



# 多种混凝土材料的 本构关系和破坏准则

宋玉普 编著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)



# 多种混凝土材料的 本构关系和破坏准则

宋玉普 编著

水利部科技专著出版基金资助项目

本书由大连市人民政府资助出版  
The published book is sponsored  
by the Dalian Municipal Government



中国水利水电出版社

[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书系统地总结了普通混凝土、钢纤维混凝土、轻骨料混凝土和钢纤维轻骨料混凝土在复杂应力状态下的变形和强度特性、相应的本构关系和破坏准则及工程应用,反映了国内外在这一研究领域的最新进展以及本书作者的研究成果。全书共分十章,内容包括:复杂应力状态下混凝土变形和强度试验的试验装置系统,混凝土本构关系和破坏准则分析基础,多向应力状态下普通混凝土(包括全级配大骨料混凝土)、钢纤维混凝土、轻骨料混凝土、钢纤维轻骨料混凝土的本构关系和破坏准则,多种混凝土材料的通用本构关系和破坏准则,混凝土本构关系和破坏准则在非线性分析和工程设计中的应用。

本书可供从事水利、土木结构工程科研和设计工作的科技人员参考使用,也可供高等院校有关专业的教师和研究生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

多种混凝土材料的本构关系和破坏准则/宋玉普编著. -北京:中国水利水电出版社, 2002

ISBN 7-5084-1235-4

I. 多… II. 宋… III. ①混凝土-本构关系②混凝土-破坏分析  
IV. TU528.01

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第082640号

书 名	多种混凝土材料的本构关系和破坏准则
作 者	宋玉普 编著
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266(总机)、68331835(发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092毫米 16开本 17.5印张 415千字
版 次	2002年12月第一版 2002年12月第一次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	36.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 出版说明

书籍是人类进步的阶梯。科技图书集聚着科学研究和发明创造的成果，凝结着人们生产活动、科学实验的实践经验和聪明才智。当今，在振兴中华的“四化”建设中，要把科学技术转化为现实的生产力，科技图书的出版是一个重要的环节。它担负着传播科技信息，扩大科技交流，推广科技成果，普及科技知识，培养科技人才，积累科学文化，提高全民族科技意识和劳动者素质的重任，是科技事业的一个重要组成部分。

改革开放以来，我国的科技出版事业取得了飞速的发展。但在还很不完善的社会主义市场经济中，科技图书出版的合理经营机制尚未形成，“出书难、买书难、卖书难”一直困扰着许多科技人员和出版工作者。特别是一些专业性很强的科学专著，发行范围有限，出版更为困难，影响了科学技术的发展。广大知识分子在不断呼吁，出版界也竭力探索解决这一问题的途径。1985年以来，中央领导同志和中宣部曾多次指示，要求国家和各主管部门筹款，为专家学者撰写学术专著建立出版基金。其后，从中央到地方各类出版基金陆续建立，有力地推动了学术专著的出版。

水利在我国具有悠久的历史，对治国安邦起着重要的作用。新中国建立40多年来，水利建设事业取得了举世瞩目的成就，已成为我国国民经济的基础设施和基础产业，是发展工农业生产的命脉。为了支持水利科技专著的出版，以适应我国水利科研、设计、建设、管理、教学的需要，水利部于1991年9月5日向全国发布了《水利部科技专著出版基金试行条例》，拨出专款用于资助科技专著的出版，并相应地建立了出版基金评审委员会和办公室。

本出版基金主要用于资助有明显社会效益而印数较少的水利优秀科技著作的出版，包括：学术水平高、内容有创见、在学科上居领先地位的水利基础学科理论专著；反映水利重大科研成果或填补我国水利科技某个空白领域的学术专著；在水利工程技术和经济管理方面有重大科学和实用价值的专著；对我国水利科技发展有重要参考价值的国外水利科技著作的中译本。申请者在已有详细编写提纲和部分样稿时，即可向本基金办公室提出申请。

本出版基金申请项目的评审，坚持“专家评议，公平竞争，择优支持”的原则，其做法是：对所有申请项目，先由基金办送请三名同行专家评议，然后再提交评审委员会讨论、评选。对被通过的申请项目，即转入中国水利水电出版社的计划，由基金赞助出版。

我们希望本出版基金的实施对推动水利科技的进步和人才培养，对促进水利建设事业的发展，会起到积极的作用。为此，我们热切地希望水利界的学者、专家，能潜心将自己的创见和经验撰写成专著，踊跃向本出版基金提出申请出版，为繁荣我国的水利科技事业添砖加瓦，奉献自己的才智和力量。

水利部科技专著出版基金委员会

1997年11月

SA1176/01

# 前 言

普通混凝土、钢纤维混凝土、轻骨料混凝土和钢纤维轻骨料混凝土的变形和强度特性及相应的本构关系和破坏准则是大型重要的混凝土结构非线性分析和设计的基础。国内外的有关设计规范已陆续将这些内容纳入规范的正式条文。为了适应这一发展的需要，本书系统地总结了这一领域的研究成果，以供有关科技、设计人员和高等院校师生参考应用。

本书介绍的主要内容是作者自 1985 年以来从事国家“七五”、“八五”重大科技攻关项目和国家自然科学基金、建设部科学基金资助项目取得的研究成果的总结，同时也介绍了国内外有关的研究成果和研究现状。

