

深圳市工程建设标准

《**桩基检测技术规程**》

SJG 09-2023

条文说明

修订说明

《基桩检测技术规程》SJG 09-2023，经深圳市住房和建设局 2023 年 **月 **日以深建规[2023] *号文批准、发布。

本标准是在《深圳市建筑基桩检测规程》SJG 09-2020 的基础上修订而成的。上一版的主编单位是深圳市建设工程质量检测中心，参编单位是深圳市建设工程质量监督总站、深圳市勘察研究院有限公司、深圳冶建院建筑技术有限公司、中国铁道科学研究院深圳研究设计院、深圳市建筑科学研究院股份有限公司、深圳市福田建设工程质量检测中心、深圳市南山区建设工程质量监督检验站、深圳市盐田区工程质量监督站、深圳市宝安区工程质量监督检验站、深圳市罗湖区建设工程质量检测中心、深圳市光明新区建设工程质量安全监督站。主要起草人为：刘南渊、杨立、张道修、黄圭峰、谢卫兵、肖兵、王耀禧、蔡巧灵、张臣琪、孟照辉、程庆阳、范少峰、袁广州、陈泽广、刘学、江辉煌、裴晓文、华洪勋、王琦玮、钟咏琴、黄建辉。本次修订的主要技术内容是：1.对灌注桩抽样检测方法 & 数量表中的承载力做了调整，扩大了静载法的适用范围，强调首选静载法的要求；2.将界面钻芯法的适用范围由上版的细长桩推广到所有桩，特别是岩溶发育场地按较大比例要求；3.低应变法适用的桩长径比调整为 30 以下；4.对抗压静载法中基准桩、受检桩、锚桩（或压重平台支墩边）之间的距离做了微调；5.对抗拔桩最大试验荷载的规定依据从设计角度做了详细说明；抗拔静载法中增加了桩和反力系统连接方式及裂缝控制的要求；6. 高应变法中强调用曲线拟合法分析计算、凯司法用于现场的初步判断；7.钻芯法中修订了钻入持力层的深度和多孔沉渣厚度加权平均的算法；8.将原附录 H《界面钻芯管制安要点》补充完善形成了单独一章即第 11 章《界面钻芯法》；9.增加了附录 B《抗拔试验反力系统连接装置》、附录 H《孔内成像法检测要点》、附录 J《桩嵌岩深度声波反射法检测要点》；10.吸纳了省标《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60-2019 和行标《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106-2014 等标准中的部分规定。

本标准修订过程中，编制组对我市基桩检测现状进行了调查研究，总结了《深

圳市建筑基桩检测规程》SJG 09-2015 和《深圳市建筑基桩检测规程》SJG 09-2020 实施以来的实践经验、出现的问题,同时参考了国内的先进检测技术、方法标准,通过调研、征求意见,对增加和修订的内容进行反复讨论、分析、论证,开展专题研究和工程实例验证等工作,为本次标准修订提供了依据。

为便于广大工程检测、设计、施工、监理、科研、学校等单位有关人员在使用本标准时能正确理解和执行条文规定,《基桩检测技术规程》SJG 09-2023 编制组按章、节、条顺序编制了本标准的条文说明。对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是,本条文说明不具备与标准正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握标准规定的参考。

目 次

1	总则.....	7
2	术语和符号.....	9
2.1	术语.....	9
3	基本规定.....	11
3.1	检测目的.....	11
3.2	检测机构、人员、仪器设备.....	11
3.3	检测前的准备.....	12
3.4	检测项目、方法及抽检数量.....	13
3.5	验证检测与扩大抽检.....	19
3.6	检测结果与报告.....	22
4	单桩竖向抗压静载法.....	24
4.1	一般规定.....	24
4.2	仪器设备.....	24
4.3	现场检测.....	25
4.4	检测结果.....	27
5	单桩竖向抗拔静载法.....	30
5.1	一般规定.....	30
5.2	仪器设备.....	34
5.3	现场检测.....	35
5.4	检测结果.....	36
6	单桩水平静载法.....	38
6.1	一般规定.....	38
6.2	仪器设备.....	38
6.3	现场检测.....	39
6.4	检测结果.....	39
7	高应变法.....	42

7.1	一般规定	42
7.2	仪器设备	42
7.3	现场检测	43
7.4	检测结果	45
8	低应变法	53
8.1	一般规定	53
8.2	仪器设备	54
8.3	现场检测	55
8.4	检测结果	57
9	超声法	63
9.1	一般规定	63
9.2	仪器设备	63
9.3	现场检测	64
9.4	检测结果	65
10	钻芯法	67
10.1	一般规定	67
10.2	仪器设备	69
10.3	现场检测	70
10.4	检测结果	76
11	界面钻芯法	79
11.1	一般规定	79
11.2	仪器设备	80
11.3	现场检测	80
11.4	检测结果	80
附录 J 桩嵌岩深度声波反射法检测要点		81

1 总 则

1.0.1 本条主要说明编制本标准的目的和指导思想。近年来，城市建设迅速发展，大量建筑物、构筑物、市政工程和城市轨道交通工程普遍采用桩基础，而基桩检测是其安全性、可靠性发挥的重要保障。基桩检测的手段和方法也随着工程经验的积累和理论研究而趋于更加成熟和先进，同时也有一些新的方法在逐步使用。为总结已有经验，提高检测和评价水平，统一检测的方法及技术指标，特别是和现行国家、省标准相协调，深圳市住房和建设局适时地组织修订原标准。

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

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

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

1.0.4 尚应符合的国家标准和地方标准系指本标准没有明确规定，而尚应符合的有关标准。国家标准主要指现行的《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003、《混凝土结构设计规范》GB 50010、《建筑地基基础设计规范》GB 50007、《混凝土结构工程施工质量验收规范》GB 50204、《建筑地基基础工程施工质量验收

规范》GB 50202、《混凝土强度检验评定标准》GBJ 107、《岩土工程勘察规范》GB 50021、《建筑桩基技术规范》JGJ 94、《建筑抗浮技术标准》JGJ 476-2019、《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106、《高层建筑岩土工程勘察规程》JGJ 72、《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS 03、《基桩动测仪》JG/T 518；地方标准系指现行的广东省标准《建筑地基基础设计规范》DBJ 15-31、《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136、《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60 和深圳市标准《地基基础勘察设计标准》SJG 01。

由于本标准在部分检测方法的数量、比例和实施细节等方面侧重点和行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106、广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60 有一些区别，对于申报省优质工程和国家优质工程项目尚应满足广东省和行业标准的要求。

2 术语、符号

2.1 术 语

2.1.1 本术语定义引自《建筑桩基技术规范》JGJ 94-2009,是“桩基础中的单桩”。
在深圳市较多采用“一柱一桩”的布桩方式。

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

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

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

2.1.8 超声法在行业标准和广东省标准中称为声波透射法。本标准之所以还沿用第一版(1999年)的名称,主要考虑超声波属于声波范畴,桩基检测实际使用的频率是在超声频段;另外是为了和基桩检测的其他几种方法命名规则相协调。

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

15-60-2019 中称之为“预埋管钻芯法”。

3 基本规定

3.1 检测目的

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

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

3.2 检测机构、人员、仪器设备

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

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

3.2.3 为了保证检测工作安全、顺利开展，确保检测结果准确可靠，对于不同的

检测方法有着不同的抗干扰要求,通常应注意防止温湿度变化、振动、电源波动、强电磁环境等干扰对检测结果的影响。使用交流电源、动力电源的设备,应可靠接地,严禁湿操作。静载法检测应有措施应对检测过程中断电等原因引起的维荷超时、数据丢失等突发事件;还应有防止发生堆载失稳、平台垮塌等安全事故发生的措施。

3.3 检测前的准备

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

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

3.3.3 桩基是隐蔽工程,在工程结构中的地位十分重要,由于成桩质量难以直观检查,使用过程中再发现质量问题时又难以处理。因此,受检桩的选取应坚持偏于安全、按最不利原则综合确定,应尽量减小对可能有质量隐患桩的漏检概率。同时也应兼顾检测造价和进度等因素,抽检数量应限制在合理的范围之内。对此,在有限数量的抽检中最大程度地暴露基桩存在的质量隐患是抽样的一个重要原则。本标准综合以下原则选取受检桩:施工质量有怀疑的桩;关键和重要部位的桩;因工程地质情况复杂可能影响施工质量的桩;采用不同施工工艺和不同施工单位施做的桩;承载力或钻芯检测时侧重桩身完整性、桩长、持力层、沉渣等不利影响因素。最后,还有随机性原则,即相同条件下桩宜均匀分布。

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

3.3.4 采用钻芯法仅检测桩身完整性、桩长、桩底沉渣或桩端持力层,而不对桩

身混凝土强度检测时，为加快检测进度可在 28d 龄期前进行。

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

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

3.4 检测项目、方法和抽检数量

3.4.1 桩基设计最主要目标是使桩土体系能提供所需的承载力（单桩承载力）以平衡上部荷载，其中桩身材料强度和截面尺寸（桩身承载力）也应满足内力验算要求。桩身材料强度和截面尺寸是桩周岩土发挥预期承载力的必要条件。桩身材料强度和截面尺寸在桩基检测中由桩身完整性体现。所以工程桩的检测都应包含单桩承载力检测和桩身完整性检测两个方面。通常同一单位工程会进行不少于两种方法的检测，应符合先简后繁、先粗后细、先面后点的原则，宜先完整性检测后承载力检测。

依据《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003-2021 第 5.4.3 条第 1 款的规定：施工完成后的工程桩应进行竖向承载力检验，承受水平力较大的桩应进行水平承载力检验，抗拔桩应进行抗拔承载力检验。故承载力检验应尽可能采用静载法，对于试验荷载超过本地试验能力、场地条件难以满足实施静载法的才可采用钻芯法验证的方式。诸如逆作法现场、内支撑支护形式的基坑等场地不具备进行静载法检测条件的情况，应对桩底沉渣厚度、桩端持力层性状及桩身混凝土强

度、桩长等检测以验证单桩承载能力。此外，该类情况宜在开挖前的桩基施工面高程做设计阶段的静载试验。

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

低应变法、超声法仅适用于检测桩身完整性，高应变法既能检测桩身完整性还能判定单桩承载力，钻芯法可检测桩身完整性和桩身材料强度（桩身承载力）也能验证桩的承载力。静载法能确定单桩承载力，一定程度上也能验证桩身材料强度（桩身承载力）。

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、工程地质条件、施工因素和工程重要性等情况确定，不允许超范围滥用。另外还要考虑经济合理性，即在满足正确评价的前提下做到快速、经济。

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

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

3.4.3 本条主要从为保证施工质量的角度提出做试验桩的检测。

在诸如设计有要求；工程地质条件复杂多变；桩端持力层岩土强度不高、易遇水软化、风化程度高；岩溶等地质条件复杂场地；成桩工艺可靠性较低；采用新桩型新工艺等特殊情况时，桩基工程正式施工前应施做试验桩并检测承载力，以正确指导设计和施工。试验桩有在非工程桩桩位施作的纯试验桩，也有在工程

