

清华大学抗震抗爆工程研究室

科学研究报告集

第6集

混凝土力学性能的试验研究



清华大学出版社

1996

清华大学抗震抗爆工程研究室

科学研究报告集

第6集

混凝土力学性能的试验研究

清华大学出版社

1996

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本论文集收入的是清华大学结构工程研究所近年来关于混凝土重要力学性能方面的试验研究成果。主要内容有:混凝土的多轴强度和破坏准则;偏心受压和受拉的应力-应变全曲线;高强混凝土的抗压和抗拉疲劳性能;火山渣混凝土的基本力学性能;约束混凝土的机理分析;钢-混凝土组合性能等。

文中提供了大量的试验结果、各种现象的机理分析和建议的本构关系,有助于深入了解混凝土材料的强度和变形机理,并为研究和分析钢筋混凝土结构性能提供必要的依据。

本书对于从事混凝土结构设计和研究工作的技术人员,以及高等院校有关专业的师生可作为研究、设计和教学的参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝土力学性能的试验研究/清华大学抗震抗爆工程研究室编著. —北京:
清华大学出版社,1996

ISBN 7-302-02062-0

I. 混… II. 清… III. 混凝土结构-结构力学-力学性能试验-研究 IV.
TU370.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 23617 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:北京宏飞印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:14.5 字数:358 千字

版 次:1996 年 5 月第 1 版 1996 年 5 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-02062-0/TU·110

印 数:0001—1500

定 价:20.00 元

目 录

混凝土的多轴强度试验和破坏准则研究.....	过镇海	王传志	张秀琴等	(1)
不同应力途径下混凝土多轴受压强度的试验研究	揽生瑞	过镇海		(52)
重复荷载作用下混凝土二轴受压性能的试验研究	揽生瑞	过镇海		(65)
慕尼黑工业大学的混凝土多轴强度试验资料的汇集 和分析.....	过镇海	周云龙	D. Nechvatal	(85)
混凝土偏心受压应力-应变全曲线的试验研究	杜育科	王传志		(111)
混凝土偏心受拉应力-应变全曲线的试验研究	李永录	过镇海		(131)
高强混凝土的抗压疲劳性能研究.....	白利明	吴佩刚	赵光仪	(158)
高强混凝土的抗拉疲劳性能研究.....	詹巍巍	赵光仪	吴佩刚	(172)
火山渣混凝土力学性能的试验研究.....	钱稼茹	何东波	成小平	(181)
钢筋混凝土在反复轴向荷载下的本构关系.....	王娟明	徐波	沈聚敏	(190)
箍筋约束混凝土的受力机理及应力-应变全曲线的计算	罗苓隆	过镇海		(202)

Research Laboratory of Earthquake and
Blast Resistant Engineering
Tsinghua University
Technical Reports TR - 6

Contents

Experimental Investigation of Multi-axial Strength of Concrete and Analysis of the Failure Criteria	Guo Zhenhai, Wang Chuanchi, Zhang Xiuqin et al(1)
Experimental Investigation of Multi-axial Compressive Strength of Concrete under Different Stress Paths	Lan Shengrui, Guo Zhenhai(52)
Experimental Investigation of Bi-axial Compressive Behaviour of Concrete under Repeated Loading	Lan Shengrui, Guo Zhenhai(65)
Collection and Analysis of Concrete Multi-axial Strength Tested in TUM	Guo Zhenhai, Zhou Yunlong, D. Nechvatal(85)
An Investigation of the Complete Stress-Strain Curves of Concrete under Eccentric Compression	Du Yuke, Wang Chuanchi(111)
Experimental Investigation of Complete Stress-Strain Curves of Plain Concrete under Eccentric Tension	Li Yonglu, Guo Zhenhai(131)
Fatigue Behaviour of High Strength Concrete under Compressive Cyclic Loading	Bai Liming, Wu Peigang, Zhao Guangyi(158)
Fatigue Behaviour of High Strength Concrete under Tensile Cyclic Loading	Zhan Weiwei, Zhao Guangyi, Wu Peigang(172)
Experimental Investigation of Mechanical Properties of Pumice Concrete	Qian Jiaru, He Dongbo, Cheng Xiaoping(181)
The Constitutive Relation of Reinforcing Steel-Concrete Element under Reversed Axial Loading	Wang Xianming, Xu Bo, Shen Jumin(190)
Mechanism and Calculation of Complete Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Square Ties	Luo Linglong, Guo Zhenhai(202)

混凝土的多轴强度试验和破坏准则研究*

过镇海 王传志 张秀琴等**

[提要] 本文简要介绍了作者自行研制的混凝土立方试件真三轴拉压加载装置,以及受压试件表面的减摩措施和受拉试件的粘结工艺等关键试验技术。本文总结了相继完成的不同标号混凝土的二轴和三轴拉压强度试验的全部资料,其中包括较为罕见的三轴拉/压/压和拉/拉/压强度;分析了不同应力状态下的混凝土强度变化规律;归纳有5种典型的破坏形态及其划分条件。据此本文建议了幂函数形式的五参数混凝土破坏准则,并给定相应的确定参数的方法和参数值。它给出的空间破坏面形状,或拉压子午线和偏平面包络线的形状符合混凝土破坏面的几何特性要求。本试验和国内外试验数据对比表明,对于多种多样的试验条件,包括不同的试件形状、混凝土强度、应力拉压状态和比例、试验设备和方法、减摩措施等众多变化因素,本准则给出的混凝土多轴强度理论值具有较高的精确度,适用应力范围没有限制。本文还对现有的混凝土破坏准则分析归纳为3种基本形式。通过大量计算,对比了各准则的破坏曲面和不同应力状态下的理论曲线,指出了适用的应力范围和存在的问题,可供用户选择参考。本文最后给出了多轴应力状态下混凝土强度设计值的建议,附有相应的计算图和近似公式,可供工程设计或制定混凝土设计规范中有关条款参考。

1 前 言

钢筋混凝土结构中,特别是一些重大的特种结构中,如核反应堆的高压容器和安全壳,水坝、海洋工程,重型水压机机架等,混凝土的大部分都处于明显的二轴或三轴应力状态。一般建筑结构中的板壳,梁柱节点,构件的端部和支座,预应力筋锚固区等的混凝土也处于多轴应力状态。对这类受力复杂的结构或构件进行强度计算和有限元分析时,需要有混凝土的三维破坏准则和本构关系。而我国现行的混凝土结构设计规范(GBJ 10-89)中所给出的混凝土强度和变形的设计计算值,都是由试件单轴受力(压或拉)试验测定,完全不能反映混凝土在多轴应力状态下的性能。