全书共分十章。第一章介绍了多种混凝土材料本构关系和破坏准则研究的意义及其有关概念；第二章叙述了目前国内外混凝土三轴试验装置的类型及各自的优缺点，并集中介绍了公认的效果最好的三轴互相独立的试验装置系统及三轴加载试验方法；第三章介绍了建立混凝土本构关系和破坏准则所必须的应力张量、应力不变量、应变张量、应变不变量和塑性理论的某些基础知识。第四章总结了目前国内外普通混凝土本构关系和破坏准则的发展现状，并在介绍混凝土多轴应力状态下的变形、强度和破坏形态的试验结果的基础上，集中介绍了几个有代表性的适用于工程实际分析和设计的本构关系和破坏准则模型；特别介绍了包含目前国内外较少开展的混凝土三轴拉及平面应变状态下的本构关系和破坏准则；大体积混凝土结构中应用的全级配大骨料混凝土的强度、变形及本构关系和破坏准则；细观层次混凝土的强度和本构关系；第五章至第七章分别叙述了钢纤维混凝土、轻骨料混凝土和钢纤维轻骨料混凝土的特点及应用，在介绍了各自在多轴应力状态下的变形、强度和破坏形态试验结果的基础上，集中介绍了各自的本构关系和破坏准则；为了便于工程设计和非线性有限元分析的应用，在第四章至第七章介绍的各种混凝土材料的本构关系和破坏准则的基础上，第八章和第九章分别给出了适用于各种混凝土材料的通用破坏准则和本构关系；第十章给出了便于工程设计应用的混凝土破坏准则，并给出了应用本章和第四章的本构关系和破坏准则分析各种大体积混凝土结构的实例，并与按单轴材料强度准则和线弹性分析方法所得的结果进行了比较，证明了应用复杂应力状态下各种混凝土材料的本构关系和破坏准则进行结构分析和设计的优越性。

本书在内容组织和介绍方面的最大特点是先介绍试验成果，后介绍理论模型。理论模型的建立均以试验研究成果为基础，而在试验成果介绍中，毫无保留地给出了大量宝贵的实测数据，这在同类书中是少见的，从而为读者从事这一领域的研究和设计应用提供了试验依据。但由于混凝土类材料的力学性能离散性很大，再加之多轴混凝土变形和强度的试验方法尚无统一标准，所以有些试验数据可能与国内外有关资料介绍的数据有差别，甚至

差别很大。作者在本书中实事求是地提供了这些数据，并在现阶段的知识水平上，认为它们是正确的，如有不当，敬请读者批评指正，以便去粗取精，去伪存真，提高我们的认识水平。

本书关于普通混凝土的三向受拉及平面应变状态下的变形和强度试验，钢纤维混凝土、轻骨料混凝土和钢纤维轻骨料混凝土的三轴变形和强度试验，全级配大骨料混凝土的拉压状态下的变形和强度试验成果在国内外均属罕见，很多试验数据填补了这一研究领域的空白，为实际应用提供了宝贵的试验依据，同时介绍了应力空间和应变空间的本构关系和破坏准则。建立的统一的内时损伤本构模型和破坏准则便于工程应用，同时还介绍了重复荷载作用下混凝土的本构关系。

本书介绍的研究工作是在我的导师赵国藩院士的指导下，在彭放博士（教授）、胡倍蕾博士、王宝庭博士（教授）、朱尔玉博士（副教授）、蔡澄清硕士、李玉君硕士、冯涤海硕士及结构研究室的靳国礼工程师、沈吉纳工程师、曲秀华工程师、张克顺技师等的参与下完成的，王宝庭博士还参编了第四章第八节，朱尔玉博士参编了第四章第六节，在此表示衷心感谢。同时，还要感谢为有关科研项目提供经费资助的国家自然科学基金委员会、建设部科学基金委员会、国家计委、国家电力公司成都勘测设计研究院。感谢水利部科技专著出版基金委员会和大连市学术专著出版基金的资助。

限于作者水平，书中难免有缺点乃至错误，敬请读者批评指正。

**宋玉普**

2002年10月

# 目 录

出版说明

前 言

第一章 绪论	1
第二章 复杂应力状态下混凝土变形和强度试验的试验装置系统	3
第一节 试验装置系统的类型	3
第二节 三轴互相独立的试验装置系统的组成	5
第三章 混凝土本构关系和破坏准则分析基础	12
第一节 指标符号和求和约定	12
第二节 应力张量及其不变量	16
第三节 八面体上的应力及 Haigh - Westergard 坐标中的应力	19
第四节 应变张量及其不变量	21
第五节 塑性力学的特点及应力—应变曲线的简化计算模型	24
第六节 屈服准则	26
第七节 加载和卸载准则	27
第八节 全量理论（形变理论）的应力—应变关系	28
第九节 增量理论（流动理论）的应力—应变关系	29
第四章 多向应力状态下普通混凝土的本构关系和破坏准则	32
第一节 混凝土本构关系和破坏准则的发展现状	32
第二节 二向应力状态下普通混凝土的破坏形态和破坏准则	36
第三节 二向应力状态下普通混凝土的变形和本构关系	41
第四节 三向应力状态下普通混凝土的破坏形态和破坏准则	47
第五节 三向应力状态下普通混凝土的变形和本构关系	64
第六节 全级配大骨料混凝土的破坏形态和破坏准则	90
第七节 全级配大骨料混凝土的变形和本构关系	117
第八节 细观层次混凝土的强度和本构关系	132
第五章 多向应力状态下钢纤维混凝土的本构关系和破坏准则	179
第一节 钢纤维混凝土的增强机理	179
第二节 三向应力状态下钢纤维混凝土的破坏形态和破坏准则	182
第三节 三向应力状态下钢纤维混凝土的变形和本构关系	192
第六章 多向应力状态下轻骨料混凝土的本构关系和破坏准则	202

