

工程材料与桥梁结构的力学性能测试

余天庆 李德寅 熊健民 编著
王邦楣 罗元文 党志杰



国防工业出版社

1440
1/4

工程材料与桥梁结构的 力学性能测试

余天庆 李德寅 熊健民
王邦楣 罗元文 党志杰 编著

国防工业出版社

·北京·

0148/18

图书在版编目(CIP)数据

工程材料与桥梁结构的力学性能测试/余天庆等编著.
—北京:国防工业出版社,1997.7

ISBN 7-118-01574-1

I. 工… II. 余… III. ①工程材料-力学性能试验②桥梁-力学性能-测试 IV. ①TB302.3②U446.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 00325 号

国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13½ 357 千字
1997 年 7 月第 1 版 1997 年 7 月北京第 1 次印刷
印数:1—1500 册 定价:17.40 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

经济发展的重要标志之一是交通运输事业的发展,交通运输是国民经济发展的“先行官”。铁路和公路建设又有力地推动着桥梁建设事业的发展。近几十年来,我国的江河上和城市内,修建了许多特大和大、中小型桥梁,包括铁路桥梁、公路桥梁、铁路公路两用桥梁和城市的立交桥等。这些桥梁在建设中和运营管理期间,都需要进行大量的技术检测工作,以保证工程的设计和施工质量以及运行安全。我国广大的桥梁工作者和研究人员已积累了许多经验,国外的桥梁建设也给我们提供了许多宝贵经验。系统地分析和总结国内外桥梁检测的经验和方法,以促进桥梁结构检测理论和技术的发展,是进一步发展桥梁建设事业的需要,也是广大从事桥梁设计、施工、检测和管理工作人员的迫切愿望。对于培养桥梁工程专业专门人才的高等院校来说,更需要一本理论与实际密切结合的工程材料与桥梁结构的力学性能检测的专著或教材,本书就是为此目的而编写的。希望本书能为桥梁工程建设和人才培养提供一些有益的论据和经验。

在编写此书的过程中,我们本着由浅入深、循序渐进的原则,把全书分成上、下两篇。上篇为基础篇,介绍工程材料的力学性能测试原理与方法;下篇为应用篇,介绍钢桥结构和混凝土桥结构的性能测试以及桥梁地基基础的测试方法。工程技术人员不仅要能熟练地掌握测试技术和方法,同时也必须懂得测试原理,以利于今后创造性地改进和发展桥梁结构性能的测试技术。为此,作者在介绍测试方法的同时,一般都在理论上作了较详细的论述,力图将理论与实践相结合的原则贯穿于本书的始终。

任何一本著作,都是在总结前人的研究成果和经验的基础上,

继续不断发展和创新的。本书与同类的书籍相比,增添了损伤力学参数的测试原理和故障诊断学在桥梁结构性能检测中的初步应用两章,以体现桥梁结构的常规测试技术向近代测试技术的发展。

这本书是大专院校和研究院所合作的产物,作者谨以此书作为庆贺湖北工学院和铁道部大桥工程局桥梁研究院密切合作 10 周年的献礼。

本书各章执笔编写的人员是:第一、三章,熊健民副教授;第二、七章,党志杰高级工程师;第四章,余天庆教授;第五、九章,罗元文教授;第六章,李德寅教授级高级工程师;第八章,王邦楣教授级高级工程师。全书由余天庆构思设计和统一审校。

湖北工学院和铁道部大桥工程局桥梁研究院对本书编写和出版给予了大力支持,在此致以衷心的感谢。

作者水平有限,如有不妥或谬误之处,恳请批评指正。

余天庆

一九九五年六月十日

于武昌

内 容 简 介

为适应我国国民经济和建设事业发展的需要,铁道、公路和桥梁工程朝着高速重载和大跨度方向发展。为保证设计合理和运行安全,各种金属和非金属材料以及桥梁结构需要进行力学性能测试和分析。

