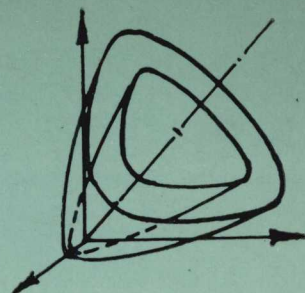


1990年10月26日—29日

北京 清华大学



混凝土结构基本理论及应用

第二届学术讨论会论文集

第一卷

中国建筑学会建筑结构学术委员会
中国土木工程学会教育工作委员会
清华大学土木工程系

TU37-65
Zh 618

混凝土结构基本理论及应用

第二届学术讨论会论文集

第一卷

1990年10月26日~29日

北京 清华大学



中国建筑学会建筑结构学术委员会(混凝土结构学组)
中国土木工程学会教育工作委员会
清华大学土木工程系

1469293

前 言

本届学术讨论会是 1987 年 10 月在烟台举行的《约束与普通混凝土强度理论及应用》学术讨论会的继续。上届会议期间就有关专题进行了广泛、深入的学术交流,展示了我国在这一领域内研究工作取得的可喜成果。会上会下学术气氛浓厚,自由讨论热烈,受到普遍赞许。应与会人员的要求,讨论会纪要中明确地指出:“今后继续举行这样的学术讨论会是很有必要的”,并决定更名为《混凝土结构基本理论及应用》学术讨论会,于 1990 年举行第二届会议。

本届学术讨论会由中国建筑学会建筑结构学术委员会(混凝土结构学组)、中国土木工程学会教育工作委员会和清华大学土木工程系联合举办。聘请专家组成学术委员会主持讨论会。举办单位组成的组织委员会负责会议的筹备工作,包括论文集的编辑出版事宜。清华大学土木工程系负责会务工作。

今年初发出征文通知后,在规定期限内收到论文摘要 195 篇。经组织委员会在京部分成员研究,向 187 篇论文的作者发出论文准备通知。七月收到论文稿,经复审符合讨论会议题及文稿格式要求的论文计 132 篇,全部收入本论文集。

论文集按照论文内容分成四部分、编为三卷:材料性能(第一卷),基本构件(第二卷),结构构件和理论计算(第三卷)。每一部分中同类专题集中,以便查阅。同一专题则按论文收到日期的先后排列。

论文集使用作者的打印原稿照相制版印刷,内容未作任何更动,以便充分发表学术观点,活跃学术思想。不同观点欢迎在会上自由讨论。

从本论文集中不难看出,无论是论文的数量、研究领域的广度,还是论文的学术水平都明显地超过了上届讨论会。表明了本学术讨论会的主题在理论研究上的生命力和生产实践中的重要价值,受到更多各界研究人员的重视和欢迎。

我们真诚地感谢论文作者及其合作研究人员的参与和贡献;

我们衷心地祝愿《混凝土结构基本理论及应用》学术讨论会将一届届继续举行,并且不断提高学术水平和开拓新的研究领域,在工程实践中发挥更大的作用;

我们热烈地欢迎更多的中青年科学工作者、包括研究生加入我们的行列。

《混凝土结构基本理论及应用》
第二届学术讨论会组织委员会
一九九〇年九月

学术委员会成员

(以汉语拼音字母为序)

蔡绍怀 成文山 陈肇元 丁自强 高伯扬 过镇海 江见鲸
姜维山 蒋大骅 路湛沁 吕志涛 沈聚敏 徐积善 杨松泉
于庆荣 于晓中 张澍曾 赵国藩 郑作樵 周 氏

组织委员会成员

(以汉语拼音字母为序)

