

中华人民共和国行业标准

建筑地基检测技术规范

Technical code for testing of building foundation soils

JGJ 340-2015

批准部门：中华人民共和国住房和城乡建设部

施行日期：2015年12月1日

中华人民共和国住房和城乡建设部公告 第786号

住房和城乡建设部关于发布行业标准《建筑地基检测技术规范》的公告

现批准《建筑地基检测技术规范》为行业标准，编号为JGJ 340-2015，自2015年12月1日起实施。其中，第5.1.5条为强制性条文，必须严格执行。

本规范由我部标准定额研究所组织中国建筑工业出版社出版发行。

中华人民共和国住房和城乡建设部
2015年3月30日

前言

根据住房和城乡建设部《〈关于印发2010年工程建设标准规范制订、修订计划〉的通知》(建标[2010]43号)的要求,规范编制组经过广泛调查研究,认真总结实践经验,参考有关国际标准和国外先进标准,并在广泛征求意见的基础上,编制本规范。

本规范的主要技术内容是:1总则;2术语和符号;3基本规定;4土(岩)地基载荷试验;5复合地基载荷试验;6竖向增强体载荷试验;7标准贯入试验;8圆锥动力触探试验;9静力触探试验;10十字板剪切试验;11水泥土钻芯法试验;12低应变法试验;13扁铲侧胀试验;14多道瞬态面波试验。

本规范中以黑体字标志的条文为强制性条文,必须严格执行。

本规范由住房和城乡建设部负责管理和对强制性条文的解释,由福建省建筑科学研究院负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议,请寄送福建省建筑科学研究院(地址:福建省福州市杨桥中路162号,邮编:350025)。

本规范主编单位:福建省建筑科学研究院
福州建工(集团)总公司

本规范参编单位:福建省建筑工程质量检测中心有限公司
建研地基基础工程有限责任公司
广东省建筑科学研究院
建设综合勘察研究设计院有限公司
机械工业勘察设计研究院
上海岩土工程勘察设计研究院有限公司
同济大学
深圳冶建院建筑技术有限公司
中国科学院武汉岩土力学研究所
现代建筑设计集团上海申元岩土工程有限公司
深圳市勘察研究院有限公司
福建省永固基强夯工程有限公司

本规范主要起草人员:侯伟生 施峰 许国平 高文生 刘越生 徐天平 刘艳玲 李耀刚 张继文

陈晖 叶为民 杨志银 汪稔 水伟厚 梁曦 严涛 刘小敏 简浩洋 陈利洲 曾文

本规范主要审查人员:龚晓南 滕延京 顾宝和 张雁 张永钧 王卫东 戴一鸣 刘国楠 康景文朱武

卫

1 总 则

- 1.0.1 为了在建筑地基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、确保质量、保护环境，制定本规范。
- 1.0.2 本规范适用于建筑地基性状及施工质量的检测和评价。
- 1.0.3 建筑地基检测方法的选择应根据各种检测方法的特点和适用范围，考虑地质条件及施工质量可靠性、使用要求等因素因地制宜、综合确定。
- 1.0.4 建筑地基检测除应符合本规范外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术 语

2.1.1 人工地基 artificial ground

为提高地基承载力，改善其变形性质或渗透性质，经人工处理后的地基。

2.1.2 地基检测 foundation soil test

在现场采用一定的技术方法，对建筑地基性状、设计参数、地基处理的效果进行的试验、测试、检验，以评价地基性状的活动。

2.1.3 平板载荷试验 plate load test

在现场模拟建筑物基础工作条件的原位测试。可在试坑、深井或隧洞内进行，通过一定尺寸的承压板，对岩土体施加垂直荷载，观测岩土体在各级荷载下的下沉量，以研究岩土体在荷载作用下的变形特征，确定岩土体的承载力、变形模量等工程特性。

2.1.4 单桩复合地基载荷试验 loading test on single column composite foundation

对单个竖向增强体与地基土组成的复合地基进行的平板载荷试验。

2.1.5 多桩复合地基载荷试验 loading test on multi-column composite foundation

对两个或两个以上竖向增强体与地基土组成的复合地基进行的平板载荷试验。

2.1.6 竖向增强体载荷试验 loading test on vertical reinforcement

在竖向增强体顶端逐级施加竖向荷载，测定增强体沉降随荷载和时间的变化，据此检测竖向增强体承载力。

2.1.7 标准贯入试验 standard penetration test (SPT)

质量为63.5kg的穿心锤，以76cm的落距自由下落，将标准规格的贯入器自钻孔孔底预打15cm，测记再打入30cm的锤击数的原位试验方法。

2.1.8 圆锥动力触探试验 dynamic penetration test (DPT)

用一定质量的击锤，以一定的自由落距将一定规格的圆锥探头打入土中，根据打入土中一定深度

所需的锤击数，判定土的性质原位试验方法。

2. 1. 9 静力触探试验 cone penetration test (CPT)

以静压力将一定规格的锥形探头压入土层，根据其所受抗阻力大小评价土层力学性质，并间接估计土层各深度处的承载力、变形模量和进行土层划分的原位试验方法。

2. 1. 10 十字板剪切试验 vane shear test

将十字形翼板插入软土按一定速率旋转，测出土破坏时的抵抗扭矩，求软土抗剪强度的原位试验方法。

2. 1. 11 扁铲侧胀试验 dilatometer test

将扁铲形探头贯入土中，用气压使扁铲侧面的圆形钢膜向孔壁扩张，根据压力与变形关系，测定土的模量及其他有关工程特性指标的原位试验方法。

2. 1. 12 多道瞬态面波试验 multi-channel transient surface wave exploration test

采用多个通道的仪器，同时记录震源锤击地面形成的完整面波(特指瑞利波)记录，利用瑞利波在层状介质中的几何频散特性，通过反演分析频散曲线获取地基瑞利波速度来评价地基的波速、密实性、连续性等的原位试验方法。

2. 2 符 号

2. 2. 1 作用与作用效应

- F——锤击力；
- P——芯样抗压试验测得的破坏荷载；
- Q——施加于单桩和地基的竖向压力荷载；
- s——沉降量；
- V——质点振动速度；
- γ_0 ——结构重要性系数。

2. 2. 2 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)；
- c_u ——地基土的不排水抗剪强度；
- E——桩身材料弹性模量；
- E_0 ——地基变形模量；
- E_s ——地基压缩模量；
- f_{ak} ——地基承载力特征值；
- f_{cu} ——混凝土芯样试件抗压强度；
- f_s ——双桥探头的侧壁摩阻力；
- f_{spk} ——复合地基承载力特征值；
- N——标准贯入试验实测锤击数；
- N' ——标准贯入试验修正锤击数；
- N_k ——标准贯入试验锤击数标准值；
- N'_k ——标准贯入试验修正锤击数标准值；
- N_{10} ——轻型圆锥动力触探锤击数；

$N_{63.5}$ ——重型圆锥动力触探修正锤击数;
 N_{120} ——超重型圆锥动力触探修正锤击数;
 p_s ——单桥探头的比贯入阻力;
 q_c ——双桥探头的锥尖阻力;
 Z ——桩身截面力学阻抗;
 ϕ ——内摩擦角;
 v ——桩身混凝土声速;
 μ ——土的泊松比;
 ρ ——桩身材料质量密度;
 γ_R ——抗力分项系数。

2. 2. 3 几何参数

A ——桩身截面面积;
 b ——承压板直径或边宽;
 D ——桩身直径(外径), 芯样试件的平均直径;
 L ——测点下桩长;
 x ——传感器安装点至桩身缺陷的距离。

2. 2. 4 计算系数

α ——摩阻比;
 δ ——原位试验数据的变异系数;
 η ——温漂系数。

2. 2. 5 岩土侧胀试验参数

E_b ——侧胀模量;
 I_b ——侧胀土性指数;
 K_b ——侧胀水平应力指数;
 U_b ——侧胀孔压指数。

2. 2. 6 其他

c_m ——桩身波速的平均值;
 f ——频率;
 Δf ——幅频曲线上桩底相邻谐振峰间的频差;
 $\Delta f'$ ——幅频曲线上缺陷相邻谐振峰间的频差;
 s_x ——标准差;
 T ——首波周期;
 Δt ——触探过程中气温与地温引起触探头的最大温差;
 ΔT ——速度波第一峰与桩底反射波峰间的时间差;
 ΔT_x ——速度波第一峰与缺陷反射波峰间的时间差。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 建筑地基检测应包括施工前为设计提供依据的试验检测、施工过程的质量检验以及施工后为验收提供依据的工程检测。需要验证承载力及变形参数的地基应按设计要求或采用载荷试验进行检测。

3.1.2 人工地基应进行施工验收检测。

3.1.3 检测前应进行现场调查。现场调查应根据检测目的和具体要求对岩土工程情况和现场环境条件进行收集和分析。

3.1.4 检测单位应根据现场调查结果，编制检测方案。检测方案应包含下列内容：

- 1 工程概况；
- 2 检测内容及其依据的标准；
- 3 检测数量，抽样方案；
- 4 所需的仪器设备和人员及试验时间计划；
- 5 试验点开挖、加固、处理；
- 6 场地平整，道路修筑，供水供电需求；
- 7 安全措施等要求。

3.1.5 检测试验点的数量应满足设计要求并符合下列规定：

- 1 工程验收检验的抽检数量应按单位工程计算；
- 2 单位工程采用不同地基基础类型或不同地基处理方法时，应分别确定检测方法和抽检数量。

3.1.6 检测用计量器具必须在计量检定或校准周期的有效期内。仪器设备性能应符合相应检测方法的技术要求。仪器设备使用时应按校准结果设置相关参数。检测前应对仪器设备检查调试，检测过程中应加强仪器设备检查，按要求在检测前和检测过程中对仪器进行率定。

3.1.7 当现场操作环境不符合仪器设备使用要求时，应采取保证仪器设备正常工作条件的措施。

3.1.8 检测机构应具备计量认证，检测人员应经培训方可上岗。

4 土(岩)地基载荷试验

4.1 一般规定

4.1.1 土(岩)地基载荷试验适用于检测天然土质地基、岩石地基及采用换填、预压、压实、挤密、强夯、注浆处理后的人工地基的承压板下应力影响范围内的承载力和变形参数。

4.1.2 土(岩)地基载荷试验分为浅层平板载荷试验、深层平板载荷试验和岩基载荷试验。浅层平板载荷试验适用于确定浅层地基土、破碎、极破碎岩石地基的承载力和变形参数；深层平板载荷试验适用于确定深层地基土和大直径桩的桩端土的承载力和变形参数，深层平板载荷试验的试验深度不应小于5m；岩基载荷试验适用于确定完整、较完整、较破碎岩石地基的承载力和变形参数。

4. 1. 3 工程验收检测的平板载荷试验最大加载量不应小于设计承载力特征值的2倍，岩石地基载荷试验最大加载量不应小于设计承载力特征值的3倍；为设计提供依据的载荷试验应加载至极限状态。

4. 1. 4 土(岩)地基载荷试验的检测数量应符合下列规定：

- 1 单位工程检测数量为每500m²不应少于1点，且总点数不应少于3点；
- 2 复杂场地或重要建筑地基应增加检测数量。

4. 1. 5 地基土载荷试验的加载方式应采用慢速维持荷载法。

4. 2 仪器设备及其安装

4. 2. 1 土(岩)地基载荷试验的承压板可采用圆形、正方形钢板或钢筋混凝土板。浅层平板载荷试验承压板面积不应小于0. 25m²，换填垫层和压实地基承压板面积不应小于1. 0m²，强夯地基承压板面积不应小于2. 0m²。深层平板载荷试验的承压板直径不应小于0. 8m。岩基载荷试验的承压板直径不应小于0. 3m。

4. 2. 2 承压板应有足够强度和刚度。在拟试压表面和承压板之间应用粗砂或中砂层找平，其厚度不应超过20mm。

4. 2. 3 载荷试验的试坑标高应与地基设计标高一致。当设计有要求时，承压板应设置于设计要求的受检土层上。

4. 2. 4 试验前应采取措施，保持试坑或试井底岩土的原状结构和天然湿度不变。当试验标高低于地下水位时，应将地下水位降至试验标高以下，再安装试验设备，待水位恢复后方可进行试验。

4. 2. 5 试验加载宜采用油压千斤顶，且千斤顶的合力中心、承压板中心应在同一铅垂线上。当采用两台或两台以上千斤顶加载时应并联同步工作，且千斤顶型号、规格应相同。

4. 2. 6 加载反力宜选择压重平台反力装置。压重平台反力装置应符合下列规定：

- 1 加载反力装置能提供的反力不得小于最大加载量的1. 2倍；
- 2 应对加载反力装置的主要受力构件进行强度和变形验算；
- 3 压重应在试验前一次加足，并应均匀稳固地放置于平台上；
- 4 压重平台支墩施加于地基的压应力不宜大于地基承载力特征值的1. 5倍。

4. 2. 7 荷重测量可采用放置在千斤顶上的荷重传感器直接测定；或采用并联于千斤顶油路的压力表或压力传感器测定油压，并应根据千斤顶率定曲线换算荷载。

4. 2. 8 沉降测量宜采用位移传感器或大量程百分表。位移传感器或大量程百分表安装应符合下列规定：

- 1 承压板面积大于0. 5m²时，应在其两个方向对称安置4个位移测量仪表，承压板面积小于等于0. 5m²时，可对称安置2个位移测量仪表；
- 2 位移测量仪表应安装在承压板上，各位移测量点距承压板边缘的距离应一致，宜为25mm~50mm；对于方形板，位移测量点应位于承压板每边中点；

3 应牢固设置基准桩，基准桩和基准梁应具有一定的刚度，基准梁的一端应固定在基准桩上，另一端应简支于基准桩上；

4 固定和支撑位移测量仪表的夹具及基准梁应避免太阳照射、振动及其他外界因素的影响。

4.2.9 试验仪器设备性能指标应符合下列规定：

1 压力传感器的测量误差不应大于1%，压力表精度应优于或等于0.4级；

2 试验用千斤顶、油泵、油管在最大试验荷载时的压力不应超过规定工作压力的80%；

3 荷重传感器、千斤顶、压力表或压力传感器的量程不应大于最大加载量的3.0倍，且不应小于最大加载量的1.2倍；

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

4.2.10 浅层平板载荷试验的试坑宽度或直径不应小于承压板边宽或直径的3倍。深层平板载荷试验的试井直径宜等于承压板直径，当试井直径需要大于承压板直径时，紧靠承压板周围土的高度不应小于承压板直径。

4.2.11 当加载反力装置为压重平台反力装置时，承压板、压重平台支墩和基准桩之间的净距应符合表4.2.11规定。

表4.2.11 承压板、压重平台支墩和基准桩之间的净距

承压板与基准桩	承压板与压重平台支墩	基准桩与压重平台支墩
$>b$ 且 $>2.0m$	$>b$ 且 $>B$ 且 $>2.0m$	$>1.5B$ 且 $>2.0m$

注：b 为承压板边宽或直径 (m)，B 为支墩宽度 (m)。

4.2.12 对大型平板载荷试验，当基准梁长度不小于12m，但其基准桩与承压板、压重平台支墩的距离仍不能满足本规范表4.2.11的规定时，应对基准桩变形进行监测。监测基准桩的变形测量仪表的分辨力宜达到0.1mm。

4.2.13 深层平板载荷试验应采用合适的传力柱和位移传递装置，并应符合下列规定：

1 传力柱应有足够的刚度，传力柱宜高出地面50cm；传力柱宜与承压板连接成为整体，传力柱的顶部可采用钢筋等斜拉杆固定；

2 位移传递装置宜采用钢管或塑料管做位移测量杆，位移测量杆的底端应与承压板固定连接，位移测量杆宜每间隔一定距离与传力柱滑动相连，位移测量杆的顶部宜高出孔口地面20cm。

4.2.14 孔底岩基载荷试验采用孔壁基岩提供反力进行试验时，孔壁基岩提供的反力应大于最大试验荷载的1.5倍。

4.3 现场检测

4.3.1 正式试验前宜进行预压。预压荷载宜为最大加载量的5%，预压时间宜为5min。预压后卸载至零，测读位移测量仪表的初始读数并应重新调整零位。

4.3.2 试验加卸载分级及施加方式应符合下列规定：

1 地基土平板载荷试验的分级荷载宜为最大试验荷载的 $1/8 \sim 1/12$ ，岩基载荷试验的分级荷载宜为最大试验荷载的 $1/15$ ；

2 加载应分级进行，采用逐级等量加载，第一级荷载可取分级荷载的2倍；

3 卸载应分级进行，每级卸载量为分级荷载的2倍，逐级等量卸载；当加载等级为奇数级时，第一级卸载量宜取分级荷载的3倍；

4 加、卸载时应使荷载传递均匀、连续、无冲击，每级荷载在维持过程中的变化幅度不得超过分级荷载的 $\pm 10\%$ 。

4.3.3 地基土平板载荷试验的慢速维持荷载法的试验步骤应符合下列规定：

1 每级荷载施加后应按第10min、20min、30min、45min、60min 测读承压板的沉降量，以后应每隔半小时测读一次；

2 承压板沉降相对稳定标准：在连续两小时内，每小时的沉降量应小于0.1mm；

3 当承压板沉降速率达到相对稳定标准时，应再施加下一级荷载；

4 卸载时，每级荷载维持1h，应按第10min、30min、60min 测读承压板沉降量；卸载至零后，应测读承压板残余沉降量，维持时间为3h，测读时间应为第10min、30min、60min、120min、180min。

4.3.4 岩基载荷试验的试验步骤应符合下列规定：

1 每级加荷后立即测读承压板的沉降量，以后每隔10min 应测读一次；

2 承压板沉降相对稳定标准：每0.5h 内的沉降量不应超过0.03mm，并应在四次读数中连续出现两次；

3 当承压板沉降速率达到相对稳定标准时，应再施加下一级荷载；

4 每级卸载后，应隔10min 测读一次，测读三次后可卸下一级荷载。全部卸载后，当测读0.5h 回弹量小于0.01mm 时，即认为稳定，终止试验。

4.3.5 当出现下列情况之一时，可终止加载：

1 当浅层载荷试验承压板周边的土出现明显侧向挤出，周边土体出现明显隆起；岩基载荷试验的荷载无法保持稳定且逐渐下降；

2 本级荷载的沉降量大于前级荷载沉降量的5倍，荷载与沉降曲线出现明显陡降；

3 在某一级荷载下，24h 内沉降速率不能达到相对稳定标准；

4 浅层平板载荷试验的累计沉降量已大于等于承压板边宽或直径的6%或累计沉降量大于等于150mm；深层平板载荷试验的累计沉降量与承压板径之比大于等于0.04；

5 加载至要求的最大试验荷载且承压板沉降达到相对稳定标准。

4.4 检测数据分析与判定

4.4.1 土(岩)地基承载力确定时，应绘制压力-沉降(p-s)、沉降-时间对数(s-lgt)曲线，可绘制其他辅助分析曲线。

4.4.2 土(岩)地基极限荷载可按下列方法确定：

1 出现本规范第4.3.5条第1、2、3款情况时，取前一级荷载值；

2 出现本规范第4.3.5条第5款情况时，取最大试验荷载。

4.4.3 单个试验点的土(岩)地基承载力特征值确定应符合下列规定：

1 当 p-s 曲线上有比例界限时，应取该比例界限所对应的荷载值；

2 地基土平板载荷试验,当极限荷载小于对应比例界限荷载值的2倍时,应取极限荷载值的一半;岩基载荷试验,当极限荷载小于对应比例界限荷载值的3倍时,应取极限荷载值的1/3;

3 当满足本规范第4.3.5条第5款情况,且p-s曲线上无法确定比例界限,承载力又未达到极限时,地基土平板载荷试验应取最大试验荷载的一半所对应的荷载值,岩基载荷试验应取最大试验荷载的1/3所对应的荷载值;

4 当按相对变形值确定天然地基及人工地基承载力特征值时,可按表4.4.3规定的地基变形取值确定,且所取的承载力特征值不应大于最大试验荷载的一半。当地基土性质不确定时,对应变形值宜取0.010b;对有经验的地区,可按当地经验确定对应变形值。

表4.4.3 按相对变形值确定天然地基及人工地基承载力特征值

地基类型	地基土性质	特征值对应的变形值 s_0
天然地基	高压缩性土	0.015b
	中压缩性土	0.012b
	低压压缩性土和砂性土	0.010b
人工地基	中、低压压缩性土	0.010b

注: s_0 为与承载力特征值对应的承压板的沉降量; b为承压板的边宽或直径,当b大于2m时,按2m计算。

4.4.4 单位工程的土(岩)地基承载力特征值确定应符合下列规定:

1 同一土层参加统计的试验点不应少于3点,当其极差不超过平均值的30%时,取其平均值作为该土层的地基承载力特征值 f_{ak} ;

2 当极差超过平均值的30%时,应分析原因,结合工程实际判别,可增加试验点数量。

4.4.5 土(岩)载荷试验应给出每个试验点的承载力检测值和单位工程的地基承载力特征值,并应评价单位工程地基承载力特征值是否满足设计要求。

4.4.6 浅层平板载荷试验确定地基变形模量,可按下列公式计算:

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2) \frac{pb}{s} \quad (4.4.6)$$

式中: E_0 ——变形模量(MPa);

I_0 ——刚性承压板的形状系数,圆形承压板取0.785,方形承压板取0.886,矩形承压板当长宽比 $l/b=1.2$ 时,取0.809,当 $l/b=2.0$ 时,取0.626,其余可计算求得,但 l/b 不宜大于2;

μ ——土的泊松比,应根据试验确定;当有工程经验时,碎石土可取0.27,砂土可取0.30,粉土可取0.35,粉质黏土可取0.38,黏土可取0.42;

b——承压板直径或边长(m);

p——p-s曲线线性段的压力值(kPa);

s——与p对应的沉降量(mm)。

4. 4. 7 深层平板载荷试验确定地基变形模量，可按下式计算：

$$E_0 = \omega \frac{pd}{s} \quad (4. 4. 7)$$

式中：w——与试验深度和土类有关的系数，按本规范第4. 4. 8条确定；
d——承压板直径(m)；
p——p-s 曲线线性段的压力值(kPa)；
s——与 p 对应的沉降量(mm)。

4. 4. 8 与试验深度和土类有关的系数 w 可按下列规定确定：

1 深层平板载荷试验确定地基变形模量的系数 w 可根据泊松比试验结果，按下列公式计算：

$$\omega = I_0 I_1 I_2 (1 - \mu^2) \quad (4. 4. 8-1)$$

$$I_1 = 0.5 + 0.23 \frac{d}{z} \quad (4. 4. 8-2)$$

$$I_2 = 1 + 2\mu^2 + 2\mu^4 \quad (4. 4. 8-3)$$

式中：I₁——刚性承压板的深度系数；
I₂——刚性承压板的与土的泊松比有关的系数；
z——试验深度(m)。

2 深层平板载荷试验确定地基变形模量的系数 w 可按表4. 4. 8选用。

表4. 4. 8 深层平板载荷试验确定地基变形模量的系数 w

土类 d/z	土类				
	碎石土	砂土	粉土	粉质黏土	黏土
0.30	0.477	0.489	0.491	0.515	0.524
0.25	0.469	0.480	0.482	0.506	0.514
0.20	0.460	0.471	0.474	0.497	0.505
0.15	0.444	0.454	0.457	0.479	0.487
0.10	0.435	0.446	0.448	0.470	0.478
0.05	0.427	0.437	0.439	0.461	0.468
0.01	0.418	0.429	0.431	0.452	0.459

4. 4. 9 检测报告除应符合本规范第3. 3. 2条规定外，尚应包括下列内容：

- 1 承压板形状及尺寸、试验点的平面位置图、剖面图及标高；
- 2 荷载分级及加载方式；
- 3 本规范第4. 4. 1条要求绘制的曲线及对应的数据表；

- 4 承载力特征值判定依据；
- 5 每个试验点的承载力检测值；
- 6 单位工程的承载力特征值。

5 复合地基载荷试验

5.1 一般规定

5.1.1 复合地基载荷试验适用于水泥石搅拌桩、砂石桩、旋喷桩、夯实水泥石桩、水泥粉煤灰碎石桩、混凝土桩、树根桩、灰土桩、柱锤冲扩桩及强夯置换墩等竖向增强体和周边地基土组成的复合地基的单桩复合地基和多桩复合地基载荷试验，用于测定承压板下应力影响范围内的复合地基的承载力特征值。当存在多层软弱地基时，应考虑到载荷板应力影响范围，选择大承压板多桩复合地基试验并结合其他检测方法进行。

5.1.2 复合地基载荷试验承压板底面标高应与设计要求标高相一致。

5.1.3 工程验收检测载荷试验最大加载量不应小于设计承载力特征值的2倍，为设计提供依据的载荷试验应加载至复合地基达到本规范第5.4.2条规定的破坏状态。

5.1.4 复合地基载荷试验的检测数量应符合下列规定：

1 单位工程检测数量不应少于总桩数的0.5%，且不应少于3点；

2 单位工程复合地基载荷试验可根据所采用的处理方法及地基土层情况，选择多桩复合地基载荷试验或单桩复合地基载荷试验。

5.1.5 复合地基载荷试验的加载方式应采用慢速维持荷载法。

5.2 仪器设备及其安装

5.2.1 单桩复合地基载荷试验的承压板可用圆形或方形，面积为一根桩承担的处理面积；多桩复合地基载荷试验的承压板可用方形或矩形，其尺寸按实际桩数所承担的处理面积确定，宜采用预制或现场制作并应具有足够刚度。试验时承压板中心应与增强体的中心(或形心)保持一致，并与荷载作用点相重合。

5.2.2 试验加载设备、试验仪器设备性能指标、加载方式、加载反力装置、荷载测量、沉降测量应符合本规范第4.2.5条~第4.2.9条的规定。

5.2.3 承压板底面下宜铺设100mm~150mm厚度的粗砂或中砂垫层，承压板尺寸大时取大值。

5.2.4 试验标高处的试坑宽度和长度不应小于承压板尺寸的3倍。基准梁及加荷平台支点宜设在试坑以外，且与承压板边的净距不应小于2m。

5.2.5 承压板、压重平台支墩边和基准桩之间的中心距离应符合本规范表4.2.11规定。

5.2.6 试验前应采取措施，保持试坑或试井底岩土的原状结构和天然湿度不变。当试验标高低于地

下水位时，应将地下水位降至试验标高以下，再安装试验设备，待水位恢复后方可进行试验。

5.3 现场检测

5.3.1 正式试验前宜进行预压，预压荷载宜为最大试验荷载的5%，预压时间为5min。预压后卸载至零，测读位移测量仪表的初始读数并应重新调整零位。

5.3.2 试验加卸载分级及施加方式应符合下列规定：

- 1 加载应分级进行，采用逐级等量加载；分级荷载宜为最大加载量或预估极限承载力的 $1/8 \sim 1/12$ ，其中第一级可取分级荷载的2倍；
- 2 卸载应分级进行，每级卸载量应为分级荷载的2倍，逐级等量卸载；
- 3 加、卸载时应使荷载传递均匀、连续、无冲击，每级荷载在维持过程中的变化幅度不得超过分级荷载的 $\pm 10\%$ 。

5.3.3 复合地基载荷试验的慢速维持荷载法的试验步骤应符合下列规定：

- 1 每加一级荷载前后均应各测读承压板沉降量一次，以后每30min测读一次；
- 2 承压板沉降相对稳定标准：1h内承压板沉降量不应超过0.1mm；
- 3 当承压板沉降速率达到相对稳定标准时，应再施加下一级荷载；
- 4 卸载时，每级荷载维持1h，应按第30min、60min测读承压板沉降量；卸载至零后，应测读承压板残余沉降量，维持时间为3h，测读时间应为第30min、60min、180min。

5.3.4 当出现下列情况之一时，可终止加载：

- 1 沉降急剧增大，土被挤出或承压板周围出现明显的隆起；
- 2 承压板的累计沉降量已大于其边长(直径)的6%或大于等于150mm；
- 3 加载至要求的最大试验荷载，且承压板沉降速率达到相对稳定标准。

5.4 检测数据分析与判定

5.4.1 复合地基承载力确定时，应绘制压力-沉降(p-s)、沉降-时间对数(s-lgt)曲线，也可绘制其他辅助分析曲线。

5.4.2 当出现本规范第5.3.4条第1、2款情况之一时，可视为复合地基出现破坏状态，其对应的前一级荷载应定为极限荷载。

5.4.3 复合地基承载力特征值确定应符合下列规定：

- 1 当压力-沉降(p-s)曲线上极限荷载能确定，且其值大于等于对应比例界限的2倍时，可取比例界限；当其值小于对应比例界限的2倍时，可取极限荷载的一半；
- 2 当p-s曲线为平缓的光滑曲线时，可按表5.4.3对应的相对变形值确定，且所取的承载力特征值不应大于最大试验荷载的一半。有经验的地区，可按当地经验确定相对变形值，但原地基土为高压缩性土层时相对变形值的最大值不应大于0.015。对变形控制严格的工程可按设计要求的沉降允许值作为相对变形值。

表5.4.3 按相对变形值确定复合地基承载力特征值

地基类型	应力主要影响范围 地基土性质	承载力特征值对应的 变形值 s_0
沉管挤密砂石桩、振冲挤密碎石桩、柱锤冲扩桩、强夯置换墩	以黏性土、粉土、砂土为主的地基	$0.010b$
灰土挤密桩	以黏性土、粉土、砂土为主的地基	$0.008b$
水泥粉煤灰碎石桩、混凝土桩、夯实水泥土桩、树根桩	以黏性土、粉土为主的地基	$0.010b$
	以卵石、圆砾、密实粗中砂为主的地基	$0.008b$
水泥搅拌桩、旋喷桩	以淤泥和淤泥质土为主的地基	$0.008b \sim 0.010b$
	以黏性土、粉土为主的地基	$0.006b \sim 0.008b$

注： s_0 为与承载力特征值对应的承压板的沉降量； b 为承压板的边宽或直径，当 b 大于2m时，按2m计算。

5.4.4 单位工程的复合地基承载力特征值确定时，试验点的数量不应少于3点，当其极差不超过平均值的30%时，可取其平均值为复合地基承载力特征值。

5.4.5 复合地基载荷试验应给出每个试验点的承载力检测值和单位工程的地基承载力特征值，并应评价复合地基承载力特征值是否满足设计要求。

5.4.6 检测报告除应符合本规范第3.3.2条规定外，尚应包括下列内容：

- 1 承压板形状及尺寸；
- 2 荷载分级方式；
- 3 本规范第5.4.1条要求绘制的曲线及对应的数据表；
- 4 承载力特征值判定依据；
- 5 每个试验点的承载力检测值；
- 6 单位工程的承载力特征值。

6 竖向增强体载荷试验

6.1 一般规定

6.1.1 竖向增强体载荷试验适用于确定水泥土搅拌桩、旋喷桩、夯实水泥土桩、水泥粉煤灰碎石桩、混凝土桩、树根桩、强夯置换墩等复合地基竖向增强体的竖向承载力。

6. 1. 2 工程验收检测载荷试验最大加载量不应小于设计承载力特征值的2倍；为设计提供依据的载荷试验应加载至极限状态。

6. 1. 3 竖向增强体载荷试验的单位工程检测数量不应少于总桩数的0. 5%，且不得少于3根。

6. 1. 4 竖向增强体载荷试验的加载方式应采用慢速维持荷载法。

6. 2 仪器设备及其安装

6. 2. 1 试验加载宜采用油压千斤顶，加载方式应符合本规范第4. 2. 5条规定。

6. 2. 2 加载反力装置应符合本规范第4. 2. 6条规定。

6. 2. 3 荷载测量可用放置在千斤顶上的荷重传感器直接测定；或采用并联于千斤顶油路的压力表或压力传感器测定油压，并应根据千斤顶率定曲线换算荷载。

6. 2. 4 沉降测量宜采用位移传感器或大量程百分表，沉降测定平面宜在桩顶标高位置，测点应牢固地固定于桩身上。

6. 2. 5 试验仪器设备性能指标应符合本规范第4. 2. 9条规定。

6. 2. 6 试验增强体、压重平台支墩边和基准桩之间的中心距离应符合表6. 2. 6的规定。

表6. 2. 6 增强体、压重平台支墩边和基准桩之间的中心距离

增强体中心与压重平台支墩边	增强体中心与基准桩中心	基准桩中心与压重平台支墩边
$\geq 4D$ 且 $> 2.0m$	$\geq 3D$ 且 $> 2.0m$	$\geq 4D$ 且 $> 2.0m$

注：1 D 为增强体直径(m)；

2 对于强夯置换墩或大型荷载板，可采用逐级加载试验，不用反力装置，具体试验方法参考结构楼面荷载试验。

6. 3 现场检测

6. 3. 1 试验前应对增强体的桩头进行处理。水泥粉煤灰碎石桩、混凝土桩等强度较高的桩宜在桩顶设置带水平钢筋网片的混凝土桩帽或采用钢护筒桩帽，加固桩头前应凿成平面，混凝土宜提高强度等级和采用早强剂。桩帽高度不宜小于一倍桩的直径，桩帽下桩顶标高及地基土标高应与设计标高一致。

6. 3. 2 试验加卸载方式应符合下列规定：

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

2 卸载应分级进行，每级卸载量取加载时分级荷载的2倍，逐级等量卸载；

3 加、卸载时应使荷载传递均匀、连续、无冲击，每级荷载在维持过程中的变化幅度不得超过分

级荷载的±10%。

6.3.3 竖向增强体载荷试验的慢速维持荷载法的试验步骤应符合下列规定：

1 每级荷载施加后应按第5min、15min、30min、45min、60min 测读桩顶的沉降量，以后应每隔半小时测读一次；

2 桩顶沉降相对稳定标准：每1h 内桩顶沉降量不超过0.1mm，并应连续出现两次，从分级荷载施加后的第30min 开始，按1.5h 连续三次每30min 的沉降观测值计算；

3 当桩顶沉降速率达到相对稳定标准时，应再施加下一级荷载；

4 卸载时，每级荷载维持1h，应按第15min、30min、60min 测读桩顶沉降量；卸载至零后，应测读桩顶残余沉降量，维持时间为3h，测读时间应为第15min、30min、60min、120min、180min。

6.3.4 符合下列条件之一时，可终止加载：

1 当荷载-沉降(Q-s) 曲线上有可判定极限承载力的陡降段，且桩顶总沉降量超过40mm~50mm；水泥土桩、竖向增强体的桩径大于等于800mm 取高值，混凝土桩、竖向增强体的桩径小于800mm 取低值；

