



建筑结构检测技术与方法

卜乐奇 陈星烨 编著
中南大学出版社

建筑结构检测技术与方法

卜乐奇 陈星烨 编著

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

建筑结构检测技术与方法/卜乐奇,陈星烨编著.
—长沙:中南大学出版社,2003.5
ISBN 7-81061-705-2

I. 建... II. ①卜...②陈... III. 建筑结构—检验
IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 031103 号

建筑结构检测技术与方法

卜乐奇 陈星烨 编著

☐责任编辑 刘石年

☐出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路 邮编:410083

发行科电话:0731-8876770 传真:0731-8710482

电子邮件:csucbs @ public. cs. hn. cn

☐经 销 湖南省新华书店

☐印 装 中南大学印刷厂

☐开 本 787×1092 1/16 ☐印张 12.5 ☐字数 305 千字

☐版 次 ☐2003 年 5 月第 1 版 ☐2003 年 5 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 7-81061-705-2/TU·011

☐定 价 20.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

建筑结构检测与评定是高等院校土木工程类专业一门实用性很强的专业课。通过这门课程的学习,旨在培养学生系统了解和掌握建筑结构与力学性能参数的检测理论;初步掌握正确评价建筑结构承载能力及其他性能的检测方法,学会用试验手段验证结构的计算理论。

本书除可作为土木工程类专业教学或在职人员继续教育用书外,还力图为广大工程技术人员提供一本既实用、简单又符合国情的参考书籍。书中内容主要针对建筑工程中的重要结构——混凝土结构、砌体结构、钢结构及桩基问题,详细论述了其检测方法及质量评定标准,在相应章节中介绍了对这些结构的现场行之有效的检测项目及实例,书后附有有关实用数据表格,以便查找,可大大提高工作效率。

本书由长沙理工大学(原长沙交通学院)卜乐奇副教授、陈星辉副教授、刘文华讲师、刘建生副教授编著。绪论、第一、三章及附录1,2由卜乐奇执笔;第二章及附录3,4,5由陈星辉执笔;第五章及附录6由刘文华执笔;第四章由刘建生执笔。中南大学谢伟、谢毅对全书图表绘制及计算做了许多工作。全书由卜乐奇副教授统稿,中南大学谢祚济教授审定,在此表示感谢。书中引用了许多单位和个人的宝贵资料,谨致感谢。

在编写之初,力求便于教学、便于应用,讲求实效,但限于编者水平,书中难免有不少缺点和错误,恳请读者批评指正,以便改进。

编 者

2003年3月于长沙理工大学

目 录

绪 论	(1)
第1章 混凝土结构的检测与评定	(3)
1.1 检测内容(项目)及方法	(3)
1.2 一般混凝土结构的静载试验	(5)
1.3 其他结构的静载试验	(11)
1.4 混凝土结构质检评定	(18)
1.5 预制混凝土构件质检评定	(23)
1.6 预应力混凝土空心板及其选用与检验	(43)
第2章 混凝土结构常用无损检测方法	(50)
2.1 回弹法	(50)
2.2 超声波法	(61)
2.3 超声-回弹综合法	(72)
2.4 钻芯法	(73)
第3章 砌体结构的检测与评定	(78)
3.1 砌体结构的质量检查	(78)
3.2 砌体结构的缺陷与分析	(79)
3.3 砌体结构的质量检测与评定	(82)
3.4 砌体基本力学性能测试	(87)
3.5 用回弹仪评定普通砖强度等级	(93)
第4章 钢结构的检测与评定	(97)
4.1 钢结构的缺损与分析	(97)
4.2 钢结构的质量检测与评定	(100)
4.3 钢结构的强度、变形及缺陷检测	(101)
4.4 钢结构的耐久性评估	(107)
第5章 地基基础及其桩基的检测与评定	(108)
5.1 地基与基础的检测与评定	(108)
5.2 桩基检测	(110)
5.3 桩基的现场静压试验	(111)

5.4 桩基检测的动测法	(121)
附录1 预应力混凝土空心板选用表及荷载检验表 (板厚 120 mm, 跨度 2.4 ~ 4.2 m)	(134)
附录2 预应力混凝土空心板选用表及荷载检验表 (板厚 180 mm, 跨度 4.5 ~ 6.0 m)	(152)
附录3 回弹法测区混凝土强度值换算表	(162)
附录4 超声 - 回弹综合法测区混凝土强度值换算表(卵石、碎石)	(168)
附录5 湖南省各地市区超声 - 回弹综合测强通用曲线	(176)
附录6 桩基低应变动测规程(JGJ93—94)	(180)
参考文献	(193)

绪 论

建筑结构检测是工程结构类专业的一门应用性较强的专业课。其目的是通过对结构物受到的各种不同因素作用后的观测和测试,并进行分析与计算,对结构物的工作性能及其可靠性进行评价、对结构物的承载能力作出正确的估计;同时,为验证和发展理论以及对新结构的研究提出可靠的具体依据。