第一节	轻骨料混凝土的特性及应用	202
第二节	二向应力状态下轻骨料混凝土的破坏形态和破坏准则	203
第三节	二向应力状态下轻骨料混凝土的变形和本构关系	209
第四节	三向应力状态下轻骨料混凝土的破坏形态和破坏准则	212
第五节	三向应力状态下轻骨料混凝土的变形和本构关系	219
<b>第七章</b>	<b>钢纤维轻骨料混凝土的本构关系和破坏准则</b>	<b>227</b>
第一节	钢纤维轻骨料混凝土的特点	227
第二节	三向应力状态下钢纤维轻骨料混凝土的破坏形态和破坏准则	228
第三节	三向应力状态下钢纤维轻骨料混凝土的变形和本构关系	238
<b>第八章</b>	<b>多种混凝土材料的通用破坏准则</b>	<b>245</b>
第一节	多种混凝土材料破坏曲面的特点	245
第二节	多种混凝土材料的通用破坏准则	247
<b>第九章</b>	<b>多种混凝土材料的通用本构关系</b>	<b>252</b>
第一节	多种混凝土材料的通用损伤演变方程	252
第二节	多种混凝土材料的通用本构关系	254
<b>第十章</b>	<b>混凝土本构关系和破坏准则在非线性分析和工程设计中的应用</b>	<b>256</b>
第一节	多轴应力状态下混凝土破坏准则在混凝土坝设计中的应用	256
第二节	混凝土本构关系和破坏准则在混凝土坝非线性分析中的应用	260
第三节	混凝土本构关系和破坏准则在混凝土海洋采油平台非线性分析中的应用	264
<b>参考文献</b>		<b>269</b>



# 第一章

## 绪 论

混凝土是工程中广泛使用的一种建筑材料。其力学特性的研究对充分发挥材料强度,提高设计水平,降低工程造价具有十分重要的意义。但由于受试验设备及试验手段的限制,以往的混凝土材料力学特性研究多局限于单轴受力状态,其相应的设计方法多依据线弹性分析及材料单轴强度准则,远不能满足大体积混凝土结构,如混凝土重力坝及拱坝、海洋采油平台、核反应堆安全壳及压力容器、大型炼钢炉基础、大型地下工程混凝土衬砌等设计的需要,因为这些结构大都在非线性复杂应力状态下工作,其受力性能与单轴应力状态差别较大,导致按单轴强度准则设计的结构可能偏于保守,如处于二轴或三轴受压状态的部分;也可能偏于危险,如处于二轴或三轴拉压状态的部分。

近 20 年来,随着高速度、大容量计算机的出现以及有限单元法等计算技术的迅速发展,传统的试验及设计分析方法面临着挑战。人们的视野已从传统的弹性设计思想发展到按非线性分析进行设计,因为这可更有效地发挥材料的潜力。从而导致有关混凝土在复杂应力状态下的变形和强度的试验及本构模型与破坏准则的研究日益受到重视,因为这是结构非线性分析及发展结构设计理论的基础。与此同时,人们也一直在寻找着其他新型混凝土材料,试图从根本上克服普通混凝土自重大、抗裂性差等的先天不足。目前在工程中得到广泛应用的钢纤维混凝土及轻骨料混凝土就是这种新型混凝土材料的典型实例,如钢纤维混凝土溢流坝面及喷锚支护、轻骨料混凝土剪力墙板、船坞等。与普通混凝土一样,新型混凝土材料的迅速发展同样已经或即将面临着非线性分析赖以实现的基本问题——材料的破坏准则及本构模型。而即便对有几十年研究历史的普通混凝土而言,其破坏准则特别是本构模型还远没有得到完善甚至统一的认可。因此,计算机在结构分析中的应用以及新型混凝土材料在材质及种类上的迅速发展,迫使我们尽快地提出能较好地反映混凝土实际性质的破坏准则及本构模型。否则,对于普通混凝土而言,就无法解决高精度算法与粗略模型间精度不匹配的矛盾;对于新型混凝土材料而言,更无法消除仅有计算方法而无模型依据的严重反差或理论滞后。因此,深入开展破坏准则及本构模型的研究,无论对普通混凝土还是对新型混凝土材料,都具有重要的理论意义和实用价值。

材料的本构关系 (constitutive relations) 和破坏准则 (failure criteria) 是描述材料特性的数学表达式。材料的本构关系是描述材料在时、空中的内部结构的力、温度、变形等之间的关系和运动规律的数学表达式,它描述的是一个变形或运动过程。而材料的破坏准则则是描述材料达到不再能承受所要求的变形或承载能力的应力或应变状态的空间坐标曲

面，它描述的是一个变形或应力的瞬时状态。

材料的本构关系包括时间、温度、力、变形、速度、加速度等多种因素。但在常温、不考虑与时间有关的因素的短期静力加载的情况下，材料的本构关系就是应力与应变关系。

在建立材料的破坏准则时，首先必须明确破坏的定义。这里破坏的含义很广泛，如线弹性极限、屈服极限、初始开裂、承载能力极限状态、过大的变形等均可被定义为破坏，并建立相应的破坏准则，本书介绍的破坏准则主要指承载能力极限状态的破坏准则或变形极限状态的破坏准则。