桩桩位施工兼作的，后者在成桩质量满足设计要求、承载力检测后未破坏时仍可作为实际工程桩使用。

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

试验桩桩位的选择应有代表性，附近应有工程地质钻探孔位。试验桩的设计应符合试验目标要求，静载试验装置的设计和安装应符合试验安全的要求。

另外，若正式施工时桩和岩土的关键参数发生了较大变动或施工工艺发生了变化，应重新试桩。

3.4.4 本条主要从静载试验可实施的阶段出发提出了做试验桩检测的要求。

为有效利用地下空间，本市基坑工程开挖深度在不断加大，桩长相应变短，而抗压、抗拔承载能力要求在不断提高。在基坑底进行单桩竖向抗压、抗拔静载法检测，面临场地条件差、进退场困难、检测造价高、检测周期变长诸多困难，特别是内支撑结构梁柱下的桩、靠近坑边的桩、电梯井下的桩、坡道下的桩、塔吊附近的桩及逆作法现场等，更无堆载和反力架安装的空间。对此，为了同时兼顾质量验收和检测条件的要求，首先应在施工组织设计阶段充分考虑后期验收检测的要求，尽可能提供在基坑底进行验收检测的条件，否则应在正式施工前充分进行试验桩的抗压、抗拔承载力检测。在桩基施工面高程做设计阶段的静载试验时试验措施、受荷工况应针对现场情况设计，试验宜测试桩身内力。如果设计需要的静载试验最大荷载超过本市能力，宜用减小桩径模拟的方式进行施工前试验桩的单桩承载力试验。

通过试验及时指导设计和施工，加强施工过程监控以降低质量风险。

3.4.5 本标准中仅在静载法检测的数量、比例统计计算种强调了“同类型桩”，原因在于其和单桩承载力有很强的关联性，而且检测数量少。划分类别的基本原

则是能比较全面地验证设计取用的关键参数。本标准中的“同类型桩”，对混凝土预制桩，可按沉桩工艺（锤击、静压、植入）、桩径、设计承载力特征值等因素划分。对混凝土灌注桩，由于桩径和设计承载力特征值分布丰富多变，通常宜按成桩工艺、桩端持力层等因素划分；在按桩端持力层类型划分的基础上，再划分到能区分三种方向受力状态为止，不再进一步按设计承载力特征值变化细分。由于传统上讲的“持力层”概念源于抗压桩，常指桩端所处岩土层。对于使用越来越普遍的抗拔桩“持力层”概念同样也适用，即看抗拔力（侧阻力）主要是由哪层岩土提供，通常深层岩土提供的抗力大，其是主要持力层。

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

3.4.6 关于预制桩完整性的检测要求说明如下：由于预制管桩的完整性检测仅采用低应变法，特别是配桩管节数多时检测效果受限，为了和省标协调和今后更大范围推广使用积累经验，增加了孔内成像法检测作为低应变法的补充资料。对管桩使用该法应更关注环向的碎裂等较大缺陷。

关于预制桩承载力的检测要求说明如下：由于多数场地沉桩时已送桩，开挖后的场地情况复杂，静载法和高应变法较难实施，大多的静载法（有时还包括高应变法）检测是在开挖前（或部分开挖后）进行的。开挖前（或部分开挖后）进行检测时，受检桩的选取往往是有取向性的，通常是选配桩富裕的，沉桩后的实际桩顶会接近或高出施工场地地面标高，而这些桩的收锤、终压标准往往会严格些，其检测合格率高，甚至存在提前准备受检桩的现象。实际配桩短于应有桩长的，实际收锤、终压标准可能偏低，因其送桩深度较大，在开挖前不具备静载法

和高应变法检测条件，往往不被选作受检桩。因此应加大对送桩深度大的桩的静载法检测覆盖范围。首先是强调静载法和高应变宜在开挖至桩顶标高处进行；其次应加强沉桩过程监控，加大打桩监控比例，加强对收锤贯入度、终压值控制标准执行情况的监督；对有抗浮（拔）要求的管桩，尚应密切注意低应变法反映出的首节桩的接头连接情况，对存在异常者，应采用单桩竖向抗拔静载法验证接头连接的可靠性。

对灌注桩抽样检测方法组合方式保持了 2015 版（2020 版）的按桩径和荷载分成三大类的检测方法组合方式。但对荷载界限做了调整，主要修订内容说明如下。

关于抗压静载法荷载界限的修订主要原因在于本市目前及今后若干年内堆载法最高试验能力会维持在 50000kN，为了最大程度地执行国家标准《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 的规定，本次修订将上版静载试验的上限 10000kN 一次性提高至 25000kN；取消抗拔静载试验 5000kN 的限定。即尽最大可能采用以静载法为主导的各方法配合的验收检测，不具备静载法检测条件的才采用以钻芯法为主配套其它方法的方式。当然，随着技术进步本市试验能力的提高，50000kN 的限制也应相应提高，以能始终适应 GB 55003 的规定。具体操作说明如下。

对灌注桩三大类检测方法组合方式，应优先选取以静载法为主的组合，第三大类仅是对不能实施静载法检测后的一种替代手段。对于抗压静载法：本市大直径灌注桩使用比例高，单桩承载力高、静载试验困难大（特别是抗压静载试验），但为了贯彻通用规范要求，此次修订原则是验收试验首先应采用静载法，确因本市试验能力和现场条件所限，比如内支撑场地、无论荷载大小均难以实施静载法检测，此时在设计偏安全的前提下，才可选用钻芯、界面钻芯验证的方法替代进行验收检测。现场不具备进行静载法检测单桩承载力条件时，相关责任主体和检测单位应对替代的检测方案进行说明，还应尽量在施工阶段做试验桩的静载法检测。

特别需要注意的是，本地区混凝土灌注桩持力层设置在强风化（或风化程度

更高)岩土层时,特别是花岗岩易遇水软化,实际抗压承载力往往比设计计算的承载力低很多。这类持力层上的抗压桩仅靠计算和钻芯法检测是不完备的,所以即使现场复杂、设备安装困难也应尽可能通过静载法来确定单桩竖向抗压承载力,或者至少有一部分桩应采用静载法确定。若试验荷载超过 50000kN,可参照深圳市工程建设标准《大直径灌注桩静载试验标准》SJG 87 中反力方式、方法的组合实施检测。

由于国内规范中静载法检测的数量均为总桩数的 1%,而灌注桩中因桩径变化范围大、施工质量不稳定,1%的比例显然存在较大风险,本市的实践也证明了这一点。对采用静载法为主检测的大直径桩,增加了 5%的钻芯法检测做为补充,以通过检测桩身混凝土强度和桩底沉渣厚度、鉴定桩端持力层岩土层性状,间接验证基桩的承载能力,也可指导静载法桩号的选取。故此次修订仍然保留该要求。

对抗拔静载法,由于本市单体建筑朝高度高、体量大、埋置深的方向发展,单桩竖向抗拔承载能力要求不断提高。多年来的实践表明,大直径旋挖、冲(钻)孔灌注桩的竖向抗拔承载力极限值离散明显,即使桩端嵌岩深度不断加大的情况下也未明显改善;相对于抗压静载法,抗拔静载法实施难度较小,反力系统要求不高,只要辅助一定的措施,无论荷载多大基本都能实施。所以对抗拔试验应全部采用静载法验收检测。

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

参照其他行业相关规范的规定，本条规定了市政工程、城市轨道交通工程的基桩，应全部检测桩身完整性。只是应注意区分市政工程、城市轨道交通工程中“桩”的具体用途，按桩基础设计施工者应执行本规定，其它比如复合地基、支挡结构等宜执行相应规范规定。

此次修订将界面钻芯作为一个独立方法要求，主要考虑了以下因素：

1 大直径灌注桩的承载力首先受桩端持力层性状、沉渣厚度控制，界面钻芯法只针对桩端情况，而钻芯法（特别是长径比较大时）会偏离桩身不能到达桩端，相比而言界面钻芯有其独特的优势。

2 由于旋挖灌注桩工艺的日渐成熟，桩身混凝土的质量趋于稳定，全长度钻取芯样的必要性已没以往那么强烈，相比之下超声法对桩身完整性的检测完备性更胜钻芯法一筹。在大比例的超声法检测之后已经可以掌握场地桩身完整性的整体情况，再依据超声法结果有针正性地指导钻芯使检测更加精准，不必强求每孔均要钻到桩底、特别是长径比大的桩。桩底情况由界面钻芯法反映。

3 岩溶发育场地，传统上钻芯法检测要求各孔均应钻至桩底持力层足够深度，难度大、工效低、桩截面损失大，显然采用界面钻芯不存在这些弊端。检测比例 30%的规定参照了广东省标准《岩溶地区建筑地基基础技术规范》DBJ/T 15-136 钻芯法检测不少于 30%的规定。

4 经过多年的实践，界面钻芯法已趋成熟，其检测效率高、针对性强。可以更好地发挥其作用。

5 但还应注意，水下灌注工艺在桩底外侧，混凝土质量会略差、沉积物积聚等不利因素，评价时应更侧重于岩性和沉渣情况。

3.5 验证检测与扩大抽检

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

循的基本原则是可靠性高的方法验证可靠性低的方法。

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

本市高承载力抗拔桩多按嵌岩桩设计，而抗拔承载力不满足设计要求的情况时有发生。虽然嵌岩深度不是桩基检测的强制项目，但嵌岩深度是桩具备要求的抗拔力的关键条件，对验证检测、扩大检测中原因分析具有指导意义，为此本次修订增加了此项要求，以积累经验提高抗拔桩设计施工技术水平。传统上采用桩内和桩外双钻孔验证方式，本次修订增加了附录 J 即仅在桩内钻芯孔检测的方式。

3.5.2 不同于在原受检桩上采用低应变法或超声法复检，同一基桩增加钻孔验证后，应同等对待各孔检测结果，客观、全面综合评价。

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

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

扩大抽检的过程和质量问题处理的过程是密不可分的，因此建设单位应组织有关各方对检测结果不满足设计要求的情况进行原因分析、扩大抽检和综合评估三方面的工作。首先应依据检测、设计、勘察、施工等资料进行原因分析，推断同类不满足设计要求桩的可能分布。其次根据可能的原因、质量问题的严重程度和工程结构重要性制定扩大抽检方案，有针对性地扩大抽检；扩大抽检方案应包含扩大检测的方法、数量和桩位要求；在扩大抽检的过程中，应对产生问题的可能的原因进一步跟踪、分析、确认，及时调整扩大抽检方案，以使整个桩基工程不留质量隐患。扩大抽检完成后，根据检测单位提供的全部检测结果，参考所有