电子计算机技术的飞速发展和有限元分析方法的广泛应用,使得复杂混凝土结构的精确分析成为可能。为了得到满意的计算结果,必须有相应的混凝土破坏准则和本构模型。

早在1900年,德国的A·Föppl就进行过砂浆的二轴抗压强度试验。30年代美国的

* 国家自然科学基金资助项目。

** 参加本文试验研究工作的还有马宝民以及研究生曲俊义、郑汝玫、叶献国、李伟政和王敬忠等,参加混凝土真三轴加载设备研制和试验技术研究的还有王如琦、张达成、**施泽元**和金同乐等。

Richart 实现了混凝土圆柱试件的常规三轴受压试验 ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$)。60 年代为解决国际能源危机,一些国家大力发展核电站,为了兴建核反应堆的预应力混凝土高压容器和安全壳,并保证安全运行,开展了真三轴应力状态 ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) 下混凝土的强度和变形性能的系统性试验和理论研究,在 70 年代形成一个高潮。

明确的工程实用价值和重要的理论意义,使得混凝土在多轴应力下的强度和变形研究受到各国学者的重视,经过多年的努力已取得较多研究成果^[1]。如今,美、英、法、德等国家的预应力混凝土压力容器设计规程,苏联的水工结构设计规范 (СНП II 54—77) 和日本的拱坝设计规范 (1979) 等都考虑了混凝土在二轴或三轴受力的强度,在工程实践中的应用已经取得很好的技术、经济效益。

由于混凝土多轴试验的加载和量测技术的复杂性,一个国家内只有个别单位具备自行研制的专用试验设备,且至今国际上尚无统一的试验标准。各研究者采用了不同的设备和加载方法 (液压或传压板),不同的试件形状 (空心或实心圆柱,立方体,板式) 和尺寸,和试件表面不同的消减摩擦措施 (各种减摩垫层或刷形加载板),所获得的混凝土多轴强度试验值,在较大范围内变动。70 年代中,美、德、英和意等四国的 7 个研究单位执行一合作研究项目,统一制作试件以求材性的一致,于相同的龄期在各单位同时进行试验,所得试验结果仍相当离散,表明试验技术对试验结果有较大影响。

从已收集到的试验资料^{[23]—[42]}看,已有试验的三向应力比例还有限,如三轴受压试验的 σ_1/σ_3 、 $\sigma_2/\sigma_3 \leq 0.15$,缺少高静水压力的试验,三轴拉压试验 (T/C/C、T/T/C、T/T/T) 只有个别数据^{[37]、[41]}。已建立的混凝土破坏准则,尚缺少更全面的试验验证。

国内的一些研究单位结合工程需要进行过岩石多轴强度和变形的试验研究,如中国科学院武汉岩土力学研究所,330 工程局,中南水电勘测设计院,长沙矿冶研究所等,试验都限于二轴和常规三轴受压试验。对混凝土的多轴强度和变形只有水利电力部水电科学研究院^[2]等少数单位作过试验,也只限于二轴应力状态。有些学者曾作过文献综述和理论探讨^[3]。

清华大学自 70 年代末开始筹备混凝土多轴强度和变形的试验研究。在收集国内外有关岩石和混凝土三轴试验研究资料的基础上,1982 年完成了混凝土三轴试验装置的设计^[4],1983 年在国家自然科学基金 (当时属中国科学院) 的资助下完成机械加工,1984 年春安装调试后投入试运行。后委托天津市液压气动工程技术研究所研制“三路比例加载电液控制系统”,1987 年初通过验收鉴定^[5],与三轴试验装置联机,实现了混凝土三轴拉压比例自动加载。

为了保证立方试件受压强度的试验精度,研究了试件表面摩擦约束的影响,并决定采取有效的减摩措施。为对立方试件施加拉力,研究和解决了高强粘结剂的配方和加工工艺^{[9]、[10]}。

1987 年起再次在国家自然科学基金的资助下进行了混凝土多轴强度的系统试验和破坏准则的理论研究^{[7]—[17]}。自 1984 年至 1989 年期间,完成多批量不同标号混凝土立方试件在二轴和三轴拉压多种应力比的试验研究,试件总数超过 600 件 (表 3)。

本文是本课题的试验研究总结。在简要介绍试验设备和试验技术之后,给出试验研究的主要结果及一般规律,归纳典型的破坏形态及其划分界线,提出破坏准则的表达式并给定参数值,对比理论计算和试验结果,对已有破坏准则进行分析与评价。最后对我国设计

规范中采用的混凝土多轴强度值提出建议。

文中使用各种符号的意义见附录表 1。

2 加载设备的研制和试验技术研究

2.1 真三轴拉压加载设备

在复杂的结构工程中，混凝土的三向主应力不等，且可能是压或拉应力，应力比为任意值。显然，加载设备应满足立方试件的真三轴 ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) 拉压任意组合的试验要求。

考虑到混凝土粗骨料的尺寸不能太小，又能利用现有的标准钢试模，立方试件的边长定为 100 mm 和 70.7 mm 两种。

真三轴试验装置的全貌及试件加载试验情况见图 1。整套装置由 3 个主要部分组成：

① 普通液压试验机——利用实验室原有的一台液压试验机施加竖向 (Z 轴) 荷载。当油压为 20 MPa 时，最大出力可达 1500 kN。机架承力架的 2 条丝杠间净距离为 500 mm。在试验机的活塞上添设了一个工作平台以搁置水平承载框 (图 2)。

② 水平承载框——为一个由 40 Cr 钢材整体锻制加工的刚性框架，内设两对互相垂直的油缸 (X 轴、Y 轴，图 2)，缸内有 T 形活塞 (图 3 (a))。当改变进油方向、活塞沿水平方向前进或后退时，可以调整加载板位置以及施加所需的压力或拉力。

