规定。

表 3.6.2 桩身完整性分类表

桩身完整性类别	分类原则
I类桩	桩身完整
II类桩	桩身有轻微缺陷，不会影响桩身承载力的正常发挥
III类桩	桩身有明显缺陷，对桩身承载力有影响
IV类桩	桩身有严重缺陷

3.6.3 钻芯法检测报告除应具有桩身完整性类别判定外，尚应包括桩身混凝土强度、桩底沉渣厚度、桩端岩土层性状是否满足验收规范和设计要求的结论。

3.6.4 界面钻芯法检测报告应包括桩端混凝土性状、桩底沉渣厚度、桩端岩土层性状是否满足验收规范和设计要求的结论。

3.6.5 检测报告应包含以下内容：

- 1 委托单位，工程名称、地点，建设、勘察、设计、监理和施工单位，基础、结构型式，高度、层数，设计要求，检测目的，检测依据，检测数量，检测日期等；
- 2 工程地质情况概述；
- 3 受检桩的桩型、截面尺寸、桩顶标高、桩号、桩位布置平面图和相关施工记录；
- 4 检测方法、仪器设备、检测过程叙述；

- 5 受检桩的实测与计算分析曲线、数据表格和汇总结果；
 - 6 与检测内容相应的检测结论。
- 3.6.6** 检测报告应准确、清晰、明确和客观地表述每一项检测的结果，结论应准确、用词应规范。
- 3.6.7** 报告结论页上应有主要检测人员、报告编写人、审核人、批准人的签字，应加盖检测专用章。

4 单桩竖向抗压静载试验

4.1 一般规定

- 4.1.1 本试验适用于确定单桩竖向抗压承载力。
- 4.1.2 工程桩抽样检测时，最大试验荷载不应小于设计单桩竖向抗压承载力特征值的 2.0 倍。
- 4.1.3 为设计提供依据的试验桩成桩工艺和质量控制标准应与后续工程桩施工拟采用的一致，试验宜加载至桩侧与桩端岩土阻力达到极限状态或达到桩顶轴向压力设计值。
- 4.1.4 当桩身埋设有测试桩身应力、应变、桩端应力的传感器或位移杆时，可同步测试桩侧的分层摩阻力、桩端阻力和相应截面位移。桩身内传感器和位移杆的埋设、数据处理宜符合现行深圳市地方标准《大直径灌注桩静载试验标准》SJG 87 的相关规定。

4.2 仪器设备

- 4.2.1 可根据现场条件选择压重平台反力装置、锚桩横梁反力装置或锚桩压重联合反力装置，并应符合下列规定：
 - 1 反力装置提供的反力不得小于最大试验荷载的 1.2 倍；
 - 2 反力装置的构件截面应满足加载前和最大试验荷载工况下承载力和变形的要求；
 - 3 验算锚桩的抗拔承载力、抗拔钢筋及预制桩接头的抗拉强度；采用工程桩作锚桩时，锚桩数量不宜少于 4 根，并应监测锚桩上拔量；
 - 4 压重应均匀稳固地放置于平台上，压重合力中心应与受检桩的几何中心重合，压重应在试验前一次加足；
 - 5 压重施加于地基的压应力不宜大于地基承载力特征值的 1.5 倍。
- 4.2.2 加载装置宜采用油压千斤顶。当采用 2 台及以上千斤顶加载时，千斤顶型号、规格应相同，各千斤顶应并联同步工作，千斤顶的合力中心应与受检桩轴线重合。各台千斤顶的起重量总和宜为最大试验荷载的 1.2 倍~2.0 倍。
- 4.2.3 荷载可采用放置在千斤顶上的荷重传感器直接测量，也可采用压力传感器测量油路的油压、通过千斤顶率定曲线换算成荷载。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。试验用荷重传感器、压力传感器、油泵、油管在最大试验荷载下的压力不宜超过各自规定最大工作压力的 80%。
- 4.2.4 桩顶沉降应采用位移传感器测量，其性能及安装应符合下列规定：
 - 1 测量误差应不大于 0.1%FS，分度值应优于或等于 0.01mm；
 - 2 直径或边宽大于 500mm 的桩，应对称安置 4 个位移传感器，直径或边宽小于或等于 500mm 的桩可对称安置 2 个位移传感器；
 - 3 基准梁应具有一定的刚度，梁的一端应固定在基准桩上，另一端应简支于基准桩上；
 - 4 固定和支撑位移传感器的夹具及基准梁应避免气温、振动及其他外界因素的影响。
- 4.2.5 沉降测量平面宜设置在桩顶以下 200mm 的位置，测点应固定在桩身上。对大直径灌注桩，可设置在桩帽顶面。
- 4.2.6 荷载测量和沉降测量应采用自动数据采集系统，应具有数据远程实时传输功能。
- 4.2.7 基准桩、受检桩、压重平台支墩边（或锚桩）之间的距离应符合表 4.2.7 的规定。

表 4.2.7 基准桩、受检桩、压重平台支墩边（或锚桩）之间的距离

反力装置	压重平台	锚桩横梁	压重锚桩联合
基准桩与受检桩中心距离	$\geq 3d$ 且 $>2.0\text{m}$	$\geq 3d$ 且 $>2.0\text{m}$	$\geq 3d$ 且 $>2.0\text{m}$
基准桩与压重平台支墩边距离	$\geq 1.5B$ 且 $>2.0\text{m}$	—	$\geq 1.5B$ 且 $>2.0\text{m}$
基准桩与锚桩中心距离	—	$\geq 3d$ 且 $>2.0\text{m}$	$\geq 4d$ 且 $>2.0\text{m}$
受检桩与压重平台支墩边距离	$\geq 1B$ 且 $>1.5\text{m}$	—	$\geq 1B$ 且 $>1.5\text{m}$
受检桩与锚桩中心距离	—	$\geq 3d$ 且 $>2.0\text{m}$	$\geq 3d$ 且 $>2.0\text{m}$

注： d 为受检桩、锚桩的直径，取其较大者； B 为支墩宽度。

4.3 现场检测

4.3.1 受检桩顶部宜高出试坑底面，试坑底面宜与桩基承台底标高一致。混凝土桩桩头处理应符合本标准附录 A 的规定。

4.3.2 对用作锚桩的灌注桩和有接头的预制桩，试验设备安装前宜对其桩身完整性进行检测。

4.3.3 符合下列情况之一的桩，应采用慢速维持荷载法：

- 1 为设计提供依据的试验桩；
- 2 灌注桩桩端持力层设置在残积土、砂卵石层，或在泥岩、炭质页岩等软质岩以及破碎带，或在强风化（或全风化）的硬质岩层；
- 3 采用静压工艺施工的预制桩；
- 4 验证检测或扩大抽检的桩。

4.3.4 同一类型的工程桩，应首先对施工质量可靠性低的桩采用慢速维持荷载法试验，数量不应少于静载试验总数量的 30%。当其试验结果满足验收规范和设计要求时，其余桩可采用快速维持荷载法试验。

4.3.5 加载、卸载方式应符合下列规定：

- 1 加载应分级进行，应逐级等量加载，分级荷载宜为最大试验荷载或预估单桩竖向抗压极限承载力的 1/10，第一次加载可直接从第二级开始；
- 2 卸载应分级进行，应逐级等量卸载，每级卸载量取加载时分级荷载的 2.0 倍；
- 3 加载、卸载时应使荷载传递均匀、连续、无冲击，每级荷载在维持过程中的变化幅度不得超过分级荷载的 $\pm 10\%$ 。

4.3.6 慢速维持荷载法试验应符合下列规定：

- 1 每级荷载施加后应按第 0min、5min、15min、30min、45min、60min 测读桩顶沉降量，以后每隔 30min 测读一次；
- 2 沉降相对稳定标准：1h 内的桩顶沉降量不超过 0.1mm；
- 3 当桩顶沉降达到相对稳定标准时，再施加下一级荷载；
- 4 卸载时，每级荷载维持 1h，按第 15min、30min、60min 测读桩顶沉降量后，即可卸至下一级荷载，卸载至零后维持 3h，应测读桩顶残余沉降量，测读时间为第 15min、30min，以后每隔 30min 测读一次。

4.3.7 快速维持荷载法试验应符合下列规定：

- 1 每级荷载施加后应按第 0min、10min 测读桩顶沉降量，以后每隔 10min 测读 1 次；
- 2 加载时每级荷载维持时间不应少于 1h，当最后 2 个 10min 内的桩顶沉降量均小于各自相邻的前 1 个 10min 内的桩顶沉降量时，可判定为沉降相对稳定；

- 3 当桩顶沉降达到相对稳定标准时，再施加下一级荷载；
 - 4 卸载时，每级荷载维持 15min，按第 5min、15min 测读桩顶沉降量；卸载至零后维持 2h，应测读桩顶残余沉降量，测读时间为第 5min、15min、30min，以后每隔 30min 测读一次。
- 4.3.8** 当出现下列情况之一时，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沉降量的 5 倍，且桩顶总沉降量已超过 40mm（大直径桩取 80mm）；
 - 2 某级荷载作用下，桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的 2 倍，且经 24h 尚未达到相对稳定标准；
 - 3 当荷载-沉降曲线呈缓变特征，可加载至桩顶沉降量达到 80mm~100mm；
 - 4 已达到反力装置最大反力的 0.85 倍或锚桩最大抗拔力；
 - 5 对抽样检测的工程桩，在最大试验荷载下桩顶沉降达到相对稳定标准。

4.4 检测结果

- 4.4.1** 应根据试验记录绘制竖向荷载-沉降（ $Q-s$ ）曲线、沉降-时间对数（ $s-lgt$ ）曲线。也可绘制其他辅助分析曲线。
- 4.4.2** 单桩竖向抗压承载力检测值可按下列方法综合分析确定：
- 1 某级荷载作用下 $Q-s$ 曲线发生明显陡降、或 $s-lgt$ 曲线尾部出现明显向下弯曲时取前一级荷载；
 - 2 出现本标准第 4.3.8 条第 2 款情况，取前一级荷载；
 - 3 当 $Q-s$ 曲线呈缓变特征、各分级荷载作用下桩顶沉降达到相对稳定标准时可根据沉降量确定，对直径小于 800mm 的桩，宜取 $s=40\text{mm}$ 对应的荷载；对直径大于或等于 800mm 的嵌岩桩，可取 $s=0.05D$ （ D 为桩端直径）且 $s\leq 60\text{mm}$ 对应的荷载；对直径大于或等于 800mm 的非嵌岩桩，可取 $s=0.05D$ （ D 为桩端直径）且 $s\leq 80\text{mm}$ 对应的荷载；对于长径比大于 40 的细长桩可考虑其桩身压缩变形；
 - 4 对抽样检测的工程桩，在最大试验荷载下，未出现以上三款情况、且桩顶沉降达到相对稳定标准时，可取最大试验荷载。
- 4.4.3** 试验桩的单桩竖向抗压极限承载力标准值、单桩竖向抗压承载力特征值的统计计算应符合下列规定：
- 1 对参加计算的单桩竖向抗压承载力检测值取算数平均值，当极差不超过平均值的 30% 时，可取其算术平均值为单桩竖向抗压极限承载力标准值；当极差超过平均值的 30% 时，应分析原因，结合桩型、施工工艺、工程地质条件、基础形式等工程具体情况综合确定单桩竖向抗压极限承载力标准值；不能明确极差过大的原因时，宜增加试桩数量；
 - 2 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。
 - 3 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%（ $K=2$ ）取值。
- 4.4.4** 检测报告除应符合本标准第 3.6.5 条和第 3.6.6 条的规定外，尚应包含以下内容：
- 1 受检桩桩位或者附近位置的工程地质钻孔柱状图或剖面图；
 - 2 锚桩的数量、截面尺寸、材料强度、配筋情况；
 - 3 加载反力装置种类，堆载法的堆载重量，锚桩法的反力梁布置平面图；
 - 4 加载、卸载方式，荷载分级；
 - 5 本标准第 4.4.1 条要求绘制的曲线及对应的数据表，与单桩竖向抗压承载力检测值确定有关的曲线及数据；

6 单桩竖向抗压承载力检测值、对应沉降及终止加载情况类别，评价是否满足验收规范和设计要求。

4.4.5 对于 $Q-s$ 曲线形态异常的受检桩，可结合试验前后桩身完整性检测结果，对其桩身质量和承载能力进行综合分析评价。当证实桩身存在缺陷时，应在检测报告中说明。

5 单桩竖向抗拔静载试验

5.1 一般规定

- 5.1.1 本试验适用于确定单桩竖向抗拔承载力。
- 5.1.2 工程桩抽样检测时，最大试验荷载取值应符合下列规定之一：
- 1 不应小于设计单桩竖向抗拔承载力特征值的 2.0 倍；
 - 2 当设计单桩竖向抗拔承载力特征值是由静载试验确定、且桩身主筋是按桩身抗拉强度设计配筋的工程桩，可取设计要求的最大试验荷载；
 - 3 当设计对最大上拔量限值有要求时可取设计提供的最大试验荷载。
- 5.1.3 为设计提供依据的试验桩成桩工艺和质量控制标准应与后续工程桩施工拟采用的一致，试验宜加载至桩侧岩土阻力达到极限状态或达到主筋拉力设计值。
- 5.1.4 当桩身埋设有测试桩身应力、应变的传感器或位移杆时，可同步测试桩侧的分层摩阻力和相应截面位移。桩身内传感器和位移杆的埋设、数据处理应符合现行深圳市地方标准《大直径灌注桩静载试验标准》SJG 87 的相关规定。

5.2 仪器设备

- 5.2.1 加载反力装置的支座反力可根据现场情况由天然地基或处理地基提供，也可由工程桩或设置的反力桩提供，应符合以下规定：
- 1 由天然地基或处理地基提供支座反力时，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；反力梁的支承面中心应与支座中心重合；
 - 2 由工程桩或反力桩提供支座反力时，反力桩顶面应平整并具有足够的强度。
- 5.2.2 加载反力装置的受力构件应满足 1.2 倍最大试验荷载下的承载力和变形要求，并符合下列规定：
- 1 受检桩主筋、连接钢筋和连接构件宜采用机械连接或焊接，应调直受检桩主筋使其受力均匀；
 - 2 反力装置可按照本标准附录 B 提供的方式和受检桩连接；
 - 3 空心桩也可采用混凝土填芯方式，宜采用和施工图一致的施工工艺，其配筋和填芯混凝土深度等要求应根据最大试验荷载验算或设计。
- 5.2.3 加载装置应符合本标准第 4.2.2 条的规定。
- 5.2.4 荷载测量方式及仪器的技术要求应符合本标准第 4.2.3 条和第 4.2.6 条的规定。
- 5.2.5 桩顶上拔量测量及其仪器的技术要求应符合本标准第 4.2.4 条和第 4.2.6 条的规定。
- 5.2.6 对于采用机械连接方式的预制桩，桩顶上拔量测量点宜设置在桩顶以下不小于 1 倍桩径的桩身上。对于采用填芯混凝土连接方式的 PHC 管桩可设置在桩顶面上；对于大直径灌注桩可设置在钢筋笼内侧的桩顶面混凝土上或由植入桩顶面的钢筋引出，测点距离桩身主筋不得少于 100mm，不得设置在受拉钢筋上。
- 5.2.7 基准桩、受检桩、支座（或反力桩）之间的距离应符合本标准表 4.2.7 的规定。

5.3 现场检测

5.3.1 单桩竖向抗拔静载试验宜采用慢速维持荷载法，也可采用多循环加载、卸载方法。慢速维持荷载法的加卸载方式、试验步骤应符合本标准第 4.3.5 条和第 4.3.6 条的有关规定。

5.3.2 当出现下列情况之一时，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桩顶上拔量的 5 倍，且桩顶总上拔量大于 15mm；

2 桩顶总上拔量超过 100mm；

3 对抽样检测的工程桩，在最大试验荷载作用下（或设计要求的上拔量限值时）桩顶上拔量达到相对稳定标准。

5.3.3 对裂缝控制等级为一级的工程桩，符合下列情况之一时，可终止加载：

1 在某级荷载作用下，桩顶上拔量大于前一级上拔荷载作用下上拔量的 5 倍；

2 在某级荷载作用下，桩身混凝土出现开裂；

3 已达到设计提供的最大试验荷载，桩顶上拔量达到相对稳定标准，且桩身混凝土未出现开裂情况。

5.3.4 试验桩除测量桩顶上拔量外，尚应对基准桩的位移进行监测、对桩周地面土体的变形情况及桩身外露部分裂缝开展情况进行观测记录。

5.4 检测结果

5.4.1 应根据试验记录绘制上拔荷载-桩顶上拔量（ $U-\delta$ ）曲线、桩顶上拔量-时间对数（ $\delta-\lg t$ ）曲线。

5.4.2 单桩竖向抗拔承载力检测值可按下列方法综合分析确定：

1 当出现本标准第 5.3.2 条第 1 款情况时，应取前一级上拔荷载；

2 当出现本标准第 5.3.2 条第 2 款情况时，可取终止试验前一级上拔荷载或设计要求上拔量对应的上拔荷载；

3 当出现本标准第 5.3.2 条第 3 款情况时，可取最大上拔荷载；

4 在某级荷载作用下 $U-\delta$ 曲线发生明显陡升、或 $\delta-\lg t$ 曲线斜率明显变陡或曲线尾部明显弯曲时，取前一级上拔荷载。

5.4.3 对裂缝控制等级为一级的工程桩，试验结果的判定应符合下列规定：

1 当出现本标准第 5.3.3 条第 1、2 款情况时，可判定单桩竖向抗拔静载试验结果不满足设计、验收要求；

2 当出现本标准第 5.3.3 条第 3 款情况时，可判定单桩竖向抗拔静载试验结果满足设计、验收要求。

5.4.4 试验桩的单桩竖向抗拔极限承载力标准值、单桩竖向抗拔承载力特征值可按本标准第 4.4.3 条的规定统计计算。

5.4.5 检测报告除应符合本标准第 3.6.5 条和第 3.6.6 条的规定外，尚应包含以下内容：

1 受检桩桩位或者附近位置的工程地质钻孔柱状图或剖面图；

2 受检桩桩径及配筋情况、传递上拔荷载的桩顶连接方式，提供支座反力的方式；

3 加载、卸载方式，荷载分级；

4 本标准第 5.4.1 条要求绘制的曲线及对应的数据表；为设计提供承载力依据的试验还包括基准桩的变形量、桩周地面土体的变形情况及桩身外露部分裂缝开展情况；

5 单桩竖向抗拔承载力检测值、对应上拔量及终止加载情况类别，并评价是否满足验收规范和设计要求；

6 对不允许带裂缝工作或对裂缝宽度有限制的受检桩，桩身外露部分裂缝开展情况观测记录。

6 单桩水平静载试验

6.1 一般规定

- 6.1.1** 本试验适用于桩顶自由的试验条件下确定单桩水平承载力、推定地基土水平抗力系数的比例系数。
- 6.1.2** 对工程桩抽样检测，可按设计要求的水平位移允许值或最大水平荷载值控制加载，但不应小于设计单桩水平承载力特征值的 1/0.75。
- 6.1.3** 为设计提供依据的试验桩成桩工艺和质量控制标准应与后续工程桩施工拟采用的一致，试验宜加载至桩顶水平位移达到 30mm~40mm（当桩侧上部为软土时取高值）或桩身结构破坏，试验桩不宜作为工程桩使用。

6.2 仪器设备

- 6.2.1** 反力装置提供的反力不得小于最大试验荷载的 1.2 倍，且具有足够的刚度；可由相邻桩提供试验反力。作用在受检桩上的试验荷载方向和工程桩实际承受的水平荷载方向（或设计要求的方向）应一致。
- 6.2.2** 水平推力加载装置宜采用卧式油压千斤顶，最大作用力宜为最大试验荷载的 1.2 倍~2.0 倍。水平力作用点宜与实际工程的桩基承台底面标高一致，作用方向应水平通过桩身轴线；千斤顶和受检桩接触处应安置球形铰支座。千斤顶与受检桩的接触处宜适当补强。
- 6.2.3** 荷载测量方式及仪器的技术要求应符合本标准第 4.2.3 条和第 4.2.6 条的规定。
- 6.2.4** 水平位移测量及其仪器的技术要求应符合本标准第 4.2.4 条和第 4.2.6 条的规定。
- 6.2.5** 应在水平力作用平面的受检桩两侧对称安装两个位移传感器；当需要测量桩顶转角时，尚应在水平力作用平面以上 50cm 的受检桩两侧对称安装两个位移传感器。基准桩宜设置在与作用力方向垂直的试桩侧面，基准桩与试桩净距不应小于 1 倍桩径、且不宜小于 2m。仪器设备布置宜符合现行深圳市地方标准《大直径灌注桩静载试验标准》SJG 87 的相关规定。

6.3 现场检测

- 6.3.1** 可在试验前、后采用低应变法检测受检桩的桩身完整性。
- 6.3.2** 加载方式宜根据工程桩实际受力特性选用单向多循环加载法或本标准第 4 章规定的慢速维持荷载法，也可按设计要求采用其他加载方法。当需要测量桩身内力时宜采用慢速维持荷载法。
- 6.3.3** 试验加载、卸载方式和水平位移测量应符合下列规定：
- 1 单向多循环加载法的分级荷载宜为预估单桩水平极限承载力或最大试验荷载的 1/10；每级荷载施加后，维荷 4min 后测读水平位移，然后卸载至零，停 2min 测读残余水平位移，至此完成一个加卸载循环；如此循环 5 次，完成一级荷载的位移测量，试验不得中间停顿；
 - 2 慢速维持荷载法的加卸载分级、试验步骤及稳定标准应符合本标准第 4.3.5 条和第 4.3.6 条的有关规定。
- 6.3.4** 当出现下列情况之一时，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可取高值；

3 对抽样检测的工程桩，水平位移达到设计要求的水平位移控制值，或达到设计要求的最大水平荷载且水平位移达到相对稳定标准。

6.4 检测结果

6.4.1 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，应绘制水平力-时间-力作用点的水平位移（ $H-t-Y_0$ ）曲线和水平力-位移梯度（ $H-\Delta Y_0/\Delta H$ ）曲线；

2 采用慢速维持荷载法时，应绘制水平力-力作用点的水平位移（ $H-Y_0$ ）曲线、水平力-位移梯度（ $H-\Delta Y_0/\Delta H$ ）曲线、力作用点的水平位移-时间对数（ Y_0-1gt ）曲线和水平力-力作用点的水平位移双对数（ $1gH-1gY_0$ ）曲线；

3 绘制水平力、力作用点的水平位移-地基土水平抗力系数的比例系数（ $H-m$ 、 Y_0-m ）曲线。

6.4.2 当桩顶自由且水平力作用位置位于地面处时，地基土水平抗力系数的比例系数可按下列公式计算：

$$m = \frac{(\nu_y H)^{\frac{5}{3}}}{b_0 Y_0^{\frac{5}{3}} (EI)^{\frac{2}{3}}} \quad (6.4.2-1)$$

$$\alpha = \left(\frac{mb_0}{EI}\right)^{\frac{1}{5}} \quad (6.4.2-2)$$

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} ）；

ν_y ——桩顶水平位移系数，由式（6.4.2-2）试算 α ，当 $\alpha h \geq 4.0$ 时（ h 为桩的人土深度）， $\nu_y = 2.441$ ；

H ——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（ $\text{kN}\cdot\text{m}^2$ ）；其中 E 为桩身材料弹性模量， I 为桩身换算截面惯性矩；

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， $b_0 = b + 1$ 。

6.4.3 单桩水平临界荷载可按下列方法综合分析确定：

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

2 取 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线或 $1gH-1gY_0$ 曲线上第一拐点对应的水平荷载值。

6.4.4 单桩水平承载力检测值可按下列方法综合分析确定：

1 取单向多循环加载法时的 $H-t-Y_0$ 曲线产生明显陡降的起始点对应的水平荷载；

2 取慢速维持荷载法时的 $H-Y_0$ 曲线发生明显陡降的起始点对应的水平荷载；或 Y_0-1gt 曲线尾部出现明显弯曲的前一级水平荷载；

3 取 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线或 $1gH-1gY_0$ 曲线上第二拐点对应的水平荷载；

4 取桩身折断或受拉钢筋屈服时的前一级水平荷载；

5 对抽样检测的工程桩在最大水平荷载作用下，未出现以上四款情况，且桩顶水平位移达到相对稳定标准时，可取最大试验荷载。

6.4.5 单桩水平承载力特征值的确定应符合下列规定：

1 当桩身不允许开裂或灌注桩的桩身配筋率小于 0.65% 时，取单桩水平临界荷载的 0.75 倍为单桩水平承载力特征值；

2 当桩身允许开裂或桩身配筋率不小于 0.65% 时，也可取桩顶标高处设计水平位移控制值所对应荷载的 0.75 倍、且不大于裂缝宽度控制要求；对水平位移敏感的建（构）筑物水平位移控制值取 6mm，对水平位移不敏感的建（构）筑物取 10mm；

3 对工程桩抽样检测当荷载已达到设计要求的最大试验荷载，且桩顶水平位移达到相对稳定标准时，可取最大试验荷载的 0.75 倍。

6.4.6 试验桩的单桩水平承载力特征值可按本标准第 4.4.3 条的规定统计计算。

6.4.7 检测报告除应符合本标准第 3.6.5 条和第 3.6.6 条的规定外，尚应包含以下内容：

1 受检桩桩位或者附近位置的工程地质钻孔柱状图或者剖面图；

2 受检桩的截面尺寸及配筋情况；

3 加载反力装置种类；

4 加载、卸载方式，荷载分级；

5 本标准第 6.4.1 条要求绘制的曲线及对应的数据表；

6 单桩水平承载力检测值、对应水平位移及终止加载情况类别，并评价是否满足验收规范和设计要求。

7 高应变法

7.1 一般规定

- 7.1.1 本方法适用于判定单桩竖向抗压承载力、检测桩身完整性及监控预制桩打桩过程。
- 7.1.2 对于大直径扩底灌注桩，不宜采用高应变法进行竖向抗压承载力检测。

7.2 仪器设备

- 7.2.1 检测仪器主要技术性能除应符合现行行业标准《基桩动测仪》JG/T 518 中 2 级标准的规定外，尚应具有信号显示、存储、分析和处理功能，宜具有数据远程实时传输功能。
- 7.2.2 桩的贯入度可采用精密水准仪等仪器测量。
- 7.2.3 锤击设备宜为自由落锤式，预制桩可利用打桩机械（导杆式柴油锤、振动锤除外），并应符合下列规定：
- 1 锤击设备应具有稳固的导向装置，重锤应采用铸铁或铸钢制作，材质均匀、形状对称、锤底平整，高宽（径）比不得小于 1.0；
 - 2 当采用在自由落锤上安装加速度传感器的方式测量锤击力时，重锤应整体铸造，高宽（径）比应在 1.0~1.5 之间；
 - 3 进行承载力检测时，锤重应大于设计单桩竖向抗压承载力特征值的 2.0%，当混凝土桩的桩径大于 600mm 或桩长大于 30m 时应大于 3.0%。当仅检测桩身完整性时，锤重应大于设计单桩竖向抗压承载力特征值的 0.3%。

7.3 现场检测

- 7.3.1 检测前准备工作应符合以下规定：
- 1 平整地面或开挖试坑使桩头露出高度应满足锤架、传感器安装的要求，找平桩头，使重锤中心线、桩头中轴线与桩身中轴线重合；
 - 2 桩头顶面应设置桩垫，宜采用 10mm~30mm 厚的木板或胶合板等匀质材料桩垫；
 - 3 对不能承受锤击力的桩头应在检测前进行处理，桩头处理应符合本标准附录 A 的规定；
 - 4 传感器的安装应符合本标准附录 C 的规定。
- 7.3.2 受检桩参数、传感器灵敏度系数、信号采集方式、采样频率和长度的设定及计算应符合下列规定：
- 1 测点下桩长和桩身截面面积设定应符合下列规定：
 - 1) 测点下桩长应是传感器安装点至桩底的距离；
 - 2) 对于预制桩，可根据建设、监理或施工单位提供的桩长和桩身截面面积设定；
 - 3) 对于灌注桩，宜根据建设、监理或施工单位提供的完整施工记录设定。
 - 2 混凝土桩桩身波速可结合经验或按同场地同类型已检桩的平均波速初步设定，现场检测完成后再作适当调整。
 - 3 桩身材料质量密度设定应符合下列规定：
 - 1) 离心成型预应力混凝土管桩应为 $2.55\text{t/m}^3\sim 2.60\text{t/m}^3$ ；
 - 2) 混凝土灌注桩应为 2.40t/m^3 ；
 - 3) 混凝土预制桩应为 $2.45\text{t/m}^3\sim 2.50\text{t/m}^3$ ；

4) 钢桩应为 7.85t/m^3 。

4 桩身材料弹性模量应按下列式计算：

$$E = \rho \cdot c^2 \quad (7.3.2)$$

式中：

E ——桩身材料弹性模量 (kPa)；

c ——桩身波速 (m/s)；

ρ ——桩身材料质量密度 (t/m^3)。

5 应变传感器和加速度传感器灵敏度系数应按检定或校准结果设定。

6 当在重锤上安装加速度传感器测量锤击力时，锤击力等于实测加速度与重锤质量的乘积；

7 信号采样长度应满足分析计算要求，采样时间间隔宜为 $50\mu\text{s}\sim 200\mu\text{s}$ 、采样点数不宜少于 1024 点。

7.3.3 现场检测应符合下列规定：

1 检测前应对仪器、电源、传感器、连线、接地情况及设定参数等进行全面检查，确认无误后方可进行检测；

2 检测时应实测单次锤击下桩的贯入度；

3 采用自由落锤实测时应重锤低击，最大锤击落距不宜大于 2.5m，单击贯入度宜在 2mm~6mm 之间；当仅检测桩身完整性时，宜采用轻锤，在能接收到桩底反射信号的前提下，可降低落距、减小桩垫厚度；

4 采用凯司法初步判断受检桩的单桩竖向抗压承载力；

5 试打预制桩与打桩监控应符合本标准附录 D 的规定；

6 预制桩承载力的时间效应应按本标准附录 D 的规定通过复打试验确定。

7.3.4 有效锤击次数应根据实测信号的质量、单击贯入度、桩顶最大动位移、桩身最大拉（压）应力、缺陷程度及发展趋势等情况综合确定。

7.3.5 检测时应及时检查信号质量，当出现下列情况之一时应进行检查、调整或停止检测：

1 信号异常，或打桩监控时波形紊乱、信号无规律；

2 四个通道测试信号不全；

3 传感器安装不良或出现故障；锤击严重偏心，两侧力信号幅值相差超过一倍；

4 力信号未归零；

5 测点处混凝土开裂；

6 桩身有明显缺陷并且程度在逐渐加剧。

7.3.6 对采用挤土工艺施工的受检桩，在检测前后均应测量桩顶标高，计算出每击下的贯入度，判断受检桩是否发生上浮。当确认有上浮情况时应取第一击信号进行分析计算。

7.4 检测结果

7.4.1 分析计算前应对所有信号进行定性检查、分析，观察各信号反映出的桩的承载性状、桩身缺陷程度及其发展趋势，选取锤击能量较大的 1 击或 2 击信号进行分析计算。

7.4.2 当出现下列情况之一时，其信号不得用作分析计算：

1 锤击严重偏心，两侧力信号幅值相差超过一倍；

2 测点处混凝土开裂或有严重塑性变形使力信号未归零；

3 四个通道测试信号不全。

7.4.3 分析计算前，可按下列方法确定桩身波速和桩身材料弹性模量：

1 当桩底反射信号明显时，可根据速度信号第一峰起升沿的起点到反射峰起升沿或下降沿的起点之间的时差与已知桩长确定波速（图 7.4.3）；

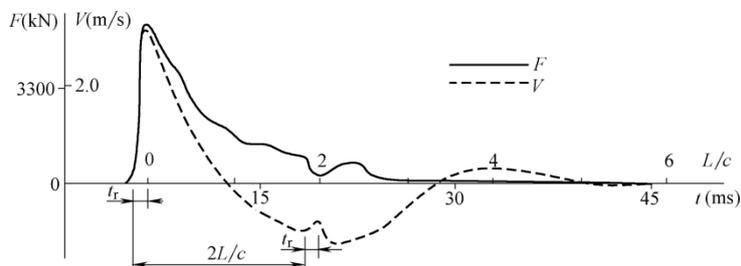


图 7.4.3 桩身波速的确定

2 当桩底反射信号不明显时，可根据桩长、波速的合理取值范围以及邻近桩的桩身波速等综合确定；

3 当确定后的桩身波速与原设定的桩身波速不一致时，应将桩身材料弹性模量和力信号的幅度作相应的调整，并应符合以下规定：

- 1) 对测点处原设定波速调整后，相应的桩身材料弹性模量应按本标准式（7.3.2）重新计算；
- 2) 采用应变传感器测量锤击力时，当原始力信号按速度单位存储，桩身材料弹性模量调整后尚应对原始实测力值进行校正；
- 3) 当在重锤上安装加速度传感器测量锤击力时，当桩身材料弹性模量或桩身波速改变时，不得对原始实测力值进行调整，但应扣除响应传感器安装点以上的桩头惯性力。