蔡绍怀 陈肇元 崔京浩 过镇海
沈聚敏 施岚青 于庆荣 吴佩刚

秘书： 钱稼茹

目 录

第 一 卷

砼在两压一拉加载下的变形和强度特性.....	赵国藩	宋玉普	彭 放	(1)	
平面应变状态下侧向拉应力对砼变形和强度的影响.....	宋玉普	赵国藩	蔡澄清	(9)	
砼三轴试验装置研制中的几个关键问题	宋玉普	靳国礼	沈吉纳	彭 放	(17)
用一个新的三参准则计算三向应力混凝土	马国伟	曾文兵			(25)
混凝土强度的中间主应力效应	俞茂宏	郑树俊	杨英群		(33)
软化砼本构关系试验	平面应力状态砼本构关系研究组				(39)
混凝土的多轴压拉强度和破坏准则	过镇海	王传志			(47)
混凝土弹塑性随动强(软)化本构模型	许锦峰	刘西拉			(55)
多轴受压状态下混凝土的宏观裂缝与应变软化行为	张崇厚	刘西拉			(63)
混凝土的断裂机理探讨	余永遐	胡春林			(71)
混凝土 I—II 复合型断裂非线性有限元分析	王启文	陈云霞			(75)
用于混凝土类材料的统计断裂判据		彭图让			(83)
混凝土开裂面剪力传递性能的试验研究	左宏亮	赵国藩	宋玉普		(91)
特细砂及 JK 高强混凝土力学性能	牛绍仁	李立仁			(99)
混凝土在变幅重复应力作用下的疲劳性能研究.....	王瑞敏	赵国藩	宋玉普		(107)
混凝土蠕变本构模型的理论研究及试验验证.....	林 洋	宋启根			(115)
受腐蚀混凝土的强度和应力应变关系.....		曹双寅			(123)
混凝土与钢筋经火烧后的物理力学特性.....	钱在兹	陈荣荣	张自坚		(131)
混凝土在高温和应力先后作用下的性能试验.....	李 卫	过镇海			(139)
方形螺旋箍约束混凝土基本性能的试验研究.....	李玉林	姜维山	赵鸿铁		(147)
方格网套箍高强混凝土的强度和变形.....	薛立红	蔡绍怀			(155)
方格网套箍高强凝土的局部承压强度.....	薛立红	蔡绍怀			(163)
混凝土标号对局部承压强度提高系数的影响.....	蔡绍怀	顾维平			(171)
约束混凝土结构的分析方法.....		张之书			(179)
高强约束混凝土应力应变全曲线性能试验研究.....	胡海涛	叶知满			(187)
含钢筋的混凝土在反复轴向荷载下的本构关系.....	王炯明	徐 波	沈聚敏		(195)
变形钢筋锚固受力的数值分析.....	沈文都	徐有邻	汪 洪		(203)
钢筋粘结锚固机理的试验研究.....	徐有邻	汪 洪	史志华		(211)

钢丝网与钢纤维水泥砂浆复合的新型结构材料	胡 昌 吴葵英 孙美芬 彭守敏	(219)
钢纤维砼轴拉本构关系的试验研究	程铁生 章文纲 吴爱中	(227)
低周反复荷载作用下钢纤维砼与钢筋粘结锚固性能的研究	章文纲 程铁生	(235)

第 二 卷

高强混凝土偏心受压短柱正截面承载力的试验分析	宋永发 李树瑶	(243)
钢筋混凝土框架柱水平荷载一位移曲线的全过程分析	叶列平	(251)
钢筋混凝土梁承载能力统一计算方法探讨	丁自强	(259)
矩形截面钢筋混凝土双向受弯构件全过程分析	章雪儿 虞锦晖	(267)
受弯构件剪弯段裂缝的试验研究	束继华 韩书香	(275)
框架柱粘结开裂破坏强度与弯曲强度的比较分析	李 力	(283)
高强混凝土正截面计算特点	张晓东 王振东	(289)
高强混凝土偏心受压柱承载力的计算	邹银生 易伟建 吴宇清	(295)
高强混凝土偏心受压柱的非线性有限元分析	易伟建 邹银生 熊 艳	(303)
钢筋混凝土受弯及偏压构件强度的尺寸效应研究	徐积善 周 竞 黎国清	(311)
周期反复荷载下高强混凝土压弯构件的受力性能	时旭东 林昊俊 庄崖屏	(319)
钢筋混凝土双向偏压构件强度计算的试验研究	柳炳康 王春藻	(327)
双向水平反复荷载下钢筋混凝土框架柱的抗震性能	刘安琪 翁义军 沈聚敏	(335)
螺旋配箍柱抗震性能的试验研究	燕太祥 高伯扬	(343)
钢管混凝土短柱有限元分析中的几个特殊问题	邸小坛	(351)
薄壁离心钢管混凝土受压柱极限承载能力的计算	徐国林 余浙云	(357)
钢管高强混凝土长柱性能和承载能力的研究	顾维平 蔡绍怀 冯文林	(365)
网片约束高强砼梁的力学性能	赵秦晋 陈肇元	(373)
受拉边倾斜梁抗剪强度的新研究	龙炳煌 蒋大骅	(381)
钢筋混凝土简支开洞深梁在顶部集中和均布荷载作用下的受力性能及抗剪承载力的研究	刘立新 王新玲	(389)
集中荷载作用下钢筋砼连续开洞深梁抗剪性能的试验研究	王新玲 刘立新	(397)
高强混凝土受弯构件的抗剪强度	赵光仪 吴佩刚 赵成文 翟 阳	(405)
钢筋混凝土深梁集中荷载间接加载试验研究	钱国梁 冒海智 朱 瞰	(413)
复杂受力状态下钢筋砼构件抗剪强度计算模式的研究	史佰通 吕志涛	(421)
钢筋砼短柱抗剪性能的有限元非线性分析	刘继明	(429)
钢筋混凝土无腹筋简支梁考虑主压应力破坏的抗剪强度计算	谢育良 曹征良	(437)

