

试验设计与 混凝土无损检测技术

庞超明 秦鸿根 季垚 编著

SHIYAN SHEJI YU
HUNNINGTU
WUSUN JIANCE JISHU

中国建材工业出版社

试验设计与混凝土 无损检测技术

庞超明 秦鸿根 季 垚 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

试验设计与混凝土无损检测技术/庞超明,秦鸿根,
季垚编著. —北京:中国建材工业出版社,2006. 3
ISBN 7-80227-028-6

I. 试... II. ①庞...②秦...③季... III. ①试验
设计(数学)-基本知识②混凝土-无损检验 IV. ①0212. 6
②TU528. 07

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 006701 号

试验设计与混凝土无损检测技术

庞超明 秦鸿根 季 垚 编著

出版发行:中国建材工业出版社

地 址:北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编:100044

经 销:全国各地新华书店

印 刷:北京鑫正大印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:11.75

字 数:291 千字

版 次:2006 年 3 月第一版

印 次:2006 年 3 月第一次

定 价:18.00 元

网上书店:www. ecod100. com

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010)88386906

前言

任何科学技术的发展都离不开试验设计和测试,试验设计和测试是关于实验技术的一门科学,它将数理统计学的基本原理广泛应用于科研和生产实践,是当今科学研究人员和工程技术人员必须掌握的基本技术方法之一。

试验设计是一项涉及多种学科、多种技术的交叉工程。它既需要方法论的指导,也依赖于各种专业理论和专业技术,更离不开技术人员的经验与实践。现代试验设计方法是在继承和发展传统设计方法的基础上,融会新的科学理论和新的科学技术成果而形成的,是在传统方法和实践的基础上拓展思路、开发新技术的一把钥匙。

在工农业生产、科学试验和经营管理中,经常要进行各种试验,如何安排试验,如何对试验进行有效地设计和科学地分析,是生产工作者、科技工作者和工程技术人员经常遇到的现实问题。如何有效地利用试验设计,合理地安排试验,最大限度地减少工作量,同时又能得到需要的试验结果,这就是试验设计的任务所在。得到试验结果以后,为获得最大限度的信息,我们还必须对测试结果进行合理有效地分析处理,这就是试验的数据处理技术。目前数据处理技术最常用的方法就是方差分析法和回归分析法。

无损检测技术,是在不破坏结构构件的前提下,直接从结构物上测试或者钻取芯样测试,通过无损检测技术的基本理论和已经建立的一些经验标准曲线,推定材料的强度或缺陷等性能。而标准曲线的建立过程实际上就是试验及其数据处理的过程,是数据处理技术的一种应用,例如大部分混凝土无损检测标准曲线的建立,都是采用回归分析法而得出的。无损检测技术既适用于工程过程中的质量检测,也适用于工程竣工验收和建筑物使用期间质量的检定,同时还能评定旧建筑物的完整性和安全性,并为检修、更新、改建、延长使用期提供崭新的途径,从而使无损检测技术在各种工程结构中得到日益广泛的应用。

本书的主要内容包括试验测试的基础、误差理论、试验设计、方差分析与回归分析、混凝土无损检测五个方面。在材料测试技术基础、试验设计与数据处理的基础上,主要侧重于土木工程材料的测试技术基础;无损检测方面,主要侧重于混凝土的无损检测技术,而在实际工作中,无损检测技术可以应用到各种材料的测试中。

目前,国内很多高校为本科生和研究生开设了有关试验设计、数据处理及相关测试技术的课程。本书的主要内容在东南大学材料系的本科生中已讲授多次,因此,本书是在丰富的教学实践基础上结合工程实际编写而成。

本书可作为高等院校相关课程的教学用书,也可供各行各业工程技术人员参考,尤其适用于土木工程行业的工程技术人员使用。本书从理论基础、技术和应用的角度出发,考虑到读者的层次与需求,力求内容简洁明了,通俗易懂。

由于编者的学识水平和实际经验有限,书中可能存在各种不足,编者衷心希望和热诚欢迎各位专家与读者批评指正。

编者
2005年12月

目 录

绪论	1
第一章 技术标准和试验基础	4
第一节 材料的技术标准	4
第二节 试验基本技能	6
第三节 材料试验机	10
第四节 变形测量仪	14
第五节 电阻应变测试技术	16
第二章 误差理论基础	28
第一节 有效数字	28
第二节 误差理论基础	29
第三节 正态分布	39
第三章 试验设计及直观分析	44
第一节 正交表的基本概念	46
第二节 正交试验设计的基本方法	49
第三节 混合水平的正交试验设计	55
第四节 均匀设计法	58
第四章 方差分析	63
第一节 方差分析的基本理论	63
第二节 正交设计中的方差分析	68
第五章 回归分析	79
第一节 一元线性回归分析	79
第二节 一元非线性回归分析	84
第三节 二元线性回归分析	86
第四节 多元线性回归分析	90
第五节 正交设计中的回归分析	93
第六节 均匀设计中的回归分析	95
第六章 无损检测混凝土、砂浆强度	102
第一节 无损检测方法简介	102