本书由上、下篇组成。上篇是基础篇,讲述工程材料力学性能的测试原理和方法;下篇为应用篇,介绍钢桥和混凝土桥的结构性能测试以及地基基础的测试,最后还介绍了故障诊断学在桥梁检测中的初步应用。

本书既有测试原理和常用测试方法的详尽叙述,也有作者长期从事桥梁工程检测的经验和研究成果的总结。本书可作为高等院校有关工程专业的教学参考书,也是工程技术人员从事设计、检测和研究工作的重要参考资料。

目 录

上篇 工程材料的力学性能测试

第一章 金属材料的常用力学性能测试	(1)
§ 1.1 拉伸试验	(1)
§ 1.2 压缩试验	(6)
§ 1.3 硬度试验	(7)
§ 1.4 冲击试验	(11)
§ 1.5 疲劳试验	(13)
第一章参考文献	(16)
第二章 混凝土的性能及测试方法	(17)
§ 2.1 混凝土	(17)
§ 2.2 混凝土的力学性能及测试方法	(25)
§ 2.3 混凝土的收缩徐变及收缩徐变试验	(40)
§ 2.4 高强度混凝土力学性能特点	(61)
第二章参考文献	(66)
第三章 断裂力学基础与断裂参数的测试	(67)
§ 3.1 线弹性断裂力学概念	(67)
§ 3.2 断裂韧性	(71)
§ 3.3 平面应变断裂韧性 K_{IC} 的测试原理	(76)
§ 3.4 弹塑性断裂力学概念	(79)
§ 3.5 J_{IC} 的测试原理	(88)
第三章参考文献	(91)
第四章 损伤力学参数的测试原理	(92)
§ 4.1 损伤力学概述	(92)
§ 4.2 损伤变量与有效应力	(96)
§ 4.3 金属材料的损伤模型	(100)
§ 4.4 损伤力学参数的测试	(106)

第四章参考文献	(120)
第五章 振动测试与分析基础	(121)
§ 5.1 振动信号的基本特征	(122)
§ 5.2 振动测试技术	(133)
§ 5.3 单自由度系统的振动响应	(150)
§ 5.4 振动信号分析	(164)
§ 5.5 试验模态分析	(179)
第五章参考文献	(194)

下篇 桥梁结构与基础的测试

第六章 钢桥的结构性能测试	(195)
§ 6.1 钢桥静载试验	(195)
§ 6.2 钢桥动载试验	(216)
§ 6.3 试验实例	(233)
第六章参考文献	(263)
第七章 混凝土桥的结构性能测试	(264)
§ 7.1 混凝土桥的静力荷载试验	(264)
§ 7.2 实桥结构的动力性能试验	(278)
§ 7.3 混凝土桥跨结构性能测试结果的参考值	(289)
§ 7.4 混凝土桥跨结构的其它测试	(291)
第七章参考文献	(316)
第八章 桥梁地基基础的测试	(317)
§ 8.1 天然地基及其上的基础测试	(317)
§ 8.2 桩基的静力测试方法	(339)
§ 8.3 桩基的动力测试法——应力波理论在桩基中的应用	(346)
§ 8.4 钻孔灌注桩混凝土缺陷超声检测技术	(377)
第八章参考文献	(395)
第九章 故障诊断学在桥梁检测中的初步应用	(396)
§ 9.1 故障诊断学及其发展概况	(396)
§ 9.2 桥梁的振动故障诊断	(407)
第九章参考文献	(425)

上篇 工程材料的力学性能测试

第一章 金属材料的常用力学性能测试

§ 1.1 拉伸试验

用拉伸试验可测定材料的屈服极限 σ_s 、强度极限 σ_b 、伸长率 δ 和断面收缩率 ψ ，它们是最富有代表性的材料力学性能的四个指标。本节中所涉及的材料强度等力学性能指标的概念，只适用于在室温下用光滑试样进行普通拉伸试验的测试结果，即拉断前载荷缓慢增加。温度、应力和加载速度对材料的力学性能有一定的影响，所以试验时这三个条件应按 GB228--87 中规定执行。