钢筋混凝土无腹筋简支梁考虑主压应力破坏的抗剪强度计算	谢育良	曹征良	(437)
无腹筋板斜截面的抗剪强度	万 卷	崔步红	(445)
外包钢板箍钢筋砼简支深梁的实验研究	仲纪龙	王德龙	姜维山
钢纤维钢筋砼梁抗剪性能的研究	章文纲	程铁生	王威龙
钢纤维混凝土梁受剪性能的试验研究	原明昭	艾 兵	(469)
钢纤维钢筋混凝土无腹筋梁的抗剪性能	高丹盈	曲 烈	(477)
高强混凝土框架节点的抗剪强度	朱春明	王 溥	陈敬安
反复荷载下,预应力装配整体式板柱节点中预应力钢筋粘结滑移性能的试验研究	阎兴华		(493)
考虑弯曲影响的钢筋混凝土板冲切强度	郑作樵		(501)
钢筋砼冲切破坏机理及冲切强度理论	曹声远	郭晓林	(509)
开孔混凝土板的抗冲切能力计算	舒兆发		(517)
钢筋混凝土无梁板的抗冲切性能	陈肇元	杨贵生	(525)
冲剪的非线性有限元分析	周克荣	蒋大骅	(533)
考虑错动和转动复合影响的板的冲剪强度塑性解	蒋大骅	周克荣	(541)
钢筋混凝土构件在拉扭、拉弯扭作用下的抗扭刚度研究	黄道凤	黄 棠	(549)
钢筋高强陶粒砼受扭构件的试验研究	张立新	康谷贻	王士琴
软化桁架理论在钢筋轻骨料砼纯扭构件分析中的应用	张立新	康谷贻	(565)
钢管混凝土柱在压扭荷载作用下的分析研究	徐积善	黎国情	(573)
钢筋混凝土板式受扭构件截面限制条件的试验研究	邹超英	王振东	(581)
关于劲性钢筋砼柱的计算研究	陈风扬	臧安民	(589)
偏心受压劲性钢筋砼柱(外包砼格构柱)的研究与设计	臧安民	杨宏强	陈风扬
劲性钢筋混凝土框架柱强度的试验分析	王海龙		(601)
劲性钢筋混凝土梁的非线性有限元分析	王祖华	钟树生	(609)
含 X 筋的劲性钢筋混凝土柱抗震性能的试验研究	张想柏	姜维山	赵鸿铁
劲性混凝土构件正截面强度计算方法	赵世春	陈家夔	路湛沁
劲性钢筋混凝土受弯构件正截面承载力的计算	陈眼云	张学文	王祖华

第 三 卷

地震荷载下钢筋混凝土剪力墙洞口间连系梁的破坏形态	董至仁	陈 平	曹普田
连系梁配筋形式对钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响	董至仁	张洵安	(649)
钢筋混凝土剪力墙的抗剪强度	尹新生	刘英三	(657)

弯曲屈服后破坏的延性 RC 剪力墙性能及计算模型	方鄂华	周云龙	(663)
双向双钢筋砼空心大楼板的试验研究与应用	张季超	张立功	(671)
双向预应力角点支承圆孔大楼板在轻板框架板柱结构中的性能	熊丹安	郭宝凯	刘顺辉 (679)
.....			
四边简支钢筋混凝土双向板挠度计算与板厚的确定	张平生		(687)
不同配筋体系的混凝土圆板试验研究	田福胜	蔡绍怀	(695)
部分预应力对重复荷载影响的分析	陈光生		(703)
预弯复合梁刚度和强度的试验研究	竺存宏		(711)
预应力混凝土 T 形梁弯扭复合作用极限承载力的研究	张祖敏	沙镇平	王仁恕 (719)
.....			
预应力砼 T 形梁在弯剪扭复合作用下的强度研究 ...	汪海	沙镇平	王仁恕 (727)
部分预应力砼结构的模糊优化设计	崔国帅	吕志涛	(735)
部分预应力混凝土柱性能研究与电算分析	王友权	吕志涛	(743)
预应力混凝土超静定结构次弯矩的计算	杨建明	吕志涛	(751)
无粘结部分预应力梁抗弯性能的试验研究	束继华	白力更	(759)
预应力混凝土简支梁徐变特性参数的确定	周乐农		(767)
预应力混凝土简支梁徐变特性影响因素的分析	周乐农		(775)
水工弧门支座钢筋混凝土结构试验研究	李宏	贺采旭	(783)
钢筋混凝土桩帽设计方法的研究	黄承逵	赵国藩	刘亚平 (791)
外包钢板高强混凝土和钢管高强混凝土园拱的试验研究	王志浩	邢秋顺	(799)
土中浅埋钢筋砼框架结构塑性变形能力的试验研究	王永喜	邢秋顺	(807)
偶然性爆炸荷载作用的结构延性比	丁曙锦		(815)
火烧过程中混凝土构件内的温度分布	陈荣荣	钱在兹	(823)
火烧后钢筋混凝土梁残余弯曲强度的计算	张自坚	陈荣荣	钱在兹 (831)
.....			
非线性循环割线法计算钢筋混凝土构件弯矩—曲率关系	王勇	周旺华	(839)
钢筋砼基本构件正截面强度的非线性规划设计法初探	王立新		(847)
装配式钢筋混凝土框架考虑装配节点非弹性变形的有限元计算方法	姚伟忠		(853)
按极限状态分析钢筋混凝土框架的有限元计算方法	姚伟忠		(859)
钢筋砼框架梁主要参数对抗震性能的影响	朱志达	涂鸣	周起敬 蒯世森 (867)
.....			
钢筋混凝土框架节点非线性有限元分析	方根生	王树兰	(875)
两跨连续墙梁的试验研究及其实用算法	刘绍炎		(883)
钢筋砼组合梁结合面抗剪有限元模型	施耀忠		(891)

