

### 基桩自平衡法静载试验技术规程

Technical specification for static load testing of self-balanced method of foundation  
pile

2020 - 12 - 21 发布

2021 - 05 - 01 实施

江苏省市场监督管理局  
江苏省住房和城乡建设厅 发布

WWW.ZYLJC.CN

目 次

前言 ..... II

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语、定义和符号 ..... 1

    3.1 术语和定义 ..... 1

    3.2 符号 ..... 2

4 基本规定 ..... 2

    4.1 一般规定 ..... 2

    4.2 检测工作程序 ..... 3

5 仪器设备及其安装 ..... 4

    5.1 仪器设备 ..... 4

    5.2 设备安装 ..... 5

6 现场检测 ..... 6

7 检测数据分析与判定 ..... 7

附录 A（规范性附录） 荷载箱的技术要求..... 9

附录 B（规范性附录） 桩身内力测试..... 10

附录 C（规范性附录） 灌注桩荷载箱的安装要求..... 11

附录 D（资料性附录） 试验记录表..... 12

附录 E（规范性附录） 等效转换方法..... 13

本标准用词说明 ..... 16

条文说明 ..... 17

## 前 言

本规程共6章，主要技术内容包括：1 总则；2 术语和符号；3 基本规定；4 仪器设备及其安装；5 现场检测；6 检测数据分析与判定；附录A~附录E。

本规程按照GB/T 1.1-2009给出的规则起草。

本规程代替DGJ32/TJ 77—2009《基桩自平衡法静载试验技术规程》。与DGJ32/TJ 77—2009相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 增加了自平衡法深层平板载荷试验的相关规定；
- 完善了检测数量的规定；
- 增加了桩身完整性检测的规定；
- 补充、修改了检测开始时间的规定；
- 修改、完善了终止加载条件；
- 修改、完善了极限加载值的确定；
- 将原“4 试验要点”、“5 资料整理”内容整合修改为“4 仪器设备及其安装”、“5 现场检测”、“6 检测数据分析与判定”、“附录A（规范性附录） 荷载箱的技术要求”、“附录B（规范性附录） 桩身内力测试”、“附录C（规范性附录） 灌注桩荷载箱的安装要求”、“附录D（资料性附录） 试验记录表”；
- 将原“附录A 等效转换方法”整理修改为“附录E（规范性附录） 等效转换方法”。

本规程由江苏省工程建设标准站归口。

本规程起草单位：南京东大自平衡桩基检测有限公司、东南大学、南京市建筑工程质量安全监督站、南京市建筑市场监督站、东南大学建筑设计研究院有限公司、南京赛宝液压设备有限公司。

本规程代替了DGJ32/TJ 77—2009。

DGJ32/TJ 77—2009的历次版本发布情况为：

- DB32/T291—1999。

# 基桩自平衡法静载试验技术规程

## 1 范围

1.0.1 为规范基桩自平衡法静载试验，做到安全适用、经济合理、技术先进、数据准确、评价正确，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于各种岩土中的钻孔灌注桩、人工挖孔桩、壁桩、预应力混凝土管桩、钢管桩、钢管混凝土组合桩以及沉井、地下连续墙等深基础的承载力测试，特别适用于传统静载试验条件受限时的水上、坡地、基坑底、狭窄场地的基桩试验，以及传统静载试验无法实施的特大吨位、逆作法、倾斜基桩试验等。

1.0.3 基桩自平衡法静载试验包括基桩竖向抗压静载试验、基桩竖向抗拔静载试验、深层平板载荷试验；分为施工前为设计提供依据的试验桩检测和施工后为验收提供依据的工程桩检测。

1.0.4 基桩自平衡法静载试验除应符合本规程外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有修改单）适用于本文件。

JGJ 106 建筑基桩检测技术规范

## 3 术语、定义和符号

### 3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1.1

**自平衡法静载试验 static load testing of self-balanced method**

静载试验的一种方法。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，测试整桩承载力的试验方法。

#### 3.1.2

**自平衡法深层平板载荷试验 deep plate load testing of self-balanced method**

平板载荷试验的一种方法。在桩端预埋底板为刚性板的荷载箱，利用桩身自重、桩侧阻力作为反力，测试持力层（桩端）承载力的试验方法。

#### 3.1.3

**平衡点 balance position**

上段桩桩身自重、桩侧阻力之和与下段桩桩侧阻力、桩端阻力之和基本相等的位置。

### 3.1.4

#### 荷载箱 load cell

自平衡法静载试验中用于施加荷载的一种加载装置。

### 3.1.5

#### 等效转换方法 equivalent conversion method

将自平衡法静载试验测得的荷载箱处向上、向下的荷载一位移曲线，等效转换为相应传统静载试验桩顶加载时的荷载一位移曲线的方法。

## 3.2 符号

下列符号适用于本文件。

- $A_D$ ——桩端面积，单位为平方米 ( $m^2$ )；
- $A_{hd}$ ——荷载箱底板面积，单位为平方米 ( $m^2$ )；
- $D$ ——桩端直径，单位为米 (m)；
- $d_{hd}$ ——荷载箱底板直径，单位为米 (m)；
- $k$ ——系数；
- $Q_u$ ——单桩竖向承载力极限值，单位为千牛 (kN)；
- $Q_{uD}$ ——桩端竖向承载力极限值，单位为千牛 (kN)；
- $Q_{uu}$ ——上段桩极限加载值，单位为千牛 (kN)；
- $Q_{ud}$ ——下段桩极限加载值，单位为千牛 (kN)；
- $W$ ——荷载箱上段桩自重与附加重量之和，单位为千牛 (kN)；
- $\gamma$ ——抗压侧阻力转换系数；
- $\phi_p$ ——尺寸效应系数。

## 4 基本规定

### 4.1 一般规定

#### 4.1.1 检测数量应符合下列规定：

- a) 为设计提供依据的试验桩，检测数量应满足设计要求，且在同一条件下不应少于 3 根；当预计工程桩总数小于 50 根时，检测数量不应少于 2 根；
- b) 为验收提供依据的工程桩，检测数量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；当总桩数小于 50 根时，检测数量不应少于 2 根。

#### 4.1.2 最大加载值应符合下列规定：

- a) 为设计提供依据的试验桩，应按设计要求确定。最大加载值可取桩周岩土预估极限承载力的 1.2~1.5 倍；
- b) 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。

