

混凝土现代技术丛书

混凝土力学性能与测定

姜福田 编著

中国铁道出版社

1989年·北京

混凝土现代技术丛书

混凝土力学性能与测定

姜福田 编著

中国铁道出版社

1989年·北京

内 容 提 要

本书内容分为两部分。第一部分介绍了测定混凝土力学性能使用的材料试验机的规格、结构、力值传递以及荷载和变形测定装置。第二部分系统地论述了混凝土的各种力学性能,包括混凝土的抗压强度、轴向抗拉强度、弯曲抗拉强度、劈裂抗拉强度、混凝土徐变特性、混凝土断裂韧性和混凝土的多轴强度。对于每一种力学性能分别阐明它的含义、测试技术、影响因素和变化规律。

本书可供混凝土工程设计、施工、科研人员及大专院校、建筑材料与制品专业的师生参考。

混凝土现代技术丛书

混凝土力学性能与测定

姜福田 编著

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 许虹进 封面设计 安宏

各地新华书店经售

阜城县印刷厂印

开本: 787×1092毫米1/32 印张: 6.5 字数: 141千

1989年10月 第1版 第1次印刷

印数: 1—5000册 定价: 2.60元

序

自从波特兰水泥问世以来，混凝土与钢筋混凝土很快就成为主要的建筑材料，广泛地应用于各种建筑工程中。第二次世界大战以后，水泥混凝土的用量迅速增加。目前世界混凝土年产量已达60亿吨左右，不仅是用量最多的建筑材料，而且也是当代最大量的人造材料。对这样的大宗材料进行有效的研究开发工作，致力于增加品种、改进工艺、提高性能、降低成本、节约能耗，不断扩大其应用范围，充分发挥其社会效益与经济效益，已成为混凝土科技工作者的光荣职责。

我们正处于新的技术革命的伟大时代，各项技术都在互相渗透、互相促进，形成日新月异之势。混凝土技术也不例外，新技术新成就不断涌现。本丛书为了加速混凝土科学技术水平的提高，使混凝土这种主要材料在我国经济建设中发挥更大作用，对于实用意义较大的混凝土现代技术，分期分批出版专册（著）。近期内将陆续出版的有：

1、新品种与特种混凝土方面

《膨胀混凝土》、《流态混凝土》、《三向应力混凝土》、《沸石岩为气体载体的多孔混凝土》、《粉煤灰混凝土》、《轻骨料混凝土》、《聚合物浸渍混凝土》、《高强度混凝土》、《防腐蚀混凝土》、《硫铝酸盐水泥混凝土的性质和应用》等。

2、新工艺、新设备方面

《混凝土养护节能技术》、《真空混凝土工艺及设备》、《混凝土中钢筋腐蚀与防护》、《混凝土冬季施工》、《混

凝土快速硬化》等。

3、性能与测试技术方面

《混凝土力学性能与测定》、《混凝土强度综合法测试技术》等。

4、应用理论方面

《混凝土材料科学》、《数理统计在混凝土试验中的应用》、《混凝土的徐变》、《混凝土的收缩》、《混凝土的耐久性》、《混凝土力学》等。

本丛书除了传播新知识以外，还将发挥宣传教育的作用。解放以来，我国混凝土科学技术进步很快，混凝土工程数量庞大，混凝土构件与各种水泥制品品种繁多，满足了基本建设与国民经济发展的需要，成绩是巨大的。但也不能否认，混凝土新技术的开发和普及工作还不能令人满意。至今我国高中标号混凝土用得不多，外加剂使用得还很少，商品混凝土还刚刚起步，而混凝土工程质量问题，尤其是耐久性问题，还亟待唤起重视。总的来说，当前我国混凝土技术水平还落后于发达的工业国家，因此，必须加速信息的传播，加强宣传教育工作，尽快赶上国际先进水平，保证我国高速度的建设事业对混凝土的需要。