7.4.4 实测的力和速度信号第一峰起始段不成比例时，不得对实测力或速度信号进行调整。

7.4.5 判定单桩竖向抗压承载力检测值可采用实测曲线拟合法、凯司法。应选取有代表性的桩进行曲线拟合分析，拟合分析的桩数不应少于受检桩总数的 50%，且不得少于 5 根；其余受检桩可采用凯司法判定单桩竖向抗压承载力检测值。

7.4.6 采用实测曲线拟合法判定单桩竖向抗压承载力检测值应符合下列规定：

- 1 桩-土力学模型物理意义明确，应能分别反映桩和土的实际力学性状；
- 2 模型参数的取值范围应能限定，拟合分析选用的参数应在合理范围内；
- 3 拟合曲线时间段长度在 t_1+2L/c 时刻后延续时间不应小于 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；
- 4 各单元所选用的土的最大弹性位移 s_q 值不应超过相应桩单元的最大计算位移值；
- 5 拟合结束时土阻力响应区段的计算曲线与实测曲线应吻合，其他区段的曲线应基本吻合；
- 6 贯入度的计算值应与实测值接近。

7.4.7 采用凯司法判定单桩竖向抗压承载力检测值应符合下列规定：

- 1 桩径小于 800mm，桩身材质和截面基本均匀；
- 2 阻尼系数 J_c 宜根据同条件下静载试验结果校核，或在有相近工程条件下可靠对比资料后采用实测曲线拟合法确定 J_c 值。在同一场地地质条件相近，桩型、工艺、截面积相同的情况下， J_c 值的极差不宜大于平均值的 30%；

3 对于 t_1+2L/c 时刻桩侧和桩端土阻力均已充分发挥的摩擦型桩，可按下列凯司法公式的计算结果判定单桩竖向抗压承载力检测值：

$$R_c = (1 - J_c) \cdot \frac{1}{2} \cdot [F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] + (1 + J_c) \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[F\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) - Z \cdot V\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) \right] \quad (7.4.7-1)$$

$$Z = \frac{E \cdot A}{c} \quad (7.4.7-2)$$

式中：

R_c ——凯司法判定的单桩竖向抗压承载力检测值（kN）；

J_c ——凯司法阻尼系数；

t_1 ——速度信号第一峰对应的时刻（ms）；

$F(t_1)$ —— t_1 时刻的锤击力（kN）；

$V(t_1)$ —— t_1 时刻的质点运动速度（m/s）；

Z ——桩身截面力学阻抗（kN·s/m）；

A ——桩身截面积（m²）；

L ——测点下桩长（m）。

4 对于土阻力滞后于 t_1+2L/c 时刻明显发挥的宜将 t_1 延时，按式（7.4.7-1）对 R_c 值进行提高修正；

5 对于土阻力先于 t_1+2L/c 时刻发挥并产生桩中上部强烈反弹的，宜计入卸载回弹的土阻力，对 R_c 值进行减小修正。

7.4.8 当受检桩出现下列情况之一时，应采用静载试验进一步验证：

1 桩身存在明显或严重缺陷无法判定单桩承载力；

2 预制桩在多次锤击下承载力下降，触变效应明显；

3 单击贯入度大，桩底同相反射强烈且反射波峰较宽，侧阻力波、端阻力波反射弱，即信号表现出的竖向承载性状与桩周土分布情况明显不符；

4 嵌岩桩桩底同相反射强烈，且在 $2L/c$ 时刻后无明显端阻力反射；

5 本标准第 7.3.5 条第 5、6 款情况；

6 对本标准第 7.3.5 条第 1、2、3、4 款情况，经检查或调整后信号质量仍未改善而停止检测的；

7 对承受水平方向荷载的受检桩，采用高应变法检测桩身完整性后显示桩身缺陷对水平承载力有影响。

7.4.9 单桩竖向抗压承载力特征值应按单桩竖向抗压承载力检测值的 50% 取值。

7.4.10 桩身完整性判定应符合下列规定：

1 采用实测曲线拟合法判定时，拟合所选用的桩土参数应符合本标准第 7.4.6 条第 1 款和第 2 款的规定；根据成桩工艺，拟合时可采用桩身阻抗拟合或桩身裂隙、混凝土预制桩的接桩缝隙拟合；桩身完整性系数 β 等于缺陷位置处桩身截面力学阻抗与其上桩身截面力学阻抗的比值，按下式计算：

$$\beta = Z_x / Z \quad (7.4.10-1)$$

式中：

β ——桩身完整性系数；

Z_x ——缺陷处的桩身截面力学阻抗（kN·s/m）。

2 采用凯司法判定时，等截面桩在缺陷深度 x 以上部位的土阻力 ΔR 未出现卸载回弹时，

桩身完整性系数和桩身缺陷位置应分别按下列公式计算：

$$\beta = \frac{F(t_1) + F(t_x) + Z \cdot [V(t_1) - V(t_x)] - 2\Delta R}{F(t_1) - F(t_x) + Z \cdot [V(t_1) + V(t_x)]} \quad (7.4.10-2)$$

$$x = c \cdot \frac{t_x - t_1}{2000} \quad (7.4.10-3)$$

式中：

- x —— 桩身缺陷至传感器安装点的距离 (m)；
- t_x —— 缺陷反射峰对应的时刻 (ms)；
- ΔR —— 缺陷以上部位土阻力的估计值 (kN)，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，取值方法见图 7.4.10。

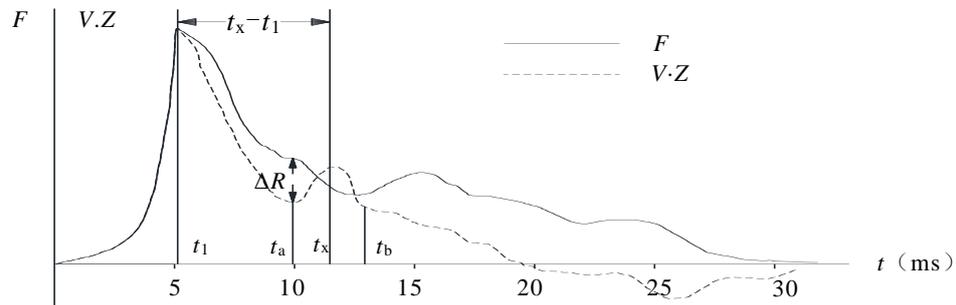


图 7.4.10 桩身完整性系数计算

3 受检桩的桩身完整性类别可按本标准表 3.6.2 和表 7.4.10 的规定结合经验综合判定。

表 7.4.10 桩身完整性分类表

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

7.4.11 出现下列情况之一时，受检桩的桩身完整性判定宜按工程地质条件和施工工艺，结合实测曲线拟合法或其他检测方法综合进行：

- 1 桩身有扩颈；
- 2 混凝土灌注桩桩身截面渐变或多变；
- 3 力和速度信号在第一峰附近不成比例，桩身浅部有缺陷；
- 4 锤击力信号上升缓慢；
- 5 等截面桩在缺陷深度 x 以上部位的土阻力 ΔR 出现了卸载回弹；
- 6 嵌岩桩桩底同相反射强烈，且在时间 $2L/c$ 后无明显端阻力反射。

7.4.12 最大桩身锤击拉应力、压应力和桩锤实际传递给桩的能量应分别按本标准附录 D 的相应公式计算。

7.4.13 检测报告除应符合本标准第 3.6.5 条和第 3.6.6 条的规定外，尚应包含以下内容：

- 1 受检桩桩位或者附近位置的工程地质钻孔柱状图或剖面图；
- 2 实测的力与速度信号，并标注有检测日期；
- 3 桩身波速、 J_c 值；

- 4 实测贯入度；
- 5 单桩竖向抗压承载力检测值，并评价是否满足验收规范和设计要求；
- 6 对采用实测曲线拟合法的包含拟合曲线、各单元桩-土模型参数、土阻力沿桩身分布图；
- 7 对用静载试验结果校核确定阻尼系数 J_c 的包含静载试验结果；
- 8 试打桩和打桩监控还应包含采用的桩锤型号、锤垫类型以及监测得到的锤击数、桩侧和桩端静阻力、桩身锤击拉应力和压应力，桩身完整性以及桩锤能量传递比随入土深度的变化。

8 低应变法

8.1 一般规定

- 8.1.1 本方法适用于检测混凝土桩的桩身完整性，检测桩身缺陷的程度及位置。
- 8.1.2 本方法的有效检测桩长范围应通过现场试验，根据桩底反射信息确定。

8.2 仪器设备

- 8.2.1 检测仪器主要技术性能除应符合现行行业标准《基桩动测仪》JG/T 518 中 2 级标准的规定外；尚应具有信号显示、储存和分析处理功能；宜具有数据远程实时传输功能。
- 8.2.2 瞬态激振设备应包括能激发宽脉冲和窄脉冲的手锤、力棒和锤垫，锤体可装有力传感器。

8.3 现场检测

8.3.1 受检桩应符合下列规定：

- 1 桩身强度应符合本标准第 3.3.4 条第 1 款的规定；
- 2 应凿除桩顶浮浆及松动部分，露出密实的混凝土，桩顶表面应平整、干净、无积水且与桩身轴线垂直，对于预应力混凝土管桩，当端板与桩身混凝土之间结合不紧密时，应对桩头进行处理；
- 3 桩头的材质、强度、截面尺寸应与桩身相同；
- 4 将桩顶表面上传感器安装点和激振点打磨成直径约为 100mm 且与桩轴线垂直的光滑平面；
- 5 当受检桩的桩侧与底板混凝土垫层浇筑成一体时，应确保垫层不对接收信号造成干扰。

8.3.2 传感器安装及选择激振点应符合下列规定：

- 1 安装位置应远离主筋，传感器应与桩顶面垂直，用耦合剂应粘结牢固，严禁采用手扶方式；
- 2 灌注桩的传感器安装点宜在距桩中心 $2/3$ 半径处，激振点应在桩中心；管桩的传感器安装点与激振点宜在 $1/2$ 壁厚处，且与桩中心连线形成的夹角为 90° 。

8.3.3 用手锤或力棒激振时激振方向应沿桩身轴线方向。应根据桩长、缺陷所在位置的深度，通过对比测试选择适当的手锤或力棒、调整激振脉冲宽度，宜符合下列要求：

- 1 当需要获取深部缺陷或长桩桩底的反射信号时宜采用宽脉冲；
- 2 当需要获取浅部缺陷、预制桩浅部水平裂缝或短桩桩底的反射信号时宜采用窄脉冲。

8.3.4 检测参数设定应符合下列规定：

- 1 设定桩长应为桩顶测点至桩底的施工桩长；
- 2 桩身波速可根据实测经验初步设定；
- 3 采样时间间隔（或采样频率）应根据桩长、桩身波速和频域分辨率合理选择，时域信号采样点数不宜少于 1024 点；
- 4 时域信号记录的时间段长度应在 $2L/c$ 时刻后延续不少于 5ms；
- 5 传感器的灵敏度系数应按检定或校准结果设定。

8.3.5 信号采集和筛选应符合下列规定：

- 1 采集前应对仪器、传感器、连线、接头等进行检查，确保检测系统各部分之间连接正常；
- 2 桩径小于或等于 800mm 时，应对不少于 2 个检测点采集信号；桩径大于 800mm 时，应不少于 3 个检测点；
- 3 每个检测点采集的有效信号数不宜少于 3 个，应对信号做叠加平均处理；
- 4 不同检测点及多次实测时域信号一致性较差时，应分析原因、增加检测点数量；
- 5 检测中应随时检查所采集信号的质量，信号应无零漂现象，幅值不应超过测量系统的量程；
- 6 检查判断实测信号反映的桩身完整性情况，据此决定是否需要进一步增加检测点、变换激振点和检测点位置。

8.4 检测结果

8.4.1 信号处理应符合下列规定：

- 1 当采用加速度传感器时低通滤波的截止频率不宜小于 2000Hz；
- 2 当桩底反射信号或深部缺陷反射信号较弱时，可采用指数放大，被放大的反射信号幅值不应大于速度信号第一峰幅值的一半，进行指数放大后的信号尾部应基本归零；指数放大的范围宜大于 $2L/c$ 的 $2/3$ ，指数放大倍数宜小于 10。

8.4.2 桩身波速确定应符合下列规定：

- 1 桩身波速可根据实测时域信号特征按下式计算：

$$c = \frac{2000L}{t_r} \quad (8.4.2-1)$$

也可根据实测频域信号特征按下式计算：

$$c = 2L \cdot \Delta f \quad (8.4.2-2)$$

式中：

- c ——桩身波速 (m/s)；
- L ——桩长 (m)；
- t_r ——速度信号第一峰与桩底反射峰间的时间差 (ms)；
- Δf ——幅频曲线上整桩导致的相邻谐振峰间频差 (Hz)。

- 2 桩身波速平均值可根据有代表性的若干根桩的桩身波速按下式计算：

$$\bar{c} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (8.4.2-3)$$

式中：

- \bar{c} ——桩身波速平均值 (m/s)；
- n ——参加桩身波速平均值计算的桩数， $n \geq 5$ ；
- c_i ——第 i 根桩的桩身波速，且 $|c_i - \bar{c}| / \bar{c}$ 不宜大于 5%。

- 3 当无法采用式 (8.4.2-1) 或式 (8.4.2-2) 计算确定时，桩身波速平均值可根据相同桩型及成桩工艺的其他桩基工程的实测值，结合桩身混凝土强度等级和骨料品种综合确定。

8.4.3 采用时域分析法时桩身缺陷位置应按下式计算：

$$x = \frac{1}{2000} ct_{rx} \quad (8.4.3-1)$$

采用频域分析法时应按下式计算：

$$x = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\Delta f'} \quad (8.4.3-2)$$

式中：

- x ——桩身缺陷位置（m）；
- t_{rx} ——速度信号第一峰与缺陷反射峰间的时间差（ms）；
- c ——桩身波速（m/s），无法确定时用 \bar{c} 代替；
- $\Delta f'$ ——幅频曲线上缺陷导致的相邻谐振峰间频差（Hz）。

8.4.4 受检桩的桩身完整性类别应结合缺陷位置和范围、实测信号衰减特性以及桩型、场地工程地质情况、施工工艺、施工记录，按本标准表 3.6.2 和表 8.4.4 的规定综合判定。

表 8.4.4 桩身完整性分类表

类别	时域信号特征	频域信号特征
I	2L/c 时刻前无缺陷反射波，桩底反射波明显，波速正常	整桩谐振峰排列基本等间距，其相邻频差 $\Delta f \approx c/2L$
II	2L/c 时刻前有轻微缺陷反射波，桩底反射波较明显，波速基本正常	整桩谐振峰排列基本等间距，其相邻频差 $\Delta f \approx c/2L$ ，轻微缺陷产生的谐振峰与整桩谐振峰之间的频差 $\Delta f' > c/2L$
III	2L/c 时刻前有明显缺陷反射波，其他特征介于 II 类和 IV 类之间	
IV	2L/c 时刻前有幅值很强的缺陷反射波或周期性反射波，无桩底反射波；或因桩身浅部严重缺陷使波形呈现低频大振幅衰减振动，无桩底反射波	缺陷谐振峰排列基本等间距，相邻频差 $\Delta f' > c/2L$ ，无整桩谐振峰；或因桩身浅部严重缺陷只出现单一谐振峰，无整桩谐振峰

注：1 当混凝土预制桩在接桩位置处有很强反射波，或在非接桩位置处有轻微反射波时桩身完整性类别应判定为 III 类；

2 当桩身波速明显低于波速参考值时应判定为 III 类，当桩身波速明显高于波速参考值的应校核实际桩长或采用钻芯法验证。

8.4.5 当实测信号无桩底反射波出现时，应结合场地工程地质条件、桩型、施工工艺、检测经验等因素综合判定，宜采用其他检测方法验证检测。

8.4.6 对于夯扩桩、扩底桩等，应考虑桩端位置截面尺寸变化对信号的影响，综合分析波形、判定受检测桩的完整性类别。也可采用实测信号拟合法辅助判定。

8.4.7 出现下列情况之一时，桩身完整性类别宜采用钻芯法、静载试验或高应变法验证检测：

- 1 信号复杂，无规律，无法对其进行准确评价；
- 2 桩身截面尺寸渐变或多变、且变化幅度较大的混凝土灌注桩；
- 3 嵌岩桩桩底有同相反射信号。

8.4.8 检测报告除应符合本标准第 3.6.5 条和第 3.6.6 条的规定外，尚应包含以下内容：

- 1 实测时域信号，并标注有滤波参数、缺陷位置及检测日期；
- 2 与时域信号时间轴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、整桩或桩身缺陷对应的相邻谐振峰间的频率；
- 3 桩身波速取值；
- 4 桩身完整性描述、缺陷的位置及桩身完整性类别。

9 超声法

9.1 一般规定

- 9.1.1 本方法适用于检测混凝土灌注桩的桩身完整性，检测桩身缺陷及位置、范围和程度。
- 9.1.2 当因声测管堵塞等原因导致采集的数据不齐全时，仅可对被检测部分的桩身完整性进行评价，不对受检桩桩身完整性进行整体评价。

9.2 仪器设备

9.2.1 超声检测仪应符合下列规定：

- 1 波形显示应连续、稳定、可存储；
- 2 应具有自动和手动声时测量功能，声时测量范围宜为 $0.5\mu\text{s}\sim 5000\mu\text{s}$ ，声时测量分辨力不宜低于 $0.1\mu\text{s}$ ；
- 3 宜具有自动和手动波幅或衰减测量功能；
- 4 宜具有自动和手动频率测量功能；
- 5 接收放大系统的带宽宜为 $10\text{kHz}\sim 200\text{kHz}$ ，接收系统灵敏度宜高于 $50\mu\text{V}$ ，宜具有增益调节功能，总增益不宜低于 80dB ；
- 6 发射系统宜输出 $200\text{V}\sim 1000\text{V}$ 的矩形脉冲；
- 7 宜采用直流供电，宜配有备用电源；
- 8 宜具有自动记录发射与接收换能器位置的功能；
- 9 宜具有数据远程实时传输功能。

9.2.2 换能器应符合下列规定：

- 1 换能器应采用柱状径向振动换能器，谐振频率宜为 $30\text{kHz}\sim 60\text{kHz}$ ，有效长度宜小于 150mm ；
- 2 接收换能器宜内装前置放大器；
- 3 换能器的水密性应满足在 1.2MPa 水压下不渗水，换能器的导线上应有深度标记，换能器宜安装扶正器。

9.3 现场检测

9.3.1 声测管制作、安装应符合本标准附录 E 的规定。

9.3.2 检测前的准备工作应符合下列要求：

- 1 检查仪器的各部分是否工作正常；
- 2 根据桩径大小选择适宜频率的换能器；
- 3 检查或测量检测仪器的系统延时和耦合层延时；
- 4 声测管应畅通，管内应注满清水；
- 5 测量两声测管外壁间的净距。

9.3.3 检测工作应符合下列规定：

- 1 应调整超声检测仪参数，接收信号应具有较高的信噪比，信号首波波幅在显示器上应高度适中，同批桩平测、斜测过程中仪器的相关参数不应随意改变；
- 2 测线间距不宜大于 100mm ，且同一测面应存储 20 条以上的测线的波形；

- 3 平测时，发射与接收换能器应保持相同深度；
 - 4 斜测时，发射与接收换能器应保持固定高差，且两个换能器中心点连线的倾角不应大于 30° ；
 - 5 换能器应作等距离同步移动，宜从下到上进行声时、波幅及接收波主频的测量，并储存全部波形；
 - 6 连续提升换能器时应匀速、缓慢、平稳、无抖动，提升速度不宜超过 0.5m/s ；
 - 7 以两个声测管组成一个测面，分别对所有测面进行检测。
- 9.3.4 对可疑测线应进行复测。宜用加密的平测、斜测、扇形扫测及 CT 成像法确定缺陷的位置和范围，加密测线的间距不宜大于 50mm ；当采用扇形扫测时，两换能器中心点连线倾角不应大于 30° 。

9.4 检测结果

9.4.1 对现场采集的数据，应按下列公式计算声时、声速、波幅值，绘制声速-深度曲线，波幅-深度曲线等。

$$t_{ci} = t_i - t_0 - t' \quad (9.4.1-1)$$

$$v_i = \frac{D_c}{t_{ci}} \quad (9.4.1-2)$$

$$A_i = 20 \lg \frac{a_i}{a_0} \quad (9.4.1-3)$$

式中：

- t_{ci} ——混凝土中第 i 测线的声时 (μs)；
- t_i ——第 i 测线的总声时 (μs)；
- t_0 ——系统延时 (μs)；
- t' ——耦合层延时 (μs)；
- D_c ——两根声测管外壁间的净距 (mm)；
- v_i ——混凝土中第 i 测线的声速 (km/s)；
- A_i ——第 i 测线的声波波幅值 (dB)；
- a_i ——第 i 测线的声波波幅值 (V)；
- a_0 ——声波 0dB 波幅值 (V)。

9.4.2 各测面声速、波幅或主频的平均值、标准差和变异系数应按下列公式计算：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (9.4.2-1)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \cdot \bar{X}^2}{n-1}} \quad (9.4.2-2)$$

$$C_v = \frac{s_x}{\bar{X}} \quad (9.4.2-3)$$

式中:

- \bar{X} ——各测面声速、波幅或主频的平均值;
- X_i ——第 i 测线的声速、波幅或主频值;
- n ——参加统计的测线数;
- s_x ——各测面声速、波幅或主频的标准差;
- C_v ——各测面声速、波幅或主频的变异系数。

9.4.3 当因声测管倾斜导致声速沿深度规律性变化时,应先对管距进行合理修正,再对数据进行统计分析。当实测数据明显偏离正常值而又无法合理修正时,不得用于评价桩身完整性。

9.4.4 应根据检测效果、现场情况和检测经验选择临界值法、斜率法等缺陷判据。

9.4.5 采用临界值法判据时,宜将同一个测面全部 n 条测线的声速、波幅或主频值 X_i 由大到下按顺序排列 ($X_1 \geq X_2 \geq \dots \geq X_m \geq X_{m+1} \dots \geq X_{n-1} \geq X_n$),按本标准式(9.4.2-1)和式(9.4.2-2)计算出 \bar{X} 及 s_x 值,异常小值判断值及临界值的确定应符合下列规定:

1 异常小值判断值按下式计算:

$$X_a = \bar{X} - \lambda_1 s_x \quad (9.4.5-1)$$

式中:

- X_a ——声速、波幅或主频异常小值判断值;
- λ_1 ——样本中不同样本总数对应的系数,按附录 F 中的规定取值。

2 当 $X_a < X_n$ 时, X_a 即为异常情况的判断值;

3 当 $X_a \geq X_n$ 时,剔除最小值 X_n ,对剩余的 $X_1 \sim X_{n-1}$ 按上述方法统计和判别;

4 通过循环的剔除和判别,直至最终的 X_a 小于最终参加统计的数据中的最小值为止,此 X_a 即为最终的异常小值判断值;

5 测面声速、波幅或主频临界值按下列方法确定:

$$X_{cr} = \begin{cases} \bar{X} (1 - 0.015 \lambda_1) & \text{当 } C_v < 0.015 \text{ 时} \\ X_a & \text{当 } 0.015 \leq C_v \leq 0.045 \text{ 时} \\ \bar{X} (1 - 0.045 \lambda_1) & \text{当 } C_v > 0.045 \text{ 时} \end{cases} \quad (9.4.5-2)$$

式中:

X_{cr} ——测面声速、波幅或主频临界值。

6 将各测线声速、波幅和对应的临界值按下列公式比较:

$$v_i < v_{cr} \quad (9.4.5-3)$$

$$A_i < A_{cr} \quad (9.4.5-4)$$

1) 当同时满足式(9.4.5-3)和式(9.4.5-4)时该测线可判定为缺陷测线;

2) 仅满足式(9.4.5-3)时该测线可判定为可疑的缺陷测线,尚应同时结合主频和接收波波形等因素进行综合分析判定。

9.4.6 采用斜率法判据时,应按下列公式计算相邻两测线声时的斜率和声时差值的乘积,并根据 $k \cdot \Delta t$ 值在某深度处的突变,结合其余声学参数及接收波波形等因素进行综合分析判定。

$$k \cdot \Delta t = \frac{(t_{ci} - t_{ci-1})^2}{z_i - z_{i-1}} \quad (9.4.6-1)$$

$$\Delta t = t_{ci} - t_{ci-1} \quad (9.4.6-2)$$

$$k = \frac{t_{ci} - t_{ci-1}}{z_i - z_{i-1}} \quad (9.4.6-3)$$

式中：

- k ——相邻两测线声时的斜率（ $\mu\text{s}/\text{m}$ ）；
- Δt ——相邻两测线声时的差值（ μs ）；
- t_{ci} ——第 i 测线的声时（ μs ）；
- t_{ci-1} ——第 $i-1$ 测线的声时（ μs ）；
- z_i ——第 i 测线的深度（ m ）；
- z_{i-1} ——第 $i-1$ 测线的深度（ m ）。

9.4.7 采用主频值判定时，宜根据主频-深度曲线上主频值的明显降低，结合其余声学参数及接收波波形等因素进行综合分析判定。

9.4.8 受检桩的桩身完整性类别应根据缺陷的位置和范围、桩型、场地工程地质情况、施工工艺、施工记录、检测经验按本标准表 3.6.2 和表 9.4.8 的规定综合判定。

表 9.4.8 桩身完整性分类表

类别	特征	
	3 管（3 测面）	4 管（6 测面）
I	无缺陷	无缺陷
II	某深度有 1 个测面有缺陷	某深度有 1~2 个测面有缺陷
III	某深度有 2 个测面有缺陷	某深度有 3~4 个测面有缺陷
IV	某深度有 3 个测面有缺陷	某深度有 5~6 个测面有缺陷

9.4.9 检测报告除应符合本标准第 3.6.5 条和第 3.6.6 条的规定外，尚应包含以下内容：

- 1 声测管布置平面图；
- 2 声速、波幅的平均值、标准差或变异系数，各测面声速-深度曲线、波幅-深度曲线、临界值线；
- 3 各测面实测波列图或影像图；
- 4 对进行过管距修正的测面，应注明修正的范围及方法；
- 5 桩身完整性描述、桩身完整性类别，对有缺陷的桩应指明缺陷位置与范围。

10 钻芯法

10.1 一般规定

10.1.1 本方法适用于检测混凝土灌注桩桩身缺陷及位置、混凝土强度、桩长、沉渣厚度，鉴定桩端岩土层性状、判定桩身完整性类别，也可作为评价嵌岩端承桩单桩竖向抗压承载力特征值是否满足设计要求的依据。受检桩长径比不宜大于 30。

10.1.2 钻芯孔数、开孔位置应符合下列规定：

1 桩径小于 1.6m 钻不少于 1 孔，桩径为 1.6m~2.0m 钻不少于 2 孔，桩径大于 2.0m 钻不少于 3 孔；

2 当采用钻芯法对桩长、桩身混凝土强度、桩底沉渣、桩端持力层进行验证检测时，受检桩的钻芯孔数可为 1 孔；对低应变法或超声法检测后的桩身完整性进行验证检测时，钻芯孔数不宜少于第 1 款的规定且钻取深度应超过缺陷底部 2.0m；

3 钻芯开孔位置宜在距桩中心 0.15 倍~0.25 倍桩径内，且应对称分布；受检桩的长径比大于 30 且仅钻一孔时，可在桩中心位置开孔；应准确记录钻芯孔在桩顶面的位置；对超声法检测后的桩身完整性进行验证检测时宜在对应位置开孔。

10.1.3 钻入持力层深度应符合下列规定：

1 抗压桩每桩至少应有 1 孔钻入持力层 3 倍桩径，且不应小于 5m；其余钻孔不应小于 1m；对详勘阶段揭露的溶（土）洞发育的场地、或场地内有软弱夹层的，各钻孔均应钻入持力层 3 倍桩径，且不小于 5m；当设计有特殊要求的按设计要求执行；

2 对抗拔桩、承受水平荷载的桩（包括基坑、边坡工程的支护桩），每个钻芯孔钻入桩端岩土层深度不宜小于 0.5m；

3 对非岩溶发育场地施工前已进行过原桩位超前钻探，已确认桩端持力层满足设计要求的桩，每个钻芯孔可仅钻至桩底 0.5m；对需要评价单桩竖向抗压承载力特征值是否满足设计要求的嵌岩端承桩钻入深度尚应满足取样要求。

10.2 仪器设备

10.2.1 钻机宜采用液压高速钻机，钻机及其配套装置的主要技术性能应符合以下规定：

1 可钻进深度不应小于 100m，钻杆直径宜为 50mm，钻杆应顺直并配有扶正装置；

2 回转器额定最高转速不应低于 790r/min；转速调节范围不应少于 4 档；立轴最大给进力不应小于 15kN；

3 卷扬机最大提升能力不应小于 11kN；

4 水泵最大排量不应小于 50L/min，最大许用压力不应小于 1.0MPa；

5 油泵额定压力不应小于 8MPa；

6 柴油机额定功率不应小于 10.3kW；电动机额定功率不应小于 11kW。

10.2.2 钻具应使用单动双管钻具，并配备相应的扩孔器、短节、卡簧、卡簧座和可捞取松散渣样的钻具。不得使用单动单管钻具。

10.2.3 钻头应根据混凝土设计强度等级选用合适粒度、浓度、胎体硬度的金刚石钻头；钻头外径不宜小于 101mm，内径不宜小于 82mm。

10.2.4 锯切芯样试件用的锯切机应配备冷却系统和夹紧固定装置，配套使用的金刚石锯片应

有足够刚度。

10.2.5 修补芯样试件端面的磨平机和补平器的性能指标应满足芯样试件加工精度的要求。

10.2.6 钻孔测斜仪的分辨力应优于 $\pm 0.1^\circ$ 。

10.2.7 重型或超重型圆锥动力触探、标准贯入试验使用的仪器、设备应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 中的相关规定。

10.3 现场检测

10.3.1 钻机设备应安装稳固、底座保持水平，应保证钻机在钻进过程中不倾斜、不移位，钻芯孔垂直度允许偏差不得大于 0.5%。

10.3.2 当桩顶面与钻机底座间的距离较大时，应安装孔口管，孔口管应垂直、牢固。

10.3.3 钻芯法钻进应符合下列要求：

1 应合理选择钻压、转速、泵压和泵量等工艺参数，在不同条件下应确保各参数之间的匹配；

2 每回次钻进开始时应轻压、慢转，待钻头已达孔底正常进尺后，方可按正常工艺参数钻进；

3 钻进过程中钻孔内循环水流不得中断，应根据回水含砂量及颜色调整泵量和钻进速度；

4 钻进过程中应观测钻取的芯样直径的变化，观察芯样侧表面的光滑程度，当芯样侧表面呈明显波浪状时应调整或更换钻机、钻头等机具；

5 钻至桩底时，应采取减压、低速钻进或干钻等适宜的钻进方法和工艺钻取沉渣、测定沉渣厚度，并采用适宜的方法对桩端持力层岩土性状进行鉴定，可按本标准附录 G 采用孔内成像法做辅助判定。

