

中国工程建设标准化协会标准

基桩动力检测标准

Standard for dynamic testing of foundation piles

征求意见稿

2025-01-24

中国工程建设标准化协会标准

基桩动力检测标准

Standard for dynamic testing of foundation piles

T/CECS ***-202*

主编单位:

批准单位:

施行日期:

中国工程建设标准化协会公告

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发(2022 年第二批工程建设协会标准制订、修订计划)的通知》(建标协字[2022]40 号)的要求,标准编制组经广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,编制了本标准。

本标准主要技术内容是:1. 总则;2. 术语和符号;3. 基本规定;4. 瞬态低应变完整性试验;5. 动力荷载试验;6. 打桩预控与监控。

本标准由中国工程建设标准化协会检测与试验专业委员会归口管理,由中国建筑科学研究院有限公司负责具体技术内容的解释。在执行过程中如有意见或建议,请寄送中国建筑科学研究院有限公司(地址:北京市北三环东路 30 号,邮编:100013)

主编单位: 中国建筑科学研究院有限公司

广东省建筑科学研究院集团股份有限公司

参编单位:

主要起草人:

主要审查人:

目 次

1	总则	1
2	术语和符号	2
2.1	术语.....	2
2.2	符号.....	4
3	基本规定	6
3.1	一般规定.....	6
3.2	检测工作实施	6
3.3	检测结果评价和检测报告.....	7
4	瞬态低应变完整性试验.....	9
4.1	一般规定.....	9
4.2	仪器设备.....	9
4.3	现场检测.....	9
4.4	检测数据的分析与判定	12
5	动力荷载试验	18
5.1	一般规定	18
5.2	仪器设备	19
5.3	现场检测	22
5.4	检测数据的分析与判定	24
6	打桩预分析与监控	34
6.1	一般规定	34
6.2	打桩预分析	35
6.3	桩身锤击应力监控.....	38
6.4	锤击能量监测	39
6.5	结果报告及建议.....	41
附录 A	混凝土桩桩头处理	42
附录 B	动力荷载试验传感器安装	43
附录 C	替打-缓冲组合体计算	45
本标准用词说明		48
引用标准名录		49
附：条文说明		xx

Contents

1	General Provisions	1
2	Terms and Symbols.....	2
2.1	Terms	2
2.2	Symbols	4
3	Basic Requirements.....	6
3.1	General requirements	6
3.2	Testing procedure s.....	6
3.3	Test results assessment and reporting.....	7
4	Low-strain Impact Integrity Test	9
4.1	General requirements	9
4.2	Equipments	9
4.3	Field test	9
4.4	Test data interpretation	12
5	Dynamic Load Test	18
5.1	General requirements.....	18
5.2	Equipments	19
5.3	Field test	22
5.4	Test data interpretation	24
6	Preliminary Pile Driving Analysis and Installation Monitoring	34
6.1	General requirements	34
6.2	Preliminary pile driving analysis.....	35
6.3	Monitoring of pile driving stresses	38
6.4	Monitoring of energy transferred to the pile	40
6.5	Test reports and recommendations	41
	Appendix A Head Treatment of Concrete Piles	42
	Appendix B Sensor Attachment for Dynamic Load Test	43
	Appendix C Calculation of Anvil-Helmet-Cushion Assembly	45
	Explanation of Wording in This Code	48
	List of Quoted Standards	49
	Explanation of Provisions	xx

1 总 则

- 1.0.1** 为了在基桩动力检测中贯彻执行国家的技术经济政策,做到安全适用、技术先进、数据准确、评价正确,为设计、施工及验收提供可靠依据,制定本标准。
- 1.0.2** 本标准适用于基桩抗压承载力和桩身完整性的检测与评价,以及锤击沉桩施工的预控与监控。
- 1.0.3** 基桩动力检测应根据检测方法的技术特点和适用范围,结合桩基的设计要求与地基条件、桩型及其施工关键控制环节,精心策划并实施现场检测、监测,正确分析和判定检测、监测数据。
- 1.0.4** 基桩动力检测除应符合本标准外,尚应符合国家现行有关标准和现行中国工程建设标准化协会有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 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。

2.1.2 桩身缺陷 pile defects

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

2.1.3 瞬态低应变完整性试验 low strain impact integrity test

采用手锤或其他类似的瞬态激励装置，沿桩轴线方向敲击桩顶，实测桩顶或桩顶附近的速度信号，或在实测桩顶部速度信号的同时，实测桩顶部的力信号，通过信号分析判定桩身完整性。

2.1.4 打桩锤 impact hammer

通过锤芯对桩施加轴向冲击荷载的设备。按锤芯冲击动能的获取方式分为：以空气、蒸汽、液体、柴油燃爆压力驱动或卷扬提升的沉桩施工设备，以及锤芯在某一设定高度脱钩自由下落的动力荷载试验专用冲击加荷设备。

2.1.5 替打-缓冲组合体 anvil-helmet-cushion assembly

一般由冲击垫板、锤垫、桩盔(帽)、桩垫等全部部件或部分部件串联组成，是置于打桩锤和桩顶之间、起传递和缓冲轴向冲击力作用的组合装置，简称替打。

【条文说明】本术语常见的简称是替打(follower)，有时也不加区别的统称为桩帽，不过要注意，这可能与国外的简称不同。在自由落锤专用设备的应用场合，替打可能只包含锤垫，此时的替打变成了无质量替打；如果将送桩器看作是加长的桩帽，它也可以视为替打。

2.1.6 打桩系统 pile driving system

直接与桩顶撞击、由打桩锤和替打串联组成的系统。

2.1.7 溜桩 pile run-away

桩底反射拉力波返回桩顶，出现持续一定时间的桩顶与打桩系统脱离接触的桩体自下沉现象。凭借视觉和听觉，能清晰区分出打桩系统对桩顶的初始撞击和桩顶下沉一定时间后打桩系统对桩顶的二次撞击，此现象称为严重溜桩。

【条文说明】桩底反射拉力波到达桩顶造成桩顶加速下沉，一旦桩顶下沉速度超过打桩系统的下落速度，两者脱离接触。本术语与沉桩施工中的溜桩(pile slipping)现象不矛盾，但采用的是波动力学解释，包含了凭视觉或听觉难以发现的溜桩现象。对于承载力偏低或承载力适中、但休止时间较短的摩擦型桩，由于锤击时桩存在一定程度的溜桩现象，桩身将出现净拉应力，而且轻锤高击和打桩阻力偏低两者叠加将导致拉应力水平加剧。轻微溜桩时，桩顶与打桩系统的脱离接触时间可能仅为几毫秒，但严重溜桩时可能远超 100ms，桩的贯入度达到几十厘米甚至几米。锤对出现溜桩现象的桩体二次撞击，可视为以一定初速度下落的锤体对桩的追赶撞击，由于听觉和视觉反应时间约 0.05s~0.1s，桩的贯入度为初始接触撞击和溜桩两部分下沉量之和，因此，也可将贯入度 100mm 作为严重溜桩的粗略判据。最后还要提醒，锤重/桩重比很大和严重溜桩两种情况耦合时，溜桩桩体运动更像刚体，桩身净拉应力反而可以忽略。

2.1.8 桩对锤冲顶 pile-to-hammer bump

从反射压力波引起桩身向上运动、对打桩系统产生向上顶推作用开始，直至受到顶推作用的打桩系统以比桩顶更快的向上运动速度脱离桩顶、顶推作用消失的过程。

【条文说明】桩对锤冲顶作用的强弱直观反映了桩-土系统刚度和阻抗的高低。对于支撑在坚硬基岩上的端承型桩，强端阻反射不仅引起桩身强烈反弹，也呈现非常可观的锤芯回跳高度，可用“拍皮球”来形容这种极端的桩、锤反弹现象。

2.1.9 动力荷载试验 dynamic load test

采用冲击动能与试桩及其预期承载力相匹配的动力荷载施加装置对桩顶冲击，实测桩顶或桩顶附近的加速度（或位移）和力信号，通过信号分析判定单桩竖向（斜桩时为轴向）抗压承载力和桩身完整性。

2.1.10 短持续动力荷载试验 short-duration dynamic load test

桩顶冲击荷载持续时间较短，桩身波传播效应及桩周激发的岩土阻力速率效应明显，桩顶实测的力和位移明显不同步变化，单桩竖向抗压承载力需依据波动力学进行分析和判定的动力荷载试验。

2.1.11 长持续动力荷载试验 long-duration dynamic load test

桩顶冲击荷载持续时间较长，桩身波传播效应及桩周激发的岩土阻力速率效应不明显，桩顶实测的力和位移基本保持同步变化，单桩竖向抗压承载力可依据波动力学进行分析和判定，也可按静力学进行简化分析和判定的动力荷载试验。

【2.1.9~2.1.11 条文说明】高应变动力荷载试验的称谓，目前在国际上大体被动力荷载试验的称谓取代。

动力荷载试验追求充足、高效和安全的冲击能量输入，最大限度地激发桩周岩土阻力、同时不增加桩身危险应力幅值，这与锤击设备选用倡导的“重锤低击”原则一脉相承，即控制锤重低限、上不封顶。除锤击过程中出现溜桩现象外，锤重增大有利于改善锤与桩-土系统的匹配条件，延长桩顶荷载持续时间，减弱桩身应力波传播效应造成的桩顶实测力和位移变化不同步现象。当桩顶荷载持续时间足够长、桩身波传播现象趋于不明显时，考虑到波动力学可以兼容静力学，桩的承载力除可沿用波动力学进行分析和判定外，也允许采用简化的静力学分析直接判定。

确切地讲，本标准定义的短持续动力荷载试验与高应变动力荷载试验相对应。

2.1.12 打桩阻力 pile driving resistance

桩受冲击荷载作用时，桩侧和桩端岩土对桩体运动的抵抗力。

2.1.13 波动方程分析 wave equation analysis

锤击沉桩前，对桩受连续锤击或单次锤击采用波动方程数值模拟锤-替打-桩-土相互作用的方法。

【条文说明】这是用于施工设计阶段的打桩预分析方法。通过模拟锤-替打-桩-土相互作用数值求解波动方程，对打桩系统和桩体的受力、运动以及因桩体运动被激发的桩周岩土阻力等时间变量，实现全时程的模拟。波动方程分析是锤击沉桩施工（包括动力荷载试验）前对桩的可打性和沉桩过程可控性进行预分析的数值计算方法，前者根据指定的桩型及其截面尺寸和桩长，选择适宜的沉桩设备并预示锤击数和桩身应力随桩入土深度的变化；后者需配合沉桩过程监测，按以下两种情形模拟的承载力与锤击数关系图表实施施工控制：

——其它条件不变仅改变土阻力；

——附带给定锤击能量传递变异的范围，改变桩尖入土深度。

总之，就是实现打桩阻力、桩型及其几何尺寸、打桩锤性能及其操控参数三方面的合理匹配。

2.1.14 延时法 time delay method

通过搜寻指定桩身位置的运动位移达到最大的时刻和计算该时刻的打桩阻力，以获得受桩体运动速度影响较小的打桩阻力或桩的竖向抗压承载力的方法。

【条文说明】指定桩身位置一般为桩顶或桩端。桩顶最大位移时刻即为桩顶速度下降为零的时刻，用 t_u 表示（亦称卸荷点），而对于桩端则用 $t_{b,u}$ 表示。 t_u 时刻以后，桩身自上而下陆续反弹，即打桩阻力中的静阻力开始卸载、与运动速度正相关的动阻力反向，用此打桩阻力表达桩的承载力一定偏低。通常，只要桩周岩土不具有应变软化性质，正常承载桩的承载力发挥程度，最终还要以桩端位移能否大到使端阻力充分发挥来衡量。因为不论是静载施加还是动载作用，约定俗成是侧阻发挥在前、端阻在后，这就是提出 $t_{b,u}$ 延时法的初衷。尽管用该时刻计算的打桩阻力中可能包含小部分桩段的桩侧动阻力为正向、静阻力加载，但对整桩而言，大部分桩段的打桩侧阻力仍处于卸载、反弹状态，特别是桩端的打桩动阻力在位移最大时恰好为零。

因为桩身某部位的最大位移一定滞后于相应部位的最大速度出现，所以叫延时法。

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；

I_a ——用测点位置锤击力代替桩顶对锤芯作用力所计算的冲量；

R ——打桩阻力；

R_c ——单桩承载力计算值；

R_x ——缺陷以上部位土阻力的估计值；

Z ——桩身截面力学阻抗；

Z_b ——桩端持力层岩土的名义阻抗；

ρ ——桩身材料质量密度；

ρ_b ——桩端持力层岩土的质量密度。

2.2.2 作用与作用效应

E_k ——锤芯最大动能；

$E_{\max,s}$ ——桩-土系统吸收的能量；

E_{tr} ——传递给桩的能量；

F ——测点（桩顶）位置的锤击力；

F_d 、 F_u ——入射（下行）力波、反射（上行）力波；

$F_{\max}$ ——桩顶最大锤击力；

F_{Rs} ——桩顶最大动位移对应的锤击力；

Q ——模拟的桩顶静荷载；

s 、 $s_{\max}$ ——模拟的桩顶沉降、桩顶最大沉降；

V ——测点（桩顶）位置的质点运动速度；

V_0 ——锤芯初始撞击速度；

w 、 $w_{\max}$ ——实测的桩顶动位移、桩顶最大动位移；

V_b ——桩端质点运动速度;
 σ_b ——桩端压应力;
 $\sigma_{c,0}$ ——桩顶初始撞击压应力;
 σ_t ——桩身锤击拉应力。

2.2.3 几何参数

A ——桩身截面面积;
 A_b ——桩底与持力层接触的轴向投影面积;
 B ——方桩的边宽;
 D ——桩的直径(外径);
 L ——桩长或测点下桩长;
 x ——传感器安装点至桩身缺陷或桩身某一位置的距离。

2.2.4 计算系数及其他

C_r ——能量传递比;
 m_r ——锤芯质量;
 t_1 、 t_2 ——速度波或力波的峰值及其由桩底初次反射回桩顶的峰值分别对应的时刻;
 $t_{b,u}$ ——桩端延时;
 t_u ——速度信号从起升到初次降为零的时刻;
 α_{rp} ——锤重与桩重之比;
 β ——桩身完整性系数;
 β_b ——桩端压应力放大系数;
 η_a ——信号幅值修正系数;
 η_{eff} ——桩锤效率;
 η_{tc} ——全桩长范围无打桩阻力时的桩身拉应力与压应力的峰值比。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 桩基动力检测可包括以下内容：

- 1 施工后为验收提供依据的工程桩检测。
- 2 根据设计阶段对锤击沉桩施工桩的可打性和可控性预分析结果，开展以下工作：
 - 1) 对试打桩在指定入土深度进行初打、复打比对测试；
 - 2) 对打桩过程进行实时监测和控制。

3.1.2 桩基动力检测的技术方案编制、现场检测操作以及测试数据的分析与评价，均应由具有相关专门知识和经验的技术人员承担。

3.1.3 工程桩验收抽检桩数量应满足设计要求，且不得低于国家及地方现行标准关于桩基动力检测抽检桩数量的规定。

3.2 检测工作实施

3.2.1 检测实施的可行性调研宜包括下列内容：

- 1 受检桩基工程的岩土工程勘察资料、设计文件，了解施工工艺和施工中出现的异常情况；
- 2 委托方的具体要求；
- 3 检测项目现场实施条件。

3.2.2 检测方案的内容应包括：工程概况、地基条件、桩基设计要求、施工工艺、检测方法和数量、受检桩选取原则、检测进度，以及所需的桩头、场地处理等机械或人工配合。

3.2.4 桩基动力检测用仪器设备应在检定或校准的有效期内；检测前，应对仪器设备进行检查调试。

3.2.5 桩基动力检测开始时间应符合下列规定：

- 1 进行桩身完整性检测时，受检桩混凝土强度不应低于设计强度的 70%，且不应低于 15MPa；对于采用锤击方式将预制桩沉入桩周水泥土中的复合桩，宜在水泥土强度较低时检测。
- 2 承载力检测前的休止时间，当无成熟的地区经验时，不应少于表 3.2.5 规定的时间；对于混凝土桩，受检桩混凝土龄期应达到 28d，或受检桩同条件养护试件的抗压强度达到设计强度。

表 3.2.5 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，宜延长休止时间。

3.2.6 验收检测宜结合下列情况选择受检桩：

- 1 施工质量有疑问的桩；
- 2 局部地基条件出现异常的桩；

- 3 承载力验收检测时可部分选择完整性检测中判定的Ⅲ类桩；
 - 4 设计方认为重要的桩；
 - 5 施工工艺不同的桩；
 - 6 针对长桩或超长桩的中、下段或多节预制桩第 1 节桩以下的各节桩的瞬态低应变完整性试验的激励能量不足，需要采用大幅提高锤重、增大激励能量进行检测的桩；
 - 7 除上述各款指定的部分受检桩外，其余受检桩宜均匀或随机选择。
- 3.2.7** 当验收检测指定采用的检测方法包括瞬态低应变完整性试验和动力荷载试验时，宜先实施瞬态低应变完整性试验、后开展动力荷载试验。桩身完整性检测应在基坑开挖至基底标高后进行。动力荷载试验时，应在试验的前、后，对受检桩进行桩身完整性检测。
- 3.2.8** 动力荷载试验时，除锤击设备吊装、操作人员外，其他人员与锤击设备、起重设备吊臂回转半径覆盖区域的边缘距离不得小于 3m。
- 3.2.9** 动力荷载试验数据异常时，应查找原因。非桩身断裂、倾斜或锤击装置无法稳定架立等原因所造成，应在纠正锤击偏心、排除仪器故障或传感器安装不良等因素后重新检测。
- 3.2.10** 桩的承载力和桩身完整性的动力检测结果验证应符合下列规定：
- 1 对于桩身或接头存在缝隙的预制桩，可采用动力荷载试验验证；
 - 2 灌注桩的桩身缺陷反射或桩底反射特征不能有效识别时，宜采用桩身钻芯验证；
 - 3 空心桩的桩身缺陷可采用孔内摄像验证；
 - 4 桩身浅部阻抗变化宜开挖验证；
 - 5 单桩竖向抗压承载力应采用单桩竖向抗压静载试验验证。