用有限单元法分析钢筋混凝土组合梁若干问题	王 力 黄保魁 吴振声 朱聘儒 (899)
钢筋混凝土框架结构随机地震反应综合分析	吴再光 (907)
膨胀混凝土楼面板试验及弹塑性内力全过程分析	
..... 赖 明 候雪岩 谢宁·尼·依	(915)
坝后钢衬钢筋混凝土压力管道的非线性有限元分析	李传才 刘 幸 (923)
钢筋混凝土一般非线性有限元分析	蒋秀根 江见鲸 (931)
RC 有限元分析中的斜压杆粘结模型	滕智明 卢慧忠 张金屏 (937)
转移塑性铰对框架结构弹塑性动力反应的影响	冯世平 (945)
板壳结构非线性有限元分析中的弧长法	王 跃 沈聚敏 (953)
正常极限状态设计的耐久性指标	周 氏 吴胜光 汪基伟 (961)
钢筋混凝土梁板结构的模糊优化设计	陈 波 (969)
威布尔分布及其在评价混凝土强度中的应用	彭图让 (977)
随机地震作用下有缝混凝土重力坝裂缝扩展概率分析	吴再光 周 晶 (985)
钢筋混凝土双曲冷却塔几何缺陷允许值	徐 彬 童光珊 卢文达 (993)
钢筋混凝土框架结构地震破坏评估	沈聚敏 林 曦 (1001)
通过现场测试结果修正钢筋混凝土结构的可靠度	刘西拉 樊 静 (1009)
钢筋混凝土肋形梁楼盖优化设计智能化计算机辅助教学系统	
..... 俞文泰 董灵平 闻卫东 邢鸿燕	(1017)
钢筋砼纯扭构件的计算机辅助教学	马 良 冯世平 王际芝 (1025)

砼在两压一拉加载下的变形和强度特性

赵国藩 宋玉普 彭 放*

摘 要

本文利用自制的三轴试验装置系统对国内外较少进行的砼在两压一拉状态下的变形和强度特性进行了试验研究,给出了在各种应力组合下砼的应力~应变关系曲线及极限强度。在分析试验资料的基础上,建议了一个用八面体应力表述的适于砼在压拉状态的强度准则。

一、前 言

国内外对砼在复杂应力状态下的变形和强度特性都非常重视,并进行了试验及理论研究^[1-4],但由于试验上的困难,目前这方面的工作开展得还不够系统深入。其表现为:理论分析多,试验研究少;强度试验多,变形试验少;三向受压强度试验多,三向拉压强度试验少。为此,我室结合两个大型水电站大坝砼在三轴应力状态下的变形和强度特性进行了试验研究,特别对于目前国内外开展得较少,而在结构设计中又起控制作用的两压一拉状态给予了重点研究。由于篇幅所限,本文集中介绍砼在两压一拉状态的变形和强度特性。并根据试验资料,建立了一个用八面体应力表述的适于砼在压拉状态的强度准则。

二、试验装置

为进行砼在平面应变状态下的变形和强度研究,我们于1986年研制了一套砼三轴试验装置^[5]。该装置由于同从美国MTS公司引进的疲劳试验系统相结合,与一般三轴

*赵国藩(1925年1月),博士生导师,大连理工大学

宋玉普(1944年10月),博士,大连理工大学

彭 放(1963年6月),博士生,大连理工大学

试验机相比,有如下两个特点:①它不仅能进行荷载控制,而且能进行变形控制,从而可进行平面应变状态下的变形和强度试验。②数据采集处理全部由计算机实现。但该装置只能进行受压状态的试验,另外试验效率较低。为进行砼在三向拉压应力状态的变形和强度试验,我们改进和完善了原来的试验装置。经改进后的试验装置系统除保留了上述的特点外增加了进行三向拉压应力状态的试验功能,并且由于改进了变形量测,承力框架及液压缸等系统,增加了竖向配重措施,不仅大大提高了试验效率,而且也提高了试验精度^[6]。改进后的试验装置由四部分组成:加载装置,应变控制装置,应变量测装置和数据采集处理。其操作过程如下:

(1)安装试件及应变量测装置。

(2)开动液压源和电动泵施加初始荷载,一般为 2KN~5KN 即可,并检查各部分运行是否正常,试验位置是否正确。

(3)卸掉初始荷载后,开动计算机,对应变计调零,并记录初始值。

(4)进入正常加载状态,每级加载后,计算机自动记录荷载及应变值。加载速度:每级荷载大约需 5 分钟。

(5)当发现荷载显示器显示的荷载值有下降的趋势时,通过计算机控制数据采集系统立即进入连续采集状态,以便采集应力—应变曲线的下降段。直至荷载降为零为止。

三、试验设计

1、试件制作

本文的试件分 A、B 两批。A 批试件是为研究二滩电站拱坝砼材料在平面应变及一般三轴加载下的变形和强度特性而制作的。采用该坝的一种骨料,二级配比,骨料粒径分别为 5~20mm 和 20~40mm 两种,其吸水率分别为 0.66% 和 0.5%,细骨料(砂)的吸水率为 1.2%;并掺入了适量的粉煤灰和木钙质减水剂。具体配比资料为:水灰比(含粉煤灰) $W/(C+F)=0.48$,粉煤灰掺量 30%,含砂率 37%,碎石级配:粒径 5~20mm 为 50%,粒径 20~40mm 为 50%,木钙掺含量 0.2%(C+F)。这样,配合比例为灰:砂:石子 = 1:2.04:3.472,每方砼用水量 165 公斤,人工拌合,电动振捣棒捣实,露天盖草浇水养护。试验时测得 $15 \times 15 \times 15\text{cm}$ 砼立方体强度为 53.9MPa, $15 \times 15 \times 30\text{cm}$ 棱柱体强度 f_c 为 37.7MPa,试件分两种尺寸,一种为 $15 \times 15 \times 15\text{cm}$ 立方体,另一种为 $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ 立方体。

B 批试件是为研究东风电站拱坝砼材料在一般三轴加载下的变形和强度特性而制作的。采用该坝的一种骨料,二级配比,骨料粒径分别为 5~20mm 和 20~40mm 两种,具体配比资料为:水灰比(含粉煤灰) $W/(C+F)=0.5$,粉煤灰掺量 30%,含砂率 32%,碎石级配:粒径 5~20mm 占 40%,粒径 20~40mm 占 60%,木钙掺含量为 0.3%(C+F)。这样,配合比例为灰:砂:石子 = 1:2.7:5.82,每方砼用水量 119Kg。试件尺寸分两种: $15 \times 15 \times 15\text{cm}$ 及 $10 \times 10 \times 10\text{cm}$ 。

2、应力比规定:拉应力为正,且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$;拉应变为正,且 $\epsilon_1 > \epsilon_2 > \epsilon_3$ 。试件尺寸、应力比如表 1 所示。当荷载增加时,应力比始终保持不变。每一应力比至少试验 3

个试件。当发现离散性较大时，增加试件数目。获得可供分析的试验试件数及试件特性见表 1。

表 1 试件特性、应力比及强度

批号	试件尺寸 cm	应力比 $\sigma_3/\sigma_3;\sigma_2/\sigma_3;\sigma_1/\sigma_3$	数量	极限强度 σ_3 平均值(MPa)	强度比值 σ_3/f_c
A	15×15×15	1:0.5:-0.1	4	-11.3	0.3
		1:0.1:-0.2	4	-10.6	0.28
		1:0.11:-0.1	4	-15.1	0.40
		1:0.12:-0.05	3	-26.7	0.71
B	15×15×15	1:1:-0.2	3	-2.78	0.12
		1:1:-0.5	3	-1.71	0.07
		1:1:-0.8	3	-1.30	0.06
		1:1:-1	3	-1.17	0.05

注:表中 f_c 为 15×15×30cm 试件的棱柱体抗压强度(轴心抗压强度)

3. 减摩材料的选用

根据国内外的经验，我们曾分别对聚四氟乙烯、弹簧钢片，三层聚乙烯纸中间夹油为减摩材料进行了试验比较，结果发现:三种减摩材料的减摩效果基本相同，都得到与砼棱柱体抗压强度(轴心抗压强度)基本相同的试验结果，且无负摩擦效应产生^[4, 7]，但后者更便宜，而且使用也较方便。

4. 试件的机械磨面与粘结

在施加多轴应力的试验中，无论试件的受压表面，还是受拉表面都要平整、光滑。对于受拉表面，为了能与加载块牢固地粘结在一起，还必须将试件表面的水泥砂浆薄弱层磨掉。由于上述原因，试验前对试件表面进行了机械磨面。

试件与带有球面铰的加载块的粘结是用大连化物所产的建筑胶，其抗拉强度为 30MPa，抗剪强度为 17.5MPa。加载块与试件粘结后，再与加载头连结(图 6)，最后安装在液压缸和荷载传感器上。当液压缸反向加油时，试件就受到了拉力作用。

四、试验结果分析

1、应力与应变

由图 1-5 可见, 对于存在拉应力的一般三轴受力情况, 由于拉应力的作用, 该向拉应变增大, 从而使压力作用方向的应变也增大, 相应地, $\sigma_3-\varepsilon_3$ 曲线的斜率小. 砼受拉压破坏时, $\sigma-\varepsilon$ 曲线基本为线性. 在压压拉应力状态, 随拉应力降低, 压应力增加, 压应变也相应增大(如图 5 所示). 但对任一应力比, 对应其峰值应力时的拉应变一般都接近甚至大于单拉时的应变(图 5), 如 A 批试件单轴拉时, 峰值应力对应的拉应变为 0.00038, 而在 1:0.12:-0.05 时的峰值应力对应的拉应变为 0.0004.