第二节	回弹法检测混凝土强度	107
第三节	超声法测试混凝土强度	115
第四节	超声回弹综合法测试混凝土强度	122
第五节	钻芯法检测混凝土强度	127
第六节	拔出法检测混凝土强度技术	129
第七节	射钉法检测混凝土、砂浆强度	132
第七章	混凝土内部性能的无损检测	135
第一节	超声法测试混凝土裂缝及缺陷	135
第二节	红外成像无损检测技术	140
第三节	冲击波检测混凝土内部缺陷及厚度	143
第四节	雷达波无损检测方法	146
第五节	光纤传感无损检测混凝土结构	151
习题		153
附录一	正态分布表	157
附录二	正交表及其表头设计	158
附录三	均匀设计表及其使用	167
附录四	$F_\alpha(f_1, f_2)$ 检验的临界值表	173
附录五	相关系数 R 检验临界值表	178
附录六	正交拉丁方表	180
参考文献		182

绪 论

一、材料测试技术的作用

材料在工程建设和日常生活中的应用极为广泛,而材料的质量则直接关系到各种结构(建筑、道路等)的安全和使用年限。为了保证和提高材料的质量,必须对材料的性能进行分析和评定,而这需要通过适当的测试技术来实现。如果没有合适的测试技术,材料的性能就无法判断,人们也就无法正确地使用各种材料,因而测试技术在建筑工程中的作用十分重要,并已成为当今建筑工程的重要课题之一。近年来,测试技术的发展尤为迅速,新的标准规范、测试方法和测试仪器不断涌现,质量检测的制度也逐步完善。测试技术显示出越来越重要的地位,发挥着越来越大的作用。

测试技术是关于试验技术的一门科学,是当代工程技术人员必须掌握的技术方法之一。随着科学技术的不断发展,它的应用也越来越广泛。它主要着重于解决材料测试中的测试技术、测试方法和数据处理技术,在建材、工民建、道路、桥梁等行业中均占有重要地位。材料在出厂前,都必须经过出厂检验,在使用前,也必须进行多种多样的检验测试,合格后方允许使用。作为专业理论教学中不可缺少的一个重要组成部分,测试技术与科研、生产、设计、施工、管理和工程质检密切相关。

1. 科学研究中,材料的测试与数据处理是科学研究中必不可少的一个重要环节,很多材料的科学理论都是建立在试验成果的基础上的,都是通过对大量试验结果的处理、分析、归纳和总结,从而得出一定的理论。

2. 各种产品、各种预制构件、商品混凝土的生产过程等都必须对所使用的材料进行测试和检测。好的材料是高质量产品的基础,只有保证了原材料的质量,把好原材料质量关,才能更充分地保证产品的质量。

3. 在产品或结构的设计中,各种设计都是以材料的性能为基础而进行的,具体结构的设计也都是以所提供的材料性能为依据的。

4. 在工程的整个施工过程中,必须有代表性、分批次检测所使用的各种材料的性能。在施工前必须掌握材料的性能,以做到心中有数,而这些都是通过样品试验而得到的;施工过程中为了加强对工程的管理,也必须对工程质量进行监控,对施工过程中的材料进行抽查(如对施工使用的混凝土进行配合比设计,进行现场测试检查以确保工程质量等)。在工程竣工验收时,必须交付施工资料,进行现场抽检,对工程进行验收和质量监督等。

由于测试过程中不可避免地受到诸多不可控制的因素的影响,使得所测试的数据出现波动性,甚至出现较大的离散。面对这些大量的数据,如不采用科学的方法进行处理,则不能充分地利用这些数据资料,而且可能得不到有用的信息,不能做出正确的结论。所以我们应该正确认识并充分重视基于数理统计的数据处理方法,把它作为测试技术的基础加以掌握。

测试技术具有非常重要的作用,那么如何进行有效的试验,即进行试验设计便成为一个需

要研究的重要问题。试验设计是试验的最优化设计,是研究如何合理而有效地获得数据资料的方法,它的主要研究内容是如何合理安排试验,以较少的试验次数、较短的时间、较低的试验费用,得到较为满意、尽可能全面的试验结果,然后进行综合的科学分析,从而达到尽快获得最优方案的目的。试验设计方法是数理统计学的应用方法之一,主要是对已经获得的数据资料进行分析,对所关心的问题做出尽可能精确的判断。

二、试验设计技术的发展

试验设计及其数据处理方法在技术领域应用广泛,在非技术领域如生产计划、产品销售、经营管理上也有应用。它的普及和推广必将对经济发展起到重大的推动作用。试验设计方法始于 20 世纪 20 年代,至今已有 80 多年的历史,其发展过程可分为三个阶段:

第一阶段:早期的方差分析方法。

20 世纪 20 年代英国生物统计学家、数学家费歇(RA Fisher, 1890—1962, 英国洛萨姆斯台特试验农场工程师)提出了早期的方差分析方法,并用于田间试验,使农业大幅度增长,费歇把这种方法命名为试验设计,并出版了专著——《试验设计》,从而开创了一门新的应用技术学科。这种方法开始主要应用于农业、生物学、遗传学方面,到 20 世纪 30~40 年代,英、美、苏等国都对此进行了研究,并把这种方法逐步推广到工业生产领域中,在第二次世界大战期间,英美采用这种方法在工业生产中取得了显著的效果。