2 某级荷载作用下，桩顶沉降量大于前一级荷载作用下沉降量的2倍，且经24h 沉降尚未稳定；

3 增强体破坏，顶部变形急剧增大；

4 Q-s 曲线呈缓变型时，桩顶总沉降量大于70mm~90mm；当桩长超过25m，可加载至桩顶总沉降量超过90mm；

5 加载至要求的最大试验荷载，且承压板沉降速率达到相对稳定标准。

6.4 检测数据分析与判定

6.4.1 竖向增强体承载力确定时，应绘制荷载-沉降(Q-s)、沉降-时间对数(s-lgt) 曲线，也可绘制其他辅助分析曲线。

6.4.2 竖向增强体极限承载力应按下列方法确定：

1 Q-s 曲线陡降段明显时，取相应于陡降段起点的荷载值；

2 当出现本规范第6.3.4条第2款的情况时，取前一级荷载值；

3 Q-s 曲线呈缓变型时，水泥土桩、桩径大于等于800mm 时取桩顶总沉降量 s 为40mm~50mm 所对应的荷载值；混凝土桩、桩径小于800mm 时取桩顶总沉降量 s 等于40mm 所对应的荷载值；

4 当判定竖向增强体的承载力未达到极限时，取最大试验荷载值；

5 按本条1~4款标准判断有困难时，可结合其他辅助分析方法综合判定。

6.4.3 竖向增强体承载力特征值应按极限承载力的一半取值。

6.4.4 单位工程的增强体承载力特征值确定时，试验点的数量不应少于3点，当满足其极差不超过平均值的30%时，对非条形及非独立基础可取其平均值为竖向极限承载力。

6.4.5 竖向增强体载荷试验应给出每个试验增强体的承载力检测值和单位工程的增强体承载力特征值，并应评价竖向增强体承载力特征值是否满足设计要求。

6.4.6 检测报告除应符合本规范第3.3.2条规定外，尚应包括下列内容：

1 加卸载方法，荷载分级；

2 本规范第6.4.1条要求绘制的曲线及对应的数据表，土层剖面图；

- 3 承载力特征值判定依据；
- 4 每个试验增强体的承载力检测值；
- 5 单位工程的承载力特征值。

7 标准贯入试验

7.1 一般规定

7.1.1 标准贯入试验适用于判定砂土、粉土、黏性土天然地基及其采用换填垫层、压实、挤密、夯实、注浆加固等处理后的地基承载力、变形参数，评价加固效果以及砂土液化判别。也可用于砂桩和初凝状态的水泥搅拌桩、旋喷桩、灰土桩、夯实水泥桩等竖向增强体的施工质量评价。

7.1.2 采用标准贯入试验对处理地基土质量进行验收检测时，单位工程检测数量不应少于10点，当面积超过3000m²应每500m²增加1点。检测同一土层的试验有效数据不应少于6个。

7.2 仪器设备

7.2.1 标准贯入试验设备规格应符合表7.2.1的规定。

表7.2.1 标准贯入试验设备规格

落锤		锤的质量 (kg)	63.5
		落距 (cm)	76
贯入器	对开管	长度 (mm)	>500
		外径 (mm)	51
		内径 (mm)	35
	管靴	长度 (mm)	50~76
		刃口角度 (°)	18~20
		刃口单刃厚度 (mm)	1.6
钻杆		直径 (mm)	42
		相对弯曲	<1/1000

注：穿心锤导向杆应平直，保持润滑，相对弯曲<1 / 1000。

7.2.2 标准贯入试验所用穿心锤质量、导向杆和钻杆相对弯曲度应定期标定，使用前应对管靴刃口的完好性、钻杆相对弯曲度、穿心锤导向杆相对弯曲度及表面的润滑程度等进行检查，确保设备与机具完好。

7.3 现场检测

7.3.1 标准贯入试验应在平整的场地上进行，试验点平面布设应符合下列规定：

- 1 测试点应根据工程地质分区或加固处理分区均匀布置，并应具有代表性；
- 2 复合地基桩间土测试点应布置在桩间等边三角形或正方形的中心；复合地基竖向增强体上可布设检测点；有检测加固土体的强度变化等特殊要求时，可布置在离桩边不同距离处；
- 3 评价地基处理效果和消除液化的处理效果时，处理前、后的测试点布置应考虑位置的一致性。

7.3.2 标准贯入试验的检测深度除应满足设计要求外，尚应符合下列规定：

- 1 天然地基的检测深度应达到主要受力层深度以下；
- 2 人工地基的检测深度应达到加固深度以下0.5m；
- 3 复合地基桩间土及增强体检测深度应超过竖向增强体底部0.5m；

4 用于评价液化处理效果时，检测深度应符合现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011的规定。

7.3.3 标准贯入试验孔宜采用回转钻进，在泥浆护壁不能保持孔壁稳定时，宜下套管护壁，试验深度须在套管底端75cm以下。

7.3.4 试验孔钻至进行试验的土层标高以上15cm处，应清除孔底残土后换用标准贯入器，并应量得深度尺寸再进行试验。

7.3.5 试验应采用自动脱钩的自由落锤法进行锤击，并应采取减小导向杆与锤间的摩阻力、避免锤击时的偏心和侧向晃动以及保持贯入器、探杆、导向杆连接后的垂直度等措施。

7.3.6 标准贯入试验应符合下列规定：

- 1 贯入器垂直打入试验土层中15cm应不计击数；
- 2 继续贯入，应记录每贯入10cm的锤击数，累计30cm的锤击数即为标准贯入击数；
- 3 锤击速率应小于30击/min；

4 当锤击数已达50击，而贯入深度未达到30cm时，宜终止试验，记录50击的实际贯入深度，应按下式换算成相当于贯入30cm的标准贯入试验实测锤击数：

$$N = 30 \times \frac{50}{\Delta S} \quad (7.3.6)$$

式中：N——标准贯入击数；

ΔS ——50击时的贯入度(cm)。

5 贯入器拔出后，应对贯入器中的土样进行鉴别、描述、记录；需测定黏粒含量时留取土样进行试验分析。

7.3.7 标准贯入试验点竖向间距应视工程特点、地层情况、加固目的确定，宜为1.0m。

7.3.8 同一检测孔的标准贯入试验点间距宜相等。

7.3.9 标准贯入试验数据可按本规范附录A的格式进行记录。

7.4 检测数据分析与判定

7.4.1 天然地基的标准贯入试验成果应绘制标有工程地质柱状图的单孔标准贯入击数与深度关系曲线图。

7.4.2 人工地基的标准贯入试验结果应提供每个检测孔的标准贯入试验实测锤击数和修正锤击数。

7.4.3 标准贯入试验锤击数值可用于分析岩土性状，判定地基承载力，判别砂土和粉土的液化，评价成桩的可能性、桩身质量等。N值的修正应根据建立的统计关系确定。

7.4.4 当作杆长修正时，锤击数可按下式进行钻杆长度修正：

$$N' = \alpha N \quad (7.4.4)$$

式中：N' ——标准贯入试验修正锤击数；

N ——标准贯入试验实测锤击数；

α ——触探杆长度修正系数，可按表7.4.4确定。

表7.4.4 标准贯入试验触探杆长度修正系数

触探杆长度 (m)	≤3	6	9	12	15	18	21	25	30
α	1.00	0.92	0.86	0.81	0.77	0.73	0.70	0.68	0.65

7.4.5 各分层土的标准贯入锤击数代表值应取每个检测孔不同深度的标准贯入试验锤击数的平均值。同一土层参加统计的试验点不应少于3点，当其极差不超过平均值的30%时，应取其平均值作为代表值；当极差超过平均值的30%时，应分析原因，结合工程实际判别，可增加试验点数量。

7.4.6 单位工程同一土层统计标准贯入锤击数标准值与修正后锤击数标准值时，可按本规范附录B的计算方法确定。

7.4.7 砂土、粉土、黏性土等岩土性状可根据标准贯入试验实测锤击数平均值或标准值和修正后锤击数标准值按下列规定进行评价：

1 砂土的密实度可按表7.4.7-1分为松散、稍密、中密、密实；

表7.4.7-1 砂土的密实度分类

N (实测平均值)	密实度
$N \leq 10$	松散
$10 < N \leq 15$	稍密
$15 < N \leq 30$	中密
$N > 30$	密实

2 粉土的密实度可按表7.4.7-2分为松散、稍密、中密、密实；

表7.4.7-2 粉土的密实度分类

孔隙比 e	N_k (实测标准值)	密实度
-------	---------------	-----

—	$N_k \leq 5$	松散
$e > 0.9$	$5 < N_k \leq 10$	稍密
$0.75 \leq e \leq 0.9$	$10 < N_k \leq 15$	中密
$e < 0.75$	$N_k > 15$	密实

3 黏性土的状态可按表7.4.7-3分为软塑、软可塑、硬可塑、硬塑、坚硬。

表7.4.7-3 黏性土的状态分类

I_L	N'_k (修正后标准值)	状态
$0.75 < I_L \leq 1$	$2 < N'_k \leq 4$	软塑
$0.5 < I_L \leq 0.75$	$4 < N'_k \leq 8$	软可塑
$0.25 < I_L \leq 0.5$	$8 < N'_k \leq 14$	硬可塑
$0 < I_L \leq 0.25$	$14 < N'_k \leq 25$	硬塑
$I_L \leq 0$	$N'_k > 25$	坚硬

7.4.8 初步判定地基土承载力特征值时，可按表7.4.8-1~表7.4.8-3进行估算。

表7.4.8-1 砂土承载力特征值 f_{ak} (kPa)

N'	10	20	30	50
中砂、粗砂	180	250	340	500
粉砂、细砂	140	180	250	340

表7.4.8-2 粉土承载力特征值 f_{ak} (kPa)

N'	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
f_{ak}	105	125	145	165	185	205	225	245	265	285	305	325	345

表7.4.8-3 黏性土承载力特征值 f_{ak} (kPa)

N'	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
f_{ak}	90	110	150	180	220	260	310	360	410	450

7.4.9 采用标准贯入试验成果判定地基土承载力和变形模量或压缩模量时，应与地基处理设计时依据的地基承载力和变形参数的确定方法一致。

7.4.10 地基处理效果可依据比对试验结果、地区经验和检测孔的标准贯入试验锤击数、同一土层的标准贯入试验锤击数标准值、变异系数等对下列地基作出相应的评价：

- 1 非碎石土换填垫层(粉质黏土、灰土、粉煤灰和砂垫层)的施工质量(密实度、均匀性)；
- 2 压实、挤密地基、强夯地基、注浆地基等的均匀性；有条件时，可结合处理前的相关数据评价

地基处理有效深度；

3 消除液化的地基处理效果，应按设计要求或现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011规定进行评价。

7. 4. 11 标准贯入试验应给出每个试验孔(点)的检测结果和单位工程的主要土层的评价结果。

7. 4. 12 检测报告除应符合本规范第3. 3. 2条规定外，尚应包括下列内容：

- 1 标准贯入锤击数及土层划分与深度关系曲线；
- 2 每个检测孔同一土层的标准贯入锤击数平均值；
- 3 同一土层标准贯入锤击数标准值；
- 4 岩土性状分析或地基处理效果评价；
- 5 复合地基竖向增强体施工质量或桩间土处理效果评价；
- 6 对地基(土)检测时，可根据地区经验或现场比对试验结果提供土层的变形参数和强度指标建议值。

8 圆锥动力触探试验

8. 1 一般规定

8. 1. 1 圆锥动力触探试验应根据地质条件，按下列原则合理选择试验类型：

1 轻型动力触探试验适用于评价黏性土、粉土、粉砂、细砂地基及其人工地基的地基土性状、地基处理效果和判定地基承载力；

2 重型动力触探试验适用于评价黏性土、粉土、砂土、中密以下的碎石土及其人工地基以及极软岩的地基土性状、地基处理效果和判定地基承载力；也可用于检验砂石桩和初凝状态的水泥搅拌桩、旋喷桩、灰土桩、夯实水泥土桩、注浆加固地基的成桩质量、处理效果以及评价强夯置换效果及置换墩着底情况；

3 超重型动力触探试验适用于评价密实碎石土、极软岩和软岩等地基土性状和判定地基承载力，也可用于评价强夯置换效果及置换墩着底情况。

8. 1. 2 采用圆锥动力触探试验对处理地基土质量进行验收检测时，单位工程检测数量不应少于10点，当面积超过3000m²应每500m²增加1点。检测同一土层的试验有效数据不应少于6个。

8. 2 仪器设备

8. 2. 1 圆锥动力触探试验的设备规格应符合表8. 2. 1的规定。

表8. 2. 1 圆锥动力触探试验设备规格

类型		轻型	重型	超重型
落锤	锤的质量 (kg)	10	63.5	120
	落距 (cm)	50	76	100

探头	直径 (mm)	40	74	74
	锥角 (°)	60	60	60
探杆直径 (mm)		25	42、50	50~60

8.2.2 重型及超重型圆锥动力触探的落锤应采用自动脱钩装置。

8.2.3 触探杆应顺直，每节触探杆相对弯曲宜小于0.5%，丝扣完好无裂纹。当探头直径磨损大于2mm或锥尖高度磨损大于5mm时应及时更换探头。

8.3 现场检测

8.3.1 经人工处理的地基，应根据处理土的类型和增强体桩体材料情况合理选择圆锥动力触探试验类型，其试验方法、要求按天然地基试验方法和要求执行。

8.3.2 圆锥动力触探试验应在平整的场地上进行，试验点平面布设应符合下列规定：

- 1 测试点应根据工程地质分区或加固处理分区均匀布置，并应具有代表性；
- 2 复合地基的增强体施工质量检测，测试点应布置在增强体的桩体中心附近；桩间土的处理效果检测，测试点的位置应在增强体间等边三角形或正方形的中心；
- 3 评价强夯置换墩着底情况时，测试点位置可选择在置换墩中心；
- 4 评价地基处理效果时，处理前、后的测试点的布置应考虑前后的一致性。

8.3.3 圆锥动力触探测试深度除应满足设计要求外，尚应符合下列规定：

- 1 天然地基检测深度应达到主要受力层深度以下；
- 2 人工地基检测深度应达到加固深度以下0.5m；
- 3 复合地基增强体及桩间土的检测深度应超过竖向增强体底部0.5m。

8.3.4 圆锥动力触探试验应符合下列规定：

- 1 圆锥动力触探试验应采用自由落锤；
- 2 地面上触探杆高度不宜超过1.5m，并应防止锤击偏心、探杆倾斜和侧向晃动；
- 3 锤击贯入应连续进行，保持探杆垂直度，锤击速率宜为(15~30)击/min；
- 4 每贯入1m，宜将探杆转动一圈半；当贯入深度超过10m，每贯入20cm宜转动探杆一次；
- 5 应及时记录试验段深度和锤击数。轻型动力触探应记录每贯入30cm的锤击数，重型或超重型动力触探应记录每贯入10cm的锤击数；
- 6 对轻型动力触探，当贯入30cm锤击数大于100击或贯入15cm锤击数超过50击时，可停止试验；
- 7 对重型动力触探，当连续3次锤击数大于50击时，可停止试验或改用钻探、超重型动力触探；当遇有硬夹层时，宜穿过硬夹层后继续试验。

8.3.5 圆锥动力触探试验数据可按本规范附录A的格式进行记录。

8.4 检测数据分析与判定

8.4.1 重型及超重型动力触探锤击数应按本规范附录C的规定进行修正。

8. 4. 2 单孔连续圆锥动力触探试验应绘制锤击数与贯入深度关系曲线。
8. 4. 3 计算单孔分层贯入指标平均值时，应剔除临界深度以内的数值以及超前和滞后影响范围内的异常值。
8. 4. 4 应根据各孔分层的贯入指标平均值，用厚度加权平均法计算场地分层贯入指标平均值和变异系数。
8. 4. 5 应根据不同深度的动力触探锤击数，采用平均值法计算每个检测孔的各土层的动力触探锤击数平均值(代表值)。
8. 4. 6 统计同一土层动力触探锤击数平均值时，应根据动力触探锤击数沿深度的分布趋势结合岩土工程勘探资料进行土层划分。
8. 4. 7 地基土的岩土性状、地基处理的施工效果可根据单位工程各检测孔的圆锥动力触探锤击数、同一土层的圆锥动力触探锤击数统计值、变异系数进行评价。地基处理的施工效果尚宜根据处理前后的检测结果进行对比评价。
8. 4. 8 当采用圆锥动力触探试验锤击数评价复合地基竖向增强体的施工质量时，宜仅对单个增强体的试验结果进行统计和评价。
8. 4. 9 初步判定地基土承载力特征值时，可根据平均击数 N_{10} 或修正后的平均击数 $N_{63.5}$ 按表 8. 4. 9-1、表 8. 4. 9-2 进行估算。

表 8. 4. 9-1 轻型动力触探试验推定地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)

N_{10} (击数)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
一般黏性土地基	50	70	90	115	135	160	180	200	220	240
黏性素填土地基	60	80	95	110	120	130	140	150	160	170
粉土、粉细砂土地基	55	70	80	90	100	110	125	140	150	160

表 8. 4. 9-2 重型动力触探试验推定地基承载力特征值 f_{ak} (kPa)

$N_{63.5}$ (击数)	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
一般黏性土	120	150	180	210	240	265	290	320	350	375	400	425	450	475	500
中砂、粗砂土	80	120	160	200	240	280	320	360	400	440	480	520	560	600	640
粉砂、细砂土	—	75	100	125	150	175	200	225	250	—	—	—	—	—	—

8. 4. 10 评价砂土密实度、碎石土(桩)的密实度时，可用修正后击数按表 8. 4. 10-1~表 8. 4. 10-4

进行。

表8.4.10-1 砂土密实度按 $N_{63.5}$ 分类

$N_{63.5}$	$N_{63.5} \leq 4$	$4 < N_{63.5} \leq 6$	$6 < N_{63.5} \leq 9$	$N_{63.5} > 9$
密实度	松散	稍密	中密	密实

表8.4.10-2 碎石土密实度按 $N_{63.5}$ 分类

$N_{63.5}$	密实度	$N_{63.5}$	密实度
$N_{63.5} \leq 5$	松散	$10 < N_{63.5} \leq 20$	中密
$5 < N_{63.5} \leq 10$	稍密	$N_{63.5} > 20$	密实

注：本表适用于平均粒径小于或等于50mm，且最大粒径小于100mm的碎石土。对于平均粒径大于50mm，或最大粒径大于100mm的碎石土，可用超重型动力触探。

表8.4.10-3 碎石桩密实度按 $N_{63.5}$ 分类

$N_{63.5}$	$N_{63.5} < 4$	$4 \leq N_{63.5} \leq 5$	$5 < N_{63.5} \leq 7$	$N_{63.5} > 7$
密实度	松散	稍密	中密	密实

表8.4.10-4 碎石土密实度按 N_{120} 分类

N_{120}	密实度	N_{120}	密实度
$N_{120} \leq 3$	松散	$10 < N_{120} \leq 14$	密实
$3 < N_{120} \leq 6$	稍密	$N_{120} > 14$	很密
$6 < N_{120} \leq 11$	中密	—	—

8.4.11 对冲、洪积卵石土和圆砾土地基，当贯入深度小于12m时，判定地基的变形模量应结合载荷试验比对试验结果和地区经验进行。初步评价时，可根据平均击数按表8.4.11进行。

表8.4.11 卵石土、圆砾土变形模量 E_0 值 (MPa)

$\bar{N}_{63.5}$ (修正锤击数平均值)	3	4	5	6	8	10	12	14	16
E_0	9.9	11.8	13.7	16.2	21.3	26.4	31.4	35.2	39.0
$\bar{N}_{63.5}$ (修正锤击数平均值)	18	20	22	24	26	28	30	35	40
E_0	42.8	46.6	50.4	53.6	56.1	58.0	59.9	62.4	64.3

8.4.12 对换填地基、预压处理地基、强夯处理地基、不加料振冲加密处理地基的承载力特征值和处理效果做初步评价时，可按本规范第8.4.9条和第8.4.10条进行。

8. 4. 13 圆锥动力触探试验应给出每个试验孔(点)的检测结果和单位工程的主要土层的评价结果。

8. 4. 14 检测报告除应符合本规范第3. 3. 2条规定外, 尚应包括下列内容:

- 1 圆锥动力触探锤击数与贯入深度关系曲线图(表);
- 2 同一土层的圆锥动力触探击数统计值;
- 3 提供下列试验要求的试验结果:
 - 1) 评价地基土的密实程度和均匀性;
 - 2) 评价复合地基竖向增强体的施工质量;
 - 3) 结合比对试验结果和地区经验确定的地基土承载力特征值和变形模量建议值。

9 静力触探试验

9. 1 一般规定

9. 1. 1 静力触探试验适用于判定软土、一般黏性土、粉土和砂土的天然地基及采用换填垫层、预压、压实、挤密、夯实处理的人工地基的地基承载力、变形参数和评价地基处理效果。

9. 1. 2 对处理地基土质量进行验收检测时, 单位工程检测数量不应少于10点, 检测同一土层的试验有效数据不应少于6个。

9. 2 仪器设备

9. 2. 1 静力触探可根据工程需要采用单桥探头、双桥探头, 单桥可测定比贯入阻力, 双桥可测定锥尖阻力和侧壁摩阻力。

9. 2. 2 单桥触探头和双桥触探头的规格应符合表9. 2. 2的规定, 且触探头的外形尺寸和结构应符合下列规定:

- 1 锥头与摩擦筒应同心;
- 2 双桥探头锥头等直径部分的高度, 不应超过3mm, 摩擦筒与锥头的间距不应大于10mm。

表9. 2. 2 单桥和双桥静力触探头规格

锥底截面积 (cm ²)	锥底直径 (mm)	锥角 (°)	单桥触探头	双桥触探头	
			有效侧壁长度 (mm)	摩擦筒表面积 (cm ²)	摩擦筒长度 (mm)
10	35.7	60	57	150	133.7
				200	178.4
15	43.7	60	70	300	218.5

9. 2. 3 静力触探的贯入设备、探头、记录仪和传送电缆应作为整个测试系统按要求进行定期检定、校准或率定。

9. 2. 4 触探主机应符合下列规定:

1 应能匀速贯入，贯入速率为 $(20 \pm 5) \text{mm} / \text{s}$ ，当使用孔压探头触探时，宜有保证贯入速率 $20 \text{mm} / \text{s}$ 的控制装置；

2 贯入和起拔时，施力作用线应垂直机座基准面，垂直度应小于 $30'$ ；

3 额定起拔力应大于额定贯入力的 120% 。

9. 2. 5 记录仪应符合下列规定：

1 仪器显示的有效最小分度值不应大于 $0.05\% \text{FS}$ ；

2 仪器按要求预热后，时漂应小于 $0.1\% \text{FS} / \text{h}$ ，温漂应小于 $0.01\% \text{FS} / ^\circ \text{C}$ ；

3 工作环境温度应为 $-10^\circ \text{C} \sim 45^\circ \text{C}$ ；

4 记录仪和电缆用于多功能探头触探时，应保证各传输信号互不干扰。

9. 2. 6 探头的技术性能应符合下列规定：

1 在额定荷载下，检测点总误差不应大于 $3\% \text{FS}$ ，其中线性误差、重复性误差、滞后误差、归零误差均应小于 $1\% \text{FS}$ ；

2 传感器出厂时的对地绝缘电阻不应小于 $500 \text{M}\Omega$ ；在 300kPa 水压下恒压 2h 后，绝缘电阻应大于 $300 \text{M}\Omega$ ；

3 探头在工作状态下，各部传感器的互扰值应小于本身额定测值的 0.3% ；

4 探头应能在 $-10^\circ \text{C} \sim 45^\circ \text{C}$ 的环境温度中正常工作，由于温度漂移而产生的量程误差，可按下式计算，不应超过满量程的 $\pm 1\%$ ：

$$\frac{\Delta V}{V} = \Delta t \cdot \eta \quad (9.2.6)$$

式中： ΔV ——温度变化所引起的误差(mV)；

V ——全量程的输出电压(mV)；

Δt ——触探过程中气温与地温引起触探头的最大温差($^\circ \text{C}$)；

η ——温漂系数，一般采用 $0.0005 / ^\circ \text{C}$ 。

9. 2. 7 各种探头，自锥底起算，在 1m 长度范围内，与之连接的杆件直径不得大于探头直径；减摩阻器应在此范围以外(上)的位置加设。

9. 2. 8 探头储存应配备防潮、防震的专用探头箱(盒)，并应存放于干燥、阴凉的一处。

9. 3 现场检测

9. 3. 1 静力触探测试应在平整的场地上进行，测试点应根据工程地质分区或加固处理分区均匀布置，并应具有代表性；当评价地基处理效果时，处理前、后的测试点应考虑前后的一致性。

9. 3. 2 静力触探测试深度除应满足设计要求外，尚应按下列规定执行：

1 天然地基检测深度应达到主要受力层深度以下；

2 人工地基检测深度应达到加固深度以下 0.5m ；

3 复合地基的桩间土检测深度应超过竖向增强体底部 0.5m 。

9. 3. 3 静力触探设备的安装应平稳、牢固，应根据检测深度和表面土层的性质，选择合适的反力

装置。

9.3.4 静力触探头应根据土层性质和预估贯入阻力进行选择，并应满足精度要求。试验前，静力触探头应连同记录仪、电缆在室内进行率定；测试时间超过3个月时，每3个月应对静力触探头率定一次；当现场测试发现异常情况时，应重新率定。率定方法应符合本规范附录 D 的规定。

9.3.5 静力触探试验现场操作应符合下列规定：

- 1 贯入前，应对触探头进行试压，确保顶柱、锥头、摩擦筒能正常工作；
- 2 装卸触探头时，不应转动触探头；
- 3 先将触探头贯入土中0.5m~1.0m，然后提升5cm~10cm，待记录仪无明显零位漂移时，记录初始读数或调整零位，方能开始正式贯入；
- 4 触探的贯入速率应控制为 $(1.2 \pm 0.3) \text{ m/min}$ ，在同一检测孔的试验过程中宜保持匀速贯入；
- 5 深度记录的误差不应超过触探深度的 $\pm 1\%$ ；
- 6 当贯入深度超过30m，或穿过厚层软土后再贯入硬土层时，应采取防止孔斜措施，或配置测斜探头，量测触探孔的偏斜角，校正土层界线的深度。

9.3.6 静力触探试验记录应符合下列规定：

- 1 贯入过程中，在深度10m 以内可每隔2m~3m 提升探头一次，测读零漂值，调整零位；以后每隔10m 测读一次；终止试验时，必须测读和记录零漂值；
- 2 测读和记录贯入阻力的测点间距宜为0.1m~0.2m，同一检测孔的测点间距应保持不变；
- 3 应及时核对记录深度与实际孔深的偏差；当有明显偏差时，应立即查明原因，采取纠正措施；
- 4 应及时准确记录贯入过程中发生的各种异常或影响正常贯入的情况。

9.3.7 当出现下列情况之一时，应终止试验：

- 1 达到试验要求的贯入深度；
- 2 试验记录显示异常；
- 3 反力装置失效；
- 4 触探杆的倾斜度超过 10° 。

9.3.8 采用人工记录时，试验数据可按本规范附录 A 的格式进行记录。

9.4 检测数据分析与判定

9.4.1 出现下列情况时，应对试验数据进行处理：

- 1 出现零位漂移超过满量程的 $\pm 1\%$ 且小于 $\pm 3\%$ 时，可按线性内插法校正；
- 2 记录曲线上出现脱节现象时，应将停机前记录与重新开机后贯入10cm 深度的记录连成圆滑的曲线；
- 3 记录深度与实际深度的误差超过 $\pm 1\%$ 时，可在出现误差的深度范围内，等距离调整。

9.4.2 单桥探头的比贯入阻力，双桥探头的锥尖阻力、侧壁摩阻力及摩阻比，应分别按下列公式计算：

$$p_s = K_p \cdot (\epsilon_p - \epsilon_0) \quad (9.4.2-1)$$

$$q_c = K_q \cdot (\epsilon_q - \epsilon_0) \quad (9.4.2-2)$$

$$f_s = K_f \cdot (\epsilon_f - \epsilon_0) \quad (9.4.2-3)$$

$$\alpha = f_s / q_c \times 100\% \quad (9.4.2-4)$$

式中： p_s ——单桥探头的比贯入阻力(kPa)；
 q_c ——双桥探头的锥尖阻力(kPa)；
 f_s ——双桥探头的侧壁摩阻力(kPa)；
 α ——摩阻比(%)；
 K_p ——单桥探头率定系数(kPa / $\mu \epsilon$)；
 K_q ——双桥探头的锥尖阻力率定系数(kPa / $\mu \epsilon$)；
 K_f ——双桥探头的侧壁摩阻力率定系数(kPa / $\mu \epsilon$)；
 ϵ_p ——单桥探头的比贯入阻力应变量($\mu \epsilon$)；
 ϵ_q ——双桥探头的锥尖阻力应变量($\mu \epsilon$)；
 ϵ_f ——双桥探头的侧壁摩阻力应变量($\mu \epsilon$)；
 ϵ_0 ——触探头的初始读数或零读数应变量($\mu \epsilon$)。

9.4.3 对于每个检测孔，采用单桥探头应整理并绘制比贯入阻力与深度的关系曲线，采用双桥探头应整理并绘制锥尖阻力、侧壁摩阻力、摩阻比与深度的关系曲线。

9.4.4 对于土层力学分层，当采用单桥探头测试时，应根据比贯入阻力与深度的关系曲线进行；当采用双桥探头测试时，应以锥尖阻力与深度的关系曲线为主，结合侧壁摩阻力和摩阻比与深度的关系曲线进行。划分土层力学分层界线时，应考虑贯入阻力曲线中的超前和滞后现象，宜以超前和滞后的中点作为分界点。

9.4.5 土层划分应根据土层力学分层和地质分层综合确定，并应分层计算每个检测孔的比贯入阻力或锥尖阻力平均值，计算时应剔除临界深度以内的数值和超前、滞后影响范围内的异常值。

9.4.6 单位工程同一土层的比贯入阻力或锥尖阻力标准值，应根据各检测孔的平均值按本规范附录B计算确定。

9.4.7 初步判定地基土承载力特征值和压缩模量时，可根据比贯入阻力或锥尖阻力标准值按表9.4.7估算。

表9.4.7 地基土承载力特征值 f_{ak} 和压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ 与比贯入阻力标准值的关系

f_{ak} (kPa)	$E_{s0.1-0.2}$ (MPa)	p_s 适用范围 (MPa)	适用土类
$f_{ak} = 80p_s + 20$	$E_{s0.1-0.2} = 2.5 \ln(p_s) + 4$	0.4~5.0	黏性土
$f_{ak} = 47p_s + 40$	$E_{s0.1-0.2} = 2.44 \ln(p_s) + 4$	1.0~16.0	粉土
$f_{ak} = 40p_s + 70$	$E_{s0.1-0.2} = 3.6 \ln(p_s) + 3$	3.0~30.0	砂土

注：当采用 q_c 值时，取 $p_s = 1.1q_c$ 。

9. 4. 8 静力触探试验应给出每个试验孔(点)的检测结果和单位工程的主要土层的评价结果。

9. 4. 9 检测报告除应符合本规范第3. 3. 2条规定外, 尚应包括下列内容:

- 1 锥尖阻力、侧壁摩阻力、摩阻比随深度的变化曲线, 或比贯入阻力随深度的变化曲线;
- 2 每个检测孔的比贯入阻力或锥尖阻力平均值;
- 3 同一土层的比贯入阻力或锥尖阻力标准值;
- 4 结合比对试验结果和地区经验的地基土承载力和变形模量值;
- 5 对检验地基处理加固效果的工程, 应提供处理前后的锥尖阻力、侧壁摩阻力或比贯入阻力的对比曲线。

10 十字板剪切试验

10. 1 一般规定

10. 1. 1 十字板剪切试验适用于饱和软黏性土天然地基及其人工地基的不排水抗剪强度和灵敏度试验。

10. 1. 2 对处理地基土质量进行验收检测时, 单位工程检测数量不应少于10点, 检测同一土层的试验有效数据不应少于6个。

10. 2 仪器设备

10. 2. 1 十字板剪切试验可分为机械式和电测式, 主要设备由十字板头、记录仪、探杆与贯入设备等组成。

10. 2. 2 十字板剪切仪的设备参数及性能指标应符合表10. 2. 2-1~表10. 2. 2-4的规定。

表10. 2. 2-1 十字板头主要技术参数

板宽 B(mm)	板高 H(mm)	板厚(mm)	刃角(°)	轴杆直径(mm)	面积比(%)
50	100	2	60	13	14
75	150	3	60	16	13

表10. 2. 2-2 扭力测量设备主要技术指标

扭矩测量范围(N·m)	扭矩测量范围(°)	扭转速率(°/min)
0~80	0~360	6~12

表10. 2. 2-3 电测式十字板剪切仪的扭力传感器性能指标

检测总误差	传感器出厂时的对地绝缘电阻	现场试验传感器对地绝缘电阻	传感器护套外径
不应大于 3% FS (其中非线性误差、重复性误差、滞后误差、归零误差均应小于 1% FS)	不应小于 500MΩ (在 300kPa 水压下恒压 1h 后, 绝缘电阻应大于 300MΩ)	≥200MΩ	不宜大于 20mm

表10. 2. 2-4 电测式十字板记录仪性能指标

时漂	温漂	有效最小分度值
应小于0.1%FS/h	应小于0.01%FS/℃	应小于0.06%FS

10. 2. 3 加载设备可利用地锚反力系统、静力触探加载系统或其他加压系统。

10. 2. 4 十字板头、记录仪、探杆、电缆等应作为整个测试系统按要求进行定期检定、校准或率定。

10. 2. 5 现场量测仪器应与探头率定时使用的量测仪器相同；信号传输线应采用屏蔽电缆。

10. 3 现场检测

10. 3. 1 场地和仪器设备安装应符合下列规定：

- 1 检测孔位应避开地下电缆、管线及其他地下设施；
- 2 检测孔位场地应平整；
- 3 试验过程中，机座应始终处于水平状态；地表水体下的十字板剪切试验，应采取必要措施，保证试验孔和探杆的垂直度。

10. 3. 2 机械式十字板剪切试验操作应符合下列规定：

- 1 十字板头与钻杆应逐节连接并拧紧；
- 2 十字板插入至试验深度后，应静止2min~3min，方可开始试验；
- 3 扭转剪切速率宜采用(6~12)° / min，并应在2min 内测得峰值强度；测得峰值或稳定值后，继续测读1min，以便确认峰值或稳定值；
- 4 需要测定重塑土抗剪强度时，应在峰值强度或稳定值测试完毕后，按顺时针方向连续转动6圈，再按第3款测定重塑土的不排水抗剪强度。

10. 3. 3 电测式十字板剪切仪试验操作应符合下列规定：

- 1 十字板探头压入前，宜将探头电缆一次性穿入需用的全部探杆；
- 2 现场贯入前，应连接量测仪器并对探头进行试力，确保探头能正常工作；
- 3 将十字板头直接缓慢贯入至预定试验深度处，使用旋转装置卡盘卡住探杆；应静止3min~5min 后，测读初始读数或调整零位，开始正式试验；
- 4 以(6~12)° / min 的转速施加扭力，每1° ~2° 测读数据一次。当峰值或稳定值出现后，再继续测读1min，所得峰值或稳定值即为试验土层剪切破坏时的读数 P_f 。

