

UDC

中华人民共和国行业标准

JGJ

P

JGJ 106 - 2003

建筑基桩检测技术规范

Technical code for testing of building
foundation piles

2003 - 03 - 21 发布

2003 - 07 - 01 实施

中华人民共和国建设部 发布

中华人民共和国行业标准

建筑基桩检测技术规范

Technical code for testing of building
foundation piles

JGJ 106- 2003

J 256 - 2003

批准部门：中华人民共和国建设部
施行日期：2 0 0 3 年 7 月 1 日

中国建筑工业出版社

2003 北 京

中华人民共和国建设部 公 告

第 133 号

建设部关于发布行业标准 《建筑基桩检测技术规范》的公告

现批准《建筑基桩检测技术规范》为行业标准，编号为 JGJ 106—2003，自 2003 年 7 月 1 日起实施。其中，第 3.1.1、4.3.5、4.4.4、6.4.6、8.4.7、9.2.3、9.2.4、9.4.2、9.4.5、9.4.15 条为强制性条文，必须严格执行。原行业标准《基桩高应变动力检测规程》JGJ 106—97 同时废止。

本规程由建设部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

中华人民共和国建设部
2003 年 3 月 21 日

前 言

根据建设部建标 [2000] 284 号文的要求，规范编制组经过广泛调查研究，认真总结国内外桩基工程基桩检测的实践经验和科研成果，并在广泛征求意见的基础上，制定了本规范。

本规范的主要技术内容是：总则、术语和符号、基本规定、单桩竖向抗压静载试验、单桩竖向抗拔静载试验、单桩水平静载试验、钻芯法、低应变法、高应变法、声波透射法等。

本规范由建设部负责管理和对强制性条文的解释，由主编单位负责具体技术内容的解释。

本规范主编单位：中国建筑科学研究院（地址：北京市北三环东路 30 号；邮编：100013）

本规范参加编写单位：广东省建筑科学研究院

上海港湾工程设计研究院

冶金工业工程质量监督总站检测中心

中国科学院武汉岩土力学研究所

深圳市勘察研究院

辽宁省建设科学研究院

河南省建筑工程质量检验检测中心站

福建省建筑科学研究院

上海市建筑科学研究院

本规范主要起草人：陈 凡 徐天平 朱光裕 钟冬波

刘明贵 刘金砺 叶万灵 滕延京

李大展 刘艳玲 关立军 李荣强

王敏权 陈久照 赵海生 柳 春

季沧江

目 次

1	总则	1
2	术语、符号	2
2.1	术语	2
2.2	符号	3
3	基本规定	6
3.1	检测方法和内容	6
3.2	检测工作程序	7
3.3	检测数量	9
3.4	验证与扩大检测	11
3.5	检测结果评价和检测报告	11
3.6	检测机构和检测人员	12
4	单桩竖向抗压静载试验	13
4.1	适用范围	13
4.2	设备仪器及其安装	13
4.3	现场检测	15
4.4	检测数据的分析与判定	16
5	单桩竖向抗拔静载试验	19
5.1	适用范围	19
5.2	设备仪器及其安装	19
5.3	现场检测	20
5.4	检测数据的分析与判定	20
6	单桩水平静载试验	22
6.1	适用范围	22
6.2	设备仪器及其安装	22

6.3	现场检测	23
6.4	检测数据的分析与判定	24
7	钻芯法	27
7.1	适用范围	27
7.2	设备	27
7.3	现场操作	28
7.4	芯样试件截取与加工	29
7.5	芯样试件抗压强度试验	29
7.6	检测数据的分析与判定	30
8	低应变法	32
8.1	适用范围	32
8.2	仪器设备	32
8.3	现场检测	32
8.4	检测数据的分析与判定	33
9	高应变法	37
9.1	适用范围	37
9.2	仪器设备	37
9.3	现场检测	38
9.4	检测数据的分析与判定	39
10	声波透射法	45
10.1	适用范围	45
10.2	仪器设备	45
10.3	现场检测	45
10.4	检测数据的分析与判定	46
附录 A	桩身内力测试	51
附录 B	混凝土桩桩头处理	56
附录 C	静载试验记录表	57
附录 D	钻芯法检测记录表	58
附录 E	芯样试件加工和测量	60

附录 F 高应变法传感器安装	62
附录 G 试打桩与打桩监控	65
G.1 试打桩	65
G.2 桩身锤击应力监测	65
G.3 锤击能量监测	66
附录 H 声测管埋设要点	67
本规范用词说明	68
条文说明	69

1 总 则

1.0.1 为了确保桩检测工作质量，统一桩检测方法，为设计和施工验收提供可靠依据，使桩质量检测工作符合安全适用、技术先进、数据准确、正确评价的要求，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于建筑工程桩的承载力和桩身完整性的检测与评价。

1.0.3 桩检测方法应根据各种检测方法的特点和适用范围，考虑地质条件、桩型及施工质量可靠性、使用要求等因素进行合理选择搭配。桩检测结果应结合上述因素进行分析判定。

1.0.4 建筑工程桩的质量检测除应执行本规范外，尚应符合国家现行有关强制性标准的规定。

2 术语、符号

2.1 术 语

2.1.1 基桩 foundation pile

桩基础中的单桩。

2.1.2 桩身完整性 pile integrity

反映桩身截面尺寸相对变化、桩身材料密实性和连续性的综合定性指标。

2.1.3 桩身缺陷 pile defects

使桩身完整性恶化，在一定程度上引起桩身结构强度和耐久性降低的桩身断裂、裂缝、缩颈、夹泥（杂物）、空洞、蜂窝、松散等现象的统称。

2.1.4 静载试验 static loading test

在桩顶部逐级施加竖向压力、竖向上拔力或水平推力，观测桩顶部随时间产生的沉降、上拔位移或水平位移，以确定相应的单桩竖向抗压承载力、单桩竖向抗拔承载力或单桩水平承载力的试验方法。

2.1.5 钻芯法 core drilling method

用钻机钻取芯样以检测桩长、桩身缺陷、桩底沉渣厚度以及桩身混凝土的强度、密实性和连续性，判定桩端岩土性状的方法。

2.1.6 低应变法 low strain integrity testing

采用低能量瞬态或稳态激振方式在桩顶激振，实测桩顶部的速度时程曲线或速度导纳曲线，通过波动理论分析或频域分析，对桩身完整性进行判定的检测方法。

2.1.7 高应变法 high strain dynamic testing

用重锤冲击桩顶，实测桩顶部的速度和力时程曲线，通过波

动理论分析，对单桩竖向抗压承载力和桩身完整性进行判定的检测方法。

2.1.8 声波透射法 crosshole sonic logging

在预埋声测管之间发射并接收声波，通过实测声波在混凝土介质中传播的声时、频率和波幅衰减等声学参数的相对变化，对桩身完整性进行检测的方法。

2.2 符 号

2.2.1 抗力和材料性能

- c ——桩身一维纵向应力波传播速度（简称桩身波速）；
- E ——桩身材料弹性模量；
- f_{cu} ——混凝土芯样试件抗压强度；
- m ——地基土水平抗力系数的比例系数；
- Q_u ——单桩竖向抗压极限承载力；
- R_a ——单桩竖向抗压承载力特征值；
- R_c ——由凯司法判定的单桩竖向抗压承载力；
- R_x ——缺陷以上部位土阻力的估计值；
- v ——桩身混凝土声速；
- Z ——桩身截面力学阻抗；
- ρ ——桩身材料质量密度。

2.2.2 作用与作用效应

- F ——锤击力；
- H ——单桩水平静载试验中作用于地面的水平力；
- P ——芯样抗压试验测得的破坏荷载；
- Q ——单桩竖向抗压静载试验中施加的竖向荷载、桩身轴力；
- s ——桩顶竖向沉降、桩身竖向位移；
- U ——单桩竖向抗拔静载试验中施加的上拔荷载；
- V ——质点运动速度；

Y_0 ——水平力作用点的水平位移；

δ ——桩顶上拔量；

σ_s ——钢筋应力。

2.2.3 几何参数

A ——桩身截面面积；

B ——矩形桩的边宽；

b_0 ——桩身计算宽度；

D ——桩身直径（外径）；

d ——芯样试件的平均直径；

I ——桩身换算截面惯性矩；

l' ——每检测剖面相应两声测管的外壁间净距离；

L ——测点下桩长；

x ——传感器安装点至桩身缺陷的距离；

z ——测点深度。

2.2.4 计算系数

J_c ——凯司法阻尼系数；

α ——桩的水平变形系数；

β ——高应变法桩身完整性系数；

λ ——样本中不同统计个数对应的系数；

ν_y ——桩顶水平位移系数；

ξ ——混凝土芯样试件抗压强度折算系数。

2.2.5 其他

A_m ——声波波幅平均值；

A_p ——声波波幅值；

a ——信号首波峰值电压；

a_0 ——零分贝信号峰值电压；

c_m ——桩身波速的平均值；

f ——频率、声波信号主频；

n ——数目、样本数量；

- s_x ——标准差；
- T ——信号周期；
- t' ——声测管及耦合水层声时修正值；
- t_0 ——仪器系统延迟时间；
- t_1 ——速度第一峰对应的时刻；
- t_c ——声时；
- t_i ——时间、声时测量值；
- t_r ——锤击力上升时间；
- t_x ——缺陷反射峰对应的时刻；
- v_0 ——声速的异常判断值；
- v_c ——声速的异常判断临界值；
- v_L ——声速低限值；
- v_m ——声速平均值；
- Δf ——幅频曲线上桩底相邻谐振峰间的频差；
- $\Delta f'$ ——幅频曲线上缺陷相邻谐振峰间的频差；
- ΔT ——速度波第一峰与桩底反射波峰间的时间差；
- Δt_x ——速度波第一峰与缺陷反射波峰间的时间差。

3 基本规定

3.1 检测方法和内容

3.1.1 工程桩应进行单桩承载力和桩身完整性抽样检测。

3.1.2 基桩检测方法应根据检测目的按表 3.1.2 选择。

表 3.1.2 检测方法 & 检测目的

检测方法	检测目的
单桩竖向抗压静载试验	确定单桩竖向抗压极限承载力； 判定竖向抗压承载力是否满足设计要求； 通过桩身内力及变形测试，测定桩侧、桩端阻力； 验证高应变法的单桩竖向抗压承载力检测结果
单桩竖向抗拔静载试验	确定单桩竖向抗拔极限承载力； 判定竖向抗拔承载力是否满足设计要求； 通过桩身内力及变形测试，测定桩的抗拔摩阻力
单桩水平静载试验	确定单桩水平临界和极限承载力，推定土抗力参数； 判定水平承载力是否满足设计要求； 通过桩身内力及变形测试，测定桩身弯矩
钻芯法	检测灌注桩桩长、桩身混凝土强度、桩底沉渣厚度， 判定或鉴别桩端岩土性状，判定桩身完整性类别
低应变法	检测桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别
高应变法	判定单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求； 检测桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别； 分析桩侧和桩端土阻力
声波透射法	检测灌注桩桩身缺陷及其位置，判定桩身完整性类别

3.1.3 桩身完整性检测宜采用两种或多种合适的检测方法进

行。

3.1.4 桩基检测除应在施工前和施工后进行外，尚应采取符合本规范规定的检测方法或专业验收规范规定的其他检测方法，进行桩基施工过程中的检测，加强施工过程质量控制。

3.2 检测工作程序

3.2.1 检测工作的程序，应按图 3.2.1 进行：

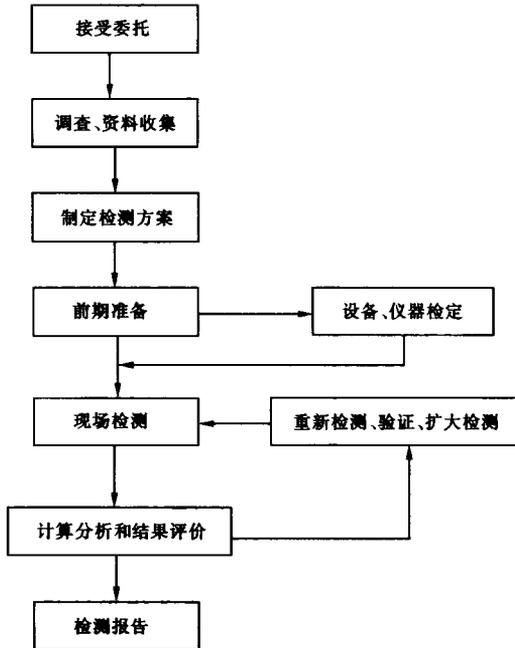


图 3.2.1 检测工作程序框图

3.2.2 调查、资料收集阶段宜包括下列内容：

- 1 收集被检测工程的岩土工程勘察资料、桩基设计图纸、施工记录；了解施工工艺和施工中出现的异常情况。
- 2 进一步明确委托方的具体要求。
- 3 检测项目现场实施的可行性。

3.2.3 应根据调查结果和确定的检测目的,选择检测方法,制定检测方案。检测方案宜包含以下内容:工程概况,检测方法及其依据的标准,抽样方案,所需的机械或人工配合,试验周期。

3.2.4 检测前应对仪器设备检查调试。

3.2.5 检测用计量器具必须在计量检定周期的有效期内。

3.2.6 检测开始时间应符合下列规定:

1 当采用低应变法或声波透射法检测时,受检桩混凝土强度至少达到设计强度的70%,且不小于15MPa。

2 当采用钻芯法检测时,受检桩的混凝土龄期达到28d或预留同条件养护试块强度达到设计强度。

3 承载力检测前的休止时间除应达到本条第2款规定的混凝土强度外,当无成熟的地区经验时,尚不应少于表3.2.6规定的时间。

表 3.2.6 休止时间

土的类别		休止时间 (d)
砂土		7
粉土		10
黏性土	非饱和	15
	饱和	25

注:对于泥浆护壁灌注桩,宜适当延长休止时间。

3.2.7 施工后,宜先进行工程桩的桩身完整性检测,后进行承载力检测。当基础埋深较大时,桩身完整性检测应在基坑开挖至基底标高后进行。

3.2.8 现场检测期间,除应执行本规范的有关规定外,还应遵守国家有关安全生产的规定。当现场操作环境不符合仪器设备使用要求时,应采取有效的防护措施。

3.2.9 当发现检测数据异常时,应查找原因,重新检测。

3.2.10 当需要进行验证或扩大检测时,应得到有关各方的确认,并按本规范第3.4.1~3.4.7条的有关规定执行。

3.3 检测数量

3.3.1 当设计有要求或满足下列条件之一时，施工前应采用静载试验确定单桩竖向抗压承载力特征值：

- 1 设计等级为甲级、乙级的桩基；
- 2 地质条件复杂、桩施工质量可靠性低；
- 3 本地区采用的新桩型或新工艺。

检测数量在同一条件下不应少于 3 根，且不宜少于总桩数的 1%；当工程桩总数在 50 根以内时，不应少于 2 根。

3.3.2 打入式预制桩有下列条件要求之一时，应采用高应变法进行试打桩的打桩过程监测：

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

在相同施工工艺和相近地质条件下，试打桩数量不应少于 3 根。

3.3.3 单桩承载力和桩身完整性验收抽样检测的受检桩选择宜符合下列规定：

- 1 施工质量有疑问的桩；
- 2 设计方认为重要的桩；
- 3 局部地质条件出现异常的桩；
- 4 施工工艺不同的桩；
- 5 承载力验收检测时适量选择完整性检测中判定的Ⅲ类桩；
- 6 除上述规定外，同类型桩宜均匀随机分布。

3.3.4 混凝土桩的桩身完整性检测的抽检数量应符合下列规定：

- 1 柱下三桩或三桩以下的承台抽检桩数不得少于 1 根。
- 2 设计等级为甲级，或地质条件复杂、成桩质量可靠性较低的灌注桩，抽检数量不应少于总桩数的 30%，且不得少于 20 根；其他桩基工程的抽检数量不应少于总桩数的 20%，且不得

少于 10 根。

注：1 对端承型大直径灌注桩，应在上述两款规定的抽检桩数范围内，选用钻芯法或声波透射法对部分受检桩进行桩身完整性检测。抽检数量不应少于总桩数的 10%。

2 地下水位以上且终孔后桩端持力层已通过核验的人工挖孔桩，以及单节混凝土预制桩，抽检数量可适当减少，但不应少于总桩数的 10%，且不应少于 10 根。

3 当符合第 3.3.3 条第 1~4 款规定的桩数较多，或为了全面了解整个工程基桩的桩身完整性情况时，应适当增加抽检数量。

3.3.5 对单位工程内且在同一条件下的工程桩，当符合下列条件之一时，应采用单桩竖向抗压承载力静载试验进行验收检测：

- 1 设计等级为甲级的桩基；
- 2 地质条件复杂、桩施工质量可靠性低；
- 3 本地区采用的新桩型或新工艺；
- 4 挤土群桩施工产生挤土效应。

抽检数量不应少于总桩数的 1%，且不少于 3 根；当总桩数在 50 根以内时，不应少于 2 根。

注：对上述第 1~4 款规定条件外的工程桩，当采用竖向抗压静载试验进行验收承载力检测时，抽检数量宜按本条规定执行。

3.3.6 对第 3.3.5 条规定条件外的预制桩和满足高应变法适用检测范围的灌注桩，可采用高应变法进行单桩竖向抗压承载力验收检测。当有本地区相近条件的对比验证资料时，高应变法也可作为第 3.3.5 条规定条件下单桩竖向抗压承载力验收检测的补充。抽检数量不宜少于总桩数的 5%，且不得少于 5 根。

3.3.7 对于端承型大直径灌注桩，当受设备或现场条件限制无法检测单桩竖向抗压承载力时，可采用钻芯法测定桩底沉渣厚度并钻取桩端持力层岩土芯样检验桩端持力层。抽检数量不应少于总桩数的 10%，且不应少于 10 根。

3.3.8 对于承受拔力和水平力较大的桩基，应进行单桩竖向抗拔、水平承载力检测。检测数量不应少于总桩数的 1%，且不应

少于 3 根。

3.4 验证与扩大检测

3.4.1 当出现本规范第 8.4.5 ~ 8.4.6 条和第 9.4.7 条中所列情况时, 应进行验证检测。验证方法宜采用单桩竖向抗压静载试验; 对于嵌岩灌注桩, 可采用钻芯法验证。

3.4.2 桩身浅部缺陷可采用开挖验证。

3.4.3 桩身或接头存在裂隙的预制桩可采用高应变法验证。

3.4.4 单孔钻芯检测发现桩身混凝土质量问题时, 宜在同一基桩增加钻孔验证。

3.4.5 对低应变法检测中不能明确完整性类别的桩或Ⅲ类桩, 可根据实际情况采用静载法、钻芯法、高应变法、开挖等适宜的方法验证检测。

3.4.6 当单桩承载力或钻芯法抽检结果不满足设计要求时, 应分析原因, 并经确认后扩大抽检。

3.4.7 当采用低应变法、高应变法和声波透射法抽检桩身完整性所发现的Ⅲ、Ⅳ类桩之和大于抽检桩数的 20% 时, 宜采用原检测方法 (声波透射法可改用钻芯法), 在未检桩中继续扩大抽检。

3.5 检测结果评价和检测报告

3.5.1 桩身完整性检测结果评价, 应给出每根受检桩的桩身完整性类别。桩身完整性分类应符合表 3.5.1 的规定, 并按本规范第 7 ~ 10 章分别规定的技术内容划分。

表 3.5.1 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, 不会影响桩身结构承载力的正常发挥
III 类桩	桩身有明显缺陷, 对桩身结构承载力有影响
IV 类桩	桩身存在严重缺陷

3.5.2 IV类桩应进行工程处理。

3.5.3 工程桩承载力检测结果的评价，应给出每根受检桩的承载力检测值，并据此给出单位工程同一条件下的单桩承载力特征值是否满足设计要求的结论。

3.5.4 检测报告应结论准确、用词规范。

3.5.5 检测报告应包含以下内容：

1 委托方名称，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，层数，设计要求，检测目的，检测依据，检测数量，检测日期；

2 地质条件描述；

3 受检桩的桩号、桩位和相关施工记录；

4 检测方法，检测仪器设备，检测过程叙述；

5 受检桩的检测数据，实测与计算分析曲线、表格和汇总结果；

6 与检测内容相应的检测结论。

3.6 检测机构和检测人员

3.6.1 检测机构应通过计量认证，并具有基桩检测的资质。

3.6.2 检测人员应经过培训合格，并具有相应的资质。

4 单桩竖向抗压静载试验

4.1 适用范围

- 4.1.1 本方法适用于检测单桩的竖向抗压承载力。
- 4.1.2 当埋设有测量桩身应力、应变、桩底反力的传感器或位移杆时，可测定桩的分层侧阻力和端阻力或桩身截面的位移量。
- 4.1.3 为设计提供依据的试验桩，应加载至破坏；当桩的承载力以桩身强度控制时，可按设计要求的加载量进行。
- 4.1.4 对工程桩抽样检测时，加载量不应小于设计要求的单桩承载力特征值的 2.0 倍。

4.2 设备仪器及其安装

- 4.2.1 试验加载宜采用油压千斤顶。当采用两台及两台以上千斤顶加载时应并联同步工作，且应符合下列规定：
 - 1 采用的千斤顶型号、规格应相同。
 - 2 千斤顶的合力中心应与桩轴线重合。
- 4.2.2 加载反力装置可根据现场条件选择锚桩横梁反力装置、压重平台反力装置、锚桩压重联合反力装置、地锚反力装置，并应符合下列规定：
 - 1 加载反力装置能提供的反力不得小于最大加载量的 1.2 倍。
 - 2 应对加载反力装置的全部构件进行强度和变形验算。
 - 3 应对锚桩抗拔力（地基土、抗拔钢筋、桩的接头）进行验算；采用工程桩作锚桩时，锚桩数量不应少于 4 根，并应监测锚桩上拔量。
 - 4 压重宜在检测前一次加足，并均匀稳固地放置于平台上。
 - 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，有条件时宜利用工程桩作为堆载支点。

4.2.3 荷载测量可用放置在千斤顶上的荷重传感器直接测定；或采用并联于千斤顶油路的压力表或压力传感器测定油压，根据千斤顶率定曲线换算荷载。传感器的测量误差不应大于1%，压力表精度应优于或等于0.4级。试验用压力表、油泵、油管在最大加载时的压力不应超过规定工作压力的80%。

4.2.4 沉降测量宜采用位移传感器或大量程百分表，并应符合下列规定：

1 测量误差不大于0.1%FS，分辨力优于或等于0.01mm。

2 直径或边宽大于500mm的桩，应在其两个方向对称安置4个位移测试仪表，直径或边宽小于等于500mm的桩可对称安置2个位移测试仪表。

3 沉降测定平面宜在桩顶200mm以下位置，测点应牢固地固定于桩身。

4 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。

5 固定和支撑位移计（百分表）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 试桩、锚桩（压重平台支墩边）和基准桩之间的中心距离应符合表4.2.5规定。

表 4.2.5 试桩、锚桩（或压重平台支墩边）和基准桩之间的中心距离

反力装置 \ 距离	试桩中心与锚桩中心 (或压重平台支墩边)	试桩中心与 基准桩中心	基准桩中心与锚桩中心 (或压重平台支墩边)
锚桩横梁	$\geq 4(3)D$ 且 $> 2.0m$	$\geq 4(3)D$ 且 $> 2.0m$	$\geq 4(3)D$ 且 $> 2.0m$
压重平台	$\geq 4D$ 且 $> 2.0m$	$\geq 4(3)D$ 且 $> 2.0m$	$\geq 4D$ 且 $> 2.0m$
地锚装置	$\geq 4D$ 且 $> 2.0m$	$\geq 4(3)D$ 且 $> 2.0m$	$\geq 4D$ 且 $> 2.0m$

注：1 D 为试桩、锚桩或地锚的设计直径或边宽，取其较大者。
 2 如试桩或锚桩为扩底桩或多支盘桩时，试桩与锚桩的中心距离尚不应小于2倍扩大端直径。
 3 括号内数值可用于工程桩验收检测时多排桩设计桩中心距离小于 $4D$ 的情况。
 4 软土场地堆载重量较大时，宜增加支墩边与基准桩中心和试桩中心之间的距离，并在试验过程中观测基准桩的竖向位移。

4.2.6 当需要测试桩侧阻力和桩端阻力时，桩身内埋设传感器应按本规范附录 A 执行。

4.3 现场检测

4.3.1 试桩的成桩工艺和质量控制标准应与工程桩一致。

4.3.2 桩顶部宜高出试坑底面，试坑底面宜与桩承台底标高一致。混凝土桩头加固可按本规范附录 B 执行。

4.3.3 对作为锚桩用的灌注桩和有接头的混凝土预制桩，检测前宜对其桩身完整性进行检测。

4.3.4 试验加卸载方式应符合下列规定：

1 加载应分级进行，采用逐级等量加载；分级荷载宜为最大加载量或预估极限承载力的 1/10，其中第一级可取分级荷载的 2 倍。

2 卸载应分级进行，每级卸载量取加载时分级荷载的 2 倍，逐级等量卸载。

3 加、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 $\pm 10\%$ 。

4.3.5 为设计提供依据的竖向抗压静载试验应采用慢速维持荷载法。

4.3.6 慢速维持荷载法试验步骤应符合下列规定：

1 每级荷载施加后按第 5、15、30、45、60min 测读桩顶沉降量，以后每隔 30min 测读一次。

2 试桩沉降相对稳定标准：每一小时内的桩顶沉降量不超过 0.1mm，并连续出现两次（从分级荷载施加后第 30min 开始，按 1.5h 连续三次每 30min 的沉降观测值计算）。

3 当桩顶沉降速率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 15、30、60min 测读桩顶沉降量后，即可卸下一级荷载。卸载至零后，应测读桩顶残余沉降量，维持时间为 3h，测读时间为第 15、30min，以后每隔

30min 测读一次。

4.3.7 施工后的工程桩验收检测宜采用慢速维持荷载法。当有成熟的地区经验时，也可采用快速维持荷载法。

快速维持荷载法的每级荷载维持时间至少为 1h，是否延长维持荷载时间应根据桩顶沉降收敛情况确定。

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。

注：当桩顶沉降能相对稳定且总沉降量小于 40mm 时，宜加载至桩顶总沉降量超过 40mm。

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

3 已达到设计要求的最大加载量。

4 当工程桩作锚桩时，锚桩上拔量已达到允许值。

5 当荷载-沉降曲线呈缓变型时，可加载至桩顶总沉降量 60~80mm；在特殊情况下，可根据具体要求加载至桩顶累计沉降量超过 80mm。

4.3.9 检测数据宜按本规范附录 C 附表 C.0.1 的格式记录。

4.3.10 测试桩侧阻力和桩端阻力时，测试数据的测读时间应符合第 4.3.6 条的规定。

4.4 检测数据的分析与判定

4.4.1 检测数据的整理应符合下列规定：

1 确定单桩竖向抗压承载力时，应绘制竖向荷载-沉降 ($Q-s$)、沉降-时间对数 ($s-\lg t$) 曲线，需要时也可绘制其他辅助分析所需曲线。

2 当进行桩身应力、应变和桩底反力测定时，应整理出有关数据的记录表，并按本规范附录 A 绘制桩身轴力分布图、计算不同土层的分层侧摩阻力和端阻力值。

4.4.2 单桩竖向抗压极限承载力 Q_u 可按下列方法综合分析确

定：

1 根据沉降随荷载变化的特征确定：对于陡降型 $Q-s$ 曲线，取其发生明显陡降的起始点对应的荷载值。

2 根据沉降随时间变化的特征确定：取 $s-lgt$ 曲线尾部出现明显向下弯曲的前一级荷载值。

3 出现第 4.3.8 条第 2 款情况，取前一级荷载值。

4 对于缓变型 $Q-s$ 曲线可根据沉降量确定，宜取 $s = 40\text{mm}$ 对应的荷载值；当桩长大于 40m 时，宜考虑桩身弹性压缩量；对直径大于或等于 800mm 的桩，可取 $s = 0.05D$ (D 为桩端直径) 对应的荷载值。