3.3 检测结果评价和检测报告

3.3.1 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 3.3.1 的规定，并按本标准第 4~5 章分别规定的技术内容划分。

表 3.3.1 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

- 3.3.2** 工程桩承载力验收检测应给出受检桩的抗压承载力检测值，并评价单桩承载力是否满足设计要求。
- 3.3.3** 每根受检桩的检测数据应具有可读的文本格式。
- 3.3.4** 瞬态低应变完整性试验和动力荷载试验报告应包含下列内容：
- 1 委托方名称，工程名称、用途、地点，建设、勘察、设计、监理和施工单位，基础、结构形式；

- 2 单桩竖向（斜桩时为轴向）抗压极限承载力，混凝土桩的桩身混凝土强度等级；
- 3 检测目的，检测依据，检测数量，试验日期；
- 4 地基条件描述及邻近受检桩的典型地质钻孔图；
- 5 受检桩的桩型、尺寸、桩号及其在桩位平面图的标记，相关施工工艺、施工设备，相关施工记录及桩顶、桩底标高；
- 6 检测方法、检测仪器设备和试验过程简述；
- 7 实测与计算分析曲线、表格和汇总结果；
- 8 与检测内容相应的检测结论。

4 瞬态低应变完整性试验

4.1 一般规定

4.1.1 本方法适用于检测混凝土桩的桩身完整性，桩身缺陷的程度及位置。

【条文说明】该方法也简称反射波法或低应变法。考虑到目前使用方法的普遍程度和可操作性，本标准仅涉及瞬态时域分析内容。

4.1.2 当受检桩的反射信号特征不能有效识别，或有效测试深度不能覆盖桩长时，应进行有针对性的检测或有代表性的抽样检测，检测方法宜符合本标准第 3.2.10 条的规定。

【条文说明】根据低应变法的实际应用情况看，现场检测中，一般情况下能够通过同条件下的波形特征比较识别出桩底反射信号。如果桩过长或长细比较大（如软弱土层大于 50），桩长虽适中但桩侧为非软弱土层、桩端为较坚硬岩土层，灌注桩桩身阻抗多变且变化幅度较大，预制桩接头端板接触缝隙、采用机械啮合接头等，往往入射波尚未传到桩底，其能量已完全消耗或提前反射，无法测到桩底反射信号。此时，尽管无法对整根桩的完整性做出评价，但若受检桩的有效检测桩长范围内存在缺陷，则实测信号中必有缺陷反射信号，低应变法仍可用于查明有效检测桩长范围是否存在缺陷。弥补反射波法信号反射特征不明显的措施除配合或改用钻芯、声波透射等方法检测外，也可尝试动力荷载试验的大能量激振方式。

4.2 仪器设备

4.2.1 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 518 规定的 2 级标准。

4.2.2 检测仪器除应储存和显示采集的数字信号外，还应具备下列可调方式的信号处理功能：

- 1 多锤次敲击信号的选择性叠加平均，消除随机干扰、提高信噪比；
- 2 频域分析及其频域曲线显示，了解信号幅值随频率的变化；
- 3 设置适宜的低通、高通滤波截止频率，消除信号的高频干扰和低频漂移；
- 4 从入射速度波的峰值时刻 t_1 至桩底反射速度波的峰值时刻 t_2 ，对该时段信号进行指数或线性放大，抵消部分桩侧土及桩身材料阻尼对速度波的衰减，提高桩底反射波的可辨识性。

4.2.3 桩顶速度响应测量传感器的总质量不得超过现行行业标准《基桩动测仪》JG/T 518 规定的 40g 限值。桩顶速度波形宜采用加速度传感器测量的加速度信号，经积分后得到速度信号；安装后的加速度传感器谐振频率不得小于 5kHz。

4.2.4 瞬态激振设备包括能激发适用脉冲的力锤、力棒和不同材质的锤头（或锤垫），力锤可加装测力传感器。

4.3 现场检测

4.3.1 受检桩应符合下列规定：

- 1 桩身强度符合本标准第 3.2.5 条第 1 款的规定；
- 2 桩身顶部的材质、强度、截面尺寸与桩身基本等同；

3 桩顶面混凝土密实、平整、干燥并与桩轴线基本垂直。

【条文说明】受检桩的桩头状态直接影响测试信号质量，如多次敲击信号的一致性、传感器与桩顶面粘接接触不良或软厚粘接层导致的安装谐振频率下降。如果是在桩顶以下安装传感器测试，则首先要保证传感器安装底座能有效固定在桩侧表面。

4.3.2 测试参数设定应符合下列规定：

1 采样频率或采样时间间隔应根据预设桩长、预设桩身波速合理选择；时域信号采样点数不少于 1024 点；

2 信号记录的时间段长度，在入射速度波反射回桩顶的时刻 t_2 后延续不少于 5ms；

3 预设的桩长包括需要显示锤击力信号时的桩身截面积等参数，均应依据施工记录；

4 预设桩身波速可根据本地区同类型桩的经验值初步设定。

【条文说明】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。

利用时域波形的桩底反射特征，仅能确定桩底反射的时间。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，设定桩长应以实际记录的施工桩长为依据，取测点至桩底的距离。桩身波速取值可按本地区同类型桩的经验值设定，实测波形分析时应根据已知桩长计算的波速重新设定，或按本标准第 4.4.1 条确定的波速平均值 c_m 来设定。

4.3.3 测量传感器安装和敲击测试应符合下列规定：

1 根据桩径大小，桩顶面中心应对称布置 2 个~4 个安装传感器的检测点：实心桩的激振点应选择桩中心，检测点宜在距桩中心 $2/3$ 半径（方桩为边宽）处；空心桩的激振点和检测点宜为桩壁厚度的 $1/2$ 处，敲击点和检测点与桩中心连线形成的夹角宜为 90° 。

2 安装传感器的检测点部位混凝土表面应平整；传感器安装应与桩顶面垂直；用耦合剂粘结时，耦合剂应具有足够的粘结强度，保证传感器底面与混凝土面紧密接触；不得采用橡皮泥作为耦合剂。

3 敲击点与测量传感器安装点应避开钢筋笼的主筋影响。

4 敲击方向应沿桩轴线方向。

5 当桩顶以下不小于 1 倍桩径（或边宽）的深度以及由该深度再向下不小于 1m 的深度，具备沿平行于桩轴线上、下两个深度各安装 1 个传感器，且能有效固定在桩侧表面时，可通过桩顶敲击，采用不低于 50kHz 的采样频率测量上、下传感器的响应时间差，测定外露桩段的波速值。

6 应通过现场敲击试验，选择合适重量的激振力锤和软硬适宜的锤垫；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。

7 当桩径较大或桩上部横截面尺寸不规则时，除应按本条 1~5 款规定的敲击点和检测点位置采集信号外，尚应根据实测信号特征，改变敲击点和检测点的位置采集信号。

【条文说明】本条是为保证获得高质量实测信号而提出的措施。传感器安装点与激振点布置示意图 1。

考虑桩的横向尺寸时，桩顶敲击点为集中力作用，想象中的半球面纵波波场还夹带着表面波和横波成分，且当敲击脉冲变窄或桩径增加时，这种由三维尺寸效应带来的干扰加剧。传感器安装点与激振点距离和位置不同，所受干扰的程度也不同；对混凝土实心桩，当检测点位于距桩中心约 $2/3$ 半径 R 时，所受干扰相对较小；对空心桩，当检测点与激振点平面夹角约为 90° 时也有类似效果。

当安装点与激振点距离或平面夹角增加时，将增大瞬态敲击与响应之间的时间差，造成波速或缺陷定位误差。

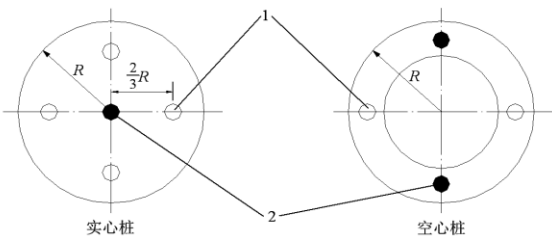


图1 传感器安装点、敲击点布置示意
1—传感器安装点；2 敲击点

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。

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，可将其向两侧板开或割短。传感器安装位置和激振点位置及两者之间的合适距离，以采集到一致性较好且清晰的实测曲线为控制目标。

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，可将测量传感器安装在桩顶以下的桩侧表面，且宜远离桩顶。作为上述方式的借鉴，本条第5款的细化规定则是为了减小采用桩侧安装两个传感器测量响应时间差、即测定外露桩段的纵波波速误差。仅采取提高采样频率或增大两传感器之间距离的措施还不够，还需要使两传感器均能有效固定以提高其安装谐振频率，如参照短持续动力荷载试验的加速度计安装方式；而要求传感器距桩顶不小于1倍桩径，则显然是为了减小横向尺寸效应影响。

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（图2）。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，适于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，较适于桩身浅部缺陷的识别及定位。但一定注意：并非脉冲愈窄、高频成分愈多，就愈容易探测更浅的桩身缺陷。如因传感器安装不良，甚至产生安装谐振时，会产生较大的高频干扰，图2（a）和图2（c）中的3.5kHz高频分量表明加速度计可能采用了软、厚的耦合介质粘接，降低了传感器的安装谐振频率。

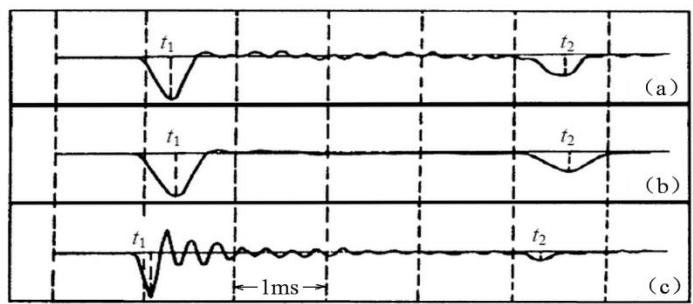


图2 不同锤头敲击下的时域波形（40cm×40cm 方桩）
（a）手锤；（b）带尼龙头力锤；（c）细金属杆

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。

4.3.4 结束受检桩的敲击测试应满足列条件：

- 1 实测信号不失真、无零漂，信号幅值不应超过检测仪器的量程；
- 2 同一检测点记录保存的有效信号有较好的一致性，数量不少于 3 个；当信号一致性较差时，应分析原因，排除干扰，增加检测点数量；
- 3 现场根据实测信号对受检桩的桩身完整性初步判断，可以做出无需变换敲击点位置和增加检测点数量而继续测试的决定。

【条文说明】对在同一根桩上采集的若干实测信号的形态、特征进行相似性比较，是低应变检测信号采集和筛选环节中的重要环节。每个检测点有效信号数量不宜少于 3 个，并进行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。为了能对室内信号分析发现的异常提供必要的比较或解释依据，检测过程中，不仅要记录激振操作、传感器和激振点布置等某一条件改变进行记录，也要记录桩头外观尺寸和混凝土质量的异常情况。

4.4 测试数据分析与评判

4.4.1 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，应在地基条件相近、桩型和成桩工艺相同的同一检验批的受检桩中，选取不少于 5 根完整桩信号的桩身波速值，按下式计算桩身波速的平均值：

$$c_i = \frac{2000L}{\Delta T} \quad (4.4.1-1)$$

$$c_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (4.4.1-2)$$

式中： ΔT ——入射速度波与桩底反射速度波波峰（或起升沿）之间的时间差（ms）；

L ——测点下桩长（m）；

n ——参加波速平均值计算的 I 类桩数量（ $n \geq 5$ ）；

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），且波速测量相对误差 $|c_i - c_m| / c_m$ 小于或等于 5%~10%；其中，对于长径比不小于 10 的中、小直径桩应按低限取值，长径比小于或等于 10 的大直径灌注桩可取高值。

- 2 当无法按前款确定时，可根据本地区相同桩型及成桩工艺的其它工程的测试值，结合桩身混凝土强度等级和骨料品种综合确定。

- 3 当具备本标准第 4.3.3 条第 5 款条件时，可取外露桩段的波速值代表整根桩的桩身波速值。

注：对于方桩、空心方桩，取与其外周边围裹的矩形面积相等的圆形面积计算等效直径。

【条文说明】桩身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。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。

上述因混凝土自身特性造成的波速离散性以灌注桩相对显著。不仅如此，灌注桩纵向尺寸效应引起的波速降低、混凝土龄期增长引起的波速增大也很难估计。但是。桩的横向尺寸效应引起的波速测量误差是可以近似计算的，且桩径愈大、桩愈短，测量相对误差愈大。如直径 1m、长 10m 的灌注桩，若按图 1 的固定模式操作，实测波速的相对误差约为 3%，且为系统性误差。

4.4.2 桩身缺陷位置应按下列公式计算：

$$x = \frac{1}{2000} \cdot \Delta t_x \cdot c \quad (4.4.2)$$

式中：x——桩身缺陷至传感器安装点的距离（m）；

Δt_x ——入射速度波与缺陷反射速度波峰（或起升沿）之间的时间差（ms）；

c——受检桩的桩身波速（m/s），无法确定时可用桩身波速的平均值替代。

【条文说明】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 存在读数误差；采样点数有限时，采样时间间隔的误差；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。还存在另一种误差，即锤击后应力波主要以一维纵波形式直接沿桩身向下传播。但集中力作用瞬时的桩头部位波场并非平面纵波，而是以半球面形式向外扩散的体波，不仅如此，还有沿径向传播的面波。因激振点与传感器安装点有一定的距离，接收点测到的入射峰总比激振点处滞后，考虑到表面波或剪切波的传播速度比纵波低得多，特别是大直径桩时，这种滞后从激振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。

4.4.3 桩身完整性类别应根据本标准表 3.3.1 的分类原则，通过分析入射波和反射波的波形形态，反射波相对于入射波的方向、幅值及到达时间，结合设计桩型、成桩工艺、地基条件、施工情况等，按表 4.4.3 判定桩身完整性类别。当桩底反射波峰值时刻前时域波形存在多次反射波且无规律可循时，可采用包括数字滤波在内的频域分析辅助桩身完整性类别的判定。

表 4.4.3 桩身完整性类别

类别	时域信号特征
I	有桩底反射信号， t_2 时刻前无缺陷反射波
II	有桩底反射信号， t_2 时刻前出现轻微缺陷反射波
III	t_2 时刻前出现明显缺陷反射波，桩底反射信号不明显，其他特征介于 II 类和 IV 类之间
IV	无桩底反射信号， t_2 时刻前出现严重缺陷反射波或周期性缺陷反射波，浅部严重缺陷引起的信号低频大振幅衰减振荡

注 1：对同一场地、地基条件相近、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无桩底反射波时，可类比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。

注 2：因桩的长细比很大、桩侧阻力很强、预制桩接头等影响导致应力波沿桩身传播严重衰减而无法测到清晰的桩底反射波时，可参照本标准第 5 章的动力荷载试验方法，通过增大冲击能量进行桩身完整性检测和桩身完整性类别判定。