10. 3. 4 十字板插入钻孔底部深度应大于3倍~5倍孔径；对非均质或夹薄层粉细砂的软黏性土层，

宜结合静力触探试验结果，选择软黏土进行试验。

10.3.5 十字板剪切试验深度宜按工程要求确定。试验深度对原状土地基应达到应力主要影响深度，对处理土地基应达到地基处理深度；试验点竖向间距可根据地层均匀情况确定。

10.3.6 测定场地土的灵敏度时，宜根据土层情况和工程需要选择有代表性的孔、段进行。

10.3.7 十字板剪切试验应记录下列信息：

- 1 十字板探头的编号、十字板常数、率定系数；
- 2 初始读数、扭矩的峰值或稳定值；
- 3 及时记录贯入过程中发生的各种异常或影响正常贯入的情况。

10.3.8 当出现下列情况之一时，可终止试验：

- 1 达到检测要求的测试深度；
- 2 十字板头的阻力达到额定荷载值；
- 3 电信号陡变或消失；
- 4 探杆倾斜度超过2%。

10.4 检测数据分析与判定

10.4.1 出现下列情况时，宜对试验数据进行处理：

- 1 出现零位漂移超过满量程的±1%时，可按线性内插法校正；
- 2 记录深度与实际深度的误差超过±1%时，可在出现误差的深度范围内等距离调整。

10.4.2 机械式十字板剪切仪的十字板常数可按下式计算确定：

$$K_c = \frac{2R}{\pi D^2 \left(\frac{D}{3} + H \right)} \quad (10.4.2)$$

式中： K_c ——机械式十字板剪切仪的十字板常数(1 / m²)；

R ——施力转盘半径(m)；

D ——十字板头直径(m)；

H ——十字板板高(m)。

10.4.3 地基土不排水抗剪强度可按下列公式计算确定：

$$c_u = 1000K_c(P_f - P_0) \quad (10.4.3-1)$$

或

$$c_u = K(\epsilon - \epsilon_0) \quad (10.4.3-2)$$

或

$$c_u = 10K_c\eta R_y \quad (10.4.3-3)$$

式中： c_u ——地基土不排水抗剪强度(kPa)，精确到0.1kPa；
 P_f ——剪损土体的总作用力(N)；
 P_0 ——轴杆与土体间的摩擦力和仪器机械阻力(N)；
 K ——电测式十字板剪切仪的探头率定系数(kPa / $\mu \epsilon$)；
 ϵ ——剪损土体的总作用力对应的应变测试仪读数($\mu \epsilon$)；
 ϵ_0 ——初始读数($\mu \epsilon$)；
 K_c ——十字板常数；当板头尺寸为50mm×100mm时，取0.00218cm⁻³；当板头尺寸为75mm×150mm时，取0.00065 cm⁻³；
 R_y ——原状土剪切破坏时的读数(mV)；
 η ——传感器率定系数(N·cm / mV)。

10.4.4 地基土重塑土强度可按下列公式计算：

$$c'_u = 1000K_c(P'_f - P'_0) \quad (10.4.4-1)$$

或

$$c'_u = K(\epsilon' - \epsilon'_0) \quad (10.4.4-2)$$

或

$$c'_u = 10K_c\eta R'_y \quad (10.4.4-3)$$

式中： c'_u ——地基土重塑土强度(kPa)，精确到0.1kPa；
 P'_f ——剪损重塑土体的总作用力(N)；
 ϵ' ——剪损重塑土对应的最大应变值；
 P'_0 、 ϵ'_0 ——重塑土强度测试前的初始读数；
 R'_y ——重塑土剪切破坏时的读数(mV)。

10.4.5 土的灵敏度可按式计算：

$$S_t = c_u/c'_u \quad (10.4.5)$$

式中： S_t ——土的灵敏度。

10.4.6 对于每个检测孔，应计算不同测试深度的地基土的不排水剪切强度、重塑土强度和灵敏度，并绘制地基土的不排水抗剪强度、重塑土强度和灵敏度与深度的关系图表。需要时可绘制不同测试深度的抗剪强度与扭转角度的关系图表。

10.4.7 每个检测孔的不排水抗剪强度、重塑土强度和灵敏度的代表值应取根据不同深度的十字板剪切试验结果的平均值。参加统计的试验点不应少于3点，当其极差不超过平均值的30%时，取其平均值作为代表值；当极差超过平均值的30%时，应分析原因，结合工程实际判别，可增加试验点数量。

10.4.8 软土地基的固结情况及加固效果可根据地基土的不排水抗剪强度、灵敏度及其变化进行评价。

10. 4. 9 初步判定地基土承载力特征值时，可按下式进行估算：

$$f_{ak} = 2c_u + \gamma h \quad (10. 4. 9)$$

式中： f_{ak} ——地基承载力特征值(kPa)；

γ ——土的天然重度(kN / m³)；

h ——基础埋置深度(m)，当 $h > 3. 0$ m时，宜根据经验进行折减。

10. 4. 10 十字板剪切试验应给出每个试验孔(点)主要土层的检测和评价结果。

10. 4. 11 检测报告除应符合本规范第3. 3. 2条规定外，尚应包括下列内容：

1 每个检测孔的地基土的不排水抗剪强度、重塑土强度和灵敏度与深度的关系曲线(图表)，需要时绘制抗剪强度与扭转角度的关系曲线；

2 根据土层条件和地区经验，对实测的十字板不排水抗剪强度进行修正；

3 同一土层的不排水抗剪强度、重塑土强度和灵敏度的标准值；

4 结合比对试验结果和地区经验所确定的地基承载力、估算土的液性指数、判定软黏性土的固结历史、检验地基加固改良的效果。

11 水泥土钻芯法试验

11. 1 一般规定

11. 1. 1 水泥土钻芯法适用于检测水泥土桩的桩长、桩身强度和均匀性，判定或鉴别桩底持力层岩土性状。

11. 1. 2 水泥土钻芯法试验数量单位工程不应少于0. 5%，且不应少于3根。当桩长大于等于10m时，桩身强度抗压芯样试件按每孔不少于9个截取，桩体三等分段各取3个；当桩长小于10m时，桩身强度抗压芯样试件按每孔不少于6个截取，桩体二等分段各取3个。

11. 1. 3 水泥土桩取芯时龄期应满足设计的要求。

11. 2 仪器设备

11. 2. 1 钻取芯样宜采用液压操纵的高速工程地质钻机，并配备相应的水泵、孔口管、扩孔器、卡簧、扶正稳定器及可捞取松软渣样的钻具。宜采用双管单动或更有利于提高芯样采取率的钻具。钻杆应顺直，钻杆直径宜为50mm。

11. 2. 2 钻取芯样钻机应根据桩身设计强度选用合适的薄壁合金钢钻头或金刚石钻头，钻头外径不宜小于91mm。

11. 2. 3 锯切芯样试件用的锯切机应具有冷却系统和夹紧牢固的装置；芯样试件端面的补平器和磨平机应满足芯样制作的要求。

11. 3 现场检测

11. 3. 1 钻机设备安装应稳固、底座水平。钻机立轴中心、天轮中心(天车前沿切点)与孔口中心必须在同一铅垂线上。应确保钻机在钻芯过程中不发生倾斜、移位，钻芯孔垂直度偏差小于0.5%。
11. 3. 2 每根受检桩可钻1孔，当桩直径或长轴大于1.2m时，宜增加钻孔数量。开孔位置宜在桩中心附近处，宜采用较小的钻头压力。钻孔取芯的取芯率不宜低于85%。对桩底持力层的钻孔深度应满足设计要求，且不小于2倍桩身直径。
11. 3. 3 当桩顶面与钻机底座的高差较大时，应安装孔口管，孔口管应垂直且牢固。
11. 3. 4 钻进过程中，钻孔内循环水流应根据钻芯情况及时调整。钻进速度宜为50mm/min~100mm/min，并根据回水含砂量及颜色调整钻进速度。
11. 3. 5 提钻卸取芯样时，应采用拧卸钻头和扩孔器方式取芯，严禁敲打卸芯。
11. 3. 6 每回次进尺宜控制在1.5m以内；钻至桩底时，可采用适宜的方法对桩底持力层岩土性状进行鉴别。
11. 3. 7 芯样从取样器中推出时应平稳，严禁试样受拉、受弯。芯样在运送和保存过程中应避免压、震、晒、冻，并防止试样失水或吸水。
11. 3. 8 钻取的芯样应由上而下按回次顺序放进芯样箱中，芯样牌上应清晰标明回次数、深度。
11. 3. 9 及时记录钻进及异常情况，并对芯样质量进行初步描述。应对芯样和标有工程名称、桩号、芯样试件采取位置、桩长、孔深、检测单位名称的标示牌的全貌进行拍照。
11. 3. 10 钻芯孔应从孔底往上用水泥浆回灌封孔。

11. 4 芯样试件抗压强度

11. 4. 1 试验抗压试件直径不宜小于70mm，试件的高径比宜为1:1；抗压芯样应进行密封，避免晾晒。
11. 4. 2 芯样试件的加工和测量可按现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106的有关规定执行。芯样试件制作完毕可立即进行抗压强度试验。
11. 4. 3 试验机宜采用高精度小型压力机，试验机额定最大压力不宜大于预估压力的5倍。
11. 4. 4 芯样试件抗压强度应按下式计算确定：

$$f_{cu} = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (11.4.4)$$

式中： f_{cu} ——芯样试件抗压强度(MPa)，精确至0.01MPa；

P——芯样试件抗压试验测得的破坏荷载(N)；
d——芯样试件的平均直径(mm)。

11.5 检测数据分析与判定

11.5.1 桩身芯样试件抗压强度代表值应按一组三块试件强度值的平均值确定。水泥土芯样试件抗压强度代表值应取各段水泥土芯样试件抗压强度代表值中的最小值。

11.5.2 桩身强度应按单位工程检验批进行评价。对单位工程同一条件下的受检桩，应取桩身芯样试件抗压强度代表值进行统计，并按下列公式分别计算平均强度、标准差和变异系数，并应按本规范附录B规定计算桩身强度标准值。

$$\bar{q}_{uf} = \frac{\sum_{i=1}^n q_{ufi}}{n} \quad (11.5.2-1)$$

$$\sigma_{uf} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{q}_{uf} - q_{ufi})^2} \quad (11.5.2-2)$$

$$\delta_{uf} = \frac{\sigma_{uf}}{\bar{q}_{uf}} \times 100\% \quad (11.5.2-3)$$

式中： q_{ufi} ——单桩的芯样试件抗压强度代表值(kPa)；
 \bar{q}_{uf} ——检验批水泥土桩的芯样试件抗压强度平均值(kPa)；
 σ_{uf} ——桩身抗压强度代表值的标准差(kPa)；
 δ_{uf} ——桩身抗压强度代表值的变异系数；
n——受检桩数。

11.5.3 桩底持力层性状应根据芯样特征、动力触探或标准贯入试验结果等综合判定。

11.5.4 桩身均匀性宜接单桩并根据现场水泥土芯样特征等进行综合评价。桩身均匀性评价标准应按表11.5.4规定执行。

表11.5.4 桩身均匀性评价标准

桩身均匀性描述	芯样特征
均匀性良好	芯样连续、完整，坚硬，搅拌均匀，呈柱状
均匀性一般	芯样基本完整，坚硬，搅拌基本均匀，呈柱状，部分呈块状
均匀性差	芯样胶结一般，呈柱状、块状，局部松散，搅拌不均匀

11.5.5 桩身质量评价应按检验批进行。受检桩桩身强度应按检验批进行评价，桩身强度标准值应满足设计要求。受检桩的桩身均匀性和桩底持力层岩土性状接单桩进行评价，应满足设计的要求。

11.5.6 钻芯孔偏出桩外时，应仅对钻取芯样部分进行评价。

11. 5. 7 检测报告除应符合本规范第3. 3. 2条规定外，尚应包括下列内容：
- 1 钻芯设备及芯样试件的加工试验情况；
 - 2 混凝土桩施工日期，取芯日期，抗压试验日期，芯样所在桩身位置及取样率，芯样彩色照片，异常情况说明；
 - 3 检测桩数、芯样进尺、持力层进尺、总进尺、芯样尺寸，芯样试件组数；
 - 4 地质剖面柱状图和不同标高桩身芯样抗压强度试验结果、重度、水泥用量等；
 - 5 受检桩桩身强度、桩身均匀性和桩底持力层岩土性状评价。

12 低应变法试验

12. 1 一般规定

12. 1. 1 低应变法适用于检测有粘结强度、规则截面的桩身强度大于8MPa 竖向增强体的完整性，判定缺陷的程度及位置。
12. 1. 2 低应变法试验单位工程检测数量不应少于总桩数的10%，且不得少于10根。
12. 1. 3 低应变法的有效检测长度、截面尺寸范围应通过现场试验确定。
12. 1. 4 低应变法检测开始时间应在受检竖向增强体强度达到要求后进行。

12. 2 仪器设备

12. 2. 1 低应变法检测仪器的主要技术性能指标应符合现行行业标准《基桩动测仪》JG / T 3055的有关规定，且应具有信号采集、滤波、放大、显示、储存和处理分析功能。
12. 2. 2 低应变法激振设备宜根据增强体的类型、长度及检测目的，选择不同大小、长度、质量的力锤、力棒和不同材质的锤头，以获得所需的激振频带和冲击能量。瞬态激振设备应包括能激发宽脉冲和窄脉冲的力锤和锤垫；力锤可装有力传感器。

12. 3 现场检测

12. 3. 1 受检竖向增强体顶部处理的材质、强度、截面尺寸应与增强体主体基本等同；当增强体的侧面与基础的混凝土垫层浇筑成一体时，应断开连接并确保垫层不影响检测结果的情况下方可进行检测。
12. 3. 2 测试参数设定应符合下列规定：
- 1 增益应结合激振方式通过现场对比试验确定；
 - 2 时域信号分析的时间段长度应在 $2L / c$ 时刻后延续不少于5ms；频域信号分析的频率范围上限不应小于2000Hz；
 - 3 设定长度应为竖向增强体顶部测点至增强体底的施工长度；
 - 4 竖向增强体波速可根据当地同类型增强体的测试值初步设定；
 - 5 采样时间间隔或采样频率应根据增强体长度、波速和频率分辨率合理选择；

6 传感器的灵敏度系数应按计量检定结果设定。

12. 3. 3 测量传感器安装和激振操作应符合下列规定：

- 1 传感器安装应与增强体顶面垂直；用耦合剂粘结时，应有足够的粘结强度；
- 2 锤击点在增强体顶部中心，传感器安装点与增强体中心的距离宜为增强体半径的 $2/3$ 并不应小于 10cm ；
- 3 锤击方向应沿增强体轴线方向；
- 4 瞬态激振应根据增强体长度、强度、缺陷所在位置的深浅，选择合适重量、材质的激振设备，宜用宽脉冲获取增强体的底部或深部缺陷反射信号，宜用窄脉冲获取增强体的上部缺陷反射信号。

12. 3. 4 信号采集和筛选应符合下列规定：

- 1 应根据竖向增强体直径大小，在其表面均匀布置 $2\sim 3$ 个检测点；每个检测点记录的有效信号数不宜少于 3 个；
- 2 检测时应随时检查采集信号的质量，确保实测信号能反映增强体完整性特征；
- 3 信号不应失真和产生零漂，信号幅值不应超过测量系统的量程；
- 4 对于同一根检测增强体，不同检测点及多次实测时域信号一致性较差，应分析原因，增加检测点数量。

12. 4 检测数据分析与判定

12. 4. 1 竖向增强体波速平均值的确定应符合下列规定：

- 1 当竖向增强体长度已知、底部反射信号明确时(图12. 4. 1-1、图12. 4. 1-2)，应在地质条件、设计类型、施工工艺相同的竖向增强体中，选取不少于 5 根完整性为 I 类的竖向增强体按式(12. 4. 1-2)或按式(12. 4. 1-3)计算波速值，按式(12. 4. 1-1)计算其平均值：

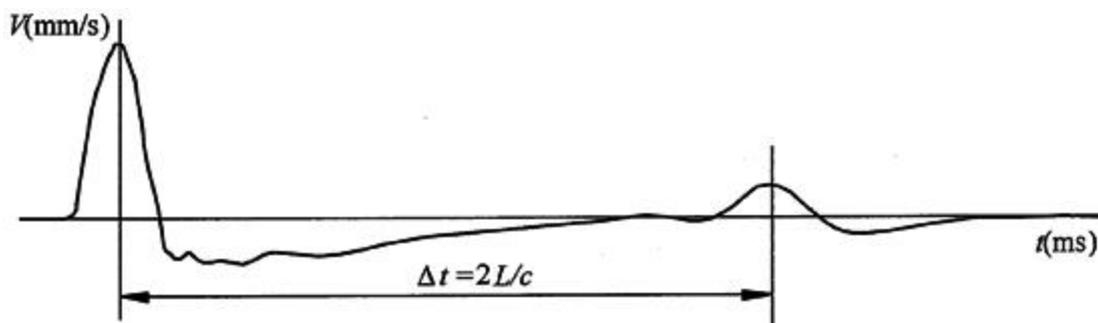


图12. 4. 1-1 完整的增强体典型时域信号特征

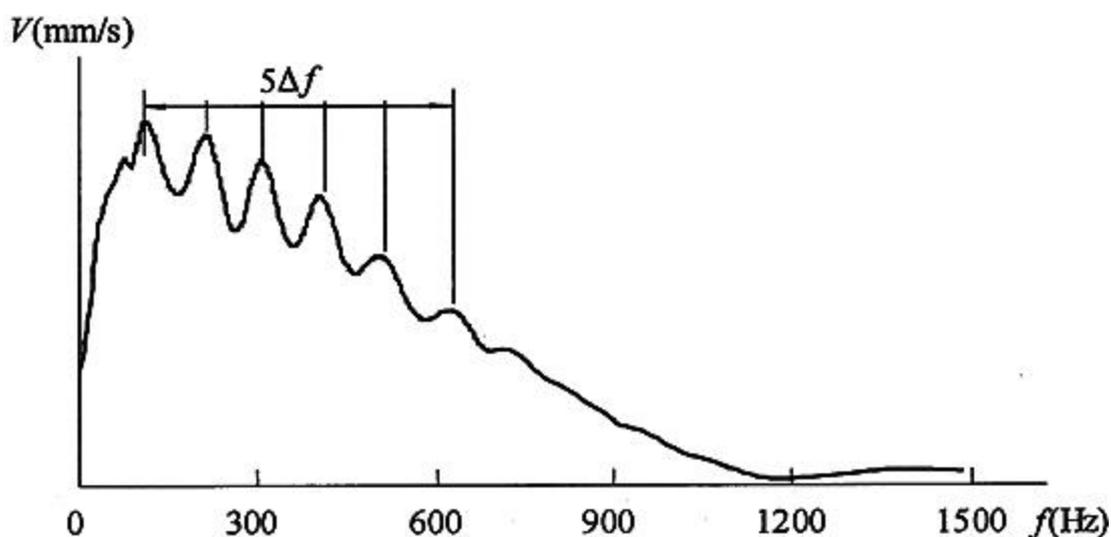


图12. 4. 1-2 完整的增强体典型幅频信号特征

$$c_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (12.4.1-1)$$

时域 $c_i = \frac{2000L}{\Delta t} \quad (12.4.1-2)$

频域 $c_i = 2L \cdot \Delta f \quad (12.4.1-3)$

式中： c_m ——竖向增强体波速的平均值(m/s)；

c_i ——第*i*根受检竖向增强体的波速值(m/s)，且 $|c_i - c_m| / c_m \leq 10\%$ ；

L ——测点下增强体长度(m)；

Δt ——速度波第一峰与竖向增强体底部反射波峰间的时间差(ms)；

Δf ——幅频曲线上竖向增强体底部相邻谐振峰间的频差(Hz)；

n ——参加波速平均值计算的竖向增强体数量($n \geq 5$)。

2 当无法按1款确定时，波速平均值可根据当地相同施工工艺的竖向增强体的其他工程的实测值，结合胶结材料、骨料品种和强度综合确定。

12. 4. 2 竖向增强体缺陷位置应按式(12. 4. 2-1)或式(12. 4. 2-2)计算确定：

时域 $x = \frac{1}{2000} \cdot \Delta t_x \cdot c \quad (12.4.2-1)$

频域 $x = \frac{1}{2} \cdot \frac{c}{\Delta f'} \quad (12.4.2-2)$

式中： x ——竖向增强体缺陷至传感器安装点的距离(m)；

Δt_x ——速度波第一峰与缺陷反射波峰间的时间差(ms)(图12. 4. 2-1)；

c ——受检竖向增强体的波速(m/s)，无法确定时用 c_m 值替代；

$\Delta f'$ ——幅频信号曲线上缺陷相邻谐振峰间的频差(Hz)(图12. 4. 2-2)。

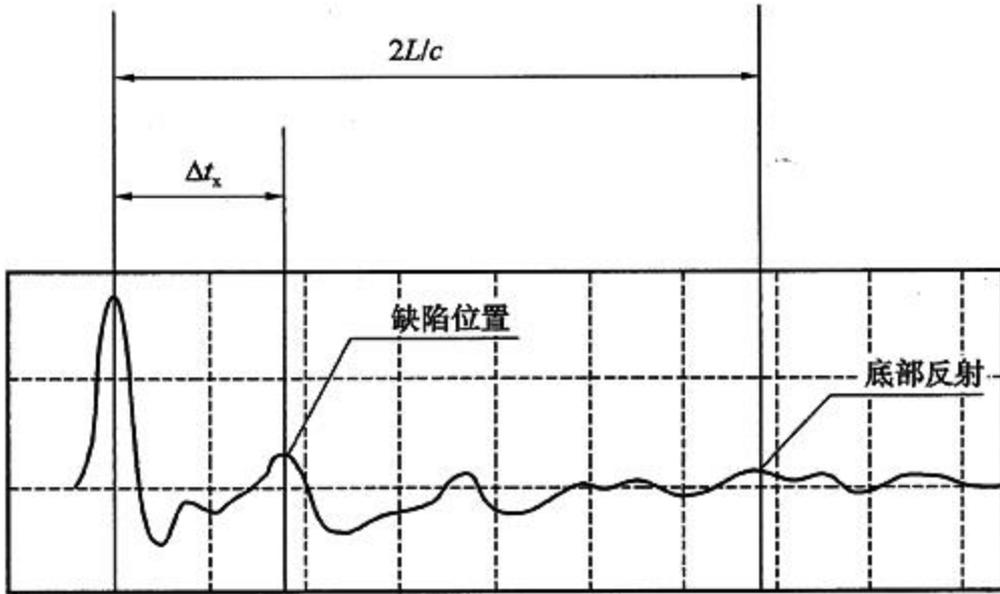


图12. 4. 2-1 缺陷位置时域计算示意图

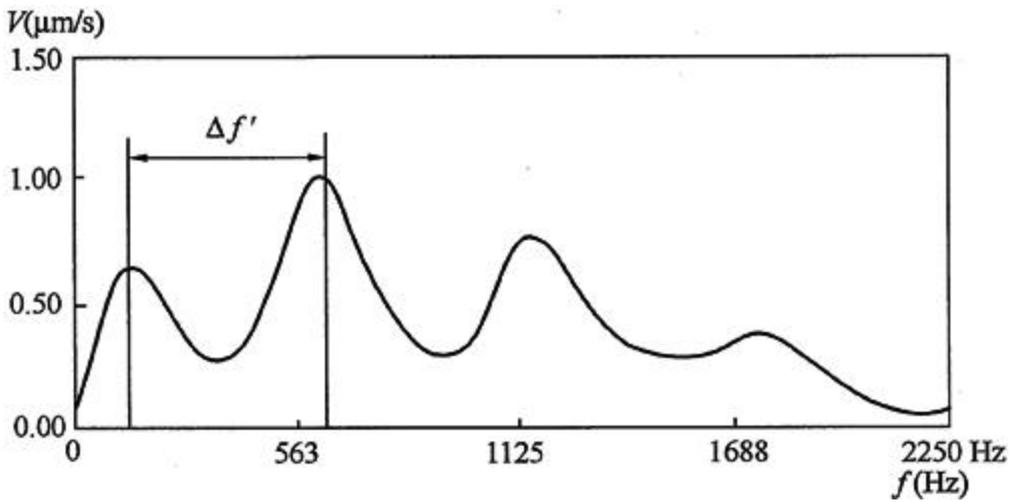


图12. 4. 2-2 缺陷位置频域计算示意图

12. 4. 3 信号处理应符合下列规定：

- 1 采用加速度传感器时，可选择不小于2000Hz 的低通滤波对积分后的速度信号进行处理；采用速度传感器时，可选择不小于1000Hz 的低通滤波对速度信号进行处理；
- 2 当竖向增强体底部反射信号或深部缺陷反射信号较弱时，可采用指数放大，被放大的信号幅值不应大于入射波幅值的一半，进行指数放大后的波形尾部应基本回零；指数放大的范围宜大于 $2L / c$ 的 $2 / 3$ ，指数放大倍数宜小于20；
- 3 可使用旋转处理功能，使测试波形尾部基本位于零线附近。

12. 4. 4 竖向增强体完整性分类应符合表12. 4. 4的规定。

表12. 4. 4 竖向增强体完整性分类表

增强体完整性类别	分类原则
I 类	增强体结构完整
II 类	增强体结构存在轻微缺陷

III类	增强体结构存在明显缺陷
IV类	增强体结构存在严重缺陷

12. 4. 5 竖向增强体完整性类别应结合缺陷出现的深度、测试信号衰减特性以及设计竖向增强体类型、施工工艺、地质条件、施工情况，按本规范表12. 4. 4的分类和表12. 4. 5所列实测时域或幅频信号特征进行综合分析判定。

表12. 4. 5 竖向增强体完整性判定信号特征

类别	时域信号特征	幅频信号特征
I	除冲击入射波和增强体底部反射波外，在 $2L/c$ 时刻前，基本无同相反射波发生；允许存在承载力有利的反相反射（扩径）； 增强体底部阻抗与持力层阻抗有差异时，应有底部反射信号	增强体底部谐振峰排列基本等间距，其相邻频差 $\Delta f \approx c/(2L)$
II	$2L/c$ 时刻前出现轻微缺陷反射波； 增强体底部阻抗与持力层阻抗有差异时，应有底部反射信号	增强体底部谐振峰排列基本等间距，其相邻频差 $\Delta f \approx c/(2L)$ ，轻微缺陷产生的谐振峰之间的频差 ($\Delta f'$) 与增强体底部谐振峰之间的频差 (Δf) 满足 $\Delta f' > \Delta f$
III	有明显同相反射波，其他特征介于II类和IV类之间	
IV	$2L/c$ 时刻前出现严重同相反射波或周期性反射波，无底部反射波； 或因增强体浅部严重缺陷使波形呈现低频大振幅衰减振动，无底部反射波	缺陷谐振峰排列基本等间距，相邻频差 $\Delta f' > c/(2L)$ ，无增强体底部谐振峰； 或因增强体浅部严重缺陷只出现单一谐振峰，无增强体底部谐振峰

注：对同一场地、地质条件相近、施工工艺相同的增强体，因底部阻抗与持力层阻抗相匹配导致实测信号无底部反射信号时，可按本场地同条件下有底部反射波的其他实测信号判定增强体完整性类别。

12. 4. 6 低应变法应给出每根受检竖向增强体的完整性情况评价。

12. 4. 7 出现下列情况之一，竖向增强体完整性宜结合其他检测方法进行判定：

- 1 实测信号复杂，无规律，无法对其进行准确评价；
- 2 增强体截面渐变或多变，且变化幅度较大。

12. 4. 8 低应变法检测报告应给出增强体完整性检测的实测信号曲线。

12. 4. 9 检测报告除应符合本规范第3. 3. 2条规定外，尚应包括下列内容：

- 1 增强体波速取值；
- 2 增强体完整性描述、缺陷的位置及增强体完整性类别；
- 3 时域信号时段所对应的增强体长度标尺、指数或线性放大的范围及倍数；或幅频信号曲线分析的频率范围、增强体底部或增强体缺陷对应的相邻谐振峰间的频差。

13 扁铲侧胀试验

13. 1 一般规定

13. 1. 1 扁铲侧胀试验适用于判定黏性土、粉土和松散~中密的砂土、预压地基和注浆加固地基的承载力和变形参数，评价液化特性和地基加固前后效果对比。在密实的砂土、杂填土和含砾土层中不宜采用。

13. 1. 2 对处理地基土质量进行验收检测时，单位工程检测数量不应少于10点，检测同一土层的试验有效数据不应少于6个。

13. 1. 3 采用扁铲侧胀试验判定地基承载力和变形参数，应结合早位工程载荷试验比对结果进行。

13. 2 仪器设备

13. 2. 1 扁铲侧胀试验设备应包括扁铲测头、测控箱、率定附件、气-电管路、压力源和贯入设备。应按要求定期检定、校准或率定。

13. 2. 2 扁铲测头外形尺寸和结构应符合下列规定：

- 1 长应为230mm~240mm、宽应为94mm~96mm、厚应为14mm~16mm；
- 2 探头前缘刃角应为 12° ~ 16° ；
- 3 探头侧面钢膜片的直径应为60mm，厚宜为0. 2mm。

13. 2. 3 测控箱与1m 长的气-电管路、气压计、校正器等率定附件组成率定装置。气-电管路的直径不宜超过12mm。压力源可采用干燥的空气或氮气。贯入设备可采用静力触探机具或液压钻机。

13. 3 现场检测

13. 3. 1 试验前准备工作应符合下列规定：

- 1 应先将气-电管路贯穿在静力触探探杆中，或直接用胶带绑在钻杆上；
- 2 气-电管路贯穿探杆后，一端应与扁铲测头连接；
- 3 应检查测控箱、压力源设备完好连接，并将气-电管路另一端与测控箱的测头插座连接；
- 4 应将地线接到测控箱的地线插座上，另一端连接于探杆或压机的机座。

13. 3. 2 扁铲侧胀试验应符合下列规定:

1 每孔试验前后均应进行探头率定, 以试验前后的平均值为修正值;

2 探头率定时膜片的合格标准, 率定时膨胀至0.05mm的气压实测值5kPa~25kPa, 率定时膨胀至1.10mm的气压实测值10kPa~110kPa;

3 应以静力匀速将探头贯入土中, 贯入速率宜为2cm/s; 试验点间距宜取20cm~50cm; 用于判断液化时, 试验间距不应大于20cm;

4 探头达到预定深度后, 应匀速加压和减压测定膜片膨胀至0.05mm、1.10mm和回到0.05mm的压力A、B、C值; 砂土宜为30s~60s、黏性土宜为2min~3min完成; A与B之和必须大于△A与△B之和。

13. 3. 3 进行扁铲侧胀消散试验时, 应在测试的深度进行。测读时间间距可取1min、2min、4min、8min、15min、30min、90min, 以后每90min测读一次, 直至消散结束。

13. 4 检测数据分析与判定

13. 4. 1 出现下列情况时, 应对现场试验数据进行处理:

1 出现零位漂移超过满量程的±1%时, 可按线性内插法校正;

2 记录曲线上出现脱节现象时, 应将停机前记录与重新开机后贯入10cm深度的记录连成圆滑的曲线;

3 记录深度与实际深度的误差超过±1%时, 可在出现误差的深度范围内等距离调整。

13. 4. 2 扁铲侧胀试验成果分析应包括下列内容:

1 对试验的实测数据应按下列公式进行膜片刚度修正:

$$P_0 = 1.05(A - Z_m + \Delta A) - 0.05(B - Z_m - \Delta B) \quad (13.4.2-1)$$

$$P_1 = B - Z_m - \Delta B \quad (13.4.2-2)$$

$$P_2 = C - Z_m + \Delta A \quad (13.4.2-3)$$

式中: P_0 ——膜片向土中膨胀之前的接触压力(kPa);

P_1 ——膜片膨胀至1.10mm时的压力(kPa);

P_2 ——膜片回到0.05mm时的终止压力(kPa);

Z_m ——调零前的压力表初读数(kPa)。

2 应根据 P_0 、 P_1 和 P_2 计算下列指标:

$$E_D = 34.7(P_1 - P_0) \quad (13.4.2-4)$$

$$K_D = (P_0 - u_0) / \sigma_{v0} \quad (13.4.2-5)$$

$$I_D = (P_1 - P_0) / (P_0 - u_0) \quad (13.4.2-6)$$

$$U_D = (P_2 - u_0) / (P_0 - u_0) \quad (13.4.2-7)$$

式中： E_b ——侧胀模量(kPa)；
 K_b ——侧胀水平应力指数；
 I_b ——侧胀土性指数；
 U_b ——侧胀孔压指数；
 u_0 ——试验深度处的静水压力(kPa)；
 σ_{v0} ——试验深度处土的有效上覆压力(kPa)。

3 绘制 E_b 、 K_b 、 I_b 、 U_b 与深度的关系曲线。

13. 4. 3 天然地基和人工地基的地基承载力及进行液化判别可根据扁铲侧胀的试验指标和载荷试验的对比试验或地区经验进行判定。

13. 4. 4 扁铲侧胀试验应给出每个试验孔(点)主要土层的检测和评价结果。

13. 4. 5 检测报告除应符合本规范第3. 3. 2条规定外，尚应包括下列内容：

- 1 扁铲侧胀试验 E_b 、 K_b 、 I_b 、 U_b 与深度及土层分类与深度关系曲线；
- 2 每个检测孔的扁铲模量、水平应力指数代表值；
- 3 同一土层或同一深度范围的扁铲模量、水平应力指数标准值；
- 4 岩土性状分析或地基处理效果评价。

14 多道瞬态面波试验

14. 1 一般规定

14. 1. 1 多道瞬态面波试验适用于天然地基及换填、预压、压实、夯实、挤密、注浆等方法处理的人工地基的波速测试。通过测试获得地基的瑞利波速度和反演剪切波速，评价地基均匀性，判定砂土地基液化，提供动弹性模量等动力参数。

14. 1. 2 多道瞬态面波试验宜与钻探、动力触探等测试方法密切配合，正确使用。

14. 1. 3 采用多道瞬态面波试验判定地基承载力和变形参数时，应结合单位工程地质资料和载荷试验比对结果进行。

14. 1. 4 当采用多种方法进行场地综合判断时，宜先进行瑞利波试验，再根据其试验结果有针对性地布置载荷试验、动力触探等测点进行点测。

14. 1. 5 现场测试前应制定满足测试目的和精度要求的采集方案，以及拟采用的采集参数、激振方式、测点和测线布置图及数据处理方法等。测试应避免各种干扰震源，先进行场地及其邻近的干扰震源调查。

14. 2 仪器设备

14. 2. 1 多道瞬态面波试验主要仪器设备应包括振源、检波器、放大器与记录系统、处理软件等。

14. 2. 2 振源可采用18磅大锤、重60kg~120kg 和落距1. 8m 的砂袋或落重等激振方式，并应保证面

波测试所需的频率及激振能量。

14. 2. 3 检波器及安装应符合下列规定：

- 1 应采用垂直方向的速度型检波器；
- 2 检波器的固有频率应满足采集最大面波周期(相应于测试深度)的需要，宜采用频率不大于4. 0Hz 的低频检波器；
- 3 同一排列检波器之间的固有频率差应小于0. 1Hz，灵敏度和阻尼系数差别不应大于10%；
- 4 检波器按竖直方向安插，应与地面接触紧密。