注：当按上述四款判定桩的竖向抗压承载力未达到极限时，桩的竖向抗压极限承载力应取最大试验荷载值。

4.4.3 单桩竖向抗压极限承载力统计值的确定应符合下列规定：

1 参加统计的试桩结果，当满足其极差不超过平均值的 30% 时，取其平均值为单桩竖向抗压极限承载力。

2 当极差超过平均值的 30% 时，应分析极差过大的原因，结合工程具体情况综合确定，必要时可增加试桩数量。

3 对桩数为 3 根或 3 根以下的柱下承台，或工程桩抽检数量少于 3 根时，应取低值。

4.4.4 单位工程同一条件下的单桩竖向抗压承载力特征值 R_a 应按单桩竖向抗压极限承载力统计值的一半取值。

4.4.5 检测报告除应包括本规范第 3.5.5 条内容外，还应包括：

1 受检桩桩位对应的地质柱状图；

2 受检桩及锚桩的尺寸、材料强度、锚桩数量、配筋情况；

3 加载反力种类，堆载法应指明堆载重量，锚桩法应有反力梁布置平面图；

4 加卸载方法，荷载分级；

5 本规范第 4.4.1 条要求绘制的曲线及对应的数据表；与承载力判定有关的曲线及数据；

6 承载力判定依据；

7 当进行分层摩阻力测试时，还应有传感器类型、安装位置，轴力计算方法，各级荷载下桩身轴力变化曲线，各土层的桩侧极限摩阻力和桩端阻力。

5 单桩竖向抗拔静载试验

5.1 适用范围

5.1.1 本方法适用于检测单桩的竖向抗拔承载力。

5.1.2 当埋设有桩身应力、应变测量传感器时，或桩端埋设有位移测量杆时，可直接测量桩侧抗拔摩阻力，或桩端上拔量。

5.1.3 为设计提供依据的试验桩应加载至桩侧土破坏或桩身材料达到设计强度；对工程桩抽样检测时，可按设计要求确定最大加载量。

5.2 设备仪器及其安装

5.2.1 抗拔桩试验加载装置宜采用油压千斤顶，加载方式应符合本规范第 4.2.1 条规定。

5.2.2 试验反力装置宜采用反力桩（或工程桩）提供支座反力，也可根据现场情况采用天然地基提供支座反力。反力架系统应具有 1.2 倍的安全系数并符合下列规定：

1 采用反力桩（或工程桩）提供支座反力时，反力桩顶面应平整并具有一定的强度。

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

5.2.3 荷载测量及其仪器的技术要求应符合本规范第 4.2.3 条的规定。

5.2.4 桩顶上拔量测量及其仪器的技术要求应符合本规范 4.2.4 条的有关规定。

注：桩顶上拔量观测点可固定在桩顶面的桩身混凝土上。

5.2.5 试桩、支座和基准桩之间的中心距离应符合表 4.2.5 的

规定。

5.2.6 当需要测试桩侧抗拔摩阻力分布或桩端上拔位移时，桩身内埋设传感器或桩端埋设位移杆应按本规范附录 A 执行。

5.3 现场检测

5.3.1 对混凝土灌注桩、有接头的预制桩，宜在拔桩试验前采用低应变法检测受检桩的桩身完整性。为设计提供依据的抗拔灌注桩施工时应进行成孔质量检测，发现桩身中、下部位有明显扩径的桩不宜作为抗拔试验桩；对有接头的预制桩，应验算接头强度。

5.3.2 单桩竖向抗拔静载试验宜采用慢速维持荷载法。需要时，也可采用多循环加、卸载方法。慢速维持荷载法的加卸载分级、试验方法及稳定标准应按本规范第 4.3.4 条和 4.3.6 条有关规定执行，并仔细观察桩身混凝土开裂情况。

5.3.3 当出现下列情况之一时，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的上拔量 5 倍。

2 按桩顶上拔量控制，当累计桩顶上拔量超过 100mm 时。

3 按钢筋抗拉强度控制，桩顶上拔荷载达到钢筋强度标准值的 0.9 倍。

4 对于验收抽样检测的工程桩，达到设计要求的最大上拔荷载值。

5.3.4 检测数据可按本规范附录 C 附表 C.0.1 的格式记录。

5.3.5 测试桩侧抗拔摩阻力或桩端上拔位移时，测试数据的测读时间宜符合本规范第 4.3.6 条的规定。

5.4 检测数据的分析与判定

5.4.1 数据整理应绘制上拔荷载-桩顶上拔量 ($U-\delta$) 关系曲线和桩顶上拔量-时间对数 ($\delta-\lg t$) 关系曲线。

5.4.2 单桩竖向抗拔极限承载力可按下列方法综合判定：

1 根据上拔量随荷载变化的特征确定：对陡变型 $U-\delta$ 曲线，取陡升起始点对应的荷载值；

2 根据上拔量随时间变化的特征确定：取 $\delta-\lg t$ 曲线斜率明显变陡或曲线尾部明显弯曲的前一级荷载值。

3 当在某级荷载下抗拔钢筋断裂时，取其前一级荷载值。

5.4.3 单桩竖向抗拔极限承载力统计值的确定应符合本规范第 4.4.3 条的规定。

5.4.4 当作为验收抽样检测的受检桩在最大上拔荷载作用下，未出现本规范第 5.4.2 条所列三款情况时，可按设计要求判定。

5.4.5 单位工程同一条件下的单桩竖向抗拔承载力特征值应按单桩竖向抗拔极限承载力统计值的一半取值。

注：当工程桩不允许带裂缝工作时，取桩身开裂的前一级荷载作为单桩竖向抗拔承载力特征值，并与按极限荷载一半取值确定的承载力特征值相比取小值。

5.4.6 检测报告除应包括本规范第 3.5.5 条内容外，还应包括：

- 1 受检桩桩位对应的地质柱状图；
- 2 受检桩尺寸（灌注桩宜标明孔径曲线）及配筋情况；
- 3 加卸载方法，荷载分级；
- 4 第 5.4.1 条要求绘制的曲线及对应的数据表；
- 5 承载力判定依据；

6 当进行抗拔摩阻力测试时，应有传感器类型、安装位置、轴力计算方法，各级荷载下桩身轴力变化曲线，各土层中的抗拔极限摩阻力。

6 单桩水平静载试验

6.1 适用范围

6.1.1 本方法适用于桩顶自由时的单桩水平静载试验；其他形式的水平静载试验可参照使用。

6.1.2 本方法适用于检测单桩的水平承载力，推定地基土抗力系数的比例系数。

6.1.3 当埋设有桩身应变测量传感器时，可测量相应水平荷载作用下的桩身应力，并由此计算桩身弯矩。

6.1.4 为设计提供依据的试验桩宜加载至桩顶出现较大水平位移或桩身结构破坏；对工程桩抽样检测，可按设计要求的水平位移允许值控制加载。

6.2 设备仪器及其安装

6.2.1 水平推力加载装置宜采用油压千斤顶，加载能力不得小于最大试验荷载的 1.2 倍。

6.2.2 水平推力的反力可由相邻桩提供；当专门设置反力结构时，其承载能力和刚度应大于试验桩的 1.2 倍。

6.2.3 荷载测量及其仪器的技术要求应符合本规范第 4.2.3 条的规定；水平力作用点宜与实际工程的桩基承台底面标高一致；千斤顶和试验桩接触处应安置球形支座，千斤顶作用力应水平通过桩身轴线；千斤顶与试桩的接触处宜适当补强。

6.2.4 桩的水平位移测量及其仪器的技术要求应符合本规范第 4.2.4 条的有关规定。在水平力作用平面的受检桩两侧应对称安装两个位移计；当需要测量桩顶转角时，尚应在水平力作用平面上 50cm 的受检桩两侧对称安装两个位移计。

6.2.5 位移测量的基准点设置不应受试验和其他因素的影响，

基准点应设置在与作用力方向垂直且与位移方向相反的试桩侧面，基准点与试桩净距不应小于 1 倍桩径。

6.2.6 测量桩身应力或应变时，各测试断面的测量传感器应沿受力方向对称布置在远离中性轴的受拉和受压主筋上；埋设传感器的纵剖面与受力方向之间的夹角不得大于 10° 。在地面下 10 倍桩径（桩宽）的主要受力部分应加密测试断面，断面间距不宜超过 1 倍桩径；超过此深度，测试断面间距可适当加大。桩身内埋设传感器应按本规范附录 A 执行。

6.3 现场检测

6.3.1 加载方法宜根据工程桩实际受力特性选用单向多循环加载法或本规范第 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。需要测量桩身应力或应变的试桩宜采用维持荷载法。

6.3.2 试验加卸载方式和水平位移测量应符合下列规定：

1 单向多循环加载法的分级荷载应小于预估水平极限承载力或最大试验荷载的 $1/10$ 。每级荷载施加后，恒载 4min 后可测读水平位移，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观测。试验不得中间停顿。

2 慢速维持荷载法的加卸载分级、试验方法及稳定标准应按本规范第 4.3.4 条和 4.3.6 条有关规定执行。

6.3.3 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 30 ~ 40mm（软土取 40mm）；
- 3 水平位移达到设计要求的水平位移允许值。

6.3.4 检测数据可按本规范附录 C 附表 C.0.2 的格式记录。

6.3.5 测量桩身应力或应变时，测试数据的测读宜与水平位移测量同步。

6.4 检测数据的分析与判定

6.4.1 检测数据应按下列要求整理：

1 采用单向多循环加载法时应绘制水平力-时间-作用点位移 ($H-t-Y_0$) 关系曲线和水平力-位移梯度 ($H-\Delta Y_0/\Delta H$) 关系曲线。

2 采用慢速维持荷载法时应绘制水平力-力作用点位移 ($H-Y_0$) 关系曲线、水平力-位移梯度 ($H-\Delta Y_0/\Delta H$) 关系曲线、力作用点位移-时间对数 ($Y_0-\lg t$) 关系曲线和水平力-力作用点位移双对数 ($\lg H-\lg Y_0$) 关系曲线。

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

当桩顶自由且水平力作用位置位于地面处时， m 值可按下列公式确定：

$$m = \frac{(\nu_y \cdot H)^{\frac{5}{3}}}{b_0 Y_0^{\frac{5}{3}} (EI)^{\frac{2}{3}}} \quad (6.4.1-1)$$

$$\alpha = \left(\frac{mb_0}{EI} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (6.4.1-2)$$

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 (6.4.1-2) 试算 α ，当

$\alpha h \geq 4.0$ 时 (h 为桩的入土深度)， $\nu_y = 2.441$ ；

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， $b_0 = B + 1$ 。

6.4.2 对埋设有应力或应变测量传感器的试验应绘制下列曲线，并列表给出相应的数据：

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

6.4.3 单桩的水平临界荷载可按下列方法综合确定：

- 1 取单向多循环加载法时的 $H-t-Y_0$ 曲线或慢速维持荷载法时的 $H-Y_0$ 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 $\lg H-\lg Y_0$ 曲线上第一拐点对应的水平荷载值。
- 3 取 $H-\sigma_s$ 曲线第一拐点对应的水平荷载值。

6.4.4 单桩的水平极限承载力可按下列方法综合确定：

- 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前一级、或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值。
- 2 取慢速维持荷载法时的 $Y_0-\lg t$ 曲线尾部出现明显弯曲的前一级水平荷载值。
- 3 取 $H-\Delta Y_0/\Delta H$ 曲线或 $\lg H-\lg Y_0$ 曲线上第二拐点对应的水平荷载值。
- 4 取桩身折断或受拉钢筋屈服时的前一级水平荷载值。

6.4.5 单桩水平极限承载力和水平临界荷载统计值的确定应符合本规范第 4.4.3 条的规定。

6.4.6 单位工程同一条件下的单桩水平承载力特征值的确定应符合下列规定：

- 1 当水平承载力按桩身强度控制时，取水平临界荷载统计值为单桩水平承载力特征值。
- 2 当桩受长期水平荷载作用且桩不允许开裂时，取水平临界荷载统计值的 0.8 倍作为单桩水平承载力特征值。

6.4.7 除本规范第 6.4.6 条规定外，当水平承载力按设计要求

的水平允许位移控制时，可取设计要求的水平允许位移对应的水平荷载作为单桩水平承载力特征值，但应满足有关规范抗裂设计的要求。

6.4.8 检测报告除应包括本规范第 3.5.5 条内容外，还应包括：

- 1 受检桩桩位对应的地质柱状图；
- 2 受检桩的截面尺寸及配筋情况；
- 3 加卸载方法，荷载分级；
- 4 第 6.4.1 条要求绘制的曲线及对应的数据表；
- 5 承载力判定依据；
- 6 当进行钢筋应力测试并由此计算桩身弯矩时，应有传感器类型、安装位置、内力计算方法和第 6.4.2 条要求绘制的曲线及其对应的数据表。

7 钻 芯 法

7.1 适用 范 围

7.1.1 本方法适用于检测混凝土灌注桩的桩长、桩身混凝土强度、桩底沉渣厚度和桩身完整性，判定或鉴别桩端持力层岩土性状。

7.2 设 备

7.2.1 钻取芯样宜采用液压操纵的钻机。钻机设备参数应符合以下规定：

- 1 额定最高转速不低于 790r/min。
- 2 转速调节范围不少于 4 档。
- 3 额定配用压力不低于 1.5MPa。

7.2.2 钻机应配备单动双管钻具以及相应的孔口管、扩孔器、卡簧、扶正稳定器和可捞取松软渣样的钻具。钻杆应顺直，直径宜为 50mm。

7.2.3 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，且外径不宜小于 100mm。钻头胎体不得有肉眼可见的裂纹、缺边、少角、倾斜及喇叭口变形。

7.2.4 水泵的排水量应为 50 ~ 160L/min，泵压应为 1.0 ~ 2.0MPa。

7.2.5 锯切芯样试件用的锯切机应具有冷却系统和牢固夹紧芯样的装置，配套使用的金刚石圆锯片应有足够刚度。

7.2.6 芯样试件端面的补平器和磨平机应满足芯样制作的要求。

7.3 现场操作

7.3.1 每根受检桩的钻芯孔数和钻孔位置应符合下列规定：

1 桩径小于 1.2m 的桩钻 1 孔，桩径为 1.2 ~ 1.6m 的桩钻 2 孔，桩径大于 1.6m 的桩钻 3 孔。

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

3 对桩端持力层的钻探，每根受检桩不应少于一孔，且钻探深度应满足设计要求。

7.3.2 钻机设备安装必须周正、稳固、底座水平。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。应确保钻机在钻芯过程中不发生倾斜、移位，钻芯孔垂直度偏差不大于 0.5%。

7.3.3 当桩顶面与钻机底座的距离较大时，应安装孔口管，孔口管应垂直且牢固。

7.3.4 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钻进速度。

7.3.5 提钻卸取芯样时，应拧卸钻头和扩孔器，严禁敲打卸芯。

7.3.6 每回次进尺宜控制在 1.5m 内；钻至桩底时，宜采取适宜的钻芯方法和工艺钻取沉渣并测定沉渣厚度，并采用适宜的方法对桩端持力层岩土性状进行鉴别。

7.3.7 钻取的芯样应由上而下按回次顺序放进芯样箱中，芯样侧面上应清晰标明回次数、块号、本回次总块数，并按本规范附录 D 附表 D.0.1-1 的格式及时记录钻进情况和钻进异常情况，对芯样质量进行初步描述。

7.3.8 钻芯过程中，应按本规范附录 D 附表 D.0.1-2 的格式对芯样混凝土、桩底沉渣以及桩端持力层详细编录。

7.3.9 钻芯结束后，应对芯样和标有工程名称、桩号、钻芯孔

号、芯样试件采取位置、桩长、孔深、检测单位名称的标示牌的全貌进行拍照。

7.3.10 当单桩质量评价满足设计要求时，应采用 0.5 ~ 1.0MPa 压力，从钻芯孔孔底往上用水泥浆回灌封闭；否则应封存钻芯孔，留待处理。

7.4 芯样试件截取与加工

7.4.1 截取混凝土抗压芯样试件应符合下列规定：

1 当桩长为 10 ~ 30m 时，每孔截取 3 组芯样；当桩长小于 10m 时，可取 2 组，当桩长大于 30m 时，不少于 4 组。

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

3 缺陷位置能取样时，应截取一组芯样进行混凝土抗压试验。

4 当同一基桩的钻芯孔数大于一个，其中一孔在某深度存在缺陷时，应在其他孔的该深度处截取芯样进行混凝土抗压试验。

7.4.2 当桩端持力层为中、微风化岩层且岩芯可制作成试件时，应在接近桩底部位截取一组岩石芯样；遇分层岩性时宜在各层取样。

7.4.3 每组芯样应制作三个芯样抗压试件。芯样试件应按本规范附录 E 进行加工和测量。

7.5 芯样试件抗压强度试验

7.5.1 芯样试件制作完毕可立即进行抗压强度试验。

7.5.2 混凝土芯样试件的抗压强度试验应按现行国家标准《普通混凝土力学性能试验方法》GB/T 50081—2002 的有关规定执行。

7.5.3 抗压强度试验后，当发现芯样试件平均直径小于 2 倍试

件内混凝土粗骨料最大粒径，且强度值异常时，该试件的强度值不得参与统计平均。

7.5.4 混凝土芯样试件抗压强度应按下列公式计算：

$$f_{cu} = \xi \cdot \frac{4P}{\pi d^2} \quad (7.5.4)$$

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

P ——芯样试件抗压试验测得的破坏荷载 (N);

d ——芯样试件的平均直径 (mm);

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

7.5.5 桩底岩芯单轴抗压强度试验可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007—2002 附录 J 执行。

7.6 检测数据的分析与判定

7.6.1 混凝土芯样试件抗压强度代表值应按一组三块试件强度值的平均值确定。同一受检桩同一深度部位有两组或两组以上混凝土芯样试件抗压强度代表值时，取其平均值为该桩该深度处混凝土芯样试件抗压强度代表值。

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

7.6.3 桩端持力层性状应根据芯样特征、岩石芯样单轴抗压强度试验、动力触探或标准贯入试验结果，综合判定桩端持力层岩土性状。

7.6.4 桩身完整性类别应结合钻芯孔数、现场混凝土芯样特征、芯样单轴抗压强度试验结果，按本规范表 3.5.1 的规定和表 7.6.4 的特征进行综合判定。

7.6.5 成桩质量评价应单桩进行。当出现下列情况之一时，应判定该受检桩不满足设计要求：

- 1 桩身完整性类别为Ⅳ类的桩。
- 2 受检桩混凝土芯样试件抗压强度代表值小于混凝土设计强度等级的桩。
- 3 桩长、桩底沉渣厚度不满足设计或规范要求的桩。
- 4 桩端持力层岩土性状（强度）或厚度未达到设计或规范要求的桩。

表 7.6.4 桩身完整性判定

类别	特征
I	混凝土芯样连续、完整、表面光滑、胶结好、骨料分布均匀、呈长柱状、断口吻合，芯样侧面仅见少量气孔
II	混凝土芯样连续、完整、胶结较好、骨料分布基本均匀、呈柱状、断口基本吻合，芯样侧面局部见蜂窝麻面、沟槽
III	大部分混凝土芯样胶结较好，无松散、夹泥或分层现象，但有下列情况之一： 芯样局部破碎且破碎长度不大于 10cm； 芯样骨料分布不均匀； 芯样多呈短柱状或块状； 芯样侧面蜂窝麻面、沟槽连续
IV	有下列情况之一： 钻进很困难； 芯样任一段松散、夹泥或分层； 芯样局部破碎且破碎长度大于 10cm

7.6.6 钻芯孔偏出桩外时，仅对钻取芯样部分进行评价。

7.6.7 检测报告除应包括本规范第 3.5.5 条内容外，还应包括：

- 1 钻芯设备情况；
- 2 检测桩数、钻孔数量，架空、混凝土芯进尺、岩芯进尺、总进尺，混凝土试件组数、岩石试件组数、动力触探或标准贯入试验结果；
- 3 按本规范附录 D 附表 D.0.1-3 的格式编制每孔的柱状图；
- 4 芯样单轴抗压强度试验结果；
- 5 芯样彩色照片；
- 6 异常情况说明。

8 低应变法

8.1 适用范围

8.1.1 本方法适用于检测混凝土桩的桩身完整性，判定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确定。

8.2 仪器设备

8.2.1 检测仪器的主要技术性能指标应符合现行行业标准《基桩动测仪》JG/T 3055 的有关规定，且应具有信号显示、储存和处理分析功能。

8.2.2 瞬态激振设备应包括能激发宽脉冲和窄脉冲的力锤和锤垫；力锤可装有力传感器；稳态激振设备应包括激振力可调、扫频范围为 10 ~ 2000Hz 的电磁式稳态激振器。

8.3 现场检测

8.3.1 受检桩应符合下列规定：

- 1 桩身强度应符合本规范第 3.2.6 条第 1 款的规定。
- 2 桩头的材质、强度、截面尺寸应与桩身基本等同。
- 3 桩顶面应平整、密实，并与桩轴线基本垂直。

8.3.2 测试参数设定应符合下列规定：

- 1 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；幅频信号分析的频率范围上限不应小于 2000Hz。
- 2 设定桩长应为桩顶测点至桩底的施工桩长，设定桩身截面积应为施工截面积。
- 3 桩身波速可根据本地区同类型桩的测试值初步设定。
- 4 采样时间间隔或采样频率应根据桩长、桩身波速和频域

分辨率合理选择；时域信号采样点数不宜少于 1024 点。

5 传感器的设定值应按计量检定结果设定。

8.3.3 测量传感器安装和激振操作应符合下列规定：

1 传感器安装应与桩顶面垂直；用耦合剂粘结时，应具有足够的粘结强度。

2 实心桩的激振点位置应选择在桩中心，测量传感器安装位置宜为距桩中心 $2/3$ 半径处；空心桩的激振点与测量传感器安装位置宜在同一水平面上，且与桩中心连线形成的夹角宜为 90° ，激振点和测量传感器安装位置宜为桩壁厚的 $1/2$ 处。

3 激振点与测量传感器安装位置应避开钢筋笼的主筋影响。

4 激振方向应沿桩轴线方向。

5 瞬态激振应通过现场敲击试验，选择合适重量的激振力锤和锤垫，宜用宽脉冲获取桩底或桩身下部缺陷反射信号，宜用窄脉冲获取桩身上部缺陷反射信号。

6 稳态激振应在每一个设定频率下获得稳定响应信号，并根据桩径、桩长及桩周土约束情况调整激振力大小。

8.3.4 信号采集和筛选应符合下列规定：

1 根据桩径大小，桩心对称布置 $2 \sim 4$ 个检测点；每个检测点记录的有效信号数不宜少于 3 个。

2 检查判断实测信号是否反映桩身完整性特征。

3 不同检测点及多次实测时域信号一致性较差，应分析原因，增加检测点数量。

4 信号不应失真和产生零漂，信号幅值不应超过测量系统的量程。

8.4 检测数据的分析与判定

8.4.1 桩身波速平均值的确定应符合下列规定：

1 当桩长已知、桩底反射信号明确时，在地质条件、设计桩型、成桩工艺相同的基桩中，选取不少于 5 根 I 类桩的桩身波速值按下式计算其平均值：

$$c_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (8.4.1-1)$$

$$c_i = \frac{2000L}{\Delta T} \quad (8.4.1-2)$$

$$c_i = 2L \cdot \Delta f \quad (8.4.1-3)$$

式中 c_m ——桩身波速的平均值 (m/s);

c_i ——第 i 根受检桩的桩身波速值 (m/s), 且 $|c_i - c_m| / c_m \leq 5\%$;

L ——测点下桩长 (m);

ΔT ——速度波第一峰与桩底反射波峰间的时间差 (ms);

Δf ——幅频曲线上桩底相邻谐振峰间的频差 (Hz);

n ——参加波速平均值计算的基桩数量 ($n \geq 5$)。

2 当无法按上款确定时, 波速平均值可根据本地区相同桩型及成桩工艺的其他桩基工程的实测值, 结合桩身混凝土的骨料品种和强度等级综合确定。

8.4.2 桩身缺陷位置应按下列公式计算:

$$x = \frac{1}{2000} \cdot \Delta t_x \cdot c \quad (8.4.2-1)$$

$$x = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\Delta f'} \quad (8.4.2-2)$$

式中 x ——桩身缺陷至传感器安装点的距离 (m);

Δt_x ——速度波第一峰与缺陷反射波峰间的时间差 (ms);

c ——受检桩的桩身波速 (m/s), 无法确定时用 c_m 值替代;

$\Delta f'$ ——幅频信号曲线上缺陷相邻谐振峰间的频差 (Hz)。

8.4.3 桩身完整性类别应结合缺陷出现的深度、测试信号衰减特性以及设计桩型、成桩工艺、地质条件、施工情况, 按本规范表 3.5.1 的规定和表 8.4.3 所列实测时域或幅频信号特征进行综合分析判定。

表 8.4.3 桩身完整性判定

类别	时域信号特征	幅频信号特征
I	2L/c 时刻前无缺陷反射波, 有桩底反射波	桩底谐振峰排列基本等间距, 其相邻频差 $\Delta f \approx c/2L$
II	2L/c 时刻前出现轻微缺陷反射波, 有桩底反射波	桩底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桩底谐振峰之间的频差 $\Delta f' > c/2L$
III	有明显缺陷反射波, 其他特征介于 II 类和 IV 类之间	
IV	2L/c 时刻前出现严重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 $\Delta f' > c/2L$, 无桩底谐振峰; 或因桩身浅部严重缺陷只出现单一谐振峰, 无桩底谐振峰
注: 对同一场地、地质条件相近、桩型和成桩工艺相同的基桩, 因桩端部分桩身阻抗与持力层阻抗相匹配导致实测信号无桩底反射波时, 可按本场地同条件下有桩底反射波的其他桩实测信号判定桩身完整性类别。		

8.4.4 对于混凝土灌注桩, 采用时域信号分析时应区分桩身截面渐变后恢复至原桩径并在该阻抗突变处的一次反射, 或扩径突变处的二次反射, 结合成桩工艺和地质条件综合分析判定受检桩的完整性类别。必要时, 可采用实测曲线拟合法辅助判定桩身完整性或借助实测导纳值、动刚度的相对高低辅助判定桩身完整性。

8.4.5 对于嵌岩桩, 桩底时域反射信号为单一反射波且与锤击脉冲信号同向时, 应采取其他方法核桩端嵌岩情况。

8.4.6 出现下列情况之一, 桩身完整性判定宜结合其他检测方法进行:

- 1 实测信号复杂, 无规律, 无法对其进行准确评价。
- 2 桩身截面渐变或多变, 且变化幅度较大的混凝土灌注桩。

8.4.7 低应变检测报告应给出桩身完整性检测的实测信号曲线。

8.4.8 检测报告除应包括本规范第 3.5.5 条内容外，还应包括下列内容：

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

9 高应变法

9.1 适用范围

9.1.1 本方法适用于检测基桩的竖向抗压承载力和桩身完整性；监测预制桩打入时的桩身应力和锤击能量传递比，为沉桩工艺参数及桩长选择提供依据。

9.1.2 进行灌注桩的竖向抗压承载力检测时，应具有现场实测经验和本地区相近条件下的可靠对比验证资料。

9.1.3 对于大直径扩底桩和 $Q-s$ 曲线具有缓变型特征的大直径灌注桩，不宜采用本方法进行竖向抗压承载力检测。

9.2 仪器设备

9.2.1 检测仪器的主要技术性能指标不应低于现行行业标准《基桩动测仪》JG/T 3055 中表 1 规定的 2 级标准，且应具有保存、显示实测力与速度信号和信号处理与分析的功能。

9.2.2 锤击设备宜具有稳固的导向装置；打桩机械或类似的装置（导杆式柴油锤除外）都可作为锤击设备。

9.2.3 高应变检测用重锤应材质均匀、形状对称、锤底平整，高径（宽）比不得小于 1，并采用铸铁或铸钢制作。当采取自由落锤安装加速度传感器的方式实测锤击力时，重锤应整体铸造，且高径（宽）比应在 1.0~1.5 范围内。

9.2.4 进行高应变承载力检测时，锤的重量应大于预估单桩极限承载力的 1.0%~1.5%，混凝土桩的桩径大于 600mm 或桩长大于 30m 时取高值。

9.2.5 桩的贯入度可采用精密水准仪等仪器测定。

9.3 现场检测

9.3.1 检测前的准备工作应符合下列规定：

- 1 预制桩承载力的时间效应应通过复打确定。
- 2 桩顶面应平整，桩顶高度应满足锤击装置的要求，桩锤重心应与桩顶对中，锤击装置架立应垂直。
- 3 对不能承受锤击的桩头应加固处理，混凝土桩的桩头处理按本规范附录 B 执行。
- 4 传感器的安装应符合本规范附录 F 的规定。
- 5 桩头顶部应设置桩垫，桩垫可采用 10 ~ 30mm 厚的木板或胶合板等材料。

9.3.2 参数设定和计算应符合下列规定：

- 1 采样时间间隔宜为 50 ~ 200 μ s，信号采样点数不宜少于 1024 点。
- 2 传感器的设定值应按计量检定结果设定。
- 3 自由落锤安装加速度传感器测力时，力的设定值由加速度传感器设定值与重锤质量的乘积确定。
- 4 测点处的桩截面尺寸应按实际测量确定，波速、质量密度和弹性模量应按实际情况设定。
- 5 测点以下桩长和截面积可采用设计文件或施工记录提供的数据作为设定值。
- 6 桩身材料质量密度应按表 9.3.2 取值。

表 9.3.2 桩身材料质量密度 (t/m^3)

钢 桩	混凝土预制桩	离心管桩	混凝土灌注桩
7.85	2.45 ~ 2.50	2.55 ~ 2.60	2.40

- 7 桩身波速可结合本地经验或按同场地同类型已检桩的平均波速初步设定，现场检测完成后应按第 9.4.3 条调整。
- 8 桩身材料弹性模量应按下列公式计算：

$$E = \rho \cdot c^2 \quad (9.3.2)$$

式中 E ——桩身材料弹性模量 (kPa);
 c ——桩身应力波传播速度 (m/s);
 ρ ——桩身材料质量密度 (t/m^3).