注 3：灌注桩出现对设计条件有利的扩径，不应判定为缺陷。

注 4：桩身完整性类别为 III 类时，桩身缺陷对桩身结构承载力的影响程度宜通过验证检测和复核后确定。

【条文说明】完整桩典型速度时域信号和频域信号分别见图 3 和图 4，缺陷桩典型的速度时域信号和频域信号分别见图 5 和图 6。

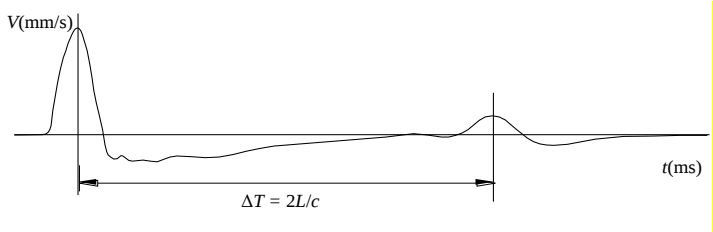


图 3 完整桩典型时域信号特征

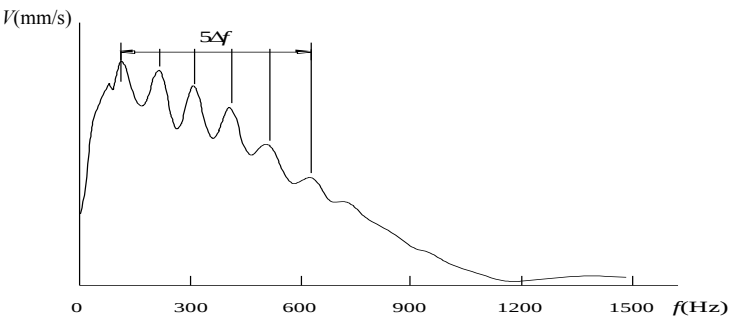


图 4 完整桩典型速度幅频信号特征

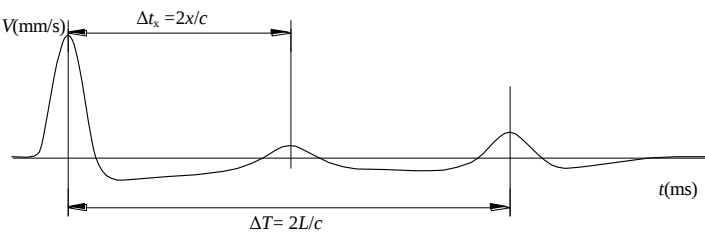


图 5 缺陷桩典型时域信号特征

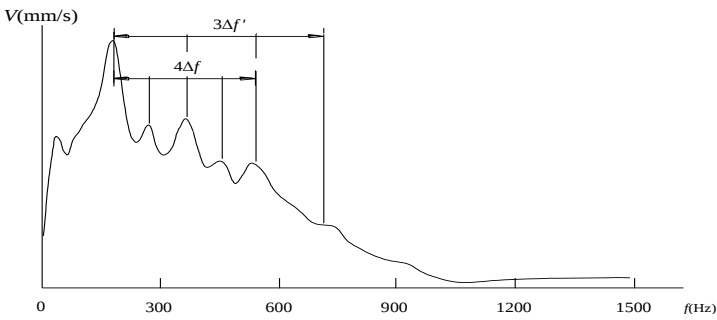


图 6 缺陷桩典型速度幅频信号特征

对于完整桩，根据时域信号或频域曲线特征判定桩身完整性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，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，还受桩周土阻力（阻尼）大小及缺陷所处深度的影响。相同程度的缺陷因桩周土特性差异或缺陷埋深不同，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、地基条件、施工情况结合当地经验综合分析判断；不仅如此，完整性类别判定一定程度上还受基础和上部结构对桩的承载安全性要求高低的主观影响。

桩身缺陷的程度及位置，除直接从时域信号或频频曲线上判定外，还可借助类似于短持续动力荷载试验 DLT 的时域信号拟合方式进行辅助分析，与动力荷载试验信号拟合的本质差别在于低应变信号拟合的边界条件除锤与桩顶只有约 1ms 持续时间的接触撞击外，其余时间为桩顶自由端的边界条件，而 DLT 的力边界条件则有较长时间段（>10ms~20ms）的锤与桩-土系统相互作用。因此，低应变信号拟合更适合纵向尺度较大的桩身截面渐变或突变时速度波形特征的波动力学识别(图 7)。

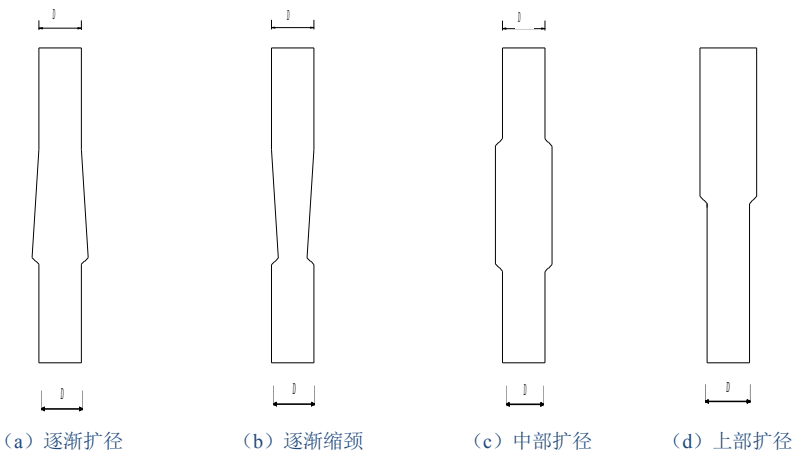


图 7 混凝土灌注桩截面(阻抗)变化示意图

另外，稳态激振法由于激振设备笨重、检测耗时等问题目前在我国已鲜有使用。但相较于本章的瞬态敲击法，稳态激振方法（亦称机械阻抗法）因能保证在不同频率点的窄小频带上激振能量集中，具有信噪比高、抗干扰能力强等优点，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，因而在欧洲一些国家仍在使用的稳态激振方法。

4.4.4 采用时域信号分析判定受检桩的完整性类别时，应结合成桩工艺和地基条件区分下列情况：

- 1 混凝土灌注桩桩身截面渐变后恢复至原桩径并在该阻抗突变处的反射，或扩径突变处的一次和二次反射；
- 2 桩侧局部强土阻力引起的混凝土预制桩负向反射及其二次反射；
- 3 纵向尺寸效应使混凝土桩桩身阻抗突变处的反射波幅值降低。

【条文说明】当灌注桩桩身截面形态呈现如图 7a 和图 7c 情况时，桩身截面（阻抗）渐变后突变，因阻抗突变前的渐变反射不明显，而在阻抗突变处的一次反射却分别表现出明显的“似缩颈”和“似扩径”相反特征，引起误判。图 7c 初次扩径截面的二次反射为“似缩颈”特征，同样桩侧初遇硬土层、包括采用半挤土施工的大直径敞口空心桩桩孔土芯闭塞后的土塞桩段，也存在类似情况，即一次反射似扩径，二次反射似缺陷。

一维波动理论因为不考虑桩身受力和运动在横截面上的不均匀，从而对应力波的波长没有限制。

但用于低应变动测时毕竟存在桩的横向尺寸影响、测量传感器安装条件及其有频率响应等限制，入射波的有效高频分量波长不可能低于“米级”，意味着瞬态低应变法对小于“分米级”纵向尺度的阻抗变化不会敏感。例如支盘桩的支盘直径很大，但随着支盘厚度的减薄，扩径反射将愈来愈不明显；若此情形换为缩颈或桩身夹泥，其危险性不言而喻。

图 7d 是实际工程中难见的仅有一个阻抗变化截面的理想情况。而对桩身存在不止一个阻抗变化截面的常见情况（图 7c），由于各阻抗变化截面的一次和多次反射波相互叠加，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复杂、无规律，难于分析判断。此时，只能在不考虑纵向尺寸效应的前提下，尝试实测信号拟合对反射波特征的辅助分析。

因为上述现象的低应变信号分析存在波动力学解释的模糊性，所以需要结合施工、地层情况进行综合分析判断。

4.4.5 当桩顶附近的浅部桩身阻抗变化的程度和深度无法判别时，可在测量桩顶速度响应的同时测量锤击力，根据实测力除以桩身阻抗曲线的起始峰和实测速度曲线的起始峰的比值差异大小，并对比其他同条件下受检桩的测试曲线，对桩身浅部阻抗变化的程度进行判定。

【条文说明】由于受横向尺寸效应的制约，激励脉冲的波长有时很难明显小于浅部阻抗变化的深度，造成无法对桩身浅部特别是极浅部的阻抗变化进行定性和定位，甚至是误判，如浅部局部扩径，波形可能主要表现出扩径恢复后的“似缩颈”反射。因此建议根据力和速度信号起始峰的比例差异情况判断桩身浅部阻抗变化程度。小锤敲击测试的桩顶力和速度曲线，由于受桩头部位的尺寸效应影响，即使是等阻抗桩，力与速度曲线在起始峰处也很难像短持续动力荷载试验那样严格成比例。因此采用这种方法时，需在同条件下进行多根受检桩信号的对比，在先定性解决阻抗变化的基础上，再判定阻抗变化程度。另外，在阻抗变化位置很浅时可能仍无法准确定位。

4.4.6 对于桩端持力层为较硬岩～坚硬岩的灌注桩，当桩底反射速度波与入射波同向时，宜结合设计对桩的竖向承载性能要求以及钻芯法、单桩竖向抗压静载试验或动力荷载试验的现场实施可行性，提出核验桩端承载力的建议。

【条文说明】对于嵌岩端承桩，桩底沉渣和桩端持力层下伏软弱夹层、溶洞等是直接关系到该桩能否安全使用的关键因素。虽然低应变方法不能直接探查桩底情况，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及其幅值判断桩端端承效果。之所以建议采用钻芯、静荷载或动荷载试验进行核验，是因为存在以下不确定性：

——设计、施工工艺和质量验收尚不能要求桩底无沉渣；

——即使桩底有沉渣或出现同向反射，桩的竖向承载力以及工后沉降仍有可能满足设计要求。

当然还有因检测方法能力所限无法测到桩底正向反射的情况：

——对于桩端持力层下伏软弱夹层、岩溶发育等，已为低应变方法探测能力所不及；

——桩底未出现同向反射波也可能是因桩端持力层以上为深厚的非软弱土覆盖层、嵌入基岩的桩段较长等因素，造成应力波幅值明显衰减。

4.4.7 当预制桩的桩身部位出现轻微缺陷反射时，受检桩的桩身完整性类别宜结合桩基设计使用条件综合判定。

【条文说明】因为预制桩桩身不存在缩颈、混凝土离析、夹泥等类型的缺陷，视觉上的缺陷反射一般由锤击沉桩的拉应力超限、基坑开挖土体位移、密集群桩施工的挤土效应等引起，无非是桩身轻微开裂或断裂，而桩在难打入时出现的因桩顶锤击偏心或应力集中打烂桩头、桩尖碰到基岩打烂桩尖的情况相对少见。这里所说的桩身轻微开裂是指桩身裂缝为水平整合型，对桩身轴力传递无明显

影响，短期不会影响桩的承载力。但是，除了桩身受桩侧土体水平推挤发生桩身折断、桩顶明显偏位外，桩身轻微开裂引起的反射波强弱一般是桩身受桩侧土体水平推挤产生的开裂要强于锤击拉应力引起的环状裂缝，大致原因是锤击沉桩的拉应力裂缝在冲击力消失后因桩身纵向钢筋特别是预应力筋的存在，可以使裂缝部分或基本闭合，而受弯裂缝却难以复合。因此，根据对纵向尺寸效应的理解，只要裂缝上、下断面存在部分有混凝土有效接触面使应力波通过（绕射），则缺陷反射就不会明显甚至不被察觉；反之，能被察觉的“轻微”缺陷反射，至少对于预应力桩，表明桩身存在可视的裂缝。

因此，若设计要求预应力桩不允许带裂缝工作，出于耐久性考虑，即使桩身只是轻微缺陷反射，桩身完整性类别也不宜判为Ⅱ类，而是Ⅲ类或Ⅳ类。

4.4.8 检测报告应给出桩身完整性检测的实测信号曲线，且对于本地区相近条件下的相同桩型，在设计桩长和试验敲击操作类同的条件下，宜采用固定的曲线纵、横坐标比例。

4.4.9 检测报告除应包括本标准第 3.3.4 条规定的内容外，尚应包括下列内容：

- 1 桩身波速取值；
- 2 桩身完整性描述、缺陷的位置及桩身完整性类别；
- 3 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；
- 4 采用低通、高通数字滤波时的截止频率。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。

5 动力荷载试验

5.1 一般规定

5.1.1 本章适用于基桩的竖向（斜桩时为轴向）抗压承载力和桩身完整性检测与判定。

5.1.2 动力荷载试验应按重锤低击原则选择锤重。

5.1.3 桩受冲击力作用产生的质点运动速度数据，可采用对称安装在桩顶下桩侧表面的加速度传感器测量的加速度信号，经积分后获得；冲击力数据可按下列方式获得：

1 采用对称安装在桩顶下桩侧表面的应变传感器测量的应变信号，将其乘以测点处桩身的横截面积及材料弹性模量，换算成锤击力；

2 在自由落锤锤体顶面下对称安装加速度传感器直接测量锤击力；

3 桩顶放置荷重传感器直接测量锤击力。

5.1.4 打桩阻力随时间的变化应按下式计算：

$$R(t) = \frac{1}{2} [F(t) + Z \cdot V(t)] + \frac{1}{2} \left[F \left(t + \frac{2L}{c} \right) - Z \cdot V \left(t + \frac{2L}{c} \right) \right] \quad (5.1.4-1)$$

$$Z = \frac{E \cdot A}{c} \quad (5.1.4-2)$$

式中： $R(t)$ ——从 t 时刻开始经过 $2L/c$ 时程发挥的打桩阻力（kN）；

F ——测点（桩顶）位置随时间变化的锤击力（kN）；

V ——测点（桩顶）位置随时间变化的质点运动速度（m/s）；

Z ——桩身截面力学阻抗（kN·s·m⁻¹）；

A ——桩身截面面积（m²）；

L ——测点下桩长（m）。

【条文说明】显然，当桩顶荷载 $F(t)$ 不随时间 t 变化时，相当于静载作用，桩的运动速度 $V(t) \equiv V(t+2L/c)$ ，即 $R=F$ 。

5.1.5 采用实测信号计算的单桩竖向抗压承载力应符合下式要求：

$$R_c \geq R(t_u) \quad (5.1.5-1)$$

对于桩端持力层为非坚硬岩土层的桩，当 $t_2 (=t_1+2L/c)$ 时刻前桩顶速度不小于零时，尚应满足下式要求：

$$R_c \leq R(t_1) \quad (5.1.5-2)$$

式中： R_c ——单桩竖向抗压承载力计算值（kN）；

t_1 ——速度波或力波的峰值对应时刻（ms）；

t_u ——速度信号从起升到初次降为零的时刻（ms）。

【条文说明】采用 DLT 检测桩的承载力，目前通行的做法是找到与桩身位移相关的“静阻力”作为承载力。但要特别注意，DLT 的桩身位移相对于 SLT 而言仍是“动位移”，变形速率效应的影响仍是存在的，这也常见于针对不同土的类别而采用不同经验系数进行承载力修正的情况。

t_u 时刻桩顶位移达到最大，以后沿桩身自上而下陆续出现桩周岩土阻力卸载、桩反弹，即 t_u 至

t_0+2L/c 时程的打桩阻力发挥状态为静阻力减小、动阻力反向,当然可以作为计算承载力的低限控制值。对于极端情况为刚性支承的桩,按式(5.1.4-1)计算的桩端承载力发挥值为冲击荷载 F 的 2 倍,试图充分发挥桩承载力的后果是桩身强度破坏,即使不产生受压破坏,如有强烈的拍皮球现象还会引发混凝土桩桩身拉应力水平超限。因此只能对规定非入岩的摩擦型桩、且当桩底反射前桩顶未处出现反弹卸载时,规定计算承载力的上限控制值。

规定 $t_2=t_1+2L/c$ 时刻前 $F_d>0$ 只为限制桩的明显卸载反弹,但仍允许桩中、上段出现一定程度的卸载,如需严格限制则应规定该时刻前 $V(t)>0$ 。

5.1.6 开展灌注桩的竖向抗压承载力动力检测,宜具有并不断积累现场实测经验和相近条件下的对比验证资料。条件允许时,可在桩身设置校核断面,埋设或侧表面贴装传感器,测量桩身变形或运动随时间变化,为桩顶实测信号提供校核,或为数值建模计算的该断面力或速度曲线提供比较,间接验证数值模型及其参数的合理性。

5.1.7 当桩顶速度信号上升缓慢使测试曲线反映的桩身阻抗变化特征不明显时,宜采用提高桩顶缓冲垫刚度和减小打桩锤质量等措施予以改善,也可按本标准第 4 章的规定进行补充测试。

5.2 仪 器 设 备

5.2.1 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 518 规定的 2 级标准。

5.2.2 桩顶冲击荷载施加可采用落锤冲击设备,当采用液压锤、柴油锤、蒸汽锤、卷扬机提升落锤等具有导向装置的冲击沉桩设备时,其锤芯重量和额定最大冲击动能应大于按拟用落锤冲击设备对锤重及落距规定的最低要求。

【条文说明】落锤冲击设备是指动力荷载试验中常用的自制自由落锤设备。对沉桩设备的锤重、额定最大冲击动能的要求超过自由落锤是因为锤击沉桩设备的机械效率低于 100%,替打还额外消耗能量。

5.2.3 落锤冲击设备应具有稳固的导向装置。重锤应形状对称,高径(宽)比不得小于 1。

5.2.4 当采取落锤上安装加速度传感器的方式实测锤击力时,重锤的高径(宽)比宜为 1.0~1.5。

【条文说明】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各部位的运动和受力无明显差异,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。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。除钢桩外,较重的自由落锤在桩身产生的力信号中的有效频率分量(占能量的 90%以上)在 200Hz 以内,超过 300Hz 后可忽略不计。按不利条件估计,对力信号有贡献的高频分量波长一般为 20m~25m。所以,在大多数采用自由落锤的场合,牛顿第二定律能严格成立。规定锤体高径(宽)比不大于 1.5 正是为了避免波传播效应造成的锤内部运动状态不均匀。这种方式与在桩顶下桩侧表面安装应变式传感器测量应变、再经过换算得到锤击力的方式相比,优点是:

1) 避免了桩头损伤和安装部位混凝土质量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,即使桩头的截面尺寸、混凝土强度等级与原桩身不同,当桩身混凝土的波速、弹性模量改变时,也无需修正;当混凝土应力-应变关系严重非线性时,避免了应变换算冲击力方式的力值放大。

4) 测量响应的加速度计在桩顶下的安装深度虽有所减小,但不允许在截面阻抗变化位置安装。缺点是:

1) 桩顶只能放置薄层桩垫,不能放置尺寸和质量较大的替打。

2) 锤高一般以不超过 3m 为限,则最大使用的锤重可能受到限制,除非采用重锤或厚软锤垫减少锤上的波传播效应。

3) 锤在下落时的非受力状态有负向的加速度(向下的重力加速度),可能被误认为是冲击力变化,这也包括撞击后锤体受桩的冲顶反弹或溜桩,与桩顶脱离接触并回落所受到的重力影响。

