

桥梁桩基础自平衡静载试验规程

2023-01-18 发布

2023-04-18 实施

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

4 基本规定 3

5 试验方案制定 4

6 仪器安装及现场试验 5

7 试验数据分析与试验报告 8

附录 A（资料性） 荷载箱的技术要求 10

附录 B（资料性） 桩身内力测试 11

附录 C（资料性） 灌注桩的荷载箱安装方法及要求 12

附录 D（资料性） 静载试验数据记录表 13

附录 E（资料性） 工程桩试验后注浆处理 14

附录 F（资料性） 等效转化方法 15

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由山西省交通运输厅提出、组织实施和监督检查。

山西省市场监督管理局对标准的组织实施情况进行监督检查。

本文件由山西省交通运输标准化技术委员会（SXS/TC37）归口。

本文件起草单位：中国铁建投资集团有限公司、中铁建投山西高速公路有限公司、山西交通科学研究院集团有限公司、山西省交通科技研发有限公司、东南大学、中国铁建大桥工程局集团有限公司、山西省交通规划勘察设计院有限公司。

本文件主要起草人：李晓燕、龚维明、员建斌、林再志、王峰、秦伟、郭文龙、苏燕东、臧博、马冬云、荆凯、梁奇、刘晓剑、杨站强、杨荣清、段亮亮、刘吉祥、王彬、王磊、刘志华。

桥梁桩基础自平衡静载试验规程

1 范围

本文件规定了公路桥梁桩基础自平衡静载试验的术语、定义和符号、基本规定、试验方案、现场试验、数据分析与判定等内容。

本文件适用于公路工程中的桥梁桩基础自平衡静载试验，市政工程可参照执行。

桥梁桩基础自平衡静载试验除应执行本文件外，尚应符合国家、行业和山西省现行有关标准的规定。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB50661 钢结构焊接规范

JT/T738 基桩静载试验 自平衡法

JT/T875 桩基础自平衡法静载试验用荷载箱

JGJ/T403 建筑基桩自平衡静载试验技术规程

JGJ106 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

自平衡静载试验

静载试验的一种方法。在桩身中预埋荷载箱，利用桩身自重（或桩身自重和上部附加重量）、桩侧阻力及桩端阻力互相提供反力，测试单桩竖向抗压（拔）承载力的试验方法。

3.1.2

上段桩、中段桩、下段桩

当采用单荷载箱试验时，荷载箱以上部分桩身称作上段桩，荷载箱以下部分桩身称作下段桩；当采用双荷载箱试验时，上荷载箱以上部分桩身称作上段桩，两荷载箱之间部分桩身称作中段桩，下荷载箱以下部分称作下段桩。

3.1.3

平衡点

上段桩桩身自重（或上段桩桩身自重和上部附加重量）及桩侧阻力之和，与下段桩桩侧阻力及桩端阻力之和基本相等的位置。

3.1.4

荷载箱

自平衡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

将自平衡静载试验测得的荷载箱处向上、向下的荷载—位移曲线，等效转换为相应静载试验的荷载—位移曲线的方法。

3.1.6

位移杆（丝）

用于传递位移的杆件（钢丝）。

3.1.7

护套管

预埋在桩身内部，用于保护位移杆（丝）的管件。

3.2 符号

下列符号适用于本文件。

3.2.1 几何参数

A_s —桩身截面面积；
 A_h —荷载箱截面面积；
 d —桩径；
 u —桩身周长；
 L —桩长。

3.2.2 作用与作用效应

Q_u —单桩竖向抗压承载力极限值；
 Q_t —单桩抗拔承载力极限值；
 Q_{ud} —桩端竖向承载力极限值；
 Q_{uu} —上段桩的极限加载值；
 Q_{um} —中段桩的极限加载值；
 Q_{ud} —下段桩的极限加载值；
 q_s —桩侧阻力；
 q_p —桩端阻力；
 Q_b —桩端轴力；
 s —桩顶位移；

s_u —荷载箱向上位移；

s_d —荷载箱向下位移。

3.2.3 计算系数与材料性能

γ_1 —抗压侧摩阻力转换系数；

γ_2 —抗拔侧摩阻力转换系数；

E —桩身弹性模量；

W —荷载箱上部桩的自重与附加重量之和，附加重量包括设计桩顶以上超灌高度的重量、空桩段泥浆重量、回填土自重、桩顶配重或施加的反力。上部桩的桩身在地下水位以下部位取浮重度，在地下水位以上部位取自身重度。