根据试验目的,结构试验可分为生产鉴定性试验和科研性试验两大类。

鉴定性试验以真实结构物为对象,一般通过现场试验对结构物作出技术鉴定。这类试验可以解决以下四个方面的问题:

(1) 检验已建结构的质量,进行可靠性论证。

一般对于比较重要的结构,在施工过程中或建成后,要进行实地检测,以鉴定其质量的可靠性。同时,对于成批生产的预制构件,也要求在出厂或安装前,按照检测规程或标准进行抽样测试,以推断成批产品的质量。

(2) 评价旧建筑结构的实际承载能力,以便为加固、改建、扩建工程提供依据。

(3) 为处理工程事故,提供技术性依据。

(4) 为进行结构设计新理论的建立或旧理论的修改,提供具体的实际资料。

鉴定性试验必须在比较成熟的理论指导下进行。否则,将带来盲目性和测试工作的艰巨性,甚至失败。

科研性试验,一般在室内试验室进行,以相似模型为对象,其任务是通过模型进行测试,验证结构设计理论,验证各种科学判断、推理、假设和概念的正确性以及提供有关设计依据。

解放以来,特别在近20年中,我国为了制定出自己的设计标准、施工验收规范、试验方法和结构可靠性鉴定标准等,对钢筋混凝土结构、钢结构、砌体结构等从基本构件的力学性能到结构体系的分析优化和有关数据的检测,进行了大量的系统的科研性试验,为制定符合我国国情的设计理论、计算公式、试验方法标准和可靠性鉴定分级标准提供了比较系统而完整的依据,进一步完善了我国的建筑工程的规范体系。本书所依据的规范基本上是2000—2002年的国家最新颁布的规范,可作为广大工程技术人员、大专院校师生学习和工作的参考。

要搞好科研性试验,必须事先进行周密计划,对测试的模型应严格按照理论和制作规程进行制作。同时,在测试时,应突出研究的主要问题,消除对结构有影响的次要因素或不利因素,使试验工作合理、观测简便、数据准确并便于分析与整理。

当前,建筑结构检测技术的发展特点,是测试方法的多样化和测试仪器的高精度、小型化

和电气化、自动化。同时,电子计算机的应用,为测试技术、载荷作用模拟、试验分析等带来了生机。

我们要引用现代高科技的新成就及其先进技术来进行结构应力、位移、裂缝、内部缺陷及振动参数的测量,并开展对模型试验理论、方法和结构非破损检测技术的研究以及结构耐久性的研究,使建筑结构检测技术达到现代化水平,以适应建筑工程发展的需要。

本书依据国家最新颁布的规范、规程及有关的试验方法标准,按照高等院校建筑结构检验课程教学大纲的要求组成体系。内容包括:混凝土结构的检测与评定;混凝土结构常用的无损检测方法;砌体结构的检测与评定;钢结构的检测与评定;地基基础及桩基的检测与评定。本书还有6个附录,附有大量实用数据表格,可供读者使用,以提高工作效率。

第 1 章 混凝土结构的检测与评定

1.1 检测内容(项目)及方法

所谓混凝土结构是指将混凝土拌合物经硬化而形成的结构。其检测内容(项目)主要有三项。

1.1.1 安全性检测

安全性检测,主要是根据结构物的整体变位和支承情况,以判断整个结构或结构的一部分是否危险;根据强度检测结果,以验算结构构件的强度安全储备情况;并由强度检测和构造条件,以验算和评价连接节点、连接材料的安全储备;根据整体结构和构件的工作条件作安全、稳定性测评;同时,根据检测结构和构件的变形和开裂数据,作出整个结构及构件的安全状态及质量优劣的评定。

其检测项目有:强度(以抗压、抗剪强度为主)、弹性与塑性、断裂性能、缺陷(主要是指在施工中形成的“蜂窝”、孔洞等)、损伤(主要是指混凝土因干缩、温变收缩、化学收缩、外载作用等而引起的裂缝)等。简言之,就是进行强度、形变(变形)与裂缝的检测。

1.1.2 功能完整性检测

功能完整性检测,主要是根据设计目的和规范要求,进行观感评估,能否满足使用要求;根据实测的变形值与规范值或理论值进行比较,以判定对使用影响的程度;另外,根据裂缝的发生和发展,以测评对屋盖、围护墙体的影响程度以及对整体结构的危害程度。

其检测项目有:观感测评、变位及形变检测、整体试验等。

1.1.3 耐久性检测

耐久性检测,主要是根据结构材料和裂缝状态、老化程度、锈蚀程度以及环境条件的作用对其使用寿命进行预测。

其检测项目有:

抗渗、抗冻、钢筋锈蚀、抗磨、碳化和收缩、受压徐变、动弹性模量、抗压疲劳强度检测等。

就其对结构或构件的损伤程度而言,检测混凝土结构或构件的方法有非破损检测法和半破损检测法以及由这两种检测法组合而形成的综合法三种。

所谓非破损检测法,是以某些物理量与混凝土标准强度(指按标准规定制作和养护的试块并按标准方式试验所得到的混凝土强度)之间的相关性为基本依据,在不破坏混凝土结构的前提下,测得混凝土某些物理特性,并按相关关系推算出混凝土的特征强度(指把现场检测强度换算成标准立方体试块强度)作为检测结果;而作为评定混凝土强度值的依据应为标准特征强度值,因而要把特征强度再换算为 28 天的试块强度值。

其检测方法有：表面压痕法、回弹法、超声脉冲法（超声波法）、振动法、射线法、敲击法、电磁法、电位差法、声发射法、微波吸收和雷达扫描法以及电测法、光弹法和激光法等。

目前，以回弹法和超声波法应用最广。

所谓半破损检测法，它是在不影响结构物承载能力的前提下，在结构物上直接进行局部破坏试验或直接取样进行试验所得的强度值，然后再换算成特征强度，以作为其检测结果。

其检测方法有：钻芯法、拔出法、扳折法和射击法等。其中，以钻芯法应用较广。

所谓综合法，是半破损法与非破损法的综合应用。取长补短，联合应用，以便提高其检测效率和检测精度，发展前途大。

其检测方法有：超声－回弹法、声发射－超声法、回弹－钻芯法、回弹－砂浆声速－碳化法等。当前，以超声－回弹法应用广泛。

如果就其检测的目的而言，混凝土结构的检测方法有三种类型：

(1) 以检测强度为目的的主要有回弹法、超声脉冲法、回弹－超声综合法、拔出法、钻芯法。

(2) 以检测内部缺陷为目的的主要有超声脉冲法、电磁法、射线法、微波吸收和雷达扫描法、声发射法等。

(3) 以检测混凝土其他性能为目的的主要有振动法（共振法、敲击法、振动内耗法）、超声法与射线法以及钻芯法等。

其他性能是指其弹性模量、黏塑性、脆性、抗渗性、抗冻性、密实度等。另外，对于钢筋在钢筋混凝土中的位置及锈蚀情况也可用电磁法来进行检测。

有关混凝土结构性能检测方法见表 1.1。

表 1.1 混凝土结构性能常用无损检测方法

检测目的	常用方法	测试量	换算原理
混凝土强度	钻芯法	芯样抗压强度	局部区域的抗压、抗拉或抗冲击强度推算成标准抗压强度及特征强度
	拔出法	拉拔强度	
	压痕法	压力和压痕直径或深度	
	射击法	探针射入深度	
	回弹法	回弹值	根据混凝土应力应变性质与强度的关系，用弹性模量或黏塑性指标推算标准抗压强度及特征强度
	超声脉冲法	超声脉冲传播速度	
	回弹－超声综合法	回弹值和声速	
	超声－衰减综合法	声速和衰减	
	射线法	吸收或散射强度	根据混凝土密实度推算强度
混凝土内部缺陷	超声脉冲法	声时、波高、波形、频谱、反射回波	波的绕射、衰减、叠加等
	射线法	穿透后的射线强度	射线强度记录或摄影
混凝土受力和损伤程度	声发射法	声发射信号、事件记数、幅值分布能谱等	声发射信号源定位、声发射的凯塞效应
	超声脉冲法	声速、衰减	破坏过程的连续观察

续表 1.1

检测目的		常用方法	测试量	换算原理
其他	弹性模量和黏塑性性质及耐久性	共振法	固有频率、品质因数	振动分析
		敲击法	对数衰减率	振动分析
		超声法	声速、衰减系数、频谱	应用波传播分析
		透气法	气压变化	孔隙渗透性
	钢筋位置和锈蚀	磁测法	磁场强度	钢筋对磁场的影响
		电测法	钢筋的半电池电位	电化学分析
		射线法	射线穿透	射线摄影

1.2 一般混凝土结构的静载试验

一般混凝土结构是指混凝土梁、板、柱、桁架、壳体、节点和整体。

1.2.1 板和梁的试验

板和梁都是建筑物中的基本承重构件,它们大都采用正位试验。

支承固定装置:由于预制的单向板和梁一般都是简支的,试验时应一端采用固定铰支座,另一端采用滚动铰支座。若是多跨连续时,则一端采用固定铰支座,其余则采用滚动铰支座。当其某跨支座会产生拉力作用时,应设拉压铰支座。