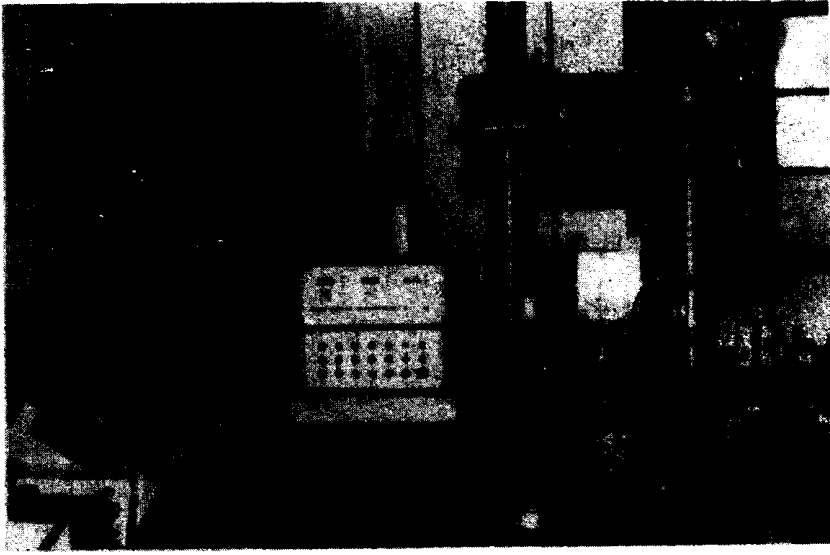
进行压力试验时，空心活塞内接测力杆，前端为球面铰支承的承压板 (图 3 (a))。3 个垂直方向共 6 块承压板之间组成的压力室内放置试件，承压板的球面位于一同心球面上，能适应必要的偏转。进行拉力试验时，取出压力测力杆，换上拉力附件 (图 3 (b))。套筒与活塞底的螺扣连接，中间有一带球面的螺母，可调节拉杆的位置和偏转。拉杆的另一端与传力板相连，此板与试件表面粘接。拉杆同时作为拉力传感器，以测定和控制拉力值。

③ 三路比例加载电液控制系统——采用了电液比例阀及相应的电子控制线路和液压元器件，系统原理见图 4。此系统与真三轴加载装置联机后可以实现：预设三向 (X、Y、Z) 应力比例，进行自动比例加卸载试验；X 和 Y 轴的油路中设置了同步缸，使同轴向的 2 个活塞同步动作，保证试件安装时居中；油路中的保压装置，可供设定油压时维持恒载；操作手动旋钮也可进行非比例的或不同应力史的加卸载试验^[12]。

全套加载和控制系统实现联机后的试验能力见表 1。

表 1 真三轴加载装置的试验能力

轴	方向	最大荷载		活塞行程 (mm)	100 mm 试件			70.7 mm 试件		
		压力 (kN)	拉力 (kN)		压应力 (MPa)	拉应力 (MPa)	应变 (10^{-3})	压应力 (MPa)	拉应力 (MPa)	应变 (10^{-3})
X, Y	水平	1000	100	2×10	100	10	±200	200	20	±300
Z	竖向	1500	—	30	150	—	300	300	—	420



(a) 试验装置的全貌



(b) 水平加载框和液压试验机



(c) 三轴受压试验



(d) 二轴拉压试验

图1 真三轴试验装置

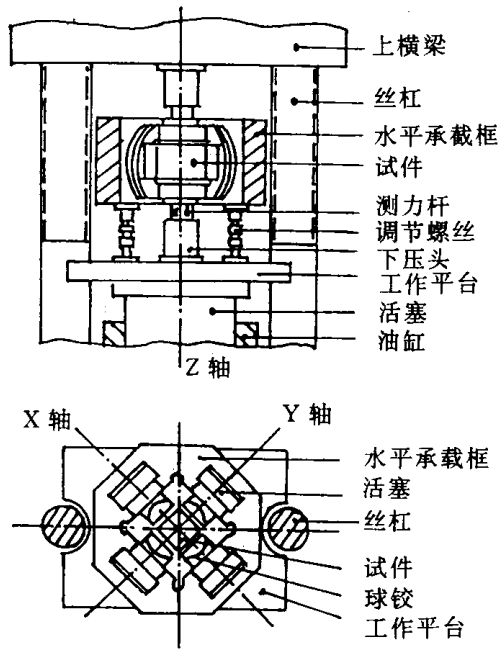


图2 三轴加载装置构造示意

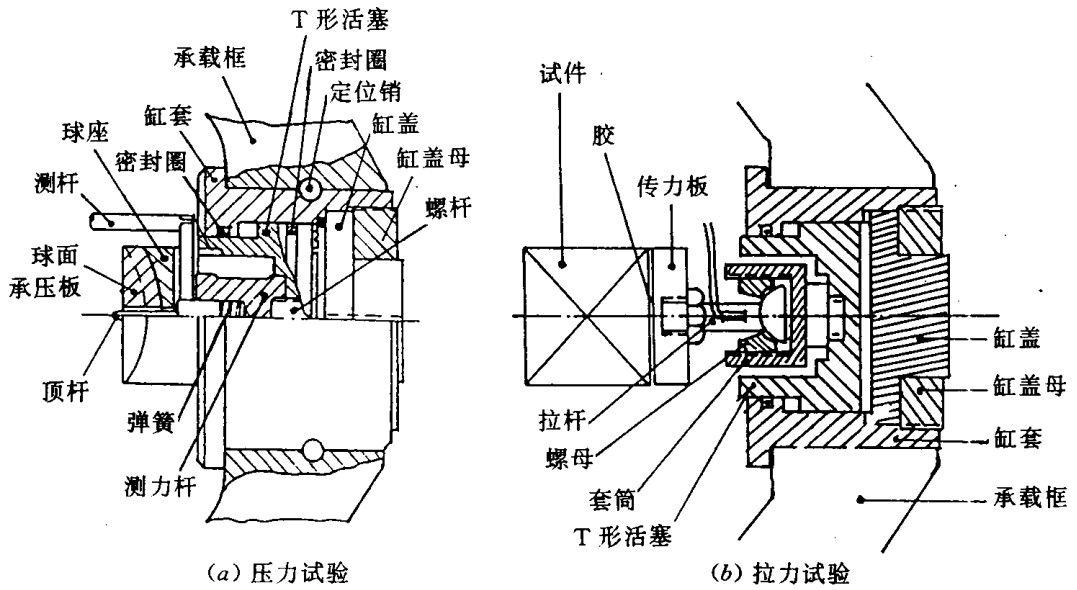


图3 水平承载框构造

本装置的设计原理、技术指标、主要构造和操作方法等详见文献 [4]、[5]。全套装置自 1987 年春联机使用，至今已完成各种三轴拉压比例加载和不同应力史试验超过 1000 次，效果良好。