4 基本规定

4.1 一般规定

4.1.1 桩基础自平衡静载试验包括抗压和抗拔静载试验。通过在桩身或桩端预埋荷载箱，利用荷载箱上、下段桩互相提供反力进行试验，是接近于抗压（抗拔）桩的实际工作条件的一种试验方法。

4.1.2 本文件适用于钻孔灌注桩、人工挖孔桩，以及静压法施工的预制混凝土桩。不适用桩身直径小于 600mm 的钻孔灌注桩。

4.1.3 为设计提供依据的试验桩宜加载至破坏，最大加载值宜根据桩长和地层条件取桩周岩土预估极限承载力的 1.5~2.0 倍；为验收提供依据的工程桩，最大加载值应满足设计要求。

4.1.4 为设计提供依据的试验，应提供桩周分层侧摩阻力、端阻力和极限承载力；为验收提供依据的工程桩试验，应提供桩的承载力试验值。

4.1.5 试验桩应先进行桩身完整性检测，满足要求后进行承载力试验。

4.1.6 工程桩承载力试验完成后，应及时对荷载箱处桩身进行处置。

4.1.7 当试验数据异常或不满足预期要求时，应查明原因，并进行重新试验或扩大试验。

4.1.8 测试前，应根据地勘资料、试桩参数、试桩桩型、施工工艺等提前设计制作荷载箱，并应满足附录 A 的要求。

4.2 试桩数量

4.2.1 为设计提供依据的试验，试验桩数量应满足设计要求。

4.2.2 为验收提供依据的工程桩试验，试验桩数量不应小于同一条件下总桩数的 1%，且不应少于 3 根。

4.3 试验流程

4.3.1 试验工作宜按图 1 的流程进行。

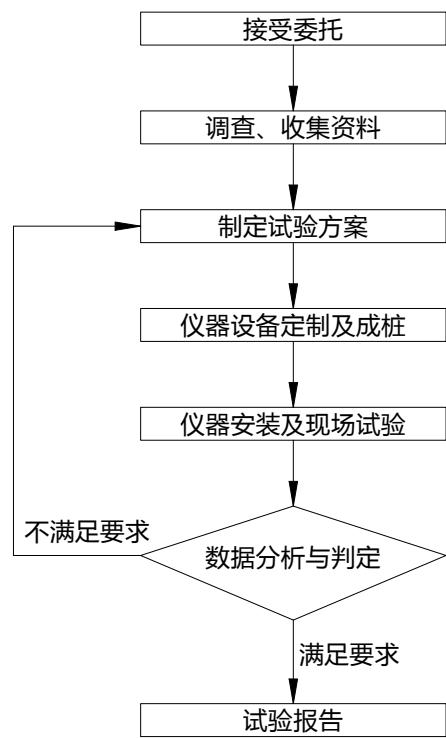


图 1 试验工作流程图

- 4.3.2 调查、资料收集阶段宜包括下列内容：
- 收集并分析岩土工程勘察报告、设计图纸、施工资料和检验资料。
 - 了解工程概况、地形、地质、水文条件、桩基类型和设计参数以及施工工艺。
- 4.3.3 试验开始时间应符合下列规定：
- 试验桩混凝土强度不应低于设计强度的 80%，或按该强度算出的桩身抗压承载力大于荷载箱单向最大加载值的 1.5 倍。
 - 土体休止时间不应少于表 1 规定的时间。

表 1 土体休止时间

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

注：对于泥浆护壁灌注桩，宜适当延长休止时间。

——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。

5 试验方案制定

5.1 方案基本内容宜包括：

- 工程概况、地形、地质、水文条件、桩基设计参数、桩位布置图、施工平面图、施工工艺、试验数量、试验桩选取原则。
- 荷载箱的类型、规格、数量、埋设位置。
- 试验桩的施工要求。
- 设备安装。
- 加载方式及加卸载分级。
- 试验进度安排。
- 试验后荷载箱处桩身处置的技术质量控制要求。
- 现场试验时的安全保护和环境保护措施。