大连理工大学自 1985 年以来，结合国家“七五”、“八五”重大科技攻关项目和国家自然科学基金和建设部科学基金项目，在自行研制的多功能混凝土三轴试验机上进行了大量的有关混凝土、钢纤维混凝土、轻骨料混凝土和钢纤维轻骨料混凝土的变形和强度试验研究，完成的试件总数达到 1000 多个，应力比不仅包含压压、拉压、三向受压、三向拉压，而且包含了目前国内外均较少开展的三向受拉及平面应变状态下的压压及拉压状态，同时进行了全级配大骨料混凝土大尺寸试件在平面拉压状态下的变形和强度试验，并在此基础上建立了相应的本构关系和破坏准则。本书重点反映了上述研究成果，同时也介绍了目前国内外在这一领域的最新发展状况，希望能对复杂应力状态下混凝土结构的设计和非线性分析提供必须的材料本构关系和破坏准则，为今后有关设计规范考虑混凝土多轴强度和非线性分析的修编提供依据。

但目前有关多种混凝土材料的多轴本构关系和破坏准则的研究大部分局限于常温、静力荷载作用下，且没有考虑时间因素，而在实际工程中有时会遇到高温下或火灾后重大复杂结构的非线性分析问题，这就需要建立高温下混凝土的本构关系和破坏准则；在大体积混凝土结构考虑多轴应力影响的蠕变分析中，需要建立考虑时间因素的混凝土多轴徐变本构关系和破坏准则；在复杂结构考虑动力和疲劳荷载作用下的多轴应力非线性分析中，需要建立动力荷载作用下混凝土的本构关系和破坏准则。虽然本书在第四章第五节中介绍了重复荷载下混凝土的本构关系，但其模型仅与单轴重复荷载作用下的试验结果进行了比较验证，因为多轴重复荷载作用下混凝土的变形和强度的试验资料很少见。为此，尚需进行大量的相应条件下材料在多轴应力下的变形和强度的试验研究，并在此基础上建立相应的能反映材料本质特性的本构关系和破坏准则，以满足工程分析和设计的需要。

## 第二章

# 复杂应力状态下混凝土变形和强度试验的试验装置系统

为研究混凝土在复杂应力状态下的受力性能，很多国家从 20 世纪 60 年代开始研制多轴加载设备<sup>[1]</sup>。我国水利电力部水利水电科学研究院<sup>[2]</sup>、清华大学<sup>[3]</sup>、大连理工大学<sup>[4]</sup>从 80 年代开始研制混凝土多轴应力试验装置，并收到了较好的效果。复杂应力状态下，混凝土变形和强度试验结果的准确性，主要取决于试验装置的加载系统及荷载和变形量测量系统的可靠性。在进行复杂应力状态下混凝土的变形和强度试验前首先必须选择合适的试验装置，并了解它的组成，各组成部分的特性、荷载和变形标定结果及详细的试验过程及要求，只有这样，才能取得满意的试验结果，否则花费了大量资金，动用了大量人力、物力，占用了很长的时间，却没有取得可靠的试验结果，这在多轴混凝土强度和变形试验中是经常出现的问题，应引起研究者的注意。

### 第一节 试验装置系统的类型

目前的混凝土多轴应力试验装置，按机架种类不同大体分为两类：整体式和分离式。

60 年代初，埃森的 Krupp 通用建筑公司研制出来的三轴试验装置的机架就是焊接成整体结构（图 2-1）。这种装置的两个轴是刚性连接的。由于应用刚性机架，所以在试验中，试件被挤到一个角里，当变形增大时试件受到的不对称应力增大。因为轴是互相固定死的，变形得不到互相补偿 [图 2-2 (a)]。这种机械限制在试件中产生强制应力，使实测破坏荷载并不能真实地代表试件的破坏荷载。为消除这种强制应力，60 年代末慕尼黑工业大学大体积工程研究所制成了一种由两个预应力混凝土框架组成的试验装置（图 2-3）。其中一个框架以弹性方式挂在另一框架上，这样就排除了两个轴方向的相互影响，并采用钢刷传力，结果减小了在试件中产生的不对称应力。这一结果，导致人们去考虑采用分离式机架结构装置。前西德联邦材料检验局的三轴试验装置就是分离结构（图 2-4）。它由