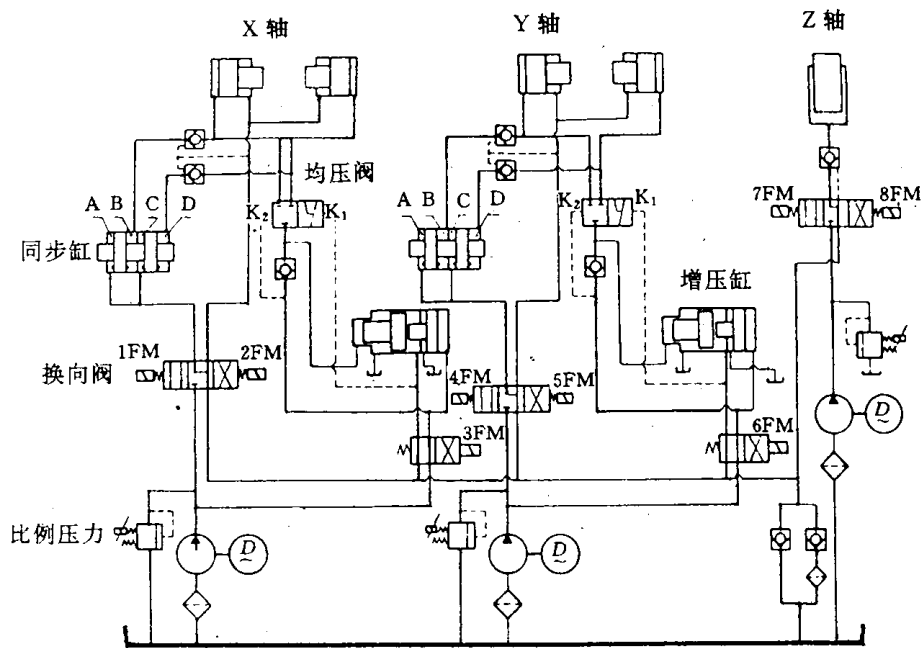


图4 三路比例加载电液控制系统

2.2 试件表面的减摩措施

进行混凝土立方试件的单轴抗压试验时，一般都采用钢承压板传力。由于钢板和混凝土的横向应变不等而在试件端面产生约束作用，形成双锥形破坏（图5(a)），提高了抗压强度。多轴抗压试验时，如不采取减摩措施，承压面的约束作用更强（图5(b)），测得的二轴和三轴抗压强度将比无摩擦试验的结果高出多倍（表4）。所以，不减摩的试验结果完全不能在工程设计中应用，试验将毫无实际价值。

为测定混凝土真实的多轴抗压强度，必须解决试件表面的摩擦约束问题。本文设计了约20种不同的减摩材料和垫层构造，进行对比试验，结果示于图6。以无减摩措施的普通立方试件的抗压强度为1，给出不同减摩措施的试件相对强度。一般认为，混凝土的棱柱体（1:3）强度约相当于无摩擦的抗压强度（0.7~0.8）。最后决定选取其中的2种：

① 2片聚四氟乙烯板（2mm厚）间加少许二硫化钼（ MoS_2 ）油膏，减摩效果好，但聚四氟乙烯抗压强度较低（ $<40\text{ MPa}$ ），且价格昂贵，主要用于二轴受压试验；

② 3层铝箔（0.2mm厚）间加少许二硫化钼油膏，主要用于三轴受压试验。

2.3 受拉试件的粘结工艺

用混凝土立方试件进行单轴拉伸和多轴拉压试验时，用传力钢板施加拉力，必须保证

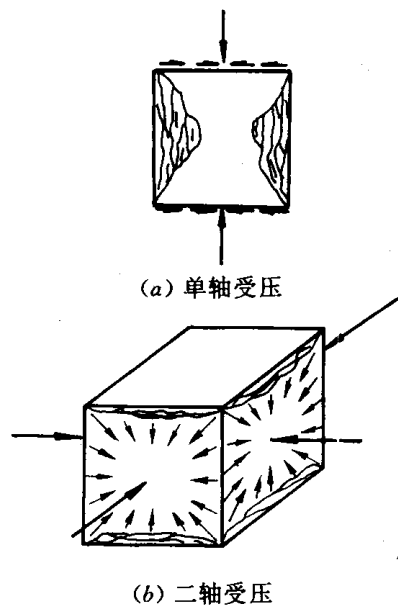
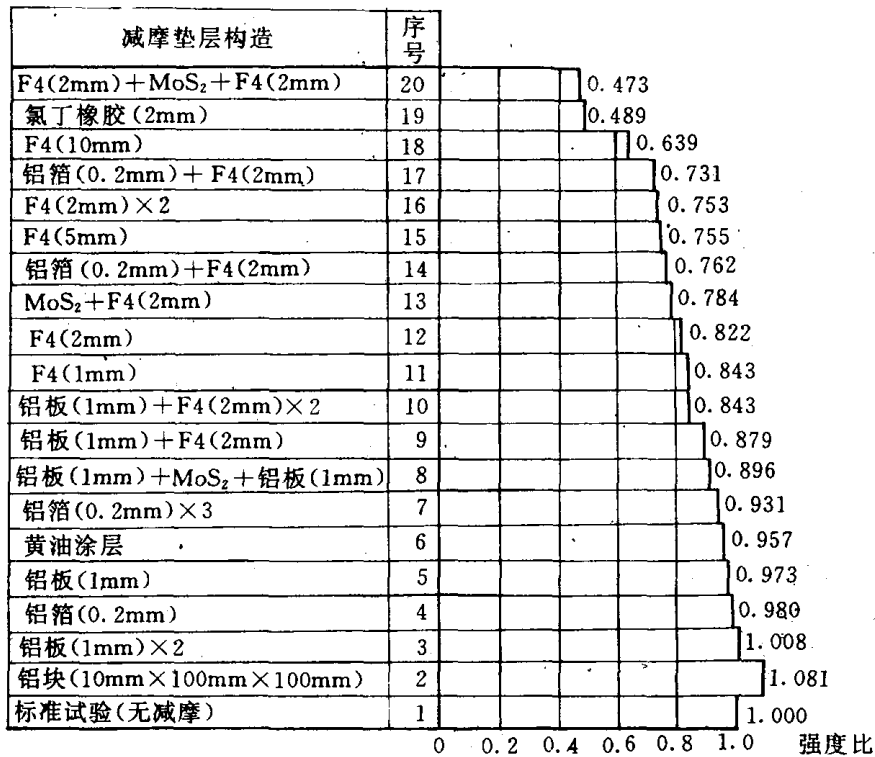