4) 重锤撞击桩顶瞬时难免与导架产生碰撞或摩擦,导致锤体上产生高频纵、横干扰波,锤的纵、横尺寸越小,干扰波频率就越高,也就越容易被滤除。

5.2.5 锤重选择不得低于下列限值:

1 锤的重量与设计或试验预期的极限承载力比值 α_{rc} 不得小于 1%~2%。其中,对于嵌入坚硬、或较坚硬基岩的端承桩, α_{rc} 可取 1%,对于摩擦型桩, α_{rc} 宜取 2%。

2 除钢桩外,锤的重量与桩的重量之比 α_{rp} 不应小于 0.2~0.4。桩端持力层以上的上覆土层为深厚软弱土层时, α_{rp} 可取 0.2;当拟采用长持续动力荷载试验,并按简化静力学方法进行桩的承载力分析判定时, α_{rp} 应大于 1。

5.2.6 锤重选择除不得低于本标准第 5.2.5 条规定的限值外,尚应分析和比较既有同条件的动力荷载试验的实测数据,结合锤芯落距(冲程)、锤与桩顶缓冲垫刚度的变化,复核锤重选择的适宜性。当无同条件下的实测数据时,宜通过锤-替打-桩-土系统数值建模的波动方程分析,试算预期发挥受检桩承载力需要传递给桩的能量 E_{tr} 、能量传递比 C_r 和桩身锤击应力,通过以下比选确定锤重:

1 计算的桩顶力与速度波形未呈现强烈反弹或明显溜桩现象时,宜取 C_r 不低于 50%所对应的锤重;

2 计算桩身锤击应力出现下列情况时,宜增加锤重并降低锤芯的落距(冲程)或桩顶缓冲垫的刚度:

1) 钢桩的桩身最大压应力超过钢材屈服强度的 0.9 倍;

2) 混凝土桩的桩身最大压应力超过混凝土轴心抗压强度标准值的 0.85 倍,桩身最大拉应力超过混凝土轴心抗拉强度标准值与桩身预应力的代数和。

【5.2.5、5.2.6 条文说明】锤击(冲击)能量和动量对桩的充分、高效、无害传递,是实现桩侧、桩端岩土阻力有效发挥的动力荷载试验初衷的关键,也是重锤低击原则的实际体现。用波动力学来解析就是锤与桩-土系统的匹配程度,包含了锤与作为广义阻抗的桩周岩土阻力和桩身截面力学阻抗匹配两部分内容。与桩身阻抗不同,桩周岩土阻力代表的广义阻抗并非某一恒定值、也不等于桩在静力荷载下的极限承载力,因为桩周岩土阻力发挥过程受桩周岩土的变形速率、静刚度非线性的双重影响和相互制约。波动方程分析虽然在原理上可以对上述复杂影响进行规律性的识别模拟,但锤-替打-桩-土系统建模数值模拟难免存在“土”模型及其参数的主观随意性。因此,在能规避锤重选择明显偏轻风险的前提下,为了简化操作、便于执行,将锤重选择的控制下限直接与预期发挥的桩承载力挂钩。

直接用锤与桩的截面阻抗解决阻抗匹配问题也不现实。考虑到钢锤与桩身混凝土截面阻抗以及

纵向尺寸存在的明显差异，可将锤视为刚体，最终能用锤与桩的质量比 α_{rp} 来规定匹配程度。于是将已知锤高度 L_r 和阻抗 Z_r 的锤分别作为弹性杆、或折算为已知质量 m_r 的刚体，对已知阻抗和长度的弹性杆（自由桩）撞击的计算模拟。图 3 证实了 $2L/c$ 前两种锤模式下的初始撞击力波形或冲量的相似性以及当 (L/c) 远大于 (L_r/c_r) 时的等效性，使锤-桩阻抗匹配问题用 α_{rp} 来解析成为可能。

出于经济性的考虑，不可能通过无限增大 α_{rc} 和 α_{rp} 来提高动载试验的有效性。因此需要回到问题的本质——实现冲击能量对桩的充分、高效、无害传递。由于受 E_r 、 C_r 和桩身锤击应力三者的相互影响和制约，当然期盼能从同条件试验中获得相关实测数据支撑和经验借鉴。这里所说的同条件试验是指“地基条件、桩长相近，桩端持力层、桩型、桩的截面尺寸、成桩工艺以及试桩设备的型号、锤芯重量相同”的条件。显然，绝对的“同条件”并不存在，如桩相对长、桩端持力层相对软弱，则桩身拉应力水平相对更强。

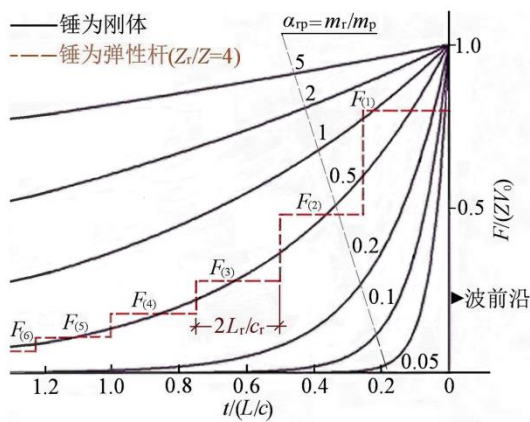


图 3 $t < 2L/c$ 时不同 α_{rp} 的自由桩桩顶撞击力波形

注：图中虚线 $F_{(1)}$, $F_{(2)}$, ……是锤为弹性杆时的各次撞击矩形力脉冲幅值。

与实测信号拟合的反演方法仅考虑桩-土相互作用相比，波动方程分析建模虽同样受人的主观随意性影响，但毕竟是目前唯一能进行锤-替打-桩-土相互作用分析的正演方法，特别对采用专用自由落锤试验设备的场合，由于锤的运动（锤的撞击初速度、反弹高度）容易测量、替打-缓冲组合体建模简便， $t=0$ 计算初始条件为锤芯的初始撞击速度 V_0 ，边界条件从反演的桩顶附近测点位置上升至锤顶。正演除实现了计算的桩顶激励、响应时程曲线与实测信号比较（拟合）外，还附带增加了锤芯运动边界条件的拟合，可简单理解为能量传递的拟合。尽管如此，针对承载力分析的可靠性而言，正演分析与反演拟合并无本质区别，因为正演分析所用的土模型与反演拟合一样，不能摆脱静、动阻力的耦合。但是，能量传递拟合至少需要仔细测量锤芯的初始动能和后继运动状态，这或许能从能量转换与守恒的角度，为限制计算承载力出现过大变异提供帮助，例如本标准第 5.4.9 条第 6 款的要求。

5.2.7 桩的贯入度可按下列方式测量：

- 1 采用自由落锤试验时，可通过精密水准仪或固定于相对稳定基准上的桩顶位移测量仪表测定。
- 2 采用施工打桩锤试验时，可根据标记贯入深度的锤击数换算确定。

【条文说明】桩顶位移曲线一般由实测的加速度曲线经两次积分得到。根据目前掌握的广泛用于动力荷载试验的加速度传感器频率特性的了解，皆不同程度的存在有限低频响应问题，且以压电式加速度传感器为甚。造成加速度信号时间积分越长，趋势项放大越明显，位移曲线随时间漂移越严重。

不过有一点需要澄清,即使瞬态位移曲线经可靠的光学测量“贯入度”校正消除了漂移,但严格地讲,被校正的瞬态位移曲线未必符合实际,因为贯入度特指永久位移,在观测时长上与瞬态位移曲线的最终位移相差甚远。好在桩是否被打动主要看瞬时冲击的桩顶最大动位移大小,贯入度只作为辅助判断,一般不要求短暂动测分析结束时刻的桩顶计算最终位移与贯入度吻合。此外,使用压阻式加速度传感器可适当降低位移信号尾部的低频漂移。

5.3 现场检测

5.3.1 检测前的准备工作,应符合下列规定:

- 1 对于不满足本标准表 3.2.5 规定的休止时间的预制桩,应根据本地区经验,合理安排复打时间,确定承载力的时间效应。
- 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,落锤装置架立应垂直。
- 3 对混凝土灌注桩的桩头和不能承受锤击的桩头应进行加固处理,混凝土桩的桩头处理应符合本标准附录 A 的规定。
- 4 对混凝土灌注桩和桩头已进行加固的桩,宜选择落锤上安装加速度传感器或桩顶放置荷重传感器的方式直接测量冲击力。当锤击设备和荷重传感器不满足试验实施条件时,可按本标准第 5.1.3 条第 1 款的规定,通过桩身侧表面安装应变传感器测量的桩身应变换算冲击力,混凝土灌注桩宜安装在加固的桩头部位,预制桩可安装在未加固的原桩身部位。
- 5 传感器安装应符合本标准附录 B 的相关规定。
- 6 采用送桩器沉桩的预制桩,桩顶标高低于试桩点位的地面标高,无法满足传感器安装及锤击设备就位条件,当满足本标准附录 B 第 B.0.4 条的规定时,可以将测量传感器安装在送桩器上。
- 7 混凝土桩应先进行桩身完整性检测,检测方法可按本标准第 4 章的有关规定执行。
- 8 桩顶应设置桩垫,桩垫可采用木板、胶合板或橡胶等材料。

5.3.2 测量参数设定和计算,应符合下列规定:

- 1 信号采样时长不得小于 100ms,桩长超过 50m 或预计冲击荷载持续时间超过 30ms 时,不得小于 200ms;当要求信号采样时长能覆盖溜桩或锤反弹回落后对桩的二次撞击时,可按预估的溜桩位移或锤被冲顶的反弹高度,估算出现二次撞击的延时,设定采样时长。
- 2 信号采样时间间隔宜为 50 μ s~200 μ s,当采样时长大于 200ms 时可取高值。
- 3 信号预采时长不得小于采样时长的 10%,当采用燃爆冲击加载方式或软、厚桩(锤)垫缓冲时,不得小于 20%。
- 4 传感器的设定值应按检定或校准的结果采用。当传感器的测量类型与待测的冲击力和加速度(包括其数学变换)一致时,测量参数应按相应类型传感器的设定值采用。除桩顶放置荷重传感器的冲击力测量方式外,测量参数的设定应符合下列规定:
 - 1) 当采用自由落锤安装加速度传感器测量冲击力时,测量参数的设定值可由加速度传感器设定值与锤芯质量的乘积确定;
 - 2) 当根据桩身侧表面安装或桩身内埋设应变传感器测量的桩身应变换算冲击力时,测量参数的设定值可由应变传感器设定值与其安装位置的桩身横截面积以及材料弹性模量的乘积确定。

- 5 测点处的桩截面尺寸应按实际测量确定。
- 6 测点以下桩长和桩身截面尺寸可按设计文件或施工记录的数据设定。
- 7 桩身材料质量密度应按表 5.3.2 取值。
- 8 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本标准第 5.4.3 条进行调整。
- 9 桩身材料弹性模量应按下式计算：

$$E = \rho \cdot c^2 \quad (5.3.2)$$

表 5.3.2 桩身材料质量密度 (t/m³)

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

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/m³)。

【条文说明】本条第 1 款对采样总时长只有最短不少于 100ms 的限制，没有上限限制；由于动力荷载试验信号中的有效高频分量即使对钢桩而言，也不会超过 1kHz，因此第 2 款规定的最大采样时间间隔 200μs（即最低采样频率 5kHz）满足采样定理的最低要求。

应变式传感器直接测到的是桩身的应变，并按下式换算成锤击力：

$$F = A \cdot E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

式中： F ——锤击力；
 A ——测点处桩截面积；
 ε ——实测应变值。

锤击力的换算误差大小首先与桩身材料的本构关系有关，尤其对于混凝土灌注桩而言， $E=E(\varepsilon) \neq$ 常数；其次是灌注桩测点多布置在新加固的桩头部位，该部位有钢护筒围裹或钢筋网和箍筋加密、混凝土强度等级高，而对测点处的等效阻抗估值，却不能根据桩身平均波速校正。另一需注意的是：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，也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，其值变化范围一般为 3000 m/s~4500m/s。混凝土预制桩可参考无缺陷桩的实测桩身平均波速预设；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校正。另外，对表 5.3.2 中的数值采用，要留意桩身混凝土是否为特殊性能或特殊配比混凝土，其质量密度可能与表中的数值有差异，如采用超流态或细石混凝土。

5.3.3 现场检测应符合下列规定：

- 1 检测时测试系统应处于正常工作状态。
- 2 采用自由落锤为锤击设备时，锤的落距应由低到高，最大落距不宜大于 2.5m。

3 应根据打桩锤的类型采用适宜的方法测量锤芯的初始撞击速度并计算动能。对于锤芯运动可视的打桩锤，可采用摄像方式测量锤芯的初始撞击速度；对于锤脱钩时刻初速度为零的自由落锤、单作用打桩锤，可根据锤的落距或冲程按下式计算锤芯撞击初速度：

$$V_0 = \sqrt{2gh} \quad (5.3.3)$$

式中： V_0 ——锤芯撞击初速度（m/s）；

g ——重力加速度，等于 9.8m/s^2 ；

h ——锤芯的落距或冲程（m）。

4 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，应按本标准第 6 章有关规定执行。

5 锤重与桩重之比 α_{TP} 小于 0.5 的非预应力混凝土桩检测，当出现溜桩或锤受桩的冲顶而强烈反弹时，应对桩身出现受拉开裂的情况进行判断，必要时应按本标准第 4 章的方法进行检测验证。

6 现场信号采集时，应检查采集信号的质量，并根据桩顶最大动位移、贯入度、桩身最大拉应力、桩身最大压应力、缺陷程度及其发展情况等，确定下一锤次锤芯落距（冲程）或缓冲垫刚度的调整。

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

【条文说明】有些自由落锤试桩设备的锤芯脱钩瞬时初速度不为零，如剪刀型脱钩装置，按落距反算的 V_0 偏低。

溜桩和锤受桩冲顶作用而反弹都有可能引起桩身受拉开裂，不过前者是由桩底初次反射拉力波所引起——反射拉力波到达桩顶后将使桩顶加速下沉与锤脱离接触，同时转变为二次入射压力波；后者是初次入射压力波到达桩底引起强端阻压力波反射——返回桩顶对锤冲顶而使锤快速反弹并与桩顶脱离接触，此时对后继到达桩顶的端阻压力波就像遇到了自由端，掉头变成二次入射拉力波。同一桩-土系统， α_{TP} 愈小，这两种现象表现就愈明显，且在桩顶自由端的二次或反复拉、压交替的多次入射波，其作用就像低应变法在桩顶用小锤敲击检测桩身缺陷一样，只是桩的初始运动状态非静止、缺陷反射特征可能不如低应变法波容易判别而已。

5.3.6 承载力检测时宜实测桩的贯入度。黏性土中按设计要求正常施工的桩，单击贯入度不宜大于 10mm。

【条文说明】按设计要求正常施工的桩应该不会出现桩挤土上浮、桩底沉渣过厚、持力层遇水软化等非正常情况。对于主要靠黏性土层承载的桩，10mm 的贯入度表明桩的承载力已充分发挥，而黏性土的速率（阻尼）效应以及强度受变形的影响相对显著，动测承载力偏高的案例也大多出现在贯入度偏大的场合。

5.4 测试数据的分析与判定

5.4.1 检测承载力时选取锤击信号，宜取锤击能量较大的击次。

5.4.2 出现下列情况之一时，动力荷载试验信号不得作为承载力分析计算的依据：

1 应变传感器安装部位的混凝土开裂或出现严重塑性变形，导致根据测量应变换算的力曲线最终未归零；

2 锤击严重偏心，对称安装的应变传感器的输出信号峰值相差超过 1 倍；

3 按截面几何形心对称安装的传感器输出信号存在通道缺失,且该安装截面再无其它对称安装的可相同测试类型的传感器。

5.4.3 桩底反射明显时,桩身波速可根据速度波第一峰起升沿的起点到速度反射峰起升或下降沿的起点之间的时间差与已知桩长确定(图 5.4.3);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。

【条文说明】不推荐按速度波峰-峰值确定桩身波速是因为有溜桩现象或测点距桩顶距离较远时,速度反射峰产生延后。

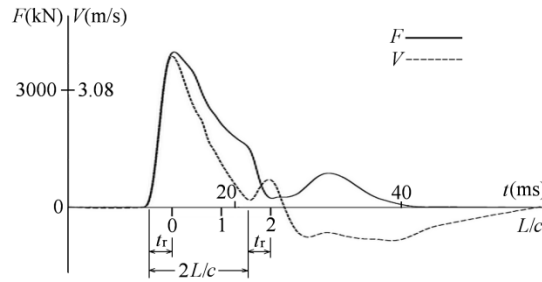


图 5.4.3 桩身波速的确定

5.4.4 对于采用荷重传感器或自由落锤安装加速度传感器的桩顶锤击力测量方式,当桩身材料弹性模量或桩身波速改变时,仍应保持原始桩顶实测锤击力信号的幅值不变,但将其转换为运动响应传感器安装测点位置的锤击力时,应扣除测点以上的桩头惯性力影响。

【条文说明】采用荷重传感器或自由落锤安装加速度传感器测量的桩顶锤击力已直接溯源到力基准,不存在随桩身波速和弹性模量变化而调整的问题。响应传感器安装测点以上的桩头质量及其加速度越大,惯性力导致的力与速度曲线之间的相位差越明显。