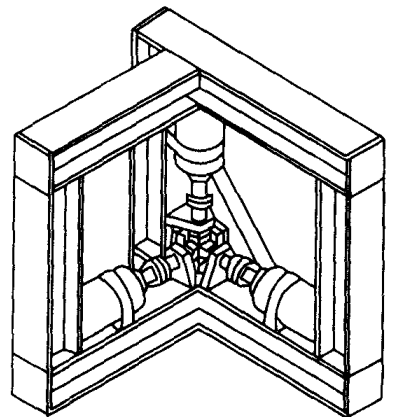


图 2-1 整体式三轴试验机示意图

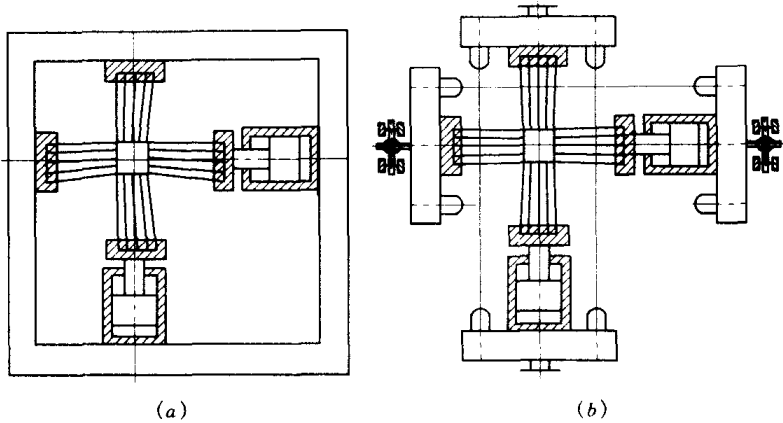


图 2-2 试件受力情况示意图

(a) 整体式材料试验机; (b) 由几部分组成的材料试验机

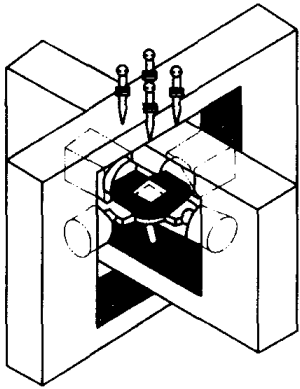


图 2-3 两个独立框架的双轴材料试验机

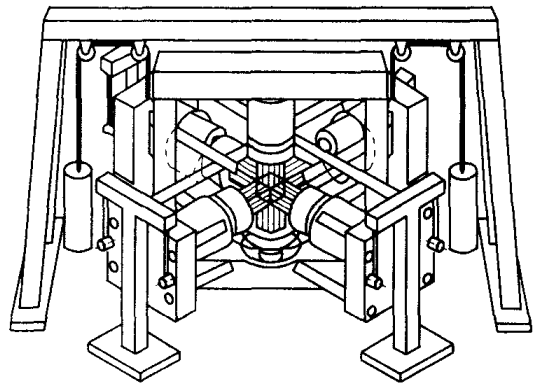


图 2-4 由几部分组成的分离式三轴试验机

三个独立的互不相连的机架组成，在水平方向的两个机架，一个用缆索悬挂起来，另一个放置在滚动轴承上。垂直机架用平衡重物悬挂起来，能适应试件在水平方向和垂直方向上受应力而产生的变形。分离式机架装置使得各轴之间结构简单，并易于安装和调整，量测装置也易于布置，所以近年来研制的三轴试验机多为分离式结构。但以往的独立三轴试验机均未很好地解决垂直方向变形对称问题，如图 2-5 所示的荷兰 Van Mier 研制的试验机就存在试件在竖向轴变形不对称问题。我国较先进的混凝土三轴试验机也都是分离结构，大连理工大学的混凝土三轴试验机<sup>[4]</sup>，三个互相垂直方向的试验机架均为独立的。水平面上的两个互相垂直的机架放置在有滚动轴承的机座滑道上，摩擦力很小，竖直方向的机架底部带有附加液压缸，两端带有导轨，安置在竖直固定刚架中。附加液压缸可根据竖向的浮重要求自动调整液压大小，保证试件在竖向变形对称。

按试件受力状态的不同，三轴试验机分为常规三轴试验机和真三轴试验机。常规三轴试验机类似于用于土壤和岩石力学多轴压试验用的试验机，轴向机械加荷，侧向液压加荷，试件为实心圆柱形或空心圆柱形。试验机主要由机械加荷部分和一个带活塞的圆柱形的高压油缸及油泵组成。试件装入油缸的活塞下部，当油泵往油缸内泵油时，试件承受侧

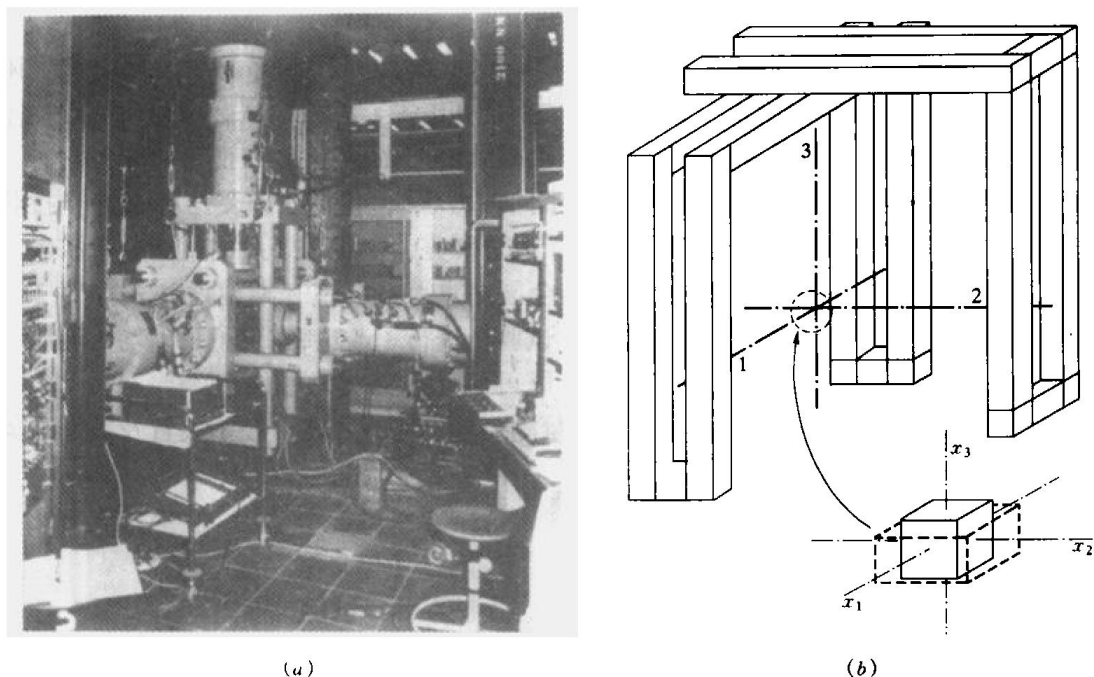


图 2-5 分离式三轴试验机

(a) 三轴试验机全貌；(b) 分离式三轴试验机

向油压，而机械加荷装置通过活塞杆对试件施加纵向荷载。为防止高压油渗入混凝土试件的裂缝，降低试件强度，试件表面要包一层橡胶薄膜。由于这种试验机与常规的岩土力学三轴试验用的试验机类似，所以称为常规三轴试验机。其特点是有定型产品，侧向液压均匀，无摩擦；可模拟多种受力状态，如文献 [5] 采用厚壁圆筒试件模拟了压—压—拉状态，还可模拟三轴压、二轴受压、二轴拉压。常规三轴试验机的最大弱点是不能模拟中间主应力的影响，也不能模拟三轴受拉试验。真三轴试验机是针对常规三轴试验机不能模拟中间主应力对混凝土多轴强度影响而于 70 年代发展起来的适于各种应力状态的试验机。其三向应力比可任意变化。后面将详细介绍这种试验机的组成。

