

## 摘要

随着我国汽车工业的迅猛发展,废旧轮胎的数量急剧增加。如何有效地对废旧轮胎进行资源性开发利用,减少其对环境的不良影响,是一个亟需解决的课题。

目前,国内外在胶粉改性沥青方面的研究较为成熟,而在橡胶混凝土方面的研究尚处于起步阶段。基于此,本文在 C35 和 C50 基准混凝土的基础上,采用不同粒径的胶粒或胶块,以不同掺量等体积代替部分细骨料或粗骨料分别制备橡胶混凝土试件,对其和易性和力学性能开展了试验研究。

橡胶混凝土的和易性试验结果表明,其坍落度随掺量增加总体上呈现下降的趋势,但受胶粒或胶块形态、掺量和混凝土内部引入气泡等因素的影响,在一定的掺量范围内存在反复变化的情况。橡胶混凝土的力学性能试验表明,在相同龄期的情况下,其抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、轴心抗压强度和弹性模量等随胶粒或胶块掺量的增加整体上均呈现下降的趋势,其中胶粉组 28 天龄期抗压强度在掺量为 70% 时下降幅度最大,其强度值仅为基准混凝土强度的 15.9%。同时,橡胶的掺入明显改善了混凝土在极限荷载下的破坏形态,其韧性和变形能力明显高于基准混凝土。橡胶混凝土的容重试验表明,其容重随胶粒或胶块掺量的增加而减小,下降幅度因胶粒或胶块掺入后混凝土内部引入气泡数量不等而略有差异,其中胶粉组在掺量为 70% 时容重下降幅度最大,达到基准混凝土的 19.35%; 胶粒-1 组次之,掺量为 70% 时降幅达到 17.2%。

现有试验结果表明,NaOH 溶液浸泡处理提高了胶粒或胶块与水泥砂浆的粘结力,对橡胶混凝土抗压强度的影响不大,但明显改善了其在极限荷载下的破坏形态。其中高掺量的橡胶混凝土在极限荷载下,表面裂纹几乎不显现,类似于弹性混凝土。

本文在橡胶混凝土试验研究的基础上,探讨了其在水泥混凝土路面面层和桥面铺装层等工程应用方面的可行性。橡胶混凝土从配合比设计、施工工艺等方面进行改进,完全可以满足工程应用的要求。此应用可实现废旧轮胎的无污染消化处理,并可充分利用橡胶混凝土的材料特性,将产生巨大经济效益和社会效益。

**关键词:** 废旧轮胎, 橡胶颗粒, 橡胶混凝土, 力学性能, 刚性路面, 桥面铺装

## Abstract

With the rapid development of automotive industry, the amount of waste wire has increased dramatically. It is a significant problem that is resolved as possible as early to recycle waste wire. The recycling waste wire can do less harm to the environment.

At present, the material property and applied technology of rubber modified asphalt concrete are studied and developed widely at home and abroad, but the study on rubcrete is only at the beginning stage in China. In this paper, the strength of reference cement concrete is C35 and C50. And different kinds of waste tire with different particle diameter are adopted to replace coarse aggregate or fine aggregate. Many groups of rubcrete specimens are manufactured in different replaced volume percentage. A series of tests including concrete workability and mechanical property and so on are done respectively.

The results of rubcrete workability tests show that slumps have the tendency of decrease with the increase of rubber in whole, but the change is iterative because of shape of rubber, replaced percent and alveoli produced in concrete. The mechanical property test results of rubcrete indicate that at the same curing age, the compressive strength, split tension strength, axial compressive strength, flexural strength and elastic modulus of rubcrete decrease with the increase of rubber. And the amount of decrease of rubcrete crumb rubber group is maximum in the condition of seventy percent, the compressive strength is equal to 15.9 percent of reference cement concrete. But rubber amends destruction form of rubcrete in maximum load, and the toughness and deformation ability are much higher than reference cement concrete. The results of rubcrete unit density tests show that the unit density decreases with the increase of replaced percentage. And the amount of decrease of rubcrete crumb rubber group is maximum and equal to 19.35 percent of reference cement concrete in the condition of seventy percent; the amount of decrease of the first rubcrete rubber particle group is equal to 17.2 percent of reference cement concrete.

Results of tests show that the *NaOH* surface treatment enhances the rubber-matrix adhesion, has little effect on compressive strength, but amends destruction form of rubcrete in maximum load. And fatigue cracks are little and invisible on the surface of rubcrete with high rubber content, rubcrete is similar to elastic concrete.

Based on the results of tests, the feasibility of rubcrete applied to cement concrete pavement and cement concrete bridge deck pavement is discussed. If rubcrete is improved on design of mixing ratio and construction, rubcrete can meet the demand of engineering projects completely. The application will make waste wire recycled harmlessly. And material property of rubcrete is used to bring remarkable economical benefits and social benefits.

**Keywords:** waste tire, rubber particle, rubcrete, mechanical property, rigid pavement, bridge deck pavement.

## 第一章 绪论

### 1.1 本文的研究背景及意义

我国橡胶消费量随着汽车工业的迅猛发展已连续三年位列世界榜首。2004年橡胶消费量为435万吨,产生了1亿条左右的废旧轮胎,预计到2010年将超过2亿条。废旧轮胎若埋在土中,100年也不会分解腐烂;若长期露天存放,极易滋生蚊虫、引发传染病,并且易造成火灾,产生大量有害气体,危害人体健康,引发诸多的环境问题<sup>[1~4]</sup>。

在废旧轮胎的回收利用方面,世界上主要的发达国家采取的方式各有特点<sup>[5,6]</sup>。美国主要通过立法推动废旧轮胎再利用。从1994年起,美国有关条例规定,由国家投资铺设的沥青公路,其铺路材料的5%必须使用废旧轮胎磨碎的胶粉。另外,对废旧轮胎进行翻新处理,一条旧轮胎平均可翻新4次。英国利用废旧轮胎为燃料,用于电厂发电,效果显著。日本废旧轮胎总的再利用率为87%,其中材料再利用占37%,热循环占50%;而在材料再利用方面,约有21%被用来生产翻新轮胎胎体,12%被用作再生胶和橡胶颗粒。韩国利用废旧轮胎批量提炼石油和炭黑。俄罗斯使用臭氧粉碎技术对废旧轮胎进行再处理。

相对发达国家,我国的废旧轮胎回收利用率只有65%,主要的做法有:轮胎翻新、生产再生胶和胶粉<sup>[1~12]</sup>。

轮胎翻新主要集中在斜交胎上,品种包括工程胎、航空胎和载重胎,而对于子午胎,尤其是全钢子午胎尚未形成真正的翻新能力,同时国内轮胎子午化的趋势却愈加明显。

利用废旧轮胎生产再生胶存在诸多缺陷:生产工艺复杂、耗能多、生产过程污染环境、容易造成二次公害等。再生胶在轮胎中的用量一般为5%~10%,在工业制品中的用量一般为10%~20%,在鞋跟、鞋底等方面的用量可达到40%左右。因此,橡胶行业对再生胶的需求量是相当有限的。

目前,利用废旧轮胎生产胶粉的方法有三种,即常温工艺的滚筒齿盘式、湿法工艺的酸性中和、水洗、带滤干燥工艺及液氮(LN<sub>2</sub>)深冷锤击粉碎。另外新工艺方法有二种:臭氧粉碎和高压爆破粉碎<sup>[16]</sup>。胶粉的主要应用<sup>[13~17]</sup>有:铺设高等级公路;作为原材料加工成橡胶地砖,适用于敬老院、幼儿园、病房地面、球场、操场、健身房及各种游乐场所,国外大量用在人行道、过街天桥、地下通道、机场、码头物料搬运区的防滑通路等;将废轮胎胶粉、沙子、石子、水泥混合,用模型压制成铁路枕木,具有重量轻、抗冲击和耐腐蚀等优点,能减少火车行驶噪声和震动;铁路平交道口用橡胶铺面板取代传统混凝土铺面,提高了道口铺面寿命,减少维修费用,增加道口安全性,极大地降低重载车辆对线路的冲击作用,并能减震降噪,是良好地面绝缘性材料,有着积极的经济效益和社会效益;精细

胶粉代替再生胶直接用于橡胶制品,如普通胶管、胶带制品、橡胶减震制品、鞋类制品、子午线轮胎和斜交轮胎等。

综上所述,要提高我国废旧轮胎的回收利用率,需进一步提高胶粉在工程上特别是道路方面的应用潜力。而将废旧轮胎橡胶加入到沥青或沥青混合料中作为铺路材料的历史则可追溯到20世纪40年代的美国。废橡胶粉应用于沥青路面的技术主要分为湿法和干法:湿法是指废橡胶先与沥青拌和,制成一种称为橡胶沥青的改性沥青胶结料,然后再与石料拌和;干法是指将废橡胶作为一部分细集料先与石料干拌,然后喷入沥青拌制成废橡胶粉(或颗粒)改性沥青混合料。改性沥青路面使用未改性胶粉,采用“干法”工艺,即将胶粉投入热沥青中,形成硫化胶改性热混合料铺设路面,每公里耗用一万个废胎(双车道),以薄层敷设橡胶沥青路面比约厚一倍的纯沥青路面更为耐久和廉价。采用橡胶沥青路面可减少噪音,提高耐磨抗冻等性能,延长一倍的使用期限,缩短刹车制动距离。此应用在美国加州已得到证实,路面不使用胶粉,五年后必须重新敷设,而含胶粉的路面处于良好状态。目前美国有三个州明确要求路面必须使用胶粉,其中胶粉用于沥青的用量1994年为5%,1995年为10%,1996年为15%,1997年为20%<sup>[4,15]</sup>。

与国外相比,国内关于胶粉改性沥青路面的研究起步较晚<sup>[4]</sup>。20世纪70年代末80年代初为改善性能不佳的国产沥青,同济大学研究了橡胶粉与沥青共熔反应的变化规律和对橡胶沥青路用性能的影响。通过系统的试验研究,分析验证了磨细橡胶粉改性沥青的主要特性和路用价值,改善了其生产工艺,促进了改性沥青混凝土在路面工程中的应用。1980年和1981年分别在江西省的铅山县和贵溪县铺筑了橡胶沥青试验路。由于试验路的等级较低,路面工艺是较低等级的贯入式和表处,研究成果不适用于高等级公路。2001年,交通部公路科研所首次在钢桥桥面铺装中用干法工艺加入了30%(相对于沥青用量)的橡胶粉,该桥面经受了两个夏季的重交通考验,基本保持完好。2001~2003年,交通部公路科学研究所与同济大学、山东省交通科学研究所等单位合作承担了西部交通建设科技项目“废旧橡胶粉用于筑路的技术研究”。该课题全面地开展了橡胶粉沥青混合料的室内试验研究,初步提出了橡胶粉改性沥青的技术标准、橡胶粉沥青混合料设计方法及技术标准。

目前,国家发改委目前正在全力推进废旧轮胎回收利用的产业化发展,并初步拟定了第一个废旧轮胎回收利用的法规《废旧轮胎回收利用管理条例》;教育部国家级循环经济创新基地计划将“废旧轮胎的资源化”列入国家课题进行研究;交通部已立项研究废旧轮胎胶粉改性沥青在道路中的应用,并在广东、山东、河北、四川、贵州等地修筑了总长近30千米的试验路段;建设部也就胶粉改性沥青在城市道路建设中的应用进行了立项研究<sup>[4]</sup>。

相对于胶粉改性沥青的成熟研究和道路应用,橡胶混凝土的研究始于20世纪

80年代末期,美国北卡罗来纳州立大学土木工程学教授Shuaib Ahmad将废轮胎磨碎,然后与混凝土混合制成“橡胶混凝土”(rubcrete)<sup>[18]</sup>。试验研究结果表明:橡胶混凝土的工程性能介于普通水泥混凝土(刚性)和沥青混凝土(柔性)之间,集合了橡胶和水泥混凝土的特点。比起普通水泥混凝土,橡胶混凝土抗裂性能好、能量吸收多(比普通混凝土高25%或更多)、韧性高,变形能力大大高于普通水泥混凝土(0.6%极限变形),具有线性与非线性特征,其弹性模量可以低至普通水泥混凝土的几分之一甚至几十分之一,并且具有重量轻、干收缩小(0.02%)、热膨胀系数低(为普通混凝土的50%或更低)和良好的隔热、隔音、减震性能。

与普通水泥混凝土路面相比较,橡胶混凝土路面能够减少甚至消除伸缩缝,同时增加路面柔度,在保持其优点的同时,从根本上改善水泥混凝土路面高噪声、高振动的缺点。通过合理的设计,橡胶混凝土可用于各种等级路面。如果我国道路铺设橡胶混凝土,不仅可实现废旧轮胎的无污染消化处理,而且可以充分利用橡胶混凝土的工程性能特征,产生较大的经济效益和社会效益<sup>[19]</sup>。

## 1.2 橡胶混凝土的研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

自20世纪80年代末期美国北卡罗来纳州立大学教授Shuaib Ahmad首次制备“橡胶混凝土”(rubcrete)开始,橡胶混凝土的相关研究随之展开。最早的研究论文发表于20世纪90年代初期,到目前为止,主要的试验研究成果有:

1993年,Eldin和Senouci<sup>[20]</sup>对部分粗(细)骨料被橡胶块(粒)代替的橡胶混凝土进行了力学性能试验研究。试验结果表明,橡胶混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度随掺量的增大有所降低,但韧性和吸能效果显著增强,在试验基础上,建立了橡胶混凝土破坏机理的数学模型。

1995年,Topcu<sup>[21]</sup>研究了在掺入橡胶粒(分别为骨料总量的30%、50%、70%、100%)后混凝土相关的力学性能。试验结果表明,橡胶混凝土的密度、抗压强度和弹性模量随橡胶掺量增加呈现降低趋势。

1996年,Hai Huynh和Dharmaraj Raghavan<sup>[22]</sup>等人在混凝土中掺入2mm橡胶粒或两种不同的橡胶块(5.5mm×1.2mm、10.8mm×1.8mm),试验结果表明,橡胶粒的掺入导致混凝土抗压强度和抗折强度下降,橡胶块的掺入改善了混凝土的某些性能。

1997年,H. Huynh和D. Raghavan<sup>[23]</sup>等人研究了高碱性环境下轮胎橡胶耐久性问题。将10.8mm×1.8mm的橡胶块置于水泥水化物、Ca(OH)<sub>2</sub>、NaOH三种碱性溶液中,浸泡四个月后发现,橡胶块的质量有所降低,但抗拉强度和结构性状基本没有改变。因此,轮胎橡胶适用于混凝土的碱性环境。

1998年,Goulias和Alin<sup>[24]</sup>等人对橡胶混凝土的无损检测技术进行了研究,

并给出了有损检测结果与无损检测 (NDT) 结果之间的对应关系。

1999 年, Khatib 和 Bayomy<sup>[25]</sup> 等人用胶粉、橡胶块分别替代砂和石子的方法制备了橡胶混凝土, 进行了力学性能试验研究。试验结果表明, 橡胶混凝土的抗压强度随掺量的增大有所降低, 而韧性显著增强。

2000 年, Segre 和 Joekes<sup>[26]</sup> 等人探讨了 NaOH 溶液浸泡处理对橡胶混凝土性能的影响。试验结果表明, 经 NaOH 溶液浸泡处理后, 提高了水泥砂浆和胶粉的粘结力, 橡胶混凝土的强度和韧性有不同程度的提高。

2002 年, Nadia Segre 和 Paulo J.M.Monteiro<sup>[27]</sup> 等人通过对废旧轮胎橡胶表面进行相应的处理, 改善其与水泥浆之间的胶结能力。

2004 年, Guoqiang Li<sup>[28]</sup> 等人研究了掺入不同长度和不同厚度橡胶条橡胶混凝土的力学性能。试验结果表明, 与普通混凝土相比, 橡胶条橡胶混凝土的强度和刚度较低, 但韧性较好; 与橡胶块橡胶混凝土相比, 橡胶条橡胶混凝土具有较好的强度和韧性。橡胶条混凝土试件的试验结果和理论分析表明, 直而薄的橡胶条能有效降低应力集中, 提高改性材料强度。

在试验研究的基础上, 美国在橡胶混凝土的工程应用方面开展了部分工作。

1999 年 2 月, 美国亚利桑那州立大学校园内修建了一段轮胎橡胶混凝土人行道, 该段人行道使用过程中性能表现良好。

2003 年 1 月, 美国设计了 3 块无伸缩缝高橡胶掺量混凝土板 (177~235 kg/m<sup>3</sup> 的橡胶粒掺量) 作为停车泊位, 经过一年的使用, 三块板均未出现裂缝。

2003 年 5 月, 亚利桑那州凤凰市建造了世界上第一个橡胶混凝土网球场, 该网球场由两块 11 m × 12 m 的无伸缩缝橡胶混凝土板组成, 厚度为 10 cm ~ 37.5 cm, 橡胶掺量为 177 kg/m<sup>3</sup>。

2003 年 6 月, 亚利桑那州交通部首次在该州北部建造了世界上第一条橡胶混凝土路面道路段。

2003 年 10 月, 亚利桑那州交通部及其它单位又在亚利桑那州建造了多个试验点, 包括停车泊位、网球场和房基等。

从“橡胶混凝土”概念被提出开始, 其相关的试验研究和工程应用的探讨就一直持续着, 其理论体系逐步完善, 工程应用价值也随之提高。

### 1.2.2 国内研究现状

国内在橡胶混凝土方面的研究起步较晚。到目前为止, 研究主要集中在材料性能试验方面, 主要成果如下。

1997 年, 石家庄铁道学院宋少民<sup>[29]</sup> 等人探讨了橡胶粉对混凝土抗折强度、抗压强度及抗冲击性能的影响。研究结果表明, 橡胶混凝土的抗折强度、抗压强

度较基准混凝土变化不大,冲击荷载明显提高。

2001年,同济大学孙家瑛<sup>[30]</sup>等人研究了橡胶混凝土的物理力学性能和耐久性能,结果表明,橡胶混凝土具有硬度高、延伸率大、抗磨损和抗老化性能佳等特点。

2004年,南华大学陈振富<sup>[31]</sup>等人对橡胶混凝土小变形阻尼进行了相关研究。试验结果表明,随橡胶掺量的增加,橡胶混凝土阻尼比增大,弹性模量降低。

2004年,同济大学熊杰<sup>[32]</sup>等人研究了橡胶块和橡胶粉取代部分粗骨料后混凝土的性能。试验结果表明,橡胶混凝土的密度和抗压强度随橡胶掺量增加而降低,橡胶颗粒种类对橡胶混凝土抗压强度影响较大。

2004年,东南大学陈波<sup>[33]</sup>等人将不同比例的橡胶粉或橡胶粒分别代替水泥和砂,制作了C50橡胶混凝土,分析加压成型对抗压和抗折性能的影响,并对橡胶混凝土的抗冻和抗渗等性能做了初步研究。研究结果表明,橡胶混凝土力学性能较基准混凝土有所下降,但加压成型工艺可有效改善其下降幅度,橡胶粉(颗粒)掺量在10%以下时,可明显改善混凝土的抗冻和抗渗性能。

2005年,天津大学袁琳<sup>[34]</sup>初步探讨了橡胶集料钢筋混凝土梁正截面受弯承载力,并给出了压应力~压应变曲线关键点的数值取值范围。

2005年,东南大学张亚梅<sup>[35]</sup>等人研究了橡胶混凝土在浸-烘循环作用下的性能。研究结果表明,橡胶混凝土的性能随浸-烘循环次数的增加逐渐劣化。

2006年,华南理工大学于利刚<sup>[36]</sup>等人将废橡胶胶粉掺入水泥混凝土中,结果表明,废橡胶胶粉可以有效改善混凝土的收缩性能,提高其韧性、抗冲击性能、抗疲劳性能和抗冻性能,但同时混凝土强度和弹性模量显著下降。

2006年,天津大学朱涵、欧兴进<sup>[37]</sup>等人将废旧轮胎经处理后得到的橡胶细颗粒取代部分骨料配置成橡胶集料混凝土,进行抗氯离子渗透性研究。结果表明,橡胶集料混凝土具有很低的氯离子渗透性。

国内关于橡胶混凝土的研究成果尚待进一步完善,其在工程方面的应用还处于探索阶段。

### 1.3 本文的主要内容

本文在国内外研究成果的基础上,重点对橡胶混凝土材料性能及其影响因素开展了试验研究。在试验结果的基础上,对其工程应用的可行性进行探讨。本文的主要内容有:

(1) 以C35为基准混凝土,将三种胶粉(粒)(即28目胶粉、0.1~5mm连续级配胶粒、2~8mm连续级配胶粒)分别以不同的掺量等体积代替细骨料,研究橡胶混凝土的和易性、力学性能和容重等性能,探讨不同因素对其性能的影响。其中力学性能试验包括7天龄期的抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验、28天龄期的抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验、抗折强度试验、轴心抗压强度试验和静

力受压弹性模量试验、90 天龄期抗压强度试验等。

(2) 通过分析比较, 探讨  $NaOH$  溶液浸泡处理对橡胶混凝土的影响。

(3) 以 C35 和 C50 为基准混凝土, 在胶粒(块)(即 1~3 mm 胶粒、5~12 mm 橡胶块)经  $NaOH$  溶液浸泡处理后, 分别以不同的掺量等体积代替细(粗)骨料, 研究橡胶混凝土的和易性、力学性能和容重等性能。其中力学性能试验包括 7 天龄期的抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验、28 天龄期的抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验、抗折强度试验、轴心抗压强度试验和静力受压弹性模量试验等。

(4) 在试验研究的基础上, 探讨橡胶混凝土在水泥混凝土路面面层和桥面铺装层等工程应用的可行性。



## 第二章 橡胶混凝土材料性能试验研究

本章以 C35 为基准混凝土,采用三种不同粒径的胶粉(粒),分别以不同的掺量等体积代替细骨料,制备了 18 组共计 432 个橡胶混凝土试件,对其和易性、力学性能和容重等方面进行试验研究,主要探讨橡胶粒径、掺量和养护龄期等因素对材料性能的影响。