10.3.4 钻取的芯样应符合下列要求：

1 应按回次顺序，自上而下、由左向右排放在芯样箱中；

2 钻机操作人员应在芯样侧面上标明回次数、块号、本回次总块数、回次累计长度，及时记录钻进情况、钻进异常情况，对芯样质量、桩底沉渣和桩端持力层性状进行初步描述；

3 检测人员应对混凝土芯样、桩底沉渣以及桩端持力层性状复核确认，还应对各断口吻合情况进行核实，检查是否存在桩身裂缝。

10.3.5 受检桩的有效桩长应根据各回次混凝土芯样累加长度，扣除桩顶设计标高以上超灌长度计算，允许误差宜为 $\pm 5\text{cm}$ 。

10.3.6 钻芯结束后，应将标有桩长、孔深的芯样和标有工程名称、桩号、孔号、混凝土芯样长度、岩土芯样长度、检测单位名称的标识牌拍摄在同一张照片中。当桩长超过 30m 时，应按总回次数的 1/2 分两张照片拍摄。拍摄时芯样应呈潮湿状，但不应因积水过多反光，光线均匀不能出现阴影，镜头宜垂直芯样，对焦准确。

10.3.7 对于未见异常的钻芯孔，应从孔底往上用水泥浆回灌封闭；对异常的钻芯孔应封存，留待处理，必要时可采用孔内成像法辅助判断混凝土质量。

10.3.8 混凝土芯样截取应符合下列规定：

1 当有效桩长小于或等于 30m 时，每孔截取芯样不应少于 3 组（每组 3 块），当有效桩长大于 30m 时，不应少于 4 组（每组 3 块）；

2 上部一组芯样位置距桩顶设计标高不宜大于 1 倍桩径且不大于 2m，下部一组芯样位置距桩底不宜大于 1 倍桩径且不大于 2m，中间组芯样宜等间距截取；同组芯样宜在 0.5m 长度范围内截取；

3 在较多气孔、蜂窝麻面、连续沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀部位应增加截取 1 组芯样，钻孔数量多于 1 孔时，尚应在对应深度的其他各孔分别增加截取 1 组芯样。

10.3.9 每组混凝土芯样应制作 3 个芯样试件，芯样试件的制作和测量应符合本标准附录 H 的规定。

10.3.10 混凝土芯样试件制作完毕后应在 $20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的清水中浸泡不少于 2h，从水中取出后应立即进行抗压强度试验。

10.3.11 混凝土芯样试件的抗压强度试验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 的有关规定。

10.3.12 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后续的统计平均。

10.3.13 混凝土芯样试件抗压强度应按下式计算：

$$f_{cu} = \xi \frac{4P}{\pi d^2} \quad (10.3.13)$$

式中：

f_{cu} ——混凝土芯样试件抗压强度（MPa），精确至 0.1MPa；

P ——混凝土芯样试件抗压试验测得的破坏荷载（N）；

d ——混凝土芯样试件的平均直径（mm）；

ξ ——混凝土芯样试件抗压强度换算系数。

10.3.14 当桩端持力层为中、微风化岩的岩芯可制作成试件时，岩石芯样试件的制作和试验应符合下列规定：

1 当设计有明确要求时，按其要求截取；

2 当需要评价嵌岩端承桩单桩竖向抗压承载力特征值是否满足设计要求时，可在接近桩底部位截取 1 组（不应少于 3 块）岩石芯样；遇分层岩性时，宜对各层岩性取样。应妥善保管岩岩芯样，保持其天然含水状态；

3 试件的制作和测量应符合本标准附录 H 的规定，宜按高径比 2:1 制作，当无法截取、制作成 2:1 的时，可制成高径比 1:1 的试件；对硬质岩应进行饱和和处理，对软质岩可保持其天然湿度；

4 桩端岩石芯样试件抗压强度试验时的加载速度宜按照现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 或现行广东省标准《建筑地基基础设计规范》DBJ 15-31 的相关规定执行；

5 岩石芯样试件单轴抗压强度应按下式计算：

$$f_{ru} = \psi \frac{4P}{\pi d^2} \quad (10.3.14)$$

式中：

f_{ru} ——岩石芯样试件单轴抗压强度（MPa），精确至 0.1MPa；

P ——岩石芯样试件抗压试验测得的破坏荷载（N）；

d ——岩石芯样试件的平均直径（mm）；

ψ ——岩石芯样试件高径比换算系数，2:1 时取 1，1:1 时取 0.85。

10.4 检测结果

10.4.1 检测结果应对各受检桩的桩身完整性类别、桩身混凝土强度、桩长、桩底沉渣厚度和桩端持力层岩土性状分别作出是否满足验收规范和设计要求的评价。

10.4.2 检测结果应提供受检桩检测桩长和施工桩长间的偏差。当设计对桩长有要求时，应作

出是否满足设计要求的评价。

10.4.3 当同一受检桩的钻芯检测孔为两个或两个以上时，桩底沉渣厚度计算和判定应符合下列规定：

- 1 将各钻芯孔的桩底沉渣厚度从小到大依次按下式排序：

$$\delta_1 \leq \delta_2 \cdots \leq \cdots \leq \delta_n \quad (10.4.3-1)$$

- 2 按下式计算桩底沉渣厚度：

$$\delta_m = \frac{\sum_{i=1}^n i \delta_i}{\sum_{i=1}^n i} \quad (10.4.3-2)$$

式中：

- δ_m ——受检桩的桩底沉渣厚度；
- δ_i ——第 i 钻芯孔的桩底沉渣厚度；
- n ——同一受检桩的钻芯检测孔数。

3 桩底的沉渣厚度允许值应符合设计及现行国家标准《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202 或相关标准的规定。

10.4.4 桩端持力层岩土性状应根据持力层岩土芯样特征、结合岩石芯样试件单轴抗压强度、标准贯入试验或圆锥动力触探结果综合鉴定。

10.4.5 受检桩桩身混凝土强度确定及评定应符合以下规定：

- 1 单个钻孔某深度的混凝土芯样抗压强度为其同组 3 块芯样试件强度的平均值；
- 2 受检桩某深度的混凝土强度为此深度处各钻孔混凝土芯样抗压强度的平均值；
- 3 受检桩混凝土抗压强度为不同深度的混凝土强度中的最小值；
- 4 当受检桩混凝土抗压强度大于或等于设计强度等级时，可评定为满足设计要求；否则应评定为不满足设计要求。

10.4.6 受检桩桩身完整性类别应根据现场各钻孔混凝土芯样特征，按本标准表 3.6.2 和表 10.4.6 规定综合判定。

表 10.4.6 桩身完整性分类表

类别	特 征
I	单孔时混凝土芯样连续、完整、胶结好、表面光滑、骨料分布均匀、呈长柱状、断口吻合，芯样侧面仅见少量气孔；两孔或三孔时局部芯样侧面有少量气孔、麻面、蜂窝、沟槽，但在同一深度部位的芯样中未同时出现
II	一孔、两孔或三孔的同一深度部位的芯样侧面有较多气孔，严重的蜂窝麻面、连续的沟槽或局部混凝土芯样骨料分布不均匀； 有一孔局部混凝土芯样破段长度小于或等于 10cm，且另外两孔的同一深度部位的混凝土芯样连续、完整、胶结好、表面光滑、骨料分布均匀、呈长柱状、断口吻合，芯样侧面仅见少量气孔
III	介于 II、IV 类之间； 存在水平裂缝
IV	有一孔（或二孔、三孔）因混凝土胶结质量差而难以钻进； 芯样任一段松散、夹泥； 芯样局部破段长度大于 10cm，且另外两孔的同一深度部位的混凝土芯样有严重的蜂窝麻面、连续的沟槽、破碎等缺陷

注：1 当上一缺陷的底部标高与下一缺陷的顶部标高的高差小于 30cm 时，可认为两缺陷处于同一深度位置。

2 有一孔局部混凝土芯样破碎时，桩径 1.6m~2.0m 的受检桩宜加钻 1 孔、桩径小于 1.6m 的宜加钻 2 孔至对应深度以下 1.0m~2.0m；应对全部三孔综合评定。

10.4.7 嵌岩端承桩桩端持力层岩石抗压强度确定及评定应符合下列规定：

- 1 桩端持力层岩石抗压强度为 1 组（不应少于 3 块）岩石芯样试件单轴抗压强度的平均值；
- 2 当桩端持力层岩石抗压强度大于或等于设计计算采用的单轴抗压强度时，可评定为满足设计要求；否则应评定为不满足设计要求。

10.4.8 当钻芯孔偏出桩身时，可对钻取芯样部分的桩身进行评价。

10.4.9 检测报告除应符合本标准第 3.6.5 条和第 3.6.6 条的规定外，尚应包含以下内容：

- 1 钻芯设备名称、型号；
- 2 检测桩数、钻孔数量、混凝土进尺、桩端岩土层进尺、总进尺、混凝土芯样试件组数、岩石芯样试件个数；
- 3 混凝土芯样试件抗压强度试验结果；
- 4 圆锥动力触探、标准贯入试验等结果及岩土性状描述；
- 5 每根受检桩的全部钻孔的芯样柱状图、钻孔在桩顶面的位置示意图和芯样彩色照片；
- 6 嵌岩端承桩单桩竖向抗压承载力特征值是否满足设计要求的评价。
- 7 异常情况说明。

11 界面钻芯法

11.1 一般规定

11.1.1 本方法适用于检测混凝土灌注桩桩端部分的混凝土性状、桩长、沉渣厚度，鉴定桩端岩土层性状。受检桩桩径不宜小于 800mm。

11.1.2 钻入持力层深度应符合本标准第 10.1.3 条的规定。

11.2 仪器设备

11.2.1 钻机及其配套装置的主要技术性能应符合本标准第 10.2.1 条的规定。

11.2.2 钻具、钻头的选用应符合本标准第 10.2.2 条、第 10.2.3 条的规定，当因界面管弯曲致钻头不能下放至管底时，可适当缩小钻具钻头直径。

11.3 现场检测

11.3.1 应在基桩钢筋笼安装阶段同步安装一根界面管。界面管材质、制作安装应符合下列规定：

1 界面管应采用钢质管材，具有一定的强度和刚度，外径不宜小于 140mm，壁厚不宜小于 4mm；对桩径小于 1.0m 的灌注桩，可采用外径不宜小于 114mm，壁厚不宜小于 4mm 的钢管；

2 制作钢筋笼时，宜将界面管绑扎在钢筋笼内侧，管底设置在钢筋笼底端以上 1m 左右、宜焊接定位钢筋，应采用焊接等可靠措施保证下放钢筋笼及灌注混凝土时管端不会下沉到岩土表面上，管顶宜与钢筋笼平齐；

3 每节钢管接长连接宜采用套管焊接、卡箍（带密封胶圈）连接或其他可靠方式连接；管底预先采用堵头或钢板焊封，上、下管应保持顺直，连接处不得渗浆；

4 吊放钢筋笼时，应防止界面管从定位钢筋处松动或脱落；

5 为防止钢筋笼上浮，吊放钢筋笼时，宜往界面钻芯管内注满清水，吊装完成后，管口应加盖堵头或用钢板焊封。

11.3.2 检测工作应符合下列规定：

1 钻机设备应安装稳固、底座保持水平；

2 钻进前空孔段钻杆可顺沿界面管快速下放，钻头到达界面管底开始钻进时宜轻压、慢转、加大泵量，待钻穿封底钢板进入混凝土层后，可采用正常参数钻进。钻进过程中，钻孔内循环水流不得中断，应根据回水含砂量及颜色调整泵量和钻进速度；

3 钻至桩底时，应采取减压、低速钻进或干钻等适宜的钻取方法和工艺钻取沉渣、测定沉渣厚度，并采用适宜的方法对桩端持力层岩土性状进行鉴定。可按本标准附录 G 采用孔内成像法做辅助判定。

11.3.3 钻取的芯样应按顺序，自上而下、由左向右排放在芯样箱中。钻机操作人员应记录接入的钻杆数量及长度，标明空孔段的深度；在芯样侧面上标明混凝土块数和累计长度，标明桩长。及时记录钻进情况，特别是钻进异常情况，并对芯样质量、桩底沉渣和桩端持力层性状进行初步描述。检测人员应对混凝土芯样，桩底沉渣以及桩端持力层性状复核确认。

11.3.4 受检桩的桩长可根据空孔段深度和混凝土芯样长度之和再减去桩顶设计标高以上超灌长度计算，允许误差宜为±5cm。

11.3.5 钻芯结束后，应将标有桩长、空孔深度的芯样和标有工程名称、桩号、混凝土芯样长度、岩土芯样长度、检测单位名称的标识牌拍摄在同一张照片中。

11.3.6 界面管（孔）的回灌及处理可按本标准第 10.3.7 条的规定执行。

11.3.7 当设计有明确要求且桩端持力层可截取岩石芯样时，应按照本标准第 10.3.14 条的规定截取、制作岩石芯样试件进行单轴抗压强度试验。

11.4 检测结果

11.4.1 检测结果应对各受检桩的界面管底到桩底部分的混凝土性状、桩长、桩底沉渣厚度和桩端持力层岩土性状分别作出是否满足验收规范和设计要求的评价。

11.4.2 检测结果应提供受检桩检测桩长和施工桩长间的偏差。

11.4.3 检测报告除应符合本标准第 3.6.5 条和第 3.6.6 条的规定外，尚应包含以下内容：

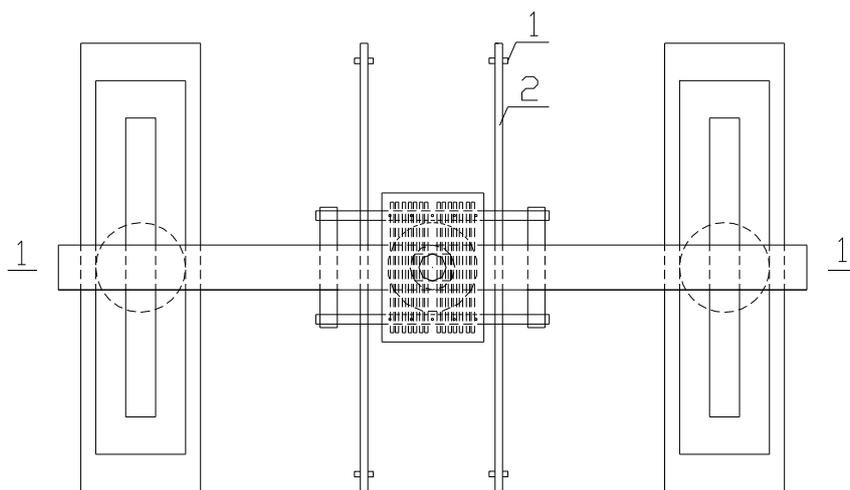
- 1 钻芯设备名称、型号；
- 2 检测桩数、钻孔数量、桩端持力层进尺；
- 3 圆锥动力触探、标准贯入试验等结果及岩土性状描述；
- 4 每根受检桩界面管管底以下钻孔的芯样柱状图、管口在桩顶面的位置示意图和芯样照片；
- 5 异常情况说明。

附录 A 抗压试验混凝土桩桩头处理要点

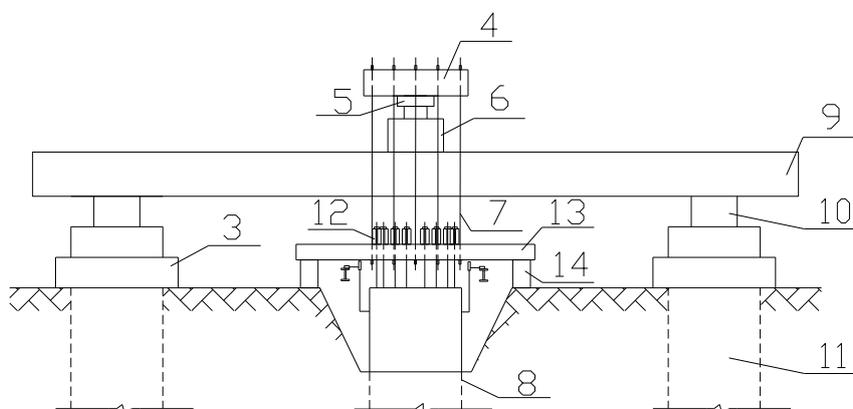
- A.0.1** 应先凿除混凝土灌注桩桩顶浮浆，露出密实混凝土及足够长度的主筋。
- A.0.2** 调直各主筋，并保持主筋顶标高一致。桩顶应设置 2~3 层钢筋网片，网片间距宜为 50mm~100mm。
- A.0.3** 桩帽混凝土强度宜高于桩身混凝土 1~2 个等级、且不得低于 C30。支模应形状规则、对称，桩帽截面中心应和原桩头中心点重合。
- A.0.4** 可在距桩顶 1.5 倍桩径范围内，加设 3mm~5mm 厚的钢套箍或箍筋，箍筋间距不宜大于 150mm。
- A.0.5** 高应变法检测时，桩头测点处截面尺寸应与原桩身截面尺寸相同。

附录 B 抗拔试验反力系统连接装置

B.0.1 灌注桩抗拔试验时加载反力装置可参照图 B.0.1-1 或图 B.0.1-2 安装。连接构件和受检桩主筋宜采用机械连接或焊接连接，并确保受检桩主筋受力均匀。加载反力装置的受力构件应满足承载力和变形的要求，其提供的反力不得小于最大试验荷载的 1.2 倍。当使用锚具连接时，应有可靠遮挡措施阻拦突然失效的锚具或拉断的钢筋飞出。



(a) 平面图



(b) 1-1 剖面图

图 B.0.1-1 抗拔加载反力装置安装示意图（中间顶升）

1—基准桩；2—基准梁；3—反力支墩；4—连接钢箱板（反力钢箱板）；5—钢垫板；6—千斤顶；7—连接钢筋；8—受检桩；9—主梁；10—支承梁；11—反力桩；12—钢锚板；13—钢锚板托梁；14—托梁支墩

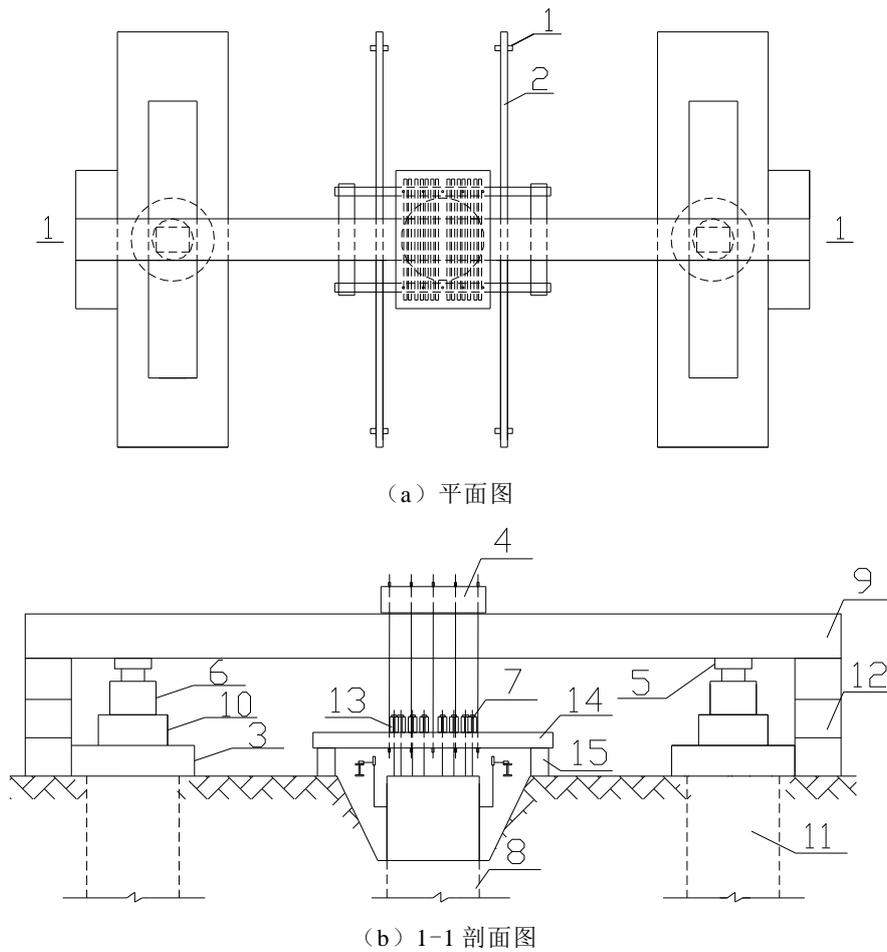


图 B.0.1-2 抗拔加载反力装置安装示意图（两边顶升）

- 1—基准桩；2—基准梁；3—反力支墩；4—连接钢箱板（反力钢箱板）；5—钢垫板；
6—千斤顶；7—连接钢筋；8—受检桩；9—主梁；10—支承梁；11—反力桩；
12—主梁支墩；13—钢锚板；14—钢锚板托梁；15—托梁支墩

B.0.2 混凝土管桩宜采用填芯方式将受检桩和反力装置连接。填芯混凝土深度、连接钢筋或连接构件的强度应根据最大试验荷载验算。

B.0.3 混凝土管桩也可采用机械连接法（图 B.0.3）将受检桩和反力装置连接。

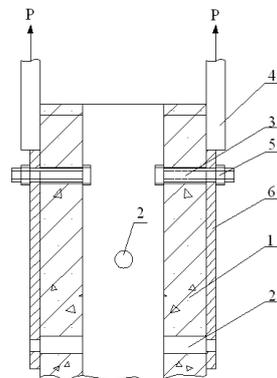


图 B.0.3 混凝土管桩机械连接法示意图

- 1—桩身；2—销孔（未插销）；3—钢销（或螺栓）；4—拉杆；5—螺母；6—柱面钢板

附录 C 高应变法传感器的安装要点

- C.0.1** 检测时应安装应变传感器和加速度传感器，且均不得少于 2 个（图 C.0.1）。
- C.0.2** 传感器应分别对称安装在距桩顶 $2d$ ($2b$) 的桩侧表面处（ d 为受检桩的直径， b 为边宽）；对于大直径桩，传感器与桩顶之间的垂直距离可适当减小，但不得小于 $1d$ ($1b$)。安装面的材质和截面尺寸必须与原桩身相同，传感器不得安装在截面突变处。
- C.0.3** 应变传感器与加速度传感器的中心应位于同一水平线上，同侧的应变传感器和加速度传感器间的水平距离不宜大于 80mm。
- C.0.4** 各传感器的安装面必须平整铅直，材质应均匀密实，否则应采用磨面手砂轮将其磨平。
- C.0.5** 采用螺栓将传感器安装在预定位置，安装螺栓的钻孔应与桩侧表面垂直，安装完毕后传感器应紧贴桩身表面，传感器的中心轴应与桩中心轴保持平行。检测过程中传感器不得产生滑动。
- C.0.6** 安装应变传感器时应对其初始应变值进行监测。应变传感器的初始应变值不得超过所用检测仪器的规定值。安装完毕后传感器的可测轴向应变余量，混凝土桩不得小于 $1000\mu\varepsilon$ ，钢桩不得小于 $1500\mu\varepsilon$ 。
- C.0.7** 当采用在重锤上安装加速度传感器的方式测量锤击力时，宜在自由落锤锤体 $0.5Hr$ 处（ Hr 为锤体高度）对称安装加速度传感器；在桩顶下的桩侧表面对称安装加速度传感器，加速度传感器距桩顶的距离不得小于 $0.4Hr$ 和 $1d$ ($1b$) 两者中的高值。

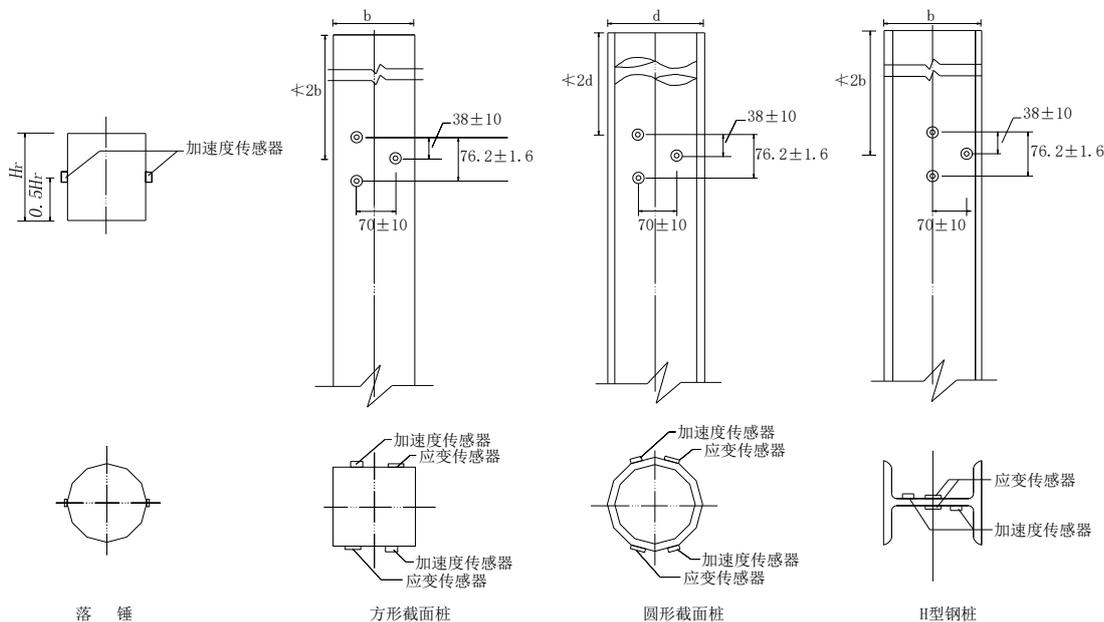


图 C.0.1 传感器安装（单位：mm）

附录 D 试打桩与打桩监控

D.1 试打桩

D.1.1 为选择工程桩的型号、桩长和桩端持力层进行试打桩时，应符合下列要求：

- 1 试打桩位置的工程地质条件应具有代表性；
- 2 应按桩端进入的土层逐一测试，当持力层较厚时，应在同一土层中进行多次测试。

D.1.2 选择桩端持力层时，应综合试打桩的打桩阻力与贯入度关系结合场地岩土工程勘察报告分析确定。

D.1.3 采用试打桩判定单桩承载力时，应符合下列规定：

- 1 应通过试打桩复打试验确定桩的承载力恢复系数；
- 2 复打至初打的休止时间应符合本标准第 3.3.4 条的规定；
- 3 试打桩数量不应少于 3 根。

D.2 桩身锤击应力监测

D.2.1 桩身锤击应力监测应符合下列要求：

- 1 被监测桩的型号、规格、材质应与后续施工的工程桩拟采用的一致，施打机械的锤型、落距和垫层材料及状况应与后续施工工程桩拟采用的一致；
- 2 应监测桩身锤击拉应力和锤击压应力。

D.2.2 为测得桩身锤击应力最大值，监测宜符合下列要求：

- 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弱夹层时测试；
- 2 桩身锤击压应力宜在桩端进入硬土层或桩侧土阻力较大时测试。

D.2.3 传感器安装点以下某深度的桩身锤击拉应力应按下式计算：

$$\sigma_t = \frac{1}{2A} \left[F \left(t_1 + \frac{2L}{c} \right) - Z \cdot V \left(t_1 + \frac{2L}{c} \right) + F \left(t_1 + \frac{2L - 2x}{c} \right) + Z \cdot V \left(t_1 + \frac{2L - 2x}{c} \right) \right] \quad (\text{D.2.3})$$

式中：

- σ_t ——深度 x 处的桩身锤击拉应力 (kPa)；
 x ——传感器安装点至计算点的距离 (m)；
 A ——桩身截面积 (m^2)。

D.2.4 最大桩身锤击压应力可按下式计算：

$$\sigma_p = \frac{F_{\max}}{A} \quad (\text{D.2.4})$$

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)。

当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坚硬土层对桩身锤击压应力的放大作用。

D.2.5 桩身最大锤击应力控制值应符合现行行业标准《预应力混凝土管桩技术标准》JGJ/T 406 的有关规定。

D.3 锤击能量监测

D.3.1 桩锤实际传递给桩的能量应按下式计算：

$$E_n = \int_0^{t_e} F \cdot V \cdot dt \quad (\text{D.3.1})$$

式中：

E_n ——桩锤实际传递给桩的能量（kJ）；
 t_e ——采样结束的时刻（s）。

D.3.2 桩锤最大动能宜通过测定锤芯最大运动速度确定。

D.3.3 桩锤能量传递比应按桩锤实际传递给桩的能量与桩锤额定能量的比值确定；桩锤效率应按实测的桩锤最大动能与桩锤的额定能量的比值确定。

附录 E 声测管制安要点

E.0.1 声测管应采用钢质管材，外径宜为 50mm，壁厚不应小于 1.5mm（桩长大于 50m 的不小于 1.8mm）。管身不得有裂缝、破损、弯曲或压扁等缺陷，内壁应光滑无结疤、毛刺。

E.0.2 声测管应具有足够的刚度。制安及灌注混凝土过程中不得弯折、变形。

E.0.3 声测管应沿钢筋笼内圆周对称分布，当桩径 $d \leq 800\text{mm}$ 时，应安装 2 根声测管；当 $800\text{mm} < d \leq 2000\text{mm}$ 时，应安装 3 根声测管；当桩径 $d > 2000\text{mm}$ 时应安装 4 根声测管。应自正北方向开始，按顺时针方向对声测管从“1”开始编号（图 E.0.3）。

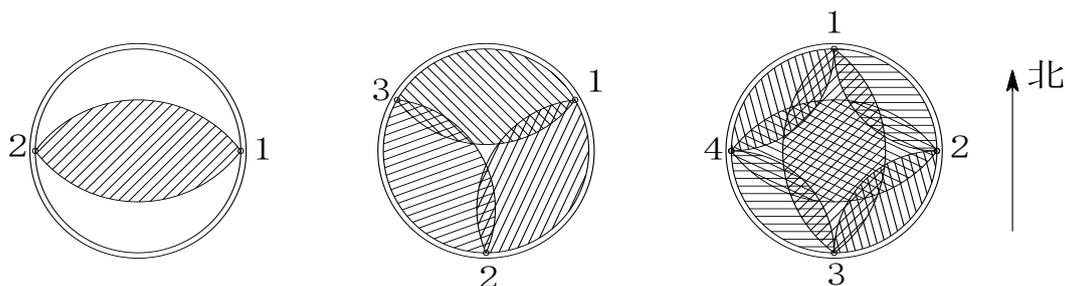


图 E.0.3 声测管布置图

E.0.4 对超大直径桩或非圆形截面桩应专门设计声测管布置、安装方式。

E.0.5 声测管底部应预先封闭，宜用堵头封闭或用钢板焊封。

E.0.6 每节钢管间应采用螺纹外套管或钳压式接头等方式连接，应保证连接处不渗浆。

E.0.7 可将声测管焊接或绑扎在钢筋笼内侧，每节声测管在钢筋笼上的固定点不应少于 3 处，声测管应与桩身中轴线平行。

E.0.8 在桩身未配筋部位，应采取有效措施（比如延长部分主筋）将声测管顺直安放至桩底（或延伸到地面）。

E.0.9 声测管管顶宜和钢筋笼平齐。上部应加盖或用堵头封闭，避免异物入内。

E.0.10 安装声测管、灌注混凝土时，应保护声测管不受损坏、不渗入浆液。

E.0.11 混凝土灌注完毕后及时检查管内是否有渗漏、堵管情况。如发生堵塞应及时疏通，可采用加重的探杆冲击并辅以高压水冲洗等方法。也可采用专用钻具疏通。

附录 F 超声法中不同样本总数对应的系数

F.0.1 样本中不同样本总数 n 对应的系数 λ_1 应根据表 F.0.1 中的规定取值。

表 F.0.1 不同样本总数对应的系数

n	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
λ_1	1.64	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.91	1.94
n	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
λ_1	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.05	2.07	2.09	2.10	2.11
n	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
λ_1	2.13	2.14	2.15	2.17	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23
n	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
λ_1	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.29	2.30	2.31	2.32
n	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
λ_1	2.33	2.34	2.36	2.38	2.39	2.41	2.42	2.43	2.45	2.46
n	150	160	170	180	190	200	220	240	260	280
λ_1	2.47	2.50	2.52	2.54	2.56	2.58	2.61	2.64	2.67	2.69
n	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480
λ_1	2.71	2.73	2.75	2.77	2.79	2.81	2.82	2.84	2.85	2.87
n	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680
λ_1	2.88	2.89	2.90	2.91	2.92	2.94	2.95	2.96	2.96	2.98
n	700	720	740	760	780	800	850	900	950	1000
λ_1	2.99	2.99	3.00	3.01	3.02	3.02	3.04	3.06	3.07	3.09