9.3.3 现场检测应符合下列要求:

1 交流供电的测试系统应良好接地;检测时测试系统应处于正常状态。

2 采用自由落锤为锤击设备时,应重锤低击,最大锤击落距不宜大于 2.5m。

3 试验目的为确定预制桩打桩过程中的桩身应力、沉桩设备匹配能力和选择桩长时,应按本规范附录 G 执行。

4 检测时应及时检查采集数据的质量;每根受检桩记录的有效锤击信号应根据桩顶最大动位移、贯入度以及桩身最大拉、压应力和缺陷程度及其发展情况综合确定。

5 发现测试波形紊乱,应分析原因;桩身有明显缺陷或缺陷程度加剧,应停止检测。

9.3.4 承载力检测时宜实测桩的贯入度,单击贯入度宜在 2~6mm 之间。

9.4 检测数据的分析与判定

9.4.1 检测承载力时选取锤击信号,宜取锤击能量较大的击次。

9.4.2 当出现下列情况之一时,高应变锤击信号不得作为承载力分析计算的依据:

1 传感器安装处混凝土开裂或出现严重塑性变形使力曲线最终未归零;

2 严重锤击偏心,两侧力信号幅值相差超过 1 倍;

3 触变效应的影晌,预制桩在多次锤击下承载力下降;

4 四通道测试数据不全。

9.4.3 桩身波速可根据下行波波起升沿的起点到上行波下降沿的起点之间的时差与已知桩长值确定(图 9.4.3);桩底反射

信号不明显时，可根据桩长、混凝土波速的合理取值范围以及邻近桩的桩身波速值综合确定。

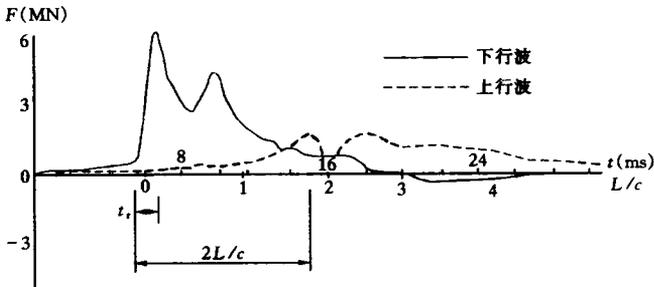


图 9.4.3 桩身波速的确定

9.4.4 当测点处原设定波速随调整后的桩身波速改变时，桩身材料弹性模量和锤击力信号幅值的调整应符合下列规定：

- 1 桩身材料弹性模量应按本规范式 (9.3.2) 重新计算。
- 2 当采用应变式传感器测力时，应同时对原实测力值校正。

9.4.5 高应变实测的力和速度信号第一峰起始比例失调时，不得进行比例调整。

9.4.6 承载力分析计算前，应结合地质条件、设计参数，对实测波形特征进行定性检查：

- 1 实测曲线特征反映出的桩承载性状。
- 2 观察桩身缺陷程度和位置，连续锤击时缺陷的扩大或逐步闭合情况。

9.4.7 以下四种情况应采用静载法进一步验证：

- 1 桩身存在缺陷，无法判定桩的竖向承载力。
- 2 桩身缺陷对水平承载力有影响。
- 3 单击贯入度大，桩底同向反射强烈且反射峰较宽，侧阻力波、端阻力波反射弱，即波形表现出竖向承载性状明显与勘察报告中的地质条件不符合。
- 4 嵌岩桩桩底同向反射强烈，且在时间 $2L/c$ 后无明显端阻力反射；也可采用钻芯法核验。

9.4.8 采用凯司法判定桩承载力，应符合下列规定：

1 只限于中、小直径桩。

2 桩身材质、截面应基本均匀。

3 阻尼系数 J_c 宜根据同条件下静载试验结果校核，或应在已取得相近条件下可靠对比资料后，采用实测曲线拟合法确定 J_c 值，拟合计算的桩数不应少于检测总桩数的 30%，且不应少于 3 根。

4 在同一场地、地质条件相近和桩型及其截面积相同情况下， J_c 值的极差不宜大于平均值的 30%。

9.4.9 凯司法判定单桩承载力可按下列公式计算：

$$R_c = \frac{1}{2}(1 - J_c) \cdot [F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] + \frac{1}{2}(1 + J_c) \cdot \left[F\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) - Z \cdot V\left(t_1 + \frac{2L}{c}\right) \right] \quad (9.4.9-1)$$

$$Z = \frac{E \cdot A}{c} \quad (9.4.9-2)$$

式中 R_c ——由凯司法判定的单桩竖向抗压承载力 (kN)；

J_c ——凯司法阻尼系数；

t_1 ——速度第一峰对应的时刻 (ms)；

$F(t_1)$ —— t_1 时刻的锤击力 (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 ——桩身截面面积 (m²)；

L ——测点下桩长 (m)。

注：公式 (9.4.9-1) 适用于 $t_1 + 2L/c$ 时刻桩侧和桩端土阻力均已充分发挥的摩擦型桩。

对于土阻力滞后于 $t_1 + 2L/c$ 时刻明显发挥或先于 $t_1 + 2L/c$ 时刻发挥并造成桩中上部强烈反弹这两种情况，宜分别采用以下两种方法对 R_c 值进行提高修正：

1 适当将 t_1 延时，确定 R_c 的最大值。

2 考虑卸载回弹部分土阻力对 R_0 值进行修正。

9.4.10 采用实测曲线拟合法判定桩承载力，应符合下列规定：

1 所采用的力学模型应明确合理，桩和土的力学模型应能分别反映桩和土的实际力学性状，模型参数的取值范围应能限定。

2 拟合分析选用的参数应在岩土工程的合理范围内。

3 曲线拟合时间段长度在 $t_1 + 2L/c$ 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值不应超过相应桩单元的最大计算位移值。

5 拟合完成时，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。

9.4.11 本方法对单桩承载力的统计和单桩竖向抗压承载力特征值的确定应符合下列规定：

1 参加统计的试桩结果，当满足其极差不超过平均值的 30% 时，取其平均值为单桩承载力统计值。

2 当极差超过 30% 时，应分析极差过大的原因，结合工程具体情况综合确定。必要时可增加试桩数量。

3 单位工程同一条件下的单桩竖向抗压承载力特征值 R_a 应按本方法得到的单桩承载力统计值的一半取值。

9.4.12 桩身完整性判定可采用以下方法进行：

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规范第 9.4.10 条第 1~2 款的规定；根据桩的成桩工艺，拟合时可采用桩身阻抗拟合或桩身裂隙（包括混凝土预制桩的接桩缝隙）拟合。

2 对于等截面桩，可按表 9.4.12 并结合经验判定；桩身完整性系数 β 和桩身缺陷位置 x 应分别按下列公式计算：

$$\beta = \frac{[F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] - 2R_x + [F(t_x) - Z \cdot V(t_x)]}{[F(t_1) + Z \cdot V(t_1)] - [F(t_x) - Z \cdot V(t_x)]} \quad (9.4.12-1)$$

$$x = c \cdot \frac{t_x - t_1}{2000} \quad (9.4.12-2)$$

式中 β ——桩身完整性系数；
 t_x ——缺陷反射峰对应的时刻 (ms)；
 x ——桩身缺陷至传感器安装点的距离 (m)；
 R_x ——缺陷以上部位土阻力的估计值，等于缺陷反射波起始点的力与速度乘以桩身截面力学阻抗之差值，取值方法见图 9.4.12。

表 9.4.12 桩身完整性判定

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

9.4.13 出现下列情况之一时，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 桩身有扩径的桩。
- 2 桩身截面渐变或多变的混凝土灌注桩。

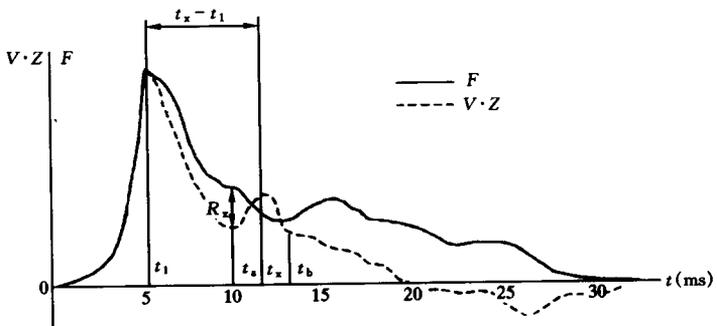


图 9.4.12 桩身完整性系数计算

3 力和速度曲线在峰值附近比例失调，桩身浅部有缺陷的桩。

4 锤击力波上升缓慢，力与速度曲线比例失调的桩。

9.4.14 桩身最大锤击拉、压应力和桩锤实际传递给桩的能量应分别按本规范附录 G 相应公式计算。

9.4.15 高应变检测报告应给出实测的力与速度信号曲线。

9.4.16 检测报告除应包括本规范第 3.5.5 条内容外，还应包括下列内容：

1 计算中实际采用的桩身波速值和 J_c 值；

2 实测曲线拟合法所选用的各单元桩土模型参数、拟合曲线、土阻力沿桩身分布图；

3 实测贯入度；

4 试打桩和打桩监控所采用的桩锤型号、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、桩身完整性以及能量传递比随入土深度的变化。

10 声波透射法

10.1 适用范围

10.1.1 本方法适用于已预埋声测管的混凝土灌注桩桩身完整性检测，判定桩身缺陷的程度并确定其位置。

10.2 仪器设备

10.2.1 声波发射与接收换能器应符合下列要求：

- 1 圆柱状径向振动，沿径向无指向性；
- 2 外径小于声测管内径，有效工作面轴向长度不大于150mm；
- 3 谐振频率宜为30~50kHz；
- 4 水密性满足1MPa水压不渗水。

10.2.2 声波检测仪应符合下列要求：

- 1 具有实时显示和记录接收信号的时程曲线以及频率测量或频谱分析功能。
- 2 声时测量分辨力优于或等于 $0.5\mu\text{s}$ ，声波幅值测量相对误差小于5%，系统频带宽度为1~200kHz，系统最大动态范围不小于100dB。
- 3 声波发射脉冲宜为阶跃或矩形脉冲，电压幅值为200~1000V。

10.3 现场检测

10.3.1 声测管埋设应按本规范附录H的规定执行。

10.3.2 现场检测前准备工作应符合下列规定：

- 1 采用标定法确定仪器系统延迟时间。
- 2 计算声测管及耦合水层声时修正值。
- 3 在桩顶测量相应声测管外壁间净距离。

4 将各声测管内注满清水, 检查声测管畅通情况; 换能器应能在全程范围内升降顺畅。

10.3.3 现场检测步骤应符合下列规定:

1 将发射与接收声波换能器通过深度标志分别置于两根声测管中的测点处。

2 发射与接收声波换能器应以相同标高(图 10.3.3a)或保持固定高差(图 10.3.3b)同步升降, 测点间距不宜大于 250mm。

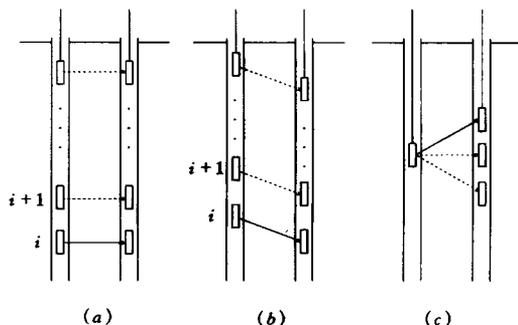


图 10.3.3 平测、斜测和扇形扫测示意图

(a) 平测; (b) 斜测; (c) 扇形扫测

3 实时显示和记录接收信号的时程曲线, 读取声时、首波峰值和周期值, 宜同时显示频谱曲线及主频值。

4 将多根声测管以两根为一个检测剖面进行全组合, 分别对所有检测剖面完成检测。

5 在桩身质量可疑的测点周围, 应采用加密测点, 或采用斜测(图 10.3.3b)、扇形扫测(图 10.3.3c)进行复测, 进一步确定桩身缺陷的位置和范围。

6 在同一根桩的各检测剖面的检测过程中, 声波发射电压和仪器设置参数应保持不变。

10.4 检测数据的分析与判定

10.4.1 各测点的声时 t_c 、声速 v 、波幅 A_p 及主频 f 应根据现

场检测数据,按下列各式计算,并绘制声速-深度($v-z$)曲线和波幅-深度(A_p-z)曲线,需要时可绘制辅助的主频-深度($f-z$)曲线:

$$t_{ci} = t_i - t_0 - t' \quad (10.4.1-1)$$

$$v_i = \frac{l'}{t_{ci}} \quad (10.4.1-2)$$

$$A_{pi} = 20 \lg \frac{a_i}{a_0} \quad (10.4.1-3)$$

$$f_i = \frac{1000}{T_i} \quad (10.4.1-4)$$

式中 t_{ci} ——第 i 测点声时 (μs);
 t_i ——第 i 测点声时测量值 (μs);
 t_0 ——仪器系统延迟时间 (μs);
 t' ——声测管及耦合水层声时修正值 (μs);
 l' ——每检测剖面相应两声测管的外壁间净距离 (mm);
 v_i ——第 i 测点声速 (km/s);
 A_{pi} ——第 i 测点波幅值 (dB);
 a_i ——第 i 测点信号首波峰值 (V);
 a_0 ——零分贝信号幅值 (V);
 f_i ——第 i 测点信号主频值 (kHz),也可由信号频谱的主频求得;
 T_i ——第 i 测点信号周期 (μs)。

10.4.2 声速临界值应按下列步骤计算:

1 将同一检测剖面各测点的声速值 v_i 由大到小依次排序,即

$$v_1 \geq v_2 \geq \dots v_i \geq \dots v_{n-k} \geq \dots v_{n-1} \geq v_n (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (10.4.2-1)$$

式中 v_i ——按序排列后的第 i 个声速测量值;
 n ——检测剖面测点数;

k ——从零开始逐一去掉式 (10.4.2-1) v_i 序列尾部最小数值的数据个数。

2 对从零开始逐一去掉 v_i 序列中最小数值后余下的数据进行统计计算。当去掉最小数值的数据个数为 k 时, 对包括 v_{n-k} 在内的余下数据 $v_1 \sim v_{n-k}$ 按下列公式进行统计计算:

$$v_0 = v_m - \lambda \cdot s_x \quad (10.4.2-2)$$

$$v_m = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} v_i \quad (10.4.2-3)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-k-1} \sum_{i=1}^{n-k} (v_i - v_m)^2} \quad (10.4.2-4)$$

式中 v_0 ——异常判断值;

v_m —— $(n-k)$ 个数据的平均值;

s_x —— $(n-k)$ 个数据的标准差;

λ ——由表 10.4.2 查得的与 $(n-k)$ 相对应的系数。

表 10.4.2 统计数据个数 $(n-k)$ 与对应的 λ 值

$n-k$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
λ	1.64	1.69	1.73	1.77	1.80	1.83	1.86	1.89	1.91	1.94
$n-k$	40	42	44	46	48	50	52	54	56	58
λ	1.96	1.98	2.00	2.02	2.04	2.05	2.07	2.09	2.10	2.11
$n-k$	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78
λ	2.13	2.14	2.15	2.17	2.18	2.19	2.20	2.21	2.22	2.23
$n-k$	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98
λ	2.24	2.25	2.26	2.27	2.28	2.29	2.29	2.30	2.31	2.32
$n-k$	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145
λ	2.33	2.34	2.36	2.38	2.39	2.41	2.42	2.43	2.45	2.46
$n-k$	150	160	170	180	190	200	220	240	260	280
λ	2.47	2.50	2.52	2.54	2.56	2.58	2.61	2.64	2.67	2.69

3 将 v_{n-k} 与异常判断值 v_0 进行比较, 当 $v_{n-k} \leq v_0$ 时,

v_{n-k} 及其以后的数据均为异常, 去掉 v_{n-k} 及其以后的异常数据; 再用数据 $v_1 \sim v_{n-k-1}$ 并重复式 (10.4.2-2) ~ (10.4.2-4) 的计算步骤, 直到 v_i 序列中余下的全部数据满足:

$$v_i > v_0 \quad (10.4.2-5)$$

此时, v_0 为声速的异常判断临界值 v_c 。

4 声速异常时的临界值判据为:

$$v_i \leq v_c \quad (10.4.2-6)$$

当式 (10.4.2-6) 成立时, 声速可判定为异常。

10.4.3 当检测剖面 n 个测点的声速值普遍偏低且离散性很小时, 宜采用声速低限值判据:

$$v_i < v_L \quad (10.4.3)$$

式中 v_i ——第 i 测点声速 (km/s);

v_L ——声速低限值 (km/s), 由预留同条件混凝土试件的抗压强度与声速对比试验结果, 结合本地区实际经验确定。

当式 (10.4.3) 成立时, 可直接判定为声速低于低限值异常。

10.4.4 波幅异常时的临界值判据应按下列公式计算:

$$A_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{pi} \quad (10.4.4-1)$$

$$A_{pi} < A_m - 6 \quad (10.4.4-2)$$

式中 A_m ——波幅平均值 (dB);

n ——检测剖面测点数。

当式 (10.4.4-2) 成立时, 波幅可判定为异常。

10.4.5 当采用斜率法的 PSD 值作为辅助异常点判据时, PSD 值应按下列公式计算:

$$PSD = K \cdot \Delta t \quad (10.4.5-1)$$

$$K = \frac{t_{ci} - t_{ci-1}}{z_i - z_{i-1}} \quad (10.4.5-2)$$

$$\Delta t = t_{ci} - t_{ci-1} \quad (10.4.5-3)$$

式中 t_{ci} ——第 i 测点声时 (μs);

t_{ci-1} ——第 $i-1$ 测点声时 (μs);

z_i ——第 i 测点深度 (m);

z_{i-1} ——第 $i-1$ 测点深度 (m)。

根据 PSD 值在某深度处的突变, 结合波幅变化情况, 进行异常点判定。

10.4.6 当采用信号主频值作为辅助异常点判据时, 主频-深度曲线上主频值明显降低可判定为异常。

10.4.7 桩身完整性类别应结合桩身混凝土各声学参数临界值、PSD 判据、混凝土声速低限值以及桩身质量可疑点加密测试(包括斜测或扇形扫测)后确定的缺陷范围, 按本规范表 3.5.1 的规定和表 10.4.7 的特征进行综合判定。

10.4.8 检测报告除应包括规范第 3.5.5 条内容外, 还应包括:

- 1 声测管布置图;
- 2 受检桩每个检测剖面声速-深度曲线、波幅-深度曲线, 并将相应判据临界值所对应的标志线绘制于同一个坐标系;
- 3 当采用主频值或 PSD 值进行辅助分析判定时, 绘制主频-深度曲线或 PSD 曲线;
- 4 缺陷分布图示。

表 10.4.7 桩身完整性判定

类别	特征
I	各检测剖面的声学参数均无异常, 无声速低于低限值异常
II	某一检测剖面个别测点的声学参数出现异常, 无声速低于低限值异常
III	某一检测剖面连续多个测点的声学参数出现异常; 两个或两个以上检测剖面在同一深度测点的声学参数出现异常; 局部混凝土声速出现低于低限值异常
IV	某一检测剖面连续多个测点的声学参数出现明显异常; 两个或两个以上检测剖面在同一深度测点的声学参数出现明显异常; 桩身混凝土声速出现普遍低于低限值异常或无法检测首波或声波接收信号严重畸变

附录 A 桩身内力测试

A.0.1 基桩内力测试适用于混凝土预制桩、钢桩、组合型桩，也可用于桩身断面尺寸基本恒定或已知的混凝土灌注桩。

A.0.2 对竖向抗压静载试验桩，可得到桩侧各土层的分层抗压摩阻力和桩端支承力；对竖向抗拔静荷载试验桩，可得到桩侧土的分层抗拔摩阻力；对水平静荷载试验桩，可求得桩身弯矩分布，最大弯矩位置等；对打入式预制混凝土桩和钢桩，可得到打桩过程中桩身各部位的锤击压应力、锤击拉应力。

A.0.3 基桩内力测试宜采用应变式传感器或钢弦式传感器。根据测试目的及要求，宜按表 A.0.3 中的传感器技术、环境特性，选择适合的传感器；也可采用滑动测微计。需要检测桩身某断面或桩端位移时，可在需检测断面设置沉降杆。

表 A.0.3 传感器技术、环境特性一览表

特性 \ 类型	钢弦式传感器	应变式传感器
传感器体积	大	较小
蠕变	较小, 适宜于长期观测	较大, 需提高制作技术、工艺解决
测量灵敏度	较低	较高
温度变化的影响	温度变化范围较大时需要修正	可以实现温度变化的自补偿
长导线影响	不影响测试结果	需进行长导线电阻影响的修正
自身补偿能力	补偿能力弱	对自身的弯曲、扭曲可以自补偿
对绝缘的要求	要求不高	要求高
动态响应	差	好

A.0.4 传感器设置位置及数量宜符合下列规定：

1 传感器宜放在两种不同性质土层的界面处，以测量桩在不同土层中的分层摩阻力。在地面处（或以上）应设置一个测量断面作为传感器标定断面。传感器埋设断面距桩顶和桩底的距离不宜小于1倍桩径。

2 在同一断面处可对称设置2~4个传感器，当桩径较大或试验要求较高时取高值。

A.0.5 应变式传感器可视以下情况采用不同制作方法：

1 对钢桩可采用以下两种方法之一：

- 1) 将应变计用特殊的粘贴剂直接贴在钢桩的桩身，应变计宜采用标距3~6mm的350Ω胶基箔式应变计，不得使用纸基应变计。粘贴前应将贴片区表面除锈磨平，用有机溶剂去污清洗，待干燥后粘贴应变计。粘贴好的应变计应采取可靠的防水防潮密封防护措施。
- 2) 将应变式传感器直接固定在测量位置。

2 对混凝土预制桩和灌注桩，应变传感器的制作和埋设可视具体情况采用以下三种方法之一：

- 1) 在600~1000mm长的钢筋上，轴向、横向粘贴四个（二个）应变计组成全桥（半桥），经防水绝缘处理后，到材料试验机上进行应力-应变关系标定。标定时的最大拉力宜控制在钢筋抗拉强度设计值的60%以内，经三次重复标定，应力-应变曲线的线性、滞后和重复性满足要求后，方可采用。传感器应在浇筑混凝土前按指定位置焊接或绑扎（泥浆护壁灌注桩应焊接）在主筋上，并满足规范对钢筋锚固长度的要求。固定后带应变计的钢筋不得弯曲变形或有附加应力产生。
- 2) 直接将电阻应变计粘贴在桩身指定断面的主筋上，其制作方法及要求同本条第1款钢桩上粘贴应变计的方法及要求。

3) 将应变砖或埋入式混凝土应变测量传感器按产品使用要求预埋在预制桩的桩身指定位置。

A.0.6 应变式传感器可按全桥或半桥方式制作，宜优先采用全桥方式。传感器的测量片和补偿片应选用同一规格同一批号的产品，按轴向、横向准确地粘贴在钢筋同一断面上。测点的连接应采用屏蔽电缆，导线的对地绝缘电阻值应在 $500\text{M}\Omega$ 以上；使用前应将整卷电缆除两端外全部浸入水中 1h，测量芯线与水的绝缘；电缆屏蔽线应与钢筋绝缘；测量和补偿所用连接电缆的长度和线径应相同。

A.0.7 电阻应变计及其连接电缆均应有可靠的防潮绝缘防护措施；正式试验前电阻应变计及电缆的系统绝缘电阻不应低于 $200\text{M}\Omega$ 。

A.0.8 不同材质的电阻应变计粘贴时应使用不同的粘贴剂。在选用电阻应变计、粘贴剂和导线时，应充分考虑试验桩在制作、养护和施工过程中的环境条件。对采用蒸汽养护或高压养护的混凝土预制桩，应选用耐高温的电阻应变计、粘贴剂和导线。

A.0.9 电阻应变测量所用的电阻应变仪宜具有多点自动测量功能，仪器的分辨力应优于或等于 $1\mu\epsilon$ ，并有存储和打印功能。

A.0.10 弦式钢筋计应按主筋直径大小选择。仪器的可测频率范围应大于桩在最大加载时的频率的 1.2 倍。使用前应对钢筋计逐个标定，得出压力（拉力）与频率之间的关系。

A.0.11 带有接长杆弦式钢筋计可焊接在主筋上；不宜采用螺纹连接。

A.0.12 弦式钢筋计通过与之匹配的频率仪进行测量，频率仪的分辨力应优于或等于 1Hz 。

A.0.13 当同时进行桩身位移测量时，桩身内力和位移测试应同步。

A.0.14 测试数据整理应符合下列规定：

1 采用应变式传感器测量时，按下列公式对实测应变值进行导线电阻修正：

$$\text{采用半桥测量时: } \epsilon = \epsilon' \cdot \left(1 + \frac{r}{R} \right) \quad (\text{A.0.14-1})$$

$$\text{采用全桥测量时: } \epsilon = \epsilon' \cdot \left(1 + \frac{2r}{R} \right) \quad (\text{A.0.14-2})$$

式中 ϵ ——修正后的应变值;

ϵ' ——修正前的应变值;

r ——导线电阻 (Ω);

R ——应变计电阻 (Ω)。

2 采用弦式传感器测量时,将钢筋计实测频率通过率定系数换算成力,再计算成与钢筋计断面处的混凝土应变相等的钢筋应变值。

3 在数据整理过程中,应将零漂大、变化无规律的测点删除,求出同一断面有效测点的应变平均值,并按下式计算该断面处桩身轴力:

$$Q_i = \bar{\epsilon}_i \cdot E_i \cdot A_i \quad (\text{A.0.14-3})$$

式中 Q_i ——桩身第 i 断面处轴力 (kN);

$\bar{\epsilon}_i$ ——第 i 断面处应变平均值;

E_i ——第 i 断面处桩身材料弹性模量 (kPa);当桩身断面、配筋一致时,宜按标定断面处的应力与应变的比值确定;

A_i ——第 i 断面处桩身截面面积 (m^2)。

4 按每级试验荷载下桩身不同断面处的轴力值制成表格,并绘制轴力分布图。再由桩顶极限荷载下对应的各断面轴力值计算桩侧土的分层极限摩阻力和极限端阻力:

$$q_{s,i} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{u \cdot l_i} \quad (\text{A.0.14-4})$$

$$q_p = \frac{Q_n}{A_0} \quad (\text{A.0.14-5})$$

式中 $q_{s,i}$ ——桩第 i 断面与 $i+1$ 断面间侧摩阻力 (kPa);

q_p ——桩的端阻力 (kPa);

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

u ——桩身周长 (m);

l_i ——第 i 断面与第 $i + 1$ 断面之间的桩长 (m);

Q_n ——桩端的轴力 (kN);

A_0 ——桩端面积 (m^2)。

5 桩身第 i 断面处的钢筋应力可按下式计算:

$$\sigma_{s_i} = E_s \cdot \epsilon_{s_i} \quad (\text{A.0.14-6})$$

式中 σ_{s_i} ——桩身第 i 断面处的钢筋应力 (kPa);

E_s ——钢筋弹性模量 (kPa);