### 2.1 试验设计

#### 2.1.1 试验原材料

- (1) 水泥。新乡市金峪水泥厂生产的金峪牌 P.O 32.5 R 水泥,指标合格。
- (2) 砂。中粗河砂,连续级配,细度模数 2.80,表观密度  $2587 \text{ kg/m}^3$ 。
- (3) 石子。5~25 mm 碎石,连续粒径,级配合格。
- (4) 外加剂。河南建苑工程材料有限公司生产的建 1 早强高效减水剂,减水效率  $\geq 13\%$ 。
- (5) 胶粉(本文以 A 表示)。河南省巩义市郑顺氟化工有限公司橡胶分公司生产的 28 目胶粉,表观密度  $1176.5 \text{ kg/m}^3$ 。见图 2-1。
- (6) 胶粒-1(本文以 B 表示)。河南省巩义市郑顺氟化工有限公司橡胶分公司生产的 0.1~5 mm 连续级配胶粒,表观密度  $1220 \text{ kg/m}^3$ 。见图 2-2。
- (7) 胶粒-2(本文以 C 表示)。河南省巩义市郑顺氟化工有限公司橡胶分公司生产的 2~8 mm 连续级配胶粒,表观密度  $1136 \text{ kg/m}^3$ 。见图 2-3。
- (8) 水。引用自来水。

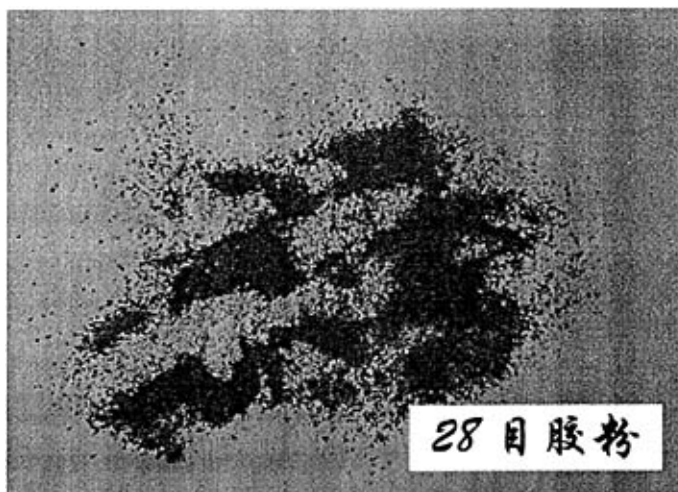


图 2-1 28 目胶粉形态图

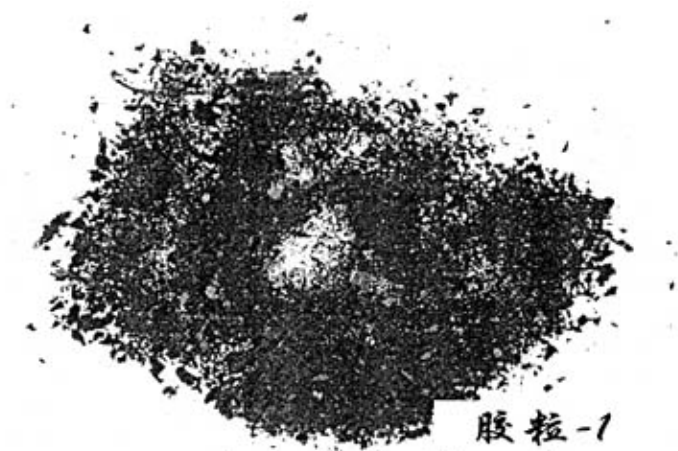


图 2-2 胶粒-1 形态图

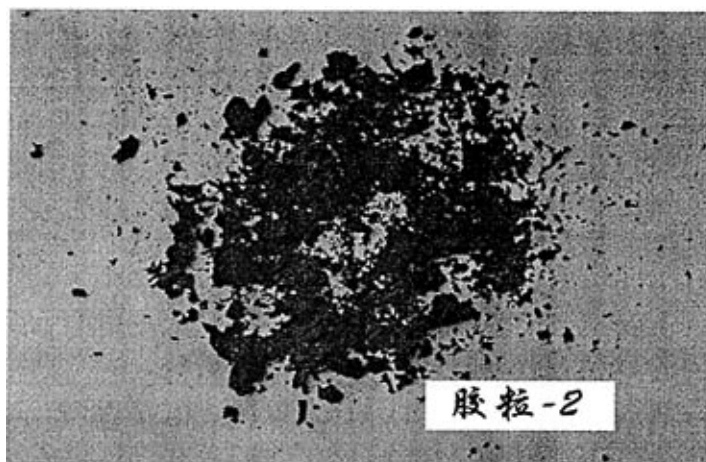


图 2-3 胶粒-2 形态图

### 2.1.2 试验分组和配合比设计

掺入的废旧轮胎橡胶为胶粉、胶粒-1、胶粒-2 等三种形式，分别以 20%、30%、40%、50%、60%、70% 的掺量等体积替代砂。依照掺量的不同，本次试验共分为 7 个大组，其中 20%~60% 组按掺合物的不同均细分为 3 个小组，70% 组按掺合物的不同细分为 2 个小组。

基准混凝土（即细骨料——砂不被橡胶替代）的设计强度等级为 C35。

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2000)，计算出初步配合比，试拌调整，得出基准配合比，在此基础上，经 7 天龄期的强度检验，确定各组混凝土配合比如下表。

表 2-1 各组混凝土配合比表

橡胶掺量 (%)		C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	橡胶 (kg/m <sup>3</sup> )	减水剂 (kg/m <sup>3</sup> )
0	C35	477	552	1230	191	0	2.385
20	A	477	441.6	1230	191	50.2	2.385
	B	477	441.6	1230	191	52.1	2.385
	C	477	441.6	1230	191	48.5	2.385
30	A	477	386.4	1230	191	75.3	2.385
	B	477	386.4	1230	191	78.1	2.385
	C	477	386.4	1230	191	72.7	2.385
40	A	477	331.2	1230	191	100.4	2.385
	B	477	331.2	1230	191	104.1	2.385
	C	477	331.2	1230	191	97.0	2.385
50	A	477	276	1230	191	125.5	2.385
	B	477	276	1230	191	130.2	2.385
	C	477	276	1230	191	121.2	2.385
60	A	477	220.8	1230	191	150.6	2.385
	B	477	220.8	1230	191	156.2	2.385
	C	477	220.8	1230	191	145.4	2.385
70	A	477	165.6	1230	191	175.7	2.385
	B	477	165.6	1230	191	182.2	2.385

2.1.3 试件设计

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002), 各组混凝土试验安排见表 2-2。

表 2-2 各组混凝土试验安排表

试件编号	橡胶掺量	试验内容	试件尺寸 (mm)	试件个数	试验说明
C35-1	0%	抗压强度	150×150×150	3×3=9	试件养护 7 天后做抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验; 养护 28 天后做抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验、轴心抗压强度-弹性模量试验、静力受压弹性模量试验、抗折强度试验; 养护 90 天后做抗压强度试验。
C35-2		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×2=6	
C35-3		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6	
C35-4		抗折强度	150×150×550	3	

续表 2-2

试件编号	橡胶掺量	试验内容	试件尺寸 (mm)	试件 个数	试验说明
20-n-1	20%	抗压强度	150×150×150	3×3×3=27	同上
20-n-2		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×3×2=18	
20-n-3		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×3=18	
20-n-4		抗折强度	150×150×550	3×3=9	
30-n-1	30%	抗压强度	150×150×150	3×3×3=27	同上
30-n-2		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×3×2=18	
30-n-3		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×3=18	
30-n-4		抗折强度	150×150×550	3×3=9	
40-n-1	40%	抗压强度	150×150×150	3×3×3=27	同上
40-n-2		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×3×2=18	
40-n-3		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×3=18	
40-n-4		抗折强度	150×150×550	3×3=9	
50-n-1	50%	抗压强度	150×150×150	3×3×3=27	同上
50-n-2		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×3×2=18	
50-n-3		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×3=18	
50-n-4		抗折强度	150×150×550	3×3=9	

续表 2-2

试件编号	橡胶掺量	试验内容	试件尺寸 (mm)	试件个数	试验说明
60-n-1	60%	抗压强度	150×150×150	3×3×3=27	同上
60-n-2		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×3×2=18	
60-n-3		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×3=18	
60-n-4		抗折强度	150×150×550	3×3=9	
70-n-1	70%	抗压强度	150×150×150	3×2×3=18	同上
70-n-2		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×2×2=12	
70-n-3		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×2=12	
70-n-4		抗折强度	150×150×550	3×2=6	

备注: n 为 A、B、C 时分别表示掺入 28 目胶粉、0.1~5mm 胶粒、2~8mm 胶粒, 掺量为 70% 时 n 为 A、B (当 n 为 C 时混凝土和易性太差, 故未浇筑试件)。

### 2.1.4 试件制作及养护

采用强制式混凝土搅拌机搅拌, 搅拌均匀后装入试模, 置于振动台振动密实成型。24 小时后拆模, 将试件搬入标准养护室 (温度为 20±2℃, 相对湿度为 95% 以上) 养护。

## 2.2 橡胶混凝土拌合物的和易性

混凝土可以看作砂浆和粗集料的混合物, 其各种性质都视砂浆和粗集料的相对数量而定。对于混凝土拌合物的和易性, 主要包括稠度和泌水离析两个方面。本次试验过程中, 混凝土稠度采用最常用的试验方法——坍落度试验进行测试, 同时观察坍落后的混凝土的黏聚性及保水性 (即混凝土是否出现泌水离析现象)。

坍落度试验<sup>[38]</sup>是 Abrams 提出的最早的试验混凝土拌合物稠度的方法。试验采用的仪器是一只装有提手和脚踏板的截锥形金属圆筒, 其上口内径等于 100mm, 下口内径等于 200mm, 高度等于 300mm, 另需配备一根端头呈半球形的、长约 600mm 的 Ø16mm 铁棒, 用于捣插拌合物。试验时先将内壁经过湿润的圆筒放在经过湿润的坚实不透水的底板上, 用双足踩住脚踏板, 不使圆筒摇

动。将混凝土拌合物分三等份装入圆筒，每次装入的拌合物用捣棒按规定捣插 25 次。在大约 5s 的时间内将圆筒向上提升 300mm，提升时不得作摇摆或扭转动作。量出拌合物石块顶面原中心点降落的高度（可从圆筒顶口平面直接量出），即为混凝土拌合物的坍落度。

橡胶混凝土拌合物坍落度随胶粉（粒）掺量变化曲线如图 2-4 所示。

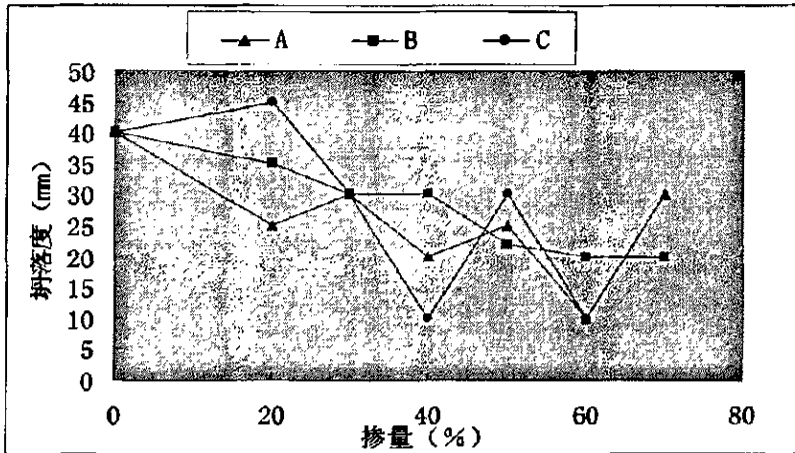


图 2-4 橡胶混凝土拌合物坍落度~掺量曲线

由橡胶混凝土拌合物坍落度~掺量曲线可知，基准混凝土在掺入胶粉（粒）后，其原有的骨架重新组构，坍落度随掺量的增加总体上保持下降的趋势。但受胶粉（粒）形态、掺量和掺入后混凝土内部引入气泡数量等因素的影响，橡胶混凝土的坍落度在一定掺量范围内出现反复变化的情况。

### 2.3 抗压强度试验

混凝土主要是用以受压的一种材料，所以抗压强度是衡量混凝土质量的基本指标。本次试验根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)，对橡胶混凝土在压缩荷载下的承载能力——抗压强度进行试验研究。

#### 2.3.1 试验步骤

- (1) 试件从养护室取出后及时进行试验，将试件表面和上下承压板面擦干净。
- (2) 将试件安放在试验机的下压板上，试件的承压面与成型时的顶面垂直。试件的中心与试验机的中心对准，开动试验机，当上压板与试件接近时，调整球座，使接触均衡。
- (3) 在试验过程中，以 11.25~18 kN/s 的加荷速度均匀加荷。当试件接近破坏开始急剧变形时，停止调整试验机油门，直至破坏，并记录破坏荷载。

#### 2.3.2 试验数据的处理

橡胶混凝土抗压强度按下式计算：

$$f_{cc} = \frac{F}{A} \tag{2-1}$$

式中：  $f_{cc}$ —立方体试件抗压强度 (MPa)；

$F$ —试件破坏荷载 (N)；

$A$ —试件承压面积 (mm<sup>2</sup>)。

抗压强度计算精确至 0.1 MPa。

橡胶混凝土抗压强度值应符合以下规定：

- (1) 三个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值 (精确至 0.1 MPa)；
- (2) 三个测值中的最大值或最小值如有一个与中间值之差大于中间值的 15%，则把最大值及最小值一并舍去，取中间值作为该组试件的抗压强度值；
- (3) 如最大值和最小值与中间值之差均超过中间值的 15%，则该组试件的试验结果无效。

### 2.3.3 试验结果及分析

橡胶混凝土三种胶粉 (粒)、不同掺量以及不同龄期的抗压强度试验结果分别见表 2-3~表 2-12。

表 2-3 掺加胶粉试件 7 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
7	A	0	546.9	24.3	25.7	100.0
			568.6	25.3		
			616.6	27.4		
		20	301.5	13.4	13.6	52.9
			337.9	15.0		
			278.4	12.4		
		30	276.5	12.3	12.3	47.8
			304.5	13.5		
			248.3	11.0		
		40	241.0	10.7	10.0	38.9
			227.3	10.1		
			207.9	9.2		
		50	219.9	9.8	9.8	38.1
			235.5	10.5		
			205.8	9.1		
		60	185.0	8.2	8.8	34.2
			199.4	8.9		
			209.3	9.3		
		70	98.13	4.4	4.4	17.1
			103.8	4.6		
			93.04	4.1		

表 2-4 掺加胶粒-1 试件 7 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
7	B	0	546.9	24.3	25.7	100.0
			568.6	25.3		
			616.6	27.4		
		20	390.3	17.3	17.6	68.5
			365.5	16.2		
			435.0	19.3		
		30	251.1	11.2	14.7	57.2
			330.8	14.7		
			351.6	15.6		
		40	210.2	9.3	11.5	44.7
			261.8	11.6		
			259.3	11.5		
		50	237.4	10.6	9.1	35.4
			204.6	9.1		
			172.7	7.7		
		60	155.3	6.9	7.8	30.4
			202.0	9.0		
			174.4	7.8		
		70	151.8	6.7	6.4	24.9
			138.1	6.1		
			141.1	6.3		

表 2-5 掺加胶粒-2 试件 7 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
7	C	0	546.9	24.3	25.7	100.0
			568.6	25.3		
			616.6	27.4		
		20	337.1	15.0	15.0	58.4
			296.5	13.2		
			390.2	17.3		
		30	312.8	13.9	14.9	58.0
			357.0	15.9		
			337.1	15.0		
		40	312.4	13.9	13.7	53.3
			297.6	13.2		
			312.9	13.9		
		50	247.1	11.0	10.7	41.6
			249.2	11.1		
			226.6	10.1		
		60	205.5	9.1	9.0	35.0
			199.8	8.9		
			204.8	9.1		



表 2-6 掺加胶粉试件 28 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
28	A	0	879.8	39.1	38.4	100
			818.4	36.4		
			893.5	39.7		
		20	491.6	21.8	23.6	61.5
			523.6	23.3		
			579.8	25.8		
		30	409.6	18.2	18.1	47.1
			396.9	17.6		
			414.5	18.4		
		40	387.1	17.2	15.6	40.6
			322.9	14.4		
			342.6	15.2		
		50	272.1	12.1	12.0	31.3
			263.1	11.7		
			276.0	12.3		
		60	293.7	13.1	13.0	33.9
			313.6	13.9		
			273.2	12.1		
		70	141.5	6.3	6.1	15.9
			129.7	5.8		
			139.1	6.2		

表 2-7 掺加胶粒-1 试件 28 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
28	B	0	879.8	39.1	38.4	100
			818.4	36.4		
			893.5	39.7		
		20	503.8	22.4	22.6	58.9
			566.2	25.2		
			456.0	20.3		
		30	400.4	17.8	20.4	53.1
			460.0	20.4		
			469.9	20.9		
		40	383.3	17.0	16.2	42.2
			350.0	15.6		
			363.0	16.1		
		50	302.5	13.4	13.0	33.9
			283.4	12.6		
			291.9	13.0		
		60	272.1	12.1	11.7	30.5
			263.4	11.7		
			219.0	9.7		
		70	249.6	11.1	10.0	26.0
			211.3	9.4		
			215.0	9.6		

表 2-8 掺加胶粒-2 试件 28 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
28	C	0	879.8	39.1	38.4	100
			818.4	36.4		
			893.5	39.7		
		20	532.3	23.7	22.7	59.1
			510.5	22.7		
			372.6	16.6		
		30	403.2	17.9	17.9	46.6
			380.0	16.9		
			491.8	21.9		
		40	451.6	20.1	19.1	49.7
			393.0	17.5		
			447.1	19.9		
		50	333.8	14.8	14.8	38.5
			320.5	14.2		
			385.1	17.1		
		60	276.2	12.3	11.5	29.9
			265.4	11.8		
			233.3	10.4		

表 2-9 掺加胶粉试件 90 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
90	A	0	1105.2	49.1	46.2	100.0
			987.3	43.9		
			1025.0	45.6		
		20	601.6	26.7	25.1	54.3
			521.8	23.2		
			569.4	25.3		
		30	434.7	19.3	23.0	49.8
			534.6	23.8		
			517.7	23.0		
		40	379.8	16.9	17.3	37.4
			407.6	18.1		
			377.7	16.8		
		50	302.5	13.4	14.6	31.6
			330.1	14.7		
			350.9	15.6		
		60	311.2	13.8	14.4	31.2
			325.9	14.5		
			337.2	15.0		
		70	183.1	8.1	7.4	16.0
			162.6	7.2		
			156.3	6.9		

表 2-10 掺加胶粒-1 试件 90 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
90	B	0	1105.2	49.1	46.2	100.0
			987.3	43.9		
			1025.0	45.6		
		20	773.4	34.4	26.1	56.5
			517.7	23.0		
			588.1	26.1		
		30	573.7	25.5	25.5	55.2
			572.0	25.5		
			470.8	21.0		
		40	448.7	20.0	18.4	39.8
			327.2	15.0		
			413.3	18.4		
		50	346.7	15.4	14.2	30.7
			297.0	13.2		
			314.6	14.0		
		60	288.4	12.8	12.7	27.5
			280.6	12.5		
			286.3	12.7		
		70	182.9	8.1	11.1	24.0
			270.8	12.0		
			250.4	11.1		

表 2-11 掺加胶粒-2 试件 90 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
90	C	0	1105.2	49.1	46.2	100.0
			987.3	43.9		
			1025.0	45.6		
		20	661.4	29.4	27.1	58.7
			385.4	17.1		
			609.9	27.1		
		30	465.6	20.7	20.7	44.8
			416.4	18.5		
			609.5	27.1		
		40	392.8	17.5	19.1	41.3
			430.0	19.1		
			463.7	20.6		
		50	334.5	14.9	14.9	32.3
			415.7	18.5		
			304.7	13.5		
		60	365.1	16.2	14.0	30.3
			314.1	14.0		
			284.2	12.6		

根据上述试验结果,可分别作出不同龄期下橡胶混凝土胶粉(粒)组抗压强度随掺量变化曲线,见图 2-5~图 2-7;对于不同掺合物,橡胶混凝土 7 天、28 天、90 天龄期下抗压强度随掺量变化曲线,见图 2-8~图 2-10。