随着科学技术的进步与我国在混凝土科研与生产经验的积累，本丛书的选题范围将继续扩大；希望同行专家与广大读者，给予支持，共同为加速混凝土新技术的发展贡献力量。

吴中伟 姚明初

一九八八年元月

目 录

第一章 绪 论	(1)
第二章 材料试验机	(5)
第一节 液压万能材料试验机.....	(5)
第二节 压力试验机.....	(13)
第三节 伺服程控和计算机控制试验机.....	(19)
第四节 大型结构试验机.....	(27)
第三章 力值传递与试验机检定	(36)
第一节 力值传递.....	(36)
第二节 三等标准测力计.....	(38)
第三节 试验机检定.....	(46)
第四章 荷载和变形测定装置	(51)
第一节 荷载传感器.....	(51)
第二节 变形测定装置.....	(64)
第五章 轴向压缩混凝土力学特性与测试技术	(76)
第一节 混凝土抗压强度.....	(76)
第二节 单轴压荷下混凝土应力-应变特征	(84)
第六章 混凝土轴向拉伸特性与测试技术	(94)
第一节 测试技术.....	(94)
第二节 混凝土拉伸荷载-应变曲线的 特征与测定	(103)
第三节 试验条件对混凝土拉伸力学特性的影响	(116)
第七章 混凝土的弯曲和劈裂抗拉强度	(121)
第一节 混凝土梁的弯曲试验	(121)

第二节 混凝土劈裂抗拉强度	(131)
第八章 混凝土徐变与测定装置	(139)
第一节 混凝土徐变特性	(139)
第二节 影响混凝土徐变的因素	(148)
第三节 混凝土徐变测定装置	(152)
第九章 混凝土断裂韧性	(158)
第一节 混凝土断裂力学	(158)
第二节 混凝土的断裂韧度	(164)
第三节 混凝土临界应变能释放率	(172)
第十章 混凝土的多轴强度	(184)
第一节 混凝土多轴试验机	(184)
第二节 多向应力状态下混凝土的强度特性	(189)

第一章 绪 论

混凝土作为重要建筑材料已有百余年的历史，当前广泛应用于各个领域；工业民用建筑、水坝、桥梁、公路和海港等无不用混凝土修筑。混凝土材料的性能取决于原材料的品质、组分、浇筑工艺和使用条件。在建筑物施工时，它不同于金属材料，那样可以按出厂钢号和规格来选用，而是根据结构设计要求来配制。

混凝土力学性能是混凝土结构设计的重要依据。如何配制满足结构要求的混凝土，充分利用混凝土的力学特性，设计和建造出造价经济、技术安全和结构合理的建筑物，对混凝土结构设计工程师和混凝土生产工艺师都是重要的和必不可少的知识。只有熟悉混凝土的力学性能，才能做到量材而用的目的。

混凝土是一门试验科学。混凝土力学性能的探索，在很大程度上要依靠试验技术和测试手段。从本世纪初的杠杆式试验机发展到当今的电子计算机控制试验机，是试验技术的一个飞跃。随着试验技术的发展，混凝土各种力学性能被揭示出来。混凝土的压缩、拉伸和弯曲力学性能，通过试验被人们逐渐认识清楚，从而制定出标准试验规程，并在结构设计中引用：作为控制结构安全的重要指标。

刚性试验机和伺服控制试验机的出现，使人们能够测定出混凝土应力-应变全曲线。微型试验机和电子显微镜相结合，揭示了混凝土裂纹尖端的秘密。裂纹尖端通过界面微裂缝，绕过空隙，随着荷载增加逐步扩展，最后贯穿。混凝土中粗骨料对裂纹扩展有阻碍作用，能够吸收较多的裂纹扩

展应变能。

1961年 Kaplan 首先发表了线弹性断裂力学应用于混凝土的试验成果。临界应变能受众多因素的影响，特别是试件尺寸的影响。伺服程控试验机的发展提供了直接测定应变能释放率的试验条件。根据大量试验成果，国际材料与结构试验学会（RILEM）于1985年提出了测定混凝土和砂浆断裂能试验方法的建议（草案）。这对断裂力学在混凝土方面的应用，测定断裂韧度或临界应变能释放率提供了统一的方法，有利于各国试验成果的交流和提高。

混凝土高坝和核电站压力容器结构的混凝土是处于多向应力状态。只根据单轴强度，按某种强度理论来确定混凝土许用应力显然是不够的。电子计算机和有限单元法的迅速发展，已能够精确计算复杂结构的应力。因此要求发展多轴强度试验机，直接测定混凝土多轴应力状态下的强度。

高层建筑要求混凝土高强、轻质，如果只根据标准试件测定的力学性质来设计混凝土结构，或是不能充分发挥混凝土的力学性能而有较大的储备，或是强度和变形不足而出现质量事故。为直接测定混凝土结构的强度和变形各国相应发展大型结构试验机。70年代初美国标准局建成54400kN大型结构试验机。相继，日本岛津制作所为建设省土木研究所而建成了30000kN大型结构试验机。

