DB21

辽 宁 省 地 方 标 准

DB21/Txxx-2023

Jxxxx-2023

大直径基桩自平衡法静载试验技术规程

Technical Specification for Static Load Test of Self-balancing Method of Large Diameter Foundation Pile

（征求意见稿）

2023-××－××发布　　2023－××－××实施

辽宁省住房和城乡建设厅

联合发布

辽宁省市场监督管理局

辽 宁 省 地 方 标 准

大直径基桩自平衡法静载试验技术规程

Technical Specification for Static Load Test of Self-balancing Method of Large Diameter Foundation Pile

DB21/T-xxx-2023

Jxxxx-2023

主编单位：辽宁省建筑设计研究院岩土工程有限责任公司

批准部门：辽宁省住房和城乡建设厅

施行日期：202×年×月×日

×××××出版社

202× 沈阳

前　言

本规程是根据辽宁省市场监督管理局文件《辽宁省市场监督管理局关于印发 2021 年辽宁省地方标准立项计划的通知》（辽市监发[2021] 19 号）的要求，由辽宁省建筑设计研究院岩土工程有限责任公司会同有关单位经广泛调查研究，认真总结工程经验，参考有关国内外先进标准，并在广泛征求意见基础上，制定了本规程。

本规程主要包括总则、术语和符号、基本规定、现场检测、测试数据的分析与判定等五部分内容及有关附录。

本规程由辽宁省住房和城乡建设厅负责管理，由辽宁省建筑设计研究院岩土工程有限责任公司负责具体技术内容的解释。执行本规程过程中如有意见和建议的资料，请寄送至辽宁省建筑设计研究院岩土工程有限责任公司（地址：辽宁省沈阳市和平区和平南大街 84 号；邮政编码：110005；E-mail：syytgs@126.com）。

主编单位：辽宁省建筑设计研究院岩土工程有限责任公司

参编单位：中建东设岩土工程有限公司

北方测盟科技有限公司

沈阳中冶检测工程有限公司

辽宁省市政工程设计研究院有限责任公司

辽宁政测科技集团方正质检有限公司

辽宁中冶勘察设计有限公司

沈阳市勘察测绘研究院有限公司

大连市建筑工程质量检测中心有限公司

营口市城乡建设与公用事业中心

锦州衡基检测有限公司

浙江欧感机械制造有限公司

南京赛宝液压设备有限公司

国家电投集团东北电力有限公司抚顺热电分公司

中国建筑第二工程局有限公司

辽宁冶地工程检测有限公司

北京城乡建设集团有限责任公司

本规程主要起草人：刘忠昌　苏艳军　顾银锋（以下按姓氏笔画为序）

于国太　王　峰　王　磊　王林林　王晓滢

朱光宇　任维军　刘　军　刘升传　苏　军

苏金强　张力佳　张传波　张忠仁　张恒兵

陈立柱　林国友　练国平　赵翔宇　赵德发

钟光强　徐香军　崔箫坡　葛宝玉　舒昭然

谭　洪　戴　悦

本规程主要审查人员：

目　次

1　总则 1
2　术语、符号 2
　2.1 术语 2
　2.2 符号 4
3　基本规定 6
　3.1 一般规定 6
　3.2 检测方案 7
　3.3 检测程序 7
　3.4 检测报告 9
4　现场检测 10
　4.1 仪器设备 10
　4.2 设备安装 11
　4.3 现场测试 14
5　测试数据分析与判定 16
附录 A　荷载箱埋设位置确定 22
附录 B　桩身内力测试 23
附录 C　自平衡法静载试验数据记录表 27
附录 D　试验后注浆处理要求及工艺 28
附录 E　荷载箱的技术要求 30
本规程用词说明 32
引用标准名录 33
条 文 说 明 34

1 总 则

1.0.1 为了规范辽宁省行政区域内基桩自平衡法静载荷试验检测方法和技术要求，使检测工作符合安全适用、技术先进、经济合理、操作规范、评价准确的要求，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于各种岩土中的大直径基桩的承载力检测与评价，特别适用于传统静载试验条件受限时的承载力检验，也可以用于斜桩静载荷试验和岩石地基载荷试验。

1.0.3 基桩自平衡法静载荷试验除应执行本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 术语、符号

2.1 术 语

2.1.1 自平衡法 self-blancing test

在桩身某一部位施力，使得桩身向上或向下互为反力以求达到力的平衡，从而求得单桩竖向承载力的一种试验方法。

2.1.2 自平衡法静载试验 self-balanced static loading test

在桩身中预埋荷载箱，利用桩身自重、桩侧阻力及桩端阻力互相提供反力的试验方法。

2.1.3 平衡点 balanced position

基桩上段桩桩身自重及极限桩侧摩阻力之和与下端桩极限桩侧摩阻力及极限端阻力之和基本相等的位置。

2.1.4 荷载箱 loading box

自平衡检测法中放置于桩平衡点位置的用于施加荷载的一种特制装置。

2.1.5 基准梁 referenced beam

用于固定变形测量设备的刚性梁。

2.1.6 基准桩 referencsd pile

用于固定基准梁且不能有任何变形的装置。

2.1.7 单桩竖向极限承载力 Ultimate vertical bearing capacity of a single pile

单桩在竖向荷载作用下到达破坏状态前或出现不适于继续承载的变形时所对应的最大荷载。

2.1.8 等效转换方法 Equivalent conversion method

将自平衡静载试验的荷载箱向上、向下的荷载-位移曲线等效转换为相应传统静载试验的荷载-位移曲线的方法。

2.2 符 号

2.2.1 抗力和材料性能

Q_u——单桩竖向抗压、抗拔极限承载力；

$Q_u^{上}$——上段桩竖向抗压、抗拔极限承载力；

$Q_u^{下}$——下段桩竖向抗压、抗拔极限承载力；

E_p——桩身材料等效弹性模量。

2.2.2 作用与作用效应

W——荷载箱上段桩自重与附加重量之和；

Q——桩顶等效荷载；

s——桩顶等效位移。

2.2.3 几何参数

A_p——桩身截面面积；

A_D——桩端截面积；

A_{hd}——荷载箱底板面积；

$L_{上}$——上段桩长；

D——桩端直径；

d_{hd}——荷载箱底板直径。

2.2.4 计算系数

γ——抗压侧阻力转换系数：对应于不同土质桩荷载箱以上部分向下方向侧阻力极限值（相当于抗拔）换算成相同位置处桩向上方向侧阻力极限值（相当于抗压）的折减系数；

C——基桩的侧阻分布系数；

k——扩底桩尺寸系数。

3 基 本 规 定

3.1 一 般 规 定

3.1.1 基桩自平衡法静载试验测试技术可用于为设计提供依据的试验桩检测和工程桩的验收检测。

3.1.2 最大加载值：

1 为设计提供依据的试验桩，按设计要求确定，应加载至桩侧与桩端的岩土阻力达到极限状态，最大加载值可取预估极限承载力的1.2～1.5倍；

2 为验收提供依据的工程桩，最大加载值应满足设计对承载力的检测与评价要求，当设计无明确要求时最大加载值为设计特征值的2倍；

3 当设置多层荷载箱时上段桩荷载箱最大加载值取预估极限摩阻力的1.2倍。

3.1.3 荷载箱选择：荷载箱极限输出推力不小于预估最大加载值1.2倍。

3.1.4 基桩自平衡静载试验的检测数量应满足设计要求，不应少于同一条件下桩基分项工程总桩数的1%，且不应少于3 根；当总桩数少于50根时，检测数量不应少于2根。