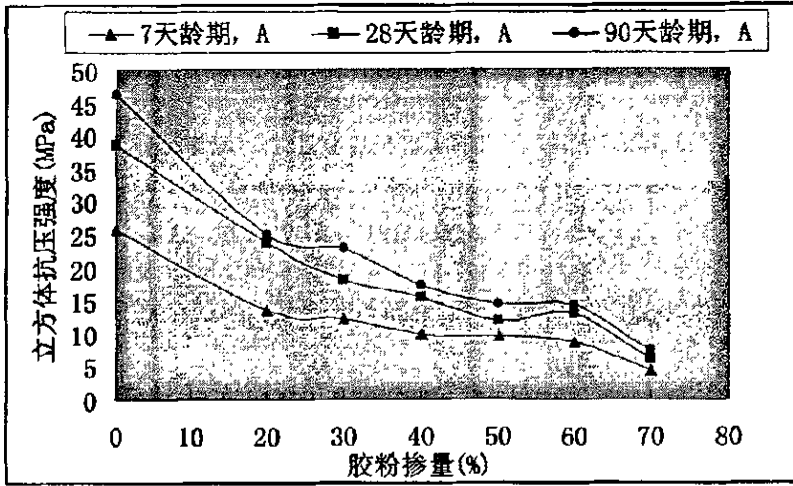


图 2-5 橡胶混凝土胶粉组抗压强度~掺量曲线

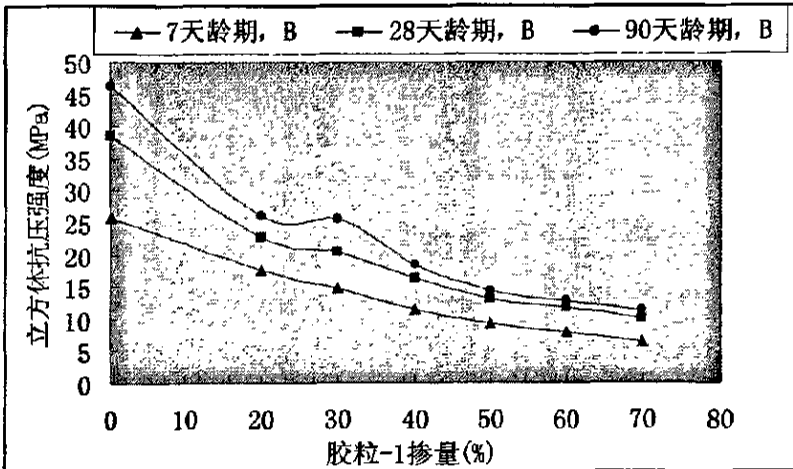


图 2-6 橡胶混凝土胶粒-1组抗压强度~掺量曲线

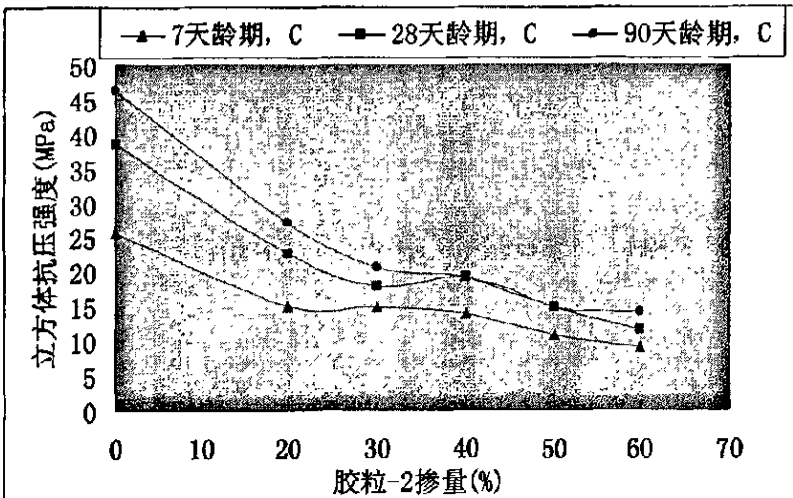


图 2-7 橡胶混凝土胶粒-2组抗压强度~掺量曲线

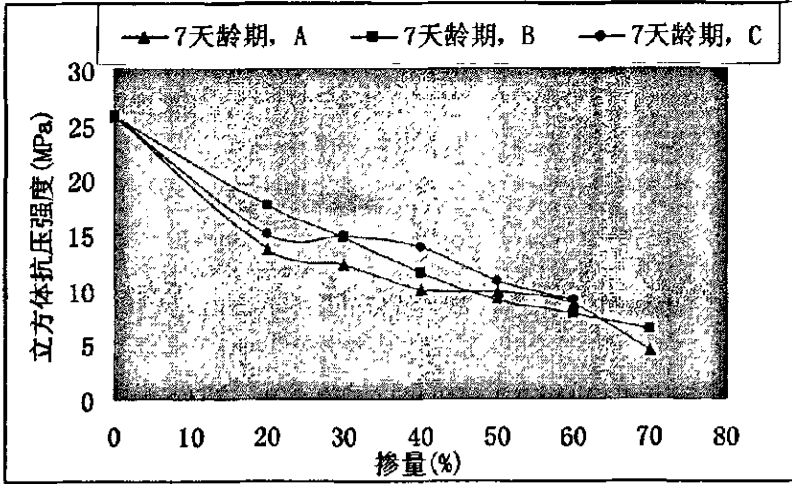


图 2-8 7 天龄期橡胶混凝土抗压强度~掺量曲线

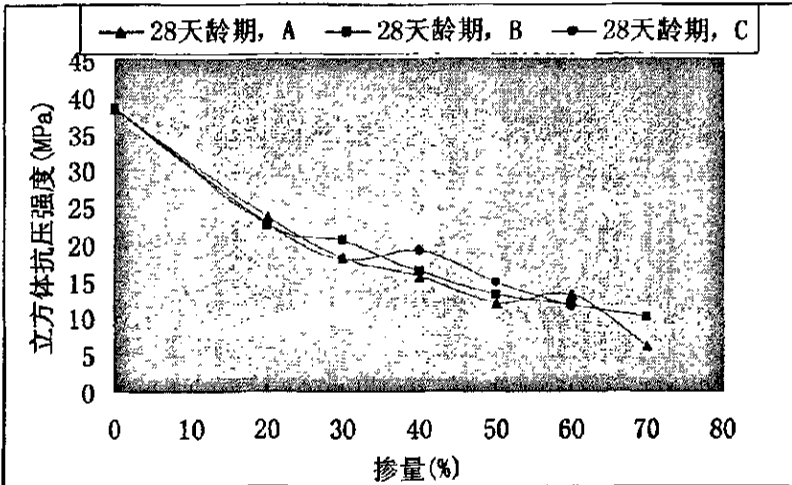


图 2-9 28 天龄期橡胶混凝土抗压强度~掺量曲线

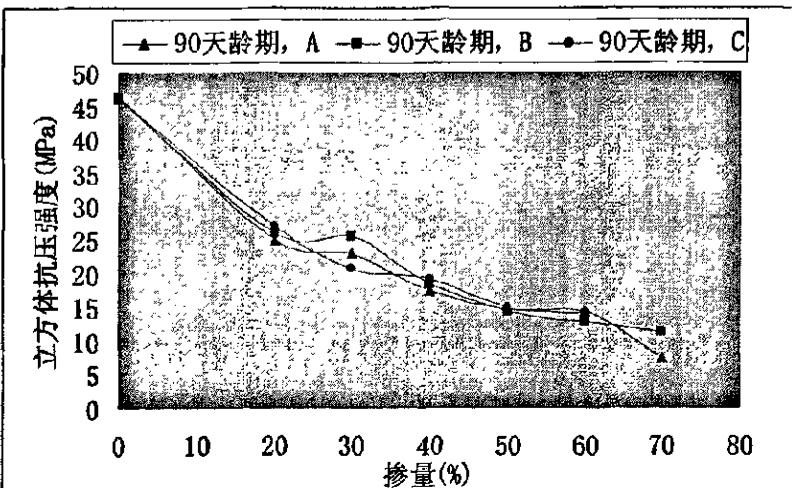


图 2-10 90 天龄期橡胶混凝土抗压强度~掺量曲线

经回归分析, 28 天龄期的橡胶混凝土抗压强度与胶粉掺量的关系可用下式表示:

$$y = 0.0048x^2 - 0.751x + 37.646 \quad (2-2)$$

$$\text{相关指数 } R^2 = 0.9706$$

28 天龄期的橡胶混凝土抗压强度与胶粒-1 掺量的关系可用下式表示:

$$y = 0.0054x^2 - 0.7691x + 37.771 \quad (2-3)$$

$$\text{相关指数 } R^2 = 0.9899$$

28 天龄期的橡胶混凝土抗压强度与胶粒-2 掺量的关系可用下式表示:

$$y = 0.0062x^2 - 0.7871x + 37.596 \quad (2-4)$$

$$\text{相关指数 } R^2 = 0.9598$$

式 2-2、2-3、2-4 中:

$x$ —胶粉、胶粒-1、胶粒-2 的掺量, %;

$y$ —28 天龄期的抗压强度,  $MPa$ 。

由以上试验结果分析可知:

(1) 橡胶混凝土胶粉组在 7 天、28 天、90 天龄期下的抗压强度均随掺量的增加而呈现下降的趋势, 下降幅度各有不同。其中, 掺量为 20% 时, 三种不同龄期的抗压强度下降幅度为 40~50%; 在掺量为 70% 时, 强度下降幅度最大, 7 天、28 天、90 天龄期分别为 82.9%、84.1%、84.0%。

(2) 橡胶混凝土胶粒-1 组在 7 天、28 天、90 天龄期下的抗压强度均随掺量的增加而呈现下降的趋势, 下降幅度各有不同。其中, 掺量为 20% 时, 三种不同龄期的抗压强度下降幅度为 30~45%; 在掺量为 70% 时, 强度下降幅度最大, 7 天、28 天、90 天龄期分别为 75.1%、74.0%、76.0%。

(3) 橡胶混凝土胶粒-2 组在 7 天、28 天、90 天龄期下的抗压强度均随掺量的增加而呈现下降的趋势, 下降幅度各有不同。其中, 掺量为 20% 时, 三种不同龄期的抗压强度下降幅度均在 40% 左右; 在掺量为 60% 时, 强度下降幅度最大, 7 天、28 天、90 天龄期分别为 65.0%、70.1%、69.7%。

(4) 在相同龄期和相同掺量的情况下, 橡胶混凝土胶粉组较胶粒-1 组和胶粒-2 组抗压强度下降幅度要略大。

(5) 从橡胶混凝土在极限荷载下的破坏形态图 (见图 2-11~图 2-13) 可以看到, 随掺量的增加, 橡胶混凝土表面裂纹数量逐渐减少甚至不显现, 其韧性明显提高。



图 2-11 基准混凝土极限荷载时的破坏形态图

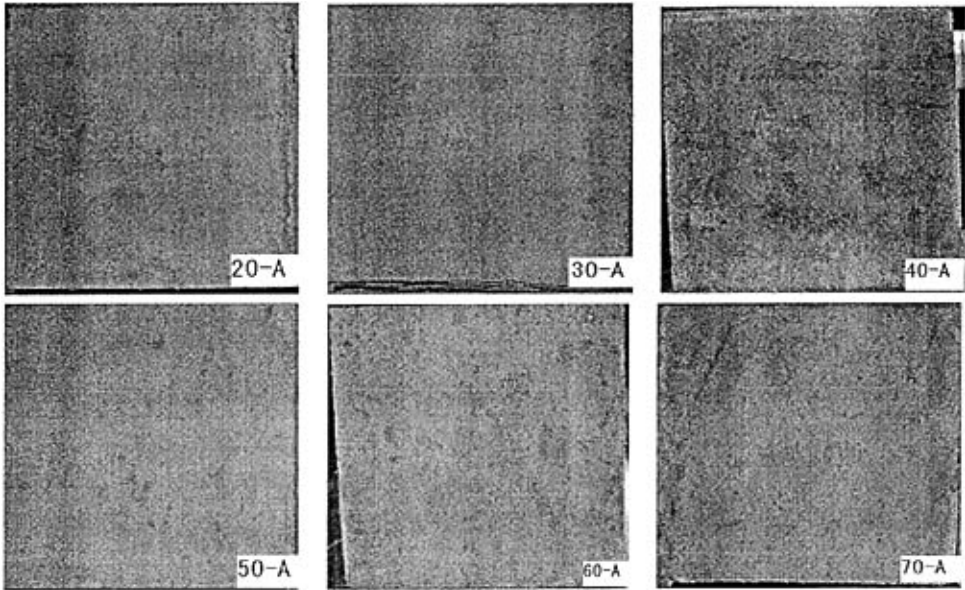


图 2-12 橡胶混凝土胶粉组极限荷载时的破坏形态图

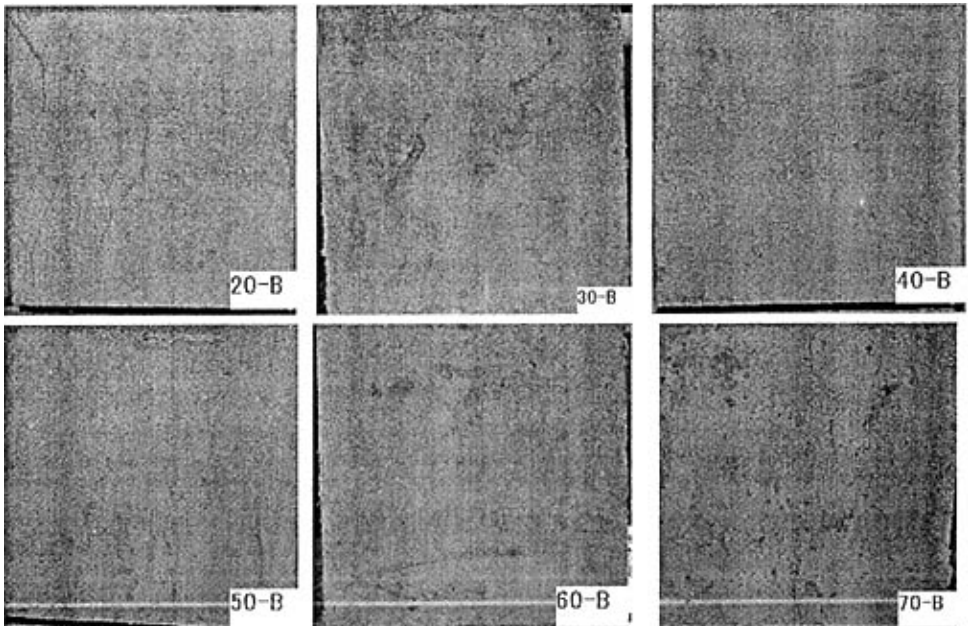


图 2-13 橡胶混凝土胶粒-1 组极限荷载时的破坏形态图

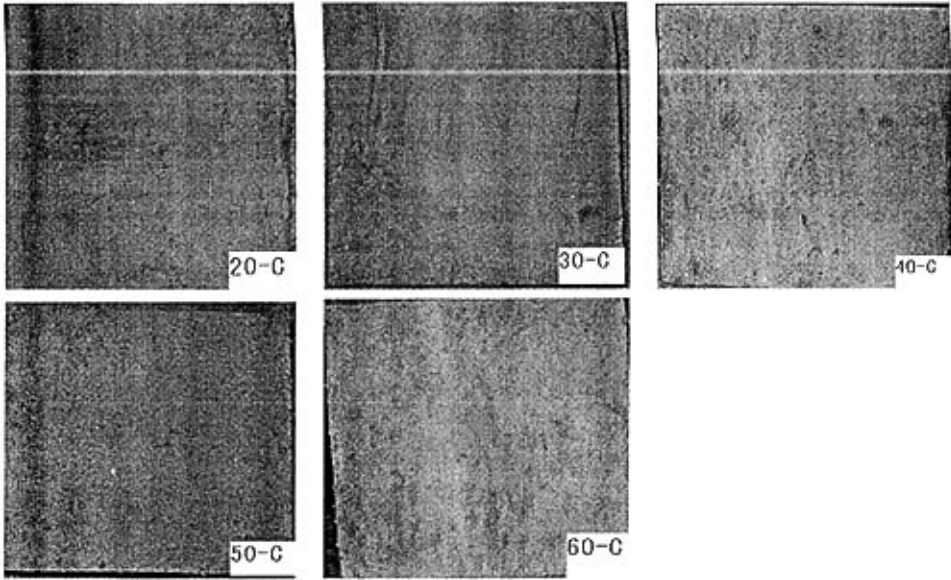


图 2-14 橡胶混凝土胶粒-2 组极限荷载时的破坏形态图

## 2.4 劈裂抗拉强度试验

抗拉强度是混凝土的基本力学性能之一，是确定混凝土抗裂度的重要指标。混凝土的轴心抗拉强度  $f_t$  远低于其抗压强度  $f_{cc}$  ( $f_t$  仅相当于  $f_{cc}$  1/9~1/18)，且当  $f_{cc}$  越大时  $f_t/f_{cc}$  的比值越低。

各国测定抗拉强度的方法不尽相同，较常见的有直接受拉法、劈裂法等。本次试验采用《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002) 中规定的劈裂抗拉试验方法进行相关试验。

试验采用半径 75mm 的钢制弧形垫块，横截面尺寸见图 2-15 所示，长度与试件相同。垫条为三层胶合板，宽度为 20mm，厚度为 3~4mm，长度不小于试件长度，垫条不重复使用。

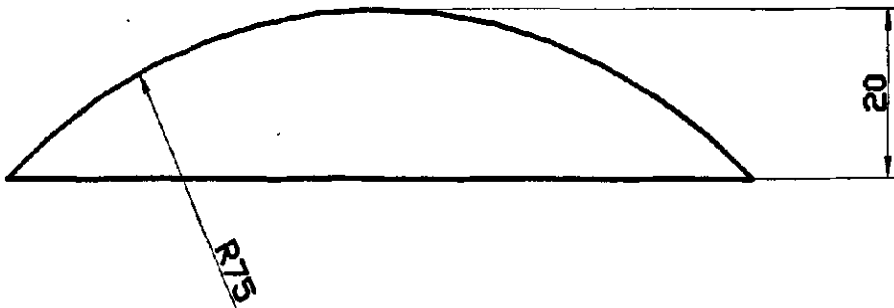


图 2-15 钢制弧形垫块横截面示意图



### 2.4.1 试验步骤

(1) 试件从养护室取出后及时进行试验, 将试件表面和上下承压板面擦干净, 画出试件成型面和相对面的中心线。

(2) 将试件放在试验机下压板的中心位置, 劈裂承压面和劈裂面与试件成型时的顶面垂直; 在上、下压板与试件之间垫以圆弧形垫块及垫条各一条, 垫块和垫条与试件上、下面的中心线对准, 并与成型时的顶面垂直。

(3) 试件均以 1.13~1.8 kN/s 的加荷速度均匀加荷, 试件接近破坏开始急剧变形时, 停止调整试验机油门, 直至破坏, 并记录破坏荷载。

### 2.4.2 试验数据的处理

橡胶混凝土的劈裂抗拉强度按下式计算:

$$f_u = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (2-5)$$

式中:  $f_u$ —劈裂抗拉强度 (MPa);

$F$ —试件破坏荷载 (N);

$A$ —试件劈裂面面积 ( $mm^2$ )。

试验结果精确至 0.01 MPa。

劈裂抗拉强度试验结果按照本文 2.3.2 中所述方法进行处理。

### 2.4.3 试验结果及分析

橡胶混凝土各组试件不同龄期劈裂抗拉强度试验结果见表 2-12~表 2-17。

表 2-12 掺加胶粉试件 7 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_u/f_{cc}$
7	A	0	62.80	1.78	1.78	25.7	0.069
			46.40	1.31			
			65.23	1.85			
		20	60.04	1.70	1.66	13.6	0.122
			54.46	1.54			
			61.13	1.73			
		30	42.08	1.19	1.51	12.3	0.122
			54.36	1.54			
			53.18	1.51			
	40	43.91	1.24	1.36	10.0	0.136	
		48.84	1.38				
		51.73	1.46				

续表 2-12

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_u/f_{cc}$
7	A	50	51.42	1.46	1.40	9.8	0.143
			50.81	1.44			
			46.40	1.31			
		60	42.20	1.19	1.26	8.8	0.143
			46.05	1.30			
			45.20	1.28			
		70	20.97	0.59	0.59	4.4	0.134
			20.37	0.58			
			27.87	0.79			

表 2-13 掺加胶粒-I 试件 7 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_u/f_{cc}$
7	B	0	62.80	1.78	1.78	25.7	0.069
			46.40	1.31			
			65.23	1.85			
		20	66.32	1.88	1.70	17.6	0.097
			59.19	1.68			
			55.13	1.56			
		30	51.69	1.46	1.46	14.7	0.099
			55.43	1.57			
			41.85	1.18			
		40	41.49	1.17	1.28	11.5	0.111
			45.05	1.28			
			52.24	1.48			
		50	43.19	1.22	1.21	9.1	0.133
			40.50	1.15			
			44.40	1.26			
		60	41.45	1.17	1.25	7.8	0.160
			44.52	1.26			
			46.06	1.30			
		70	29.19	0.83	0.86	6.4	0.134
			30.75	0.87			
			31.10	0.88			

表 2-14 掺加胶粒-2 试件 7 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_u/f_{cc}$
7	C	0	62.80	1.78	1.78	25.7	0.069
			46.40	1.31			
			65.23	1.85			
		20	50.29	1.42	1.58	15.0	0.105
			56.85	1.61			
			60.13	1.70			
		30	59.74	1.69	1.69	14.9	0.117
			58.73	1.66			
			60.82	1.72			
		40	50.01	1.42	1.54	13.7	0.112
			52.20	1.48			
			60.60	1.72			
		50	49.16	1.39	1.36	10.7	0.127
			48.01	1.36			
			33.70	0.95			
60	46.92	1.33	1.17	9.0	0.130		
	35.50	1.01					
	41.48	1.17					

表 2-15 掺加胶粉试件 28 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_u/f_{cc}$
28	A	0	97.07	2.75	2.77	38.4	0.072
			97.74	2.77			
			98.27	2.78			
		20	73.67	2.09	2.14	23.6	0.091
			78.48	2.22			
			74.51	2.11			
		30	65.13	1.84	2.06	18.1	0.114
			80.36	2.28			
			72.30	2.05			
		40	60.98	1.73	1.82	15.6	0.117
			63.45	1.80			
			68.15	1.93			
		50	61.23	1.73	1.86	12.0	0.155
			67.45	1.91			
			68.66	1.94			

续表 2-15

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_u/f_{cc}$
28	A	60	66.28	1.88	1.79	13.0	0.138
			56.38	1.60			
			67.19	1.90			
		70	39.57	1.12	1.06	6.1	0.174
			36.54	1.03			
			35.91	1.02			

表 2-16 掺加胶粒-1 试件 28 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_u/f_{cc}$
28	B	0	97.07	2.75	2.77	38.4	0.072
			97.74	2.77			
			98.27	2.78			
		20	90.62	2.57	2.49	22.6	0.110
			87.05	2.46			
			86.35	2.44			
		30	71.12	2.01	1.90	20.4	0.093
			67.26	1.90			
			63.31	1.79			
		40	79.74	2.26	2.08	16.2	0.128
			69.27	1.96			
			70.95	2.01			
		50	56.08	1.59	1.57	13.0	0.121
			59.99	1.70			
			50.37	1.43			
		60	56.91	1.61	1.62	11.7	0.138
			62.60	1.77			
			51.84	1.47			
		70	39.63	1.12	1.15	10.0	0.115
			40.73	1.15			
			57.48	1.63			

表 2-17 掺加胶粒-2 试件 28 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_u/f_{cc}$
28	C	0	97.07	2.75	2.77	38.4	0.072
			97.74	2.77			
			98.27	2.78			
		20	76.98	2.18	2.26	22.7	0.100
			82.88	2.35			
			79.55	2.25			
		30	85.71	2.43	2.32	17.9	0.130
			76.72	2.17			
			83.93	2.38			
		40	77.76	2.20	2.03	19.1	0.106
			68.35	1.94			
			69.02	1.95			
		50	70.11	1.98	1.93	14.8	0.130
			70.57	2.00			
			63.94	1.81			
		60	65.91	1.87	1.87	11.5	0.163
			67.52	1.91			
			53.10	1.50			

根据上述试验结果，分别作出掺加胶粉、胶粒-1、胶粒-2 的橡胶混凝土劈裂抗拉强度随掺量变化的曲线，见图 2-16、图 2-17、图 2-18；对于不同掺合物，橡胶混凝土 7 天、28 天龄期劈裂抗拉强度随掺量变化曲线，见图 2-19、图 2-20。