ϵ_{s_i} ——桩身第 i 断面处的钢筋应变。

A.0.15 沉降杆宜采用内外管形式: 外管固定在桩身, 内管下端固定在需测试断面, 顶端高出外管 100 ~ 200mm, 并能与固定断面同步位移。

A.0.16 沉降杆应具有一定的刚度; 沉降杆外径与外管内径之差宜小于 10mm, 沉降杆接头处应光滑。

A.0.17 测量沉降杆位移的检测仪器应符合本规范第 4.2.4 条的技术要求。数据的测读应与桩顶位移测量同步。

A.0.18 当沉降杆底端固定断面处桩身埋设有内力测试传感器时, 可得到该断面处桩身轴力 Q_i 和位移 s_i 。

附录 B 混凝土桩桩头处理

- B.0.1** 混凝土桩应先凿掉桩顶部的破碎层和软弱混凝土。
- B.0.2** 桩头顶面应平整，桩头中轴线与桩身上部的中轴线应重合。
- B.0.3** 桩头主筋应全部直通至桩顶混凝土保护层之下，各主筋应在同一高度上。
- B.0.4** 距桩顶 1 倍桩径范围内，宜用厚度为 3~5mm 的钢板围裹或距桩顶 1.5 倍桩径范围内设置箍筋，间距不宜大于 100mm。桩顶应设置钢筋网片 2~3 层，间距 60~100mm。
- B.0.5** 桩头混凝土强度等级宜比桩身混凝土提高 1~2 级，且不得低于 C30。
- B.0.6** 高应变法检测的桩头测点处截面尺寸应与原桩身截面尺寸相同。

附录 C 静载试验记录表

C.0.1 单桩竖向抗压静载试验的现场检测数据宜按附表 C.0.1 的格式记录。

C.0.2 单桩水平静载试验的现场检测数据宜按附表 C.0.2 的格式记录。

附表 C.0.1 单桩竖向抗压静载试验记录表

工程名称				桩号	日期				本级 沉降 (mm)	累计 沉降 (mm)	备注
加载 级	油压 (MPa)	荷载 (kN)	测读 时间	位移计 (百分表) 读数							
				1号	2号	3号	4号				
检测单位:				校核:				记录:			

附表 C.0.2 单桩水平静载试验记录表

工程名称				桩号	日期				上下表距			
油压 (MPa)	荷载 (kN)	观测 时间	循环 数	加载		卸载		水平位移 (mm)		加载上下 表读数差	转角	备注
				上 表	下 表	上 表	下 表	加载	卸载			
检测单位:				校核:				记录:				

附录 D 钻芯法检测记录表

D.0.1 钻芯法检测的现场操作记录和芯样编录应分别按附表 D.0.1-1、D.0.1-2 的格式记录；检测芯样综合柱状图应按附表 D.0.1-3 的格式记录和描述。

附表 D.0.1-1 钻芯法检测现场操作记录表

桩号		孔号			工程名称			
时间		钻进 (m)			芯样 编号	芯样长度 (m)	残留 芯样	芯样初步描述及 异常情况记录
自	至	自	至	计				
检测日期					机长:	记录:		页次:

附表 D.0.1-2 钻芯法检测芯样编录表

工程名称		日期			
桩号/钻芯孔号		桩径	混凝土设计强度等级		
项 目	分段 (层) 深度 (m)	芯样描述		取样编号 取样深度	备注
桩身混凝土		混凝土钻进深度, 芯样连续性、完整性、胶结情况、表面光滑情况、断口吻合程度、混凝土芯是否为柱状、骨料大小分布情况, 以及气孔、空洞、蜂窝麻面、沟槽、破碎、夹泥、松散的情况			
桩底沉渣		桩端混凝土与持力层接触情况、沉渣厚度			
持力层		持力层钻进深度, 岩土名称、芯样颜色、结构构造、裂隙发育程度、坚硬及风化程度; 分层岩层应分层描述		(强风化或土层时的动力触探或标贯结果)	
检测单位:		记录员:		检测人员:	

附表 D.0.1-3 钻芯法检测芯样综合柱状图

桩号/孔号		混凝土设计强度等级			桩顶标高	开孔时间	
施工桩长		设计桩径			钻孔深度	终孔时间	
层序号	层底标高 (m)	层底深度 (m)	分层厚度 (m)	混凝土/岩土芯柱状图 (比例尺)	桩身混凝土、持力层描述	序号 $\frac{\text{芯样强度}}{\text{深度 (m)}}$	备注
				□ □ □			
编制：				校核：			
注：□代表芯样试件取样位置。							

附录 E 芯样试件加工和测量

E.0.1 应采用双面锯切机加工芯样试件。加工时应将芯样固定，锯切平面垂直于芯样轴线。锯切过程中应淋水冷却金刚石圆锯片。

E.0.2 锯切后的芯样试件，当试件不能满足平整度及垂直度要求时，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）或硫磺胶泥（或硫磺）等材料在专用补平装置上补平。水泥砂浆（或水泥净浆）补平厚度不宜大于 5mm，硫磺胶泥（或硫磺）补平厚度不宜大于 1.5mm。

补平层应与芯样结合牢固，受压时补平层与芯样的结合面不得提前破坏。

E.0.3 试验前，应对芯样试件的几何尺寸做下列测量：

1 平均直径：用游标卡尺测量芯样中部，在相互垂直的两个位置上，取其两次测量的算术平均值，精确至 0.5mm。

2 芯样高度：用钢卷尺或钢板尺进行测量，精确至 1mm。

3 垂直度：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：用钢板尺或角尺紧靠在芯样端面上，一面转动钢板尺，一面用塞尺测量与芯样端面之间的缝隙。

E.0.4 试件有裂缝或有其他较大缺陷、芯样试件内含有钢筋以及试件尺寸偏差超过下列数值时，不得用作抗压强度试验：

1 芯样试件高度小于 $0.95d$ 或大于 $1.05d$ 时（ d 为芯样试件平均直径）。

2 沿试件高度任一直径与平均直径相差达 2mm 以上时。

3 试件端面的不平整度在 100mm 长度内超过 0.1mm 时。

- 4 试件端面与轴线的不垂直度超过 2° 时。
- 5 芯样试件平均直径小于 2 倍表观混凝土粗骨料最大粒径时。

附录 F 高应变法传感器安装

F.0.1 检测时至少应对称安装冲击力和冲击响应（质点运动速度）测量传感器各两个（传感器安装见图 F.0.1）。冲击力和响应测量可采取以下方式：

1 在桩顶下的桩侧表面分别对称安装加速度传感器和应变式力传感器，直接测量桩身测点处的响应和应变，并将应变换算成冲击力。

2 在桩顶下的桩侧表面对称安装加速传感器直接测量响应，在自由落锤锤体 $0.5H_r$ 处（ H_r 为锤体高度）对称安装加速度传感器直接测量冲击力。

F.0.2 在第 F.0.1 条第 1 款条件下，传感器宜分别对称安装在距桩顶不小于 $2D$ 的桩侧表面处（ D 为试桩的直径或边宽）；对于大直径桩，传感器与桩顶之间的距离可适当减小，但不得小于 $1D$ 。安装面处的材质和截面尺寸应与原桩身相同，传感器不得安装在截面突变处附近。

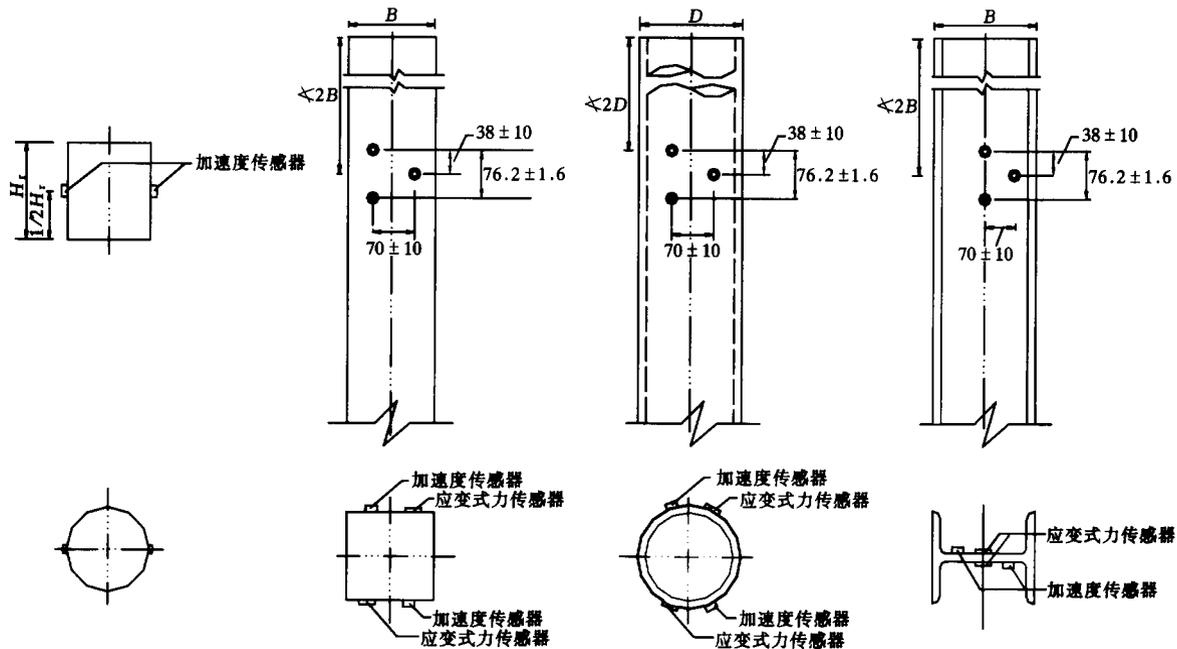
在第 F.0.1 条第 2 款条件下，对称安装在桩侧表面的加速度传感器距桩顶的距离不得小于 $0.4H_r$ 或 $1D$ ，并取两者高值。

F.0.3 在第 F.0.1 条第 1 款条件下，传感器安装尚应符合下列规定：

1 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 。安装完毕后，传感器的中心轴应与桩中心轴保持平行。

2 各传感器的安装面材质应均匀、密实、平整，并与桩轴线平行，否则应采用磨光机将其磨平。

3 安装螺栓的钻孔应与桩侧表面垂直；安装完毕后的传感器应紧贴桩身表面，锤击时传感器不得产生滑动。安装应变式传



落锤

混凝土方桩

管桩

H型钢桩

图 F.0.1 传感器安装示意图(单位:mm)

感器时应对其初始应变值进行监视，安装后的传感器初始应变值应能保证锤击时的可测轴向变形余量为：

- 1) 混凝土桩应大于 $\pm 1000\mu\epsilon$ ；
- 2) 钢桩应大于 $\pm 1500\mu\epsilon$ 。

F.0.4 当连续锤击监测时，应将传感器连接电缆有效固定。

附录 G 试打桩与打桩监控

G.1 试打桩

G.1.1 选择工程桩的桩型、桩长和桩端持力层进行试打桩时，应符合下列规定：

- 1 试打桩位置的工程地质条件应具有代表性。
- 2 试打桩过程中，应按桩端进入的土层逐一进行测试；当持力层较厚时，应在同一土层中进行多次测试。

G.1.2 桩端持力层应根据试打桩结果的承载力与贯入度关系，结合场地岩土工程勘察报告综合判定。

G.1.3 采用试打桩判定桩的承载力时，应符合下列规定：

- 1 判定的承载力值应小于或等于试打桩时测得的桩侧和桩端静土阻力值之和与桩在地基土中的时间效应系数的乘积，并进行复打校核。
- 2 复打至初打的休止时间应符合本规范表 3.2.6 的规定。

G.2 桩身锤击应力监测

G.2.1 桩身锤击应力监测应符合下列规定：

- 1 被监测桩的桩型、材质应与工程桩相同；施打机械的锤型、落距和垫层材料及状况应与工程桩施工时相同。
- 2 应包括桩身锤击拉应力和锤击压应力两部分。

G.2.2 为测得桩身锤击应力最大值，监测时应符合下列规定：

- 1 桩身锤击拉应力宜在预计桩端进入软土层或桩端穿过硬土层进入软夹层时测试。
- 2 桩身锤击压应力宜在桩端进入硬土层或桩周土阻力较大时测试。

G.2.3 最大桩身锤击拉应力可按下式计算：

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

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

G.2.4 最大桩身锤击压应力可按下式计算:

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

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硬层对桩身锤击压应力的放大作用。

G.2.5 桩身最大锤击应力控制值应符合《建筑桩基技术规范》JGJ 94 的有关规定。

G.3 锤击能量监测

G.3.1 桩锤实际传递给桩的能量应按下式计算:

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

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)。

G.3.2 桩锤最大动能宜通过测定锤芯最大运动速度确定。

G.3.3 桩锤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 H 声测管埋设要点

H.0.1 声测管内径宜为 50~60mm。

H.0.2 声测管应下端封闭、上端加盖、管内无异物；声测管连接处应光滑过渡，管口应高出桩顶 100mm 以上，且各声测管管口高度宜一致。

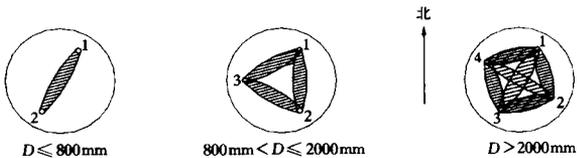
H.0.3 应采取适宜方法固定声测管，使之成桩后相互平行。

H.0.4 声测管埋设数量应符合下列要求：

- 1 $D \leq 800\text{mm}$ ，2 根管。
- 2 $800\text{mm} < D \leq 2000\text{mm}$ ，不少于 3 根管。
- 3 $D > 2000\text{mm}$ ，不少于 4 根管。

式中 D ——受检桩设计桩径。

H.0.5 声测管应沿桩截面外侧呈对称形状布置，按图 H.0.5 所示的箭头方向顺时针旋转依次编号。



H.0.5 声测管布置图

检测剖面编组分别为：1-2；

1-2，1-3，2-3；

1-2，1-3，1-4，2-3，2-4，3-4。

本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待，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：

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：

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：

正面词采用“宜”；反面词采用“不宜”。

表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

2 条文中指定应按其他有关标准、规范执行的写法为“应按……执行”或“应符合……的要求（或规定）”。

中华人民共和国行业标准

建筑基桩检测技术规范

JGJ 106—2003

条文说明

前 言

《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106—2003，经建设部 2003 年 3 月 27 日以第 133 号公告批准、发布。

为便于广大检测、设计、施工、科研、学校等单位的有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定，《建筑基桩检测技术规范》编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明，供国内使用者参考。在使用中如发现本条文说明有不妥之处，请将意见函寄中国建筑科学研究院（地址：北京市北三环东路 30 号；邮编：100013）。

目 次

1 总则	73
2 术语、符号	76
2.1 术语	76
3 基本规定	78
3.1 检测方法和内容	78
3.2 检测工作程序	79
3.3 检测数量	82
3.4 验证与扩大检测	85
3.5 检测结果评价和检测报告	86
3.6 检测机构和检测人员	89
4 单桩竖向抗压静载试验	91
4.1 适用范围	91
4.2 设备仪器及其安装	91
4.3 现场检测	94
4.4 检测数据的分析与判定	97
5 单桩竖向抗拔静载试验	99
5.1 适用范围	99
5.2 设备仪器及其安装	99
5.3 现场检测	100
5.4 检测数据的分析与判定	101
6 单桩水平静载试验	102
6.1 适用范围	102
6.2 设备仪器及其安装	102
6.3 现场检测	103
6.4 检测数据的分析与判定	103

7	钻芯法	106
7.1	适用范围	106
7.2	设备	106
7.3	现场检测	107
7.4	芯样试件截取与加工	110
7.5	芯样试件抗压强度试验	112
7.6	检测数据的分析与判定	113
8	低应变法	115
8.1	适用范围	115
8.2	仪器设备	116
8.3	现场检测	118
8.4	检测数据的分析与判定	120
9	高应变法	128
9.1	适用范围	128
9.2	仪器设备	129
9.3	现场检测	131
9.4	检测数据的分析与判定	134
10	声波透射法	142
10.1	适用范围	142
10.2	仪器设备	142
10.3	现场检测	142
10.4	检测数据的分析与判定	143

1 总 则

1.0.1 工业与民用建筑中的质量问题和重大质量事故多与基础工程质量有关，其中有不少是由于桩基工程的质量问题，而直接危及主体结构的正常使用与安全。我国每年的用桩量超过 300 万根，其中沿海地区和长江中下游软土地区占 70% ~ 80%。如此大的用桩量，如何保证质量，一直倍受建设、施工、设计、勘察、监理各方以及建设行政主管部门的关注。桩基工程除因受岩土工程条件、基础与结构设计、桩土体系相互作用、施工以及专业技术水平和经验等关联因素的影响而具有复杂性外，桩的施工还具有高度的隐蔽性，发现质量问题难，事故处理更难。因此，基桩检测工作是整个桩基工程中不可缺少的重要环节，只有提高基桩检测工作的质量和检测评定结果的可靠性，才能真正做到确保桩基工程质量与安全。

20 世纪 80 年代以来，我国基桩检测技术、特别是基桩动测技术得到了飞速发展。从国内外基桩检测实践看，如果不将动测法作为质量普查和承载力判定的补充手段，很难在人力和物力上对桩基工程质量进行有效的检测和评价。因此，利用理论和实践渐趋成熟的动测技术势在必行。但同时应注意，与常规的直接法（静载法、钻芯法）相比，动测法对检测人员的经验与理论水平要求高。况且，动测法在国内起步近三十年，但推广应用才十年，仍属发展中的技术，经验和理论有待进一步积累和完善。

目前，国内有关基桩检测的标准虽已形成初步系列，但这些标准只针对一类检测方法单独制定，有关设计规范对基桩检测的规定比较原则，主要侧重于为桩基设计提供依据。这些标准施行后暴露出的问题可归纳为：

- 1 各方法之间在某些方面（如抽检数量、桩身完整性类别

划分及判据、测试仪器主要性能指标、复检规则等)缺乏统一的标准(至少是能被共同接受的一个低限原则),使检测人员在方法应用、检测数据采用及评判时显得无所适从,容易造成桩基工程验收工作的混乱。

2 由于技术上的原因,各检测方法都有其一定的适用范围。若将检测能力和适用范围不适宜的扩大,容易引起误判。

3 桩基检测通常是直接法与半直接法配合,多种方法并用。当需要对整个桩基质量进行评定时,单独的方法无法覆盖,各个标准(包括地方标准)并用时又出现主次不分或不一致。

因此,统一桩基检测方法,使桩基检测技术标准化、规范化,才能促进桩基检测技术进步,提高检测工作质量,为设计和施工验收提供可靠依据,确保工程质量。

1.0.2 本规范所指的桩基是混凝土灌注桩、混凝土预制桩(包括预应力管桩)和钢桩。桩基的承载力和桩身完整性检测是桩基质量检测中的两项重要内容,除此之外,质量检测的其他内容要求已在相关的设计和施工质量验收规范中做了明确规定。本规范的适用范围是根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007和《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202的有关规定制定的,交通、铁路、港口等工程的桩基检测可参照使用。但应注意:建筑工程的桩基绝大多数以竖向受压混凝土桩为主,某些交通、铁路、港工以及上部竖向荷载较小的构筑物等基础桩的承载力并非单纯以竖向抗压承载力控制,而是以上拔或水平荷载控制,也可能是抗压与水平荷载或上拔与水平荷载的双重控制。此外,对于复合地基增强体设计强度等级不小于C15的高粘结强度桩(类似于素混凝土桩,如水泥粉煤灰碎石桩),其桩身完整性检测的原理、方法与本规范桩基的桩身完整性检测无异,同样可按本规范执行。

1.0.3 本条是本规范编制的基本原则。桩基工程的安全与单桩本身的质量直接相关,而设计条件(地质条件、桩的承载性状、桩的使用功能、桩型、基础和上部结构的型式等)和施工因素

(成桩工艺、施工过程的质量控制、施工质量的均匀性、施工方法的可靠性等)不仅对单桩质量而且对整个桩基的正常使用均有影响。另外,检测得到的数据和信号也包含了诸如地质条件、桩身材料、不同桩型及其成桩可靠性、桩的休止时间等设计和施工因素的作用和影响,这些也直接决定了与检测方法相应的检测结果判定是否可靠,及所选择的受检桩是否具有代表性等。如果基桩检测及其结果判定时抛开这些影响因素,就会造成不必要的浪费或隐患。同时,由于各种检测方法在可靠性或经济性方面存在不同程度的局限性,多种方法配合时又具有一定的灵活性。因此,应根据检测目的、检测方法的适用范围和特点,考虑上述各种因素合理选择检测方法,实现各种方法合理搭配、优势互补,使各种检测方法尽量能互为补充或验证,即在达到“正确评价”目的的同时,又要体现经济合理性。

2 术语、符号

2.1 术 语

2.1.2 桩身完整性是一个综合定性指标，而非严格的定量指标。其类别是按缺陷对桩身结构承载力的影响程度划分的。这里有两点需要说明：

1 连续性包涵了桩长不够的情况。因动测法只能估算桩长，桩长明显偏短时，给出断桩的结论是正常的。而钻芯法则不同，可准确测定桩长。

2 作为完整性定性指标之一的桩身截面尺寸，由于定义为“相对变化”，所以先要确定一个相对衡量尺度。但检测时，桩径是否减小可能会参照以下条件之一：

——按设计桩径；

——根据设计桩径，并针对不同成桩工艺的桩型按施工验收规范考虑桩径的允许负偏差；

——考虑充盈系数后的平均施工桩径。

所以，灌注桩是否缩颈必需有一个参考基准。过去，在动测法检测并采用开挖验证时，说明动测结论与开挖验证结果是否符合通常是按第一种条件。但严格地讲，应按施工验收规范，即第二个条件才是合理的，但因为动测法不能对缩颈严格定量，于是才定义为“相对变化”。

2.1.3 桩身缺陷有三个指标，即位置、类型（性质）和程度。动测法检测时，不论缺陷的类型如何，其综合表现均为桩的阻抗变小，即完整性动力检测中分析的仅是阻抗变化，阻抗的变小可能是任何一种或多种缺陷类型及其程度大小的表现。因此，仅根据阻抗的变小不能判断缺陷的具体类型，如有必要，应结合地质资料、桩型、成桩工艺和施工记录等进行综合判断。对于扩径而

表现出的阻抗变大，应在分析判定时予以说明，因扩径对桩的承载力有利，不应作为缺陷考虑。

2.1.6~2.1.7 基桩动力检测方法按动荷载作用产生的桩顶位移和桩身应变大小可分为高应变法和低应变法。前者的桩顶位移量与竖向抗压静载试验接近，桩周岩土全部或大部进入塑性变形状态，桩身应变量通常在 0.1‰~1.0‰ 范围内；后者桩-土系统变形完全在弹性范围内，桩身应变量一般小于 0.01‰。对于普通钢桩，超过 1.0‰ 的桩身应变量已接近其屈服台阶所对应的变形；对于混凝土桩，视混凝土强度等级的不同，其出现明显塑性变形对应的应变量约为 0.5‰~1.0‰。

3 基本规定

3.1 检测方法和内容

3.1.1 工程桩应进行承载力检验是现行《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202 和《建筑地基基础设计规范》GB 50007 以强制性条文的形式规定的；混凝土桩的桩身完整性检测是 GB 50202 质量检验标准中的主控项目。因工程桩的预期使用功能要通过单桩承载力实现，完整性检测的目的是发现某些可能影响单桩承载力的缺陷，最终仍是为减少安全隐患、可靠判定工程桩承载力服务。所以，基桩质量检测时，承载力和完整性两项内容密不可分，往往是通过低应变完整性普查找出基桩施工质量问题并得到对整体施工质量的大致估计。

3.1.2 表 3.1.2 所列 7 种方法是基桩检测中最常用的检测方法。对于冲钻孔、挖孔和沉管灌注桩以及预制桩等桩型，可采用其中多种甚至全部方法进行检测；但对异型桩、组合型桩，表 3.1.2 中的 7 种方法就不能完全适用（如高、低应变动测法和声透法）。因此在具体选择检测方法时，应根据检测目的、内容和要求，结合各检测方法的适用范围和检测能力，考虑设计、地质条件、施工因素和工程重要性等情况确定，不允许超适用范围滥用。同时也要兼顾实施中的经济合理性，即在满足正确评价的前提下，做到快速经济。

3.1.3 本条是 1.0.3 条中“各种检测方法合理选择搭配”这一原则的具体体现，目的是提高检测结果的可靠性。除中小直径灌注桩外，大直径灌注桩完整性检测一般可同时选用两种或多种的方法检测，使各种方法能相互补充印证，优势互补。另外，对设计等级高、地质条件复杂、施工质量变异性大的桩基，或低应变完整性判定可能有技术困难时，提倡采用直接法（静载试验、钻

芯和开挖)进行验证。

3.1.4 鉴于目前对施工过程中的检测重视不够,本条强调了施工过程中的检测,以便加强施工过程的质量控制,做到信息化施工。如:冲钻孔灌注桩施工中应提倡或明确规定采用一些成熟的技术和常规的方法进行孔径、孔斜、孔深、沉渣厚度和桩端岩性鉴别等项目的检验;对于打入式预制桩,提倡沉桩过程中的动力监测等。

桩基施工过程中可能出现以下情况:设计变更、局部地质条件与勘察报告不符、工程桩施工参数与施工前为设计提供依据的试验桩不同、原材料发生变化、施工单位更换等,都可能造成质量隐患。除施工前为设计提供依据的检测外,仅在施工后进行验收检测,即使发现质量问题,也只是事后补救,造成不必要的浪费。因此,基桩检测除在施工前和施工后进行外,尚应加强桩基施工过程中的检测,以便及时发现并解决问题,做到防患于未然,提高效益。

3.2 检测工作程序

3.2.1 框图 3.2.1 是检测机构应遵循的检测工作程序。实际执行检测程序中,由于不可预知的原因,如委托要求的变化、现场调查情况与委托方介绍的不符,或在现场检测尚未全部完成就已发现质量问题而需要进一步排查,都可能使原检测方案中的抽检数量、受检桩桩位、检测方法发生变化。如首先用低应变法普测(或扩检),再根据低应变法检测结果,采用钻芯法、高应变法或静载试验,对有缺陷的桩重点抽测。总之,检测方案并非一成不变,可根据实际情况动态调整。

3.2.2 根据 1.0.3 条的原则及基桩检测工作的特殊性,本条对调查阶段工作提出了具体要求。为了正确地对基桩质量进行检测和评价,提高基桩检测工作的质量,做到有的放矢,应尽可能详细地了解和搜集有关的技术资料,并按表 1 填写受检桩设计施工记录表。另外,有时委托方的介绍和提出的要求是笼统的、非技

术性的；也需要通过调查来进一步明确委托方的具体要求和现场实施的可行性；有些情况下还需要检测技术人员到现场了解和搜集。

表 1 受检桩设计施工资料表

桩号	桩横截面尺寸	混凝土设计强度等级 (MPa)	设计桩顶标高 (m)	检测时桩顶标高 (m)	施工桩底标高 (m)	施工桩长 (m)	成桩日期	设计桩端持力层	单桩承载力特征值 (kN)	其他
工程名称						地点		桩型		
提供资料人员：				日期：			第 页			

3.2.3 本条提出的检测方案内容为一般情况下包含的内容，某些情况下还需要包括桩头加固、处理方案以及场地开挖、道路、供电、照明等要求。有时检测方案还需要与委托方或设计方共同研究制定。

3.2.5 检测所用计量器具必须送至法定计量检定单位进行定期检定，且使用时必须在计量检定的有效期之内，这是我国《计量法》的要求，以保证基桩检测数据的准确可靠性和可追溯性。虽然计量器具在有效计量检定周期之内，但由于基桩检测工作的环境较差，使用期间仍可能由于使用不当或环境恶劣等造成计量器具的受损或计量参数发生变化。因此，检测前还应加强对计量器具、配套设备的检查或模拟测试；有条件时可建立校准装置进行自校，发现问题后应重新检定。

3.2.6 混凝土是一种与龄期相关的材料，其强度随时间的增加而增加。在最初几天内强度快速增加，随后逐渐变缓，其物理力学、声学参数变化趋势亦大体如此。桩基工程受季节气候、周边环境或工期紧的影响，往往不允许等到全部工程桩施工完并都达到 28d 龄期强度后再开始检测。为做到信息化施工，尽早发现桩的施工质量问题并及时处理，同时考虑到低应变法和声波透射法

检测内容是桩身完整性，对混凝土强度的要求可适当放宽。但如果混凝土龄期过短或强度过低，应力波或声波在其中的传播衰减加剧，或同一场地由于桩的龄期相差大，声速的变异性增大。因此，对于低应变法或声波透射法的测试，规定桩身混凝土强度应大于设计强度的70%，并不得低于15MPa。钻芯法检测的内容之一即是桩身混凝土强度，显然受检桩应达到28d龄期或同条件养护试块达到设计强度，如果不是以检测混凝土强度为目的的验证检测，也可根据实际情况适当缩短混凝土龄期。高应变法和静载试验在桩身产生的应力水平高，若桩身混凝土强度低，有可能引起桩身损伤或破坏。为分清责任，桩身混凝土应达到28d龄期或设计强度。另外，桩身混凝土强度过低，也可能出现桩身材料应力-应变关系的严重非线性，使高应变测试信号失真。