3.1.5 大直径灌注桩自平衡静载试验检测前，应先进行桩身完整性检测，宜优先采用声波透射法。

3.1.6 为设计提供依据的试验桩桩位应符合设计要求。设计无要求时，宜选择在有代表性的地质条件处布置。

3.1.7 工程桩承载力检测应评价受检桩单桩承载力是否满足设计要

求。当单桩承载力特征值不满足设计要求时，由原设计单位核算满足安全和使用后，可以验收；当不满足时，应分析原因或进行扩大检测。

3.1.8 工程桩承载力验收检测后，应在荷载箱位置处进行注浆处理，处理后的工程桩可正常使用。

3.1.9 检测使用的计量器具均应在检定（校准、验证）有效期内，性能符合相应检测方法的技术要求，所用的检测仪器设备实行唯一性编号。检测前应对仪器设备检查调试。

3.2 检 测 方 案

3.2.1 检测单位应根据设计、勘察、施工等资料编制检测方案，检测方案宜包括以下内容：

1 工程概况、地质条件、桩基设计参数和施工工艺等；

2 试验目的、试验要求及试验依据、检测数量和受检桩选取原则；

3 荷载箱的规格、数量、埋设位置和预估最大加载值；

4 检测桩的施工要求、所需的机械或人工配合、检测进度计划等；

5 检测安全和质量保证措施等。

3.3 检 测 程 序

3.3.1 基桩自平衡法静载试验检测程序，应按图 3.3.1 进行。

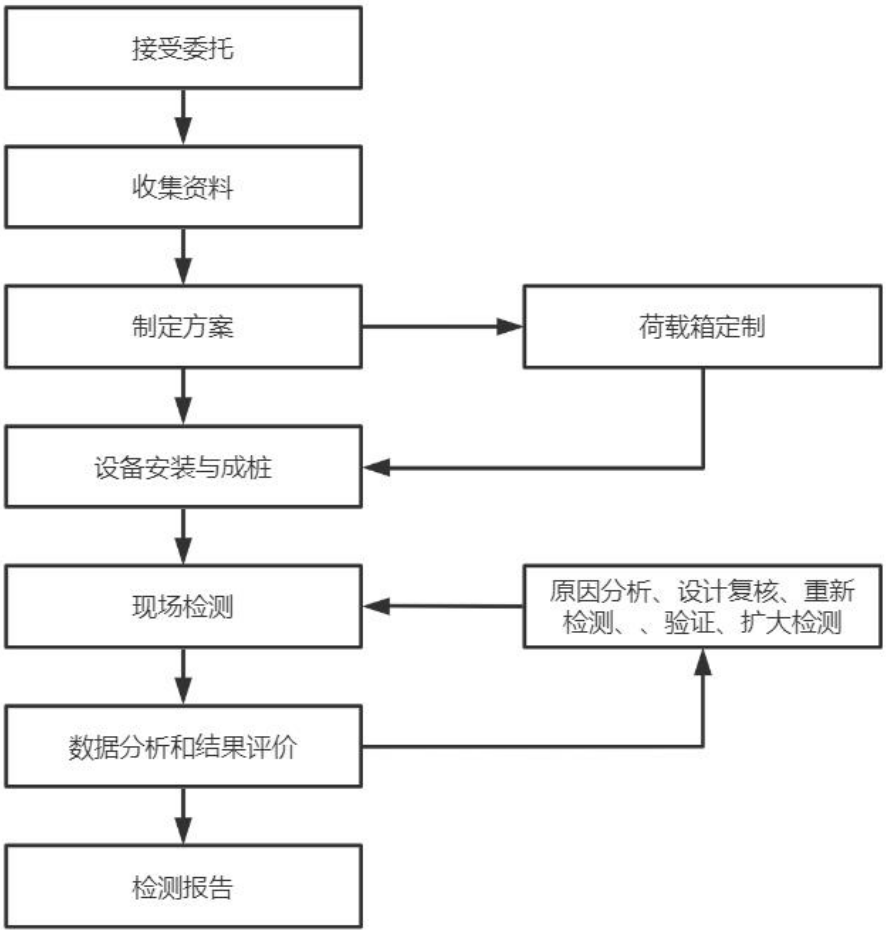


图 3.3.1　检测工作程序框图

3.3.2 检测开始时间应符合下列规定：

1 对于受检桩桩身混凝土强度应不低于设计强度的 80%，或按该强度计算的桩身承载力应大于荷载箱单向最大加载值的 1.5 倍；

2 检测前土体的休止时间应不小于表 3.3.2 规定的时间。

表3.3.2　休止时间

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

注：①当采用泥浆护壁灌注桩时，宜适当延长休止时间；②当采用后注浆施工工艺时，除符合本条第 1 款的规定外，注浆后休止期不宜小于 20d，当水泥浆中掺入早强剂时，注浆后休止期不宜小于 10d。

3.4 检 测 报 告

3.4.1 检测报告应包含以下内容：

1 工程名称、地点、建设、勘察、设计、监理、施工和检测单位，基础、结构形式、层数、设计要求、检测目的、检测依据、检测数量、检测日期；

2 地质条件描述、土的力学指标和相应的地质柱状图；

3 受检桩的桩型、尺寸、桩号、桩身强度、桩顶标高、荷载箱参数、荷载箱位置、成桩工艺、施工日期、检测点平面布置图；

4 加载、卸载方法，检测仪器设备，承载力判定依据；

5 受检桩的检测数据，试验与计算分析曲线图表和试验数据汇总结果；

6 当进行分层侧阻力和端阻力测试时，应包括传感器类型、安装位置、轴力计算方法、各级荷载下桩身轴力变化曲线、各土层的桩侧极限侧阻力和桩端阻力；

7 与检测内容相应的检测结论。

4 现 场 检 测

4.1 仪 器 设 备

4.1.1 基桩自平衡静载试验系统由以下组成（图 4.1.1）：

1 荷载箱、高压油管、加载泵、油压测量仪表组成的加载系统；

2 位移传递装置、位移传感器、位移基准装置组成的位移量测系统；

3 采集压力和位移数据并据此对加载进行控制的数据采集与控制系统。

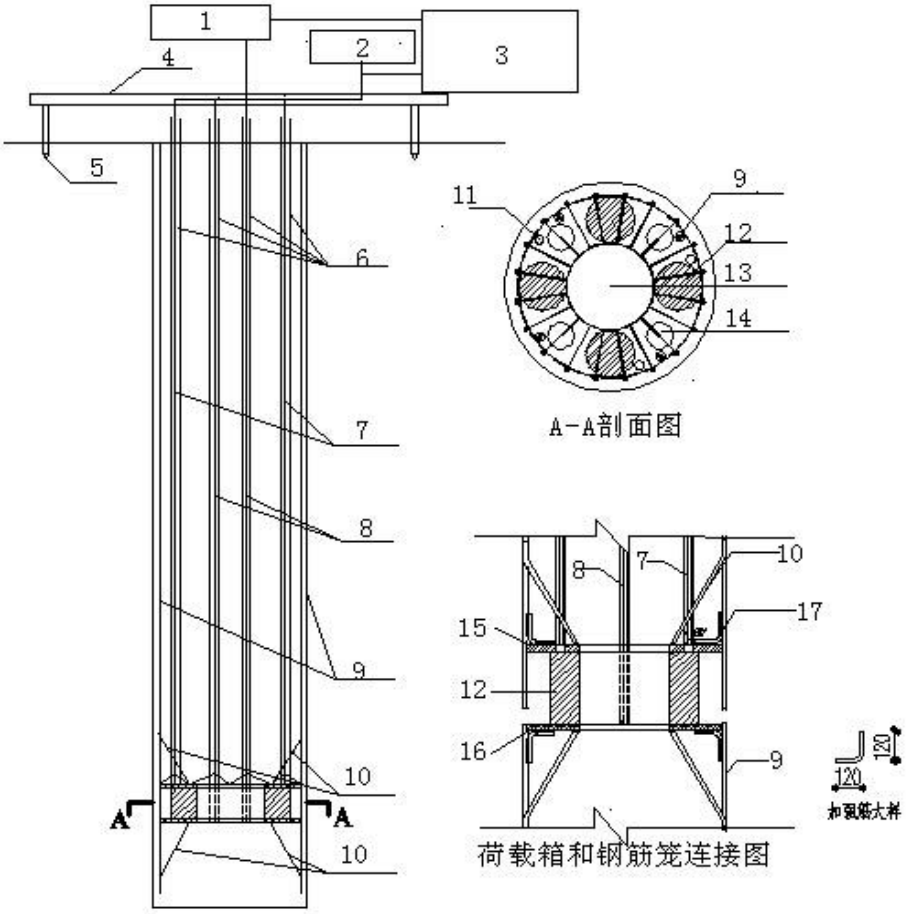


图 4.1.1 检测系统的安装与连接

1—加压系统；2—位移系统；3—静载试验仪（压力控制和数据采集）；4—基准梁；5—基准桩；6—位移杆（丝）护筒； 7—上位移杆（丝）；8—下位移杆（丝）；9—主筋；10—导向筋（喇叭筋）；11—声测管；12—千斤顶；13—导管孔；14—翻浆孔；15—荷载箱上钢板；16—荷载箱下钢板；17—加强筋（数量直径同主筋）

4.1.2 检测所使用的仪器仪表及设备应具备检测工作所必需的防尘、防潮、防震等功能，并应能在适用温度范围内正常工作。

4.1.3 荷载箱应按基桩类型、检测要求及基桩施工工艺正确选用。荷载箱的技术要求应符合本规程附录 E 的规定。

4.1.4 采用连接于荷载箱油路的压力传感器或压力表测定油压，压力传感器或压力表精度均不应低于 0.5 级，量程不应小于 60MPa，压力表、油泵、油管在最大加载时的压力不应超过额定工作压力的 80%。

4.1.5 受检桩位移宜采用电子百分表测量，测量误差不应大于 0.1 %FS，分辨率不应低于 0.01mm。每根检测桩布置不少于 3 组（每组不宜少于 2 个位移传感器，对称布置），分别用于测定荷载箱处的向上、向下位移和桩顶位移。