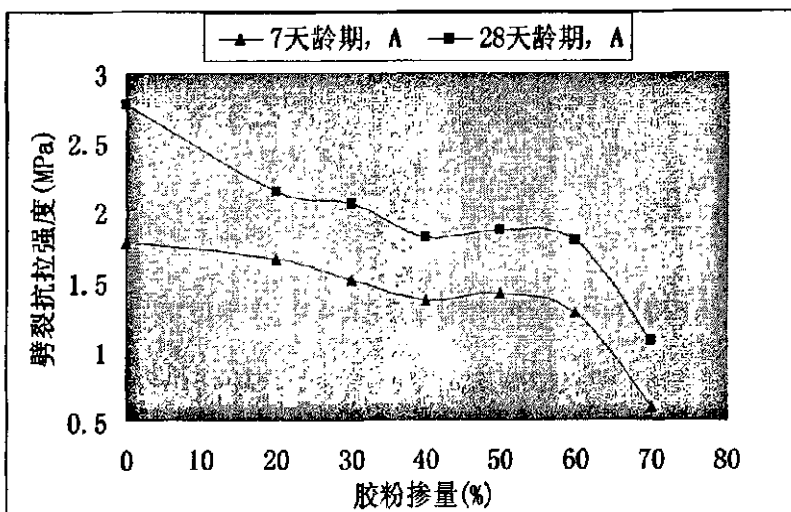


图 2-16 橡胶混凝土胶粉组劈裂抗拉强度~掺量曲线

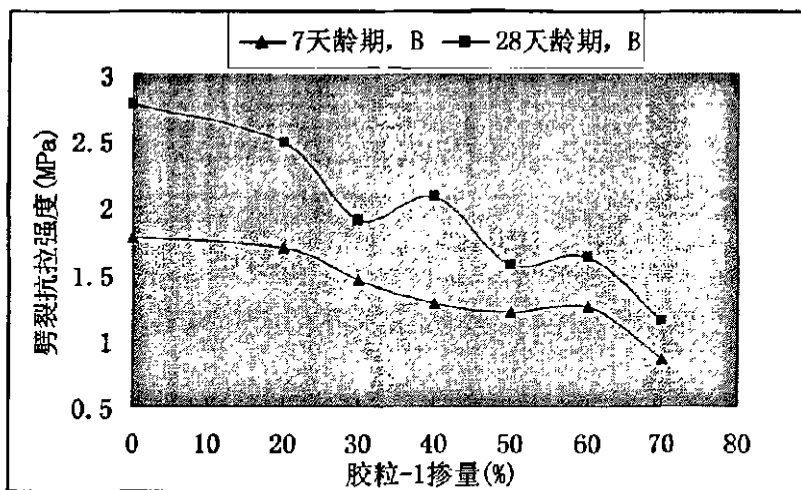


图 2-17 橡胶混凝土胶粒-1 组劈裂抗拉强度~掺量曲线

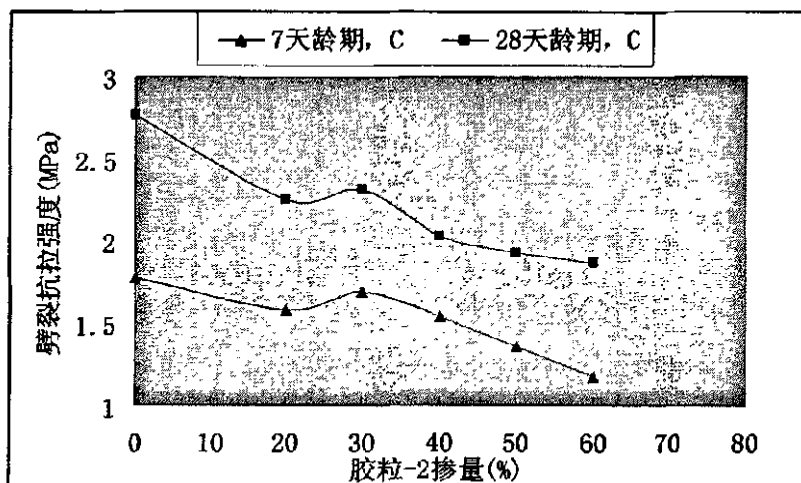


图 2-18 橡胶混凝土胶粒-2 组劈裂抗拉强度~掺量曲线

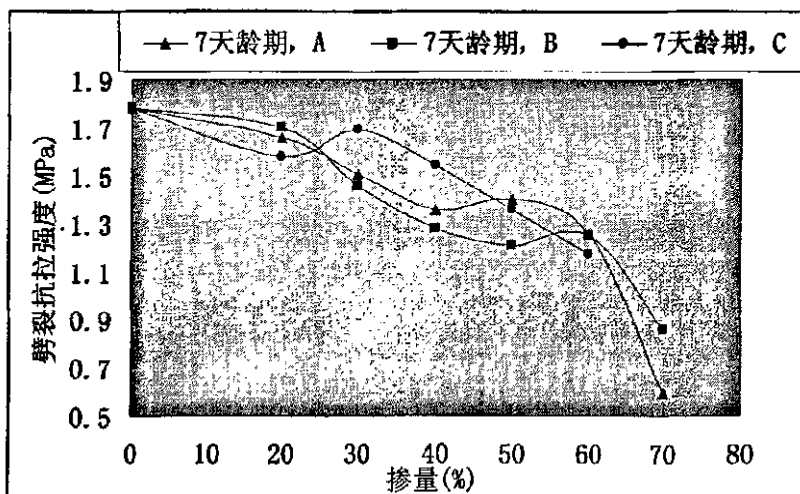


图 2-19 7天龄期橡胶混凝土劈裂抗拉强度~掺量曲线

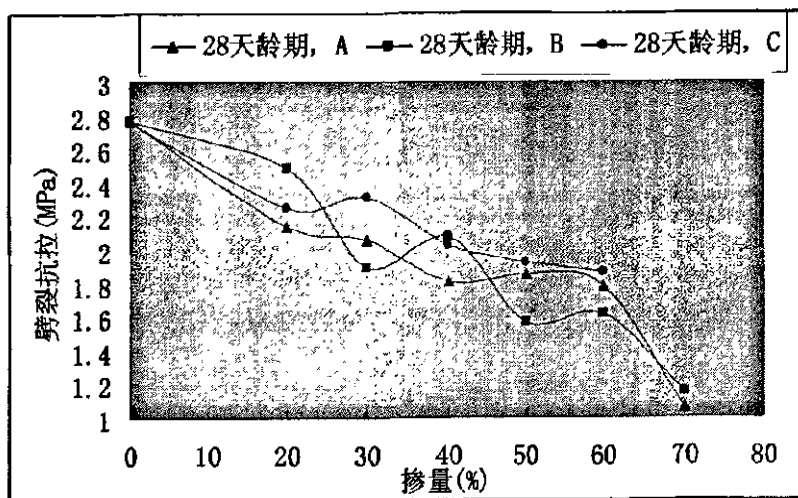


图 2-20 28 天龄期橡胶混凝土劈裂抗拉强度~掺量曲线

由以上试验结果分析可知：

(1) 橡胶混凝土胶粉组 7 天、28 天龄期劈裂抗拉强度，在掺量增加的情况下，均呈现大致下降的趋势，而相对强度  $f_s / f_{cc}$  呈现大致增大的趋势。

(2) 橡胶混凝土胶粒-1 组 7 天龄期劈裂抗拉强度，在掺量增加的情况下呈现下降的趋势；28 天龄期劈裂抗拉强度总体上呈现下降趋势，相对强度  $f_s / f_{cc}$  则在掺量 20%~60% 依次增大，在 70% 时又略微减小。

(3) 橡胶混凝土胶粒-2 组 7 天龄期劈裂抗拉强度和相对强度  $f_s / f_{cc}$ ，在掺量增加的情况下，均呈现大致下降的趋势；28 天龄期劈裂抗拉强度在 20%~40% 变化不大，但总体是大致减小的趋势。

(4) 在相同龄期和相同掺量的情况下，胶粉（粒）对混凝土劈裂抗拉强度影响程度相差不大。

(5) 从橡胶混凝土极限荷载下的破坏形态（见图 2-21~图 2-23）可以看出，随掺量的增加，其抗拉能力增强，整体性相对较好。



图 2-21 基准混凝土极限荷载时的破坏形态图

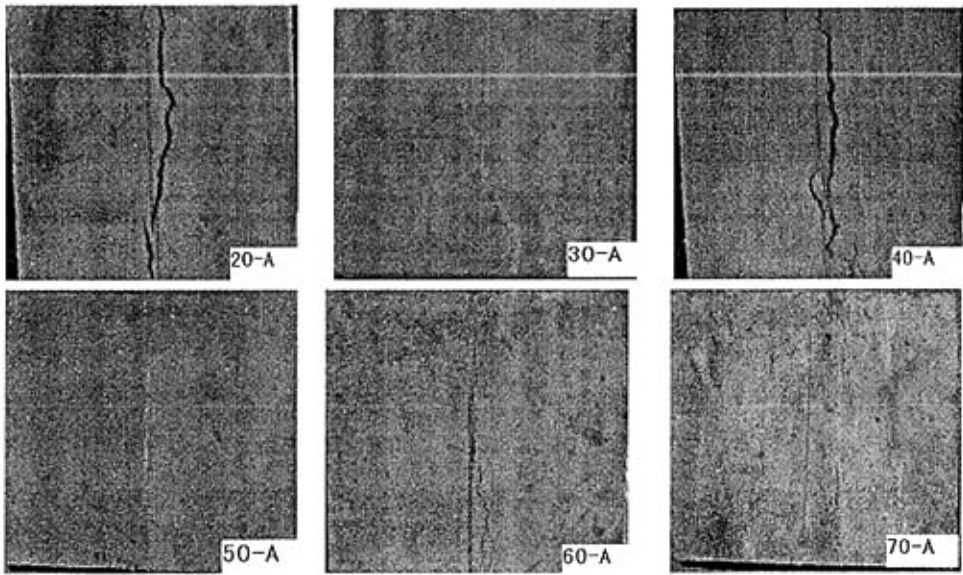


图 2-22 橡胶混凝土胶粉组极限荷载时的破坏形态图

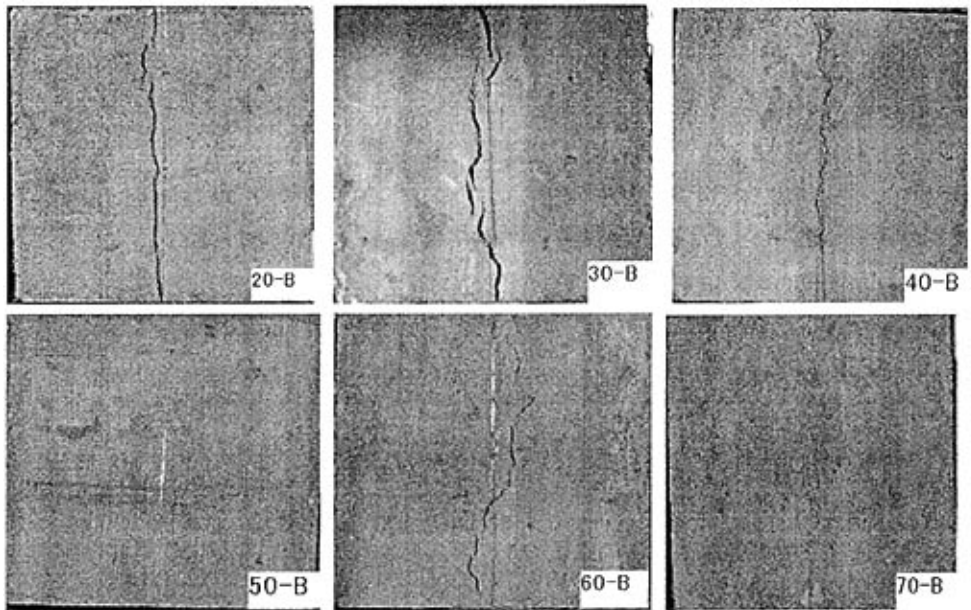
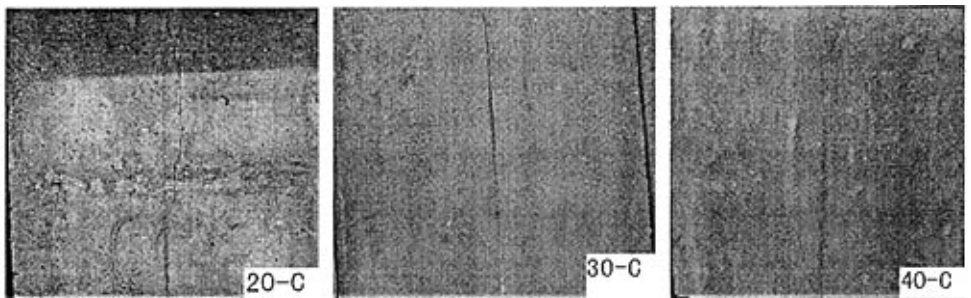


图 2-23 橡胶混凝土胶粒-1 组极限荷载时的破坏形态图





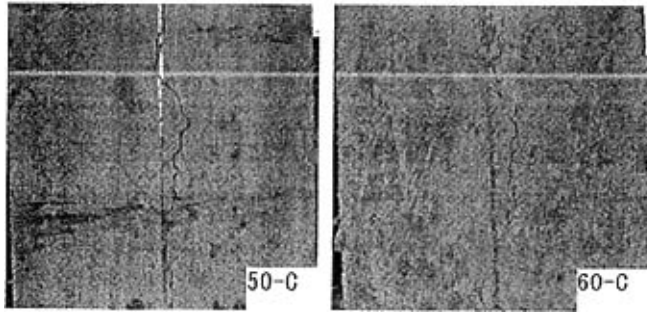


图 2-24 橡胶混凝土胶粒-2 组极限荷载时的破坏形态图

## 2.5 抗折强度试验

混凝土抗折强度试验是另一种测定混凝土抗拉强度的间接试验方法。加荷方式有单点集中加荷和三分点加荷两种，单点集中加荷时，最大弯矩在梁中央，破坏断面被固定；三分点加荷时，最大弯矩在两加荷点之间，破坏将发生在区间的最薄弱面上，因此，采用三分点加荷方式测得的混凝土抗折强度小于采用单点加荷方式测得的混凝土抗折强度。目前，我国抗折强度试验多采用三分点加荷方式。三分点加荷示意图见图 2-25。

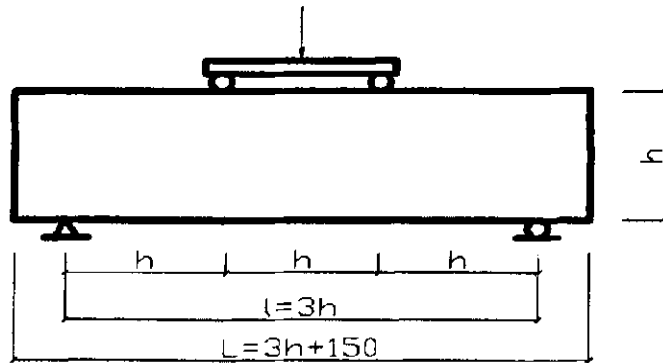


图 2-25 三分点加荷示意图

### 2.5.1 试验步骤

(1) 试件从养护室取出后进行试验，将试件表面擦干净，在图 2-25 所示的支座和加荷头对应的部位划线。

(2) 按图 2-25 装置试件，试件承压面为试件成型时的侧面。支座及承压面与圆柱的接触应平稳、均匀，否则垫平。

(3) 橡胶混凝土试件均以  $0.38 \sim 0.60 \text{ kN/s}$  的加荷速度均匀加载，试件接近破坏开始急剧变形时，停止调整试验机油门，直至破坏，并记录破坏荷载。

### 2.5.2 试验数据的处理

若试件下边缘断裂位置处于两个集中荷载作用线之间，则试件的抗折强度  $f_f$

(MPa)按下式计算:

$$f_f = \frac{Fl}{bh^2} \quad (2-6)$$

式中:  $f_f$ —混凝土抗折强度 (MPa);

$F$ —试件破坏荷载 (N);

$l$ —支座间跨度 (mm);

$h$ —试件截面高度 (mm);

$b$ —试件截面宽度 (mm)。

试验结果精确至 0.1 MPa。

抗折强度试验结果按本文 2.3.2 中所述方法进行处理。三个试件中若有一个折断面位于两个集中荷载之外,则混凝土抗折强度值按另两个试件的试验结果计算。若有两个试件的折断面位于两个集中荷载之外,则该组试件的试验结果无效。

### 2.5.3 试验结果及分析

橡胶混凝土各组试件的抗折强度试验结果见表 2-18、表 2-19、表 2-20。

表 2-18 掺加胶粉试件 28 天龄期抗折强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_f$ 试验值 (MPa)	$f_f$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_f/f_{cc}$
28	A	0	30.6	4.1	4.7	38.4	0.122
			35.8	4.8			
			38.2	5.1			
		20	23.9	3.2	3.3	23.6	0.238
			27.0	3.6			
			23.2	3.1			
		30	19.8	2.6	3.3	18.1	0.182
			26.9	3.6			
			24.8	3.3			
		40	24.0	3.2	3.2	15.6	0.205
			26.4	3.5			
			20.4	2.7			
		50	16.0	2.1	2.1	12.0	0.175
			13.8	1.8			
			19.8	2.6			
		60	17.4	2.3	2.7	13.0	0.208
			26.2	3.5			
			20.4	2.7			
		70	16.5	2.2	2.0	6.1	0.328
			14.2	1.9			
			15.0	2.0			

表 2-19 掺加胶粒-1 试件 28 天龄期抗折强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_f$ 试验值 (MPa)	$f_f$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_f/f_{cc}$
28	B	0	30.6	4.1	4.7	38.4	0.122
			35.8	4.8			
			38.2	5.1			
		20	25.2	3.4	3.6	22.6	0.159
			29.6	3.9			
			26.6	3.5			
		30	27.6	3.7	3.3	20.4	0.162
			25.2	3.4			
			22.4	3.0			
		40	21.0	2.8	2.8	16.2	0.173
			21.6	2.9			
			14.8	2.0			
		50	15.5	2.1	2.8	13.0	0.215
			21.0	2.8			
			21.4	2.9			
		60	23.8	3.2	2.7	11.7	0.231
			18.4	2.5			
			20.4	2.7			
		70	19.0	2.5	2.6	10.0	0.260
			20.9	2.8			
			19.3	2.6			

表 2-20 掺加胶粒-2 试件 28 天龄期抗折强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_f$ 试验值 (MPa)	$f_f$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_f/f_{cc}$
28	C	0	30.6	4.1	4.7	38.4	0.122
			35.8	4.8			
			38.2	5.1			
		20	21.8	2.9	2.8	22.7	0.123
			20.6	2.7			
			20.8	2.8			
		30	23.8	3.2	3.3	17.9	0.184
			26.6	3.5			
			24.7	3.3			
		40	18.8	2.5	2.4	19.1	0.126
			19.2	2.6			
			16.4	2.2			

续表 2-20

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_f$ 试验值 (MPa)	$f_f$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_f/f_{cc}$
28	C	50	22.8	3.0	3.1	14.8	0.209
			22.7	3.0			
			23.8	3.2			
		60	19.8	2.6	2.7	11.5	0.235
			21.8	2.9			
			18.8	2.5			

根据上述试验结果，可以作出橡胶混凝土 28 天龄期抗折强度随掺量变化曲线，见图 2-26。

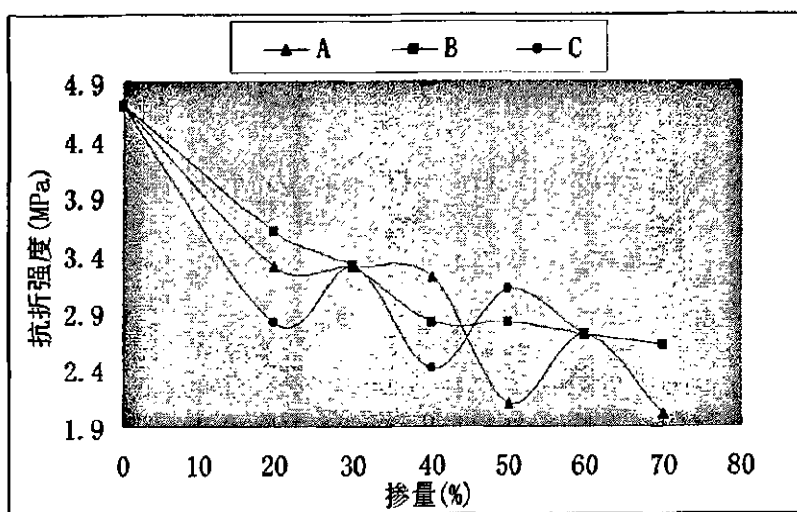


图 2-26 28 天龄期橡胶混凝土抗折强度~掺量变化曲线

由上述试验结果，可得到以下结论：

(1) 橡胶混凝土胶粉组在掺量 20%、30%、40%的抗折强度值相差不大，但由 40%依次增大到 70%时，强度值在 50%时出现突变，但总体呈现下降的趋势。存在突变的主要原因是胶粉掺入后在混凝土内部分布不均匀，且产生的气泡数量不等、分布不均匀。

(2) 橡胶混凝土胶粒-1 组抗折强度随掺量的增加而减小，同时相对强度  $f_f/f_{cc}$  也呈现下降的趋势。

(3) 橡胶混凝土胶粒-2 组抗折强度随掺量的增加整体上呈现减小的趋势，但在一定的掺量范围内存在反复变化的情况，原因可能是胶粒-2 级配不良，掺入后在混凝土内部分布不均匀，且产生的气泡数量不等、分布不均匀。

## 2.6 轴心抗压强度试验

鉴于试件与试验机接触面的摩擦作用，立方体试件将不能完全反映混凝土构

件的实际受压性能,为了测试混凝土的理想单轴受压性能,本次试验按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002),采用150mm×150mm×300mm的棱柱体进行轴心受压试验。

2.6.1 试验步骤

(1) 试件从养护室取出后进行试验,将试件表面和上下承压板面擦干净。

(2) 将试件直立放置于试验机的下压板上,使试件轴心与下压板中心对准,开动试验机,当上压板与试件接近时,调整球座,使接触均衡。

(3) 试件均以11.25~18kN/s的加荷速度均匀加载,试件接近破坏开始急剧变形时,停止调整试验机油门,直至破坏,并记录破坏荷载。

2.6.2 试验数据的处理

橡胶混凝土的轴心抗压强度按下式计算:

$$f_{cp} = \frac{F}{A} \tag{2-7}$$

式中:  $f_{cp}$ —轴心抗压强度 (MPa);

$F$ —试件破坏荷载 (N);