当试验双向受力板时,应一边采用固定铰支座,另三边采用滚动铰支座。

支承结构的设计和选用应进行强度验算。

为保证支承面与构件紧密接触,在钢板与支墩、钢板与构件之间应用砂浆找平,对宽度较大的试件,要避免支承面翘曲。

荷载布置:板一般承受均布荷载,故加载应均匀,当用重力加载时,应避免构件因受载弯曲而使荷重块产生起拱作用,使板的工作状态发生改变。

梁的试验荷载一般较大,多采用液压加载方法。

试验荷载的布置应符合设计计算的规定,若试验荷载的布置难于符合设计计算的规定时,应采用等效荷载的原则进行换算。

对吊车梁试验,由于主要荷载是往复运动的吊车轮压,则试验荷载的加载点应根据抗弯与抗剪最不利组合来决定,一般均应分别进行试验。

在观测项目中,对常用的钢筋混凝土结构的梁板构件的鉴定性试验,主要测定构件的强度、安全度、抗裂度及各级荷载下的挠度及裂缝开展情况。

在科研性试验中,除观测上述内容外,一般要测量控制截面或区段的应力大小和分布变化规律。有时还需测定钢筋锚固性能等。

挠度测量一般用位移计。精度要求不高时亦可用挂标尺的方法,用水准仪观测。

板、梁构件的弯曲应变测量是主要内容之一,特别是正负弯矩最大或有突变的截面。为测得截面上应力分布规律和确定中性轴位置,一般沿截面高度连续布点,测点布置可以是等距

的,也可以不等距。不等距主要是外密内疏,以便测出较大的应变值,具有较好的精度。

对钢筋混凝土板或梁,在受拉区混凝土开裂后,混凝土部分退出工作,此时拉区仪表就丧失作用。为探求截面受力的全过程,则需在拉区钢筋上布置测点(压区钢筋有时也有布置),以便测量钢筋应变。

抗剪测点应设在剪应力较大部位。当要求测量梁沿长度方向的剪应力或主应力的变化规律时,应沿梁长度方向布点;若需测定沿梁高度方向剪应力的变化规律,则需沿高度方向布点。对钢筋混凝土梁来说,为检测抗剪强度,通常在梁的弯起钢筋和箍筋上布置测点(见图 1.1)。