附录 G 孔内成像法

G.1 一般规定

G.1.1 本方法适用于对灌注桩钻芯法检测结果的验证，可确定沉渣厚度、判别桩身缺陷位置及缺陷程度、鉴别桩端岩土层性状、测定桩长；也适用于检测混凝土管桩的桩身完整性，可判别桩身缺陷的位置、范围和程度。

G.2 仪器设备

G.2.1 检测仪器应具备全孔壁成像及影像、深度的实时记录功能，可显示具有深度及方位角信息的平面展开图。

G.2.2 成像系统的性能指标应符合下列规定：

1 分辨率不应低于两百万像素；最大可测孔径时，孔壁的轴向、环向成像光学分辨率不应低于 100pix/cm；

2 应具有照度调节功能，最大可测孔径时，孔壁照度不宜低于 150lx；

3 应具备方位角识别记录功能；

4 应满足 1MPa 水压下能正常工作。

G.2.3 探头应配置居中器和电子罗盘，电子罗盘方位精度不应低于 5°。

G.2.4 检测仪器应配置深度控制装置，控制精度不应低于 1cm，图像和视频标识深度与实际深度的偏差值不应大于总测试深度的 0.5%。

G.2.5 进行定量检测前，应对仪器所成图像的平面尺寸进行校准，宜对缺陷角度进行校准。校准宜在标记有已知宽度和间距的环状模拟缺陷的校准筒中进行。

G.2.6 图像分析软件应具备图像分析、描述、编辑、转换及打印输出等功能。

G.3 现场检测

G.3.1 检测前宜对检测深度范围的孔壁进行清洗。可先选用压力位 0.5MPa~2.0MPa 高压水清洗；当孔壁清洁度达不到要求时，宜采用机械清理方式，应使用适宜硬度的接触物及合适的力度，不得损坏孔壁原表面；机械清理后宜再次进行高压水清洗，清理产生的浊水宜采用清水置换出孔外。对桩底岩土界面宜使用清水置换法清理沉积物。

G.3.2 检测前宜根据孔径的大小选择适宜的探头。

G.3.3 检测工作应符合下列规定：

1 三角支架应稳固放置于孔口上方，调节支架宜使探头位于钻孔中心位置；

2 摄像头光源亮度应根据孔内环境合理确定，且在同一孔检测过程中宜保持不变；

3 摄像头宜平稳、不旋转、匀速移动，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 应自上而下或自下而上单方向全面、清晰的记录孔内的图像；在疑似缺陷位置，可在全面检测后慢速（或静态）重点检测。

G.4 检测结果

G.4.1 当需对缺陷进行定量分析时，应按照下列方法对现场采集的数据进行处理：

1 宜将图像展开为二维平面图像，环向转换为平面图形水平方向，轴向转换为平面图形的垂直方向；

2 缺陷环向占宜等于环向缺陷的长度除以钻孔周长；

3 宜将展开图水平向划分为 20 个等分格，对图像每个格中间缺陷竖向高度累加求和，再除以包含缺陷的格子数，即为轴向缺陷平均高度。

G.4.2 灌注桩桩身缺陷、桩底沉渣厚度、桩端持力层岩土性状可根据图像和视频信息结合钻芯法检测情况综合判定。

G.4.3 预制管桩桩身缺陷位置、范围和程度及其完整性可根据图像和视频信息结合低应变法检测情况综合判定。

附录 H 芯样试件制作和测量

H.0.1 混凝土芯样试件的高径比应为 1:1；岩石芯样试件高径比应为 2:1，钻取的芯样高度不足时方可按 1:1 制作。

H.0.2 锯切芯样应采用锯切机。锯切时应将芯样固定，锯切平面垂直于芯样轴线。锯切过程中应淋水冷却金刚石锯片。

H.0.3 当锯切后的芯样试件垂直度或端部平整度不能满足要求时，应选用以下方法进行端面加工：

1 在磨平机上磨平；

2 用水泥砂浆（或水泥净浆）、硫磺胶泥（或硫磺）等材料在专用补平器上补平，水泥砂浆（或水泥净浆）补平厚度不宜大于 5mm，硫磺胶泥（或硫磺）补平厚度不宜大于 1.5mm，补平层应与芯样试件牢固结合，以使抗压强度试验时补平层与芯样试件的结合面不会提前破坏。

H.0.4 应对芯样试件的几何尺寸做如下测量：

1 在试件表观直径偏小部位的两个相互垂直方向，用游标卡尺测量芯样的直径，平均直径宜取两次测量的算术平均值，精确至 0.5mm；

2 高度应采用钢卷尺或钢板尺进行测量，精确至 1mm；

3 垂直度应采用游标量角器测量两个端面与母线的夹角，精确至 0.1°；

4 平整度测量时应将钢板尺或角尺紧靠在芯样试件端面上，一面转动钢板尺，一面用塞尺测量与芯样试件端面之间的缝隙。

H.0.5 当出现下列情况时，芯样试件不得用作抗压强度试验：

1 混凝土芯样试件内含有钢筋；

2 1:1 的混凝土或岩石芯样试件高度小于 $0.95d$ 或大于 $1.05d$ （ d 为芯样试件平均直径）；

3 2:1 的岩石芯样试件高度小于 $1.95d$ 或大于 $2.05d$ （ d 为芯样试件平均直径）；

4 沿试件高度方向任一直径与平均直径相差达 2mm 以上；

5 试件端面的不平整度在 80mm 长度内超过 0.1mm；

6 试件端面与轴线的不垂直度超过 2°；

7 表观混凝土粗骨料最大粒径大于 0.5 倍芯样试件平均直径。

本标准用词说明

- 1 为了便于在执行本标准条文时区别对待，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 条文中指明应按其他有关的标准执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003
- 2 《建筑地基基础设计规范》GB 50007
- 3 《岩土工程勘察规范》GB 50021
- 4 《建筑地基基础工程施工质量验收标准》GB 50202
- 5 《混凝土物理力学性能试验方法标准》GB/T 50081
- 6 《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266
- 7 《高层建筑岩土工程勘察标准》JGJ 72
- 8 《建筑桩基技术规范》JGJ 94
- 9 《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106
- 10 《预应力混凝土管桩技术标准》JGJ/T 406
- 11 《基桩动测仪》JG/T 518
- 12 《建筑地基基础设计规范》DBJ 15-31
- 13 《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60
- 14 《地基基础勘察设计规范》SJG 01
- 15 《大直径灌注桩静载试验标准》SJG 87

深圳市工程建设地方标准

建筑桩基检测标准

SJG 09-2024

条文说明

修 订 说 明

本标准是在《深圳市建筑基桩检测规程》SJG 09-2020 的基础上修订而成。上一版的主编单位是深圳市建设工程质量检测中心（现更名为深圳市房屋安全和工程质量检测鉴定中心），参编单位是深圳市建设工程质量监督总站、深圳市勘察研究院有限公司、深圳冶建院建筑技术有限公司、中国铁道科学研究院深圳研究设计院、深圳市建筑科学研究院股份有限公司、深圳市福田建设工程质量检测中心、深圳市南山区建设工程质量监督检验站、深圳市盐田区工程质量监督站、深圳市宝安区工程质量监督检验站、深圳市罗湖区建设工程质量检测中心、深圳市光明新区建设工程质量安全监督站。主要起草人为：刘南渊、杨立、张道修、黄圭峰、谢卫兵、肖兵、王耀禧、蔡巧灵、张臣琪、孟照辉、程庆阳、范少峰、袁广州、陈泽广、刘学、江辉煌、裴晓文、华洪勋、王琦玮、钟咏琴、黄建辉。本次修订的主要技术内容是：**1** 基本规定中取消混凝土预制桩桩抽样检测方法中高应变法需要静载试验对比的要求；适用范围增加了钢桩；要求 PHC 管桩完整性检测报告附有孔内成像法验证资料；调整了灌注桩抽样检测方法中荷载的划分界限；调整了扩大抽检程序中的部分要求；**2** 单桩竖向抗压静载试验中，优化了基准桩、受检桩、压重平台支墩边（或锚桩）之间距离的规定；调整了考虑桩身压缩变形的长径比限值；**3** 单桩竖向抗拔静载试验中，补充了受抗裂控制桩的终止试验条件和结果判定标准；**4** 单桩水平静载试验中，规定了水平荷载的最小限值；**5** 高应变法中，调整了使用曲线拟合法和凯司法分析的比例；增加了曲线拟合法中桩身完整性判定方法；**6** 低应变法中，细化了激振要求；**7** 超声法中，补充了部分检测数据缺少时桩身完整性评价的规定；**8** 钻芯法中，调整了钻入持力层的深度，并将沉渣厚度计算改用加权平均方法，增加了对嵌岩端承桩单桩竖向抗压承载力特征值是否满足设计要求的评价；**9** 将原附录 G《界面钻芯管制安要点》完善后单独成章，即第 11 章“界面钻芯法”；**10** 增加了附录 B《抗拔试验反力系统连接装置》和附录 G《孔内成像法检测要点》；**11** 补充了各方法检测仪器宜具备数据远程实时传输功能。

本标准修订过程中，编制组对我市基桩检测现状进行了调查研究，总结了《深圳市建筑基桩检测规程》SJG 09-2015 实施以来的实践经验、出现的新情况，同时参考了国内的先进检测技术、方法标准，通过调研、征求意见，对增加和修订的内容进行反复讨论、分析、论证，开展专题研究和工程实例验证等工作，为本次标准修订提供了依据。

为便于广大工程检测、设计、施工、监理、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《建筑基桩检测标准》SJG 09-2024 编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明。对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则	57
2	术语和符号	58
2.1	术语	58
3	基本规定	59
3.1	检测目的	59
3.2	检测机构、人员、仪器设备	59
3.3	检测前的准备	59
3.4	检测项目、方法和抽检数量	60
3.5	验证检测与扩大抽检	65
3.6	检测结果与报告	66
4	单桩竖向抗压静载试验	67
4.1	一般规定	67
4.2	仪器设备	67
4.3	现场检测	68
4.4	检测结果	68
5	单桩竖向抗拔静载试验	71
5.1	一般规定	71
5.2	仪器设备	73
5.3	现场检测	74
5.4	检测结果	74
6	单桩水平静载试验	75
6.1	一般规定	75
6.2	仪器设备	75
6.3	现场检测	75
6.4	检测结果	76
7	高应变法	77
7.1	一般规定	77
7.2	仪器设备	77
7.3	现场检测	78
7.4	检测结果	79
8	低应变法	84
8.1	一般规定	84
8.2	仪器设备	85
8.3	现场检测	85
8.4	检测结果	87
9	超声法	91
9.1	一般规定	91
9.2	仪器设备	91
9.3	现场检测	91

9.4	检测结果	92
10	钻芯法	94
10.1	一般规定	94
10.2	仪器设备	95
10.3	现场检测	95
10.4	检测结果	99
11	界面钻芯法	101
11.1	一般规定	101
11.2	仪器设备	101
11.3	现场检测	101
11.4	检测结果	101

1 总 则

1.0.1 本条主要说明编制本标准的目的和指导思想。伴随着城市建设迅速发展，大量建筑物、构筑物、市政工程和城市轨道交通工程普遍采用桩基础，而基桩检测是其安全性、可靠性的重要保障。基桩检测的方式和方法也随着工程经验的积累和理论研究而趋于更加成熟和先进，一些新的方法技术和方法在逐步被应用。为总结已有经验，提高检测和评价水平，统一检测方法及技术指标，特别是和通用规范、现行国家（省）标准相协调，保持本标准的延续性，深圳市住房和城乡建设局适时地组织修订原标准。

1.0.2 本条主要阐明标准的适用范围。包括两个方面，适用的工程类别有建筑工程、市政工程和城市轨道交通工程，水利、电力、铁路、港口、码头、环境保护等工程的基桩检测可参照使用；检测对象是桩基工程中的基桩，目的是对工程桩的质量安全可靠进行综合评价，并作为桩基工程设计、验收评定或缺陷处理的依据。

本标准主要针对桩基础。复合地基中非散体材料的竖向增强体、基坑（边坡）工程中的桩（或地下连续墙）的检测也会使用本标准中的检测方法，因其工况和桩基有区别，在检测过程和评价方面有所不同，其检测评价应依据相应的规范、标准。因本标准对各方法的规定详细、表述透彻，故在方法实施层面可作为桩基之外其他用途桩（竖向增强体、支护桩、地连墙）的参考，但结果评价应按具体桩的功能分析确定。

1.0.3 本条主要提出基桩检测工作的总要求和总原则。强调各种检测方法和综合评价都应充分了解勘察成果、设计目标、施工过程，并掌握场地环境条件、充分运用已有经验。由于桩基工程是隐蔽工程，而每一种方法各有其特长和不足，因此，因地制宜、因桩制宜、因时制宜选择检测方法、检测对象、检测数量尤为重要。

1.0.4 尚应符合的国家标准和地方标准系指本标准没有明确规定，而尚应符合的有关标准。国家标准主要指现行的《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003、《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202、《混凝土强度检验评定标准》GBJ 107、《岩土工程勘察规范》GB 50021、《建筑桩基技术规范》JGJ 94、《建筑抗浮技术标准》JGJ 476-2019、《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106、《高层建筑岩土工程勘察标准》JGJ/T 72、《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS 03、《基桩动测仪》JG/T 518；地方标准系指现行的广东省标准《建筑地基基础设计规范》DBJ 15-31、《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136、《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60和深圳市工程建设地方标准《地基基础勘察设计标准》SJG 01、《桩基施工技术标准》SJG 126。

由于本标准在部分检测方法的数量、比例和技术细节等方面侧重点和现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106、广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60略有不同，对于申报省优质工程和国家优质工程的项目尚应满足广东省和行业标准的要求。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 本术语定义引自行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94-2008，是“桩基础中的单桩”。在本市较多采用“一柱一桩”的布桩方式。

2.1.4 承载力检测值是检测中实测、确定或判定的单桩承载力，其与极限承载力有区别。这是因为受检桩是工程桩，检测目的是检验是否满足设计要求或为工程处理提供依据。静载试验只需证实是否满足设计要求（包括设计预计的极限承载力）即可，不一定能达到极限状态，因此单桩承载力检测值有两种情况：①等于极限承载力；②小于极限承载力。对于情况①，最大试验荷载下桩土体系达到了极限状态；情况②是试验荷载已加至预定最大试验荷载，可以满足设计要求，但桩土体系尚未达到极限状态，承载力仍有富余，此类情况在实际工程中较多出现。对高应变法判定的单桩承载力，因其荷载的作用方式、变形特性均与桩的实际工况相差较大，所以判定的单桩承载力也不是真正的极限承载力。因此，本标准提出用承载力检测值以概括之。

2.1.6 高应变法是实测桩顶部的力和速度信号，通过波动理论分析判定单桩竖向抗压承载力及桩身完整性，是间接方法，与静载试验直接试桩有区别。在无可靠经验的情况下需要有静动对比资料。

2.1.7 低应变法通常还包括其他多种方法，如机械阻抗法、动力参数法等，本标准低应变法特指反射波法。

2.1.8 超声法在行业标准和广东省标准中称为声波透射法。本标准之所以还沿用第一版（99年）的名称，主要考虑超声波属于声波范畴，桩基检测实际使用的频率是在超声频段；另外是为了和基桩检测的其他几种方法命名规则相协调。

2.1.10 该法引进至今已在本市使用 20 多年。随着应用不断成熟，也为了发挥其检测目的针对性强、检测效率高等优势，在本标准中将其列为传统五大桩基检测方法之外的第六种方法。该法也被广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60-2019 纳入，名称为“预埋管钻芯法”。

3 基本规定

3.1 检测目的

3.1.1 桩基检测的成果是验收、设计和质量鉴定与加固处理的重要依据。作为桩基施工质量验收依据的检测结果应采用本标准规定的检测方法，按照本标准对桩基进行检测时，仅对受检桩的承载力、桩身完整性等项目作出评价，整个桩基工程的合格判定应按照施工验收规范的要求在验收阶段进行。

就检测实施阶段而言，一般有设计阶段、施工过程和验收阶段，有时还有旧基础、质量事故后和加固补强后的桩基检测等。本标准主要适用于设计、施工和验收阶段，作为桩基设计或工程质量问题处理依据的检测结果可采用本标准规定的检测方法。其余用途的检测应依据有关规定可参照本标准执行。

当采用本标准之外的检测方法、新型仪器设备时，应进行检测方案论证。

3.2 检测机构、人员、仪器设备

3.2.1 根据广东省住房和城乡建设厅《广东省住房和城乡建设厅关于印发委托实施建设工程质量检测机构资质审批工作方案的通知》（粤建质[2023]1号），省住房和城乡建设厅委托各地级以上市住房城乡建设主管部门正式开展建设工程质量检测机构资质审批工作。因此，机构和人员资质、资格除了应符合国家、广东省的规定外，还应符合深圳市建设行政主管部门的要求。

3.2.2 检测所用仪器设备必须由法定计量检定机构进行定期检定或校准，且使用时必须在检定或校准的有效期内，这是我国《计量法》的要求，是桩基检测数据准确、可靠和可追溯的先决条件。需要指出的是，某些时候虽然计量器具在有效计量检定或校准周期内，但使用期间仍可能由于操作不当或环境条件恶劣等造成计量器具受损或计量参数发生改变。因此，检测前宜对计量器具、配套设备进行检查或模拟测试。

3.2.3 为了保证检测工作安全、顺利开展，确保检测结果准确可靠，对于不同的检测方法有着不同的抗干扰要求。通常应注意防止温湿度变化、振动、电源波动、强电磁环境等干扰对检测结果的影响。使用交流电源、动力电源的设备，应可靠接地，连接电源时严禁湿操作。静载试验应有措施应对检测过程中断电等原因引起的维荷超时、数据丢失等突发事件；还应有防止发生堆载失稳、平台垮塌等安全事故发生的措施。

3.3 检测前的准备

3.3.1 检测前收集本条所列的资料，有助于编制合理检测方案和选取受检桩，也有助于对检测结果进行分析，得出符合实际的结论。有条件时可收集附近桩基工程的资料。

3.3.2 检测前应勘察现场、调查了解现场情况，并根据调查结果编制检测方案。当有特殊要求时，检测方案还需要与委托方、设计方共同研究制定。本条提出的检测方案包含内容为通常情况下的内容，某些情况下还可包含诸如桩头加固方案以及场地处理、道路、供电、照明等要求。

3.3.3 桩基是隐蔽工程，在工程结构中的地位十分重要，由于成桩质量难以直观检查，使用过程中再发现质量问题时又难以处理。因此，受检桩的选取应坚持偏于安全、按最不利原则综合确定，应尽量减小对可能有质量隐患桩的漏检概率。同时也应兼顾检测造价和进度等因素，抽检数量应限制在合理的范围之内。对此，在有限数量的抽检中最大程度地暴露基桩存在的质量隐患是

抽样的一个重要原则。本标准综合以下原则选取受检桩：施工质量有怀疑的桩（比如发生过塌孔、混凝土灌注中断过、桩底沉渣厚度可能超过设计或验收标准规定）；关键和重要部位的桩；因工程地质情况复杂（如桩端持力层起伏较大、存在地质构造、岩溶发育等地质条件变化较强烈区域等）可能影响施工质量的桩；采用不同施工工艺和不同施工单位施做的桩；承载力检测时侧重桩身完整性、桩长、持力层、沉渣等不利影响因素。最后，还有随机性原则，即相同条件下受检桩宜均匀分布。

静载试验和钻芯法受检桩的选取，宜由设计、勘察、施工、建设、监理和检测等单位共同讨论确定并形成会议纪要。

3.3.4 采用钻芯法仅检测桩身完整性、桩长、桩底沉渣或桩端持力层，而不对桩身混凝土强度检测时，为加快检测进度可在 28d 龄期前进行。

一般场地从桩顶至桩端分布有不同的岩土层，检测方法的开始时间主要由对承载力起控制作用的岩土层决定，有经验时检测开始时间可适当提前。对于泥浆护壁灌注桩的静载试验，宜结合经验延长休止时间。

3.3.5 为了提高检测工作的效率，客观、准确地反映整个桩基工程的质量状况，宜先进行抽检比例大的方法，后进行抽检比例小的方法；宜先普查桩身完整性，后有针对性地进行静载试验或钻芯法检测。通常各方法的检测先后顺序是，先低应变法和超声法，后钻芯法、高应变法和静载试验。当基础埋置较深时，基坑开挖产生土体侧移将桩身剪断、机械开挖使桩身受损的现象时有发生，故强调桩身完整性检测宜在基坑开挖至基坑底标高后进行。对受现场条件限制，只能先进行静载试验、后进行低应变法或超声法检测的工程项目，为确保土方开挖不对桩身质量产生影响，应由有关责任主体召开专题会议，形成的会议纪要应和竣工资料一同存档。

3.4 检测项目、方法和抽检数量

3.4.1 桩基设计最主要目标是使桩土体系能提供所需的承载力（单桩承载力）以平衡上部荷载，其中桩身材料强度和截面尺寸（桩身承载力）也应满足内力验算要求。桩身材料强度和截面尺寸是桩周岩土发挥预期承载力的必要条件。桩身材料强度和截面尺寸在桩基检测中由桩身完整性体现。所以工程桩的检测都应包含单桩承载力检测和桩身完整性检测二个项目。通常同一单位工程会进行不少于两种方法的检测，应符合先简后繁、先粗后细、先面后点的原则，宜先完整性检测后承载力检测。

依据国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003-2021 第 5.4.3 条第 1 款的规定：施工完成后的工程桩应进行竖向承载力检验，承受水平力较大的桩应进行水平承载力检验，抗拔桩应进行抗拔承载力检验。故承载力检验应尽可能采用静载试验，对于试验荷载超过本市试验能力、场地条件难以满足实施静载试验的才可采用钻芯法验证的方式。诸如逆作法现场、内支撑支护形式的基坑等场地不具备进行静载试验条件的情况，应对桩底沉渣厚度、桩端持力层性状及桩身混凝土强度、桩长等检测以验证单桩承载能力。同样，通规也要求做设计阶段的静载试验，本市通常是在开挖前的桩基施工面高程实施。

3.4.2 桩基检测的结论主要是针对单桩承载力和桩身完整性的，本条列举了每种方法包含的检测目的，规定了各方法与单桩承载力和桩身完整性对应关系，以正确使用各方法、合理搭配多种方法、充分发挥各种方法的优势。

低应变法、超声法仅适用于检测桩身完整性，高应变法既能检测桩身完整性还能判定单桩承载力，钻芯法可检测桩身完整性和桩身材料抗力（混凝土强度）也能验证岩土抗力（单桩承载力），界面钻芯法可验证岩土抗力（单桩承载力）。静载试验能确定单桩承载力，一定程度上也

能验证桩身材料抗力（混凝土强度）。

具体选择检测方法时，应根据检测目的、特定要求，结合各检测方法的适用范围和检测能力，考虑设计、工程地质条件、施工因素和工程重要性等情况确定，不允许超范围滥用。另外还要考虑经济合理性，即在满足正确评价的前提下做到快速、经济。

单桩承载力检测应首选静载试验，确因场地和试验能力受限才采用钻芯法间接验证单桩承载力。虽然钻芯法验证承载力有局限性，即不能直接检测出承载力、检测桩身完整性也有一孔之见之嫌，但其优势在于检测参数多、抽测比例大，更能全面反映整个工程的总体状况。所以对某一类型灌注桩的验收检测就有以静载试验为主+低应变法（超声法、钻芯法、界面钻芯法）或以钻芯法为主+低应变法（超声法、界面钻芯法）两种组合方式，显然第一种组合方式是首选。

作为常规基桩检测方法的补充，本标准在正文及条文说明（包括引用的其他方法标准）里还推荐了诸如桩身内力测试、成孔质量检测、自平衡法等方法，可视具体情况选用。

3.4.3 本条主要执行现行国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 的规定，按照其规定本市大量使用的混凝土预制桩、灌注桩在设计阶段均应进行试验桩的静载试验。

试验桩有在非工程桩桩位施做的纯试验桩，也有在工程桩桩位施工兼作的，后者在成桩质量满足设计要求、承载力试验后未破坏时仍可作为实际工程桩使用。试验桩桩位的选择应有代表性，附近应有工程地质钻探孔位。试验桩的设计应符合试验目标要求，静载试验装置的设计和安装应符合试验安全的要求。若正式施工时桩和岩土的关键参数发生了较大变动或施工工艺发生了变化，应重新试桩。

另外，由于试桩多在基坑开挖前的施工地面标高进行，地面试桩与坑底试桩的地质条件、岩土阻力构成和大小有异，应考虑基坑开挖后的“时空效应”，区别对待试桩结果，复核承载力损失，确保工程安全度。

在诸如设计有要求；工程地质条件复杂多变；桩端持力层岩土强度不高、易遇水软化、风化程度高；岩溶等地质条件复杂场地；采用新桩型新工艺等特殊情况时，桩基工程正式施工前施做试验桩进行静载试验时测试桩端阻力和分层岩土侧阻力，对优化设计和指导施工大有裨益，应提倡。

对于大荷载的端承型大直径灌注桩，受设备或现场条件限制无法做竖向抗压静载试验的，可依据现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 相关要求、按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 进行深层平板载荷试验、岩基载荷试验；或在其他条件相同的情况下进行小直径桩静载试验，通过桩身内力测试，确定岩土承载力参数，但此时尚应考虑尺寸效应。采用小直径试桩替代方案时，应先通过相关质量责任主体组织的技术论证。

除了按国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 的规定应进行试验桩的静载试验外，还有则是为了弥补验收阶段无条件进行工程桩的静载试验的不足，施工前的试验桩静载试验也尤其必要。对此说明如下：为有效利用地下空间，本市基坑工程开挖深度在不断加大，桩长相应变短，而抗压、抗拔承载能力要求在不断提高。在基坑底进行单桩竖向抗压、抗拔静载试验，面临场地条件差、进退场困难、检测造价高、检测周期变长诸多困难，特别是内支撑结构梁柱下的桩、靠近基坑侧壁的桩、电梯井下的桩、坡道下的桩、塔吊附近的桩及逆作法现场等，更无堆载和反力架安装的空间。对此，为了同时兼顾质量验收和检测条件的要求，首先应在施工组织设计阶段充分考虑后期验收检测的要求，尽可能提供在基坑底进行验收检测的条件，否则应在正式施工前充分进行试验桩的抗压、抗拔承载力检测。在桩基施工面高程做设计阶段的静载试验时试验措施、受荷工况应针对现场情况设计。通过试验及时指导设计和施工，加强施工过程监控以降低质量风险。

3.4.4 本标准中仅在静载试验的比例、数量统计中强调了“同类型桩”，原因在于其和单桩承

承载力有很强的关联性，而且检测数量少。对此说明如下：

按照现行国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 的规定，单桩竖向承载力特征值由单桩竖向极限承载力除以安全系数得到，而单桩竖向极限承载力应通过单桩静载荷试验确定。本市灌注桩使用量大，同一场地往往采用多种桩径、不同持力层、各种受荷方向的桩，设计承载力特征值分布丰富多变。如果完全按照通规执行是不现实的，故此建议按同类型方式确定试验数量。

划分类别的基本原则是能比较全面地验证设计取用的关键参数。本标准中的“同类型桩”，对混凝土预制桩，可按沉桩工艺（锤击、静压、植入）、桩径、设计承载力特征值等因素划分。对混凝土灌注桩，通常宜按成桩工艺、桩端持力层等因素划分；在按桩端持力层类型划分的基础上，再划分到能区分三种受力方向为止，不再进一步按设计承载力特征值变化细分。

关于“持力层”说明如下：由于传统上讲的“持力层”概念源于抗压桩，常指桩端所处岩土层。对于使用越来越普遍的抗拔桩“持力层”概念同样也适用，即看抗拔力（侧阻力）主要是由哪层岩土提供，通常深层岩土提供的抗力大、层厚大的提供的抗力大、岩层比土层提供的抗力大，其是主要持力层。

无论是预制桩还是灌注桩，采用静载试验的抗压桩和抗拔桩因其桩身结构受力方向及承载力特征值不同，显然分属不同类型桩。对于复合受力、兼顾不同工况荷载的，如抗压兼抗拔桩，同一根桩既属于抗压类别也属于抗拔类别，不应仅检测抗压承载力或抗拔承载力中的一种，而应分别进行抗压和抗拔静载试验。为按照检测比例计算检测数量需要统计抗压桩和抗拔桩总数时，此类桩既要计入抗压桩总数又要计入抗拔桩总数。而和静载试验配套的其他方法（低应变法、超声法、钻芯法和界面钻芯法）反映的参数对抗压和抗拔功能无区别则可不重复计算。水平受荷桩亦同。

3.4.5 关于混凝土预制桩完整性的检测要求说明如下：由于预制管桩的完整性检测仅采用低应变法，特别是配桩管节数多时检测效果受限，为了和现行省标《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60 协调和今后更大范围推广使用积累经验，增加了孔内成像法检测作为低应变法的补充资料，使用时宜重点关注环向的碎裂等较大缺陷。

关于预制桩承载力的检测要求说明如下：由于多数场地沉桩时已送桩，开挖后的场地情况复杂，抗压静载试验和高应变法较难实施，大多的静载试验（有时还包括高应变法）是在开挖前（或部分开挖后）进行的。开挖前（或部分开挖后）进行检测时，受检桩的选取往往是有取向性的，通常是选配桩富裕的，沉桩后的实际桩顶会接近或高出施工场地地面标高，而这些桩的收锤、终压标准往往会严格些，其检测合格率高，甚至存在提前准备受检桩的现象。实际配桩短于应有桩长的，实际收锤、终压标准可能偏低，因其送桩深度较大，在开挖前不具备静载试验和高应变法检测条件，往往不被选作受检桩。因此应加大对送桩深度大的桩的静载试验覆盖范围。首先是强调静载试验和高应变宜在开挖至桩顶标高处进行；其次应加强沉桩过程监控，加大打桩监控比例，加强对收锤贯入度、终压值控制标准执行情况的监督；对有抗浮（拔）要求的管桩，在开挖至桩顶标高后试验是可行的，但尚应密切注意低应变法反映出的首节桩的接头连接情况，对存在异常者应首选为验收受检桩，通过单桩竖向抗拔静载试验验证接头连接的可靠性。

高应变法作为一种成熟的检测方法，由于以往要求静载试验对比，使其应用受到一定的限制，故此次修订取消了验收阶段 3 根抗压静载试验对比的要求。为了和现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 及现行广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60 相协调，对个别不适用的特殊情况加注做了说明。当然，施工前试验桩仍应按现行国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 的要求采用静载试验。

对灌注桩抽样检测方法组合方式保持了 2015 版（2020 版）的按桩径和荷载分成三种类别（表 3.4.5-2 第 2 列）、各类别应采用各自对应的所有检测方法（表 3.4.5-2 第 3 列）的组合方式。就主要修订内容说明如下。

1 抗压静载试验的荷载界限：

本次修订将上版静载试验的上限 10000kN 一次性提高至 20000kN，即尽最大可能采用以静载试验为主导各方法配合的验收检测方式，以最大程度地满足现行国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 的要求。制订该界限的最主要原因是本市目前及今后若干年内堆载法最高试验能力会维持在 40000kN~50000kN。当然随着技术进步、本市试验能力的提高，该限值也会相应提高，以能始终适应通规的规定。

灌注桩三种类别检测方法组合方式，应优先选取以静载试验为主的组合，第三种类别仅是对不能实施静载试验的一种替代方式。原因在于本市大直径灌注桩使用率高，单桩承载力高、静载试验困难大（特别是抗压静载试验），如第 3.4.3 条条文中不具备静载试验条件的情况确实普遍存在，其中内支撑场地无论荷载大小均难以实施静载试验，此时在设计偏安全的前提下，方可选用钻芯法（含界面钻芯法）验证为主配套其他方法的方式替代静载试验进行验收检测。确因本市试验能力和现场条件所限，不具备进行静载试验检验单桩承载力条件时，相关责任主体和检测单位应对替代的检测方案进行论证。

