

 广东省标准

 DBJ 15-XX-2021

 备案号 J XXXXX-2021

**基桩与锚杆内力测试技术规程**

**Technical Standard for Plate Dynamic Loading Test**

**(征求意见稿)**

2021-XX-XX 发布 2021-XX-XX 实施

广东省住房和城乡建设厅 发布

**前 言**

根据《广东省住房和城乡建设厅关于发布<2017年广东省工程建设标准制订和修订计划>的通知》（粤建科函〔2017〕2904号文）的要求，广东省建筑科学研究院集团股份有限公司会同有关单位经过广泛调查研究，认真总结基桩与锚杆内力测试的实践经验和科研成果，参考有关国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，编制了《基桩与锚杆内力测试技术规程》。

本规程的主要技术内容是：1．总则；2．术语和符号；３．基本规定；4．传感装置与测试仪器设备；5．测试元件的制作与安装；6．基桩内力测试；7．锚杆内力测试。

本规程不涉及专利。

本规程由住房和城乡建设厅负责管理，由广东省建筑科学研究院集团股份有限公司负责具体技术内容的解释。在执行过程中，请各单位结合工程实践，认真总结经验，并将意见和建议寄送广州市先烈东路121号广东省建筑科学研究院集团股份有限公司（邮编：510500，传真：02087252610，Email：guangpinglidr@163.com）。

主编单位：广东省建筑科学研究院集团股份有限公司

参编单位：广东省建筑工程集团有限公司

广东省建设工程质量安全检测总站有限公司

广东天信电力工程检测有限公司

中铁西北科学研究院有限公司深圳南方分院

广东省建筑设计研究院有限公司

中交四航工程研究院有限公司

苏交科（广州）工程勘察设计有限公司

广东三和管桩股份有限公司

广州欧美大地仪器科技有限公司

华南理工大学

清远市建设工程综合服务站

本规程主要起草人员：李广平 徐天平 杨 眉 王 凯 程小俊

王建松 周洪波 桑登峰 尹 科 李 龙

廖永初 杨 春 邝文浩 徐权辉 宋露露

李超华 毛 悦

本规程主要审查人员：

目 次

[1 总则 8](#_Toc85800350)

[2 术语和符号 9](#_Toc85800351)

[2.1 术语 9](#_Toc85800352)

[2.2 符号 9](#_Toc85800353)

[3 基本规定 11](#_Toc85800354)

[3.1 一般规定 11](#_Toc85800355)

[3.2 测试工作程序 12](#_Toc85800356)

[3.3 测试数据处理和测试报告 14](#_Toc85800357)

[4 传感装置与测试仪器设备 16](#_Toc85800358)

[4.1 一般规定 16](#_Toc85800359)

[4.2 振弦式光纤光栅电阻应变式传感器 17](#_Toc85800360)

[4.3 分布式传感光纤 21](#_Toc85800361)

[4.4 滑动测微计 24](#_Toc85800362)

[5 测试元件的制作与安装 27](#_Toc85800363)

[5.1 一般规定 27](#_Toc85800364)

[5.2 振弦式光纤光栅电阻应变式传感器安装 27](#_Toc85800365)

[5.3 分布式传感光缆布设 29](#_Toc85800366)

[5.4 滑动测微计测管安装 31](#_Toc85800367)

[6 基桩内力测试 33](#_Toc85800368)

[6.1 一般规定 33](#_Toc85800369)

[6.2 测试元件埋设与试验桩制作施工 33](#_Toc85800370)

[6.3 试验现场操作与测试数据采集 36](#_Toc85800371)

[6.4 测试数据分析与结果评价 37](#_Toc85800372)

[Ⅰ 竖向抗压桩与抗拔桩 38](#_Toc85800373)

[Ⅱ 水平受荷桩 40](#_Toc85800374)

[7 锚杆内力测试 42](#_Toc85800375)

[7.1 一般规定 42](#_Toc85800376)

[7.2 测试元件埋设与试验锚杆制作施工 42](#_Toc85800377)

[7.3 试验现场操作与测试数据采集 43](#_Toc85800378)

[7.4 数据分析与结果评价 44](#_Toc85800379)

[附录A 传感器与传感光缆传感系数的标定 47](#_Toc85800380)

[附录B 滑动测微计测试探头的率定 48](#_Toc85800381)

[附录C 基桩与锚杆内力测试记录表格 50](#_Toc85800382)

[本规程用词说明 55](#_Toc85800383)

[引用标准名录 56](#_Toc85800384)

[附：条文说明 57](#_Toc85800385)

Contents

1 General Provisions………………………………………………………………8

2 Terms and Symbols…………………………………………………………….9

2.1 Terms………………………..….....……………...…..…...…..…………………..…………9

2.2 Symbols…….....….……………..………………………….…………………………………9

3 Basic Requirements…………………………………………………………..…11

3.1 General Requirements………………………………………………………………………11

3.2 Testing Produceres……………………………………………………………………….…12

3.3 Testing Data Treatment and Testing reports………………………………………………14

4 Sensors and Test equipments…………………………………………………..…16

4.1 General Requirements………………………………………………………………….……16

4.2 Vibrational Chord Optical Fiber Grating Resistance Strain Sensor…………………………17

4.3 Distributed Optical Fiber…………………………………………………………………21

4.4 [Sliding Micrometer](http://www.baidu.com/link?url=mLZz9BxDopHlQXTDoPt5hN4qb2beYY6B2DWPEs53xFptV9CSi_9wTb6FXysGkGzDI4Dc1OAzPycLtt1eaTwHuwfvd0p5ah-kETGscKwU6HdUxqZxShJeoRF5pSz9x_W5&wd=&eqid=8253f80600290066000000065d7d35cd)…………………………………………………………………………24

5 Testing Component Installation……………………………………………..…27

5.1 General Requirements………………………………………………………………….……27

5.2 Vibrational Chord Optical Fiber Grating Resistance Strain Sensor Installation……………27

5.3 Optical Fiber Layout…………………………………………………………………………29

5.4 Gauging Pipe Installation……………………………………………………………………31

6 Internal Force Test for Single Pile……..…....……..…....…..…....…….…..…....…33

6.1 General Requirements……………………………………………………………….……33

6.2 Manufacture & Constrution for Test Pile………………………………………………33

6.3 Field Testing and Testing Data Collection…………………………………………………36

6.4 Testing Data Treatment and Results Assesment……………………………………………37

7 Anchor Internal Force Test……..…..………..…....……..………..…....……..…42

7.1 General Requirements……………………………………………………………….……42

7.2 Manufacture & Constrution for Test Anchors………………………………………………42

7.3 Field Testing and Testing Data Collection…………………………………………………43

7.4 Testing Data Treatment and Results Assesment……………………………………………44

Appendix A Sensor coefficient Calibration………………………………………47

Appendix B [Sliding Micrometer](http://www.baidu.com/link?url=mLZz9BxDopHlQXTDoPt5hN4qb2beYY6B2DWPEs53xFptV9CSi_9wTb6FXysGkGzDI4Dc1OAzPycLtt1eaTwHuwfvd0p5ah-kETGscKwU6HdUxqZxShJeoRF5pSz9x_W5&wd=&eqid=8253f80600290066000000065d7d35cd) Calibration………………………………………48

Appendix C Test Record Table of Internal Force Test………………………………50

Explanation of Wording in This Code………………………………………………55

List of Quoted Standards……………………………………………………………56

Explanation of Provisions……………………………………………………………57

# 1 总则

**1.0.1** 为了在基桩与锚杆内力测试中贯彻执行国家的技术经济政策，规范基桩与锚杆内力测试方法，做到技术先进、测试准确，为基桩与锚杆的设计、试验研究提供可靠依据，制定本规程。

**1.0.2** 本规程适用于广东省基桩与锚杆内力测试。

**1.0.3** 基桩与锚杆内力测试应根据内力测试目的，综合考虑场地地质条件、设计要求、施工工艺、传感器特性等因素，合理选择传感器类型及测试方法，正确分析和评价测试数据。

**1.0.4** 基桩与锚杆内力测试除应符合本规程外，尚应符合国家和广东省现行有关规范、标准的规定。

# 2 术语和符号

## 2.1 术语

**2.1.1** 基桩内力测试 internal force testing of foundation pile

在进行基桩静载试验时，通过安设于桩身的测试元件，测试桩身变形，计算桩身内力，分析基桩桩侧阻力、桩端阻力、桩周土抗力等参数的测试方法。

**2.1.2** 锚杆内力测试 internal force testing of anchor

在进行锚杆抗拔试验时，通过安设于杆体的测试元件，测试杆体变形，计算杆体内力，分析锚固体与岩土体之间的粘结力等参数的测试方法。

**2.1.3** 振弦式传感器 vibrating wire sensor

利用振弦的固有频率变化来感测相关参数的传感器。

**2.1.4** 光纤光栅传感器 fiber grating sensor

利用光纤光栅的敏感性来测试桩身或杆体变形的传感器。

**2.1.5** 电阻应变式传感器 straingauge type sensor

以电阻应变计为转换元件的电阻式传感器。

**2.1.6** 分布式传感光纤 distributed optical fiber

既可以将被测对象的应变与温度等物理量转变为光信号，又可以进行数据传输的传感光纤。

**2.1.7** 滑动测微计 [sliding micrometer](http://www.baidu.com/link?url=mLZz9BxDopHlQXTDoPt5hN4qb2beYY6B2DWPEs53xFptV9CSi_9wTb6FXysGkGzDI4Dc1OAzPycLtt1eaTwHuwfvd0p5ah-kETGscKwU6HdUxqZxShJeoRF5pSz9x_W5&wd=&eqid=8253f80600290066000000065d7d35cd)

能在预埋测管内滑动，利用球面-锥面接触定位原理连续地测定固定在测管上相邻两测标之间的距离，系统测试分辨力达到0.001mm/m的机械式长度测试仪器。系统测试分辨力达到0.01mm/m的机械式长度测试仪器称为滑动变形计。

## 2.2 符号

**2.2.1** 抗力和材料性能

*E*——钢材弹性模量；

*Ec*——混凝土弹性模量；

*E*t——填芯混凝土弹性模量。

**2.2.2** 作用与作用效应

*M*——桩身弯矩；

*P*——桩身轴力、杆体轴力；

*q*s——桩侧摩阻力、锚杆锚固段注浆体与岩土层之间的粘结力；

$q\_{p}$——桩端阻力；

*s*e——桩身弹性压缩量；桩身弹性拉伸量；

*ΔL*——测微计测标间发生的变形；

*ε*—*—*应变值。

**2.2.3** 几何参数

*A*——桩身钢材横截面面积；

*A*c——桩身混凝土截面面积；

*A*p——预应力钢筋截面面积；

*A*s——钢筋面积、锚杆杆体的截面面积；

*A*t——填芯混凝土截面面积；

*d*——锚杆锚固段钻孔直径；

*h*0——拉、压应变测点的间距；

*L*——桩长、锚杆长度、测试探头标距；

*u——*桩身周长。

**2.2.4** 其他参数

*f*——振弦式传感器输出频率；

*k*——传感器传感系数；传感光缆传感系数；探头率定系数；

*R*——电阻应变计电阻。

*V*——光纤的布里渊散射光频移量；

λ——光纤光栅传感器输出波长值。

# 3 基本规定

## 3.1 一般规定

**3.1.1**  基桩内力测试按桩型可分为灌注桩、预制混凝土桩和钢桩内力测试；按受力性状可分为竖向抗压桩、竖向抗拔桩、水平受荷桩内力测试。锚杆内力测试本规程仅涉及拉力型钢筋锚杆内力测试。

**3.1.2** 基桩与锚杆内力测试的测试方法、测试对象与参数和测试目的宜符合表3.1.2的规定：

**表3.1.2 基桩与锚杆内力测试的试验方法、测试参数**、**测试内容和测试目的**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 测试方法 | 测试对象与参数 | 测试目的 |
| 竖向抗压桩内力测试 | 灌注桩、预制混凝土桩和钢桩桩身变形 | 桩身轴力，桩侧摩阻力、桩端阻力 |
| 竖向抗拔桩内力测试 | 灌注桩、预制混凝土桩和钢桩桩身变形 | 桩身轴力，桩侧摩阻力 |
| 水平受荷桩内力测试 | 灌注桩、预制混凝土桩和钢桩桩身变形 | 桩身弯矩、剪力，桩周土抗力 |
| 锚杆内力测试 | 拉力型钢筋锚杆杆体变形 | 锚杆轴力，锚固段注浆体与岩土层之间的粘结力、粘结强度 |

**3.1.3** 当设计有要求或有下列情况之一时，宜在进行试验桩检测的同时，进行基桩内力测试：

**1** 设计等级为甲级的桩基；

**2** 无相关试桩资料且设计等级为乙级的桩基；

**3** 地质条件复杂、基桩施工质量可靠性低的桩基；

**4** 本地区采用的新桩型或采用新工艺施工的桩基。

**3.1.4** 当设计有要求或有下列情况之一时，宜在进行锚杆基本试验的同时，进行锚杆内力测试：

**1** 设计等级为甲级的基础锚杆，安全等级为一级的支护锚杆；

**2** 无相关测试资料，且设计等级为乙级的基础锚杆或安全等级为二级的支护锚杆；

**3** 地质条件复杂、锚杆施工质量可靠性低的锚杆；

**4** 本地区采用的新型锚杆或采用新工艺施工的锚杆。

**3.1.5** 基桩内力测试的数量为同一受力形态不应少于3根；锚杆内力测试的数量不应少于3根。

**3.1.6** 基桩与锚杆内力测试可不考虑温度的影响，当温度变化对测试结果有影响时，可在基桩与锚杆内同时埋设温度传感器进行温度测试。

**3.1.7** 基桩与锚杆内力测试，应优先选用工程环境适应性强、安装便捷、测试量程与测试精度适宜的传感器，并宜采用具有数字化技术的测试系统和具有无线采集与唯一编号识别的传感器。

## 3.2 测试工作程序

**3.2.1** 测试工作应按图3.2.1的程序进行。

接受委托

受委托

资料收集和现场调查

料收集和现场调查

制定测试技术方案

定测试技术方案

传感装置选择与测试元件制作安装

测试元件埋设与试验桩（锚杆）制作施工

测试元件的保护与过程性能检查

现场测试

场测试

重新测试

新测试

需要与允许时

数据处理和结果分析

测试报告

图3.2.1 测试工作程序框图

**3.2.2** 测试单位应根据测试目的，进行资料收集和现场调查。资料收集、现场调查宜包括下列内容：

**1** 收集被测试工程的概况、岩土工程勘察资料、设计初步方案与拟采用的施工工艺；

**2** 搜集现场试验可能采用的基桩静载试验、锚杆抗拔试验方案；

**3** 确定测试目的，并进一步明确委托方的具体要求；

**4** 分析测试项目现场实施的可行性。

**3.2.3** 测试单位应根据测试目的制定测试技术方案。测试技术方案宜包含下列内容：

**1** 工程概况；

**2** 本规程第3.2.2条所规定的内容；

**3** 测试所依据的规范标准；

**4** 相关单位确定的测试对象、测试参数和测试数量；

**5** 传感器选型、标定，测试元件制作安装与埋设方法；

**6** 试验桩与锚杆的制作和施工要求；

**7** 所需的测试仪器，试验时间要求；

**8** 现场测试元器件（传感器、缆线）安全防护和现场安全生产措施。

**3.2.4** 内力测试基桩与锚杆所在位置处的地质条件、设计参数以及施工工艺应具有代表性。

**3.2.5** 从成桩到开始测试的混凝土强度与间歇时间应符合下列规定：

**1** 混凝土灌注桩龄期不得少于28d或预留立方体试块强度不得低于设计强度等级；

**2** 混凝土预制桩强度不得低于设计强度等级或制作养护时间不得少于28d；

**3** 混凝土预制桩与钢桩的承载力测试间歇时间：砂土不宜少于7d；粉土不宜少于10d；非饱和黏性土不宜少于15d；饱和黏性土不宜少于25d；桩端持力层为遇水易软化的风化岩层，不应少于25d。

**3.2.6** 锚杆测试开始时间，锚固段注浆体强度不应低于设计强度，或锚固段注浆体的龄期应达到28d。

**3.2.7** 桩身材料与锚杆杆体材料抽检应符合下列规定：

**1** 灌注桩应进行钢筋应力应变曲线试验、混凝土标准试块抗压强度试验和混凝土应力应变曲线试验；

**2** 预制混凝土桩应按本条第1款的规定进行材料检测，有条件时可进行预制桩结构试验；

**3** 钢桩应进行型钢应力应变曲线试验；

**4** 锚杆杆体材料应进行钢筋应力应变曲线试验。

**3.2.8** 灌注桩成孔后，宜进行成孔质量检测，获得桩径随深度变化数据；预制混凝土桩、钢桩成桩前，应进行桩身截面测试，获得桩身断面面积随深度变化数据。

**3.2.9** 试验桩宜在测试前进行桩身完整性检测。

## 3.3 测试数据处理和测试报告

**3.3.1** 测试元件成活和数据有效性判断，应给出每个测试元件成活情况和数据有效性评判。

**3.3.2** 数据处理应给出数据处理原则和数据分析方法。

**3.3.3** 基桩内力测试应给出受测桩的桩身变形与内力图表，并评价桩周摩阻力与桩端阻力、估算桩周土抗力。

**3.3.4** 锚杆内力测试应给出受测锚杆的杆体变形与轴力图表，并评价锚固段注浆体与岩土层之间的粘结力。

**3.3.5** 测试报告应结论准确、用词规范；测试报告应包含以下内容：

**1** 委托方名称，工程名称、工程地点，建设、勘察、设计和施工单位，设计要求，测试目的，测试依据，测试数量，测试日期；

**2** 代表性钻孔岩土工程勘察资料；

**3** 主要测试仪器设备及传感器的规格、型号、量程、精度、标定结果；

**4** 测试元件安装方法、安装位置、过程检查记录、异常情况描述；

**5** 测试方法，测试过程叙述及异常情况描述；

**6** 与测试内容相应的结论及建议。

# 4 传感装置与测试仪器设备

## 4.1 一般规定

**4.1.1** 基桩与锚杆内力测试可分为点测式测量与线测式测量，点测式测量可选用振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器，线测式测量可选用分布式光纤、滑动测微计。

**4.1.2** 传感装置选择应符合下列规定：

**1** 灌注桩宜选取振弦式传感器、光纤光栅传感器、电阻应变式传感器和滑动测微计，也可选用分布式传感光纤；水平受荷桩选用滑动测微计时，桩径宜大于等于800mm；

**2** 桩成型前安装测试元件的预制混凝土桩宜选取振弦式传感器、光纤光栅传感器、电阻应变式传感器，也可选用分布式传感光纤；

**3** 桩成型后安装测试元件的预制混凝土桩可选用分布式传感光纤；管桩采用植筋填芯处理时宜选取振弦式应变计、光纤光栅应变计、电阻应变传感器；直径大于等于500mm的竖向受荷管桩，也可选取滑动测微计；

**4** 钢桩可选用分布式传感光纤；

**5** 锚杆宜选取振弦式传感器、光纤光栅传感器、电阻应变式传感器，也可选用分布式传感光纤；

**6** 分布式传感光纤宜与振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器和滑动测微计联合使用。

**4.1.3** 用于基桩与锚杆内力测试的振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器可分为埋入式应变计、钢筋应变计（不与主筋对接的小直径钢筋计）和钢筋应力计（与主筋对接的钢筋计）。其适用范围应符合下列规定：