第二阶段:传统的正交设计方法。

二战后,日本面临着恢复经济的问题,他们把试验设计方法作为质量管理技术之一从英美引进,1949 年以田口玄一为首的一批研究人员在研究电话通讯系统质量管理的过程中,发现了试验设计法的不足,加以改进后创造了正交试验设计法,即用正交表安排试验的方法。这种方法在日本迅速推广。据统计,推广这种方法的前 10 年,试验项目超过 100 万项,其中 1/3 效果十分显著,获得了极大的经济效益。在日本,正交设计技术早已成为企业界人士、工程技术人员、研究人员和管理人员必备的技术,成为工程师们共同语言的一部分。

第三阶段:信噪比试验设计法与三阶段试验设计法。

1957 年田口玄一提出了信噪比设计法与产品的三阶段试验设计法,他把信噪比设计和正交表设计、方差分析相结合,开辟了更为重要、更为广泛的应用领域。信噪比试验设计法可以评价与改善计测仪表的计测方法的误差,解决产品或工序的最佳稳定性和最佳动态特性问题。

产品的三阶段设计是系统设计、参数设计和容差设计的总称,是传统的试验设计方法的重要发展和完善,它充分利用专业技术、生产实践提供的信息资料,与正交设计方法相结合,取得了十分显著的技术与经济效益。

实践证明,正交设计法与产品的三阶段设计法是试验设计技术的重要方法,具有巨大的经济效益。日本战后工业生产迅速发展的重要原因之一就是在工业领域里普遍推广和应用试验设计法,日本因此把试验设计技术誉为国宝。

我国从 20 世纪 50 年代开始研究这门学科,并逐步应用到工农业生产中。60 年代末,中国科学院系统研究所的研究人员编制了一套适用的正交表,简化了试验程序和试验结果的分析方法,创立了简单易懂、行之有效的正交试验设计法。自 1973 年,特别是推行全面质量管理以来,在正交理论上又有新的突破,不少科研生产单位,应用正交设计方法,解决了一些问题,取得了显著的效果。产品的三阶段设计法在我国的起步较晚,80 年代才开始研究,也取得了一

些成果。

三、混凝土无损检测技术的发展

混凝土是现代建筑工程中应用最广泛的建筑材料之一,混凝土的质量极大地影响着结构的安全性能,加强混凝土质量的监测和控制,保证和提高混凝土的质量,是当今建筑工程的重要课题之一。混凝土的无损检测技术,是在不破坏结构构件的前提下,直接从结构物上测试或者钻取芯样测试,通过无损检测技术的基本理论和已经建立的一些经验标准曲线,推定混凝土的强度和缺陷,它既适用于工程过程中的质量检测,也适用于工程的竣工验收和建筑物使用期间混凝土质量的检定,同时还能评定旧老建筑物的完整性和安全性。

早在 20 世纪 30 年代初人们就已开始探索混凝土的无损检测方法,并获得了迅速的发展。1930 年表面压痕法问世,1935 年共振法被用于测试混凝土的弹性模量,1948 年施米特(E.Schmid)研制成功回弹仪,1949 年加拿大的莱斯利(Leslie)和奇斯曼(Cheesman)、英国的琼斯(R.Jones)等运用超声脉冲进行混凝土的检测获得了成功,接着,琼斯又利用放射性同位素进行混凝土的密实度和强度的检测,这些研究为混凝土无损检测技术的发展奠定了基础。我国在这一领域的研究工作始于 20 世纪 50 年代,当时引进了瑞士、英国、波兰等国的回弹仪和超声仪,并结合工程应用开展了许多研究工作,60 年代初,开始批量生产回弹仪,并研制成功多种型号的超声检测仪,在检测方法上也取得了很大的进展。由于混凝土无损检测方法对结构构件无损害性,检测方便,检测范围较大,适用于整个工程质量监测和控制的全过程,且检测结果较为可靠,在工程中得到了较为广泛的应用。

第一章 技术标准和试验基础

第一节 材料的技术标准

技术标准也称技术规范,主要是对产品与工程建设的质量、规格及检验方法等所作的技术规定,是从事生产建设科学研究工作与商品流通的一种共同的技术依据,是以往实践经验的总结。

在实际工作中,材料的测试一般包含以下五个步骤:样品的选取,样品的制备和养护,样品的测试,数据的分析和处理,材料性能的评定。从取样到材料性能的分析 and 评定,整个测试过程一般都是依据或参照相关的标准规范来进行的,标准在测试过程中起着重要的作用,我们应正确认识与对待。

一、技术标准的定位

首先,技术标准不是法律,不可能适用于各种情况。我国所有的标准规范的首页均具有“本标准适用于……”的字样;英国土建工程设计与施工的各种标准的第一页,都写有:“遵守英国规范(标准)本身,并不给予豁免法律责任”。但不是所有的材料都有标准规范,尤其是一些新型材料、新型结构出现之初,基本上都没有标准规范,这些新材料只有在使用一段时间后,或参考相近产品的技术标准规范,或针对性地对一些性能提出新的测试方法或评价标准,逐步完善以后形成新的技术标准。但由于编制人员知识的局限性和社会经济的快速发展,技术标准一般只适用于一般的工程,仅代表一些成熟经验的总结,一般不能及时地跟上新技术的发展。