设计、施工、监理资料，由有关各方共同对全部桩基进行综合评估，设计单位以满足结构安全和使用功能要求为原则，提出处理方案。处理方案一般有：由原设计单位复核是否可满足结构安全和使用功能要求，或者是补桩（有原桩报废后在原桩位补桩，有原桩报废后在原桩侧补桩，有同时利用原桩的原桩侧补桩等方式）、加固补强等。处理应按照有关程序进行，应按设计单位出具的处理方案，监理单位全程监督施工单位实施。对加固、补强后基桩的验收检测，还应由建设、设计、勘察、监理、施工、检测单位共同研究确定验收检测方案，原则上宜采用直接法、可靠性高的方法，实施验收检测后，由各方共同综合评估、验收。

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

为使静载法、高应变法或钻芯法扩大抽检有较强的针对性，抽检样本的范围应遵照相同原因原则。通常扩大抽检的扩大检测范围在同类型桩基础上进一步细化，主要是加入施工阶段因素。细化依据应基于不满足设计要求的具体原因，一般会涉及场地局部范围岩土层性状的显著差异、施工工艺、施工机具及至施工班组和材料批次等等。桩侧、桩端岩土性状不同、桩径不同、清孔工艺不同都是划分不同亚类的关键要素。检测过程中当某根桩检测结果和设计要求接近、导致不满足设计要求的原因明确且不具普遍性时，考虑到同型号桩因所处结构部位不同其承受的荷载也会不同，若经设计复核可以对该型号全部或部分降低标准验收，可不对该桩所属型号的全部桩扩大抽检。试验中破坏了的桩，特别是抗拔桩因桩土体系受到破坏，应做工程处理后使用。

当出现不满足设计要求的具体原因尚未明确时，应在同类型桩中扩大抽检，一般按就近兼顾随机原则选取扩大抽检桩号。

由于各检测方法各自的特点，虽然本标准第 3.5.4 条第 1 款中要求采用可靠性更高的检测方法扩大抽检，有时也可采用可靠性较低的其他方法辅助分析判断。

本标准第 3.5.4 条第 2 款中，若两次抽检中Ⅲ、Ⅳ类桩之和大于或等于两次抽检桩数总和的 20%时，应加大比例继续扩大抽检，直至对全部基桩检测桩身完整性。

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

对于界面钻芯法扩大抽检，当安装有界面管的桩数不足时，可用钻芯法替代。

3.6 检测结果与报告

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

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

扩大抽检同步进行。

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

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

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

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

3.6.7 本条的规定是计量认证和资质管理的要求。

4 单桩竖向抗压静载法

4.1 一般规定

4.1.1 竖向抗压静载法是公认确定单桩竖向抗压承载力最直观、最可靠的传统方法。在国内外、在不同行业间，因基桩使用环境、工况的差异，有循环荷载法、等变形速率法及终级荷载长时间维持法等方法。本章主要对深圳市建筑工程中惯用的维持荷载法进行了技术规定。

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

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

4.2 仪器设备

4.2.1 采用压重平台反力装置，当荷载水平较高时，压重施加于地基的附加压应力大使地基产生较大变形，影响检测结果的准确性，更为甚者还可能存在较大安全隐患，此时宜制定地基处理方案，以满足检测的要求。

4.2.2 为防止加载使桩偏心受压，千斤顶的合力中心应与反力装置的重心、桩身轴线重合，并保证合力方向铅直。

4.2.3 用荷重传感器和用压力传感器的两种荷载测量方式区别在于：前者测量每台千斤顶的输出，而多台千斤顶并联工作时，由于各千斤顶的输出有差异，应在各千斤顶上分别放置荷重传感器。后者需通过率定曲线换算成千斤顶出力，换算后的千斤顶出力包含了千斤顶活塞摩擦力。采用压力传感器测定油压时，为保证测量精度和稳定性，可采用压力表同时监控和校核压力传感器，压力表精度等级

应优于或等于 0.4 级。当油路工作压力较高时可能出现油管爆裂、接头漏油、油泵加压不足造成千斤顶出力受限、压力表线性度变差等情况,所以应选用耐压高、工作压力大的油管、油泵和大量程压力表。

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

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

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

关于压重平台支墩边与基准桩和受检桩之间的最小间距问题,应区别两种情况对待。在场地土质较硬时,堆载引起的支墩及其周边地面沉降和试验加载引起的地面回弹均很小;但在软土地基,大荷载下支墩附近应力影响范围大,应特别重视。虽然此次修订为适应大荷载试验的实际情况参照广东省标准《建筑地基基础检测规范》 DBJ 15-60-2019 对部分间距降低了要求,但需要在远离支墩处设置稳定的基准点,用水准仪等测量仪器观测基准桩的竖向位移,作为沉降校核的辅助手段。

4.3 现场检测

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

4.3.2 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检测失败或中断的情况时有发生,为此建议在试验前对灌注桩及有接头的预制桩进行桩身完

整性检测，大致确定其能否作锚桩使用。

4.3.3、4.3.4 慢速维持荷载法是我国公认、且已沿用多年的标准试验方法，也是衡量其他承载力检测方法的唯一标准。本市大量静载试验数据显示，桩端持力层设置在强风化(或风化程度更高)岩土层的灌注桩和采用静压工艺施工的预制桩，其竖向抗压静载法检测结果不满足设计要求的概率偏高， $Q-s$ 曲线多呈缓变形，单级荷载作用下桩顶沉降稳定时间长。对于上述两类较易出现问题的桩和为设计提供依据的试验桩，一律不得采用快速维持荷载法。对于工程桩抽样检测，应首先针对成桩质量相对最不可靠的基桩采用慢速维持荷载法，当其检测结果满足设计要求后，方可选用快速维持荷载法检测其余基桩。这样既能保证检测结果的可靠性，也能提高检测效率。

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

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

4.3.8 当桩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沉降超过上一级荷载对应沉降量 5 倍的陡降，当缝隙闭合或桩端与硬持力层接触后，随着维荷时间延续、荷载增加，变形梯度逐渐变缓。可是当桩身某截面强度不足而被压碎，也会出现陡降，与前不同的是随着沉降增加，荷载不能维持甚至大幅降低。所以，出现陡降后不宜立即卸荷，而应看最终桩顶总沉降量是否超过 40mm，有助于大致判断造成陡降的原因。对于大直径桩为了原因分析和后续处理需要也可以继续加载至 60mm~80mm。

4.4 检测结果

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

4.4.2 对应于第 4.3.8 条第 1 款的情况，虽然经过 5 倍陡降、但后几级又都能达到相对稳定标准，也不能就断定该桩的承载力检测值就是最末级的荷载。应分析、验证造成 $Q-s$ 等曲线异常的原因。若证实是沉渣超标、吊脚、桩身裂缝等原因所致，就不能判定该桩的承载力检测值就是最末级的荷载。但在未知原因的情况下，判定 $Q-s$ 曲线发生明显陡降或 $s-lgt$ 曲线尾部出现明显向下弯曲的前一级荷载值为承载力检测值是偏安全的。

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

关于桩身弹性压缩量，当进行桩身应变或位移测试时是可测得的；缺乏测试数据时，可假设桩身轴力沿桩长倒梯形分布进行估算，或忽略端承力按倒三角形保守估算，计算公式为 $\frac{QL}{2EA}$ 。考虑了桩身压缩放宽沉降标准利于桩端承载

力有效发挥、获得更准确的承载力，但对由变形控制的设计作用有限。

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

4.4.3 本条只适用于为设计提供依据时的竖向抗压承载力检测值结果的统计，统计取值方法遵照《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定的原则。

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

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

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

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

确定单桩竖向抗压承载力特征值。

4.4.5 本条规定了检测报告中应包含的一些基本内容，还宜提供和桩工作性状相关的其他信息以便设计分析验算。

5 单桩竖向抗拔静载法

5.1 一般规定

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

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

先对灌注桩加以说明。

1 荷载

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

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

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

2 桩身结构抗力

按相关规范要求，桩身结构抗力考虑两方面因素，即强度和裂缝宽度。

1) 强度

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

料（纵筋）抗拉强度控制试验上拔荷载时不应超过 1.5 倍的荷载标准值。

2) 桩身抗裂验算

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

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

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

3 岩土抗力

1) 计算方法

岩土抗力设计惯用安全系数法，安全系数不小于 2.0，抗浮桩也不例外。岩土侧阻力取值一般采用规范推荐的经验参数和系数，根据桩侧土阻力经验值、抗拔经验系数、施工工艺系数、后注浆系数等初步设计确定桩

侧岩土层深度、桩身直径（桩径桩长持力层）。再通过静载试验确定承载力特征值、验证安全系数。

2) 安全系数

安全系数的验证只能采用静载试验。

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

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

综上，现实中宜从安全和经济的角度确定试验最大荷载，可分以下四种情形。

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

2 按钢筋抗拉强度控制设计的宜按 1.5 倍单桩竖向抗拔承载力特征值加载。由于只能验证 1.5 的岩土设计安全系数，设计阶段宜按总桩数的 0.5%且不少于 3 根进行试验桩的抗拔力试验，荷载和配筋按抗拔承载力特征值的 2.0 倍要求，未

破坏的试验桩可用作工程桩。

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

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

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

5.1.3 为设计提供依据的试验桩，其试验目标是尽可能使桩土界面达到极限状态。试验桩宜加载到能判别单桩抗拔极限承载力为止，或加载到桩身材料（纵筋）设计强度。如果初步设计偏保守、计算的桩侧阻力偏低，与之相应的桩身纵筋配置也不会太高，实际试验时会出现桩侧阻力未全部发挥前钢筋所受荷载已经达到设计强度，这时为了能让侧阻力继续发挥，习惯上会在原初步设计的最大上拔荷载基础上超加部分上拔荷载。考虑到试验准备时接长钢筋的工艺简陋、各受拔钢筋受力不均现象明显，为了试验安全对超过钢筋设计强度的荷载增量取值应慎重，

在有可靠的防锚具飞出、钢筋连接位置崩断伤及人员的措施下，可按不超过受拉钢筋屈服强度控制。

对旋挖、冲（钻）孔灌注桩，在灌注混凝土前进行成孔质量检测，目的是查明桩孔有无明显扩径现象或扩大头尺寸是否符合设计。因实际桩身截面和设计不符的桩抗拔承载力缺乏代表性，特别是桩身中下部有明显扩颈的桩，其抗拔极限承载力远远高于长度和桩径相同的非扩颈桩、相同荷载下的上拔量也有明显差异。试验桩也不宜作为工程桩使用。

5.2 仪器设备

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

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

对受裂缝控制的预制管桩，因填芯混凝土段较长埋深大，试验现场不能观察到填芯段下方桩身裂缝开展情况，故对受裂缝控制的预制管桩不宜采用混凝土填芯方式。

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

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

5.2.7 关于基准桩、受检桩、支座（或反力桩）之间距离的规定，主要目的是减小支墩反力对基准桩稳定性的影响、降低支墩施加给桩侧土的附加应力使桩侧摩阻力增加的效应。由于大荷载试验时支墩宽度大，与之配套的反力梁截面和长度也要比较大，造成运输安装成困难，故本次修订仍然维持和抗压静载法同样的规定。对此说明如下：由于本市抗拔桩的破坏形式多呈脆性破坏，破坏时桩顶上拔位移急剧变化，故对桩顶位移的监测准确度要求可以适当放宽，但为设计提供依据的试验可采用监测基准桩位移的方式修正；本市抗拔桩主要由中下部岩土层提供抗拔力、破坏发生在桩土界面，而支墩下附加应力的影响深度有限，支墩和受检桩间距离也可适当放宽以保障试验安全。