**1** 埋入式应变计适用于灌注桩的混凝土、预埋传感器的预制混凝土桩的混凝土、预制空心桩的填芯混凝土应变测试；

**2** 钢筋应变计适用于钢筋、钢筋混凝土桩桩身、植筋填芯处理组合体的应变测试；

**3** 钢筋应力计适用于桩身主筋、植筋、锚杆杆体的应变测试。

**4.1.4** 传感光缆应选用单模光纤，以G.652b类光纤为宜，不宜选用低水峰及多模光纤。

**4.1.5** 电阻应变计的电阻应变片选择与粘贴，可按现行国家标准《金属粘贴式电阻应变计》GB/T 13992的规定执行。

**4.1.6** 滑动变形计是测试分辨力比滑动测微计小一个量级的测试装置，其测试方法可按滑动测微计的相关规定执行。

**4.1.7** 温度传感器的应能应符合下列规定：

**1** 光纤光栅温度传感器主要性能，量程范围应为-10℃～+90℃；分辨率应小于等于0.1℃；重复性应优于0.3%FS；

**2** 温度补偿光缆，可选用单模光纤或多模光纤，且应采用松套结构，纤芯应不受桩身、杆体应变的影响。

## 4.2 振弦式光纤光栅电阻应变式传感器

**4.2.1** 基桩与锚杆内力测试的振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器选择，应符合下列规定：

**1** 竖向抗压与水平受荷灌注桩宜选用埋入式应变计，也可选用钢筋应变计；竖向抗拔灌注桩宜选用钢筋应力计，也可选用钢筋应变计；

**2** 桩成型前安装传感器的预制混凝土桩宜选用埋入式应变计，也可选用钢筋应变计；

**3** 桩成型后采用植筋填芯处理安装传感器的预制混凝土桩，竖向抗压与水平受荷桩宜选用埋入式应变计，也可选用钢筋应变计；竖向抗拔桩宜选用钢筋应力计，也可选用钢筋应变计；

**4** 锚杆应选用钢筋应力计。

**4.2.2** 振弦式传感器的应变性能参数，即传感器分辨力、滞后、不重复度、非线性度、综合误差均应满足表4.2.2的规定。

**表4.2.2 振弦式传感器的应变性能参数**

|  |  |
| --- | --- |
| 分辨力 | ≤0.2%FS |
| 滞后 | ≤1.0%FS |
| 不重复度 | ≤0.5%FS |
| 非线性度 | ≤2.0%FS |
| 综合误差 | ≤2.5%FS |

**4.2.3** 光纤光栅传感器的主要性能指标，即测量范围、综合误差、分辨力、重复性均应符合表4.2.3的要求。

**表4.2.3 光纤光栅传感器主要性能**

|  |  |
| --- | --- |
| 性能参数 | 指标 |
| 测量范围（με） | -500~+500、-1000~+1000、-500~+1500、-1000~+2000、-1500~+1500、-2000~+1000 |
| 综合误差 | ≤1.0%FS |
| 分辨力 | ≤0.15%FS |
| 重复性 | ≤0.3%FS |

**4.2.4** 电阻应变式传感器的应变性能参数，即传感器分辨力、滞后、不重复度、非线性度、综合误差均应满足表4.2.4的规定。

**表4.2.4 电阻应变式传感器的应变性能参数**

|  |  |
| --- | --- |
| 分辨力 | ≤0.2%FS |
| 滞后 | ≤1.0%FS |
| 不重复度 | ≤0.5%FS |
| 非线性度 | ≤1.0%FS |
| 综合误差 | ≤1.0%FS |

**4.2.5** 振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器的标距、量程、耐水压性能、工作温度和直径等其他参数的选择应符合下列规定：

**1** 传感器的标距，埋入式应变计的标距宜为150mm~250mm；钢筋应变计的标距宜为100mm~250mm；钢筋应力计的标距宜为50mm~150mm；

**2** 传感器的量程应大于基桩与锚杆在预估最大加载量作用下变形量的1.25倍；且量程的选择应与所测变形相匹配；

**3** 传感器的耐水压性能，干作业成桩不应低于0.5MPa；水下成桩不应低于1MPa，超过100m的桩不宜低于1.5MPa，且不宜小于实际水压的1.5倍；

**4** 传感器的工作温度宜为-10℃～＋80℃；

**5** 传感器的外形尺寸应符合基桩与锚杆的孔径、壁厚等要求；钢筋应力计接长杆直径应按主筋直径大小进行选择，钢筋应变计接长杆直径应宜为12mm~22mm；钢筋应变计与钢筋应力计主要规格尺寸可按表4.2.5的规定选取。

**表4.2.5 钢筋应变计与钢筋应力计主要规格尺寸**

|  |  |
| --- | --- |
| 传感器类型 | 主要规格尺寸 |
| 直径（mm） |
| 钢筋应变计 | 12，16，18，20，22 |
| 钢筋应力计 | 16，18，20，22，25，28，32，36，40，50，60 |

**4.2.6** 传感器在使用前，其传感系数应按本规程附录A的规定进行标定，且宜符合下列规定：

**1** 标定分档宜按应变计满量程分10档或8档进行标定，不宜按应变计满量程分5档进行标定；

**2** 抗压桩可按压应变量程进行分档，抗拔桩可按拉应变量程进行分档，水平受荷桩应分别按拉、压应变量程进行分档；

**3** 同一批次传感器的标定数量不宜少于传感器总数的5%且不宜少于6个。

**4.2.7** 传感器传感系数的抽查和使用应符合下列规定：

**1** 传感器产品证书宜提供每个传感器全量程按10档或8档标定的传感系数参数表；

**2** 按本规程第4.2.6条的规定抽查合格的该批次传感器，可按产品证书提供的应变传感系数参数表使用；

**3** 按本规程第4.2.6条的规定抽查有不合格的该批次传感器，应加倍抽查；仍有不合格的，应全数标定，或按不合要求产品处置。

**4.2.8** 振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器与测试仪表组成的测量系统应符合下列规定：

**1** 频率采集仪、光纤光栅解调仪、电阻静态应变采集仪应具有数据采集、显示和存储功能，且宜具有多点自动测量功能；且应在检定或校准的有效期内；

**2** 振弦式测试系统测量误差不得大于2.5%FS，分辨力宜为1Hz；

**3** 光纤光栅测试系统测量误差不得大于1%FS，分辨力宜为1pm；

**4** 电阻应变测试系统测量误差不得大于1%FS，分辨力应优于或等于1με；

**5** 测试数据采集仪应能在温度-10℃～45℃的环境中工作。

**4.2.9** 振弦式传感器测点应变可根据测量频率的量值由传感器应变―频率的标定关系进行确定；也可根据现行国家标准《土工试验仪器岩土工程仪器振弦式传感器通用技术条件》GB/T 13606的规定，按下式进行核查：

$ε\_{i}=k\left(f\_{i}^{2}-f\_{0}^{2}\right)+C+b(T\_{t}-T\_{i})$ （4.2.9）

式中：*εi*——第*i*测试点应变（με）；

*k*——传感器传感系数（με/Hz2）；

*fi*——第*i*测试点输出频率（Hz）；

*f*0——初始频率值（Hz）；

*C——*传感器的自由状态输出（με）；

*b*——传感器温度修正系数（με/℃）；

*T*t——测试点温度（℃）；

*Ti*——基准温度（℃）。

**4.2.10** 光纤光栅传感器测点应变应根据测量波长的量值由传感器应变-波长的标定关系进行确定；也可根据现行行业标准《土木工程用光纤光栅应变传感器》JG/T 422的规定，按下式进行核查：

 （4.2.10）

式中：*εi*——*i* 时刻传感器测量出的应变值（με）；

λ*i*——*i* 时刻应变传感器输出波长值（nm）；

λ0——传感器测试开始前作为“0”应变位置时的波长（nm）；

*k*——传感器传感系数（nm/με）；

*ΔT*——应变传感器环境温度相对于测试开始前的温度变化量（℃）；

*α*T——应变传感器温度系数（nm/℃）。

**4.2.11** 电阻应变式传感器测点应变可根据测量电阻的量值由传感器应变―电阻的标定关系进行确定；也可根据现行国家标准《金属粘贴式电阻应变计》GB/T 13992的规定，测点应变可按下式进行核查：

$ε\_{i}=\frac{∆\overbar{R}\_{i}}{R\_{0}}/k $ （4.2.11）

式中：*εi*——传感器应变（$μm$/m）；

$∆\overbar{R}\_{i}$——同一层应变计，第*i*级荷载读数与初始读数之差的平均值（Ω）；

$ R\_{0}$——正式加载前，记录的每个应变计的初始读数（Ω）；

*k*——传感器传感系数（$1/με$）。

**4.2.12** 电阻应变计导线补偿修正，当采用电阻应变式传感器测量且未采用六线制长线补偿时，实测应变值可按下列公式进行修正：

**1** 采用半桥测量时：

 （4.2.12-1）

**2** 采用全桥测量时：

 （4.2.12-2）

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）。

## 4.3 分布式传感光纤

**4.3.1** 分布式光纤传感器的应变性能参数，即传感器光学衰减、应变隔离长度、应变均匀性、定位误差、采样间隔、空间分辨率、重复误差、综合误差均应满足表4.3.1的规定。

**表4.3.1 分布式光纤传感器的应变性能参数**

|  |  |
| --- | --- |
| 光学衰减 | ≤0.3dB/km（1550nm） |
| 应变隔离长度 | ≤50cm |
| 应变均匀性 | ≤500µε |
| 定位误差 | ≤30cm |
| 采样间隔 | ≤10cm |
| 空间分辨率 | U型、双端 | ≤20cm |
| 短纤、单端 | ≤50cm |
| 重复误差 | U型、双端 | 5με |
| 短纤、单端 | 10με |
| 综合误差 | U型、双端 | 10με |
| 短纤、单端 | 20με |

注：**1** 应变隔离长度：应变传感光缆的性能指标，指应变衰减至5%的长度；

**2** 应变均匀性：表征一定长度传感光缆初始应变分布均匀程度的指标，用两倍均方差表示。

**4.3.2** 传感光缆的直径、量程、耐水压性能、工作温度和机械强度等其他参数的选择应符合下列规定：

**1** 传感光缆直径，钢筋与杆体宜选用直径小于3.0mm的传感光缆；桩身混凝土与型钢宜选用直径小于6.0mm的传感光缆；

**2** 传感光缆的应变测量量程应大于基桩与锚杆在预估最大加载量作用下变形量的1.25倍，且应按实际可能使用的量程进行控制；

**3** 传感光缆的耐水压性能，干作业成桩不应低于0.5MPa；水下成桩不应低于1MPa，超过100m的桩不宜低于1.5MPa，且不宜小于实际水压的1.5倍；

**4** 传感器的工作温度宜为-10℃～＋80℃；

**5** 机械强度应满足现场施工条件和测试环境的要求。

**4.3.3** 传感光纤在使用前，其传感系数应按本规程附录A的规定进行标定，且应符合下列规定：

**1** 标定分档宜按传感光纤预估应变使用量程的1.25倍分10档或8档进行标定，不宜按传感光纤应变满量程分5档进行标定；

**2** 抗压桩可按压应变量程进行分档，抗拔桩可按拉应变量程进行分档，水平受荷桩应分别按拉、压应变量程进行分档；

**3** 同一批次传感光纤标定数量不宜少于3个样品。

**4.3.4** 传感光纤的传感系数的抽查和使用应符合下列规定：

**1** 传感光纤产品证书宜提供1.25倍预估应变使用量程按10档或8档标定的传感系数参数表；

**2** 按本规程第4.3.3条的规定抽查合格的该批次传感光纤，可按产品证书提供的应变传感系数参数表使用；

**3** 按本规程第4.3.3条的规定抽查有不合格的该批次传感光纤，应加倍抽查；仍有不合格的，应全数标定，或按不合要求产品处置。

**4.3.5** 分布式光纤与解调仪组成的测量系统应符合下列规定：

**1** 光纤解调仪具有数据采集、显示和存储功能，且宜具有多点自动测量功能；且应在检定或校准的有效期内；

**2** 当传感光缆构成回路时，应采用基于布里渊散射光时域分析技术（BOTDA）、布里渊散射光频域分析技术（BOFDA）等技术的光纤解调仪；

**3** 当传感光缆未构成回路或光损大于10dB时，可采用基于布里渊散射光时域反射技术（BOTDR）等技术的光纤解调仪；

**4** 解调仪工作环境温度-10℃～45℃。

**4.3.6** 分布式光纤的数据预处理应符合下列规定：

**1** 数据标准化宜采用数据插值或抽稀等方法统一测试数据的离散间距；

**2** 数据对齐，当测试过程中光缆连接线长度发生变化时，应将各测次数据的空间位置进行对齐；

**3** 数据定位应在应变分布曲线上确定桩顶和桩端特征点位置，将测试数据曲线与桩身测点位置进行匹配；

**4** 数据分段截取宜根据定位结果截取测试目标段对应的应变分布曲线；

**5** 数据平滑宜利用多点平均等数学方法对数据进行平滑处理。

**4.3.7** 分布式光纤测点应变值可按下式进行计算：

$ε=\frac{v\left(ε,T\right)-v\left(ε\_{0},T\_{0}\right)-C\_{T}∆T}{k}$ （4.3.7）

式中：——传感光缆感测点处应变值（με）；

$v\left(ε,T\right)$——测量时的布里渊频移（MHz）；

$v\left(ε\_{0},T\_{0}\right)$——初始布里渊频移（MHz）；

——传感光缆感测点处结构温度（0C）；

——传感光缆感测点处结构初始应变值（με）；

——传感光缆感测点处结构初始温度（0C）；

*k*——传感光缆传感系数（MHz/με）；

——布里渊频移温度影响系数（MHz/0C）；

——相较于初始时的温度变化量（0C）。

## 4.4 滑动测微计

**4.4.1** 滑动测微计与滑动变形计探头的主要性能指标应满足表4.4.1的要求。

**表4.4.1 滑动测微探头主要性能指标**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 探头种类 | 滑动测微计 | 滑动变形计 |
| 标距（mm） | 1000 |
| 温度分辨率（℃） | 0.1 |
| 承受水压能力（MPa） | 1.5 |
| 沿测线方向 | 每米测量范围（mm） | 995.0～1005.0 | 977.5～1022.5 |
| 分辨率（mm） | 0.001 | 0.01 |
| 精度（mm） | ±0.003 | ±0.03 |
| 线性度 | ＜0.02%FS | ＜0.2%FS |
| 温度影响 | ＜0.02%FS/℃ | ＜0.02%FS/℃ |