按控制条件，三轴试验机分为荷载控制、变形控制和荷载变形控制试验机。由普通液压试验机改造成的三轴试验机和采用比例阀的试验机均只能进行荷载控制，而三向采用伺服阀的试验机三个方向既可进行变形控制，也可进行荷载控制。由于伺服阀系统较昂贵，所以有的试验机仅在一个方向采用伺服系统，以便实现变形控制，而另两方向采用液压系统，仅能进行荷载控制。

## 第二节 三轴互相独立的试验装置系统的组成

下面结合大连理工大学第三代三轴互相独立的混凝土试验装置系统说明其组成。

为了解混凝土在复杂应力状态下的特性，特别是在一般三轴加载和平面应变状态下的变形与强度特性，大连理工大学自 1985 年开始研制混凝土三轴试验装置系统，并于 1986 年投入使用。利用该套试验系统，完成了混凝土在平面应力、平面应变及一般三轴加载作

用下的变形和强度试验。

1987年底,先后受能源部和水利部水利水电规划设计总院、成都勘测设计院和贵阳勘测设计院的委托,结合国家“七五”、“八五”攻关项目和国家自然科学基金项目研究混凝土及钢纤维混凝土、轻骨料混凝土和钢纤维轻骨料混凝土在平面应变及一般三轴应力状态下的变形和强度特性。为了适应不同试件尺寸和不同应力状态,包括三向受压和三向受拉状态的要求,并提高试验效率,对原试验装置进行了改进和完善。经改进后的试验装置扩大了适用范围,提高了试验效率和精度。1999年,结合国家重点实验室二期建设和教育部211工程重点学科建设,又投资100多万元对原三轴试验机进行了改造,实现了三向均为液压伺服控制,既可进行静力试验,也可进行动力试验,既可荷载控制,也可变形控制。

该系统由四部分组成:加载装置、应变量测装置、荷载和变形控制装置及数据采集处理装置。

## 一、加载装置

加载装置包括承力框架、加载头、液压缸、加压泵和荷载测读装置。

三个方向的加载框架的组成基本相同,都由4根直径为90mm的丝杠与两端的承力组合钢板连接而成(图2-6),其一端用于固定液压缸,另一端安置荷载传感器。在液压缸和荷载传感器上安装加载头和带球面铰的加载块或钢刷(图2-7~图2-10)。三向受拉

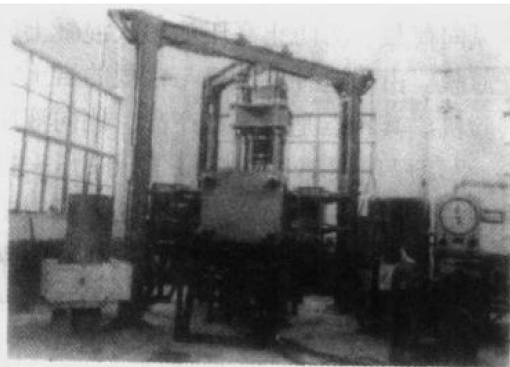


图 2-6 试验机承力框架及配重全貌

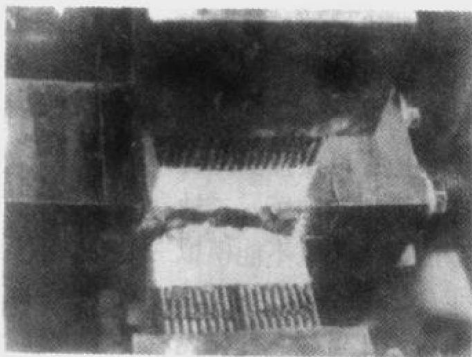


图 2-7 三向受拉后试件破坏形态及钢刷加载图

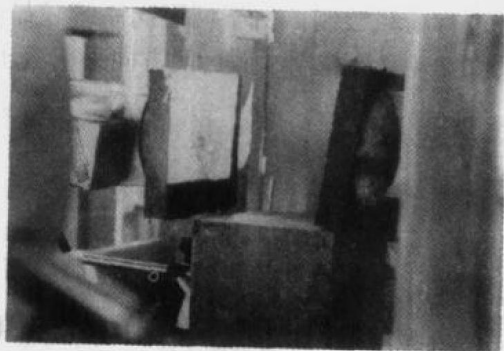


图 2-8 受压试件的球面加载块



图 2-9 拉断后的试件及加载头、加载块

时,为消除加载块对试件的受拉约束,主拉向的试件表面与加载块用建筑胶粘结,而非主拉向的试件表面,即受拉后将形成裂缝的四个表面与钢刷用建筑胶粘结。为了防止建筑胶浸入刷杆间,以保证钢刷受拉张开,粘结前用滑石粉将刷杆间的空隙塞满,并用丙酮将刷杆顶面擦净,再与试件粘结。受压时,为减少试件表面与加载块间的摩擦约束,采用三层塑料薄膜,各层间涂硫化钼油膏的减摩措施。试验证明这可达到较好的减摩效果。如采用本试验装置的钢刷直接加压力,就不再需要采用减摩措施。