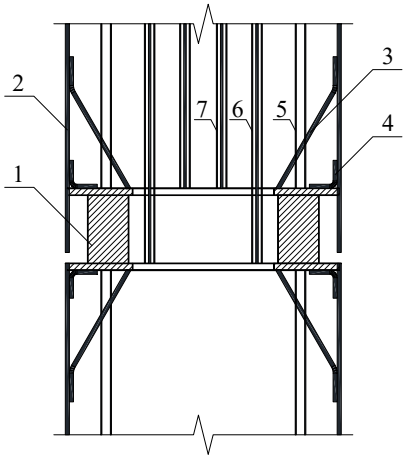
4.2 设 备 安 装

4.2.1 荷载箱埋设位置应符合附录 A 规定。

4.2.2 荷载箱与钢筋笼连接应符合下列规定：

1 荷载箱应平放于桩横截面同心处，荷载箱位移方向与桩身轴线夹角不应大于 1°；

2 对于灌注桩，试验荷载箱安装宜按下图（图 4.2.2）进行；



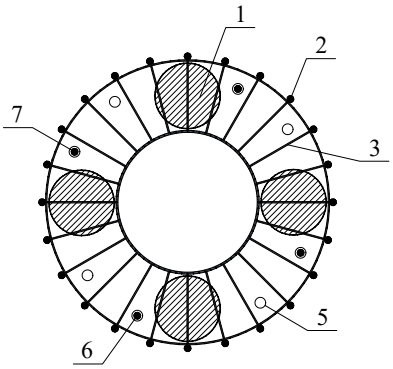


图 4.2.2　灌注桩荷载箱安装示意图

1—荷载箱；2—主筋；3—导向钢筋；4—L 形加强钢筋；5—声测管（注浆管、取芯管）；6—下位移杆（丝）及护套管；7—上位移杆（丝）及护套管

3 钢筋笼与荷载箱焊接必须保持垂直，钢筋笼的主筋与荷载箱上的方钢或加强筋进行焊接；

4 将灌注导管的导向结构焊接在钢筋笼上，导向钢筋一端宜与荷载箱导管孔边缘处焊接，另一端宜与钢筋笼主筋焊接，荷载箱上下面都需要布置，数量、直径和长度根据桩径大小现场确定，保证导向钢筋与荷载箱平面夹角宜大于 60^0。

5 在荷载箱上下各 1.5 倍桩直径范围内钢筋笼箍筋应加密处理，其间距取 100mm；

6 荷载箱的顶部和底部应通过 L 型加强筋分别与上下钢筋笼的主筋焊接在一起，焊缝应满足强度要求，L 型加强筋数量应与桩主筋等同。

4.2.3 对于预应力混凝土桩和钢管桩，荷载箱与上、下段桩应采取可靠的连接方式。

4.2.4 位移杆（丝）与护套管应符合下列规定：

1 位移杆应具有一定的刚度，确保将荷载箱处的位移传递到地面，位移杆宜采用直径 10mm～25mm 的钢管或圆钢；位移丝应绷紧，宜选用合适的配重；

2 护套管内径与位移杆直径之比应大于 2；

3 采用位移丝时，其直径不得小于 0.3mm；

4 保护位移杆（丝）的护套管应与荷载箱焊接，多节护套管连接

时可采用机械连接或焊接方式，焊缝应满足强度要求，并确保不渗漏水泥浆；

5 位移杆（丝）的护套管上口应封堵，以避免砂土、泥浆等进入；

6 当护套管兼作注浆管时，尚应满足注浆的压力要求。

4.2.5 桩身荷载箱位置浇筑技术要求

1 桩身混凝土宜采用细石混凝土，混凝土坍落度宜大于 200mm。

2 桩身混凝土灌注前除荷载箱埋设于桩底外，应计算好导管长度配置，导管的底距必须控制在距荷载箱底 2m 左右，超过 500mm 的必须加短接，应控制导管拆除的节数。

3 料斗大小应根据桩径大小来确定，保证灌料浇筑后混凝面上升至少 2m；导管通过荷载箱到达桩端浇注混凝土。

1）当混凝土接近荷载箱时，拔导管速度应放缓，荷载箱上、下 2.5m 范围内浇注速率降低至正常速率的 1/2；

2）当荷载箱上部混凝土大于 2.0m 时导管底端方可拔过荷载箱，浇混凝土至设计桩顶。

4.2.6 基准桩和基准梁应符合下列规定：

1 基准桩与受检桩之间的中心距离不应小于 3 倍的受检桩直径，且不应小于 2.0m；基准桩应打入地面以下足够的深度，不宜小于 1.0m；

2 基准梁应具有足够的刚度，梁的一端应固定在基准桩上，另一端应简支于基准桩上；

3 宜在位移量测系统上方及周围采取适当的遮挡防护措施，以减

小位移传感器的夹具及基准梁受天气、周边震动及其他外界因素的影响，保证试验数据可靠。

4.3 现 场 测 试

4.3.1 自平衡静载试验为设计提供依据时应采用慢速维持荷载法。

4.3.2 试验加、卸载应符合下列规定：

1 试验前应进行预加载，预加载的最大值不大于预估最大加载值的 1/10；

2 加载应分级进行，采用逐级等量加载，每级荷载为最大加载值的 1/10，其中第一级加载量可取分级荷载的 2 倍；

3 卸载应分级进行，每级卸载量宜取加载时分级荷载的 2 倍，且应逐级等量卸载；

4 加、卸载时，应使荷载传递均匀、连续、无冲击，且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%；

5 采用双层荷载箱时，宜先进行下荷载箱测试，后进行上荷载箱测试。

4.3.3 慢速维持荷载法试验步骤应符合下列规定：

1 每级荷载施加后，应分别按第 5min、15min、30min、45min、60min 测读位移，以后每隔 30min 测读一次位移；

2 位移相对稳定标准：从分级荷载施加后的第 30min 开始，按 1.5h 连续三次每 30min 的位移观测值计算，每小时内的荷载箱上下位移增量均不超过 0. 1mm、并连续出现两次；

3 当位移变化速率达到相对稳定标准时，再施加下一级荷载；

4 卸载时，每级荷载分别按第 15min、30min、60min 测读位移量，即可卸下一级荷载；卸载至零后，应测读残余位移，维持时间不得小于 3h，测读时间分别为第 15min、30min，以后每隔 30min 测读一次残余位移量。

4.3.4 荷载箱上段或下段位移出现下列情况之一时，终止加载：

1 某级荷载作用下，荷载箱上段或下段位移增量大于前一级荷载作用下位移增量的 5 倍，且位移总量超过 40mm；

2 某级荷载作用下荷载箱上段或下段位移增量大于前一级荷载作用下位移增量的 2 倍，且经 24h 尚未达到相对稳定标准；

3 已达到设计要求的最大加载量且荷载箱上段或下段位移达到相对稳定标准；

4 当荷载-位移曲线呈缓变型时，向上位移总量可加载至 40mm～60mm；向下位移总量可加载至 60mm～80mm；当桩端阻力尚未充分发挥时，可加载至总位移量超过 80mm；

5 荷载已达荷载箱加载极限，或荷载箱上、下段位移已超过荷载箱行程，即可终止加载。

4.3.5 测试桩身应变和桩身截面位移时，数据的测读时间应符合本规程第 4.3.3 条的规定。

4.3.6 检测试验数据宜按附录 C 的格式记录。

5　测试数据分析与判定

5.0.1 应绘制桩身各分段的荷载-位移曲线、位移-加载时间单对数曲线，也可绘制其他辅助分析所需的曲线。

5.0.2 进行桩身应力、应变或桩身截面位移测定时，应按本规程附录B的规定整理测试数据，绘制桩身轴力分布图，计算不同土层的桩侧阻力和桩端阻力；必要时也可绘制侧阻力分布、桩端阻力-荷载、桩端阻力-下段桩沉降关系等曲线。

5.0.3 上段桩极限承载力Q_{uu}和下段桩极限承载力Q_{ud}应根据曲线特征综合确定：

1 对于陡变型荷载-位移曲线，确定各段桩的极限承载力时应符合下列规定：

1）应取曲线发生明显陡变的起始点对应的荷载值；

2）应取位移-加载时间单对数曲线尾部出现明显弯曲的前一级荷载值；

3）当出现本规程4.3条规定的破坏状态时，取前一级荷载值。

2 对于缓变型荷载-位移曲线，确定各段桩的极限承载力时应符合下列规定：

1）上段桩极限加载值取荷载箱处向上位移总量等于20mm～40mm（桩端进入基岩时取低值，上段桩桩较长或桩端为土体时取高值）对应的荷载值，或按设计要求的位移总量取值；

2）下段桩极限加载值取荷载箱处向下位移总量等于40mm或0.05D桩端直径（二者取大值）对应的荷载值；

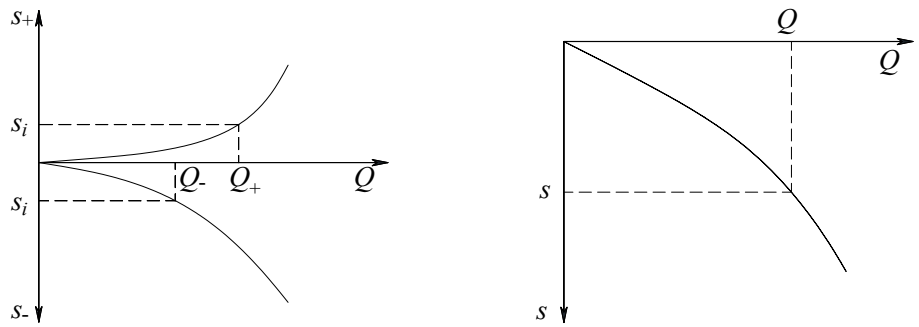
3）当上段桩长或下段桩长大于 40m 时，宜考虑桩身弹性压缩量。

5.0.4 对于荷载箱下段桩在前几级加载过程中出现位移不超过 100mm 的突变，但经荷载维持稳定一段时间后，位移又趋于稳定的试桩，其下段桩宜按缓变型处理，此位移不计入正式加载的试验位移中。

5.0.5 不满足本规程第 5.0.3 条情况时，上下段桩极限承载力宜分别取荷载箱处向上、向下的最大加载值。

5.0.6 基桩自平衡法静载试验测得的荷载-位移曲线，宜等效转换为相应传统静载试验桩顶加载时的荷载-位移曲线，工程桩验收检测或试验桩无法确定上、下段桩极限承载力时可不进行等效转换。