电子计算机在试验机上应用，对测定弹性模量、破坏强度、变形能力和应变能等力学参数自动采样和计算，减少了人为的因素，提高了试验精度。

新的测试技术开阔了人们对混凝土的认识，从而可以取长补短。混凝土抗压强度高，而且可以随意配制，但其抗拉强度只有抗压强度的6~10%。对已建混凝土建筑物的调查，大多数是因为抗拉强度和拉伸变形能力不足而开裂，严

重者会发生质量事故。因此，提高混凝土拉伸性能已引起混凝土工程师的极大兴趣。

对混凝土内部结构亚微观分析发现，混凝土在承受荷载以前已存在微裂缝，大多数是粗骨料与水泥砂浆之间的介面裂缝，随着荷载增加介面微裂缝诱发开裂，而逐渐扩展，直至断裂。由混凝土荷载-应变全曲线，根据混凝土微裂缝理论更清楚地解释了混凝土压缩和拉伸破坏发展的全过程。

混凝土不论是压缩或拉伸，在极限强度的30~40%以下应力-应变关系是线性的。大于此范围，混凝土中微裂缝扩展，应变增长速率大于应力增长速率，而表现出非线性。但是在极限强度的40~80%范围，是属于微裂缝稳定扩展阶段，卸荷后混凝土变形恢复不到原点而有残余变形。超出极限强度90%以上时，是属于微裂缝不稳定扩展阶段，即使不再增加荷载，随着持荷时间的增长，混凝土中的裂缝仍会继续扩展而导致最后断裂，此称为徐变破坏。

实用中大多数混凝土结构是按弹性理论设计计算，只有应力在极限强度40%以下时混凝土可视为弹性体。

处于复杂应力状态的混凝土结构物，结构设计时应考虑混凝土所处应力状态。两向受压或三向受压的混凝土强度均高于单轴抗压强度。拉-压应力状态的混凝土强度低于单轴抗拉强度。两向或三向受拉混凝土强度大致与单轴抗拉强度相等。混凝土多轴强度试验成果在某些国家的设计标准中已采用。如日本的规范规定：在设计拱坝混凝土强度时要考虑它在两轴应力下的强度。苏联的规范规定：在设计拱坝和重力拱坝上游区和评价混凝土承载能力时，要考虑多轴受压状态比单轴受压状态下的混凝土强度的提高。英国的设计准则规定：在三轴压应力状态下和压拉组合应力状态下，规定了最终极限强度值及使用极限强度值。

混凝土使用范围在不断扩大，混凝土在高温、低温介质中的力学性能也正在进行研究。近年来不少学者重视混凝土界面力学的研究，混凝土中骨料界面的改善，一定会使混凝土性能有一个较大突破，将会得到更理想的混凝土材料。