技术标准规范上所作的要求是一般情况下的最低要求。一般的标准规范不可能全面地考虑各种情况,对于重要或复杂工程,应该通过科学研究专门制定或设计技术标准,原则上不能采用标准规范上的一般做法。技术规范的作用主要在于对工程或产品等的指导性,设计人员应该以规范为指导,创造性地解决实际工程问题。美国 ACI 混凝土结构设计规范的第一章即表明:“本规范提供设计与施工……的最低要求”,而美国公路部门 ASSHTO 桥梁设计规程的第一章第一节中则写道:“本规程无意取代设计人所具有的专门教育和工程判断的训练,仅在规程中规定为保证公共安全的最低要求;业主或设计人可能需要在设计中采用新的先进技术,或需对材料及施工质量提出更高的要求”。对于重大复杂工程,应该专门制定相关标准。

技术标准不能违反国家和公共利益,所以必须经政府有关部门的批准、认可。在市场经济条件下,标准规范的作用只建立在业主与设计、施工企业之间的合同或契约基础上,作为共同认可的进行工程的一种规则,业主和设计人员从工程的特点和本身的利益出发,可以选用不同的规范;在不违反有关法规的前提下,甚至还可以采用不同于规范的要求和做法。

从本质上讲,标准是根据当时的技术水平和实践情况而制定的,总体上是暂时而相对稳定的,因此随着社会的进步和新技术的发展,必须进行不断的修订。标准的修订周期,根据新技术发展程度的不同而不同,一般为五到十年左右。

二、技术标准的等级

目前技术标准有国际标准和国家标准。国际标准由国际标准化组织制定,是具有统一性的世界范围内的标准。ISO 是国际上作用最大的国际性的标准化组织之一,它的宗旨是在世界范围内促进标准化工作的发展,以便于国际物资的交流与互助,并逐步扩大在知识、科学、技术与经济方面的合作。其主要任务是制定国际标准,协调世界范围内的标准化工作,报道国际标准化交流情况以及与其他国际性组织合作研究有关标准化的问题等。我国是国际标准化协会成员国,为便于科学技术的交流与提高,我国的标准规范正向国际标准靠拢,部分新发布的标准已标注有“idt”或“eqv ISO”等字样。

我国的标准规范按发布单位与通用范围分为国家标准、行业标准、地方标准、企业标准和其他标准。

1. 国家标准。这一级标准是由国家标准主管部门委托有关部门起草,视其性质与涉及的范围,报请国家标准总局会同各部委审批。一般由国家标准总局、国家质量监督局发布,在全国范围内适用,以 GB 开头(即“国标”汉语拼音的第一个大写字母),如 GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》。

2. 行业标准。指全国性的各专业范围内的技术标准。由部、局标准机构提出或者联合提出,报请中央有关部门审批发布,并报请国家标准总局备案。不同的专业范围以不同的字母打头,如以 JGJ 开头,如 JGJ 53—92《普通混凝土用碎石或卵石质量检验标准及检验方法》。常见的几个专业范围的打头字母为:

JGJ——建筑	YB——冶金	SH——石油
JC——建材	JTJ——交通	SD——水电

3. 地方标准。在某省范围适用的技术标准,由省的标准机构审批并发布,一般使用于相应的省份,以 DB 开头(即“地标”汉语拼音的第一个字母大写)。如江苏省的地方标准:DB32/P(JG) 003—1992《江苏省回弹-超声综合法检测混凝土强度技术规程》。

4. 企业标准。凡未颁发国家和行业标准的产品与工程,生产企业为了保证产品质量能符合已颁布的相关标准,自行制定较已颁布标准要求更高的技术标准。这类标准由企业起草提出,报请本省市有关主管机构审批执行,以 Q 开头(即“企”字汉语拼音的第一个字母大写),如 Q/32500 SG 5602—1992《低合金盘圆变形钢筋》。企业标准一般只在没有国家标准或行业标准的行业或者企业内部使用。

5. 其他标准。如国家标准化委员会标准;由部标准机构委托有关部门起草,部的标准机构审批,并由中国工程建设委员会颁布的标准(以 CECS 开头);中国土木工程协会颁布的标准(以 CCES 开头)等。例如:

CECS 02:88 《超声回弹综合法检测混凝土强度技术规程》;

CECS 03:88 《钻芯法检测混凝土强度技术规程》;

CECS 21:2000 《超声法检测混凝土缺陷技术规程》;

CECS 69:94 《后装拔出法检测混凝土强度技术规程》;