1.1.1 试样

试样可制成圆形或矩形截面。圆形截面试样如图 1-1 所示。试样中段用于测量拉伸变形，此段的长度 l_0 称为标距。两端较粗的部分是头部，为装入试验机夹头中传递拉力之用。试样头部形状可根据试验机夹头的要求而定，可制成圆柱形（图 1-1）、阶梯形（图 1-2）或螺纹形（图 1-3）。试样两头部之间的均匀段长度 l 应大于标距 l_0 ，均匀段长度称为平行长度，用符号 l 表示（见图 1-1）。

试验表明，试样的尺寸和形状对试验结果具有一定的影响。为了避免这种影响和便于各种材料机械性质的数值能互相比较，国家对试样的尺寸和形状定出了统一规定。根据国家标准

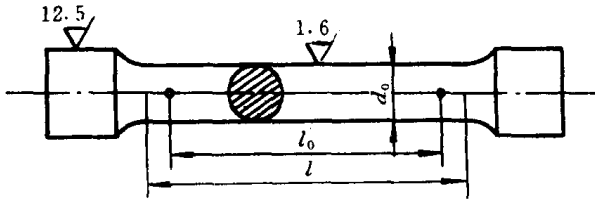


图 1-1 圆柱形拉伸试样

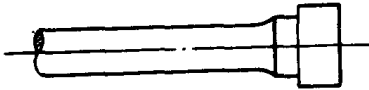


图 1-2 阶梯形拉伸试样头部

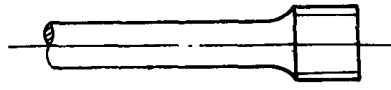


图 1-3 螺纹形拉伸试样头部

GB228—87, 拉力试样分为比例试样和非比例试样两种。比例试样是指标距长度与横截面面积间具有下列关系的试样

$$l_0 = K \sqrt{A_0}$$

式中系数 K 通常为 5.65 和 11.3, 前者称为短试样, 后者称为长试样。因此, 直径为 d_0 的短、长圆形试件的标距长度 l_0 分别等于 $5d_0$ 和 $10d_0$ 。非比例试样的标距与其横截面间无上述一定关系, 而是根据制品(薄板、薄带、细管、细丝、型材等)的尺寸和材料的性质给以规定的平行长度 l 和标距长度 l_0 。

1.1.2 试验设备

一、试验机

各种类型试验机均可使用, 试验机应备有调速指示装置和记录或显示装置。试验机误差应符合 JYG139—83《拉力、压力和万能材料试验机检定规程》或 JYG157—83《小负荷材料试验机检定规程》的 1 级试验机要求。试验机由计量部门定期进行检定。试验时所使用力的范围应在检定范围内。

二、引伸计

引伸计(包括记录器或指示器)应进行标定,标定时引伸计的工作状态应尽可能与试验时的工作状态相同。引伸计的标定与分级方法参照 GB228—87。经过标定的引伸计,在日常试验前应注意检查,当引伸计经过检修或发现异常,应按规定重新进行标定。

1.1.3 试验步骤

首先测量试样标距两端和中间这三个截面处的尺寸,对于圆试样,在每一横截面内沿互相垂直的两个直径方向各测量一次取其平均值。用测得的三个平均值中最小的值计算试样的横截面面积 A_0 。

从手册中查得材料强度极限 σ_b 和量得的横截面面积 A_0 ,估计试验中要加的最大载荷,并由此选择合适的测力量程,同时调整好自动记录装置。

将试样安装在试验机上,开动试验机进行缓慢匀速加载。加载速度应根据材料性质和试验目的确定。

(1) 测定规定非比例伸长应力、规定残余伸长应力和规定总伸长应力时,弹性范围内的应力速率应符合表 1-1 规定,并保持试验机控制器固定于这一速率位置上,直至该性能测出为止。