$A$ —试件承压面积 (mm<sup>2</sup>)。

试验结果精确至0.1MPa。

轴心抗压强度试验结果按照本文2.3.2中所述方法进行处理。

2.6.3 试验结果及分析

橡胶混凝土各组试件轴心抗压强度试验结果见表2-21~表2-23。

表 2-21 掺加胶粉试件 28 天龄期轴心抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_{cp}$ 试验值 (MPa)	$f_{cp}$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_{cp}/f_{cc}$
28	A	0	615.3	27.3	27.1	38.4	0.706
			600.2	26.7			
			612.0	27.2			
		20	431.3	19.2	17.8	23.6	0.754
			391.1	17.4			
			380.0	16.9			
		30	327.6	14.6	14.3	18.1	0.790
			324.8	14.4			
			315.2	14.0			
		40	221.4	9.8	13.2	15.6	0.846
			328.8	14.6			
			177.1	7.9			

续表 2-21

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_{cp}$ 试验值 (MPa)	$f_{cp}$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_{cp}/f_{cc}$
28	A	50	273.1	12.1	11.7	12.0	0.975
			247.5	11.0			
			266.4	11.8			
		60	243.7	10.8	11.1	13.0	0.854
			254.7	11.3			
			253.1	11.2			
		70	145.8	6.5	6.6	6.1	1.082
			147.6	6.6			
			152.4	6.8			

表 2-22 掺加胶粒-1 试件 28 天龄期轴心抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_{cp}$ 试验值 (MPa)	$f_{cp}$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_{cp}/f_{cc}$
28	B	0	615.3	27.3	27.1	38.4	0.706
			600.2	26.7			
			612.0	27.2			
		20	431.3	19.2	17.5	22.6	0.774
			402.5	17.9			
			345.0	15.3			
		30	390.3	17.3	15.9	20.4	0.779
			336.9	15.0			
			347.8	15.5			
		40	285.7	12.7	11.9	16.2	0.735
			268.4	11.9			
			199.5	8.9			
		50	272.4	12.1	11.0	13.0	0.846
			246.1	10.9			
			224.7	10.0			
		60	241.2	10.7	10.5	11.7	0.897
			228.5	10.2			
			236.0	10.5			
		70	193.0	8.6	8.5	10.0	0.850
			187.5	8.3			
			190.0	8.4			

表 2-23 掺加胶粒-2 试件 28 天龄期轴心抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cp}$ 试验值 (MPa)	$f_{cp}$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_{cp}/f_{cc}$
28	C	0	615.3	27.3	27.1	38.4	0.706
			600.2	26.7			
			612.0	27.2			
		20	307.7	13.7	16.4	22.7	0.722
			369.6	16.4			
			382.2	17.0			
		30	387.6	17.2	16.5	17.9	0.922
			377.4	16.8			
			351.3	15.6			
		40	277.5	12.3	12.3	19.1	0.644
			345.4	15.4			
			262.2	11.7			
50	272.8	12.1	11.6	14.8	0.784		
	266.7	11.9					
	246.2	10.9					
60	229.8	10.2	10.8	11.5	0.939		
	236.4	10.5					
	262.0	11.6					

根据以上试验结果，可以作出橡胶混凝土 28 天龄期轴心抗压强度随掺量变化曲线，见图 2-14。

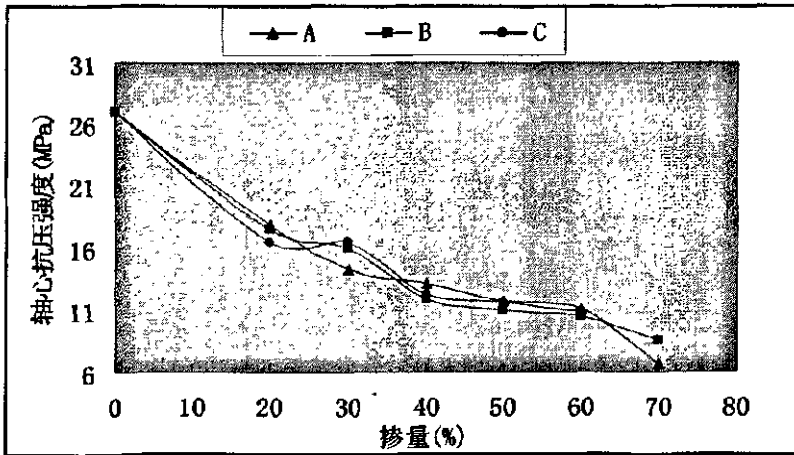


图 2-27 28 天龄期橡胶混凝土轴心抗压强度~掺量变化曲线

由上述试验结果，可以得出以下结论：

- (1) 橡胶混凝土胶粉组轴心抗压强度值随掺量的增大而减小，相对强度  $f_{cp}/f_{cc}$  则随掺量的增大而增大。
- (2) 橡胶混凝土胶粒-1 组轴心抗压强度随掺量的增加而减小。

(3) 橡胶混凝土胶粒-2 组轴心抗压强度随掺量的增加而减小, 相对强度  $f_{cp}/f_{cc}$  则随掺量的增大先增大, 在 40% 有一个突变 (变小), 之后再增大。

## 2.7 静力受压弹性模量试验

弹性模量的标定主要有切线弹性模量和割线弹性模量两种方法。切线弹性模量是指过混凝土应力~应变曲线原点的切线斜率, 又称为初始弹性模量, 但初始弹性模量不易从试验中测出。割线弹性模量的前提是认为当应力不大时, 应力~应变关系近似于直线, 弹性模量可以用应力除以其相应的应变来表示。本次试验按照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002), 采用割线弹性模量来标定混凝土的弹性模量。

### 2.7.1 试验步骤

(1) 试件从养护室取出后及时进行试验, 用于毛巾将试件表面与上下承压板面擦干净。

(2) 把变形测量仪安装在试件两侧的中在线并对称于试件的两端, 测量标距为 150mm。

(3) 上述准备工作结束后, 将试件直立放置在试验机的下压板上, 并使其轴心与下压板中心对准。当上压板与试件接近时, 调整球形铰支座, 保证接触均衡。

(4) 加荷至基准应力为 0.5MPa 的初始荷载值, 保持恒载 60s 并在以后的 30s 内记录每测点的变形读数。立即连续均匀地加荷至应力为 1/3 轴心抗压强度的荷载值  $F_0$ , 保持恒载 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数  $\epsilon_0$ 。为便于比较, 所有试件均以 11.25~18kN/s 的加荷速度均匀加载。当以上变形值之差与它们的平均值之比大于 20% 时, 重新对中试件后重复上述操作, 如果无法使其减少到低于 20%, 则应重新测试。

(5) 当以上变形值之差与它们的平均值之比小于 20% 时, 再以相同的加荷速度加荷到 0.5MPa 的初始荷载值, 恒载 60s; 然后用同样的加荷和卸荷速度以及 60s 的保持恒载至少进行两次反复预压。在最后一次预压完成后, 在基准应力 0.5MPa 持荷 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数  $\epsilon_0$ ; 再用同样的加荷速度加荷至  $F_0$ , 保持 60s 并在以后的 30s 内记录每一测点的变形读数  $\epsilon_0$ 。

(6) 以同样的速度加荷至破坏, 取得该试件的轴心抗压强度值。如果试件的抗压强度与  $f_{cp}$  之差超过  $f_{cp}$  的 20% 时, 应在试验记录中注明。

### 2.7.2 试验数据的处理

弹性模量按下式计算:

$$E_c = \frac{F_0 - F_0}{A} \times \frac{L}{\Delta n} \quad (2-8)$$



式中:  $E_c$ —混凝土弹性模量 (MPa);

$F_a$ —应力为 1/3 轴心抗压强度时的荷载 (N);

$F_0$ —应力为 0.5MPa 时的初始荷载 (N);

$A$ —试件承压面积 ( $mm^2$ );

$L$ —测量标距 (mm);

$$\Delta n = \varepsilon_a - \varepsilon_0 \quad (2-9)$$

式中:  $\Delta n$ —最后一次从  $F_0$  加荷至  $F_a$  时试件两侧变形的平均值 (mm);

$\varepsilon_a$ — $F_a$  时试件两侧变形的平均值 (mm);

$\varepsilon_0$ — $F_0$  时试件两侧变形的平均值 (mm)。

混凝土受压弹性模量计算精确至 0.1 GPa。

弹性模量按 3 个试件测值的算术平均值计算。如果其中有一个试件的轴心抗压强度值与用以确定检验控制荷载的轴心抗压强度值相差超过后者的 20% 时, 弹性模量值按另两个试件测值的算术平均值计算; 如有两个试件超过上述规定, 则试验无效。

### 2.7.3 试验结果及分析

橡胶混凝土各组试件的弹性模量试验结果见表 2-24。

表 2-24 弹性模量试验结果统计表

掺量		0%	20%	30%	40%	50%	60%	70%
弹性模量 (GPa)	胶粉	35.8	29.2	24.4	23.7	19.5	15.2	10.2
	胶粒-1	35.8	30.4	25.8	21.8	16.6	19.1	15.9
	胶粒-2	35.8	30.3	27.4	25.2	22.3	19.2	—

由上述结果, 可作出橡胶混凝土弹性模量随掺量变化的曲线, 见图 2-28。

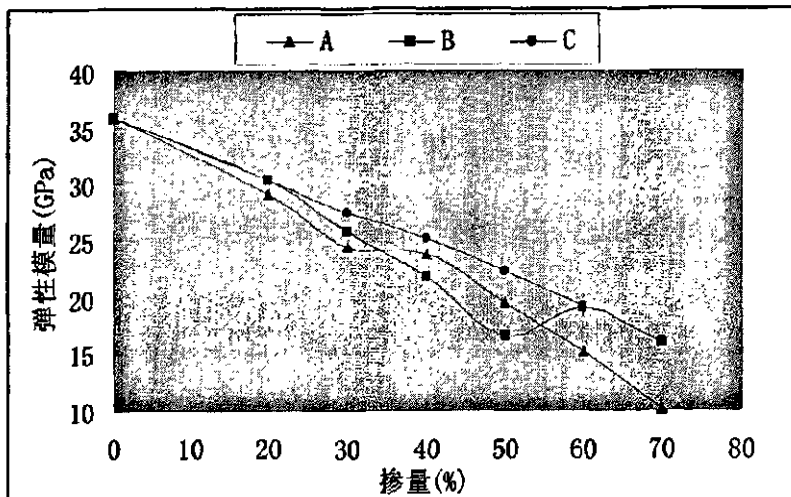


图 2-28 橡胶混凝土弹性模量~掺量曲线

由以上的试验结果，可以看出：

(1) 橡胶混凝土胶粉组、胶粒-2 组的弹性模量随着掺量的增大均呈现下降的趋势。

(2) 橡胶混凝土胶粒-1 组的弹性模量随着掺量的增大呈现大致下降的趋势，其中在 50%掺量出现剧减现象，原因是胶粒-1 级配不良和在混凝土内部分布不均匀。

(3) 橡胶混凝土弹性模量较基准混凝土小，其变形能力增强。

### 2.8 橡胶混凝土容重试验

橡胶混凝土试件处于气干状态时，对其重量进行称量。橡胶混凝土胶粉（粒）组的容重如表 2-25 所示。

表 2-25 橡胶混凝土容重统计表

掺量		0%	20%	30%	40%	50%	60%	70%
容重 ( $kg/m^3$ )	胶粉	2511	2322	2246	2217	2180	2152	2025
	胶粒-1	2511	2331	2288	2188	2167	2152	2079
	胶粒-2	2511	2351	2312	2230	2170	2137	—

根据上述试验结果，橡胶混凝土的容重随胶粉（粒）的掺量变化曲线如图 2-29 所示。

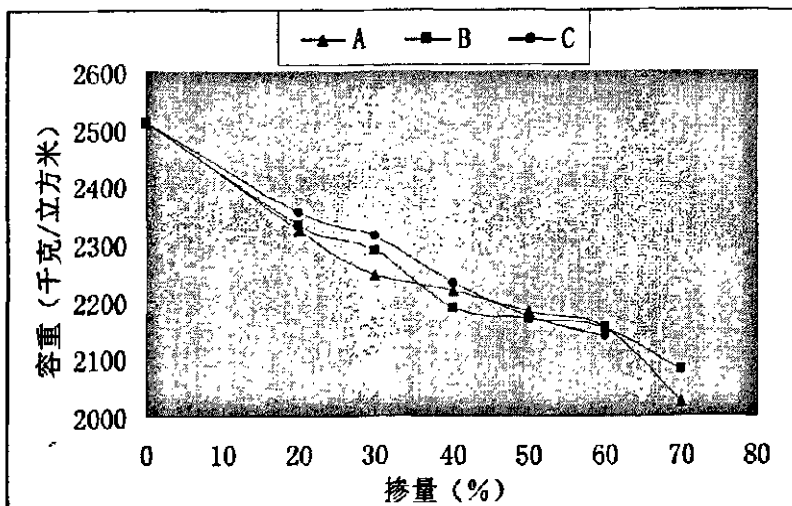


图 2-29 橡胶混凝土容重~掺量曲线

由橡胶混凝土容重~掺量曲线可以看出，其容重随着掺量的增大而减小。但相同掺量下各组容重的下降幅度略有差异，主要原因是胶粉（粒）掺入后混凝土内部产生的气泡数量不等。

## 2.9 本章小结

本章主要对三种胶粉（粒）橡胶混凝土的和易性、力学性能和容重等性能进行了探讨。试验结果表明，随着胶粉（粒）掺量的增大，橡胶混凝土坍落度、抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、轴心抗压强度、弹性模量和容重等整体上均呈现减小的趋势。但受不同因素的影响，其下降幅度存在一定的差异。同时，橡胶混凝土的韧性和变形能力明显高于基准混凝土。

### 第三章 经 NaOH 溶液浸泡处理的橡胶混凝土材料性能试验研究

在橡胶生产中,需引入硬脂酸锌作为润滑剂、防粘剂、硫化催媒的活化剂等。因此,由废旧轮胎制备而成的胶粒(块)将不可避免地含有硬脂酸锌。粉状且有滑腻感的硬脂酸锌将会降低胶粒(块)与水泥砂浆的粘结力。胶粒(块)经 NaOH 强碱溶液浸泡处理不会改变其物理力学性能,但对其掺配的混凝土性能有一定的影响

#### 3.1 NaOH 溶液浸泡处理对橡胶混凝土的影响

第二章试验中胶粉(粒)未经 NaOH 溶液浸泡处理,将其试验结果和已有试验结果<sup>[9]</sup>对比,探讨 NaOH 溶液浸泡处理对橡胶混凝土的影响。

##### 3.1.1 NaOH 溶液浸泡处理对橡胶混凝土强度的影响

胶粉(粒)在两种情况(即经 NaOH 溶液浸泡处理和未经 NaOH 溶液浸泡处理)下,其掺配的橡胶混凝土 7 天龄期抗压强度结果如表 3-1 所示。

表 3-1 7 天龄期橡胶混凝土抗压强度(单位:MPa)统计表

掺量 (%)	经 NaOH 溶液浸泡处理			未经 NaOH 溶液浸泡处理		
	胶粉	胶粒-1	胶粒-2	胶粉	胶粒-1	胶粒-2
20	16.1	18.0	17.2	13.6	17.6	15.0
40	8.4	10.6	13.6	10.0	11.5	13.7
60	6.6	8.4	10.0	8.8	7.8	9.0

从上表可以看出,橡胶混凝土胶粉组抗压强度在两种情况(即经 NaOH 溶液浸泡处理和未经 NaOH 溶液浸泡处理)下相差不大;橡胶混凝土胶粒-1 组和胶粒-2 组在经 NaOH 溶液浸泡处理的情况下,其抗压强度一般略大,但也存在略小的情况。综上所述,NaOH 溶液浸泡处理对橡胶混凝土抗压强度影响不大。

##### 3.1.2 NaOH 溶液浸泡处理对橡胶混凝土破坏形态的影响



图 3-1 橡胶混凝土胶粉组极限荷载时的破坏形态图



图 3-2 橡胶混凝土胶粒-1 组极限荷载时的破坏形态图



图 3-3 橡胶混凝土胶粒-2 组极限荷载时的破坏形态图

经 NaOH 溶液浸泡处理的橡胶混凝土极限荷载下破坏形态见图 3-1~3-3，通过与图 2-12~图 2-14 破坏形态图相比较可以看出，NaOH 溶液浸泡处理改善了橡胶混凝土极限荷载下的破坏形态。

总之，NaOH 溶液浸泡处理虽对橡胶混凝土抗压强度的影响不明显，但提高了胶粉(粒)与水泥浆的胶结能力，改善了其极限荷载下的破坏形态。所以 NaOH 溶液浸泡处理是橡胶混凝土制备过程中不可缺少的一环。

在此基础上，考虑工程应用的要求，以 C35 和 C50 为基准混凝土，采用不同粒径的橡胶粒（块），经 NaOH 溶液浸泡处理后，分别以不同的掺量等体积代替细（粗）骨料，制备了 14 组共计 294 个试件，对其和易性、力学性能和容重等方面开展试验研究，进一步探讨混凝土在掺入橡胶粒（块）后相关性能的变化规律和各因素对其性能的影响。

### 3.2 试验设计

#### 3.2.1 试验原材料和胶粒（块）的 NaOH 溶液浸泡处理

(1) 水泥。郑州市金龙水泥股份有限公司生产的金龙牌 P.O 42.5 R 水泥，指标合格。

(2) 砂。中粗河砂，连续级配，细度模数 2.90，表观密度  $2598 \text{ kg/m}^3$ 。

(3) 石子。5~25mm 碎石，表观密度  $2703 \text{ kg/m}^3$ ，连续粒径，级配合格。

(4) 胶粒-3（本文以 D 表示）。河南省三力胶粉厂生产的 1~3mm 胶粒，表观密度  $1250 \text{ kg/m}^3$ 。见图 3-4。

(5) 橡胶块（本文以 E 表示）。河南省三力胶粉厂生产的 5~12mm 橡胶块，

表观密度  $1364\text{kg/m}^3$ 。见图 3-5。

(6) 水。引用自来水。



图 3-4 1~3mm 胶粒形态图



图 3-5 5~12mm 橡胶块

本次试验过程中，针对胶粒-3、橡胶块的密度比水略大的特点，浸泡时采取直接浸泡，具体的操作工序如下：

- (1) 配置 1% 的 NaOH 溶液，一半置于桶中，另一半留待后续添加。
- (2) 在桶中加入胶粒-3 或橡胶块，并用木棒搅拌。
- (3) 搅拌过程中不断加入 NaOH 溶液，最终使胶粒-3 或橡胶块完全处于液面以下。
- (4) 浸泡 30 分钟后，用清水洗净胶粒-3 或橡胶块，晾晒至饱和面干。

### 3.2.2 试验分组和配合比设计

基准混凝土设计强度等级为 C35 和 C50，掺入的废旧轮胎橡胶为胶粉-3、橡胶块等两种形式，分别以 10%、20%、30% 的掺量等体积代替砂或石子。本次试验 10%、20%、30% 组按基准混凝土和掺合物的不同各自细分为 4 个小组。

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2000)，计算出初步配合比，试拌调整，得出基准配合比，在此基础上，经 7 天龄期的强度检验，确定各组混凝土配合比如下表。

表 3-2 各组混凝土配合比表

组编号	C ( $\text{kg/m}^3$ )	S ( $\text{kg/m}^3$ )	G ( $\text{kg/m}^3$ )	W ( $\text{kg/m}^3$ )	胶粒(块) ( $\text{kg/m}^3$ )
C35	375	625	1270	180	0
D-35-10	375	562.5	1270	180	30.1
D-35-20	375	500	1270	180	60.1
D-35-30	375	437.5	1270	180	90.2
E-35-10	375	625	1143	180	64.1
E-35-20	375	625	1016	180	128.2
E-35-30	375	625	889	180	192.3

续表 3-2

组编号	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	W (kg/m <sup>3</sup> )	胶粒 (块) (kg/m <sup>3</sup> )
C50	500	528	1232	190	0
D-50-10	500	475.2	1232	190	25.4
D-50-20	500	422.4	1232	190	50.8
D-50-30	500	369.6	1232	190	76.2
E-50-10	500	528	1108.8	190	62.2
E-50-20	500	528	985.6	190	124.3
E-50-30	500	528	862.4	190	186.5

### 3.2.3 试件设计

根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002), 各组试件试验安排见表 3-3。

表 3-3 各组混凝土试件试验安排表

试件编号	橡胶掺量	试验内容	试件尺寸 (mm)	试件个数	试验说明
C35 C50	0%	抗压强度	150×150×150	3×2×2=12	试件养护 7 天后做抗压强度试验和劈裂抗拉强度试验; 试件养护 28 天后做抗压强度试验、劈裂抗拉强度试验、轴心抗压强度试验、静力受压弹性模量试验和抗折强度试验等。
		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×2×2=12	
		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×2=12	
		抗折强度	150×150×550	3×2=6	
D-35-10 E-35-10 D-50-10 E-50-10	10%	抗压强度	150×150×150	3×2×4=24	同上
		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×2×4=24	
		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×4=24	
		抗折强度	150×150×550	3×4=12	
D-35-20 E-35-20 D-50-20 E-50-20	20%	抗压强度	150×150×150	3×2×4=24	同上
		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×2×4=24	

续表 3-3

试件编号	橡胶掺量	试验内容	试件尺寸 (mm)	试件个数	试验说明
D-35-20 E-35-20 D-50-20 E-50-20	20%	轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×4=24	同上
		抗折强度	150×150×550	3×4=12	
D-35-30 E-35-30 D-50-30 E-50-30	30%	抗压强度	150×150×150	3×2×4=24	同上
		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×2×4=24	
		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×4=24	
		抗折强度	150×150×550	3×4=12	
D-35-40 E-35-40 D-50-40 E-50-40	40%	抗压强度	150×150×150	3×2×4=24	同上
		劈裂抗拉强度	150×150×150	3×2×4=24	
		轴心抗压强度-弹性模量	150×150×300	6×4=24	
		抗折强度	150×150×550	3×4=12	
备注: D、E 分别表示掺加 1~3mm 胶粒、5~12mm 橡胶块					

橡胶混凝土试件制作及养护如前所述, 在此不再赘述。

### 3.3 橡胶混凝土拌合物的和易性

橡胶混凝土各组拌合物的工作性能描述如表 3-4 所示。

表 3-4 各组混凝土拌合物的工作性能统计表

组编号	坍落度值 (mm)	拌和物工作性能
C35	60	黏聚性、流动性、保水性均较好
D-35-10	50	黏聚性、流动性、保水性均较好
D-35-20	40	黏聚性、流动性、保水性均较好
D-35-30	50	黏聚性、流动性、保水性均较好
E-35-10	60	黏聚性、流动性、保水性均较好
E-35-20	35	黏聚性、流动性、保水性均较好
E-35-30	55	黏聚性、流动性、保水性均较好