5.2 试桩位置应选择地质条件具有代表性的区段，宜靠近地质勘察钻探孔。

5.3 荷载箱埋设位置应根据地勘资料计算确定，并应符合下列规定：

- 试验桩为抗压桩，预估极限桩端阻力小于极限侧阻力时，应将荷载箱置于桩身平衡点处；预估极限桩端阻力大于极限侧阻力时，可将荷载箱置于桩端以上 2m 处，并在桩顶设置一定量的配重等。
- 试验桩为抗拔桩时，荷载箱应置于桩端以上 2m 处。桩端提供的反力不足时，可采取加大桩长、桩底注浆等措施提高荷载箱下部反力。
- 荷载箱埋设位置宜根据地质条件、桩型及施工工艺等按照下列原则确定埋设位置区间：当采用单荷载箱进行试验时，其位置应设在上下段桩身的受力平衡点处；当采用双荷载箱进行试验时，荷载箱位置应符合下列原则：
 - 1) 上段桩承载力 $\geq$ 中段桩承载力；
 - 2) 上段桩承载力 $\leq$ 中段桩和下段桩承载力之和；
 - 3) 上段桩和中段桩承载力之和 $\geq$ 下段桩承载力。

5.4 荷载箱技术参数应符合 JT/T 875《桩基础自平衡法静载试验用荷载箱》的规定。

5.5 湿陷性黄土、陡坡、冲刷等特殊地质、地形条件下的桩基础，应按设计有效桩长制定试验方案。

6 仪器安装及现场试验

6.1 仪器设备定制

6.1.1 自平衡静载试验系统仪器设备的总体组成如图 2 所示。

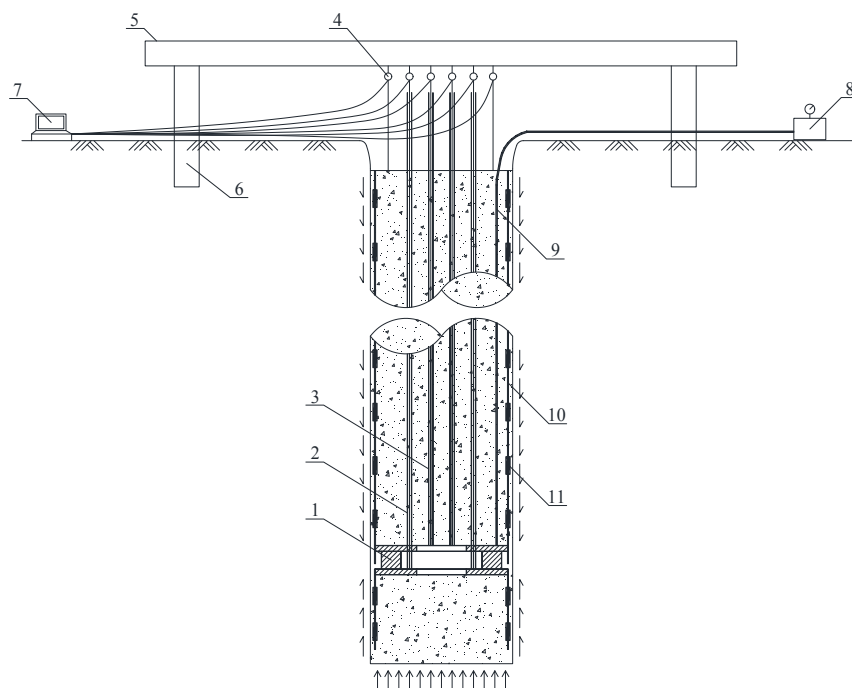


图2 仪器设备总体安装布置图

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—内力测试装置

6.1.2 加载系统由桩基静载仪、荷载箱、加载油泵、油压表或压力传感器、高压油管等设备部件组成，并应符合以下规定：

- 桩基静载仪宜采用可自动加卸载、自动补压、数据自动采集的智能化仪器，并在有效的检定或校准期内，试验前应对仪器进行检查调试。
- 油压表或压力传感器的准确度应优于或等于 0.5 级，量程不应小于 60MPa。
- 油压表或压力传感器、加载油泵、油管在最大加载工况时的压力不应超过规定工作压力的 80%。
- 各组成设备部件应具备试验工作所必需的防尘、防潮、防震等功能，并应在适用的温度、湿度范围内工作。