表 1-1 材料的弹性模量与加载速率

金属材料的弹性模量 /MPa	应力速率 /MPas ⁻¹	
	最小	最大
< 150000	1	10
≥ 150000	3	30

(2) 测定屈服点和上屈服点时,屈服前的应力速率按表 1-1 规定,并保持试验机控制器固定于这一速率位置上,直至该性能测出为止。

(3) 测定下屈服点时, 平行长度内的应变速率应在 $(0.00025 \sim 0.0025)/s$ 之间, 并应尽可能保持恒定。如不能直接控制这一速率, 则应通过调节在屈服开始前的应力速率将其固定, 直至屈服阶段过后。但弹性范围内的应力速率不得超过表 1-1 所允许的最大速率。

(4) 屈服过后或只需测定抗拉强度及最大力下或断后伸长率时, 试验机两夹头在力作用下的分离速率应不超过 $0.5L_c/\text{min}$ [L_c 是试样两头部或两夹持部分(不带头试样)之间的平行长度]。

加载时记录屈服载荷 P_s 及最大载荷 P_b 等, 直至试样拉断。

取下试样, 将断成两段的试样的断口对齐并尽量靠紧, 测量拉断后的标距长度 l_1 及颈缩处的直径 d_1 (对于延性材料)。测量直径的方法和测量试件的初始直径一样, 取其最小值计算出断口处的最小横截面面积 A_1 。

1.1.4 试验结果与分析

(1) 根据屈服载荷 P_s 和最大载荷 P_b 计算屈服极限 σ_s 和强度极限 σ_b , 即

$$\sigma_s = \frac{P_s}{A_0} \quad (1-1)$$

$$\sigma_b = \frac{P_b}{A_0} \quad (1-2)$$

(2) 根据试样断裂前、后标距长度和颈缩处的横截面面积计算延伸率 δ 和截面收缩率 ψ , 即

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

(3) 试验曲线的分析如下:

低碳钢是工程中使用最广的钢材, 这种金属材料在拉伸试验中表现出来的力学性能最为典型, 现以低碳钢的试验曲线反映出

来的力学性能为例,作如下简要分析。

图 1-4(a) 是试验中记录的载荷 - 位移($P-\Delta l$) 曲线。为了消除试样尺寸的影响,用拉力 P 除以试样的初始截面面积 A_0 ,得到试样横截面上的正应力 $\sigma = P/A_0$;同时,把伸长量 Δl 除以标准的原始长度 l ,得到试样在工作段内的应变 $\epsilon = \Delta l/l$,从而得到图 1-4(b) 所示的应力 - 应变($\sigma-\epsilon$) 曲线。

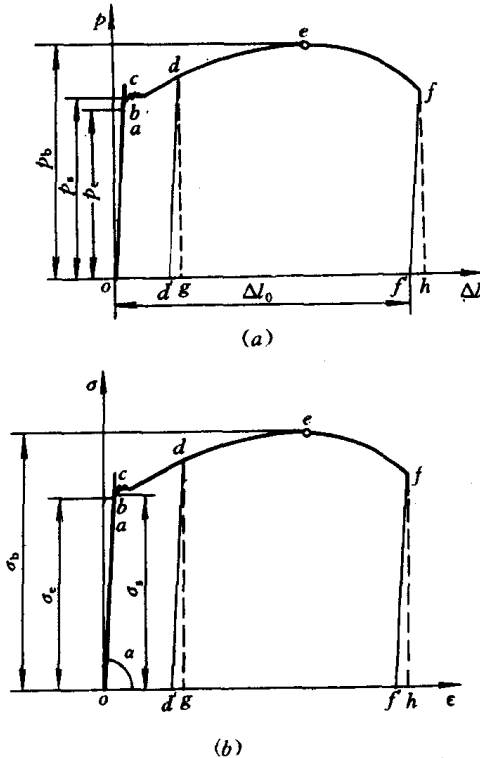


图 1-4 低碳钢的拉伸曲线
(a) 载荷 - 位移曲线; (b) 应力 - 应变曲线。

ob 为弹性变形阶段。 b 点对应的应力 σ_s 称为弹性极限。其中 oa 段表示应变和应力成正比。 a 点对应的应力称为比例极限。工程中对弹性极限和比例极限并不严格区分。