14. 2. 4 放大器与记录系统应符合下列规定：

- 1 仪器放大器的通道数不应少于12通道；采用的通道数应满足不同面波模态采集的要求；
- 2 带通0. 4Hz~4000Hz；示值(或幅值)误差不大于±5%；通道一致性误差不大于所用采样时间间隔的一半；
- 3 仪器采样时间间隔应满足不同面波周期的时间分辨率，保证在最小周期内采样(4~8)点；仪器采样时间长度应满足在距震源最远通道采集完面波最大周期的需要；
- 4 仪器动态范围不应低于120dB，模数转换(A / D)的位数不宜小于16位。

14. 2. 5 采集与记录系统处理软件应具备下列功能：

- 1 具有采集、存储数字信号和对数字信号处理的智能化功能；
- 2 采集参数的检查与改正、采集文件的组合拼接、成批显示及记录中分辨坏道和处理等功能；
- 3 识别和剔除干扰波功能；
- 4 对波速处理成图的文件格式和成图功能，并应为通用计算机平台所调用的功能；
- 5 分频滤波和检查各分频率有效波的发育及信噪比的功能；
- 6 分辨识别及利用基态面波成分的功能，反演地层剪切波速和层厚的功能。

14. 3 现场检测

14. 3. 1 有效检测深度不超过20m 时宜采用大锤激振，不超过30m 时宜采用砂袋和落重激振。

14. 3. 2 现场检测时，仪器主机设备等应有防风沙、防雨雪、防晒和防摔等保护措施。

14. 3. 3 多道瞬态面波测试记录通道应为12道或24道，道间距宜为1. 0m~3. 0m，偏移距根据现场试验确定；宜在排列延长线方向，距排列首端或末端检波器1. 0m~5. 0m 处激发，具体参数由现场试验确定。

14. 3. 4 多通道记录系统测试前应进行频响与幅度的一致性检查，在测试需要的频率范围内各通道应符合一致性要求。

14. 3. 5 在地表介质松软或风力较大条件下时，检波器应挖坑埋置；在地表有植被或潮湿条件时，应防止漏电。检波器周围的杂草等易引起检波器微动之物应清除；检波器排列布置应符合、下列规定：

- 1 应采用线性等道间距排列方式，震源应在检波器排列以外延长线上激发；
- 2 道间距应小于最小测试深度所需波长的1 / 2；
- 3 检波器排列长度应大于预期面波最大波长的一半，且大于最大检测深度；
- 4 偏移距的大小，应根据任务要求通过现场试验确定。

14.3.6 对大面积地基处理采用普测时，测点间距可按半排列或全排列长度确定，一般为12m~24m。

14.3.7 波速测试点的位置、数量、测试深度等应根据地基处理方法和设计要求确定。遇地层情况变化时，应及时调整观测参数。重要异常或发现畸变曲线时应重复观测。

14.4 检测数据分析与判定

14.4.1 面波数据资料预处理时，应检查现场采集参数的输入正确性和采集记录的质量。采用具有提取频散曲线功能的软件，获取测试点的面波频散曲线。

14.4.2 频散曲线的分层，应根据曲线的曲率和频散点的疏密变化综合分析；分层完成后，可反演计算剪切波层速度和层厚。

14.4.3 根据实测瑞利波波速和动泊松比，可按下列公式计算剪切波波速：

$$V_s = V_R / \eta_s \quad (14.4.3-1)$$

$$\eta_s = (0.87 - 1.12\mu_d) / (1 + \mu_d) \quad (14.4.3-2)$$

式中： V_s ——剪切波速度(m/s)；
 V_R ——面波速度(m/s)；
 η_s ——与泊松比有关的系数；
 μ_d ——动泊松比。

14.4.4 对于大面积普测场地，对剪切波速可以等厚度计算等效剪切波速，并应绘制剪切波速等值图，分层等效剪切波速可按下列公式计算：

$$V_{se} = d_0 / t \quad (14.4.4-1)$$

$$t = \sum_{i=1}^n (d_i / V_{si}) \quad (14.4.4-2)$$

式中： V_{se} ——土层等效剪切波速(m/s)；
 d_0 ——计算深度(m)，一般取2m~4m；
 t ——剪切波在计算深度范围内的传播时间(s)；
 d_i ——计算深度范围内第*i*层土的厚度(m)；
 V_{si} ——计算深度范围内第*i*层土剪切波速(m/s)；
 n ——计算深度范围内土层的分层数。

14.4.5 对地基处理效果检验时，应进行处理前后对比测试，并保持前后测点测线一致。可不换算成剪切波速，按处理前后的瑞利波速度进行对比评价和分析。

14.4.6 当测试点密度较大时，可绘制不同深度的波速等值线，用于定性判断场地不同深度处地基处理前后的均匀性。在波速较低处布置动力触探、静载试验等其他测点。根据各种方法的测试结果对

处理效果进行综合判断。

14. 4. 7 瑞利波波速与承载力特征值和变形模量的对应关系应通过现场试验比对和地区经验积累确定；初步判定碎石土地基承载力特征值和变形模量，可按表14. 4. 7估算。

表14. 4. 7 瑞利波波速与碎石土地基承载力特征值和变形模量的对应关系

V_R (m/s)	100	150	200	250	300
f_{ak} (kPa)	110	150	200	240	280
E_0 (MPa)	5	10	20	30	45

注：表中数据可内插求得。

14. 4. 8 多道瞬态面波试验应给出每个试验孔(点)的检测结果和单位工程的主要土层的评价结果。

14. 4. 9 检测报告除应符合本规范第3. 3. 2条规定外，尚应包括下列内容：

- 1 检测点平面布置图，仪器设备一致性检查的原始资料，干扰波实测记录；
- 2 绘制各测点的频散曲线，计算对应土层的瑞利波相速度，根据换算的深度绘制波速-深度曲线或地基处理前后对比关系曲线；有地质钻探资料时，应绘制波速分层与工程地质柱状对比图；
- 3 根据瑞利波相速度和剪切波速对应关系绘制剪切波速和深度关系曲线或地基处理前后对比关系曲线，面波测试成果图表等；
- 4 结合钻探、静载试验、动力触探和标贯等其他原位测试结果，分析岩土层的相关参数，判定有效加固深度，综合作出评价。

附录 A 原始记录图表格式

A. 0. 1 标准贯入试验记录表应符合表 A. 0. 1的规定。

A. 0. 1 标准贯入试验记录表

合同编号_____

第___页 共___页

工程名称_____

地基类型_____

钻孔编号_____

钻孔标高_____

试验日期_____

地下水位_____

仪器设备编号_____

标定时间_____

序号	试验深度 (m)	贯入度 Δ (cm)			对应于 Δ_i 的击数 N_i			实测击数 N	修正击数 N'	探杆长度 (m)	土层定名及描述	备注
		Δ_1	Δ_2	Δ_3	N_1	N_2	N_3	(击/30cm)				
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												

项目负责:

校对:

检测:

A. 0. 2 动力触探试验记录表应符合表 A. 0. 2的规定。

A. 0. 2 动力触探记录表

合同编号 _____
 工程名称 _____
 钻孔编号 _____
 试验日期 _____
 仪器设备编号 _____

第 ___ 页 共 ___ 页
 地基类型 _____
 钻孔标高 _____
 地下水位 _____
 标定时间 _____

探杆总长 (m)	试验深度 (m)	贯入度 (cm)	锤击数 n (击)	$N_{10} = n \times 30 / \Delta s$ (击/10cm)	土层定名 及描述	备注	
探杆 总长 (m)	试验 深度 (m)	贯入 度 (cm)	锤击 数 n (击)	$N'_{63.5} = n \times 10 / \Delta s$ (击/10cm)	修正后击数 $N_{63.5} = \alpha \cdot N'_{63.5}$ (击/10cm)	土层定 名及 描述	备注
探杆 总长 (m)	试验 深度 (m)	贯入 度 (cm)	锤击 数 n (击)	$N'_{120} = n \times 10 / \Delta s$ (击/10cm)	修正后击数 $N_{120} = \alpha \cdot N'_{120}$ (击/10cm)	土层定 名及 描述	备注

项目负责:

校对:

检测:

A. 0. 3 静力触探试验记录表及成果图应符合表 A. 0. 3-1~表 A. 0. 3-4的规定。

表 A. 0. 3-1 探头标定记录表

探头号	标定内容	工作面积 A (cm ²)	电缆规格	电缆长 (m)	应变计灵敏度数	仪器号	仪器型号	率定系数	桥压 (V)	仪表示值	标定系数 ξ	质量评定		
N	各级荷载 P_i (kN)	仪表读数					读数平均			运算	最佳值 x_i	偏差值		
		加荷		卸荷			加荷 x_i^+	卸荷 x_i^-	加卸荷 \bar{x}_i	$(\bar{x}_i)^2$		$\bar{x}_i P_i$	重复性 Δx_i^+ Δx_i^-	非线性 $ x_i^+ - \bar{x}_i $
0														
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
$\xi = \Sigma(\bar{x}_i P_i) / A \Sigma(\bar{x}_i)^2 =$		$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \Sigma(x_{i\max}^{\pm} - \bar{x}_i)^2}$					Σ							
$\delta_r = (\Delta x_i^{\pm})_{\max} / FS =$														
$\delta_l = x_i^+ - x_i^- _{\max} / FS =$		起始感量 $Y_0 = \xi \Delta r$					评定意见： 其他说明：							
$\delta_s = x_i^+ - x_i^- _{\max} / FS =$														
$\delta_0 = x_0 / FS =$														

率定：

计算：

复核者：

率定日期：

表 A. 0. 3-2 静力触探记录表

合同编号 _____ 第 _____ 页 共 _____ 页
 工程名称 _____ 地基类型 _____
 钻孔编号 _____ 钻孔标高 _____
 试验日期 _____ 地下水位 _____
 仪器类型及编号 _____ 率定系数 _____
 探头类型及编号 _____ 标定时间 _____

深度 (m)	读数	校正后读数	阻力 (kPa)	初读数及备注	深度 (m)	读数	校正后读数	阻力 (kPa)	初读数及备注

项目负责：

校对：

检测：

表 A. 0. 3-3 单桥静力触探测试成果图

编号 _____

编制 _____

位置 _____

复核 _____

高程 _____

日期 _____

层序	层底深度 d (m)	层面高程 (m)	土名	$\frac{p_s}{E_0}$ (MPa)	$\frac{\sigma_0}{c_u}$ (kPa)	备注

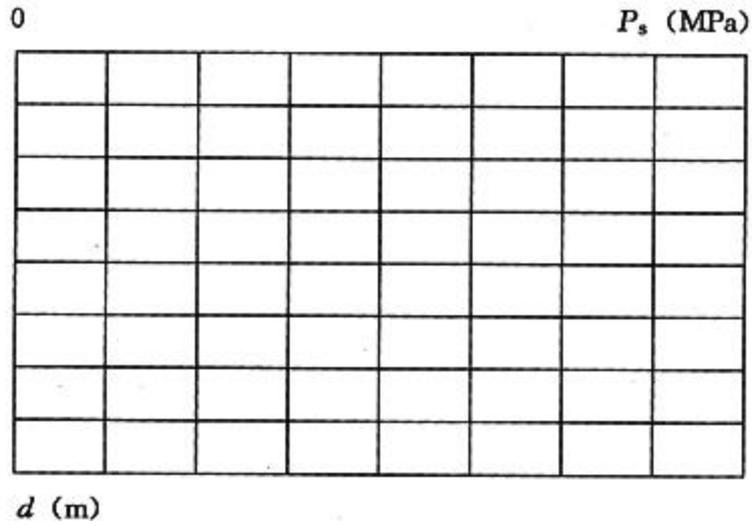


表 A. 0. 3-4 双桥静力触探测试成果图

编号 _____
 位置 _____
 高程 _____

编制 _____
 复核 _____
 日期 _____

层序	层底深度 d (m)	层面高程 (m)	土名	端阻 q_c (kPa)	侧阻 f_s (kPa)	摩阻比 R_f	总锥尖 阻力 q_T (MPa)	备注

0 f_s (kPa), q_c (kPa), q_T (MPa)

d (m)

0 R_f (%)

A. 0. 4 十字板剪切试验记录表及成果图应符合表 A. 0. 4-1、表 A. 0. 4-2 的规定。

表 A. 0. 4-1 十字板剪切试验记录表

工程名称		仪器型号		原状土强度 s_u		(kPa)									
试验地点		传感器(钢环)号		重塑土强度 s'_u		(kPa)									
试验深度(d)		(m)		率定系数 ξ		灵敏度 $s_t = s_u/s'_u$									
孔口高程		(m)		板头规格、类型		$H/D=$, $D=$ (mm)									
试验日期		地下水位		(m)		土名、状态									
原状土剪切				重塑土剪切											
序数 j	转角修正量 $\Delta\theta$	修正后转角 θ	仪表读数 ϵ	修正后读数 ϵ'	剪应力 τ (kPa)	序数 j	仪表读数 ϵ	修正后读数 ϵ'	剪应力 τ (kPa)	序数 j	转角修正量 $\Delta\theta$	修正后转角 θ	仪表读数 ϵ'	修正后读数 ϵ'	剪应力 τ (kPa)
仪表初读数			$\epsilon_0 =$; $\epsilon'_0 =$			算式			剪应力 $\tau_j = K\xi(\epsilon_j - \epsilon_0) =$ $\tau'_j = K\xi(\epsilon'_j - \epsilon'_0) =$ 强度 $s_u = (\tau_j)_{\max} =$; $s'_u = (\tau'_j)_{\max} =$; $s_{ur} = (\tau_j)_{\min} =$ 转角修正量 $\Delta\theta_j = \frac{7.2 \times 10^{-5} l(M_1)j}{\pi^2(d_1^4 - d_2^4)}$; 修正后转角 $\theta_j = j^\circ - \Delta\theta_j$						
读数计量单位															
轴杆摩擦读数		原状	$\epsilon_0 =$		重塑										

项目负责人:

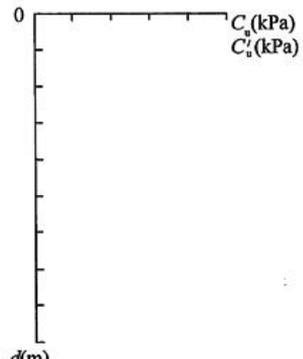
校对:

试验:

表 A. 0. 4-2 十字板剪切试验成果图

编号 _____
 位置 _____
 孔口高程 _____

制图 _____
 校核 _____
 日期 _____

试验点号 i	土名	深度 d (m)	高程 (m)	十字板强度		灵敏度 s_t	板头尺寸: 高 $H=$ (mm); 宽 $D=$ (mm) 板头常数: $K=$ 率定系数: $\xi=$ 地下水位: 
				原状土 C_u (kPa)	重塑土 C'_u (kPa)		

A. 0. 5 扁铲侧胀试验记录表及成果图应符合表 A. 0. 5-1、表 A. 0. 5-2的规定。

表 A. 0. 5-1 扁铲侧胀试验记录表

工程名称 _____ 试验者 _____
 测点编号 _____ 记录者 _____
 测点标高 _____ 测头号 _____
 压入方式 _____ 试验日期 _____

试验深度 (m)	测试压力 (bar)		
	A	B	C
备注	$\Delta A =$	$\Delta B =$	$Z_m =$

项目负责：

校对：

检测：

表 A. 0. 5-2 扁铲侧胀试验成果图

孔深		标高		水位埋深		测头号		率定值 Z_a		率定值 Z_b		零读数 Z_m		试验日期	
土层编号	土层名称	层底深度 (m)	层底标高 (m)	厚度 (m)	初始压力 P_0 (kPa)	膨胀压力 (kPa)	ΔP (kPa)	土类指数 I_D	孔压指数 U_D	侧胀模量 E_D (MPa)	水平应力指数 K_D	深度 (m)	P_0 、 P_1 、 $\Delta P \sim H$ 曲线	I_D 、 $U_D \sim H$ 曲线	E_D 、 $K_D \sim H$ 曲线

附录 B 地基土试验数据统计计算方法

B. 0. 1 本附录方法适用于天然土地基和处理后地基的标准贯入、动力触探、静力触探等原位试验数据的标准值计算。

B. 0. 2 标准贯入、动力触探、静力触探等原位试验数据的标准值，应根据各检测点的试验结果，按单位工程进行统计计算。当试验结果需要进行深度修正时，应先进行深度修正。

B. 0. 3 原位试验数据的平均值、标准差和变异系数应按下列公式计算：

$$\phi_m = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i}{n} \quad (\text{B. 0. 3-1})$$

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n \phi_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \phi_i)^2}{n} \right]} \quad (\text{B. 0. 3-2})$$

$$\delta = \frac{\sigma_f}{\phi_m} \quad (\text{B. 0. 3-3})$$

式中： ϕ_i ——原位试验数据的试验值或试验修正值；当同一检测孔的同一分类土层中有多个检测点时，取其平均值；当难以按深度划分土层时，可根据原位试验结果沿深度的分布趋势自上而下划分(3~5)个深度范围进行统计；

ϕ_m ——原位试验数据的平均值；

σ_f ——原位试验数据的标准差；

δ ——原位试验数据的变异系数；

n ——参与统计的个数。

B. 0. 4 单位工程同一土层或同一深度范围的原位试验数据的标准值应按下列方法确定：

$$\phi_k = \gamma_s \phi_m \quad (\text{B. 0. 4-1})$$

$$\gamma_s = 1 - \left\{ \frac{1.704}{\sqrt{n}} + \frac{4.678}{n^2} \right\} \delta \quad (\text{B. 0. 4-2})$$

式中： ϕ_k ——原位试验数据的标准值；

γ_s ——统计修正系数。

附录 C 圆锥动力触探锤击数修正

C. 0. 1 当采用重型圆锥动力触探推定地基土承载力或评价地基土密实时，锤击数应按下式修正：

$$N_{63.5} = \alpha_1 N'_{63.5} \quad (\text{C. 0. 1})$$

式中： $N_{63.5}$ ——经修正后的重型圆锥动力触探锤击数；

$N'_{63.5}$ ——实测重型圆锥动力触探锤击数；

α_1 ——修正系数，按表 C. 0. 1 取值。

表 C. 0. 1 重型触探试验的杆长修正系数 α_1

α_1 杆长 (m)	$N'_{63.5}$								
	5	10	15	20	25	30	35	40	≥ 50
≤ 2	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
4	0.96	0.95	0.93	0.92	0.90	0.89	0.87	0.86	0.84
6	0.93	0.90	0.88	0.85	0.83	0.81	0.79	0.78	0.75
8	0.90	0.86	0.83	0.80	0.77	0.75	0.73	0.71	0.67
10	0.88	0.83	0.79	0.75	0.72	0.69	0.67	0.64	0.61
12	0.85	0.79	0.75	0.70	0.67	0.64	0.61	0.59	0.55
14	0.82	0.76	0.71	0.66	0.62	0.58	0.56	0.53	0.50
16	0.79	0.73	0.67	0.62	0.57	0.54	0.51	0.48	0.45
18	0.77	0.70	0.63	0.57	0.53	0.49	0.46	0.43	0.40
20	0.75	0.67	0.59	0.53	0.48	0.44	0.41	0.39	0.36

C. 0. 2 采用超重型圆锥动力触探评价碎石土(桩)密实时，锤击数应按下式修正：

$$N_{120} = \alpha_2 N'_{120} \quad (\text{C. 0. 2})$$

式中： N_{120} ——经修正后的超重型圆锥动力触探锤击数；

N'_{120} ——实测超重型圆锥动力触探锤击数；

α_2 ——修正系数，按表 C. 0. 2 取值。

表 C. 0. 2 超重型触探试验的杆长修正系数 α_2

α_2 杆长(m)	N'_{120} 1	3	5	7	9	10	15	20	25	30	35	40
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	0.96	0.92	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.89	0.89	0.88	0.88	0.88
3	0.94	0.88	0.86	0.85	0.84	0.84	0.84	0.83	0.82	0.82	0.81	0.81
5	0.92	0.82	0.79	0.78	0.77	0.76	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.72
7	0.90	0.78	0.75	0.74	0.73	0.71	0.71	0.70	0.68	0.68	0.67	0.66
9	0.88	0.75	0.72	0.70	0.69	0.67	0.67	0.66	0.64	0.63	0.62	0.62
11	0.87	0.73	0.69	0.67	0.66	0.64	0.64	0.62	0.61	0.60	0.59	0.58
13	0.86	0.71	0.67	0.65	0.64	0.61	0.61	0.60	0.58	0.57	0.56	0.55
15	0.86	0.69	0.65	0.63	0.62	0.59	0.59	0.58	0.56	0.55	0.54	0.53
17	0.85	0.68	0.63	0.61	0.60	0.57	0.57	0.56	0.54	0.53	0.52	0.50
19	0.84	0.66	0.62	0.60	0.58	0.56	0.56	0.54	0.52	0.51	0.50	0.48

附录 D 静力触探头率定

D. 0. 1 探头率定可在特制的率定装置上进行, 探头率(标)定设备应符合下列规定:

- 1 探头率定用的测力(压)计或力传感器, 其公称量程不宜大于探头额定荷载的两倍, 精度不应低于Ⅲ级;
- 2 探头率定达满量程时, 率定架各部杆件应稳定;
- 3 率定装置对力的传递误差应小于0. 5%。

D. 0. 2 率定前的准备工作应符合下列规定:

- 1 连接触探头和记录仪并统调平衡, 当确认正常后, 方可正式进行率定工作;
- 2 当采用电阻应变仪时, 应将仪器的灵敏系数调至与触探头中传感器所贴的电阻应变片的灵敏系数相同;
- 3 触探头应垂直稳固旋转在率定架上, 率定架的压力作用线应与被率定的探头同轴, 并应不使电缆线受压;
- 4 对于新的触探头应反复预压到额定载荷, 反复次数宜为3次~5次, 以减少传感元件由于加工引起的残余应力。

D. 0. 3 触探头的率定可分为固定桥压法和固定系数法两种, 其率定方法和资料整理应符合下列规定:

- 1 当采用固定桥压法时, 可按下列要求执行:
 - 1) 选定量测仪器的供桥电压, 电阻应变仪的桥压应是固定的;
 - 2) 逐级加荷, 一般每级为最大贯入力的1 / 10;
 - 3) 每级加荷均应标明输出电压值或测记相应的应变值;
 - 4) 每次率定, 加卸荷不得少于3遍, 同时对顶柱式传感器还应转动顶柱至不同角度, 观察载荷作用下读数的变化, 其测定误差应小于1%FS;
 - 5) 计算每一级荷载下输出电压(或应变值)的平均值, 绘制以荷载为纵坐标, 输出电压值(或应变值)为横坐标的率定曲线, 其线性误差应符合本规范第9. 2. 6条的规定;
 - 6) 按式(D. 0. 3-1)计算触探头的率定系数:

$$K = \frac{P}{A\epsilon} \text{ 或 } K = \frac{P}{AU_p} \quad (\text{D. 0. 3-1})$$

式中: K——触探头的率定系数(MPa / $\mu\epsilon$ 或 MPa / mV);

P——率定时所加的总压力(N);

A——触探头截面积或摩擦筒面积(mm²);

ϵ ——P 所对应的应变值($\mu\epsilon$);

U_p ——P 所对应的输出电压(mV)。

2 当采用固定系数法时, 可按下列要求执行:

- 1) 指定一个标定系数K, 当输出电压每 mV 或画线长每 cm 表示贯入阻力1MPa、2MPa、4MPa, 按式(D. 0. 3-2)计算出输出电压为满量程时, 所需加的总荷载:

$$P = KA l \quad (\text{D. 0. 3-2})$$

式中：P——总荷载(N)；

A——探头截面积或摩擦筒面积(mm²)；

l——满量程的输出电压值(mV)或记录纸带的宽度(cm)。

2) 输入一个假设的供桥电压 U，并施加荷载为 P / 2，记录笔指针未达满量程的一半处，则调整供桥电压，使其指针指于满量程的一半处。然后卸荷，指针应回到零位。如不归零则调指针归零。如此反复加卸荷，使记录笔指针从零位往返至满量程的一半处。

3) 在调整后的供桥电压下，按 P / 10 逐级加荷至满量程，分级卸荷使记录笔返回零点。

4) 按上述步骤，其测试误差应符合本规范第9.2.6条的规定，调整后的供桥电压即为率定的供桥电压值。

本规范用词说明

- 1 为便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”；
 - 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”；
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”；
 - 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执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 1 《建筑抗震设计规范》GB 50011
- 2 《土工试验方法标准》GB / T 50123
- 3 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79
- 4 《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106
- 5 《基桩动测仪》JG / T 3055

中华人民共和国行业标准

建筑地基检测技术规范

JGJ 340-2015

条文说明

制订说明

《建筑地基检测技术规范》JGJ 340-2015,经住房和城乡建设部2015年3月30日以第786公告批准、发布。

本规范编制过程中,编制组对我国地基检测现状进行了广泛的调查研究,总结了我国地基检测的实践经验,同时参考了国外的先进检测技术、方法标准,通过调研、征求意见,对规范内容进行反复讨论、分析、论证,开展专题研究和工程实例验证等工作,为本次规范编制提供了依据。

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规范时能正确理解和执行条文规定,《建筑地基检测技术规范》编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明。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,还着重对强制性条文的强制性理由做了解释。但是,本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力,仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

1 总 则

1.0.1 建筑地基工程是建筑工程的重要组成部分,地基工程质量直接关系到整个建(构)筑物的结构安全和人民生命财产安全。大量事实表明,建筑工程质量问题和重大质量事故较多与地基工程质量有关,如何保证地基工程施工质量,一直倍受建设、勘察、设计、施工、监理各方以及建设行政主管部门的关注。由于我国地缘辽阔,地质条件复杂,基础形式多样,施工及管理水平参差不齐,且地基工程具有高度的隐蔽性,从而使得地基工程的施工比上部建筑结构更为复杂,更容易存在质量隐患。因此,地基检测工作是整个地基工程中不可缺少的重要环节,只有提高地基检测工作的质量和检测结果评价的可靠性,才能真正做到确保地基工程质量与安全。本规范对建筑地基检测方法、检测数量和检测评价作了统一规定,目的是提高建筑地基检测水平,保证工程质量。

1.0.2 建筑地基包含天然地基和人工地基。天然地基可分为天然土地基和天然岩石地基。人工地基包含采用换填垫层、预压、压实、夯实、注浆加固等方法处理后的地基及复合地基等。复合地基包括采用振冲挤密碎石桩、沉管挤密砂石桩、水泥土搅拌桩、旋喷桩、灰土挤密桩、土挤密桩、夯实水泥土桩、水泥粉煤灰碎石桩、柱锤冲扩桩、微型桩、多桩型等方法处理后的地基。本规范适用于天然地基的承载力特征值试验、变形参数(变形模量和压缩模量)等指标的测定,并对岩土性状进行分析评价;适用于人工地基的承载力特征值试验、变形参数(变形模量和压缩模量)指标测定、地基施工质量和复合地基增强体桩身质量的评价。本规范未包含特殊土地基的内容。

1.0.3 地基工程质量与地质条件、设计要求、施工因素密切相关，目前各种检测方法在可靠性或经济性方面存在不同程度的局限性，多种方法配合时又具有一定的灵活性，而且由于上部结构的不同和地质条件的差异，不同地区的情况也有差别，对地基的设计要求不尽相同。因此，应根据检测目的、检测方法的适用范围和特点，结合场地条件，考虑上述各种因素合理选择检测方法，实现各种方法合理搭配、优势互补，使各种检测方法尽量能互为补充或验证，在达到安全适用的同时，又要体现经济合理。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.3~2.1.6 根据地基的分类，把地基载荷试验分成三大类。在本规范中，将地基土平板载荷试验和岩基载荷试验合并成为土(岩)地基载荷试验，适用于天然土(岩)地基和采用换填垫层、预压、压实、夯实、注浆加固等方法处理后的人工地基的承载力试验；单桩及多桩复合地基载荷试验适用于采用振冲挤密碎石桩、沉管挤密砂石桩、水泥土搅拌桩、旋喷桩、灰土挤密桩、土挤密桩、夯实水泥土桩、水泥粉煤灰碎石桩、柱锤冲扩桩、微型桩、多桩型等方法处理后的复合地基的承载力试验；竖向增强体载荷试验适用于复合地基中有粘结强度的竖向增强体的承载力试验，竖向增强体习惯上也称为桩，此处的竖向增强体载荷试验相当于现行有关规范中的复合地基的单桩载荷试验。

2.1.7~2.1.11 相应的术语在《建筑地基基础术语标准》GB/T 50941-2014也做了解释。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 建筑地基工程一般按勘察、设计、施工、验收四个阶段进行，地基试验和检测工作多数情况下分别放在设计和验收两阶段，即施工前和施工后。但对工程量较大、施工周期较长的大型地基工程，验收检测应尽早施工过程中穿插进行，而且这种做法应大力提倡。强调施工过程中的检测，以便加强施工过程的质量控制，做到信息化施工，及时发现并解决问题，做到防患于未然，提高效益。必须指出：本规范所规定的验收检测仅仅是地基分部工程验收资料的一部分，除应按本规范进行验收检测外，还应该进行其他有关项目的检测和检查；依据本规范所完成的检测结果不能代替其他应进行的试验项目。为设计提供依据的检测属于基本试验，应在设计前进行。天然地基的承载力和变形参数，当设计有要求需要在施工后进行验证时，也需要进行检测，一般选择载荷试验进行检测。建筑地基检测方法有土(岩)地基载荷试验、复合地基载荷试验、竖向增强体载荷试验、标准贯入试验、圆锥动力触探试验、静力触探试验、十字板剪切试验、水泥土钻芯法试验、低应变法试验、扁铲侧胀试验、多道瞬态面波试验等。本规范的各种检测方法均有其适用范围和局限性，在选择检测方法时不仅应考虑其适用范围，而且还应考虑其实际实施的可能性，必要时应根据现场试验结果判断所选择的检测方法是否满足检测目的，当不满足时，应重新选择检测方法。例如：动力触探试验，应根据检测对象合理选择轻型、重型或超重型；可能难以对靠近边轴线的复合地基增强体进行载荷试验；当受检桩长径比很大、无法钻至桩底时，钻芯法只能评价已钻取部分的桩身质量；桩身强度过低(小于8MPa)，低应变法无法准确判定桩身完整性。

建筑地基检测工作，应按图1程序进行。

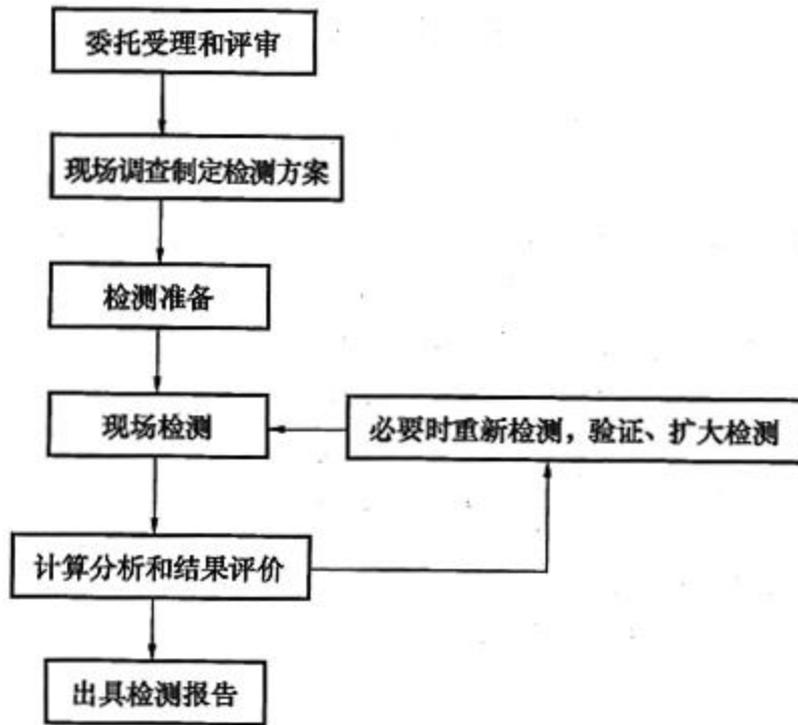


图1 检测工作程序框图

图1是检测机构应遵循的检测工作基本程序。实际执行检测程序中，由于不可预知的原因，如委托要求的变化、现场调查情况与委托方介绍的不符，实施时发现原确定的检测方法难以满足检测目的的要求，或在现场检测尚未全部完成就已发现质量问题而需要进一步排查，都可能使原检测方案中的检测数量、受检桩桩位、检测方法发生变化。

3. 1. 2 建筑地基分部工程抽样验收检测是《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300-2013以强制性条文的形式规定的。建筑地基应进行地基强度和承载力检验是现行《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202和《建筑地基处理技术规范》JGJ 79以强制性条文的形式规定的，并且也是 GB 50202 质量验收中的主控项目。

3. 1. 3 根据本规范第1. 0. 3条的原则及地基检测工作的特殊性，本条对调查阶段工作提出了具体要求。为了正确地对地基工程质量进行检测和评价，提高地基工程检测工作的质量，做到有的放矢，应尽可能详细了解和搜集有关的技术资料。另外，有时委托方的介绍和提出的要求是笼统的、非技术性的，也需要通过调查来进一步明确检测的具体要求和现场实施的可行性。

3. 1. 4 本条提出的检测方案内容为一般情况下包含的内容，制定检测方案要考虑的因素较多，一是要考虑检测对象特殊性，如1m 的压板尺寸与3m 的压板尺寸，对场地条件和试验设备的要求是不一样的或对检测方法的选择有影响。二是要考虑受检工程所在地区的试验设备能力。三是要考虑场地局限性。同时还应考虑检测过程中可能出现的争议，因此，检测方案可能需要与委托方或设计方共同协商制定，尤其是应确定受检桩桩位、检测点的代表性，有时候委托单位要求检测单位对有疑问的检测对象(如下暴雨时施工的桩、局部暗沟区域的地基处理效果)进行检测，掌握其质量状况。这类检测对象属于特别的检测对象，不具备正常抽样的样品代表性的特性。

3. 1. 5 根据《建筑工程施工质量验收统一标准》GB 50300-2013规定，具有独立使用功能的单位工

程是建筑工程施工质量竣工验收的基础，因此，一般情况下，检测数量应按单位工程进行计算确定。施工过程的质量检验应根据该工程的施工组织设计的要求进行。设计单位根据上部结构和岩土工程勘察资料，可能在同一单位工程中同时采用天然地基和人工处理地基、天然地基和复合地基等不同地基类型，或采用不同的地基处理方法，对于这种情况，应将不同设计参数或不同施工方法的检测对象划为不同的检验批，按检验批抽取一定数量的样本进行检测。