#### 4.1.3 工程桩承载力验收检测应给出受检桩的承载力检测值，并评价单桩承载力是否满足设计要求。

#### 4.1.4 受检桩应先进行桩身完整性检测，后进行承载力检测。

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

4.2 检测工作程序

4.2.1 检测工作宜按图 1 的程序进行。

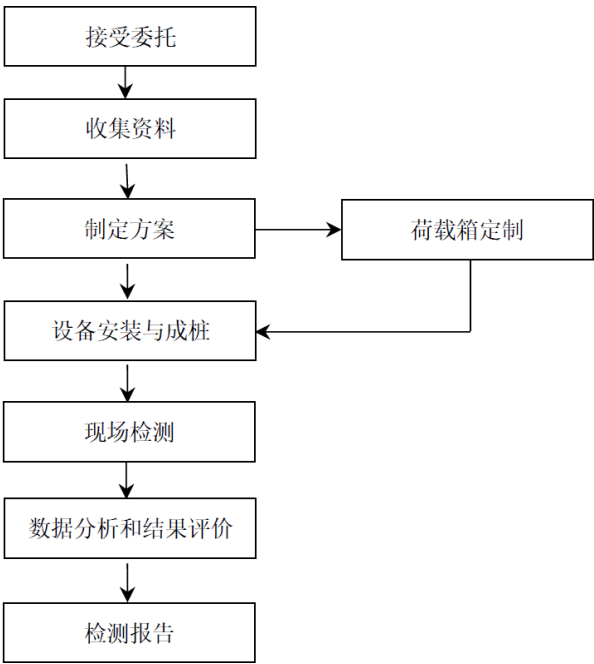


图 1 检测工作程序框图

4.2.2 检测方案宜包含下列内容：

- a) 工程概况、地基条件、桩基设计要求、施工工艺、检测数量、受检桩选取原则；
- b) 荷载箱的规格、数量、埋设位置；
- c) 受检桩的施工要求、所需的机械或人工配合、检测进度；
- d) 工程桩试验后，其荷载箱处注浆的技术质量控制要求。

4.2.3 检测开始时间应符合下列规定：

- a) 受检桩混凝土强度不应低于设计强度的 80%，或按该强度算得的桩身抗压承载力大于荷载箱单向最大加载值的 1.5 倍；
- b) 休止时间不应少于表 1 规定的时间；

表 1 休止时间

| 土的类别                   |     | 休止时间<br>d |
|------------------------|-----|-----------|
| 砂土                     |     | 7         |
| 粉土                     |     | 10        |
| 黏性土                    | 非饱和 | 15        |
|                        | 饱和  | 25        |
| 注：对于泥浆护壁灌注桩，宜适当延长休止时间。 |     |           |

- c) 当采用后注浆施工工艺时，注浆后休止时间不宜少于 20d；当水泥浆中掺入早强剂时，注浆后休止时间不宜少于 15d。

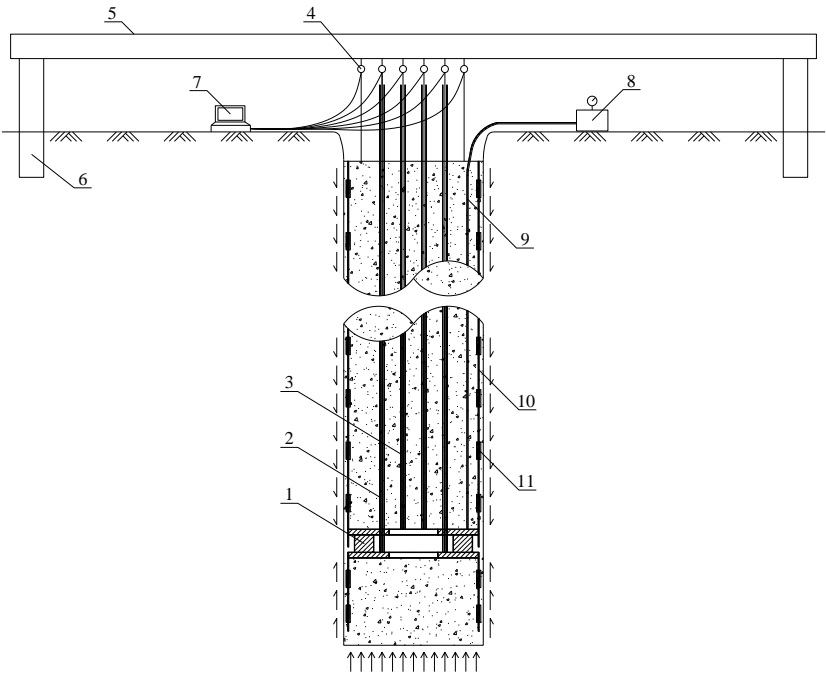
4.2.4 检测报告应包含下列内容：

- a) 委托方名称，工程名称、地点，建设、勘察、设计、监理和施工单位，基础、结构形式，层数，设计要求，检测目的，检测依据，检测数量，检测日期；
- b) 地基条件描述，受检桩桩位对应的地质柱状图；
- c) 受检桩的桩型、尺寸、材料强度、桩号、桩位、桩顶标高、荷载箱标高、荷载箱规格和相关施工记录；
- d) 加、卸载方法，检测仪器设备，检测过程叙述，承载力判定依据；
- e) 受检桩的检测数据，实测与计算分析曲线、表格和汇总结果；
- f) 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、各级荷载作用下的桩身轴力曲线，各土层的桩侧极限侧阻力和桩端阻力；
- g) 与检测内容相应的检测结论。

5 仪器设备及其安装

5.1 仪器设备

5.1.1 基桩自平衡法静载试验系统可由下列部分组成（图 2）：



说明：

- 1——荷载箱；2——下位移杆（丝）及护套管；3——上位移杆（丝）及护套管；4——位移传感器；  
5——基准梁；6——基准桩；7——数据采集系统；8——油泵；9——油管；10——主筋；11——应变传感器

图 2 基桩自平衡法静载试验系统

- a) 加载系统。由荷载箱、油管、油泵、油压测量仪表等组成；
- b) 位移量测系统。由位移传递装置、位移传感器、位移基准装置等组成；
- c) 数据采集与控制系统。由采集压力和位移数据并据此对加载进行控制的数采集仪或电脑等组成。