5.0.7 等效转换方法可将自平衡法静载试验测得的荷载箱处向上、向下的荷载-位移曲线，等效转换为相应传统静载试验桩顶加载时的荷载-位移曲线（图 5.0.7）。适用于单层荷载箱，双层荷载箱可参照本方法分段进行转换。等效转换应满足位移连续条件，取某一位移值在自平衡法测得的向上、向下荷载-位移曲线上，分别求出与该位移值对应的 2 个荷载值，再进行等效转换。



（a）自平衡法静载试验测试荷载—位移曲线　　（b）等效桩顶加载荷载—位移曲线

图 5.0.7　等效转换示意图

5.0.8 试验桩一般可采用简化转换法

在自平衡法静载试验测试荷载-位移曲线上，取分界截面向上、向下位移大小相等时的对应荷载，按下式进行转换：

$$Q=\frac{Q_{上}-W}{\gamma}+Q_{下} \qquad (5.0.8\text{-}1)$$

$$s=s_i+\frac{\frac{Q_{上}-W}{\gamma}+2Q_{下}}{2E_{\mathrm{p}}A_{\mathrm{p}}}L_{上} \qquad (5.0.8\text{-}2)$$

$$\gamma=\frac{\gamma_a h_1+\gamma_s h_2}{h_1+h_2} \qquad (5.0.8\text{-}3)$$

式中：Q——桩顶等效荷载（kN）；

s——桩顶等效位移（m）；

$Q_{上}$—分界截面向上位移大小为 s_i 时的对应荷载（kN）；

$Q_{下}$—分界截面向下位移大小为 s_i 时的对应荷载（kN）；

W——荷载箱上段桩自重与附加重量之和（kN），附加重量包括桩顶配重或施加的反力、设计桩顶以上超灌段自重和空桩段回填土自重，地下水位以下应取浮重度计算；

s_i——荷载箱向下分级位移（mm）；

$L_{上}$——上段桩长（m）；

A_p——桩身截面面积（m^2）

E_{p}——桩身等效弹性模量（kPa）；

γ——抗压桩侧阻力转换系数，宜根据实际情况通过相近条件的比对试验和地区经验确定。当无可靠比对试验资料和地区经验时，可根据上段桩长范围内的岩土类型确定：黏性土、

粉土取 0.7～0.8，砂土、碎石土取 0.6～0.7，岩石取 0.8～1.0，若该范围内有不同类型的岩土层时，按土层厚度加权取平均值。

γ_a——粉土、黏性土转换系数取值；

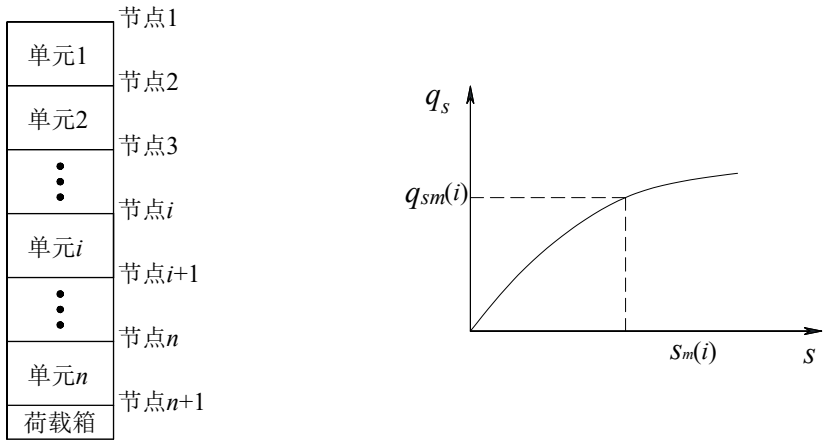
γ_s——砂土、碎石土转换系数取值；

h_1—上段桩粉土、黏性土厚度；

h_2—上段桩砂土、碎石土厚度。

5.0.9 当采用桩身内力测试时，可采用荷载传递转换法从荷载箱处向上转换，直至桩顶。

1 将上段桩自上而下分为 n 个单元、n+1 个节点（图 5.0.9），则任一节点 i 处 $Q(i)$、 $s(i)$ ：



（a）上段桩单元划分　　（b）单位面积侧阻—位移关系曲线

图 5.0.10　单元划分与侧阻本构关系

$$Q(i) = Q(i+1) + \frac{U(i) + U(i+1)}{2} h(i) q_{\mathrm{sm}}(i) \qquad (5.0.9\text{-}1)$$

$$s(i) = s(i+1) + \frac{Q(i) + Q(i+1)}{A_{\mathrm{p}}(i)E_{\mathrm{p}}(i) + A_{\mathrm{p}}(i+1)E_{\mathrm{p}}(i+1)} h(i) \qquad (5.0.9\text{-}2)$$

式中：$Q(i)$——第 i 个节点的等效荷载（kN）；

$s(i)$——第 i 个节点的等效位移（m）；

$U(i)$——第 i 个节点处桩周长（m）；

$h(i)$——第 i 个单元的高度（m）；

$q_{sm}(i)$——第 i 个单元中点处桩侧阻力（kPa）；

$A_p(i)$——第 i 个节点处桩身截面面积（m^2）；

$E_p(i)$——第 i 个节点处桩身弹性模量（kPa）。

2 根据单元 i 的中点位移值 $s_m(i)$，由单位面积侧阻-位移关系曲线求得 $q_{sm}(i)$，$s_m(i)$由下式计算：

$$s_m(i) = s(i+1) + \frac{Q(i) + 3Q(i+1)}{A_p(i)E_p(i) + 3A_p(i+1)E_p(i+1)} \frac{h(i)}{2} \qquad (5.0.9\text{-}3)$$

式中：$s_m(i)$——单元 i 的中点位移值（m）。

5.0.10 单桩竖向抗压极限承载力 Q_u，应按下式计算：

$$Q_u = \frac{Q_u^{上} - W}{\gamma} + Q_u^{下} \qquad (5.0.10)$$

5.0.11 对于扩底桩，当荷载箱位于桩底时，应按式 5.0.11 推算单桩极限承载力：

$$Q_u = \beta \times \frac{Q_u^{上} - W}{\gamma} + \frac{Q_u^{下}}{A_{hd}} A_p \left(\frac{d_{hd}}{D}\right)^k \qquad (5.0.11)$$

式中：A_{hd}——荷载箱底板面积（m^2）；

d_{hd}——荷载箱底板直径（m）；

D——扩底直径（m）；

k——扩底桩尺寸系数，砂土、碎石土取 1/3，岩石地基取 1/5；

β——折减系数一般取 0.8。

5.0.12 单桩竖向抗拔极限承载力，应按下式计算：

$$Q_{\mathrm{u}} = \frac{Q_u^{上}}{\gamma_{抗拔}} \qquad (5.0.12)$$

式中：$\gamma_{抗拔}$——抗拔桩侧阻力转换系数，承压型抗拔桩应取 1.0，对于承拉型抗拔桩，应根据实际情况通过相近条件的比对试验和地区经验确定，但不得小于 1.1。

5.0.13 单桩竖向抗压（抗拔）极限承载力的统计取值，应符合下列规定：

1 同条件下，对参加统计算术平均的试验桩检测结果，当极差不超过平均值的 30%时，可取其算术平均值为单桩竖向抗压（抗拔）极限承载力；

2 对参加算术平均的试验桩检测结果，当极差超过平均值的 30%时，应结合桩型、施工工艺、地基条件、基础形式等工程具体情况分析原因，结合工程具体情况综合确定极限承载力；不能明确极差过大的原因时，宜增加试桩数量；

3 试验桩数量小于 3 根或桩基承台下的桩数不大于 3 根时，应取低值；

4 不同条件的单个试验桩，不参与统计分析。

附录 A　荷载箱埋设位置确定

A.0.1 一般规定

1 当受检桩为抗压桩，预估极限端阻力小于预估极限侧阻力时，应将荷载箱置于桩身平衡点处；

2 当受检桩为抗压桩，预估极限端阻力大于预估极限侧阻力时，可将荷载箱置于桩端，并在桩顶设置以不影响测读位移为前提增加一定量的压力荷载（堆载或锚桩）等；

3 当受检桩为抗拔桩时，荷载箱应置于桩端；当荷载箱下部提供的反力不足时，可采取加大桩长或后注浆措施等措施，但荷载箱仍应置于设计桩端标高；

4 当荷载箱埋置在桩端时，荷载箱距离桩端不宜少于 0.5d。

A.0.2 荷载箱埋设位置应埋设在平衡点位置，可按下式计算：

$$\sum u_i l_i q_{u上} \times \gamma_i + W = \sum u_i l_i q_{u下} + q_{up} \times A_D \qquad \text{(A.0.2)}$$