**4.4.2** 测管与测标的性能应符合下列规定：

**1** 测管外径63mm、壁厚4.1mm，金属测环直径71mm，螺丝安装后金属测环外径76mm；套管的材质和构造应利于测标随被测体一起发生位移；

**2** 测标锥形环应有足够刚度，材质可为不锈钢、铜或铝合金等；锥面的加工精度应优于IT7级，椭圆度不应大于0.001mm；测标外壳与锥形环的结合应牢固，外表面宜有凹凸；

**3** 测管的耐水压性能（承受水压能力为1.5MPa），适用于干作业成桩、水下成桩；桩长超过100m时应采取提高抗水压性能的措施，不宜小于实际水压的1.5倍；

**4** 测管的工作温度：-10℃～＋80℃；温度在0℃以下时，应采取有效措施防止测管中的清水结冰。

**4.4.3** 当出现下列情况之一时，测试探头应按附录B的规定进行率定，获得仪器零点漂移和探头率定系数：

**1** 新探头启用前；

**2** 长期闲置后使用前；

**3** 探头当天使用前后；

**4** 测试过程中对探头性能有怀疑时；

**5** 遭受严重撞击或其他损害。

**4.4.4** 当出现探头读数不稳定或同一方向连续5次读数最大值与最小值之差超过0.003mm/m，探头应停止使用。

**4.4.5**  滑动测微测试系统由测试探头、导向链、绞车、套管和测标、数据采集仪、操作杆等部件以及标定筒组成。测量装置应符合下列规定：

**1** 数据采集仪应与测试探头性能指标相匹配，连续正常工作时间应大于4h；且应在检定或校准的有效期内；

**2**  测量电缆应为加强电缆，应具有满足测试要求的抗拉能力，长度应满足测试深度要求；

**3**  操作杆应具有满足测试要求的抗拉能力，材质宜轻且应耐腐蚀，单节长度宜为2m，连接后进行测试时，应可顺利转动和上下滑动测试探头；

**4** 测试系统可在-10°~45°的环境下工作。

**4.4.6** 当采用滑动测微计测试时，测试单元沿测线的变形与平均应变应按下列公式计算：

$ΔL\_{i}=(δ\_{0}-z\_{0})k-(δ\_{i}-z\_{0})k$ （4.4.6-1）

$ε\_{i}=ΔL\_{i}/[L-(δ\_{0}-z\_{0})k]×10^{6}$ （4.4.6-2）

式中:*δ*0——初始读数（mm）；

*δi*——第*i*级测试读数值（mm）；

*z*0——仪器零点漂移（mm）；

*k*——探头率定系数（ε）；

*ΔLi*——第*i*级测试相对于初始读数测标间发生的变形（mm），负值表示压缩，正值表示拉伸；

*εi——*第*i*级测试相对于初始读数测试单元的平均应变（με），正值表示拉应变，负值表示压应变；

*L——*测试探头标距，即测试读数正好等于仪器零点时探头上下球形头间相对应长度（mm）。

# 5 测试元件的制作与安装

## 5.1 一般规定

**5.1.1** 测试元件安装应符合下列规定：

**1** 灌注桩、桩成型前安装测试元件的预制混凝土桩，应根据测试元件的类型，采用合适的方法将测试元件安装于钢筋笼上，预埋设于桩身混凝土中；

**2** 桩成型后采用填芯植筋处理安装测试元件的管桩，应根据测试元件的类型，采用合适的方法将测试元件安装于植筋钢筋笼上预埋设于填芯混凝土中；

**3** 桩成型后的预制混凝土桩，应采用合适的方法将传感光缆布设于桩身混凝土中；

**4** 钢桩，应采用合适的方法将传感光缆安装于桩身型钢上；

**5** 锚杆，应根据测试元件的类型，采用合适的方法将测试元件安装于杆体上，预埋设于注浆体中；

**6** 应确保测试元件与被测对象整体协调变形，且不得明显改变待测试区域的应力应变状态；

**7** 测试元件的敏感轴应与桩（锚杆）轴线方向平行，并避免受施工过程的影响而产生移位、偏斜、弯曲等变形。

**5.1.2** 温度传感器安装应符合下列规定：

**1** 光纤光栅等温度传感器，可绑扎在钢筋上；

**2** 分布式光纤温度传感光缆，应采用松套结构，可绑扎在钢筋上。

## 5.2 振弦式光纤光栅电阻应变式传感器安装

**5.2.1** 振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器的安装应符合下列规定：

**1** 埋入式应变计应采用双加强箍定位安装法；

**2** 钢筋应变计宜采用全长辅助钢筋安装法，也可采用主筋并联连接法；

**3** 钢筋应力计应采用与主筋对接焊接法。

**5.2.2** 埋入式应变计双加强箍定位安装法应符合下列规定：

**1** 每一层传感器应设置2个钢筋笼加强定位箍筋，间隔应与传感器长度相适应；

**2** 可将传感器置于两排主筋之间，采用绑扎加点焊将传感器与钢筋笼加强定位箍连接；

**3** 点焊连接时应采取有效措施防止焊接时高温对传感器的影响。

**5.2.3** 钢筋应变计全长辅助钢筋安装法应符合下列规定：

**1** 钢筋应变计应配置接长杆，接长杆直径宜为12mm~22mm；

**2** 钢筋应变计应采用辅助钢筋与其接长杆连接，对预应力管桩应优先选用预制桩配置中的非预应力筋，其连接应采用焊接连接；

**3** 辅助钢筋应与传感器接长杆的规格直径相同，且应在传感器埋设深度范围内通长配置；

**4** 根据测点布置的要求裁截钢筋，焊接连接应采取有效措施防止焊接时高温对传感器的影响，

**5** 可将连接有传感器的辅助钢筋置于两排主筋之间，与钢筋笼连接，并应在每层传感器安装位置设置2个加强定位箍筋，间隔宜为1m。

**5.2.4** 钢筋应变计与主筋并联连接法应符合下列规定：

**1** 钢筋应变计应配置接长杆，接长杆直径宜为12mm~22mm；

**2** 钢筋应变计与主筋并联连接，应在主筋相应位置焊接2个垫块，并将应变计一端与垫块焊接，另一端与垫块绑扎加点焊或机械卡头进行连接；

**3** 焊接连接应采取有效措施防止焊接时高温对传感器的影响；

**4** 可将连接有钢筋应变计的主筋与钢筋笼连接，并应在传感器安装位置设置加强定位箍筋。

**5.2.5** 钢筋应力计安装应符合下列规定：

**1** 钢筋应力应配置与之受力相适应的一体焊接的接长杆，接长杆直径规格应与主筋、杆体直径相同；

**2** 当接长杆采用普通钢筋时，钢筋应力计与主筋、杆体的连接宜采用对接焊连接；

**3** 根据测点布置的要求裁截钢筋；焊接连接时应采取有效措施防止焊接时高温对传感器的影响；

**4** 可将连接有钢筋应力的主筋与钢筋笼连接，并应在传感器安装位置设置加强定位箍筋。

**5.2.6** 传感器编号、线缆编号与连接应符合下列规定：

**1** 加长传感器电缆时，芯线的连接应牢固，各芯线之间应有绝缘层隔离，且防水密封可靠；

**2** 传感器与线缆均应有固定编号，可采用多色系线缆对应唯一传感器编号；且应在引出线缆上间隔10m~15m的距离设置传感器编号标签，线缆排布编号记录清晰，测试断面与传感器编号对应一致，并做好存档工作；

**3** 传感器线缆编号应外覆保护套且无破损及松动；测点较多时，宜设置集线箱；

**4** 接线完成后应检查传感器的绝缘电阻和传感器初值是否正常。

## 5.3 分布式传感光缆布设

**5.3.1** 传感光缆布设钢筋表面粘贴法、预制混凝土桩桩身刻槽粘贴法、钢桩桩身点焊法、钢桩桩身表面粘贴法，其选用应符合下列规定：

**1** 灌注桩传感光缆布设，抗压桩与水平受荷桩宜采用辅助钢筋表面粘贴法、也可采用主筋表面粘贴法，抗拔桩宜采用主筋表面粘贴法、也可采用辅助钢筋表面粘贴法；

**2** 预制混凝土桩传感光缆布设，桩成型前安装传感光缆宜采用非预应力筋表面粘贴法；桩成型后安装传感光缆的管桩宜采用植筋表面粘贴法，也可采用桩身刻槽粘贴法；桩成型后安装传感光缆的预制混凝土实心桩可采用桩身刻槽粘贴法；

**3** 钢桩传感光缆布设可采用桩身点焊法、表面粘贴法；

**4** 锚杆传感光缆布设宜采用杆体表面粘贴法。

**5.3.2** 预制混凝土桩桩成型后采用桩身布设传感光缆进行内力测试、钢桩布设传感光缆进行内力测试，应开展传感光缆布设效果与打桩保护的前期专项测试，确定测试方法的有效性。

**5.3.3** 传感光缆布设作业应符合下列规定：

**1** 传感光缆在布设前，应对传感光缆出厂指标进行核查；

**2** 光缆布设准备工作应根据系统设计方案，通过划线、标记方式确定光缆布设位置，计算光纤长度，并选择开槽机、光纤切割刀、光时域反射仪（OTDR）和光纤熔接机等辅助安装器材；

**3** 光缆连接宜使用熔接连接，每个熔接点处的光损不宜大于0.05dB，每个光缆回路的总光损不宜大于10dB；光纤施工过程中应尽量减少接头数量，并避免在多尘及潮湿环境中进行熔接操作。

**5.3.4** 传感光缆布设的钢筋表面粘贴法应符合下列规定：

**1** 钢筋包含辅助钢筋、主筋、杆体、非预应力筋和植筋；

**2** 表面粘贴法，粘贴前应打磨处理所粘贴钢筋表面，并做表面抹平处理；粘贴过程中，宜将光缆间隔一定距离初步固定于钢筋表面；与钢筋连接时，应将粘结剂均匀地涂抹在光缆表面及其周围，确保光缆与钢筋的有效连接；

**3** 辅助钢筋直径宜为12mm~22mm，且应在传感器埋设深度范围内通长配置；

**4** 布设有传感光缆的钢筋可采用绑扎法或点焊法与对应的钢筋笼连接，且宜每3m~5m设置1个加强定位箍；

**5** 当钢筋笼为多段时，应提前安装传感光缆接口，当钢筋笼连接完成后，连接传感光缆，并设置保护装置。

**5.3.5** 传感光缆的预制混凝土桩桩身刻槽粘贴法应符合下列规定：

**1** 布设前应在预制混凝土桩桩身切割出适宜光缆铺设的凹槽，并做表面抹平处理；粘贴过程中，宜将回填材料均匀涂抹于凹槽的底面及侧壁，确保光缆受力均匀，与桩身连接紧密；

**2** 预制混凝土桩接桩处理，对于闭口桩及开口桩土塞位置低于底节桩长的，可分别在上下管桩靠近接桩的位置打引线孔，将上下两节管桩上的传感光缆经引线孔穿到桩内，在桩身内部进行连接；且应提前安装传感光缆接口，并设置保护装置。

**5.3.6** 传感光缆布设的钢桩桩身点焊法、表面粘贴法应符合下列规定：

**1** 钢桩桩身点焊法，点焊前应打磨处理所粘贴桩身型钢表面，并做表面抹平处理；点焊过程中，宜将光缆间隔一定距离初步固定与桩身型钢表面；与桩身型钢接时，应采用焊接固定、全面粘贴、铺设防火材料和焊接保护型钢；

**2** 钢桩桩身表面粘贴法，粘贴前应打磨处理所粘贴型钢表面，并做表面抹平处理；粘贴过程中，宜将光缆间隔一定距离初步固定于型钢表面；与型钢连接时，应将粘结剂均匀地涂抹在光缆表面及其周围，确保光缆与型钢的有效连接；

**3** 接桩处理应采取合适的传感光缆接口装置的安设与保护措施。

**5.3.7** 传感光缆的保护应符合下列规定：

**1** 传感光缆的断点熔接段应采用套管保护；

**2** 光缆引线应从桩身侧面引出，出线位置应在设计桩顶标高0.5m以下；在灌注桩浇筑过程中、预制桩与钢桩沉桩前应做好桩头引线的临时固定与保护；

**3** 启封后的传感光缆应按照原有缠绕方向，按圈依次解开，避免受扭或受弯，控制光缆的弯曲半径应大于5cm，且不得小于光缆外径的20倍。

**5.3.8** 传感光缆安装完成后应采用光时域反射仪（OTDR）、红光笔等技术对传感光缆的通光完整性进行检查。

## 5.4 滑动测微计测管安装

**5.4.1** 测管安装前的准备工作应符合下列规定：

**1** 测管安装前应对套管和测标逐一检查，对异常的套管和测标应放弃使用，对内侧有污垢和灰尘的套管和测标应擦拭干净；

**2** 测管在埋入桩身前宜进行预连接，预连接长度视埋设时空间大小决定，且不宜超过3m，进行预连接的场地应平整，保持清洁。

**5.4.2** 测管的连接应符合下列规定：

**1** 测标排列的方向和顺序应统一，测标宜按1m等间距排列；

**2** 套管进入测标的方向和长度应能使套管和测标上的螺丝孔对齐；

**3** 埋入桩中各测标锥形环应和被测试体同步位移，测管的底部应封闭，顶部有密封盖，管内注满清水；

**4** 套管与测标连接处的防水措施应可靠，安装过程中测管内发现有漏浆现象时，应及时采用高压清水将测管内侧清洗干净。

**5.4.3**  混凝土灌注桩的测管安装应符合下列规定：

**1** 测管应绑扎在钢筋笼内侧主筋上，试验桩应通长配筋，配筋量上下一致；钢筋笼应稳固、无扭曲；

**2** 钢筋笼放入桩孔之前，应根据单节钢筋笼的长度和下放次序，将预连接的测管组装至与单节钢筋笼基本相同的长度并临时绑扎；

**3** 测管随钢筋笼放入桩孔过程中，应及时将测管牢固绑扎在钢筋笼上，及时向测管内注入清水，保持测管中水头高于桩孔中液面高度；按静载试验设备的安装位置确定测管和钢筋笼在桩孔中的位置，钢筋笼若发生扭转应及时校正；钢筋笼间测管的连接应在钢筋笼焊接后进行，钢筋笼焊接时，应采取措施保护测管并防止杂质进入测管；

**4** 浇筑混凝土前、桩的整条钢筋笼应保证自然铅直悬吊状态，浇筑混凝土的导管在下放和提升过程应缓慢，避免碰撞测管，导管最大直径宜比钢筋笼直径小30cm以上；浇筑混凝土过程中测管内水头高度应高于混凝土浇筑面及桩孔中液面高度；

**5** 测管安装完成后，应采取保护措施防止杂质进入测管；

**6** 桩头制作时，应避免敲打、碰撞、挤压测管；测管顶端应高于桩头顶面10cm。

**5.4.4** 管桩的测管安装应符合下列规定：

**1** 应制作钢筋笼，并每隔2m~3m设置一个定位装置，确保测管与轴轴线平行；

**2** 填芯处理的材料应在C15以上，可加膨胀剂，并浇注均匀；

**3** 桩底部应闭口；

**4** 测管安装过程应符合本规程第5.4.3条的规定。

# 6 基桩内力测试

## 6.1 一般规定

**6.1.1** 本方法适用于竖向受荷桩的内力测试，测试桩身变形，计算桩身轴力，分析桩侧摩阻力、桩端阻力；适用于水平受荷桩的内力测试，计算桩身弯矩、剪力，分析桩周土抗力。

**6.1.2** 试验桩最大试验荷载预估值应取按岩土条件设计极限荷载的（1.0~1.5）倍；设计极限荷载应由设计提供，也可按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94等相关标准的规定计算确定。

**6.1.3** 试验桩桩身性能要求宜符合下列规定：

**1** 竖向受荷桩宜确保桩身变形主要在弹性范围内；水平受荷桩，宜与工程桩相同；

**2** 灌注桩、预制混凝土实心桩可增加配筋量或提高混凝土强度；管桩可选择厚壁桩或提高配筋量，即选择C型桩；钢桩可选择更高强度的型钢或厚壁型钢。

## 6.2 测试元件埋设与试验桩制作施工

**6.2.1** 用于内力测试的试验桩，应根据桩型、传感器类型与安装方法等因素，进行测试元件埋设，并采用适合的施工方法进行试验桩的制作与施工。

**6.2.2** 竖向受荷桩传感器埋设断面的选取应符合下列规定：

**1** 在桩头（1~2）倍桩径范围内或地面以上设置一个测量断面作为传感器标定断面，且应避开试验承台的影响范围；

**2**  传感器测量断面应在两种不同性质土层的界面处，各主要土层的上下界面应各布置一个测量断面，测量断面距离界面不应小于30cm，同一土层应布设不少于2个断面；当土层较厚时，中间部分宜适当增设断面，断面间距不宜超过5m；

**3** 传感器标定断面处应对称设置4个传感器，其他测量断面处可对称埋设2~4个传感器，当桩径较大或试验要求较高时取高值。

**6.2.3** 水平受荷桩传感器埋设断面的选取应符合下列规定：

**1** 在桩头（1~2）倍桩径范围内或地面以上设置一个测量断面作为传感器标定断面；

**2** 传感器应沿受力方向对称布置在远离中性轴的受拉和受压区；

**3**  传感器应设置在水平抗力主要区域，测量断面间距宜为1m~3m，桩中下部可适当较少；传感器测量断面应在两种不同性质土层的界面处，各土层的上下界面应各布置一个测量断面，测量断面距离界面不应小于30cm；同一土层布设2个断面；

**4** 传感器标定断面与测量断面均按照水平荷载作用方向对称地方布设4个或2个传感器。

**6.2.4** 传感光缆的布设数量应符合下列规定：

**1** 灌注桩应均匀布设不少于4根传感光缆，且宜形成U型回路；

**2** 预制混凝土桩，桩径小于等于800mm的桩应对称布设不少于2根传感光缆，桩径大于800mm的应对称布设不少于4根传感光缆，且宜形成U型回路；

**3** 钢桩应均匀布设不少于2根传感光缆，且宜形成U型回路；

**4** 竖向受荷桩与锚杆的分布式光纤宜通长布置；水平受荷桩的分布式光纤可不通长布置，但应大于水平力影响深度。

**6.2.5** 滑动测微计测管的埋设数量应符合下列规定：

**1** 灌注桩测管的埋设数量不宜少于2根，且宜对称均匀布置；

**2** 桩径为500mm~800mm的竖向受荷管桩，可埋设1根测管，且测管宜布置在桩几何中轴线附近；

**3** 竖向受荷桩的测管宜通长布置，水平受荷桩的测管可不通长布置，但应大于水平力影响深度。

**6.2.6** 试验桩施工应符合现行广东省标准《建筑地基基础施工规范》DBJ/T 15-152等相关规范的规定，且对桩身表面安装测试元件的预制混凝土桩、钢桩不宜采用柴油锤锤击法施工**。**

**6.2.7** 灌注桩钢筋笼与填芯处理的钢筋笼制作和安装，应符合下列规定：

**1** 钢筋笼应适当提高刚度，确保施工过程不发生过大的变形；

**2** 钢筋笼在制作、运输和安装过程中，应采取有效措施防止变形，并应有保护层垫块或垫板；

**3** 浇注混凝土时，应采取措施固定钢筋笼位置；

**5** 钢筋笼吊装时，不得碰撞孔壁。

**6.2.8** 振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器线缆排线与连接应符合下列规定：

**1** 应按钢筋走向分段固定，固定时宜分段留1%自由长度，线缆固定间隔宜按2m~3m控制；

**2** 灌注桩与植筋填芯处理，当钢筋笼为多段时，在钢筋笼下设过程中绑扎线缆，线缆宜沿钢筋笼的內缘走线；

**3** 桩身安装传感器的预制桩，施工过程接桩时的线缆处置，线缆应挂设在每节桩的上端内孔中，完成下一节桩施工，与上一节桩接桩时，可通过拉绳将下一节桩的线缆牵引出来，线缆完成安装后，再挂设于上一节桩的上端内孔中，再进行接桩。

**6.2.9** 在下列施工过程等环节，应采取有效措施对测试元件和线缆进行保护：

**1** 灌注桩钢筋笼运输、安装、下设过程和成桩过程；

**2** 桩身安装测试元件的预制桩，桩运输、吊装和成桩过程；

**3** 采用植筋填芯处理时，植筋钢筋笼运输、安装、下设过程和填芯混凝土浇注过程；

**4** 在试桩养护期间、基坑开挖、试坑开挖、试验承台制作等过程。

**6.2.10** 测试元件的初值应在正常范围内，线缆应完好无损；条件允许时，应对破损测试元件及其连线及时修复或更换。

**6.2.11** 测试元件性能状态与线缆破损状况的检查应符合下列规定：

**1** 测试元件安装前后，应进行联机测试；

**2** 钢筋笼下设完毕后、混凝土浇注前后，宜进行联机测试；

**3** 桩成型前安装测试元件的预制混凝土桩，离心成型后、蒸养完成后、运输前后、施工前后，宜进行联机测试；

**4** 桩成型后桩身安装测试元件的预制混凝土桩、钢桩，运输过程、施工前后，宜进行联机测试；

**5** 试验桩施工完成后，应对测试元件的成活率进行联机测试，以及异常数据测试元件的排查；

**6** 试验前，应对测试元件的初始状态进行检查，以及异常数据测试元件的排查。

**6.2.12** 传感器的埋设记录可按表C.0.1的格式进行记录，传感光缆布设记录可按表C.0.2的格式进行记录，滑动测微计测管安装记录可按表C.0.3的格式进行记录。

## 6.3 试验现场操作与测试数据采集

**6.3.1** 进行基桩内力测试的静载试验除应按照现行行业标准《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106、现行广东省标准《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60等相关规范的规定外，尚应符合下列规定：

**1** 分级荷载宜为最大试验荷载预估值的1/15；

**2** 试验加荷方式应采用慢速维持荷载法；

**3** 当桩顶位移速率达到相对稳定标准时，且内力测试数据完成后，可施加下一级荷载；

**4** 当加载至最大试验荷载预估值尚未出现静载试验的终止加载情况时，宜按分级荷载增量继续进行（1~4）级荷载加载试验。

**6.3.2** 振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器和分布式光纤，测试准备工作与联机测试应符合下列规定：

**1** 启封传感器线缆；

**2** 将传感器线缆连接到对应接口，且宜采用自动观测用集线箱，记录接口编号和对应的传感器编号；

**3** 连接数据采集仪器与集线箱；

**4** 记录传感器状态读数，传感器读数应稳定；

**5** 联机测试或加卸载过程结束后，应妥善保护好传感器线缆。

**6.3.3** 滑动测微计测试准备工作应符合下列规定：

**1** 测试前应检查并保证测试探头各密封圈完整无破损，各测试组件连接正确；测试探头应放入测管内，同时将测试系统开机预热不少于20min；

**2** 每次测试前后应将导向链、测试探头、操作杆和测量电缆察拭干净；

**3** 各测试单元应按顺序编号；

**4** 每次测试完毕，应将测管孔口封闭；测试过程中若测管内有杂质或探头提放困难，应采用适当措施进行处理。

**6.3.4** 基桩内力测试步骤应符合下列规定：

**1** 试验前应测读传感装置初始读数；宜采集3次有效的传感装置读数，取其平均值作为初始读数；

**2** 试验测读，每级荷载施加后，宜每隔1小时进行一次内力测试，每级荷载沉降稳定后应再次进行传感装置读数与记录。

**6.3.5** 当发现测试数据异常，应查找原因，有条件时应重新测试。

**6.3.6** 基桩内力测试的传感器测试数据可按本规程表C.0.4~C.0.6的格式进行记录。

## 6.4 测试数据分析与结果评价

**6.4.1** 测试数据的整理应剔除异常数据，当同一断面有一个以上测读值时应取平均值。

**6.4.2** 测试数据的修正应符合下列规定：

**1** 当因传感器垂直度导致应变数据有规律地偏高或偏低变化时，应先对传感器垂直度进行合理修正；

**2** 当传感器读数发生系统偏差时，应按有效方法进行系统偏差修正；

**3** 当传感器读数的偏离无变化规律的，不得随意修正。

**6.4.3** 数据分析原则应以校准断面的测试数据为基础，并应符合物理条件、力学条件、边界条件和岩土规律等原则。

**6.4.4** 当桩身发生塑性变形时，弹性变形的修正应符合下列规定：

**1** 弹性变形应扣除塑性变形、徐变的影响；

**2** 桩身钢筋应力、混凝土应力应分别按抽检的应力应变曲线进行修正。

Ⅰ 竖向抗压桩与抗拔桩

**6.4.5** 桩身弹性变形量（压缩量、拉伸量）可按下式计算，且不宜大于基桩检测的回弹量：

$s\_{e}=\sum\_{i=1}^{n-1}Δs\_{i+1}=\sum\_{i=1}^{n-1}\left(ε\_{i}+ε\_{i+1}\right)L\_{i}/2$ （6.4.5）