CCES 01:2004 《混凝土结构耐久性设计与施工指南》。

一般,地方标准、企业标准的相关系数大于国家标准、行业标准;平均相对误差、相对标准差小于国家标准和行业标准。标准适用的范围越广,其被承认程度就越高;但适用的范围越

窄,数据的相关性就越好,相对标准差就越小。

技术标准按其特性,还可以分为基础标准、方法标准、原材料标准、产品标准、包装标准、安全与环境保护标准等。

三、技术标准的代号与编号

每个技术标准都有自己的代号与编号,代号为汉语拼音字母表示,编号采用阿拉伯数字由顺序号及年代号组成,中间加一横线隔开。如 GB/T 175—1999《硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥》,GB 代表为国家标准,T 代表是推荐性标准、非强制性标准,175 代表国家标准编号,1999 代表在 1999 年发布。也有一些标准是不带 T 的,如 GB 50119—2003《混凝土外加剂应用技术规范》,这表示是强制性的国家标准。

第二节 试验基本技能

材料测试通常包括取样,试验方法设计,测试与试验数据的整理、分析,结果评定等技术问题。本节叙述有关测试技术基础、试验条件的影响等方面的基本技能。

一、测试技术

(一)取样

从研究工作方法论的观点看,人们总是从研究对象的局部入手,进行深入的考察、试验、分析、判断与推理,进而达到对研究对象总体、全面而深刻的认识。从客观上讲,人们不可能对使用的所有材料都进行试验,这一方面是因为某些试验是有破坏性的,材料被破坏以后将不能再使用;另一方面,大量的试验会使检验的频率增高,不仅降低产品的生产效率,而且检验费用增加,经济上不合理。所以,在进行试验之前首先要对材料进行样品的选择即取样,取样必须具有代表性,一般采取标准规定的取样方法和取样数量,多数为随机抽样,即在若干材料中,任意随机地抽取试验用的试样同时样品应该具有足够的数量。不同材料或同一材料的不同测试内容,一般取样方法和取样数量都可能不同,即使是同一材料的相同测试内容,在不同标准中的取样方法也可能不同。

例如水泥的取样,GB 12573—1980 水泥取样方法中规定,对袋装水泥,每 1/10 检验批从每一袋中取样至少 6kg;散装水泥每 5min 取样至少 6kg,封存样应密封保管 3 个月。

混凝土的取样,应在浇筑地点随机取样制作,同时试样的留置应符合以下规定:①每拌制 100 盘且不超过 100m³ 的同配合比的混凝土,取样不得少于一次;②每工作班拌制的同配合比的混凝土不足 100 盘时,取样不得少于一次;③对于现浇混凝土结构,每一现浇楼层同配合比的混凝土(同强度等级),取样不得少于一次;④同一单位工程每一验收项目中同配合比混凝土,取样不得少于一次;⑤每次取样至少应留置一组标准试件(即 3 个 150mm × 150mm × 150mm 试件)经标养至 28d 后送检。

砂石的取样,应自堆场的不同部位、不同高度处选取,其总量应该大大超过试验所需要的用量,混合均匀后采用四分法取样。四分法取样是将试样摊开成一定厚度(砂厚度约 20mm,石子厚度约 40mm)的圆饼,沿相互垂直的两条直线把圆饼分成大致相同的四份,然后取对角线的两份重新拌匀,重复上述过程,直至缩分至材料的数量略大于试验需要的用量为止。对于砂筛

分析试验,取样烘干后重量 500g,砂的表观密度试验取样 300g。同样,石子的筛分析试验重量不少于 $0.2D_{\max}$ 量。

钢筋的取样应从距端部大于 500mm 处截取,拉伸试件长度 = 夹持部分的长度(约 200mm) + 原始标距,常用的为 500mm 左右;反复弯曲试件长度为 150 ~ 250mm;一般每批不大于 60t,热轧光圆钢筋取 2 根拉伸试样、2 根弯曲试样。不同标准可能取样的数量也不一样,如对冷轧带肋钢筋,国标 GB 13788—92 中逐盘 1 根拉伸试样,每批取 2 根弯曲试样;而 JGJ 95—95 中,则取 1 根拉伸试样、1 根弯曲试样。

(二)仪器选择

试验有时需要称取试样的质量,称量时要求具有一定的精确度,如试样要求精度为 0.1g,则应相应选取感量为 0.1g 的天平,亦可选用精度更高的天平。一般称量精度大致为试样质量的 0.1%,但还要考虑试验结果的精度要求。例如在拌制混凝土试验中,砂、石称量精度为 $\pm 1\%$,水泥、水、外加剂的称量精度要求为 $\pm 0.5\%$ 。

对于试样尺寸的测量,同样也有精度的要求,普通情况下,试样尺寸大于 50mm,精度可取 1mm 或更高,而对试样尺寸不大于 50mm,精度可取 0.1mm 或更高。但也应视具体性能试验而定,如测量混凝土的干燥收缩、限制膨胀等,试件尺寸都超过 50mm,但由于其测量数值的变化很小,达 10^{-4} 数量级,其测量精度要求为 0.001mm。

试验机量程的选择,应该预先估计最大荷载,使测试的结果落在量程的 20% ~ 80% 之间,因为只有在此范围内,试验机才能保证试验机规定的精度要求,而在此之外,有可能超过精度要求,从而导致产生更大的误差。