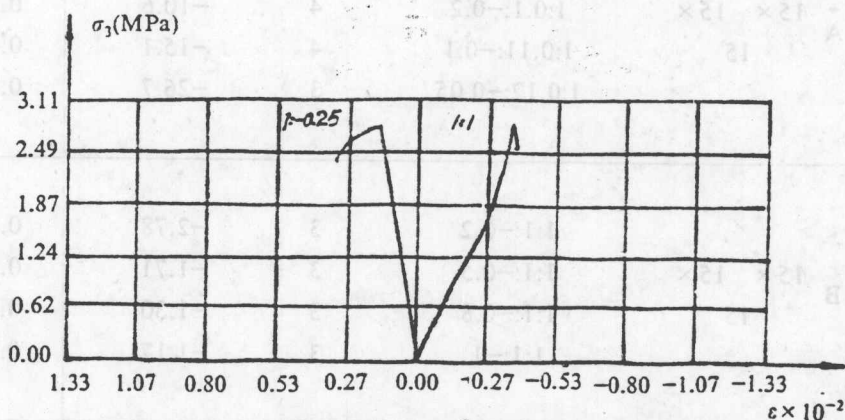


图 1 应力-应变关系曲线(B 批试件应力比 1:1:-0.25)

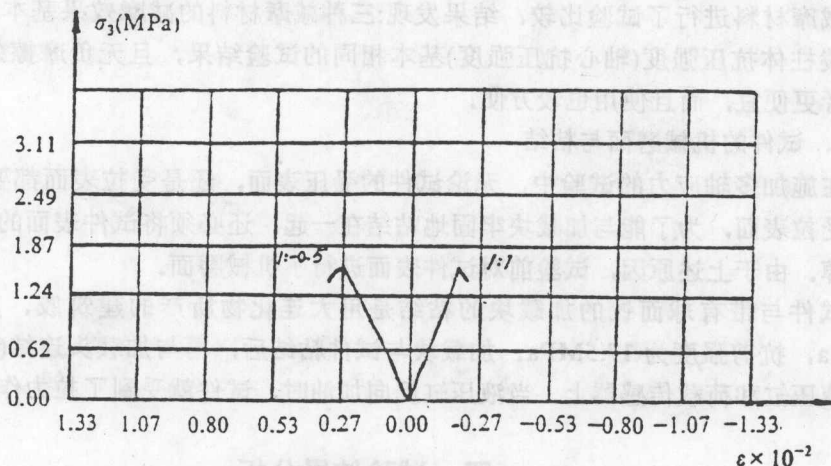


图 2 应力-应变关系曲线(B 批之试件应力比 1:1:-0.5)

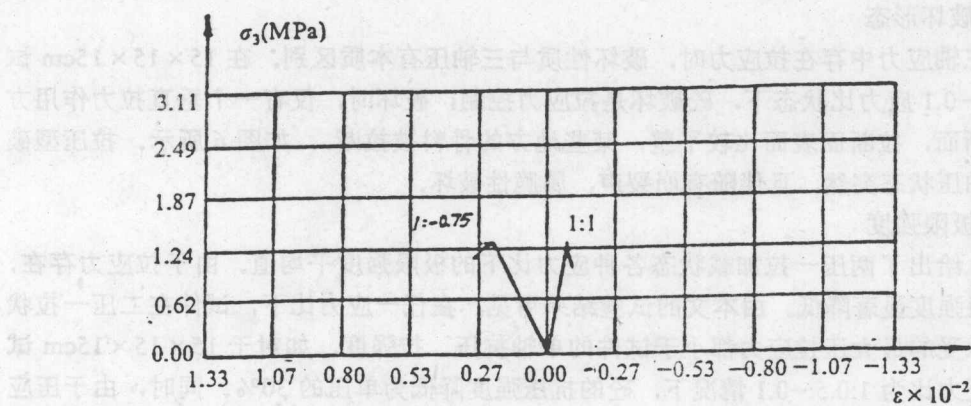


图3 应力-应变关系曲线(B批试件应力比 1:1:-0.75)