但还需要特别注意的是，本市混凝土灌注桩持力层设置在强风化（或风化程度更高）岩土层时，特别是花岗岩易遇水软化，实际抗压承载力会比设计计算的承载力低很多。所以即使现场复杂、设备安装困难也应尽进可能通过静载试验检验单桩竖向抗压承载力，或者至少有一部分桩应采用静载试验检验。若试验荷载超过 40000kN，可参照现行深圳市工程建设标准《大直径灌注桩静载试验标准》SJG 87 中反力方式、方法的组合实施检测。

本次修订检测方法选取的原则之一是以静载试验为主。由于国内规范中静载试验的数量均为总桩数的 1%，对灌注桩因桩径变化范围大、施工环节影响因素多，1%的比例显然偏少；再者，因可选取静载试验的桩位受基坑侧壁、坡道、支撑构件等限制，随机性难以保证，而钻芯法容易实施，并且钻芯法是以单项指标评价单桩质量，比静载试验只反映基桩整体承载性状更加严格；同时考虑对低应变法和超声法检测结果验证之需；故对第二种类别的钻芯法检测比例调整为 8%。

2 抗拔静载试验：

由于本市单体建筑朝高度高、体量大、埋置深的方向发展，单桩竖向抗拔承载力要求不断提高。多年来的实践表明，大直径旋挖、冲（钻）孔灌注桩的竖向抗拔承载力极限值离散明显，即使桩端嵌岩深度不断加大的情况下也未明显改善；相对于抗压静载试验，抗拔静载试验实施难度较小，反力系统要求不高，只要辅助一定的措施，无论荷载多大基本都能实施。所以对抗拔桩验收应采用静载试验。因此取消上一版 5000kN 的限定，即所有承受上拔荷载的桩均采用抗拔静载试验验收。考虑到“时空效应”，验收试验宜在开挖后的坑底实施。

3 界面钻芯：

此次修订将界面钻芯作为一个独立方法来要求，主要考虑了以下因素：

- 1) 大直径灌注桩的承载力首先受桩端持力层性状、沉渣厚度控制，界面钻芯法只针对桩端情况，而钻芯法（特别是长径比较大时）会偏离桩身不能到达桩端，相对而言界面钻芯有其独特的优势；
- 2) 由于旋挖灌注桩成孔工艺的日渐成熟，桩身混凝土的质量趋于稳定，全长度钻取芯样的必要性已没以往那么强烈，相比之下超声法对桩身完整性的检测完备性更胜钻芯法一筹。在大比例的超声法检测之后已经可以掌握场地桩身完整性的整体

情况，再依据超声法结果有针正性地指导钻芯使检测更加精准，不必强求每孔均要钻到桩底、特别是长径比大的桩。桩底情况由界面钻芯法反映。经过多年的实践，界面钻芯法已趋成熟，其检测效率高、针对性强。可以更好地发挥其作用，将是今后的发展方向；

- 3) 岩溶发育场地，传统上钻芯法检测要求各孔均应钻至桩底持力层足够深度，难度大、工效低、桩截面损失大，显然采用界面钻芯不存在这些弊端。检测比例规定参照了现行广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 钻芯法检测不少于 30% 的规定，即钻芯法和界面钻芯法之和达到 30% 的要求；
- 4) 但还应注意，水下灌注工艺在桩底外侧，混凝土质量会略差、有沉积物积聚等不利因素，可不对其取样试压，只是评价时应更侧重于岩性和沉渣情况；
- 5) 虽然本次修订将其作为一个独立方法，但作为过渡在数量上和钻芯法作了协调、相比上版有所减少。

虽然本条规定了各类别桩应采用的检测方法，但由于某些具体施工工艺、基桩设计参数等可能会影响特定方法的检测效果，故选择检测方法时应综合考虑。比如，低应变法可能不适用于超长桩的检测，对此，可采用高应变法替代低应变法、采用孔内成像法辅助检查管桩、采用超声法替代低应变法检测灌注桩。替代的一般原则是完备性高的方法替代完备性低的、对某类型缺陷敏感的方法替代不敏感的。比如，对于桩径为小于 1600mm 的灌注桩的完整性检测，低应变法与超声法均适用，在考虑了长径比因素后可根据实际情况选择更适合的检测方法。为了保证在桩径大于或等于 1600mm 的桩上超声法检测的随机均匀分布，也为了超声法补充或扩大抽检的需要，规定了对于桩径大于或等于 1600mm 的灌注桩应全部安装声测管。

参照现行行业标准《城市桥梁工程施工与质量验收规范》CJJ 2、《铁路桥涵工程施工质量验收标准》TB 10415 等相关规范规定和设计普遍要求，本条规定了市政工程、城市轨道交通工程的灌注桩应全部检测桩身完整性。只是应注意区分市政工程、城市轨道交通工程中“桩”的具体用途，按桩基础设计施工者应执行本规定，其他比如复合地基、支挡结构等宜执行相应规范规定。本市轨道交通工程中的车辆段、停车场工程（如停车库、检修库、运用库），结构功能更符合建筑工程中的工业建筑工程，这些工程是有条件实施静载试验的，其桩身完整性检测可按不少于每承台桩总数的 30% 且不应少于 1 根实施。对于市政桥梁和轨道交通工程桥梁，特别是市政桥梁（布桩数量少、场地狭小、周边环境复杂）当现场无条件实施静载试验时，在检测数量确定、检测方法选取时更应把握偏于安全的原则，各方责任主体应对检测方案论证。

最后还需要指出，该条规定的检测数量和比例是本市验收需要的最低要求。对需要申报省、国家优质工程的项目，在检测方案编制阶段应考虑本市规定和省、国家标准的协调，也应满足省、国家相关标准的要求。

3.4.6 桩基工程中个别基岩埋深浅的部位，是按浅基础的“墩”设计计算的，通常由桩基施工单位和桩基一起施工、施工工艺接近，低应变法对墩检测的准确性欠佳、超声法又不能鉴定桩端岩土层性状，故直接采用钻芯法检测。

3.4.7 本条是为了执行国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 中施工完成后的工程桩应进行竖向承载力检验的要求。当对嵌岩端承桩采用钻芯法或界面钻芯法评价单桩竖向抗压承载力特征值是否满足设计要求时，应编制检测方案，方案应包括需要核验的桩数量、桩号、钻取制作取岩石芯样数量、持力层岩石抗压强度确定、检测沉渣方法、其他情况（如桩端持力层岩石破碎）处置等，建设方组织各责任主体对检测方案作出的论证意见。核验数量可参照静载试验，即不应少于该类别桩总数的 1%，且不应少于 3 根。

3.5 验证检测与扩大抽检

3.5.1 验证检测是指，当检测者对桩身某个部位、某根桩、及对一批桩的异常检测结果有怀疑或非检测者对检测结果有异议，需进一步确认时，采用原方法以外的其他检测方法（钻芯法还可增加钻孔验证）来验证原检测结果。验证检测应遵循的基本原则是可靠性高的方法验证可靠性低的方法。

由于桩基孔内成像法日渐成熟、在桩基检测中有其独特优势。当管桩存在低应变法难以判定的缺陷时，采用该方法可以直观观察。当钻芯法检测的沉渣厚度处在临界厚度附近，或者桩底有塌孔沉积物在水下钻进难以取样时，该方法能直观、准确反映出桩端状况。故本次修订增加了桩基孔内成像法作为一种补充检测手段。

3.5.2 综合评价时宜以可靠性高的方法结果作为主要依据。

不同于在原受检桩上采用低应变法或超声法复检，同一根桩增加钻孔验证后，应同等对待各孔检测结果，客观、全面综合评价。

3.5.3、3.5.4 扩大抽检是指原抽检子样样本的检测结果不满足设计要求时，应扩大抽样比例使其更有代表性，以较大样本的检测结果更真实地反映总体情况，减小质量问题漏检概率。

虽然在扩大抽检前可能已进行过个别桩的验证检测，但对扩大检测后出现的Ⅲ、Ⅳ类桩还宜进一步验证检测、复核承载能力。

扩大抽检的过程和质量问题处理的过程是密不可分的，因此建设单位应组织有关各方对检测结果不满足设计要求的情况进行原因分析、扩大抽检和综合评估三方面的工作。一、首先应依据检测、设计、勘察、施工等资料进行原因分析。由于岩土条件差异性大、钻勘孔数量有限、施工因素多且变异性大，因此这些都是重点分析方向。二、推断同类原因导致不满足设计要求桩的可能分布。可从相类似的岩土条件和相同施工要素来划定分布范围，其中施工要素一般有施工工艺、施工机具及至施工班组和材料批次等。当出现不满足设计要求的具体原因尚不明确应在同类型桩中扩大抽检，一般按就近兼顾随机原则选取扩大抽检桩号。根据可能的原因、质量问题的严重程度和工程结构重要性制定扩大抽检方案，有针对性地扩大抽检；扩大抽检方案应包含扩大检测的方法、数量和桩位要求；在扩大抽检的过程中，应对产生问题的可能的原因进一步跟踪、分析、确认，及时调整扩大抽检方案，以使整个桩基工程不留质量隐患。对于设计变更后可以判定满足变更后设计要求的是否需要扩大抽检，应具体问题具体分析。三、扩大抽检完成后，根据检测单位提供的全部检测结果，参考所有设计、施工、监理资料，由有关各方共同对全部基桩进行综合评估，设计单位以满足结构安全和使用功能要求为原则，提出处理方案。处理方案一般有：由原设计单位复核是否可满足结构安全和使用功能要求，或者是补桩（有原桩报废后在原桩位补桩，有原桩报废后在原桩侧补桩，有同时利用原桩的原桩侧补桩等方式）、加固补强等。处理应按照有关程序进行，应按设计单位出具的处理方案，监理单位全程监督施工单位实施。对加固、补强后基桩的验收检测，还应由建设、设计、勘察、监理、施工、检测单位共同研究确定验收检测方案，原则上宜采用直接法、可靠性高的方法，比如经高压注浆处理后应采用钻芯法验证处理效果、不宜采用低应变法验证。实施验收检测后，由各方共同综合评估、验收。必要时应对扩大抽检和质量问题处理方案进行论证。

关于质量问题处理，还会有场地局部地质条件和详勘报告不符的情况，有时还是严重工程地质现象，比如有破碎带穿过、有较大的溶洞（土洞）、有软弱夹层、局部岩样破碎等，这些情况和施工图设计阶段所掌握的条件有较大出入，对此类问题的处理建设方应委托专业机构进行专项调查、设计及施工，原设计方予以配合。

由于各检测方法自身的特点，虽然本标准第 3.5.4 条第 1 款中要求采用可靠性更高的检测

方法扩大抽检，有时也可采用可靠性相对较低、确有独特优势的其他方法辅助分析判断。

本标准第 3.5.4 条第 3 款中，静载试验、高应变法、钻芯法（或界面钻芯法）的检测结果严重不满足设计要求的情况主要是指单桩极限承载力、桩端持力层性状、桩底沉渣厚度、混凝土强度、桩身完整性等方面。比如，当抗压（抗拔、水平）静载试验得到的承载力特征值低于设计承载力特征值的 80%（参照《既有建筑地基可靠性鉴定标准》JGJ/T 404-2018，个体承载力级别为 d 级的个体承载力特征比值 $c_{ri} < 0.8$ ）；桩身混凝土强度低于设计的混凝土抗压强度两个等级及以上；桩端持力层风化程度高于原设计的两个等级及以上；沉渣厚度超出标准要求的 4 倍及以上；桩身有两个或两个以上钻孔在同一深度松散等等。

3.6 检测结果与报告

3.6.1 工程桩的检测包含单桩承载力检测和桩身完整性检测。相较桩身完整性检测，单桩承载力检测更直观、能一定程度地反映桩身材料抗力，但抽检比例低、实施难度大，故其比桩身完整性更为重要，是桩基验收中的最关键项目。

由于试验桩的单桩承载力试验目的是为了验证设计，其报告可不完全按照工程桩验收检测报告的要求编制。

3.6.2 根据桩身有无缺陷及缺陷的严重程度，桩身完整性类别有 I 类桩（桩身完整）、II 类桩（轻微缺陷）、III 类桩（明显缺陷）和 IV 类桩（严重缺陷）。显然，缺陷的严重程度和其对桩身承载力的影响程度是相关的。II 类桩可以理解为基础完整的桩，其桩身承载力基本能够正常发挥，但 II 类桩比例较高时应选取部分核实单桩承载力。III 类桩的桩身承载力会受到一定影响，应进行验证或核实单桩承载力，或由设计单位根据工程桩的具体情况决定是否需要进行处理。IV 类桩有严重缺陷，对桩身承载力有很大影响进而影响单桩承载力发挥，应进行处理。缺陷桩的处理和整个桩基工程质量隐患的排查实际上是质量问题处理工作中的内容，通常和验证检测、扩大抽检同步进行。

桩身完整性是桩身材料强度、截面尺寸和连续性综合性状的反映，单桩承载力主要由桩周岩土抗剪强度决定。故桩身完整性和单桩承载力通常是两个独立概念，只是前者是后者发挥的必要条件。桩身完整性判定和桩受荷工况密切相关。比如桩身水平整合型裂缝（因挤土、土体侧向位移导致），对抗拔（浮）桩、受水平荷载桩的完整性判定比抗压桩更敏感。同一缺陷桩用不同的方法检测反映出的完整性状况也会有所不同，即不同方法对同一缺陷的敏感程度也不同。所以，桩身完整性判定要视桩受荷工况、结合检测方法的特点综合分析判定。

完整性为 I 类或 II 类的桩其桩身承载力满足或基本满足要求，但并不意味单桩承载力满足设计要求，桩周岩土抗剪强度、沉渣等因素也会导致单桩承载力不满足设计要求。由于桩土体系荷载传递的复杂性，完整性为 III 类或 IV 类的桩在采用静载试验验证时也可能满足单桩承载力要求，即桩周岩土具备所需抗力、缺陷位置的桩身应力没有使缺陷位置发生桩身结构破坏。前者直接影响结构安全，后者因耐久性原因间接影响结构安全，都宜进行相应工程处理。

3.6.5 检测报告内容除应符合《检测和校准实验室能力的通用要求》ISO/IEC 17025 的有关规定外，还应包含桩基工程的特定信息。

3.6.6 本条引用了《检测和校准实验室能力的通用要求》ISO/IEC 17025 中对检测报告的要求。

3.6.7 本条的规定是计量认证和资质管理的要求。

4 单桩竖向抗压静载试验

4.1 一般规定

4.1.1 静载试验是公认的确确定单桩抗压（抗拔、水平）承载力最直观、最可靠的传统方法。在国内外、在不同行业间，因基桩所属工程类别、工况差异，有循环荷载法、等变形速率法及终级荷载长时间维持法等方法。本章主要对深圳市建筑工程中惯用的维持荷载法进行了技术规定。

4.1.2 对工程桩抽样检测，为保证足够的安全度，规定了最大试验荷载不应小于单桩竖向抗压承载力特征值的 2.0 倍。

4.1.3 为设计提供依据的静载试验宜加载至极限状态，即试验应进行到能确定单桩极限承载力为止。对于端承型桩（尤其是嵌岩桩），当桩端岩石饱和单轴抗压强度比较高，单桩极限承载力可能由桩身材料强度控制，最大试验荷载不应超过荷载效应基本组合下的桩顶轴向压力设计值。

4.2 仪器设备

4.2.1 采用压重平台反力装置，当荷载水平较高时压重施加于地基的附加压应力大使地基产生较大变形，影响试验结果的准确性，更为甚者还可能存在较大安全隐患，此时宜制定地基处理方案，以满足试验的要求。条件允许时，可利用工程桩作为堆载支点，但应充分考虑两支墩下不同支承刚度造成压重平台发生不均匀沉降而存在的安全隐患。

4.2.2 为防止加载使桩偏心受压，千斤顶的合力中心应与反力装置的重心、桩身轴线重合，并保证合力方向铅直。由于荷载测读有通过千斤顶率定曲线换算成荷载的测量方式，为了控制试验误差，使最大试验荷载接近率定范围，本次修定对配置千斤顶时的起重量提出了要求，目的在于提高各级荷载的测量精度。

4.2.3 用荷重传感器和用压力传感器的两种荷载测量方式区别在于：前者测量每台千斤顶的作用力，而多台千斤顶并联工作时，由于各千斤顶的作用力有差异，应在各千斤顶上分别放置荷重传感器。后者需通过率定曲线换算成千斤顶作用力，换算后的千斤顶作用力包含了千斤顶活塞摩擦力。采用压力传感器测定油压时，为保证测量精度和稳定性，可采用压力表同时监控和校核压力传感器，压力表精度等级应优于或等于 0.4 级。当油路工作压力较高时可能出现油管爆裂、接头漏油、油泵加压不足造成千斤顶作用力受限、压力表线性度变差等情况，所以应选用耐压高、工作压力大的油管、油泵和大量程压力表。

4.2.4 基准桩应打入地面以下足够的深度，通常不小于 1m。基准梁一端固定另一端简支，是为了减少温度变化引起的基准梁挠曲变形。基准梁不宜过长，并应采取有效遮挡措施，以减少阳光、气温和风力影响，尤其在阳光照射强烈、昼夜温差较大时更应重视。

4.2.5 沉降测量平面宜在千斤顶底座承压板以下的桩身位置，不得在承压板上或千斤顶上设置沉降观测点，以避免因承压板变形导致沉降观测数据失实。

4.2.7 在试验加、卸载过程中，荷载将通过压重平台支墩、锚桩传至受检桩和基准桩周围地基土中，并使之变形。随着受检桩、基准桩和压重平台支墩（或锚桩）三者间相互距离的减小，地基土变形对受检桩、基准桩的附加应力和变形影响加剧。

关于压重平台支墩边与基准桩和受检桩之间的最小间距问题，应区别两种情况对待。在场土地质较硬时，堆载引起的支墩及其周边地面沉降和试验加载引起的地面回弹均很小；但在软土地质，大荷载下支墩附近应力影响范围大，应特别重视。虽然此次修订为适应大荷载试验的实际情

况参照广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60-2019 对部分间距降低了要求，但需要在远离支墩处设置稳定的基准点，用水准仪等测量仪器观测基准桩的竖向位移，作为沉降校核的辅助手段。

4.3 现场检测

4.3.1 为便于安装位移传感器，受检桩顶部宜高出试坑底面；为使受检桩的受力条件与设计工况相同，试坑底面宜与承台底标高一致。对于工程桩抽样检测，当最大试验荷载较低时，允许采用水泥砂浆找平桩顶的简单桩头处理方法。

4.3.2 在实际工程桩试验中，因锚桩质量问题而导致试验失败或中断的情况时有发生，为此建议在试验前对灌注桩及有接头的预制桩进行桩身完整性检测，大致确定其能否作锚桩使用。

4.3.3、4.3.4 慢速维持荷载法是我国公认、且已沿用多年的标准试验方法，也是衡量其他承载力检测方法的唯一标准。本市大量静载试验数据显示，桩端持力层设置在强风化（或风化程度更高）岩土层的灌注桩和采用静压工艺施工的预制桩，其竖向抗压静载试验结果不满足设计要求的概率偏高， $Q-s$ 曲线多呈缓变形，各级荷载作用下桩顶沉降稳定时间长。对于上述两类较易出现问题的桩和为设计提供依据的试验桩，均不得采用快速维持荷载法。对于工程桩抽样检测，应首先针对成桩质量相对最不可靠的基桩采用慢速维持荷载法，当其试验结果满足设计要求后，方可选用快速维持荷载法对其余基桩试验。这样既能保证试验结果的可靠性，也能提高试验效率。

4.3.6 本地大量实测资料表明，某级荷载下桩顶沉降首次稳定后，由于强烈阳光照射、温差变化易使基准梁易产生挠曲变形，经常导致稳定过程中沉降反向变化。使用静载测试仪进行静载试验时，加载装置加压和补压由系统自动精确控制，形成假稳定的概率非常小，要求连续两次相对稳定是没有必要的。因此，本条第 3 款规定了慢速维持荷载法沉降首次相对稳定后即可施加下一级荷载。

4.3.7 在工程桩抽样检测中，国内某些行业或地方标准允许采用快速维持荷载法。部分标准未提出适宜的沉降相对稳定标准，本条对此作出了规定。

4.3.8 当桩发生过上浮、桩身存在水平整合型缝隙、桩端有沉渣时，在较低竖向荷载时常出现本级沉降超过上一级荷载对应沉降量 5 倍的陡降，当缝隙闭合或桩端沉渣压密实后，随着维荷时间延续、荷载增加，变形梯度逐渐变缓。可是当桩身某截面强度不足而被压碎，也会出现陡降，与前不同的是随着沉降增加，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，而应看最终桩顶总沉降量是否超过 40mm，以大致判断造成陡降的原因。对于大直径桩为了原因分析和后续处理需要也可以继续加载至 60mm~80mm。

4.4 检测结果

4.4.1 除 $Q-s$ 、 $s-lgt$ 曲线外，还有 $s-lgQ$ 曲线。为便于直观地比较结果，同一工程的全部受检桩的结果曲线应按相同的沉降纵坐标比例绘制。

4.4.2 按本条前二款确定的单桩竖向抗压承载力检测值即单桩竖向抗压极限承载力。

本标准确定承载力检测值必要条件之一是，本检测值满足沉降（位移）相对稳定标准，要么是稳定过的某个荷载分级对应的荷载，或者是能证明是稳定的，比如第 3 款情形是在两个稳定过的荷载分级之间按沉降量或相对沉降量插值。

对应于第 4.3.8 条第 1 款的情况，虽然经历 5 倍陡降、但后几级又都能达到相对稳定标准，也不能就断定该桩的承载力检测值就是最末级的荷载。应分析、验证造成 $Q-s$ 等曲线异常的原因。若证实是上浮、沉渣超标、桩身裂缝等原因所致，就不能判定该桩的承载力检测值就是

最末级的荷载。在未知原因的情况下，判定 $Q-s$ 曲线发生明显陡降或 $s-lgt$ 曲线尾部出现明显向下弯曲的前一级荷载值为承载力检测值是偏安全的。

大量实践经验表明：当沉降量达到桩径的 10% 时才可能出现极限荷载（太沙基和 ISSMFE）。黏性土中端阻充分发挥所需的桩端位移为桩径的 4%~5%，而砂土中至少达到 15%。故本条第 3 款对缓变型 $Q-s$ 曲线，按 $s=0.05D$ 确定直径大于或等于 800mm 桩的单桩竖向抗压极限承载力大体上是保守的。桩径在 800mm 以上的桩定义为大直径桩，当桩端直径 $D=800\text{mm}$ 时， $0.05D=40\text{mm}$ ，正好与中、小直径桩的取值标准衔接。应该注意到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。现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 中，取缓变型 $Q-s$ 曲线 $s=40\text{mm}$ 对应的荷载值为单桩竖向抗压极限承载力，且该规范规定桩基沉降不得超过建筑物的沉降允许值。考虑到本市多采用端承型桩，故将“ $s=0.05D$ （ D 为桩端直径）且 $s\leq 80\text{mm}$ ”分为“ $s\leq 60\text{mm}$ 和 $s\leq 80\text{mm}$ 两种情况”，前者适用于嵌岩桩，目的在于控制差异沉降，后者适用于非嵌岩桩，以和现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 和现行广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60 相协调。

关于桩身弹性压缩量，当进行桩身应变或桩端位移测试时是可测得的；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 $\frac{QL}{2EA}$ 。考虑了桩身压缩而放宽沉降标准利于桩端承载力有效发挥、获得更准确的承载力，但对由变形控制的设计作用有限。

当出现锚桩上拔位移梯度加大、抗拔力不足，试验被迫终止时属于试验不成功，应补加反力继续试验，该桩承载力检测值至少是实际施加的荷载。

4.4.3 本条只适用于为设计提供依据时的单桩竖向抗压极限承载力标准值的统计，统计取值方法遵照现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定的原则。

试验过程中，因故提前终止试验时，试验结果能否参与统计，应具体情况具体分析，要视能否比较真实反映桩土体系工作性状、是否安全等多角度研判决定。如果是受检的桩土体系之外的原因，如加载装置故障、反力平台有倾覆危险、锚桩即将拔出、桩帽开裂破坏等，试验终止前的荷载还较低，就不宜参与统计，有条件时宜排除故障、消除安全隐患后继续试验，对前、后两次试验数据综合分析后确定受检桩承载力再参与统计计算。如果提前终止前，荷载已比较接近预计最大试验荷载，也可参与统计，这样是偏于安全的，可以节省不必要的试验费用、缩短试验周期。

现行国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 中规定，单桩竖向承载力特征值为单桩竖向极限承载力标准值除以安全系数。在现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 中，单桩竖向承载力特征值为单桩竖向极限承载力除以安全系数 2，现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 和《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106 亦同，但区别在于各规范对缓变型 $Q-s$ 曲线确定的极限承载力有区别，GB 50007 严于 JGJ 106。

本市大直径桩几乎都是端承型桩，即使是大直径扩底灌注桩也多以强风化岩为桩端持力层，正常情况下多数桩在 2 倍特征值的荷载下沉降不会太大，接近 60mm~80mm 比较少。按 60mm~80mm 合格的标准，可能存在同一结构单元下的端承型桩，因个别桩的沉降太大而出现较大差异沉降的情况，对此设计单位应予以重视。

静载试验结果最终给出的是极限承载力，而设计布桩时使用的是特征值。按照沉降控制设计原则，特征值对应的沉降不能太大，对此设计单位应根据结构要求予以验算、取值。可以参考现行行业标准《大直径扩底灌注桩技术规范》JGJ/T 225，对缓变型 $Q-s$ 曲线，取 10mm 到 15mm 沉降对应的荷载作为单桩竖向承载力特征值。故此，当设计有明确要求时可依据设计要求、相关

规范确定单桩竖向抗压承载力特征值。

4.4.4 本条规定了检测报告中应包含的一些基本内容，还宜提供和桩工作性状相关的其他信息以便设计分析验算。桩身内力测试报告还应包括传感器类型、安装位置、轴力计算方法、各级荷载作用下的桩身轴力图 and 桩侧各土层的侧阻力、端阻力等。

5 单桩竖向抗拔静载试验

5.1 一般规定

5.1.1 单桩竖向抗拔静载试验是确定单桩竖向抗拔承载力最直观、最可靠的方法。

5.1.2 针对抗拔桩最大试验荷载规定的有多种情形，以下从设计角度以荷载和抗力（桩身结构抗力和桩侧岩土抗力）验算说明抗拔试验的预定最大荷载取值问题。

先对灌注桩加以说明。

1 荷载：

抗浮桩最重要的荷载是水浮力，其标准值大小和设计取用的抗浮设防水位有关，一般有两种典型取法，一是跟室外地坪一致，二是取室外地坪以下 0.5m~1m。

抗浮构件尺寸（包括配筋）设计时，对于第一种情况，由于荷载（水浮力）已经计足，分项系数可取低值；对于第二种情况，由于荷载（水浮力）有超出设防水位的可能，分项系数宜取高值。因此，两种情况下的荷载效应的基本组合值会比较接近。

当按两种不同设防水位下水浮力的标准值设计抗浮桩的桩径、桩长、持力层及用桩数量时，会有两种单桩抗拔承载力特征值。对第一种情况可适当降低预定最大试验荷载。

2 桩身结构抗力：

按相关规范要求，桩身结构抗力考虑两方面因素，即强度和裂缝宽度。

1) 强度：

抗浮构件受拉（抗拔）承载力不大于纵向钢筋受拉承载力，即 $N_F < N_{ba}$ 。依据行业标准《建筑工程抗浮技术标准》JGJ 476-2019，建筑工程水浮力倾向于永久荷载，作用效应按承载力极限状态下作用的基本组合分项系数 1.35。由于普通钢筋采用了 1.1 的分项系数，考虑荷载试验是短暂工况，荷载可按主筋屈服强度标准值控制，即受拉钢筋承载力标准值是水浮力标准值得 1.5 倍。即不考虑重要性系数时，按桩身材料（主筋）抗拉强度控制试验上拔荷载时不应超过 1.5 倍的荷载标准值。

2) 桩身抗裂验算：

因本市地下水位高，抗拔桩绝大多数是按裂缝控制配筋的。《建筑工程抗浮技术标准》JGJ 476-2019 验算的最大裂缝宽度为 0.3mm，依据国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010-2010，构件受拉抗裂承载力标准值除和最大裂缝宽度有关外，还和保护层厚度、钢筋等效直径、配筋率有关，对混凝土灌注桩还和成桩工艺系数有关。比如，对桩径 $d1000\text{mm}$ ，配置 26 根 25mm 的 HRB400 钢筋，取灌注桩工艺系数 0.9、最大裂缝宽度 0.3mm 时受拉承载力标准值是 2073kN；取工艺系数 0.6、最大裂缝宽度 0.3mm 时受拉承载力标准值是 1767kN。而该配筋下的轴心受拉承载力设计值是 4524kN，分别是上述受拉承载力标准值的 2.18 和 2.56 倍。

本次修订还查阅了近几年深圳市建筑科学研究院设计的 8 个工程项目，它们全部进行过裂缝控制验算。桩径在 800mm~1600mm 之间，共有 25 种桩型，抗拔承载力特征值在 800kN~4200kN 之间。桩身主筋配置由抗裂控制，主筋设计强度对应的桩身承载力设计值和单桩抗拔承载力特征值的比值在 1.8~2.9 之间，小于 2.0 的（1.8、1.9、1.9）仅有 3 种桩型；主筋的屈服强度对应的桩身承载力标准值和单桩抗拔承载力特征值的比值在 2.0~3.8 之间。

即由 1)、2) 可见, 本市桩身抗拔承载力主要由抗裂控制。桩身受拉承载力能达到单桩抗拔承载力特征值的 2 倍。

3 岩土抗力

1) 计算方法

岩土抗力设计惯用安全系数法, 安全系数不小于 2.0, 抗浮桩也不例外。岩土侧阻力取值一般采用规范推荐的经验参数和系数, 根据桩侧土阻力经验值、抗拔经验系数、施工工艺系数、后注浆系数等初步设计确定桩侧岩土层深度、桩径。再通过静载试验确定承载力特征值、验证安全系数。

2) 安全系数

安全系数的验证只能采用静载试验。

传统上的静载试验是针对抗压桩的, 其设计阶段和验收阶段最大试验荷载取 2.0 倍抗压承载力特征值时, 桩身竖向应力能满足最大荷载要求。原因在于: 首先, 设计时采用了桩身混凝土强度设计值、工艺系数、水下灌注折减系数等, 再考虑箍筋加强作用、桩头加强措施等, 实际桩头部位的强度有富余能承受 2.0 倍抗压承载力特征值下的荷载。其次是岩土阻力, 考虑极端情况下侧摩阻力发挥到极限后仍有可观的残余强度、并会逐步恢复; 桩端土经压密硬化作用, 承载力也会提高; 至于嵌岩桩则是由桩身强度控制; 所以从岩土抗力角度, 以 2.0 倍特征值试验是安全的也是今后使用阶段安全有利的。

抗拔桩则不然。验收阶段预定最大上拔荷载受桩身抗拉强度、抗裂要求、岩土极限抗力三者中的小值控制。当受桩身抗拉强度控制时极有可能最大荷载不满足 2.0 倍安全系数。因本市灌注桩抗拔力离散现象明显, 抗拔桩岩土抗力安全系数验证非常重要, 若验收阶段不得不按小于 2.0 的安全系数加载, 则应加强设计阶段用试验桩验证的要求; 还由于试验桩的静载试验习惯上只做 3 根, 显然是偏少的, 即应增加试验桩数量。

综上, 现实中宜从安全和经济的角度确定试验最大荷载, 可分以下三种情形。

1 按抗裂控制设计的可按 2.0 倍单桩竖向抗拔承载力特征值加载。桩身结构不会破坏, 也验证岩土抗力要求的安全系数 2.0。但桩身有可能出现裂缝, 由于实际工程水浮力作用下抗浮桩呈群桩受力特性, 而试验过的桩数量少、卸荷后裂缝回缩闭合, 所以也不用做特别工程处理。试验桩按同类型不少于 3 根的数量要求, 未破坏的试验桩可用作工程桩;