桩在施工过程中不可避免地扰动桩周土，降低土体强度，引起桩的承载力下降，以高灵敏度饱和粘性土中的摩擦桩最明显。随着休止时间的增加，土体重新固结，土体强度逐渐恢复提高，桩的承载力也逐渐增加。成桩后桩的承载力随时间而变化的现象称为桩的承载力时间（或歇后）效应，我国软土地区这种效应尤为突出。研究资料表明，时间效应可使桩的承载力比初始值增长40%~400%。其变化规律一般是初期增长速度较快，随后渐慢，待达到一定时间后趋于相对稳定，其增长的快慢和幅度与土性和类别有关。除非在特定的土质条件和成桩工艺下积累大量的对比数据，否则很难得到承载力的时间效应关系。另外，桩的承载力包括两层涵义，即桩身结构承载力和支撑桩结构的地基岩土承载力，桩的破坏可能是桩身结构破坏或支撑桩结构的地基岩土承载力达到了极限状态，多数情况下桩的承载力受后者制约。如果混凝土强度过低，桩可能产生桩身结构破坏而地基土承载力尚未完全发挥，桩身产生的压缩量较大，检测结果不能真正反映设计条件下桩的承载力与桩的变形情况。因此，对于承载力检测，应同时满足地基土休止时间和桩身混凝土龄期（或设计强度）双重规定，若验收检测工期紧无法满足休止时间规定时，应在检测报告

中注明。

3.2.7 相对于静载试验而言，本规范规定的完整性检测（除钻芯法外）方法作为普查手段，具有速度快、费用较低和抽检数量大的特点，容易发现桩基的整体施工质量问题，至少能为有针对性的选择静载试验提供依据。所以，完整性检测安排在静载试验之前是合理的。当基础埋深较大时，基坑开挖产生土体侧移将桩推断或机械开挖将桩碰断的现象时有发生，此时完整性检测应等到开挖至基底标高后进行。

3.2.8 操作环境要求是按测量仪器设备对使用温湿度、电压波动、电磁干扰、振动冲击等现场环境条件的适应性规定的。

3.2.9 测试数据异常通常是因测试人员误操作、仪器设备故障及现场准备不足造成的。用不正确的测试数据进行分析得出的结果必然是不正确的。对此，应及时分析原因，组织重新检测。

3.2.10 按检测方法的准确可靠程度和直观性高低，用“高”的检测方法来弥补“低”的检测方法的不确定性或复核“低”的结论，称为验证检测。本条所指情况主要是针对动测法而言的。

通常，因初次抽样检测数量有限，当抽样检测中发现承载力不满足设计要求或完整性检测中Ⅲ、Ⅳ类桩比例较大时，应会同有关各方分析和判断桩基整体的质量情况，如果不能得出准确判断，为补强或设计变更方案提供可靠依据时，应扩大检测。倘若初次检测已基本查明质量问题的原因所在，则不应盲目扩大检测。

3.3 检测数量

3.3.1 施工前进行单桩竖向抗压静载试验，目的是为设计提供依据。对设计等级高且缺乏地区经验的地区，为获得既经济又可靠的设计施工参数，减少盲目性，前期试桩尤为重要。本条规定的试桩数量和第1~2款条件，与《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《建筑桩基技术规范》JGJ 94基本一致。考虑到桩基基础选型、成桩工艺选择与地区条件、桩型和工法的成熟性密切相关。

关，为在推广应用新桩型或新工艺过程中不断积累经验，使其能达到预期的质量和效益目标，增加了本地区采用新桩型或新工艺时也应进行施工前静载试验的规定。对于大型工程，“同条件下”可能包含若干个子单位工程（子分部工程）。本条规定的试桩数量仅仅是下限，若实际中由于某些原因不足以为设计提供可靠依据或设计另有要求时，可根据实际情况增加试桩数量。另外，如果施工时桩参数发生了较大变动或施工工艺发生了变化，应重新试桩。

对于端承型大直径灌注桩，当受设备或现场条件限制无法做静载试验时，可按《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，或在同条件下的小直径桩的静载试验中，通过桩身内力测试，确定端承力参数。

3.3.2 本条的要求恰好是在打入式预制桩（特别是长桩、超长桩）情况下的高应变法技术优势所在。进行打桩过程监控可减少桩的破损率和选择合理的入土深度，进而提高沉桩效率。

3.3.3 由于检测成本和周期问题，很难做到对桩基工程全部基桩进行检测。施工后验收验测的最终目的是查明隐患、确保安全。为了在有限的抽检数量中更能充分暴露桩基存在的质量问题，宜优先抽检本条第 1~5 款所列的桩，其次再考虑抽样的随机性。

3.3.4 “三桩或三桩以下的柱下承台抽检桩数不得少于 1 根”的规定涵盖了单桩单柱应全数检测之意。按设计等级、地质情况和成桩质量可靠性确定灌注桩抽检比例大小，符合惯例，是合理的。端承型大直径灌注桩一般设计承载力高，桩身质量是控制承载力的主要因素；随着桩径的增大，尺寸效应对低应变法的影响加剧，而钻芯法、声透法恰好适合于大直径桩的检测（对于嵌岩桩，采用钻芯法可同时钻取桩端持力层岩芯和检测沉渣厚度）。同时，对大直径桩采用联合检测方式，多种方法并举，可以实现低应变法与钻芯法、声透法之间的相互补充或验证，提高完整性检测的可靠性。

常见的干作业灌注桩是人工挖孔桩。当在地下水位以上施工时，终孔后可派人下孔核验桩端持力层；因能保证清底干净和混凝土灌注质量，成桩质量比水下灌注桩可靠；同样，混凝土预制桩由于工厂化生产，桩身质量较有保证，缺陷类型远不如灌注桩复杂，且单节桩不存在接头质量问题，主要是桩身开裂，因此抽检数量可适当减少。对多节预制桩，接头质量缺陷是较常见的问题。在无可靠验证对比资料和经验时，低应变法对不同形式的接头质量判定尺度较难掌握。所以，当对预制桩的接头质量有怀疑时，宜采用低应变法与高应变法相结合的方式检测。当对复合地基中类似于素混凝土桩的增强体进行检测时，抽检数量应按《建筑地基处理技术规范》JGJ 79 规定执行。

3.3.5 桩基工程属于一个单位工程的分部（子分部）工程中的分项工程，一般以分项工程单独验收。所以本规范限定的工程桩承载力验收检测范围是在一个单位工程内。本条同时规定了在何种条件下工程桩应进行单桩竖向抗压静载试验及抽检数量下限。与第 3.3.1 条规定条件相比，现对第 4 款增加条件说明如下：

挤土群桩施工时，由于土体的侧挤和隆起，质量问题（桩被挤断、拉断、上浮等）时有发生，尤其是大面积密集群桩施工，加上施打顺序不合理或打桩速率过快等不利因素，常引发严重的质量事故。有时施工前虽做过静载试验并以此作为设计依据，但因前期施工的试桩数量毕竟有限，挤土效应并未充分显现，施工后的单桩承载力与施工前的试桩结果相差甚远，对此应给予足够的重视。

3.3.6 高应变法在我国的应用不到二十年，目前仍处于发展和完善阶段。作为一种以检测承载力为主的试验方法，尚不能完全取代静载试验。该方法的可靠性的提高，在很大程度上取决于检测人员的技术水平和经验，绝非仅通过一定量的静动对比就能解决。由于检测人员水平、设备匹配能力、桩土相互作用复杂性等原因，超出高应变法适用范围后，静动对比在机理上就不具备可

比性。如果说“静动对比”是衡量高应变法是否可靠的唯一“硬”指标的话，那么对比结果就不能只是与静承载力数值的比较，还应比较动测得到的桩的沉降和土参数取值是否合理。同时，在不受第3.3.5条规定条件限制时，尽管允许采用高应变法进行验收检测，但仍需不断积累验证资料、提高分析判断能力和现场检测技术水平。尤其针对灌注桩检测中，实测信号质量有时不易保证、分析中不确定因素多的情况，本规范第9.1.2~9.1.3条对此已做了相应规定。

3.3.7 端承型大直径灌注桩（事实上对所有高承载力的桩），往往不允许任何一根桩承载力失效，否则后果不堪设想。由于试桩荷载大或场地限制，有时很难、甚至无法进行单桩竖向抗压承载力静载检测。对此，本条规定实际是对第3.3.5条的补充，体现了“多种方法合理搭配，优势互补”的原则，如深层平板载荷试验、岩基载荷试验，终孔后混凝土灌注前的桩端持力层鉴别，成桩后的钻芯法沉渣厚度测定、桩端持力层钻芯鉴别（包括动力触探，标贯试验、岩芯试件抗压强度试验），有条件时可预埋荷载箱进行桩端载荷试验等。

当单位工程的钻芯法抽检数量不少于总桩数的10%，且不少于10根时，可认为既满足了本条的要求，也满足了第3.3.4条注1的要求。

3.3.8 对于上覆竖向荷载不大的构筑物，如烟囱、埋深及水浮力大的地下结构、送电线路塔等基础中的桩，荷载最不利组合为拔力或推力，承载力静载试验以竖向拔桩或水平推桩为主，并非所有的工程桩承载力检验都要做竖向抗压试验。

3.4 验证与扩大检测

3.4.1~3.4.5 这五条内容针对检测中出现的缺乏依据、无法或难于定论的情况，提出了可用的验证检测原则。应该指出：桩身完整性不符合要求和单桩承载力不满足设计要求是两个独立概念。完整性为Ⅰ类或Ⅱ类而承载力不满足设计要求显然存在结构

安全隐患；竖向抗压承载力满足设计要求而完整性为Ⅲ类或Ⅳ类也可能存在安全和耐久性方面的隐患。如桩身出现水平整合型裂缝（灌注桩因挤土、开挖等原因也常出现）或断裂，低应变完整性为Ⅲ类或Ⅳ类，但高应变完整性可能为Ⅱ类，且竖向抗压承载力可能满足设计要求，但存在水平承载力和耐久性方面的隐患。

3.4.6~3.4.7 扩大检测数量宜根据地质条件、桩基设计等级、桩型、施工质量变异性等因素合理确定，并应经过有关各方确认。

3.5 检测结果评价和检测报告

3.5.1 桩身完整性类别划分过去在国内一直未统一，其表现为划分的依据、类（级）别及名称三个方面。在划分依据上，根据信号反映的桩的缺陷程度划分者居多；部分是在考虑缺陷程度和整桩波速的基础上，以信号“反映的缺陷性质”划分；极少数是根据波速“得出的桩身混凝土强度”划分。在类别及名称上，有的分为“优质（优良）、良好（较好）、合格、可疑（较差）、不合格（很差、报废）”等五类；有的分为“完整（优质）、基本完整（尚可、合格、轻微缺陷）、可疑（较差）、不合格（报废）”等四类；或分为“优质、良好、不合格”等三类；甚至有的仅给出“合格、不合格”两类。表3.5.1统一了桩身完整性类别划分标准，有利于对完整性检测结果的判定和采用。需要特别指出：分项工程施工质量验收时的检查项目很多，桩身完整性仅是主控检查项目之一（承载力也如此），通常所有的检查项目都满足规定要求时才给出是否合格的结论，况且经设计复核或补强处理还允许通过验收。

桩基整体施工质量问题可由桩身完整性普测发现，如果不能就提供的完整性检测结果估计对桩承载力的影响程度，进而估计是否危及上部结构安全，那么在很大程度上就减少了桩身完整性检测的实际意义。桩的承载功能是通过桩身结构承载力实现的。

完整性类别划分主要是根据缺陷程度，但这种划分不能机械地理解为不需考虑桩的设计条件和施工因素。综合判定能力对检测人员极为重要。

检测时实测桩长小于施工记录桩长，有两种情况：一种是桩端未进入设计要求的持力层或进入持力层的深度不满足设计要求，直接影响桩的承载力；另一种情况是桩端按设计要求进入了持力层，基本不影响桩的承载力。不论哪种情况，按桩身完整性定义中连续性的涵义，显然均应判为Ⅳ类桩。

3.5.2 本条所指的“工程处理”包括以下内容：补强、补桩、设计变更或由原设计单位复核是否可满足结构安全和使用功能要求。

3.5.3 承载力特征值是根据一个单位工程内同条件下的单桩承载力检测结果的统计、考虑一定的安全储备得到的。所以，本条所指的工程桩承载力检测结果评价——“给出承载力特征值是否满足设计要求的结论”，相当于用小样本推断大母体。这和过去常说的“仅对来样负责”不同，这里详细解释如下：

桩的设计要求通常包含承载力、混凝土强度以及施工质量验收规范规定的各项要求内容，而施工后基桩检测结果的评价包含了承载力和完整性两个相对独立的评价内容。设计文件中一般不提出完整性检测中Ⅲ类和Ⅳ类桩数的具体要求，但只要存在缺陷桩，尽管承载力满足设计要求，除非采取可靠的补救措施或设计上有很大的安全储备，否则该批桩不能被认为是合格批。所以，工程基桩整体评价满足设计要求的必要条件应理解为：包括补强处理后复检在内的承载力和完整性应全部符合要求；而其充分条件是结合设计施工等因素，确定有限的抽检数量（特别是静载和钻芯检测）具有代表性，能推断整体。若评价依据不充分，应增加抽检数量。

一种合适的检测评定标准，应该能保证施工和使用双方的风险均很小，但对基桩的承载力检测，要同时使二者的风险都比较小是不可能的，除非增大随机抽检数量。基桩承载力检测与评价

与药品质量检测既有类似之处：生产方的风险一般大于使用方的风险，即有“不合格”桩存在就判为不满足设计要求，虽然从确保安全的角度说是合理的，但会造成很多合格桩也被否定掉；也有不同之处：通过设计复核或补强处理，只要不影响安全和正常使用功能，桩基工程可予以验收。

更为重要的是，同一批药品的生产条件相对稳定，其质量的抽样检测评定标准是严格建立在科学的概率统计学基础上。根据一定的抽样规则，通过样本检测推断整批质量的错判率（生产方风险）和漏判率（使用方风险）在概率统计学上是已知的。然而，在桩基抽样检测评定中，同一批桩的施工中隐蔽影响因素多，很难保持条件恒定；传统的抽样规则，并未建立在概率统计学基础上。显然，倘要使工程桩的整体评价（推断）有很高的置信度，势必要打破过去沿袭下来的“抽检1%且不少于3根”的做法，从而大幅度增加静载试桩数量，造成不经济。

根据桩基工程特点，应强调在出具检测结论时，需结合设计条件（基础和上部结构型式、地质条件、桩的承载性状、沉降控制要求等）和施工质量可靠性，在充分考虑受检桩数量及代表性的基础上进行；但桩基工程事故，绝大部分表现为沉降过大而不均匀，其中有些是因桩身存在严重缺陷造成的。而完整性检测带有普查性，故整体评价不能仅根据少数桩的承载力检测结果，尚应结合完整性检测结果。

还应注意，对整个工程桩的承载力评价，不是检测规范和检测人员能完全解决的。因为：

- 1 检测人员并非都具有较宽的知识面，也较难详细了解施工全过程以及设计条件。

- 2 桩基检测制定抽样方案的要求与《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300有所不同：既然是通过小样本检测进行推断，就存在犯错判和漏判两类错误的可能性，但桩基检测目前却不能确定犯两类错误的概率各是多少。如按本规范第3.3.3条关于抽样的规定，少量静载试桩往往不具随机性（可能仅抽检完

整性较差的桩，增加了施工方风险)。

所以，为使工程桩承载力主控项目验收结论明确，便于采用，规定用“单桩承载力特征值满足设计要求”的结论书面形式，并无全部基桩承载力均满足设计要求的涵义。

最后还需说明两点：(1) 承载力检测因时间短暂，其结果仅代表试桩那一时刻的承载力，更不能包含日后自然或人为因素(如桩周土湿陷、膨胀、冻胀、侧移、基础上浮、地面堆载等)对承载力的影响。(2) 承载力评价可能出现矛盾的情况，即承载力不满足设计要求而满足有关规范要求。因为规范一般给出满足安全储备和正常使用功能的最低要求，而设计时常在此基础上留有一定余量。考虑到责权划分，可以作为问题或建议提出，但仍需设计方复核和有关各责任主体方表态确认。

3.5.4~3.5.5 检测报告应根据所采用的检测方法和相应的检测内容出具检测结论。为使报告内容完整和具有较强的可读性，报告中应包括常规内容的叙述。还需特别强调：检测报告应包含各受检桩的原始检测数据和曲线，并附有相关的计算分析数据和曲线。检测报告仅有检测结果而无任何检测数据和曲线的现象必须杜绝。

3.6 检测机构和检测人员

3.6.1 建工行业的基桩检测机构只有经国务院、省级建设行政主管部门检测资质认可和计量行政主管部门的计量认证考核合格后，才能合法地进入检测市场开展相应的检测业务。实行这种考核办法旨在确认检测机构的计量检定、测试设备能力、人员技术水平、符合相关检测标准的情况、检测数据可靠性和质量管理体系的有效性，以保证出具的检测结果客观、公正、可靠。

3.6.2 由于基桩检测时需综合考虑地质、设计、施工等因素的影响，这就要求从事基桩检测工作的技术人员应经过学习、培训，具有必要的基桩检测方面的理论基础和实践，并对岩土工程尤其是桩基工程方面的知识有充分了解。

在各种基桩检测方法中，动力检测技术涉及的学科较多，且仍处于发展中，对检测人员的素质、技术水平和实践经验要求都很高。因此，持有工程桩动测资质证书的单位，还需要该单位的检测人员持有经考核合格后颁发的上岗证书。

4 单桩竖向抗压静载试验

4.1 适用范围

4.1.1 单桩抗压静载试验是公认的检测基桩竖向抗压承载力最直观、最可靠的传统方法。本规范主要是针对我国建筑工程中惯用的维持荷载法进行了技术规定。根据桩的使用环境、荷载条件及大量工程检测实践，在国内其他行业或国外，尚有循环荷载、等变形速率及终级荷载长时间维持等方法。

4.1.2 桩身内力测试按附录 A 规定的方法执行。

4.1.3 本条明确规定为设计提供依据的静载试验应加载至破坏，即试验应进行到能判定单桩极限承载力为止。对于以桩身强度控制承载力的端承型桩，当设计另有规定时，应从其规定。

4.1.4 在对工程桩抽样验收检测时，规定了加载量不应小于单桩承载力特征值的 2.0 倍，以保证足够的安全储备。实际检测中，有时出现这样的情况：3 根工程桩静载试验，分十级加载，其中一根桩第十级破坏，另两根桩满足设计要求，按第 3.5.3 条，单位工程的单桩竖向抗压承载力特征值不满足设计要求。此时若有一根满足设计要求的桩的最大加载量取为单桩承载力特征值的 2.2 倍，且试验证实竖向抗压承载力不低于单桩承载力特征值的 2.2 倍，则单位工程的单桩竖向抗压承载力特征值满足设计要求。显然，若抽检的 3 根桩有代表性，就可避免不必要的工程处理。

4.2 设备仪器及其安装

4.2.1 为防止加载偏心，千斤顶的合力中心应与反力装置的重心、桩轴线重合，并保证合力方向垂直。

4.2.2 加载反力装置的形式在《建筑桩基技术规范》基础上增

加了地锚反力装置，对单桩极限承载力较小的摩擦桩可用土锚作反力；对岩面浅的嵌岩桩，可利用岩锚提供反力。

4.2.3 用荷重传感器（直接方式）和油压表（间接方式）两种荷载测量方式的区别在于：前者采用荷重传感器测力，不需考虑千斤顶活塞摩擦对出力的影响；后者需通过率定换算千斤顶出力。同型号千斤顶在保养正常状态下，相同油压时的出力相对误差约为1%~2%，非正常时可高达5%。采用传感器测量荷重或油压，容易实现加卸荷与稳压自动化控制，且测量精度较高。采用压力表测定油压时，为保证测量精度，其精度等级应优于或等于0.4级，不得使用1.5级压力表控制加载。当油路工作压力较高时，有时出现油管爆裂、接头漏油、油泵加压不足造成千斤顶出力受限、压力表线性度变差等情况，所以应选用耐压高、工作压力大和量程大的油管、油泵和压力表。

4.2.4 对于机械式大量程（50mm）百分表，《大量程百分表》JJG379规定的1级标准为：全程示值误差和回程误差分别不超过40 μm 和8 μm ，相当于满量程测量误差不大于0.1%FS。沉降测定平面应在千斤顶底座承压板以下的桩身位置，即不得在承压板上或千斤顶上设置沉降观测点，避免因承压板变形导致沉降观测数据失实。基准桩应打入地面以下足够的深度，一般不小于1m。基准梁应一端固定，另一端简支，这是为减少温度变化引起的基准梁挠曲变形。在满足表4.2.5的规定条件下，基准梁不宜过长，并应采取有效遮挡措施，以减少温度变化和刮风下雨的影响，尤其在昼夜温差较大且白天有阳光照射时更应注意。

4.2.5 在试桩加卸载过程中，荷载将通过锚桩（地锚）、压重平台支墩传至试桩、基准桩周围地基土并使之变形。随着试桩、基准桩和锚桩（或压重平台支墩）三者间相互距离缩小，地基土变形对试桩、基准桩的附加应力和变位影响加剧。

1985年，国际土力学与基础工程协会（ISSMFE）根据世界各国对有关静载试验的规定，提出了静载试验的建议方法并指出：试桩中心到锚桩（或压重平台支墩边）和到基准桩各自间的

距离应分别“不小于 2.5m 或 $3D$ ”，这和我国现行规范规定的“大于等于 $4D$ 且不小于 2.0m”相比更容易满足（小直径桩按 $3D$ 控制，大直径桩按 2.5m 控制）。高重建筑物下的大直径桩试验荷载大、桩间净距小（最小中心距为 $3D$ ），往往受设备能力制约，采用锚桩法检测时，三者间的距离有时很难满足“大小等于 $4D$ ”的要求，加长基准梁又难避免气候环境影响。考虑到现场验收试验中的困难，且加载过程中，锚桩上拔对基准桩、试桩的影响小于压重平台对它们的影响，故本规范中对部分间距的规定放宽为“不小于 $3D$ ”。

关于压重平台支墩边与基准桩和试桩之间的最小间距问题，应区别两种情况对待。在场地土较硬时，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。如 $\phi 1200$ 灌注桩采用 $10 \times 10\text{m}^2$ 平台堆载 11550kN，土层自上而下为凝灰岩残积土、强风化和中风化凝灰岩，堆载和试验加载过程中，距支墩边 1m、2m 处观测到的地面沉降及回弹量几乎为零。但在软土地带，大吨位堆载由于支墩影响范围大而应引起足够的重视。以某一场地 $\phi 500$ 管桩用 $7 \times 7\text{m}^2$ 平台堆载 4000kN 为例：在距支墩边 0.95m、1.95m、2.55m 和 3.5m 设四个观测点，平台堆载至 4000kN 时观测点下沉量分别为 13.4mm、6.7mm、3.0mm 和 0.1mm；试验加载至 4000kN 时观测点回弹量分别为 2.1mm、0.8mm、0.5mm 和 0.4mm。但也有报导管桩堆载 6000kN，支墩产生明显下沉，试验加载至 6000kN 时，距支墩边 2.9m 处的观测点回弹近 8mm。这里出现两个问题：其一，当支墩边距试桩较近时，大吨位堆载地面下沉将对桩产生负摩阻力，特别对摩擦型桩将明显影响其承载力；其二，桩加载（地面卸载）时地基土回弹对基准桩产生影响。支墩对试桩、基准桩的影响程度与荷载水平及土质条件等有关。对于软土地带超过 10000kN 的特大吨位堆载（目前国内压重平台法堆载已超过 30000kN），为减少对试桩产生附加影响，应考虑对支墩下 2~3 倍宽影响范围内的地基进行加固；对大吨位堆载支墩出现明显下沉的情况，尚需进一步积累资

料和研究可靠的沉降测量方法，简易的办法是在远离支墩处用水准仪或张紧的钢丝观测基准桩的竖向位移。

4.3 现场检测

4.3.1 本条是为使试桩具有代表性而提出的。

4.3.2 为便于沉降测量仪表安装，试桩顶部宜高出试坑地面；为使试验桩受力条件与设计条件相同，试坑地面宜与承台底标高一致。对于工程桩验收检测，当桩身荷载水平较低时，允许采用水泥砂浆将桩顶抹平的简单桩头处理方法。

4.3.3 本条主要是考虑在实际工程桩检测中，因锚桩质量问题而导致试桩失败或中途停顿的情况时有发生，为此建议在试桩前对灌注桩及有接头的混凝土预制桩进行完整性检测，大致确定其能否作锚桩使用。

4.3.4 本条是按我国的传统做法，对维持荷载法进行的原则性规定。

4.3.5 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，也是其他工程桩竖向抗压承载力验收检测方法的唯一比较标准。

4.3.6~4.3.7 按 4.3.6 条第 2 款，慢速维持荷载法每级荷载持载时间最少为 2h。对绝大多数桩基而言，为保证上部结构正常使用，控制桩基绝对沉降是第一位重要的，这是地基础按变形控制设计的基本原则。在工程桩验收检测中，国内某些行业或地方标准允许采用快速维持荷载法。国外许多国家的维持荷载法相当于我国的快速维持荷载法，最少持载时间为 1h，但规定了较为宽松的沉降相对稳定标准，与我国快速法的差别就在于此。1985 年 ISSMFE 根据世界各国的静载试验有关规定，在推荐的试验方法中，建议“维持荷载法加载为每小时一级，稳定标准为 $0.1\text{mm}/20\text{min}$ ”。当桩端嵌入基岩时，个别国家还允许缩短时间；也有些国家为测定桩的蠕变沉降速率建议采用终级荷载长时间维持法。

快速维持荷载法在国内从 20 世纪 70 年代就开始应用，我国港口工程规范从 1983 年 (JTJ 2202—83)、上海地基设计规范从 1989 年 (DBJ-08-11-89) 起就将这一方法列入，与慢速法一起并列列为静载试验方法。快速法由于每级荷载维持时间为 1h，各级荷载下的桩顶沉降相对慢速法确实要小一些。表 2 列出了上海市 23 根摩擦桩慢速维持荷载法试验实测桩顶稳定时的沉降量和 1h 时沉降量的对比结果。从中可见，在 1/2 极限荷载点，快速法 1h 时的桩顶沉降量与慢速法相差很小 (0.5mm 以内)，平均相差 0.2mm；在极限荷载点相差要大些，为 0.6 ~ 6.1mm，平均 2.9mm。相对而言，“慢速法”的加荷速率比建筑物建造过程中的施工加载速率要快得多，慢速法试桩得到的使用荷载对应的桩顶沉降与建筑物桩基在长期荷载作用下的实际沉降相比，要小几倍到十几倍。所以，规范中的快慢速试桩沉降差异是可以忽略的。

关于快慢速法极限承载力比较，根据上海市统计的 71 根试验桩资料 (桩端在粘性土中 47 根，在砂土中 24 根)，这些对比是在同一根桩或桩土条件相同的相邻桩上进行的，得出的结果见表 3。

表 2 稳定时的沉降量 s_w 和 1h 时的沉降量 s_{1h} 的对比

荷载点	s_w 与 s_{1h} 之差 (mm)		s_{1h}/s_w (%)	
	幅度	平均	幅度	平均
极限荷载	0.57 ~ 6.07	2.89	71 ~ 96	86
1/2 极限荷载	0.01 ~ 0.51	0.20	95 ~ 100	98

表 3 快速法与慢速法极限承载力比较

桩端土类别	快速法比慢速法极限荷载提高幅度
粘性土	0 ~ 9.6%，平均 4.5%
砂土	-2.5% ~ 9.6%，平均 2.3%

从中可以看出快速法试验得出的极限承载力较慢速法略高一

些，其中桩端在粘性土中平均提高约 1/2 级荷载，桩端在砂土中平均提高约 1/4 级荷载。

在我国，如有些软土中的摩擦桩，按慢速法加载，在 2 倍设计荷载的前几级，就已出现沉降稳定时间逐渐延长，即在 2h 甚至更长时间内不收敛。此时，采用快速法是不适宜的。而也有很多地方的工程桩验收试验，在每级荷载施加不久，沉降迅速稳定，缩短持载时间不会明显影响试桩结果；且因试验周期的缩短，又可减少昼夜温差等环境影响引起的沉降观测误差。在此，建议快速维持荷载法按下列步骤进行：

1 每级荷载施加后维持 1h，按第 5、15、30min 测读桩顶沉降量，以后每隔 15min 测读一次。

2 测读时间累计为 1h 时，若最后 15min 时间间隔的桩顶沉降增量与相邻 15min 时间间隔的桩顶沉降增量相比未明显收敛时，应延长维持荷载时间，直至最后 15min 的沉降增量小于相邻 15min 的沉降增量为止。