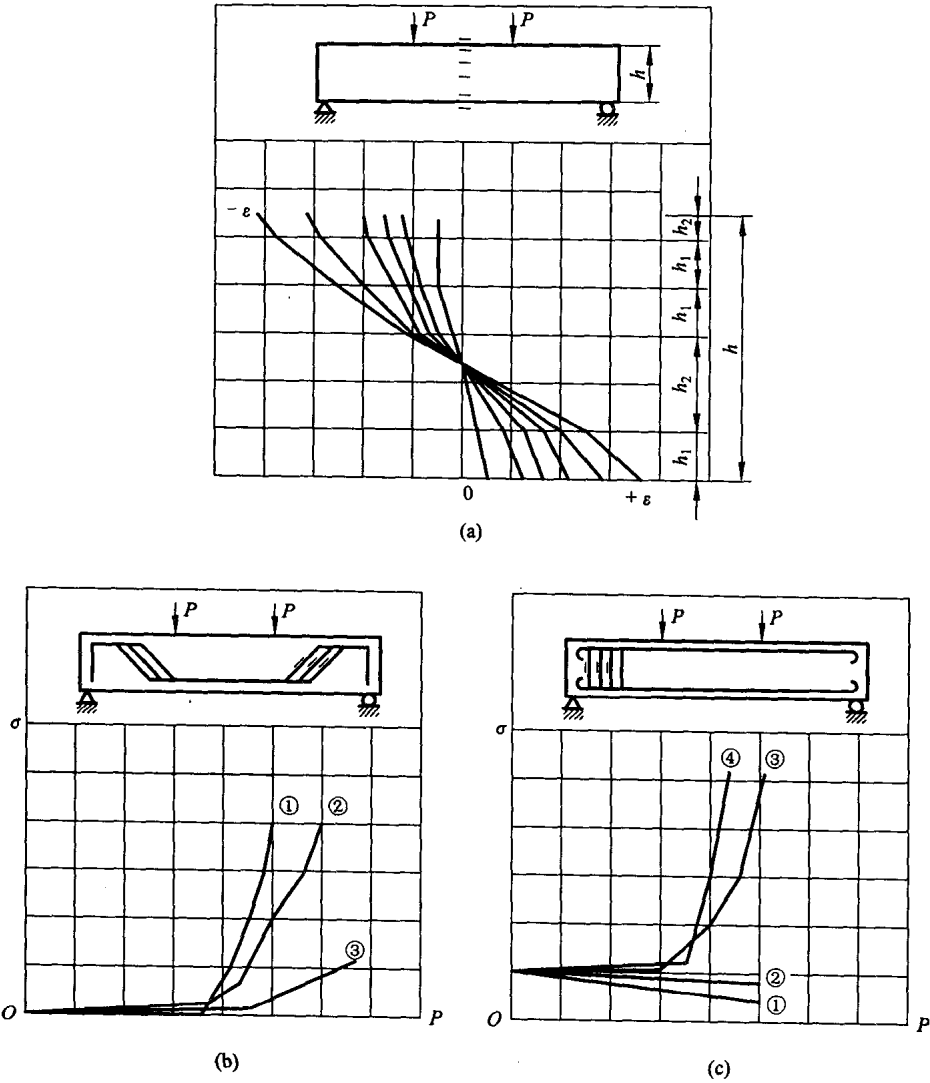


图 1.1 测量应变的应变片在梁截面上的布置示意图

(a)混凝土表面应变测点的布置和测量 (b)弯起钢筋应变测点的布置和测量 (c)箍筋应变测点的布置和测量

钢筋混凝土构件中钢筋应变的测量方法,可在混凝土浇注前,事先在钢筋上贴片,并做好防护处理。也可在浇注混凝土时,在测点处预留孔洞,使钢筋的测量区段外露,以便于装置杠杆应变仪或粘贴电阻应变片。当选用千分表或手持式应变仪时,由于标距较大,可以用短钢筋

点焊在被测钢筋上,短钢筋长度等于混凝土保护层厚度,四周用软橡皮做成防护套。待混凝土硬化后,即可在短钢筋头上固定千分表或钻手持式应变仪插足圆孔,借助短钢筋测量受力钢筋的应变(图 1.2),要注意的是,用这种方法量测受弯构件时,应尽可能使短钢筋与中性轴平行,以免引起测量误差。

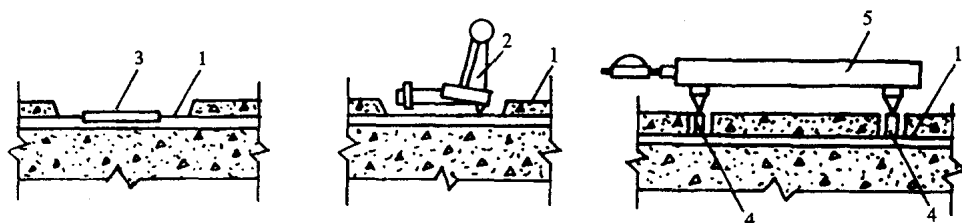


图 1.2 测定钢筋混凝土构件内钢筋应变的方法图示

1—受力钢筋 2—杠杆式应变仪 3—电阻应变片 4—手持式应变仪脚标 5—手持式应变仪

标准荷载下的最大裂缝宽度,对于正截面应取受拉钢筋处的最大裂缝宽度,对于斜截面则应在斜裂缝最大处测量。

对于需确定抗裂度的构件,在试验过程中应十分注意观察第一条裂缝出现时的荷载值。当进行破坏试验时,应特别注意人身和仪表的安全。构件在临近破坏时应着重观察记录破坏特征及其破坏荷载值。

1.2.2 柱子试验

柱子是建筑物中的基本承重构件。柱子试验的主要目的在于研究纵向弯曲的影响与柱子破坏的规律,从而找出不同长细比的柱子与极限荷载之间的关系。

对于钢结构还有局部稳定问题。

柱子试验可采用正位或卧位方案,正位试验主要在长柱试验机或大型承力架配合液压千斤顶加载系统中进行。卧位试验比较方便、安全,但自重影响难于有效消除。

铰支座是柱子试验中的一个重要设备。多数试验表明,采用刀口支座比较灵活可靠。常用的有双刀铰支座或单刀铰支座两种。当然也有采用圆球形铰支座的,但加工困难,精度不易保证,摩擦阻力大。

柱子加载一般按估算破坏荷载的 $1/15 \sim 1/10$ 分级施加。接近开裂荷载及破坏荷载时,加载值应减至 $1/3 \sim 1/2$ 的原分级值。

柱子试验的观测项目有:破坏荷载值,各级荷载下的侧向挠度值或变形曲线,各级荷载下控制截面或区段的应力及变化规律,梁柱节点应力或变形、裂缝的开展及构件延性等情况。

在研究各种框架柱,无梁楼盖柱以及类似桁架压杆等问题时,不同柱端约束情况及柱端弯矩变化影响等也需根据不同要求进行布点观测。

仪表的布置主要根据试验目的和要求决定。柱子的侧向变位一般用位移传感器、挠度计、曲率仪或经纬仪观测。混凝土表面及其内部钢筋的应变多采用电阻应变测量为主,延性测量主要用函数仪自动描绘荷载—位移(应变)曲线。测点布置方式参见图 1.3。