5.3 现场检测

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

5.3.2 试验中若因某根钢筋拉断，为防止钢筋连续断裂，试验应及时终止，该情形属于试验失败，应重新连接后继续试验。

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

5.4 检测结果

5.4.1 抗拔静载法与抗压静载法一样，应绘制 $U-\delta$ 曲线、 $\delta-1gt$ 曲线。但当上述二种曲线难以判别时，也可以辅以 $\delta-1gU$ 曲线或 $1gU-1g\delta$ 曲线，以确定拐点位置。

5.4.2、5.4.3 抗拔桩按主要提供抗力的岩土层对应应有嵌岩桩和非嵌岩桩，按桩侧法向应力大小可对应挤土桩和非挤土成桩工艺，按桩土界面摩擦系数高低又可对应于湿作业水下浇灌和干作业浇灌。不同类型抗拔作用机理、破坏形态不同，除了脆性、延性外，实际中还会出现介于两者之间的破坏形式，即 $U-\delta$ 曲线有变形加快趋势却无明显陡升， $\delta-1gt$ 曲线斜率无明显变陡或曲线尾部无明显弯曲现象，对此极限抗拔承载力的判定应把握承载力极限状态和正常使用极限状态两个原则，即在某级荷载下上拔位移相对稳定且总上拔位移没超过本地最大上拔量经验的可判定为极限抗拔承载力。在等荷载增量加载过程中总上拔量不大、位移即使有局部突变，只要末级能稳定，可按最大荷载判定承载力检测值。但对有抗裂控制要求的在接近开裂荷载时，由于桩身开裂使桩截面应力转换导致位移突变，应判断位移突变时的上拔荷载为承载力检测值。有条件时，可借助数值分析方法辅助分析。

第 5.4.2 条前两款确定的单桩竖向抗拔承载力检测值是岩土极限抗拔阻力与桩（有时还包括桩向上位移所带动的土体）自重两部分之和。工程桩抽样检测时，一般土的抗力尚未发挥到极限，而混凝土桩抗拔承载力可能受抗裂或钢筋强度制约，宜取最大试验荷载或取上拔量控制值对应的荷载作为单桩竖向抗拔承载力检测值。因上拔荷载下桩土作用机理更加复杂，不宜由抗拔承载力检测值外推极限值。

试验过程出现钢筋（或焊接接头）“断裂”是因钢筋（焊接）强度不足导致。因存在抗拔钢筋受力不均匀现象，在桩顶上拔荷载还未达到钢筋屈服强度标准值时，部分钢筋因受力大而断裂，应视该试验失败并重新试验，不能将钢筋断裂前一级荷载作为极限荷载。

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

5.4.6 当进行桩侧的分层摩阻力测试时，还应包括传感器类型、安装位置、轴力计算方法、各级荷载作用下的桩身轴力图和桩侧各土层的抗拔极限侧阻力。

6 单桩水平静载法

6.1 一般规定

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

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

6.2 仪器设备

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

6.2.3 水平力作用点位置不在桩基承台底面标高处时，由于边界条件的改变，试验时在相对承台底面处将产生附加弯矩，影响测试结果，也不利于将试验成果根据实际桩顶的约束予以修正。在试验过程中，必须使用球形铰支座以保持作用力的方向始终水平和通过桩轴线、不随桩的倾斜或扭转而改变。

6.3 现场检测

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

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

6.3.4 对抗弯性能较差的长桩或中长桩而言，水平荷载下桩的破坏特征是弯曲破坏，即桩身发生折断，此时试验自然终止。在工程桩水平承载力验收检测中，终止加荷条件可按设计要求或标准规定的水平位移允许值控制。考虑软土的侧向约束能力较弱以及大直径桩的抗弯刚度大等特点，终止加载的变形值可取上限。对一般建筑物，水平允许变形为10mm；敏感建筑物或有特殊使用要求的建筑物水平允许变形仅为6mm。

6.4 检测结果

6.4.2 本条中的地基土水平抗力系数随深度增大的比例系数 m 的计算公式仅适用于水平力作用点至试坑底面的桩自由长度为零时的情况。试验得到的地基土水平抗力系数的比例系数 m 不是一个常量，而是随地面水平位移及荷载而变化的曲线。按桩、土相对刚度不同，水平荷载作用下的桩-土体系有两种工作状态和破坏机理，一种是“刚性短桩”，因转动或平移而破坏，相当于 $ah < 2.5$ 时的情况；另一种是工程中常见的“弹性长桩”，桩下段嵌固于土中不能转动，桩身产生挠曲变形，即本条中 $ah \geq 4.0$ 的情况。 $2.5 \leq ah < 4.0$ 的，称为“弹性中长桩”。《建

筑桩基技术规范》JGJ 94 对中长桩的 v_y 变化给出了具体数值（见表 1）。因此，在按公式（6.4.2-1）计算 m 值时，应先试算 ah 值，以确定 ah 是否大于或等于 4.0，若在 2.5~4.0 范围以内，应调整 v_y 值重新计算 m 值（有些行业标准不考虑）。当 $ah < 2.5$ 时，公式（6.4.2-1）不适用。

表 1 桩顶水平位移系数 v_y

桩的换算埋深 ah	4.0	3.5	3.0	2.8	2.6	2.4
桩顶自由或铰接时的 v_y 值	2.441	2.502	2.727	2.905	3.163	3.526

注：当 $ah > 4.0$ 时取 $ah = 4.0$ 。

6.4.3 对于混凝土长桩或中长桩，随着水平荷载的增加，桩侧土体的塑性区自上而下逐渐开展扩大，最大弯矩断面下移，最后导致桩身结构的破坏。所测水平临界荷载为桩身产生开裂前所对应的水平荷载。因为只有混凝土桩才会产生开裂，故只有混凝土桩才有临界荷载。

6.4.4、6.4.5 单桩水平极限承载力是对应于桩身折断或桩身钢筋屈服时的前一级水平荷载。

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

单桩水平承载力特征值除与桩的材料强度、截面刚度、入土深度、土质条件、桩顶水平位移允许值有关外，还与桩顶边界条件（嵌固情况和桩顶竖向荷载大小）有关。由于建筑工程基桩的桩顶嵌入承台深度通常较浅，桩与承台连接的实际约束条件介于固接与铰接之间，这种连接相对于桩顶完全自由时可减少桩顶位移，相对于桩顶完全固接时可降低桩顶约束弯矩并重新分配桩身弯矩。如果桩顶完全

固接，水平承载力按位移控制时，是桩顶自由时的 2.60 倍；对较低配筋率的灌注桩按桩身强度（开裂）控制时，由于桩顶弯矩的增加，水平临界承载力是桩顶自由时的 0.83 倍。如果考虑桩顶竖向荷载作用，混凝土桩的水平承载力将会产生变化，桩顶荷载是压力，其水平承载力增加，反之减小。

桩顶自由的单桩水平试验得到的承载力和弯矩仅代表试桩条件的情况，要得到符合实际工程桩嵌固条件的受力特性，需将试桩结果转化，而求得地基土水平抗力系数是实现这一转化的关键。考虑到水平荷载 - 位移关系的非线性且 m 值随荷载和位移增加而减小，有必要给出 $H-m$ 和 Y_0-m 曲线并按以下考虑确定 m 值：

- 1 可按设计给出的实际荷载或桩顶位移确定 m 值；
- 2 设计未作具体规定的，可取水平承载力特征值对应的 m 值。

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

7 高应变法

7.1 一般规定

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

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

此外,高应变法还有以下几项功能:

- 1 用实测曲线拟合法分析时,可计算出桩身缺陷的位置及缺损程度、桩端阻力、桩侧阻力及其分布;
- 2 打桩监控可监测打桩过程中随入土深度的增加桩承载力的变化、桩身应力、裂缝等缺陷的发展情况及锤击效率;
- 3 为选择沉桩设备及工艺参数、选择合理的桩长及收锤标准提供依据。

7.2 仪器设备

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

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

7.2.2 现场检测时,重锤对桩的冲击也会使桩周土产生振动,因此不宜采用设置

基准梁（桩）的方法实测贯入度，宜采用精密水准仪等光学仪器来测量。

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

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

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

7.3 现场检测

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

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

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

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

7.3.2 本条规定了检测前各类参数的设定要求。

高应变法现场检测时采集的是桩顶部测点处的应变和加速度信号，然后根据

设定的各类参数计算出桩身应力和速度。因此，参数的设定应按测点处桩的性状来确定。

测点下桩长是传感器安装点至桩底面的距离，不包括桩尖长度。

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

混凝土桩的桩身波速大小除与桩身材质有关外，还和成桩工艺、龄期等有关。而灌注桩即使是同一工程桩身波速有时相差还较大，所以应按本标准第 7.4.4 条的规定，采用桩底反射信号进行校核，用实测桩身波速作为设定值。混凝土桩桩身波速在 3000m/s~4500m/s 之间；钢桩桩身波速取 5120m/s。

7.3.3 本条规定了现场检测的基本要求。

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

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

1) 锤击落距越高越容易产生锤击偏心；

2) 桩顶的最大锤击力只与锤冲击桩顶的初速度有关，与桩顶最大速度成正比，落距过大，桩顶初速度偏高，容易击碎桩头、造成桩尖破损或桩身拉裂；

3) 轻锤高击并不能有效提高桩锤能量传递比、增大桩顶位移，锤击脉冲较窄易增大波传播的不均匀性，即桩身受力和运动的不均匀性（惯性效应）较明显、实测信号中的动阻力影响程度加剧、与位移相关的静土阻力呈明显的分段发挥态势，致使承载力的测试误差增大；

4) 如将锤重增加到预估单桩极限承载力的 5%~10%以上，则可得到与长持续动载试验（rapid load test 或 Statnamic）相似持续时间的宽脉冲作用。此时由于桩身中的波传播效应大大减弱，桩侧、桩端岩土阻力的发挥更接近静载作用时桩的荷载传递性状。

因此，“重锤低击”是保障高应变法判定承载力准确性的基本原则。

3 关于单击贯入度

单击贯入度是反映桩侧、桩端土阻力是否充分发挥的一个重要标志。要判定

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

4 桩身完整性检测

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

7.3.4 对记录锤击信号数量的规定是为了确保采集到可靠的信号供后续分析。本条规定的锤击信号是指有效的锤击信号，即可用于后续分析的锤击信号。

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

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

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

7.4 检测结果

7.4.1 采用挤土沉桩工艺，尤其是大面积密集群桩施工时，由于施打顺序不合理、沉桩速率过快、土体的侧挤和隆起等不利因素，造成先期沉桩的上浮情况时有发生

生,因此对施工过程产生挤土效应群桩的高应变法检测应首先判断受检桩是否有上浮情况。当确认有上浮情况时,应取第一击信号进行分析计算,否则随着锤击次数的增加,受检桩上浮情况逐渐消除,承载力会逐渐提高。若采用第一击之后承载力增加了的信号分析计算,可能会造成受检场地其他上浮桩漏检的现象,产生较大的质量隐患。