5.4.5 当采用应变传感器测量应变并由应变换算锤击力时,桩身材料弹性模量和测点位置锤击力信号的校核修正应符合下列规定:

1 当原桩身的设定波速随修正后的桩身波速改变时,相应的桩身材料弹性模量应按本标准式(5.3.2)重新计算;当测点位置原设定波速同样随修正后的桩身波速改变时,对于按速度单位存储的测点位置原始锤击力信号,应将其幅值除以调整前、后波速之比的平方。

2 对于灌注桩以及应变传感器安装在混凝土加固桩头部位的桩,当替打的质量小于锤芯质量的5%时,测点位置锤击力信号幅值的修正应符合下列规定:

1) 力信号幅值调整系数应按下列式计算:

$$\eta_a = \frac{m_r \cdot V_0}{I_a(t_u)} \quad (5.4.4-1)$$

$$I_a(t_u) = \int_0^{t_u} F \cdot dt \quad (5.4.4-2)$$

式中: η_a ——信号幅值修正系数;

m_r ——锤芯质量(kg);

t_u ——速度信号由起升到初次降为零所对应的时刻(ms);

F ——测点位置的锤击力(kN);

I_a ——用测点位置锤击力代替桩顶对锤芯作用力所计算的冲量(N·s)。

2) 当信号幅值修正系数小于 1 时, 应将测点位置锤击力信号按该系数的比例进行幅值折减。

3) 当信号幅值修正系数大于 1 时, 可根据加固桩头的混凝土强度等级、配筋等情况, 对测点位置锤击力信号幅值、桩身材料弹性模量进行单一或分别调整。

【条文说明】采用应变传感器测量应变并由应变换算锤击力时, 不论仪器存储格式有何差异、换算的力值随波速或弹性模量如何修正, 原始的应变测试数据是不能改变的。

将锤芯视为刚体, 锤芯底面所受的作用力冲量等于锤芯动量的改变, 因此能用桩身测点部位测得的锤击力较准确代替锤芯底面的反作用力, 需降低锤底面到测点之间的替打和桩头质量以及应力波传播时间。对灌注桩或混凝土加固桩头的桩, 桩头部位易出现低强度混凝土、使其应力-应变关系的非线性加剧, 或是桩头加固用箍筋、钢筋网、钢护筒以及高强混凝土加强, 使该部位的阻抗明显大于桩身阻抗。于是通过观测到的锤芯动量改变与作用力冲量的比较, 发现锤击力的测试误差并予以修正, 对降低混凝土非线性导致的锤击力放大、即分析承载力虚高的风险, 尤为重要。不过, 由于动量定理应用与桩身材料本构关系无关, 只能对锤击力信号幅值的非线性放大近似按线性修正。

5.4.6 承载力分析计算前, 应结合地基条件、设计参数, 对下列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 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。

5.4.7 出现下列情况之一时, 应采用相应的直接检测方法进一步验证:

- 1 桩身存在缺陷, 无法判定桩的竖向承载力。桩身缺陷的性质, 可采用下列方式核验:

- 1) 浅部缺陷采用开挖;
- 2) 空心桩采用孔内摄像;
- 3) 预制桩接头采用上拔;
- 4) 灌注桩采用桩身钻芯或与孔内摄像、跨孔声波透射相结合。

- 2 桩身缺陷对水平承载力有影响。

- 3 触变效应的影响, 预制桩在多次锤击下承载力下降。

4 溜桩现象明显或严重, 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, 波形表现出的桩竖向承载性状明显与勘察报告中的地基条件不符合。

5 嵌岩桩桩底同向反射强烈, 且在桩底同向反射后无明显端阻力反射。桩端持力层岩性、桩底沉渣厚度、桩端嵌岩深度可采用桩身和桩周旁孔钻芯核验。

5.4.8 实测信号未出现明显或严重溜桩现象时, 可采用延时法并按下列步骤计算桩的承载力:

- 1 桩端质点运动速度按下列公式计算:

$$V_b(t + \frac{L}{c}) = \frac{1}{Z} \cdot \left[F_d(t) - F_u(t + \frac{2L}{c}) - \Delta R_{skn,c} \right] \quad (5.4.8-1)$$

$$\Delta R_{skn,c} = R_{skn,i,0 \rightarrow L} - R_{skn,r,L \rightarrow 0} \quad (5.4.8-2)$$

式中: F_d 、 F_u ——实测的入射(下行)力波、反射(上行)力波(kN), 分别等于 $\frac{F+Z \cdot V}{2}$ 、 $\frac{F-Z \cdot V}{2}$;

$\Delta R_{skn,c}$ ——反映 t 至 $t + \frac{2L}{c}$ 全程打桩侧阻力发挥不对称性的估计值(kN), 可根据实测波形特

征并结合地基条件估算, 其中 $R_{skn,i,0 \rightarrow L}$ 和 $R_{skn,r,L \rightarrow 0}$ 分别为 t 至 $t + \frac{L}{c}$ 入射、 $t + \frac{L}{c}$ 至

$t + \frac{2L}{c}$ 反射两个 L/c 半程依次激发的入射和反射侧阻力波（图 5.4.8）；

V_b ——桩端质点运动速度（m/s）。

2 从时间 t_1 开始，沿时间增大的方向，将实测的入射力波 F_d 、反射力波 F_u 以及打桩侧阻力发挥不对称性的估计值 $\Delta R_{skn,c}$ 带入式（5.4.8-1）进行试算，直至满足下式要求：

$$V_b(t_{b,u} + \frac{L}{c}) = 0 \quad (5.4.8-3)$$

式中： $t_{b,u}$ ——桩端延时，在桩顶实测信号曲线时间坐标轴上标记，其值等于桩端运动速度降至为零的时刻减去时间 L/c 。

3 按下列公式计算单桩竖向抗压承载力 R_c ：

$$R(t_{b,u}) = F_d(t_{b,u}) + F_u(t_{b,u} + \frac{2L}{c}) \quad (5.4.8-4)$$

$$R_c = R(t_{b,u}) \quad (5.4.8-5)$$

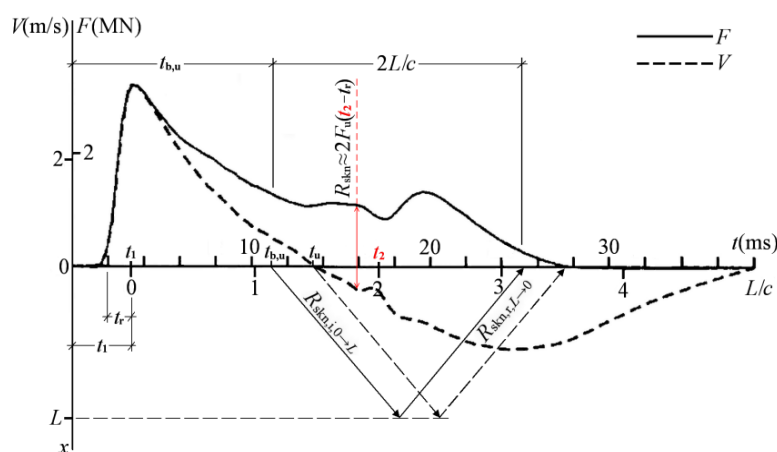


图 5.4.8 入射半程和反射半程依次激发的侧阻力波示意

【条文说明】明显溜桩是承载力低下的表现，其信号特征是桩底反射速度峰较入射峰宽，即 $t_u + L/c$ 时刻桩底的运动速度仍大于零。

所谓延时法是相对桩顶速度达到峰值时刻 t_1 而言的。 $t_{b,u}$ 延时旨在找到桩端速度从峰值降为零、亦即位移达到最大时刻的波传播轨迹。理想情况下该轨迹上桩端的动阻力恰好为零、静阻力发挥至最大，或桩侧动阻力虽然不一定为零，但相对于 t_1 时刻入射力波引起的动阻力，一定有明显的降低。况且，单桩抗压静载试验判断桩的极限承载力标准其实也是看桩端沉降是否大到足以使桩端静阻力充分发挥。根据波动理论，当桩侧阻力为零、桩底持力层阻抗等于桩身阻抗（ $\Delta R_{skn,c} = 0$ ）时，桩端出现最大位移的时刻为 $t_u + L/c$ ，而对于没有溜桩现象的正常承载桩，桩端出现最大位移的时刻将早于 $t_u + L/c$ ，变成了 $t_{b,u} + L/c$ 。因此，将利用桩端位移达到最大时刻所在的波传播轨迹上的全部打桩阻力作为桩承载力的方法称为延时法。它与熟知的凯司法和实测信号拟合法的异同点在于：

——承载力计算公式（5.4.8-5）与 $t = t_{b,u}$ 时的波动力学的解析表达式（5.1.4-1）等价，承载力的分析和计算只依靠波动力学，与土模型及其参数（经验系数）无关；

——虽然规避了土模型及其经验系数（参数）的引入，但对涉及打桩侧阻力发挥不对称性 $\Delta R_{skn,c}$ 中的入射与反射半程的侧阻力波 $R_{skn,i,0 \rightarrow L}$ 、 $R_{skn,r,L \rightarrow 0}$ 各自数值的估算，不仅需要根据波形的波动力学特征，也离不开桩的勘察设计条件作参比，获得合理估值的分析辨识难度较大。

——反映 t 至 $t + \frac{2L}{c}$ 时程打桩侧阻力发挥不对称性的估计值，可根据实测波形特征并结合地基条件估算，其中 $R_{skn,i,0 \rightarrow L}$ 和 $R_{skn,r,L \rightarrow 0}$ 分别为 t 至 $t + \frac{L}{c}$ 入射、 $t + \frac{L}{c}$ 至 $t + \frac{2L}{c}$ 反射两个 L/c 半程依次激发的

整个桩段入射和反射的侧阻力波。

相较于 t_u 延时法， $t_{b,u}$ 延时法计算的承载力将会提高。若 t_2 时刻前桩出现强烈卸载反弹，尽管 $t_{b,u}$ 延时法能包含端阻力充分发挥的信息，但打桩侧阻力已发生卸载， $R(t_{b,u})$ 自然偏低。

为便于式 (5.4.8-1) 试算迭代，当摩擦型桩或摩阻力对桩承载力贡献较大的长桩、超长桩在 t_2 桩底反射前未出现桩侧阻力提前卸载时，可将式 (5.4.8-1) 中的 $\Delta R_{skn,c}$ 改用下式近似估算：

$$\Delta R_{skn,c} = S_{ym} \times R_{skn} \quad (2)$$

式中： R_{skn} ——整个桩长范围的入射加反射全程侧阻力波 ($R_{skn,i,0 \rightarrow L} + R_{skn,r,L \rightarrow 0}$) 的实际发挥值，可按图 5.4.8 近似取桩底反射前曾出现的桩侧阻力最大值，即 $2F_u(t_2 - t_r)$ 。

S_{ym} ——反映入射半程和反射半程打桩侧阻力发挥对称性的系数，桩未出现明显反弹情况下的取值范围一般在 0~0.5 之间。

式 (2) 中，虽然不论是 S_{ym} 还是 R_{skn} 增大都能使 $t_{b,u}$ 减小，从而增大计算阻力 $R(t_{b,u})$ ，但两者是相互制约的：当荷载持续时间 t_d 相对于 L/c 较短、桩在 t_2 之前明显发生卸载时， R_{skn} 确实低估了真实的桩侧阻力，但不对称性的增加使 S_{ym} 系数增大；当 t_d 相对于 L/c 较长、 t_2 之前桩侧阻力持续发挥且较充分时， R_{skn} 估值较高且接近真实，说明入射和反射两个半程的侧阻发挥性状相近， S_{ym} 估值降低趋于零。

下面对 S_{ym} 取值的两种特殊情况具体说明：

1) 对于较高承载力的端承桩或侧阻力较强的摩擦桩，桩卸载反弹较强，反射半程中的桩侧静阻力可完全卸载，类似于数值建模计算的静阻力模型参数——卸载弹性限 $U_{NL}=0$ 的情况，再加上动阻力反向，可认为 $R_{skn,r,L \rightarrow 0} \approx 0$ ，即 $S_{ym} \approx 0.5$ 或 $\Delta R_{skn,c} \approx 0.5 R_{skn}$ ；当发生类似“拍皮球”的强烈反弹时， $R_{skn,r,L \rightarrow 0}$ 变为负值，极端情况就相当于 $U_{NL}=100\%$ ， S_{ym} 可趋近于 1。

2) 对于长持续 DLT 条件下打桩贯入度适中的桩，可认为 $R_{skn,i,0 \rightarrow L} = R_{skn,r,L \rightarrow 0}$ ，相当于 $S_{ym}=0$ 或 $\Delta R_{skn,c}=0$ ，亦即桩侧静阻力发挥的理想塑性状态；当桩侧土静阻力发挥所需变形较大（如加工硬化型的松散砂），类似于数值建模计算参数——加载弹性限 s_q （也称 Quake 值）较大的情况，只要有足够的锤重，使 t_d 与 L/c 之比大到能保证反射半程的桩侧静阻力继续发挥，则 $R_{skn,i,0 \rightarrow L} < R_{skn,r,L \rightarrow 0}$ ，一定程度上 S_{ym} 可小于零，否则得出 $t_{b,u} > t_u$ 的结果。

5.4.9 采用实测信号拟合法计算单桩竖向抗压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、土力学模型应能反映桩-土相互作用的实际性状，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 信号拟合时间段长度按 t_2 时刻或荷载作用持续结束时刻两者的较大值，在其后延续时间不得小于 20ms，对于柴油锤或类似的燃爆冲击加载信号不得小于 30ms。

4 当土的静阻力模型为弹-塑性时，该模型的最大弹性位移设定值不应超过相应桩单元的最大计算位移值。

5 拟合完成时，土阻力反射明显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 拟合完成后,利用计算桩底位移模拟的桩顶静荷载-沉降($Q-s$)曲线,所计算的桩-土系统吸收能量应符合下列公式要求:

$$E_{\max,s} = \int_0^{s_{\max}} Q \cdot ds \quad (5.4.9-1)$$

$$E_{\max,s} \leq E_k \quad (5.4.9-2)$$

对于桩端持力层为非坚硬岩土层的摩擦型桩,尚应符合下式要求:

$$E_{\max,s} \leq E_{tr} \quad (5.4.9-3)$$

式中: Q ——模拟的桩顶静荷载(kN);

s 、 $s_{\max}$ ——模拟的桩顶沉降、桩顶最大沉降(mm);

$E_{\max,s}$ ——桩-土系统吸收的能量(J);

E_k ——实测锤芯最大动能(J);

E_{tr} ——传递给桩的能量(J),按本标准式(6.4.2)计算。

7 当缺乏相同或相近条件下的对比验证资料为信号拟合的桩承载力提供借鉴时,应按以下步骤检查拟合的桩承载力对建模计算的岩土参数取值及其分布改变的敏感性:

1)以取得最佳信号拟合效果的初次拟合计算的桩端最大位移时刻 $t_{b,u}$ 和承载力 R_u 作为比较基准;

2)可按 R_u 的 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 、……、的变化增量 ΔR_u ,设定 R_u 与 ΔR_u 之和作为总的桩静阻力,并基本按取得最佳拟合效果的初次拟合曲线的吻合程度进行第二次、第三次、……、信号拟合,直至拟合曲线的吻合程度明显变差;

3)应根据每次拟合计算的 $t_{b,u}$,由式(5.4.8-4)计算打桩阻力 $R(t_{b,u})$;

4)检查 $\Delta R(t_{b,u})/R_u$ 和 $\Delta R_u/R_u$ 的相对变化。当变化比率 $\Delta R(t_{b,u})/R_u$ 与 $\Delta R_u/R_u$ 之比大于或等于50%时,信号拟合计算的单桩竖向抗压承载力对岩土参数的调节可判定为敏感;否则可判定为不敏感。当变化比率 $\Delta R(t_{b,u})/R_u$ 与 $\Delta R_u/R_u$ 之比小于20%时,宜采用静荷载试验进行验证。

【条文说明】 信号拟合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,这种方法还是相对客观的,但由于桩、土以及它们之间的相互作用等力学行为的复杂性,实际运用时还不能对各种桩型、成桩工艺、地基条件,都能达到十分准确地求解桩的动力学和承载力问题的效果。

与实测信号拟合的反演方法仅考虑桩-土相互作用相比,波动方程分析建模虽同样受人的主观随意性影响,但毕竟是目前唯一能进行锤-替打-桩-土相互作用分析的正演方法,特别对采用专用自由落锤试验设备的场合,由于锤的运动(锤的撞击初速度、反弹高度)容易测量、替打-缓冲组合体建模简便, $t=0$ 计算初始条件为锤芯的初始撞击速度 V_0 ,边界条件从反演的桩顶附近测点位置上升至锤顶。正演除实现了计算的桩顶激励、响应时程曲线与实测信号比较(拟合)外,还附带增加了锤芯运动边界条件的拟合,可简单理解为能量传递的拟合。尽管如此,针对承载力分析的可靠性而言,正演分析与反演拟合并无本质区别,因为正演分析所用的土模型与反演拟合一样,不能摆脱静、动阻力的耦合。但是,能量传递拟合需要认真测量锤芯的初始动能和后继运动状态,这或许能从能量转换与守恒的角度,提供限制计算承载力出现过变异的实用方法,例如本条第6款提出的要求。