续表 3-4

组编号	坍落度值 (mm)	拌和物工作性能
C50	45	黏聚性、流动性、保水性均较好
D-50-10	50	黏聚性、流动性、保水性均较好
D-50-20	40	黏聚性、流动性、保水性均较好
D-50-30	30	黏聚性、流动性、保水性均较好
E-50-10	50	黏聚性、流动性、保水性均较好
E-50-20	40	黏聚性、流动性、保水性均较好
E-50-30	60	黏聚性、流动性、保水性均较好

橡胶混凝土拌合物坍落度随胶粒(块)掺量的变化曲线, 见图 3-6 和图 3-7。

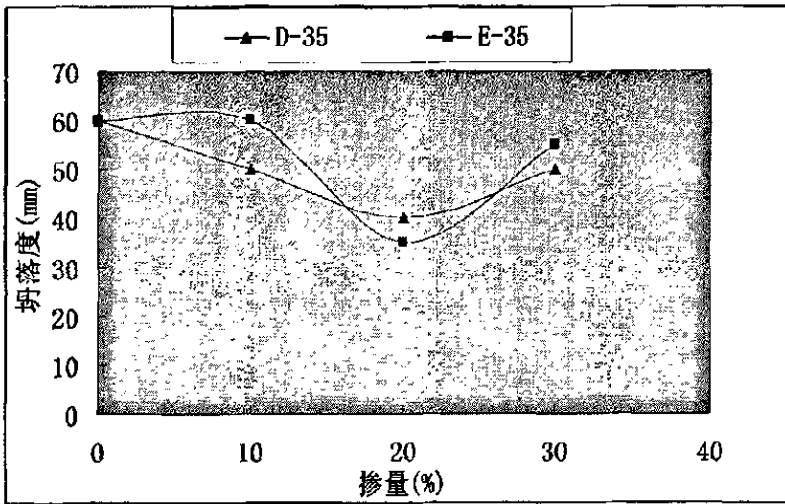


图 3-6 以 C35 为基准混凝土的拌合物坍落度~掺量曲线

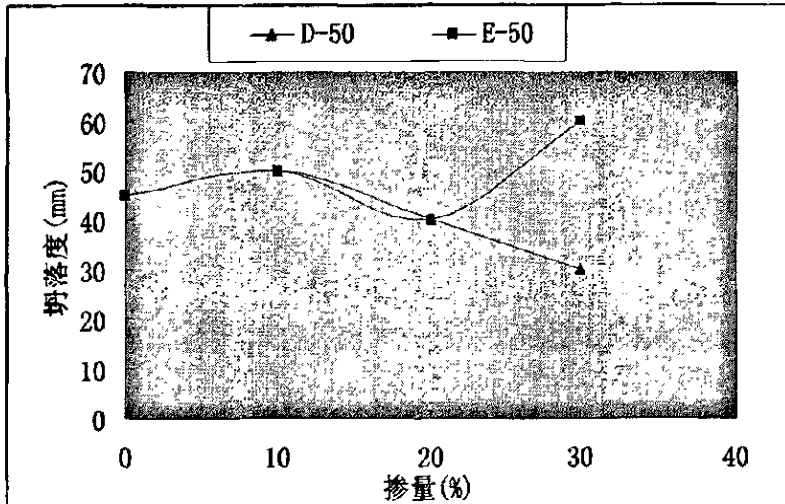


图 3-7 以 C50 为基准混凝土的拌合物坍落度~掺量曲线

由橡胶混凝土拌合物坍落度~掺量曲线可以看出, 在掺入不同掺量的胶粒-3 或橡胶块后, 基准混凝土原有的骨架重新组构, 坍落度发生改变。但受胶粒(块)

形态、掺量和掺入后混凝土内部引入气泡数量等诸多因素的影响，拌合物坍落度的变化起伏较大，但整体上呈现下降的趋势。

### 3.4 抗压强度试验

橡胶混凝土抗压强度的试验步骤和试验数据处理如前所述，在此不再赘述。

橡胶混凝土胶粒-3 组、橡胶块组试件 7 天、28 天龄期抗压强度试验结果见表 3-5~表 3-12。

表 3-5 掺加胶粒-3 试件 (C35) 的 7 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
7	D	0	463.4	20.6	23.2	100.0
			520.4	23.1		
			586.8	26.1		
		10	456.3	20.3	19.4	83.6
			401.9	17.9		
			451.0	20.0		
		20	279.9	12.4	12.8	55.2
			304.1	13.5		
			280.2	12.5		
		30	172.1	7.6	8.4	36.2
			208.2	9.3		
			183.6	8.2		

表 3-6 掺加橡胶块试件 (C35) 的 7 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
7	E	0	463.4	20.6	23.2	100.0
			520.4	23.1		
			586.8	26.1		
		10	347.8	15.5	15.7	67.7
			392.7	17.5		
			317.6	14.1		
		20	259.5	11.5	10.8	46.6
			251.6	11.2		
			215.6	9.6		
		30	158.6	7.0	6.8	29.3
			153.6	6.8		
			149.4	6.6		

表 3-7 掺加胶粒-3 试件 (C50) 的 7 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
7	D	0	805.9	35.8	34.7	100.0
			777.3	34.5		
			759.5	33.8		
		10	522.9	23.2	24.8	71.5
			603.3	26.8		
			551.9	24.5		
		20	480.6	21.4	21.4	61.7
			351.6	15.6		
			488.0	21.7		
		30	499.5	22.2	22.2	64.0
			500.6	22.2		
			393.7	17.5		

表 3-8 掺加橡胶块试件 (C50) 的 7 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
7	E	0	805.9	35.8	34.7	100.0
			777.3	34.5		
			759.5	33.8		
		10	531.6	23.6	23.8	68.6
			523.5	23.3		
			554.4	24.6		
		20	331.0	14.7	17.5	50.4
			411.3	18.3		
			393.0	17.5		
		30	234.7	10.4	10.4	30.0
			248.9	11.1		
			219.0	9.7		

表 3-9 掺加胶粒-3 试件 (C35) 的 28 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
28	D	0	662.0	29.4	35.0	100.0
			786.8	35.0		
			822.7	36.6		
		10	699.5	31.1	29.0	82.6
			673.3	29.9		
			587.4	26.1		

续表 3-9

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
28	D	20	387.0	17.2	19.0	54.3
			460.5	20.5		
			434.7	19.3		
		30	282.3	12.5	12.5	35.7
			263.1	11.7		
			298.2	13.3		

表 3-10 掺加橡胶块试件 (C35) 的 28 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
28	E	0	662.0	29.4	35.0	100.0
			786.8	35.0		
			822.7	36.6		
		10	544.5	24.2	25.6	73.1
			576.7	25.6		
			609.2	27.1		
		20	445.7	19.8	18.2	52.0
			409.6	18.2		
			334.0	14.8		
		30	151.4	6.7	6.9	19.7
			157.3	7.0		
			157.5	7.0		

表 3-11 掺加胶粒-3 试件 (C50) 的 28 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
28	D	0	1011	44.9	43.2	100.0
			890.3	39.6		
			1018	45.2		
		10	692.1	30.8	30.8	71.3
			644.2	28.6		
			899.9	40.0		
		20	661.8	29.4	30.0	69.4
			617.4	27.4		
			744.4	33.1		
		30	482.7	21.5	23.9	55.3
			540.1	24.0		
			587.9	26.1		

表 3-12 掺加橡胶块试件 (C50) 的 28 天龄期抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F (kN)$	$f_{cc}$ 试验值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 (%)
28	E	0	1011	44.9	43.2	100.0
			890.3	39.6		
			1018	45.2		
		10	873.2	38.8	35.6	82.4
			814.2	36.2		
			716.7	31.9		
		20	509.9	22.7	19.0	44.0
			427.8	19.0		
			390.1	17.3		
		30	370.7	16.5	14.4	33.3
			324.6	14.4		
			258.9	11.5		

根据上述试验结果, 分别作出掺加胶粒-3、橡胶块的橡胶混凝土抗压强度随掺量变化曲线, 见图 3-8~图 3-11; 对于不同掺合物, 橡胶混凝土 7 天、28 天龄期抗压强度随掺量变化曲线, 见图 3-12~图 3-15。

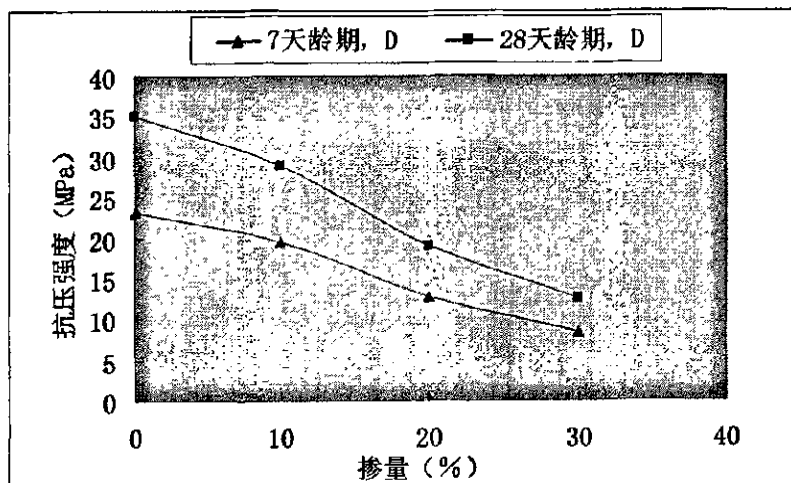


图 3-8 橡胶混凝土胶粒-3 组 (C35) 抗压强度~掺量曲线

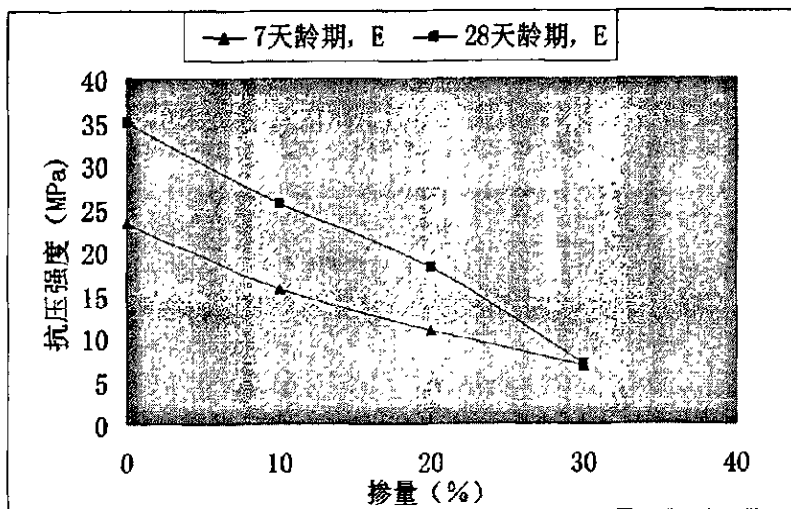


图 3-9 橡胶混凝土橡胶块组 (C35) 抗压强度~掺量曲线

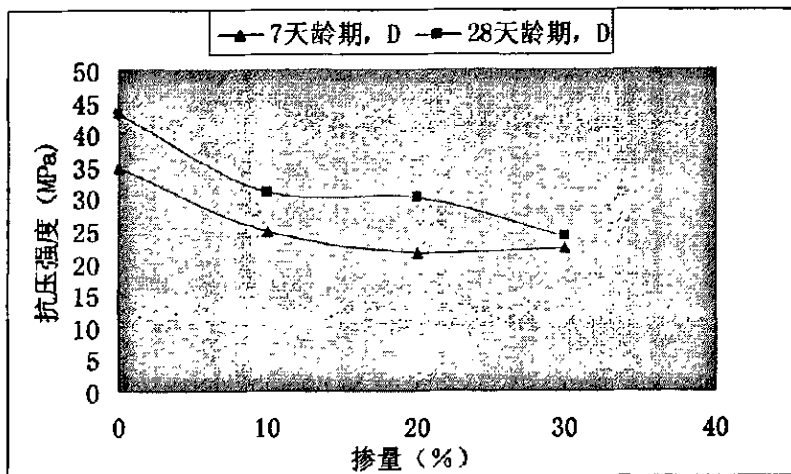


图 3-10 橡胶混凝土胶粒-3 组 (C50) 抗压强度~掺量曲线

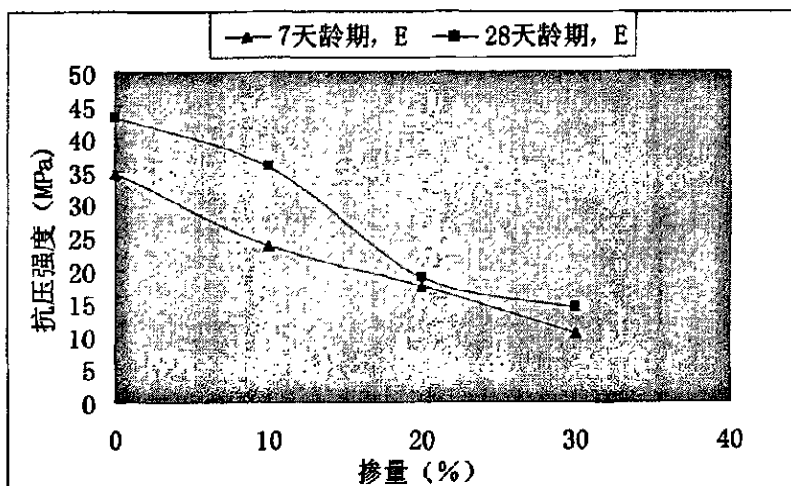


图 3-11 橡胶混凝土橡胶块组 (C50) 抗压强度~掺量曲线

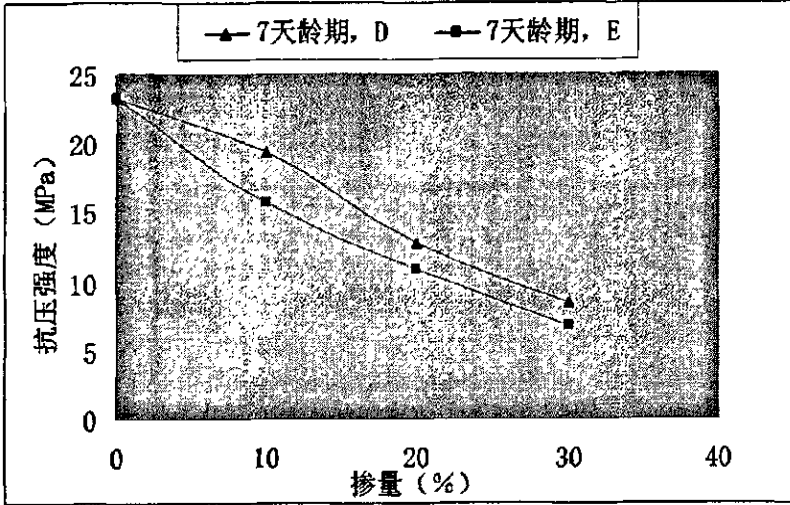


图 3-12 7天龄期橡胶混凝土 (C35) 抗压强度~掺量曲线

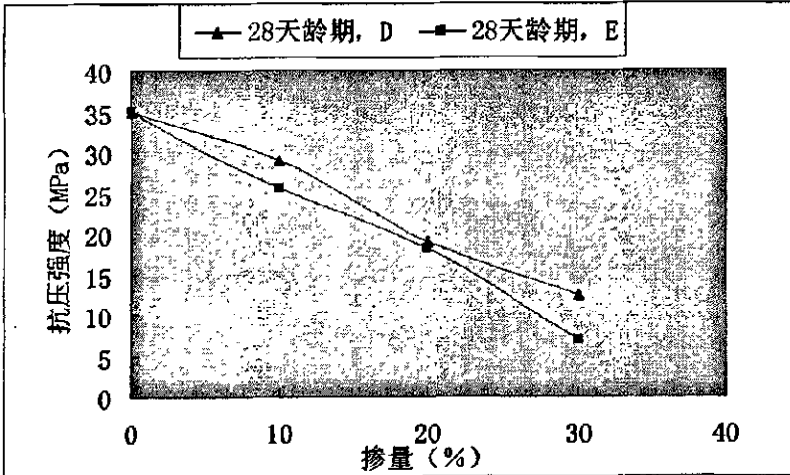


图 3-13 28天龄期橡胶混凝土 (C35) 抗压强度~掺量曲线

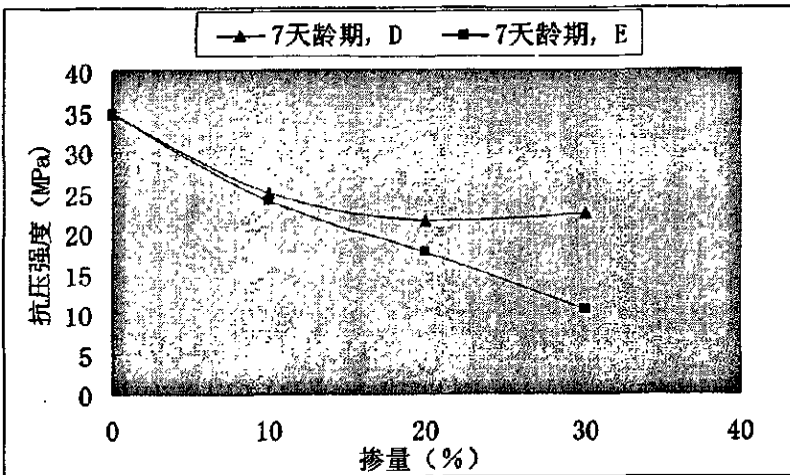


图 3-14 7天龄期橡胶混凝土 (C50) 抗压强度~掺量曲线

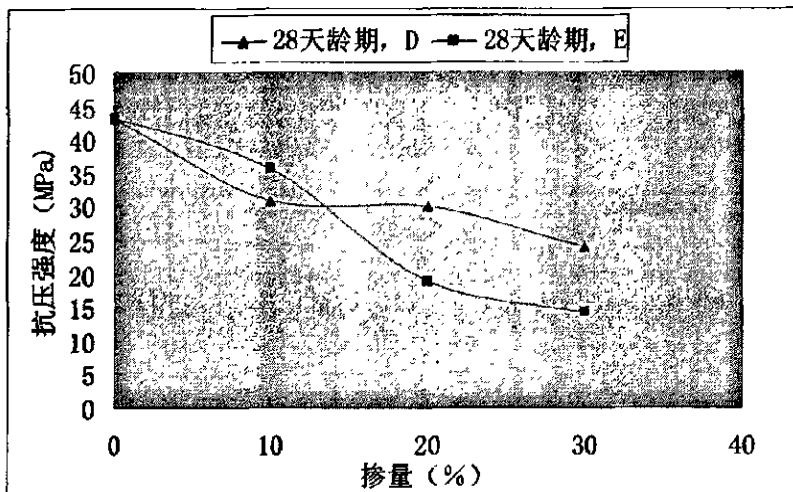


图 3-15 28 天龄期橡胶混凝土 (C50) 抗压强度~掺量曲线

经回归分析, 橡胶混凝土 28 天龄期抗压强度 (C35) 与胶粒-3 掺量的关系可用下式表示:

$$y = -0.0013x^2 - 0.7375x + 35.375 \quad (3-1)$$

相关指数  $R^2=0.9907$

28 天龄期抗压强度 (C35) 与橡胶块掺量的关系可用下式表示:

$$y = -0.0047x^2 - 0.7745x + 34.705 \quad (3-2)$$

相关指数  $R^2=0.9959$

28 天龄期抗压强度 (C50) 与胶粒-3 掺量的关系可用下式表示:

$$y = 0.0157x^2 - 1.0595x + 42.355 \quad (3-3)$$

相关指数  $R^2=0.9273$

28 天龄期抗压强度 (C50) 与橡胶块掺量的关系可用下式表示:

$$y = 0.0075x^2 - 1.255x + 44.25 \quad (3-4)$$

相关指数  $R^2=0.9603$

在式 3-1、3-2、3-3、3-4 中:

$x$ —胶粒-3、橡胶块的掺量, %;

$y$ —28 天龄期的抗压强度, MPa。

由以上的试验结果, 可以得到以下几点结论:

(1) 以 C35 为基准混凝土, 7 天、28 天龄期橡胶混凝土胶粒-3 组掺量由 10% 增到 20% 时, 其相对强度变化较大, 变化值达到 30%; 橡胶混凝土橡胶块组 7 天、28 天龄期强度值的变化则说明其在 30% 掺量时抗压强度随龄期增长极为缓慢。

(2) 以 C50 为基准混凝土, 7 天、28 天龄期橡胶混凝土胶粒-3 组掺量为 10% 时, 其相对强度变化较大, 变化值达到 30%; 橡胶混凝土橡胶块组掺量 20%、30% 时, 强度值在 7 天、28 天龄期的变化较小, 增长较为缓慢。



(3) 以 C35 或 C50 为基准混凝土，在相同掺量的情况下，掺入橡胶块比掺入胶粒-3 对混凝土抗压强度的影响更大。

(4) 橡胶混凝土 7 天、28 天龄期抗压强度均随胶粒-3 或橡胶块掺量的增大而减小，但下降程度略有不同。

(5) 由橡胶混凝土极限荷载破坏形态（见图 3-16~图 3-18）可以看出，胶粒-3 和橡胶块的掺入使混凝土极限荷载下表面裂纹数量减少，明显改善了其破坏形态，混凝土韧性增强。