式中 ：W——荷载箱上段桩自重与附加重量之和（kN），附加重量包括桩顶配重或施加的反力、设计桩顶以上超灌段自重和空桩段回填土自重，地下水位以下应取浮重度计算；

u——桩身周长（m）；

l——土层厚度（m）；

q_u——侧摩阻力极限值（kPa）；

A_D——桩端截面积（m^2）；

q_{up}——桩端持力层极限端阻力（kPa），嵌岩桩应计算桩端入风化岩嵌固力，按照相关规范进行深度修正；

γ_i ——折减系数取γ抗压桩侧阻力转换系数的最大值。

附录 B　桩身内力测试

B.0.1 桩身内力测试适用于桩身横截面尺寸基本恒定或已知的桩，可得桩侧各土层的分层摩阻力及端阻力。

B.0.2 标定断面：在荷载箱上下 1～2 倍桩径范围内各设置一个测量断面作为传感器标定断面，标定断面处（荷载箱上部和下部）可对称设置 4 个应变传感器。

B.0.3 测量断面：传感器测量断面应设置在两种不同性质土层的界面处，且距桩顶和桩底的距离不宜小于 1 倍桩径。

B.0.4 桩身内力测试宜根据测试目的、试验桩型及施工工艺选用电阻应变式传感器、振弦式应力传感器、滑动测微计、光纤应变传感器等传感器。

传感器技术、环境特性一览表　　表 B.0.4

类型 特性	振弦式传感器	电阻应变式传感器	滑动测微计	光纤应变计
传感器体积	大	较小	大	小
蠕变	较小，适宜于长期观测	较大，需提高制作技术、工艺解决	无蠕变问题	较小，适宜于长期观测
测量灵敏度	较低	较高	较高	较高
温度变化的影响	温度变化范围较大时需要修正	可以实现温度变化的自补偿	温度变化范围较大时应修正	可以实现温度变化的自补偿
长导线影响	不影响测试结果	除非采用六线制，需进行长导线电阻影响的修正	不存在导线影响问题	不影响测试结果
自身补偿能力	补偿能力弱	对自身的弯曲、扭曲可以自补偿	可通过标定解决零漂和温度影响	可以自补偿
对绝缘的要求	要求不高	要求高	无要求	要求不高
动态响应	—	好	—	较好
埋设工作量	大	大	大	较大

B.0.5 桩身应变测量：静载试验开始前应测读传感器初始读数，桩身应变测试应与桩身持荷过程同步测量桩身位移。

B.0.6 测试数据整理应符合下列规定：

1 根据选用的传感器，计算得出各测点处的应变值。

2 剔除异常数据后，求出同一断面有效测点的应变平均值，并应按下式计算该断面处的桩身轴力：

$$Q_i = \overline{\varepsilon_i} \times E_i \times A_i \qquad \text{（B.0.6-1）}$$

式中：Q_i——桩身第 i 断面处轴力（kN）；

$\overline{\varepsilon_i}$——第 i 断面处钢筋应变平均值，长期监测时应消除桩身徐变影响；

E_i——第 i 断面处桩身材料弹性模量（kPa）；当混凝土桩桩身测量断面与标定断面两者的材质、配筋一致时，宜按标定断面处的应力与应变的比值确定；

A_i——第 i 断面处桩身截面面积（m^2）。

3 每级试验荷载下，应将桩身不同断面处的轴力值制成表格，并绘制轴力分布图。桩侧土的分层侧阻力和桩端阻力应分别按下列公式计算：

$$q_{si} = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{u \bullet l_i} \qquad \text{（B.0.6-2）}$$

$$q_p = \frac{Q_n}{A_D} \qquad \text{（B.0.6-3）}$$

式中：q_{si}——桩第 i 断面与 i+1 断面间侧阻力（kPa）；

q_p——桩的端阻力（kPa）；

i——桩检测断面顺序号；

u——桩身周长（m）；

l_i——第 i 断面与第 i+1 断面之间的长度（m）；

Q_n——桩端轴力（kN）；

A_D——桩端面积（m^2）。

4 桩身第 i 断面处的钢筋应力可按下式计算：

$$\sigma_{si}=E_s\cdot\varepsilon_{si} \qquad \text{（B.0.6-4）}$$

式中： σ_{si}——桩身第 i 断面处的钢筋应力（kPa）；

E_s——钢筋弹性模量（kPa）；

ε_{si}——桩身第 i 断面处的钢筋应变。

B.0.7 指定桩身断面的位移以及两个指定桩身断面之间的位移差，可采用位移杆（丝）测量。位移杆（丝）应具有一定的刚度，宜采用内外套管形式，外管固定在桩身，内管下端固定在需测试断面，顶端高出外管 100～200mm，并能与测试断面同步位移。

B.0.8 传感器应力测量数据处理

1 采用电阻应变式传感器测量时，应按下列公式对实测应变值进行导线电阻修正：

采用半桥测量时按下式计算：

$$\varepsilon=\varepsilon'(1+\frac{r}{R}) \qquad \text{（B.0.8-1）}$$

采用全桥测量时按下式计算：

$$\varepsilon=\varepsilon'(1+\frac{2r}{R}) \qquad \text{（B.0.8-2）}$$

式中：ε——修正后的应变值；

ε'——修正前的应变值；

r——导线电阻（Ω）；

R——应变计电阻（Ω）。

2 采用弦式传感器测量时，应根据率定系数将钢筋计实测频率换算成力，再将力值换算成与钢筋计断面处的混凝土应变相等的钢筋应

变量。

3 采用滑动测微计测量时，应按下列公式计算应变：

$$e=(e'-z_0)\cdot K \tag{B.0.8-3}$$

$$\varepsilon=e-e_0 \tag{B.0.8-4}$$

式中：e——仪器读数修正值；

e'——仪器读数；

z_0——仪器零点；

K——率定系数；

ε——应变值；

e_0——初始测试仪器读数修正值。

附录 C　自平衡法静载试验数据记录表

C.0.1 自平衡法静载试验的检测数据宜按表 C.0.1 的格式记录。

表 C.0.1 自平衡法静载试验记录表

检测桩编号		检测桩类型		桩径(mm)		桩长(m)	
桩端持力层		成桩日期		测试日期		加载方法	

荷载编号	荷载值(kN)	记录时间(d h min)	间隔(min)	各表读数(mm)						位移(mm)			温度(˚C)
				1	2	3	4	5	6	向上	向下	桩顶	

记录人：　　校核人：

C.0.2 自平衡法静载试验的结果宜按表 C.0.2 的格式记录。

表 C.0.2 自平衡法静载试验结果汇总表

工程名称				工程地点			
建设单位				施工单位			
桩型		桩径(mm)		桩长(m)		桩顶标高(m)	
成桩日期		测试日期		加载方法			

荷载编号	加载值(kN)	加载历时(min)		向上位移(mm)		向下位移 (mm)		桩顶位移(mm)	
		本级	累计	本级	累计	本级	累计	本级	累计

记录人：　　校核人：

C.0.3 自平衡法静载试验荷载箱宜按表 C.0.3 的格式记录。

表 C.0.3 自平衡法静载试验荷载箱参数表

序号	桩号	桩径（mm）	荷载箱型号	荷载箱参数				
				外径（mm）	内径（mm）	高度（mm）	额定加载能力（kN）	荷载箱位置

记录人：　　校核人：

附录 D　试验后注浆处理要求及工艺

D.0.1 对于在工程桩上完成的自平衡法试验，为确保测试后桩正常使用，必须对测试时荷载箱部位产生的缝隙进行注浆处理。

D.0.2 试验后注浆管应符合以下规定：

1 注浆管应采用钢管，采用丝扣连接或套焊，确保不漏浆，上下端加盖、管内无异物，应能承受 2.0MPa 以上静水压力；

2 注浆管也可采用下位移护管或者声测管代替；

3 注浆管数量宜根据桩径大小设置。对直径小于 1200mm 的桩，宜对称布置不少于 2 根注浆管；对直径大于等于 1200mm 且小于 2500mm，宜对称布置 4 根注浆管。

D.0.3 采用压力注浆进行试验桩后处理时，注浆材料应采用强度等级 42.5 以上检验合格的水泥，浆液的水灰比宜为 0.5～0.65，并掺入 7%的膨胀剂和 1%的减水剂。

D.0.4 注浆前应根据荷载箱的残余行程计算理论注浆量。

D.0.5 注浆过程应符合下列要求：

1 注浆前应进行压水试验，冲洗试验后留下的空隙，直到相邻注浆管返回的水流变清澈后，方可进行灌浆；

2 注浆流量不宜超过 75L/min；

3 注浆压力不应少于 0.3MPa，注浆时间间隔不得超过 12h；

4 观察压力表和浆液注入情况，并做好注浆记录。

D.0.6 当注浆符合下列条件之一时，可终止注浆：

1 注浆总量达到理论注浆量，注浆压力不小于 0.5MPa；

2 浆液从另外注浆管冒出，相邻注浆管冒出的浆液浓度与注入浆液浓度相差不大时，封闭相邻注浆管管头，进行压力注浆，维持压力1h。

D.0.7 注浆压力长时间低于正常值或者地面出现冒浆时，应更改为间歇注浆或者调整浆液水灰比。间歇注浆时，间歇时间宜为30min～60min。

附录 E　荷载箱的技术要求

E.0.1 一般规定

1 荷载箱液压缸必须经有资质的法定计量单位校准或检定，并取得检定合格证书；

2 荷载箱应经耐压检验合格后方可出厂，现场不得拆卸或重新组装；

3 荷载箱应有铭牌，注明规格、额定压力、额定输出推力、质量、出厂编号、制造日期等；

4 应按基桩类型、使用要求及基桩施工工艺选用相应规格的荷载箱。

E.0.2 检定

1 荷载箱检定率为 100%，加载分级数不少于五级，荷载箱在 1.2 倍额定压力下持荷时间不应小于 30min,在额定压力下持荷时间不应小于 2h，持荷过程中荷载箱不应出现压力减小值大于 5%等异常现象；