(三)试验方法

将取得的试样进行处理或者加工,以满足试验所需要的形状和数量。试样的制备方法应严格按照各个试验要求的方法进行。测试时,如果有标准,则按标准规定的方法和步骤进行,否则,可参照类似标准或拟订一定的试验方案与方法进行。对于研究性的试验,可根据一定的试验设计原则、设计方法进行相应的试验方案设计,所制定的试验方案应具有一定的可靠程度,并具有一定的试验原理,能准确地反映试验要求,取得的试验结果能够得到同行专家学者的认同,对测试结果能进行比较或者评定,且相对误差较小。

(四)结果计算与评定

对试验所取得的数值,一般需进行数据处理,在实验误差的允许范围内,一般取几次平行试验结果的算术平均值作为最终的试验结果。平行试验的次数,根据材料性能、测试方法和允许误差而定,不同材料、不同测试方法、不同性能有不同的允许误差,试验的最终结果应满足精确度与有效数字的要求。一般有效数字的位数越多,表示观测值的准确度越高。建材试验中,一般取 3 ~ 4 位有效数字。随着国际单位的普及,4 位有效数字越来越多,如砂、石、水泥的密度原单位为 g/cm^3 ,最终结果保留 3 位有效数字,现单位为 kg/m^3 ,应保留 4 位有效数字。

试验的最终目的,即是对样品性能优劣的评定,所以对试验结果进行处理后,应进行评定:是否满足要求,等级如何,得出何种结论等。

二、试验条件的影响

相同材料在不同的试验条件下,如在不同的温度、湿度,不同的加荷速率,不同的试件尺寸

等情况下,会得出不同的试验结果,故在试验中一般要求标明测试的环境条件。

(一)温度的影响

温度对有些材料和性能所产生的影响不大,常温 10 ~ 30℃即可满足要求,但对某些材料和某些性能则影响很大,如混凝土的钢筋锈蚀速率(单位为 $\mu\text{m/a}$):温度每增加 10℃,钢筋锈蚀速率约可提高一倍。故对感温材料,试验时应严格控制温度,如粉状材料密度试验,测定体积时,考虑到液体密度随温度的变化,比重瓶与液体温度应控制在 20℃;又如沥青的感温性很强,故要求针入度、延度等试验须在 25℃的恒温水浴中进行,并可用针入指数(Penetration Index,简称 PI)来表示其温度敏感性。将在不同温度 T 下测定的针入度 P 绘在对数坐标上可得到一条直线,其公式为:

$$\log P = AT + K$$

式中 A ——针入度对温度的敏感性;

K ——常数。

针入指数 PI 为: $PI = 20(1 - 25A)/(1 + 50A)$

PI 值的范围从约为 -3 到约为 +7,表示沥青对温度极为敏感到温度敏感性很低。 PI 值太低或太高都不好,一般要求道路沥青的 PI 在 -1.0 ~ +1.0 范围内。针入度指数反映了沥青偏离牛顿体的程度,当 $PI < -2$ 时,沥青的温度敏感性强,同温度条件下更接近牛顿流体的性质,但在低温时表现明显的脆性特征;当 $PI > +2$ 时,沥青具有明显的凝胶特征,沥青的耐久性不好,此时它的低温脆性虽然小,但会显示较强的荷载速率感应性,流变指数往往较小,在大变形条件或变形速率很低时,抗裂性能变差,很容易产生温缩裂缝。

通常情况下,材料强度随试验时温度升高而降低,随温度降低而升高,如混凝土强度与试验时的温度关系(图 1-1)。

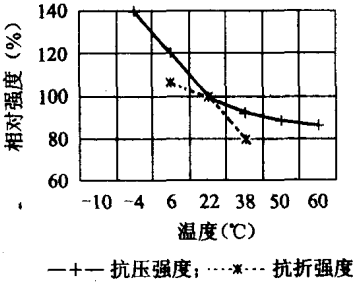


图 1-1 试验时温度对混凝土强度的影响

(二)湿度的影响

不同的湿度环境对材料的某些性能有时也会产生明显的影响,如对碳化引起的钢筋锈蚀,在不会发生锈蚀的干燥环境,碳化速度与时间 t 的 0.5 次方成正比。潮湿环境($RH = 81\%$)下与 t 的 0.4 次方成正比,长期湿润下(高湿度又经常受雨淋)甚至与 t 的 0.1 次方成正比。所以在一些材料的试验中,对材料的湿度也有所要求。表 1-1 列出了水泥、混凝土、砂浆、钢筋四种常用建筑材料对试验室和养护室的温度和湿度要求。

表 1-1 常用建筑材料对试验室和养护室的温度和湿度要求

材 料	试 验 室		养 护 室		水	
	温 度	相对湿度	温 度	相 对 湿 度	温 度	
水泥	(20 ± 2)℃	≥50%	(20 ± 1)℃	> 90%	(20 ± 1)℃	
混凝土	(20 ± 3)℃		(20 ± 2)℃	> 95%		
砂浆	(20 ± 5)℃		(20 ± 3)℃	混合砂浆: 60% ~ 80% 水泥砂浆: > 90%		
钢筋	10 ~ 35℃					