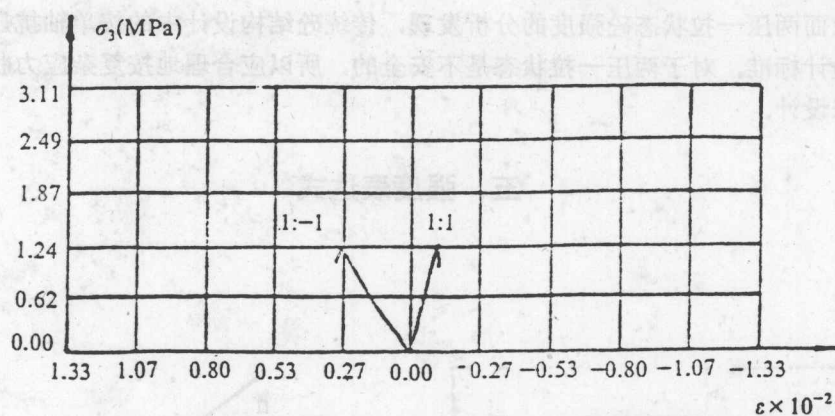


图4 应力-应变关系曲线(B批试件, 应力比 1:1:-1)

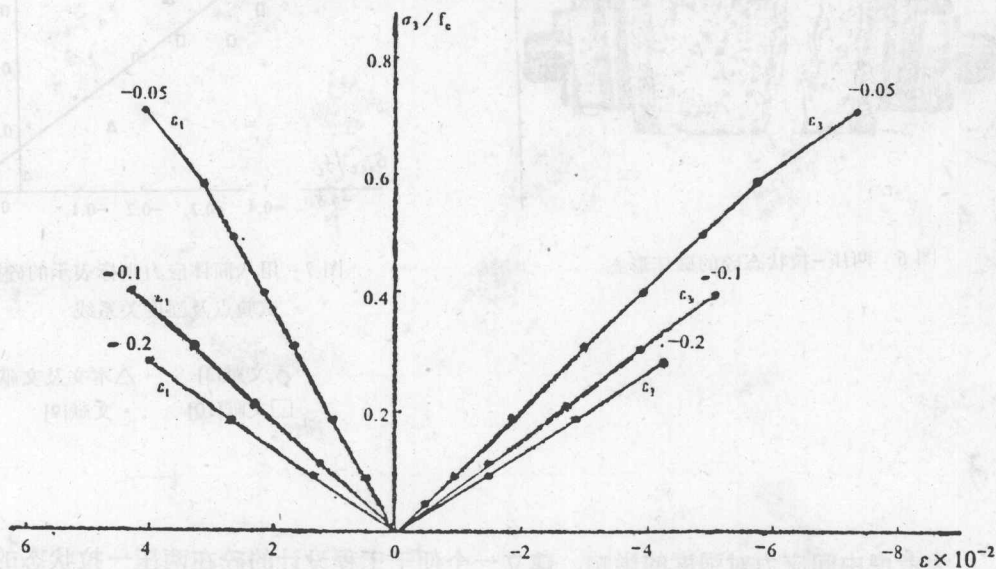


图5 A批试件 ϵ_1, ϵ_3 与 σ_3 与 σ_3 / f_c 的关系曲线比较(应力比分别为 1:0.1:-0.2:0.11:-0.11:0.12:-0.05)

2、破坏形态

当三轴应力中存在拉应力时，破坏性质与三轴压有本质区别。在 $15 \times 15 \times 15\text{cm}$ 试件 $1:0.5:-0.1$ 应力比状态下，砼破坏是拉应力控制，破坏时，仅有一个垂直拉力作用方向的拉断面，拉断面表面比较平整，某些地方的骨料被拉断，如图 6 所示。拉压型破坏比三轴压状态突然，且伴随有崩裂声，属脆性破坏。

3、极限强度

表 1 给出了两压一拉加载状态各种应力比下的极限强度平均值。由于拉应力存在，砼的极限强度显著降低。由本文的试验结果可见，在任一应力比下，试件在二压一拉状态所能承受的最大压拉应力都小于试件的单轴抗压、拉强度，如对于 $15 \times 15 \times 15\text{cm}$ 试块，在应力比为 $1:0.5:-0.1$ 情况下，砼的抗压强度降低为单压的 30%。同时，由于压应力的存在，使得砼抗拉强度降低，为单拉的 36%。这表明砼的拉压混合受力状态是最危险的情形，设计中应特别注意。

从上面两压一拉状态砼强度的分析发现，传统砼结构设计中的按单轴抗压、抗拉强度作为设计标准，对于两压一拉状态是不安全的，所以应合理地按复杂应力状态砼的强度准则来设计。

五、强度表达式

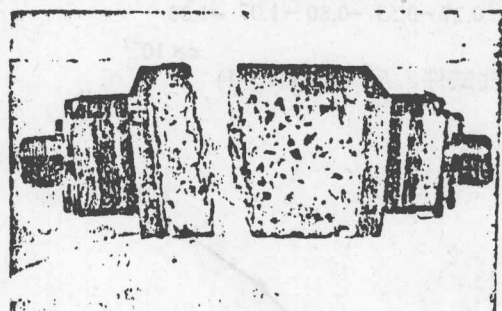


图 6 两压一拉状态砼的破坏形态

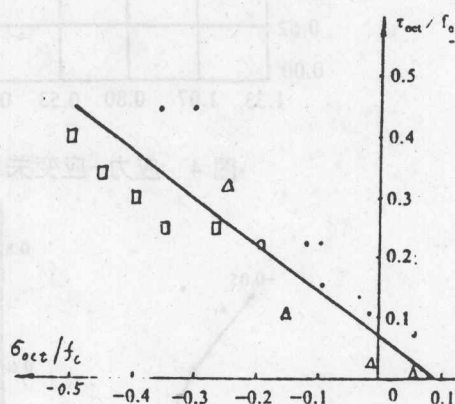


图 7 用八面体应力坐标表示的砼强度试验点及强度关系线

○ 文献[3] △ 本文及文献[4,7]
□ 文献[10] • 文献[9]