5.1.2 检测用仪器设备应在校准或检定的有效期内。

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

5.1.4 采用连接于荷载箱油路的压力传感器或压力表测定油压并换算荷载。压力传感器或压力表的准确度应优于或等于 0.5 级，量程不应小于 60MPa。试验用压力传感器或压力表、油泵、油管在最大加载时的压力不应超过规定工作压力的 80%。

5.1.5 位移测量宜采用大量程的位移传感器，测量误差不得大于 0.1%FS，分辨力应优于或等于 0.01mm。荷载箱处向上、向下位移应各自采用一组位移传感器测量，每组位移传感器的数量不应少于 2 个，且应对称布置。

5.1.6 测试桩侧阻力、桩端阻力、桩身截面位移时，桩身内应变传感器、位移传递装置的埋设应符合本规程附录 B 的规定。

## 5.2 设备安装

5.2.1 荷载箱的埋设位置应符合下列规定：

- a) 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；
- b) 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，并在桩顶设置一定量的配重等；
- c) 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，可采取大加桩长等措施，但荷载箱仍应置于设计桩端标高；
- d) 当进行深层平板载荷试验时，荷载箱应置于桩端；
- e) 当需要测试桩的分段承载力，或者单层荷载箱测试有困难时，可布置双层荷载箱，其埋设位置应根据检测要求确定。

5.2.2 荷载箱的安装应符合下列规定：

- a) 荷载箱中心应位于受检桩中心，荷载箱的位移方向与桩身轴线的夹角不应大于 1°；
- b) 对于灌注桩，荷载箱安装应符合本规程附录 C 的规定；
- c) 对于预应力混凝土管桩和钢管桩，荷载箱应与上、下段桩焊接。

5.2.3 位移杆（丝）与护套管应符合下列规定：

- a) 位移杆应具有一定的刚度，宜采用直径 10mm~32mm 的钢管或钢筋；位移丝应绷紧，宜选用合适的配重；
- b) 护套管应顺直无扭曲，接头处应密闭不渗漏；
- c) 当护套管兼做注浆管或代替主筋时，尚应满足相关设计要求。

5.2.4 基准桩和基准梁应符合下列规定：

- a) 基准桩与受检桩之间的中心距离不应小于受检桩直径的 3 倍，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；

- b) 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；
- c) 对于固定和支撑位移传感器的夹具及基准梁，应采取遮挡措施，以减小受气温、振动及其他外界因素的影响。

## 6 现场检测

6.0.1 自平衡法静载试验应采用慢速维持荷载法。

6.0.2 试验加、卸载应符合下列规定：

- a) 试验前应进行预加载；
- b) 加载应分级进行，且采用逐级等量加载，分级荷载宜为最大加载值的 1/10，其中，第一级加载量可取分级荷载的 2 倍；
- c) 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；
- d) 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  $\pm 10\%$ ；
- e) 采用双层荷载箱时，可根据受检桩情况确定上、下荷载箱的测试顺序。

6.0.3 慢速维持荷载法试验应符合下列规定：

- a) 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；
- b) 位移相对稳定标准：每一小时内的位移增量不超过 0.1mm，并连续出现两次（从分级荷载施加后的第 30min 开始，按 1.5h 连续三次每 30min 的位移观测值计算）；
- c) 当位移变化速率达到相对稳定标准时，可施加下一级荷载；
- d) 卸载时，每级荷载应维持 1h，分别按第 15min、30min、60min 测读位移后，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。

6.0.4 当荷载箱处向上或向下位移出现下列情况之一时，可终止加载：

- a) 某级荷载作用下，荷载箱处向上或向下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；
- b) 某级荷载作用下，荷载箱处向上或向下位移增量大于前一级荷载作用下位移增量的 2 倍，且经 24h 尚未达到本规程第 6.0.3 条第 2 款相对稳定标准；
- c) 已达到设计要求的最大加载值或位移总量，且荷载箱处向上或向下位移达到本规程第 6.0.3 条第 2 款相对稳定标准；
- d) 当荷载一位移曲线呈缓变型时，荷载箱处向上位移总量可加载至 40mm~60mm，荷载箱处向下位移总量可加载至 60mm~80mm；当桩端阻力尚未充分发挥时，荷载箱处向下位移总量可加载至超过 80mm；
- e) 荷载已达荷载箱加载极限，或荷载箱处向上、向下位移总量之和已达荷载箱最大行程。

6.0.5 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 6.0.3 条的规定。

6.0.6 试验数据宜按本规程附录 D 的格式记录。

## 7 检测数据分析与判定

### 7.0.1 检测数据的处理应符合下列规定：

- 应绘制荷载—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曲线；
- 当进行桩身应变和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。

### 7.0.2 上段桩极限加载值 $Q_{uu}$ 和下段桩极限加载值 $Q_{ud}$ 应按下列方法综合确定：

- 根据位移随荷载的变化特征确定：对于陡变型荷载—位移曲线，应取其发生明显陡变的起始点对应的荷载值；
- 根据位移随时间变化的特征确定：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；
- 符合本规程第 6.0.4 条第 2 款情况时，宜取前一级荷载值；
- 对于缓变型荷载—位移曲线，宜根据位移总量确定：上段桩极限加载值取荷载箱处向上位移总量等于 40mm 对应的荷载值，或按设计要求的位移总量取值；下段桩极限加载值取荷载箱处向下位移总量等于 40mm 对应的荷载值，对直径大于或等于 800mm 的桩，可取荷载箱处向下位移总量等于  $0.05D$  ( $D$  为桩端直径) 对应的荷载值；当上段桩长或下段桩长大于 40m 时，宜考虑桩身弹性压缩量；
- 不满足本条第 1~4 款情况时，宜分别取荷载箱处向上、向下的最大加载值。

### 7.0.3 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，转换方法宜符合本规程附录 E 的规定。

### 7.0.4 单桩竖向抗压极限承载力，应按下列式计算：

$$Q_u = \frac{Q_{uu} - W}{g} + Q_{ud} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

$Q_u$ ——单桩竖向承载力极限值，单位为千牛 (kN)；

$Q_{uu}$ ——上段桩极限加载值，单位为千牛 (kN)；

$Q_{ud}$ ——下段桩极限加载值，单位为千牛 (kN)；

$W$ ——荷载箱上段桩自重与附加重量之和，单位为千牛 (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；