2 按钢筋抗拉强度控制设计的可取设计要求的最大试验荷载, 建议按 1.5 倍单桩竖向抗拔承载力特征值加载。由于这时只能验证 1.5 的岩土设计安全系数, 设计阶段宜按总桩数的 0.5% 且不少于 3 根进行试验桩的抗拔力试验, 试验桩的荷载和配筋按抗拔承载力特征值的 2.0 倍要求, 未破坏的试验桩可用作工程桩;

3 设计按变形量控制的试验最大荷载由设计单位确定, 设计阶段宜综合变形控制和岩土抗力安全系数 (建议取 1.5) 确定设计阶段的试验数量和荷载。

对于 PHC 管桩, 行业标准《预应力混凝土管桩技术标准》JGJ/T 406-2017 规定: 轴心受拉时裂缝控制等级为一级。按荷载效应标准组合计算的抗裂拉力值和桩身轴心受拉承载力设计值基本相等。对静压和锤击工艺, 深圳市大量静载抗拔试验表明直径 d400mm、d500mm、d600mm 管桩的极限抗拔承载力检测值大约分别是 600kN、1000kN、1200kN, 该值和桩身轴心受拉承载力设计值基本相同。即对于 PHC 管桩, 按 2.0 倍单桩抗拔承载力特征值施加荷载, 桩身基本上是不出现裂缝的, 即使个别情况下出现裂缝, 也和灌注桩的情况一样, 因数量少、试验完毕裂缝闭合等因素, 对耐久性影响有限。

关于上拔荷载中是否包含桩身自重等问题说明如下。桩抗拔力首先是由桩侧土摩阻力提供,

桩身自重是否计入其中，不同设计规范有不同的处理方式，试验时的最大试验荷载需要和设计计算相协调。如果设计计算的桩抗拔力仅是桩侧土阻力，则最大试验荷载可按 2 倍的侧阻力再加上桩重考虑，在提供试验结果时再将桩重扣除。若设计计算时抗拔力包含了桩重、按安全系数法计算承载力，最大试验荷载是该抗拔力特征值乘以 2.0，表面上看是对侧阻力特征值和桩重都乘以安全系数 2.0，实质上多出的一个桩重是由侧阻力的发挥代替实现的，提供试验结果时也不用扣除桩重。若试验用反力梁架等构件的总重量和试验荷载分级相当时，也可按以上方式处理。

5.1.3 为设计提供依据的试验桩，其试验目标是尽可能使桩土界面达到极限状态。试验桩宜加载到能判别单桩抗拔极限承载力为止，或加载到桩身主筋应力达到设计强度。如果初步设计偏保守、计算的桩侧阻力偏低，与之相应的桩身配筋率也不会太高。实际试验时会出现桩侧阻力未全部发挥前主筋所受荷载已经达到设计强度，这时为了能让侧阻力继续发挥，习惯上会在原初步设计的最大上拔荷载基础上超加部分上拔荷载，考虑到试验准备时接长钢筋的工艺简陋、各受拉钢筋受力不均现象明显，为了试验安全对超过钢筋拉力设计值的荷载增量取值应慎重，可按主筋屈服强度控制，并且要有可靠的防锚具飞出、钢筋连接位置崩断伤及人员的措施。试验桩不宜作为工程桩使用。

对旋挖、冲（钻）孔灌注桩施工时宜进行成孔质量检测，桩孔中、下部位有明显扩径时（设计有扩径要求者除外）成桩后不宜作为抗拔试验桩。因实际桩身截面和设计不符的桩抗拔承载力缺乏代表性，特别是桩身中下部有明显扩颈的桩，其抗拔极限承载力远远高于长度和桩径相同的非扩颈桩、相同荷载下的上拔量也有明显差异。试验桩也不宜作为工程桩使用。

5.2 仪器设备

5.2.1 当采用天然地基（或处理地基）提供反力时，在加载产生的附加压应力作用下，地基土的压缩变形量不宜过大，以无明显变形为宜。另外，两边支座处的地基土强度应相近，两边支座与地面的接触面积宜相同，以避免加载过程中两边沉降不均造成受检桩偏心受拉。试验所需反力由桩提供时，反力桩承载力和桩顶强度应在最大试验荷载作用下仍然保持安全，为使反力梁保持稳定，反力桩顶面直径（或边长）应不小于反力梁宽。

5.2.2 对采用混凝土填芯方式传递荷载的预制管桩抗拔力试验，除检测桩土之间的摩阻力外，还检测了填芯混凝土和桩管内壁间的粘结力，在前者未充分发挥前，后者是不允许提前失效的。根据最大试验荷载，按照工程桩设计选用的参数验算或专门设计桩顶连接，就能在对桩土之间摩阻力检测的同时也对填芯混凝土和桩管内壁间的粘结力进行验证。

5.2.3 本条的要求基本同本标准第 4.2.2 条。因拔桩试验时千斤顶可安放在反力架顶面，当采用 2 台（或以上）千斤顶加载时，应采取一定的安全措施，防止千斤顶倾倒等意外发生。

5.2.6 桩顶上拔量测量平面必须在桩身位置，严禁在混凝土桩的受拉钢筋上设置位移观测点，以避免因钢筋变形导致桩顶上拔量观测数据失实；为防止混凝土桩保护层开裂对上拔量测量的影响，桩顶上拔量观测点应避开混凝土容易开裂区域设置。但由于大直径灌注桩试验时，桩顶面往往较低，上拔量观测点设置受很多限制，允许上拔量观测点设置在桩顶面混凝土上，但要确保不受主筋变形的影响。

5.2.7 关于基准桩、受检桩、支座（或反力桩）之间距离的规定，主要目的是减小支墩反力对基准桩稳定性的影响、降低支墩施加给桩侧土的附加应力使桩侧摩阻力增加的效应。由于大荷载试验时支墩宽度大，而且的反力梁截面和长度也比较大，造成运输安装成困难，故本次修订仍然维持了和抗压静载试验同样的规定。对此说明如下：一、由于本市抗拔桩的破坏形式多呈脆性破坏，破坏时桩顶上拔位移急剧变化，故对桩顶位移的监测准确度要求可以适当放宽，但为设计提

供依据的试验可采用监测基准桩位移的方式修正；二、本市抗拔桩主要由中下部岩土层提供抗拔力、破坏发生在桩土界面，而支墩下附加应力的影响深度有限，支墩和受检桩间距离也可适当放宽以保障试验安全。

5.3 现场检测

5.3.1 如需循环加卸载可参照相关标准进行，如：现行行业标准《高层建筑岩土工程勘察标准》JGJ/T 72。加载至荷载等级较大时，有条件者宜仔细观察桩身混凝土开裂情况。

5.3.2 出现本条前两款情况属于达到抗拔力极限状态，可终止加载。若在较小荷载作用下，出现本级桩顶上拔量大于前一级荷载下的5倍，而桩的累计上拔量却不大，受检桩自身结构承载力和桩周土承载力可能未发挥至极限，比如，有扩大头的桩，只有当桩顶产生一定上拔量后才会调动下部土体的抗拔承载力，所以要求有一定上拔量后才停止加载是合理的，故此这里增加了累计上拔量应大于15mm的限制条件。

试验过程中必然存在抗拔钢筋受力不匀现象，在桩顶上拔荷载还未达到钢筋屈服强度标准值时，部分受力较大钢筋（焊接接头）因强度不足而断裂。为防止钢筋连续断裂，试验应及时终止，该情形属于试验失败，应重新连接后继续试验。不宜将钢筋断裂前一级荷载作为极限承载力。

5.3.3 现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94规定预应力混凝土桩裂缝控制等级为一级和二级，最大裂缝宽度的限值为0、即桩身不允许出现裂缝。

5.4 检测结果

5.4.1 抗拔静载试验与抗压静载试验一样，应绘制 $U-\delta$ 曲线、 $\delta-1gt$ 曲线。但当上述二种曲线难以判别时，也可以辅以 $\delta-1gU$ 曲线或 $1gU-1g\delta$ 曲线，以确定拐点位置。

5.4.2、5.4.3 按第5.4.2条前二款确定的单桩竖向抗拔承载力检测值即单桩竖向抗拔极限承载力。

抗拔桩按主要提供抗力的岩土层对应有嵌岩桩和非嵌岩桩；按桩侧法向应力大小可对应挤土桩和非挤土成桩工艺；按桩土界面摩擦系数高低又可对应于湿作业水下灌注和干作业灌注。不同类型抗拔作用机理、破坏形态不同，除了脆性、延性外，实际中还会出现介于两者之间的破坏形式，即 $U-\delta$ 曲线有变形加快趋势却无明显陡升、 $\delta-1gt$ 曲线斜率无明显变陡或曲线尾部无明显弯曲现象，对此极限抗拔承载力的判定应把握承载力极限状态和正常使用极限状态两个原则，即在某级荷载作用下上拔位移相对稳定且总上拔位移没超过本地最大上拔量经验范围的可判定为极限抗拔承载力。在等荷载增量加载过程中总上拔量不大、位移即使有局部突变，只要末级能稳定，可按最大荷载判定承载力检测值。但对有抗裂控制要求的在接近开裂荷载时，由于桩身开裂使桩截面应力转换导致位移突变，应判断位移突变时的上拔荷载为承载力检测值。有条件时，可借助数值分析方法辅助分析。

5.4.4 试验因意外中断、或者失败的，如支墩下沉（或不均匀下沉）较大、钢筋连接处断开、反力梁受弯（扭）过大等等，是否参与统计应具体问题具体分析。

5.4.5 桩身内力测试报告还应包括传感器类型、安装位置、轴力计算方法、各级荷载作用下的桩身轴力图 and 桩侧各土层的抗拔侧阻力等。进行过成孔质量检测的灌注桩宜提供孔径-深度曲线。

6 单桩水平静载试验

6.1 一般规定

6.1.1 桩的水平静载试验除了桩顶自由的试验外，还有带承台的水平静载试验（考虑承台的底面阻力和侧面抗力，充分反映桩基在水平力作用下的实际工作状态）、桩顶不能自由转动的不同约束条件及桩顶施加垂直荷载等试验方法，也有循环荷载的加载方法。这些都可根据设计的特殊要求使用本方法模拟。

6.1.2 桩的抗弯能力取决于桩和土的力学性能，包括桩的自由长度、抗弯刚度、截面形状和尺寸、桩顶约束等因素。试验条件应尽可能和实际工作条件接近，将各种差别的影响降低到最低程度，使试验成果能尽量反映工程桩的实际工况。通常情况下，试验条件很难做到和工程桩的情况完全一致，此时应通过试验桩测得桩周土的地基反力特性，即地基土水平抗力系数，它反映了桩在不同深度处桩侧土抗力和水平位移之间的关系，可视为土的固有特性。根据实际工程桩的情况，参考现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94，确定土抗力大小，进而计算单桩的水平承载力和弯矩。

6.2 仪器设备

6.2.1 现场试验时水平力作用方向与工程桩实际承受的水平力作用方向不一致的现象时有发生，比如用两根边坡抗滑桩对顶时桩受力方向垂直于设计工况下的受力方向，易产生误导，故此修订对此加以明确。

当依据设计要求加载至桩身结构破坏时，反力桩或反力装置应能够提供相应的反力并具有足够的刚度。

6.2.2 水平力作用点位置不在桩基承台底面标高处时，由于边界条件的改变，试验时在相对承台底面处将产生附加弯矩，影响试验结果，也不利于将试验成果根据实际桩顶的约束予以修正。在试验过程中，必须使用球形铰支座以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。

6.3 现场检测

6.3.1 在试验前，采用低应变法检测桩身完整性，目的是了解桩身结构是否会对水平承载力产生影响、也便于对检测结果的分析。对于混凝土桩，常因推力过大造成桩身开裂或破损，因此水平承载力试验完成后的桩身完整性检测也很有必要。

6.3.2 单向多循环加载法，主要是为了模拟实际结构受重复荷载作用的情形。当需考虑长期水平荷载作用影响时，宜采用本标准第4章规定的慢速维持荷载法。水平试验桩多为桩身结构破坏，为缩短试验时间，也可参照水工桩基水平承载力试验方法，采用更短时间的快速维持荷载法。

6.3.4 对抗弯性能较差的长桩或中长桩而言，水平荷载下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定的水平位移允许值控制。考虑软土的侧向约束能力较弱以及大直径桩的抗弯刚度大等特点，终止加载的变形值可取上限。对一般建筑物，水平允许变形为10mm；敏感建筑物或有特殊使用要求的建筑物水平允许变形仅为6mm。

6.4 检测结果

6.4.2 本条中的地基土水平抗力系数的比例系数 m 的计算公式仅适用于水平力作用点至试坑底面的桩自由长度为零时的情况。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。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 $ah < 2.5$ 时的情况；另一种是工程中常见的“弹性长桩”，桩下段嵌固于土中不能转动，桩身产生挠曲变形，即本条中 $ah \geq 4.0$ 的情况。 $2.5 \leq ah < 4.0$ 的，称为“弹性中长桩”。现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 对中长桩的 v_y 变化给出了具体数值（见表 1）。因此，在按公式（6.4.2-1）计算 m 值时，应先试算 ah 值，以确定 ah 是否大于或等于 4.0，若在 2.5~4.0 范围以内，应调整 v_y 值重新计算 m 值（有些行业标准不考虑）。当 $ah < 2.5$ 时，公式（6.4.2-1）不适用。

表 1 桩顶水平位移系数 v_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 v_y 值	2.441	2.502	2.727	2.905	3.163	3.526

注：当 $ah > 4.0$ 时取 $ah = 4.0$ 。

6.4.3 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开展扩大，最大弯矩断面下移，最后导致桩身结构的破坏。所测水平临界荷载为桩身产生开裂前所对应的水平荷载。因为只有混凝土桩才会产生开裂，故只有混凝土桩才有临界荷载。

6.4.4、6.4.5 单桩水平极限承载力是对应于桩身折断或桩身钢筋屈服时的前一级水平荷载。按第 6.4.4 条前四款确定的单桩水平承载力检测值即单桩水平极限承载力。

现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 中根据静载试验结果确定单桩水平承载力特征值，是把桩身强度、开裂或允许位移等作为控制条件的。以桩身配筋率 0.65% 为界，大于 0.65% 的由位移控制，即按水平位移 10mm（敏感建筑物取 6mm）对应的荷载的 75% 取为特征值；小于 0.65% 的由桩身强度控制，即特征值取临界荷载的 75%；由永久荷载控制的再乘以 0.8。同时，该规范中单桩水平承载力特征值以桩身配筋率 0.65% 为界有两个计算公式用于初步设计，一个主要由桩身混凝土抗拉强度等参数控制，另一个主要由桩顶允许水平位移等参数控制。

单桩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。由于建筑工程基桩的桩顶嵌入承台深度通常较浅，桩与承台连接的实际约束条件介于固接与铰接之间，这种连接相对于桩顶完全自由时可减少桩顶位移，相对于桩顶完全固接时可降低桩顶约束弯矩并重新分配桩身弯矩。如果桩顶完全固接，水平承载力按位移控制时，是桩顶自由时的 2.60 倍；对较低配筋率的灌注桩按桩身强度（开裂）控制时，由于桩顶弯矩的增加，水平临界承载力是桩顶自由时的 0.83 倍。如果考虑桩顶竖向荷载作用，混凝土桩的水平承载力将会产生变化，桩顶荷载是压力，其水平承载力增加，反之减小。

桩顶自由的单桩水平静载试验得到的承载力和弯矩仅代表试桩条件的情况，要得到符合实际工程桩嵌固条件的受力特性，需将试桩结果转化，而求得地基土水平抗力系数是实现这一转化的关键。考虑到水平荷载-位移关系的非线性且 m 值随荷载和位移增加而减小，有必要给出 $H-m$ 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。

6.4.6 试验因意外中断、或者失败的，是否参与统计应具体问题具体分析。比如，若中断前的荷载离群，应不参加统计；若接近最大荷载时中断，分析原因，综合判断是否参与统计。

7 高应变法

7.1 一般规定

7.1.1 判定单桩竖向抗压承载力和检测桩身完整性是高应变法的主要功能。这里的承载力是指岩土对桩的静土阻力，是在桩身材料强度满足桩身承载力设计值的前提下得到的。所以要得到极限承载力，应使桩侧和桩端岩土阻力充分发挥，否则不能得到极限承载力。

采用高应变法检测桩身完整性时，由于其激发能量大、检测有效深度深的优点，特别在检测桩身水平整合型裂缝、预制桩接头缝隙等缺陷时，能够在分析这些“缺陷”是否影响竖向抗压承载力的基础上，更加合理地评价缺陷程度、完整性类别。

此外，高应变法还有以下几项功能：

1 用实测曲线拟合法分析时，可计算出桩身缺陷的位置及缺损程度、桩端阻力、桩侧阻力及其分布；

2 打桩监控可监测打桩过程中随入土深度的增加桩承载力的变化、桩身应力、裂缝等缺陷的发展情况及锤击效率；

3 为选择沉桩设备及工艺参数、选择合理的桩长及收锤标准提供依据。

7.2 仪器设备

7.2.1 本条规定了检测仪器设备所应具备的性能和基本功能。建议根据实测经验合理选择加速度传感器的量程，量程宜大于预估最大冲击加速度的一倍以上。混凝土桩上安装的加速度传感器的量程不应小于 20000m/s^2 ，钢桩不应小于 30000m/s^2 。在锤体上安装的加速度传感器不应小于 50000m/s^2 。

对于环形电阻应变式传感器，虽然检测时的实测轴向平均应变在 $\pm 1000\mu\epsilon$ 以内，但考虑到锤击偏心、传感器安装初始应变以及钢桩检测等极端情况，一般可测最大轴向应变范围不宜小于 $\pm 2500\mu\epsilon \sim \pm 3000\mu\epsilon$ 。

7.2.2 现场检测时，重锤对桩的冲击也会使桩周土产生振动，因此不宜采用设置基准梁（桩）的方法实测贯入度，宜采用精密水准仪等光学仪器来测量。

7.2.3 现场检测时，对预制桩可用现场打桩机械或类似的装置作为锤击设备，但导杆式柴油锤除外，原因是其荷载上升时间过于缓慢，容易造成速度信号失真。其他桩型则应采用自由落锤。锤击设备宜具有稳固的导向装置。

由于组装锤的单片或扁平的强夯锤下落时平稳性差且不容易导向，更易造成锤击偏心，影响检测质量，因此规定锤体高宽（径）比不得小于 1.0。

“重锤低击”是高应变法检测的基本原则。对锤重的要求是为了保证检测时桩土之间产生足够大位移，激发出土的极限阻力，同时重锤低击能减小锤击偏心的影响，并防止桩顶局部应力过大而破损。当桩较长或桩径较大时，使桩侧阻力、桩端阻力充分发挥所需的位移更大，因此当混凝土桩的桩径大于 600mm 或桩长大于 30m 时，锤重应大于设计单桩竖向抗压承载力特征值的 3.0%。

7.3 现场检测

7.3.1 桩头顶部设置桩垫是为了保护桩头，避免被击碎，同时也是为了得到良好的实测信号，桩垫应根据现场检测情况及时更换。

安装传感器在检测工作中十分重要，安装质量的优劣直接影响到信号的质量，传感器应由专业技术人员安装。传感器与桩顶之间距离为 $2d$ 或 $2b$ 的限制是为了得到高质量的实测信号，同时也是为了保护传感器。

由于测点附近截面力学阻抗值的变化会对实测信号产生影响，因此传感器安装面的材质和截面尺寸应与原桩身相同。对于桩头进行了修复或加固处理后的桩，传感器应尽可能安装在原桩身上。

本市常用桩型（特别是挤土桩）承载力的时间效应比较明显。一般情况下成桩后承载力随时间而增长并趋于稳定。承载力恢复系数目前尚无非常成熟的地区经验，因此工期紧、休止时间短时，除非得到的单桩承载力已达到设计要求，否则检测时间应符合本标准第 3.3.4 条的相关规定。

7.3.2 本条规定了检测前各类参数的设定要求。

高应变法现场检测时采集的是桩顶部测点处的应变和加速度信号，然后根据设定的各类参数计算出桩身应力和速度。因此，参数的设定应按测点处桩的性状来确定。

测点下桩长是传感器安装点至桩底面的距离，不包括桩尖长度。

在时间、桩长和波速三个量中，必须已知两个才能求出第三个。因此在检测前要尽可能掌握桩的实际长度。为了验证实际桩长，检测后应用计算得到的桩身波速对现场提供的桩长进行校核。

混凝土桩的桩身波速大小除与桩身材质有关外，还和成桩工艺、龄期等有关。灌注桩即使是在同一场地，桩身波速有时相差也会较大，所以应按本标准第 7.4.3 条的规定，采用桩底反射信号进行校核，用实测桩身波速作为设定值。混凝土桩桩身波速在 $3000\text{m/s}\sim 4500\text{m/s}$ 之间；钢桩桩身波速取 5120m/s 。

7.3.3 本条规定了现场检测的基本要求。

1 因传感器外壳与仪器外壳共地，当检测现场潮湿、传感器对地未绝缘时，交流供电时常会出现 50Hz 干扰，所以应使检测仪器良好接地或改用直流供电；

2 当采用自由落锤时，锤重及落距的选择也可采用波动理论预分析确定。规定重锤低击原则及最大锤击落距的限制是基于以下因素：

- 1) 落距越高越容易产生锤击偏心；
- 2) 桩顶的最大锤击力只与锤冲击桩顶的初速度有关，与桩顶最大速度成正比，落距过大，桩顶初速度偏高，容易击碎桩头、造成桩尖破损或桩身拉裂；
- 3) 轻锤高击并不能有效提高桩锤能量传递比、增大桩顶位移，锤击脉冲较窄易增大波传播的不均匀性，即桩身受力和运动的不均匀性（惯性效应）较明显、实测信号中的动阻力影响程度加剧、与位移相关的静土阻力呈明显的分段发挥态势，致使承载力的检测误差增大；
- 4) 如将锤重增加到预估单桩极限承载力的 $5\%\sim 10\%$ 以上，则可得到与长持续动载试验（rapid load test、Statnamic、速载法）相似持续时间的宽脉冲作用。此时由于桩身中的波传播效应大大减弱，桩侧、桩端岩土阻力的发挥更接近静荷载作用时桩的荷载传递性状。

因此，“重锤低击”是保障高应变法判定承载力准确性的基本原则。

3 关于单击贯入度

单击贯入度是反映桩侧、桩端土阻力是否充分发挥的一个重要标志。要判定受检桩的极限承载力，检测时就应使桩周土产生一定的塑性变形。贯入度过小，即通常所说的“打不动”，使判定的承载力检测值低于极限值。但单击贯入度过大会造成桩周土扰动大、使高应变承载力分析所用的力学模型和真实的桩-土互相作用状态接近程度变差，此时激发出的承载力也不代表受检桩的极限承载力。因此本条要求单击贯入度控制在2mm~6mm，是从保证承载力分析计算结果的可靠性出发的。虽然本条给出的贯入度的合适范围，但不能片面理解成在检测中应减小锤重使单击贯入度不超过6mm，“6mm贯入度”只是一个统计参考值。

预制桩采用打桩机械（导杆式柴油锤、振动锤除外）作为锤击设备时，通常是实测一阵（10击）下的总贯入度后再平均为单击贯入度。

4 桩身完整性检测

由于高应变法是通过实测岩土对桩的极限阻力来检测单桩承载力的，适用于常见的地基土破坏模式，因此在检测单桩承载力时，应先检测桩身是否有缺陷。

7.3.4 本条所述“有效锤击次数”是指能获得有效信号的锤击次数，有效信号是指可用于后续分析的信号。一定数量的有效信号可使后续分析有对比、选择的余地。

高应变法检测成功的关键是信号质量以及信号中的信息是否充足。所以应根据每锤信号质量以及贯入度、动位移和大致的土阻力发挥情况，初步判别采集到的信息是否满足检测目的。同时也要检查混凝土桩锤击拉、压应力和缺陷程度，决定是否进一步锤击，从而避免桩头或桩身受损。自由落锤锤击时，锤的落距应由低到高逐步加大。打入式预制桩则按每次采集一阵（10击）信号进行判别。

7.3.5 检测现场情况复杂，经常出现各种不利状况。为确保采集到可靠的信号，检测人员应能正确判断信号质量，熟练地诊断检测系统的各类故障，排除干扰因素。如检测中及时检查信号质量、传感器的安装情况、测点处混凝土是否开裂等，这些都是采集到高质量信号的必要条件，应引起高度重视。

除柴油锤施打的长桩信号外，力或速度信号尾部都应归零。出现不归零说明检测过程中的某一环节出现了问题，如混凝土桩可能是传感器或传感器安装面处的混凝土受损，或传感器的安装问题等所致，应立即进行检查。

当出现测点处混凝土开裂、桩身有明显缺陷并且程度在逐渐加剧时应停止检测。

7.3.6 采用挤土沉桩工艺，尤其是大面积密集群桩施工时，由于施打顺序不合理、沉桩速率过快、土体的侧挤和隆起等不利因素，可能会造成先期沉桩的上浮，因此对施工过程产生挤土效应群桩的高应变法检测应首先判断受检桩是否有上浮情况。当确认有上浮情况时，应取第一击信号进行分析计算，否则随着锤击次数的增加，受检桩上浮情况逐渐消除，承载力会逐渐提高。若采用第一击之后承载力增加了的信号分析计算，可能会造成受检场地其他上浮桩漏检，产生较大的质量隐患。

7.4 检测结果

7.4.1 高应变法采集的信号即使不采用复杂的数学计算和模拟，只要信号质量有保障，也能定性地反映桩土的承载性状及其他相关的动力学现象。因此，承载力分析计算前，应由具有坚实理论基础和丰富实践经验的高素质检测人员对信号进行定性检查和正确判断。

高应变法测得的是检测时激发出的土阻力值，要使土阻力充分激发，锤击能量应足够大使单击贯入度在2mm~6mm之间，如锤击能量不足单击贯入度偏小，无法测得极限承载力，此时只

能作为检验性检测，即证明岩土阻力至少能达到的水平。

良好的接收信号是取得正确分析结果的必要条件，所以在信号选取时，除了考虑锤击能量足够大以使桩土间有一定的相对位移外，还应特别重视以下情况：

- 1 桩身有缺陷的桩，锤击使缺陷进一步发展或拉应力使桩身混凝土产生裂缝；
- 2 连续打桩时桩周土的扰动及残余应力；
- 3 在桩易打或难打以及长桩情况下，速度基线修正引起的误差；
- 4 对桩垫过厚和柴油锤的冷锤信号，应考虑因压电加速度测量系统的低频特性所造成的速度信号误差或严重失真。

所以选取信号时要对以上各情况综合考虑。在保证锤击能量足以使土阻力充分发挥的前提下，也可能选取的不是锤击能量最大的那一击。当然，当确认受检桩存在上浮时应取第一击信号进行分析计算。

7.4.2 锤击偏心是指一侧力信号与另一侧力信号的幅值不同，幅值相差超过一倍属严重偏心，其信号不得用于分析计算。因为锤击偏心很难避免，所以严禁用单侧信号代替平均信号。

信号的质量除了与传感器安装好坏、锤击是否偏心、安装面混凝土是否开裂等因素有关外，还和混凝土的不均匀性和非线性有关。这些影响对应变式传感器测得、经转换得到的力信号尤其敏感。其中混凝土的非线性表现为随着应变的增加，割线模量减小并出现塑性变形，使力信号最终不归零。

现场检测时若传感器灵敏度系数和仪器增益设置无误，在分析时严禁将力或速度信号再重新标定。若有力和速度信号不重合等现象，应仔细分析找出原因。

7.4.3 桩身波速是否正确，对总阻力的计算结果有直接影响，而判定桩身波速所具备的必要条件是已知准确桩长。所以用高应变法检测承载力时，预知实际桩长是检测结果是否正确的必要条件。就目前高应变检测技术的原理和水平来看，在对桩长毫无所知的情况下，错判的可能性是较大的。

桩底反射明显时，桩身波速也可根据实测信号的下行波上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确定。

对桩底反射波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桩身波速。桩长较短且锤击力信号上升缓慢时，可采用低应变法确定桩身波速。

当桩身波速按实测信号改变后，测点处的原设定桩身波速也按线性比例改变，弹性模量则应按平方的比例关系改变。当采用应变式传感器测力时，多数仪器并非直接保存实测应变值，如有些是以速度 ($v = c \cdot \varepsilon$) 的单位存储。若弹性模量随桩身波速改变后，仪器不能自动修正以速度为单位存储的力信号，则应对原始实测力信号作校正。

7.4.4 在多数情况下，正常施打的预制桩，力和速度信号第一峰应基本成比例。但以下几种情况不成比例也属正常：

- 1 受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 锤击力信号上升缓慢或桩很短时，受到了土阻力波或桩底反射波的影响。

除第2种情况力值减小可避免计算的承载力过高外，其他情况随意调整比例均是对实测信号的歪曲，会产生错误的结果。因此，禁止将实测力或速度信号重新标定。

7.4.5 实测曲线拟合法和凯司法均是基于行波理论来分析高应变动测信号、判定单桩承载力的方法。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数值。而凯司法是对桩土力学模型做一定近似假定，推导出一系列简便公式以分析计算。

凯司法的特点是简洁快速，可在现场作直接分析得出初步结果。但其结果的客观性、可靠性均低于实测曲线拟合法。从同一工程多桩实测信号中选取一定比例有代表性的信号进行实测曲线拟合法分析，进而优化凯司法模型参数取值，既能提高高应变法判定单桩承载力的可靠性、也能提升检测效率。

7.4.6 从理论上讲，实测曲线拟合法的结果是客观唯一的，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、工程地质条件等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，所以采用实测曲线拟合法应注意下列问题：

1 关于桩与土模型：

- 1) 目前实测曲线拟合法采用的土的静阻力模型为理想弹 - 塑性模型或考虑土体硬化或软化的双线性模型。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。在卸载阶段，同样要规定卸载路径的斜率和弹性位移限；
- 2) 土的动阻力模型应采用与桩身质点运动速度成比例的线性粘滞阻尼模型；
- 3) 桩的力学模型通常采用一维杆件模型，桩单元划分应采用等时单元，即应力波通过每个单元的时间相等。为保证计算精度，不宜采用弹簧 - 质量块的离散模型；
- 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) 所用模型的物理概念应明确，参数取值应能限定范围，避免采用可使承载力计算结果产生较大变异的桩 - 土模型及参数。

2 拟合时应根据波形特征，结合施工和工程地质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；

3 自由落锤产生的力脉冲持续时间通常不超过 20ms，但柴油锤信号在主峰过后的尾部仍然能产生较长的低幅值延续；另外与位移相关的总静阻力会不同程度地滞后于 $2L/c$ 时刻发挥，当端承桩的端阻力发挥所需位移很大时，土阻力发挥将出现严重滞后，因此规定 $2L/c$ 时刻后延续足够的时间，是为了使曲线拟合能包含土阻力响应区段的全部土阻力信息。由于同样的原因，曲线拟合质量系数的计算方法也应考虑到这种滞后性；

4 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，则得出的承载力结果只能验证岩土阻力发挥的实际程度。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 土阻力响应区是指信号上呈现的静土阻力信息较为突出的时间段，本款特别强调此区段的拟合质量。应避免只重信号头尾，忽视中间土阻力响应区段拟合质量的错误做法。应通过合理的加权方式计算总的拟合质量系数，突出其影响。

7.4.7 凯司法的计算公式是在以下三个近似假定下推导出来的：

- 1 桩身阻抗基本恒定；
- 2 动阻力只与桩底质点运动速度成正比，即全部动阻力集中于桩端；
- 3 土阻力在时刻 t_1+2L/c 时刻已充分发挥。

显然，它较适用于摩擦型的中、小直径预制桩和截面较均匀的灌注桩。由于凯司法的计算公式是在以上近似假定下得到的，因此，所有和假定不符的影响都将反映到阻尼系数 J_c 中去，所以根据实际使用条件的不同，该系数有两种不同的意义：

1 受检桩的实际情况完全符合近似假定时, J_c 是桩端持力层的凯司阻尼系数, 主要取决于该土层的颗粒细度, 遵循随土中细颗粒含量增加阻尼系数增大的规律;