为考虑中间应力对强度的影响，建立一个便于工程设计的砼在两压一拉状态的强度准则，本文采用八面体应力坐标系对试验结果进行了分析整理，并绘在图 7 中。由图可

见, 各种应力比的试验结果在八面体应力坐标系的分布可近似用直线方程表示, 回归分析得直线方程为

$$\tau_{oct} / f_c = 0.06 - 0.785 \sigma_{oct} / f_c \quad (1)$$

式中 σ_{oct} 、 τ_{oct} 分别为八面体上的正应力和剪应力; f_c 为砼轴心抗压强度。该方程式适于拉压应力状态(包括两压一拉、一压一拉状态)。

六、结 论

1、砼在两压一拉状态的应力-应变关系曲线基本呈线性, 且随拉应力降低, 压应力增加, 压应变也相应增大。

2、砼在两压一拉状态的抗压极限强度 σ_3 低于双向受压的抗压强度, 其抗拉强度低于单轴受拉的抗拉强度。工程设计中应特别注意控制拉压状态由于压应力的存在使砼抗拉强度降低的不利影响。

3、在两压一拉及一压一拉状态下砼的强度可在八面体应力坐标系用一直线方程表示, 这便于工程实际应用。

参考文献

- [1] 于晓中等, 混凝土的二轴强度及其在拱坝设计中的应用, 水利水电科学研究院科学研究所论文集, 第 19 集(结构、材料), p17~23, 1982 年 10 月。
- [2] 王传志、过镇海、张秀琴, 二轴和三轴受压混凝土的强度试验, 土木工程学报, 1987 年 2 月, 第一期, p15~27。
- [3] Gerstl, H.K., Linse, D.H., et al, Strength of Concrete under Multiaxial Stress States, Proceedings, MoHenry Symposium, Held at Mexico City, Mexico, ACI, 1976.
- [4] 宋玉普, 钢筋混凝土有限元分析中的力学模型研究, 大连理工大学, 博士论文, 1988 年 4 月。
- [5] 宋玉普等, 平面应变状态下混凝土变形和强度研究的试验装置, 试验技术与试验机, 1988 年第五期, p12~17, 1988 年 5 月。
- [6] 宋玉普等, 三轴多功能混凝土试验系统, 大连理工大学, 1989 年 9 月。
- [7] 蔡澄清, 平面应变状态下砼本构模型的试验研究及非线性有限元分析, 大连理工大学, 硕士论文, 1988 年 11 月。
- [8] Hobbs, D.W., The Strength and Deformation Properties of Plain Concrete under Combined Stress, Part 2, London, Cement and Concrete Association, Technical Report, 42, 463, 1972.
- [9] Kupfer, H.B., and Gerstle, K.H., Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, J.ACI, Aug., 1973.

- [10] Hannant, D.J., Nomograms for the Failure of Plain Concrete Subjected to Short-Term Multiaxial Stresses, *The Structural Engineer*, Vol.52, No.5, May, 1974, pp151-165.

参考文献

- [1] 王世安等, 混凝土在短期多轴应力作用下的破坏, 混凝土结构设计, 中国建筑工业出版社, 1982年10月。
- [2] 王世安等, 混凝土在短期多轴应力作用下的破坏, 混凝土结构设计, 中国建筑工业出版社, 1982年10月。
- [3] Gao, H.K., Li, D.H. et al, Strength of Concrete under Multiaxial Stress, *Proceedings, Mechanics Symposium, Held at Mexico City, Mexico, ACI, 1979*。
- [4] 宋玉普等, 混凝土在短期多轴应力作用下的破坏, 混凝土结构设计, 中国建筑工业出版社, 1982年10月。
- [5] 宋玉普等, 混凝土在短期多轴应力作用下的破坏, 混凝土结构设计, 中国建筑工业出版社, 1982年10月。
- [6] 宋玉普等, 混凝土在短期多轴应力作用下的破坏, 混凝土结构设计, 中国建筑工业出版社, 1982年10月。
- [7] 宋玉普等, 混凝土在短期多轴应力作用下的破坏, 混凝土结构设计, 中国建筑工业出版社, 1982年10月。
- [8] Hobbs, D.W., The Strength and Deformation Properties of Plain Concrete under Combined Stress, Part 1, *London, Cement and Concrete Association, Technical Report, 41, 1971*。
- [9] Kupfer, H.R. and Gerstle, K.H., Behavior of Concrete under Biaxial Stress, *ACI, Aug. 1973*。