$g$ ——抗压侧阻力转换系数，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 0.8，砂土取 0.7，岩石取 1.0，若该范围内有不同类型的岩土层时，可取加权平均值。

### 7.0.5 单桩竖向抗拔极限承载力，应按下列式计算：

$$Q_u = Q_{uu} \dots \dots \dots (1)$$

### 7.0.6 由深层平板载荷试验确定桩端竖向抗压极限承载力，应按下列式计算：

$$Q_{ud} = \phi_p \frac{Q_{ud}}{A_{hd}} A_p \dots \dots \dots (3)$$

$$\psi_p = \frac{Q_{uD}}{A_D} \cdot \frac{d_{hd}^k}{D^k} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$Q_{uD}$ ——桩端竖向承载力极限值，单位为千牛（kN）；

$A_D$ ——桩端面积，单位为平方米（ $m^2$ ）；

$A_{hd}$ ——荷载箱底板面积，单位为平方米（ $m^2$ ）；

$\psi_p$ ——尺寸效应系数；

$d_{hd}$ ——荷载箱底板直径，单位为米（m）；

$k$ ——系数，黏性土、粉土取 1/4，砂土、碎石土取 1/3。

7.0.7 为设计提供依据的单桩竖向抗压（抗拔）极限承载力的统计取值，应符合下列规定：

- a) 对参加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；当极差超过平均值的 30%时，应分析原因，结合桩型、施工工艺、地基条件、基础形式等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；
- b) 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。

7.0.8 单桩竖向抗压（抗拔）承载力特征值应按单桩竖向抗压（抗拔）极限承载力的 50%取值。

附 录 A  
(规范性附录)  
荷载箱的技术要求

A.1 荷载箱宜进行整体校准,加载分级数不宜少于五级;当无法进行整体校准时,可对组成荷载箱的液压缸逐一进行校准。液压缸应为同型号,且各液压缸相同油压时的出力相对误差应小于 3%。

A.2 荷载箱或液压缸的校准示值重复性不应大于 3%。

A.3 荷载箱的极限输出推力不应小于额定输出推力的 1.2 倍。加载达到 1.2 倍额定输出推力后,持荷 30min,不应出现泄漏、压力减小值大于 5%等异常现象。

A.4 荷载箱应进行整体试压检验,其耐压性能应符合下列规定:

- a) 检验压力通常情况下不应小于额定压力;
- b) 荷载箱在检验压力下持荷 2h,不应出现泄漏、压力减小值大于 5%等异常现象。

A.5 荷载箱的打开压力应小于额定压力的 10%。

A.6 荷载箱有效面积比  $\rho$  应按下式计算:

$$r = \frac{A_h}{A_p} \times 100\% \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

$A_h$ ——荷载箱投影面积,单位为平方米 ( $m^2$ );

$A_p$ ——桩身截面面积,单位为平方米 ( $m^2$ )。

灌注桩的荷载箱置于桩间时  $45\% < \rho \leq 60\%$ ,置于桩端时  $45\% < \rho \leq 100\%$ 。

A.7 荷载箱应进行出厂检验,并提供合格证和检验报告;荷载箱出厂后不得拆卸、改装或重新组装,否则必须重新进行整体试压检验。

## 附 录 B

### (规范性附录)

### 桩身内力测试

B.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。

B.2 桩身内力测试宜根据测试目的、试验桩型及施工工艺选用应变传感器。

B.3 应变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。在荷载箱附近应设置一个测量断面作为应变传感器标定断面,且距荷载箱的距离不宜小于1倍桩径。标定断面处应对称设置4个应变传感器,其他测量断面处可对称设置2~4个应变传感器,当桩径较大或试验要求较高时取高值。

B.4 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,应采用位移传递装置测量,且应符合本规程第5.2.3条的规定。数据的测读应符合本规程第6.0.3条的规定。

B.5 测试数据整理应符合下列规定:

- a) 根据选用的应变传感器,计算得出各测点处的应变值;
- b) 剔除异常数据后,求出同一断面有效测点的应变平均值,并按下式计算该断面处的桩身轴力:

$$Q_i = \bar{e}_i \cdot E_i \cdot A_i \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

$Q_i$ ——桩身第*i*断面处轴力,单位为千牛(kN);

$\bar{e}_i$ ——第*i*断面处应变平均值,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,单位为千帕(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,应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,单位为平方米( $m^2$ )。

- c) 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:

$$q_{si} = \frac{|Q_{i+1} - Q_i|}{u \cdot l_i} \dots\dots\dots (B.2)$$

$$q_p = \frac{Q_b}{A_b} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

$q_{si}$ ——桩第*i*断面与*i+1*断面间侧阻力,单位为千帕(kPa);

$q_p$ ——桩的端阻力,单位为千帕(kPa);

$i$ ——桩检测断面顺序号;

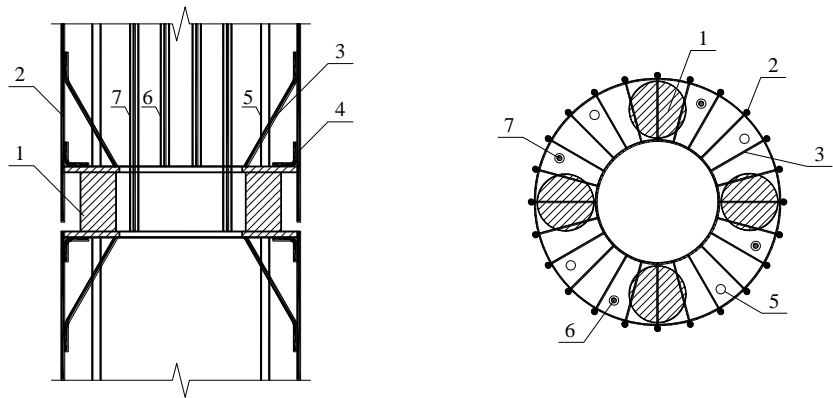
$u$ ——桩身周长,单位为米(m);

$l_i$ ——第*i*断面与第*i+1*断面之间的桩长,单位为米(m);