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

高应变法测得的是检测时激发出的土阻力值,要使土阻力充分激发,锤击能量应足够大使单击贯入度在 2mm~6mm 之间,如锤击能量不足单击贯入度偏小,无法测得极限承载力,此时只能作为检验性测试,即证明岩土阻力至少能达到的水平。

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

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

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

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

信号的质量除了与传感器安装好坏、锤击是否偏心、安装面混凝土是否开裂等因素有关外,还和混凝土的不均匀性和非线性有关。这些影响对应变式传感器

测得的、经转换得到的力信号尤其敏感。混凝土的非线性表现为随着应变的增加，割线模量减小并出现塑性变形，使力信号最终不归零。

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

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

桩底反射明显时，桩身波速也可根据实测信号的下行波上升沿的起点到上行波下降沿的起点之间的时差与已知桩长确定。

对桩底反射波峰变宽或有水平裂缝的桩，不应根据峰与峰间的时差来确定桩身波速。桩较短且锤击力信号上升缓慢时，可采用低应变法确定桩身波速。

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

7.4.5 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。但以下几种情况不成比例属于正常：

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

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

7.4.6 宜首先对静载试验的桩做拟合法分析以指导本场地其余受检桩的拟合分析。

从理论上讲，实测曲线拟合法的结果是客观唯一的，但由于桩、土以及它们之间的相互作用等力学行为的复杂性，实际运用时还不能对各种桩型、成桩工艺、工程地质条件等都能达到十分准确地求解桩的动力学和承载力问题的效果，所以

采用实测曲线拟合法应注意下列问题：

1 关于桩与土模型：

1) 目前实测曲线拟合法采用的土的静阻力模型为理想弹 - 塑性模型或考虑土体硬化或软化的双线性模型。在加载阶段，土体变形小于或等于 s_q 时，土体在弹性范围工作；变形超过 s_q 后，进入塑性变形阶段。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，应采用与桩身质点运动速度成比例的线性粘滞阻尼模型。

3) 桩的力学模型通常采用一维杆件模型，桩单元划分应采用等时单元，即应力波通过每个单元的时间相等。为保证计算精度，不宜采用弹簧 - 质量块的离散模型。

4) 桩单元除考虑 A 、 E 、 c 等参数外，也可考虑桩身阻尼和裂隙。另外，也可考虑桩底的缝隙、开口桩或异形桩的土塞、残余应力影响和其他阻尼形式。

5) 所用模型的物理概念应明确，参数取值应能限定范围，避免采用可使承载力计算结果产生较大变异的桩 - 土模型及参数。

2 拟合时应根据波形特征，结合施工和工程地质条件合理确定桩土参数取值。因为拟合所用的桩土参数的数量和类型繁多，参数各自和相互间耦合的影响非常复杂，而拟合结果并非唯一解，需通过综合比较判断进行参数选取或调整。正确选取或调整的要点是参数取值应在岩土工程的合理范围内。

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

4 为防止土阻力未充分发挥时的承载力外推，设定的 s_q 值不应超过对应单元的最大计算位移值。若桩、土间相对位移不足以使桩周岩土阻力充分发挥，则得出的承载力结果只能验证岩土阻力发挥的实际程度。贯入度的计算值与实测值

是否接近，是判断拟合选用参数、特别是 s_q 值是否合理的辅助指标。

5 土阻力响应区是指信号上呈现的静土阻力信息较为突出的时间段。本条第 5 款特别强调此区段的拟合质量，应避免只重信号头尾，忽视中间土阻力响应区段拟合质量的错误做法，应通过合理的加权方式计算总的拟合质量系数，突出其影响。

7.4.7 凯司法的计算公式是在以下三个近似假定下推导出来的：

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

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

- 1 受检桩的实际情况完全符合近似假定时， J_e 是桩端持力层的凯司阻尼系数，主要取决于该土层的颗粒细度，遵循随土中细颗粒含量增加阻尼系数增大的规律。
- 2 受检桩的实际情况不完全符合假定时， J_e 将变成一个没有明确意义的综合调整系数，综合反映受检桩在各个方面的特定条件。

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

7.4.8 凯司法判定单桩承载力检测值有多种不同的算法，需要根据具体条件选择使用。凯司法除了公式（7.4.8-1）的方法外，还有以下几种方法：

- 1 由于公式（7.4.8-1）给出的 R_e 值与位移无关，仅包含 t_1+2L/c 时刻之前所发挥的土阻力信息。除较短的摩擦桩外，通常土阻力在 t_1+2L/c 时刻不会充分发挥，检测时岩土对桩的阻力是经过一定的时间才达到其最大值（端承桩尤其显著）。所以，需要采用将计算所取的 t_1 位置向后延迟，以对与位移相关的土阻力滞后于 t_1+2L/c 发挥的情况进行提高修正得到土阻力的最大值，即最大阻力法（RMX 法）。

2 桩身在 t_1+2L/c 时刻之前产生向上的反弹,使桩身从顶部逐渐向下产生土阻力卸载(此时桩的中下部土阻力还处于加载阶段)。负阻力的影响使计算结果偏低,这对于桩较长、摩阻力较大而荷载作用持续时间相对较短的桩较为明显。因此,需要采用将桩中上部卸载的土阻力进行补偿提高修正的卸载法(RSU法)。

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

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

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

在应用凯司法判定单桩承载力时,应注意以下几个问题:

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

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

7.4.11 采用高应变法检测桩身完整性不如低应变法方便快捷,但它却有检测信号强、可对缺陷程度作出定量计算、发现有缺陷后可重复进行高能量冲击观察缺陷的发展趋势等优点。由于高应变法和低应变法检测桩身完整性测出的都是桩身阻抗的变化,所以对桩身完整性的评价是桩身阻抗变化的评价,通常不宜判断缺陷的性质。只要激发的阻力不很大,可以对阻力分布作出假定,再采用实测曲线拟合法单纯地拟合桩身、分析桩身截面阻抗的变化,从而评价出桩身完整性。有些仪器配备了上述分析软件,拟合后能够直接输出桩身阻抗图。特别当实测信号复杂,有一个以上缺陷时,应采用实测曲线拟合法评价桩身完整性。

为了正确应用桩身完整性系数，还应注意以下几点：

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

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

2 由于计算 ΔR 值的结果是粗略的，求得的 β 值也不会十分精确。当桩长大于 30m 时，由于土阻力提前卸载， β 值计算误差较大。当满足本条“等截面桩”和“土阻力未卸载回弹”的条件时， β 值计算公式为解析解，即 β 值测试属于直接法，在结果的可信度上与属于半直接法的高应变法判定承载力是不同的。长桩存在深部缺陷时，当土阻力 ΔR 先于 $t_1 + 2x/c$ 时刻发挥并产生桩中上部明显反弹时， x 以上桩段侧阻提前卸载造成 ΔR 被低估， β 计算值被放大，不安全，因此公式(7.4.11-1)不适用。

3 桩身完整性的类别除按表 7.4.11 规定外，还应结合实测信号特性、缺陷位置和范围、桩型、场地工程地质条件、施工工艺、施工记录、检测经验等综合判定。

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

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

7.4.13 桩身锤击拉应力是混凝土预制桩施打抗裂控制的重要指标。在深厚软土地区，打桩初始侧阻和端阻虽小，但桩很长，桩锤能正常爆发起跳，桩底反射回来的上行拉力波的头部（拉应力幅值最大）与下行传播的锤击压力波尾部叠加，在桩身某一部位产生净拉应力。当拉应力超过混凝土抗拉强度时，引起桩身拉裂。开裂部位经常发生在桩的中上部，且桩愈长或锤击力持续时间愈短，最大拉应力出现部位就愈往下移。当桩进入硬土层后，随着打桩阻力的增加拉应力逐步减小，桩身压应力逐步增加，如果桩在易打情况下已出现拉应力所致的水平裂缝，渐强

的压应力会在已有裂缝处产生应力集中，使裂缝处混凝土逐渐破碎并最终导致桩身断裂。

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

8 低应变法

8.1 一般规定

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

目前,国内多数检测机构采用的低应变法均为反射波法(或瞬态时域分析法)。反射波法以一维线弹性杆件为模型,波传播时满足一维杆平截面假设。因此瞬态激振脉冲有效高频分量的波长与杆的横向尺寸之比均宜大于 10,桩身截面宜规则。对于扩底桩,由于扩大端以上桩身截面规则,所以基本适用。

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

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

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

边坡工程中的微型桩,有多种施工工艺,因桩身材料的弹性模量、钢筋(钢管、型钢)等因素,对低应变信号影响程度不一,低应变法适用与否应结合现场实测效果而定。

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

的，仅刚性桩适用。

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

对于桩身不同类型的缺陷，反射波法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，只凭测试信号很难区分。因此，对缺陷类型进行判定，应结合工程地质、施工情况综合分析，或采取钻芯法、超声法确定。

8.1.2 由于受桩周土约束、桩身材料阻尼和桩身截面阻抗变化等，应力波在桩身传播过程中能量在逐渐衰减，若桩过长、桩身截面阻抗多变或变幅较大，应力波尚未反射回桩顶甚至尚未传到桩底，其能量已完全衰减，致使仪器接收不到桩底反射信号，无法判定整根桩的桩身完整性。

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

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

8.2 仪器设备

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

8.2.2 低应变法检测采用的传感器主要是压电式加速度传感器（国内多数厂家生产的仪器尚能兼容磁电式速度传感器），根据其结构特点和动态性能，当压电式传感器的可用上限频率在其安装谐振频率的 1/5 以下时，可保证较高的冲击测量

精度，且在此范围内，相位误差几乎可以忽略。所以应尽量选用自振频率较高的加速度传感器。

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

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

8.2.3 瞬态激振操作应通过现场试验选择不同材质的锤头或锤垫，以获得低频宽脉冲或高频窄脉冲。除大直径桩外，冲击脉冲中的有效高频分量可选择不超过 2000Hz（钟形力脉冲宽度为 1ms，对应的高频截止分量约为 2000Hz）。目前激振设备普遍使用的是手锤、力棒，其锤头或锤垫多数选用工程塑料、高强尼龙、铝、铜、铁、橡皮垫等材料，锤的质量为几百克至几十千克不等。

8.3 现场检测

8.3.1 要采集到高质量的信号，桩顶处理也是重要的环节。传感器安装处的混凝

土不得松动，以避免激振时传感器本身产生振荡、晃动、滑移。传感器安装点和激振点尽可能是光滑的平面，这样传感器与桩之间耦合就较为紧密、传感器的安装谐振频率较高。

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

8.3.2 若传感器安装在纵筋附近，激振时钢筋振动将产生干扰信号；耦合剂太厚，粘接强度较低，传感器的安装谐振频率低；试验证明手扶方式安装传感器，其安装谐振频率为 500Hz~800Hz，明显低于采用粘接安装方式。