图5 试件表面摩擦的影响



注: F4-聚四氟乙烯, MoS₂二硫化钼油膏

图6 不同减摩垫层的试件强度比较

钢板和混凝土的粘结强度超过混凝土本身的抗拉强度。经过多次反复试验确定以环氧树脂作为基本粘结材料, 配以适量的固化剂和增韧剂, 按一定的操作工艺配制粘结胶。也可使用偶联剂和填料, 以改善粘结性能。事实上, 由于每批原材料的性能和化学成分的差别, 每次使用前均需试配及加载试验后确定胶的配比。本项研究^{[9],[10]}中采用的2种配比见表2。

表2 粘结剂配合比

文献	基本粘结材料	固化剂	增韧剂	附注
	环氧树脂	593 ^{#①}	丁晴-26 ^②	
[9]	100	26	20	① 上海新华树脂厂生产的二乙烯三胺环氧丙烷丁基醚缩合物。 ② 兰州石油化学工业公司生产的液体丁晴橡胶。
[10]	100	29	20	

浇注混凝土试件时, 一部分空气沿钢模侧面上升, 混凝土凝固后在试件表面形成一层含有较多气泡的水泥砂浆(约厚3~5mm), 抗拉强度明显偏低。试件直接与钢板粘结, 拉断面总是在这薄层内, 不反映试件混凝土的真实抗拉强度。用作拉力试验的边长100mm的立方块, 必须由较大面积(如150mm×150mm)的棱柱体锯切制备。

钢板和混凝土立方块的粘结工艺详见参考文献[9]、[10]。

3 多轴拉压强度试验的主要结果

3.1 试验的范围和内容

自 1984 年起,本课题的许多研究人员相继使用研制的三轴加载设备,完成不同标号混凝土立方试件的各种应力比、二轴和三轴拉压强度试验多批(表 3),获得了大量的试验资料。全部试验数据已以统一格式收入“混凝土多轴强度试验数据汇编”,详细情况可查阅相应的研究报告或学位论文[6]~[17]。此外,天津大学博士生黄真^[18]也使用本设备进行了混凝土多轴强度试验。

表 3 本课题完成的混凝土多轴强度试验一览

序号	研究人员	试验应力状态	试件			单轴强度 (MPa)		完成日期	文献
			形状	组数	件数	f_c	f_t		
1	王传志 过镇海 张秀琴等	C/C、C/C/C	方	48	99	7.6~13.2	—	1985 07	[13] [14]
2	曲俊义	C/C、C/C/C	方	70	157	9.4~38.3	—	1985 10	[6]
3	郑汝玫	C/C	板	13	58	10.9~19.8	—	1987 07	[7]
4	叶献国	C/C/C	方	24	69	24.5~28.8	—	1988 05	[8]
5	李伟政	C/C、T/C、T/T	方	16	46	21.7~25.0	2.03	1989 01	[9]
6	王敬忠	T/C/C、T/T/C	方	45	45	16.4~19.1	1.51~2.06	1989 11	[10]
7	徐 焱	T/C/C、T/T/C	方	14	63	24.5~30.2	1.79~3.14	1991 03	[11]
8	揽生瑞	C/C、C/C/C	方	38	150	15.0~26.5	—	1993	[12]
			共 计	268	687				

这些试验的覆盖面很宽:混凝土的单轴抗压强度(有减摩) $f_c = (7.6 \sim 38.3)$ MPa,相当于混凝土强度等级 C15~C50;数据遍及主应力空间 8 个象限中的 7 个,包括坐标面的二轴拉压组合;三轴受压试验的应力比达 $(-0.5 : -0.5 : -1)$;破坏时试件的八面体正应力(静水压力)和剪应力与单轴抗压强度的比值达 $\sigma_{oct}/f_c = -12.0$ 和 $\tau_{oct}/f_c = 4.5$ 。这些试验数据和试验中观察的现象,为分析混凝土破坏形态和验证破坏准则提供了重要依据。

3.2 二轴强度试验

混凝土在二轴拉压全组合(C/C、T/C和T/T)下的强度试验结果绘于图 7。二轴强度试验见诸于国内外文献者已为数不少。由于试件原材料的差别,更主要是由于试验设备、加载方法和减摩措施的不同,试验结果离散度较大^[1]。本项研究的每批试验结果的规律性较好,全部试验因混凝土标号和试件形状不同而有离散,但仍在国外试验数据的合理离散度范围以内。

不同强度等级混凝土的二轴受压(C/C, $\sigma_1 = 0$)强度变化规律相似:

应力比 $\sigma_2/\sigma_3 = 0 \sim 0.2$ 二轴抗压强度增长较大;
 $= 0.2 \sim 0.6$ 强度变化平缓;
 $= 0.7 \sim 1.0$ 强度增长值减小。