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

3.1.7 操作环境要求应与测量仪器设备对环境温湿度、电压波动、电磁干扰、振动冲击等现场环境条件的要求相一致，例如使用交流电的仪器设备应注意接地问题。

4 土(岩)地基载荷试验

4.1 一般规定

4.1.1 土(岩)地基载荷试验是一种在现场模拟地基基础工作条件的原位试验方法，在拟检测的(土)岩地基上置放一定尺寸的刚性承压板，对承压板逐级加荷，测定承压板的沉降(由于承压板为刚性，因此，承压板的沉降等于拟检测地基的沉降)随荷载的变化，以确定土(岩)地基承载力和变形参数。本规范的土(岩)地基载荷试验适用于天然土地基、天然岩石地基及没有竖向增强体的人工处理地基包括换填地基、预压地基、压实地基、挤密地基、强夯地基、注浆地基等。

承压板下应力主要影响范围：对于天然土地基及采用换填、预压、压实、挤密、强夯、注浆等方法处理后的人工地基，根据美国材料试验协会标准(ASTM)D1194的说明，承压板下应力主要影响范围指大约2.0倍承压板直径(或边宽)的深度范围。《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011地基变形计算深度取值略小于2.5倍的基础宽度，并指出地基主要受力层系指条形基础底面下深度为3倍基础底面宽度，独立基础下为1.5倍基础底面宽度，且厚度均不小于5m的范围。工程地质手册认为承压板下应力主要影响范围为1.5倍~2.0倍承压板直径(或边宽)的深度范围。对均质地基而言，《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018-2003规定平板载荷试验的作用深度和影响半径约为 $2b$ 和 $1.5b$ 。因此，可以认为承压板下应力主要影响范围为2.0倍~2.5倍承压板直径(或边宽)以内的深度范围。本章的变形参数主要是指地基的变形模量，未涉及地基基床系数。应力主要影响范围的地基土应该为均质地基，而不能是分层地基。

4.1.2 本规范将载荷试验分为三章，即土(岩)地基载荷试验，复合地基载荷试验和竖向增强体载荷试验，本规范第3.2.2条对它们各自的适用范围进行了规定。土(岩)地基载荷试验分为浅层平板载荷试验、深层平板载荷试验和岩基载荷试验，未包含螺旋板载荷试验。浅层平板载荷试验和深层平板载荷试验又统称为地基土平板载荷试验或平板载荷试验。

深层平板载荷试验与浅层平板载荷试验的区别在于荷载是作用于半无限体的表面还是作用于半无限体的内部，浅层平板载荷试验的荷载作用于半无限体的表面，深层平板载荷试验的荷载作用于半无限体的内部。本规范规定深层平板载荷试验的试验深度不应小于5m，也有资料规定深层平板载荷试验的试验深度不应小于3m。深层平板载荷试验的深度过浅，则不符合变形模量计算假定荷载作用于半无限体内部的条件。

例如：如果基坑设计深度为15m，开挖完成后进行载荷试验，试坑宽度符合浅层载荷试验条件，则属于浅层平板载荷试验；如果载荷试验深度为5.5m，试井直径与承压板直径相同，则属于深层平板载荷试验；如果载荷试验深度为4.5m，试井直径与承压板直径相同，既不符合浅层平板载荷试验的条件也不符合深层平板载荷试验的条件，则既不属于浅层平板载荷试验也不属于深层平板载荷试验。

对于完整、较完整、较破碎的岩石地基应选择岩基载荷试验，对于破碎、极破碎的岩石地基以及土类地基应选择浅层平板载荷试验或深层平板载荷试验。

4.1.3 根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011规定，要求最大加载量不应小于设计要求的地基承载力特征值的2.0倍、岩基承载力特征值的3倍。如果最大加载量取为设计要求的地基承载力特征值的2.0倍、岩基承载力特征值的3倍，当其中一个试验点的承载力特征值偏小，按照本规范第4.4.4条和第4.4.5条的规定，则单位工程的地基承载力特征值不满足设计要求。为了避免这种情况，本规范规定最大加载量不小于设计要求的地基承载力特征值的2.0倍、岩基承载力特征值的3倍。在设计阶段，为设计提供依据的载荷试验应加载至极限状态，从而获得完整的p-s曲线，以便确定承载力特征值。

4.1.4 土(岩)地基载荷试验能准确提供土(岩)地基的承载力及变形参数。对于天然地基，检测数量应按照地基基础占地面积来计算；对于采用土(岩)地基载荷试验确定承载力的人工地基，检测数量应按照地基处理面积来计算，而不应按照地基基础占地面积来计算，一般来说，单位工程的地基处理面积不小于建(构)筑物的占地面积。对于建筑物以外区域检测密度可适当减少。

4.1.5 对于地基土载荷试验的加载方式，加荷方法为我国惯用的维持荷载法。根据各级荷载维持时间长短及各级荷载作用下地基沉降的相对稳定标准，分为慢速维持荷载法及快速维持荷载法。为了与《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011和《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106-2014的规定取得一致，本规范规定应采用慢速维持荷载法。

4.2 仪器设备及其安装

4.2.1 浅层平板载荷试验的承压板尺寸大小与需要评价的处理土层的深度有关，深度越深、承压板尺寸则越大，根据本规范第4.1.1条条文说明，承压板下应力主要影响范围为2.0倍~2.5倍承压板直径(或边宽)，承压板直径或边宽宜为拟评价处理土层的深度的1/2或2/5。

本规范规定当采用其他原位测试方法评价地基承载力和变形参数时，应结合载荷试验比对结果和地区经验进行评价。载荷试验的承压板尺寸要考虑其应力主要影响范围能覆盖主要加固处理土层厚度。

对于人工地基的载荷试验，由于试验的压板面积有限，考虑到大面积荷载的长期作用结果与小面积短时荷载作用的试验结果有一定的差异，故需要对载荷板尺寸有限制。

强夯处理和预压处理的有效深度为7m~10m时，应考虑压板的尺寸效应，根据处理深度的大小，采用较大的承压板，目前3m尺寸的承压板应用得不少，最大承压板尺寸超过了5m。《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-2012规定对于强夯地基不应小于2.0m²，故作此规定。

关于深层平板载荷试验的尺寸确定，《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)规定深层平板载荷试验的试井截面应为圆形，承压板直径宜取0.8m~1.2m，《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011规定承压板直径采用0.8m。因此本规范规定深层平板载荷试验承压板直径不应小于0.8m。

对于较破碎岩石，岩基载荷试验采用0.3m直径承压板，可能影响试验结果的准确性，因此，本规范规定岩基载荷试验的直径不应小于0.3m。

土(岩)地基载荷试验承压板形状宜采用圆形板和正方形板，不应采用矩形板。

4.2.2 承压板应有足够刚度，保证加载过程不出现翘曲变形，是为确保地基尽可能产生均匀沉降，以模拟地基在刚性基础作用下的实际受力变形状况。承压板底面下铺砂，主要是找平作用，找平砂层应尽可能薄。

4.2.3 当设计有要求时，承压板应设置于设计要求的受检土层，是本规范的新要求。在实际工程中，由于承压板尺寸大小的限制，难以准确评价深部土层(该部分土层仍然是设计需要验算的主要受力土层之一)的承载能力性状，在这种情况下，有必要将承压板设置在一定深度的受检土层上进行试验，获得更完整的试验资料，对地基承载能力进行评价。

4.2.4 借鉴美国材料试验协会标准(ASTM)D1194或广东省地方标准《建筑地基基础检测规范》DBJ 15-60-2008的规定，为了防止试验过程中场地地基土含水量的变化或地基土的扰动，影响试验效果，要求保持试坑或试井底岩土的原状结构和天然湿度。必要时，应在承压板周边2m范围内覆盖防水布。传统的平板载荷试验适用于地下水位以上的土，对于地下水位以下的土，安装试验设备时可采取降水措施，但试验时应保证试土维持原来的饱和状态，这时试验在浸水或局部浸水状态下进行。

4.2.5 当采用两台及两台以上千斤顶加载时，为防止偏心受荷，要求千斤顶活塞直径应一样且应并联同步工作；在设备安装时，千斤顶的合力中心、承压板中心、反力装置重心、拟试验区域的中心应在同一铅垂线上。

4.2.6 加载反力装置应优先选用压重平台反力装置。与桩的静载试验相比，平板载荷试验的试验荷载要小得多，因此，要求压重在试验前一次加足。但对于单墩复合地基载荷试验等，当承压板面积非常大，不配置(难以配置满足规范要求的)反力支墩时，可参考结构载荷试验，一边堆载，一边试验。

4.2.7 用荷重传感器(直接方式)和油压表(间接方式)两种荷载测量方式的区别在于：前者采用荷重传感器测力，千斤顶仅作为加载设备使用而不是作为测量仪器使用，不需考虑千斤顶活塞摩擦对出力的影响；后者采用并联于千斤顶油路的压力表测量力时，应根据千斤顶的校准结果换算力。同型号千斤顶在保养正常状态下，相同油压时的出力相对误差约为1%~2%，非正常时可高达5%。采用传感器测量荷重或油压，容易实现加卸荷与稳压自动化控制，且测量精度较高。采用压力表测定油压时，为保证测量精度，其精度等级应优于或等于0.4级，不得使用1.5级压力表控制加载。

4.2.8 承压板沉降测量仪表可采用位移传感器或百分表等测试仪表，其性能应满足本规范第4.2.9条的规定。美国材料试验协会标准(ASTM)D1195和D1196中采用的位移测量仪表测点均距承压板边缘的距离为25.4mm。为了统一位移测试仪表的安装位置，本规范规定位移测试仪表应安装在承压板上，安装点应在承压板边中而不宜安装在角上且各位移测试仪表在承压板上的安装点距承压板边缘的距离宜为25mm~50mm。对于直径为0.8m的深层平板载荷试验，可对称安置2个位移测量仪表。

4.2.9 为保证液压系统的安全，在最大试验荷载时，要求试验用千斤顶、油泵、油管的压力不应超过规定工作压力的80%。压力表的最佳使用范围为压力表量程的 $1/4 \sim 2/3$ ，因此，应根据最大试验荷载合理选择量程适当的压力表。调查表明，部分检测机构由于千斤顶或其他仪器设备所限，存在“大秤称轻物”的现象，本规范规定荷重传感器、千斤顶、压力表或压力传感器的量程不应大于最大加载量的3.0倍，且不应小于最大加载量的1.2倍。

对于机械式大量程(50mm)百分表，《大量程百分表检定规程》JJG 379规定1级标准为：全程示值误差和回程误差分别不超过 $40 \mu\text{m}$ 和 $8 \mu\text{m}$ ，相当于满量程(注：FS：full scale，满量程或全量程)测

量误差不大于0.1%。

4.2.10 试验试坑宽度或直径不应小于承压板宽度或直径的3倍参考了《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-2012的相关规定。对于深层平板载荷试验，试井截面应为圆形，紧靠承压板周围土层高度不应小于承压板直径，以尽量保持半无限体内部的受力状态，避免试验时土的挤出。

4.2.11 承压板、压重平台支墩和基准桩之间的距离综合考虑了广东省建筑科学研究院等单位研究成果和《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011、《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-2012、“Standard test method for bearing capacity of soil for static load and spread footings” ASTM D1194的有关规定。

广东省建筑科学研究院等单位的研究成果表明：支墩底面地基荷载小于其地基土极限承载力时，支墩周围地表地基土变形量：距离支墩边大于1B且大于2m处地基变形在2mm以内，距离支墩边大于1.5B且大于3m处地基变形在1mm以内，距离支墩边大于2B且大于4m处地基变形量在0.5mm左右。当支墩底面地基荷载大于地基土极限承载力时，支墩周围地表地基土变形量较大，且可能为沉降也可能为隆起。

1 基准桩与压重平台支墩、承压板之间距离的确定。JGJ 79-2012附录A规定基准点应设在试坑外(试坑宽度不小于承压板尺寸的3倍)，也就是要求承压板与基准桩之间的净距大于1倍承压板尺寸。ASTM D1194规定：基准点离承压板(受荷面积)中心的距离为2.4m。如果要求基准点选取在地表地基土变形小于1mm的范围内，则基准桩与压重平台支墩、承压板之间的净距一般应大于1.5B且大于3m。从广东省工程实践来看，边宽大于3m的大面积承压板越来越多，综合考虑工程精度要求和实际检测设备情况，将基准桩与压重平台支墩之间的净距离调整为大于1.5B且大于2m，将基准桩与承压板之间的净距离调整为大于b且大于2m。

2 承压板与压重平台支墩之间距离的确定。GB 50007-2011附录C和JGJ 79-2012附录A只规定试坑宽度不小于承压板尺寸的3倍，如果支墩设在试坑外，也就是要求承压板与支墩之间的净距大于1倍承压板尺寸。ASTM D1194规定：承压板与压重平台支墩的净距离为2.4m。按支墩地基附加应力控制，承压板与压重平台支墩的净距离可取为0.5B；按支墩地基变形控制，承压板与压重平台支墩的净距离宜取为1B且大于2.0m；综合以上因素，并结合实际检测情况，将承压板与压重平台支墩之间的净距离规定为 $>b$ 且 $>B$ 且 $>2.0m$ 。

4.2.12 大型平板载荷试验基准梁的安装存在以下问题：型钢一般长12m，超过12m的基准梁需要组装或拼装，现场组装较困难且现场组装的基准梁稳定性较差；一般平板车的运输长度为12m，超过12m的基准梁运输较困难。因此，本规范认为12m长的基准梁即使不满足表4.2.11的规定也可以使用，但在这种情况下应对基准桩位移进行监测。

当需要对基准桩位移进行监测时，《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106-2014指出：简易的办法是在远离支墩处用水准仪或张紧的钢丝观测基准桩的竖向位移。与对受检桩的沉降观测要求相比，本规范对基准桩位移的监测要求也降低了，但要求位移测量仪表的分辨力宜达到0.1mm。

4.2.13 传力装置应采用有足够刚度的传力柱组成，并将传力柱与承压板连接成整体，传力柱的顶部可采用钢筋等斜拉杆固定定位，从而确保安全。

位移传递装置宜采用钢管或塑料管做位移测量杆，位移测量杆的底端应与承压板固定连接，每隔一定距离位移测量杆应与传力柱滑动相连，以保证位移测量的准确性。

4.2.14 当桩底岩基载荷试验采用传力装置进行测试时，其传力装置和位移传递装置的做法同本规

范第4.2.13条。桩底岩基载荷试验当采用桩孔基岩提供反力时，鉴于实际情况的复杂性，应确保作业安全，并尽可能减少试验条件对基准桩变形的影响。

4.3 现场检测

4.3.1 在所有试验设备安装完毕之后，应进行一次系统检查。其方法是施加一较小的荷载进行预压，其目的是消除整个量测系统由于安装等人为因素造成的间隙而引起的非真实沉降；排除千斤顶和管路中之空气；检查管路接头、阀门等是否漏油等。如一切正常，卸载至零，待位移测试仪表显示的读数稳定后，并记录位移测试仪表初始读数，即可开始进行正式加载。

4.3.2 《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011规定岩基载荷试验的分级荷载为预估设计荷载的 $1/10$ ，并规定将极限荷载除以3的安全系数，所得值与对应于比例界限的荷载相比较，取小值为岩石地基承载力特征值。因此，本规范规定岩基载荷试验的荷载分级宜为15级。

4.3.3 慢速维持荷载法的测读数据时间、沉降相对稳定标准与《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011的附录C、D的规定一致。

4.3.4 《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011和《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)规定岩基载荷试验的沉降稳定标准为连续三次读数之差均不大于 0.01mm ，鉴于 0.01mm 是百分表的读数精度，在现场试验时难以操作，本规范将岩基载荷试验的沉降稳定标准修改为：30min 读数之差小于 0.03mm ，并在四次读数中连续出现两次，卸载半小时一级，以有利于现场操作。

4.3.5 试验终止条件的制定参考了《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)、《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011和《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-2012、《建筑地基基础检测规范》DBJ 15-60-2008的规定。发生明显侧向挤出隆起或裂缝，表明受荷地层发生整体剪切破坏，这属于强度破坏极限状态；等速沉降或加速沉降，表明承压板下产生塑性破坏或刺入破坏，这是变形破坏极限状态；过大的沉降(浅层平板载荷试验承压板直径的 0.06 倍、深层平板载荷试验承压板直径的 0.04 倍)，属于超过限制变形的正常使用极限状态。当承压板尺寸过大时，增加沉降量明显不易操作且已无太多意义，因此设定沉降量上限为 150mm 。

在确定终止试验标准时，对岩基而言，常表现为承压板上的测表不停地变化，这种变化有增加的趋势，荷载加不上去或加上后很快降下来。

4.4 检测数据分析与判定

4.4.1 同一单位工程的试验曲线的沉降坐标宜按相同比例绘制压力-沉降($p-s$)、沉降-时间对数($s-\lg t$)曲线，加载量的坐标应为压力，也可在同一图上同时标明荷载量和压力值。

4.4.2 地基的极限承载力，是指滑动边界范围内的全部土体都处于塑性破坏状态，地基丧失稳定时的极限承载力。典型的 $p-s$ 曲线上可以分成三个阶段：即压密变形阶段、局部剪损阶段和整体剪切破坏阶段。三个阶段之间存在两个界限荷载，前一个称比例界限(临塑荷载)，后一个称极限荷载。比例界限标志着地基土从压密阶段进入局部剪损阶段，当试验荷载小于比例界限时，地基变形主要处于弹性状态，当试验荷载大于比例界限时，地基中弹性区和塑性区并存。极限荷载标志着地基土从局部剪损破坏阶段进入整体破坏阶段。按本条第2款取值，是偏于安全的取值。

4.4.3 关于表4.4.3中取值的说明如下：根据《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011关于按相对变形确定地基特征值的规定，取 s/b 或 $s/d=0.01\sim 0.015$ 所对应的荷载为深层平板载荷试验与浅层平板载荷试验的地基承载力特征值，本规范的取值参照《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018-2003表3.4.2中的规定，但对压板尺寸作限定，与广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ 15-60-2008表8.4.3的规定一致。

4.4.4 当极差超过平均值的30%时，如果分析能够明确试验结果异常的试验点不具有代表性，可将异常试验值剔除后，再进行统计计算确定单位工程承载力特征值。

4.4.5 载荷试验不仅要求给出每点的承载力特征值，而且要求给出单位工程的承载力特征值是否满足设计要求的结论。对工业与民用建筑(包括构筑物)来说，单位工程的载荷试验结果的离散性要比单桩承载力的离散性小，因此，有必要根据载荷试验结果给出单位工程的承载力特征值。还需说明两点：①承载力检测因时间短暂，其结果仅代表试桩那一时刻的承载力，更不能包含日后自然或人为因素(如桩周土湿陷、膨胀、冻胀、融沉、侧移，基础上浮、地面超载等)对承载力的影响。②承载力评价可能出现矛盾的情况，即承载力不满足设计要求而满足有关规范要求。因为规范一般给出满足安全储备和正常使用功能的最低要求，而设计时常在此基础上留有一定余量。考虑到责权划分，可以作为问题或建议提出，但仍需设计方复核和有关各责任主体方确认。

4.4.6 建筑地基基础施工质量验收一般对变形模量并无要求，考虑到设计的需要，本规范对浅层平板载荷试验确定变形模量进行了规定，计算方法主要参考了《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)和广东省地方标准《建筑地基基础检测规范》DBJ 15-60-2008。本规范进一步规定应优先根据试验确定土的泊松比 μ ，当无试验数据时，方可参考经验取值。

4.4.7 深层平板载荷试验确定变形模量的计算公式参照了《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)的规定，深层平板载荷试验荷载作用在半无限体内部，式(4.4.7)是在 Mindlin 解的基础上推算出来的，适用于地基内部垂直均布荷载作用下变形模量的计算。

4.4.8 w 是与试验深度和土类有关的系数。当土的泊松比 μ 根据试验确定时，可按式(4.4.8)计算，该公式来源于岳建勇和高大钊的推导(《工程勘察》2002年1期)；当土的泊松比按本规范第4.4.6条的经验取值时，即碎石的泊松比取0.27，砂土取0.30，粉土取0.35，粉质黏土取0.38，黏土取0.42，则可制成本规范表4.4.8。

5 复合地基载荷试验

5.1 一般规定

5.1.1 复合地基与其他地基的区别在于部分土体被增强或被置换形成增强体，由增强体和周围地基土共同承担荷载，本条给出适用于复合地基载荷试验检测的各种地基处理方法。

5.1.2 载荷试验的目的是确定承载力及变形参数，以便为设计提供依据或检验地基是否满足设计要求。载荷试验的应力主要影响范围是 $2.0b\sim 2.5b$ (b 为承压板边长)，为检测主要处理土层的增强效果，承压板的尺寸与设置标高应考虑到主要处理土层，或设置在主要处理土层顶面，或承台板的尺寸能满足检验主要处理土层影响深度的要求。

5.1.4 本条明确规定复合地基应进行载荷试验。载荷试验的形式可根据实际情况和设计要求采取下面三种形式之一：第一，单桩(墩)复合地基载荷试验；第二，多桩复合地基载荷试验；第三，部分试验点为单桩复合地基载荷试验，另一部分试验点为多桩复合地基载荷试验。选择多桩复合地基平板载荷试验时，应考虑试验设备和试验场地的可行性。无论选择哪种形式的载荷试验，总的试验点数量(而不是受检桩数量)应符合要求。

5.1.5 本条为强制性条文。慢速维持荷载法是我国公认且已沿用几十年的标准试验方法，是行业或地方标准的关于复合地基设计参数规定值获取的最直接方法，是复合地基承载力验收检测方法的可靠参照标准。

5.2 仪器设备及其安装

5.2.1 本规范将承压板应为有足够刚度板作为单独一条提出，原因如下：

1 如承压板刚度不够，当荷载加大时，承压板本身的变形影响到沉降量的测读；

2 为了检测主要处理土层，当该土层不在基础底面而需采用多桩复合地基载荷试验而加大承压板尺寸以加大压力影响深度时，刚度不足引起承载板本身变形问题更为明显。

5.2.3 影响复合地基载荷试验的主要因素有承压板尺寸和褥垫层厚度，褥垫层厚度主要调节桩土荷载分担比例，褥垫层厚度过小桩对基础产生明显的应力集中，桩间土承载能力不能充分发挥，主要荷载由桩承担失去了复合地基的作用；厚度过大当承压板较小时影响主要加固区的检测效果，造成检测数据失真。如采用设计的垫层厚度进行试验，试验承压板的宽度对独立基础和条形基础应采用基础设计的宽度，对大型基础试验有困难时应考虑承压板尺寸和垫层厚度对试验结果的影响。

5.2.6 本条特别强调场地地基土含水量的变化或地基土的扰动对试验的影响。复合地基在开挖至基底标高时进行荷载试验，当基底土保护不当、或因晾晒时间过长、或因现场基坑降水导致试验土含水量变化形成硬层时，试验数据失真。

5.3 现场检测

5.3.1 加载前预压在以往静载检测的相关规定中没有提及，检测单位对预压的做法也不规范，个别地方标准定义了预压力取值的范围，但依据不足。在静载荷试验中预压是为了检测加压系统的工作状态，因此建议取最大加荷的5%。如果按10%预压相当于一级的加压力，所得的p-s曲线需要修正。

5.3.3 慢速维持荷载法的测读数据时间、沉降相对稳定标准与《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-2012的附录B的规定一致。

5.3.4 本条第2款为了检验主要处理土层的情况，加大承压板尺寸进行多桩复合地基试验，只规定沉降量大于承压板宽度或直径6%，明显不易操作且已无太多意义，因此设定沉降量上限为150mm。

5.4 检测数据分析与判定

5.4.3 地基基础设计规范规定的地基设计原则，各类建筑物地基计算均应满足承载力计算要求，设计为甲、乙级的建筑物均应按地基变形设计，控制地基变形成为地基设计的主要原则。表5.4.3规定的承载力特征值对应的相对变形要严于天然地基。对于水泥搅拌桩和旋喷桩，按主要加固土层性质

提出的取值范围，高压缩性土取高值。

5.4.4 当极差超过平均值的30%时，如果分析明确试验结果异常的试验点不具有代表性，可将异常试验值剔除后，进行统计计算确定单位工程承载力特征值。

6 竖向增强体载荷试验

6.1 一般规定

6.1.1 水泥土搅拌桩、旋喷桩、灰土挤密桩、夯实水泥土桩、水泥粉煤灰碎石桩、树根桩、混凝土桩等复合地基按《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-2012的规定，除了需进行复合地基载荷试验，还需对有粘结强度的增强体进行竖向抗压静载试验。本规范主要是针对这条规定，对有粘结强度的增强体的竖向抗压静载试验进行了技术规定。

6.1.2 在对工程桩抽样验收检测时，规定了加载量不应小于单桩承载力特征值的2.0倍，以保证足够的安全储备。实际检测中，有时出现这样的情况：3根工程桩静载试验，分十级加载，其中一根桩第十级破坏，另两根桩满足设计要求。按本规范第6.4.4条规定，单位工程的单桩竖向抗压承载力特征值不满足设计要求。此时若有一根好桩的最大加载量取为单桩承载力特征值的2.2倍，且试验证实竖向抗压承载力不低于单桩承载力特征值的2.2倍，则单位工程的单桩竖向抗压承载力特征值满足设计要求。显然，若检测的3根桩有代表性，就可避免不必要的工程处理。本条明确规定为设计提供依据的静载试验应加载至破坏，即试验应进行到能判定单桩极限承载力为止。对于以桩身强度控制承载力的端承型桩，当设计另有规定时，应从其规定。

6.1.3 考虑到复合地基大面积荷载的长期作用结果与小面积短时荷载作用的试验结果有一定的差异，而且竖向增强体是主要施工对象，因此，需要再对竖向增强体的承载力和桩身质量进行检测。而且，《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-2012作为强制性条文规定，对有粘结强度的复合地基增强体尚应进行单桩静载荷试验和桩身完整性检验。

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

6.2 仪器设备及其安装

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

6.2.3 用荷重传感器(直接方式)和油压表(间接方式)两种荷载测量方式的区别在于：前者采用荷重传感器测力，不需考虑千斤顶活塞摩擦对出力的影响；后者需通过率定换算千斤顶出力。同型号千斤顶在保养正常状态下，相同油压时的出力相对误差约为1%~2%，非正常时可高达5%。采用传感器测量荷重或油压，容易实现加卸荷与稳压自动化控制，且测量精度较高。采用压力表测定油压时，为保证测量精度，其精度等级应优于或等于0.4级，不得使用1.5级压力表作加载控制。

6.2.4 对于机械式大量程(50mm)百分表,《大量程百分表检定规程》JJG 379规定的1级标准为:全程示值误差和回程误差分别不超过 $40\mu\text{m}$ 和 $8\mu\text{m}$,相当于满量程测量误差不大于0.1%。沉降测定平面应在千斤顶底座承压板以下的桩顶标高位置,不得在承压板上或千斤顶上设置沉降观测点,避免因承压板变形导致沉降观测数据失实。

6.2.6 在加卸载过程中,荷载将通过锚桩(地锚)、压重平台支墩传至试桩、基准桩周围地基土并使之变形,随着试桩、基准桩和锚桩(或压重平台支墩)三者间相互距离缩小,土体变形对试桩产生的附加应力和使基准桩产生变位的影响加剧。

1985年,国际土力学与基础工程协会(ISSMFE)根据世界各国对有关静载试验的规定,提出了静载试验的建议方法并指出:试桩中心到锚桩(或压重平台支墩边)和到基准桩各自间的距离应分别“不小于2.5m或3D”,这和我国现行规范规定的“大于等于4D且不小于2.0m”相比更容易满足(小直径桩按3D控制,大直径桩按2.5m控制)。高重建筑物下的大直径桩试验荷载大、桩间净距小(规定最小中心距为3D),往往受设备能力制约,采用锚桩法检测时,三者间的距离有时很难满足“不小于4D”的要求,加长基准梁又难免产生显著的气候环境影响。考虑到现场验收试验中的困难,且加载过程中,锚桩上拔对基准桩、试桩的影响小于压重平台对它们的影响,故本规范中对部分间距的规定放宽为“不小于3D”。

6.3 现场检测

6.3.1 本条主要是考虑在实际工程检测中,因桩头质量问题或局部承压应力集中而导致桩头爆裂、试验失败的情况时有发生,为此建议在试验前对桩头进行加固处理。当桩身荷载水平较低时,允许采用水泥砂浆将桩顶抹平的简单桩头处理方法。

6.3.2 本条是按我国的传统做法,对维持荷载法进行原则性的规定。

6.3.3 慢速维持荷载法的测读数据时间、沉降相对稳定标准与现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106的规定一致。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,也是桩基工程竖向抗压承载力验收检测方法的唯一比较标准。慢速维持荷载法每级荷载持载时间最少为2h。对绝大多数增强体而言,为保证复合地基桩土共同作用,控制绝对沉降是第一位重要的,这是地基基础按变形控制设计的基本原则。

6.3.4 当桩身存在水平整合型缝隙、桩端有沉渣或吊脚时,在较低竖向荷载时常出现本级荷载沉降超过上一级荷载对应沉降5倍的陡降,当缝隙闭合或桩端与硬持力层接触后,随着持载时间或荷载增加,变形梯度逐渐变缓;当桩身强度不足桩被压断时,也会出现陡降,但与前相反,随着沉降增加,荷载不能维持甚至大幅降低。所以,出现陡降后不宜立即卸荷,而应使桩下沉量超过 $40\text{mm}\sim 50\text{mm}$,以大致判断造成陡降的原因。由于考虑到不同复合地基的增强体的桩径、强度和荷载传递性状的差异,给出了一个总沉降量的区间值,按规定进行取值。

长(超长)增强体的 $Q-s$ 曲线一般呈缓变型,在桩顶沉降达到 40mm 时,桩端阻力一般不能发挥。由于长细比大、桩身较柔,弹性压缩量大,桩顶沉降较大时,桩端位移还很小。因此,放宽桩顶总沉降量控制标准是合理的。

6.4 检测数据分析与判定

6.4.1 除 $Q-s$ 曲线、 $s-\lg t$ 曲线外,还有 $s-\lg Q$ 曲线。同一工程的一批试验曲线应按相同的沉降纵

坐标比例绘制，满刻度沉降值不宜小于40mm，这样可使结果直观、便于比较。

6.4.2 由于有粘结强度的增强体的直径一般较小，桩身强度较低，桩身弹性压缩变形量会较大，因此取 $s=40\text{mm}\sim 50\text{mm}$ 对应的荷载为极限承载力，较传统的中、小直径桩的沉降标准有一定的放松。主要考虑到不同复合地基的增强体的桩径、强度和荷载传递性状的差异，给出了一个总沉降量的区间值，按规定进行取值。对于 $s=40\text{mm}\sim 50\text{mm}$ 的范围取值，一般桩身强度高且桩长较短时，或桩截面较小，取低值；桩身强度低且桩长较长时，或桩截面较大，取高值。

应该注意，世界各国按桩顶总沉降确定极限承载力的规定差别较大，这和各国安全系数的取值大小、特别是上部结构对地基沉降的要求有关。因此当按本规范建议的按桩顶沉降量确定极限承载力时，尚应考虑上部结构对地基沉降的具体要求。

6.4.3 《建筑地基基础设计规范》GB 50007-2011规定的竖向抗压承载力特征值是按竖向抗压极限承载力统计值除以安全系数2得到的，综合反映了桩侧、桩端极限阻力控制承载力特征值的低限要求。

7 标准贯入试验

7.1 一般规定

7.1.1 标准贯入试验适用于评价砂土、粉土、黏性土的天然地基或人工地基，对残积土的评价在个别省份有一定资料积累。

7.1.2 天然地基和人工地基除应进行地基载荷试验外，还应进行其他原位试验。检测数量参考《建筑地基基础工程施工质量验收规范》GB 50202-2002第4.1.5条的规定，并进行细化。

7.2 仪器设备

7.2.1 标准贯入试验设备规格主要参考《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)确定。《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)规定标准贯入试验钻杆直径采用42mm，贯入器管靴的刃口单刃厚度修改为1.6mm。

7.2.2 本条明确规定试验仪器的穿心锤质量、导向杆和钻杆相对弯曲度应定期标定；并规定其他需要定期检查的部分。

7.3 现场检测

7.3.1、7.3.2 本条对试验测试点的平面布置和测试深度的详细规定，主要是配合《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-2012关于原位测试手段在地基处理检测中的一些规定，在该基础上进行细化。

7.3.8 在检测天然土地基、人工地基，评价复合地基增强体的施工质量时，要求每个检测孔的标准贯入试验次数不应少于3次，间距不大于1.0m，否则数据太少，难以作出准确评价。

7.4 检测数据分析与判定

7.4.3 标准贯入试验锤击数的修正和使用应根据建立统计关系时的具体情况确定，强调尊重地区经验和土层的区域性。

7.4.7 确定砂土密实度，工程勘察、地基基础设计规范均采用未经修正的数值，为实测平均值，因此表7.4.7-1采用实测平均值，与现行规范保持一致。

在目前规范中，粉土的密实度和孔隙比存在对应关系，孔隙比、标准贯入试验实测锤击数和密实度三者之间缺乏相应关系；黏性土的状态与液性指数存在相应关系，状态、标准贯入试验修正后锤击数和液性指数三者之间缺乏相应关系。因此，在本规范的编制过程中，需要建立前述各个指标之间的相应关系以更好的指导实际工程。

为统计分析全国情况，对全国华东、华北、东北、中南、西北、西南各区28家勘察设计院发出征求意见函，就我们根据部分地区经验拟定的初步意见值征询意见，提供的初步征询意见值见表2、表3。

表2 粉土孔隙比、标准贯入试验实测锤击数和密实度相关关系表

e	初步意见 N_k (实测值)	密实度
—	$N_k \leq 5$	松散
$e > 0.9$	$5 < N_k \leq 10$	稍密
$0.75 \leq e \leq 0.9$	$10 < N_k \leq 15$	中密
$e < 0.75$	$N_k > 15$	密实

表3 黏性土状态、标准贯入试验修正后锤击数和液性指数相关关系表

I_L	初步意见 N_k (修正值)	状态
$I_L > 1$	$N_k \leq 2$	流塑
$0.75 < I_L \leq 1$	$2 < N_k \leq 4$	软塑
$0.5 < I_L \leq 0.75$	$4 < N_k \leq 8$	软可塑
$0.25 < I_L \leq 0.5$	$8 < N_k \leq 18$	硬可塑
$0 < I_L \leq 0.25$	$18 < N_k \leq 35$	硬塑
$I_L \leq 0$	$N_k > 35$	坚硬

收集整理各单位返回的意见，具有代表性的地区统计经验值见表4~表7。

表4 粉土孔隙比、标准贯入试验实测锤击数和密实度相关关系表

序号	e	深圳市勘察测绘院	安徽建设工程勘察院	内蒙古建筑勘察设计院勘测有限责任公司	中勘冶金勘察设计研究院	福建省建筑设计研究院	密实度
1	—	—	$N_k \leq 6$	$N_k \leq 5$	$N_k \leq 5$	$N_k \leq 4$	松散
2	$e > 0.9$	$1 < N_k \leq 4$	$6 < N_k \leq 13$	$5 < N_k \leq 10$	$5 < N_k \leq 9$	$4 < N_k \leq 12$	稍密
3	$0.75 \leq e \leq 0.9$	$4 < N_k \leq 7$	$13 < N_k \leq 25$	$10 < N_k \leq 15$	$9 < N_k \leq 14$	$12 < N_k \leq 18$	中密
4	$e < 0.75$	$7 < N_k \leq 15$	$N_k > 25$	$N_k > 15$	$N_k > 14$	$N_k > 18$	密实