检测敲击时，因尺寸效应，在桩顶部位将出现与桩的横向振型相对应的高频干扰。当锤击脉冲变窄或桩径增加时，这种由三维尺寸效应引起的干扰加剧。传感器安装点与激振点距离和位置不同，所受干扰的程度各异。理论研究表明，按图 1 所示，即实心桩安装点在距桩中心约 $\frac{2}{3}$ 半径、空心桩安装点与激振点平面夹角等于或略大于 90° 时，所受干扰相对较小。另应注意，加大安装与激振两点距离或平面夹角将增大激振点与安装点响应信号时间差，造成桩身波速或缺陷定位误差加大。激振点与传感器安装点距离太近时，入射波后面往往紧跟着一个负向脉冲，影响浅部缺陷的分析判断。

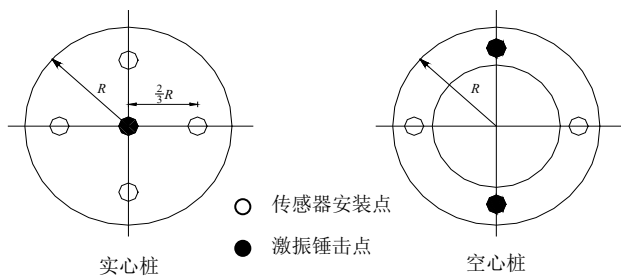


图 1 激振点、传感器安装点位置示意图

8.3.3 通过改变锤的质量、材质及锤垫，可使冲击入射波脉冲宽度在 0.5ms~3.5ms 之间变化。冲击入射波脉冲较宽时，低频分量大，应力波衰减较慢；冲击入射波脉冲较窄时，高频成分较多，应力波衰减较快。因此，若要获得长桩的桩底反射信息或判断深部缺陷，冲击入射波脉冲应宽一些；当检测短桩或桩的浅部缺陷时，

冲击入射波脉冲应窄一些。自由落体激振，可使能量集中，应力波规整。要求激振方向应沿桩轴线方向的目的是为了有效减少敲击时的水平分量。

8.3.4 从时域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 $t_r = 2L/c$ ，只有已知桩长 L 才能计算波速 c ，或已知波速 c 计算桩长 L 。因此，桩长参数应以实际记录的施工桩长为依据，按测点至桩底的距离设定。测试前桩身波速可根据同类桩型的测试经验值初步设定，实际分析过程中应重新设定为由桩长计算的波速，或按本标准第 8.4.2 条确定的波速平均值。

对于时域信号，采样频率越高则采集的数字信号越接近模拟信号，越有利于缺陷位置的准确判断。应在保证测得完整信号，即时段 $2L/c + 5\text{ms}$ 和有 1024 个采样点的前提下，选用较高的采样频率或较小的采样时间间隔。但是，若要兼顾频域分辨率，则应按采样定理适当降低采样频率或增加采样点数。

8.3.5 桩径增大时，桩截面各部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完整性情况。叠加平均处理是提高实测信号信噪比的有效手段。

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

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

8.4 检测结果

8.4.1 可采用低通滤波的方式对接收信号进行处理，以减小噪声信号对测试效果的影响。指数放大是提高桩中、下部和桩底信号识别能力的有效手段，指数放大倍数以 2~20 倍、能识别桩底反射信号为宜，过大的放大倍数会将干扰信号也放大，可能会使测试信号尾部明显不归零，影响桩身完整性的分析判断。

8.4.2 完整桩信号有效信息成分应包括：激振信号、岩土层分界面反射波、桩底

反射波以及正常的桩身波速。对于中、小直径桩，已知桩长，按速度波第一峰与桩底反射波峰间的时间差确定桩身波速。对于大直径桩，由于激振点和传感器安装点间的距离引起时间的滞后，按速度波第一峰与桩底反射波峰间的时间差确定的桩身波速比实际的高。在检测现场，通过对已知桩长的若干根完整桩的测试，计算出每根桩的桩身波速，取平均值后可得到该场地的桩身波速平均值 $\bar{c}$ 。

虽然波速与混凝土强度二者并不呈严格的函数关系，但考虑到二者整体趋势上呈正相关，且强度等级是现场最易得到的参考数据，故对于超长桩或无法明确找出桩底反射信号的桩，可根据经验并结合混凝土强度等级综合确定波速平均值，或利用成桩工艺、桩型相同且桩长相对较短并能够找出桩底反射信号的桩确定的波速，作为波速平均值，表 2 选取不同混凝土强度等级的应力波波速经验值可供参考。

表 2 不同混凝土强度等级的应力波波速参考值

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

8.4.3 因为设定波速有误差，本公式计算的桩身缺陷位置是有误差的。波速带来的缺陷位置误差为 $\Delta x = x \cdot \Delta c / c$ ($\Delta c / c$ 为波速相对误差)，如波速相对误差为 5%，缺陷位置为 10m 时，则误差有 0.5m；缺陷位置为 20m 时，则误差有 1.0m，影响较大。其次采用频域分析计算缺陷位置时，由于和采样周期及采样点数相关的频域分辨率有限，会使缺陷位置的计算精度降低，频域分析法计算的缺陷位置仅作参考。

对瞬态激振还存在另一种误差，即锤击后应力波主要以纵波形式直接沿桩身向下传播，同时在桩顶又主要以直达纵波、横波和表面波的形式沿径向传播。因锤击点与传感器安装点有一定的距离，接收点测到的直达峰总比锤击点处滞后，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

明显加大。而波从缺陷或桩底以一维平面应力波反射回桩顶时，引起的桩顶面径向各点的质点运动却在同一时刻都是相同的，即不存在由近及远的时间滞后问题。严格地讲，按直达波峰-桩底反射峰确定的波速将比实际的高，若按“正确”的桩身波速确定缺陷位置将比实际的浅。另外桩身截面阻抗在纵向较长一段范围内变化较大时，将引起波的绕行距离增加，使“真实的一维杆波速”降低。基于以上两种原因，按照目前的锤击方式测桩，不可能精确测到桩的“一维杆纵波波速”。

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

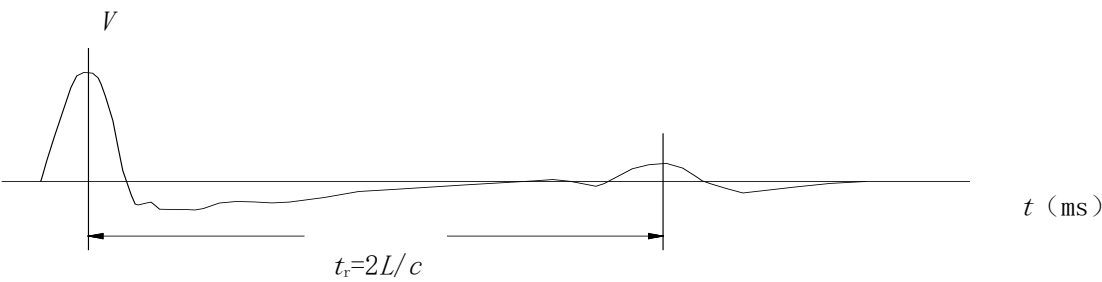


图 2 完整桩典型时域信号特征

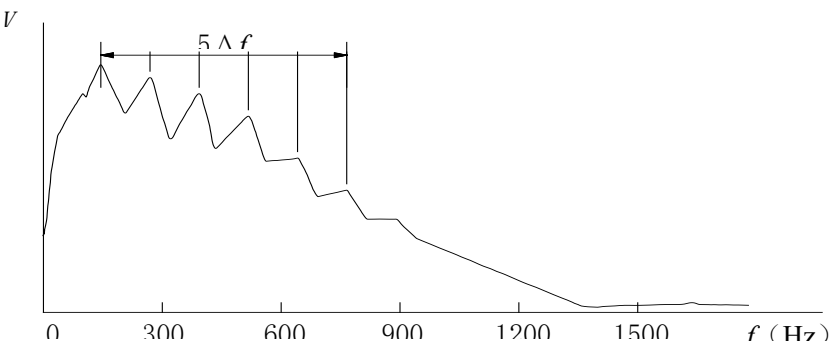


图 3 完整桩典型速度幅频信号特征

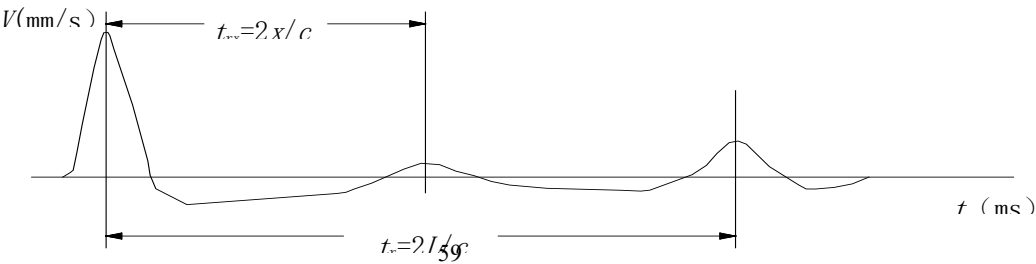


图4 缺陷桩典型时域信号特征

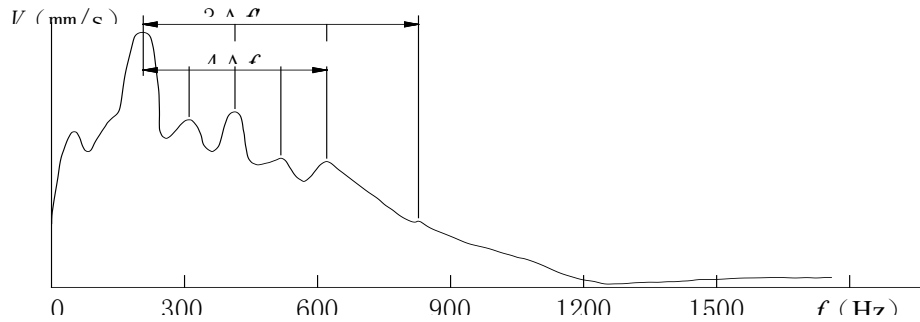


图5 缺陷桩典型速度幅频信号特征

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

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

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

对于预应力管桩和预制方桩，若因焊接工艺或机械接头而存在施工接缝，可能会产生明显的反射波，在多数情况下，这类接缝不影响竖向抗压承载力，甚至对竖向抗拔承载力和水平承载力的影响也可能不大，判断这类反射波应慎重，宜结合其他检测方法进行评价。

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

表 8.4.4 没有列出桩身无缺陷或有轻微缺陷、同时也无桩底反射的这类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，例如以下情形的完整桩是不易测不到桩底信号的：

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

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

8.4.5 本条是对两种特殊情形的补充。

混凝土预制桩采用焊接方式接桩，当焊接质量差时，在该位置会有明显的缺陷反射波；采用机械啮合接头时，在该连接位置有明显的缺陷反射波仍属正常。刚出厂的混凝土预制桩桩身是完整的，沉桩后如在非接桩位置产生较明显的缺陷反射波，大部分情况是在沉桩过程中桩身断裂或碎裂引起，可用孔内成像法进行核实。