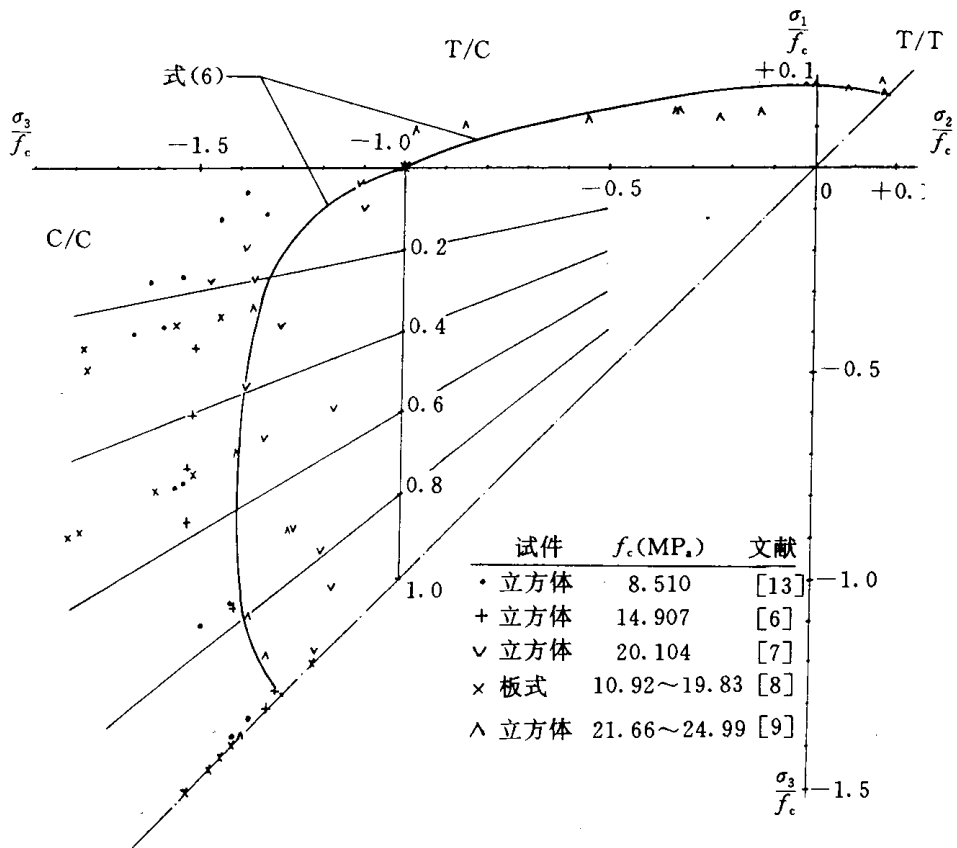


图7 二轴强度试验结果

最大二轴抗压强度发生在应力比 $\sigma_2/\sigma_3=0.3\sim 0.6$ 之间。

单轴强度偏低的混凝土，其二轴抗压强度的提高值显然系统性偏高（图7和表4），但提高的幅度并不大。

表4 试件表面摩擦对混凝土多轴受压强度的影响

表面情况	设计强度	单轴强度 f_c (MPa)	二轴应力比 (σ_2/σ_3) [13]					
			0	0.246	0.504	0.762	0.980	
有摩擦	C15	13.220	1.000	2.691	3.142	3.323	3.122	
减摩层 B	C15	7.665	1.000	1.787	1.860	1.715	1.558	
减摩层 A	C15	8.510	1.000	1.622	1.543	1.448	1.482	
表面情况	设计强度	单轴强度 f_c (MPa)	二轴应力比 (σ_2/σ_3) [6]					
			0.1	0.2	0.5	0.7	0.8	1.0
有摩擦	C50	38.345		1.86		2.61		2.28
减摩层 A	C40	20.104	1.10	1.36	1.33	1.25	1.19	1.16
表面情况	设计强度	单轴强度 f_c (MPa)	三轴应力比 ($\sigma_1/\sigma_3=\sigma_2/\sigma_3$) [6]					
			0.1	0.15	0.2	0.3		
有摩擦	C20	14.318	4.45	8.78	19.28			
减摩层 A	C15	9.415	2.39		4.99			
减摩层 A	C20	13.338	2.42	3.49	5.26	7.8~10.1		

注：减摩层 A，2片2mm厚聚四氟乙烯板间加二硫化钼油膏；

B，2片2mm厚聚四氟乙烯板。

在三轴受压试验中，研究了试件表面摩擦约束对强度的影响。有摩擦试件的三轴抗压强度的提高值明显地大于有减摩措施的试件（约为 1.4~2.0 倍），而强度绝对值相差更多。表 4 中还列出三轴受压试验中，有摩擦和减摩试件的强度提高值对比，说明了摩擦约束的影响更大。因而在多轴受压试验时必须采取减摩措施，否则试验结果无效。

二轴拉压 (T/C, $\sigma_2=0$) 强度试验表明，混凝土的抗压强度 (σ_3) 随着另一方向拉应力 (σ_1) 的增加而降低；同样地，抗拉强度也随另一方向压应力的增加而缓慢降低。