表5 粉土孔隙比、标准贯入试验实测锤击数和密实度相关关系表

序号	e	中国建筑东北设计研究院有限公司	浙江大学建筑设计研究院岩土工程分院	北京航天勘察设计研究院	建设综合勘察研究设计院	密实度
1	—	—	$N_k \leq 7$	$N_k \leq 5$	$N_k \leq 5$	松散
2	$e > 0.9$	—	$7 < N_k \leq 13$	$5 < N_k \leq 10$	$5 < N_k \leq 10$	稍密
3	$0.75 \leq e \leq 0.9$	$12 < N_k \leq 18$	$13 < N_k \leq 25$	$10 < N_k \leq 15$	$10 < N_k \leq 12$	中密
4	$e < 0.75$	$N_k > 18$	$N_k > 25$	$N_k > 15$	$N_k > 12$	密实

表6 黏性土状态、标准贯入试验修正后锤击数和液性指数相关关系表

I_L	安徽建设工程勘察院	深圳市勘察测绘院	内蒙古建筑勘察设计院勘测有限公司	中勘冶金勘察设计院	福建省建筑设计研究院	状态
$I_L > 1$	$N_k \leq 3$	$N_k \leq 1.5$	$N_k \leq 2$	$N_k \leq 2$	$N_k \leq 2$	流塑
$0.75 < I_L \leq 1$	$3 < N_k \leq 5$	$1.5 < N_k \leq 4$	$2 < N_k \leq 4$	$2 < N_k \leq 4$	$2 < N_k \leq 5$	软塑
$0.5 < I_L \leq 0.75$	$5 < N_k \leq 7$	$4 < N_k \leq 6$	$4 < N_k \leq 8$	$4 < N_k \leq 7$	$5 < N_k \leq 11$	软可塑
$0.25 < I_L \leq 0.5$	$7 < N_k \leq 12$	$6 < N_k \leq 15$	$8 < N_k \leq 15$	$7 < N_k \leq 16$	$11 < N_k \leq 22$	硬可塑
$0 < I_L \leq 0.25$	$12 < N_k \leq 20$	$15 < N_k \leq 25$	$15 < N_k \leq 35$	$16 < N_k \leq 30$	$22 < N_k \leq 33$	硬塑
$I_L \leq 0$	$N_k > 20$	$25 < N_k \leq 35$	$N_k > 35$	$N_k > 30$	$N_k > 33$	坚硬

表7 黏性土状态、标准贯入试验修正后锤击数和液性指数相关关系表

I_L	中国建筑东北设计研究院有限公司	浙江大学建筑设计研究院岩土工程分院	北京航天勘察设计院	建设综合勘察研究院	中建西南勘察设计院	状态
$I_L > 1$	$N_k \leq 3$	$N_k \leq 1.5$	$N_k \leq 2$	$N_k \leq 2$	$N_k \leq 2$	流塑
$0.75 < I_L \leq 1$	$3 < N_k \leq 5$	$1.5 < N_k \leq 4$	$2 < N_k \leq 4$	$2 < N_k \leq 4$	$2 < N_k \leq 4$	软塑
$0.5 < I_L \leq 0.75$	$5 < N_k \leq 7$	$4 < N_k \leq 6$	$4 < N_k \leq 8$	$4 < N_k \leq 9$	$4 < N_k \leq 8$	软可塑
$0.25 < I_L \leq 0.5$	$7 < N_k \leq 12$	$6 < N_k \leq 15$	$8 < N_k \leq 15$	$9 < N_k \leq 13$	$8 < N_k \leq 15$	硬可塑
$0 < I_L \leq 0.25$	$12 < N_k \leq 20$	$15 < N_k \leq 25$	$15 < N_k \leq 35$	$13 < N_k \leq 25$	$15 < N_k \leq 25$	硬塑
$I_L \leq 0$	$N_k > 20$	$25 < N_k \leq 35$	$N_k > 35$	$N_k > 25$	$N_k > 25$	坚硬

对以上数据分析应用如下：

(1) 由表4可知，第一行标贯值均值为5，可以作为松散与稍密粉土的临界值；第二行均值为10.8，标准值为9.24，因此选10作为稍密与中密粉土的临界值；第三行均值为14.8，所以选择15作为中密与密实粉土的临界值。综上，确定结果见表8。

表8 粉土孔隙比、标准贯入试验实测锤击数和密实度相关关系表

e	统计结果 N_k (实测值)	密实度
—	$N_k \leq 5$	松散
$e > 0.9$	$5 < N_k \leq 10$	稍密
$0.75 \leq e \leq 0.9$	$10 < N_k \leq 15$	中密
$e < 0.75$	$N_k > 15$	密实

(2) 由表6和表7可知，流塑与软塑黏性土标贯值临界值取2；但因标准贯入试验一般不适用于软塑与流塑软土，建议用标贯进行软土判别时要慎重；软塑与软可塑的临界值均值为4.33，标准值为3.91，因此可取为4；软可塑与硬可塑的临界值均值为8.33，标准值为7.09，因此可取为8；硬可塑与硬塑的临界值均值为14.2，均值为12.64，考虑到以300kPa的承载力为限，由规范公式 $10.5 + (N-3) \times 2 = 30$ 计算出 $N=13$ ，因此取为14；硬塑与坚硬的临界值均值为28.6，标准值为22.8，考虑到全国规范中标贯击数为23时地基承载力已经达到680kPa，足以达到坚硬状态了，因此取值为25。综上，确定结果见表9。

表9 黏性土状态、标准贯入试验修正后锤击数和液性指数相关关系表

I_L	统计结果 N_k (修正值)	状态
$I_L > 1$	$N_k \leq 2$	流塑
$0.75 < I_L \leq 1$	$2 < N_k \leq 4$	软塑
$0.5 < I_L \leq 0.75$	$4 < N_k \leq 8$	软可塑
$0.25 < I_L \leq 0.5$	$8 < N_k \leq 14$	硬可塑
$0 < I_L \leq 0.25$	$14 < N_k \leq 25$	硬塑
$I_L \leq 0$	$N_k > 25$	坚硬

本次意见征询表发放的单位见表10。

表10 意见征询表发放的单位名称

序号	地区	省份	单位名称
1	华北	北京	北京航天勘察设计研究院
2		北京	北京市勘察设计研究院有限公司
3		北京	军队工程勘察协会
4		北京	中兵勘察设计研究院
5		北京	中航勘察设计研究院
6		河北	河北建设勘察研究院有限公司
7		河北	中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司
8		天津	天津市勘察院
9		山西	山西省勘察设计研究院
10		内蒙古	内蒙古建筑勘察设计研究院勘测有限责任公司
11	东北	辽宁	中国建筑东北设计研究院有限公司
12	华东	上海	上海岩土工程勘察设计研究院有限公司
13		浙江	浙江大学建筑设计研究院岩土工程分院
14		浙江	杭州市勘测设计研究院
15		安徽	安徽省建设工程勘察设计院
16		福建	福建省建筑设计研究院
17		山东	山东正元建设工程有限责任公司
18	中南	河南	河南工程水文地质勘察院有限公司
19		湖北	中南勘察设计院
20		深圳	深圳市勘察测绘院有限公司
21		广西	广西电力工业勘察设计研究院
22	西南	四川	中国建筑西南勘察设计研究院有限公司
23		云南	中国有色金属工业昆明勘察设计研究院
24		贵州	贵州省建筑工程勘察院
25	西北	陕西	机械工业勘察设计研究院
26		陕西	西北综合勘察设计研究院
27		陕西	中国有色金属工业西安勘察设计研究院
28		新疆	新疆建筑设计研究院

7.4.8 标准贯入试验结果用于评价地基承载力时，一定要结合当地载荷试验结果和地区经验。特别是进行地基检测时，采用标准贯入试验判断地基土承载力应和地基处理设计时依据的地区承载力确定方法一致。

应用标准贯入试验评价和确定地基承载力是一个相当复杂的问题，涉及的不确定因素很多，比如沉积年代、沉积环境、成因类型、土中有机质含量、地下水位升降等等。另外，各地方规范关于锤击数 N 值是否修正、如何修正不同，标准值的计算方法不同，不一定存在可比性。制作一个全国性表，难度很大。

通过对国标《建筑地基基础设计规范》GBJ 7-89(已废止)及部分地方标准《河北建筑地基承载力技术规程》DB13(J) / T 48-2005、《北京地区建筑地基基础勘察设计规范》DB 11-501-2009、《南京地区建筑地基基础设计规范》DB 32 / 112-95、湖北《建筑地基基础技术规范》DB 42 / 242-2003等的对比研究，可以看出，河北规范考虑了地质分区，北京规范考虑了新近沉积土。关于锤击数修正，北京规范采用的是有效覆盖压力修正法，与其他规范采用杆长修正法不同；即使是杆长修正，各地规范的最大修正长度也不尽相同，福建、河北和南京规范均达到75m。

综上所述，本条要求应优先采用地方规范，当无地方规范也无地方经验时，在能满足本条限制条件下可使用本规范所列承载力表。

应用承载力表还应注意几个问题：

(1) 各地对地基承载力采用标准值还是特征值并不一致，而标准值和特征值概念是存在差异的；

(2) 个别地区经验积累的标贯值和承载力对应表主要是针对原状土的，对经过加固的土层结构性有很大改变的情况下并不适用；

(3) 作为地基处理效果判定时，只能根据地基处理设计时依据的地区承载力确定方法确定加固后的承载力，不能依据大范围统计确定的承载力表格确定承载力，以避免产生检测结果分歧。

7. 4. 11 单位工程主要土层的原位试验数据应按本规范附录B的规定进行统计计算，给出评价结果。

8 圆锥动力触探试验

8. 1 一般规定

8. 1. 1 圆锥动力触探试验(DPT)是用标准质量的重锤，以一定高度的自由落距，将标准规格的圆锥形探头贯入土中，根据打入土中一定距离所需的锤击数，判定土的力学特性，具有勘探和测试双重功能。

本规范列入了三种圆锥动力触探(轻型、重型和超重型)。轻型动力触探的优点是轻便，对于施工验槽、填土勘察、查明局部软弱土层、洞穴等分布，均有实用价值。重型动力触探应用广泛，其规格标准与国际通用标准一致。超重型动力触探的能量指数(落锤能量与探头截面积之比)与国外的并不一致，但相近，适用于碎石土和软岩。圆锥动力触探试验设备轻巧，测试速度快、费用较低，可作为地基检测的普查手段。

8. 2 仪器设备

8. 2. 1~8. 2. 3 圆锥动力触探试验设备规格主要参考现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021确定，并规定重型及超重型圆锥动力触探的落锤应采用自动脱钩装置。触探杆顺直与否直接影响试验结果，本规范对每节触探杆相对弯曲度作了宜小于0. 5%的规定。圆锥动力触探探杆、锥头的磨损度直接影响试验的准确性，本条对探杆、锥头的容许磨损度作出规定，方便现场检查判断。

8. 3 现场检测

8. 3. 1 对于人工地基，由于处理土的类型或增强体的桩体材料可能各不相同，应根据其材料情况，

选择适合的圆锥动力触探试验类型。

8.3.2 本条规定了进行圆锥动力触探试验的试验位置，测试点布置应考虑地质分区或加固处理分区的不同，且应有代表性。评价复合地基增强体施工质量时，应布置在增强体中心位置，评价桩间土的处理效果时，应布置在桩间处理单元的中心位置。评价地基处理效果时，处理前、后测试点应尽可能布置在同一位置附近，才具有较强的可比性。

8.3.3 本条规定了进行动力触探的测试深度，以便较为全面地评价地基的工程特性。对天然地基测试应达到主要受力层深度以下，可结合勘察资料确定试验深度。对人工地基测试应达到加固深度及其主要影响深度以下，复合地基应不小于竖向增强体底部深度。

8.3.4 本条规定进行圆锥动力触探试验时的技术要求：

1 锤击能量是最重要的因素。规定落锤方式采用控制落距的自动落锤，使锤击能量比较恒定。

2 注意保持杆件垂直，锤击时防止偏心及探杆晃动。贯入过程应不间断地连续击入，在黏性土中击入的间歇会使侧摩阻力增大。锤击速度也影响试验成果，一般采用每分钟15击~30击；在砂土、碎石土中，锤击速度影响不大，可取高值。

3 触探杆与土间的侧摩阻力是另一重要因素。试验中可采取下列措施减少侧摩阻力的影响：

(1) 探杆直径应小于探头直径，在砂土中探头直径与探杆直径比应大于1.3；

(2) 贯入时旋转探杆，以减少侧摩阻力；

(3) 探头的侧摩阻力与土类、土性、杆的外形、刚度、垂直度、触探深度等均有关，很难用一固定的修正系数处理，应采取切合实际的措施，减少侧摩阻力，对贯入深度加以限制。

4 由于地基土往往存在硬夹层，不同规格的触探设备其穿透能力不同，为避免强行穿越硬夹层时损坏设备，对轻型动力触探和重型动力触探分别给出可终止试验的条件。当全面评价人工地基的施工质量，当处理范围内有硬夹层时，宜穿过硬夹层后继续试验。

8.4 检测数据分析与判定

8.4.2~8.4.4 对圆锥动力触探试验成果分析与判定做如下说明：

1 圆锥动力触探试验主要取得的贯入指标，是触探头在地基土中贯入一定深度的锤击数(N_{10} 、 $N_{63.5}$ 、 N_{120})或地基土的动贯入阻力以及对应的深度范围。动贯入阻力可采用荷兰的动力公式：

$$q_d = \frac{M}{M+m} \cdot \frac{M \cdot g \cdot H}{A \cdot e} \quad (1)$$

式中： q_d ——动贯入阻力(MPa)；

M ——落锤质量(kg)；

m ——圆锥探头及杆件系统(包括打头、导向杆等)的质量(kg)；

H ——落距(m)；

A ——圆锥探头截面积(cm^2)；

e ——贯入度，等于 D/N ， D 为规定贯入深度， N 为规定贯入深度的击数；

g ——重力加速度，其值为 9.81m/s^2 。

上式建立在古典的牛顿非弹性碰撞理论(不考虑弹性变形量的损耗)。故限于：

(1) 贯入土中深度小于12m，贯入度2mm~50mm；

(2) $m/M < 2$ 。如果实际情况与上述适用条件出入大，用上述计算应慎重。

有的单位已经研制电测动贯入阻力的动力触探仪，这是值得研究的方向。

本规范推荐的分析方法是对触探头在地基土中贯入一定深度的锤击数(N_{10} 、 $N_{63.5}$ 、 N_{120})及其对应的深度进行分析判定，这种方法在国内已有成熟的经验。

2 根据触探击数、曲线形态，结合钻探资料可进行力学分层，分层时注意超前滞后现象，不同土层的超前滞后量是不同的。

上为硬土层下为软土层，超前约为0.5m~0.7m，滞后约为0.2m；上为软土层下为硬土层，超前约为0.1m~0.2m，滞后约为0.3m~0.5m。

在整理触探资料时，应剔除异常值，在计算土层的触探指标平均值时，超前滞后范围内的值不反映真实土性；临界深度以内的锤击数偏小，不反映真实土性；故不应参加统计。动力触探本来是连续贯入的，但也有配合钻探，间断贯入的做法，间断贯入时临界深度以内的锤击数同样不反映真实土性，不应参加统计。

3 整理多孔触探资料时，应结合钻探资料进行分析，对均匀土层，可用厚度加权平均法统计场地分层平均触探击数值。

8.4.5~8.4.7 动力触探指标可用于推定土的状态、地基承载力、评价地基土均匀性等，本条规定通过对各检测孔和同一土层的触探锤击数进行统计分析，得出其平均值(代表值)和变异系数等指标推定土的状态及地基承载力。进行分层统计时，应根据动探曲线沿深度变化趋势结合勘探资料进行。用于评价地基处理效果时，宜取得处理前、后的动力触探指标进行对比评价。

8.4.8 复合地基竖向增强体的施工工艺和采用材料的种类较多，只有相同的施工工艺并采用相同材料的增强体才有可比性，本条规定只对单个增强体进行评价。

8.4.9 用 N_{10} 评价地基承载力特征值的表分别分析、参考了《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018-2003、广东、北京、西安、浙江的资料。

本规范所列 N_{10} 评价素填土的承载力，该素填土的成分是黏性土，西安经验所对应的填土含有少量杂物，在击数对应的承载力相对较低，故表8.4.9参考了北京、浙江的资料。

粉细砂土的承载力与其饱和程度关系明显，表中数值参照了北京资料中饱和状态下的资料。

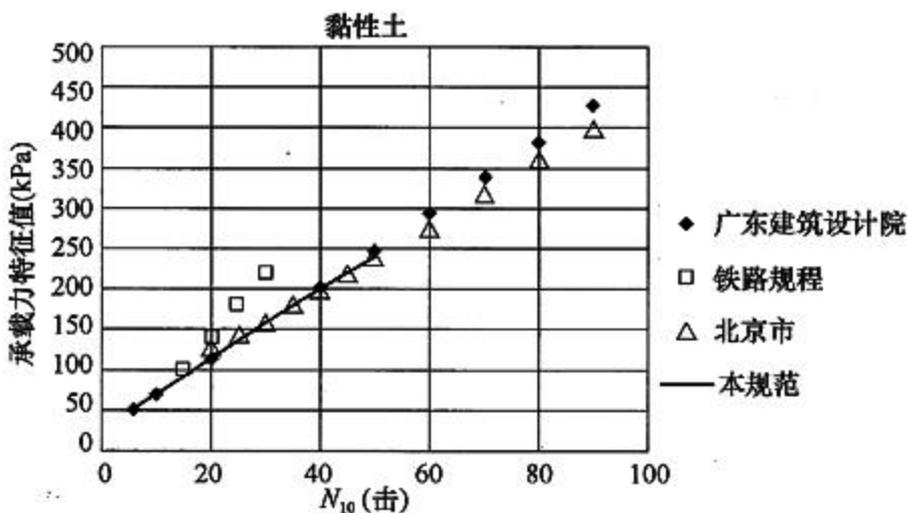


图2 黏性土承载力特征值与 N_{10} 关系

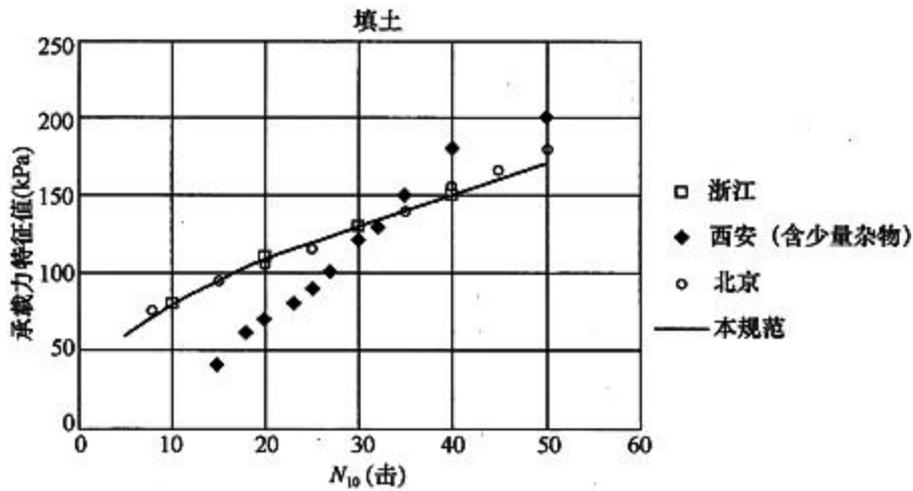


图3 填土承载力特征值与 N_{10} 关系

用重型动力触探试验 $N_{63.5}$ 评价地基承载力特征值分别参考了原一机部勘测公司西南大队、广东、成都、沈阳、铁路标准、石油标准等资料和部分工程实测验证资料，适当做了外延和内插。

8. 4. 10 砂土、碎石桩的密实度评价标准参考了《工程地质手册》、广东省、辽宁省等资料。为方便检测人员使用，本条引用了《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)用 $N_{63.5}$ 、 N_{120} 击数评价碎石土密实度的表格。考虑到碎石土的粒径

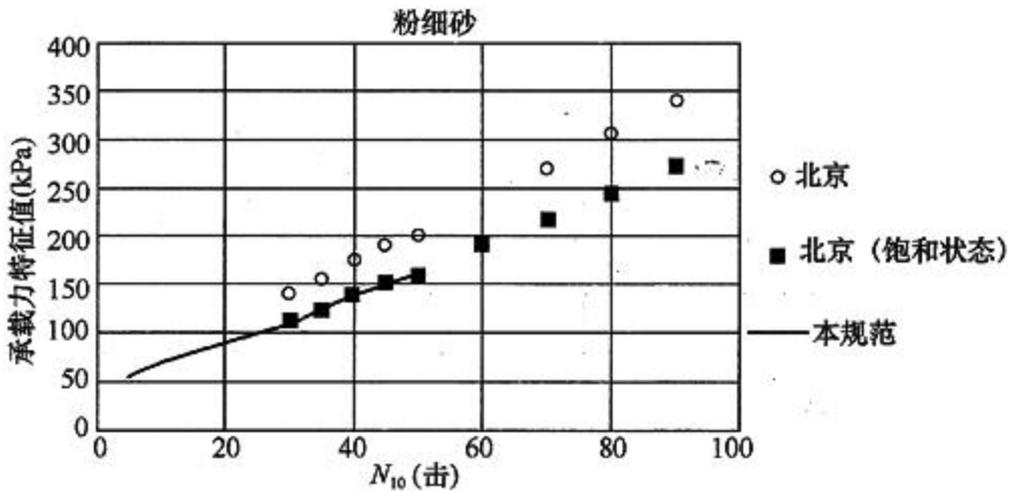


图4 粉细砂承载力特征值与 N_{10} 关系

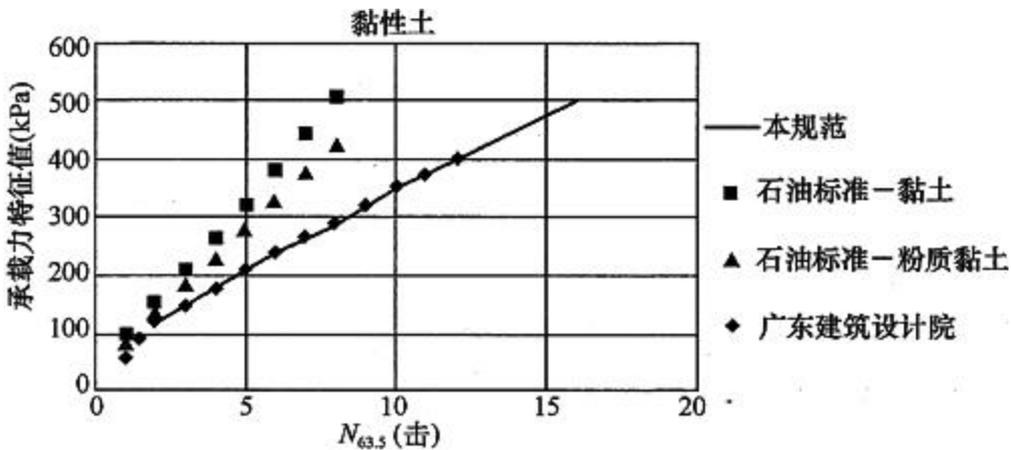


图5 黏性土承载力特征值与 $N_{63.5}$ 关系

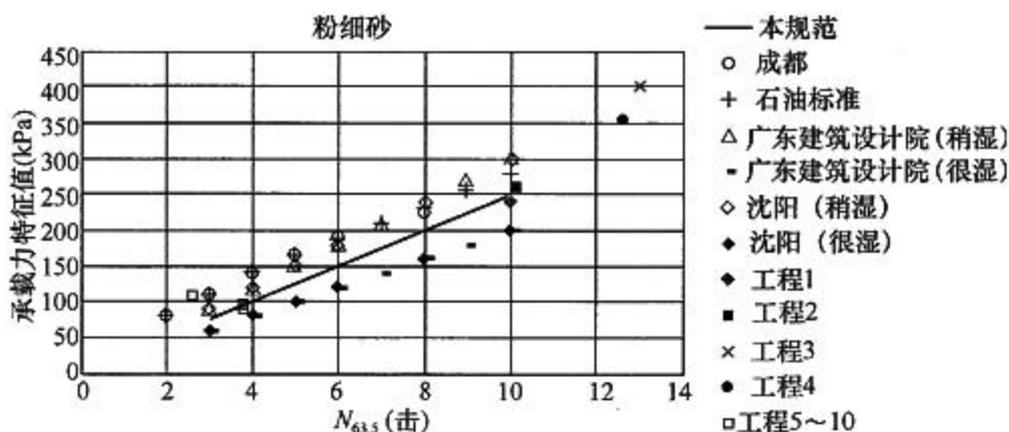


图6 粉细砂承载力特征值与 $N_{63.5}$ 关系

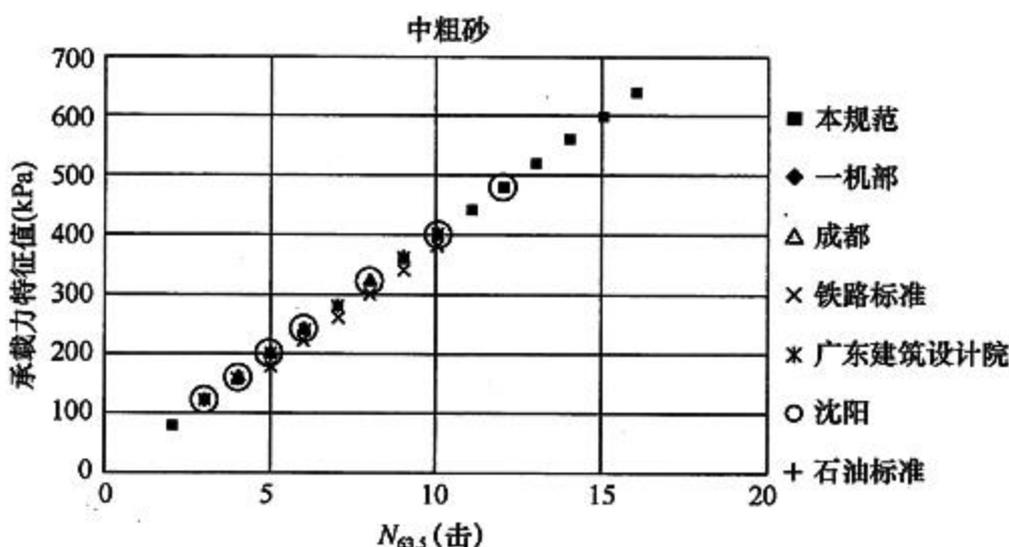


图7 中粗砂承载力特征值与 $N_{63.5}$ 关系

大小、颗粒组成、母岩成分、填充物等对动力触探锤击数和地基承载力影响较大，各地所测数据离散性也很大，故当需要用动力触探锤击数评价碎石土的承载力时，应结合载荷试验的比对结果和地区经验进行。

8. 4. 11 推定地基的变形模量 E_0 引用了《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018-2003中的资料。

9 静力触探试验

9. 1 一般规定

9. 1. 1 静力触探试验(CPT)为采用静力方式均匀地将标准规格的探头压入土中，通过量测探头贯入阻力以测定土的力学特性的原位测试方法。一般在黏性土、粉土和砂土及相应的处理土地基中较为适用，对于含少量碎石土层，其适用性应根据碎石含量、粒径级配等条件而定。静力触探试验能较为直观地评价土的均匀性和地基处理效果，结合载荷试验成果或地区工程实践经验，能推定土的承载力及

变形参数。

9.2 仪器设备

9.2.1 单桥、双桥探头是国内常用的静力触探探头。国际上不少国家已较广泛采用多功能探头，国内也有勘察单位在工程中成功使用多功能探头。国内部分院校引进的现代多功能 CPTU 系统，配备有四功能5t、10t、20t 数字式探头，具有常规 CPT、孔压、地震波和电阻率功能模块。数字式探头内传感器后配有电子放大调节元件，清除测试时电缆阻力的影响。另配有温度读数仪，用来校准微波稳定状态下的温度变化，保证测试精度。

9.2.2 国内目前探头锥底截面积有 10cm^2 、 15cm^2 和 20cm^2 。国际标准探头为锥角 60° ，锥底截面积为 10cm^2 ，此种规格在国内也较为常用。对于可能有较大的贯入阻力时，可选择锥底面积较大的探头。

9.2.3 静力触探的贯入设备和记录仪作为设备应定期校准，校准的方式可以采用自校、外校，或自校加外校相结合的方式进行。

9.2.4 本条是对触探主机的技术要求，能匀速贯入，且标准速度为 $1.2\text{m}/\text{min}$ ，允许变化范围为 $\pm 0.3\text{m}/\text{min}$ 。

9.2.5 国内目前常用的记录仪主要有四种：(1)电阻应变仪；(2)自动记录绘图仪；(3)数字式测力仪；(4)数据采集仪(静探微机)。

9.2.6 探头在额定荷载下，室内检测总误差不应大于 $3\%FS$ ，其中非线性误差、重复性误差、滞后误差、归零误差均应小于 $1\%FS$ ，要求野外现场的归零误差不应超过 $3\%FS$ 。

9.2.7 为了不影响测试数据和减少探杆与孔壁的摩阻力，探杆的直径应小于探头直径。如安装减摩阻器，安装位置应在影响范围之外。

9.2.8 国内探头一般采用电阻应变式传感器，应避免受潮和振动。

9.3 现场检测

9.3.1 本条是规定测试点的平面布设，应具有代表性和针对性。对于评价地基处理效果的，前、后测试点应考虑一致性。

9.3.2 本条是规定静力触探测试深度，除设计特殊要求外，一般应达到主要受力层或地基加固深度以下。对于复合地基桩间土测试，其深度应达到竖向增强体深度以下。

9.3.3 本条规定了静力触探设备安装应注意的问题，如注意施工安全，防止损坏地下管线等。因地制宜选择反力装置，有地锚法、堆载法和利用混凝土地坪反拉法等。

9.3.4 本条规定试验前，探头应连同记录仪、电缆线作为一个系统进行率定。率定有效期为3个月，超过3个月需要再次率定。当现场测试发现异常时，应重新率定，检验探头有效性。

9.3.5 本条规定静力触探试验现场操作的一些准则，如消除温漂，规定贯入标准速度。为防止孔斜的措施有：下护管或配置测斜探头。

9.3.6 在试验贯入过程中由于温度和传感器受力影响，探头应按一定间隔及时调零，保证测试数据的准确。

9.3.7 当探杆的倾斜角超过了 10° 时，测试深度和数据将会失真，应当终止试验。

9.4 检测数据分析与判定

9.4.7 为了统计静力触探试验成果和地基承载力、变形参数的关系，编制组收集了全国各地的一些工程资料，进行分析和统计，得出了以下经验公式。

1 收集资料情况

本次静力触探成果经验关系统计共收集23项工程，其中上海12项、江苏5项、陕西3项、辽宁1项、山西1项、浙江1项，详见表11。

表11 收集资料一览表

序号	工程名称	工程地点
1	上海中心大厦工程勘察、地灾评估	上海
2	上海市陆家嘴金融贸易区 X2 地块	上海
3	无锡红豆国际广场	江苏无锡
4	上海富士康大厦	上海
5	卢湾区马当路 388 号地块（卢 43 街坊项目）	上海
6	耀皮玻璃有限公司浮法玻璃搬迁项目	江苏常熟
7	虹桥综合交通枢纽地铁西站	上海
8	西部商业开发与西公交中心	上海
9	上海北外滩白玉兰广场	上海
10	无锡国棉 1A、1B 地块	江苏无锡
11	无锡国棉 2 号地块	江苏无锡
12	上海市静安区大中里综合发展项目	上海
13	太原湖滨广场综合项目	山西太原
14	上海市普陀区真如副中心 A3、A5 地块（一期）发展项目	上海
15	静安区 60 号街坊地下空间建设项目	上海
16	上海市长宁区临空 13-1、13-2 地块	上海
17	九龙仓苏州超高层项目	江苏苏州
18	轨道交通 10 号线海伦路站地块综合开发项目	上海

19	杭州市地铁4号线一期工程	浙江杭州
20	沈阳东北电子商城	辽宁沈阳
21	西安市城市快速轨道交通一号线一期工程	陕西西安
22	西安市城市快速轨道交通二号线一期工程	陕西西安
23	西安市城市快速轨道交通三号线一期工程	陕西西安

2 地基承载力和压缩模量的确定

确定地基承载力和土体变形模量最直接方法是载荷板试验，但由于载荷板试验一般在表层土进行，无法在深层土体实施，所以本次统计选用旁压试验成果来确定地基土承载力和压缩模量，确定原则如下：

地基土承载力特征值取值： $f_{ak} = 0.9(p_v - p_0)$ ， p_v 为旁压试验临塑压力， p_0 为旁压试验原位侧向压力。

压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ 按土工试验结果取值。

3 统计结果(图8~图13)