表 8.4.4 是正常波速下的完整性判定规定。而对有桩底反射的桩，若实测波速不及表 2 中不同组别混凝土强度等级对应波速低限值的 80%时，该桩的波速可视为异常，不论信号特征如何，都应及时查找原因，可用钻芯等方法验证。

8.4.6 对于因设计或施工工艺所产生的桩身阻抗随深度有明显变化的受检桩，应考虑阻抗变化对测试结果的影响程度，对受检桩的类别判定应进行综合评价。

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

对嵌岩桩，桩底沉渣和桩端下存在软弱夹层、溶洞等是直接关系到该桩能否安全使用的关键因素。虽然本方法不能确定桩底情况，但理论上可以将嵌岩桩桩端视为杆件的固定端，并根据桩底反射波的相位判断桩的端承效果，也可通过导纳值、动刚度的相对高低提供辅助分析。采用本方法判定桩端嵌固效果差时，应采用钻芯法、静载法或高应变法等检测方法验证桩端嵌岩情况，确保基桩使用安全。

9 超声法

9.1 一般规定

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

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

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

9.2 仪器设备

9.2.2 换能器有效长度指换能元件的排列长度，该长度过大会漏判较小缺陷。

换能器的谐振频率越高，对缺陷检测的分辨力就越高，但同时声波衰减会加大、有效测距变短。选用换能器时，在保证有一定的接收灵敏度的前提下，原则上尽可能选择较高的频率。例如，采用 30kHz~60kHz 谐振频率范围的换能器，混凝土声速取为 4200m/s 时，声波波长在 7cm~14cm，即能检测到的缺陷尺寸约在分米量级。当测管间距较大或接收信号较弱时，应选用带前置放大器的接收换能器，其次宜采用低频换能器，但后者要以牺牲分辨力为代价。另外，提高换能器谐振频率，可使其外径进一步减少，这有利于换能器在声测管中顺畅升降，也使减小声测管管径成为可能。

因为检测时使用清水作为耦合剂，换能器在 1MPa 水压下不渗水也就相当于在约 100m 水深下不渗水，这可以满足常见工程桩检测要求。对于超长桩，宜再提高水密性指标。换能器配置扶正器，是为了防止换能器在声测管内摆动影响声学参数的稳定性，特别是在连续、不停顿检测过程中更加有效。

9.3 现场检测

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

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

式中 t ——声时 (μs)；

l ——换能器中心距(mm)；

b ——直线斜率($\mu\text{s}/\text{mm}$)；

t_0 ——系统延时(μs)。

耦合层延时 t' 可由下式计算得出：

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

式中 D ——声测管外径(mm)；

d ——声测管内径(mm)；

d' ——换能器外径(mm)；

v_t ——声测管厚度方向声速 (km/s)；

v_w ——水的声速 (km/s)；

t' ——耦合层延时 (μs)。

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

+ t' 。

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

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

9.4 检测结果

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

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

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

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

常部位。

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

9.4.8 表 9.4.8 中桩身完整性分类的主要原则是：完整性最差的部位决定本桩的桩身完整性类别；在同一横截面（即同一深度）上缺陷的数量愈多，则桩身完整性愈差；对深度范围小于或等于 10cm 的缺陷可从轻评价；评价时宜考虑纵向上（即深度方向）缺陷的数量及分布情况。要比较客观地判定桩身完整性类别，还要结合缺陷的性质、位置、范围等因素综合判定。

另外，对声速临界值明显偏低的基桩应分析原因，宜进行桩身混凝土强度的检测。

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

10 钻芯法

10.1 一般规定

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

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

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

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

10.1.2 关于混凝土灌注桩钻芯孔数、开孔位置的规定说明如下：

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

当采用钻芯法对桩长、桩身混凝土强度、桩身局部缺陷、桩底沉渣、桩端持力层进行验证检测（或鉴定）时，可根据具体验证（或鉴定）的目的、要求确定开孔位置、钻取深度，必要时还可以增加钻孔数量，可不按本标准第 10.4 节进行单桩全面评价。如验证超声法、低应变法等判定的桩身局部缺陷时，可在其要求的方位开孔，为弥补“一孔之见”的不足还需要钻 2 孔，钻进深度可控制到缺陷以下 1m~2m 处，宜进行芯样试件抗压强度试验。

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

10.1.3 关于混凝土灌注桩钻入持力层深度的规定说明如下：

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

《建筑与市政地基基础通用规范》GB 55003 规定：桩基工程施工验收检验，单柱单桩的大直径嵌岩桩，应视岩性检验孔底下 3 倍桩身直径或 5m 深度范围内有无溶洞、破碎带或软弱夹层等不良地质条件。《建筑地基基础设计规范》GB 50007 规定：嵌岩灌注桩桩端以下 3 倍桩径且不小于 5m 范围内应无软弱夹层、断裂破碎带和洞穴分布，且在桩底应力扩散范围内无岩体临空面。《建筑桩基技术规范》JGJ 94 和深圳市标准《地基基础勘察设计规范》SJG 01 也有类似规定。所以，本条规定每桩至少应有 1 孔钻至桩端持力层足够深度，并且按规范和设计要求中较严格的执行。

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

关于钻入持力层深度问题，还应注意满足孔内成像法检测对最小孔深的要求。

比如抗压桩，虽然每桩至少有 1 孔钻入持力层 3 倍桩径（且不应小于 5m），若发现桩底存在沉渣，则其余钻孔钻进就不应小于 1.5m，以便采用孔内成像法验证沉渣厚度、再加权平均计算。再比如对非岩溶发育场地施工前已进行过原桩位超前钻探的桩，钻入持力层深度 0.5m 即可，但是如果发现沉渣厚度可能超标、持力层性状不符等情况时，各钻孔均应钻进小于 1.5m。

10.2 仪器设备

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

10.2.2 钻取的芯样（含中、微风化岩）性状真实度与所用钻具有很大关系，直接影响到桩身完整性类别的判定。为提高取芯质量，钻芯检测用钻具宜为单动双管钻具，不得使用单动单管钻具。孔口管、扶正稳定器（又称导向器）及可捞取松软渣样的钻具应根据需要选用。当桩顶面与钻机塔座距离大于 2m 时，宜安装孔口管，孔口管应垂直、牢固。当桩较长时，应使用扶正稳定器确保钻芯孔的垂直度。钻取强风化岩或土层时宜采用合金钢钻头。

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

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

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

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

10.3 现场检测

10.3.1 应精心安装钻机，钻机立轴中心、天轮中心（天车前沿切点）与孔口中心必须在同一铅垂线上。设备安装后，应进行试运转，在确认正常后方能开钻。钻进初始阶段应对钻机立轴进行校正，及时纠正立轴偏差，确保钻芯过程不发生移位、倾斜。

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

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

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

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

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

钻芯法宜采用清水钻进，冲洗液量一般按钻头大小而定。钻头直径为 101mm

时，一般情况冲洗液流量应为 60L/min~120L/min。在泵量不变的条件下，泵压与水口、水槽的截面积成反比，研究表明，钻头内外侧保持约 0.3MPa 的压差，可保持出水口处部分冲洗液通过刃部，迅速带走岩粉，并润滑和冷却金刚石。因此，应合理调整泵量与泵压。

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

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

由于金刚石钻头与岩芯管之间安有用以修正孔壁的扩孔器，扩孔器外径应比钻头外径大 0.3mm~0.5mm，卡簧内径应比钻头内径小约 0.3mm，金刚石钻头和扩孔器应按外径先大后小的排列顺序使用，内径小的钻头先用，内径大的后用。

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

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

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

10.3.6 钻机操作人员应及时记录孔号、回次数、起至深度、块数、总块数、芯样质量的初步描述及钻进异常情况。芯样取出后，应按回次顺序放进芯样箱中，芯样侧面上应清晰标明回次数、块号、本回次总块数（宜写成带分数的形式，如 $2\frac{3}{5}$ 表示第 2 回次共有 5 块芯样，本块芯样为第 3 块）。

对桩身混凝土芯样的描述包括桩身混凝土钻进深度，芯样连续性、完整性、胶结情况、表面光滑情况、断口吻合程度、混凝土芯样是柱状或块状、骨料大小分布情况，气孔、麻面、蜂窝、沟槽、破碎、夹泥、松散的情况，以及取样编号和取样位置。

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

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

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

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

10.3.10 桩基础中的混凝土桩大多是轴心受压构件，薄弱部位的强度（桩身结构

承载能力)能否满足使用要求直接关系到结构安全。通常情况下,麻面、蜂窝、沟槽等缺陷部位的强度较正常胶结的混凝土强度低,无论是严把质量关查明质量隐患,还是便于设计人员进行桩身结构承载力验算,都有必要对缺陷部位的芯样进行取样试验。因此,缺陷位置能取样试验时,应截取一组芯样进行混凝土抗压试验。

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

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

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

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

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

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

10.3.15 混凝土芯样试件的强度不等于在施工现场取样、成型、同条件养护试块的抗压强度，也不等于标准养护 28d 的试块抗压强度。依据广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ 15-60，将芯样试件抗压强度除以 0.88 的系数换算得到标准立方体试块的抗压强度代表值。

10.3.16 当设计认为对端承力有必要进行验算时，可按分层岩性截取制作芯样试件进行抗压强度试验。由于单个岩石芯样试件截取的理想长度宜大于直径的 2 倍（芯样长度不足时方可按 1 倍截取），通常在桩底以下 1m 范围内很难截取制作 3 个完整芯样试件，可不要求截取“1 组”芯样。

为了更客观地反映实际性状宜保持岩石的天然含水状态，截取的芯样应及时密封包装后浸泡在水中，避免暴晒、雨淋，尤其是软岩。

由于和桩底接触部位的岩石对单桩抗压承载力影响最为关键，应尽可能采取此部分岩样进行抗压试验。

10.3.17 按岩土工程勘察的做法和《建筑地基基础设计规范》GB 50007 的相关规定，需要在岩石的地质年代、名称、风化程度、矿物成分、结构、构造相同条件下至少制作 6 个以上完整岩石芯样试件，才有可能确定岩石单轴抗压强度标准值。与勘察钻探相比，钻芯法检测基桩钻取桩端持力层的主要目的是鉴定桩端岩土层性状，当岩石芯样试件单轴抗压强度试验仅仅是配合鉴定桩端岩土层岩性时，检测报告中可不给出岩石单轴抗压强度标准值，可只给出单个芯样试件单轴抗压强度值。当要求提供岩石饱和单轴抗压强度标准值时，可按国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007、广东省标准《建筑地基基础设计规范》DBJ 15-31 的规定，通过多桩、多孔钻芯取得。

关于岩石芯样含水率问题。岩土工程勘察提供的岩石单轴抗压强度值通常是在岩石饱和状态下得到的，因为水下成孔、灌注施工会不同程度造成岩石强度下降，故采用饱和强度是安全的做法。基桩钻芯法钻取岩芯是成桩后的验收检验，