二轴受拉 (T/T, $\sigma_3=0$) 强度试验给出的混凝土抗拉强度与单轴抗拉强度相差不大，而不管应力比 (σ_1/σ_2) 值如何。

3.3 三轴强度试验

混凝土三轴受压 (C/C/C) 强度的一般规律 (图 8) 为：

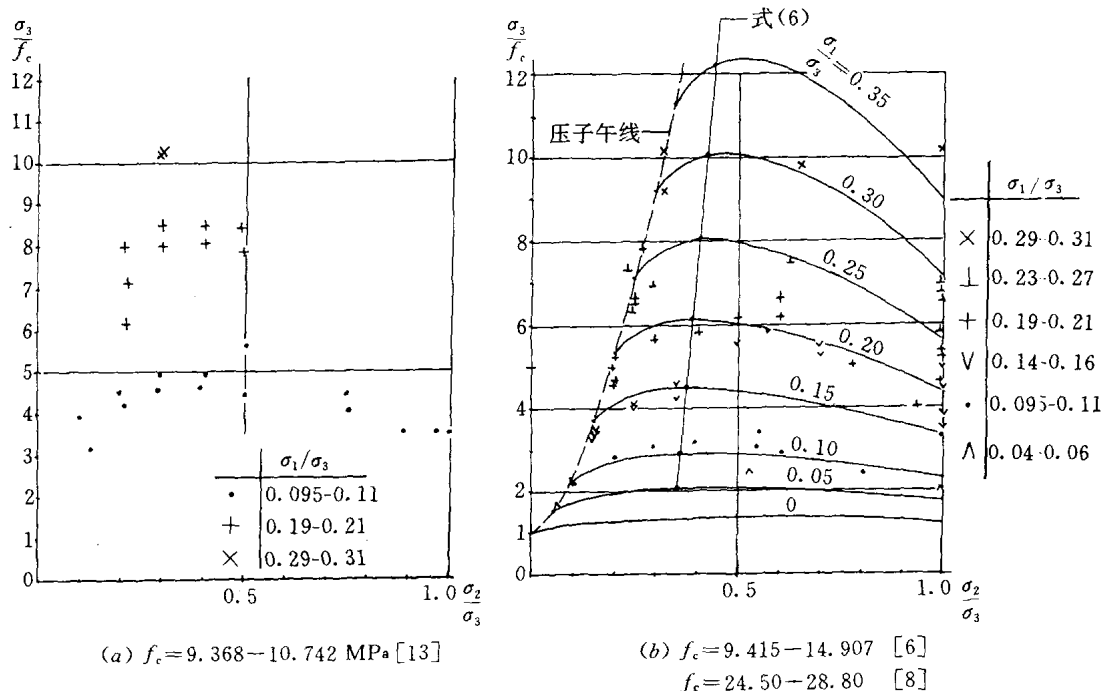


图 8 三轴受压强度试验结果

(1) 随着应力比 σ_1/σ_3 的加大，三轴抗压强度 (σ_3) 成倍地增长；

(2) 第 2 主应力 σ_2/σ_3 对三轴强度有明显影响。最高抗压强度 σ_3/f_c 发生在 $\sigma_2/\sigma_3 = 0.3 \sim 0.6$ 之间，当 σ_2/σ_3 减小、趋向压子午线 ($\sigma_2/\sigma_3 = \sigma_1/\sigma_3$)，或者增大、趋向拉子午线 ($\sigma_2/\sigma_3 = 1$)，三轴抗压强度都逐渐下降。最低强度和最高强度相差约为 20%~25%；

(3) 压子午线和拉子午线的比较 (图 9)。当 $\sigma_1/\sigma_3 \leq 0.15$ 时，拉子午线强度偏高，如应力比为 $-0.1 : -1 : -1$ 的试件强度超过应力比为 $-0.1 : -0.1 : -1$ 的试件；而 $\sigma_1/\sigma_3 > 0.15$ 时，拉子午线强度偏低，即应力比为 $-0.3 : -1 : -1$ 的试件强度低于应力比为 $-0.3 : -0.3 : -1$ 的试件。

(4) 低标号混凝土试件的三轴抗压强度提高值 σ_3/f_c 有增大的趋势 (见图 8 (a))，且约束应力 σ_1/σ_3 小者，增大更明显。

有一轴或二轴受拉的混凝土三轴强度试验 (T/C/C、T/T/C)，由于试验技术难度大，至今文献上公开发表的试验资料极少，只有 van Mier^[37] 提供了 3 个试件的数据。本研究共进行各种应力比的三轴拉压强度试验共 45 个^[12]，全部试验结果绘于图 10。混凝土三轴拉压强度的一般规律为：

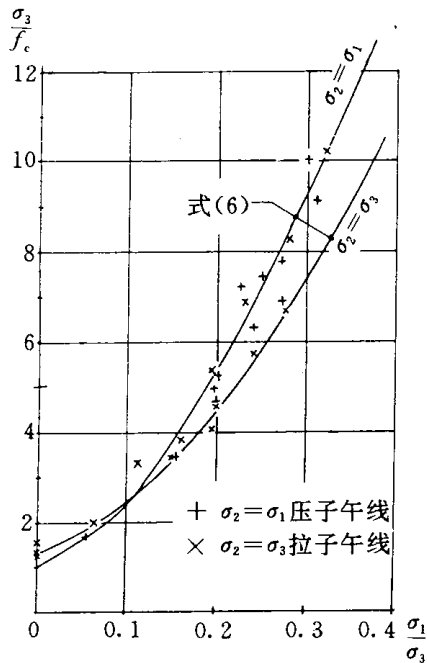


图 9 压拉子午线比较

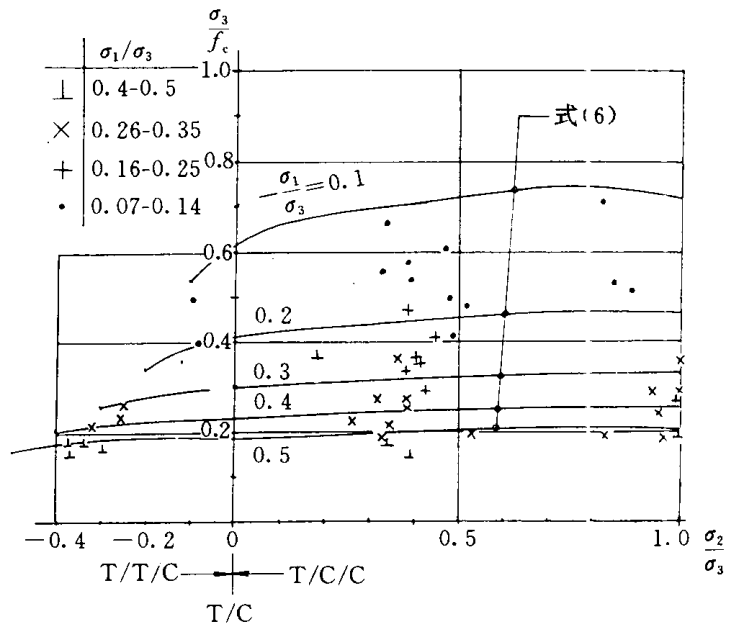


图 10 三轴拉压强度试验结果

(1) 任何应力比的三轴拉压试件，其抗压强度不超过单轴抗压强度 ($\sigma_3/f_c \leq 1.0$)，抗拉强度不超过单轴抗拉强度 ($\sigma_1/f_t \leq 1.0$)。