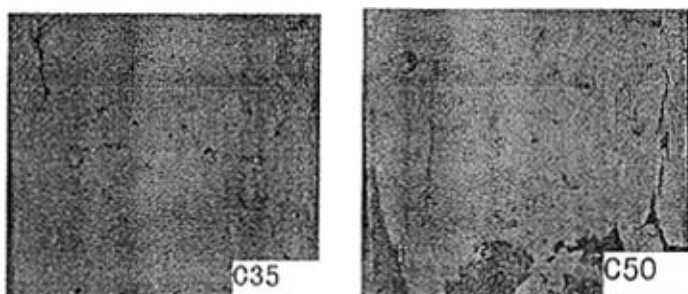


图 3-16 基准混凝土极限荷载时的破坏形态图

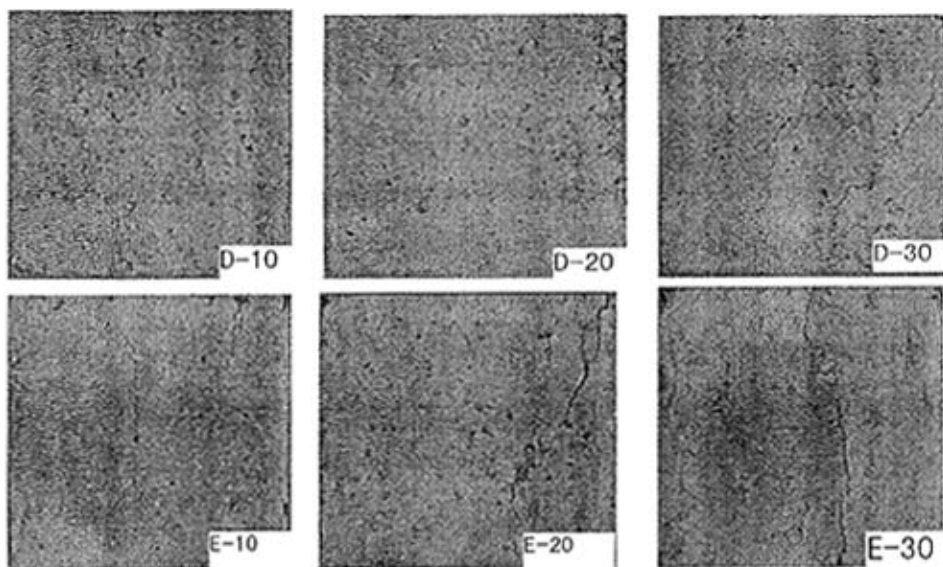
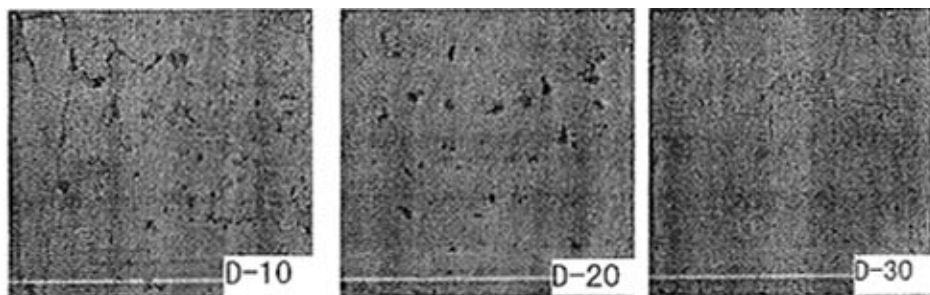


图 3-17 橡胶混凝土 (C35) 极限荷载时的破坏形态图



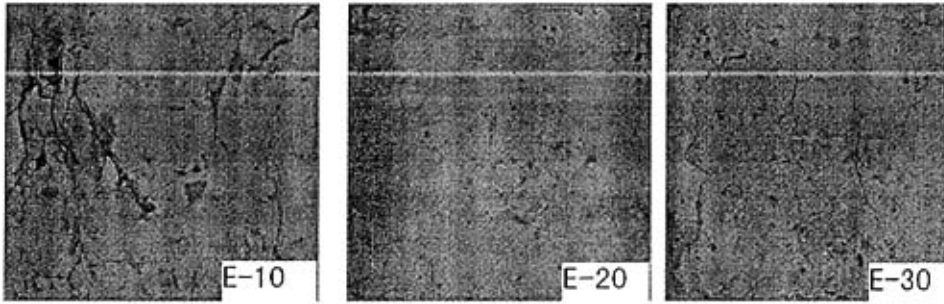


图 3-18 橡胶混凝土 (C50) 极限荷载时的破坏形态图

### 3.5 劈裂抗拉强度试验

橡胶混凝土劈裂抗拉强度的试验步骤和试验数据处理如前所述,在此不再赘述。

橡胶混凝土各组试件不同龄期劈裂抗拉强度试验结果见表 3-13~表 3-20。

表 3-13 掺加胶粒-3 试件 (C35) 的 7 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_u/f_{cc}$
7	D	0	72.83	2.06	2.08	23.2	0.090
			75.35	2.13			
			72.21	2.04			
		10	72.95	2.07	1.98	19.4	0.102
			62.07	1.76			
			74.01	2.10			
		20	60.28	1.71	1.45	12.8	0.113
			49.04	1.39			
			51.06	1.45			
		30	41.06	1.16	1.07	8.4	0.127
			38.60	1.09			
			33.79	0.96			

表 3-14 掺加橡胶块试件 (C35) 的 7 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_u/f_{cc}$
7	E	0	72.83	2.06	2.08	23.2	0.090
			75.35	2.13			
			72.21	2.04			
		10	61.82	1.75	1.74	15.7	0.111
			61.54	1.74			
			61.51	1.74			

续表 3-14

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_b$ 试验值 (MPa)	$f_b$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_b/f_{cc}$
7	E	20	42.28	1.20	1.22	10.8	0.113
			44.11	1.25			
			42.51	1.20			
		30	22.09	0.62	0.61	6.8	0.090
			20.12	0.57			
			22.93	0.65			

表 3-15 掺加胶粒-3 试件 (C50) 的 7 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_a$ 试验值 (MPa)	$f_a$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_a/f_{cc}$
7	D	0	104.3	2.95	3.02	34.7	0.087
			99.78	2.82			
			116.5	3.30			
		10	93.05	2.63	2.72	24.8	0.110
			100.6	2.85			
			94.20	2.67			
		20	76.72	2.17	2.29	21.4	0.107
			82.74	2.34			
			83.70	2.37			
		30	61.71	1.75	2.32	22.2	0.105
			90.55	2.56			
			81.93	2.32			

表 3-16 掺加橡胶块试件 (C50) 的 7 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_a$ 试验值 (MPa)	$f_a$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_a/f_{cc}$
7	E	0	104.3	2.95	3.02	34.7	0.087
			99.78	2.82			
			116.5	3.30			
		10	73.83	2.09	2.09	23.8	0.088
			64.23	1.82			
			87.06	2.46			
		20	64.89	1.84	1.77	17.5	0.101
			62.93	1.78			
			59.83	1.69			
		30	50.86	1.44	1.39	10.4	0.134
			47.78	1.35			
			49.03	1.39			

表 3-17 掺加胶粒-3 试件 (C35) 的 28 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_u/f_{cc}$
28	D	0	108.9	3.08	2.79	35.0	0.080
			100.0	2.83			
			87.22	2.47			
		10	94.27	2.67	2.85	29.0	0.098
			105.6	2.99			
			102.2	2.89			
		20	57.13	1.62	2.42	19.0	0.127
			86.40	2.45			
			85.39	2.42			
		30	66.88	1.89	1.87	12.5	0.150
			66.38	1.88			
			65.03	1.84			

表 3-18 掺加橡胶块试件 (C35) 的 28 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_u/f_{cc}$
28	E	0	108.9	3.08	2.79	35.0	0.080
			100.0	2.83			
			87.22	2.47			
		10	96.29	2.72	2.82	25.6	0.110
			105.7	2.99			
			96.89	2.74			
		20	49.46	1.40	1.58	18.2	0.087
			61.50	1.74			
			55.93	1.58			
		30	15.51	0.44	0.43	6.9	0.062
			14.31	0.41			
			15.99	0.45			

表 3-19 掺加胶粒-3 试件 (C50) 的 28 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_u/f_{cc}$
28	D	0	156.7	4.44	4.39	43.2	0.102
			148.9	4.22			
			159.4	4.51			
		10	131.6	3.73	3.56	30.8	0.116
			98.64	2.79			
			125.6	3.56			

续表 3-19

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_u/f_{cc}$
28	D	20	113.0	3.20	3.03	30.0	0.101
			112.1	3.17			
			96.17	2.72			
		30	103.1	2.93	2.86	23.9	0.120
			110.6	3.13			
			89.42	2.53			

表 3-20 掺加橡胶块试件 (C50) 的 28 天龄期劈裂抗拉强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_u$ 试验值 (MPa)	$f_u$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_u/f_{cc}$
28	E	0	156.7	4.44	4.39	43.2	0.102
			148.9	4.22			
			159.4	4.51			
		10	96.29	2.73	2.77	35.6	0.108
			89.71	2.54			
			107.0	3.03			
		20	78.42	2.22	2.30	19.0	0.121
			83.05	2.35			
			82.54	2.34			
		30	56.81	1.61	1.72	14.4	0.119
			61.80	1.75			
			63.50	1.80			

根据上述试验结果, 分别作出掺加胶粒-3、橡胶块的劈裂抗拉强度随掺量变化曲线, 见图 3-19~图 3-22; 对于不同掺合物, 7 天、28 天龄期劈裂抗拉强度随掺量变化曲线, 见图 3-23~图 3-26。

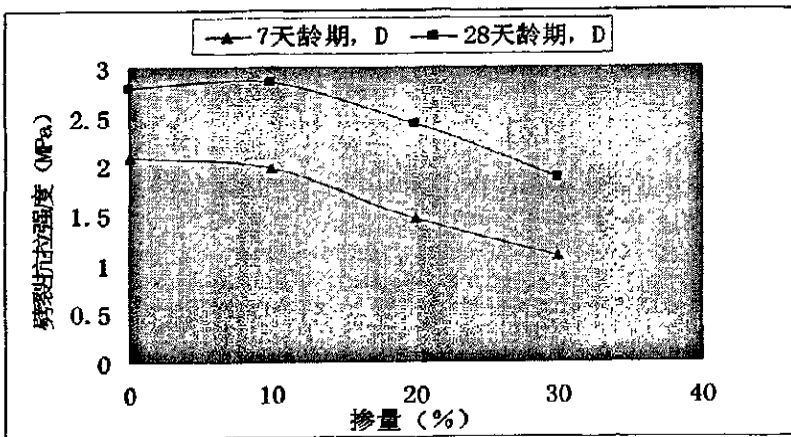


图 3-19 橡胶混凝土胶粒-3 组 (C35) 劈裂抗拉强度~掺量曲线

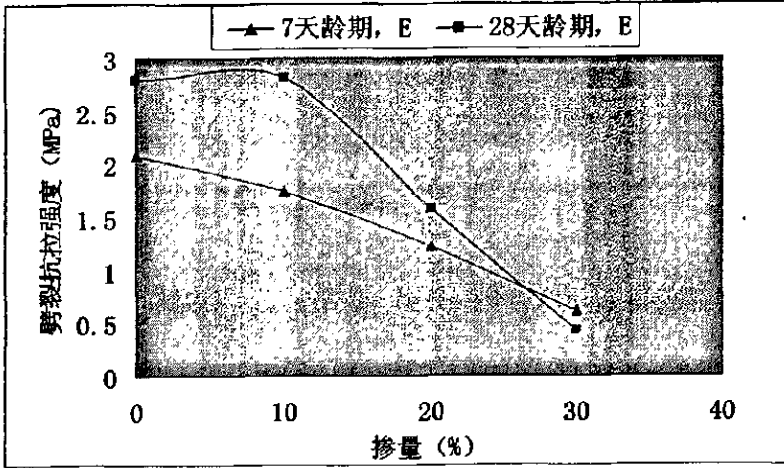


图 3-20 橡胶混凝土橡胶块组 (C35) 劈裂抗拉强度~掺量曲线

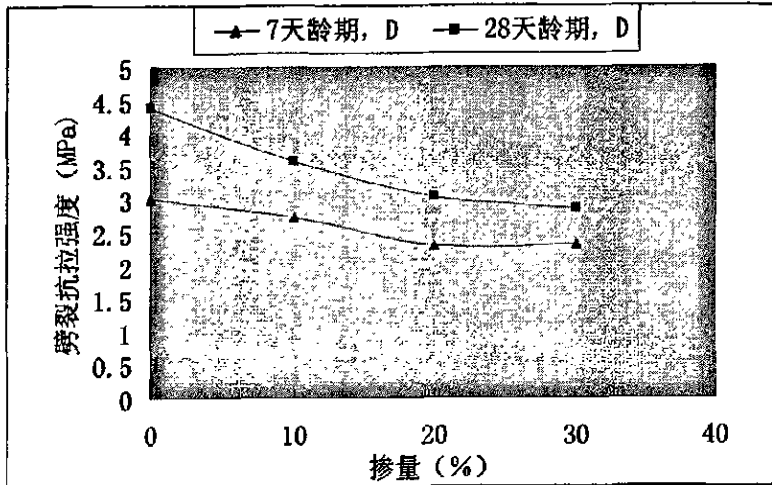


图 3-21 橡胶混凝土胶粒-3 组 (C50) 劈裂抗拉强度~掺量曲线

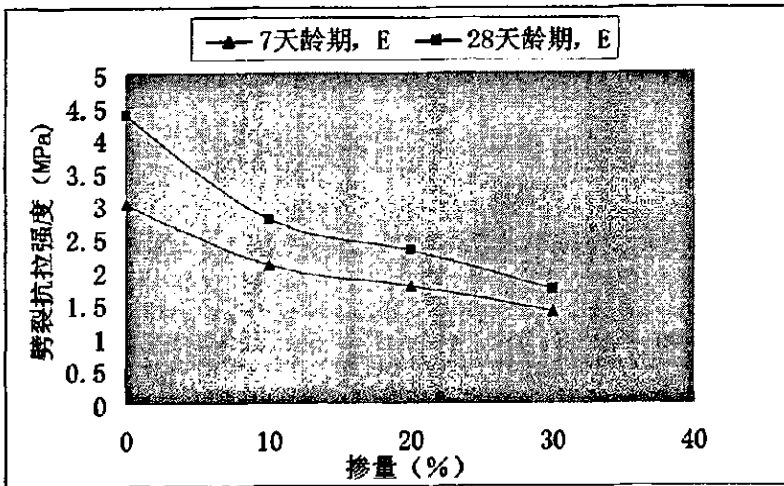


图 3-22 橡胶混凝土橡胶块 3 组 (C50) 劈裂抗拉强度~掺量曲线

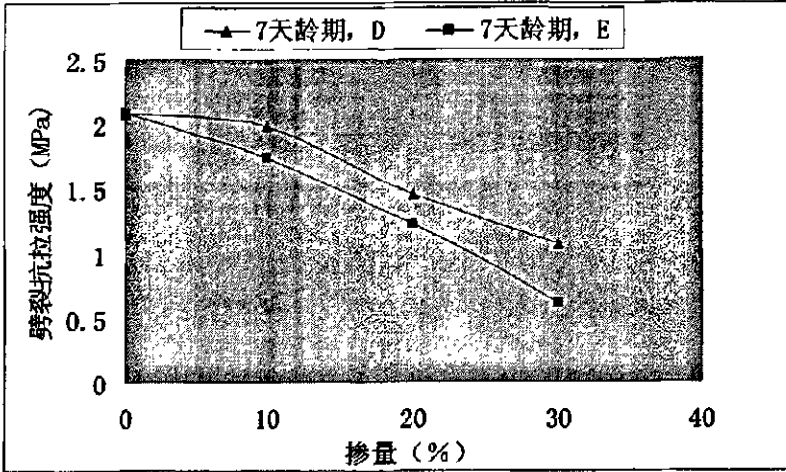


图 3-23 7 天龄期橡胶混凝土 (C35) 劈裂抗拉强度~掺量曲线

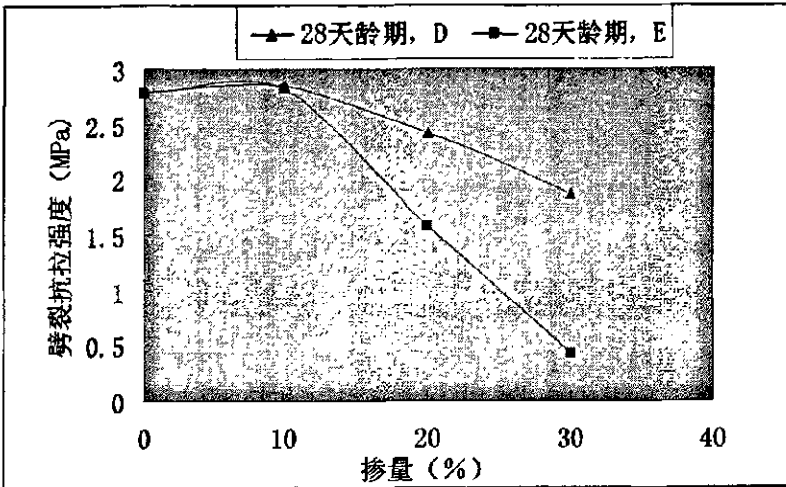


图 3-24 28 天龄期橡胶混凝土 (C35) 劈裂抗拉强度~掺量曲线

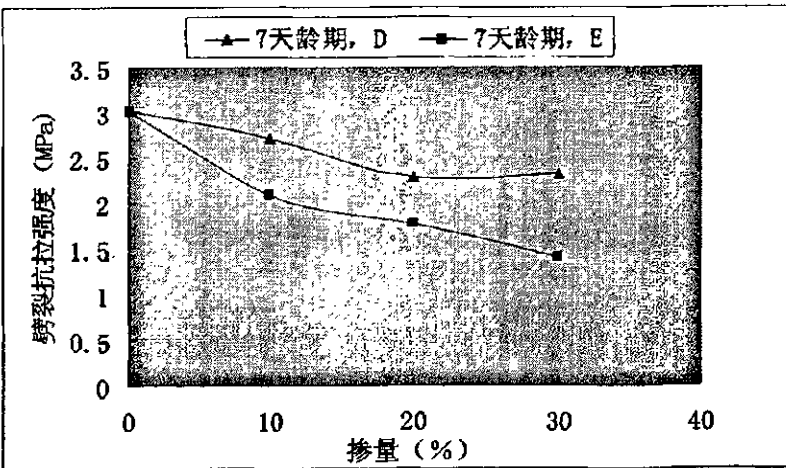


图 3-25 7 天龄期橡胶混凝土 (C50) 劈裂抗拉强度~掺量曲线

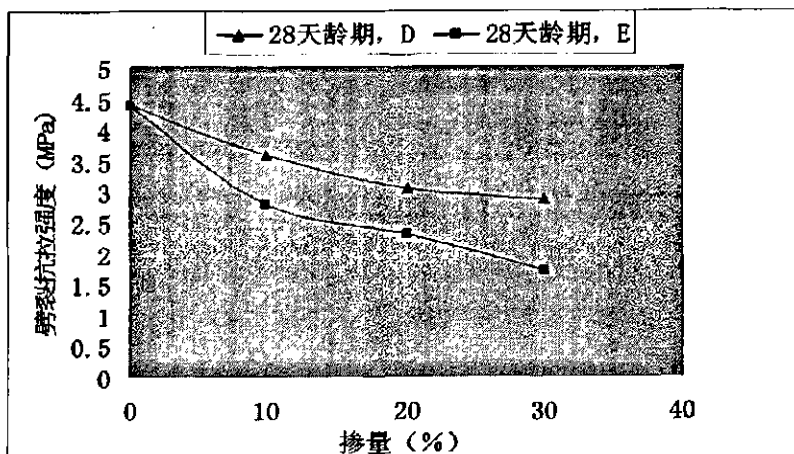


图 3-26 28 天龄期橡胶混凝土 (C50) 劈裂抗拉强度~掺量曲线

由以上试验结果,可以得到以下结论:

(1) 以 C35 为基准混凝土, 7 天、28 天龄期橡胶混凝土胶粒-3 组劈裂抗拉强度和相对强度  $f_w/f_{wc}$  均随掺量的增大而减小。

(2) 以 C35 为基准混凝土, 7 天、28 天龄期的橡胶混凝土橡胶块组在相同掺量下, 其劈裂抗拉强度比胶粒-3 组略小。

(3) 以 C50 为基准混凝土, 橡胶混凝土相对强度  $f_w/f_{wc}$  在掺量 10%~30% 之间变化不是很大, 相对保持较为稳定的状态。

(4) 橡胶混凝土劈裂抗拉强度随胶粒(块)掺量的增大而呈现减小的趋势。

(5) 从橡胶混凝土劈裂抗拉破坏形态(见图 3-27~图 3-29)可以看出, 掺入胶粒(块)明显改善了混凝土的抗拉能力, 极限荷载下仍能保持相对完整的状态。

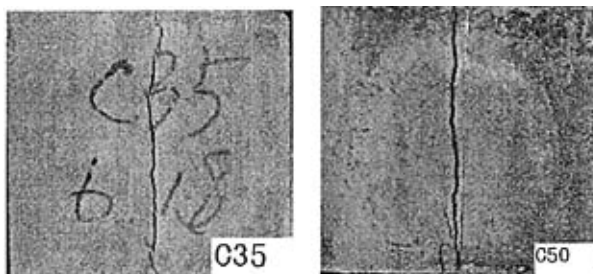
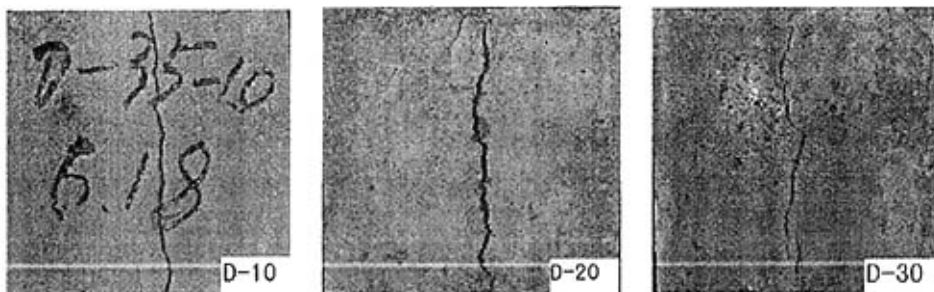