式中：——桩身弹性压缩量、拉伸量（mm）；

Δ*si*——桩身相邻两个传感器之间的压缩量、拉伸量（mm）；

——相邻两个传感器的应变量（mm）；

*Li*——相邻两个传感器的间距（mm）。

**6.4.6** 灌注桩桩身轴力的确定应符合下列规定：

**1** 桩身第*i*断面处的轴力可按下式计算：

$P\_{i}=E\_{c}\left(\bar{ε}\_{i}\right)⋅\bar{ε}\_{i}∙A\_{ci}+E（\bar{ε}\_{i}）∙\bar{ε}\_{i}∙A\_{si} $ （6.4.6-1）

式中：*Pi*——桩身第*i*断面处轴力（N）；

——第*i*断面处应变平均值（με）；

$E\_{c}\left(\bar{ε}\_{i}\right)$——第*i*断面处桩身混凝土弹性模量（MPa），宜取实测混凝土强度等级对应的弹性模量；

$E（\bar{ε}\_{i}）$——钢材的弹性模量（MPa）；

*A*s*i*——第*i*断面处钢筋截面面积（m2）；

*A*c*i*——第*i*断面处桩身混凝土截面面积（m2），宜取实测值。

**2** 当桩身材料发生塑性变形时，应按抽检的应力应变曲线对桩身轴力进行修正；抗拔桩当桩身开裂时，*A*c*i*宜取0。

**6.4.7** 预制混凝土桩桩身轴力的确定应符合下列规定：

**1** 当传感器埋入桩身主要受力截面内时，桩身第*i*断面处的轴力可按下式计算：

$P\_{i}=E\_{c}\left（\bar{ε}\_{ci}\right）⋅\overbar{ε}\_{i}∙A\_{ci}+E\left（\bar{ε}\_{i}\right）∙\bar{ε}\_{i}∙A\_{si}+E\left（\bar{ε}\_{i}\right）∙\bar{ε}\_{i}∙A\_{pi} $ （6.4.7-1）

式中：*A*p*i*——第*i*断面处预应力钢筋截面面积（m2）。

**2** 当传感器采用填芯处理埋入管桩的中空位置时，如果预制桩身材料与填芯材料能够协同变形，桩身第*i*断面处的轴力可按下列公式计算：

$$P\_{i}=E\_{c}\left（\bar{ε}\_{i}\right）⋅\overbar{ε}\_{i}∙A\_{ci}+E\_{t}\left（\bar{ε}\_{i}\right）⋅\overbar{ε}\_{i}∙A\_{ti}+E\left（\bar{ε}\_{i}\right）∙\bar{ε}\_{i}∙A\_{si}+E\left（\bar{ε}\_{i}\right）∙\bar{ε}\_{i}∙A\_{pi} $$

（6.4.7-2）

式中：$E\_{t}\left（\bar{ε}\_{i}\right）$——第*i*断面处填芯混凝土弹性模量（kPa），宜取实测混凝土强度等级对应的弹性模量；

*A*s*i*——第*i*断面处非预应力筋、植筋的钢筋截面面积（m2）；

*A*t*i*——第*i*断面处填芯混凝土截面面积（m2）。

**3** 当桩身材料发生塑性变形时，应按抽检的应力应变曲线对桩身轴力进行修正；抗拔桩当填芯混凝土、桩身开裂时，*A*t*i*、*A*c*i*宜取0。

**6.4.8** 钢桩桩身轴力的确定应符合下列规定：

**1** 桩身第*i*断面处的轴力可按下式计算：

$P\_{i}=E\left（\bar{ε}\_{i}\right）∙\bar{ε}\_{i}∙A\_{i}$ （6.4.8）

式中：*Ai*——第*i*断面处桩身钢材截面面积（m2），宜取实测值。

**2** 当桩身材料发生塑性变形时，应按抽检的应力应变曲线对桩身轴力进行修正。

**6.4.9** 基桩内力测试数据的表格和分布图，每级试验荷载下，应将桩身不同断面处的轴力值制成表格，并绘制桩身轴力-深度-试验荷载分布图。

**6.4.10** 桩身摩阻力和端阻力应分别按下列公式计算：

$q\_{si}(j)=\frac{P\_{i}\left(j\right)-P\_{i+1}\left(j\right)}{u∙L\_{i}}$ （6.4.10-1）

$q\_{p}(j)=\frac{P\_{n}(j)}{A\_{p}}$ （6.4.10-2）

式中：*q*s*i*(*j*)——第*j*级试验荷载作用下，桩第*i*断面与*i*+1断面间单位侧摩阻力（kPa）；

$q\_{p}(j)$——第*j*级试验荷载作用下，桩的单位端阻力（kPa）；

*u——*桩身周长（m），宜取两个测试断面之间周长的实测代表值；

*Li*——第*i*断面与第*i*+1断面之间的桩长（m）；

*Pn*(*j*)——第*j*级试验荷载作用下，桩端的轴力（kN）；

*A*p*——*桩端面积（m2），宜取实测值。

**6.4.11** 桩侧摩阻力和桩端阻力应绘制柱状图。

**6.4.12** 桩侧摩阻力和桩端阻力标准值的确定宜符合下列规定：

**1** 桩侧摩阻力和桩端阻力标准值可分别取桩侧摩阻力~试验荷载关系曲线、桩端阻力~试验荷载关系曲线中的极限摩阻力和桩端阻力；

**2** 同一条件下参加统计的试验桩不得少于3根，当桩侧摩阻力、桩端阻力标准值极差不超过平均值的30%时，宜取其平均值为桩侧摩阻力、桩端阻力标准值。

Ⅱ 水平受荷桩

**6.4.13** 水平受荷桩测量断面桩身弯矩的计算应符合下列规定：

**1** 测量断面桩身弯矩，可按下式进行计算：

$M=\frac{EI\left(ε\_{+}-ε\_{-}\right)}{h\_{0}}×10^{-3}$ （6.4.13）

式中：*M*——测量断面桩身弯矩（kN·m）；

*h*0——拉、压应变测点的间距（m），

*EI——*桩身抗弯刚度（MN·m2）；

*ε*+——测量断面受拉一侧的应变（με），以拉为正；

*ε*-——测量断面受压一侧的应变（με），以压为负。

**2** 桩身抗弯刚度（*EI*），可按现行行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94的有关规定进行计算；且应符合现行国家标准《混凝土结构设计规范》GB 50010的有关规定。

**6.4.14** 水平受荷桩测量断面桩身剪力、土抗力的确定可采用下列原则进行计算，也可采用其他合适方法进行计算：

**1** 桩身弯矩-深度-试验荷载曲线，应采用合适的方法进行平滑处理，可按五点滑移平均公式进行磨光处理；

**2** 测量断面桩身剪力可通过对桩身弯矩一次微分进行计算，可采用差分法原理计算确定；

**3** 测量断面土抗力可通过对桩身弯矩二次微分进行计算，可采用差分法原理计算确定。

**6.4.15** 水平受荷桩应绘制各级水平力作用下的桩身弯矩-深度-试验荷载曲线、桩身剪力-深度-试验荷载曲线、土抗力-深度-试验荷载曲线，且应列表给出相应的数据。

**6.4.16** 测试报告除应符合本规程第3.3.5条规定外，尚应包括下列内容：

**1** 受测桩的桩型、尺寸、桩号、桩位、桩顶标高和相关施工记录；

**2** 试验桩的测试数据，数据处理原则，桩身轴力、桩身弯矩与剪力的计算方法；各级水平力作用下的桩身轴力-深度-试验荷载曲线、桩身弯矩-深度-试验荷载曲线、桩身剪力-深度-试验荷载曲线、表格和汇总结果；

**3** 桩侧阻力、桩端阻力、土抗力分析方法；各级水平力作用下的桩侧阻力-深度-试验荷载曲线、桩端阻力-深度-试验荷载曲线、土抗力-深度-试验荷载曲线、表格和汇总结果；

**4** 竖向抗压桩各土层的桩侧极限侧阻力、桩端阻力，竖向抗拔桩各土层的桩侧极限侧阻力，水平受荷桩主要岩土层的桩周土抗力。

# 7 锚杆内力测试

## 7.1 一般规定

**7.1.1** 本方法适用于拉力型钢筋锚杆的内力测试，测试杆体变形，计算锚杆轴力，确定锚杆锚固段注浆体与岩土层之间的粘结力和粘结强度。

**7.1.2** 试验锚杆最大试验荷载预估值应取按岩土条件设计极限荷载的（1.0~1.5）倍；设计极限荷载应由设计提供，也可按现行国家标准《建筑地基基础设计规范》GB 50007、现行行业标准《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120等相关规范的规定计算确定。

**7.1.3** 试验锚杆性能要求宜符合下列规定：

**1** 宜加载至锚固段注浆体与岩土体之间发生破坏；

**2** 宜确保杆体变形主要在弹性范围内；

**3** 当杆体承载力不够时，可采取加大杆体截面面积的措施。

## 7.2 测试元件埋设与试验锚杆制作施工

**7.2.1** 用于内力测试的锚杆，应根据锚杆类型、传感器类型与安设方法等因素，进行测试元件埋设，并采用适合的施工方法进行试验锚杆的制作与施工。

**7.2.2** 锚杆内力测试测试元件埋设断面的选择应符合下列规定：

**1** 宜设置一测量断面作为传感器标定断面，标定断面应设置在锚杆自由段上，且距孔口位置宜为0.5m~1.5m；

**2** 应根据拟测试岩土层的空间分布和锚杆受力特点以及传感器特性进行合理布设；

**3** 在不同岩土层分界面处应布置测试断面，同一岩土层的测量断面宜等间距布置，测试断面间距不宜超过5m；

**4** 传感光缆的布设数量可布设1根传感光缆，但宜通长布置。

**7.2.3** 测试元件的埋设应符合下列规定：

**1** 将组装合格的锚杆杆体和排气管送入孔内，引出观测电缆，检查注浆管和排气管是否通畅；

**2** 埋设完成后应测读传感器初值，满足试验要求后即封堵孔口，按设计要求注浆；

**3** 测点较多时，宜设置集线箱，并对测试元件进行编号；

**4** 观测电缆与集线箱应设保护装置；

**5** 应记录测试元件埋设情况。

**7.2.4** 传感器线缆排线应按杆体分段固定，固定时宜分段留1%自由长度，线缆固定间隔宜按2m~3m控制。

**7.2.5** 锚杆施工应符合现行[广东省标准《建筑地基基础施工规范》DBJ/T 15-152](http://www.baidu.com/link?url=Ae8fyGJfsGmMJzhapTHhPbMAzrE0QvtWzhWmQxbYNeSFJUufo6wn3GO34GJloJXdDldWornV9zw6q70BOIlNPWiefKRA_ATr3eWO5Nm6SXS&wd=&eqid=9988ddee0000f44f00000006614fea70" \t "_blank)等相关规范的规定；在下列施工过程等环节，应采取有效措施对测试元件和线缆进行保护：

**1** 杆体运输、安装和锚杆施工过程；

**2** 在锚杆养护期间、基坑开挖、试坑开挖、锚固结构制作等过程。

**7.2.6** 测试元件的初值应在正常范围内，线缆应完好无损；条件允许时，应对破损测试元件及其连线应及时修复或更换。

**7.2.7** 测试元件性能状态与线缆破损状况的检查应符合下列规定：

**1** 测试元件安装前后，应进行联机测试；

**2** 杆体下设完毕后、注浆体浇注前后，宜进行联机测试；

**3** 锚杆施工完成后，应对测试元件的成活率进行测试，以及异常数据测试元件的排查；

**4** 试验前，应对测试元件的初始状态进行检查，以及异常数据测试元件的排查。

**7.2.8** 传感器的埋设记录可按表C.0.1的格式进行记录，传感光缆布设记录可按表C.0.2的格式进行记录。

## 7.3 试验现场操作与测试数据采集

**7.3.1** 进行锚杆内力测试的抗拔试验除应符合现行行业标准《锚杆检测与监测技术规程》JGJ/T 401等相关规范的规定外；尚应符合下列规定：

**1** 分级荷载宜为最大试验荷载预估值的1/15；

**2** 支护锚杆内力测试应采用单循环加卸载法；

**3** 基础锚杆内力测试应采用分级维持荷载法；

**4** 锚头位移达到位移相对稳定标准时，且内力测试数据完成后，可继续施加下一级荷载；

**5** 当加载至最大试验荷载预估值尚未出现抗拔试验的终止加载情况时，宜按分级荷载增量继续进行（1~4）级加载试验。

**7.3.2** 振弦式光纤光栅式电阻应变式传感器和分布式光纤，测试前的准备工作与联机测试应符合本规程第6.3.2条的规定。

**7.3.3** 锚杆内力测试数据采集应符合下列规定：

**1** 试验前应测读传感装置初始读数或基准值；宜采集3次有效的传感装置读数，取其平均值作为初始读数或基准值；

**2** 试验测读，传感器数据的测读时间，宜与本规程第7.3.1条规定的测读时间相适应，且每级荷载锚头位移稳定后应读取传感器读数。

**7.3.4** 当发现测试数据异常，查找原因，有条件时应重新测试。

**7.3.5**  锚杆内力测试的传感器测试数据可按本规程表C.0.4的格式进行记录，锚杆内力测试分布式光纤测试数据可按表C.0.5的格式进行记录。

## 7.4 数据分析与结果评价

**7.4.1** 试验数据的整理应符合本规程第6.4.1条的规定。

**7.4.2** 测试数据的修正应符合本规程第6.4.2条的规定。

**7.4.3** 数据分析原则应以校准断面的测试数据为基础，并宜符合物理条件、力学条件、边界条件和岩土规律等原则。

**7.4.4** 当杆体发生塑性变形时，弹性变形的修正应符合本规程第6.4.4条的规定。

**7.4.5** 锚杆内力的计算，杆体轴力的确定应符合下列规定：

**1** 杆体第*i*断面处的轴力可按下式计算：

$P\_{i}=E（\bar{ε}\_{i}）∙\bar{ε}\_{i}∙A\_{si} $ （7.4.5）

式中：*Pi*——杆体第*i*断面处轴力（N）；

——第*i*断面处应变平均值（με）；

$E（\bar{ε}\_{i}）$——杆体的弹性模量（MPa）；

*A*s*i*——第*i*断面处杆体截面面积（m2）。

**2** 当杆体材料发生塑性变形时，应按抽检的杆体应力应变曲线对锚杆轴力进行修正。

**7.4.6** 锚杆杆体轴力应根据测读数据确定，并绘制不同试验荷载下锚杆杆体轴力沿轴向的变化曲线，粘结力与试验荷载的关系曲线。

**7.4.7** 各级试验荷载作用下的锚固段注浆体与岩土体之间的粘结力可按下式计算：

 （7.4.7）

式中：*q*s*i*（*j*）*——*第*j*级试验荷载作用下，锚杆第*i*断面与*i*+1断面内锚固段注浆体与岩土体之间的单位面积粘结力（kPa）；

*Pi*（*j*）——第*j*级试验荷载作用下，锚杆第*i*断面的杆体轴力（kN）；

*Li*——锚头到第*i*断面的锚杆长度（m）；

*d*——锚固段钻孔直径（m）；

*j——*试验荷载加载级别；

*i——*锚杆测试断面顺序号，*i*=1，2，……，*n*，并自锚杆顶以下从小到大排列。

**7.4.8** 锚固段注浆体与岩土层之间粘结强度的确定应符合下列规定：

**1** 粘结强度可取粘结力~试验荷载关系曲线中的极限粘结力；

**2** 同一条件下参加统计的试验锚杆不得少于3根，当粘结强度极差不超过平均值的30%时，宜取其平均值为粘结强度标准值。

**7.4.9** 测试报告除应符合本规程第3.3.5条规定外，尚应包括下列内容：

**1** 测试锚杆布置图、编号、位置和相关施工记录，锚杆孔径、长度、角度、杆体直径或面积、锚杆锚固段长度、锚杆自由段长度、杆体自由段长度、杆体粘结段长度等、杆体材料、材料强度；

**2** 锚杆的测试数据，数据处理原则，锚杆轴力计算方法；各级荷载作用下的锚杆轴力-深度-试验荷载曲线、表格和汇总结果；

**3** 锚固段注浆体与各岩土层之间的粘结力分析方法；各级荷载作用下的粘结力-深度-试验荷载曲线、表格和汇总结果；

**4** 锚固段注浆体与各岩土层之间的极限粘结力、极限粘结强度。

# 附录A 传感器与传感光缆传感系数的标定

**A.0.1** 本方法适用于应变计与传感光缆传感系数的标定，钢筋应力计可按照执行。

**A.0.2** 标定仪器设备应符合下列规定：

**1** 传感器标定架应具有足够的刚度；

**2** 力传感器、变形传感器精度应优于1%FS；

**3** 频率采集仪、光纤光栅解调仪、电阻静态应变采集仪应符合或优于本规程第4.2.8条的规定；分布式光纤解调仪应符合或优于本规程第4.3.5条的规定。

**A.0.3** 试验要求应符合下列规定：

**1** 传感器应在正常试验大气条件下预先置放24h以上；

**2** 标定试验前，应在满量程值预拉、压三次循环，每次间隔2min；

**3** 传感器应在无强烈震动和磁场干扰的条件下试验。

**A.0.4** 标定试验应符合下列规定：

**1** 在正常试验大气条件下，将传感器安装在专用标定架上；

**2** 将传感器满量程应变量按分10档或8档规定的量值分档，从满量程的下限开始，逐级进给应变量至满量程上限，用相应的数据采集仪测量其输出，并记录每个档位的测值；

**3** 如此共进行三个正、反行程的测量；

**4** 按本规程A.0.5条的规定计算传感器的传感系数；

**5** 振弦式传感器、光纤光栅传感器、电阻应变式传感器和分布式传感光纤标定结果应分别符合本规程第4.2.2条、第4.2.3条、第4.2.4条、第4.3.1条的规定。

**A.0.5** 传感器传感系数的确定应符合下列规定：

**1** 按传感器满量程应变量按分档的测度数进行统计；

**2** 线性拟合振弦式传感器、振弦式传感器、电阻应变式传感器和分布式传感光纤应分别按本规程公式（4.2.9）、公式（4.2.10）、公式（4.2.11）、公式（4.3.7）执行。

# 附录B 滑动测微计测试探头的率定

**B.0.1** 率定筒应由铟钢制成，其测标应采用不锈钢制成,且应符合下列规定：

**1** 铟钢的热膨胀系数应满足在00～30℃时，约为1×10-6m/℃；

**2** 温度对标距长度的影响应小于0.0015mm/℃。

**B.0.2** 率定筒应通过有资质单位的技术鉴定或检定，并在鉴定或校准有效期内使用。

**B.0.3** 率定前准备工作应符合下列规定：

**1** 率定应在温度恒定，无扬尘的环境中进行；率定场所的环境温度宜和现场测管内温度接近；

**2** 应将标定筒平放在平整的桌面上，记录标定筒*e*(1)和*e*(2)位置测标距离的差值*Δe*（图B.0.3）；

**3** 连接所有设备并开机预热不宜少于20min。



图B.0.3 标定装置示意图

1—*e*(1)=997.5mm；2—*e*(2)=1002.5mm；3—*e*(0)=1000.0mm；4—△*e*=*e*(2)-*e*(1)=5mm

**B.0.4** 率定步骤应符合下列规定：

**1** 将探头放置在标定装置的*e*(1)位置（图B.0.3）进行测试并记录读数；再从标定装置中将探头移出再重复测读，直至获得数据间极差小于0.003mm的3个测试数据，将其算术平均获得率定值*e*1；

**2** 在*e*(2)位置（图B.0.3）应按本条第1款要求操作，获得率定值*e*2；

**3** 仪器零点漂移（*z*0）和探头率定系数（*k*）应按下列公式计算：

 （B.0.4-1）

$k=\frac{∆e}{e\_{2}-e\_{1}}$ （B.0.4-2）

式中：*e*1——*e*(1)位置的率定值（mm）

*e*2——*e*(2)位置的率定值（mm）

*z*0——仪器零点漂移（mm）；

*k*——探头率定系数（ε）。

# 附录C 基桩与锚杆内力测试记录表格

**C.0.1** 传感器的埋设记录可按表C.0.1的格式进行记录。

**表C.0.1 传感器的埋设记录表**

|  |
| --- |
| 工程名称：  |
| 桩、锚杆编号： 测试项目： |
| 传感器类型： 安装日期： 年 月 日 |
| 其他信息： |
| 序号 | 测点编号 | 测点位置 | 传感器编号 | 埋设完成后读数 | 备注 |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