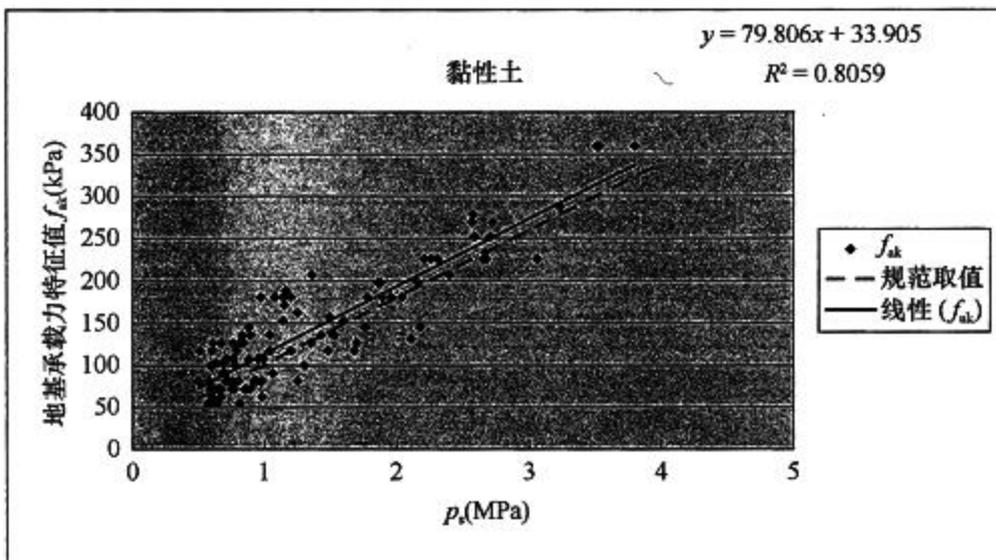


图8 黏性土地基承载力特征值与 p_s 关系

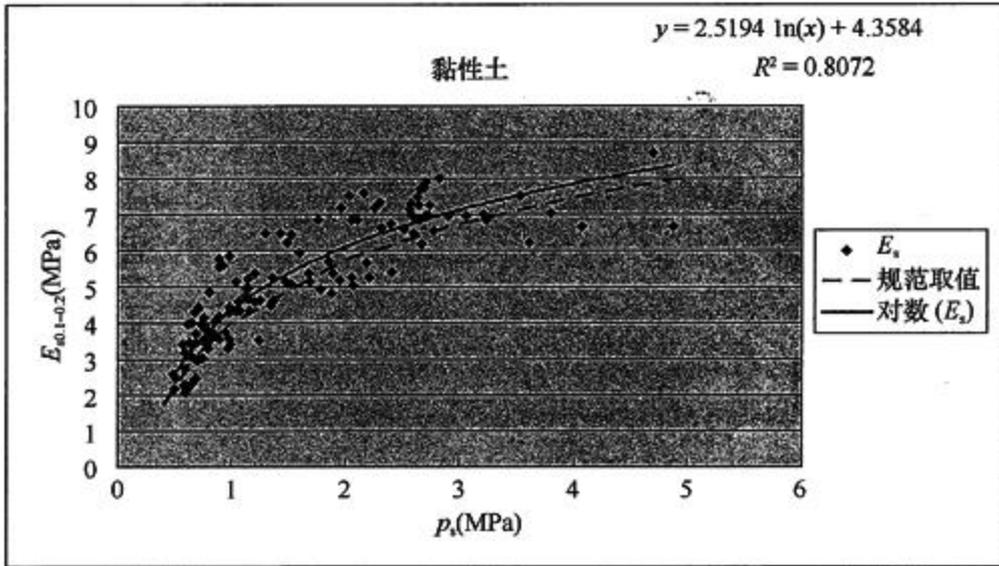


图9 黏性土 $E_{s0.1-0.2}$ 与 p_s 关系

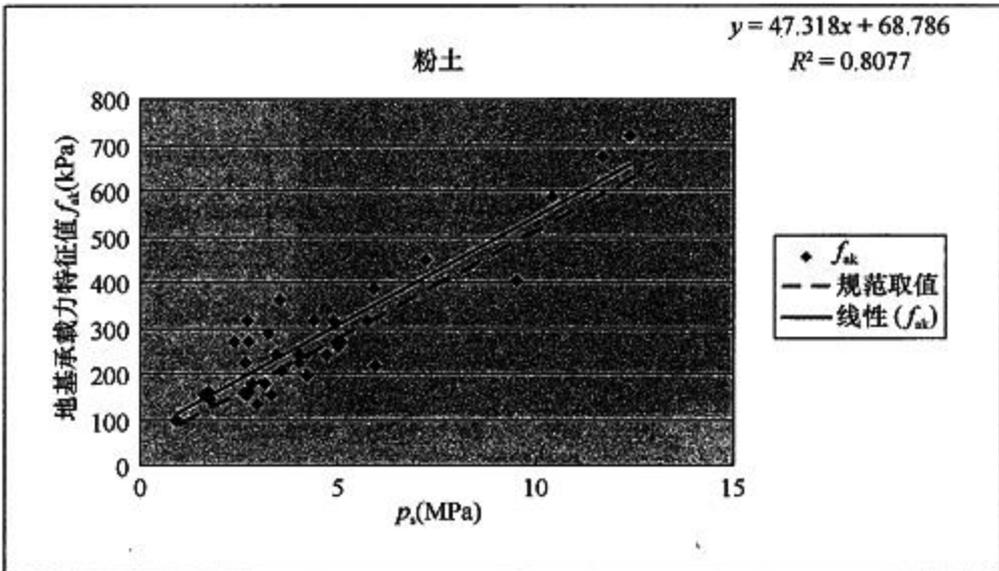


图10 粉土地基承载力特征值与 p_s 关系

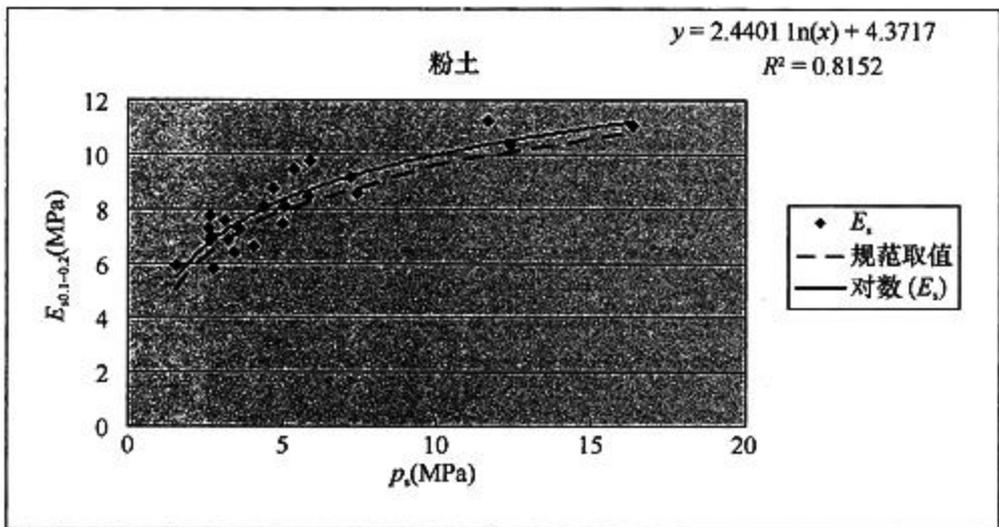


图11 粉土 $E_{s0.1-0.2}$ 与 p_s 关系

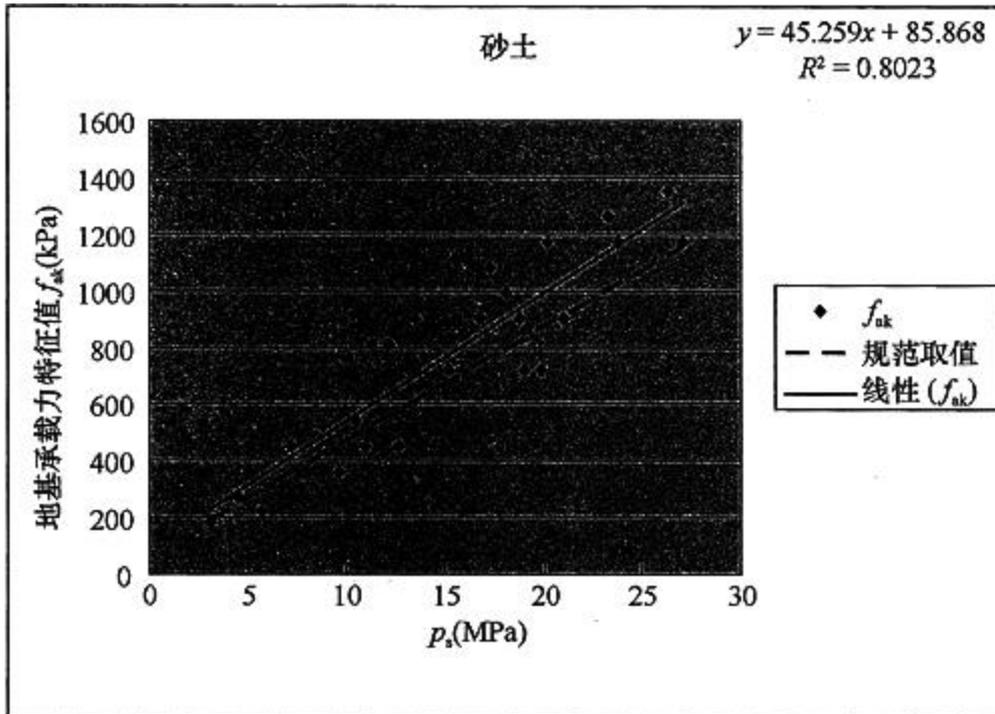


图12 砂土地基承载力特征值与 p_s 关系

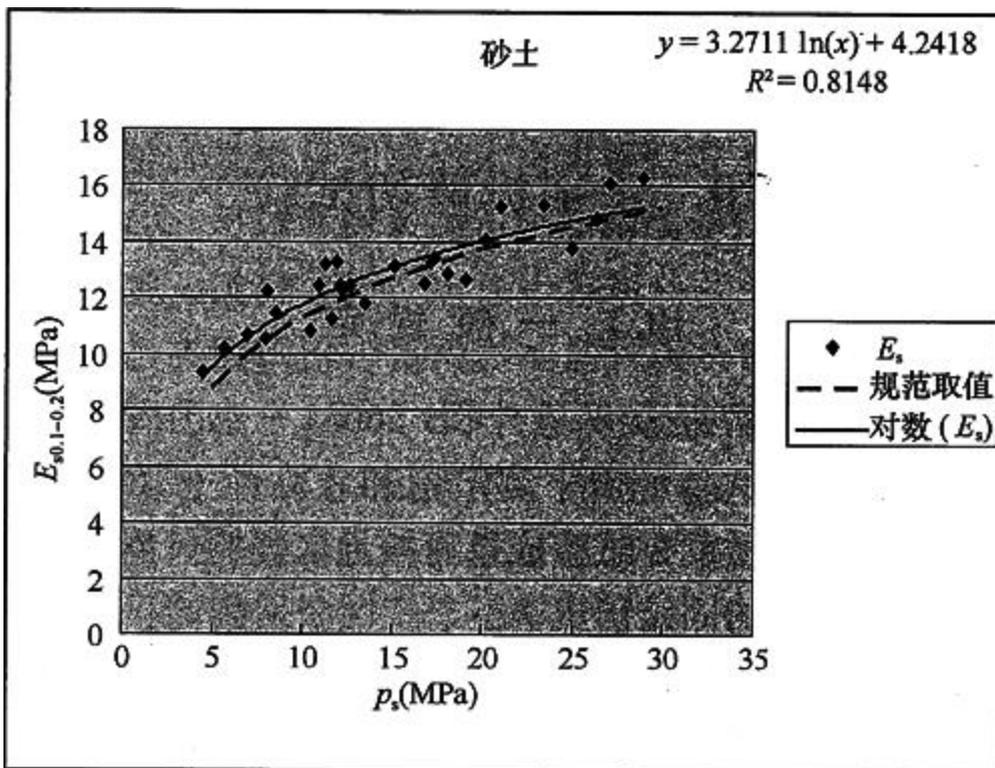


图13 砂土 $E_{s0.1-0.2}$ 与 p_s 关系

(1) 黏性土, 规范取值: $f_{ak} = 80p_s + 20$, $E_{s0.1-0.2} = 2.5 \ln(p_s) + 4$

(2) 粉土, 规范取值: $f_{ak} = 47p_s + 40$, $E_{s0.1-0.2} = 2.44 \ln(p_s) + 4$

(3) 砂土, 规范取值: $f_{ak} = 40p_s + 70$, $E_{s0.1-0.2} = 3.6 \ln(p_s) + 3$

本次归纳统计的经验公式应进一步通过载荷板对比试验, 在工程中验证, 积累资料, 不断完善。

10 十字板剪切试验

10.1 一般规定

10.1.1 《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)指出,十字板剪切试验可用于测定饱和软黏性土($\phi \approx 0$)的不排水抗剪强度和灵敏度;试验成果可按地区经验,确定地基承载力,判定软黏性土的固结历史。

十字板剪切试验的适用范围,大部分国家规定限于饱和软黏性土,软黏性土是指天然孔隙比大于或等于1.0,且天然含水量大于液限的细粒土。

作为建筑地基检测方法,十字板剪切试验适用于检测饱和软黏性土天然地基及其预压处理地基的不排水抗剪强度和灵敏度,可推定原状土与处理土地基的地基承载力,检验原状土地基质量和桩间土加固效果。

10.2 仪器设备

10.2.1 机械式十字板剪切仪的特点是施加的力偶对转杆不产生额外的推力。它利用蜗轮蜗杆扭转插入土层中的十字板头,借助开口钢环测定土层的抵抗扭力,从而得到土的抗剪强度。

电测十字板剪切仪是相对较新的一种设备。与机械式的主要区别在于测力装置不用钢环,而是在十字板头上端连接一个贴有电阻应变片的扭力传感器装置(主要由高强度弹簧钢的变形柱和成正交贴在其上的电阻片等组成)。通过电缆线将传感器信号传至地面的电阻应变仪或数字测力仪,然后换算十字板剪切的扭力大小。它可以不用事前钻孔,且传感器只反映十字板头处受力情况,故可消除轴杆与土之间,传力机械等的阻力以及坍孔使土层扰动的影响。如果设备有足够的压入力和旋扭力,则可自上而下连续进行试验。

10.2.2 十字板头形状国外有矩形、菱形、半圆形等,但国内均采用矩形,故本规范只列矩形。当需要测定不排水抗剪强度的各向异性变化时,可以考虑采用不同菱角的菱形板头,也可以采用不同径高比板头进行分析。矩形十字板头的宽高比1:2为通用标准。十字板头面积比,直接影响插入板头时对土的挤压扰动,一般要求面积比小于15%;当十字板头直径为50mm和75mm,翼板厚度分别为2mm和3mm时,相应的面积比为13%~14%。

扭力测量设备需满足对测量量程的要求和对使用环境适应性的要求,才可能确保检测工作正常进行。

传感器和记录仪如达到条文规定的技术要求,则由零漂造成的试验误差(归零误差)被控制在1%FS以内。零漂可分为时漂和温漂两种:在恒温和零输入状态下,在规定的时段内,仪表对传感器零输出值的变化不小,谓之时漂;在零输入状态下,传感器零输出值随温度变化而改变,称为温漂。

传感器检测总误差若在3%以内,则整个测试误差(包括仪器的检测误差、十字板头尺寸误差等在内)被控制在8%以内。

传感器的绝缘程度随静置时间延长而降低,对传感器出厂时的绝缘电阻要求既是合理的,也是可行的。武汉冶金勘察研究院就传感器(探头)绝缘电阻对测试误差的影响进行过分析与试验,结论认为探头应变测量测试误差在绝缘电阻为 $1M\Omega$ 级时可远小于1%。铁四院在南方若干工点中,也发现同一探头在 $5M\Omega$ 和大于 $200M\Omega$ 时,其测试值的重现性很好;但当探头绝缘电阻降至 $5M\Omega$ 以下时,由于气候潮湿和野外环境恶劣,也许在一夜之间便降为零。为此,本规程将传感器绝缘电阻的使用下限定为 $200M\Omega$,可保证外业工作不受这方面因素影响。

10.2.5 专用的试验记录仪是指与设备主机配套生产制作的专用试验记录仪。试验的信号传输线采

用屏蔽电缆可防止或减小杂散信号干扰，保证测试结果准确。

10.3 现场检测

10.3.1 安装平稳才能保证钻杆入土的垂直度以及形成与理论假定一致的剪切圆柱体。

10.3.5 同一检测孔的试验点的深度间距规定宜为1.5m~2.0m，当需要获得多个检测点的数据而土层厚度不够时，深度间距可放宽至0.8m；当土层随深度的变化复杂时，可根据工程实际需要，选择有代表性的位置布置试验点，不一定均匀间隔布置试验点，遇到变层，要增加检测点。

10.4 检测数据分析与判定

10.4.3、10.4.4 十字板不排水抗剪强度计算的假定为：当十字板在土中扭转时，土柱周围的剪力是均匀的，土柱体上、下两端也是均匀的。

10.4.5 根据原状土与重塑土不排水抗剪强度的比值可计算灵敏度，可评价软黏土的触变性。

10.4.6、10.4.7 实践证明，正常固结的饱和软黏性土的不排水抗剪强度是随深度增加的；室内抗剪强度的试验成果，由于取样扰动等因素，往往不能很好地反映这一变化规律；利用十字板剪切试验，可以较好地反映土的不排水抗剪强度随深度的变化。

绘制抗剪强度与扭转角的关系曲线，可了解土体受剪时的剪切破坏过程，确定软土的不排水抗剪强度峰值、残余值及不排水剪切模量。目前十字板头扭转角的测定还存在困难，有待研究。

10.4.8 根据 c_u-h 曲线，判定软土的固结历史；若 c_u-h 曲线大致呈一通过地面原点的直线，可判定为正常固结土；若 c_u-h 直线不通过原点，而与纵坐标的向上延长轴线相交，则可判定为超固结土。

10.4.9 利用十字板剪切试验成果计算出来的地基土承载力特征值，在没有载荷试验作对比的情况下，不宜作为工程设计和验收的最终依据。十字板剪力试验结果宜结合平板载荷试验结果对地基土承载力特征值作出评价。当单独采用十字板剪切试验统计结果评价地基时，初步设计时可根据不排水抗剪强度标准值，根据规范提供的经验公式推定地基土承载力特征值。

地基承载力与原状土不排水抗剪强度 c_u 之间有着良好的线性关系，国内一些勘察设计单位根据几十年大量工程实践经验、现场试验对地基承载力与原状土不排水抗剪强度 c_u 之间的关系进行统计、分析得到一些经验公式。本规范的公式(10.4.9)系根据中国建筑科学研究院及华东电力设计院提供的经验公式，经真空预压处理的吹填土地基、堆载预压联合排水加固的软土地基、经换填处理的软弱地基及滨海相沉积的软黏土地基均可采用上述公式计算地基承载力。本条规定对经验公式中的埋置深度进行了取值限制，建议当 $h>3.0m$ 时应进行适当折减。

11 水泥土钻芯法试验

11.1 一般规定

11.1.1 钻芯法检测是地基基础工程检测的一个基本方法，比较直观，可靠性强，在灌注桩检测中起到了巨大的作用。由于水泥土桩强度低，均匀性相对较差，其强度评定和完整性评价偏差有时较大，因此钻芯法可作为水泥土桩的辅助检测手段，当桩身强度和均匀性较差时，应采用平板载荷试验确定

复合地基的承载力。

钻芯法适用于检测水泥土搅拌桩、高压旋喷桩、夯实水泥土桩等各种水泥土桩的桩长、桩身水泥土强度和桩身均匀性，还可判定和鉴别桩底持力层岩土性状。CFG 桩、微型桩长径比大，钻芯时易偏出，检测实操难度较大，不推荐使用钻芯法检测，当有可靠措施能取到桩全长芯样时，也可作为其辅助检测方法。

11. 1. 2 以概率论为基础、用可靠性指标度量可靠度是比较科学的评价方法，即在钻芯法受检桩的芯样中截取一批芯样试件进行抗压强度试验，采用统计的方法判断桩身强度是否满足设计要求。为了取得较多的统计样本，准确评价单位工程同一条件下受检桩的桩身强度标准值，要求受检桩每根桩按上、中、下截取3组9个芯样试件。

11. 1. 3 水泥土桩的强度按7d、28d、90d 龄期均有不同，因此应按设计要求的龄期进行抗压强度试验，以检验水泥土桩的强度是否达到该龄期的强度要求。

11. 2 仪器设备

11. 2. 1~11. 2. 3 钻取芯样设备一般使用灌注桩取芯设备即可，水泥土桩强度一般较低，使用薄壁合金钻头即可，设备动力要求也可以低一些，但芯样的截取、加工、制作应更加细心。

11. 3 现场检测

11. 3. 1 钻芯设备应精心安装、认真检查。钻进过程中应经常对钻机立轴进行校正，及时纠正立轴偏差，确保钻芯过程不发生倾斜、移位。设备安装后，应进行试运转，在确认正常后方能开钻。

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

11. 3. 2 当钻芯孔为一个时，规定宜在距桩中心100mm~150mm 处开孔，是为了在桩身质量有疑问时，方便第二个孔的位置布置。为准确确定桩的中心点，桩头宜开挖裸露；来不及开挖或不便开挖的桩，应由全站仪测出桩位中心。鉴别桩底持力层岩土性状时，应按设计要求钻进持力层一定的深度，无设计要求时，钻进深度应大于2倍桩身直径。

11. 3. 6 钻至桩底时，为检测桩底虚土厚度，应采用减压、慢速钻进，若遇钻具突降，应即停钻，及时测量机上余尺，准确记录孔深及有关情况。

对桩底持力层，可采用动力触探、标准贯入试验等方法鉴别。试验宜在距桩底50cm 内进行。

11. 3. 8 芯样取出后，应由上而下按回次顺序放进芯样箱中，芯样侧面上应清晰标明回次数深度。及时记录孔号、回次数、起至深度、芯样质量的初步描述及钻进异常情况。

11. 3. 9 对桩身水泥土芯样的描述包括水泥土钻进深度，芯样连续性、完整性、胶结情况、水泥土芯样是否为柱状、芯样破碎的情况，以及取样编号和取样位置。

对持力层的描述包括持力层钻进深度，岩土名称、芯样颜色、结构构造，或动力触探、标准贯入试验位置和结果。分层岩层应分别描述。

应先拍彩色照片，后截取芯样试件。取样完毕剩余的芯样宜移交委托单位妥善保存。

11.4 芯样试件抗压强度

11.4.2 本条规定芯样试件加工完毕后，即可进行抗压强度试验，一方面考虑到钻芯过程中诸因素影响均使芯样试件强度降低，另一方面是出于方便考虑。

11.4.4 水泥石芯样试件的强度值计算方法参照混凝土芯样试件的强度值计算方法。

11.5 检测数据分析与判定

11.5.2 由于地基处理增强体设计和施工的特殊性，评价单根受检桩的桩身强度是否满足设计要求并不合理，以概率论为基础、用可靠性指标度量可靠度评价整个工程的桩身强度是比较科学合理的评价方法。单位工程同一条件下每个检验批应按照附录B 地基土数据统计计算方法计算桩身抗压强度标准值。

11.5.3 桩底持力层岩土性状的描述、判定应有工程地质专业人员参与，并应符合现行国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021的有关规定。

11.5.4、11.5.5 由于水泥石桩通常为大面积复合地基工程，桩数较多，其中的一根或几根桩并不起到决定作用，而是作为一个整体发挥作用，因此水泥石桩的桩身质量评价应按检验批进行。

除桩身均匀性和桩身抗压强度标准值外，当设计有要求时，应判断桩底持力层岩土性状是否满足或达到设计要求。

此外，由于水泥石桩强度低，均匀性相对较差，其强度评定和均匀性评价偏差有时较大，因此钻芯法仅作为水泥石桩的辅助检测手段，当桩身强度和均匀性较差时，应采用载荷试验确定复合地基的承载力。

12 低应变法试验

12.1 一般规定

12.1.1 目前工程中常用的竖向增强体有碎石桩、砂桩、水泥石桩、石灰桩、灰土桩、CFG 桩等。根据竖向增强体的性质，桩体复合地基又可分为三类：散体材料桩复合地基、一定粘结强度材料桩复合地基和高粘结强度材料桩复合地基。其中，散体材料桩复合地基的增强体材料是颗粒之间无粘结的散体材料，如碎石、砂等，散体材料桩只有依靠周围土体的围箍作用才能形成桩体，桩体材料本身单独不能形成桩体。其他可称为粘结材料桩，视粘结强度的不同又可分为一般粘结强度桩和高粘结强度桩（也有人称为半刚性桩和刚性桩）。为保证桩土共同作用，常常在桩顶设置一定厚度的褥垫层。一般粘结强度桩复合地基如水泥石桩复合地基、灰土桩复合地基等，其桩体刚度较小。高粘结强度材料桩复合地基的桩体通常以水泥为主要胶结材料，有时以混凝土或由混凝土与其他掺和料构成，桩身强度较高，刚度很大。

这几种类型中，散体材料增强体明显不符合低应变反射法的检测理论模型，因此不属于本规范的检测范围。而经大量试验证明：类似水泥石搅拌法形成的一般粘结强度的竖向增强体，因其掺入水泥量、均匀性变化较大，强度较低，采用低应变法往往难以达到满意的效果，故一般只作为一种试验方法提供工程参考。本规范的检测适用范围主要是高粘结强度增强体，规定增强体强度为8MPa 以上，当增强体强度达到15MPa 以上时，可参照现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106进行检测。

低应变法有许多种，目前国内外普遍采用瞬态冲击方式，通过实测桩顶加速度或速度响应时域曲

线，用一维波动理论分析来判定基桩的桩身完整性，这种方法称为反射波法(或瞬态时域分析法)。据住房和城乡建设部所发工程桩动测单位资质证书的数量统计，绝大多数的单位采用上述方法，所用动测仪器一般都具有傅立叶变换功能，可通过速度幅频曲线辅助分析判定桩身完整性，即所谓瞬态频域分析法；也有些动测仪器还具备实测锤击力并对其进行傅立叶变换的功能，进而得到导纳曲线，这称之为瞬态机械阻抗法。当然，采用稳态激振方式直接测得导纳曲线，则称之为稳态机械阻抗法。无论瞬态激振的时域分析还是瞬态或稳态激振的频域分析，只是习惯上从波动理论或振动理论两个不同角度去分析，数学上忽略截断和泄漏误差时，时域信号和频域信号可通过傅立叶变换建立对应关系。所以，当桩的边界和初始条件相同时，时域和频域分析结果应殊途同归。综上所述，考虑到目前国内外使用方法的普遍程度和可操作性，本规范将上述方法合并编写并统称为低应变(动测)法。

一维线弹性杆件模型是低应变法的理论基础。因此受检增强体的长径比、瞬态激励脉冲有效高频分量的波长与增强体的横向尺寸之比均宜大于5，设计增强体截面宜基本规则。另外，一维理论要求应力波在杆中传播时平截面假设成立，所以，对异形的竖向增强体，本方法不适用。

本方法对增强体缺陷程度只作定性判定，尽管利用实测曲线拟合法分析能给出定量的结果，但由于增强体的尺寸效应、测试系统的幅频相频响应、高频波的弥散、滤波等造成的实测波形畸变，以及增强体侧土阻尼、土阻力和增强体阻尼的耦合影响，曲线拟合法还不能达到精确定量的程度。

12.1.3 由于受增强体周土约束、激振能量、竖向增强体材料阻尼和截面阻抗变化等因素的影响，应力波从增强体顶传至底再从底反射回顶的传播为一能量和幅值逐渐衰减过程。若竖向增强体过长(或长径比较大)或竖向增强体截面阻抗多变或变幅较大，往往应力波尚未反射回竖向增强体顶甚至尚未传到竖向增强体底，其能量已完全衰减或提前反射，致使仪器测不到竖向增强体底反射信号，而无法评定竖向增强体的完整性。在我国，若排除其他条件差异而只考虑各地区地质条件差异时，竖向增强体的有效检测长度主要受竖向增强体和土刚度比大小的制约，故本条未规定有效检测长度的控制范围。具体工程的有效检测长度，应通过现场试验，依据能否识别竖向增强体底反射信号，确定该方法是否适用。

截面尺寸主要是因为上述的长径比影响及尺寸效应问题，应当有所限制，但各地、各种规范的规定不同，一般地，按直径小于2.0m为宜，具体情况应根据数据的可识别情况通过现场试验确定。

12.2 仪器设备

12.2.1 检测仪器设备除了要考虑其动态性能满足测试要求，分析软件满足对实测信号的再处理功能外，还要综合考虑测试系统的可靠性、可维修性、安全性等。竖向增强体在某种意义上也可以称为“低强度桩”，对仪器设备的要求与基桩检测的要求接近，因此，有关内容可按现行行业标准《基桩动测仪》JG/T 3055。信号分析处理软件应具有光滑滤波、旋转、叠加平均和指数放大等功能。检测报告所附波形曲线必须有横、纵坐标刻度值，方便其他技术人员同波形进行分析和对检测结果的准确性进行评估，可确保可溯源性。

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

对于增强体顶瞬态响应测量，习惯上是将加速度计的实测信号积分成速度曲线，并据此进行判读。实践表明：除采用小锤硬碰硬敲击外，速度信号中的有效高频成分一般在2000Hz以内。但这并不等于说，加速度计的频响线性段达到2000Hz就足够了。这是因为，加速度原始信号比积分后的速度波形中要包含更多和更尖的毛刺，高频尖峰毛刺的宽窄和多寡决定了它们在频谱上占据的频带宽窄和能量大小。事实上，对加速度信号的积分相当于低通滤波，这种滤波作用对尖峰毛刺特别明显。当加速度计

的频响线性段较窄时，就会造成信号失真。所以，在±10%幅频误差内，加速度计幅频线性段的高限不宜小于5000Hz，同时也应避免在增强体顶敲击处表面凹凸不平时用硬质材料锤(或不加锤垫)直接敲击。

高阻尼磁电式速度传感器固有频率接近20Hz时，幅频线性范围(误差±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、制作以及可用性来看又难于做到。因此，若要提高高频测量上限，必须提高固有频率，势必造成低频段幅频特性恶化，反之亦然。同时，速度传感器在接近固有频率时使用，还存在因相位越迁引起的相频非线性问题。此外由于速度传感器的体积和质量均较大，其安装谐振频率受安装条件影响很大，安装不良时会大幅下降并产生自身振荡，虽然可通过低通滤波将自振信号滤除，但在安装谐振频率附近的有用信息也将随之滤除。综上所述，高频窄脉冲冲击响应测量不宜使用速度传感器。

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

12.3 现场检测

12.3.1 增强体头部条件和处理好坏直接影响测试信号的质量。因此，要求受检增强体头部的材质、强度、截面尺寸应与增强体整体基本等同。这就要求在检测前对松散、破损部分进行处理，使得增强体顶部表面平整干净且无积水。因为增强体的强度一般低于混凝土桩，所以桩头处理时强度与下部基本一致即可，不可要求过高，如果按混凝土桩的标准过高要求，容易将符合要求的增强体处理掉。

当增强体与垫层相连时，相当于增强体头部处存在很大的截面阻抗变化，对测试信号会产生影响。因此，测试应该安排在垫层施工前，若垫层已经施工，检测时增强体头部应与混凝土承台断开；当增强体头部的侧面与垫层相连时，应断开才能进行试验。

12.3.2 从时域波形中找到增强体底面反射位置，仅仅是确定了增强体底反射的时间，根据 $\Delta t = 2L / c$ ，只有已知增强体长L才能计算波速c，或已知波速c计算增强体长L。因此，增强体长参数应以实际记录的施工增强体长为依据，按测点至增强体底的距离设定。测试前增强体波速可根据本地区同类型增强体的测试值初步设定，实际分析过程中应按由增强体长计算的波速重新设定或按12.4.1条确定的波速平均值 c_m 设定。

对于时域信号，采样频率越高，则采集的数字信号越接近模拟信号，越有利于缺陷位置的准确判断。一般应在保证测得完整信号(时段 $2L / c + 5ms$ ，1024个采样点)的前提下，选用较高的采样频率或较小的采样时间间隔。但是，若要兼顾频域分辨率，则应按采样定理适当降低采样频率或增加采样点数。

12.3.3 本条是为保证获得高质量响应信号而提出的措施：

1 传感器应安装在增强体顶面，传感器安装点及其附近不得有缺损或裂缝。传感器可用黄油、橡皮泥、石膏等材料作为耦合剂与增强体顶面粘结，或采取冲击钻打眼安装方式，不得采用手扶方式。安装完毕后的传感器必须与增强体顶面保持垂直，且紧贴增强体顶表面，在信号采集过程中不得产生滑移或松动。传感器用耦合剂粘结时，粘结层应尽可能薄，但应具有足够的粘结强度；必要时可采用冲击钻打孔安装方式，传感器底安装面应与增强体顶面紧密接触。

2 相对增强体顶横截面尺寸而言，激振点处为集中力作用，在增强体顶部位可能出现与增强体的横向振型相对应的高频干扰。当锤击脉冲变窄或增强体径增加时，这种由三维尺寸效应引起的干扰加

剧。传感器安装点与激振点距离和位置不同，所受干扰的程度各异。初步研究表明：实心增强体安装点在距增强体中心约 $2/3R$ (R 为半径)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锤击点与安装点响应信号时间差，造成波速或缺陷定位误差。传感器安装点、锤击点布置见图14。竖向增强体的直径往往较小，如果传感器和激振点距离只有相对量的要求，而没有绝对量的要求，部分小直径的竖向增强体可能会导致传感器和激振点间距过小，因此，另外规定的二者的距离不小于10cm。

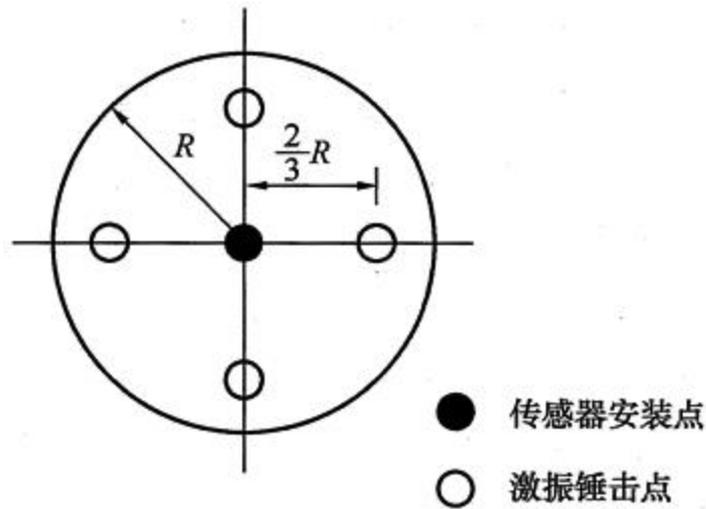


图14 传感器安装点、锤击点布置示意图

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

12. 3. 4 本条是对信号采集和筛选而提出的措施：

1 增强体直径增大时，增强体截面各部位的运动不均匀性也会增加，增强体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增强体结构完整性情况。一般情况下，增强体的直径较小，布置(2~3)个测试点，已经能较好反映桩身完整性的信息，当然，这(2~3)个测点是指能够测到有效的、一致性较好的测点，如果不能，需要增加测点并分析原因。每个检测点有效信号数不宜少于3个，通过叠加平均提高信噪比。

2 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。

12. 4 检测数据分析与判定

12. 4. 1 为分析不同时段或频段信号所反映的增强体阻抗信息、核验增强体底信号并确定增强体缺陷位置，需要确定增强体波速及其平均值 c_m 。波速除与增强体强度有关外，还与骨料品种、粒径级配、密度、水灰比、施工工艺等因素有关。波速与增强体强度整体趋势上呈正相关关系，即强度高波速高，但二者并不是一一对应关系。在影响波速的诸多因素中，强度对波速的影响并非首位。因此，不能依据波速去评定增强体强度等级，反之亦然。对工程地质条件相近、施工工艺相同、同一单位施工的增强体，确定增强体纵波波速平均值，是信号分析的基础。《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106规定 $|c_i - c_m| / c_m \leq 5\%$ 是针对混凝土刚性桩而言的，考虑到竖向增强体波速低(即基数小)，差异大，因此，本规范