第二章 材料试验机

近二十年来，材料试验机发展是突飞猛进。古老杠杆式试验机与现代电子计算机控制的试验机相比较，说明了这种进步。

材料试验机的发展集中表现在荷载和变形测量控制系统上，可分为以下四个阶段：

第一阶段：液压式或机械式加荷，手动控制。由动摆式测力计的度盘显示荷载。

第二阶段：液压式或机械式加荷，手动控制。荷载和变形用电测传感器检测，数码显示或X-Y记录仪绘图显示。

第三阶段：液压式或机械式加荷，荷载或变形由电液或电机伺服系统自动控制。荷载和变形用传感器检测，数码显示和X-Y记录仪绘图显示。

第四阶段：液压式或机械式加荷，电子计算机控制。试验条件和测试数据全部由电子计算机处理、自动显示、打印和贮存。

本章介绍四种有代表性的典型材料试验机，即液压万能材料试验机、压力试验机、伺服程控试验机 and 大型构件试验机。

第一节 液压万能材料试验机

我国WE型液压式万能试验机是最通用的，一般工程材料实验室必备的试验设备。

一、用 途

本系列液压式万能试验机主要用于金属材料的拉伸、压

缩、弯曲及剪切试验。亦可用于木材、水泥混凝土以及聚合物混凝土的压缩及弯曲试验。

二、规格

本系列试验机主要技术规格见表2—1。

WE型系列主要技术规格

表 2—1

技术规格	型号	WE-10	WE-30	WE-60	WE-100
试验机最大容量(kN)		100	300	600	1000
测力计分档(kN)		20; 50; 100	60; 150; 300	120; 300; 600	200; 500; 1000
拉伸试验夹头最大间距(mm)		600	750	750	750
拉伸试验立柱间距(mm)		400	530	580	740
压缩试验上、下压板间距(mm)		0~250	0~300	0~300	150~400
压缩试验上、下压板尺寸(mm)		Ø100	Ø120	204×204	205×205
弯曲试验两支点间距(mm)		30~600	100~1000	100~1000	100~1000
弯曲试验最大高度(mm)		90	100	100	150
工作活塞直径×行程(mm)		Ø80×250	Ø140×300	Ø170×300	Ø230×250
试台上升速度(mm/min)		0~180	0~175	0~120	0~65
油泵电动机功率(kW)		0.6	1.5	1.5	1.5
试验机外型尺寸(长×宽×高)					
主机 (mm)		750×650×2495	1200×580×3185	1220×660×3460	1400×700×4100
测力计 (mm)		1010×685×1490	1040×860×1820	1040×860×1820	1040×860×1820
试验机净重					
主机 (kg)		500	1250	1950	3500
测力计 (kg)		300	500	500	500

三. 结 构

本机由主机和测力机构两部分组成，见图2—1。

1. 主 机

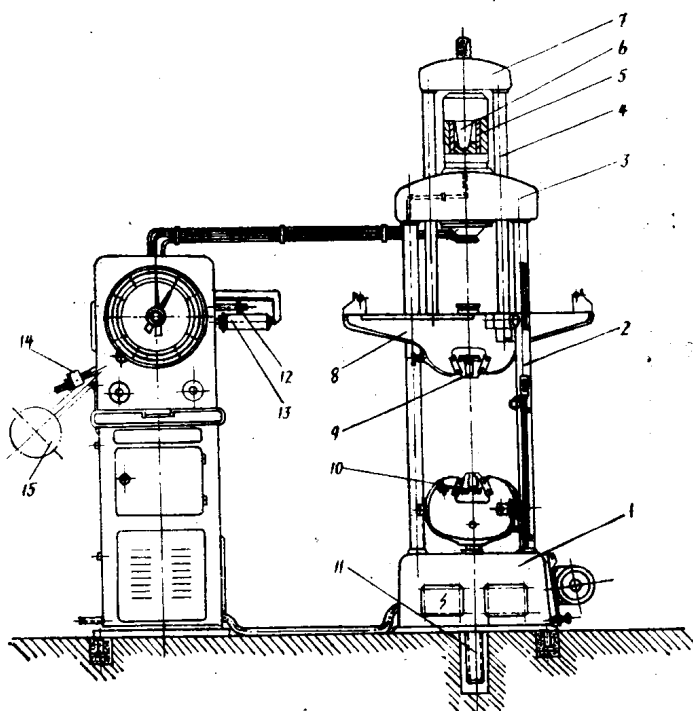


图2—1 WE系列液压万能材料试验机结构图

- 1 — 机座；2 — 立柱；3 — 固定横梁；4 — 拉杆；
 5 — 工作油缸；6 — 工作活塞；7 — 上横梁；8 — 工作台；
 9 — 上夹头；10 — 下夹头；11 — 丝杠；12 — 记录笔；
 13 — 绘图筒；14 — 平衡砣；15 — 摆锤。

机座（1）上固定两根立柱（2）与固定横梁（3）组成固定框架。工作油缸（5）固定在固定横梁上。上横梁

(7)、两根拉杆(4)和工作台(8)组成活动框架。当工作油缸充油时推动工作活塞(6)上升,从而带动工作台上升,因此可对试件进行拉伸、压缩和弯曲试验。

拉伸试验是在工作台上夹头(9)与下夹头(10)之间进行。开动电动机,通过皮带传动带动机座内的蜗杆蜗轮付旋转,使丝杠(11)及其连接的下夹头上、下移动,因而可以调整拉伸试验空间高度。压缩和弯曲试验是在固定横梁与工作台之间进行。

试验速度(工作台上升速度)由人工手动控制。

2. 测力机构

本机采用正切摆锤度盘式测力计,工作原理见图2-2。来自测力油缸拉杆的力 F 作用于短臂的力点上,而使摆杆摆动 θ 角,推板推动齿杆移动 x 距离,与齿杆相啮接的齿轮带动指针在度盘上偏转,指示出荷载值。

设计时使 $\phi = \beta$, $r_1 = r_2$, 由摆锤平衡条件推导出

$$x = \frac{hl}{GL \cos \beta} \cdot F \quad (2-1)$$

式中 x 在 F 力作用下齿杆的移动距离;

F ——测力油缸拉杆传至拉杆的力;

h ——0点与齿杆的垂直距离;

l ——0点至力点的距离;

G ——摆锤的重量;

L ——摆锤重心至0点的距离;