记录： 校核： 第 页 共 页

**C.0.2** 传感光缆布设记录可按表C.0.2的格式进行记录。

**表C.0.2 传感光缆布设记录表**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 工程名称 |  | 桩、锚杆编号 |  |
| 项目地址 |  | 委托单位 |  |
| 光缆类型 |  | 光缆长度 |  |
| 光缆参数 | 直径： 出厂光损：强度： 应变隔离度： |
| 布线方案 |  | （绘制草图） |
| 测线序号 | 方位 | 顶部刻度 | 底部刻度 | 出露标示 |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  过程记录 |
| 时间 | 完成步骤 | 光路检查 | 备注（施工照片） |
| 1 |  |  |  |
| 2 |  |  |  |
| 3 |  |  |  |
| … |  |  |  |
| 完工记录 |
| 测线 |  |  |  |  |  |
| 长度 |  |  |  |  |  |
| 完整性 |  |  |  |  |  |
| 出线标识 |  |  |  |  |  |
| 备注： |

记录： 校核： 第 页 共 页

**C.0.3** 滑动测微计测管安装记录可按表C.0.3的格式进行记录。

**表C.0.3 滑动测微计测管安装记录表**

|  |
| --- |
| 工程名称：  |
| 桩型： 桩径： 桩长：  |
| 埋设管数： 测管编号： 埋设管长：  |
| 安装日期： 年 月 日 |
| 序号 | 测标编号 | 测标位置（标高） | 埋设完成后读数 | 位置示意图 |
| 测值 | 温度（℃） | 测值 | 温度（℃） |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 备注： |

记录： 校核： 第 页 共 页

**C.0.4** 基桩（锚杆）内力测试传感器测试数据可按表C.0.4的格式进行记录。

**表C.0.4 基桩（锚杆）内力测试传感器测试数据记录表**

|  |
| --- |
| 工程名称： |
| 试验编号： 基桩（锚杆）编号： 检测日期： 年 月 日 |
| 传感器类型： 标定情况：  |
| 其他信息： |
| 序号 | 试验荷载 | 测读时间 | 测点编号 | 传感器编号 | 传感器读数 | 测点应变 | 备注 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |

记录： 校核： 第 页 共 页

**C.0.5** 基桩（锚杆）内力测试分布式光纤测试数据可按表C.0.5的格式进行记录。

**表C.0.5 基桩（锚杆）内力测试分布式光纤测试数据记录表**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 工程名称 |  | 测桩编号 |  |
| 设备名称与编号 |  | 测线编号 |  |
| 测线长度 |  | 测线顺序 |  |
| 加载级别 |  | 设计吨位 |  |
| 参数配置 | 测试距离： 空间分辨率： 采样精度：起始频率： 终了频率： 歩长： |
| 序号 | 试验荷载 | 测试时间 | 储存文件名  | 备 注 |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
| 备注： |

记录： 校核： 第 页 共 页

**C.0.6** 基桩内力测试滑动测微计测试数据可按表C.0.6的格式进行记录。

**表C.0.6 基桩内力测试滑动测微计测试数据表**

|  |  |
| --- | --- |
| 工程名称： | 测试时间： |
| 测管编号： | 测试工况： |
| 其他信息： |
| 测试单元编号 | 进程 | 回程 |
| 测值 | 温度（℃） | 测值（mm） | 温度（℃） |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

记录： 校核： 第 页 共 页

# 本规程用词说明

**1** 为便于在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，非这样做不可的用词：

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用词，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……规定”或“应按……执行”。

# 引用标准名录

**1** 《建筑地基基础设计规范》GB 50007

**2** 《混凝土结构设计规范》GB 50010

**3** 《土工试验仪器岩土工程仪器振弦式传感器通用技术条件》GB/T 13606

**4** 《金属粘贴式电阻应变计》GB/T 13992

**5** 《建筑桩基技术规范》JGJ 94

**6** 《建筑基坑支护技术规程》JGJ 120

**7** 《锚杆检测与监测技术规程》JGJ/T 401

**8** 《土木工程用光纤光栅应变传感器》JG/T 422

**9** 《建筑基桩检测技术规范》JGJ 106

**10** 《建筑地基基础检测规范》DBJ/T 15-60

**11** 《建筑地基基础施工规范》DBJ/T 15-152

# 附：条文说明

**广东省标准**

**基桩与锚杆内力测试技术规程**

DBJ15—xxx—201x（征求意见稿）

**条文说明**

**制定说明**

本规程是根据《广东省住房和城乡建设厅关于发布<2017年广东省工程建设标准制订和修订计划>的通知》（粤建科函〔2017〕2904号文）的要求，由广东省建筑科学研究院集团股份有限公司会同有关设计、科研、生产和教学单位共同编制而成。

本规程主编单位是广东省建筑科学研究院集团股份有限公司，参编单位是广东省建筑工程集团有限公司、广东省建设工程质量安全检测总站有限公司、广东天信电力工程检测有限公司、中铁西北科学研究院有限公司、广东省建筑设计研究院有限公司、中交四航工程研究院有限公司、苏交科（广州）工程勘察设计有限公司、广东三和管桩股份有限公司、广州欧美大地仪器科技有限公司、华南理工大学、清远市建设工程综合服务站。主要起草人员是李广平、徐天平、杨 眉、王 凯、程小俊、王建松、周洪波、桑登峰、尹 科、李 龙、廖永初、杨 春、邝文浩、徐权辉、宋露露、李超华、毛 悦。

在本规程编制过程中，编制组进行了广泛的调查分析，总结了我国在基桩与锚杆内力测试领域的科研成果，与相关标准进行了协调，比较和借鉴了国际相关标准，充分考虑了我国的经济条件和工程实践，在此基础上以多种形式征求全国有关单位的意见。

为便于广大设计、检测、施工、科研、学校等单位有关人员在使用本规程时能正确理解和执行条文规定，《基桩与锚杆内力测试技术规程》编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是条文说明不具备与规范正文同等的效力，仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

目 次

[1 总则 61](#_Toc85800448)

[3 基本规定 63](#_Toc85800449)

[3.1 一般规定 63](#_Toc85800450)

[3.2 测试工作程序 64](#_Toc85800451)

[3.3 测试数据处理和测试报告 66](#_Toc85800452)

[4 传感装置与测试仪器设备 67](#_Toc85800453)

[4.1 一般规定 67](#_Toc85800454)

[4.2 振弦式光纤光栅电阻应变式传感器 69](#_Toc85800455)

[4.3 分布式传感光纤 72](#_Toc85800456)

[4.4 滑动测微计 75](#_Toc85800457)

[5 测试元件的制作与安装 78](#_Toc85800458)

[5.1 一般规定 78](#_Toc85800459)

[5.2 振弦式光纤光栅式电阻应变式传感器安装 78](#_Toc85800460)

[5.3 分布式光纤传感光缆布设 80](#_Toc85800461)

[5.4 滑动测微计测管安装 82](#_Toc85800462)

[6 基桩内力测试 84](#_Toc85800463)

[6.1 一般规定 84](#_Toc85800464)

[6.2 测试元件埋设与试验桩制作施工 84](#_Toc85800465)

[6.3 试验现场操作与测试数据采集 87](#_Toc85800466)

[6.4 测试数据分析与结果评价 89](#_Toc85800467)

[7 锚杆内力测试 95](#_Toc85800468)

[7.1 一般规定 95](#_Toc85800469)

[7.2 测试元件埋设与试验锚杆制作施工 95](#_Toc85800470)

[7.3 试验现场操作与测试数据采集 96](#_Toc85800471)

[7.4 数据分析与结果评价 96](#_Toc85800472)

# 1 总则

**1.0.1** 施工前进行基桩内力测试，目的是为设计单位选定桩型和桩端持力层、掌握桩侧桩端阻力分布并确定基桩承载力提供依据，同时也为施工单位在新的地基条件下设定并调整施工工艺参数进行必要的验证。对设计等级高且缺乏地区经验的工程，为获得既经济又可靠的设计施工参数，减少盲目性，前期基桩内力测试尤为重要。同样，施工前进行锚杆内力测试，目的是为设计单位在锚杆选型和持力层位置、掌握粘结力分布并确定锚杆承载力提供设计依据，同时也为施工单位在新的地质等特殊条件下设定并调整施工工艺参数进行必要的验证。

桩基（锚杆）工程质量直接危及主体结构的正常使用与安全，除桩径（锚杆直径）外，影响基桩（锚杆）承载能力的因素主要有两个，一个是施工质量、基桩混凝土质量、锚杆注浆体质量等，另一个是根据岩土性状合理确定桩长（锚杆长度）。一般来说，可以通过试验桩确定单桩极限承载力，锚杆基本试验确定锚杆极限承载力，基桩与锚杆内力测试，在确定极限承载力的同时，还可确定岩土设计参数——主要岩土层对承载能力的贡献，为科学合理设计和合理选择施工工艺提供依据，因此，基桩与锚杆内力测试工作是十分重要的、也是非常必要的。

目前，现行标准主要针对基桩内力测试中的电阻应变式传感器、弦式钢筋计和滑动测微计等传感器安装、测试数据整理进行了简要规定，未有专门针对基桩与锚杆内力测试的标准规程。近年来，编制组成员单位针对各类典型桩基工程和锚杆工程，开展了大量的基桩与锚杆内力测试技术研究，取得了较丰富的成果，具备了编制我省地方标准的条件。编制地方标准《基桩与锚杆内力测试技术规程》，对推动基桩与锚杆内力测试技术的发展，规范和指导基桩与锚杆内力测试技术工作，保障建设工程安全、实现工程投资控制，具有十分重要的社会效益和经济效益。

**1.0.2** 本规程未涉及素混凝土、钢混组合桩等基桩内力测试，可按照本规程的相关规定执行；复合地基增强体、支护排桩等的内力测试也可按照本规程的相关规定执行。基桩内力测试可按按受力形态、桩型、桩身组成材料、测试元件类型进行分类：

**1** 按受力形态可分为：竖向抗压桩、竖向抗拔桩、水平受荷桩内力测试；

**2** 按桩型可分为：灌注桩、预制混凝土桩、钢桩和钢混组合桩内力测试；

**3** 按桩身组成材料可分为：素混凝土、钢筋混凝土、纯钢桩、型钢混凝土桩（钢管混凝土桩）内力测试；

**4** 按桩身材料组成可分为：现浇混凝土、预制混凝土、钢筋、板材、钢管、其他型钢内力测试；

**5** 按传感器类型可分为：振弦式光纤光栅式电阻应变式传感器、分布式传感光纤、滑动测微计内力测试。

**1.0.3** 基桩与锚杆内力测试技术，涉及测试技术、传感技术、施工技术、信息技术、数据反演技术和智能化分析技术等。实际测试工作，尤其要注意以下几个问题：1、传感器的标定问题，即量值溯源问题；2、传感器标定断面与实测数据的校验问题，即从实测数据到结果的影响因素问题；3、传感器的安装问题，即有效传递测试参数，包括传感器外形尺寸对测试参数的影响，传感器与钢筋笼的连接，确保传感器垂直度，传感器的保护措施；4、传感器的精度、传感器量程与实际测量值的关系；5、传感器对基桩（锚杆）施工工艺的适应性，施工工艺对传感器的影响；6、传感器工作环境对传感器性能影响，传感器的可靠性。

。

# 3 基本规定

## 3.1 一般规定

**3.1.1**  基桩内力测试：按成桩工艺可分为灌注桩与预制桩内力测试，预制桩按桩身材料又可分为预制混凝土桩与钢桩内力测试；按受力形态又可分为竖向抗压桩、竖向抗拔桩和水平荷载受荷桩内力测试。预制混凝土桩可分为管桩、方桩和板桩内力测试，钢桩可分为钢管桩与板桩内力测试。

**1** 根据桩侧主要岩土体的分布，在桩身若干个不同深度的横截面上埋设传感器，在基桩静载试验时，同时测试桩身的应变，研究分析桩侧阻力、桩端阻力、桩身弯矩等参数与桩顶荷载的关系。近年来，随着传感技术、数据分析智能化的发展，以及业界对传感器选型、标定（率定）、测试元件制作安装与埋设、试验桩与锚杆的制作和施工的不断探索，基桩内力测试的成功率和测试准确度得到了快速提升。

**2** 锚杆内力测试：在进行锚杆抗拔试验时，通过测试杆体的应变或应力，计算荷载作用下，锚杆锚固体与岩土体之间的粘结力等参数的试验方法。

**3.1.2** 基桩与锚杆内力测试的测试对象与参数说明如下：

**1** 混凝土应变测试可分为现浇混凝土应变、预制混凝土应变、填芯混凝土应变测试；

**2** 钢材应变测试可分为钢筋应力、钢筋应变、植筋应力、植筋应变、型钢应变、杆体应力、杆体应变测试；

**3** 当桩身受力材料难以分别进行测试时，可选择钢筋混凝土组合体进行测量；

**4** 当桩身主要材料难以进行直接测试时，可选择植筋填芯处理等进行间接测量。

**5** 组合体应变测试可分为钢筋与混凝土组合体应变、植筋填芯处理组合体应变测试；

**6** 锚杆可进行杆体应变测试，忽略注浆体拉力。

**3.1.3** 考虑到桩基础选型、成桩工艺选择与地基条件、桩型和工法的成熟性密切相关，为在推广应用新桩型或新工艺过程中不断积累经验，使其能达到预期的质量和效益目标，规定本地区采用新桩型或新工艺也应在施工前进行试桩与内力测试。

**3.1.4** 准确确定锚杆极限抗拔承载力是确保岩土锚固工程安全与投资控制的重要前提。锚杆承载力试验是锚杆性能的全面试验，并确定锚杆极限抗拔力，目的是为设计单位在锚杆选型和持力层位置、掌握粘结力分布并确定锚杆承载力提供设计依据，同时也为施工单位在新的地质等特殊条件下设定并调整施工工艺参数进行必要的验证；并为获得既经济又可靠的设计施工参数，减少盲目性，前期锚杆极限抗拔承载力试验尤为重要。

**3.1.5**  本条所说的“受力形态”是指桩的承压、抗拔和水平三种受力状态。本条规定同一受力形态的试桩数量不得少于一组3根，是保障合理评价试桩结果的低限要求。若实际中由于某些原因不足以为设计提供可靠依据或设计另有要求时，可根据实际情况增加试桩数量。

**3.1.7** 传感器的特点包括：微型化、数字化、智能化、多功能化、系统化、网络化。它是实现自动检测和自动控制的首要环节。

目前传感技术和信息化技术的发展为地基基础检测采用自动化与智能化等新技术、新方法提供了条件，鉴于传感技术和信息化技术尚处于快速发展阶段，变化较大，所以本规范尚未对相关内容进行规定，在满足本规范的有关技术要求的前提下，鼓励在实际工作中采用自动化与智能化等新技术、新方法。

## 3.2 测试工作程序

**3.2.1**  框图3.2.1是测试机构应遵循的检测工作基本程序。传感器选型、标定（率定）、测试元件制作安装与埋设，试验桩（锚杆）的施工过程中对传感器的保护措施，是内力测试成败的前提条件。

实际执行测试程序中，由于传感器成活率不足、传感器导线被拉断等原因，实施时发现原确定的测试方法难以满足测试目的的要求。如果只是测试过程的仪器故障、人为操作失误等等原因，则可进行重新测试。

**3.2.2**  本条规定了测试单位资料收集与现场调查的主要内容，岩土工程勘察资料、设计初步方案、拟采用的施工工艺、可能采用的基桩静载试验方案等是否清晰和合理，关系到基桩内力测试能否达到测试目的要求的关键前提。桩基设计参数、地质资料是设计传感器埋设位置的依据，桩孔情况、成孔概况是资料分析解释的已知数据。资料收集的越全、越准确，传感器安装位置的设计才能更合理，资料整理的难度会降低，成果的可靠性才能有保证。

**3.2.3**  本条规定，测试前，测试单位应制定测试技术方案，制定测试技术方案应考虑的因素较多，一是应考虑传感器对各种桩型的适应性；二是应考虑测试元件制作安装与埋设方法；三是应考虑试验桩的制作和施工，如灌注桩、预制混凝土桩、钢桩。因此，测试技术方案可能需要与委托方或设计方共同协商制定，尤其是确定的受测桩桩位应具有代表性。

测试技术方案是指导基桩内力测试的纲领性文件，其中测试元件的安设应编写详细的技术方案，对测试元件的保护措施应与所采用的测试方法有针对性。

**3.2.4** 基桩内力测试的目的是为设计提供合理的岩土设计参数，力求对影响桩承载力的主要因素进行有效控制，故桩的设置应与设计要求一致，以便降低因桩本身参数的变化而误导对桩的认识。

**3.2.5** 静载试验在桩身产生的应力水平高，若桩身混凝土强度低，有可能引起桩身损伤或破坏，因此，桩身混凝土应达到28d龄期或设计强度。预制混凝土桩桩成型前安装测试元件，需采用常温常压进行养护，故混凝土预制桩制作养护时间往往需要28d**。**

**3.2.6** 锚杆内力测试，一般要求试验至岩土体破坏，若注浆体强度偏低，有可能引起注浆体破坏，因此，锚固段注浆体强度不应低于设计强度，或锚固段注浆体的龄期应达到28d。

**3.2.7** 桩身、杆体材料检测的目的主要为桩身轴力、杆体轴力的分析提供材料力学性能参数，包括：

**1** 钢筋（钢材）应力应变曲线试验、混凝土应力应变曲线试验；

**2** 成桩过程中应制作混凝土标准试块，进行抗压强度试验，根据强度等级确定混凝土弹性模量，条件允许时可做混凝土弹性模量试验；

**3** 进行基桩与锚杆内力测试时，桩体与杆体在较大荷载作用下除发生弹性应变外，也会发生塑性变形，若得到的应变中包含较大的塑性变形，应根据应力应变曲线换算测试对象的应力。

**3.2.8** 灌注桩桩身轴力换算准确与否与桩身横截面尺寸有关，某一成孔工艺对不同地层条件的适应性不同，因此对成孔质量无把握或预计桩身将出现较大变径时，应进行灌注前的成孔质量检测。内力测试通过实测应变计算桩身轴力时，需要准确的桩身截面积，因此在预制混凝土桩、钢桩成桩前，应进行桩身截面测试，获得桩身断面面积随深度变化数据。

## 3.3 测试数据处理和测试报告

**3.3.1~3.3.4** 传感器成活和数据有效性判断，是测试数据取舍的关键；数据处理原则和数据分析方法，是分析判断测试结果是否合理的重要依据；受测桩的桩身变形与轴力图表、桩周摩阻力与桩端阻力评价、受测锚杆的杆体变形与轴力图表、锚固段注浆体与岩土层之间的粘结力评价等，为设计提供分析依据与参数采纳依据。

**3.3.5** 测试报告应根据所采用的测试方法和相应的测试内容，出具测试结论。为使报告内容完整和具有较强的可读性，报告中应包括常规内容的叙述。还需特别强调：测试报告应包含测试数据和曲线以及主要计算依据。实际工作中，测试单位可适当调整报告内容，以满足测试报告符合工程所在地行政主管部门的规定和要求。