2 受检桩的实际情况不完全符合假定时, J_c 将变成一个没有明确意义的综合调整系数, 综合反映受检桩在各个方面的特定条件。

由于凯司法在简化计算时所做的一些近似假定使得它的应用受到一定的限制, 为防止凯司法的不合理应用, 本条规定宜采用动静对比试验或实测曲线拟合法确定 J_c 。

凯司法判定单桩承载力检测值有多种不同的算法, 需要根据具体条件选择使用。凯司法除了公式 (7.4.7-1) 的方法外, 还有以下几种方法:

1 RMX 法

由于公式 (7.4.7-1) 给出的 R_c 值与位移无关, 仅包含 t_1+2L/c 时刻之前所发挥的土阻力信息。除较短的摩擦桩外, 通常土阻力在 t_1+2L/c 时刻不会充分发挥, 检测时岩土对桩的阻力是经过一定的时间才达到其最大值 (端承桩尤其显著)。所以, 需要采用将计算所取的 t_1 位置向后延迟, 以对与位移相关的土阻力滞后于 t_1+2L/c 发挥的情况进行提高修正得到土阻力的最大值, 即最大阻力法 (RMX 法)。

2 RSU 法

桩身在 t_1+2L/c 时刻之前产生向上的反弹, 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还处于加载阶段)。负阻力的影响使计算结果偏低, 这对于桩较长、摩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)。

3 RAU 法和 RA2 法

在桩尖速度为零时, 动阻力也为零。取这个时刻来计算总阻力, 就可以直接得到静阻力, 而无需设定 J_c 。因此有两种“自动”法, RAU 法和 RA2 法。RAU 法适用于端承型桩, RA2 法适用于具有中等侧阻力的桩。

4 RMN 法

和最大阻力法相对应, 通过 t_1 位置向后延迟, 得到土阻力的最小值, 即最小阻力法 (RMN 法)。

各方法中, RMX 法和 RSU 法判定单桩承载力, 体现了高应变法波形分析的基本概念, 即应充分考虑与位移相关的土阻力发挥状态和波传播效应, 这也是实测曲线拟合法的精髓所在。

在应用凯司法判定单桩承载力时, 应注意以下几个问题:

- 1 必须准确确定 t_2 ($t_2=t_1+2L/c$) 时刻;
- 2 受检桩要基本符合凯司法的三个近似假定;
- 3 必须正确使用凯司法的阻尼系数;
- 4 正确选择具体的凯司算法。

7.4.8 当出现本条所述各种情况时, 高应变法难于分析判定承载力和预示桩身结构破坏的可能性, 建议采取验证检测。

7.4.10 采用高应变法检测桩身完整性不如低应变法方便快捷, 但它却有检测信号强、可对缺陷程度作出定量计算、发现有缺陷后可重复进行高能量冲击观察缺陷的发展趋势等优点。由于高应变法和低应变法检测桩身完整性测出的都是桩身截面力学阻抗的变化, 所以对桩身完整性的评价是桩身截面力学阻抗变化的评价, 通常不宜判断缺陷的性质。只要激发的阻力不很大, 可以对阻力分布作出假定, 再采用实测曲线拟合法单纯地拟合桩身、分析桩身截面力学阻抗的变化, 从而评价出桩身完整性。有些仪器配备了上述分析软件, 拟合后能够直接输出桩身截面力学阻抗

图。特别当实测信号复杂，有一个以上缺陷时，应采用实测曲线拟合法评价桩身完整性。

为了正确应用凯司法中桩身完整性系数，还应注意以下几点：

1 这种定量计算只适用于等截面桩最上面的第一个缺陷。当有轻微缺陷并确认为水平裂缝（如预制桩的接头缝隙）时，裂缝宽度 δ_w 可按下式计算：

$$\delta_w = \frac{1}{2} \int_{t_a}^{t_b} \left(V - \frac{F - \Delta R}{Z} \right) \cdot dt \quad (1)$$

2 由于计算 ΔR 的结果是粗略的，求得的 β 值也不会十分精确。当桩长大于 30m 时，由于土阻力提前卸载， β 值计算误差较大。当满足本条“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 值检测属于直接法，在结果的可信度上与属于半直接法的高应变法判定承载力是不同的。长桩存在深部缺陷时，当土阻力 ΔR 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 ΔR 被低估， β 计算值被放大，不安全，因此公式（7.4.10-2）不适用；

3 桩身完整性的类别判定除按表 7.4.10 规定外，还应结合实测信号特性、缺陷位置和范围、桩型、场地工程地质条件、施工工艺、施工记录、检测经验等综合判定。

7.4.11 采用实测曲线拟合法分析桩身扩颈、桩身截面渐变或多变的情况时应注意合理选择土参数。

高应变法锤击的荷载上升时间通常在 1ms~3ms 范围，在桩身最上部区段存在“盲区”，冲击力的持续时间越长，“盲区”越长，缺陷位置离传感器安装面的距离过小时不能用 β 值判定。对桩身浅部缺陷，只能根据力和速度信号的比例失调程度来估计浅部缺陷程度，也不能定量给出缺陷的具体部位，尤其是锤击力信号上升非常缓慢时大量耦合有土阻力影响时。对浅部缺陷桩，采用低应变法检测并进行缺陷定位。

7.4.12 桩身锤击拉应力是混凝土预制桩施打抗裂控制的重要指标。在深厚软土地区，打桩初始侧阻和端阻虽小，但桩很长，桩锤能正常爆发起跳，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力波尾部叠加，在桩身某一部位产生净拉应力。当拉应力超过混凝土抗拉强度时，引起桩身拉裂。开裂部位经常发生在桩的中上部，且桩愈长或锤击力持续时间愈短，最大拉应力出现部位就愈往下移。当桩进入硬土层后，随着打桩阻力的增加拉应力逐步减小，但桩身压应力逐步增加，如果桩在易打情况下已出现拉应力所致的水平裂缝，渐强的压应力会在已有裂缝处产生应力集中，使裂缝处混凝土逐渐破碎并最终导致桩身断裂。

有时打桩过程中桩端碰到硬层（基岩、孤石、漂石等）、贯入度突然骤减或拒锤，继续施打会造成桩身破坏，这是由于入射压力波遇桩端阻抗增大时，会引起小阻抗之桩身压应力放大，破坏形态常为桩身纵向裂缝，此时最大压应力出现在接近桩端的部位。

8 低应变法

8.1 一般规定

8.1.1 本标准中的低应变法只适用于检测桩身完整性，判定桩身缺陷的位置和程度。

目前，国内多数检测机构采用的低应变法均为反射波法（或瞬态时域分析法）。反射波法以一维线弹性杆件为模型，波传播时满足一维杆平截面假设。受检桩桩身截面宜规则。对于扩底桩，由于扩大端以上桩身截面规则，所以基本适用。

虽然本标准是针对桩基工程制定的，但从原理上讲其他工程类别中的桩构件只要符合一维线弹性杆件模型，该法均适用，只是判定桩身完整性类别时应考虑构件的不同受荷工况。为了规范该方法使用，现就实际遇到的特殊场地的桩、基坑（边坡）支护桩、复合地基刚性增强体的适用性说明如下：

岩溶场地由于溶洞土洞发育，灌注桩充盈系数大、桩身截面变化大，不宜采用低应变法。

基坑支护结构中的排桩，由于其和高压旋喷桩胶结形成了截水帷幕，桩身混凝土和水泥土阻抗差异不十分明显，不太符合一维弹性杆件的理论模型，采用低应变法获得的信号规律性差，故不宜采用低应变法检测其完整性，建议施工前期试验检测效果并结合经验确定是否采用。该法显然不适用于咬合桩。支撑体系中的立柱桩，因开挖暴露出桩顶面时，立柱已和桩身混凝土胶结，桩已不符合一维弹性杆件的理论模型，低应变法适用与否应结合现场实测效果确定。

边坡工程中的微型桩，有多种施工工艺，因桩身材料的弹性模量、钢筋形式（钢管、型钢）等因素，对低应变信号影响程度不一，低应变法适用与否应结合现场实测效果而定。微型桩还因桩身截面尺寸很小、长径比大，安装传感器和激振均存在困难。

复合地基增强体中的水泥土桩、CFG 桩等桩身阻抗与桩周土的阻抗差异小、截面不规则，应力波在这类桩中传播时能量衰减快，因此，该法不适用于水泥土桩、CFG 桩等刚度较小桩的检测。显然散体材料增强体的砂石桩等也是不适用的，仅刚性桩适用。

本方法对桩身缺陷程度只作定性判定，尽管可以利用实测曲线拟合法分析能给出定量的结果，但还不能达到精确定量的程度。原因在于桩的尺寸效应、测试系统的幅频及相频响应、高频波的弥散、信号滤波等造成了实测波形畸变，以及桩侧土阻尼、土阻力和桩身阻尼的耦合影响。

对于桩身不同类型的缺陷，反射波法实测信号中主要反映出桩身阻抗减小的信息，缺陷性质往往较难区分。例如，混凝土灌注桩出现的缩颈与局部松散、夹泥、空洞等，只凭实测信号很难区分。因此，对缺陷类型进行判定，应结合工程地质、施工情况综合分析，或采用钻芯法、超声法确定。

8.1.2 由于受桩周土约束、桩身材料阻尼和桩身截面阻抗变化等，应力波在桩身传播过程中能量在逐渐衰减，若桩过长、桩身截面阻抗多变或变幅较大，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，致使仪器接收不到桩底反射信号，无法判定整根桩的桩身完整性。即存在“有效检测桩长”问题。

有效检测桩长还受桩土刚度比大小的制约，工程地质条件不同，施工工艺不同，有效检测桩长也不同。应通过现场试验，依据能否识别桩底反射波来确定有效检测桩长范围。

对于实际桩长大于最大有效检测深度的长桩、超长桩，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，低应变法仍可用于查明有效检测长度范围内是否存在缺陷。

8.2 仪器设备

8.2.1 检测仪器中数据采集系统使用的 A/D 转换器有两个重要的指标：一是采样频率（采样时间间隔的倒数），二是转换精度。采样频率的选择应能将桩底反射波完整地记录下来。A/D 转换器精度用二进制转换位数来衡量，目前所用仪器均不低于 12 位，有 16 位再加 8 位浮点放大、可达 24 位。

低应变法检测采用的传感器主要是压电式加速度传感器（国内多数厂家生产的仪器尚能兼容磁电式速度传感器），根据其结构特点和动态性能，当压电式传感器的可用上限频率在其安装谐振频率的 1/5 以下时，可保证较高的冲击测量精度，且在此范围内，相位误差几乎可以忽略。所以应尽量选用自振频率较高的加速度传感器。

对于桩顶瞬态响应测量，习惯上是将加速度传感器的实测信号积分成速度曲线，并据此进行分析。实践表明：除采用小锤硬碰硬敲击外，速度信号中的有效高频成分一般在 2000Hz 以内。但这并不等于说，加速度传感器的频响线性段达到 2000Hz 就足够了。这是因为，原始加速度信号比积分后的速度信号中要包含更多和更尖的毛刺，高频尖峰毛刺的宽窄和多寡决定了它们在频谱上占据的频带宽窄和能量大小。事实上，对加速度信号的积分相当于低通滤波，这种滤波作用对尖峰毛刺特别明显。当加速度传感器的频带较窄时，就会造成信号失真。所以，在 $\pm 10\%$ 幅频误差内，加速度传感器工作频率范围上限不宜小于 5000Hz，同时也应避免在桩顶表面凹凸不平时，不加锤垫用硬质材料锤直接敲击。

高阻尼磁电式速度传感器固有频率接近 10Hz~20Hz 之间时，幅频线性范围（误差 $\pm 10\%$ 时）约在 20Hz~1000Hz 内，若要拓宽使用频带，理论上可通过提高阻尼比来实现。但从传感器的结构设计、制作以及可用性看却又难以做到。因此，若要提高高频测量上限，必须提高固有频率，势必造成低频段幅频特性恶化，反之亦然。同时，速度传感器在接近固有频率时使用，还存在因相位跃迁引起的相频非线性问题。此外由于速度传感器的体积和质量均较大，其二阶安装谐振频率很大程度上受安装条件影响，安装不良时会大幅下降并产生自身振荡，虽然可通过低通滤波将自振信号滤除，但在安装谐振频率附近的有用信息也将一并滤除。所以，反射波法中高频窄脉冲冲击响应测量不宜使用速度传感器。

8.2.2 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手锤、力棒，其锤头或锤垫多数选用工程塑料、高强尼龙、铝、铜、铁、橡皮垫等材料，锤的质量为几百克至几十千克不等。

8.3 现场检测

8.3.1 要采集到高质量的信号，桩顶处理也是重要的环节。传感器安装处的混凝土不得松动，以避免激振时传感器本身产生振荡、晃动、滑移。传感器安装点和激振点尽可能是光滑的平面，这样传感器与桩之间耦合就较为紧密、传感器的安装谐振频率会较高。

检测时，桩顶外露的主筋可向外弯折，以不妨碍手锤正常敲击为宜。当受检桩的桩侧与基础的混凝土垫层浇筑成一体时，垫层对实测信号的影响主要与垫层的厚度、强度以及与桩侧结合的紧密程度有关。可通过对比试验确定垫层对实测信号的影响程度，决定是否进行处理。

8.3.2 若传感器安装在主筋附近，激振时钢筋振动将产生干扰信号；耦合剂太厚粘接强度较低，传感器的安装谐振频率低；试验证明手扶方式安装传感器，其安装谐振频率为

500Hz~800Hz，明显低于采用粘接安装方式。

检测敲击时，因尺寸效应在桩顶部位将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，按图 1 所示，即实心桩安装点在距桩中心约 $\frac{2}{3}R$ 半径、空心桩安装点与激振点平面夹角等于或略大于 90° 时，所受干扰相对较小。另应注意，加大安装与激振两点距离或平面夹角将增大激振点与安装点响应信号时间差，造成桩身波速或缺陷定位误差加大。激振点与传感器安装点距离太近时，入射波后面往往紧跟着一个负向脉冲，影响浅部缺陷的分析判断。

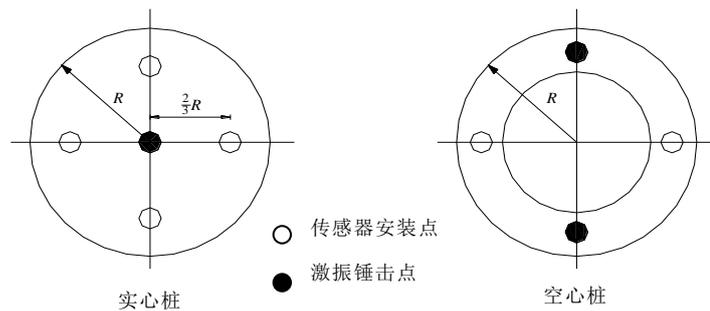


图 1 激振点、传感器安装点位置示意图

8.3.3 通过改变锤的质量、材质及锤垫，可使冲击入射波脉冲宽度在 0.5ms~3.5ms 之间变化。冲击入射波脉冲较宽时，低频分量多，应力波衰减较慢；冲击入射波脉冲较窄时，高频成分较多，应力波衰减较快。因此，若要获得长桩的桩底反射信息或判断深部缺陷，冲击入射波脉冲应宽一些；当检测短桩或桩的浅部缺陷时，冲击入射波脉冲应窄一些。自由落体激振，可使能量集中，应力波规整。要求激振方向应沿桩轴线方向的目的是为了有效减少敲击时的水平分量。

8.3.4 从时域信号中找到桩底反射位置，仅仅是确定了桩底反射波的到达时间，根据 $t_r=2L/c$ ，只有已知桩长 L 才能计算波速 c ，或已知波速 c 计算桩长 L 。因此，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。检测前桩身波速可根据同类桩型的实测经验值初步设定，实际分析过程中应重新设定为由桩长计算的波速，或按本标准第 8.4.2 条确定的桩身波速平均值。

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。应在保证测得完整信号，即时段 $2L/c+5ms$ 和有 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。

8.3.5 桩径增大时，桩截面各部分的运动不均匀性也会增加，桩浅部的阻抗变化往往表现出明显的方向性。故应增加检测点数量，使检测结果能全面反映桩身完整性情况。叠加平均处理是提高实测信号信噪比的有效手段。

根据经验，当实测信号与该类型完整桩信号特征差异较大时，应增加检测点数量，或变换激振点及检测点位置。

对于同一根桩不同检测点及多次的实测时域信号差别较大时，应综合受检桩的桩型特点、施工工艺和工程地质情况等，增加布置检测点进一步分析，亦可采用其他方法验证检测。

8.4 检测结果

8.4.1 可采用低通滤波的方式对接收信号进行处理，以减小噪声信号对检测效果的影响。指数放大是提高桩中、下部和桩底信号识别能力的有效手段，指数放大倍数以 2~10 倍、能识别桩底反射信号为宜，过大的放大倍数会将干扰信号也放大，可能会使实测信号尾部明显不归零，影响桩身完整性的分析判断。

8.4.2 完整桩信号有效信息成分应包括：激振信号、岩土层分界面反射波、桩底反射波以及正常的桩身波速。对于中、小直径桩，已知桩长，按速度信号第一峰与桩底反射峰间的时间差确定桩身波速。对于大直径桩，由于激振点和传感器安装点间的距离引起时间的滞后，按速度信号第一峰与桩底反射峰间的时间差确定的桩身波速比实际的高。在检测现场，通过对已知桩长的若干根完整桩的测试，计算出每根桩的桩身波速，取平均值后可得到该场地的桩身波速平均值 \bar{c} 。

虽然波速与混凝土强度二者并不呈严格的函数关系，但考虑到二者整体趋势上呈正相关，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波速平均值。表 2 为不同混凝土强度等级的应力波波速经验值，可参考使用。

表 2 不同混凝土强度等级的应力波波速参考值

混凝土强度等级	应力波波速经验值范围 (m/s)
C20、C25、C30	3200~3800
C35、C40	3600~3900
C45	3800~4100
C50 及以上	3900~4400

8.4.3 因为设定波速有误差，本条所列公式计算的桩身缺陷位置是有误差的。波速误差产生的缺陷位置误差为 $\Delta x = x \cdot \Delta c / c$ ($\Delta c / c$ 为波速相对误差)，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，影响较大。其次采用频域分析法计算缺陷位置时，由于和采样周期及采样点数相关的频域分辨率有限，会使缺陷位置的计算精度降低，频域分析法计算的缺陷位置仅作参考。

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直达纵波、横波和表面波的形式沿径向传播。因激振点与传感器安装点有一定的距离，传感器接收到的直达峰总比激振点处滞后，特别对大直径灌注桩或直径较大的管桩，这种从激振点起由近及远的时间线性滞后将明显加大。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，按直达波峰-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，不可能精确测到桩的“一维杆纵波波速”。

8.4.4 表 8.4.4 列出了根据实测时域或频域信号特征划分的桩身完整性类别。完整桩典型的时域信号和速度幅频信号见图 2 和图 3，缺陷桩典型的时域信号和速度幅频信号见图 4 和图 5。判定桩身完整性类别首先是判断有没有缺陷反射波，其次是分析缺陷程度。

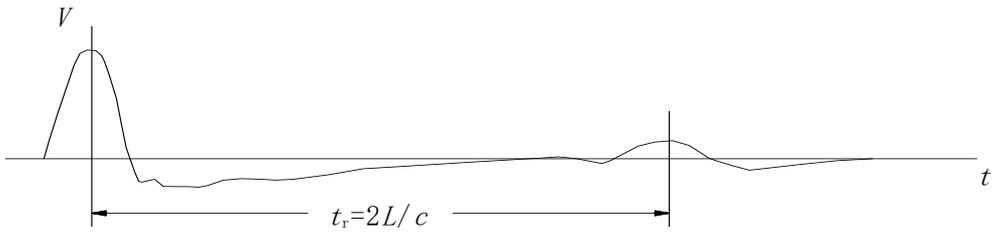


图 2 完整桩典型时域信号特征

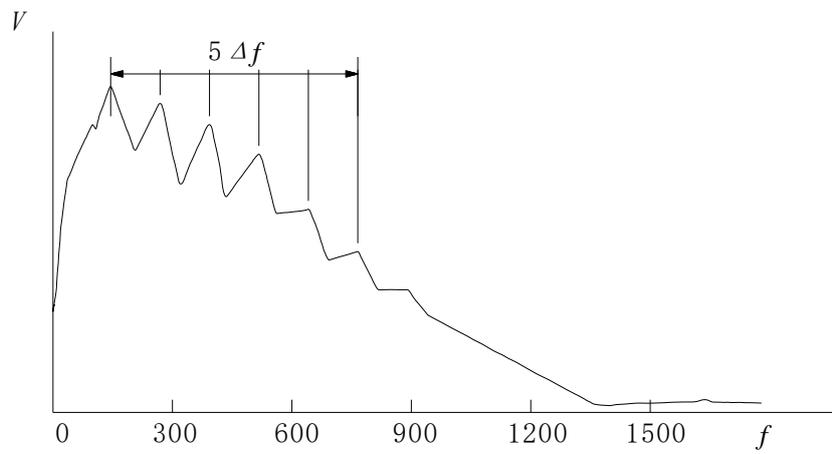


图 3 完整桩典型速度幅频信号特征

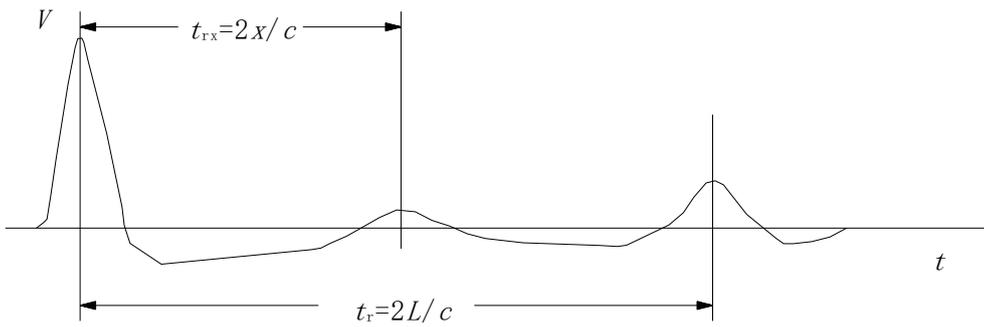


图 4 缺陷桩典型时域信号特征

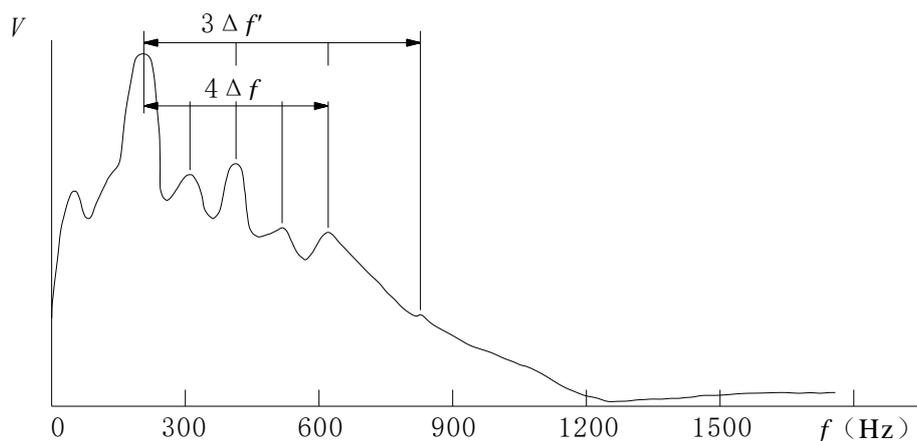


图5 缺陷桩典型速度幅频信号特征

对完整桩分析判定时，从时域信号或频域信号特征表现的信息判定，相对来说较简单直观。而分析缺陷桩信号要复杂些，实测信号既包含施工形成的缺陷产生的反射波，也包含因设计桩身构造或成桩工艺本身导致的不连续截面产生的反射波，例如预制桩的接缝、灌注桩的逐渐扩颈再缩回原桩径的渐变截面、地层硬夹层影响，再如，采用部分挤土方式沉桩的开口预应力管桩，桩孔内土塞的影响等。因此，在分析接收信号时，应仔细区分哪些是缺陷反射波或缺陷导致的相邻谐振峰，哪些是因桩身构造、成桩工艺、土层影响造成的类似于缺陷的反射信号。

反射波的幅值大小除了和缺陷程度有关外，还和桩周土阻力、桩身阻尼大小及缺陷所处的深度有关。相同程度的缺陷因桩周土岩土性状不同或缺陷埋深不同，在接收信号中的幅值大小各异。因此，如何正确判定缺陷程度，特别是缺陷十分明显时，如何区分是Ⅲ类桩还是Ⅳ类桩，应仔细对照桩型、工程地质情况、施工情况结合经验综合分析判断；不仅如此，还应按照桩的设计工况、结合基础和上部结构对桩的承载安全性要求，考虑桩身承载力不足引发桩身结构破坏的可能性，进行缺陷类别划分，不应仅凭接收信号；在信号特征为Ⅲ类、Ⅳ类的桩中应按不同特征类型选取有代表性的桩，采用更可靠的检测方法验证，再根据验证结果综合评定。

缺陷有多种形式：松散、空洞（蜂窝）、变颈、接缝、裂缝、断裂，以及单界面缺陷和多界面缺陷等。缺陷形式可根据施工记录、工程地质资料，结合经验综合分析判断。裂缝、接缝等突变型缺陷所产生的反射波比较单一，缺陷反射信号由两部分组成，先有一个与入射波相位相同、形态相似的反射波，紧跟着一个与入射波相位相反，形态相似的反射波。突变型缩颈或离析等缺陷的第一个界面所产生的反射波与入射波相位相同，第二个界面所产生的反射波与入射波相位相反，反射波幅值越大则缩颈或离析程度越严重。渐变的缩颈或离析所产生的反射波的幅值较小、脉冲宽度大于入射波脉冲宽度。渐变缺陷的反射波信号较难分析，相同的缺陷程度突变缺陷所产生的反射波比渐变缺陷所产生的反射波要明显。

混凝土预制桩采用焊接方式接桩，当焊接质量差时，在该位置会有明显的反射波；采用机械啮合接头时，在该连接位置有明显的反射波仍属正常。在多数情况下，这类接缝不影响竖向抗压承载力，甚至对竖向抗拔承载力和水平承载力的影响也可能不大，判断这类反射波应慎重，宜结合其他检测方法进行评价。刚出厂的混凝土预制桩桩身是完整的，沉桩后如在非接桩位置产生较明显的缺陷反射波，大部分情况是在沉桩过程中桩身断裂或碎裂引起，可用孔内成像法进行验证。

要求受检桩有桩底反射信号，是保证不漏判桩身缺陷的必要条件。因此，本条规定Ⅰ、Ⅱ类桩应有桩底反射波。

表 8.4.4 是正常波速下的完整性判定规定。而对有桩底反射的桩，若实测波速不及表 2 中不同组别混凝土强度等级对应波速低限值的 80% 时，该桩的波速可视为异常，不论信号特征如何，都应及时查找原因，可采用钻芯等方法验证。当波速明显高于参考值的，应校核实际桩长设置的准确性。

8.4.5 表 8.4.4 没有列出接收信号中无缺陷反射波（或有轻微缺陷反射波）、同时也无桩底反射波特征的类别分类。事实上，测不到桩底反射波这种情况受多种因素和条件影响，例如以下情形的完整桩是不易测不到桩底反射波的：

- 1 软土地区的超长桩，长径比很大；
- 2 桩周土约束很强，应力波衰减很快；
- 3 桩身阻抗与持力层阻抗匹配良好；
- 4 桩身截面显著突变或沿桩长渐变；
- 5 预制桩接头缝隙影响。

再比如，当缺陷靠近桩底部且属于渐变型的离析类型时，低应变法也无法测得桩底反射波。因此，针对实测信号无桩底反射波的情况，应结合经验、参照本场地同类型桩，综合分析或采用其他方法进一步检测桩身完整性。

8.4.6 对于因设计或施工工艺所产生的桩身阻抗随深度有明显变化的受检桩，应考虑阻抗变化对检测结果的影响程度，对受检桩的完整性类别判定应综合评价。

8.4.7 由于工程地质情况复杂，施工桩型较多，成桩质量千差万别，反射波法未必能对每根受检桩都给出检测结果，因此，对于信号虽无异常反射，但并未测得桩底反射；接收信号无规律，无法用波动理论进行分析；由施工记录提供的桩长计算所得的桩身波速值明显偏高或偏低，且又缺乏可靠资料验证；无法准确获得桩身质量的全部信息时，不应勉强判定受检桩的桩身完整性类别。

对嵌岩桩，桩底沉渣和桩端下存在软弱夹层、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相位判断桩的嵌岩效果，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，应采用钻芯法、静载试验或高应变法等检测方法验证桩端嵌岩情况，确保基桩使用安全。

9 超声法

9.1 一般规定

9.1.1 本标准中的超声法是声波透射法，即 A 型超声检测技术在混凝土灌注桩中的应用。主要检测桩身中是否存在缺陷，缺陷的性质、位置及范围，判定桩身完整性类别。

地下连续墙是基坑支护结构较常采用的形式，其发挥挡土、截水功能，主要承受水平方向水土压力，设计计算和桩基不同。本标准主要针对桩构件，虽然检测原理相同，但评价项目和指标区别较大，有关其检测评价可参照现行广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60 执行，评价时应结合设计的受力工况。

9.1.2 当因声测管接头渗浆、管体变形、管内掉入石子；未沿桩身通长安装声测管；声测管安装数量和位置不符合本标准附录 E 要求等导致现场未能通长检测的，仅能对被检测的部分进行评价，未检测到的部分应采用其他方法，如钻芯法、低应变法等进行补充检测。

9.2 仪器设备

9.2.2 换能器有效长度指换能元件的排列长度，该长度过大会漏判较小缺陷。

换能器的谐振频率越高，对缺陷检测的分辨力就越高，但同时声波衰减会加大、有效测距变短。选用换能器时，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的频率。例如，采用 30kHz~60kHz 谐振频率范围的换能器，混凝土声速取为 4200m/s 时，声波波长在 7cm~14cm，即能检测到的缺陷尺寸约在分米量级。当测管间距较大或接收信号较弱时，应选用带前置放大器的接收换能器，其次宜采用低频换能器，但后者要以牺牲分辨力为代价。另外，提高换能器谐振频率，可使其外径进一步减少，这有利于换能器在声测管中顺畅升降，也使减小声测管管径成为可能。

因为检测时使用清水作为耦合剂，换能器在 1.2MPa 水压下不渗水也就相当于在约 120m 水深下不渗水，这可以满足多数工程桩检测要求。换能器配置扶正器，是为了防止换能器在声测管内摆动影响声学参数的稳定性，特别是在连续、不停顿检测过程中更加有效。

9.3 现场检测

9.3.2 检测仪器的系统延时可用线性回归方法得到，即将接收换能器和发射换能器平行置于清水中，逐次改变换能器间的中心距并不少于 5 次，测量其中心距及声时，进行线性回归分析，得出直线方程：

$$t = t_0 + bl \quad (2)$$

式中：

- t ——声时 (μs)；
- t_0 ——系统延时 (μs)；
- b ——直线斜率 ($\mu\text{s}/\text{mm}$)；
- l ——换能器中心距 (mm)。

耦合层延时 t' 可由下式计算得出：

$$t' = \frac{D-d}{v_t} + \frac{d-d'}{v_w} \quad (3)$$

式中：

- t' ——耦合层延时（ μs ）；
- D ——声测管外径（ mm ）；
- d ——声测管内径（ mm ）；
- d' ——换能器外径（ mm ）；
- v_t ——声测管厚度方向声速（ km/s ）；
- v_w ——水的声速（ km/s ）。

超声检测仪器系统延时 t_0 与耦合层延时 t' 之和 t_0+t' 也可直接测量得出：将与声测管同型号、规格的两节声测管平行绑扎在一起，垂直置于清水中，再将收、发换能器分别垂直放在声测管中心的同一水平位置，测读声时，此声时值即为 t_0+t' 。

9.3.3、9.3.4 为了满足数据统计时对最少样本数量的要求，规定同一测面应大于 20 条测线。对短桩且存在缺陷时，还应考虑到数据处理时，剔除异常数据后剩余数据不足 20 个的情况，对此，现场采集数据时，宜通过减小间距加密检测，加大后续数据处理时的样本数量。

检测和数据采集应连续观测整个测面，重点检测可疑部位。经平测或斜测观测后，对测面有可疑声测线的部位，再减小测线间距加密检测、交叉斜测、扇测、CT 成像等方式检测，这样既可复核可疑声测线，又可以依据加密检测结果判定桩身缺陷的范围和空间分布。