2 荷载箱宜整体检定；

3 当整体检定受限制时，组成荷载箱的液压缸应为同型号，相同油压时的液压缸出力相对误差小于 3%。

E.0.3 荷载性能

荷载箱的极限输出推力不应小于额定输出推力的 1.2 倍，荷载箱缸体行程不宜小于 150mm。

E.0.4 荷载箱启动压力

荷载箱空载启动压力应小于额定压力的 4%。

E.0.5 开箱压力

荷载箱打开压力应小于额定压力的 10%。

E.0.6 荷载箱有效面积比

ρ=荷载箱投影面积/桩身截面面积

灌注桩的荷载箱置于桩中时 45%<ρ≤60%，置于桩端时 45%<ρ≤100%

本规程用词说明

1 为便于执行本规程条文时区别对待，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：

正面词采用“可”；

反面词采用“不可”。

2 条文中指明按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”；非必须按所指明的标准执行的写法为：“可参照……”。

引用标准名录

1	《建筑地基基础设计规范》	GB 50007-2011
2	《建筑地基基础工程施工质量验收规范》	GB 50202-2018
3	《建筑与市政地基基础技术通用规范》	GB 55003-2021
4	《建筑与市政工程施工质量控制通用规范》	GB 55032-2022
5	《建筑基桩技术规范》	JGJ 94-2018
6	《建筑基桩检测技术规范》	JGJ 106-2014
7	《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》	JGJ /T 403-2017

辽 宁 省 地 方 标 准

大直径基桩自平衡法静载试验技术规程

Technical Specification for Static Load Test of Self-balancing Method of Large Diameter Foundation Pile

DB21/T-xxx-2023

Jxxxx-2023

条 文 说 明

目　次

1　总 则 34
3　基 本 规 定 35
　3.1 一般规定 35
　3.3 检测程序 35
4　现场检测 37
　4.1 仪器设备 37
　4.2 设备安装 37
5　检测数据分析与判定 42
附录 A　荷载箱埋设位置确定 45
附录 B　桩身内力测试 49

1 总 则

1.0.1 基桩自平衡法静载试验利用桩身中预埋的荷载箱进行加载，由上段桩的桩侧阻力和下段桩的桩侧阻力和端阻力互为反力进行测试。与传统的静载试验相比，自平衡法具有许多优点：

1 装置简单，不受场地条件（陆地、水上）和加载吨位限制，不需运输上百吨至数千吨的钢梁和压重，试验省时、省力、安全、环保；

2 可分别测得桩侧阻力和桩端阻力；

3 与传统方法相比，试验综合费用低，吨位越大、场地条件越复杂、传统静载试验很难实施时，效果越明显；

4 可省去传统方法所需的场地道路平整、锚桩施打、桩帽制作等工作；

5 方便进行多次测试和长期观测，加载设备预埋桩身，地面仪器设备简单；

6 工程桩采用该法进行抗拔检测时，桩身混凝土不会产生裂缝，因此不对桩身耐久性产生影响。

1.0.2 本规程适用于辽宁省行政区域内建筑、市政行业的大直径混凝土桩、预制桩及钢桩基础承载力检测与评价。特殊条件下其它直径桩采用自平衡法静载试验时，可执行本规程。

基桩自平衡法静载试验可进行斜桩抗压与抗拔静载荷试验，通过该项检测技术也可确定斜桩抗压、抗拔极限承载力（如港口、桥梁、矿山等行业）。

3 基 本 规 定

3.1 一 般 规 定

3.1.4 本条规定的检测数量仅为下限，可根据实际情况增加试桩数量。

3.1.5 自平衡法静载试验中，有时会因桩身缺陷、桩身截面突变处应力集中或桩身强度不足造成桩身结构破坏，故建议在检测前后对试验桩进行声波透射法完整性检测，为分析桩身结构破坏的原因提供证据。

3.1.8 检测时，组成荷载箱的千斤顶缸套和活塞之间会产生相对滑移，荷载箱处的混凝土被拉开，但桩身其它部分未破坏，上、下两段桩仍被荷载箱连在一起。因荷载箱多在桩身下端，试验后通过位移管对此裂缝进行压力注浆，注浆后的强度应满足设计要求，此时受检桩仍可作为工程桩使用。

3.3 检 测 程 序

3.3.1 检测程序是检测机构应遵循的检测一般工作程序。实际执行检测程序中，由于不可预知的原因，如委托要求的变化、现场调查情况与委托方介绍的不符，或在现场检测尚未全部完成就已发现质量问题而需要进一步排查，都可能使原检测方案中的检测数量、受检桩桩位发生变化。总之，检测方案并非一成不变，可根据实际情况动态调整。

3.3.2 本条提出的检测方案内容为一般情况下包含的内容，某些情况下还需要包括场地开挖、道路、供电、照明等要求。为满足建设方在技术质量、安全及工期方面的要求，检测机构应根据现场情况，从仪器设备、人员组织、质量保证措施、安全措施、检测周期等方面认真

编写有针对性的检测方案，并在检测过程中遵照实施。

3.3.3 自平衡法为双向加载，桩身产生的应力是传统试验的一半，本规程规定的桩身混凝土强度不应低于 80%。

4 现 场 检 测

4.1 仪 器 设 备

4.1.4 为保证试验现场的人员安全，最大加载压力不应超过压力表、油泵、油管工作压力的 80%，一般为为 50MPa。当受条件限制而需加载超过 50MPa 时，应采用耐压性能更好的配套试验设备，或者采用双荷载箱测试。

4.2 设 备 安 装

4.2.1 当预估极限端阻力大于预估极限侧阻力时，可将荷载箱置于桩端，同时在桩顶通过配重或锚桩来提供加载所需反力的差值，并且配重或锚桩所能提供的反力不得小于此差值的 1.2 倍。当荷载箱埋置在桩端时，直接埋设桩端沉渣或浇筑过程容易造成空洞试验失败，故本规程对荷载箱距离桩端位置不宜少于 0.5d。

4.2.2 导向结构应根据现场情况在现场加工制作，数量和直径宜与主筋数相同，当相邻两根导向筋间距大于或小于导管直径的三分之二时，则应增加或减少导向筋数量，避免因导向筋间距过大下放导管过程卡导管及浪费。

钢筋笼之间设置导向筋，导向筋的一端与主筋焊接，一端焊在环形荷载箱板内圆边缘处，导向筋其数量和直径宜等同主筋。导向筋与荷载箱平面的夹角应大于 60°。喇叭筋与荷载箱的连接大样图见图 1 所示。

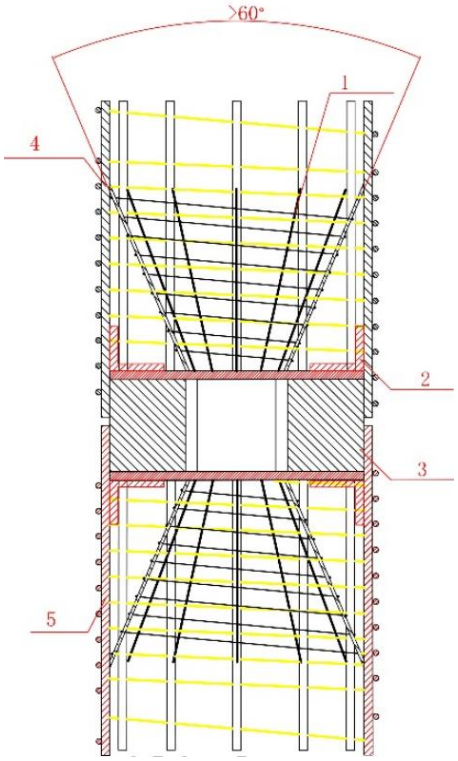


图 1　喇叭筋与荷载箱的连接大样图

1-喇叭筋；2-L 型喇叭筋；3-荷载箱；4-上段钢筋笼；5-下段钢筋笼

4.2.3 对于预应力混凝土管桩和钢管桩，荷载箱与上、下段桩焊接连接，焊接强度应符合现行国家有关标准的规定。

由于预应力混凝土管桩一般在工厂中按固定模数生产，平衡点位置未必刚好与模数相符，此时应特别制作一定长度（非标准模数）的管桩节段，以满足平衡点设置的要求。对于钢管桩，可直接在平衡点位置切割后焊接荷载箱。

对于双层荷载箱，每层荷载箱的连接均应满足上述要求。

对于预制混凝土管桩和钢桩，荷载箱可选择打桩过程中焊接，也可在预制过程中同时制作，连接大样图可参考图 2 和图 3 所示。

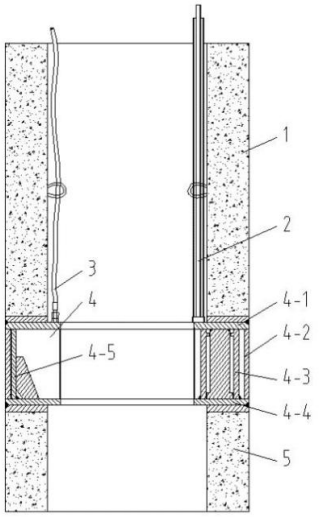


图 2　预制混凝土管桩与荷载箱连接大样图

1-上段预制管桩； 2-位移管；3-油管；4-荷载箱(其中 4-1-上盖板；4-2-外支撑环；4-3-导向限位柱；4-4-下盖板；4-5-内支撑环)；5-下段预制管桩