关于第1款：(1)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_u 后不再随位移增加而变化）。对于卸载阶段，同样要规定卸载路径的斜率和弹性位移限。(2) 土的动阻力模型一般习惯采用与桩身运动速度成正比的线性粘滞阻尼（简化的 Smith 阻尼或 Case 无量纲阻尼），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，单元划分采用等时单元（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、敞口桩或异形桩的土塞、残余应力影响和辐射阻尼。(5) 所用模型的物理力学概念应明确，参数取值应能限定；避免采用可使承载力计算结果产生较大变异的桩-土模型及其参数。例如辐射阻尼模型就突破了传统“桩动土不动”的桩与土相互作用形态。

关于第2款：拟合时应根据波形特征，结合施工和地基条件合理确定桩土参数取值。因为拟合所用的桩、土参数的数量和类型繁多，参数的相互间耦合影响非常复杂，而拟合结果并非唯一解，需通过综合比较判断进行参数选取或调整。正确选取或调整的要点是参数取值应在岩土工程的合理范围内。因此，尽管信号拟合软件的自动拟合功能很强，但还是要有必要的人为干预。

关于第3款：短持续 DLT 自由落锤产生的力脉冲持续时间 t_d 通常不超过 30ms，而长持续 DLT 通过加大锤（配）重和采用软、厚垫缓冲或燃爆式加载可使 t_d 接近 100ms。

关于第4款：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是一个被证实的低限值。

关于第5款：波形上呈现的土阻力反射信息较为突出的时间段称为土阻力响应区。所以特别强调此区段的拟合质量，避免只重波形头尾，忽视中间土阻力响应区段拟合质量的错误做法，并通过合理的加权方式计算总的拟合质量系数，突出土阻力响应区段拟合质量的影响。对于短持续动力荷载试验曲线，常见 t_1+2L/c 时刻前出现明显卸载回弹，这将使土阻力的加载和卸载同时在土阻力响应区出现，此时不仅是加载 s_q 值、卸载的 s_{qu} 值也要发挥作用。

关于第6款：从能量转换和守恒的角度原则性地对计算承载力提出了限高要求。由于信号拟合的数值求解可以记忆静阻力的加、卸载历史，所以式 (5.4.9-3) 也就不需要式 (5.1.5-2) 的前置条件—— $t_2=t_1+2L/c$ 时刻前桩顶不得出现卸载反弹。

关于第7款：虽然从原理上讲信号拟合的承载力具有一定的客观性，特别对于信号自动拟合，人的主观干预程度相对较低，但仍无法避开问题的本质——不同的岩土参数取值及其组合带来的波动方程数值解的多解性。

信号拟合承载力的接受标准是视觉上的曲线吻合程度和经验上的岩土参数估值合理性，通过拟合得到的波动方程数值解（亦称凑合解）及从中分离出的静阻力 R_u ，将因人和计算软件不同而异。因为不可能任何时候都用 SLT 和岩土工程经验复核来发现拟合承载力 R_u 的变异程度，只能在波动方程的凑合解上做文章。比如选择初次拟合计算的桩端最大位移时刻 $t_{b,u}$ 和承载力 R_u 作为比较基准，通过改变 R_u 、并尽量按取得最佳拟合效果的初次拟合曲线的吻合程度进行二次拟合，检查 $\Delta R(t_{b,u})/R_u$ 和 $\Delta R_u/R_u$ 的相对变化。如果改变 R_u 后的拟合质量仍良好如初，则还原信号拟合的本意可知：两次拟

合的数值解所模拟的桩身波动力学现象应该基本相同, $t_{b,u}$ 或打桩阻力 $R(t_{b,u})$ 应基本不变, 这就是信号拟合的多解性表现。随着 $\Delta R_u/R_u$ 的改变, 拟合质量有所变差, 但 $\Delta R(t_{b,u})/R_u$ 也跟着明显改变, 说明拟合承载力对岩土参数的调节较敏感, 进一步调节承载力的余地不大; 反之, 则表明拟合承载力的改变相对于岩土参数的调节不敏感, 在此不敏感区域存在较大的计算承载力变异。

5.4.10 符合长持续动力荷载试验信号特征的判定应满足下列要求:

- 1 锤重与桩重之比 α_{tp} 不得小于 1;
- 2 根据实测的桩顶锤击力-动位移 ($F-w$) 曲线, 最大锤击力 F_{max} 与最大动位移 w_{max} 所对应的力 F_{Rs} 之差, 应满足下式要求:

$$F_{max} - F_{Rs} \leq 0.2F_{max} \quad (5.4.10)$$

式中: F_{max} ——实测最大锤击力 (kN);

F_{Rs} —— $F-w$ 曲线上与最大动位移 w_{max} 所对应的力 (kN)。

- 3 在实测曲线上, $0.8F_{Rs}$ 的荷载水平持续时间不得小于 $2L/c$ 。

【条文说明】本条第 1 款为必要条件, 并非充分条件。当锤与桩简化为弹性杆且桩周无土阻力时, 桩受撞击后能呈现波传播现象消失的刚体运动状态的最低要求是 $\alpha_{tp}=1$, 有土阻力时将大于或远大于 1。第 2 款要求是为了避免用于惯性效应和速率效应显著的场合。第 3 款要求则是要求使高幅值水平的准静态荷载能维持一定的时间。以上 3 款决定了波动力学问题能否采用刚体力学+静力学的近似简化。

5.4.11 符合本标准第 5.4.10 条要求的长持续动力荷载试验信号, 可按静力等效采用下式确定单桩竖向抗压承载力:

$$R_c = F_{Rs} \quad (5.4.11)$$

5.4.12 依据短持续动力荷载试验信号进行等截面桩的桩身完整性判定应符合下列规定:

- 1 缺陷深度 x 以上部位的土阻力 R_x 未受卸载回弹影响时, 桩身完整性系数 β 和桩身缺陷位置 x 应按下列公式计算:

$$\beta = \frac{F(t_1) + F(t_x) + Z \cdot [V(t_1) - V(t_x)] - 2R_x}{F(t_1) - F(t_x) + Z \cdot [V(t_1) + V(t_x)]} \quad (5.4.12-1)$$

$$x = c \cdot \frac{t_x - t_1}{2} \quad (5.4.12-2)$$

式中: 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 (kN), 等于缺陷反射波起始点的力与速度乘以桩身截面力学阻抗之差值 (图 5.4.12);

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

- 2 桩身完整性可按表 5.4.12 并结合经验判定。

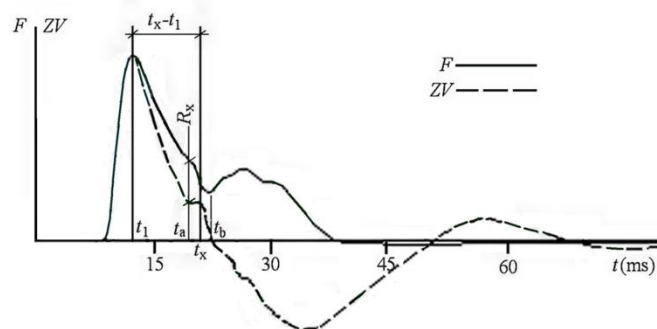


图 5.4.12 桩身完整性系数计算

表 5.4.12 桩身完整性判定

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

3 当缺陷被确认为预制桩的接头缝隙时，缝隙宽度可按下式计算：

$$\delta_w = \frac{1}{2} \int_{t_a}^{t_b} \left(V - \frac{F - R_x}{Z} \right) \cdot dt \quad (5.4.12-3)$$

式中： δ_w ——缝隙宽度（mm）；

t_a 、 t_b ——缺陷反射速度波的起点、终点时刻（图 5.4.12）。

5.4.13 当通过实测信号拟合判定桩身完整性时，拟合所选用的桩、土参数应符合本标准第 5.4.9 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以及混凝土预制桩的接桩缝隙拟合。

5.4.14 出现下列情况之一时，桩身完整性宜按地基条件和施工工艺，结合实测信号拟合或其他检测方法综合判定：

- 1 桩身有扩径；
- 2 混凝土灌注桩桩身截面渐变或多变；
- 3 力和速度曲线在第一峰附近不成比例，桩身浅部有缺陷；
- 4 锤击力波上升缓慢；
- 5 缺陷深度 x 以上部位的打桩阻力 R_x 明显受卸载回弹影响，造成计算的桩身完整性系数偏高。

5.4.15 动力荷载试验报告应给出实测的力与速度信号曲线，且对于本地区相近条件下的相同桩型，在设计要求的单桩竖向抗压极限承载力差别不大的条件下，宜采用固定的曲线纵、横坐标刻度。

5.4.16 检测报告除应包括本标准第 3.3.4 条规定的内容外，尚应包括下列内容：

- 1 冲击加荷设备锤芯的质量、冲程或额定动能，锤重与桩重比，锤击力的测量方式。
- 2 采用应变传感器的测量应变信号换算锤击力时的校核修正系数，实际采用的桩身波速值。
- 3 实测信号或由实测信号变换的力、加速度、速度、位移的最大值，锤芯的落距或初始撞击速度，传递给桩的能量及能量传递比，桩身最大拉、压应力。

4 按式 (5.1.4-1)、式 (5.1.4-2) 分别计算的 t_1 和 t_u 时刻的打桩阻力 $R(t_1)$ 、 $R(t_u)$ 。

5 桩身完整性类别。

6 桩身有缺陷时，缺陷距桩顶的深度，也可在力与速度或入射与反射力波曲线图上标注。

7 所采用的单桩竖向抗压承载力计算方法简要说明。

8 相应的承载力计算方法还应提供下列数据和图表：

1) 实测信号拟合所选用的各单元桩和土的模型及其参数取值，拟合曲线、土阻力沿桩身分布图，模拟的桩顶静荷载-沉降 ($Q-s$) 曲线及其按式 (5.4.9-1) 计算的能量 $E_{\max,s}$ ；

2) 延时法应将桩端延时 $t_{b,u}$ 标注在力与速度或入射与反射力波曲线图上；

3) 对于符合长持续动力荷载试验特征的信号，当采用静力等效直接确定单桩竖向抗压承载力时，应给出实测的桩顶锤击力-动位移 ($F-w$) 曲线， $F-w$ 曲线上的最大锤击力 $F_{\max}$ 和最大动位移 $w_{\max}$ 所对应的力 F_{Rs} 数值。

6 打桩预分析和监控

6.1 一般规定

6.1.1 锤击沉桩前，根据桩基设计条件和拟用打桩设备的型号，对桩的可打性进行预分析，可获得打桩系统能量传递、桩身应力、桩承载力、锤击数等组别的代表值随桩入土深度变化，以及对锤击沉桩设备适宜性的评估。通过不同组别代表值的综合比选，可将其作为锤击沉桩过程中和初打结束收锤标准的控制指标。

【条文说明】打桩预分析所采用的方法分为两类。一类是基于波动理论的方法；另一类是基于刚体力学的打桩公式方法，基本思路是根据预估的桩顶有效冲击能量传递与土阻力（承载力）相对桩顶位移做功所消耗的能量之间的关系，建立半理论-半经验公式。打桩公式的应用逾百年历史，通常应用时离不开当地的工程经验，我国罕见应用，且国际上也有逐步被波动理论方法取代的趋势。因此本标准的打桩预分析仅限于波动理论的方法，如根据弹性杆碰撞现象推导的打桩应力计算公式、用于锤-替打-桩-土系统数值模拟的波动方程分析。

当锤击沉桩的设计和施工已积累大量成熟经验或有相关标准可依时，初打结束的收锤标准通常不需要借助波动方程分析确定，而采用下列简单要求：

- 1) 桩的入土深度；
- 2) 桩的单击贯入度或单位打入深度的锤击数；
- 3) 兼顾以上两款指标双控。

6.1.2 锤击沉桩施工前已进行了打桩预分析的沉桩施工，宜在正式施工开始的初期阶段，选择同一条件下的工程桩，在打桩系统工作平稳的状态下进行沉桩施工过程的监测和观测，或待桩初打结束休止一定时间后进行复打测试，对收锤标准的控制指标所依据的代表值以及相关联的计算参数，进行复核与调整。复打至初打的停歇时间应符合本标准表 3.2.5 的规定。

【条文说明】本条是锤型和桩型已确定的情况下，对正式施工前期如何开展初打、复打工作的原则性规定，试打桩工作其实就是两者的有效结合。

对于以轴向承压为主的桩，设计层面一般较关注桩打入预定桩底标高后的初打承载力，于是沉桩前的波动方程分析（EQA），仅需针对锤-替打-桩-土系统数值建模时的桩周土阻力改变，计算得到预设静阻力随锤击数的变化曲线（承载图），然后根据初打结束时观测的锤击数（或贯入度），便能在承载图上找到对应的初打承载力预测。更繁复的做法是：需要合理预估桩尖进入和穿越不同土层时土阻力初始值，以及反复锤击扰动引起的土阻力变化（疲劳、触变、挤密等）范围，经 EQA 得到锤击数和输入能量 E_{tr} 随入土深度变化，并与打桩全程观测的锤击数、锤芯冲程数据进行比较，当 EQA 预测与实际观测的曲线变化规律基本相符时，可取各层岩土阻力的初始估值之和作为最终入土深度时桩的初打承载力估计值。再进一步，如果对打桩全程 EQA 模拟还结合桩型尺寸及土塞、桩锤型号及冲程等变化进行，则同时涵盖了桩的可打性分析。

EQA 的合理应用离不开沉桩过程的观测、监测数据验证和成熟应用经验的支持，而且，EQA 得到的毕竟是初打承载力，桩的长期承载力还需要复打甚至静载试验才能确定。因此相对而言，桩的可打性分析更多是从施工的角度，不仅要预测桩能否被顺利打到设计标高，更注重这一过程的高效

和无害实现，由于涉及沉桩质量控制，自然也就成了本检测标准的关注重点。

6.1.3 当采用试打桩进行桩端持力层和单桩竖向抗压承载力比选时，应根据下列条件的测试数据，并结合设计和地基条件，经综合分析后确定。

- 1 初打测得的桩承载力和贯入度数据；
- 2 复打确定的桩承载力恢复系数。

【条文说明】综合分析时可能遇到这些情况：设计荷载工况以水平力或上拔力为主，存在泥面下的冲刷深度较大、新近沉积或回填的欠固结土层较厚等不利影响。

6.1.4 锤击沉桩前未进行打桩预分析，或已开展过打桩预分析并建立收锤标准的沉桩施工，当出现下列各款情况之一，并初步判断该款情况的出现与打桩系统的性能或操控的设置不合适有关，宜按当前沉桩施工采用和记录的参数、数据，补充或补正打桩预分析工作：

- 1 沉桩过程无异常，但桩身出现了损伤；
- 2 桩尖已达到设计标高，但锤击数或收锤贯入度不满足设计要求；
- 3 桩顶强烈反弹，拒锤现象明显。

【条文说明】关于本条第 1 款桩身损伤原因的解释。习惯上，打桩桩身轴向拉、压应力超限引起的桩身损伤，可依据一维应力波理论的预警在沉桩中避免。因此，一旦桩身损伤发生，更多的怀疑是打桩系统的性能和操控设置出了问题。但需说明，一维纵波理论计算的桩身应力能直接评判与桩身材料强度相关的桩身结构正截面受压承载力，但也有例外，对更危险的桩身结构屈曲失稳尚不能直接预警：

1) 预钻孔植入桩需通过后继锤击将桩尖打入设计要求的坚硬持力层，由于桩侧缺乏侧向约束导致桩身弯曲失稳；更常见的桩身失稳是桩尖已接触坚硬岩土层，而泥面以上的桩段（包括桩底以上覆盖层为深厚软弱土层中的桩段）长、细、柔，可能还叠加斜桩施工、水上沉桩打桩船晃动等不利因素。

2) 喀斯特、花岗岩球状风化地貌隐伏基岩起伏大，混凝土桩因桩尖侧滑或桩端受压偏心而折断，敞口钢管桩或 H 型钢桩的桩端受力不均、局部卷边损伤最终导致弯曲或弯扭失稳。

3) 与混凝土桩桩身屈曲失稳的脆性破坏现象不同，钢桩的桩身失稳、包括桩尖的局部损伤逐步演变而成的桩端屈曲失稳，并非脆性破坏，即便有打桩跟踪监测，短持续动力荷载试验的测试波形在桩身失稳过程中的缺陷程度发展相对缓慢，特别出现在桩底附近的桩身屈曲失稳，位置与桩底反射重叠。

6.1.5 锤击沉桩过程连续监测的传感器安装除应符合本标准附录 B 的规定外，当传感器信号采取有线方式传输时，还应对传感器的连接线缆有效固定。

6.2 打桩预分析

6.2.1 预制桩连续锤击沉桩的预分析，应根据桩尖拟穿越和进入的岩土层力学性状、打桩设备性能及其操控设置，经综合分析、比选，对最不利的桩身应力及其相应的桩尖入土深度，进行验算和预判。

6.2.2 波动方程分析数值模拟应符合下列规定：

- 1 锤、替打、桩模型的几何尺寸和材料特性参数，宜按相应打桩设备型号和桩型规格的产品说明书取用。
- 2 打桩锤的冲击动能宜按既往实测锤芯撞击初速度 V_0 的统计值取用，无实测数据参考时，可

按无能量损耗条件取额定值，但应在锤击沉桩时进行实测复核。

3 替打-缓冲组合体的缓冲垫加载、卸载模量，宜根据平面应变条件下的反复压缩压力-变形曲线，分别按加载和卸载全程的割线模量取用。

4 土阻力模型参数取值应符合下列规定：

1) 桩侧、桩端静阻力沿桩的分布和初始估值，可按岩土工程勘察报告提供的岩土层划分及分层岩土物理力学指标采用；

2) 在无长时间意外停歇的连续锤击条件下，桩侧和桩端岩土强度的损失或增强幅度，可按相近条件的既有经验估算；无相近条件的经验时，应选择预估打桩阻力出现显著变化的代表性桩端入土深度，逐一通过初打、复打测试确定；