3 终止加荷条件可按本规范第 4.3.8 条第 1、3、4、5 款执行。

4 卸载时，每级荷载维持 15min，按第 5、15min 测读桩顶沉降量后，即可卸下一级荷载。卸载至零后，应测读桩顶残余沉降量，维持时间为 2h，测读时间为第 5、15、30min，以后每隔 30min 测读一次。

各地在采用快速法时，应总结积累经验，并可结合当地条件提出适宜的沉降相对稳定控制标准。

4.3.8 当桩身存在水平整合型缝隙、桩端有沉渣或吊脚时，在较低竖向荷载时常出现本级荷载沉降超过上一级荷载对应沉降 5 倍的陡降，当缝隙闭合或桩端与硬持力层接触后，随着持载时间或荷载增加，变形梯度逐渐变缓；当桩身强度不足桩被压断时，也会出现陡降，但与前相反，随着沉降增加，荷载不能维持甚至大幅降低。所以，出现陡降后不宜立即卸荷，而应使桩下沉量超过 40mm，以大致判断造成陡降的原因。

非嵌岩的长（超长）桩和大直径（扩底）桩的 $Q-s$ 曲线一般呈缓变型，在桩顶沉降达到 40mm 时，桩端阻力一般不能充分发挥。前者由于长细比大、桩身较柔，弹性压缩量大，桩顶沉降较大时，桩端位移还很小；后者虽桩端位移较大，但尚不足以使端阻力充分发挥。因此，放宽桩顶总沉降量控制标准是合理的。

4.4 检测数据的分析与判定

4.4.1 除 $Q-s$ 、 $s-lgt$ 曲线外，还有 $s-lgQ$ 曲线。同一工程的一批试桩曲线应按相同的沉降纵座标比例绘制，满刻度沉降值不宜小于 40mm，使结果直观、便于比较。

4.4.2 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）；粘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 4 款对缓变型 $Q-s$ 曲线，按 $s = 0.05D$ 确定直径大于等于 800mm 桩的极限承载力大体上是保守的；且因 $D \geq 800\text{mm}$ 时定义为大直径桩，当 $D = 800\text{mm}$ 时， $0.05D = 40\text{mm}$ ，正好与中、小直径桩的取值标准衔接。应该注意，世界各国按桩顶总沉降确定极限承载力的规定差别较大，这和各国安全系数的取值大小、特别是上部结构对桩基沉降的要求有关。因此当按本规范建议的桩顶沉降量确定极限承载力时，尚应考虑上部结构对桩基沉降的具体要求。

4.4.3 本规范单桩竖向抗压承载力的统计按《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的规定执行。也有根据统计承载力标准差大于 15% 时，采用极限承载力标准值折减系数的修正方法。实际操作中对桩数大于等于 4 根时，折减系数的计算比较繁琐，且静载检测本身是通过小样本来推断总体，样本容量愈小，可靠度愈低，而影响单桩承载力的因素复杂多变。当一批受检桩中有一根桩承载力过低，若恰好不是偶然原因造成，则该验收批一旦被接受，就会增加使用方的风险。因此规定极差超过平均值的 30% 时，首先应分析、查明原因，结合工程实际综合确定。例如一组

5根试桩的承载力值依次为800、950、1000、1100、1150kN，平均值为1000kN，单桩承载力最低值和最高值的极差为350kN，超过平均值的30%，则不得将最低值800kN去掉将后面4个值取平均，或将最低和最高值都去掉取中间3个值的平均值。应查明是否出现桩的质量问题或场地条件变异。若低值承载力出现的原因并非偶然的施工质量造成，则按本例依次去掉高值后取平均，直至满足极差不超过30%的条件。此外，对桩数小于或等于3根的柱下承台，或试桩数量仅为2根时，应采用低值，以确保安全。对于仅通过少量试桩无法判明极差大的原因时，可增加试桩数量。

4.4.4 《建筑地基基础设计规范》GB 50007规定的单桩竖向抗压承载力特征值是按单桩竖向抗压极限承载力统计值除以安全系数2得到的，综合反映了桩侧、桩端极限阻力控制承载力特征值的低限要求。

4.4.5 本条规定了检测报告中应包含的一些内容，避免检测报告过于简单，也有利于委托方、设计及检测部门对报告的审查和分析。

5 单桩竖向抗拔静载试验

5.1 适用范围

5.1.1 单桩竖向抗拔静载试验是检测单桩竖向抗拔承载力最直观、可靠的方法。与本规范中抗压静载试验一样，拔桩试验也是采用了国内外惯用的维持荷载法，并规定应采用慢速维持荷载法。

5.1.2 当需要检测桩侧抗拔极限摩阻力或了解桩端上拔量时，可按本规范附录 A 中有关方法执行。

5.1.3 当为设计提供依据时，应加载到能判别单桩抗拔极限承载力为止，或加载到桩身材料强度控制值。在对工程桩抽样验收检测时，可按设计要求控制最大上拔荷载，但应有足够的安全储备。

5.2 设备仪器及其安装

5.2.1 本条的要求基本同第 4.2.1 条。因拔桩试验时千斤顶安放在反力架上面，当采用二台以上千斤顶加载时，应采取一定的安全措施，防止千斤顶倾倒或其他意外事故发生。

5.2.2 当采用天然地基作反力时，两边支座处的地基强度应相近，且两边支座与地面的接触面积宜相同，避免加载过程中两边沉降不均造成试桩偏心受拉。为保证反力梁的稳定性，应注意反力桩顶面直径（或边长）不小于反力架的梁宽。

5.2.3~5.2.5 这三条基本参照本规范第 4.2.3~4.2.5 条执行，但应注意以下两点：

1 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，避免因钢筋变形导致上拔量观测数据失实。

2 在采用天然地基提供支座反力时，拔桩试验加载相当于给支座处地面加载。支座附近的地面也因此会出现不同程度的沉降。荷载越大，这种变形越明显。为防止支座处地基沉降对基准梁的影响，一是应使基准桩与支座、试桩各自之间的间距满足表 4.2.5 的规定，二是基准桩需打入试坑地面以下一定深度（一般不小于 1m）。

5.3 现场检测

5.3.1 本条包含以下三个方面内容：

1 在拔桩试验前，对混凝土灌注桩及有接头的预制桩采用低应变法检查桩身质量，目的是防止因试验桩自身质量问题而影响抗拔试验成果。

2 对抗拔试验的钻孔灌注桩在浇注混凝土前进行成孔检测，目的是查明桩身有无明显扩径现象或出现扩大头，因这类桩的抗拔承载力缺乏代表性，特别是扩大头桩及桩身中下部有明显扩径的桩，其抗拔极限承载力远远高于长度和桩径相同的非扩径桩，且相同荷载下的上拔量也有明显差别。

3 对有接头的 PHC、PTC 和 PC 管桩应进行接头抗拉强度验算。对电焊接头的管桩除验算其主筋强度外，还要考虑主筋墩头的折减系数以及管节端板偏心受拉时的强度及稳定性。墩头折减系数可按有关规范取 0.92，而端板强度的验算则比较复杂，可按经验取一个较为安全的系数。

5.3.2 本条规定拔桩试验应采用慢速维持荷载法，其荷载分级、试验方法及稳定标准均同第 4.3.4 条和 4.3.6 条有关规定。

5.3.3 本条规定出现所列四种情况之一时，可终止加载。但若在较小荷载下出现某级荷载的桩顶上拔量大于前一级荷载下的 5 倍时，应综合分析原因。若是试验桩，必要时可继续加载，因混凝土桩当桩身出现多条环向裂缝后，其桩顶位移可能会出现小的突变，而此时并非达到桩侧土的极限抗拔力。

5.4 检测数据的分析与判定

5.4.1 拔桩试验与压桩试验一样，一般应绘制 $U-\delta$ 曲线和 $\delta-\lg t$ 曲线，但当上述二种曲线难以判别时，也可以辅以 $\delta-\lg U$ 曲线或 $\lg U-\lg \delta$ 曲线，以确定拐点位置。

5.4.2 本条前两款确定的抗拔极限承载力是土的极限抗拔阻力与桩（包括桩向上运动所带动的土体）的自重标准值两部分之和。第3款所指的“断裂”是因钢筋强度不够情况下的断裂。如果因抗拔钢筋受力不均匀，部分钢筋因受力太大而断裂，应视该桩试验无效并进行补充试验。不能将钢筋断裂前一级荷载作为极限荷载。

5.4.4 工程桩验收检测时，混凝土桩抗拔承载力可能受抗裂或钢筋强度制约，而土的抗拔阻力尚未发挥到极限，一般取最大荷载或取上拔量控制值对应的荷载作为极限荷载，不能轻易外推。

5.4.5 按统计的试桩竖向抗拔极限承载力确定单桩竖向抗拔承载力特征值 U_a 时取安全系数为2，显然只与极限抗拔承载力按土的极限抗拔阻力控制的情况对应。有关抗裂控制要求的解释可参见第6.4.6~6.4.7条的条文说明。

6 单桩水平静载试验

6.1 适用范围

6.1.1 桩的水平承载力静载试验除了桩顶自由的单桩试验外，还有带承台桩的水平静载试验（考虑承台的底面阻力和侧面抗力，以便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。这一切都可根据设计的特殊要求给予满足，并参考本方法进行。

6.1.2 桩的抗弯能力取决于桩和土的力学性能、桩的自由长度、抗弯刚度、桩宽、桩顶约束等因素。试验条件应尽可能和实际工作条件接近，将各种影响降低到最小的程度，使试验成果能尽量反映工程桩的实际情况。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，即地基土的水平抗力系数。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（如不同桩顶约束、不同自由长度），用它确定土抗力大小，进而计算单桩的水平承载力和弯矩。因此，通过试验求得地基土的水平抗力系数具有更实际、更普遍的意义。

6.2 设备仪器及其安装

6.2.3 水平力作用点位置高于基桩承台底标高，试验时在相对承台底面处产生附加弯矩，影响测试结果，也不利于将试验成果根据实际桩顶的约束予以修正。球形支座的作用是在试验过程中，保持作用力的方向始终水平和通过桩轴线，不随桩的倾斜或扭转而改变。

6.2.6 为保证各测试断面的应力最大值及相应弯矩的测量精度，

试桩设置时应严格控制测点的纵剖面与力作用方向之间的偏差。对承受水平荷载的桩而言，桩的破坏是由于桩身弯矩引起的结构破坏。因此对中长桩而言，浅层土的性质起了重要作用，在这段范围内的弯矩变化也最大。为找出最大弯矩及其位置，应加密测试断面。

6.3 现场检测

6.3.1 单向多循环加载法，主要是为了模拟实际结构的受力形式。由于结构物承受的实际荷载异常复杂，所以当需考虑长期水平荷载作用影响时，宜采用第4章规定的慢速维持荷载法。由于单向多循环荷载的施加会给内力测试带来不稳定因素，为方便测试，建议采用第4章规定的慢速或快速维持荷载法；此外水平试验桩通常以结构破坏为主，为缩短试验时间，也可采用更短时间的快速维持荷载法。例如《港口工程桩基规范》（桩的水平承载力设计）JTJ 254—98 规定每级荷载维持 20min。

6.3.3 对抗弯性能较差的长桩或中长桩而言，承受水平荷载桩的破坏特征是弯曲破坏，即桩身发生折断，此时试验自然终止。本条对终止加荷的水平位移限制要求是根据《建筑桩基技术规范》提出的；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规范规定的水平位移允许值控制。

6.4 检测数据的分析与判定

6.4.1 本条中的地基土水平抗力系数随深度增长的比例系数 m 值的计算公式仅适用于水平力作用点至试坑地面的桩自由长度为零时的情况。按桩、土相对刚度不同，水平荷载作用下的桩-土体系有两种工作状态和破坏机理，一种是“刚性短桩”，因转动或平移而破坏，相当于 $ah < 2.5$ 时的情况；另一种是工程中常见的“弹性长桩”，桩身产生挠曲变形，桩下段嵌固于土中不能转动，即本条中 $ah \geq 4.0$ 的情况。在 $2.5 \leq ah < 4.0$ 范围内，称为“有限长度的中长桩”。《建筑桩基技术规范》对中长桩的 ν 变化

给出了具体数值（见表4）。因此，在按式（6.4.1-1）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 ν_y 值重新计算 m 值（有些行业标准不考虑）。当 $ah < 2.5$ 时，式（6.4.1-1）不适用。

表 4 桩顶水平位移系数 ν_y

桩的换算埋深 ah	4.0	3.5	3.0	2.8	2.6	2.4
桩顶自由或铰接时的 ν_y 值	2.441	2.502	2.727	2.905	3.163	3.526
注：当 $ah > 4.0$ 时取 $ah = 4.0$ 。						

试验得到的地基土水平抗力系数的比例系数 m 不是一个常量，而是随地面水平位移及荷载而变化的曲线。

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，最后形成桩身结构的破坏。所测水平临界荷载 H_{cr} 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 单桩水平极限承载力是对应于桩身折断或桩身钢筋应力达到屈服时的前一级水平荷载。

6.4.6~6.4.7 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。由于建筑工程的基桩桩顶嵌入承台长度通常较短，其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 值随荷载或位移增加而减小，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 设计未做具体规定的，可取 6.4.6 条或 6.4.7 条确定的水平承载力特征值对应的 m 值：对低配筋率灌注桩，水平承载力多由桩身强度控制，则应按试验得到的 $H-m$ 曲线取水平临界荷载所对应的 m 值；对于高配筋率混凝土桩或钢桩，水平承载力按允许位移控制时，可按设计要求的水平允许位移选取 m 值。

与竖向抗压、抗拔桩不同，混凝土桩在水平荷载作用下的破坏模式一般为弯曲破坏，极限承载力由桩身强度控制。所以，6.4.6 条在确定单桩水平承载力特征值 H_a 时，未采用按试桩水平极限承载力除以安全系数的方法，而按照桩身强度、开裂或允许位移等控制因素来确定 H_a 。不过，也正是因为水平承载桩的承载能力极限状态主要受桩身强度制约，通过试验给出极限承载力和极限弯矩对强度控制设计是非常必要的。抗裂要求不仅涉及桩身强度，也涉及桩的耐久性。6.4.7 条虽允许按设计要求的水平位移确定水平承载力，但根据《混凝土结构设计规范》GB 50010，只有裂缝控制等级为三级的构件，才允许出现裂缝，且桩所处的环境类别至少是二级以上（含二级），裂缝宽度限值为 0.2mm。因此，当裂缝控制等级为一、二级时，按 6.4.7 条确定的水平承载力特征值就不应超过水平临界荷载。

7 钻 芯 法

7.1 适用范围

7.1.1 钻芯法是检测钻（冲）孔、人工挖孔等现浇混凝土灌注桩的成桩质量的一种有效手段，不受场地条件的限制，特别适用于大直径混凝土灌注桩的成桩质量检测。钻芯法检测的主要目的有四个：

- 1 检测桩身混凝土质量情况，如桩身混凝土胶结状况、有无气孔、松散或断桩等，桩身混凝土强度是否符合设计要求。
- 2 桩底沉渣是否符合设计或规范的要求。
- 3 桩端持力层的岩土性状（强度）和厚度是否符合设计或规范要求。
- 4 施工记录桩长是否真实。

受检桩长径比较大时，成孔的垂直度和钻芯孔的垂直度很难控制，钻芯孔容易偏离桩身，故要求受检桩桩径不宜小于800mm、长径比不宜大于30。

7.2 设 备

7.2.1~7.2.3 应采用带有产品合格证的钻芯设备。钻机宜采用岩芯钻探的液压钻机，并配有相应的钻塔和牢固的底座，机械技术性能良好，不得使用立轴旷动过大的钻机。

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。桩较长时，应使用扶正稳定器确保钻芯孔的垂直度。

目前钻芯取样方法分三大类：钢粒钻进、硬质合金钻进和金刚石钻进。钢粒钻进能通过坚硬岩石，但钻头与切削具是分开的，破碎孔底环状面积大、芯样直径小、芯样易破碎、磨损大、

采取率低，不适用于基桩钻芯法检测。硬质合金钻进虽然切削具破坏岩石比较平稳、破碎孔底环状间隙相对较小、孔壁与钻具间隙小、芯样直径大、采取率较好，但是硬质合金钻只适用于小于七级的岩石（岩石有十二级分类），不适用于基桩钻芯法检测。金刚石钻头切削刃细、破碎岩石平稳、钻具孔壁间隙小、破碎孔底环状面积小，且由于金刚石较硬、研磨性较强，高速钻进时芯样受钻具磨损时间短，容易获得比较真实的芯样。因此钻芯法检测应采用金刚石钻头钻进。

芯样试件直径不宜小于骨料最大粒径的3倍，在任何情况下不得小于骨料最大粒径的2倍，否则试件强度的离散性较大。目前，钻头外径有76mm、91mm、101mm、110mm、130mm几种规格，从经济合理的角度综合考虑，应选用外径为101mm和110mm的钻头；当受检桩采用商品混凝土、骨料最大粒径小于30mm时，可选用外径为91mm的钻头；如果不检测混凝土强度，可选用外径为76mm的钻头。

7.3 现场检测

7.3.1 当钻芯孔为一个时，规定宜在距桩中心10~15cm的位置开孔，是考虑导管附近的混凝土质量相对较差、不具有代表性；同时也方便第二个孔的位置布置。

为准确确定桩的中心点，桩头宜开挖裸露；来不及开挖或不便开挖的桩，应由经纬仪测出桩位中心。

桩端持力层岩土性状的准确判断直接关系到受检桩的使用安全。《建筑地基基础设计规范》GB 50007规定：嵌岩灌注桩要求按端承桩设计，桩端以下三倍桩径范围内无软弱夹层、断裂破碎带和洞隙分布，在桩底应力扩散范围内无岩体临空面。虽然施工前已进行岩土工程勘察，但有时钻孔数量有限，对较复杂的地质条件，很难全面弄清岩石、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。

7.3.2~7.3.5 钻芯设备应精心安装、认真检查。钻进过程中应

经常对钻机立轴进行校正，及时纠正立轴偏差，确保钻芯过程不发生倾斜、移位。设备安装后，应进行试运转，在确认正常后方可开钻。

桩顶面与钻机塔座距离大于 2m 时，宜安装孔口管。开孔宜采用合金钻头、开孔深为 0.3~0.5m 后安装孔口管，孔口管下入时应严格测量垂直度，然后固定。

当出现钻芯孔与桩体偏离时，应立即停机记录，分析原因。当有争议时，可进行钻孔测斜，以判断是受检桩倾斜超过规范要求还是钻芯孔倾斜超过规定要求。

金刚石钻头、扩孔器与卡簧的配合和使用要求：金刚石钻头与岩芯管之间必须安有扩孔器，用以修正孔壁；扩孔器外径应比钻头外径大 0.3~0.5mm，卡簧内径应比钻头内径小 0.3mm 左右；金刚石钻头和扩孔器应按外径先大后小的排列顺序使用，同时考虑钻头内径小的先用，内径大的后用。

金刚石钻进技术参数：

1 钻头压力：钻芯法的钻头压力应根据混凝土芯样的强度与胶结好坏而定，胶结好、强度高的钻头压力可大，相反的压力应小；一般情况初压力为 0.2MPa，正常压力 1MPa。

2 转速：回次初转速宜为 100r/min 左右；正常钻进时可以采用高转速，但芯样胶结强度低的混凝土应采用低转速。

3 冲洗液量：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，冲洗液流量应为 60~120L/min。

金刚石钻进应注意的事项：

1 金刚石钻进前，应将孔底硬质合金捞取干净并磨灭，然后磨平孔底。

2 提钻卸取芯样时，应使用专门的自由钳拧卸钻头和扩孔器。

3 提放钻具时，钻头不得在地下拖拉；下钻时金刚石钻头不得碰撞孔口或孔口管上；发生墩钻或蹩钻事故，应提钻检查钻

头，不得盲目钻进。

4 当孔内有掉块、混凝土芯脱落或残留混凝土芯超过200mm时，不得使用新金刚石钻头扫孔，应使用旧的金刚石钻头或针状合金钻头套扫。

5 下钻前金刚石钻头不得下至孔底，应下至距孔底200mm处，采用轻压慢转扫到孔底，待钻进正常后再逐步增加压力和转速至正常范围。

6 正常钻进时不得随意提动钻具，以防止混凝土芯堵塞，发现混凝土芯堵塞时应立刻提钻，不得继续钻进。

7 钻进过程中要随时观察冲洗液量和泵压的变化，正常泵压应为0.5~1MPa，发现异常应查明原因，立即处理。

7.3.6 钻至桩底时，为检测桩底沉渣或虚土厚度，应采用减压、慢速钻进。若遇钻具突降，应即停钻，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。当持力层为强风化岩层或土层时，可采用合金钢钻头干钻等适宜的钻芯方法和工艺钻取沉渣并测定沉渣厚度。

对中、微风化岩的桩端持力层，可直接钻取岩芯鉴别；对强风化岩层或土层，可采用动力触探、标准贯入试验等方法鉴别。试验宜在距桩底50cm内进行。

7.3.7 芯样取出后，应由上而下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）。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。

有条件时，可采用钻孔电视辅助判断混凝土质量。

7.3.8 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、

混凝土芯是否为柱状、骨料大小分布情况，气孔、蜂窝麻面、沟槽、破碎、夹泥、松散的情况，以及取样编号和取样位置。

对持力层的描述包括持力层钻进深度，岩土名称、芯样颜色、结构构造、裂隙发育程度、坚硬及风化程度，以及取样编号和取样位置，或动力触探、标准贯入试验位置和结果。分层岩层应分别描述。

7.3.9 应先拍彩色照片，后截取芯样试件。取样完毕剩余的芯样宜移交委托单位妥善保存。

7.4 芯样试件截取与加工

7.4.1 以概率论为基础，用可靠性指标度量桩基的可靠度是比较科学的评价桩基强度的方法，即在钻芯法受检桩的芯样中截取一批芯样试件进行抗压强度试验，采用统计的方法判断混凝土强度是否满足设计要求。但在应用上存在以下一些困难：

1 由于桩基施工的特殊性，评价单根受检桩的混凝土强度比评价整个桩基工程的混凝土强度更合理。

2 《混凝土强度检验评定标准》GBJ 107—87 定义立方体抗压强度标准值采用了概率论和可靠度概念，但是在判断一个验收批的混凝土强度是否合格时采用了两个不等式：

$$m_{fcu} - \lambda_1 \cdot s_{fcu} \geq 0.9f_{cu,k} \quad (1)$$

$$f_{cu,min} \geq \lambda_2 \cdot f_{cu,k} \quad (2)$$

如果说第一个不等式沿用了概率论和可靠度概念，那么，第二个不等式是考虑评定对象是结构受力构件，不允许出现过低的小值。同时，该标准指出一组试件的强度代表值应由三个试件的强度值确定，而钻芯法增加 3 倍的芯样试件数量有困难。

3 混凝土桩应作为受力构件考虑，薄弱部位的强度（结构承载能力）能否满足使用要求，直接关系到结构安全。

综合多种因素考虑，规定按上、中、下截取芯样试件的原则，同时对缺陷和多孔取样做了规定。

一般来说，蜂窝麻面、沟槽等缺陷部位的强度较正常胶结的混凝土芯样强度低，无论是严把质量关，尽可能查明质量隐患，还是便于设计人员进行结构承载力验算，都有必要对缺陷部位的芯样进行取样试验。因此，缺陷位置能取样试验时，应截取一组芯样进行混凝土抗压试验。

如果同一基桩的钻芯孔数大于一个，其中一孔在某深度存在蜂窝麻面、沟槽、空洞等缺陷，芯样试件强度可能不满足设计要求，按第 7.6.1 条的多孔强度计算原则，在其他孔的相同深度部位取样进行抗压试验是非常必要的，在保证结构承载能力的前提下，减少加固处理费用。

7.4.2 为便于设计人员对端承力的验算，提供分层岩性的各层强度值是必要的。为保证岩石原始性状，选取的岩石芯样应及时包装并浸泡在水中。

7.4.3 对于基桩混凝土芯样来说，芯样试件可选择的余地较大，因此，不仅要求芯样试件不能有裂缝或有其他较大缺陷，而且要求芯样试件内不能含有钢筋；同时，为了避免试件强度的离散性较大，在选取芯样试件时，应观察芯样侧面的表观混凝土粗骨料粒径，确保芯样试件平均直径不小于 2 倍表观混凝土粗骨料最大粒径。

为了避免再对芯样试件高径比进行修正，规定有效芯样试件的高度不得小于 $0.95d$ 且不得大于 $1.05d$ 时（ d 为芯样试件平均直径）。

附录 E 规定平均直径测量精确至 0.5mm ；沿试件高度任一直径与平均直径相差达 2mm 以上时不得用作抗压强度试验。这里做以下几点说明：

1 一方面要求直径测量误差小于 1mm ，另一方面允许不同高度处的直径相差大于 1mm ，增大了芯样试件强度的不确定度。考虑到钻芯过程对芯样直径的影响是强度低的地方直径偏小，而抗压试验时直径偏小的地方容易破坏，因此，在测量芯样平均直径时宜选择表观直径偏小的芯样中部部位。

2 允许沿试件高度任一直径与平均直径相差达 2mm，极端情况下，芯样试件的最大直径与最小直径相差可达 4 mm，此时固然满足规范规定，但是，当芯样侧面有明显波浪状时，应检查钻机的性能，钻头、扩孔器、卡簧是否合理配置，机座是否安装稳固，钻机立轴是否摆动过大，提高钻机操作人员的技术水平。

3 在诸多因素中，芯样试件端面的平整度是一个重要的因素，容易被检测人员忽视，应引起足够的重视。

7.5 芯样试件抗压强度试验

7.5.1 根据桩的工作环境状态，试件宜在 $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 的清水中浸泡一段时间后进行抗压强度试验。本条规定芯样试件加工完毕后，即可进行抗压强度试验，一方面考虑到钻芯过程中诸因素影响均使芯样试件强度降低，另一方面是出于方便考虑。

7.5.2 芯样试件抗压破坏时的最大压力值与混凝土标准试件明显不同，芯样试件抗压强度试验时应合理选择压力机的量程和加荷速率，保证试验精度。

7.5.3 当出现截取芯样未能制作成试件、芯样试件平均直径小于 2 倍试件内混凝土粗骨料最大粒径时，应重新截取芯样试件进行抗压强度试验。条件不具备时，可将另外两个强度的平均值作为该组混凝土芯样试件抗压强度值。在报告中应对有关情况予以说明。

7.5.4 混凝土芯样试件的强度值不等于在施工现场取样、成型、同条件养护试块的抗压强度，也不等于标准养护 28 天的试块抗压强度。广东有 137 组数据表明在桩身混凝土中的钻芯强度与立方体强度的比值的统计平均值为 0.749。为考察小芯样取芯的离散性（如尺寸效应、机械扰动等），广东、福建、河南等地 6 家单位在标准立方体试块中钻取芯样进行抗压强度试验（强度等级 C15 ~ C50，芯样直径 68 ~ 100mm，共 184 组），目的是排除龄期、振捣和养护条件的差异。结果表明：芯样试件强度与立方体强度的比值分别为 0.689、0.848、0.895、0.915、1.106、1.106，平

均为 0.943，其中有两单位得出了 $\phi 68$ 、 $\phi 80$ 芯样强度与 $\phi 100$ 芯样强度相比均接近于 1.0 的结论。当排除龄期和养护条件（温度、湿度）差异时，尽管普遍认同芯样强度低于立方体强度，尤其是在桩身混凝土中钻芯更是如此，但上述结果说明：尚不能采用一个统一的折算系数来反映芯样强度与立方体强度的差异。作为行业标准，为了安全起见，本规范暂不推荐采用 $1/0.88$ （国内一些地方标准采用的折算系数）对芯样强度进行提高修正，留待各地根据试验结果进行调整。

7.5.5 岩石芯样试件数量按本规范 7.4.3 条每组芯样制作三个芯样抗压试件的规定。当岩石芯样抗压强度试验仅仅是配合判断桩端持力层岩性时，检测报告中可不给出岩石饱和单轴抗压强度标准值，只给出平均值；当需要确定岩石饱和单轴抗压强度标准值时，宜按《建筑地基基础设计规范》GB 50007 附录 J 执行。

7.6 检测数据的分析与判定

7.6.1 由于混凝土芯样试件抗压强度的离散性比混凝土标准试件大得多，采用《混凝土强度检验评定标准》GBJ 107 来计算混凝土芯样试件抗压强度代表值有时会出现无法确定代表值的情况。为了避免这种情况，对数千组数据进行验算，证实取平均值的方法是可行的。