对于试样强度的测试,一般试件湿度越大,测得的强度越低,因为水分会使材料软化或起尖劈作用而产生裂缝,从而降低强度,所以干燥试件的强度高于潮湿试件。而对于脆性材料弯曲强度的测试,湿度的影响可能会引起相反的结果。这是因为试件的不均匀干燥收缩会引起拉应力,即使试件较小,干燥速度很慢,也会导致干燥试件的强度低于潮湿试件。所以试验时试件的湿度应控制在规定的范围内,如木材,由于木材的含水率会较大地影响其强度,为了使试验结果具有可比性,标准规定将试样的测试强度统一换算到 15% 含水率时的强度,其换算公式为:

$$R_{15} = R[1 + \alpha(W - 15)]$$

式中 R_{15} ——15% 含水率时的强度(MPa);

R ——实测强度(MPa);

α ——与木材品种有关的常数;

W ——实测含水率(%)。

(三)试件尺寸的影响

试件受压时,在沿加荷方向发生纵向变形的同时,按泊松比效应也会产生横向变形。试件与试验机承压板变形程度不同,承压板的变形一般小于试件的变形,因而在支承面周界产生摩擦阻力,对试件的横向变形起限制和约束作用,从而提高测试强度。周界与承压面积的比值越大,摩擦阻力也越大,强度越高,故对于同一种材料,小试件测得的强度比大试件的为高。同时这种摩擦阻力的影响范围随着与接触面间距离的变化而变化,距离越远,受到的影响越小,故相同受压面积的试件,高度大的比高度小的测试强度低,可采取涂石蜡等措施来消除这种影响。脆性越小的材料,试件的尺寸效应越小,反之,脆性越大的材料,试件的尺寸效应也越大,表现为高强高性能混凝土试件的强度尺寸效应比普通混凝土更加明显。有研究表明:对于 C70 左右的粉煤灰高性能混凝土,从小试件到大试件,抗压强度、轴压强度的换算系数分别为 0.82、0.88 左右;劈拉强度、抗折强度换算系数分别为 0.59、0.79 左右。Weibull 最弱键理论认为:小试件内部薄弱环节(或严重缺陷)存在的概率较大试件要小,且小试件易密实,这也使小试件测得的强度偏高,如混凝土棱柱体(150mm×150mm×300mm)的抗压强度约为混凝土正方体(150mm×150mm×150mm)抗压强度的 0.65~0.85 倍。

(四)试件受荷面平整度的影响

试件受荷面的平整度也会较大地影响测试强度。如受荷表面粗糙,平整度不够,则会引起应力集中而降低强度,凸出来比凹下去对应力集中影响更大。又如在混凝土强度测试中,不平整度达到 0.25mm 时,其强度可能会降低 1/3,所以受荷面必须平整。在水泥抗折和抗压、混凝土抗压强度测试中规定,成型面一般不作为受压面,如一定要做受压面,必须用适当强度的材料找平。

(五)加荷速度的影响

施加于试件的荷载速度对强度试验的结果有着较大的影响。一般加荷速度越慢,测得的强度越低,因为当加荷慢时,应变有足够的时间发展,应力还不大时由于应变的充分发展,其变形已经达到应变极限(即破坏);反之加荷速度越快,应力急速上升,而应变来不及发展使试件测得的应力偏高,强度偏高。因此对各种材料力学性能的测试,都有加荷速率的规定。如对混凝土试件,以 40MPa/min 的加荷速度测得的抗压强度要比 1MPa/min 的加荷速度测得的强度提高 15% 左右,按规定的速率加荷至极限强度的 90% 左右,并维持荷载不变,则过一段时间,试

件也会破坏。在日本建立了一个强度与加荷速度的关系式:

$$R = R_1(1 + k \lg S) \quad (1-1)$$

式中 R_1 ——0.0069MPa/s 时的强度;

k ——系数, $k = 0.08$;

S ——加荷速度(MPa/s)。

我国国标 GB/T 50081—2002 中规定混凝土抗压强度、弹性模量、抗折强度、劈拉强度测试的加荷速度如表 1-2 所示;GB/T 17671—1999 中规定水泥胶砂抗压强度加荷速度为 (2400 ± 200) MPa/s。

表 1-2 混凝土力学性能测试的加荷速度要求 (MPa/s)

混凝土力学性能	强 度 等 级		
	< C30	C30 ~ C60	≥ C60
抗压强度、弹性模量	0.3 ~ 0.5	0.5 ~ 0.8	0.8 ~ 1.0
抗折强度、劈拉强度	0.02 ~ 0.05	0.05 ~ 0.08	0.08 ~ 0.10

第三节 材料试验机

在材料的力学性能试验中,给试件施加荷载的设备称之为材料试验机。试验机在外观、容量与适用性等方面各不相同,常用的有拉力试验机、压力试验机、万能试验机等,其中拉力和压力试验机一般仅做单一的拉伸和压缩试验,而万能试验机可做拉伸、压缩、弯曲、疲劳等多种试验。