3) 当需要根据波动方程分析建立的初打收锤标准估计桩的承载力时，土阻力模型中的静阻力参数应按本标准表 3.2.5 规定的休止时间，通过复打复核；

4) 土阻力模型中分别模拟静阻力、动阻力发挥的变形和阻尼参数，可按既有经验取值。

6.2.3 预制桩在连续锤击沉桩过程中，当桩端平面以上的上覆土层基本为软弱土层，或虽非软弱土层，但锤击扰动引起桩的侧阻力可以忽略时，打桩桩身应力可按下列简化公式计算：

1 桩顶初始撞击压应力峰值可按下列公式计算：

当 $t_{c-eq} \geq t_{r-eq}$ 时

$$\sigma_{c,0} = \frac{2Z_r \cdot Z_c}{(Z_r + Z_c)(Z_c + Z)} \cdot \frac{Z \cdot V_0}{A} \quad (6.2.2-1)$$

当 $t_{c-eq} < t_{r-eq}$ 时

$$\sigma_{c,0} = \frac{4Z_r \cdot Z_c (Z_r \cdot Z + Z_c^2)}{(Z_r + Z_c)^2 (Z_c + Z)^2} \cdot \frac{Z \cdot V_0}{A} \quad (6.2.2-2)$$

式中： V_0 ——锤芯初始撞击速度（m/s）；

$\sigma_{c,0}$ ——桩顶初始撞击压应力（kPa）；

Z_r ——锤芯的等效阻抗（kN·s·m⁻¹）；

Z_c ——替打-缓冲组合体的等效阻抗（kN·s·m⁻¹）；

t_{c-eq} 、 t_{r-eq} ——纵波分别通过替打-缓冲组合体、锤芯的等效时间（ms），应按本标准附录 C 计算。

注：当替打-缓冲组合体的质量可以忽略时，可按本标准附录 C 第 C.0.5 条，将缓冲体与锤芯串联组合构成只包含单一组合锤的打桩系统。当采用（6.2.2-1）计算桩顶初始撞击压应力时，应将该式中的替打-缓冲组合体的等效阻抗 Z_c 替换为桩身截面力学阻抗 Z 。

2 当桩尖尚未进入硬层时，混凝土桩桩身的最大拉应力可按下列公式计算：

$$\sigma_t = \beta_t \cdot \eta_{tc} \cdot \sigma_{c,0} \quad (6.2.2-3)$$

$$\eta_{tc} = \begin{cases} \exp \left[-\frac{\max(t_{r-eq}, t_{c-eq})}{L \cdot c^{-1}} \cdot (\alpha_{tp} - 0.5) \right] & (\alpha_{tp} > 0.5) \\ 1 & (\alpha_{tp} \leq 0.5) \end{cases} \quad (6.2.2-4)$$

式中： σ_t ——桩身拉应力（kPa）；

β_t ——拉应力反射系数，可根据相近条件下的既往监测及观测数据确定，或基于对反复锤击过程中桩周岩土强度改变积累的经验进行估算，全桩长范围的打桩阻力可以忽略或出现明显~严重溜桩时， β_t 可取为-1；

η_{tc} ——全桩长范围无打桩阻力时的桩身拉应力与压应力的峰值比；

α_{TP} ——锤重与桩重之比。

3 当桩端进入硬层时，桩端压应力可按下列公式计算：

$$\sigma_b = \beta_b \cdot \sigma_{c,0} \quad (6.2.2-5)$$

$$\beta_b = \frac{2Z_b}{Z + Z_b} \quad (6.2.2-6)$$

$$Z_b = \rho_b \cdot c_b \cdot A_b \quad (6.2.2-7)$$

式中： σ_b ——桩端压应力（kPa）；

β_b ——桩端压应力放大系数；

Z_b ——桩端持力层岩土的名义阻抗（kN·s·m⁻¹）；

ρ_b ——桩端持力层岩土的质量密度，当为风化岩时，可按 2.0t/m³~2.7t/m³ 取值；

c_b ——桩端岩土的纵波波速，当为风化岩时，可按 1000 m/s~3000m/s 取值；

A_b ——桩底与持力层接触的轴向投影面积（m²）。对于沉桩过程中有土体涌入桩内腔的敞口中~小直径混凝土空心桩以及半敞口钢管桩、大直径混凝土管桩，接触面积可按闭口桩端面积取值；对于敞口钢管桩，当受桩端进入硬层和涌入桩内腔土芯发生闭塞两个因素共同影响出现沉桩困难时，接触面积可按闭口桩端面积取值；但对于超大直径钢管桩，沉桩过程中桩内腔的土芯不发生闭塞时，接触面积应按包括加强箍在内的实际桩端面积取值。

【条文说明】打桩侧阻力适中或较强、且沿桩分布无明显突变时，桩身危险应力一般以桩顶的初始撞击压应力峰值控制。打桩侧阻力低下使初始入射压力波几乎不衰减地传至桩底，当桩端处于软弱土层时产生强拉力波反射，处于较硬岩层时产生压力波反射（不考虑伴随拍皮球现象的二次入射拉力波问题），因此桩身危险拉应力、压应力控制分别由桩顶下移至桩身某一深度和桩端。

需要进行打桩预分析和监控的锤击预制桩工程，其单桩在荷载模式、几何尺寸、使用环境、场地岩土工程条件、所用沉桩施工设备及综合造价等方面，与陆地常见的中小型竖向承载桩有不同程度的差别，且以穿越深厚软弱土层的大直径长桩、超长桩较为多见。基于 DLT 波形在 t_1 时刻的初始撞击力峰值主要受桩上部侧阻力影响的特点，可忽略桩端岩土层以上的上覆软弱土层（或虽非软弱土层，但反复锤击扰动使其强度明显下降）的打桩阻力，于是将锤-替打-桩-土四者的相互作用简化成不包括土的三者相互作用，从而得到了具有不同阻抗的三根弹性杆相互碰撞问题的解答——式（6.2.2-1）和（6.2.2-2）；同时，利用替打等效时间 $t_{c\text{-eq}}$ 与锤芯等效时间 $t_{r\text{-eq}} (=H_r/c_r)$ 的比值，区分了 $t_{r\text{-eq}} \leq t_{c\text{-eq}}$ 轻锤与替打的一次撞击和 $t_{r\text{-eq}} > t_{c\text{-eq}}$ 重锤、细长锤与替打的多次撞击（图 4），弥补了按一次撞击计算重锤初始撞击力峰值导致的低估。式（6.2.2-2）的应用场合多见于重锤与轻-薄-软替打的组合。

η_{lc} 为无打桩阻力时桩身拉应力与压应力的峰值比，其值越大，说明后继入射压力波对桩底反射拉力波的抵消能力越差。式（6.2.2-4）给出了 η_{lc} 随 α_{TP} 和相对荷载作用时长 $\max(t_{r\text{-eq}}, t_{c\text{-eq}})/(L \cdot c^{-1})$ 变化的曲线（见图 5），说明锤相对轻、桩相对长时桩身拉应力相对幅值增大，反之减小。

敞口桩（包括 H 型钢桩）的土塞形成及其作用机理较复杂，不仅与桩的直径和壁厚有关（桩径变大、壁厚变薄，排土效果变好，土芯闭塞效果趋弱），还从出现土芯开始到形成土塞为止，受桩尖已穿越和进入岩土层的岩土物理力学特性影响，这其中还包括沉桩过程中停歇时间长短对受扰动土强度恢复的影响。从土塞发挥作用的机理上看，桩内腔土芯完全闭塞时，土塞与桩内壁间的摩擦

力换来的桩底受力面积增大是土塞的外在表现；而土芯与相邻桩段内壁的相对滑移变形减小，使闭塞土芯高度范围内桩身的运动和变形受限是土塞的内在表现，可视同为土塞段的桩身阻抗增加。所以，当桩底反射压力波时，土塞段与非土塞段分界处的桩身截面将出现压应力放大。

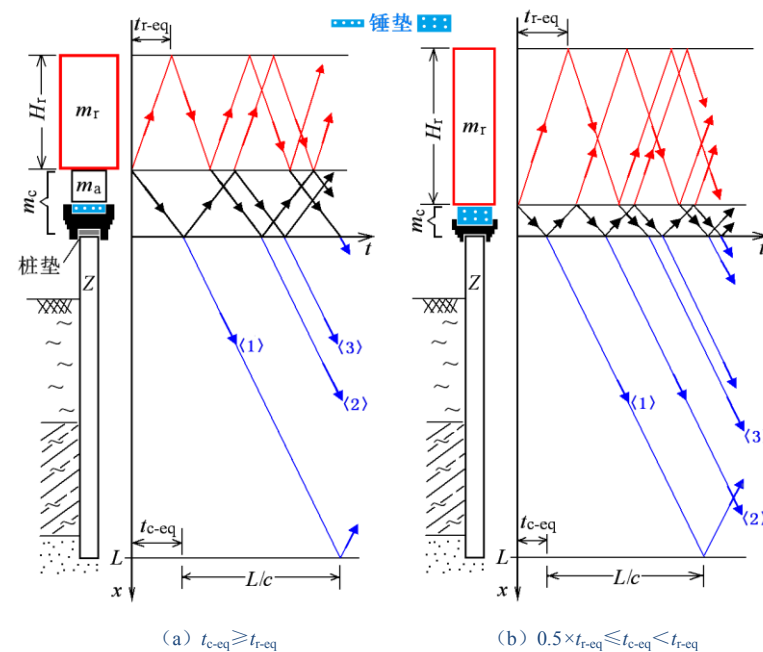


图4 波的传播轨迹（不计桩侧阻力反射影响）

m_r —锤芯质量； m_c —替打质量； m_a —冲击板质量(属于 m_c 的一部分)；〈1〉、〈2〉、〈3〉—分别为替打对桩顶的第1、2、3次撞击

混凝土实心桩和中~小直径空心桩，桩端处压应力放大常导致打烂桩尖，对于钢管桩、H型钢桩，常引起桩端局部破损（卷边）或进一步演变为桩身屈曲失稳，而失稳状态的承载力低于按材料抗压强度控制的正截面受压承载力。

补充强调：一维纵波理论虽能发现桩身压应力放大，也只针对桩身的正截面受压承载力，因与更危险的桩桩弯曲、弯扭失稳非同一机制，只能算是为提供预警的计算辅助。薄壁钢管桩、H型钢桩的桩端为基岩时，应采用相对宽松的收锤标准。

当然，混凝土实心桩同样会出现桩端压应力放大导致的破损，如喀斯特、花岗岩球状风化地貌遇到严苛的收锤标准打烂桩尖，桩端侧移或局部偏压导致的桩身弯折破坏。

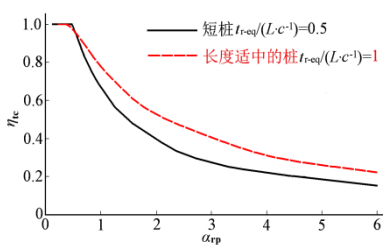


图5 α_{tp} 与 η_c 的模拟关系

6.3 桩身锤击应力监控

6.3.1 最不利桩身锤击应力监测宜符合下列规定：

- 1 锤击拉应力宜在预计桩端进入软土层或桩端穿过硬土层进入软弱夹层时测试；
- 2 锤击压应力宜在桩端进入硬土层或岩层时测试。

6.3.2 桩端未打入硬层的锤击沉桩阶段，当桩处于容易打入或接近正常打入状态时，混凝土桩桩身锤击拉应力的计算与控制应符合下列规定：

- 1 桩身锤击拉应力应采用以 t_2 时刻反射力波作为比较基准的反向（时间减小方向）搜索模式，按下列公式计算：

$$\sigma_t(t_1 + \frac{2L-x}{c}) = \frac{1}{A} \left[F_d \left(t_1 + \frac{2L-2x}{c} \right) + F_u(t_2) - R_{skn,i,0 \rightarrow x} - R_{skn,r,x \rightarrow 0} \right] \quad (6.3.2-1)$$

当桩顶入射波力波 $F_d(t)$ 在时间 $t_1 < t \leq t_2 - t_r$ 范围内大于零时, 测点至深度 x 、深度 x 至测点依次激发的 x 桩段侧阻力的代数和可按式估算 (图 6.3.2) :

$$R_{skn,i,0 \rightarrow x} + R_{skn,r,x \rightarrow 0} = 2 \left[F_u \left(t_1 + \frac{2L-x}{c} \right) - F_u \left(t_1 + \frac{2L-2x}{c} \right) \right] \quad (6.3.2-2)$$

式中: x ——测点至计算点的深度 (m) ;

σ_t —— $(t_1 + \frac{2L-x}{c})$ 时刻、 x 深度处的桩身拉应力 (kPa) ;

F_d, F_u ——实测的入射(下行)力波、反射(上行)力波(kN), 分别等于 $\frac{F+Z \cdot V}{2}$ 、 $\frac{F-Z \cdot V}{2}$;

$R_{skn,i,0 \rightarrow x}$ 、 $R_{skn,r,x \rightarrow 0}$ ——测点至深度 x 、深度 x 至测点依次激发的 x 桩段入射和反射侧阻力波 (kN) 。

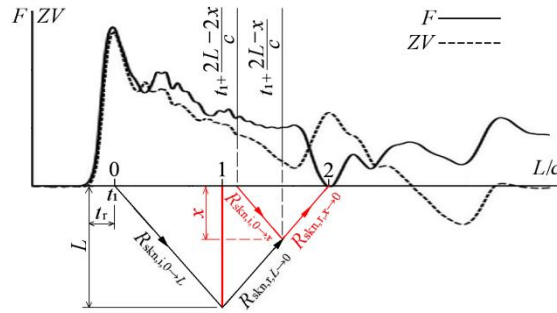


图 6.3.2 桩身锤击拉应力计算图示

2 沉桩跟踪监测过程中, 当桩的贯入度持续增大, 且桩身拉应力绝对值超过设计限值, 应暂停锤击和监测, 待调整打桩设备参数、减小锤芯初始撞击速度 V_0 , 或休止一定时间、使桩侧和桩端打桩阻力部分恢复后, 方可继续沉桩。

【条文说明】规定 $t=t_2-t_r$ 时刻前 $F_d(t)>0$ 只是为限制桩的明显卸载反弹, 仍允许桩中、上段出现一定程度的卸载, 如需严格限制则应规定该时刻前 $V(t)>0$ 。另外, t_2 时刻前如果桩顶出现明显反弹, 说明桩的打桩侧阻力相对很强, 这对摩擦型桩而言, 桩身极端拉应力问题已不突出。规避桩顶出现明显反弹的波动力学意义是: 在深度 x' ($0 < x' \leq x$) 处, $0 \rightarrow x$ 入射轨迹与 x' 相遇点处激发的入射阻力波 $R_{skn,i,x'}$ 不等于 $x \rightarrow 0$ 反射轨迹与 x' 相遇点处激发的反射阻力波 $R_{skn,r,x'}$ (这种情况多见于轻锤、窄脉冲导致的桩明显提前卸载反弹, 此时 $R_{skn,r,x'} < R_{skn,i,x'}$), 而低估 $(R_{skn,i,0 \rightarrow x} + R_{skn,r,x \rightarrow 0})$, 使计算的拉应力偏低, 不安全。

6.3.3 当桩端打入硬层并出现沉桩困难时, 桩端压应力的计算与控制应符合下列规定:

1 桩端压应力应按下列公式计算:

$$\sigma_b(t_1 + \frac{L}{c}) = \frac{1}{A} \left[F_d(t_1) + F_u(t_2) - R_{skn,i,0 \rightarrow L} - R_{skn,r,L \rightarrow 0} \right] \quad (6.3.3-1)$$

测点至桩底入射半程和桩底至测点反射半程所激发的桩全程侧阻力可按式估算:

$$R_{skn,i,0 \rightarrow L} + R_{skn,r,L \rightarrow 0} = \max_{t_1 < t \leq t_2 - t_r} [F_u(t)] \times 2 \quad (6.3.3-2)$$

式中： σ_b —— $(t_1 + \frac{L}{c})$ 时刻的桩端压应力（kPa）；

$R_{skn,i,0 \rightarrow L}$ 、 $R_{skn,r,L \rightarrow 0}$ ——测点至桩底半程、桩底至测点半程依次激发的整个桩段的入射侧阻力波和反射侧阻力波（kN）。

2 满足下列条件时，应判定桩端出现压应力放大：

$$\sigma_b \times A > F_d(t_1) \quad (6.3.3-3)$$

3 沉桩跟踪监测过程中，如遇贯入度骤减、桩顶强烈反弹，应立即停锤、终止监测。

【条文说明】当时间 $t \leq t_2 - t_r$ 出现桩顶发生明显反弹（ $F_d(t) < 0$ ）时，仍会造成式（6.3.3-2）对（ $R_{skn,i,0 \rightarrow x} + R_{skn,r,x \rightarrow 0}$ ）的估值偏低，好在高估桩端压应力相对偏于安全，特别对钢桩而言，桩端通常发生屈曲失稳而非正截面受压破坏。