$Q_b$ ——桩端轴力,单位为千牛(kN)。

附录 C  
(规范性附录)  
灌注桩荷载箱的安装要求

C.1 灌注桩荷载箱的安装应符合下列规定（图 C.1）：



说明：  
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——上位移杆（丝）及护套管；7——下位移杆（丝）及护套管

图 C.1 灌注桩荷载箱安装示意图

- a) 主筋应在荷载箱位置断开，上段钢筋笼的主筋与荷载箱顶板焊接，下段钢筋笼的主筋与荷载箱底板焊接；主筋与荷载箱焊接处可增设 L 形加强钢筋；
- b) 导向钢筋一端与主筋焊接，另一端与荷载箱内孔边缘焊接；导向钢筋与荷载箱平面的夹角不应小于 60°；
- c) 荷载箱上、下不小于 2.0m 范围内的钢筋笼箍筋应加密，间距不应大于 100mm；
- d) 穿过荷载箱的其他声测管、注浆管、取芯管等，应设计成不影响桩身断开面形成和试验加载的结构。

附 录 D  
(资料性附录)  
试验记录表

D.1 检测数据宜按表 D.1 的格式记录。

表 D.1 自平衡法静载试验检测数据记录表

| 工程名称  |             |            |               |             |        | 工程地点 |   |   |       |          |    |    |
|-------|-------------|------------|---------------|-------------|--------|------|---|---|-------|----------|----|----|
| 受检桩编号 |             |            | 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  |          |    |    |
| 加载级   | 压力<br>(MPa) | 荷载<br>(kN) | 测读时间<br>(min) | 位移传感器读数(mm) |        |      |   |   |       | 平均位移(mm) |    |    |
|       |             |            |               | 1           | 2      | 3    | 4 | 5 | 6     | 向上       | 向下 | 桩顶 |
|       |             |            |               |             |        |      |   |   |       |          |    |    |
|       |             |            |               |             |        |      |   |   |       |          |    |    |
|       |             |            |               |             |        |      |   |   |       |          |    |    |

校核：记录：

D.2 结果汇总宜按表 D.2 的格式记录。

表 D.2 自平衡法静载试验结果汇总表

| 工程名称  |        |           |    | 工程地点     |    |          |       |          |    |
|-------|--------|-----------|----|----------|----|----------|-------|----------|----|
| 受检桩编号 |        | 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  |          |    |
| 加载级   | 荷载(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 |
|       |        |           |    |          |    |          |       |          |    |
|       |        |           |    |          |    |          |       |          |    |
|       |        |           |    |          |    |          |       |          |    |
|       |        |           |    |          |    |          |       |          |    |

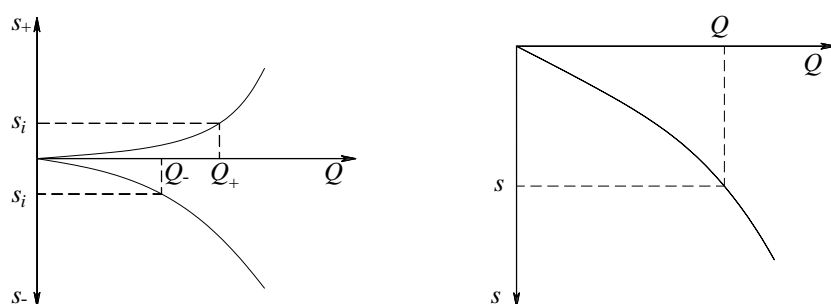
校核：记录：

## 附录 E

### (规范性附录)

### 等效转换方法

E.1 等效转换方法，是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—位移曲线的方法（图 E.1）。



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 E.1 等效转换示意图

E.2 本方法适用于单层荷载箱。双层荷载箱可参照本方法进行转换。

E.3 转换假定：

- a) 桩为弹性体；
- b) 等效桩顶加载桩分为上、下段桩，分界面即为荷载箱截面，该截面满足位移、应变、应力连续条件；
- c) 自平衡法的下段桩与等效桩顶加载桩的下段桩，在分界面处的位移相等；
- d) 自平衡法的桩端阻力—位移关系及不同深度处的桩侧阻力—位移关系，与等效桩顶加载桩相同；
- e) 等效桩顶加载桩上段桩的桩身压缩量为上段桩桩底荷载及桩侧阻力引起的桩身压缩量之和；
- f) 计算由等效桩顶加载桩上段桩的桩侧阻力引起的桩身压缩量时，桩侧阻力采用该单元中点的值；
- g) 等效桩顶加载桩各单元的应变，由该单元上、下轴力及平均断面刚度计算。

E.4 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：

$$Q = \frac{Q_+ - W}{g} + Q \dots\dots\dots (E.1)$$

$$s = s_i + \frac{\frac{Q_+ - W}{g} + 2Q}{2E_p A_p} L_+ \dots\dots\dots (E.2)$$



式中:

$Q$ ——桩顶等效荷载, 单位为千牛 (kN);

$s$ ——桩顶等效位移, 单位为米 (m);

$Q^+$ ——分界截面向上位移大小为  $s_i$  时的对应荷载, 单位为千牛 (kN);

$Q^-$ ——分界截面向下位移大小为  $s_i$  时的对应荷载, 单位为千牛 (kN);

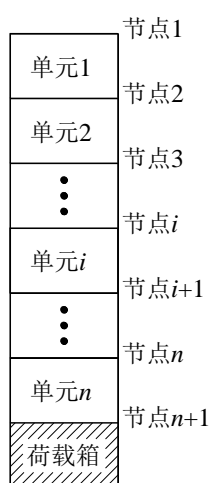
$s_i$ ——位移大小, 单位为米 (m);

$L^+$ ——上段桩长, 单位为米 (m);

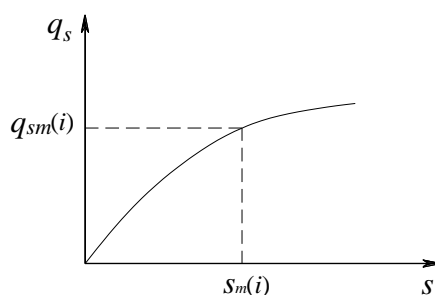
$E_p$ ——桩身弹性模量, 单位为千帕 (kPa)。

#### E.5 荷载传递转换法:

a) 将上段桩自上而下分为  $n$  个单元、 $n+1$  个节点 (图 E.2), 则任一节点  $i$  处:



a) 上段桩单元划分



b) 单位面积侧阻—位移关系曲线

图 E.2 单元划分与侧阻本构关系

$$Q(i) = Q(i+1) + \frac{U(i) + U(i+1)}{2} h(i) q_{sm}(i) \dots\dots\dots (E.3)$$

$$s(i) = s(i+1) + \frac{Q(i) + Q(i+1)}{A_p(i)E_p(i) + A_p(i+1)E_p(i+1)} h(i) \dots\dots\dots (E.4)$$