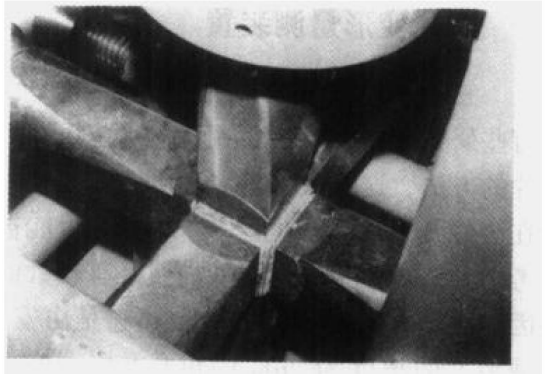


图 2-10 正在受压的加载头、加载块

竖向承力框架底部带有附加液压缸和弹簧,两端带有导轨,安装在竖向固定刚架中,附加液压缸的液压大小由竖向的浮重大小确定。从而保证了竖向加载位置及试件上下两面变形一致,避免了一般试验机竖向只能使试件上表面压缩、底表面不动而引起的不对称变形。互相正交的两个水平向承力框架通过带有滚轮的 4 个小车安装在底固定支承架上(图 2-6)。每一向的水平承力框架都可自由移动,这既便于试件调位,又可使试件两面同时均匀受力。由于三个方向的承力框架互相独立,且正交,并可沿各自的轴向自由移动,从而避免了机械限制在试件中产生的强制应力。

液压缸是由大连拉伸机厂特制的;额定压力为 21MPa,产生的最大压力为 2500kN,最大拉力为 500kN,最高工作频率 10Hz,最大行程为 150mm(图 2-11)。

液压缸的压力油是由加压泵供给的,本装置系统有两个泵站。当进行静力试验时,采用小的泵站,其技术指示为:流量 100L/min,压力 21MPa。当进行疲劳、冲击等动力试验时,采用由美国 MTS 公司引进的结构疲劳试验系统的泵站,它的流量为 450L/min,压力 21MPa。

每一向荷载测量都由安装在承力框架组合钢板上的拉压荷载传感器来实现的,它是由上海华东电子仪器厂生产(图 2-12)。荷载传感器的额定压力为 2500kN,拉力为 500kN,为了根据测量得到的荷载值控制三个加载方向上的应力比及实现自动采集荷载值,在每一向的荷载传感器上都安装了荷载放大器。

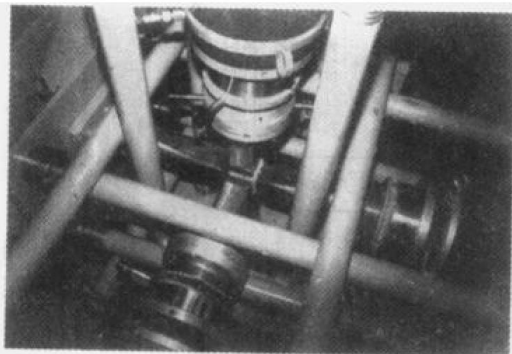


图 2-11 液压缸

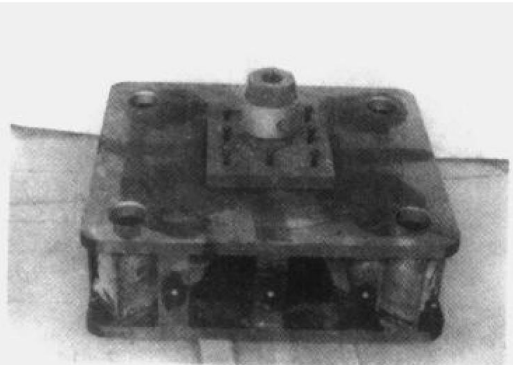


图 2-12 安装在承力组合钢板上的荷载传感器

## 二、变形量测装置

三轴加载试验的变形量测是比较困难的。有些研究者曾采用在混凝土试件侧面埋置应变片的方法，这不仅影响了标准试件的性能，且在试件开裂、膨胀过程中，应变片可能被破坏。考虑到该试验系统在试件加载区有较大的空间，因此决定采用外部量测装置，它是由安装在加载头上的精度为  $2\mu\text{m}$  的位移传感器 (LVDT) 和放大器组成 (图 2-13)。传感器测得的位移信号经放大器输送到计算机自动采集。

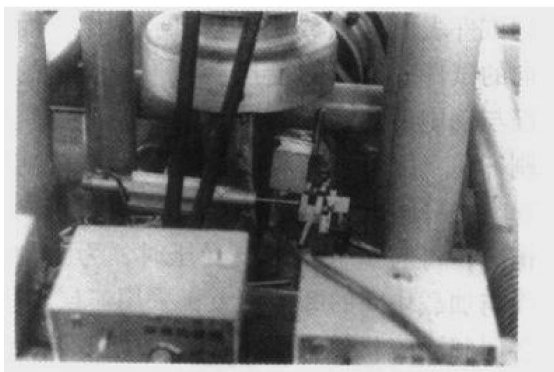


图 2-13 安装在试验机上的位移传感器和放大器

## 三、荷载和变形控制装置

本系统的荷载和变形控制均由计算机自动实现。该三轴试验系统具有三套类似的液压伺服驱动系统，即  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个轴向，每个方向的工作原理基本相同，现以一个方向为例进行说明 (图 2-14)。