6.1.3 位移量测系统由基准桩、基准梁、位移传感器、位移传递装置等设备部件组成，并应符合以下规定：

- 基准桩与试验桩之间的中心距离不应小于试验桩直径的 3 倍，且不应小于 2.0m；基准桩应打入地面以下足够深度，不宜小于 1.0m。
- 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。
- 位移传感器的测量误差不得大于满量程的 0.1%，分辨力应优于或等于 0.01mm。荷载箱处向上、向下的位移应各采用一组位移传感器测量，每组传感器数量不应少于 2 个，且应对称布置。桩顶应对称布置 2 个传感器测量桩顶位移。
- 位移传递装置可采用位移杆或位移丝，并应符合以下规定：
 - 1) 位移杆应具有一定的刚度，宜采用钢管或钢筋，外径一般不宜小于 18mm。当采用钢管时，壁厚不宜小于 2mm。护套管内径应大于 2 倍位移杆外径，壁厚不应小于 3mm。
 - 2) 位移丝应具有一定的刚度，应选用合适的配重使位移丝绷紧。当采用后置位移丝时，声测管可兼做护套管，内径不应小于 40mm，壁厚不宜小于 3mm。当采用预埋位移丝时，应增设护套管对位移丝进行可靠的保护。

3) 位移杆或位移丝的护套管均应顺直无扭曲, 接头处应密闭不渗漏。

4) 位移杆或位移丝与护套管之间应填充特殊材质填充材料, 以保证位移杆或位移丝能在护套管自由滑动, 以及减少位移杆或位移丝与护套管摩擦而引起位移数据失真。

——加载系统和位移量测系统应采取遮挡措施, 以减小受气温、振动及其他外界不利因素的影响。

6.1.4 桩身内力测试仪器设备的埋设应符合附录 B 的规定。

6.2 仪器设备安装

6.2.1 荷载箱安装应符合下列规定:

——荷载箱中心应位于试验桩中心, 荷载箱位移方向与桩身轴线夹角不应大于 1° ;

——灌注桩的荷载箱安装宜按本文件附录 C 进行。

6.2.2 位移杆(丝)与护套管的安装应符合以下规定:

——护套管与荷载箱顶盖和底板应采用机械连接或焊接, 焊缝应满足强度要求, 并确保护套管不渗浆。

——位移杆(丝)与引测部位及位移杆(丝)中间的接头应连接可靠, 确保在试验前或试验过程中不会脱开。

——安装后, 应对位移杆(丝)和护套管进行保护, 并对位移杆(丝)做好标识, 确保试验时可区分上位移与下位移;

——位移杆及其护套管宜伸出地面, 对开挖后进行试验的, 位移杆及护管应伸出桩顶面, 浇注混凝土前应先将其护套管封口保护, 以防杂物漏入。

——试验桩顶部空桩长度较长时, 位移杆和护套管必须有可靠的固定措施。

6.2.3 埋设油管时, 宜沿同一根上(下)护管或主筋拉直并每隔 2m 绑扎固定, 应伸出地面不少于 1m~2m。对开挖后进行试验的, 钢筋笼宜伸出桩顶面 1m~2m。

6.2.4 场地开挖及凿除桩头时宜人工操作, 不得损坏位移杆、护套管和油管。

6.3 现场试验

6.3.1 静载试验应采用慢速维持荷载法。

6.3.2 试验加、卸载应符合下列规定:

——试验应进行预加载, 预加载前应进行排气, 加载过程中宜连续加载。

——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。

——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。

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

——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 $\pm 10\%$ 。

——采用双层荷载箱时, 可根据试验桩情况确定上、下荷载箱的测试顺序。

6.3.3 慢速维持荷载法试验应符合下列规定:

——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。

——位移相对稳定标准: 荷载箱上下的位移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)。

——当位移变化速率达到相对稳定标准时, 可施加下一级荷载。

——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。

6.3.4 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：

- 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。
- 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 尚未达到本文件第 6.3.3 条第 2 款相对稳定标准。
- 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文件第 6.3.3 条第 2 款相对稳定标准。
- 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。
- 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。