β ——摆锤为铅垂位置时,推板边沿与齿杆垂直直线间的夹角。

作用到测力活塞拉杆的力 F 是经过前级缩小,前级液压系统的活塞有效面积比为 A_1/A_2 ,所以

$$F = \frac{A_1}{A_2} P \quad (2-2)$$

式中 A_1 ——测力活塞的有效面积；

A_2 ——工作活塞的有效面积；

P ——工作活塞油压施于试件上的荷载。

将公式 (2-2) 代入公式 (2-1) 得

$$x = \frac{hl}{GL \cos \beta} \cdot \frac{A_1}{A_2} \cdot P \quad (2-3)$$

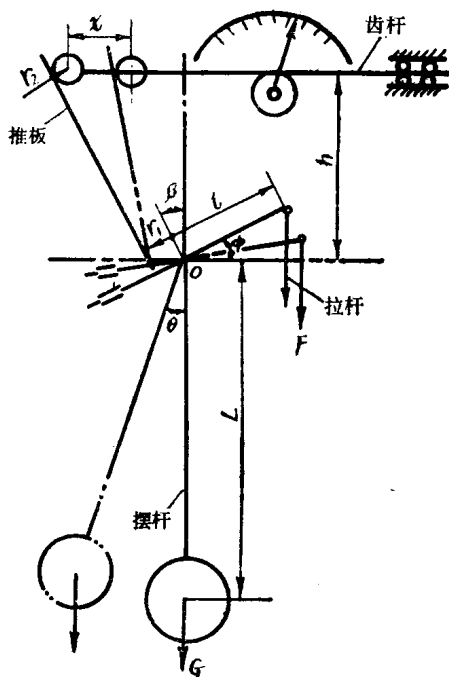


图2-2 正切摆锤度盘式测力计工作原理

公式 (2-3) 表明指针的角位移与主机施加于试件上的荷载成正比例，所以用度盘的 $0 \sim 360^\circ$ 来指示主机荷载由零到满量程。

为了提高测力度盘的分度精度，摆砵有三个，分别标以“A”、“B”和“C”字样，三个摆砵叠加使用，而将测力计分为三挡(见表2-1)。

由于拉杆、测力活塞、工作活塞、活动框架、夹头和试件等的重量作用于测力计的短臂上，而使摆锤的初始状态发生

变化（即摆锤不在铅垂位置）。因此，需要设置一个可调节的平衡砣（14）（见图2—1），用以平衡上述附加重量。在调节平衡砣的位置时应不改变公式（2—3）的关系，为此平

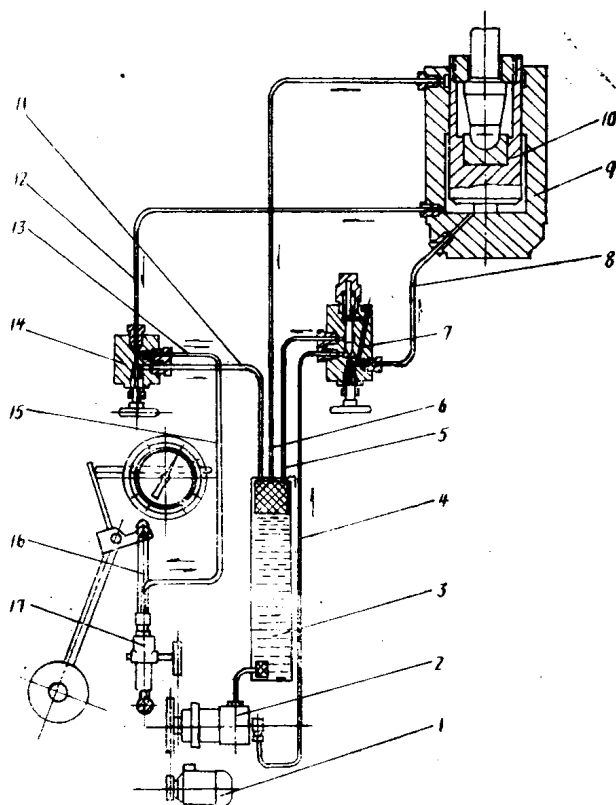


图2—3 WE系列万能材料试验机液压系统图

- 1 — 电动机；2 — 油泵；3 — 油箱；4、8 — 进油管；
 5、12、14 — 回油管；6 — 间隙漏油回油管；7 — 送油阀；
 9 — 工作油缸；10 — 工作活塞；11、13、15 — 油管；
 16 — 测力拉杆；17 — 测力油缸。