同一根桩有两个或两个以上钻芯孔时，应综合考虑各孔芯样强度来评定桩身承载力。取同一深度部位各孔芯样试件抗压强度的平均值作为该深度的混凝土芯样试件抗压强度代表值，是一种简便实用方法。

7.6.2 虽然桩身轴力上大下小，但从设计角度考虑，桩身承载力受最薄弱部位的混凝土强度控制。

7.6.3 桩端持力层岩土性状的描述、判定应有工程地质专业人员参与，并应符合《岩土工程勘察规范》GB 50021 的有关规定。

7.6.4~7.6.5 通过芯样特征对桩身完整性分类，有比低应变法更直观的一面，也有一孔之见代表性差的一面。同一根桩有两个

或两个以上钻芯孔时，桩身完整性分类应综合考虑各钻芯孔的芯样质量情况，不同钻芯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，桩身缺陷类别应判重些。

在本规范中，虽然按芯样特征判定完整性和通过芯样试件抗压试验判定桩身强度是否满足设计要求在内容上相对独立，且表 3.5.1 中的桩身完整性分类是针对缺陷是否影响结构承载力的原则性规定。但是，除桩身裂隙外，根据芯样特征描述，不论缺陷属于哪种类型，都指明或相对表明桩身混凝土质量差，即存在低强度区这一共性。因此对于钻芯法，完整性分类尚应结合芯样强度值综合判定。例如：

1 蜂窝麻面、沟槽、空洞等缺陷程度应根据其芯样强度试验结果判断。若无法取样或不能加工成试件，缺陷程度应判重些。

2 芯样连续、完整、胶结好或较好、骨料分布均匀或基本均匀、断口吻合或基本吻合；芯样侧面无表观缺陷，或虽有气孔、蜂窝麻面、沟槽，但能够截取芯样制作成试件；芯样试件抗压强度代表值不小于混凝土设计强度等级。则应判为Ⅱ类桩。

3 芯样任一段松散、夹泥或分层，钻进困难甚至无法钻进，则判定基桩的混凝土质量不满足设计要求；若仅在一个孔中出现前述缺陷，而在其他孔同深度部位未出现，为确保质量，仍应进行工程处理。

4 局部混凝土破碎、无法取样或虽能取样但无法加工成试件，一般判定为Ⅲ类桩。但是，当钻芯孔数为 3 个时，若同一深度部位芯样质量均如此，宜判为Ⅳ类桩；如果仅一孔的芯样质量如此，且长度小于 10cm，另两孔同深度部位的芯样试件抗压强度较高，宜判为Ⅱ类桩。

除桩身完整性和芯样试件抗压强度代表值外，当设计有要求时，应判断桩底的沉渣厚度、持力层岩土性状（强度）或厚度是否满足或达到设计要求；否则，应判断是否满足或达到规范要求。

8 低应变法

8.1 适用范围

8.1.1 目前国内外普遍采用瞬态冲击方式，通过实测桩顶加速度或速度响应时域曲线，籍一维波动理论分析来判定基桩的桩身完整性，这种方法称之为反射波法（或瞬态时域分析法）。据建设部所发工程桩动测单位资质证书的数量统计，绝大多数的单位采用上述方法，所用动测仪器一般都具有傅立叶变换功能，可通过速度幅频曲线辅助分析判定桩身完整性，即所谓瞬态频域分析法；也有些动测仪器还具备实测锤击力并对其进行傅立叶变换的功能，进而得到导纳曲线，这称之为瞬态机械阻抗法。当然，采用稳态激振方式直接测得导纳曲线，则称之为稳态机械阻抗法。无论瞬态激振的时域分析还是瞬态或稳态激振的频域分析，只是习惯上从波动理论或振动理论两个不同角度去分析，数学上忽略截断和泄漏误差时，时域信号和频域信号可通过傅立叶变换建立对应关系。所以，当桩的边界和初始条件相同时，时域和频域分析结果应殊途同归。综上所述，考虑到目前国内外使用方法的普遍程度和可操作性，本规范将上述方法合并编写并统称为低应变（动测）法。

一维线弹性杆件模型是低应变法的理论基础。因此受检桩的长细比、瞬态激励脉冲有效高频分量的波长与桩的横向尺寸之比均宜大于5，设计桩身截面宜基本规则。另外，一维理论要求应力波在桩身中传播时平截面假设成立，所以，对薄壁钢管桩和类似于H型钢桩的异型桩，本方法不适用。

本方法对桩身缺陷程度只做定性判定，尽管利用实测曲线拟合法分析能给出定量的结果，但由于桩的尺寸效应、测试系统的幅频相频响应、高频波的弥散、滤波等造成的实测波形畸变，以

及桩侧土阻尼、土阻力和桩身阻尼的耦合影响，曲线拟合法还不能达到精确定量的程度。

对于桩身不同类型的缺陷，低应变测试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，只凭测试信号就很难区分。因此，对缺陷类型进行判定，应结合地质、施工情况综合分析，或采取钻芯、声波透射等其他方法。

8.1.2 由于受桩周土约束、激振能量、桩身材料阻尼和桩身截面阻抗变化等因素的影响，应力波从桩顶传至桩底再从桩底反射回桩顶的传播为一能量和幅值逐渐衰减过程。若桩过长（或长径比较大）或桩身截面阻抗多变或变幅较大，往往应力波尚未反射回桩顶甚至尚未传到桩底，其能量已完全衰减或提前反射，致使仪器测不到桩底反射信号，而无法评定整根桩的完整性。在我国，若排除其他条件差异而只考虑各地区地质条件差异时，桩的有效检测长度主要受桩土刚度比大小的制约。因各地提出的有效检测范围变化很大，如长径比 30 ~ 50、桩长 30 ~ 50m 不等，故本条未规定有效检测长度的控制范围。具体工程的有效检测桩长，应通过现场试验，依据能否识别桩底反射信号，确定该方法是否适用。

对于最大有效检测深度小于实际桩长的超长桩检测，尽管测不到桩底反射信号，但若有效检测长度范围内存在缺陷，则实测信号中必有缺陷反射信号。因此，低应变方法仍可用于查明有效检测长度范围内是否存在缺陷。

8.2 仪器设备

8.2.1 低应变动力检测采用的测量响应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测试），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，习惯上是将加速度计的实测信号积分成速度曲线，并据此进行判读。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，加速度计的频响线性段达到 2000Hz 就足够了。这是因为，加速度原始信号比积分后的速度波形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。当加速度计的频响线性段较窄时，就会造成信号失真。所以，在 $\pm 10\%$ 幅频误差内，加速度计幅频线性段的高限不宜小于 5000Hz，同时也应避免在桩顶敲击处表面凹凸不平时用硬质材料锤（或不加锤垫）直接敲击。

高阻尼磁电式速度传感器固有频率接近 20Hz 时，幅频线性范围（误差 $\pm 10\%$ 时）约在 20 ~ 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于做到。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，还存在因相位越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，其安装谐振频率受安装条件影响很大，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随之滤除。综上所述，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力锤、力棒，其锤头或锤垫多选用工程塑料、高强尼龙、铝、铜、铁、橡皮垫等材料，锤的质量为几百克至几十千克

不等。

稳态激振设备可包括扫频信号发生器、功率放大器及电磁式激振器。由扫频信号发生器输出等幅值、频率可调的正弦信号，通过功率放大器放大至电磁激振器输出同频率正弦激振力作用于桩顶。

8.3 现场检测

8.3.1 桩顶条件和桩头处理好坏直接影响测试信号的质量。因此，要求受检桩桩顶的混凝土质量、截面尺寸应与桩身设计条件基本等同。灌注桩应凿去桩顶浮浆或松散、破损部分，并露出坚硬的混凝土表面；桩顶表面应平整干净且无积水；妨碍正常测试的桩顶外露主筋应割掉。对于预应力管桩，当法兰盘与桩身混凝土之间结合紧密时，可不进行处理，否则，应采用电锯将桩头锯平。

当桩头与承台或垫层相连时，相当于桩头处存在很大的截面阻抗变化，对测试信号会产生影响。因此，测试时桩头应与混凝土承台断开；当桩头侧面与垫层相连时，除非对测试信号没有影响，否则应断开。

8.3.2 从时域波形中找到桩底反射位置，仅仅是确定了桩底反射的时间，根据 $\Delta T = 2L/c$ ，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。测试前桩身波速可根据本地区同类桩型的测试值初步设定，实际分析过程中应按由桩长计算的波速重新设定或按 8.4.1 条确定的波速平均值 c_m 设定。

对于时域信号，采样频率越高，则采集的数字信号越接近模拟信号，越有利于缺陷位置的准确判断。一般应在保证测得完整信号（时段 $2L/c + 5\text{ms}$ ，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。

稳态激振是按一定频率间隔逐个频率激振，并持续一段时

间。频率间隔的选择决定于速度幅频曲线和导纳曲线的频率分辨率，它影响桩身缺陷位置的判定精度；间隔越小，精度越高，但检测时间很长，降低工作效率。一般频率间隔设置为 3Hz、5Hz 和 10Hz。每一频率下激振持续时间的选择，理论上越长越好，这样有利于消除信号中的随机噪声。实际测试过程中，为提高工作效率，只要保证获得稳定的激振力和响应信号即可。

8.3.3 本条是为保证获得高质量响应信号而提出的措施：

1 传感器用耦合剂粘结时，粘结层应尽可能薄；必要时可采用冲击钻打孔安装方式，但传感器底安装面应与桩顶面紧密接触。

2 相对桩顶横截面尺寸而言，激振点处为集中力作用，在桩顶部位可能出现与桩的横向振型相应的高频干扰。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。初步研究表明：实心桩安装点在距桩中心约 $\frac{2}{3}$ 半径 R 时，所受干扰相对较小；空心桩安装点与激振点平面夹角等于或略大于 90° 时也有类似效果，该处相当于横向耦合低阶振型的驻点。另应注意加大安装与激振两点距离或平面夹角将增大锤击点与安装点响应信号时间差，造成波速或缺陷定位误差。传感器安装点、锤击点布置见图 1。

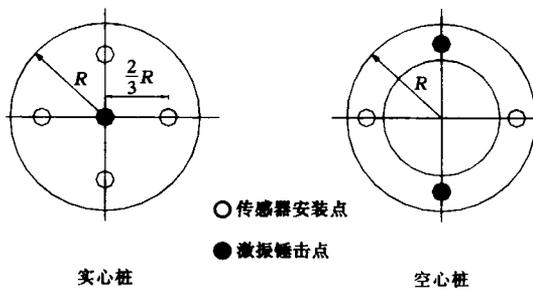


图 1 传感器安装点、锤击点布置示意图

当预制桩、预应力管桩等桩顶高于地面很多，或灌注桩桩顶

部分桩身截面很不规则，或桩顶与承台等其他结构相连而不具备传感器安装条件时，可将两支测量响应传感器对称安装在桩顶以下的桩侧表面，且宜远离桩顶。

3 激振点与传感器安装点应远离钢筋笼的主筋，其目的是减少外露主筋对测试产生干扰信号。若外露主筋过长而影响正常测试时，应将其割短。

4 瞬态激振通过改变锤的重量及锤头材料，可改变冲击入射波的脉冲宽度及频率成分。锤头质量较大或刚度较小时，冲击入射波脉冲较宽，低频成分为主；当冲击力大小相同时，其能量较大，应力波衰减较慢，适合于获得长桩桩底信号或下部缺陷的识别。锤头较轻或刚度较大时，冲击入射波脉冲较窄，含高频成分较多；冲击力大小相同时，虽其能量较小并加剧大直径桩的尺寸效应影响，但较适宜于桩身浅部缺陷的识别及定位。

5 稳态激振在每个设定的频率下激振时，为避免频率变换过程产生失真信号，应具有足够的稳定激振时间，以获得稳定的激振力和响应信号，并根据桩径、桩长及桩周土约束情况调整激振力。稳态激振器的安装方式及好坏对测试结果起着很大的作用。为保证激振系统本身在测试频率范围内不至于出现谐振，激振器的安装宜采用柔性悬挂装置，同时在测试过程中应避免激振器出现横向振动。

8.3.4 桩径增大时，桩截面各部位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结构完整性情况。每个检测点有效信号数不宜少于3个，通过叠加平均提高信噪比。

应合理选择测试系统量程范围，特别是传感器的量程范围，避免信号波峰削波。

8.4 检测数据的分析与判定

8.4.1 为分析不同时段或频段信号所反映的桩身阻抗信息、核验桩底信号并确定桩身缺陷位置，需要确定桩身波速及其平均值

c_m 。波速除与桩身混凝土强度有关外，还与混凝土的骨料品种、粒径级配、密度、水灰比、成桩工艺（导管灌注、振捣、离心）等因素有关。波速与桩身混凝土强度整体趋势上呈正相关关系，即强度高波速高，但二者并不为一一对应关系。在影响混凝土波速的诸多因素中，强度对波速的影响并非首位。中国建筑科学研究院的试验资料表明：采用普硅水泥，粗骨料相同，不同试配强度及龄期强度相差 1 倍时，声速变化仅为 10% 左右；根据辽宁省建设科学研究院的试验结果：采用矿渣水泥，28 天强度为 3 天强度的 4~5 倍，一维波速增加 20%~30%；分别采用碎石和卵石并按相同强度等级试配，发现以碎石为粗骨料的混凝土一维波速比卵石高约 13%。天津市政研究院也得到类似辽宁院的规律，但有一定离散性，即同一组（粗骨料相同）混凝土试配强度不同的杆件或试块，同龄期强度低约 10%~15%，但波速或声速略有提高。也有资料报导正好相反，例如福建省建筑科学研究院的试验资料表明：采用普硅水泥，按相同强度等级试配，骨料为卵石的混凝土声速略高于骨料为碎石的混凝土声速。因此，不能依据波速去评定混凝土强度等级，反之亦然。

虽然波速与混凝土强度二者并不呈一一对应关系，但考虑到二者整体趋势上呈正相关关系，且强度等级是现场最易得到的参考数据，故对于超长桩或无法明确找出桩底反射信号的桩，可根据本地区经验并结合混凝土强度等级，综合确定波速平均值，或利用成桩工艺、桩型相同且桩长相对较短并能够找出桩底反射信号的桩确定的波速，作为波速平均值。此外，当某根桩露出地面且有一定的高度时，可沿桩长方向间隔一可测量的距离段安置两个测振传感器，通过测量两个传感器的响应时差，计算该桩段的波速值，以该值代表整根桩的波速值。

8.4.2 本方法确定桩身缺陷的位置是有误差的，原因是：缺陷位置处 Δt_x 和 Δf 存在读数误差；采样点数不变时，提高采样频率降低了频域分辨率；波速确定的方式及用抽样所得平均值 c_m 替代某具体桩身段波速带来的误差。其中，波速带来的缺陷位置

误差 $\Delta x = x \cdot \Delta c / c$ ($\Delta c / c$ 为波速相对误差) 影响最大, 如波速相对误差为 5%, 缺陷位置为 10m 时, 则误差有 0.5m; 缺陷位置为 20m 时, 则误差有 1.0m。

对瞬态激振还存在另一种误差, 即锤击后应力波主要以纵波形式直接沿桩身向下传播, 同时在桩顶又主要以表面波和剪切波的形式沿径向传播。因锤击点与传感器安装点有一定的距离, 接收点测到的人射峰总比锤击点处滞后, 考虑到表面波或剪切波的传播速度比纵波低得多, 特别对大直径桩或直径较大的管桩, 这种从锤击点起由近及远的时间线性滞后将明显增加。而波从缺陷或桩底以一维平面应力波反射回桩顶时, 引起的桩顶面径向各点的质点运动却在同一时刻都是相同的, 即不存在由近及远的时间滞后问题。所以严格地讲, 按入射峰-桩底反射峰确定的波速将比实际的高, 若按“正确”的桩身波速确定缺陷位置将比实际的浅, 若能测到 $4L/c$ 的二次桩底反射, 则由 $2L/c$ 至 $4L/c$ 时段确定的波速是正确的。

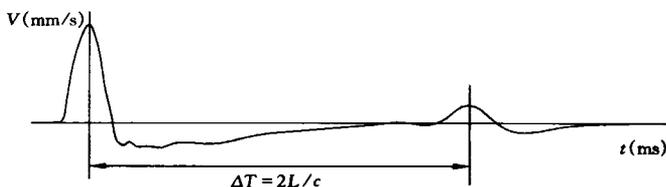


图 2 完整桩典型时域信号特征

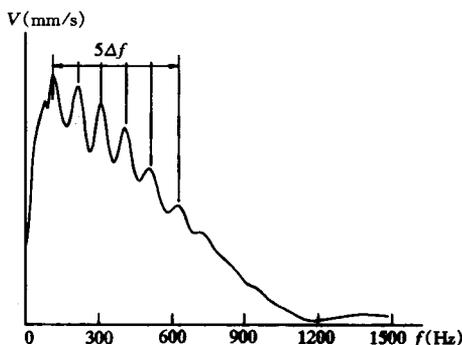


图 3 完整桩典型速度幅频信号特征

8.4.3 表 8.4.3 列出了根据实测时域或幅频信号特征、所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。

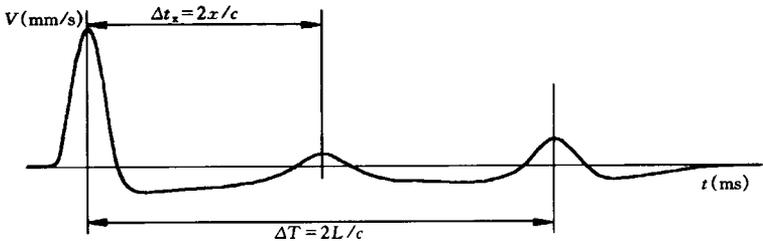


图 4 缺陷桩典型时域信号特征

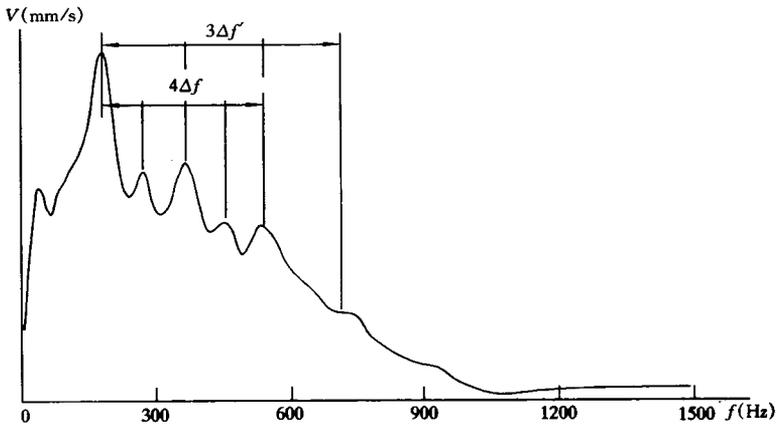


图 5 缺陷桩典型速度幅频信号特征

完整桩分析判定，从时域信号或频域曲线特征表现的信息判定相对来说较简单直观，而分析缺陷桩信号则复杂些，有的信号的确是因施工质量缺陷产生的，但也有是因设计构造或成桩工艺本身局限导致的不连续断面产生的，例如预制打入桩的接缝，灌注桩的逐渐扩径再缩回原桩径的变截面，地层硬夹层影响等。因此，在分析测试信号时，应仔细分清哪些是缺陷波或缺陷谐振峰，哪些是因桩身构造、成桩工艺、土层影响造成的类似缺陷信

号特征。另外，根据测试信号幅值大小判定缺陷程度，除受缺陷程度影响外，还受桩周土阻尼大小及缺陷所处的深度位置影响。相同程度的缺陷因桩周土岩性不同或缺陷埋深不同，在测试信号中其幅值大小各异。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、地质条件、施工情况结合当地经验综合分析判断；不仅如此，还应结合基础和上部结构型式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，不宜单凭测试信号定论。

桩身缺陷的程度及位置，除直接从时域信号或幅频曲线上判定外，还可借助其他计算方式及相关测试量作为辅助的分析手段：

1 时域信号曲线拟合法：将桩划分为若干单元，以实测或模拟的力信号作为已知条件，设定并调整桩身阻抗及土参数，通过一维波动方程数值计算，计算出速度时域波形并与实测的波形进行反复比较，直到两者吻合程度达到满意为止，从而得出桩身阻抗的变化位置及变化量大小。该计算方法类似于高应变的曲线拟合法。

2 根据速度幅频曲线或导纳曲线中基频位置，利用实测导纳值与计算导纳值相对高低、实测动刚度的相对高低，进行判断。此外，还可对速度幅频信号曲线进行二次谱分析。

图6为完整桩的速度导纳曲线。计算导纳值 N_c 、实测导纳值 N_m 和动刚度 K_d 分别按下列公式计算：

$$\text{导纳理论计算值：} \quad N_c = \frac{1}{\rho c_m A} \quad (3)$$

$$\text{实测导纳几何平均值：} \quad N_m = \sqrt{P_{\max} \cdot Q_{\min}} \quad (4)$$

$$\text{动刚度：} \quad K_d = \frac{2\pi f_m}{\left| \frac{V}{F} \right|_m} \quad (5)$$

式中 ρ ——桩材质量密度 (kg/m^3)；

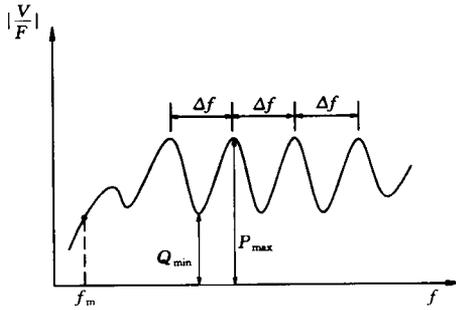


图 6 均匀完整桩的速度导纳曲线图

c_m ——桩身波速平均值 (m/s);

A ——设计桩身截面积 (m^2);

P_{max} ——导纳曲线上谐振波峰的最大值 ($m/s \cdot N^{-1}$);

Q_{min} ——导纳曲线上谐振波谷的最小值 ($m/s \cdot N^{-1}$);

f_m ——导纳曲线上起始近似直线段上任一频率值 (Hz);

$\left| \frac{V}{F} \right|_m$ ——与 f_m 对应的导纳幅值 ($m/s \cdot N^{-1}$)。

理论上, 实测导纳值 N_m 、计算导纳值 N_c 和动刚度 K_d 就桩身质量好坏而言存在一定的相对关系: 完整桩, N_m 约等于 N_c 、 K_d 值正常; 缺陷桩, N_m 大于 N_c 、 K_d 值低, 且随缺陷程度的增加其差值增大; 扩径桩, N_m 小于 N_c 、 K_d 值高。

值得说明, 由于稳态激振过程在某窄小频带上激振, 其能量集中、信噪比高、抗干扰能力强等特点, 所测的导纳曲线、导纳值及动刚度比采用瞬态激振方式重复性好、可信度较高。

表 8.4.3 没有列出桩身无缺陷或有轻微缺陷但无桩底反射这种信号特征的类别划分。事实上, 测不到桩底信号这种情况受多种因素和条件影响, 例如:

- 软土地区的超长桩, 长径比很大;
- 桩周土约束很大, 应力波衰减很快;
- 桩身阻抗与持力层阻抗匹配良好;

- 桩身截面阻抗显著突变或沿桩长渐变；
- 预制桩接头缝隙影响。

其实，当桩侧和桩端阻力很强时，高应变法同样也测不出桩底反射。所以，上述原因造成无桩底反射也属正常。此时的桩身完整性判定，只能结合经验、参照本场地和本地区的同类型桩综合分析或采用其他方法进一步检测。

对设计条件有利的扩径灌注桩，不应判定为缺陷桩。

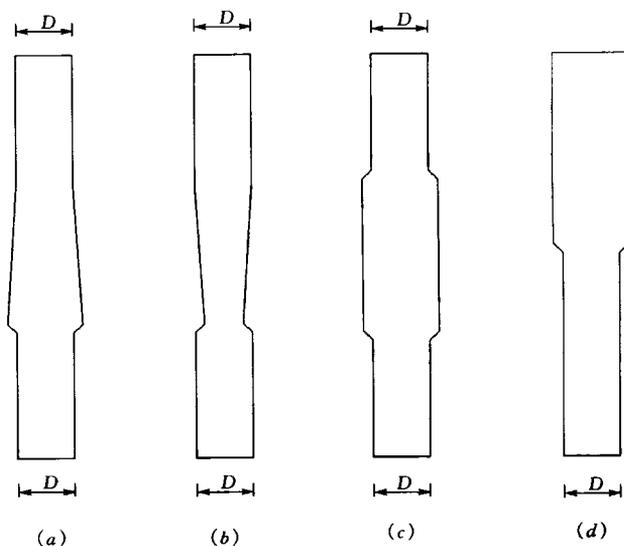


图 7 混凝土灌注桩截面（阻抗）变化示意图

(a) 逐渐扩径；(b) 逐渐缩颈；(c) 中部扩径；(d) 上部扩径

8.4.4 当灌注桩桩截面形态呈现如图 7 情况时，桩身截面（阻抗）渐变或突变，在阻抗突变处的一次或二次反射常表现为类似明显扩径、严重缺陷或断桩的相反情形，从而造成误判。因此，可结合施工、地层情况综合分析加以区分；无法区分时，应结合其他检测方法综合判定。当桩身存在不止一个阻抗变化截面（包括上述桩身某一范围阻抗渐变的情况）时，由于各阻抗变化截面

的一次和多次反射波相互迭加，除距桩顶第一阻抗变化截面的一次反射能辨认外，其后的反射信号可能变得十分复杂，难于分析判断。此时，宜按下列规定采用实测曲线拟合法进行辅助分析：

- 1 信号不得因尺寸效应、测试系统频响等影响产生畸变。
- 2 桩顶横截面尺寸应按现场实际测量结果确定。
- 3 通过同条件下、截面基本均匀的相邻桩曲线拟合，确定引起应力波衰减的桩土参数取值。

4 宜采用实测力波形作为边界条件输入。

8.4.5 对嵌岩桩，桩底沉渣和桩端持力层是否为软弱层、溶洞等是直接关系到该桩能否安全使用的关键因素。虽然本方法不能确定桩底情况，但理论上可以将嵌岩桩桩端视为杆件的固定端，并根据桩底反射波的方向判断桩端端承效果，也可通过导纳值、动刚度的相对高低提供辅助分析。采用本方法判定桩端嵌固效果差时，应采用静载试验或钻芯法等其他检测方法核验桩端嵌岩情况，确保基桩使用安全。

8.4.7 人员水平低、测试过程和测量系统各环节出现异常、人为信号再处理影响信号真实性等，均直接影响结论判断的正确性，只有根据原始信号曲线才能鉴别。

9 高应变法

9.1 适用范围

9.1.1 高应变法的主要功能是判定单桩竖向抗压承载力是否满足设计要求。这里所说的承载力是指在桩身强度满足桩身结构承载力的前提下，得到的桩周岩土对桩的抗力（静阻力）。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，否则不能得到承载力的极限值，只能得到承载力检测值。

与低应变法检测的快捷、廉价相比，高应变法检测桩身完整性虽然是附带性的，但由于其激励能量和检测有效深度大的优点，特别在判定桩身水平整合型缝隙、预制桩接头等缺陷时，能够在查明这些“缺陷”是否影响竖向抗压承载力的基础上，合理判定缺陷程度。当然，带有普查性的完整性检测，采用低应变法更为恰当。

高应变检测技术是从打入式预制桩发展起来的，试打桩和打桩监控属于其特有的功能，是静载试验无法做到的。

9.1.2 灌注桩的截面尺寸和材质的非均匀性、施工的隐蔽性（干作业成孔桩除外）及由此引起的承载力变异性普遍高于打入式预制桩，导致灌注桩检测采集的波形质量低于预制桩，波形分析中的不确定性和复杂性又明显高于预制桩。与静载试验结果对比，灌注桩高应变检测判定的承载力误差也如此。因此，积累灌注桩现场测试、分析经验和相近条件下的可靠对比验证资料，对确保检测质量尤其重要。

9.1.3 除嵌入基岩的大直径桩和纯摩擦型大直径桩外，大直径灌注桩、扩底桩（墩）由于尺寸效应，通常其静载 $Q-s$ 曲线表现为缓变型，端阻力发挥所需的位移很大。另外，在土阻力相同条件下，桩身直径的增加使桩身截面阻抗（或桩的惯性）与直径成

平方的关系增加，锤与桩的匹配能力下降。而多数情况下高应变检测所用锤的重量有限，很难在桩顶产生较长持续时间的作用荷载，达不到使土阻力充分发挥所需的位移量。另一原因如第 9.1.2 条条文说明所述。