式中:

$Q(i)$ ——第  $i$  个节点的等效荷载, 单位为千牛 (kN);

$s(i)$ ——第  $i$  个节点的等效位移, 单位为米 (m);

$U(i)$ ——第  $i$  个节点处桩周长, 单位为米 (m);

$h(i)$ ——第  $i$  个单元的高度, 单位为米 (m);

$q_{sm}(i)$ ——第  $i$  个单元中点处桩侧阻力, 单位为千帕 (kPa);

$A_p(i)$ ——第  $i$  个节点处桩身截面面积, 单位为平方米 ( $m^2$ );

$E_p(i)$ ——第  $i$  个节点处桩身弹性模量, 单位为千帕 (kPa)。

b) 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  $q_{sm}(i)$ , 其中  $s_m(i)$  由下式计算:

$$s_m(i) = s(i+1) + \frac{Q(i) + 3Q(i+1)}{A_p(i)E_p(i) + 3A_p(i+1)E_p(i+1)} \frac{h(i)}{2} \dots\dots\dots (E.5)$$

式中：

$s_m(i)$ ——单元*i*的中点位移值，单位为米（m）。

## 本标准用词说明

1 为便于在执行本标准条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1) 表示很严格，非这样做不可的：  
正面词采用“必须”；  
反面词采用“严禁”。
- 2) 表示严格，在正常情况下均应这样做的用词：  
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用词：  
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”。非必须按所指定的标准执行时，写法为“可参考……”

## 江苏省地方标准

# 基桩自平衡法静载试验技术规程

Technical specification for static load testing of self-balanced method of foundation pile

### 条文说明

2020 南京

目 次

1 范围 ..... 19

4 基本规定 ..... 19

    4.1 一般规定 ..... 19

    4.2 检测工作程序 ..... 20

5 仪器设备及其安装 ..... 21

    5.1 仪器设备 ..... 21

    5.2 设备安装 ..... 21

6 现场检测 ..... 23

7 检测数据分析与判定 ..... 23

附录 A（规范性附录） 荷载箱的技术要求..... 24

附录 B（规范性附录） 桩身内力测试..... 24

附录 C（规范性附录） 灌注桩荷载箱的安装要求..... 25

附录 E（规范性附录） 等效转换方法..... 25

## 1 范围

1.0.1~1.0.2 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，由桩侧阻力和桩端阻力互为反力进行测试。与传统静载试验相比，自平衡法具有如下优点：

- a) 不受场地条件限制。水上、坡地、高山、深谷、基坑底、狭窄场地等皆方便测试；
- b) 不受加载吨位限制。最大加载能力（荷载箱）已达4.0万吨，最大实测承载力已达3.2万吨；
- c) 不受基础尺寸限制。沉井直径已达8.0m，圆形桩直径已达3.6m，壁桩截面尺寸已达6.0×1.2m，圆端形桩截面尺寸已达5.5×2.4m；最大桩长已达140m；
- d) 不受基础倾斜限制。不仅可用于直桩测试，也可用于斜桩测试；
- e) 不影响工程桩使用。测试后对荷载箱处注浆，工程桩便可正常使用；当进行抗拔承载力测试时，桩身不会产生受拉裂缝，不影响耐久性；
- f) 方便进行多次测试和长期观测。加载设备预埋在桩身，地面仪器设备简单，便于进行压浆前、后承载力测试，或者进行多次观测以确定承载力随时间的变化等；
- g) 显著缩短工期。2~3根桩的试验周期可缩短10~20天；
- h) 安全环保。没有潜在危及人身安全的地面反力系统，无配重、反力梁的运输、吊装、转场等工作；
- i) 无额外费用。无需平整道路、处理地基、加固桩头、施打锚桩等，桩顶有埋深时无需接桩至地面便可测试；
- j) 综合费用低。工期越紧张、场地条件越复杂、试验荷载越大，经济效益越好。

自平衡法适用于黏性土、粉土、砂土、碎石土、岩石以及软土、冻土、湿陷性土等特殊土中的基桩承载力测试。

自平衡法适用于能够安装荷载箱的各种桩型，如机械成孔灌注桩、人工挖孔灌注桩、预制桩等。

自平衡法的加载方向为桩身轴向，故可用于斜桩的轴向抗压、抗拔承载力测试。目前，自平衡法已用于水上钢管桩和钢管混凝土组合桩斜桩的测试。

斜桩轴向承载力的测试，可参照本规程相关内容执行。

1.0.3 自平衡法适用于基桩竖向抗压、抗拔承载力测试，对于斜桩则为轴向抗压、抗拔承载力测试。

当荷载箱底板为整体刚性板、置于桩端测试持力层（桩端）承载力时，试验条件与深层平板载荷试验类似，但此时桩端处岩土受力状况与基桩使用条件更加接近，故其测试结果也更加准确。自平衡法深层平板载荷试验的荷载箱底板直径宜与桩径接近。

自平衡法可用于施工前为设计提供依据的试验桩检测，此时应加至桩周岩土破坏；当试验桩无其他用途时，试验后可不作处理。

自平衡法可用于施工后为验收提供依据的工程桩检测，此时应按设计要求加载；试验后应对荷载箱处进行注浆处理，以保证工程桩的正常使用。

## 4 基本规定

### 4.1 一般规定

4.1.1 受检桩数量应满足设计要求。本条引用现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106，给出了受检桩数量的下限。

4.1.2 试验桩的大量测试结果表明，按照岩土工程勘察报告预估的极限承载力加载，往往达不到桩周岩土破坏。为测得桩周岩土的极限承载力，宜将预估的极限承载力放大后作为最大加载值进行加载。若桩长较短或地层较差，放大系数可取 1.2；若桩长较长或地层较好，放大系数可取 1.5；对于强度高的岩石，放大系数有时需取 2.0 以上才会出现破坏。