试验前,应将构件轴线对准作用力的中心线。构件几何尺寸对中后,若有可能再进行力学

对中,即加载约达标准荷载的 20% ~40% 时,测量其中央截面的两侧应变或四角应变,并调整作用力的轴线,使各点的应变均匀。将构件对中后即可进行中心受压试验。

对偏心受压构件试验,应在力学对中后,沿加力中心线量出偏心距离,再把加力点移至偏心距上,进行偏心试验。

对钢筋混凝土和砖石结构构件来讲,由于材料的离散性,力学对中一般难于做到,因此仅需保证几何对中即可。

柱子试验的特点是:构件高,荷载大;对中就位困难,侧向挠曲变形不好控制和测量,构件破坏时危险性较大,均需引起足够重视。

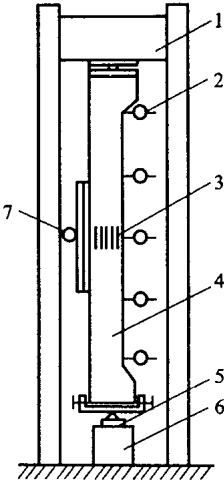


图 1.3 钢筋混凝土柱试验测量装置
1—承力架 2—挠度计 3—电阻应变片
4—试件 5—测力计 6—加载油缸 7—速率仪

1.2.3 桁架试验

桁架、拱架、钢架等结构,是最常用承重结构形式,主要承受集中荷载,其特点是只能在平面内承受荷载而出平面刚度很小,在建筑物中要依靠支撑体系将它们相互联系起来,才具有足够的空间刚度。

1. 常用试验方案

桁架试验(图 1.4a)一般多采用正位加载方式,试验时必须采用专门的措施,设置侧向支撑,以保证桁架的侧向稳定。侧向支撑点的位置应根据设计要求确定。

图 1.4b 是一般常用的桁架侧向支撑方式。支撑立杆与上弦间应垫以滚筒,以便于桁架受载时能自由下垂;图 1.4c 是另一种设置侧向支撑的方式,其水平杆应有适当的长度,以保证桁架能自由上下变形。

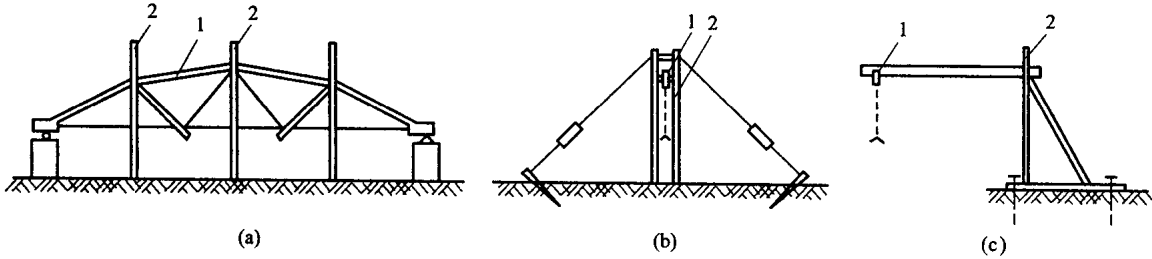


图 1.4 正位试验时常用的支撑形式
1—试验桁架 2—支撑

在施工现场进行鉴定性试验时,还可以采用两榀桁架对顶做卧位试验。此时桁架的侧面应垫平并设有滚筒,减少摩擦阻力,保证桁架在平面内自由变形。卧位试验可以避免试验时的高空作业和有利地解决上弦的侧向稳定,但自重影响无法消除,向下的侧边观测困难。

当需要做破坏性试验时,也可采用两榀屋架同时做正位试验的方法,并采用在屋面板上堆放重物方法加载。

桁架试验支座的构造与梁试验支座相仿,但桁架端节点支承轴线的位置对节点局部受力影响较大。再者桁架受载后下弦伸长较多,滚动支座的水平位移往往较大,因此支承垫板应当留有充分余地。图 1.5 是滚动支座常用的构造方式之一。

桁架试验可用重力加载及千斤顶同步液压加载。当利用杠杆加载时,最好使杠杆吊篮左右相间地悬挂在桁架两侧,这样可使桁架对称受力,但当节间间距较大时,则要防止节间受扭。单侧安置吊篮将会使桁架产生较大的侧向推力,造成整体侧向失稳。

桁架的挠度较大,特别在做破坏试验时,当下弦应力达到流限时,变形增长加快,因此在试验安装和试验过程中应注意这一特点,以免在试验中途因吊篮着地,或千斤顶冲程不够而无法进行。

当桁架的试验荷载不能与设计荷载相符时,亦可采用等效荷载的原则替换,但应注意荷载改变后可能引起的局部影响,防止产生局部损坏。

2. 试验项目和观测方法

根据试验的目的要求及桁架的结构形式,以一般的预应力混凝土桁架为例,主要有下列测试内容:

- (1) 上下弦挠度的测定;
- (2) 抗裂度的测定;
- (3) 强度安全度的测定;
- (4) 主要杆件应力测定;
- (5) 节点变形及节点刚度对桁架杆件的次应力影响程度的测定;
- (6) 端节点的主应力、主应力方向及剪应力的测定;
- (7) 其他: 诸如预应力钢筋张拉应力的测定;预应力钢筋对桁架的反拱测定;屋架吊装时控制杆件的应力测定等等。

对于设计计算理论比较成熟的桁架,需做鉴定性试验时,只测定(1)、(2)、(3)项就可以了。对于科研性试验,则根据研究的目的以及桁架的特点,则应安排更多的测定内容。