9.2 仪器设备

9.2.1 本条对仪器的主要技术性能指标要求是按建筑工业行业标准《基桩动测仪》提出的，比较适中，大部分型号的国产和进口仪器能满足。由于动测仪器的使用环境恶劣，所以仪器的环境性能指标和可靠性也很重要。本条对加速度计的量程未做具体规定，原因是针对不同类型的桩，各种因素影响使最大冲击加速度变化很大。建议根据实测经验来合理选择，宜使选择的量程大于预估最大冲击加速度值的一倍以上。如对钢桩，宜选择 $20000 \sim 30000\text{m/s}^2$ 量程的加速度计。

9.2.2 导杆式柴油锤荷载上升时间过于缓慢，容易造成速度响应信号失真。

9.2.3 分片组装式锤的单片或强夯锤，下落时平稳性差且不易导向，更易造成严重锤击偏心并影响测试质量。因此规定锤体的高径（宽）比不得小于 1。

自由落锤安装加速度计测量桩顶锤击力的依据是牛顿第二和第三定律。其成立条件是同一时刻锤体内各质点的运动和受力无差异，也就是说，虽然锤为弹性体，只要锤体内部不存在波传播的不均匀性，就可视锤为一刚体或具有一定质量的质点。波动理论分析结果表明：当沿正弦波传播方向的介质尺寸小于正弦波波长的 $1/10$ 时，可认为在该尺寸范围内无波传播效应，即同一时刻锤的受力和运动状态均匀。除钢桩外，较重的自由落锤在桩身产生的力信号中有效频率分量（占能量的 90% 以上）在 200Hz 以内，超过 300Hz 后可忽略不计。按最不利估计，对力信号有贡献的高频分量波长也超过 15m。所以，在大多数采用自由落锤的场合，牛顿第二定律能较严格地成立。规定锤体需整体铸造且高径

(宽) 比不大于 1.5 正是为了避免分片锤体在内部相互碰撞和波传播效应造成的锤内部运动状态不均匀。这种方式与在桩头附近的桩侧表面安装应变式传感器的测力方式相比, 优缺点是:

1 避免了桩头损伤和安装部位混凝土差导致的测力失败以及应变式传感器的经常损坏。

2 避免了因混凝土非线性造成的力信号失真(混凝土受压时, 理论上讲是对实测力值放大, 是不安全的)。

3 直接测定锤击力, 即使混凝土波速、弹性模量改变, 也无需修正。

4 测量响应的加速度计只能安装在距桩顶较近的桩侧表面, 尤其不能安装在桩头变阻抗截面以下的桩身上。

5 桩顶只能放置薄层桩垫, 不能放置尺寸和质量较大的桩帽(替打)。

6 需采用重锤或软锤垫以减少锤上的高频分量。但因锤高度一般不大于 1.5m, 则最大适宜锤重可能受到限制, 如直径 1.0m、高 1.5m 的圆柱形锤仅为 92kN。

7 由于基线修正方式的不同, 锤体加速度测量可能有 $1g$ (g 为重力加速度) 的误差。大锤上的测试效果可能比小锤差。

9.2.4 本条对锤重选择与原《基桩高应变动力检测规程》不同, 给出的是一个范围。主要理由如下:

1 桩较长或桩径较大时, 一般使侧阻、端阻充分发挥所需位移大。

2 桩是否容易被“打动”取决于桩身“广义阻抗”的大小。广义阻抗与桩周土阻力大小和桩身截面波阻抗大小两个因素有关。随着桩直径增加, 波阻抗的增加通常快于土阻力, 仍按预估极限承载力的 1% 选取锤重, 将使锤对桩的匹配能力下降。因此, 不仅从土阻力, 而从多方面考虑提高锤重的措施是更科学的做法。本条规定的锤重选择为最低限值。

9.2.5 重锤对桩冲击使桩周土产生振动, 在受检桩附近架设的基准梁也将受影响, 导致桩的贯入度测量结果不可靠。也有采用

加速度信号两次积分得到的最终位移作为实测贯入度，虽然最方便，但可能存在下列问题：

1 由于信号采集时段短，信号采集结束时桩的运动尚未停止，以柴油锤打长桩时为甚。

2 加速度计的质量优劣影响积分精度，零漂大和低频响应差（时间常数小）时极为明显。

所以，对贯入度测量精度要求较高时，宜采用精密水准仪等光学仪器测定。

9.3 现场检测

9.3.1 承载力时间效应因地而异，以沿海软土地区最显著。成桩后，若桩周岩土无隆起、侧挤、沉陷、软化等影响，承载力随时间增长。工期紧休止时间不够时，除非承载力检测值已满足设计要求，否则应休止到满足表 3.2.6 规定的时间为止。

锤击装置垂直、锤击平稳对中、桩头加固和加设桩垫，是为了减小锤击偏心和避免击碎桩头；在距桩顶规定的距离下的合适部位对称安装传感器，是为了减小锤击在桩顶产生的应力集中和对偏心进行补偿。所有这些措施都是为保证测试信号质量提出的。

9.3.2 采样时间间隔为 $100\mu\text{s}$ ，对常见的工业与民用建筑的桩是合适的。但对于超长桩，例如桩长超过 60m，采样时间间隔可放宽为 $200\mu\text{s}$ ，当然也可增加采样点数。

应变式传感器直接测到的是其安装面上的应变，并按下式换算成锤击力：

$$F = A \cdot E \cdot \epsilon \quad (6)$$

式中 F ——锤击力；

A ——测点处桩截面积；

E ——桩材弹性模量；

ϵ ——实测应变值。

显然，锤击力的正确换算依赖于测点处设定的桩参数是否符合

合实际。另一需注意的问题是：计算测点以下原桩身的阻抗变化、包括计算的桩身运动及受力大小，都是以测点处桩头单元为相对“基准”的。

测点下桩长是指桩头传感器安装点至桩底的距离，一般不包括桩尖部分。

对于普通钢桩，桩身波速可直接设定为 5120m/s。对于混凝土桩，桩身波速取决于混凝土的骨料品种、粒径级配、成桩工艺（导管灌注、振捣、离心）及龄期，其值变化范围大多为 3000 ~ 4500m/s。混凝土预制桩可在沉桩前实测无缺陷桩的桩身平均波速作为设定值；混凝土灌注桩应结合本地区混凝土波速的经验值或同场地已知值初步设定，但在计算分析前，应根据实测信号进行修正。

9.3.3 本条说明如下：

1 传感器外壳与仪器外壳共地，测试现场潮湿，传感器对地未绝缘，交流供电时常出现 50Hz 干扰，解决办法是良好接地或改用直流供电。

2 根据波动理论分析：若视锤为一刚体，则桩顶的最大锤击应力只与锤冲击桩顶时的初速度有关，落距越高，锤击应力和偏心越大，越容易击碎桩头。轻锤高击并不能有效提高桩锤传递给桩的能量和增大桩顶位移，因为力脉冲作用持续时间不仅与锤垫有关，还主要与锤重有关；锤击脉冲越窄，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）越明显，实测波形中土的动阻力影响加剧，而与位移相关的静土阻力呈明显的分段发挥态势，使承载力的测试分析误差增加。事实上，若将锤重增加到预估单桩极限承载力的 5% ~ 10% 以上，则可得到与静动法（STATNOMIC 法）相似的长持续力脉冲作用。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”是保障高应变法检测承载力准确性的基本原则，这与低应变法充分利用波传播效应（窄脉冲）准确探测缺陷位置有着概念上的区别。

3 打桩全过程监测是指预制桩施打开始后，从桩锤正常爆发起跳直到收锤为止的全部过程测试。

4 高应变试验成功的关键是信号质量以及信号中的信息是否充分。所以应根据每锤信号质量以及动位移、贯入度和大致的土阻力发挥情况，初步判别采集到的信号是否满足检测目的的要求。同时，也要检查混凝土桩锤击拉、压应力和缺陷程度大小，以决定是否进一步锤击，以免桩头或桩身受损。自由落锤锤击时，锤的落距应由低到高；打入式预制桩则按每次采集一阵（10击）的波形进行判别。

5 检测工作现场情况复杂，经常产生各种不利影响。为确保采集到可靠的数据，检测人员应能正确判断波形质量，熟练地诊断测量系统的各类故障，排除干扰因素。

9.3.4 贯入度的大小与桩尖刺入或桩端压密塑性变形量相对应，是反映桩侧、桩端土阻力是否充分发挥的一个重要信息。贯入度小，即通常所说的“打不动”，使检测得到的承载力低于极限值。本条是从保证承载力分析计算结果的可靠性出发，给出的贯入度合适范围，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。贯入度大且桩身无缺陷的波形特征是 $2L/c$ 处桩底反射强烈，其后的土阻力反射或桩的回弹不明显。贯入度过大造成的桩周土扰动大，高应变承载力分析所用的土的力学模型，对真实的桩-土相互作用的模拟接近程度变差。据国内发现的一些实例和国外的统计资料：贯入度较大时，采用常规的理想弹塑性土阻力模型进行实测曲线拟合分析，不少情况下预示的承载力明显低于静载试验结果，统计结果离散性很大！而贯入度较小，甚至桩几乎未被打动时，静动对比的误差相对较小，且统计结果的离散性也不大。若采用考虑桩端土附加质量的能量耗散机制模型修正，与贯入度小时的承载力提高幅度相比，会出现难以预料的承载力成倍提高。原因是：桩底反射强意味着桩端的运动加速度和速度强烈，附加土质量产生的惯性力和动阻力恰好分别与加速度和速度成正比。可以想见，对于长细比较大、摩阻力较强的摩擦

型桩，上述效应就不会明显。此外，6mm贯入度只是一个统计参考值，本章第9.4.7条第3款已针对此情况做了具体规定。

9.4 检测数据的分析与判定

9.4.1 从一阵锤击信号中选取分析用信号时，除要考虑有足够的锤击能量使桩周岩土阻力充分发挥外，还应注意下列问题：

- 1 连续打桩时桩周土的扰动及残余应力。
- 2 锤击使缺陷进一步发展或拉应力使桩身混凝土产生裂隙。
- 3 在桩易打或难打以及长桩情况下，速度基线修正带来的误差。

4 对桩垫过厚和柴油锤冷锤信号，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。

9.4.2 可靠的信号是得出正确分析计算结果的基础。除柴油锤施打的长桩信号外，力的时程曲线应最终归零。对于混凝土桩，高应变测试信号质量不但受传感器安装好坏、锤击偏心程度和传感器安装面处混凝土是否开裂的影响，也受混凝土的不均匀性和非线性的影响。这种影响对应变式传感器测得的力信号尤其敏感。混凝土的非线性一般表现为：随应变的增加，弹性模量减小，并出现塑性变形，使根据应变换算到的力值偏大且力曲线尾部不归零。本规范所指的锤击偏心相当于两侧力信号之一与力平均值之差的绝对值超过平均值的33%。通常锤击偏心很难避免，因此严禁用单侧力信号代替平均力信号。

9.4.3 桩底反射明显时，桩身平均波速也可根据速度波形第一峰起升沿的起点和桩底反射峰的起点之间的时差与已知桩长值确定。对桩底反射峰变宽或有水平裂缝的桩，不应根据峰与峰间的时差来确定平均波速。桩较短且锤击力波上升缓慢时，可采用低应变法确定平均波速。

9.4.4 通常，当平均波速按实测波形改变后，测点处的原设定波速也按比例线性改变，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 ($V = c \cdot \epsilon$) 的单位存储。若模量随波速改变后, 仪器不能自动修正以速度为单位存储的力值, 则应对原始实测力值校正。

9.4.5 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。但在以下几种情况下比例失调属于正常:

- 1 桩浅部阻抗变化和土阻力影响。
- 2 采用应变式传感器测力时, 测点处混凝土的非线性造成力值明显偏高。
- 3 锤击力波上升缓慢或桩很短时, 土阻力波或桩底反射波的影响。

除第 2 种情况减小力值, 可避免计算的承载力过高外, 其他情况的随意比例调整均是对实测信号的歪曲, 并产生虚假的结果。因此, 禁止将实测力或速度信号重新标定。这一点必须引起重视, 因为有些仪器具有比例自动调整功能。

9.4.6 高应变分析计算结果的可靠性高低取决于动测仪器、分析软件和人员素质三个要素。其中起决定作用的是具有坚实理论基础和丰富实践经验的高素质检测人员。高应变法之所以有生命力, 表现在高应变信号不同于随机信号的可解释性——即使不采用复杂的数学计算和提炼, 只要检测波形质量有保证, 就能定性地反映桩的承载性状及其他相关的动力学问题。在建设部工程桩动测资质复查换证过程中, 发现不少检测报告中, 对波形的解释与分析计算已达到盲目甚至是滥用的地步。对此, 如果不从提高人员素质入手加以解决, 这种状况的改观显然仅靠技术规范以及仪器和软件功能的增强是无法做到的。因此, 承载力分析计算前, 应有高素质的人员对信号进行定性检查和正确判断。

9.4.7 当出现本条所述四款情况时, 因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。本条第 3、4 款反映的代表性波形见图 8。原因解释参见第 9.3.4 条的条文说明。由图 9 可见, 静载验证试验尚未压至破坏, 但高应变测试的锤重、贯入度却“符合”要求。当采用波形拟合法分析承

载力时，由于承载力比按地质报告估算的低很多，除采用直接法验证外，不能主观臆断或采用能使拟合的承载力大幅提高的桩-土模型及其参数。

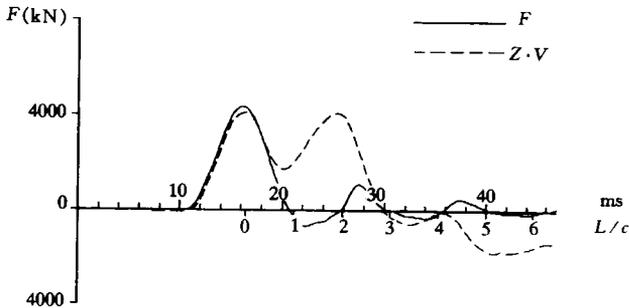


图 8 灌注桩高应变实测波形

注： $\phi 800\text{mm}$ 钻孔灌注桩，桩端持力层为全风化花岗片麻岩，测点下桩长 16m。采用 60kN 重锤，先做高应变检测，后做静载验证检测。

9.4.8 凯司法与实测曲线拟合法在计算承载力上的本质区别：前者在计算极限承载力时，单击贯入度与最大位移是参考值，计算过程与它们无关。另外，凯司法承载力计算公式是基于以下三个假定推导出的：

- 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 $t_2 = t_1 + 2L/c$ 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。

公式中的唯一未知数——凯司法无量纲阻尼系数 J_c 。定义为仅与桩端土性有关，一般遵循随土中细粒含量增加阻尼系数增大的规律。 J_c 的取值是否合理在很大程度上决定了计算承载力的准确性。所以，缺乏同条件下的静动对比校核，或大量相近条件

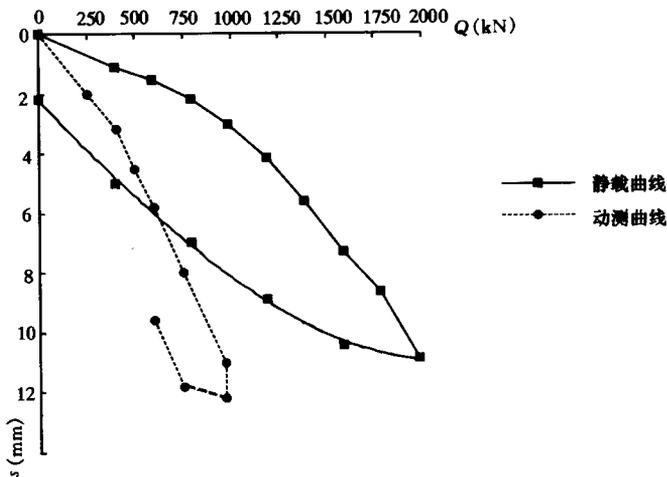


图9 静载和动载模拟的 $Q-s$ 曲线

下的对比资料时，将使其使用范围受到限制。当贯入度达不到规定值或不满足上述三个假定时， J_c 值实际上变成了一个无明确意义的综合调整系数。特别值得一提的是灌注桩，也会在同一工程、相同桩型及持力层时，可能出现 J_c 取值变异过大的情况。为防止凯司法的不合理应用，规定应采用静动对比或实测曲线拟合法校核 J_c 值。

9.4.9 由于式 (9.4.9-1) 给出的 R_c 值与位移无关，仅包含 $t_2 = t_1 + 2L/c$ 时刻之前所发挥的土阻力信息，通常除桩长较短的摩擦型桩外，土阻力在 $2L/c$ 时刻不会充分发挥，尤以端承型桩显著。所以，需要采用将 t_1 延时求出承载力最大值的最大阻力法 (RMX 法)，对与位移相关的土阻力滞后 $2L/c$ 发挥的情况进行提高修正。

桩身在 $2L/c$ 之前产生较强的向上回弹，使桩身从顶部逐渐向下产生土阻力卸载（此时桩的中下部土阻力属于加载）。这对于桩较长、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）。

RMX法和RSU法判定承载力，体现了高应变法波形分析的基本概念——应充分考虑与位移相关的土阻力发挥状况和波传播效应，这也是实测曲线拟合法的精髓所在。另外，还有几种凯司法的子方法可在积累了成熟经验后采用。它们是：

1 在桩尖质点运动速度为零时，动阻力也为零，此时有两种与 J_c 无关的计算承载力“自动”法，即RAU法和RA2法。前者适用于桩侧阻力很小的情况，后者适用于桩侧阻力适中的场合。

2 通过延时求出承载力最小值的最小阻力法（RMN法）。

9.4.10 实测曲线拟合法是通过波动问题数值计算，反演确定桩和土的力学模型及其参数值。其过程为：假定各桩单元的桩和土力学模型及其模型参数，利用实测的速度（或力、上行波、下行波）曲线作为输入边界条件，数值求解波动方程，反算桩顶的力（或速度、下行波、上行波）曲线。若计算的曲线与实测曲线不吻合，说明假设的模型及参数不合理，有针对性地调整模型及参数再行计算，直至计算曲线与实测曲线（以及贯入度的计算值与实测值）的吻合程度良好且不易进一步改善为止。虽然从原理上讲，这种方法是客观唯一的，但由于桩、土以及它们之间的相互作用等力学行为的复杂性，实际运用时还不能对各种桩型、成桩工艺、地质条件，都能达到十分准确地求解桩的动力学和承载力问题的效果。所以，本条针对该法应用中的关键技术问题，做了具体阐述和规定：

1 关于桩与土模型：（1）目前已有成熟使用经验的土的静阻力模型为理想弹-塑性或考虑土体硬化或软化的双线性模型；模型中有两个重要参数——土的极限静阻力 R_u 和土的最大弹性位移 s_q ，可以通过静载试验（包括桩身内力测试）来验证。在加载阶段，土体变形小于或等于 s_q 时，土体在弹性范围工作；变形超过 s_q 后，进入塑性变形阶段（理想弹-塑性时，静阻力达

到 R_0 后不再随位移增加而变化)。对于卸载阶段, 同样要规定卸载路径的斜率和弹性位移限。(2) 土的动阻力模型一般习惯采用与桩身运动速度成正比的线性粘滞阻尼, 带有一定的经验性, 且不易直接验证。(3) 桩的力学模型一般为一维杆模型, 单元划分应采用等时单元 (实际为连续模型或特征线法求解的单元划分模式), 即应力波通过每个桩单元的时间相等, 由于没有高阶项的影响, 计算精度高。(4) 桩单元除考虑 A 、 E 、 c 等参数外, 也可考虑桩身阻尼和裂隙。另外, 也可考虑桩底的缝隙、开口桩或异形桩的土塞、残余应力影响和其他阻尼形式。(5) 所用模型的物理力学概念应明确, 参数取值应能限定; 避免采用可使承载力计算结果产生较大变异的桩-土模型及参数。

2 拟合时应根据波形特征, 结合施工和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取舍。正确判断取舍条件的要点是参数取值应在岩土工程的合理范围内。

3 本款考虑两点原因: 一是自由落锤产生的力脉冲持续时间通常不超过 20ms (除非采用很重的落锤), 但柴油锤信号在主峰过后的尾部仍能产生较长的低幅值延续; 二是与位移相关的总静阻力一般会不同程度地滞后于 $2L/c$ 发挥, 当端承型桩的端阻力发挥所需位移很大时, 土阻力发挥将产生严重滞后, 因此规定 $2L/c$ 后延时足够的时间, 使曲线拟合能包含土阻力响应区段的全部土阻力信息。

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, 则给出的承载力结果只能验证岩土阻力发挥的最低程度。

5 土阻力响应区是指波形上呈现的静土阻力信息较为突出的时间段。所以本条特别强调此区段的拟合质量, 避免只重波头尾, 忽视中间土阻力响应区段拟合质量的错误做法, 并通过合

理的加权方式计算总的拟合质量系数，突出其影响。

6 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。

9.4.11 高应变法动测承载力检测值多数情况下不会与静载试验桩的明显破坏特征或产生较大的桩顶沉降相对应，总趋势是沉降量偏小。为了与静载的极限承载力相区别，称为“本方法得到的承载力或动测承载力”。这里需要强调指出：验收检测中，单桩静载试验常因加荷量或设备能力限制，而做不出真正的试桩极限承载力。于是一组试桩往往因某一根桩的极限承载力达不到设计要求的特征值 2 倍，使一组试桩的承载力统计平均值不满足设计要求。动测承载力则不同，可能出现部分桩的承载力远高于承载力特征值的 2 倍。所以，即使个别桩的承载力不满足设计要求，但“高”和“低”取平均后仍能满足设计要求。为了避免可能高估承载力的危险，不得将极差超过 30% 的“高值”参与统计平均。

9.4.12 高应变法检测桩身完整性具有锤击能量大，可对缺陷程度定量计算，连续锤击可观察缺陷的扩大和逐步闭合情况等优点。但和低应变法一样，检测的仍是桩身阻抗变化，一般不宜判定缺陷性质。在桩身情况复杂或存在多处阻抗变化时，可优先考虑用实测曲线拟合法判定桩身完整性。

式 (9.4.12-1) 适用于截面基本均匀桩的桩顶下第一个缺陷的程度定量计算。当有轻微缺陷，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：

$$\delta_w = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \left(V - \frac{F - R_x}{Z} \right) \cdot dt \quad (7)$$

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

高应变法锤击的荷载上升时间一般不小于 2ms，因此对桩身浅部缺陷位置的判定存在盲区，也无法根据式 (9.4.12-1) 来判定缺陷程度。只能根据力和速度曲线的比例失调程度来估计浅部

缺陷程度，不能定量给出缺陷的具体部位，尤其是锤击力波上升非常缓慢时，还大量耦合有土阻力的影响。对浅部缺陷桩，宜用低应变法检测并进行缺陷定位。

9.4.14 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，打桩时侧阻和端阻虽小，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迭加，在桩身某一部位产生净的拉应力。当拉应力强度超过混凝土抗拉强度时，引起桩身拉裂。开裂部位一般发生在桩的中上部，且桩愈长或锤击力持续时间愈短，最大拉应力部位就愈往下移。

有时，打桩过程中会突然出现贯入度骤减或拒锤，一般是碰上硬层（基岩，孤石，漂石、卵石等碎石土层）。继续施打会造成桩身压应力过大而破坏。此时，最大压应力部位不一定出现在桩顶，而是接近桩端的部位。

9.4.15 本条解释同 8.4.7 条。

10 声波透射法

10.1 适用范围

10.1.1 声波透射法是利用声波的透射原理对桩身混凝土介质状况进行检测，因此仅适用于在灌注成型过程中已经预埋了两根或两根以上声测管的基桩。

10.2 仪器设备

10.2.1 声波换能器有效工作面长度指起到换能作用的部分的实际轴向尺寸，该长度过大将夸大缺陷实际尺寸并影响测试结果。

提高换能器谐振频率，可使其外径减少到 30mm 以下，利于换能器在声测管中升降顺畅或减小声测管直径。但因声波发射频率的提高，使长距离声波穿透能力下降。所以，本规范仍推荐目前普遍采用的 30 ~ 50kHz 的谐振频率范围。

10.3 现场检测

10.3.2 标定法测定仪器系统延迟时间的方法是将发射、接收换能器平行悬于清水中，逐次改变点源距离并测量相应声时，记录若干点的声时数据并作线性回归的时距曲线：

$$t = t_0 + b \cdot l \quad (8)$$

式中 b ——直线斜率 ($\mu\text{s}/\text{mm}$)；
 l ——换能器表面净距离 (mm)；
 t ——声时 (μs)；
 t_0 ——仪器系统延迟时间 (μs)。

按下式计算声测管及耦合水层声时修正值：

$$t' = \frac{d_1 - d_2}{v_t} + \frac{d_2 - d'}{v_w} \quad (9)$$

式中 d_1 ——声测管外径 (mm);
 d_2 ——声测管内径 (mm);
 d' ——换能器外径 (mm);
 v_t ——声测管材料声速 (km/s);
 v_w ——水的声速 (km/s);
 t' ——声测管及耦合水层声时修正值 (μs)。

10.3.3 同一根桩检测时, 强调各检测剖面的声波发射电压和仪器设置参数保持不变, 目的是使各检测剖面的检测结果具有可比性, 便于综合判定。

10.4 检测数据的分析与判定

10.4.2 声速、波幅和主频都是反映桩身质量的声学参数测量值。大量实测经验表明: 声速的变化规律性较强, 在一定程度上反映了桩身混凝土的均匀性, 而波幅的变化较灵敏, 主频在保持测试条件一致的前提下也有一定规律。因此本规范在确定测点声学参数测量值的判据时, 采用了三种不同的方法。

声速异常临界值判据中的临界值 v_c 是参考数理统计学判断异常值的方法, 经过多次试算而得出的。其基本原理如下:

在 n 次测量所得的数据中, 去掉 k 个较小值, 得到容量为 $(n - k)$ 的样本, 取异常测点数据不可能出现的次数为 1, 则对于标准正态分布假设, 可得异常测点数据不可能出现的概率为:

$$P(X \leq -\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{-\lambda} e^{-\frac{x^2}{2}} \cdot dx = \frac{1}{n - k} \quad (10)$$

由 $\phi(\lambda) = 1 / (n - k)$, 在标准正态分布表可得与不同的 $(n - k)$ 相对应的 λ 值, 从而得到表 10.4.2。

每次去掉样本中的最小数据, 计算剩余数据的平均值、标准差, 由表 10.4.2 查得对应的 λ 值。由式 $v_0 = v_m - \lambda \cdot s_x$ 计算异常

判断值并将样本中当时的最小值与之比较；当 v_{n-k} 仍为异常值时，继续去掉最小值重复计算和比较，直至剩余数据中不存在异常值为止。此时， v_0 则为异常判断的临界值 v_c 。

桩身混凝土均匀性可采用离差系数 $C_v = s_x/v_m$ 评价，其中 s_x 和 v_m 分别为 n 个测点的声速标准差和 n 个测点的声速平均值。

10.4.3 当桩身混凝土的质量普遍较差时，可能同时出现下面两种情况：

- 1 检测剖面的 n 个测点声速平均值 v_m 明显偏低。
- 2 n 个测点的声速标准差 s_x 很小。

则由统计计算公式 $v_0 = v_m - \lambda \cdot s_x$ 得出的判断结果可能失效。此时可将各测点声速 v_i 与声速低限值 v_L 比较得出判断结果。

10.4.4 波幅临界值判据式为 $A_{pi} < A_m - 6$ ，即选择当信号首波幅值衰减量为其平均值的一半时的波幅分贝数为临界值，在具体应用中应注意以下几点：

- 1 因波幅的衰减受桩材不均匀性、声波传播路径和点源距离的影响，故应考虑声测管间距较大时波幅分散性而采取适当的调整。

- 2 因波幅的分贝数受仪器、传感器灵敏度及发射能量的影响，故应在考虑这些影响的基础上再采用波幅临界值判据。

- 3 当波幅差异性较大时，应与声速变化及主频变化情况相结合进行综合分析。

10.4.6 实测信号的主频值与诸多影响因素有关，因此仅作辅助声学参数选用。在使用中应保持声波换能器具有单峰的幅频特性和良好的耦合一致性；若采用 FFT 方法计算主频值，还应保证足够的频率分辨率。

10.4.7 桩身完整性判定与分类除依据声速、波幅等变化规律和借助其他辅助方法外，还与诸多复杂因素有关，故在使用中应注意以下几点：

- 1 可结合钻芯法将其结果进行对比，从而得出更符合实际情况的分类。

2 可将实测时程曲线的畸变及频谱、*PSD* 值的变化相结合，进行综合判定与分类。

3 可结合施工工艺和施工记录等有关资料具体分析。