工程桩的最大加载值，应满足按照此值进行试验后，得到的单桩竖向承载力极限值满足设计要求。对于抗压桩，单桩竖向承载力极限值一般要达到承载力特征值的 2.0 倍；抗拔桩也可按 2.0 倍考虑。当设计有要求时，如抗拔桩按上拔量控制加载等，则应按设计要求执行。

4.1.3 本条引用现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106。

4.1.4 受检桩桩身完整性宜采用声波透射法检测，当条件适用时也可采用低应变法检测。一些新兴的检测技术，如管波法、热完整性法，具备条件时也可采用。

对受检桩进行桩身完整性检测时，荷载箱处可能会产生异常，但不应直接判为桩身缺陷，而应注明该区域为荷载箱。若自平衡法静载试验的前几级加载无异常，则表明荷载箱处桩身质量无异常，不会对桩身结构承载力产生不利影响。

4.1.5 自平衡法用于工程桩检测时，为确保试验后工程桩的正常使用，施工单位应对荷载箱处因试验产生的缝隙进行注浆处理。

试验过程中，组成荷载箱的液压缸缸套和活塞之间产生相对位移，荷载箱处的混凝土被拉开产生缝隙，其宽度等于卸载后向上、向下残余位移之和，但桩身的其他部位并未损坏，上下段桩仍被荷载箱连在一起；试验后将不低于桩身强度的水泥浆注入，受检桩就可作为工程桩正常使用，这是因为：

- a) 注浆不仅填满荷载箱处混凝土的缝隙，使该处桩身强度不低于试验前，而且还相当于增加了桩侧注浆工序，使荷载箱以上 12m（或荷载箱上下 6m）范围内的桩侧阻力提高 40%~100%，即注浆处理后的受检桩承载力，比同等条件下的工程桩要高；
- b) 试验时已将桩底土压实，试验后的受检桩沉降量，比同等条件下的工程桩要小；
- c) 由于荷载箱置于桩身平衡点处，上段桩即可承担与工作荷载相当的荷载，故此在工作荷载作用下，该处桩身的应力水平很低，桩身强度能够满足要求；
- d) 平衡点大多靠近桩底，该处弯矩为零、剪力为零或者很小，不影响其水平承载力。

荷载箱注浆可利用声测管或护套管，也可单独设置注浆管。

注浆顺序宜按清水洗孔—水泥浆置换—压力注浆的顺序进行。当完成水泥浆置换后，荷载箱处缝隙已被浆液填满，此后的压力注浆一方面确保桩身浆液饱满、密实，另一方面可提高桩侧阻力。

## 4.2 检测工作程序

4.2.3 从桩身强度来看，因自平衡法静载试验为双向加载，荷载箱处施加的最大荷载是传统静载试验的一半，故不必等到混凝土龄期 28d 即可进行试验。但若桩身混凝土强度过低，仍有可能引起桩身损伤或破坏。为分清责任，规定试验时受检桩的混凝土强度不应低于设计强度的 80%，或按该龄期混凝土强度算得的桩身抗压承载力大于荷载箱单向预估最大加载值的 1.5 倍。

后注浆桩的休止时间应考虑水泥浆液增强反应所需时间的影响。

若因某些原因使得检测工期无法满足休止时间的规定，应在检测报告中注明。

## 5 仪器设备及其安装

### 5.1 仪器设备

5.1.4 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%，目前多为 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以降低最大加载压力。

5.1.5 有条件时，桩顶位移宜采用一组位移传感器测量，位移传感器的数量不宜少于 2 个。

5.1.6 试验桩宜进行桩身内力测试。

### 5.2 设备安装

5.2.1 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。

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。

图1总结归纳了荷载箱的安放位置，可供制定检测方案时参考。

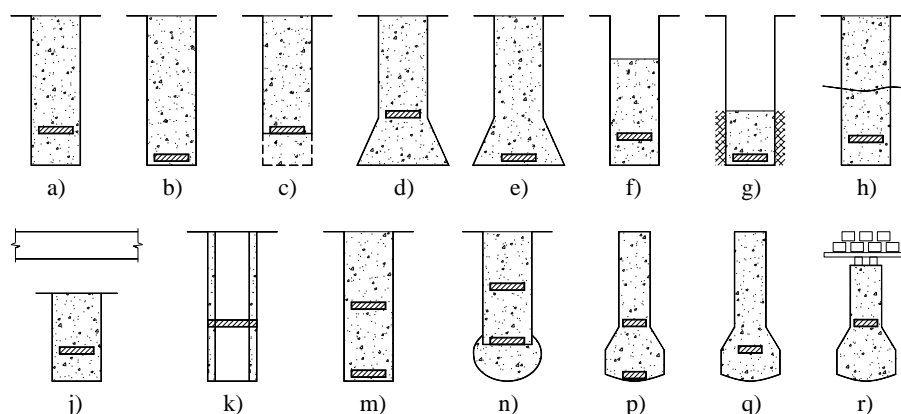


图1 荷载箱的安放位置

图1 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1 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1 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1 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1 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1 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1 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1 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1 j) 为上部空间受限时情况，如在地下室中或基坑内支撑下进行测试。

图1 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1 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1 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1 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1 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1 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。

5.2.2 当荷载箱的位移方向与桩身轴线的夹角不大于 $1^\circ$ 时，荷载箱偏心出力对测试产生的影响很小，可忽略不计。

灌注桩荷载箱与钢筋笼的连接，宜按本规程附录C进行。

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。

5.2.3 位移传递装置一般采用位移杆（丝）及护套管的形式，也可采用满足试验要求的其他形式的位移传递装置。

5.2.4 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，基准梁长度可按传统静载试验的小者取值，即不小于受检桩直径的6倍且不小于4.0m。若大直径桩按6倍受检桩直径架梁困难时，基准梁的长度可适当放宽，但不应小于8.0m。