6.3.5 测试桩身内力和桩身截面位移时，数据的测读时间宜符合本文件第 6.3.3 条的规定。

6.3.6 试验数据宜按本文件附录 D 的格式记录。

6.3.7 试验桩为工程桩时，按附录 E 对荷载箱处桩身进行处置。

7 试验数据分析与试验报告

7.1 试验数据分析

7.1.1 应绘制荷载一位移曲线、位移—加载时间单对数曲线，也可绘制其他辅助分析曲线。同一工程的一批试验桩基础曲线应按相同的位移比例绘制，满刻度位移值不宜小于 4cm，使结果直观、便于比较。

7.1.2 当进行桩身应力和桩身截面位移测定，应按本文件附录 F 的规定整理测试数据，绘制桩身轴力图，计算不同土层的桩侧阻力和桩端阻力。

7.1.3 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：对于陡变型荷载一位移曲线，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；
- 符合本文件第 6.3.4 条第 1、2 款情况时，宜取前一级荷载值；
- 对于缓变型荷载一位移曲线，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。

7.1.4 桩基础自平衡法静载试验测得的荷载一位移曲线，宜等效转换为相应传统静载试验桩顶加载时的荷载一位移曲线，转换方法宜符合本文件附录 F 的规定。

7.1.5 单桩竖向抗压极限承载力，应按下列公式计算：

$$Q_u = \frac{Q_{uu} - W}{\gamma_1} + Q_{ud} \dots \dots \dots (1)$$

式中：

Q_u ——单桩竖向抗压承载力极限值 (kN)；

Q_{uu} ——上段桩极限加载值 (kN)；

Q_{ud} ——下段桩极限加载值 (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；

γ_1 ——抗压侧摩阻力转换系数，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。

7.1.6 单桩抗拔极限承载力，应按下式计算：

$$Q_t = \frac{Q_{uu}}{\gamma_2} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

Q_t ——单桩抗拔承载力极限值 (kN)；

γ_2 ——抗拔侧摩阻力转换系数；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。

7.1.7 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：

——对参加算术平均的试验桩试验结果，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；不能明确极差过大原因时，宜增加试桩数量；

——试验桩数量小于 3 根或桩基承台下的桩数不大于 3 根时，应取试验结果的低值。

7.1.8 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。

7.2 试验报告

试验报告应包含下列内容：

- 委托方名称，工程名称、地点，参建单位，设计要求，试验目的，试验依据，试验数量，试验日期。
- 地质条件描述，试验桩桩位对应的地质柱状图。
- 试验桩设计参数、桩基类型、尺寸、有效桩长、材料强度、桩号、桩位、桩顶标高、荷载箱标高、荷载箱规格、成孔工艺和相关施工记录。
- 加、卸载方法，试验仪器设备，试验过程叙述。
- 试验数据，实测与计算分析曲线、表格和汇总结果，承载力判定依据。
- 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，各土层的极限桩侧摩阻力和桩端阻力；
- 试验结论及建议。

附录 A

(资料性)

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.2 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.3 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.4 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。
- A.5 荷载箱的其他技术要求应符合现行行业标准 JT/T875《桩基础自平衡法静载试验用荷载箱》。

附录 B
(资料性)
桩身内力测试

- B.1 通过桩身内力测试,计算桩侧各土层的分层侧摩阻力及端阻力。
- 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电阻应变式传感器、振弦式传感器、滑动测微计、光纤传感器等。
- 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,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。
- B.5 测试数据整理应符合下列规定:
- 根据选用的应变传感器,计算得出各测点处的应变值。
 - 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:

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

式中:

Q_i ——桩身第*i*断面处轴力(kN);

$\bar{\varepsilon}_i$ ——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(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(m²)。

- 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:

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

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

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——桩试验断面顺序号;

u——桩身周长(m);

l_i——第*i*断面与第*i+1*断面之间的桩长(m);

Q_b ——桩端轴力(kN)。

A_s ——桩端面积(m²)。

附录 C

(资料性)

灌注桩的荷载箱安装方法及要求

C.1 灌注桩荷载箱的安装应符合下列规定 (图 C.1):