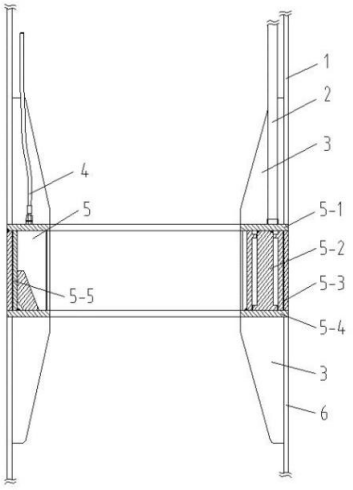


图 3　钢管桩与荷载箱连接大样图

1-上段钢管桩；2-位移管；3-筋板；4-油管；5-荷载箱(其中 5-1-上盖板；5-2-导向限位柱；5-3-外支撑环；5-4-下盖板；5-5-内支撑环)；6-下段钢管桩

4.2.4 对桩身上部、下部位移测量可采用位移杆或位移丝进行传递，位移杆或位移丝应有护管进行保护，护管应确保不漏浆。也可采用满足试验要求的其他形式的位移传递装置。

具体操作步骤为：未浇灌混凝土前将位移杆(丝)的一端固定在待测量位移处（一般为荷载箱的上、下盖板），然后套入护管并将端部密封，再将护管沿桩身钢筋笼固定好，并对外露部分进行妥善保护并

塞口，防止混凝土或泥土等进入护管。护管如果漏浆则不能得到待测量部位的真实位移。

应注意保护各测点及油管的外露部分，防止施工过程中破坏。注意上位移杆(丝)和下位移杆(丝)的区分，防止混淆。

当采用位移丝测量装置时，应使用足够的配重使位移丝系紧。根据工程经验，建议优先采用位移杆，位移丝因与护管之间的摩擦原因，测得的结果可能偏小。

目前位移测量根据荷载箱内有无位移杆（丝）卡扣分别选用。荷载箱无位移杆（丝）卡扣时选用带保护管的位移杆（丝），施工时仅需将上位移杆（丝）固定在荷载箱以上 20cm～30cm 的位置，下位移杆（丝）固定在荷载箱以下 20cm～30cm 的位置，然后将位移杆（丝）沿主筋绑扎牢固，引出桩顶。

4.2.5 荷载箱位置砼浇筑技术要求

试验各方主体，包括检测方、施工方、监理方等均应认识到荷载箱上部、下部混凝土浇灌密实是确保试验成功的关键因素，如采取措施不当将会导致试验失败，因此施工时应特别留意对荷载箱以上和以下 2m 范围内混凝土的和易性、导管埋人混凝土中的深度以及控制好拔升速度，确保混凝土能浇灌密实。

对于桩径 1200mm 以内的桩混凝土应采用细石混凝土，因荷载箱中部预留导管孔直径有限，同时施工现场采用的灌注导管直径不定，避免翻浆过程中卡导管影响其密实度。

自平衡法应用于抗拔试验时，荷载箱埋置于桩端，端承力对试验反力的提供占比一般较大，抗拔桩孔底沉渣厚度不应大于 50mm。为了达到此要求，对抗拔桩一般应施工延长段，使导管能够穿过荷载箱，从而达到更好的清孔效果。

根据工程实践总结，荷载箱加导管所占面积不宜超过桩截面面积的 2/3，混凝土必须具备良好的和易性，坍落度宜为 200mm 以上，混凝土超过荷载箱 2m 后才可把导管拔出荷载箱，要避免出现堵管和起笼现象。

4.2.6 自平衡静载试验无地面堆载及锚桩，故基准桩所受试桩的影响小于传统静载试验， 基准梁的截面高度不宜小于其跨度的 1/40，基准桩的线刚度不宜小于基准梁线刚度的 3 倍。

在受检桩加卸载过程中，荷载传至基准桩周围地基土并使之变形。随着受检桩与基准桩间距离较近时，地基土变形对基准桩的变位影响加剧。对于扩底桩、嵌岩桩或桩长较短等，基准桩与受检桩中心距不应小于 4 倍受检桩直径。

5 检测数据分析与判定

5.0.2 单桩竖向抗压试验时，荷载箱埋设在设计桩端标高以上，自平衡测试时荷载箱上部桩身自重和桩顶以上空桩段内的物质自重方向与桩侧阻力方向一致，故在判定桩侧阻力时应当扣除。自平衡测出的上段桩的摩阻力方向是向下的，与传统方法得到的摩阻力方向相反。传统加载时，侧阻力将使土层压密，而自平衡法加载时，上段桩侧阻力将使土层减压松散，故该法测出的摩阻力小于传统方法的摩阻力，国内外大量的对比试验已证明了该点。

5.0.4 预加载过程需要考虑施工工艺对桩端有虚土、沉渣的影响，为避免因虚土、沉渣问题，提前结束试验，在预加载过程中出现对于荷载箱下段桩在预加载过程中出现位移不超过 100mm 的突变，但经荷载维持稳定一段时间后，位移又趋于稳定的试桩，可认为此位移变化是将桩底沉渣压实，并不是桩体受力后产生的位移，故此位移不计入正式加载的试验位移中。

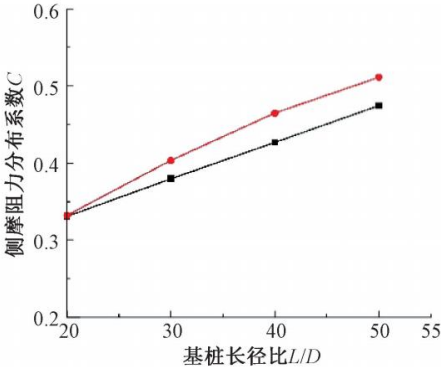
5.0.6-5.0.7 目前国外对该法测试值如何得出抗压桩承载力的方法也不相同。有些国家将上、下两段实测值相迭加作为桩抗压极限承载力，这样偏于安全、保守。有些国家将上段摩阻力乘以 1.5 再与下段桩迭加而得抗压极限承载力。

5.0.8 我国将向上、向下摩阻力根据土性划分，对于黏性土，向下摩阻力为向上摩阻力的(0.6-0.8)倍；对于砂土，向下摩阻力为向上摩阻力(0.5-0.7)倍。近年来，我省在超高层建筑、一般民用建筑、市政、地铁、高铁、风电等领域基桩进行了一定数量的自平衡法静载试验，取得了宝贵数据，为编制本规程提供了科学依据。根据我们在黏土地区做的对比试验，其系数在 0.73-0.8，本规程的取值不仅可完全满足工程要求，而且是偏于安全的。

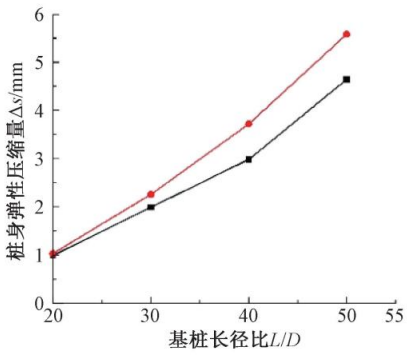
根据上推桩桩顶与桩端的荷载-位移曲线，可得出其桩身的弹性压缩量，并在不同长径比条件下，分析上推桩桩身压缩量和分布系数 C 随长径比变化的规律及变化区间。

桩身的弹性压缩量随着长径比的增大而增加，且增加的绝对值也逐渐变大。而当基桩的长径比不变时，桩身越长，基桩的弹性压缩也随之增大。

因桩侧负摩阻力分布曲线的不确定性，所以在进行上推桩桩身压缩量的计算时，不能仅仅假定取其平均值，而应考虑到桩侧负摩阻力的分布系数 C 的不同，根据分布系数 C 随基桩长径比的变化对现行简单转换法进行改进。



长径比与桩身压缩量的关系



长径比与侧摩阻力分布系数 C 的关系

式 5.0.8-2 $s = s_i + \dfrac{\dfrac{Q_{上} - W}{\gamma} + 2Q_{下}}{2E_p A_p} L_{上}$ 优化后为 $s = s_i + \dfrac{\dfrac{Q_{上} - W}{\gamma} C + Q_{下}}{E_p A_p} L_{上}$，基桩的侧阻分布系数 C 随着基桩长径比的增大而呈线性增大，具体变化区间为 0. 332～0.511，再结合基桩的桩侧负摩阻力分布情况，分布系数 C 的大小与基桩长径比的关系是：

当 L/D≤20 时，$C = 1/3$；

当 L/D≥50 时，$C = 1/2$；

当 20≤L/ D≤50 时，分布系数 C 与长径比 L/D 呈线性关系，此时 C =（L/ D）/180+2/9。

5.0.10 对于缓变型 Q-s 曲线，将上下段桩按两根完全独立的检测桩取极限值，对于工程而言，已具有足够精度。

桩的承载力由岩土阻力和桩身强度控制。对于抗压试验，自平衡法静载试验为双向加载，桩身产生的应力是传统试验的一半，对于抗拔试验，自平衡法静载试验时桩身受压，传统试验桩身受拉，故自平衡法静载试验可测出岩土阻力控制的承载力，无法得出桩身强度控制的承载力。桩身强度的检验需采取其它方法。