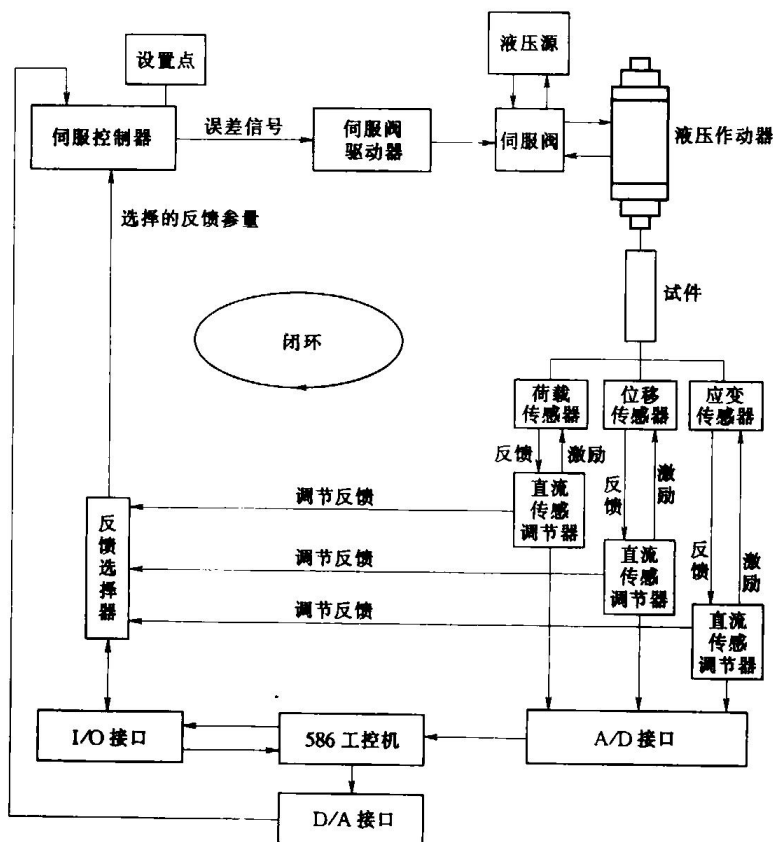


图 2-14 三轴液压伺服系统原理

按实验要求，计算机发出控制过程信号，经 D/A 接口转换成模拟信号，输入到伺服



控制器,作为输入信号激活阀控制器来驱动伺服阀,使液压作动器向试件加力,试件产生物理变化,由传感器发出控制信号使信感器工作,荷载传感器检测试件所受力,位移传感器检测试件被拉伸或压缩的距离,试件的变形由应变传感器测出,这三个参量经传感调节器送至反馈选择器。反馈选择器按实验要求选一路信号送至液压伺服控制器作为反馈值,形成负反馈闭环控制器,保证作动器能实时跟踪计算机的给定信号运行。

#### 四、数据采集处理装置

本系统的数据采集处理由计算机自动实现,如图 2-14 所示,三路测试信号(位移、荷载、变位)经 A/D 接口转换成数字信号由计算机采集,并作相应的存储、画图等处理。

#### 五、试验操作过程

加载试验分为静态试验与动态试验,各试验又分为单轴、双轴、三轴加载,这三种试验原理相同,现在以三轴加载为例说明试验过程。

##### 1. 系统设置

系统设置分为参数设置和通道设置。

(1) 加载参数设置:根据试验要求设置加载参数:加载方式、采集方式、定时采集周期、定幅采集间隔、主从轴加载比例、控制参数等。

采集数据方式有两种:定时采集与定幅采集。在本系统中,要采集三种参量:荷载、位移、应变。设置时,主要设置荷载参量值,定时采集按照一定的时间间隔连续采集,时间间隔一般由操作者设定,计算机默认值为 1ms;定幅采集按主通道一定的电压变幅间隔连续采集,这是最好的采集方式,可以更直接地将采集的数据与输出的数据比较,但无论何种采集方式,为了克服波动干扰,每次采集 10 个数据取其平均值作为一次采集数。

荷载比例值根据试验要求由操作者设定,为了使系统安全运行,操作者要预先设定试件所能承受的最大荷载值。加载参数既可由计算机默认,又可以由操作者自行设置,方便灵活。

(2) 反馈参数设置:在自动控制系统中,反馈是灵魂,反馈形式是本系统的关键,是区别于其他系统的特点。在系统运行过程中,系统根据试件破坏程度,判断是否进行反馈转换,如由荷载反馈转换为应变反馈,在系统运行之前要进行反馈参数设置,系统进行自动反馈转换必须在某一定值处,这一定值也可以由操作者根据实际情况自行判断得出。人工反馈控制转换也有两种情况:一种是由操作者随时使系统暂停运行,再由操作者手动做反馈控制转换;另一种是操作者设定要暂停时的荷载值,当计算机采集的数据与设定值相同时,系统自动停止,操作者做人工反馈控制转换。

(3) AD/DA 接口输入输出通道设置:计算机输出和采集的每一路信号,都对应 D/A、A/D 接口卡的一个通道,根据硬件电路、软件对通道进行设置,每一个轴都有两个控制通道:通道 1 和通道 2,这是因为系统硬件电路在设计过程中,考虑到在同一个通道反馈控制转换时,由于反馈控制信号的电压不同,可能会导致反馈转换不平滑,或转换失败,以致系统崩溃,所以设计成两通道,输出转换前后的两种控制电压信号。采集接口卡的采集通道共有 32 道,操作者根据硬件电路的连接选定相应参量的采集通道。