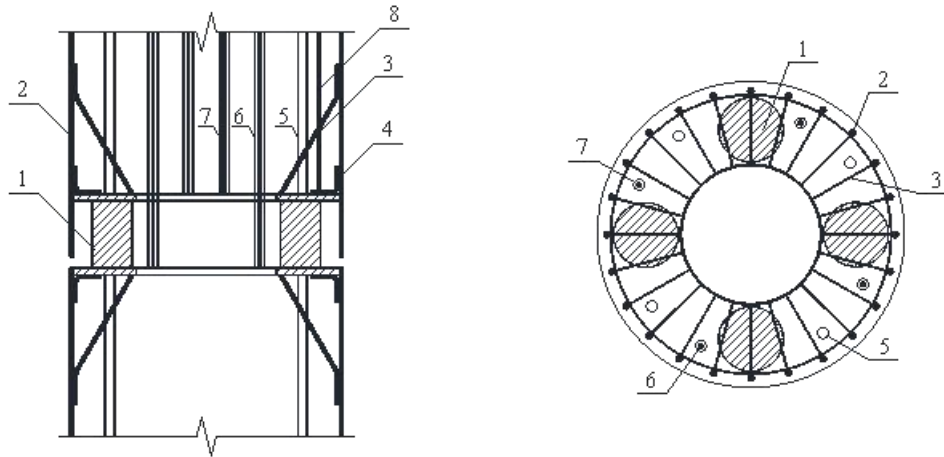


图 B.1 灌注桩荷载箱安装示意图

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；8—高压油管

C.2 主筋应在荷载箱位置断开，钢筋笼主筋断开位置应在同一水平面上。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，焊接强度应满足要求。

C.3 主筋与荷载箱焊接处可增设 L 形加强钢筋，长度应满足焊接长度要求，数量宜同主筋，当主筋数量较多时，可适当减少。

C.4 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° 。导向钢筋与主筋搭接长度应大于 200mm。

C.5 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。

C.6 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。

C.7 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。L 形加强钢筋的直径宜同主筋，焊缝长度不宜小于 120mm。

C.8 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。

C.9 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 D
(资料性)
静载试验数据记录表

D.1 试验数据宜按表 D.1 的格式记录。

表 D.1 静载试验试验数据记录表

工程名称						工程地点						
试验桩编号			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				
荷载箱型号												
加载级	压力	荷载	测读时间	位移传感器读数(mm)						平均位移(mm)		
	(MPa)	(kN)	(min)	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					
试验桩编号		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

(资料性)

工程桩试验后注浆处理

E.1 注浆管可兼用声测管或位移杆护套管，也可单独布置。若单独布置注浆管，当桩径小于 1.0m 时，可布置 2 根；桩径大于 1.0m 时，应布置 2 根以上。注浆管应具有一定的强度，在钢筋笼吊装、混凝土灌注等施工过程中不破损，不渗漏。

E.2 注浆材料应采用性能稳定、强度等级大于 42.5MPa 的水泥，同时应比混凝土水泥强度高一个等级。浆液的水灰比宜为 0.5~0.65，并掺入一定量微膨胀剂和减水剂，确保浆体强度达到桩身强度要求，无收缩。

E.3 注浆量根据现场试验确定，原则上应大于荷载箱张开体积的 2 倍。注浆流量 ≤ 75 L/min，注浆压力宜为 2.0MPa~4.0MPa，保压持续时间应不少于 5min，并记录注浆量。

E.4 水泥浆体经搅拌机充分搅拌均匀后方可压注，注浆过程中应不停缓慢搅拌，浆液在泵送前应经过筛网过滤。

E.5 注浆工艺可按照如下步骤进行：

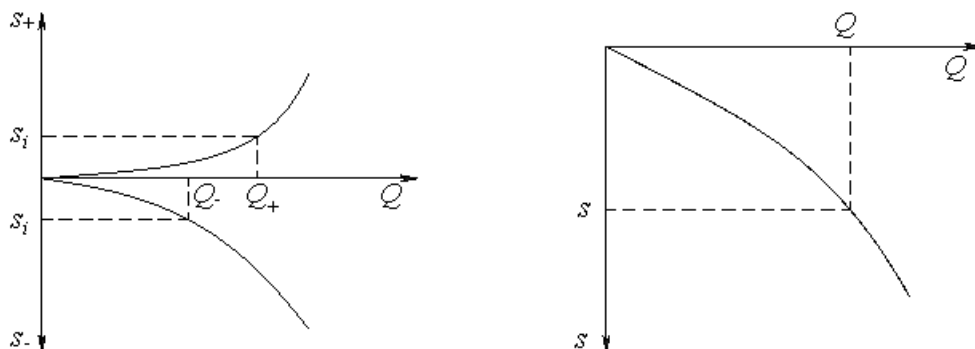
- 先将所有注浆管打开，通过其中一根注浆管注入清水冲洗注浆管道，同时将荷载箱打开处泥浆及杂质清洗干净，待其他注浆管均流出清水后，完成冲洗工作。
- 改注水泥浆，待其他注浆管均流出水泥浆后，将出浆管封管，开始荷载箱注浆，达到 E.3 的注浆参数要求时，完成注浆工作。