# 4 传感装置与测试仪器设备

## 4.1 一般规定

**4.1.1、4.1.2** 传感装置选择说明如下：

**1** 关于振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器：（1）振弦式传感器，由于其具有稳定性较好、埋设较方便等特点，是目前基桩与锚杆内力测试的主要传感器之一；（2）光纤光栅传感器是近年来快速发展的一种传感器，具有精度较高、稳定性较好、埋设较方便等特点，适用于基桩与锚杆的使用条件，越来越受到行业的青睐；（3）电阻应变式传感器是最传统的传感器，由于其具有测量范围大、价格较便宜、埋设较方便等特点，是目前基桩与锚杆内力测试的主要传感器之一。其适用范围说明如下：

**1）**灌注桩，采用预埋传感器，可进行抗压、抗拔、水平受荷桩的内力测试；

**2）**预制混凝土桩，采用预制桩成型前埋设传感器、或预制桩成型后采用管桩中空全长植筋埋设传感器，可进行抗压、抗拔、水平受荷桩的内力测试；

**3）**预制桩宜优先采用成桩（型）前埋设传感器的测试方法，成桩（型）后采用中空全长植筋埋设传感器的测试方法，由于预制桩、填芯材料的强度可能差异较大，其测试准确性需具体分析；

**4）**锚杆，锚杆内力测试，主要测量杆体拉力，忽略注浆体拉力；采用在杆体安装振弦式传感器、光纤光栅传感器、电阻应变式传感器，可进行拉力型锚杆的内力测试。

**2** 关于分布式光纤传感器：分布式光纤传感器是近年来快速发展的一种传感器，适合于整桩的连续测量，对温度测量已发展得较成熟，对变形测量，其精度尚在改善中，为鼓励新技术的发展，本规程也编入其中。其适用范围包括灌注桩、桩成型前安装测试元件的预制混凝土桩、桩成型后安装测试元件的预制混凝土桩、钢桩和锚杆，但限于其目前的测试精度，宜与其他传感器联合使用。

**3** 关于滑动测微计：滑动测微技术是基于几何（机械）原理的一种测量方法，直观可靠，在混凝土灌注桩的竖向抗压与抗拔内力测试中取得了较广泛的应用。滑动测微计有别于以应变计为代表的点式测试仪器，可连续地测量相邻两点间（间距一般为1000mm）的距离，当被测体发生变形时，也就可以获得连续的变形和应变测试结果；在已知测线上任意一点的位移后，也可以计算出测线上其他位置沿测线的位移。由于滑动测微计测管的体积较大：测管外径63mm、壁厚4.1mm、金属测环直径71mm、螺丝安装后金属测环外径76mm。其适用范围说明如下：

**1）**混凝土灌注桩，仅推荐了桩径大于等于800mm的试验桩可采用此方法进行水平受荷桩内力测试，主要由于水平受荷桩承受弯曲变形，其适宜性应进一步研究和积累资料。

**2）**预制空心桩，仅推荐了直径大于等于500mm（预制混凝土管桩）的竖向受荷试验桩可采用此方法进行内力测试，对实心预制桩本规程未作规定，主要由于如果桩径较小，预埋测管容易改变受测桩的应力应变状态，其适宜性应进一步研究和积累资料。

**3）**对于钢管桩，有的规程规定直径大于600mm的钢管桩可埋设测管进行滑动测微计测试，由于钢管桩是采用开口式打入法，钢管内直接与土接触，不可能埋入测管；闭口钢管混凝土桩则可埋入测管。

**4.1.3** 关于振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器，目前，业界将其分为埋入式传感器、表面式传感器和钢筋计；现将其说明如下：

**1** 表面式传感器适用于混凝土结构、钢结构的表面变形测量，规程编制过程中原先拟用于大直径管桩、大直径钢管混凝土桩的桩身变形测量，考虑到大直径管桩主要应用于码头等海运行业且需整桩工厂预制，现场不能接桩，如果采用管桩内壁安装传感器，一是可能影响桩身性能，二是不易安装；大直径钢管混凝土桩，同样，如果采用钢管内壁安装传感器，一是可能影响桩身性能，二是不易安装；因此，未列入本规程。

**2** 埋入式传感器适用于测量混凝土的变形，以及以混凝土受力为主的钢筋混凝土组合体或结构。

**3** 钢筋计：本规程将不与主筋对接的小直径钢筋计称为钢筋应变计、将与主筋对接的钢筋计称为钢筋应力计；钢筋应变计主要适合于测量钢筋的变形，以及以钢筋受力为主的钢筋混凝土组合体或结构；钢筋应力计主要适用于测量以钢筋受力为主的钢筋混凝土组合体或结构的桩身主筋、植筋、锚杆杆体的应变测试。

**4** 关于埋入式应变计与钢筋应变计的区别：目前，业界对埋入式应变计，未提供具有接长杆的应变计，安装时只能采用绑扎等方法，对传感器安装的垂直度难以保证；如果埋入式应变计与钢筋应变计的区别主要为接长杆的问题，建议采用钢筋应变计代替埋入式应变计。

**4.1.4** 传感光缆，应选用背向散射衰减系数较大的单模光纤，不宜选用低水峰及多模光纤；G.652b类光纤是目前测量应变较常用的一种光纤。

## 4.2 振弦式光纤光栅电阻应变式传感器

**4.2.1** 振弦式、光纤光栅、电阻应变式传感器选择应综合考虑下列因素：1）桩身主要受力材料，2）传感器的可靠性，3）传感器外形尺寸，4）传感器的可安装性，5）传感器的精度，6）传感器对基桩（锚杆）施工工艺的适应性等，说明如下：

**1** 灌注桩：竖向抗压桩其桩身主要受力材料一般为混凝土、水平受荷桩其主要性能取决于桩身混凝土性能和桩身截面性质，因此，宜选用埋入式应变计、也可选用钢筋应变计；竖向抗拔桩其桩身主要受力材料一般为钢筋，因此，宜选用钢筋应力计，也可选用钢筋应变计。

**2** 桩成型前安装传感器的预制混凝土桩，竖向抗压桩与水平受荷桩其桩身主要受力材料为混凝土，竖向抗拔桩其桩身主要受力材料一般为钢筋混凝土预应力组合体，因此，宜选用埋入式应变计、也可选用钢筋应变计。

**3** 桩成型后采用植筋填芯处理安装传感器的预制混凝土桩，竖向抗压与水平受荷桩其桩身主要受力材料为混凝土，因此，宜选用埋入式应变计，也可选用钢筋应变计；竖向抗拔桩其桩身主要受力材料一般为植筋，因此，宜选用钢筋应力计，也可选用钢筋应变计。

**4** 锚杆，其主要受力材料为杆体，因此，应选用钢筋应力计。

**4.2.2** 表**4.2.2**振弦式传感器的应变性能：传感器分辨力、滞后、不重复度、非线性度/不符合度、综合误差是现行国家标准《土工试验仪器岩土工程仪器振弦式传感器通用技术条件》GB/T 13606的规定。

**4.2.3** 表**4.2.3**光纤光栅传感器的主要性能指标，即测量范围、综合误差、分辨力、重复性、插入损耗是现行行业标准《土木工程用光纤光栅应变传感器》JG/T 422的规定。

**4.2.4** 电阻应变式传感器的应变性能参数，即传感器分辨力、滞后、不重复度、非线性度、综合误差等的规定，参照了电阻应变计、振弦式传感器、光纤光栅传感器的性能指标综合确定的。

**4.2.5** 传感器的标距、量程、耐水压性能、工作温度和外形尺寸等参数也是传感器选择的重要依据，说明如下：

**1** 传感器的标距，主要有50mm、100mm、150mm、200mm、250mm，由于混凝土为非均质材料，其测量的长度应比钢筋（金属）测量的长度要大，钢材力学性能的标准尺寸通常要求为10cm，或为5倍直径。因此，本规程规定：埋入式应变计应选用200mm、250mm的标距，可选150mm的标距；钢筋应变计应选100mm、150mm、200mm、250mm的标距；测量钢筋变形的应力计可选用50mm、100mm、150mm的标距；需要注意的是：目前，业界往往未区分测试对象，笼统选择50mm、100mm标距的传感器，进行基桩内力测试。

**2** 传感器的量程，传感器的最佳使用范围约为量程的1/4至量程的4/5，因此，应根据预估极限荷载合理选择量程适当的传感器。由于预估的基桩与锚杆的极限荷载往往与实际情况有差异，当试验荷载加载至预估的最大加载量且基桩与锚杆未破坏时，允许增加（1~4）级荷载试验，此时仅要求可测变形量不宜小于在最大加载时的变形量。对于桩长较长的桩，可按预测变形量，按桩的不同受力区段分测试区域选择传感器量程。

**3** 传感器的耐水压性能，可根据成桩条件的实际水压进行选定。

**4** 传感器的工作温度，常温传感器为-10℃～＋80℃。

**5** 钢筋应力计应按主筋直径大小进行选择，应变传感器的连接杆、连接钢筋宜选用较小直径规格的钢筋，传感器的外形尺寸应符合孔径、壁厚等要求，并方便埋设。

**6** 预制混凝土桩宜在大气压力86kPa～106kPa下蒸养，也可在耐水压的压力环境下蒸养；但不论在大气压力86kPa～106kPa下蒸养、或在耐水压的压力环境下蒸养，其蒸养温度应控制在80℃以下，否则应选用中温传感器。广东三和管桩股份有限公司，对预应力管桩在大气压力与温度80℃以下蒸养方面，做了不少工作，取得了较好的效果。

**4.2.6** 本条对传感器的传感系数规定在使用前应按本规程附录A的规定进行标定，说明如下：

**1** 对过去不少测试单位，传感器买来就用，不进行标定的不当做法，提出了新的指引；

**2** 考虑到基桩与锚杆内力测试，荷载较小时，传感器的读数值往往在实际使用的全量程的20%以下，或中下部的传感器的读数值也不少在实际使用的全量程的20%以下，因此规定应进行全量程的9点或11点进行标定，不宜采用常规全量程的6点进行标定；

**3** 标定数量：同一批次标定数量不宜少于5%且不少于6个，考虑到传感器有其专用产品标准，未要求全数标定或逐个标定，仅要求抽查合格即可。

**4.2.7** 本条关于传感器应变传感系数的使用和抽查的规定，说明如下：

**1** 新增传感器产品证书应提供每个传感器的全量程的9点或11点的应变传感系数参数（表），这点应引起足够重视；

**2** 抽查合格的传感器使用要求、抽查不合格的传感器处置，与工程进场产品的检验一致。

**4.2.8** 本条对锚杆监测与测试传感器及二次测试仪表组成的测量系统性能指标做出了相应的规定。

**4.2.9** 通常传感器的灵敏度比较接近，同层传感器随荷载增量的变化呈现近似相同的增量变化，而下层传感器随荷载增量的变化应小于上层传感器同级荷载增量时对应的变化量。当出现明显的异常数据时应做出标记以确定取舍。

计算时，应根据钢筋应力计的受力状态（压或拉）分别代入不同的公式进行计算。由于传感器的标定状态和其实际工作状态有一定区别，可能造成其零点的漂移（增大或者缩小），但并不影响其标定关系，因此在其工作状态下必须在受力前测读新的零点，据此计算钢筋力。

**4.2.10** 基本功能，光纤光栅应变传感器在规定的测量范围内，能使应变量对传感器反射中心波长进行调制，实现应变量和光纤光栅反射波长的一一对应关系。

**4.2.11** 电阻应变式传感器数据的处理，测点应变可根据测量电阻的量值由传感器应变―电阻的标定关系进行确定；也可根据现行国家标准《金属粘贴式电阻应变计》GB/T 13992的规定，测点应变可按本规程公式（4.2.11）进行核查。

**4.2.12** 电阻应变计导线补偿修正，当采用电阻应变式传感器测量且未采用六线制长线补偿时，实测应变值的修正公式参照了现行行业标准《基桩检测技术规范》JGJ 106的规定。

电阻应变测量通常采用四线制，导线长度超过5m～10m就需对导线电阻引起的桥压下降进行修正。采用六线制长线补偿是指通过增加2根导线作为补偿取样端，从而形成闭合回路，消除长导线电阻及温度变化带来的误差。

## 4.3 分布式传感光纤

**4.3.1** 分布式传感光纤用于内力测试的相关技术正在发展中，且未形成相关产品标准，是根据目前分布式传感光纤技术应用水平综合调整而成。相关术语说明如下：

**1** 布里渊散射光时域反射技术：是一种采用传感光缆作为传感器，基于自发布里渊散射光原理，利用光时域解调技术实现对被测物进行分布式温度和应变测试的技术；英文为brillouin optical time-domain reflectometry，简称BOTDR。

**2** 布里渊散射光时域分析技术：采用传感光缆作为传感器，基于受激布里渊光原理，利用光时域解调技术实现对被测物进行分布式温度和应变测试的技术；英文为brillouin optical time domain analysis，简称BOTDA。

**3** 布里渊散射光频域分析技术：是一种采用传感光缆作为传感器，基于受激布里渊光原理，利用光频域解调技术实现对被测物进行分布式温度和应变测试的技术；英文为brillouin optical frequency-domain analysis，简称BOFDA。

**4** 光时域反射技术：利用光在光纤中传输时的瑞利散射和菲涅尔反射所产生的背向散射，实现光纤长度、传输衰减、接头衰减和故障定位等测量的技术；英文为optical time domain reflectometry，简称OTDR。

**5** 半高宽：布里渊频谱峰值高度一半时的谱带宽度。

**6** 光学衰减：每公里传感光缆对光信号功率的衰减值。

**7** 分布式光纤传感技术的定位精度取决于测量光缆的长度和采样间隔，定位精度可取±(0.2+2×采样间隔+2×10-5×距离)（m）。

**8** 空间分辨率是表征测量系统区分传感光缆上相邻最近两个事件点的能力，一般可以定义为被测信号在过渡段的10%～90%上升时间所对应的空间长度，主要由测量系统的探测光脉冲宽度决定。若探测光脉冲为矩形，脉冲宽度为τ，光纤中光的群速度为ν，那么空间分辨率（R）可按下式计算：

R=ν·τ/2 （1）

**4.3.2** 传感光缆的直径、量程、耐水压性能、工作温度和机械强度等其他参数的选择，说明如下：

**1** 传感光缆直径，光缆布设本规程仅推荐粘贴法、刻槽粘贴法和点焊法，未推荐绑扎法，因此，光缆直径不应太大，否则会改变桩身材料的应力应变状况或损坏桩身。

**2** 传感光缆的应变量程可为±15000με，容易满足测量要求，但应按实际测量工作的预测量程范围进行控制。

**4.3.3** 传感光纤在使用前，其传感系数应按本规程附录A的规定进行标定，且尚应符合下列规定：本条对传感光纤的传感系数规定在使用前应按本规程附录A的规定进行标定，说明如下：

**1** 对过去不少测试单位，传感光纤买来就用，不进行标定的不当做法，提出了新的指引；

**2** 考虑到基桩与锚杆内力测试，荷载较小时，传感光纤的读数值往往在实际使用的全量程的20%以下，或中下部的传感光纤的读数值也不少在实际使用的全量程的20%以下，因此规定应进行全量程的9点或11点进行标定，不宜采用常规全量程的6点进行标定；此外，传感光纤应变量程可为±15000με，因此，应按预估应变使用量程的1.25倍进行标定；

**3** 标定数量：同一批次传感光纤标定数量不宜少于3个样品，考虑到传感光纤有其专用产品检验，未要求全数标定或逐个标定，仅要求抽查合格即可。

**4.3.4** 传感光纤的传感系数的使用和抽查的规定，说明如下：

**1** 新增传感光缆产品证书应提供每批传感光缆的全量程的9点或11点的应变传感系数参数（表），这点应引起足够重视；

**2** 抽查合格的传感光缆使用要求、抽查不合格的传感光缆处置，与工程进场产品的处置一致。

**4.3.5** 分布式光纤应变和温度解调技术包括两大类：一类是以BOTDR为代表的单端测量技术，通过检测光纤中的自发布里渊散射光实现对光纤应变和温度的测量。由于自发布里渊散射较微弱，检测比较困难，传感器的性能受到很大的制约。但该技术只需将传感光缆的一端与解调仪连接即可实现对光缆应变分布的测量，对于工程应用而言是十分方便的。另一类是以BOTDA、BOFDA为代表的双端测量技术，该技术利用从传感光缆两端分别注入的泵浦脉冲光和连续探测光，使光纤中产生受激布里渊散射。由于检测信号强度较大，传感器的测量精度可得到显著的提高。但该技术需要将传感光缆的两端分别与解调仪连接，才能实现对光缆应变分布的测量，工程应用的难度相对较大。

由于双端测量技术的应变测量精度和空间分辨率均高于单端测量技术，为了提高基桩应变测试的精度，应首选双端测量技术。对于无法采用双端测量技术的情况，可采用应变测量精度和空间分辨率较低的单端测量技术。

**4.3.6** 分布式光纤的数据预处理说明如下：

**1** 数据标准化是指将空间采样间隔参数不同的测试数据进行调整，使采样点间隔一致，其中数据加密或抽稀可采用加权平均方法进行，权系数为最近两点的距离倒数（反距离权加权差值）。

**2** 数据对齐是指由于更换引线、重熔、热胀冷缩等原因，使传感光缆的长度发生变化，造成不同期次的测试数据存在位置偏移，通过手动或自动平移，使数据点的位置一致。手动平移是指根据数据分布特征，人工调整数据的位置，使不同期次的测试数据对齐；自动平移是指将需要对其的测试数据按照采样间距，在一定范围内进行滑动，每滑动一次计算其与参照数据的均方差，取均方差最小的位置作为对齐位置。

**3** 数据定位是指依据传感光缆的布设情况和不同荷载作用下的应变分布特征，将测试数据准确地映射到基桩上。数据定位的关键是确定传感光缆进出桩头位置，桩端底定位一种是推算法，即在桩头定出的基础上，依据桩身光缆的布设长度确定桩端的位置。建议采用温度标识法和实际测量法：**1）**温度标识法**：**在光缆进出桩头的地方采用热水、发热袋、热吹风等方法使长度为0.5m～1m长度左右的光缆发生明显的温度变化，测试前后数据，根据温度引起的应变异常部位来定位（图1）；



图1 温度标识法**2）**实际测量法：利用皮尺测量光纤从仪器到桩头的实际长度来定位。

**4** 数据平滑可采用滑动平均法，将采样点前后一定区间（宜在0.5m～3m之间）的所有数据进行平均，取其平均值作为该采样点的测值，以采样点间距为歩距向前依次平均，得到新的应变分布曲线。

## 4.4 滑动测微计

**4.4.1** 滑动测微计和滑动变形计探头的主要性能指标为现行协会标准《滑动测微测试规程》CECS 369的规定。

**4.4.2** 套管的主要作用之一是保护测标免受周围杂质污染，一方面它应具有一定强度，以免在测管安装过程中受其他物体撞击发生损坏；另一方面也应控制其刚度，刚度过大时可能会阻碍测标与被测体的协同位移。此外，埋设后套管与测标外壳也不应与周围介质发生化学反应污染测标锥形环。

测标由锥形环和外壳组成，利用锥面-球面定位原理，锥形环的锥面和测试探头的球面接触时具有良好的重复性和精准的位置关系，为高精度测试结果提供基础。因此锥形环的材质和加工精度极为关键，一般采用滑动测微计时锥形环由硬金属（如不锈钢、铜合金和硬铝等）制成；滑动变形计的锥形环也可采用硬塑料，并可同采用硬塑料的外壳一次成型。测标外壳的材质可为硬金属或硬塑料，其主要作用是固定测标锥形环，因此其外表面应凹凸以增加与周围介质的粘结力。椭圆度为最大外径与最小内径之差。