一、试验机的构造原理

试验机一般是由三个系统组成的:加荷载系统、测力系统与试件装置系统。系统彼此之间由机器支架联系在一起,有的试验机还备有自动绘图装置及其他配件。

(一)加荷系统

试验机的加荷系统主要有两种形式:油压式和机械传动式。当加载能力超过 100kN 时一般采用油压传动加载,机械传动加载一般加载压力不大于 400kN,目前已经较少生产。

1. 油压式加荷系统(图 1-2)

油压式加荷系统是利用手动油泵或电动机驱动油泵,将油箱中的油打入工作油缸产生油压,并作用到活塞上,使活塞移动并将力传到试件夹具,给试件加荷,加荷速度由进油量来控制,进油量大则加荷快。目前所用的压力试验机或万能试验机大部分都是油压式的。

目前出现一种电脑自动控制式的加荷系统,其实质与油压加荷系统类似,只是通过电脑控制油门的比例阀来控制加荷速度。

2. 机械传动式加荷系统(图 1-3)

机械传动式加荷系统是利用螺旋与齿轮传动机构式带动装有活动横梁的螺旋杆旋转,使试件受荷,其加荷速度取决于螺旋杆的旋转速度,旋转速度由摩擦传动装置或控制电机速度的变速箱来控制。

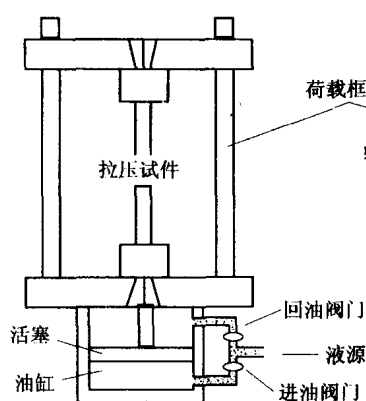


图1-2 油压式加荷系统示意图

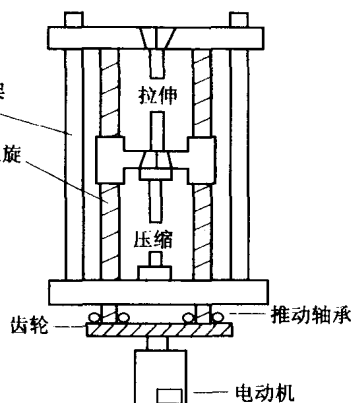


图1-3 机械传动式加荷系统示意图

(二)测力系统

测力系统常见的有螺旋状弹簧测力系统(如 2000kN 压力机)、油压摆锤式测力系统(如万能试验机)、水平杠杆式测力系统(如水泥电动抗折仪)、电脑自动采集系统等。

1. 螺旋状弹簧测力系统

这种测力系统由螺旋状弹簧、测力油缸、刻度盘等组成。当试件受荷时,工作油缸的油压传至弹簧测力计小油缸,在相应油压作用下,小油缸活塞下降带动弹簧变形,其变形值与油缸油压成正比,并通过钢皮带或蜡线带动刻度盘上的指针旋转而显示荷载读数(图 1-4)。在同一试验机上,一般具有粗细不同的弹簧,通过改变弹簧的粗细来选择合适的量程。

2. 油压摆锤式测力系统

大多数试验机是采用油压摆锤式的测力机构,其测力系统由测力油缸、摆锤、齿条与刻度盘等组成,由工作油缸带动测力小油缸,以相应的油压使小油缸活塞下降,带动摆锤扬起,平移齿条,使装有指针的齿轮旋转,指出荷载读数(图 1-5)。摆锤的重量一般是可以变化的,通过改变摆锤的重量,可以选择不同的量程。一般摆锤数量为三个,相应量程为试验机最大吨位的 20%、50% 和 100%。还有一种类似于油压摆锤式的杠杆摆锤式测力机构,它的工作原理与油压摆锤式相似,只是通过杠杆系统使摆锤扬起,推动齿条、齿轮,使指针旋转指出荷载的读数。

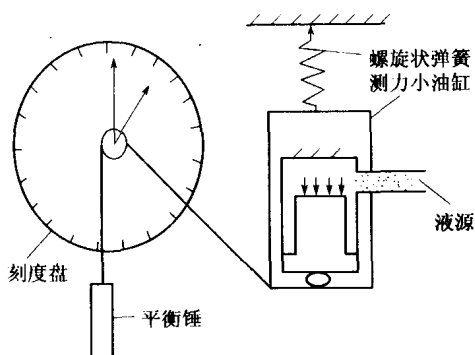


图 1-4 螺旋状弹簧测力系统示意图

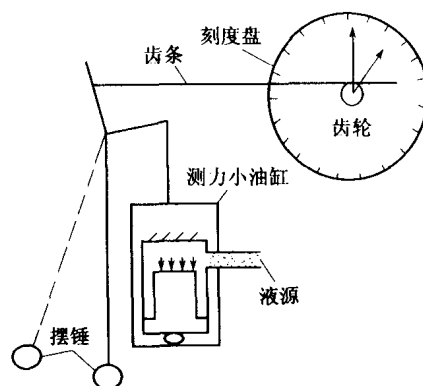


图 1-5 油压摆锤式测力系统示意图