①挠度测定。桁架的跨度较大,挠度测点宜适当增加,挠度测量一般用挠度计、位移传感器或用标尺通过水准仪进行测量。试验若受某些条件限制时,也可利用结构和荷载的对称性用半跨装表的方法测量。但应注意钢筋混凝土结构材料性能的离散性和加工制造中的偏差所带来的可能影响。

②应变测量。为研究桁架的实际工作,还需要了解桁架杆件的受力情况,因此要在杆件上布置应变测点来确定构件的内力。在一个截面上引起法向应力的内力最多是三个,即 N 、 M_x 、 M_y ,但对于薄壁杆件尚有第四个,即扭矩 M_k 。

内力分析中一般只考虑结构的弹性工作,在这个条件下,在一个截面上布置应变测点的数量只要等于未知内力数,就可以用材料力学的公式求出全部的未知内力数值。当结构进入弹性阶段以后,弹性模量已不是定值,此时测点应力的计算应按结构材料实测的应力-应变曲线所对应的受力状态的变形模量值进行计算。

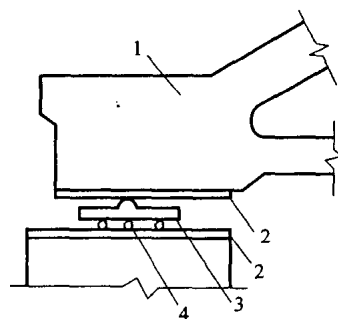


图 1.5 桁架结构滚动支座构造形式

1—屋架端部节点 2—上下钢垫板
3—半圆形支承板 4—圆钢

为了正确测得杆件内力,测点所在截面位置要经过选择。这是因为钢筋混凝土桁架在设计计算时,各构件的轴向力是按铰接桁架计算的,上弦属压弯杆,其弯矩是按弹性铰支的连续梁计算的,但在实际钢筋混凝土桁架整体浇筑时,其节点并非铰接,而具有一定刚性,使汇交于节点的杆件产生次弯矩,即在杆件截面上产生次应力。因此,若要求量测桁架在承受轴力或轴力和弯矩组合影响下的应力,并希望尽可能避免节点刚度影响时,则测点所在截面要尽量远离节点。反之,假若要求测定由于节点刚度引起的次弯矩,则应该把测点布置在紧靠节点处的杆件截面上,但不能将测点布置在节点或节点板上,因为测点的作用截面不明确,将使分析困难。

图 1.6 为 12 m 柱距 36 m 跨度预应力混凝土拱形空腹屋架现场试验的荷载布置、下弦挠度测量、应变测量仪表布置与实测轴力弯矩图。由于采用天窗架与屋架合一方案,1.5 m × 12 m 大型屋面板在屋架上弦与下弦相隔放置,故上弦与下弦同时受载。应变测量采用了机测仪表与电测仪表,按结构对称布置,便于相互比较和校核。挠度仪表按结构变形特征分别布置。变形模量采用实测值,实测结果说明这种屋架受力性能以轴力为主,与理论分析一致,试验方案的考虑和布置是合理的。

从一般预应力混凝土屋架及其他桁架试验分析资料来看,实测轴向力与理论值比较接近,且试验值稍大于理论值;而弯矩的试验值离散性较大,因此在试验钢筋混凝土桁架结构时应注意如下两个问题:

首先,目前桁架设计都是依据静力条件按弹性状态考虑的,材料假定

为纯弹性体,并认为结构的各工作阶段其杆件刚度比不变。但钢筋混凝土实际上是一种弹塑性材料,在外荷载作用下,某些杆件会开裂,其刚度将会降低,从而引起构件间的刚度发生变化。另外,在长期荷载下因突变也将产生非弹性变形,所有这些因素都会导致结构构件内力的重新分布,实际的轴力和变形与按弹性体系计算的结果是有差别的。因此,要准确地分析实测构件内力,应该改进计算方法。

其次,应变换算成内力时,应采用实际材质的变形模量,实测内力数值是否准确,与实测应变值、混凝土和钢材的变形模量以及截面的几何特征值有直接关系,尤其是与混凝土变形模量及浇筑质量关系更大,因为混凝土是弹塑性材料,其应力与应变不成正比,而是随荷载变化的。如果按设计的混凝土强度 f_c 采用规范规定的弹性模量,势必造成误差。设计规范所规定的弹性模量 E_h 是反复加载卸载 5 ~ 6 次后所测得的,与试验时结构受力状态并不一致。因此,为了