**4.4.3** 滑动测微技术的一个重要特点是测试探头可随时标定，获得不同时间和环境条件下的零点位置和率定系数，从而可消除电测元件零点漂移的影响，是获得高精度测试结果的一个重要保障。因此标定工作特别重要，一般要求每次测试前后均需标定；同时标定也是了解测试系统工作状态的一个手段，可据此判定其是否异常。

**4.4.4** 若标定时测试系统不能正常工作、读数不稳定（同一方向连续3次读数最大值与最小值之差对滑动测微计超过0.003mm，对滑动变形计超过0.03mm），表明采集仪或探头异常时，应送相关单位维修后使用。

**4.4.5** 滑动测微测试系统由测试探头、导向链、绞车、套管和测标、数据采集仪、操作杆等部件以及标定筒组成（图2）；此外还可有测温仪、电缆绞车等附属设备方便数据测试。本条有关测量装置的规定说明如下：



图2 滑动测微计测试原理图

1—被测体；2—（锥形）测标；3—测试探头；4—线性位移传感器；5—上球形头；

6—下球形头；7—方向槽；8—套管；9—导向链；10—操作杆；

11—线缆；12—绞缆盘；13—绞车；14—操作手柄；15—数据采集仪。

**1** 探头在标定筒中进行标定，因此要求标定简的标距长度要保持稳定性，铟钢的低热膨胀系数可保证探头标定的准确性；标定简在存放过程中应封堵防止杂物污染锥形环。

**2** 测试通过旋转操作杆控制测试探头处于滑动位置或测试位置，旋转过程中不应出现操作杆接头松动的情况；测试时一般通过回拉操作杆或测量电缆使探头和测标紧密接触，因此操作杆和电缆均需有强度要求，均应能承受测试探头、导向链、全部电缆和操作杆的重力，以及测试时回拉探头受力之和。

**3** 测管的耐水压性能与测管的工作温度，详见本规程第4.2.3条的条文说明。

**4.4.6** 数据采集仪上显示的读数是测试单元长度的一种表达方式，测试单元变形和应变的获得都必须要有初始读数作为参照，初始读数对成果分析非常重要，务必细致准确。

初始读数时，测试单元的绝对长度为：

$d\_{0}=L-(δ\_{0}-z\_{0})$ （2）

第*i*级测试时，测试单元的绝对长度为：

$d\_{i}=L-(δ\_{i}-z\_{0i})k\_{i}$ （3）

# 5 测试元件的制作与安装

## 5.1 一般规定

**5.1.1** 测试元件安装说明如下：

**1** 灌注桩、桩成型前安装测试元件的预制混凝土桩，应根据选用的传感器、传感光缆、测管等测试元件，在浇注混凝土前，采用合适的方法将测试元件安装于钢筋笼上，预埋设于桩身混凝土中；

**2** 桩成型后采用填芯植筋处理安装测试元件的管桩，应根据选用的传感器、传感光缆、测管等测试元件，在浇注填芯混凝土前，采用合适的方法将测试元件安装于植筋钢筋笼上预埋设于填芯混凝土中；

**3** 桩成型后的预制混凝土桩，应采用桩身刻槽法将传感光缆布设于桩身混凝土中；

**4** 钢桩应采用桩身点焊法、表面粘贴法将传感光缆安装于桩身型钢上；

**5** 锚杆，应根据选用的传感器、传感光缆等测试元件，在注浆前，应根据测试元件测试元件的类型，采用合适的方法将测试元件安装于杆体上，预埋设于注浆体中；

**6** 确保传感器与被测对象整体协调变形，是内力测试的重要前提，如果不能整体协调变形，内力测试将是失败的；如果因为传感器的埋设，明显改变原测试区域的应力应变状态，测出的数据也是不准的。

**7** 确保测试元件的敏感轴应与桩（锚杆）轴线方向平行，也是内力测试的重要前提，如果传感器产生移位、偏斜、弯曲等变形，尤其是偏斜与弯曲，传感器测出的数据将严重偏离其正常数值。

## 5.2 振弦式光纤光栅式电阻应变式传感器安装

**5.2.1** 振弦式光纤光栅式电阻应变式传感器的安装推荐了四种安装方法：埋入式应变计双加强箍定位安装法、钢筋应变计全长辅助钢筋安装法、钢筋应变计主筋并联连接法、钢筋应力计主筋对接焊接法。

**5.2.2** 埋入式应变计应采用双加强箍定位安装法：目前业界普遍采用将埋入式应变传感器与主筋绑扎，并采用塑料胶带全面包扎，这将导致传感器与被测对象不能产生整体协调变形，且明显改变了待测试区域的应力应变状态；且将应变传感器与主筋绑扎的安装方式，由于容易受施工过程的影响，难以确保传感器的垂直度（与桩轴线方向一致），容易产生传感器的移位、偏斜、弯曲等变形。

**5.2.3~5.2.5** 钢筋计与钢筋（主筋、植筋、辅助钢筋、杆体）的连接，关系到桩身各主要受力材料整体协调变形、以及确保传感器垂直度的关键。

**1** 与钢筋连接的钢筋计应配置接长杆，目前，业界仅要求钢筋应力计接长杆直径规格与主筋（杆体）直径规格相同，但应变传感器未配置接长杆。钢筋应变计连接杆直径宜为12mm~22mm，且宜选用较小直径规格的钢筋。

**2** 为确保传感器的垂直度，钢筋应变计不得直接绑扎在钢筋上，宜优先采用全长辅助钢筋与其接长杆连接；其连接应稳固，不得产生松动移位，影响传感器的真实变形量值。也可采用主筋并联连接法，应在主筋相应位置焊接2个垫块，并将应变计一端与垫块焊接，另一端与垫块绑扎加点焊或机械卡头进行连接。

**3** 钢筋应力计规定采用对接焊，避免连接间隙而影响应力计的量值。

**4** 传感器连接杆与钢筋的焊接应在技术人员的监督指导下进行，避免焊接引起的高温损伤传感器，焊接过程中传感器温度应控制在传感器可工作的温度以下。

**5** 传感器与钢筋笼的安装，也是关系到桩身各主要受力材料整体协调变形、以及确保传感器垂直度的关键。本款关于混凝土应变传感器与钢筋笼的连接规定，目的是将混凝土应变传感器尽可能地埋设于混凝土中、尽量远离主筋；设置加强定位箍筋与全长辅助钢筋是为确保传感器垂直度而采取的相关措施，是防止传感器容易产生移位、偏斜、弯曲等变形；辅助钢筋直径、接长杆直径应选用低于等于主筋级别、直径小于主筋的钢筋，是为了在确保传感器合理定位的前提下，减少因传感器的埋设，引起混凝土测试区域过大的变形改变量。

**5.2.6** 传感器编号、线缆编号与连接，也是内力测试成败的关键环节。

**1** 传感器本身及测试线缆都应有固定编号，为防止后期施工中出现整体断线无法识别传感器编号问题，可采用多色系线缆对应唯一传感器编号；

**2** 传感器线缆编号应外覆保护套且无破损及松动，线缆排布编号记录清晰，测试断面与传感器编号对应一致。

**3** 传感器线缆及其编号在基桩开挖及处理过程中极易损坏，造成无法识别其埋藏深度，采用线缆的不同颜色可以建立与埋深的对应关系，当线缆断裂时可作为一种补救手段。

## 5.3 分布式光纤传感光缆布设

**5.3.1** 传感光缆的布设方式本规程推荐了四种布设方法，即钢筋表面粘贴法、预制混凝土桩桩身刻槽粘贴法、钢桩桩身点焊法、钢桩桩身表面粘贴法，各有特点。行业协会标准《基桩分布式光纤规程》T/CECS 622-2019推荐了绑扎法。说明如下：

**1** 灌注桩：竖向抗压桩其桩身主要受力材料一般为混凝土、水平受荷桩其主要性能取决于桩身混凝土性能和桩身截面性质，因此，宜采用辅助钢筋表面粘贴法、也可采用主筋表面粘贴法；竖向抗拔桩其桩身主要受力材料一般为钢筋，因此，采用主筋表面粘贴法、也可采用辅助钢筋表面粘贴法。

**2** 桩成型前安装传感光缆的预制混凝土桩，竖向抗压桩与水平受荷桩其桩身主要受力材料为混凝土，竖向抗拔桩其桩身主要受力材料一般为钢筋混凝土预应力组合体，因此，宜采用非预应力筋表面粘贴法。

**5.3.2** 传感光缆在预制混凝土桩桩身、钢桩桩身的布设，目前这方面累积的经验不多，应开展传感光缆布设效果与打桩保护的前期专项测试，确定测试方法的有效性。

**5.3.3** 传感光缆布设作业应符合下列规定：

**1**  人工检查是指对照原厂记录对传感器的品名、规格、外观等指标进行检查和核实，避免混入通讯光缆。应采用光时域反射技术（ODTR）对光缆的长度进行检查，采用布里渊散射光测试法对传感光缆的初始应变的大小和均匀程度进行检查，采用拉力试验机对光缆的抗拉强度进行抽查复核。

**2**  传感光缆中光纤的切割工作，应遵循以下工序：1）用剥线钳将光纤树脂涂层剥除；2）采用酒精棉清洗干净；3）切割光纤，并确保光纤的端面与光纤垂直。

光纤熔接机：用于传感光缆布设过程中光纤的熔接、保护以及断点的定位、修复。

光纤的熔接及保护工作，应满足以下要求：1）在光纤切割之前，须预先将光纤熔接的一端穿过热缩管；2）当光纤熔接后，将热缩管移至光纤熔接处，并对其进行加热缩处理；3）光纤熔接时，为了确保两个断面完好连接，应将两根光纤对中。

**3** 光纤的连接方式应以熔接为主，熔接又可分为冷熔接与热熔接；其中热熔接光损较小、连接牢固，但现场操作难度较大；冷熔接与活动连接操作简单，但连接处光损较大、稳定性差，因此，现场条件允许的情况下宜采用热熔接。由于熔接后连接处的光纤变得脆弱易断，应重点加强保护。

**5.3.4** 利用粘贴法对光缆进行安装时，需先对钢筋（杆体）、桩身表面进行清理，对于混凝土宜去除表面碳化层、对于钢材宜去除表面氧化层，再涂抹底胶，保障连接的耐久性。光缆粘贴可采用环氧树脂类胶水；胶水宜满足以下几个特点：胶层韧性好、抗腐蚀、无溶剂、粘度高。

**5.3.5** 利用刻槽法对光缆进行安装时，需要预先准备开槽机，对桩身表面进行开槽，然后再浇筑回填材料，保障光缆连接的牢固性和耐久性。

**5.3.6** 传感光缆布设的点焊法、表面粘贴法，说明如下：

**1** 传感光缆与型钢应粘接可靠；粘接传感光缆的粘合剂应质地饱满、强度可靠，不应存在气泡、蜂窝、杂质区；粘接剂凝固后应具备与桩身型钢相适应的强度及变形协调能力。

**2** 铺设防火材料和焊接保护型钢：既要保护传感光缆，又能完成施工作业。

**5.3.7** 传感光缆的保护说明如下：

**1** 光纤熔接时，影响光纤连接质量的因素较多，若光纤端面出现斜角面、圆角面、粗糙面等情况；或者光纤连接时存在横面交错、面面夹角、间隙等情况，都将导致光损过大，连接失效。

**2** 由于桩头需要处理并浇注桩帽，为避免损坏传感光缆，传感光缆或传感光缆的引线宜在设计桩顶标高0.5m以下，从桩身侧面以适当的弯曲半径引出，弯曲半径一般是不得小于光缆外径的20倍，避免弯折光缆。

应根据桩型、现场施工和试验的布置情况，合理设置引线的临时固定和保护装置，避免引线受到冲击、拉伸和弯折。

**3** 光纤本身属光学器件，应避免人为使光纤的出现大的弯曲，影响光的传播。光缆转弯时，其转弯半径应大于光纤自身直径的20倍。

**5.3.8** 对于按U型布设成回路的传感光缆，且光路完整，可以采用红光笔对传感光缆的通光完整性进行初步检查。如果需要对传感光缆的光损情况进行检查，或者对不构成回路的传感光缆进行检查时，则需要采用OTDR技术。

## 5.4 滑动测微计测管安装

**5.4.1** 测管安装前的准备工作说明如下：

**1** 测管安装是滑动测微测试成败的关键，很小的细节问题都可能影响到测试效果，测管安装工作需要细心，多次检查。首先是对拟埋设的套管和测标逐一检查，对异常的套管和测标，如：锥形环变形（将使得探头与锥形环不能很好接触），锥形环与外壳连接不紧密，套管破裂等，应放弃使用；套管和测标内侧有杂物时，要清理干净。

**2** 为缩短测管现场埋设的时间及减少埋设错误，一般需要对测管进行预连接：

（1）每根套管连接一个测标（最底部套管还需连接孔底封堵管）；

（2）在（1）的基础上继续连接，将测管连接至2m～3m。

预连接的长度还要视测管埋设时的空间大小，但不宜太长，太长则在搬运过程中易产生挠曲，即使是轻微的挠曲也会影响探头与锥形环的接触，以及测管防水性能。进行预连接的场地平整可方便预连接测管的集中摆放与检查，保持场地清洁可防止杂物进入测管。

**5.4.2** 测管安装过程中通常都有水的参与，若测管无可靠的防水措施，水中混杂的细颗粒容易随水渗入测管污染测环，其中套管与测标的连接处是最为薄弱的环节，应有可靠的防水措施。通常需要在连接套管与测标时，在套管与测标外壳的接触部位涂抹胶水，接缝外侧缠防水胶带等措施加强防水性能。安装过程中测管内若有漏浆现象发生，势必会污染锥形环表面，不加处理会影响测试效果，因此应采取补救措施，在浆液凝固前采用高压清水冲洗补救比浆液凝固后再处理要容易。

**5.4.3**  混凝土钻（挖）孔灌注桩内力测试的测管不宜少于2根，在混凝土浇筑前随钢筋笼一起进入桩孔中。桩较长时，钢筋笼在吊装及放入桩孔过程中有时容易产生较大的挠度和扭曲，此时宜适当加大试桩配筋率和主筋直径，以降低其不利影响。在混凝土浇筑过程中，为避免导料管碰撞测管，测管与导料管间应有足够的空隙，导料管最大直径宜比钢筋笼直径小30cm以上。

**5.4.4** 预制管桩的测管安装，本规程规定应制作钢筋笼和填芯材料应在C15以上，这方面的内力测试关键是能否协同变形、是否明显改变测试区域的应变关系，应进一步研究和积累资料。

# 6 基桩内力测试

## 6.1 一般规定

**6.1.1** 通过内力测试可解决如下问题：对竖向抗压静载试验桩，可得到桩侧各土层的分层抗压侧阻力和桩端支承力；对竖向抗拔静荷载试验桩，可得到桩侧土的分层抗拔侧阻力；对水平静荷载试验桩，可求得桩身弯矩分布，最大弯矩位置等。

滑动测微计（变形计）对竖向抗压桩内力测试，由于数据采集需在桩的上方进行，因此，当采用压重平台堆载法进行试验桩抗压静载试验平台搭建时，应处理好堆载平台与内力测试操作平台之间的关系，并做好内力测试现场作业的相关安全工作。

**6.1.2** 目前，虽然基桩的设计体系比较成熟，但岩土参数的经验取值存在较大的不确定性，在试验桩的制作和施工时，最大试验荷载预估值按设计极限荷载的（1.0~1.5）倍准备，可更好地发挥内力测试的作用。

**6.1.3** 试验桩桩身性能要求：竖向受荷桩宜确保桩身变形主要在弹性范围内，内力测试的数据分析不至产生过大误差；水平受荷桩，宜与工程桩相同，目的是如改变其刚度则受力形态发生改变。

## 6.2 测试元件埋设与试验桩制作施工

**6.2.1** 测试元件埋设与试验桩制作施工是内力测试能否取得成功的关键环节，例如：预制管桩的成桩养护过程传感器的保护、施工过程传感器导线的安装与连接、采用植筋填芯处理能否整体协调变形；灌注桩钢筋笼是否有足够的刚度并保证不发生过大的变形；传感器的垂直度、防水防潮性能、成活率、导线保护等。

**6.2.2** 竖向受荷桩传感器埋设断面选取的规定说明如下：

**1** 标定截面的设置决定了桩身轴力及其后续计算结果的合理性。标定截面的代表性很重要，如果标定截面与桩身其他部位存在明显差异，其标定的测试参数将不能真实代表桩身其他部位的测试参数，计算结果会出现异常。

**2** 传感器安设的深度除了参照地层界面外，还应兼顾相邻层传感器之间的距离。因为摩阻的发挥进程与桩顶荷载的大小有关，也与离开桩顶的距离有关。当地层层厚较大时，即使是同一土层，其上下部位摩阻的发挥进程也会因上下部位位移的不同而表现出明显差异，因此在深度方向适当加密观测可获得更真实的桩身摩阻表现，同时也可提高桩身压缩量的计算精度。

**3** 每层传感器的数目决定了每层传感器测试数据的可靠性，通常单一的传感器无法评价其测试数据是否有效。当桩身横截面积增大时，为了保持每只传感器所控制的桩身横截面积相当，应增加每层的传感器数量，以使测试得到的桩身轴力都有近似相同的精度保证。

**6.2.3** 水平受荷桩传感器埋设断面选取的规定说明如下：

**1** 水平受荷桩传感器标定断面的使用，由于施加水平荷载时，标定断面的传感器难以取得比照系，可通过试验前，施加一定的竖向荷载的方法，进行比照。

**2**  传感器应设置在水平抗力主要区域，测量断面间距宜为1m~3m的规定，主要考虑的因素为：水平受荷桩内力分析主要是通过在桩身布设的传感器获得桩身的弯矩，然后通过对弯矩进行相关拟合（如五次多项式拟合），然后获得沿桩身的纵向分布的弯矩函数，进而对弯矩进行求导或者积分得到剪力、弯矩以及桩身位移等参数，因而对于各个点位的距离，或将直接影响拟合精度，从而造成获得的内力出现差异。

**3** 传感器的埋设可参考埋设断面示意图3。

 

（a）2个传感器 （b）4个传感器

图3 2个与4个传感器的位置示意图

1—传感器；2—灌注桩

**6.2.4** 由于灌注桩、预制桩和钢桩的传感光缆的布设不同，为了便于测试和数据校核，规定了灌注桩应均匀布设不少于4根传感光缆，对于预制桩，桩径小于等于800mm，应对称布设不少于2根传感光缆，桩径大于800mm，应对称布设不少于4根传感光缆，对于钢桩均匀布设不少于2根传感光缆，所有的传感光缆宜形成U型回路。

**6.2.5** 滑动测微计测管的体积较大，测管的埋设数量一般根据桩径的大小以及桩顶以上的操作空间决定：对灌注桩宜对称埋设不少于2根；对预制桩，当埋设1根测管时，宜将测管埋设在桩中心轴上；对水平静荷载试验桩，宜沿受力方向在桩两侧对称埋设2根测管，测管可不通长埋设，但应大于水平力影响深度。

为减小竖向加载偏心的影响，一般应沿桩体对称布置多根测管，但对截面尺寸500mm~800mm的预制空心桩等，往往不具备安装多根测管的条件，或者虽能安装但会影响桩身应力应变关系，可只埋设1根测管，此时应将测管安装在桩几何中轴线附近，以减小加载偏心影响。混凝土钻孔灌注桩的单桩水平静载试验，桩身弯矩和钢筋应力测试的测管也应沿受力方向对称布置在受拉和受压的主筋旁。滑动测微计测管的体积较大，且通长布置，容易确保测管的垂直度，这是区别于其他传感器的优势。