bcd 段为屈服阶段。在屈服阶段内的最高应力和最低应力分别称为上屈服极限和下屈服极限,通常把下屈服极限称为屈服极

限 σ_s 或流动极限。

de 段为强化阶段。过屈服阶段后,材料又恢复了抵抗变形的能力。要使它继续变形就必须增加拉力,这种现象称为材料的强化。强化阶段中的最高点 e 对应的应力是材料所承受的最大应力,称为强度极限 σ_b 。

ef 段为局部变形阶段。 e 点以后试样出现颈缩现象。此时,颈缩处的截面面积突然减小,总载荷不断降低(实际应力并未降低),变形仍然继续进行,直至 f 点试样断裂。

因为应力达到强度极限后,试样出现颈缩现象,随后即被拉断,所以强度极限 σ_b 是衡量材料强度的一个重要力学性能指标。

§ 1.2 压缩试验

通过压缩试验,可以测得材料的压缩模量、应力-应变曲线、屈服强度和压缩强度。工程检测中,常常只对脆性材料进行压缩试验,测定压缩强度极限 σ_b ,因为脆性材料抗拉能力较差,一般只用来制造承压构件。

铸铁材料的压缩试验一般将试样加工成圆柱形,其高度 h_0 与直径 d_0 之比为

$$1 \leq \frac{h_0}{d_0} \leq 3$$

试验装置和试验方法基本上与拉伸试验相同,加载方向与拉伸时相反。圆柱形试样的下端应当用球形承垫。当试样两端面稍有不平行时,球形承垫可起调节作用,使压力通过试样的轴线。对于薄板压缩试样,要设计专用夹具,防止试样纵向失稳。

铸铁压缩过程的应力-应变曲线如图 1-5 所示。用铸铁试样进行压缩试验时,达到最大载荷 P_b 前会出现一定量的塑性变形,然后才发生破裂,铸铁的压缩强度极限 σ_b 是将 P_b 除以试验前试样的横截面面积 A_0 ,即

$$\sigma_b = \frac{P_b}{A_0} \quad (1-5)$$

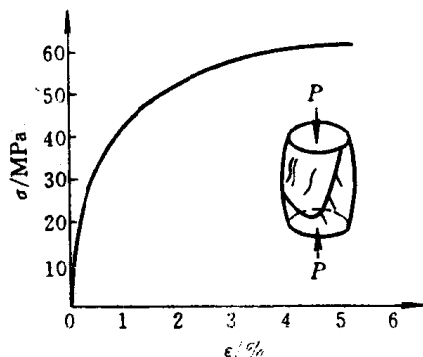


图 1-5 铸铁压缩过程的应力 - 应变曲线

§ 1.3 硬度试验

材料的硬度是材料力学性能的又一主要指标。试验研究表明，金属的硬度和其他力学性能指标有一定关系，如钢的拉伸强度极限 σ_b 与布氏硬度 HB 有如下关系

$$\sigma_b = 3.62\text{HB}(\text{MPa}) \quad (\text{HB} < 175) \quad (1-6a)$$

$$\sigma_b = 3.45\text{HB}(\text{MPa}) \quad (\text{HB} > 175) \quad (1-6b)$$

对于灰铸铁，则

$$\sigma_b = \frac{\text{HB} - 40}{0.6} \quad (\text{MPa}) \quad (1-7)$$

由此可以看出，用测量硬度的办法不用破坏零件即可得到该材料的强度数据。所以，在工程检测中，测量材料的硬度也显得非常重要。

硬度是表示材料抵抗他物压入的能力，同时也表示抵抗弹性变形、塑性变形和破坏的能力。硬度测试可分为压入法、弹跳法和刻线法。下面介绍常用的压入法，即测量材料的布氏硬度和洛氏硬度。