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。

为减少因温度变化等引起的基准梁挠曲变形，其一端固定于基准桩，另一端简支于基准桩，如图2所示。其中，简支端可根据现场条件采用圆钢或钢管，使基准梁能够自由伸缩。

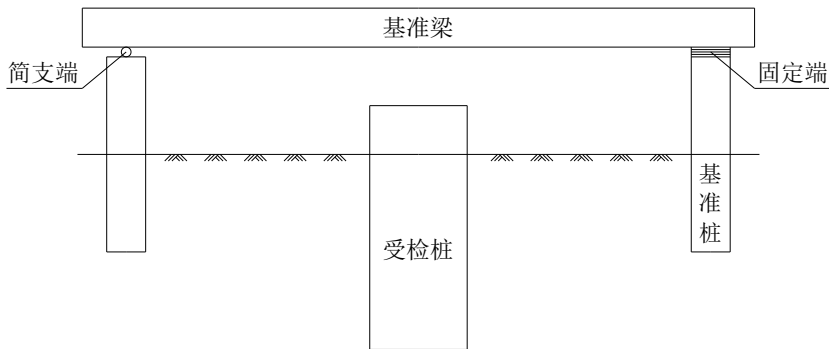


图 2 基准系统示意图

6 现场检测

6.0.1 慢速维持荷载法是我国的传统试验方法，有条件时均应采用。

对于一些试验条件恶劣的情况，如水上风浪大、试验平台受潮水涨落影响等，也可采用快速维持荷载法，但应符合现行有关标准的规定。

6.0.2 预加载用于打开荷载箱，同时对仪器设备的工作状况进行检查。预加载值可取最大加载值的10%~20%，同时观测压力、位移变化，荷载箱打开后应卸载至零，之后可进行正式加载。

当预估极限承载力较大时，加载可分15级，卸载可分5级。

双层荷载箱一般先测试下荷载箱，再测试上荷载箱。条件适当时也可先测试上荷载箱，再测试下荷载箱。

6.0.4 本级荷载作用下的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，可认为产生了陡变破坏。

对于抗拔桩，当设计有要求时可按上拔量控制加载。

7 检测数据分析与判定

7.0.4 自平衡法测得的抗压承载力为桩周岩土阻力控制的承载力，由桩身强度控制的承载力可通过钻芯法等进行检测。

对于抗压侧阻力转换系数 $\gamma$ ，碎石土可参照砂土取值，全风化岩、强风化岩可根据岩体的风化程度，参照对应土类取值。

7.0.5 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，应按上拔要求取承载力值。

7.0.6 当深层平板载荷试验的荷载箱底板面积小于桩底面积时，需要进行承载力换算方可得到桩端承载力。按建筑行业考虑尺寸效应时，换算公式由现行《建筑桩基技术规范》JGJ 94 中  $D=800\text{mm}$  时的桩端阻力尺寸效应系数推导得出。

当荷载箱底板直径小于800mm时不考虑尺寸效应。

7.0.7~7.0.8 本条引用现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106。

附录 A（规范性附录） 荷载箱的技术要求

- A.1 荷载箱不应采用变形板密封形式的液压缸。变形板密封液压缸的活塞与缸套为间隙配合，稳定性差，可靠性低。
- A.5 荷载箱的打开压力主要受荷载箱上、下连接板间的连接筋、连接管（声测管、护套管、注浆管、取芯管）等连接件的影响，应根据试桩参数设计连接件。若吊装时在荷载箱上、下连接板间临时增加连接件的，则应在钢筋笼安装到位后割开，使荷载箱能够在预加载时正常打开。
- A.6 灌注桩荷载箱的上、下连接板应采用刚性板，其外形、尺寸应与钢筋笼一致，主筋应直接与连接板焊接。
- A.7 荷载箱经整体试压检验合格后，能保证其内部连接和整体工作的可靠性；若改动其结构或连接而不重新整体试压，则不能保证荷载箱的耐压性能仍符合出厂标准。

附录 B（规范性附录） 桩身内力测试

B.3 自平衡法的加载点位于荷载箱处，故应在荷载箱上部或下部不小于 1 倍桩径处设置应变传感器标定断面，如图 3 所示。

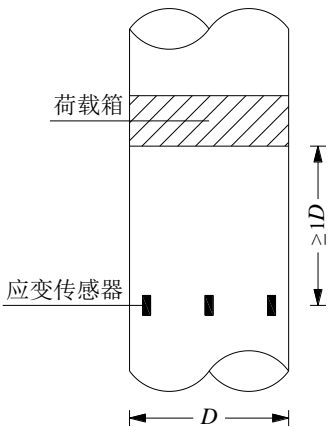


图 3 应变传感器标定断面示意图

自平衡法受检桩的桩顶一般不受力，故桩顶附近可不设置应变传感器。

B.4 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。

## 附录 C（规范性附录） 灌注桩荷载箱的安装要求

C.1 主筋与荷载箱的焊接强度，应能避免施工过程中荷载箱脱落。当荷载箱和下段钢筋笼的重量较大，仅靠主筋与荷载箱的焊接强度不能承受此重量时，应分别在荷载箱顶板、底板的主筋焊接处增设 L 形加强钢筋。L 形加强钢筋的直径宜同主筋，焊缝长度不宜小于 120mm。

荷载箱上下应分别设置喇叭状的导向钢筋，其作用在于保证混凝土导管能顺利通过荷载箱，避免对荷载箱产生损伤，同时还可增加桩身强度。导向钢筋的数量和直径宜同主筋，有条件时宜采用直径不小于 16mm 的圆钢。

因荷载箱处钢制构件占据了较大截面，钢筋数量众多，因此在灌注混凝土时，荷载箱上下 2.0m 范围内应放慢灌注速度，有条件时宜采用坍落度 200mm 以上的混凝土，以保证该处混凝土灌注密实。

## 附录 E（规范性附录） 等效转换方法

E.2 双层荷载箱将桩身分为上、中、下 3 段，可参照本方法进行两次等效转换。

若先测试下荷载箱，后测试上荷载箱，则先进行中、下段桩的等效转换，将转换结果视为“下”段桩，再与上段桩进行一次等效转换。

若先测试上荷载箱，后测试下荷载箱，则先进行上、中段桩的等效转换，将转换结果视为“上”段桩，再与下段桩进行一次等效转换。

E.4 等效转换应满足位移连续条件，故此可取某一位移值，在自平衡法测得的向上、向下荷载一位移曲线上，分别求出与该位移值对应的 2 个荷载值，再将此荷载进行等效转换。

E.5 按附录 B 进行桩身内力测试时，得出侧阻一位移曲线和端阻一位移曲线后，可采用荷载传递法进行等效转换。

进行自平衡法等效转换时，一般从荷载箱处向上转换即可。