9.4 检测结果

9.4.3 当声测管平行时，构成某一测面的两声测管在桩顶面的净距离 D_c 等于该测面所有测线处的声程，当声测管倾斜、弯曲时，各测线处的声程将不再相等，导致按公式（9.4.1-2）计算出的声速值偏离混凝土声速正常值。通常情况下声测管倾斜、弯曲造成的各测线处声程变化沿深度方向有一定规律，各条声测线的声速值呈规律性变化，此时可采用高阶曲线拟合等方法对各条测线处声程做合理修正，然后重新计算各测线的声速。理论推导和实测表明，采用钢质声测管，声测管间的倾斜造成各测线上的声程近似于线性变化，此时，可采用简单的线性修正方法。

当由于声测管倾斜、弯曲造成实测声速高于正常声速的 25% 时，不宜进行修正，不宜对该偏离段的完整性进行评定。各测线的声速值沿深度方向变化无规律时，不得随意修正。

9.4.5 临界值法基于正常混凝土的声学参数服从正态分布的假设。因实测数据可能因声测管平行度不好等因素带有一定的系统误差，所以在数据处理之前宜采用合理的修正方法消除这种系统误差。为了提高计算效率，计算异常小值判断值 X_a 时，可不从最小值开始剔除，可从预设的某个初值开始。

9.4.6 斜率法可消除声测管不平行或混凝土不均匀等非缺陷因素的影响，突出异常部位。

9.4.7 超声波在混凝土中传播时主频会向低端漂移，存在缺陷的混凝土致使接收波的主频比正常混凝土的主频低，这是由于正常的混凝土与存在缺陷的混凝土对超声波的“滤波作用”不同。接收波主频明显降低反映了混凝土质量的降低。但是由于发射和接受换能器幅频特性以及声耦合状态、声程等非缺陷因素的影响，主频测试值对缺陷没有波幅敏感，没有声速测试稳定，故在实际应用中作为辅助判据。

9.4.8 表 9.4.8 中桩身完整性分类的主要原则是：完整性最差的部位决定本桩的桩身完整性类别；在同一横截面（即同一深度）上缺陷的数量愈多，则桩身完整性愈差；对深度范围小于或等

于 10cm 的缺陷可从轻评价；评价时宜考虑纵向（即深度方向）缺陷的数量及分布情况。要比较客观地判定桩身完整性类别，还要结合缺陷的性质、位置、范围等因素综合判定。对仅安装了 2 根测管的较小直径桩按同样原则判定。

另外，对声速临界值明显偏低的基桩应分析原因，宜进行桩身混凝土强度的检测。

9.4.9 在提供了声速 - 深度和波幅 - 深度曲线的基础上，还可提供 $k \cdot \Delta t$ -深度曲线。各曲线绘制应采用同一个坐标比例。当采用主频、接受能量进行辅助分析判定时，应绘制主频-深度曲线、能量-深度曲线。

10 钻芯法

10.1 一般规定

10.1.1 钻芯法是检测旋挖桩、冲孔桩、人工挖孔桩质量最直观的方法，特别适用于大直径混凝土灌注桩。钻芯法检测的主要目的有五个：

- 1 检测桩身缺陷及位置，判定桩身完整性类别；
- 2 检测桩身混凝土强度；
- 3 检测桩长；
- 4 检测桩底沉渣厚度；
- 5 鉴定桩端持力层的岩土性状、厚度。

受检桩长径比太大时，钻芯孔容易偏离桩身，故比较适合长径比不大于 30 的桩。另外对于小直径灌注桩，灌注混凝土时导管移动区域的质量相对较差，在中心开孔缺乏代表性，若避开中心开孔，又容易发生偏离桩身的情形，故小桩径时应协调开孔位置和最大钻进深度并客观评价桩身质量。

同本标准第 9.1.1 条条说明，地下连续墙的检测评价可参照现行广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60 执行，评价时宜考虑实际受力工况。

10.1.2 关于混凝土灌注桩钻芯孔数、开孔位置的规定说明如下：

本标准基本规定中规定，钻芯法检测的数量不少于总桩数的 15%，远远超过行标 10% 的规定，其目的在于多钻桩，以更全面地反映整个桩基工程的施工质量，与此相应，为降低检测造价、加快检测进度，和行业标准及广东省标准相比降低了部分桩径钻取的孔数。结合本市混凝土灌注桩长径比大的特点，规定桩径小于 1.6m 钻 1 孔，桩径为 1.6m~2.0m 钻 2 孔，桩径大于 2.0m 不少于 3 孔是比较适宜的。当然，对有缺陷的桩，在采用钻芯法验证过程中，应视需要增加钻芯孔数。对桩径很大的巨型桩，钻芯孔数和各孔钻入持力层的深度的确定，应把握单位桩身截面上的孔数和本条规定相适应的原则，同时宜结合桩端持力层的岩面起伏、风化程度、混凝土灌注的均匀程度等因素综合确定。

当采用钻芯法对桩长、桩身混凝土强度、桩身局部缺陷、桩底沉渣、桩端持力层进行验证检测（或鉴定）时，可根据具体验证（或鉴定）的目的、要求确定开孔位置、钻取深度，必要时还可以增加钻孔数量，可不按本标准第 10.4 节进行单桩全面评价。

当钻芯孔为 1 个且受检桩的长径比大于 30 时，在桩中心的位置开孔是为了保证较小桩径、较大长径比的桩能顺利钻至桩端持力层，避免偏离桩身。在此情形下，对桩身完整性评价时要适当考虑灌注时导管对中心部位混凝土完整性的不利影响，可以适当从轻评价。为准确确定桩的中心点，桩头宜开挖裸露。

10.1.3 关于混凝土灌注桩钻入持力层深度的规定说明如下：

桩端持力层岩土性状的准确鉴定直接关系到受检桩的使用安全。虽然施工前已进行岩土工程勘察，但钻探孔数量有限，对较复杂的工程地质情况，很难全面掌握岩石、土层的分布情况。因此，应对桩端持力层进行足够深度的钻探。

现行国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 规定：桩基工程施工验收检验，单柱单桩的大直径嵌岩桩，应视岩性检验孔底下 3 倍桩身直径或 5m 深度范围内有无溶洞、破碎带或软弱夹层等不良地质条件。现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定：嵌岩灌注桩桩端以下 3 倍桩径且不小于 5m 范围内应无软弱夹层、断裂破碎带和洞穴分布，且在桩底

应力扩散范围内无岩体临空面。现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 和现行深圳市地方标准《地基基础勘察设计规范》SJG 01 也有类似规定。所以，本条规定每桩至少应有 1 孔钻至桩端持力层足够深度，并且按规范和设计要求中较严格的执行。

岩溶发育场地，大直径桩的桩端持力层往往存在局部的土洞、溶洞，由于施工勘察时多为 1 桩 1 孔，致使这些土洞、溶洞未充分揭露，在钻芯验收检测时常常还会被发现，为了尽可能地消除隐患，不错过对可能存在的土洞、溶洞处理的最后时机，规定此类场地各钻芯孔均应钻入岩层足够深度。

关于钻入持力层深度问题，还应注意满足孔内成像法检测对最小孔深的要求。比如抗压桩，虽然每桩至少有 1 孔钻入持力层 3 倍桩径、且不应小于 5m，若发现桩底存在沉渣，则其余钻孔钻进也不应小于 1.5m，以便采用孔内成像法验证沉渣厚度、再加权平均计算。再比如对非岩溶发育场地施工前已进行过原桩位超前钻探的桩，钻入持力层深度 0.5m 即可，但当发现沉渣厚度可能超标，各钻孔均应钻进小于 1.5m。

基坑工程、边坡工程的支护桩可参照水平受荷桩的入岩深度钻芯。

10.2 仪器设备

10.2.1 钻芯检测宜采用岩芯钻探使用的液压钻机，随机携带有产品合格证。应配有相应的水泵和钻塔。钻塔底座应稳固、主轴振动小。本条规定的主要部件的关键参数参照了最常用的 XY-1A 型钻机。

10.2.2 钻取的芯样（含中、微风化岩样）性状真实度与所用钻具有很大关系，直接影响到桩身完整性类别的判定。为提高取芯质量，钻芯检测用钻具应为单动双管钻具，不得使用单动单管钻具。孔口管、扶正稳定器（又称导向器）及可捞取松软渣样的钻具应根据需要选用。当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、牢固。当桩较长时，应使用扶正稳定器确保钻芯孔的垂直度。钻取强风化岩或土层时宜采用合金钻头。

10.2.3 钻芯取样的钻进方法主要有：金刚石钻进、硬质合金钻进、冲击钻进、冲击回转钻进等。金刚石钻进取芯质量好，钻进效率高。为了获得比较真实的芯样，基桩钻芯法检测应使用金刚石薄壁钻头钻取混凝土芯样。钻头胎体不得有肉眼可见的裂纹、缺边、少角、倾斜及喇叭型磨损。

常见钻头外径有 76mm、91mm、101mm、110mm、130mm 几种规格。采用较大直径钻头可一定程度上避免钻取的试件强度值出现较大离散（一般要求芯样试件直径不宜小于骨料最大粒径的 3 倍、任何情况下不得小于骨料最大粒径的 2 倍）。但采用大直径钻头费用高、破损面大，故本标准规定选用外径为 101mm 的钻头。当骨料最大粒径小于 30mm 时，也可选用外径为 91mm 的钻头。当不检测混凝土强度时，还可选用外径为 76mm 的钻头。

10.2.3 为了控制钻进垂直度、对偏离桩身的钻孔的垂直度偏差作出判定，进而调整后续钻芯孔的开孔位置和钻进方向，宜使用测斜仪了解钻芯孔垂直度偏差。

10.2.7 对强风化岩层或土层的鉴定，宜采用原位试验结果判定，所使用的仪器设备应符合规范规定。

10.3 现场检测

10.3.1 应精心安装钻机，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移位、倾斜。

当出现钻芯孔偏离桩身时，应立即停机记录，分析原因。可进行钻孔测斜，判定钻芯孔倾斜是否超过规定、分析受检桩垂直度。

10.3.2 桩顶面与钻塔底座距离大于 2m 时，宜安装孔口管。开孔宜采用合金钻头，开孔至 0.3m~0.5m 深度后安装孔口管，孔口管下入时应严格测量垂直度，然后固定。

10.3.3 基桩钻芯检测普遍采用金刚石钻进技术，其工艺参数主要包括钻压、转速、泵压和泵量。它们之间是相互关联的，操作时要统筹兼顾，才能达到效率高、质量好、成本低、事故少的目的。

钻进中应合理控制钻压，钻压应根据混凝土的强度与胶结好坏而定，胶结好、强度高的压力可大，反之压力应小。钻压应超过混凝土或岩石的抗破碎强度，钻压过小则钻进效率低，钻压过大容易使钻头钻杆变形。

正常钻进时可以采用高转速，但胶结差强度低的混凝土应采用低转速。转速和钻进效率有直接关系，提高转速受功率、钻具强度和钻机性能的限制，应合理把握，一般是保证钻压，调整转速。回次初转速宜为 100r/min 左右。

钻芯法宜采用清水钻进，冲洗液量一般按钻头大小而定。钻头直径为 101mm 时，一般情况冲洗液流量应为 60L/min~120L/min。在泵量不变的条件下，泵压与水口、水槽的截面积成反比，研究表明，钻头内外侧保持约 0.3MPa 的压差，可保持出水口处部分冲洗液通过刃部，迅速带走岩粉，并润滑和冷却金刚石。因此，应合理调整泵量与泵压。

钻进中可根据回水含砂量及颜色发现钻进过程中的异常情况，判断是否有桩身缺陷，是否已钻至桩端持力层或者钻孔已偏离桩身。

当芯样侧表面呈明显波浪状时，应检查钻机的工作状况，如机座是否稳固、钻机立轴是否摆动过大、人员操作是否得当。检查钻头、扩孔器、卡簧的配置是否合理。

由于金刚石钻头与岩芯管之间安有用以修正孔壁的扩孔器，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约 0.3mm，金刚石钻头和扩孔器应按外径先大后小的排列顺序使用，内径小的钻头先用，内径大的后用。

钻进至接近桩底时，为检测桩底沉渣或虚土厚度、鉴定桩端持力层岩土性状，应减压、慢速钻进。若遇钻具突降，应立即停钻，及时测量机上余尺，准确记录孔深及有关情况。

当持力层为中、微风化岩石时，可将桩底 0.5m 左右的混凝土芯样、0.5m 左右的持力层以及沉渣纳入同一回次，检测沉渣厚度、鉴定岩土性状。可采用孔内成像法分析沉渣厚度。

当持力层为强（全）风化岩层或土层时，宜采用合金钻头干钻等适宜的钻芯工艺钻取沉渣并测定沉渣厚度。也可进行标准贯入试验，量取贯入器内沉渣厚度。标准贯入试验深度间距宜为 1m，宜在距桩底 0.5m 内开始。参照桩底岩土层自上而下贯入度的变化情况鉴定桩端持力层岩土性状，还应观察上部岩土层是否存在软化情况。可取样进行室内土工试验综合判定。也可通过检测剪切波波速、采用动力触探的方式，鉴定桩端持力层岩土性状。

10.3.4 钻机操作人员应及时记录孔号、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。芯样取出后，应按回次顺序放进芯样箱中，芯样侧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）。

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、混凝土芯样是柱状或块状、骨料大小分布情况，气孔、麻面、沟槽、蜂窝、破碎、夹泥、松散的情况，以及取样编号和取样位置。

对桩端持力层的描述包括持力层钻进深度，岩土名称、颜色、结构构造、裂隙发育程度、坚硬程度、风化程度，以及取样编号和取样位置，标准贯入试验或圆锥动力触探位置和结果。遇岩

性分层应分别描述。

最后还要关注桩身裂缝问题。桩身裂缝对桩耐久性影响较大，对桩的长期工作性能、特别是抗拔和水平承载性能影响显著。因为其难以被发现，在现场检测过程中应特别引起重视。现场检测时检测人员应仔细检查断口吻合情况，区分原生裂缝（施工过程中形成的不连续界面、或者养护过程混凝土收缩等原因形成）和次生裂缝（钻进或提取芯样时扭断及受弯剪产生），当桩身有原生裂缝时，循环冷却水会将钻芯过程中产生的石粉渣带入裂缝中，可以观察到断口中存在白色的石粉渣，且断口吻合程度不佳。如是次生裂缝，断口处无石粉渣，且断口较尖锐、吻合程度好。由于低应变法对裂缝比较敏感，应仔细核实低应变法检测反映出的存在明显缺陷反射信号深度附近芯样断口形态，检查芯样是否存在裂缝。相反，对钻芯前未进行低应变法检测的、芯样显示可能存在裂缝的桩，也可以补充低应变法检测以帮助分析判断。此外可采用压水试验验证，即钻取两个孔后，从一个钻孔将钻头压入时另一钻孔会不断冒出水来，这说明两个钻孔是连通的、存在裂缝。此外，当裂缝宽度较大时钻芯过程中会发生掉钻现象，应密切观察钻进过程。宜采用孔内成像法直观检查。

10.3.6 应先拍照片，后截取芯样试件。拍照前应用清水淋湿芯样。取样完毕，剩余的芯样宜移交委托单位妥善保存以备复核或补充取样等用。

10.3.7 钻芯工作完毕，应按有关规定办理见证认可手续，验收符合设计要求时，应及时对钻芯孔进行回灌封闭。可采用水泥浆，也可采用水泥砂浆或细骨料混凝土回灌封闭。由于正常钻孔孔壁光滑、密实，可不采用压力注浆也能达到密封效果。对异常的钻芯孔暂不回灌封闭，留作后续验证、处理使用。

10.3.8 桩基础中的混凝土桩大多是轴心受压构件，薄弱部位的强度（桩身结构承载能力）能否满足使用要求直接关系到结构安全。通常情况下，麻面、沟槽、蜂窝等缺陷部位的强度较正常胶结的混凝土强度低，无论是严把质量关查明质量隐患，还是便于设计人员进行桩身结构承载力验算，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。验证超声法、低应变法等判定的桩身局部缺陷时，宜在对应位置进行取样试验。

同一基桩的钻芯孔数大于1个，其中1孔在某深度存在麻面、沟槽、蜂窝等缺陷，芯样试件强度可能不满足设计要求，按本标准第10.4.5条的同截面多孔强度平均原则，应在其他孔的相同深度部位取样进行抗压试验，能在保证桩身结构承载能力满足使用要求的前提下，减少加固处理费用。对于芯样任一段松散、夹泥，或局部破碎长度大于10cm且另外一孔（两孔）的同一深度部位的混凝土芯样存在麻面、沟槽、蜂窝、破碎等缺陷时，因该桩完整性属于IV类，可不在此缺陷深度取样；如果1孔破碎长度大于10cm且另外一孔（两孔）的同一深度部位的混凝土芯样完整时，因该桩完整性属于III类，为了后续质量问题处理工作的需要，可在完整的一孔（两孔）同一深度部位取样进行抗压强度试验。

10.3.9 由于基桩混凝土芯样试件可选择的余地较大，因此，为了避免试件强度离散，选取芯样试件时应观察芯样试件侧表面的表观混凝土粗骨料粒径，确保表观混凝土粗骨料最大粒径小于0.5倍芯样试件平均直径。

由于芯样试件抗压试验时直径偏小的地方先破坏，因此，宜测量芯样试件表观直径偏小部位的直径。

10.3.10 根据桩的工作环境状态，以及深圳市建设工程质量检测中心和深圳市建筑科学研究院2006年的混凝土芯样试件吸水率试验结果，芯样试件宜在20℃±5℃的清水中浸泡12h后进行抗压强度试验。但考虑到芯样在钻取、制作和试验等环节均存在使芯样强度产生负偏差的因素，同时也为了保障工期，允许芯样试件制作完毕浸泡不少于2h进行抗压强度试验。

10.3.11 混凝土芯样试件抗压强度试验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，保证试验精度。

10.3.12 当出现截取混凝土芯样未能制作成合格的试件，应重新截取芯样加工成试件进行抗压强度试验。条件不具备时，可将另外两块强度的平均值作为该组混凝土芯样试件抗压强度值，并在报告中加以说明。

10.3.13 混凝土芯样试件的强度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 28d 的试块抗压强度。依据现行广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60，将芯样试件抗压强度除以 0.88 的系数换算得到标准立方体试块的抗压强度代表值。即对于符合性验收检测，如无特别或附加规定 ξ 取 1.136，如果需要检测真实的实体强度，换算系数 ξ 应取 1。

10.3.14 由于和桩底接触部位的岩石对单桩竖向抗压承载力影响最为关键，应尽可能截取此部分岩样进行抗压试验。用于岩石芯样试件抗压强度试验的试件理想长度应为直径的 2 倍（芯样长度不足时方可按 1 倍制作）。通常同一钻孔在接近桩底部位不太容易截取制作 3 个标准芯样试件，这时可在同一受检桩（有 1 个或以上钻孔）的其他钻孔截取。截取的芯样首先按高径比 2:1 制作试件，当无法截取、制作时才可制成高径比 1:1 的试件。当仅有 1 个钻孔且无法截取、制作出 3 个芯样试件时可根据具体情况截取 1~2 个。首先保证数量，而后考虑尺寸。

关于岩石芯样含水率问题。为了更客观地反映实际性状宜保持岩石的天然含水状态，截取的芯样应及时密封包装后浸泡在水中，避免暴晒、雨淋，尤其是软岩。基桩钻芯法钻取岩芯是成桩后的验收检验，正常情况下应尽量使岩芯保持钻取时的“天然”含水状态。岩土工程勘察报告提供的岩石单轴抗压强度值通常是在岩石饱和状态下得到的；设计计算通常也是采用饱和单轴抗压强度，为了和设计计算统一，对硬质岩岩石芯样试件应在清水中浸泡不少于 12h 后进行试验。也因为水下成孔、灌注施工会不同程度地造成岩石强度下降，故对硬质岩采用饱和强度是安全的做法，这也是和现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007、现行广东省标准《建筑地基基础设计规范》DBJ 15-31 以及现行国家标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266 相协调的。对软质岩可不进行饱和处理。

关于岩样的尺寸在现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007 中，要求岩样尺寸一般为 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ ，即通常讲的“2:1 的小芯样”。在现行国家标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266 中也规定，试件直径宜为 48mm~54mm，高径比宜为 2.0~2.5。同样在现行深圳市标准《地基基础勘察设计规范》SJG 01 中要求岩样尺寸一般为 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。

关于直径。在基桩钻芯法检测中，为了提高桩身混凝土的采取率、岩样获得率和岩石质量指标（RQD），现场普遍采用较大直径的 101mm 外径 83mm 内径的单动双管钻具和金刚石钻头，钻取的芯样直径约 83mm。钻进操作时还要求“当持力层为中、微风化岩石时，可将桩底 0.5m 左右的混凝土芯样、0.5m 左右的持力层以及沉渣纳入同一回次”，亦即在钻取包含桩岩界面的回次时不宜更换钻头。再者，实际上由于桩长、进尺等偏差，很难实现钻头刚入岩即变换小直径钻头的愿望。还有，考虑到岩石属不均质体，为降低其节理、裂隙等结构面对岩样试件抗压强度的影响，为减小不同试件间强度的离散，宜采用较大直径的钻头。再有，当其他条件相同时，不同直径对抗压强度的影响可以忽略。综合以上多种因素，本标准未要求采用“小钻头”钻取岩样。

关于高径比，为了能和现行相关标准相协调，应在条件允许时，尽可能采用高径比为 2:1 的芯样试件。当无法采取、制作时，方可采用 1:1 的试件，抗压试验后再进行换算。结合深圳市的实践经验取 0.85 的换算系数较合理且偏安全。对此，说明如下：

在最早的中国工程建设标准化委员会标准《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS 03:88中将高径比为 2:1 的混凝土芯样试件强度换算成 1:1 的时,乘以 1.24 的系数,亦即将高径比为 1:1 的混凝土芯样试件强度换算成 2:1 的时,乘以 0.81 的系数。在中国铁道出版社 1995 年 1 月第 2 版的《工程地质试验手册(修订版)》中,表 4.3.5 中提供的统计数据表明,高径比为 2:1 的岩石芯样试件强度是高径比 1:1 的 0.85~0.90 倍。在交通行业标准《公路工程岩石试验规程》JTG E41-2005 中提出了将任意高径比的抗压强度 R 换算成高径比为 2:1 的标准强度值 R_e 的公式:

$$R_e = \frac{8R}{7+2D/H} \quad (4)$$

即以上标准采用了 0.89 的换算系数把高径比为 1:1 的岩石芯样试件强度换算成了 2:1 的。综合以上各因素,本标准取用 0.85 的换算系数。

10.4 检测结果

10.4.1 本方法应对 5 个基本指标、参数都作出评价,缺一不可。当钻芯孔偏出桩身时,仅对钻取部分的桩身进行评价。

本标准中的高应变法、低应变法和超声法都能判定桩身完整性类别,判定时还都需考察平均波速(或声速),通过平均波速(或声速)大致判断混凝土强度值的范围,但限于目前检测技术水平,仍然存在漏判的情况,即存在完整性判定为 I 类的桩混凝土强度不满足设计要求的可能。钻芯法也存在类似的情况,即从钻取的芯样外观特征可判定为 I 类的桩,后续的强度试验却有不符合设计要求的情况出现。完整性为 IV 类的桩肯定存在局部的、且影响桩身强度的劣质混凝土,即桩身混凝土强度达不到设计强度等级,可以明确该桩不满足设计要求。所以完整性和强度有关联,却又相互独立。

10.4.2 对于抗拔桩、承受水平荷载的桩,桩长是重要设计控制指标。对于嵌岩桩,实际桩长和判断桩端是否入岩及嵌入深度密切相关,可根据受检桩的有效长度,结合详勘、施工勘察、受检桩侧补勘、施工记录等其他资料,综合分析判断嵌岩情况。

10.4.3 同一根受检桩,桩底沉渣厚度有两个或两个以上钻孔的检测值时,取平均值是不合理的,因为既不符合破坏机理,也不符合安全原则。本次修订采用广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60-2019 的计算方法。

桩底沉渣厚度允许值在不同行业、不同规范、不同的承载性状、不同桩型、不同施工工艺中不尽相同,应区别对待。例如现行深圳市标准《地基基础勘察设计规范》SJG 01 规定,钻(冲)孔灌注桩为端承桩时沉渣允许值为 50mm、摩擦桩时允许值为 80mm、抗拔桩(或承受水平荷载桩)时允许值为 150mm,挖孔桩为端承桩时允许值为 40mm、摩擦桩时允许值为 50mm、抗拔桩(或承受水平荷载桩)时允许值为 100mm。

10.4.4 桩端持力层岩土性状的描述,应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定。

10.4.5 虽然桩身轴力上大下小,但从安全角度考虑,桩身结构承载力受最薄弱部位的混凝土强度控制。因此规定,取受检桩全长中混凝土抗压强度的最小值为该桩混凝土抗压强度。

10.4.6 桩身完整性类别和混凝土强度及本方法的其他 3 个评价指标虽然独立提出,但完整性和强度最终都统一到桩身结构承载力这个设计要求上了,这 2 个指标和沉渣厚度、桩端持力层性状(有时还有最小桩长)对最终的合格判定都具有“一票否决”的作用。钻芯法与高应变法、低应变法和超声法不同,属于直接法,其对桩身完整性类别的判定是通过观察对芯样外观特征

出的，如观感差而判为 IV 类的桩，桩身结构承载力肯定是达不到设计要求的，但凭观感判为 I、II 类的桩，桩身结构承载力也不能肯定就满足设计要求，因还需要由强度判据确认。表 10.4.6 将完整性和强度分开，分别作为独立的判定条件来判定桩身承载力，既便于现场操作又不会漏判、误判。例如两种极端情况，对于芯样外观判为 I 类的桩，后续强度检测不满足设计要求，最终整桩评价时也是判为不合格，即未漏判；对于芯样外观判为 III 类的桩，即使后续强度满足设计要求，由于耐久性方面的原因，应加固补强，也不能判为合格，也未错判。

表 10.4.6 中的桩身完整性分类是针对缺陷是否影响桩身结构承载力及影响程度的原则规定的。不论何种类型缺陷，都表明桩身混凝土质量差，即存在低强度区这一共性。

通过芯样特征对桩身完整性分类，有比其他无损检测方法更直观的一面，也有 1 孔之见代表性差的一面，适当增加钻孔数量可以使判定更加客观。表 10.4.6 中主要是针对常规桩径下、单桩钻孔数量不超过 3 个（包括加孔至 3 个）时的情况制定的，因为常规桩径下，按照本标准第 10.1.2 条规定，单根桩钻孔数量达到 3 孔时，应能客观地判定出完整性类别。当还允许继续加孔验证时，宜根据各孔反映的缺陷位置、范围和性质结合桩型、场地工程地质情况、施工工艺、施工记录等综合判定桩身完整性类别。不同孔的芯样在同一深度部位均存在缺陷时，该位置存在安全隐患的可能性大，桩身完整性类别应判差些。

对芯样任一段松散、夹泥或分层的受检桩，应进行工程处理，以确保质量。

当存在水平裂缝时，可结合设计工况下荷载方向、荷载水平、耐久性要求和水平裂缝深度、宽度等进行综合判定。可借助孔内成像法帮助分析。

10.4.7 当因桩端持力层岩石完整程度低（如裂隙、结构面发育、破碎等）取不了足够高度岩石芯样或不能制作成岩样试件（2:1、1:1）的，可由建设方组织勘察等单位进行论证评估，必要时可进行点荷载试验作为参考。

10.4.8 钻芯孔偏出桩身的情况时有发生。当钻芯孔偏出桩身时，无法评价桩长、沉渣厚度和持力层，也无法判定嵌岩端承桩的单桩竖向抗压承载力特征值是否满足设计要求，仅需对钻取芯样部分的桩身进行评价。

当受检桩长径比不超过 30，按照本标准第 10.3.1 条规定的 0.5% 钻孔垂直度，通常应能顺利钻至桩底。对长径比超过 30 的，钻芯法至少应能钻至 30d 的深度，因钻孔偏出桩外未检测到的桩身部分可采用超声法（或低应变法）评价该部分完整性，而沉渣厚度检测和桩端持力层岩土性状鉴定交由界面钻芯法完成。对整根桩的评价宜按所有方法的结果综合评价，要注意各方法间的协调和验证，避免出现矛盾。对于实际中存在未钻芯到底的桩未安装界面钻芯管的情况，可以不拘泥于单个桩的检测完备程度，宜从整个单位工程角度整体把控，只要钻芯法和界面钻芯法对沉渣（包括持力层）的检测数量之和与正常钻芯法要求的数量相当即可。

10.4.9 应说明采用的钻芯设备型号、钻头类型、直径等。设计有要求时，还应包含岩石芯样试件抗压强度试验结果、圆锥动力触探、标准贯入试验结果。

当嵌岩端承桩的桩身完整性类别是 I 或 II 类、混凝土强度满足设计要求、沉渣厚度满足验收标准和设计要求、桩端持力层岩层性状及岩石抗压强度满足设计要求的桩，可评价为单桩竖向抗压承载力特征值满足设计要求。对未取得岩石抗压强度等其他情况的可由勘察单位参与进行核验。

11 界面钻芯法

11.1 一般规定

11.1.1 界面钻芯法是香港地区普遍采用的灌注桩检测方法，该法非常适合于大长径比、较小桩径的桩底情况检测。经过本市 20 多年的工程经验积累，本法应用趋于成熟可以进一步推广。此次修订，将其作为一种独立方法单独成章，以规范该方法的使用，以充分发挥其突出重点（沉渣和持力层）、高效可靠的优势，保障超长桩检测工作的完备程度，为使其在今后桩基检测中承担更加重要的角色做准备。

现场检测中在检测范围上，仅要求对长径比大于 30、桩径大于或等于 800mm 桩实施；不论全长钻芯钻至桩底岩层与否，界面钻芯数量应满足本标准第 3.4.5 条的规定。另外，还应注意为避免桩身截面破损加大、检测占用工期延长、检测费用大幅度增加的弊端，不宜在全长钻芯中不断增加钻孔以达到钻孔入岩的目标。

但界面钻芯不能完全替代常规全长钻芯法检测。因为桩底以上其余桩身部分混凝土完整性和强度（尤其轴力最大的桩顶部位）的检测还得由钻芯法完成。就单个桩而言，对长径比大的桩（钻芯法未能钻到桩底），两者有互补作用；对长径比小的桩（钻芯法钻到了桩底），界面钻芯法和钻芯法共同评价提高了检测准确度。就单位工程而言，界面钻芯法保证了对整个工程项目桩端情况评价的样本数量、检测准确度高，特别是桩长径比大的工程项目能满足正常评价所需的最少样本数量。

今后，随着施工工艺成熟、施工质量的稳步提高，超声法和界面钻芯法的组合将是灌注桩质量检测的主要发展方向。

11.2 仪器设备

11.2.2 由于本法首先要钻穿界面管的端板，对钻具的磨损消耗大，应备有足够的钻具。

11.3 现场检测

11.3.1 根据长期的实践经验，界面钻芯法成功与否的关键在于界面管的垂直度。因安装不精细，后续检测时钻具不能下放到管底的情况时有发生。因此应特别关注所用管材的刚度、接头连接处的顺直、吊放时的保护措施等。对桩径小于 1.0m 的灌注桩，由于钢筋笼制作尺寸偏差、安装界面管后可能会出现导管下放或提升困难，对此可以采用更小直径的界面管、配套使用外径 91mm 的钻头。安装界面管时严控垂直度、钻取时轻压慢转避免混凝土芯样严重受损。

11.3.2 钻穿端板过程中，应密切注意钻进进尺，接近钻穿时，立即减压降速，以免对混凝土造成破坏。

11.4 检测结果

11.4.1 由于界面管安装在桩身外周附近，而水下灌注混凝土时桩端存在混凝土上返死角，界面钻芯法反映的混凝土完整性会略差一些，评价时应适当考虑施工工艺的因素。如果混凝土松散、破碎或因混凝土胶结质量差而难以钻进时，宜采用可靠措施验证桩端部位混凝土完整性、或验证单桩承载力。