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

5.0.13 自平衡法进行抗拔承载力测试时，桩身受压，所得结果为桩周岩土阻力控制的承载力，无法得出按钢筋抗拉强度控制的承载力或按抗裂要求控制的承载力。当设计要求按上拔量控制加载时，应按上拔量要求取承载力值。

附录 A　荷载箱埋设位置确定

自平衡法的荷载箱埋设位置是一个重要的关键技术，根据工程实例及试桩经验，归纳了荷载箱在桩中合理的埋设位置，如图4所示总结归纳了荷载箱的安放位置，可供制定检测方案时参考。

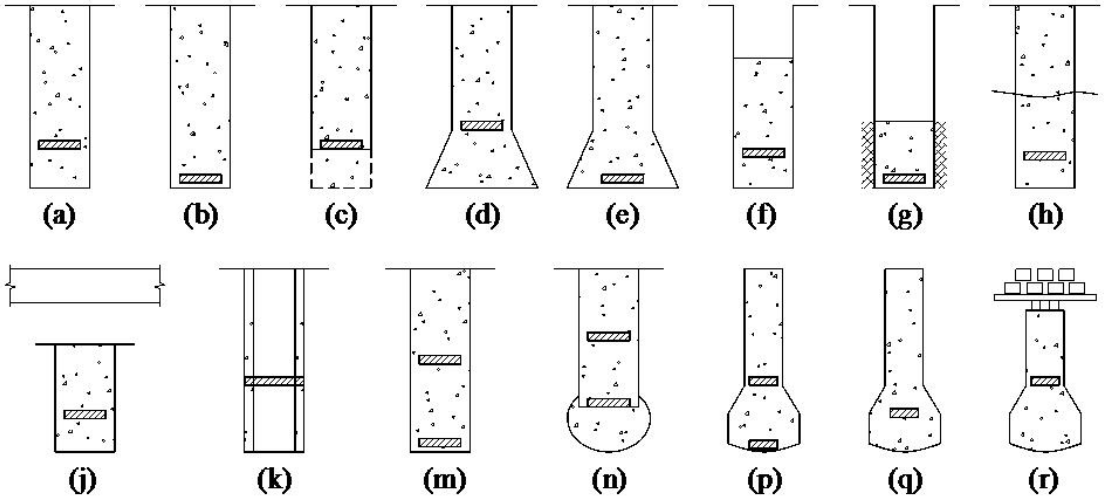


图4　荷载箱的安放位置

图4（a）是一般常用位置，即将荷载箱置于桩身平衡点。当下段桩的桩侧阻力与桩端阻力之和达到极限时，上段桩的桩侧阻力同时达到极限。

图4（b）将荷载箱置于桩端，适用于预估极限侧阻力与预估极限端阻力大致相等的情况，或者预估极限端阻大于预估极限侧阻力但要测试极限侧阻力的情况，或者测试抗拔承载力的情况。

图4（c）为进行抗拔承载力测试，但荷载箱下部提供的反力不足，故将该桩加长，以提供试验所需的反力，但荷载箱仍置于桩端设计标高。

图4（d）的扩大头可代替图1（c）的加长段，或者用于测试扩大头承载力的情况。

图4（e）为荷载箱置于扩大头底部进行试验的情况，可按自平衡法深层平板载荷试验测试持力层（桩端）承载力，或者测试扩底桩的抗拔承载力。

图4（f）适用于桩顶设计标高位于地面以下一定深度时的测试，如地下室尚未开挖或者采用逆作法施工，此时可仅将位移杆（丝）及护套管、油管引至地面，无需接桩至地面即可测试。

图4（g）适用于单独测试嵌岩段承载力的情况，此时仅灌注嵌岩段桩身混凝土，故其承载力不会与上覆土层的承载力相混。如仍需测试上覆土层的承载力，则可在灌注土层中桩身混凝土后再次测试。

图4（h）适用于测试两个或两个以上土层侧阻力的情况。先将混凝土灌注至下层土顶面进行测试，然后再灌注至上一层土顶面进行测试。

图4（j）为上部空间受限时的情况，如在地下室中或基坑内支撑下进行测试。

图4（k）为预应力混凝土管桩或钢管桩的测试，荷载箱直接与上、下段桩焊接，位移杆（丝）及护套管、油管从中间孔洞引出至测试平台。

图4（m）为采用双层荷载箱，将桩身分成上、中、下三段，分别测试其极限承载力的情况。

图4（n）为注浆前、后测试的情况。先进行注浆前测试，然后进行桩底（或桩侧）注浆，再进行注浆后测试，从而获得同一根桩注浆前、后的承载力变化数据。可根据需要采用单层荷载箱或双层荷载箱。

图4（p）在扩底桩中埋设双层荷载箱，上荷载箱测量上段直桩桩侧阻力，下荷载箱测量持力层（桩端）承载力，最后得到整桩承载力。

图4（q）将荷载箱埋设在扩大头里，直接测量扩大头桩端全截面承载力。

图4（r）为桩侧阻力小，无法测出扩底段承载力的情况，此时可在桩顶施加配重或利用锚桩提供部分反力。

A.0.2 荷载箱埋设位置确定方法

确定荷载箱位置方法基本分为三类：（1）规范经验公式法，（2）相似模拟试验法，（3）数值模拟分析法。以下对另外两种方法描述。

A.0.2.1 相似模拟试验法

各土层的桩侧摩阻力由Mohr-Coulomb准则确定，如下式所示：

桩侧摩阻力计算公式：

$$q_s = \sum_i^n \tau_i A_i \tag{A.0.2-1.1}$$

$$\tau = \sigma_h \tan\varphi + c \tag{A.0.2-1.2}$$

式中：τ——土的抗剪强度（kPa）；

σ_h——各土层中点处自重应力下的侧向水平应力；

φ——土体的内摩擦角；

c——土体的内粘聚力；

τ_i——为第i层土的抗剪强度；

A_i——为桩在第i层土层侧面积。

对于桩端阻力，由室内三轴模拟试验确定。取桩端地层土样置于三轴仪中，以求得试样的极限抗压强度。综合考虑等效截面理论和尺寸效应，可求出修正后的桩端阻力。

若受检桩为抗压兼抗拔桩并且承载力由抗压控制时，自平衡法可同时测得抗压、抗拔承载力，此时荷载箱应置于平衡点处。

A.0.2.2 数值模拟分析法

利用有限元分析法，在对桩的实际受力状态进行模拟分析的基础上，对桩承载力进行计算，通过计算推算出平衡点的位置。建模时采用Drucker -Prager弹塑性模型，对桩及桩周土进行剖分，用有限元数值分析求得桩与桩周各岩土层相互作用的法向应力及各岩土层的侧摩阻力，用试验法求得桩端极限承载力。数值模拟分析法需要足够的工程经验来确定模型参数，如果参数选择正确，则该法能准确模拟桩土相互作用，反之，若参数选择有偏差，则模拟精度低，影响计算结果。

附录 B　桩身内力测试

B.0.2 测量指定桩身断面的位移时，护套管固定在桩身，管底固定于待测断面；位移杆（丝）仅在下端与护套管管底相连接（即固定于待测断面）。测量两个或多个指定桩身断面之间的位移差时，可通过设置于各个断面的位移传递装置，测出各断面位移，再求其差值。

B.0.4 内力测试传感器选择

B.0.4.1 滑动测微计测管的埋设应确保测标同桩身位移协调一致，并保持测标清洁，测管安装可根据下列情况采用不同的方法：

1 对灌注桩，在浇筑混凝土前将测管绑扎在主筋上，并应采取防止钢筋笼扭曲的措施；

2 对钢管桩，可通过安装在测管上的测标与钢管桩焊接，将测管固定在桩壁内侧；

3 对非高温养护的预制管桩可在沉桩后将测管放入中心孔中，用含膨润土水泥浆充填测管与桩壁间的空隙。

B.0.4.2 应变式传感器可按全桥或半桥方式制作，宜优先采用全桥方式。传感器的测量片和补偿片应选用同一规格同一批号的产品，按轴向、横向准确地粘贴在钢筋同一断面上。测点的连接应采用屏蔽电缆，导线的对地绝缘电阻值应在 500MΩ以上，使用前应将整卷电缆除两端外全部浸入水中 1h，测量芯线与水的绝缘；电缆屏蔽线应与钢筋绝缘；测量和补偿所用连接电缆的长度和线径应相同。

B.0.4.3 应变传感器安装，应遵循以下原则：

1 混凝土桩可采用焊接或绑焊工艺将传感器固定在钢筋笼上；

2 钢桩可将电阻应变计直接粘贴在桩身上，振弦式和光纤式传感器可采用焊接或螺栓连接固定在桩身上；

3 带有接长杆弦式钢筋计宜焊接在主筋上，不宜采用螺纹连接。

4 应变传感器采用焊接连接时应采取有效降温措施，防止因焊接温度过高损坏传感器。

5 带有应变计的钢筋不得弯曲变形或有附加应力产生。

6 传感器导线通过荷载箱时应在荷载箱内部预留不小于 15cm 导线。

B.0.4.4 电阻应变式传感器及其连接电缆，应有可靠的防潮绝缘防护措施；正式测试前，传感器及电缆的系统绝缘电阻不得低于 200MΩ。

B.0.4.5 应变测量所用的仪器，宜具有多点自动测量功能，仪器的分辨力应优于或等于 1με。