(2) 混凝土的三轴拉压强度 σ_3/f_c 主要取决于应力比 σ_1/σ_3 ，随 $|\sigma_1/\sigma_3|$ 的加大而逐渐降低。

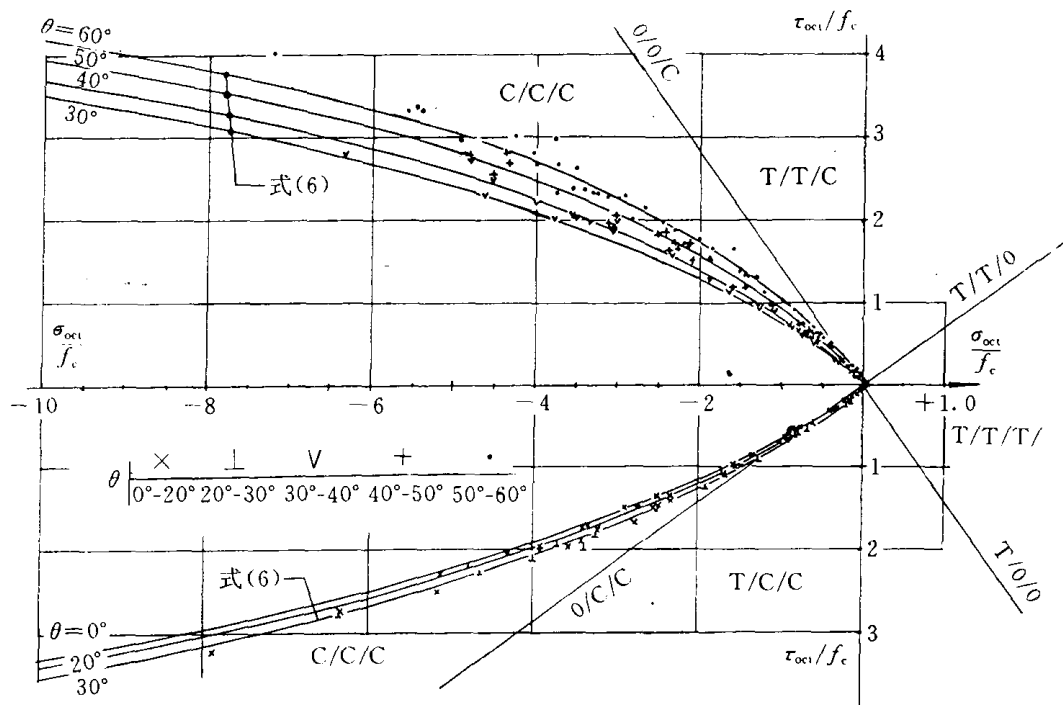
(3) 第 2 主应力 σ_2 不论正负或应力比 σ_2/σ_3 的大小，对三轴拉压强度 σ_3/f_c 的影响很小。变化幅度一般在 10% 以内。

需要说明的是，试验的各批混凝土试件，其单轴抗拉强度和单轴抗压强度的比值不等， $f_t/f_c = 0.09 \sim 0.12$ 。上述三轴拉压试验强度统一以相对强度 (σ_1/f_c 、 σ_2/f_c 、 σ_3/f_c) 表示，必然会有一定波动。而且，在下面的理论计算和分析中，只能采用统一的单轴拉压强度比， $f_t/f_c = 0.1$ ，对于 $f_t/f_c \neq 0.1$ 的混凝土会有一些离散。由于混凝土抗拉强度本身的离散较大，这一误差的影响有限。

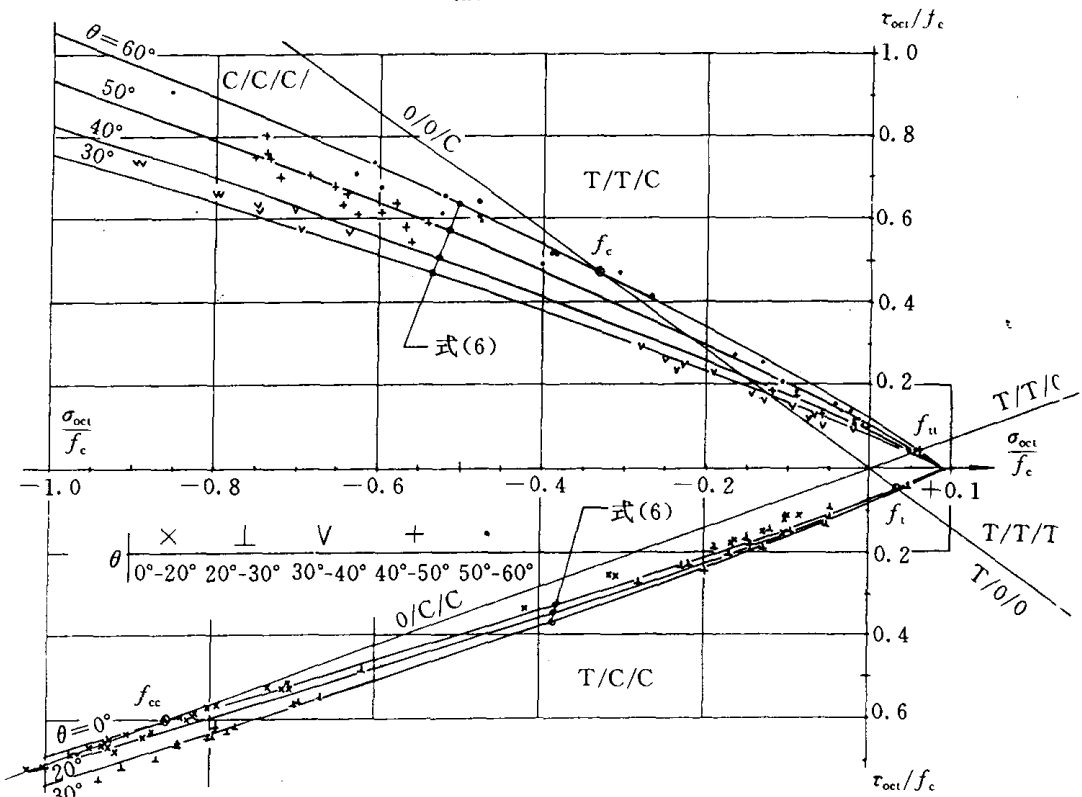
3.4 试验结果汇总

本项研究的二轴和三轴拉压强度试验的全部结果，均以试件破坏时的八面体正应力和剪应力 (σ_{oct}/f_c 、 τ_{oct}/f_c) 表示，汇总于图 11 (a)。静水压力较小 ($|\sigma_{oct}/f_c| < 1.0$) 的试验结果再现于图 11 (b)。试验点按照试件应力比计算的偏平面夹角 θ 值分别绘出，并以 $\theta = 30^\circ$ 划分，分列在横坐标的上下。

图上标出的 4 条特征线代表单轴受压 0/0/C、单轴受拉 T/0/0、二轴等压 (C/C/C, $\sigma_2 = \sigma_3$) 和二轴等拉 (T/T/0, $\sigma_1 = \sigma_2$) 等应力状态。由此可划分不同的三轴应力区段，即压子



(a)



(b)

图 11 多轴拉压强度试验结果(子午线)

午线上的 T/T/T、T/T/C 和 C/C/C，及拉子午线上的 T/T/T、T/C/C 和 C/C/C。

根据试件的静水压力值 σ_{oct}/f_c 的大小，绘出试件强度在偏平面上的分布(图 12)。偏平面上的包络图为三折对称曲线，图中只绘出 1/6，即 $\theta=0^\circ\sim 60^\circ$ 。