1.3.1 布氏硬度的测试方法

用规定的压力 $p(N)$, 把直径为 $D(mm)$ 的标准钢球(压陷器)压入材料内, 如图 1-6 所示, 并保持一定时间, 卸载后, 测量残留在

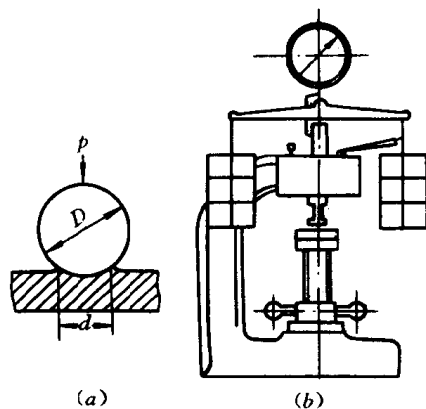


图 1-6 布氏硬度测量原理及布氏硬度试验机简图

(a) 测量原理; (b) 试验机简图。

材料表面的凹痕直径 $d(mm)$, 按下式计算材料的布氏硬度值 HB

$$HB = \frac{10p}{\frac{\pi D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (\text{MPa}) \quad (1-8)$$

试验用钢球直径及试样应符合表 1-2 和表 1-3 的要求。

表 1-2 钢球直径尺寸公差

钢球直径 /mm	钢球直径公差 /mm
2.5	± 0.035
5.0	± 0.004
10.0	± 0.005

表 1-3 试验用试样尺寸

钢球直径/mm	试样长度和宽度/mm
2.5	5 × 5
5.0	10 × 10
10.0	20 × 20

试样厚度应不小于压痕深度的 10 倍,压痕深度(h ,mm)按下式计算

$$h = \frac{P}{\pi \times D \times HB} \quad (1-9)$$

布氏硬度试验的基本条件是载荷 P 和钢球直径 D 必须恒定,所得数据才能进行比较。因此 P 和 D 必须事先规定。但由于实际金属有硬有软,所试工件有厚有薄,如果只采用一组标准的载荷 P 和钢球直径 D ,就可能仅对于硬金属适合,而对于软金属不适合,会发生整个钢球全部陷入金属内的现象;或者对于厚的工件适合,对于薄的工件会出现压透的现象。此外,工件有宽有窄,有的工件不允许表面有过大的压痕;而且压窝直径和钢球直径的比值太大或太小都将使硬度值不够准确,只有两个直径比在一定范围内才能得到可靠的硬度数据。因此,在生产上实际应用布氏硬度试验时,就要求不只采用一组载荷 P 和钢球直径 D ,而要求有不同的载荷 P 和不同的钢球直径 D 。问题在于,对于同一种材料,当采用不同的 P 和 D 进行试验时如何能保证得到同样的布氏硬度值。根据相似性原理可以推出,不论采用多大的载荷 P 和何种直径 D 的钢球,只要能满足 $P/D^2 = \text{常数}$,则对同一材料而言所得 HB 值是一样的;并且,对不同材料而言,所得 HB 值是可以进行比较的。

硬度测试中应注意以下几点:

(1) 在检验单上记载材料的布氏硬度时,一定要标出试验条件。例如,若采用 $D = 10\text{mm}$ 的钢球,压力 $P = 3000\text{N}$,保持时间为 30s,测得的硬度值为 138,则记为 $HB = 10/3000/30 = 138$;

(2) 试验时,凹痕直径 d 应在 0.2 ~ 0.6 倍钢球直径 D 范围内,否则应改换试验标准,重新测量,凹痕中心离试样边缘不应小于 D ,两相邻的凹痕中心之间的距离应大于 $2D$;