取 $|c_i - c_m| / c_m \leq 10\%$ 。

12.4.2 本方法确定增强体缺陷的位置是有误差的,原因是:缺陷位置处 Δt_x 和 $\Delta f'$ 存在读数误差;采样点数不变时,提高采样频率降低了频域分辨率;波速确定的方式及用抽样所得平均值 c_m 替代某具体增强体段波速带来的误差。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。波速在强度低时变化的幅度更大,用桩基中5%的偏差太严格,考虑到复合地基增强体对长度的要求不如桩基严格,这方面适度放宽一些是比较妥当的。

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增强体向下传播,同时在增强体顶又主要以表面波和剪切波的形式沿径向传播。因锤击点与传感器安装点有一定的距离,接收点测到的入射峰总比锤击点处滞后,考虑到表面波或剪切波的传播速度比纵波低得多,特别对大直径增强体,这种从锤击点起由近及远的时间线性滞后将明显增加。而波从缺陷或增强体底以一维平面应力波反射回增强体顶时,引起的增强体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-增强体底反射峰确定的波速将比实际的高,若按“正确”的增强体波速确定缺陷位置将比实际的浅,若能测到 $4L/c$ 的二次增强体底反射,则由 $2L/c$ 至 $4L/c$ 时段确定的波速是正确的。

12.4.3 当检测信号中存在少量高频噪声时,可采用低通滤波方式对测试信号进行处理,以降低测试噪声对测试效果的影响程度,但低通滤波频率应限定在一定范围,否则会使信号失真。若信号存在较多的高频噪声时,应当在检测时通过增强体顶部处理、改变锤头材料或对锤垫厚度进行调整以降低高频噪声,而不能期待事后进行数字滤波。指数放大是提高增强体中下部和底部信号识别能力的有效手段,指数放大倍数宜为(2~20)倍,能识别底部反射信号为宜,过大的放大倍数会使干扰信号一同放大,也可能会使测试波形尾部明显不归零,影响完整性的分析判断。

12.4.4、12.4.5 这两条规定是对检测数据进行分析判别的依据,表12.4.5列出了根据实测时域或幅频信号特征所划分的增强体完整性类别。

1 完整增强体分析判定,从时域信号或频域曲线特征表现的信息判定相对来说较简单直观,而分析缺陷增强体信号则复杂些,有的信号的确是因施工质量缺陷产生的,但也有是设计构造或施工工艺本身局限导致的,例如:增强体的逐渐扩径再缩回原增强体直径的变截面,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,哪些是因增强体构造、增强体施工工艺、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,还受增强体周围土阻尼大小及缺陷所处的深度位置影响。相同程度的缺陷因增强体周围土性质不同或缺陷埋深不同,在测试信号中其幅值大小各异。因此,如何正确判定缺陷程度,特别是缺陷十分明显时,如何区分是III类增强体还是IV类增强体,应仔细对照增强体类型、地质条件、施工情况结合当地经验综合分析判断。

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

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

3 表12.4.5信号特征中,有关测不到增强体底部信号这种情况是受多种因素和条件影响,例如:
——软土地区较长的增强体,长径比很大;

- 增强体阻抗与持力层阻抗匹配良好；
- 增强体截面阻抗显著突变或沿增强体渐变。

此时的增强体完整性判定，只能结合经验、参照本场地和本地区的同类型增强体综合分析或采用其他方法进一步检测。

4 对设计条件有利的扩径增强体，不应判定为缺陷增强体，故仍划分为 I 类。

12. 4. 8、12. 4. 9 这两条规定是对低应变法报告的更具体的要求，其中特别要求了要给出实测信号曲线，不能只给个判断的结论，或过度人为处理的曲线。这是因为检测人员水平高低不同，测试过程和测量系统各环节容易出现异常，人为信号处理影响信号真实性，从而影响结论判断的正确性，只有根据原始信号曲线才能鉴别。

13 扁铲侧胀试验

13. 1 一般规定

13. 1. 1 扁铲侧胀试验(DMT)，也有译为扁板侧胀试验，是20世纪70年代意大利 Silvano Marchetti 教授创立。扁铲侧胀试验是将带有膜片的扁铲压入土中预定深度，充气使膜片向孔壁土中侧向扩张，根据压力与变形关系，测定土的模量及其他有关指标。因能比较准确地反映小应变的应力-应变关系，测试的重复性较好，引入我国后，受到岩土工程界的重视，进行了比较深入的试验研究和工程应用，已列入中华人民共和国国家标准《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)和中华人民共和国行业标准《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018-2003，美国 ASTM 和欧洲 EUROCODE 亦已列入。经征求意见，决定列入本规范。

扁铲侧胀试验最适宜在软弱、松散土中进行，随着土的坚硬程度或密实程度的增加，适宜性渐差。当采用加强型薄膜片时，也可应用于密实的砂土，参见表12。

表12 扁铲侧胀试验在不同土类中的适用程度

土的性状 土类	$q_c < 1.5\text{MPa}$, $N < 5$		$q_c = 7.5\text{MPa}$, $N = 25$		$q_c = 15\text{MPa}$, $N = 40$	
	未压实填土	自然状态	轻压实填土	自然状态	紧密压实填土	自然状态
黏土	A	A	B	B	B	B
粉土	B	B	B	B	C	C
砂土	A	A	B	B	C	C
砾石	C	C	G	G	G	G
卵石	G	G	G	G	G	G
风化岩石	G	C	G	G	G	G

带状黏土	A	B	B	B	C	C
黄土	A	B	B	B	—	—
泥炭	A	B	B	B	—	—
沉泥、尾矿砂	A	—	B	—	—	—

注：适用性分级：A 最适用；B 适用；C 有时适用；G 不适用。

在有使用经验的地区，使用 DMT 可划分土层并定名，确定静止侧压力系数、超固结比、不排水抗剪强度、变形参数、侧向地基基床系数乃至判定地基液化可能性等。

13.1.3 当采用扁铲侧胀试验评价地基承载力和变形参数时，应结合载荷试验比对结果和地区经验进行评价。规定在同一工程内或相近工程进行比对试验，取得本地区相近条件的对比验证资料。载荷试验的承压板尺寸要考虑应力主要影响范围能覆盖主要加固处理土层厚度。

13.2 仪器设备

13.2.2 设备标准化是扁铲侧胀试验的基础。为使本规程向国际现有标准靠拢，达到保证试验成果质量和资料通用的目的，本条文对扁铲测头的技术性能作了强调。

13.2.3 控制装置主要为测控箱，主要作用是控制试验的压力和指示膜片三个特定位置时的压力，并传送膜片到达特定位移量时的信号。

蜂鸣器和检流计应在扁铲测头膜片膨胀量小于0.05mm 或大于等于1.10mm 时接通，在膜片膨胀量大于等于0.05mm 与小于1.10mm 时断开。

膜片膨胀的三个特殊位置的状态见表13。

表13 扁铲侧胀试验膜片膨胀的三个特殊位置及对应状态

位置编号	膨胀量	状态	蜂鸣器和检流计
1	小于0.05mm	压偏	接通
2	大于等于0.05mm 且小于1.10mm	膨胀	断开
3	大于等于1.10mm	完全膨胀	接通

一只充气15MPa 的10L 气瓶，在中密度土和25m 长管路的试验，一般可进行1000个测点试验。耗气量随土质密度和管路的增加(长)而增大。

贯入设备是将扁铲测头送入预定试验土层的机具。一般土层中利用静力触探机具代替；在硬塑黏性土或较密实砂层中，利用标准贯入试验机具替代；对于坚硬黏土还可采用液压钻机。

应优先选用静力触探设备，扁铲测头的贯入速率与静力触探探头贯入速率一致，即每分钟20cm 左右，贯入探杆与测头通过变径接头连接。

扁铲测头可用以下方式压入土中：

(1) 主机为静力触探机具压入，可采用国内目前各种液压双缸静力触探机和 CLD-3 型手摇静探机(φ28mm 以上探杆，接头内径大于或等于12mm，气电管路可贯穿)；

(2) 主机为液压钻机压入，若试验在钻孔中，从钻孔底部开始，气电管路可不用贯穿于钻杆中而直接在板头以上的钻杆任何部位的侧面引出；

(3) 标准贯入设备锤击击入；

(4) 水下试验可用装有设备的驳船以电缆测井法压入或打入。

锤击法会影响试验精度，静力触探设备以手摇静探机压入较理想，应优先选用。

13.3 现场检测

13.3.1 扁铲侧胀试验操作属多岗位联合作业性质，其成果质量与现场操作者的技术素质和工作质量有关，有必要对操作人员进行职业培训。

13.3.2 扁铲侧胀试验具体操作过程如下：

1) 关闭排气阀，缓慢打开微调阀，在蜂鸣器停止响声瞬间记录气压值，即 A 读数；

2) 继续缓慢加压，直至蜂鸣器鸣响时，记录气压值，即 B 读数；

3) 立即打开排气阀，并关闭微调阀以防止膜片过度膨胀导致损坏；

4) 将探头贯入至下一测点，在贯入过程中排气阀始终打开，重复下一次试验。

若在试验中需要获取 C 读数，应在步骤3) 中打开微排阀而非打开排气阀，使其缓慢降压直至蜂鸣器停后再次鸣响(膜片离基座为0.05mm)时，记录 C 读数。

在大气压力下，膜片自然地提起高于它的支座，在 A 位置(膨胀0.05mm)与 B 位置(膨胀1.10mm)之间，控制装置的蜂鸣器是关着的。气压必须克服膜片刚度，并使它在空气中移动，使膜片从自然位置移至 A 位置时为 ΔA ，移至 B 位置时为 ΔB 。它们是不可忽略的。标定程序包括 ΔA 和 ΔB 的气压值，便于修正 A、B、C 的读数。

新膜片的标定值通常在许用范围值之外，而且，在试验或标定中，未实践的新膜片标定值总不稳定。解决的办法即为老化处理过程。重复对膜片加压和减压，增大 ΔA ，减少 ΔB ，直到它们达许用范围。

取出侧胀板头后，要用直角尺和直尺检查其弯曲度和平面度。直角尺靠在板头上接头两侧，量测两板面到直角尺距离，差值应小于4mm，否则应予校直。用150mm直尺沿板头轴向置于板面凹处，倘用0.5mm塞规插不进，其弯曲程度可以接受，若能插进，则需校正(可用液压机或杠杆方法校直)。

试验完毕后应对气电管路作下列检查：

(1) 检查管路两端接头的导通性、绝缘性是否良好；

(2) 将管路一端密封放入水中，另一端接入4MPa气压，检查管路有无泄漏；

(3) 检查管路有无阻塞；将一根长管路一端接入测控箱上，另一端空着，加压4MPa，压力表指针不应超过800kPa，超过此值，视阻塞程度加以修改；

(4) 检查管路是否夹扁或破裂。

13.4 检测数据分析与判定

13.4.2 扁铲侧胀试验中测得的 A 压力是作用在膜片内部使膜片中心向周围土体水平推进0.05mm时所需的气压，为获得膜片在向土中膨胀之前作用在膜片上的接触力 P_0 (无膨胀时)，需要修正 A 压力以考虑膜片刚度、0.05mm 膨胀本身和排气后压力表零度偏差的影响。Marchetti 和 Crapps(1981年)假设土-膜界面上的压力与膜片位移间的关系成线性，如式(13.4.2-1)。同样，试验中测得的 B 压力是作用在膜片内侧使膜片中心向周围土体推进1.10mm 时所需要的气压，考虑到膜片刚度和排气后压力表零度偏差。故膜片膨胀1.10mm 时的膨胀压力 P_1 可根据式(13.4.2-2)得到。根据正常的压力膨胀程序获得常规的 A 和 B 压力，还可读取 C 压力以获得在控制排气时膜片回到0.05mm 膨胀时膜片

的压力，该压力读数 C 由式(13. 4. 2-3)修正为 P_2 。

扁铲侧胀试验时膜片向外扩张可视为在半无限弹性介质中对圆形面积施加均布荷载 ΔP ，设弹性介质的弹性模量为 E 、泊松比为 μ 、膜片中心的外移量为 s ，则有

$$s = \frac{4R \cdot \Delta P}{\pi} \cdot \frac{(1 - \mu^2)}{E} \quad (2)$$

式中 R 为膜片的半径，即30mm，当试验中外移量 s 为1. 10mm时，且令 $E_D = E / (1 - \mu^2)$ ，则

$$E_D = 34.7 \Delta P \quad (3)$$

式中 $\Delta P = P_1 - P_0$ ，因而侧胀仪模量 $E_D = 34.7 (P_1 - P_0)$ 。

扁铲侧胀试验各曲线随深度变化反映了土层的若干性质，成为定性、定量评估这些性质的重要依据，与静力触探曲线相比较可得如下特征：

- (1) 试验曲线连续，具有类似静力触探曲线直观反映土性变化的特点；
- (2) 黏性土的 I_b 值一般较小， U_b 值一般较大；
- (3) 砂性土的 I_b 值一般较大， U_b 值非常低，接近0；
- (4) 在均质土中贯入， P_0 、 P_1 、 P_2 、 ΔP 、 E_D 均随深度线性递增， I_b 、 U_b 保持稳定， K_b 则呈递减趋势；
- (5) K_b 曲线很大程度上反映地区土层的应力历史，超固结土 K_b 较大；
- (6) 在非均质土中贯入，各曲线起伏变化较大，遇砂性土变化加剧。

水平应力指数 K_0 为1. 5~4. 0的一般饱和黏性土，静止土压力系数 K_0 可按下式计算：

$$K_0 = 0.30 K_D^{0.54} \quad (4)$$

在连云港、宁波、无锡、昆山、武昌地区，对一般饱和黏性土(含软黏土)共开展了52组扁铲和DMT对比试验，得到静止侧压力系数与 K_0 关系如下：

$$K_0 = 0.34 K_D^{0.54} \quad (5)$$

膨胀压力 $\Delta P \leq 100 \text{kPa}$ 的饱和黏性土，不排水杨氏模量 E_u 可按下式计算：

$$E_u = 3.5 E_D \quad (6)$$

在昆山、无锡、武昌三地进行了钻孔取样做三轴不排水压缩试验与DMT、CPT进行对比，在39组 E_u 与 E_D 数据中有32组 $\Delta P \leq 100 \text{kPa}$ 的饱和黏性土，其关系为 $E_u = 2.92 E_D$ 。

饱和黏性土、饱和砂土及粉土地基的基准水平基床系数 K_{hl} (kN / m^3) 可按下式计算：

$$K_{hl} = 0.2 K_h \quad (7)$$

$$K_h = 1817 (1 - A) (P_1 - P_0) \quad (8)$$

式中: K_h ——侧胀仪抗力系数;

A——孔隙压力系数, 无室内试验数据时, 可按表14取值;

1817——量纲为 m^{-1} 的系数。

表14 饱和土的 A 值

土类	砂类土	粉土	粉质粘土		粘土	
			OCR=1	1<OCR≤4	OCR=1	1<OCR≤4
A	0	0.10~0.20	0.15~0.25	0~0.15	0.25~0.5	0~0.25

若假定土体在小应变条件下为弹性体且侧胀仪膜片对土体的膨胀压力可视为平面应力(单向压缩), 则用 DMT 测定地基水平基床系数是可行的。

下面给出上海、深圳各土层扁铲测试结果及分析取值方法, 见表15、表16。

表15 上海市各土层扁铲侧胀试验结果统计

土层 编号	土层 名称	汇总							
		土类指数 I_D		水平应力指数 K_D		扁铲模量 E_D (MPa)		孔压指数 U_D	
		平均值	子样数	平均值	子样数	平均值	子样数	平均值	子样数
		最大值	均方差	最大值	均方差	最大值	均方差	最大值	均方差
		最小值	变异系数	最小值	变异系数	最小值	变异系数	最小值	变异系数
② ₀	粉质 黏土 (江滩 土)	0.52	29	3.52	29	3.05	29	-0.28	1
		2.00	0.47	5.41	0.85	10.31	2.65		
		0.24	0.91	2.23	0.25	1.17	0.89		
② ₁	粉质 黏土			5.88	1	2.48	1		

③ _上	淤泥 质粉 质黏 土	0.25	19	5.70	14	1.62	17		
		1.66	0.36	6.62	3.84	11.15	2.61		
		0.03	1.50	3.95	0.70	0.18	1.66		
③ _夹	黏质 粉土	0.57	32	4.40	24	4.31	28	0.19	1
		2.57	0.60	6.30	2.71	11.91	3.86		
		0.11	1.07	2.59	0.63	0.73	0.91		
③ _下	淤泥 质粉 质黏 土	0.20	23	3.77	20	1.59	23	-0.05	4
		0.27	0.02	4.23	1.50	2.40	0.19	0.06	
		0.17	0.12	3.38	0.41	1.46	0.12	-0.17	
④	淤泥 质黏 土	0.21	178	2.89	170	2.19	180	0.10	37
		0.80	0.08	3.74	0.92	5.61	0.82	0.43	0.12
		0.12	0.38	1.78	0.32	1.13	0.37	-0.21	1.33
⑤ ₁	粉质 黏土	0.25	115	2.64	115	3.69	115	0.17	23
		2.00	0.17	3.07	0.25	20.59	1.71	0.30	0.08
		0.13	0.69	1.65	0.09	1.75	0.47	-0.01	0.52
⑥	粉质 黏土	0.49	97	3.26	97	11.62	97	0.16	18
		0.68	0.07	4.11	0.33	17.74	2.16	0.29	0.06
		0.24	0.15	2.74	0.10	5.28	0.19	0.06	0.39
⑦ ₁	砂质 黏土	0.85	3	3.37	3	21.96	3		
		1.34		3.95		29.40			
		0.30		2.61		8.67			

表16 深圳市各土层扁铲侧胀试验结果统计

地层年代	成因及名称	指标名称	初始应力 P_0 (kPa)	膨胀压力 P_1 (kPa)	ΔP (kPa)	扁胀模量 E_D (MPa)	水平压力 指数 K_D	材料指数 I_D	静止侧压力 系数 K_0
		统计项目							
Q^{ml}	人工填土	统计件数	26	26	26	26	26	26	26
		最小值	98.85	177.00	16.80	0.58	1.43	0.11	0.41
		最大值	626.03	1528.50	1120.88	38.89	9.07	5.89	0.74
		平均值	232.02	516.46	284.44	9.87	3.34	1.27	0.56
		标准差	120.71	396.82	315.47	10.95	1.80	1.35	0.09
		变异系数	0.52	0.77	1.11	1.11	0.54	1.06	0.17
Q^{al+pl}	淤泥质黏土	统计件数	8	8	7	7	8	7	8
		最小值	150.00	171.00	12.60	0.44	2.99	0.07	0.52
		最大值	391.93	730.00	489.30	16.98	6.00	2.23	0.80
		平均值	255.40	362.50	128.52	4.46	3.93	0.52	0.65
		标准差	67.39	164.49	120.78	4.19	0.93	0.50	0.08
		变异系数	0.26	0.45	0.94	0.94	11.05	50.33	39.29
	中粗砂 (混淤泥)	统计件数	7	7	6	6	7	6	7
		最小值	59.00	206.00	4.20	0.15	0.79	0.02	0.30
		最大值	217.45	263.00	186.90	6.49	2.92	3.00	0.61
		平均值	203.26	231.40	35.18	1.22	2.54	0.21	0.56
		标准差	14.39	20.80	31.01	1.08	0.20	0.19	0.02
		变异系数	0.07	0.09	0.88	0.88	0.08	0.94	0.04
Q^{al+pl}	黏土①	统计件数	27	27	27	27	27	27	27
		最小值	175.08	317.00	84.53	2.93	1.54	0.36	0.43
		最大值	757.88	2245.00	1565.03	54.31	9.44	4.20	0.72
		平均值	407.82	1055.94	648.12	22.49	3.66	1.65	0.58
		标准差	146.02	546.31	438.67	15.22	1.57	0.96	0.08
		变异系数	0.36	0.52	0.68	0.68	0.43	0.58	0.14
	砂砾①	统计件数	27	27	27	27	27	27	27
		最小值	175.08	317.00	84.53	2.93	1.54	0.36	0.43
		最大值	757.88	2245.00	1565.03	54.31	9.44	4.20	0.72
		平均值	407.82	1055.94	648.12	22.49	3.66	1.65	0.58
		标准差	146.02	546.31	438.67	15.22	1.57	0.96	0.08
		变异系数	0.36	0.52	0.68	0.68	0.43	0.58	0.14
	黏土②	统计件数	6	6	6	6	6	6	6
		最小值	66.28	302.00	235.73	8.18	0.68	1.89	0.28
		最大值	580.73	1605.00	1163.93	40.39	7.11	7.23	0.87
		平均值	407.13	1412.50	1005.38	34.89	5.20	3.43	0.62
		标准差	139.55	124.96	110.73	3.84	1.77	2.20	0.15
		变异系数	0.34	0.09	0.11	0.11	0.34	0.64	0.23

Q ^{al+pl}	砂砾②	统计件数	34	34	34	34	34	34	34
		最小值	110.95	238.00	127.05	4.41	0.46	1.04	0.22
		最大值	1024.25	2228.00	2086.35	72.40	8.13	46.73	0.98
		平均值	415.61	1498.03	1082.42	37.56	3.69	3.88	0.56
		标准差	201.69	629.10	507.40	17.61	1.78	3.58	0.13
		变异系数	0.49	0.42	0.47	0.47	0.48	0.92	0.24
Q ^{cl}	含砾黏土	统计件数	12	12	12	12	12	12	12
		最小值	39.13	278.00	238.88	8.29	1.09	0.94	0.36
		最大值	798.88	1956.50	1157.63	40.17	11.22	6.11	0.58
		平均值	472.72	1226.20	753.48	26.15	7.25	2.02	0.54
		标准差	206.14	480.39	280.73	9.74	2.78	1.37	0.06
		变异系数	0.44	0.39	0.37	0.37	0.38	0.68	0.12
Q ^{cl}	砾质黏土	统计件数	272	272	272	272	272	272	272
		最小值	54.75	60.00	5.25	0.18	0.14	0.19	0.12
		最大值	1213.03	2848.00	2049.60	72.12	10.57	7.28	0.72
		平均值	544.61	1257.35	712.74	24.73	4.18	1.54	0.56
		标准差	191.91	428.78	293.22	10.17	1.72	0.88	0.10
		变异系数	0.35	0.34	0.41	0.41	0.41	0.57	0.19

13. 4. 3 根据《工程地质手册》地基土承载力计算强度：

$$f_0 = n(P_1 - P_0) \quad (9)$$

式中：f₀——地基承载力计算强度；

n——经验修正系数，黏土取1.14(相对变形约0.02)，粉质黏土取0.86(相对变形约0.015)。

根据《建筑地基基础设计规范》GBJ 7-89(已废止)的附录五土(岩)的承载力标准值的规定，即可求得地基土承载力特征值 f_{ak}。

上式中(P₁-P₀)。为同一土层样本测试结果按平均值统计。

13. 4. 5 扁铲侧胀试验成果的应用经验目前尚不丰富。根据铁道部第四勘察设计院和上海岩土工程勘察设计院有限公司的研究成果，利用侧胀土性指数 I_b划分土类、黏性土的状态，利用侧胀模量计算饱和黏性土的水平不排水弹性模量，利用侧胀水平应力指数 K_b确定土的静止侧压力系数等，均有良好效果，并列入铁道部《铁路工程地质原位测试规程》TB 10018-2003。上海、天津以及国际上都有一些研究成果和工程经验，由于扁铲侧胀试验在我国开展较晚，故应用时必须结合当地经验，并与其他试验方法配合，相互印证。

采用平均值法计算每个检测孔的扁铲模量、水平应力指数代表值。

利用《岩土工程勘察规范》GB 50021-2001(2009年版)第14.2条岩土参数的分析和选定中的规定，来计算同一土层或同一深度范围的扁铲模量、水平应力指数标准值。

14 多道瞬态面波试验

14. 1 一般规定

14. 1. 1 目前波速测试方法很多，包括单孔法、跨孔法和面波法，而面波法还有瞬态面波和稳态面波之分。基于目前在测试中，多道瞬态面波法测试方法简便，在地基处理检测中得到推广应用，本次仅将多道瞬态面波编入规范。单孔法和跨孔法已经很成熟，但测试成本较高，适于进行深度较大波速测试，主要应用于勘察场地分类中；而稳态面波虽技术成熟，但由于设备较重成本较高，不利于推广

使用，目前工程中应用较少。多道瞬态面波法对地基进行大面积普查，既能降低成本、扩大检测面，又能提高检测速度和精度，在检测地基均匀性方面有独到优势。目前均匀性还停留在宏观定性判断，还不能进行定量判定。

14.1.2 多道瞬态面波法是一种物探手段，用于宏观定性判别岩土体的密实情况和均匀性。若使其波速测试结果和工程地质参数相对应，应结合该场地的地质资料和其他原位测试结果比较后综合判定。

14.1.3 当采用多道瞬态面波试验评价地基承载力和变形参数时，应结合载荷试验比对结果和地区经验进行评价，本章节中提供的承载力表格仅供初步评价时进行估算。应结合单位工程地质资料，在同一工程内或相近工程进行比对试验，取得本地区相近条件的对比验证资料。载荷试验的承压板尺寸要考虑应力主要影响范围能覆盖主要加固处理土层厚度。在没有经验公式可供参考，也没有可对比静载试验的地区或场地，应结合单位工程地质资料，采用普测方法，将获得的波速绘制成等值线，从波速等值线可以定性判断场地地基的加固效果和深度，初步确定整个场地的相对“软”和“硬”区域及程度，从而达到定性评价地基均匀性的目的。然后在相对较“软”的地方重点布置其他原位测试手段，这样可以避免测点布置的盲目性。

14.1.4 从检测次序角度来讲，宜先采用面测方法，如多道瞬态面波法，后采用点测方法，如动探、静载试验等。地基加固前后的检测是目前研究的一个热点问题，常用的检测方法是在地表做平板载荷试验来确定地基的承载力，用钻探、标贯或动力触探试验来确定其深层的加固程度和加固深度。特别是常规检测方法难以判定的碎石土地基检测方法，各种方法均有其优缺点和适用性，静载试验和动探方法在抽查数量较少时易漏掉薄弱部位，抽查数量较大时费时费钱，特别是针对大厚度开山碎石回填地基，多道瞬态面波法有其突出的优点。近年国内外围海造田和开山造陆工程的大量开展形成的大粒径回填地基，更凸显了多道瞬态面波法效率高、速度快、精度高等优点。

14.1.5 若检测现场附近有夯机、桩机或重型卡车等大型机械的振动，甚至风速过大，都会影响到测试数据的准确性。测试应避免这些震源，或选择在早晨工地开工前或晚上工地下工后进行检测。对测试到的频散曲线要在现场有个初步判断。若数据较差应重新测试直至取得合理数据。

14.2 仪器设备

14.2.1 本条是对目前地基检测中多道瞬态面波勘察方法所需仪器设备性能的基本条件。对波速差别大的地层，或具有低速夹层，宜采用更多的通道，以保证空间分辨率。

多道瞬态面波勘察仪器的主要技术参数如下：

通道数：24道(12、24道或更多通道)；

采样时间间隔：一般为10、25、50、100、250、500、1000、2000、4000、8000(μ s)；

采样点数：一般分512、1024、2048、4096、8192点等；

模数转换： ≥ 16 位；

动态范围： ≥ 120 dB；

模拟滤波：具备全通、低通、高通功能；

频带宽度：0.5Hz~4000Hz。

14.2.2 在锤击、落重、炸药三种震源中，锤击激发的地震波频率最高，采用大锤人工敲击地面，可获得深度20m 以内的面波频散信息；落重激发面波频率次之，采用标贯锤或其他重物，吊高一至数米，自由落下，激发出较低频率面波和得到较深处(一般不超过30m)的频散信息；炸药震源频率最低，

用它可得到更深处(一般不超过50m)的频散信息。

14. 2. 3 本条是对检波器的基本要求。检波器是面波测试的重要组成部分,它的频响特性、灵敏度、相位的一致性以及与地面(或被测介质表面)的耦合程度,都直接影响面波记录的质量。

14. 2. 5 本条主要对面波测试接收和处理软件进行规定,目前常用的面波测试软件基本都有剔除坏道或插值的功能,自动提取频散曲线和自动或手动剪切波速分层反演功能等。

14. 3 现场检测

14. 3. 2、14. 3. 5 由于面波测试受到振动干扰影响较大,根据以往经验,现场应通过测试前试验确定测试相关参数,或尽量避开干扰波影响;在测试过程中对周围环境和天气情况也要加强注意,大风或周围环境介质干扰也会对测试产生影响,必要时应采取一定措施。

面波测试之前应明确测试目的和环境,根据测试目的和环境不同,调整测试参数。对于进行地层分层测试,需要有现场对比钻孔资料;如仅仅对地基加固效果进行评价时,应在同一点进行地基加固前后的对比;如需要通过反演剪切波速换算地基承载力和模量时,应有其他如静载试验或动力触探等原位测试资料可参照,数量应满足回归计算的需要。

14. 3. 3 测试记录通道12道和24道为常用通道数量,从精度上来看,地基检测常用道间距一般不超过2m,激发距离应满足采集需要,为同一采集方法,这里作了基本规定。

14. 3. 6 对大面积地基处理采用普测时,测点间距应根据精度要求来确定。

14. 4 检测数据分析与判定

14. 4. 1 面波数据资料预处理时,应检查现场采集参数的输入正确性和采集记录的质量。若质量不合格应再次采集。采用具有提取频散曲线的功能的软件,获取测试点的面波频散曲线。

14. 4. 2 频散曲线的分层,应根据曲线的曲率和频散点的疏密变化综合分析;分层完成后,反演计算剪切波层速度和层厚。

14. 4. 3、14. 4. 4 对需要计算动参数的场地,可以直接使用面波测试结果进行换算。必要时可用 V_s 计算地基的动弹性模量、动剪切模量和动泊松比。地基的弹性模量、动剪切模量和泊松比应按下列公式计算:

$$G_d = (\rho/g) \cdot V_s^2 \quad (10)$$

$$E_d = 2(1 + \mu_d) \cdot (\rho/g) \cdot V_s^2 \quad (11)$$

$$\mu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2[(V_p/V_s)^2 - 1]} \quad (12)$$

式中: G_d ——动剪切模量(kPa);

E_d ——动弹性模量(kPa);

μ_d ——动泊松比;

ρ ——重力密度 (kN / m^3);
 g ——重力加速度 (m / s^2).

14. 4. 6 在大面积普测中, 可以通过计算分层等效剪切波速, 绘制分层等效剪切波速等值线图, 通过等值线图直观展示波速高低, 对整个场地的波速均匀性进行判定; 如场地有剪切波速-承载力或模量回归关系, 同样可以通过计算绘制承载力或模量的等值线图, 方便设计根据场地情况进行设计。对于单一面波测试报告, 可以结合相关规范评价场地的均匀性; 如需要对场地承载力和模量进行评价, 应结合本场地的其他原位测试结果进行判定。地基加固后波速超过加固前波速的深度可判为按照本方法判定的地基处理有效加固深度。

14. 4. 7 波速与变形模量、波速与承载力之间存在一定的关系, 但各个场地之间的差异较大。鉴于目前碎石土收集的资料较全面 (25项工程200项静载与波速的对比资料, 见图15、图16), 为

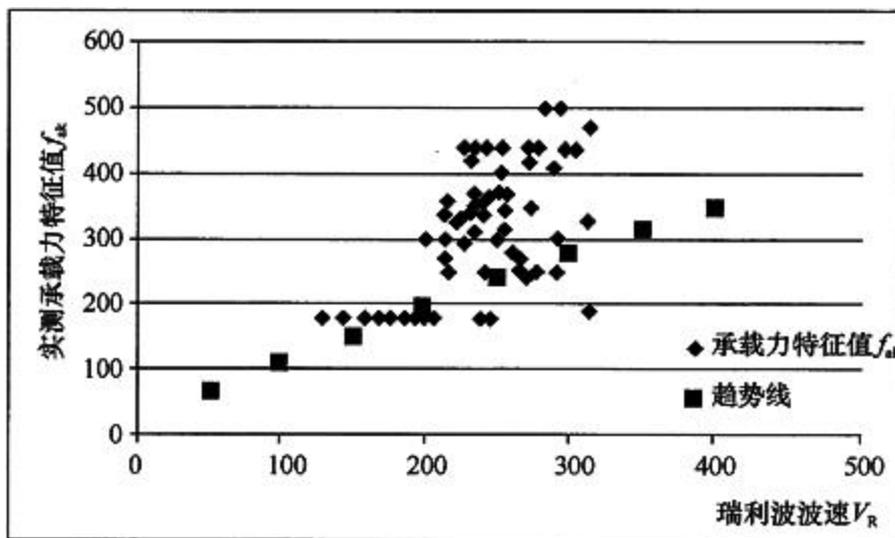


图15 实测承载力特征值 f_{ak} 与瑞利波波速 V_R 关系图

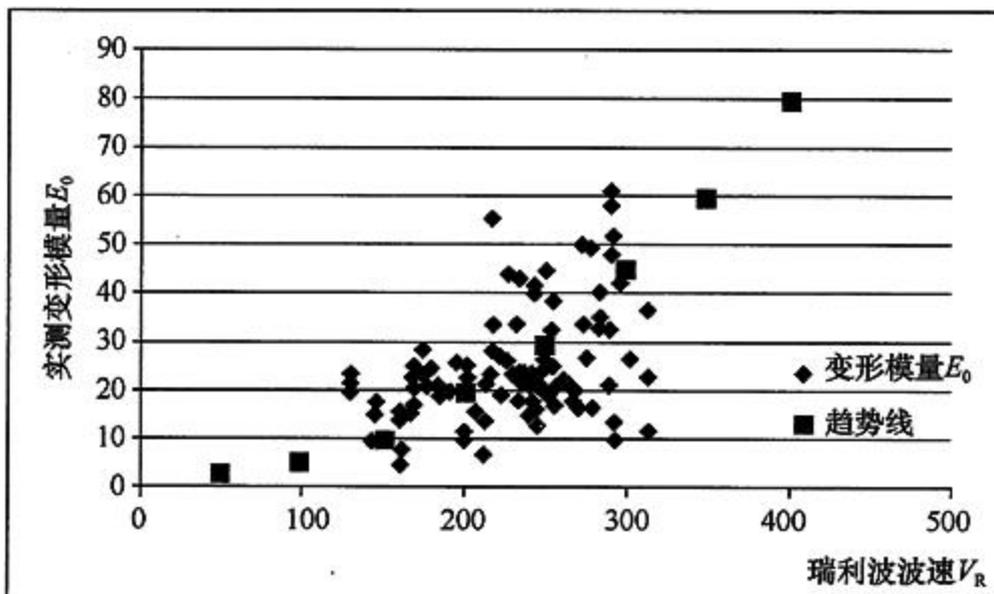


图16 实测变形模量 E_0 与瑞利波波速 V_R 关系图

保证规范的严肃性和安全度，先提出碎石土波速与变形模量、波速与承载力之间的关系，其他土类的关系在相关资料补充全面后再提出。

14. 4. 8 多道瞬态面波测试应强调结合地质条件和其他原位测试结果综合判断。