正常情况下应尽量使岩芯保持钻芯时的“天然”含水状态，可不进行饱和处理，尤其是软质岩。只有明确要求提供岩石饱和单轴抗压强度标准值时，硬质岩岩石芯样试件应在清水中浸泡不少于 12h 后进行试验，软质岩可保持天然湿度试验。这也是和国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007、广东省标准《建筑地基基础设计规范》DBJ 15-31 以及国家标准《工程岩体试验方法标准》GB/T 50266 相协调的。

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

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

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

在最早的中国工程建设标准化委员会标准《钻芯法检测混凝土强度技术规程》CECS 03:88 中将高径比为 2:1 的混凝土芯样试件强度换算成 1:1 的时，乘以 1.24

的系数，亦即将高径比为 1:1 的混凝土芯样试件强度换算成 2:1 的时，乘以 0.81 的系数。在中国铁道出版社 1995 年 1 月第 2 版的《工程地质试验手册(修订版)》中，表 4.3.5 中提供的统计数据表明，高径比为 2:1 的岩石芯样试件强度是高径比 1:1 的 0.85~0.90 倍。在交通行业标准《公路工程岩石试验规程》JTGE41-2005 中提出了将任意高径比的抗压强度 R 换算成高径比为 2:1 的标准强度值 R_e 的公式：

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

即以上标准采用了 0.89 的换算系数把高径比为 1:1 的岩石芯样试件强度换算成了 2:1 的。

综合以上各因素，本标准取用 0.85 的换算系数。

10.4 检测结果

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

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

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

嵌岩情况。

10.4.3 同一根受检桩，桩底沉渣厚度有两个或两个以上钻孔的检测值时，取平均值是不合理的，因为既不符合破坏规律，也不符合安全原则。本次修订采用加权平均法，以和广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ 15-60-2019 保持一致。

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

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

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

10.4.6 桩身完整性和混凝土强度及本方法的其他 3 个评定指标虽然独立提出，但完整性和强度最终都统一到桩身承载力这个设计要求上了，这 2 个指标和沉渣厚度、桩端持力层性状（有时还有最小桩长）对最终的合格判定都具有“一票否决”的作用。钻芯法与高应变法、低应变法和超声法不同，属于直接法，其对桩身完整性类别的判定是通过芯样外观特征观察得出的，如观感差而判为 IV 类的桩，桩身承载力肯定是达不到设计要求的，但凭观感判为 I、II 类的桩，桩身承载力也不能肯定就满足设计要求，因还需要由强度判据确认。表 10.4.6 将完整性和强度分开，分别作为独立的判定条件来判定桩身承载力，既便于现场操作又不会漏判、误判。例如两种极端情况，对于芯样外观判为 I 类的桩，后续强度检测不满足设计要求，最终整桩评定时也是判为不合格，即未漏判；对于芯样外观判为 III 类的桩，即使后续强度满足设计要求，由于耐久性方面的原因，应加固补强，也不能判为合格，也未错判。

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

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

对芯样任一段松散、夹泥或分层的受检桩，应进行工程处理，以确保质量。

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

10.4.7 钻芯孔偏出桩身的情况时有发生。当钻芯孔偏出桩身时，无法评价桩长、沉渣厚度和持力层，仅需对钻取芯样部分的桩身进行评价。

当受检桩长径比不超过 30，按照本标准第 10.3.1 条规定的 0.5% 钻孔垂直度，通常应能顺利钻至桩底，界面钻芯也会顺利完成。

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

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

11 界面钻芯法

11.1 一般规定

11.1.1 界面钻芯法是香港地区普遍采用的灌注桩检测方法，该法非常适合于大长径比、较小桩径的桩底情况检测。经过本市 10 多年的工程经验积累，本法应用趋于成熟可以进一步推广。自从本标准 2015 版开始，对长径比大于 35、桩径大于或等于 800mm 桩推荐采用界面钻芯法做为钻芯法的补充，弥补其难于钻至桩底的不足。应用中也发现了一些问题，由于对两种方法的关系把握不够精准，出现过个别项目过度检测的情况，如个别桩长较长的项目，已经完成符合规定数量的界面钻芯检测，但还片面的增加很多全长钻芯孔以达到单桩钻孔入岩的比例，造成检测费用大幅度增加、检测占用工期延长、桩身截面破损大等问题。

此次修订，将其作为一种独立方法单独成章，以规范该方法的使用，使其在桩基检测中承担更加重要的角色，以充分发挥其突出重点（沉渣和持力层）、高效可靠的优势，具体体现在对岩溶场地按不少于总桩数 30%比例实施界面钻芯法、对长径比小于或等于 30 的桩也要求了该法。界面钻芯法的优势还在于对长径比大的单位工程，能提高全部检测工作的完备程度。

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

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

11.2 仪器设备

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

11.3 现场检测

11.3.1 根据长期的实践经验，界面钻芯法成功与否的关键是界面管的垂直度。因安装不精细，后续检测时钻具不能下放到管底的情况时有发生。因此应特别关注所用管材的刚度、接头连接处的顺直、吊放时的保护措施等。对桩径 800mm 的灌注桩，由于钢筋笼制作尺寸偏差、安装界面管后可能会出现导管下放困难，对此可以采用更小直径的界面管（外径 114mm 壁厚 4mm）、配套使用外径 91mm 的钻头。安装界面管时严控垂直度、钻取时轻压慢转避免混凝土芯样受损严重。

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

11.4 检测结果

11.4.1 由于界面管安装在桩身外周附近，而水下灌注混凝土时桩端由于存在混凝土上返死角，界面钻芯反映的混凝土完整性会略差一些，评定时应适当考虑施工工艺的因素。

附录 J 桩嵌岩深度声波反射法检测要点

J.0.1 声波反射法检测原理如下图所示：

图中 R_1 和 R_2 为钻孔中心距桩岩（土）界面最近和最远处的水平距离。发射换能器 T 和接收换能器 R 置于钻孔中央。发射换能器 T 发射超声脉冲信号，该信号在桩岩（土）界面上反射被由收换能器 R 接收。图示为某检测深度声波在桩岩（土）界面近侧和远侧传播最短路径示意图。

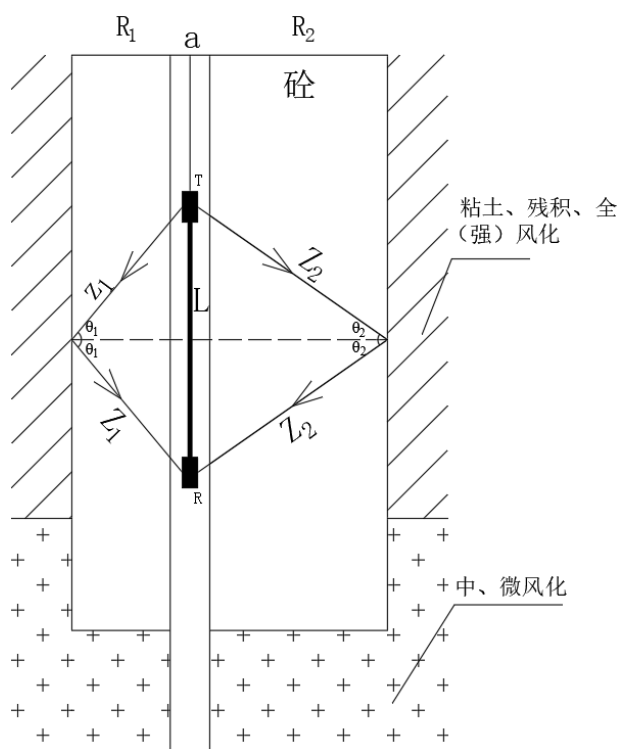


图 6 声波反射法检测原理

因在桩岩（土）界面，入射角和反射角相等的反射信号被最先接收到。桩岩（土）界面近侧和远侧的最短声程分别是 $2Z_1$ 和 $2Z_2$ 。其中：

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + \frac{L^2}{4}} \quad (5)$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + \frac{L^2}{4}} \quad (6)$$

对应的声时 t_1 、 t_2 为：

$$t_1 = \frac{2Z_1}{v_c} \quad (7)$$

$$t_2 = \frac{2Z_2}{v_c} \quad (8)$$

J.0.12 对两种判定基桩嵌岩深度的方法说明如下：

1 桩岩界面反射波相位判别法是对波列图进行反射波同相轴追踪，利用混凝土和岩（土）界面反射波相位特征不同判定基桩嵌岩深度。

若桩身混凝土的声阻抗为 Z_c 、桩侧岩（土）的声阻抗为 Z_r 、则有反射系数：

$$r = \frac{Z_c - Z_r}{Z_c + Z_r} \quad (9)$$

当 $Z_c > Z_r$ ，则有 $r > 0$ ；当 $Z_c < Z_r$ ，则有 $r < 0$ ； Z_c 和 Z_r 相差越大反射信号的波幅就越大。即在强风化岩及风化程度更高地层的反射信号首波相位与入射波的相同；在微风化（部分中风化）地层的反射波首波相位与入射波反相或没有反射波（ $r=0$ ）；在强风化及风化程度更高地层的反射波幅值大于在中微风化地层的反射波幅值。通常，由浅到深岩土层风化程度是连续变化的，检测时存在反射波首波相位从同相到反相的变化过程、也存在反射波首波的波幅单调变小再到单调变大的趋势。相位判别法根据这些反射波的特征判定基桩嵌岩深度。

2 能量反射系数法是根据归一化反射能量系数曲线，判定基桩嵌岩深度。

各测点混凝土桩与岩（土）界面归一化反射能量系数为：

$$r_e = \frac{E_i}{E_0} \quad (10)$$

式中 r_e —— 归一化桩岩（土）界面能量反射系数；

E_0 —— 参考桩段接收信号平均能量；

E_i —— 第 i 个深度测点桩岩（土）界面反射波能量；

其中 E_0 按下公式计算：

$$E_0 = \frac{1}{3} \sum_{i=N}^{N+3} \sum_{j=n_1}^{n_2} A_{ij}^2 \quad (11)$$

式中 A_{ij} —— 第 i 个深度测点、第 j 个数据采样点的波幅值；

N —— 归一化参考能量计算深度测点；

n_1 —— 第 i 深度测点、第 n_1 个数据采样点（计算时间区间起点）；

n_2 —— 第 i 深度测点、第 n_2 个数据采样点（计算时间区间终点）；

n_1 和 n_2 间距一般为半波的长度。

E_i 按如下公式计算：

$$E_0 = \sum_{j=m_1}^{m_2} A_{ij}^2 \quad (12)$$

式中 A_{ij} ——第 i 深度测点、桩与岩（土）界面反射信号的第 j 个数据采样点的波幅；

m_1 ——第 i 深度测点、第 m_1 个数据采样点（计算时间区间起点）；

m_2 ——第 i 深度测点、第 m_2 个数据采样点（计算时间区间终点）。

m_1 和 m_2 间距一般为半波的长度。