**6.2.6** 桩身表面安装测试元件的预制混凝土桩、钢桩已采用静压法施工，需采用锤击法施工时，宜采用液压锤施工，不宜采用柴油锤锤击法施工**。**

**6.2.7** 若钢筋笼过长、主筋过细，容易导致钢筋笼及连接在其上的测试元件产生移位、倾斜、扭曲从而影响测试，本条规定的这些措施，都是尽量减少这些影响。

**6.2.8** 振弦式光纤光栅式电阻应变式传感器线缆排线与连接说明如下：

**1** 传感器的线缆长度应有适当余量，以防在起吊钢筋笼时产生过大的线缆应变而使线缆破损，通常留1%的余量即可；传感器线缆的固定可采用普通电工绝缘自粘胶带缠绕绑扎，绑扎时每段拉紧后放回2cm~3cm余量，这样做目的是要线缆的允许应变远大于实际钢筋笼产生的应变，防止线缆拉断。

**2** 预制混凝土桩制作与施工，传感器线缆保护是极其重要的工作，实际工程中，经常出现线缆被拉断损坏等情况，导致测试工作无法正常进行。

**6.2.9** 传感器线缆保护是极其重要的工作，实际工程中，经常出现线缆被拉断损坏等情况，导致测试工作无法正常进行。

**6.2.10、6.2.11** 早期在各个环节对传感器与线缆进行检查，条件允许时，对破损传感器及其连线应及时修复或更换，是确保内力测试取得成功的关键。

**1** 安装前后对传感器进行测试，测试传感器是否损坏，如果损坏进行更换。

**2** 对灌注桩，钢筋笼下设完毕后、混凝土浇注前后，对传感器进行联机测试，有时现场条件确实难以进行，可在事后进行补测。

**3** 对桩成型前安装传感器的预制混凝土桩，运输过程、打桩过程，对传感器进行联机测试，有时现场条件确实难以进行，可在事后进行补测。

**4** 对桩成型后桩身安装传感器的预制混凝土桩、钢桩，运输过程、打桩过程，填芯混凝土浇注前后，对传感器进行联机测试，有时现场条件确实难以进行，可在事后进行补测。

**5** 成桩后，应读取传感器初读数，并做好记录。初始值：每个传感器所处的位置和环境条件是不同的，故每个传感器的初始状态并不一致，荷载作用前后其特性反应只能与其自身对比才能客观反映其状态变化。

## 6.3 试验现场操作与测试数据采集

**6.3.1** 这条是在传统静载试验方法的基础上，作了适量的调整，以便更好地适用于基桩内力测试，说明如下：

**1** 关于分级荷载：常规静载试验一般要求分级荷载为设计极限荷载的1/10，本规程要求分级荷载为设计极限荷载的1/15，相当于分级荷载为常规静载试验分级荷载的2/3，以便更准确地测定基桩内力；根据本规程第6.1.2条规定：试验桩最大试验荷载预估值应取按岩土条件设计极限荷载的（1.0~1.5）倍，正常情况下内力测试荷载分级大致在15级~22级。

**2** 本规程规定的基桩静载试验的慢速维持荷载法，为传统慢速维持荷载法。

**3** 静载试验时应内力测试数据完成后，采可施加下一级荷载，这样静载试验的荷载维持时间可能会适当延长。

**4** 终止加载条件采用了更为严格的标准：荷载已达到预估的最大试验荷载值，或完成了增加的（1~4）级荷载试验，且位移达到位移相对稳定标准。

**6.3.2** 振弦式、光纤光栅式、电阻应变式传感器和分布式光纤，测试准备工作与联机测试说明如下：

**1** 传感器线缆与测试仪表的连接可采用如下几种方法之一：

**（1）**直线连接：频率采集仪配备传感器连接插口，对于配备插头的应变计可直接插入仪表测量；（**2）**夹线连接：频率采集仪配备带夹子的连接线，可将连接线夹子与应变计引线，按颜色相同的对应连接；（**3）**接线箱连接：将应变计导线对应连接于接线箱的输入端，颜色标记为：A红线、B黄线或黑线、C蓝线或白线、D绿线；（**4）**应变计可焊接航空插头，数字标记为：1红线、2黄线或黑线、3蓝线或白线、4绿线，数字对应插头上标识的数字。

**2** 电阻应变传感器注意的是：1）在试验前将灵敏度系数、导线电阻、应变计电阻、泊松比等参数输入应变测试仪器系统；2）应变计测量通常有全桥、半桥与1/4桥测量方法，测试条件较复杂、要求较高的电路应优先采用全桥方式。

**3** 传感器较多时，采用单通道观测仪需频繁接拆线缆很不方便，宜采用集成多路转换器进行读数；传感器编号与埋深对应，卸载结束后所读的传感器空载值与加载前的空载值均做记录，以了解传感器的状态是否正常。

**4** 加卸载过程结束后，妥善保护好线缆，当对数据有疑问时可重新核对，必要时复测。

**5** 分布式光纤：正式测试前应进行试测，根据试测得到的布里渊频谱、光损和应变，确定合理的光纤解调仪测试参数。具体要求如下：

初值测试时，第一步为初步扫描，该操作采用全带宽、大扫描步长（20MHz～100MHz）、低平均次数（210～212）进行初扫描；扫描完成后确定测试扫描范围，扫描范围要包括测试有效段内所有布里渊光谱的覆盖范围，并留有变形造成频谱变化值，每1000微应变约留有50MHz余地；当光路光损大于10db，需对光路进行检查或提升出光功率。第二步为确定扫频范围，将扫频步长控制（1~5）MHz，平均次数不少于212次，重新扫描后观察光谱是否满足测试要求，不满足重复上面步骤再进行；后续测试中所有参数不宜改动。

**6.3.3** 本规程所述的被测体，大都处于地下，测管内温度较为恒定，也往往与大气温度有较大差别。温度对测试结果有较明显影响，测试前应将探头放入测管内，使探头温度与测管内温度一致，消除温差的影响。

**6.3.4** 本条是关于基桩内力测试步骤的规定，说明如下：

**1** 在基桩静载试验加载前，应采集传感装置初始值作为测量基准，当加载过程中断，重新从初始荷载进行加载时，需要重新采集传感装置初值。

**2** 传感器数据的测读时间，规定为：每级荷载施加后，宜每隔1小时进行一次内力测试，每级荷载沉降稳定后应再次进行传感装置读数与记录，主要为与静载试验时间相适应，以及避免每级荷载未达位移稳定时，受测桩突然发生破坏，而未采集传感器的相应数据，因此，不应每级加卸载只采集一次传感器读数。

**6.3.5** 加卸载过程结束后，妥善保护好线缆，当对数据有疑问时可重新核对，必要时复测。测试过程中及时检查本次读数与上次读数的差值，分析变化趋势，发现下列异常异常情况时应重新测量：

**1** 连续多次测试，测试数据不稳定；

**2** 与其他测试次相比，测试数据不合理；

**3** 当出现光纤测试数据异常、测试信号信噪比较低时。

## 6.4 测试数据分析与结果评价

**6.4.2** 埋设于桩身的传感器，由于受施工相关环节的影响，有时会发生传感器的倾斜，影响其垂直度，本条规定的测试数据的修正，借鉴了现行广东省规范《建筑地基地基基础检测规范》DBJ/T 15-60关于声波透射法管距修正的有关思路。

**6.4.3** 内力测数据分析，是以传感器采集的数据为基础，进行基桩内力的反演分析，要求测试技术人员应较全面地掌握岩土规律、桩基试验与测试技术、传感技术和力学基础等综合性知识，且分析结果应符合物理条件、力学条件、边界条件和岩土规律等原则。

**6.4.4** 当桩身发生塑性变形或开裂时，弹性变形的修正是一项很重要的工作，因此本规程第3.2.7条关于桩身材料抽检的规定应认真贯彻执行。

**6.4.5** 关于桩身弹性变形量（压缩量、拉伸量）（），可按行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ 94 - 2008第5.5.14条的有关规定进行估算，且不宜大于基桩检测的回弹量。基于桩身材料的弹性假定及桩侧阻力呈矩形、三角形分布，桩身弹性压缩量（）可按下式计算：

 （4）

式中：——桩身压缩系数；端承型桩，取=1.0；摩擦型桩，当时，取=2/3；当时，取=1/2；介于二者之间可线性插值。

**6.4.6~6.4.8** 这3条是关于基桩内力的计算，计算时应检查：桩身不同材料的结构是否整体协调变形、桩身材料、钢筋是否发生塑性变形（修正）、桩身是否开裂等。

**6.4.9~6.4.11** 轴力分布曲线是最基本的测试成果，由其微分得到摩阻分布曲线。计算得出的桩侧摩阻力分为两测量断面间的平均粘结力，因此，极限摩阻力为拟测试桩侧测量段的平均极限摩阻力。由于测量数据具有离散性，绘制桩身不同断面轴力随试验荷载的变化曲线（图4：桩身轴力~深度~试验荷载曲线）、摩阻力随试验荷载的变化曲线（图5：桩身粘结力~深度~试验荷载关系曲线），可分析桩身轴力、摩阻力沿轴向分布以及随试验荷载的变化趋势，合理剔除异常数据，有助于桩侧摩阻力标准值的确定。



图4 桩身轴力―深度―试验荷载曲线

*P*—桩身轴力；*L*—深度；*Qi*—试验荷载



图5 桩身摩阻力―深度―试验荷载曲线

*q*s—桩身摩阻力；*L*—深度；*Qi*—试验荷载

**6.4.13** 水平受荷桩，桩身抗弯刚度（*EI*），根据现行行业标准《桩基技术规范》JGJ 94的有关规定，钢筋混凝土桩桩身抗弯刚度可按下列公式计算：

桩身抗弯刚度：

 （5）

圆形截面桩身换算截面惯性矩：

*I*0=$\frac{πdd\_{0}}{64}[d^{2}+2(α\_{E}-1)ρ\_{g}d\_{0}^{2}]$ （6）

方形截面桩身换算截面惯性矩：

*I*0=$\frac{bb\_{0}}{12}[b^{2}+2(α\_{E}-1)ρ\_{g}b\_{0}^{2}]$ （7）

式中：——桩身混凝土弹性模量（MPa）；

——桩身换算截面惯性矩（m4）；

*d*——桩直径（m）；

*d*0——扣除保护层厚度的桩直径（m）；

*b*——方形截面边长（m）;

*b*0——扣除保护层厚度的桩截面边长（m）；

*α*E——钢筋弹性模量与混凝土弹性模量的比值；

*ρ*g——桩身配筋率。

**6.4.14** 水平受荷桩，测量断面桩身剪力、桩周土抗力的确定说明如下：

**1** 对桩身剪力、土抗力（）进行分析前，应采用合适的方法对桩身弯矩进行平滑处理，也可按五点滑移平均公式进行磨光处理（计算地面第一、二断面时使用第一、二行计算式，计算最后两个断面时利用第四、五行计算式，其余用第三行计算式）：

 （8）

式中：*M*——为等距离线性插入后桩身各点弯矩；

——为光滑后桩身各点弯矩；

——光滑断面离桩顶距离；

——步长。

**2** 测量断面桩身剪力可通过对桩身弯矩一次微分求得，剪力计算可采用差分法按下式计算：

 （9）

式中：——为桩身各点剪力。

**3** 测量断面土抗力（）可通过对桩身弯矩二次微分求得，或对桩身剪力再微分一次并除以桩直径求得，土抗力计算可采用差分法按下式计算：

$\left(\begin{array}{c}q\left(x\_{0}-2h\right)\\q\left(x\_{0}-h\right)\\q\left(x\_{0}\right)\\q\left(x\_{0}+h\right)\\q\left(x\_{0}+2h\right)\end{array}\right)=\frac{1}{20hd}\left(\begin{array}{c}-21 13 17 -9 0 \\-11 3 7 1 0\\ -4 -2 0 2 4\\ 0 -1 -7 -3 11\\0 9 -17 -13 21\end{array} \right)\left(\begin{array}{c}Q\left(x\_{0}-2h\right)\\Q\left(x\_{0}-h\right)\\Q\left(x\_{0}\right)\\Q\left(x\_{0}+h\right)\\Q\left(x\_{0}+2h\right)\end{array}\right)$ （10）

式中：*q*——为桩侧土抗力；

*d*——桩直径。

**6.4.15** 水平受荷桩，应绘制各级水平力作用下的桩身弯矩-深度-试验荷载曲线（图6）、桩身剪力-深度-试验荷载曲线（图7）、土抗力-深度-试验荷载曲线（图8），且应列表给出相应的数据。



图6 桩身弯矩―深度―试验荷载曲线

*M*—桩身弯矩；*L*—深度；*Qi*—试验荷载



图7 桩身剪力―深度―试验荷载曲线

*V*—桩身剪力；*L*—深度；*Qi*—试验荷载



图8 桩身土抗力―深度―试验荷载曲线

*q*—桩身土抗力；*L*—深度；*Qi*—试验荷载

**6.4.16** 桩竖向抗压应力测试过程是一项复杂的作业过程，既需要现场人员精心操作外，繁杂的资料处理过程更需要有深厚理论基础和丰富实践经验的专业人员完成。能够完整完成本项作业的技术人员应该具备的理论基础包括：高等数学、数理方程、土力学、材料力学、线性代数、计算方法等理论基础。桩竖向抗压应力测试提供资料的准确性依赖于对已知条件的掌握程度，已知条件越丰富，对测试数据的分析更有深度，分析成果的可靠性也才有保证。例如成孔质量测试结果、标定截面的代表性对于轴力转化的精度是至关重要的，而测试截面的间隔则对于公式离散化处理时产生的误差会产生一定影响。

轴力分布曲线是最基本的测试成果，由其微分、积分分别得到摩阻分布曲线和压缩量分布曲线，由轴力分布数据和摩阻分布数据分别与压缩量分布数据组合，产生力与变形的多种组合效果，可实现桩周摩阻力、桩端阻力以及各截面承载力等的多样化分析。

# 7 锚杆内力测试

## 7.1 一般规定

**7.1.1** 通过锚杆内力测试，可得到拉力型钢筋锚杆的锚固段注浆体与岩土层之间的粘结力和粘结强度。锚杆粘结力包括两个概念，一个是锚固段注浆体与岩土层之间的粘结力，另一个是锚固段注浆体与杆体之间的粘结力，考虑到杆体与锚固段注浆体之间的粘结力通常都比锚固段注浆体与岩土层之间的粘结力要大，且可在试验室内进行，因此，本规程未编制这方面的内容。实际工程中，在钢绞线上较难安装传感器，在钢筋上安设传感器的技术较为成熟，因此，锚杆粘结力测试安设传感器测试法主要适用于杆体材料为钢筋、高强钢筋的拉力型锚杆和荷载分散型拉力型锚杆，对于难以安设传感器的拉力型锚索和压力型锚杆，可按现行行业标准《锚杆监测与检测技术规程》JGJ/T 401的短锚固段锚杆测试法进行粘结强度测试。

**7.1.2** 目前，虽然锚杆的设计体系比较成熟，但岩土参数的经验取值存在较大的不确定性，在锚杆的制作和施工时，最大试验荷载预估值按设计极限荷载的（1.0~1.5）倍准备，可较好地发挥内力测试的作用。

**7.1.3** 只有当锚固段注浆体与岩土体间发生的破坏，才有可能测得锚固段注浆体与岩土层间粘结强度。因此，为了避免出现杆体破坏、或锚固段注浆体与杆体之间的破坏，可采取加大杆体的截面面积的措施。

## 7.2 测试元件埋设与试验锚杆制作施工

**7.2.1**测试元件埋设与试验锚杆制作施工是内力测试能否取得成功的关键环节，例如：传感器的垂直度、防水防潮性能、成活率、导线保护等。

**7.2.2** 本条是关于传感器埋设断面选择的原则性规定，数据校核断面的设置应引起足够的重视，否则传感器数据的校核难以进行。

**7.2.3** 测试元件的埋设要求采用**了**现行行业标准《锚杆检测与监测技术规程》JGJ/T 401的有关规定。测试元件的埋设应能满足测试的技术要求，并保证测试过程中避免预测试元件及线缆损伤。

## 7.3 试验现场操作与测试数据采集

**7.3.1** 这条是关于锚杆内力测试现场试验方法的规定，参考了现行行业标准《锚杆检测与监测技术规程》JGJ/T 401关于锚杆基本试验方法的规定。

**7.3.3** 本条是关于锚杆基桩内力测试步骤的规定，说明如下：

**1** 对施加有初始荷载的支护锚杆等，初始读数也称基准值。

**2** 传感器数据的测读时间，规定为宜与锚杆抗拔试验的测读时间相适宜，主要考虑：避免每级荷载未达位移稳定时，受测锚杆突然发生破坏，而未采集传感器的相应数据，因此，不应每级加卸载只采集一次传感器读数；另一方面，由于锚杆测读时间间隔较短，检测机构也可根据具体情况进行适当调整。

## 7.4 数据分析与结果评价

**7.4.3** 数据分析原则应以校准断面的测试数据为基础，并宜符合物理条件、力学条件、边界条件和岩土规律等原则。

**7.4.4** 当杆体发生塑性变形时，弹性变形的修正应符合本规程第7.4.5条的规定。

**7.4.5** 这条是关于锚杆内力的计算，计算时应检查：杆体是否发生塑性变形（修正）、传感光纤是否与杆体协调变形等。

**7.4.6** 粘结力是根据测试区段的两个断面的杆体轴力测试结果计算得到，对于单个测试区段或者两个测试区段的关联性不强，可针对每个测试区段绘制杆体轴力~试验荷载曲线、粘结力与试验荷载的关系曲线；对于两个或两个以上连续测试区段，还应绘制锚杆轴力~深度~试验荷载曲线、绘制粘结力~深度~试验荷载曲线。

**7.4.7、7.4.8** 计算得出的锚固段注浆体与岩土体之间粘结力为两测量断面间的平均粘结力，因此，极限粘结强度为拟测试锚固段的平均极限粘结强度。由于测量数据具有离散性，绘制锚杆不同断面（杆体）轴力随试验荷载的变化曲线（图9：锚杆轴力~深度~试验荷载曲线）、粘结力随试验荷载的变化曲线（图10：锚杆粘结力~深度~试验荷载关系曲线），可分析锚杆轴力、粘结力沿轴向分布以及随试验荷载的变化趋势，合理剔除异常数据，有助于粘结强度的确定。

需要注意的是，锚杆粘结强度是通过特定条件测出的，应注意锚固段长度与锚固效应的变化关系，在设计使用时应调整或折减。



图9 锚杆轴力―深度―试验荷载曲线

*P*—锚杆轴力；*L*—深度；*L*f—锚杆自由段；*Qi*—试验荷载



图10 锚杆粘结力―深度―试验荷载曲线

*q*s—锚杆粘结力；*L*—深度；*L*f—锚杆自由段；*Qi*—试验荷载

**7.4.9** 测试报告除应包括本规程第3.4.6条内容以外，还应包括下列内容：

**1** 测试锚杆布置图、锚杆孔径、长度、角度、杆体直径或面积、锚杆锚固段长度、锚杆自由段长度、杆体自由段长度、杆体粘结段长度等、杆体材料、材料强度；

**2** 锚杆抗拔试验要求绘制的曲线及对应的数据表；试验锚杆的极限承载力及确定依据、预应力锚杆弹性变形验算结果；

**3** 锚杆的测试数据，数据处理原则与数据分析方法（锚杆轴力计算方法）；各级水平力作用下的锚杆轴力-深度-试验荷载曲线、表格和汇总结果；

**4** 锚固段注浆体与各岩土层之间的粘结力、极限粘结强度。