附录 F

(资料性)

等效转化方法

F.1 等效转换方法是将自平衡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 F.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 F.1 等效转换示意图

F.2 本方法适用于单荷载箱。

F.3 转换假定

- 桩为弹性体。
- 等效桩顶加载桩分为上、下段桩，分界截面即为荷载箱截面，该截面满足位移、应变、应力连续条件。
- 自平衡法的下段桩与等效桩顶加载桩的下段桩，在分界截面的位移相等。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。

F.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：

$$Q = \frac{Q_+ - W}{\gamma} + Q_- \quad \dots\dots\dots (F.1)$$

$$s = s_i + \frac{\frac{Q_+ - W}{\gamma} + 2Q_-}{2E_p A_s} L_+ \quad \dots\dots\dots (F.2)$$

式中：

Q —桩顶等效荷载 (kN) ；

s —桩顶等效位移 (m) ；

Q_+ ——分界截面向上位移大小为 s_i 时的对应荷载 (kN) ;

Q_- ——分界截面向下位移大小为 s_i 时的对应荷载 (kN) ;

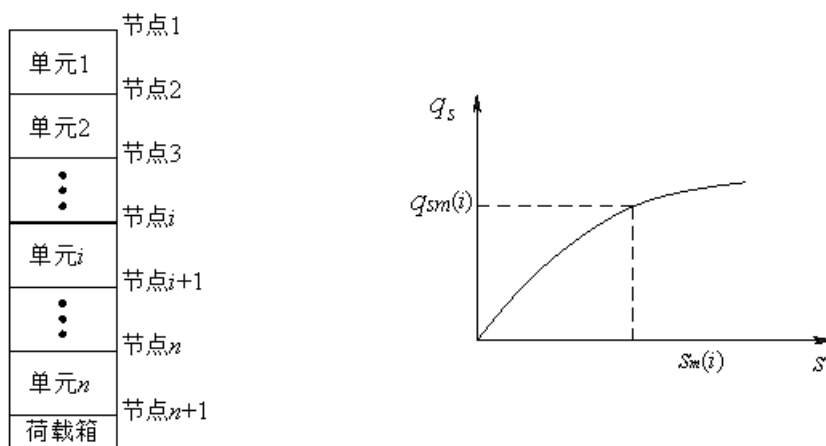
s_i ——位移大小 (m) ;

L_+ ——上段桩长 (m) ;

E_p ——桩身弹性模量 (kPa) 。

F.5 荷载传递转换法

F.5.1 将上段桩自上而下分为 n 个单元、 $n+1$ 个节点 (图F.2), 则任一节点 i 处的等效荷载、等效位移按照下式计算:



(a) 上段桩单元划分 (b) 单位面积侧阻—位移关系曲线

图 F.2 单元划分与侧阻本构关系

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

$$s(i) = s(i+1) + \frac{Q(i)+Q(i+1)}{A_s(i)E_p(i)+A_s(i+1)E_p(i+1)} \dots\dots\dots (F.4)$$

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);

$A_s(i)$ ——第 i 个节点处桩身截面面积 (m²);

$E_p(i)$ ——第 i 个节点处桩身弹性模量 (kPa)。

F.5.2 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 $q_{sm}(i)$, 其中 $s_m(i)$ 由下式计算:

$$s_m(i) = s(i+1) + \frac{Q(i)+3Q(i+1)}{A_s(i)E_p(i)+3A_s(i+1)E_p(i+1)} \dots\dots\dots (F.5)$$

式中：

$s_m(i)$ ——单元 i 的中点位移值 (m)。

F.6 对于双荷载箱，宜按照上述方法将每层荷载箱从下往上依次进行转换。双荷载箱将桩身分为上、中、下 3 段，可参照本方法进行 2 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，将其结果作为“下”段桩，再与上段桩进行等效转换。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，将其结果作为“上”段桩，再与下段桩进行等效转换。