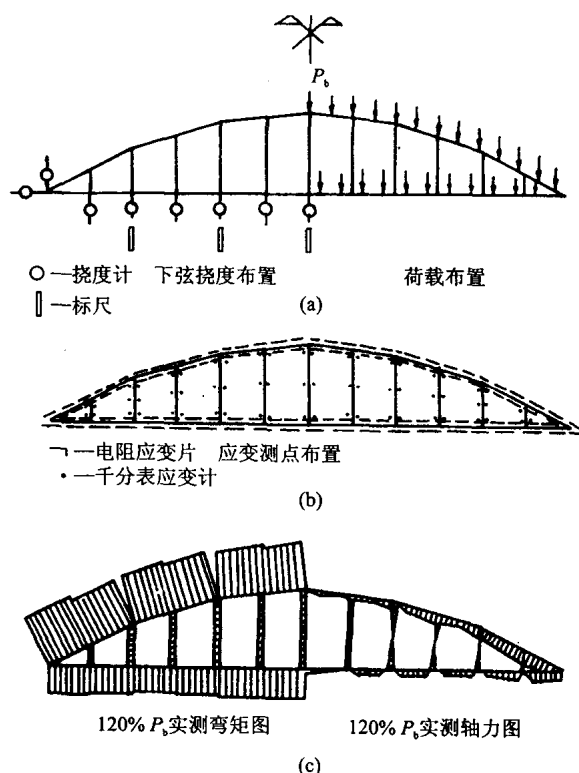


图 1.6 12 m 柱距 36 m 跨度预应力钢筋混凝土拱形空腹屋架的荷载布置、挠度与应变测量简图

准确分析实测内力值,最好采用与试验桁架同样的混凝土配合比的棱柱体试件,按照桁架的加载速度和次数测出混凝土应力-应变关系曲线,再根据需要换算成某荷载级相应加载阶段的变形模量,这样测得的内力值将会进一步接近实际受力情况。

桁架端部节点,是上下弦主要受力杆件的交汇节点,又是支承反力的作用点,应力状态比较复杂,测出端节点的应力分布规律,要求布置较多的三向应变花测点。应变花测点常由电阻应变片组成,如果用千分表或杆应变仪布置成应变花,则占用面积较大,使测点数量受到限制,难于很清楚地得到应力分布状态。从三向应变花测点测得的应变值,通过计算或图解法求得端节点上的主应力大小和方向及剪应力的分布规律。图 1.7 所示为某预应力混凝土屋架端节点应变测点的布置及在承载力检验荷载设计值下实测主应力轨迹图。

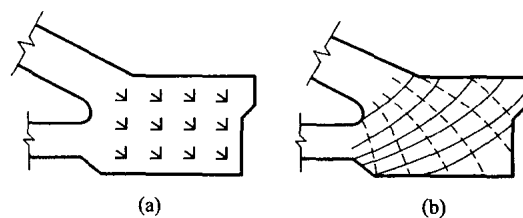


图 1.7 端节点应变测点布置与测量示意图

(a) 屋架端部节点应变测点布置

(b) 标准荷载下实测主应力轨迹曲线图

3. 裂缝测定

预应力混凝土桁架的裂缝测定,通常针对三种情况:预应力杆件的开裂荷载级;在承载力检验荷载设计值下裂缝开展宽度是否超过允许值;极限荷载作用阶段的最大裂缝值。

目前,对第一条裂缝出现的标准并不一致,有的以肉眼观测为准,有的以放大镜观测为准,有的以电测或机测应变仪表发生徐变或荷载挠度曲线转折为准。由于标准不一,至少带来 5% 的抗裂安全度观测误差。这里,建议采用以肉眼观测到的约为 0.05 mm 的受力裂缝为准。因为组成混凝土材料的线膨胀系数是不等的,在混凝土硬化过程中出现微小制作裂缝是不可避免的,即使是预应力混凝土构件,由于温度湿度变化,也会在构件边缘发生某些细微裂缝。

桁架结构各杆件的实测结果,特别是应变应力的测量与理论计算值进行比较,就可以说明理论计算与实际受力的符合程度,在一定程度上可以表征强度安全度的大小。对于不做破坏试验的桁架,可根据实测应力与理论计算相符合的程度,估算出结构的强度储备。

1.3 其他结构的静载试验

在结构试验研究中,还经常遇到一些特殊结构试验和观测。由于情况各不相同,各种试验的加载方法、测试项目和观测要求也都不同。现将几种不同类型的结构试验分述如下。

1.3.1 壳体结构的试验

壳体结构类型较多,包括筒壳、双曲壳、回转壳以及马鞍形壳与 V 形板等。

常用的梁板构件都是单向或双向受力的,且以抗弯形式抵抗外荷作用。而壳体结构则属于空间受力体系,在一定的曲面形式下,壳面弯矩很小,荷载主要靠轴向力来承受,这种受力特点有利于发挥混凝土或砖石材料的抗压能力,它主要用于覆盖结构或壳体基础。

壳体结构多采用正位试验。

壳体结构由于具有较大的平面尺寸,单位面积上荷载量不会太大,所以多采用重力直接加载,有些情况下也采用在壳体上预留孔洞、上架分配梁,用吊杆穿过孔洞下悬吊篮加载的方法,