6.3.4 对于桩端未曾穿越硬层也未进入硬层的正常打入桩，桩身最大压应力可按桩顶测点的实测最大锤击压应力取值。

6.3.5 当混凝土桩在沉桩过程中出现桩顶强烈反弹甚至拒锤时，除应按本标准第 6.3.3 条计算桩端压应力外，还应采用正向（时间增大方向）搜索模式，以 t_2 时刻附近或以后出现的最大入射拉力波为基准，进行桩身拉应力验算。

【条文说明】桩顶强烈反弹甚至拒锤就是俗称的“拍皮球”现象，常见于嵌岩桩。极强的桩端压力波反射回桩顶，锤受桩冲顶反弹脱离桩顶，进而在 t_2 时刻附近或稍后出现入射拉力波，桩身拉应力可以桩顶出现最大入射拉力波幅值的时刻 t_{2nd} 为基准，在 $t_{2nd} \sim t_{2nd} + 2L/c$ 时间范围或等价地变为对如下表达式各行波分量中的变量 x 进行搜寻得到：

$$\sigma_t(x, t_{2nd} + \frac{x}{c}) = \min_{0 < x \leq L} \left[F_d(t_{2nd}) + F_u\left(t_{2nd} + \frac{2x}{c}\right) - (R_{skn,i,0 \rightarrow x} + R_{skn,r,x \rightarrow 0}) \right] \cdot \frac{1}{A} < 0 \quad (3)$$

这里需要提醒，（ $R_{skn,i,0 \rightarrow x} + R_{skn,r,x \rightarrow 0}$ ）估值较困难，因为以 t_1 时刻为起点的（ $0 \rightarrow x$ ）+（ $x \rightarrow 0$ ）全程侧阻力波（ $R_{skn,i,0 \rightarrow x} + R_{skn,r,x \rightarrow 0}$ ）的初始值一般可默认为零，而 t_{2nd} 时刻这些初始值一般不等于零。

6.4 锤 击 能 量 监 测

6.4.1 桩锤最大动能宜通过实测锤芯最大运动速度确定。桩锤效率应按下式计算：

$$\eta_{eff} = \frac{E_k}{E_{nom}} \quad (6.4.1)$$

式中： η_{eff} ——桩锤效率；

E_k ——锤芯最大动能；

E_{nom} ——沉桩监测过程中，桩锤系统在设定操控条件下的输出能量标称值。

6.4.2 打桩锤实际传递给桩的能量应按下式计算：

$$E_{tr} = \int_0^{t_e} F \cdot V \cdot dt \quad (6.4.2)$$

式中： E_{tr} ——传递给桩的能量；

t_e ——信号采样结束时刻。

6.4.3 桩锤的能量传递比应按下式计算：

$$C_r = \frac{E_{tr}}{E_k} \quad (6.4.3)$$

式中： C_r ——能量传递比。

6.4.4 打桩设备的适宜性应根据监测过程中桩锤能量传递比、打桩阻力、贯入度等监测数据的变化，进行综合评价。

【条文说明】桩锤效率是沉桩机械工作性能的综合体现，如设备维修保养不佳，锤芯与导向间的摩擦，液压锤负压损耗等；锤芯传递给桩的能量高低受锤-替打-桩-土相互作用的影响，尽管监测过程中锤型、桩型及替打各部件的阻抗或刚度不变，但仍需要考虑以下因素：

1) 打桩阻力及贯入度随桩的入土深度改变，都将影响桩顶实测输入能量 E_{tr} 的大小，如打桩阻力渐强（贯入度减小）使 E_{tr} 减小，桩端进入相对软弱土层打桩阻力下降（贯入度增大）并伴有明显溜桩现象， E_{tr} 可能不增反降。

2) 缓冲垫经反复锤击变硬变薄、能耗下降， E_{tr} 增加。

6.5 结果报告及建议

6.5.1 打桩预分析或打桩监测的结果报告应包括下列通用内容：

- 1 委托方名称，工程名称、地点、设计用途以及基础、结构形式，建设、勘察、设计、监理和施工单位；
- 2 场地环境、地基条件描述；
- 3 桩型、桩长和桩的入土深度，桩的各节段长度及截面尺寸；
- 4 试打桩和打桩监控采用的打桩系统型号、规格，包括替打的几何尺寸、质量，缓冲垫的材质、厚度和模量；
- 5 混凝土桩的桩身混凝土强度等级、有效预应力，钢桩的钢材牌号、屈服强度；
- 6 参照的相关标准、规范或文献。

6.5.2 打桩预分析结果报告除应包含本标准第 6.5.1 条规定的内容外，尚应包括下列内容：

- 1 桩的可打性分析所设定的计算条件：
 - 1) 桩的入土深度、分阶段沉的桩段长度，连续沉桩或中间有停歇沉桩、敞口桩是否考虑土塞等；
 - 2) 各土层土模型的极限土阻力、弹性变形限和阻尼取值；
 - 3) 桩尖穿越或进入不同土层的极限土阻力受连续锤击影响的衰减或增强。
- 2 计算的锤击数、锤击传递给桩的能量随桩打入深度变化以及桩的极限土阻力。
- 3 计算的桩身最大压应力和拉应力。
- 4 对混凝土桩出现桩身最大拉应力的入土深度，给出适当降低锤芯冲程或锤击能量的提示。
- 5 桩端持力层为坚硬岩土层的大直径混凝土薄壁管桩、钢管桩、H 型钢桩，当计算的桩端最大压力超过桩端以上的桩身最大轴力时，给出适当降低收锤标准（如锤击数）、锤芯冲程或锤击能量的提示；当 H 型钢桩、敞口钢管桩的桩端持力层为较硬～坚硬岩石但基岩面可能起伏较大或有孤石存在时，给出桩端局部卷边导致的桩身屈曲失稳的风险提示。
- 6 桩尖打入坚硬、较坚硬土层的钢桩，其桩身在泥面以上和泥面以下软弱或可液化土层中的长度 L_f 较长时，可根据计算的力时程曲线在 L_f/c 时段的有效幅值高低，结合是否存在斜桩施工、水上沉桩打桩船晃动等不利因素，按照现行国家标准《钢结构设计标准》GB 50017 进行桩身受压稳定性

验算，或向设计方提出桩身受压稳定性验算的建议。

7 为自由落锤动力荷载试验匹配锤重时，给出计算的桩顶力-速度时程曲线、最大位移，落锤传递给桩的能量和桩身最大拉应力、压应力。

6.5.3 桩身锤击应力监控和锤击能量监测结果报告除应包含本标准第 6.5.1 条规定的内容外，尚应包括下列内容：

- 1 锤击数和桩锤冲击能量随入土深度变化的记录。
- 2 桩身锤击拉应力和压应力、传递给桩的能量以及桩身完整性随入土深度变化的图表。
- 3 桩身出现最大拉应力和压应力的幅值及对应的入土深度，监控过程中发出停锤指令的原因解释。
- 4 试打桩按既定时间休止后的复打，应给出初打、复打承载力的计算比较。对于停歇一定时间后继续打桩至设计桩底标高的沉桩过程监控，报告应包括本条第 1~3 款的内容。必要时，结合沉桩前已开展的可打性分析数据，对打桩系统性能、收锤标准以及预估的初打承载力的适宜性进行评价。

附录 A 混凝土桩桩头处理

- A.0.1** 混凝土桩应凿掉桩顶部的破碎层以及软弱或不密实的混凝土。
- A.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。
- A.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。
- A.0.4** 对于不采用荷重传感器或锤芯安装加速度传感器直接测量锤击力的灌注桩，应在距桩顶 1.5 倍桩径（或边宽）范围内，采用厚度为 3mm~5mm 的钢板围裹。
- A.0.5** 距桩顶 1 倍桩径（或边宽）范围内，宜用厚度为 3mm~5mm 的钢板围裹或距桩顶 1.5 倍桩径（或边宽）范围内设置箍筋，间距不宜大于 100mm。
- A.0.6** 桩顶设置钢筋网片不得少于 3 层，间距 60mm~100mm。
- A.0.7** 桩头混凝土强度等级宜比桩身混凝土提高 1 级~2 级，且不得低于 C30。
- A.0.8** 桩顶下安装传感器位置处的截面尺寸应与原桩身截面尺寸相同。
- A.0.9** 桩顶应使用水平尺找平。

附录 B 测量传感器安装

B.0.1 桩顶与锤芯之间设置荷重传感器（图 B.0.1a）应符合下列要求：

- 1 荷重传感器底面与桩顶的接触面积不得小于桩头顶面面积的 50%；
- 2 荷重传感器量程不得低于预估最大锤击力的 2 倍；
- 3 荷重传感器与替打的质量之和不宜超过锤芯质量的 10%；
- 4 灌注桩测试宜增设桩垫缓冲。

B.0.2 在桩顶下桩侧表面安装应变传感器和加速度传感器（图 B.0.1c～图 B.0.1e）时，应符合下列规定：

1 应变传感器和加速度传感器，宜分别对称安装在距桩顶不小于 1.5 倍直径 D 或边宽 B 的桩侧表面处；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 $1D$ 或 $1B$ ；传感器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；

2 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；

3 各传感器的安装面材质应均匀、密实、平整；当传感器的安装面不平整时，可采用磨光机将其磨平；

4 安装传感器的螺栓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，传感器的敏感轴应与桩中心轴线平行；锤击时传感器不得产生滑动；

5 加速度传感器的安装底座宜采用质量轻、弹性模量高的材料制作；

6 安装应变式传感器时，应对其初始应变值进行监视；安装后的传感器初始应变值不应过大，锤击时传感器的可测轴向变形余量的绝对值应符合下列规定：

- 1) 混凝土桩不得小于 $1500\mu\epsilon$ ；
- 2) 钢桩不得小于 $2000\mu\epsilon$ 。

B.0.3 自由落锤锤体上安装加速度传感器（图 B.0.1b）时，除应符合本标准第 B.0.2 条的有关规定外，尚应保证安装在桩侧表面的加速度传感器距桩顶的距离，不小于下列数值中的较大者：

- 1 0.4 倍锤芯高度 H_t ；
- 2 桩的直径 D 或边宽 B 。

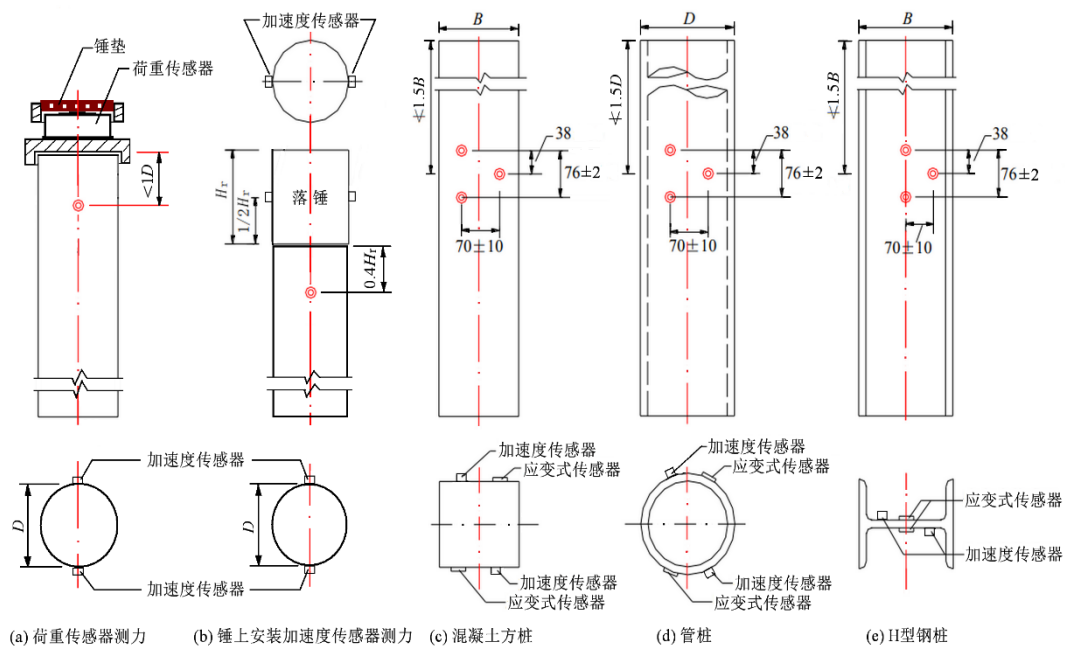


图 B.0.1 传感器安装示意图

注：图中尺寸单位为 mm。

B.0.4 送桩器上安装传感器除应符合本标准第 B.0.2 条的有关规定外，尚应满足下式要求：

$$0.75Z \leq Z_f \leq 1.25Z \quad (\text{B.0.4})$$

式中： Z_f ——传感器安装处的送桩器截面阻抗 ($\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$)。

附录C 替打计算

C.0.1 替打-缓冲组合体的抗压刚度应按下列公式计算：

1 锤垫和桩垫

$$k_{c-r} = \frac{E_{c-r} \cdot A_{c-r}}{\delta_{c-r}} \quad (C.0.1-1)$$

$$k_{c-p} = \frac{E_{c-p} \cdot A_{c-p}}{\delta_{c-p}} \quad (C.0.1-2)$$

式中， k_{c-r} 、 k_{c-p} ——锤垫、桩垫的抗压刚度（kN/mm）；

E_{c-r} 、 E_{c-p} ——锤垫、桩垫的割线模量（MPa）；对于采用具有加工硬化特性材料制成的缓冲垫，应按预期的锤击沉桩条件计入多次锤击后的割线模量递增；

A_{c-r} 、 A_{c-p} ——锤垫与锤或冲击垫板、桩垫与桩的有效接触面积（m²）；

δ_{c-r} 、 δ_{c-p} ——锤垫、桩垫的厚度（m），对于横纹木板、胶合板、纸板等缓冲垫，应按预期的锤击沉桩条件计入多次锤击后的厚度折减。

2 锤垫和桩垫串联形成的缓冲体

$$k_c = \frac{k_{c-r} \cdot k_{c-p}}{k_{c-r} + k_{c-p}} \quad (C.0.1-3)$$

式中： k_c ——缓冲体的刚度（kN/mm）。当不设锤垫时，取 $k_c = k_{c-p}$ ；当不设桩垫时，取 $k_c = k_{c-r}$ 。

3 替打-缓冲组合体的抗压刚度

$$k_{ass} = \frac{k_c \cdot k_{st}}{k_c + k_{st}} \quad (C.0.1-4)$$

式中， k_{ass} ——替打-缓冲体组合体的刚度（kN/mm）；

k_{st} ——替打中各钢质组（部）件串联后形成的抗压刚度（kN/mm）。

C.0.2 替打-缓冲组合体的等效阻抗应按下列公式计算：

$$Z_c = \sqrt{m_c \cdot k_{ass}} \quad (C.0.2)$$

式中： Z_c ——替打-缓冲组合体的等效阻抗（kN·s·m⁻¹）；

m_c ——替打-缓冲组合体的等效质量（kg），应按承受和传递冲击力、以及影响冲击力传递的替打各组件质量的代数和赋值，当桩帽（套筒）、内插销等起定位作用的组件对钢质替打组件的抗压刚度或运动状态的影响不能忽略时，可将这些组件的部分质量作为附加质量计入替打-缓冲组合体的等效质量。

C.0.3 应力波通过锤芯的等效时间应按下列公式计算：

$$t_{r-eq} = \frac{H_r}{c_r} \quad (C.0.3)$$

式中， t_{r-eq} ——缓冲体应力波通过锤芯的等效时间（ms）；

H_r ——锤芯的高度（mm）；

c_r ——锤芯的纵波波速（m/s）。

C.0.4 应力波通过替打-缓冲组合体的等效时间可按下列公式计算：

$$t_{c-eq} = \frac{Z_c}{k_{ass}} \quad (C.0.4)$$

式中： t_{c-eq} ——应力波通过替打-缓冲组合体的等效时间（ms）。

C.0.5 当替打-缓冲组合体的质量与锤芯质量之比小于 2%时，可忽略替打-缓冲组合体的质量，将缓冲体与锤芯串联组合构成只包含单一组合锤的打桩系统。单一组合锤形式的打桩系统计算应符合下列规定：

- 1 缓冲体抗压刚度应按本标准第 C.0.1 条计算；
- 2 组合锤的抗压刚度应按下列公式计算：

$$k_r = \frac{E_r \cdot A_r}{H_r} \quad (C.0.5-1)$$

$$k_{r, cmb} = \frac{k_c \cdot k_r}{k_c + k_r} \quad (C.0.5-2)$$

式中： k_r ——锤芯的抗压刚度（kN/mm）；

E_r ——锤芯的弹性模量（MPa）；

A_r ——锤芯的横截面积（m²），当锤芯为非均匀截面时，可按 $\frac{m_r}{\rho_r \cdot H_r}$ 取值（ ρ_r 为锤芯材料的质量密度）；

$k_{r, cmb}$ ——组合锤的抗压刚度（kN/mm）。

- 3 组合锤的等效阻抗应按下列公式计算：

$$Z_{r, cmb} = \sqrt{m_r \cdot k_{r, cmb}} \quad (C.0.5-3)$$

式中： $Z_{r, cmb}$ ——组合锤的等效阻抗（kN·s·m⁻¹）。

- 4 应力波通过组合锤的等效时间可按下列公式计算：

$$t_{r-eq} = \frac{Z_{r, cmb}}{k_{r, cmb}} \quad (C.0.5-4)$$

本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

1) 表示很严格，非这样做不可的：

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”；

4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

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

引用标准名录

- 1 《钢结构设计标准》 GB 50017
- 2 《基桩动测仪》 JG/T 518