图 3-27 基准混凝土极限荷载时的破坏形态图





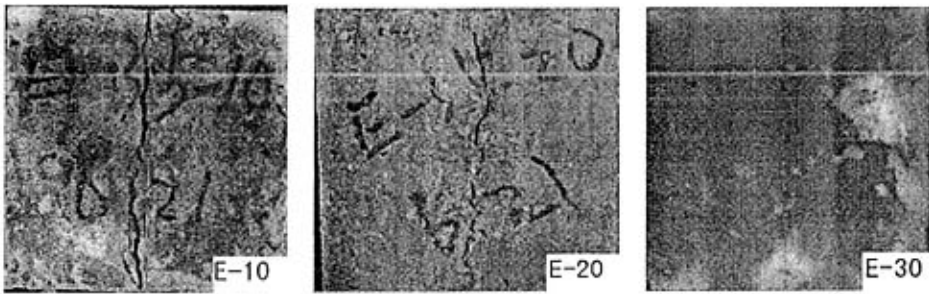


图 3-28 橡胶混凝土 (C35) 极限荷载时的破坏形态图

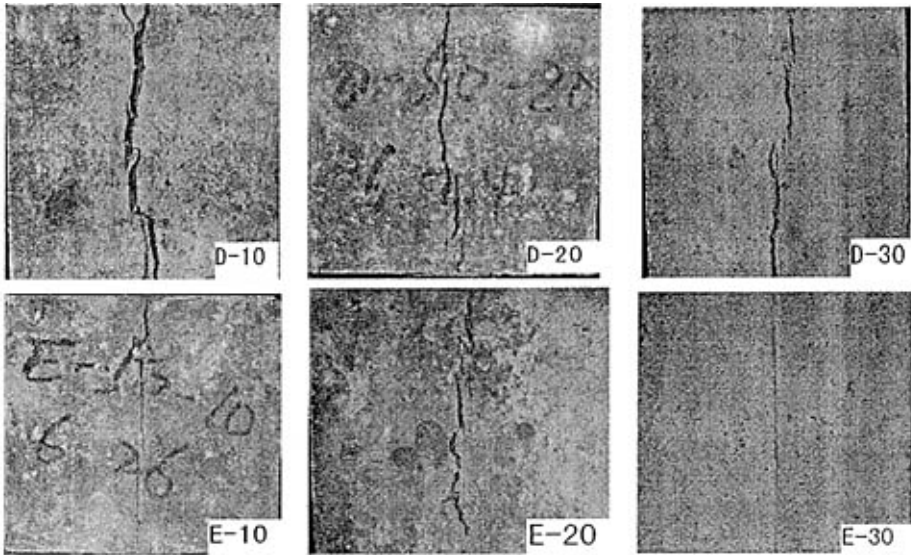


图 3-29 橡胶混凝土 (C50) 极限荷载时的破坏形态图

### 3.6 抗折强度试验

橡胶混凝土抗折强度的试验步骤和试验数据处理如前所述, 在此不再赘述。

橡胶混凝土各组试件的抗折强度试验结果见表 3-21、表 3-22、表 3-23。

表 3-21 掺加胶粒-3 试件 (C35) 的 28 天龄期抗折强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_f$ 试验值 (MPa)	$f_f$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_f/f_{cc}$
28	D	0	35.0	4.7	5.0	35.0	0.143
			40.5	5.4			
			37.3	5.0			
		10	27.3	3.6	4.1	29.0	0.141
			33.6	4.5			
			31.3	4.2			
		20	26.0	3.5	3.9	19.0	0.205
			29.4	3.9			
			31.4	4.2			

续表 3-21

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_f$ 试验值 (MPa)	$f_f$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_f/f_{cc}$
28	D	30	23.8	3.2	3.4	12.5	0.272
			24.7	3.3			
			27.0	3.6			

表 3-22 掺加橡胶块试件 (C35) 的 28 天龄期抗折强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_f$ 试验值 (MPa)	$f_f$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_f/f_{cc}$
28	E	0	35.0	4.7	5.0	35.0	0.143
			40.5	5.4			
			37.3	5.0			
		10	25.3	3.4	3.4	25.6	0.133
			23.0	3.1			
			29.8	4.0			
		20	23.9	3.2	3.0	18.2	0.165
			22.2	3.0			
			20.8	2.8			
		30	10.4	1.4	1.4	6.9	0.203
			10.0	1.3			
			10.6	1.4			

表 3-23 掺加胶粒-3 试件 (C50) 的 28 天龄期抗折强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏 荷载 $F$ (kN)	$f_f$ 试验值 (MPa)	$f_f$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对 强度 $f_f/f_{cc}$
28	D	0	47.5	6.3	6.4	43.2	0.276
			50.6	6.7			
			47.2	6.3			
		10	41.0	5.5	5.1	30.8	0.166
			36.8	4.9			
			36.0	4.8			
		20	40.5	5.4	5.1	30.0	0.170
			36.0	4.8			
			37.5	5.0			
		30	37.3	5.0	5.0	23.9	0.209
			37.9	5.1			
			37.5	5.0			

表 3-24 掺加橡胶块试件 (C50) 的 28 天龄期抗折强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_f$ 试验值 (MPa)	$f_f$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_f/f_{cc}$
28	E	0	47.5	6.3	6.4	43.2	0.148
			50.6	6.7			
			47.2	6.3			
		10	36.6	4.9	5.2	35.6	0.146
			37.8	5.0			
			41.8	5.6			
		20	32.7	4.4	4.4	19.0	0.232
			32.8	4.4			
			29.4	3.9			
		30	25.0	3.3	3.4	14.4	0.236
			26.2	3.5			
			25.7	3.4			

根据上述试验结果, 可以作出橡胶混凝土 28 天龄期抗折强度随掺量变化曲线, 见图 3-30, 图 3-31。

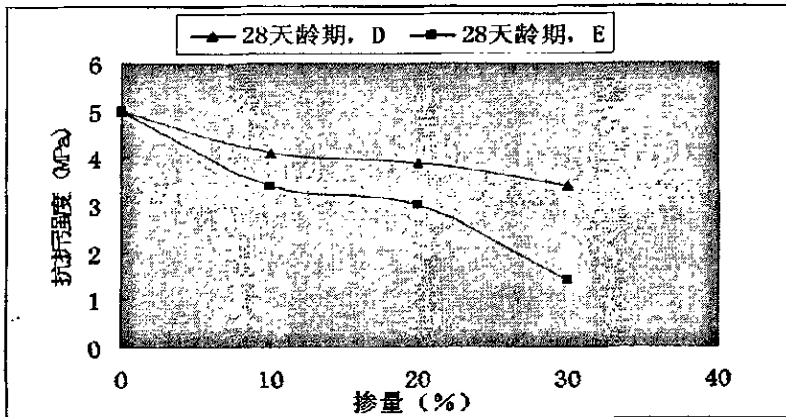


图 3-30 28 天龄期橡胶混凝土 (C35) 抗折强度~掺量曲线

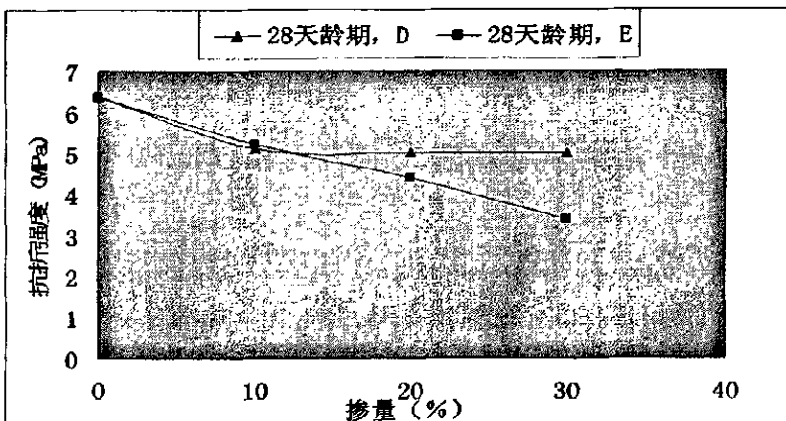


图 3-31 28 天龄期橡胶混凝土 (C50) 抗折强度~掺量曲线

由以上试验结果，可以得到以下结论：

- (1) 以 C35 为基准混凝土，橡胶混凝土橡胶块组的抗折强度在掺量 10%~20%之间变化不大，说明橡胶块的掺入在此范围内对混凝土抗折强度影响甚微。
- (2) 以 C50 为基准混凝土，橡胶混凝土胶粒-3 组抗折强度在掺量 10%~30%之间变化不大，说明胶粒-3 的掺入在此范围内对混凝土抗折强度影响甚微。
- (3) 相同掺量的情况下，掺入橡胶块的橡胶混凝土抗折强度比掺入胶粒-3 的稍小一些，即相同掺量的橡胶块比胶粒-3 对混凝土抗折强度影响更大一些。
- (4) 橡胶混凝土抗折强度均随着胶粒(块)掺量的增大而减小。

### 3.7 轴心抗压强度试验

橡胶混凝土轴心抗压强度的试验步骤和试验数据处理如前所述，在此不再赘述。

橡胶混凝土各组试件轴心抗压强度试验结果见表 3-25 至表 3-28。

表 3-25 掺加胶粒-3 试件 (C35) 的 28 天龄期轴心抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cp}$ 试验值 (MPa)	$f_{cp}$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_{cp}/f_{cc}$
28	D	0	534.1	23.7	23.7	35.0	0.677
			566.9	25.2			
			636.2	28.3			
		10	439.7	19.5	20.3	29.0	0.700
			434.4	19.3			
			497.7	22.1			
		20	345.5	15.4	16.5	19.0	0.868
			387.8	17.2			
			378.8	16.8			
		30	281.2	12.5	11.3	12.5	0.904
			250.2	11.1			
			228.9	10.2			

表 3-26 掺加橡胶块试件 (C35) 的 28 天龄期轴心抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cp}$ 试验值 (MPa)	$f_{cp}$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_{cp}/f_{cc}$
28	E	0	534.1	23.7	23.7	35.0	0.677
			566.9	25.2			
			636.2	28.3			
		10	450.5	20.0	18.1	25.6	0.707
			378.1	16.8			
			396.5	17.6			

续表 3-26

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cp}$ 试验值 (MPa)	$f_{cp}$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_{cp}/f_{cc}$
28	E	20	318.1	14.1	14.0	18.2	0.769
			337.5	15.0			
			288.3	12.8			
		30	110.2	4.9	4.6	6.9	0.667
			101.0	4.5			
			100.8	4.5			

表 3-27 掺加胶粒-3 试件 (C50) 的 28 天龄期轴心抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cp}$ 试验值 (MPa)	$f_{cp}$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_{cp}/f_{cc}$
28	D	0	850.4	37.8	37.1	43.2	0.859
			778.6	34.6			
			875.0	38.9			
		10	660.2	29.3	30.7	30.8	0.997
			716.3	31.8			
			694.6	30.9			
		20	532.3	23.7	23.4	30.0	0.780
			471.3	20.9			
			574.7	25.5			
		30	491.5	21.8	22.0	23.9	0.921
			494.2	22.0			
			600.8	26.7			

表 3-28 掺加橡胶胶块试件 (C50) 的 28 天龄期轴心抗压强度试验结果统计表

龄期 (天)	橡胶	掺量 (%)	破坏荷载 $F$ (kN)	$f_{cp}$ 试验值 (MPa)	$f_{cp}$ 平均值 (MPa)	$f_{cc}$ 平均值 (MPa)	相对强度 $f_{cp}/f_{cc}$
28	E	0	850.4	37.8	37.1	43.2	0.859
			778.6	34.6			
			875.0	38.9			
		10	575.7	25.6	24.5	35.6	0.688
			578.1	25.7			
			496.8	22.1			
		20	336.8	15.0	15.0	19.0	0.789
			315.5	14.0			
			461.5	20.5			
		30	264.6	11.8	11.7	14.4	0.813
			270.6	12.0			
			255.5	11.4			

根据以上试验结果，可以作出橡胶混凝土 28 天龄期轴心抗压强度随掺量变化曲线，见图 3-32、图 3-33。

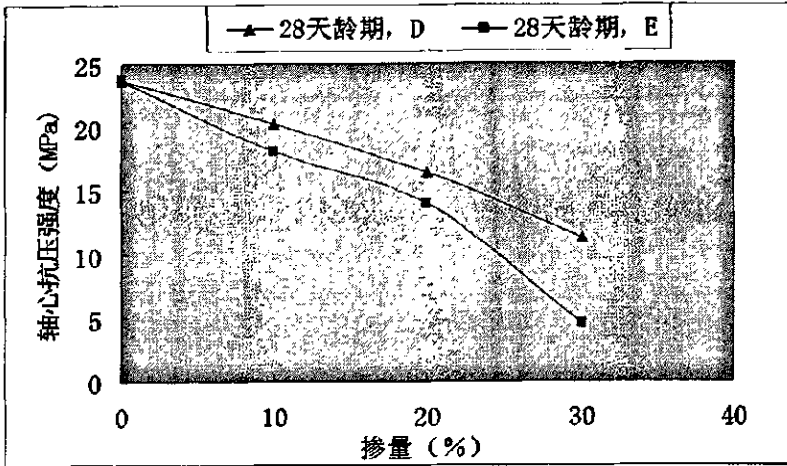


图 3-32 28 天龄期橡胶混凝土 (C35) 轴心抗压强度~掺量曲线

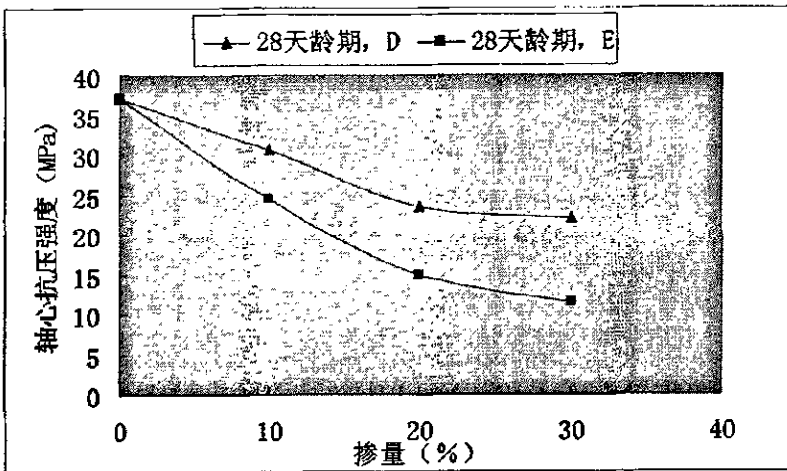


图 3-33 28 天龄期橡胶混凝土 (C50) 轴心抗压强度~掺量曲线

由以上试验结果，可以得到以下结论：

- (1) 橡胶混凝土轴心抗压强度随胶粒（块）掺量的增大而减小。
- (2) 以 C35 或 C50 为基准混凝土，相同掺量下，橡胶块比胶粒-3 对橡胶混凝土轴心抗压强度的影响略大。

### 3.8 静力受压弹性模量试验

橡胶混凝土静力受压弹性模量的试验步骤和试验数据处理如前所述，在此不再赘述。

橡胶混凝土各组试件的弹性模量试验结果见表 3-29

表 3-29 弹性模量试验结果统计表

编号		C35	35-10	35-20	35-30	C50	50-10	50-20	50-30
弹性模量(GPa)	胶粒-3	39.0	36.0	30.8	22.2	40.1	37.8	34.7	32.3
	橡胶块	39.0	31.2	24.2	2.5	40.1	34.8	30.9	28.5

由上述试验结果,可作出橡胶混凝土弹性模量随掺量变化曲线,如图 3-34、图 3-35。

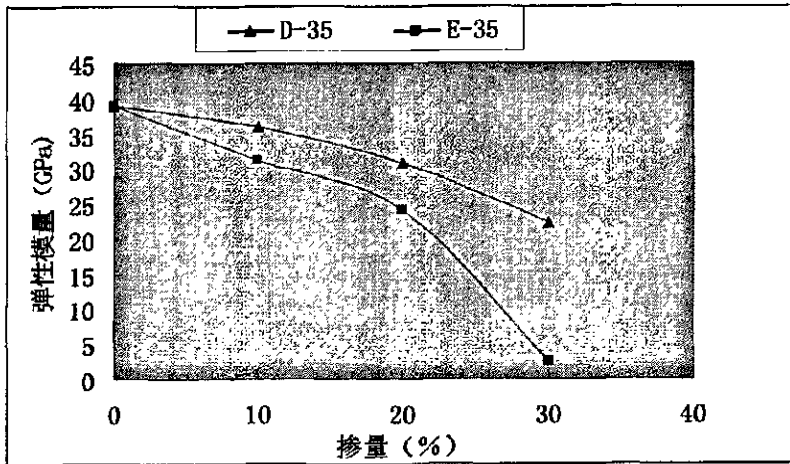


图 3-34 橡胶混凝土(C35)弹性模量~掺量变化曲线

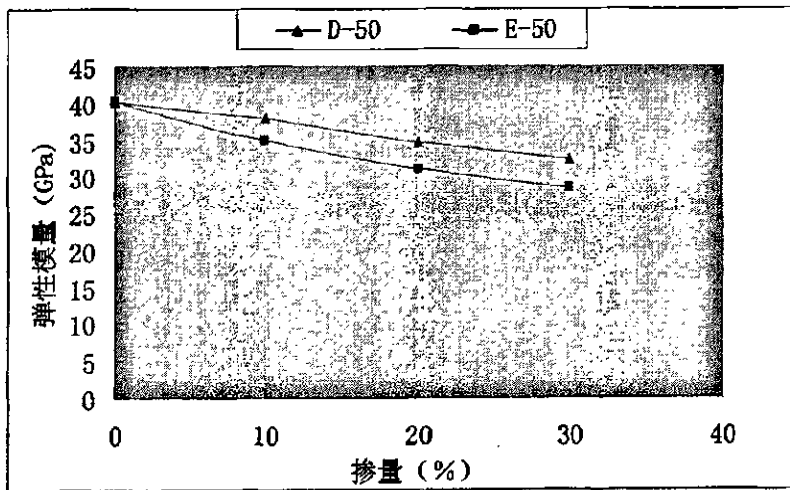


图 3-35 橡胶混凝土(C50)弹性模量~掺量变化曲线

由以上试验结果,可以看出:

- (1) 橡胶混凝土的弹性模量随胶粒(块)掺量的增大而减小。
- (2) 相同掺量下,橡胶块比胶粒-3对混凝土的弹性模量的影响略大。
- (3) 橡胶混凝土的弹性模量随掺量的增大而减小,其变形能力增强。

### 3.9 橡胶混凝土容重试验

橡胶混凝土试件处于气干状态时,对其重量进行称量。橡胶混凝土胶粒(块)组的容重如表 3-30 所示。

表 3-30 橡胶混凝土气干状态下的容重统计表

编号		C35	35-10	35-20	35-30	C50	50-10	50-20	50-30
容重 (kg/m <sup>3</sup> )	胶粒-3	2393	2341	2296	2104	2415	2370	2296	2258
	橡胶块	2393	2311	2222	2044	2415	2320	2228	2148

根据上述试验结果,可作出橡胶混凝土容重随掺量变化曲线,如图 3-36、图 3-37 所示。

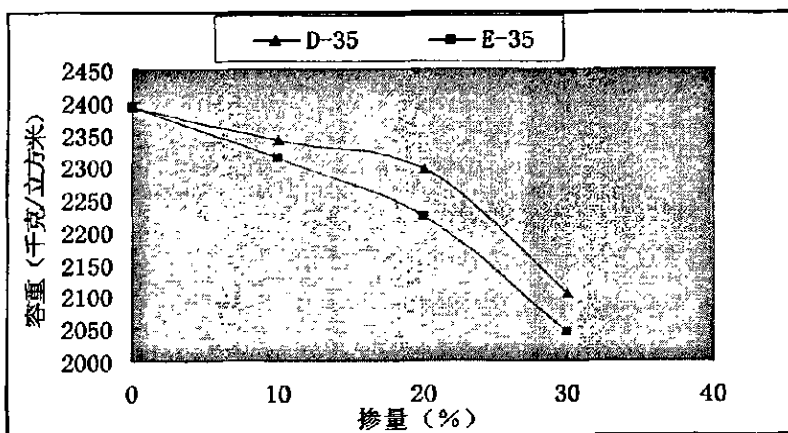


图 3-36 橡胶混凝土 (C35) 容重~掺量曲线

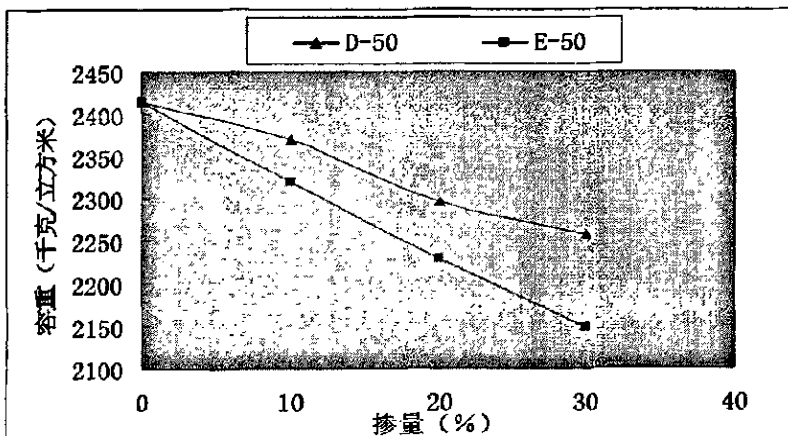


图 3-37 橡胶混凝土 (C50) 容重~掺量曲线

由试验结果可知,橡胶混凝土的容重随胶粒(块)掺量的增大而减小,相同掺量的橡胶块比胶粒-3 对混凝土容重的影响略大。由于混凝土掺入胶粒(块)后,内部产生数量不等的气泡,所以相同掺量的胶粒(块)对混凝土容重的影响存在一定的差异。



### 3.10 本章小结

本章通过探讨 NaOH 溶液浸泡处理对橡胶混凝土的影响,得出其是橡胶混凝土制备过程中不可缺少的一环。在此基础上,以 C35 和 C50 为基准混凝土,对经 NaOH 溶液浸泡处理的胶粒(块)橡胶混凝土的和易性、力学性能和容重等性能开展试验研究。试验结果表明,随着胶粒(块)掺量的增大,橡胶混凝土坍落度、抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、轴心抗压强度、弹性模量和容重等均呈现减小的趋势。同时,橡胶的掺入明显改善了混凝土在极限荷载下的破坏形态,其韧性和变形能力明显高于基准混凝土。

### 第四章 橡胶混凝土在工程中的应用

在已有试验研究的基础上,针对橡胶混凝土较基准混凝土强度低、韧性好和变形能力强等特性,本章主要探讨其在混凝土路面面层和桥面铺装层等工程应用的可行性。

#### 4.1 橡胶混凝土在水泥混凝土路面面层中的应用

水泥混凝土路面包括普通混凝土、钢筋混凝土、连续配筋混凝土、预应力混凝土、装配式混凝土和钢纤维混凝土等面层板和基(垫)层。水泥混凝土路面由面层、基层、垫层、路肩结构和排水设施等组成,某水泥混凝土路面结构如图4-1所示。

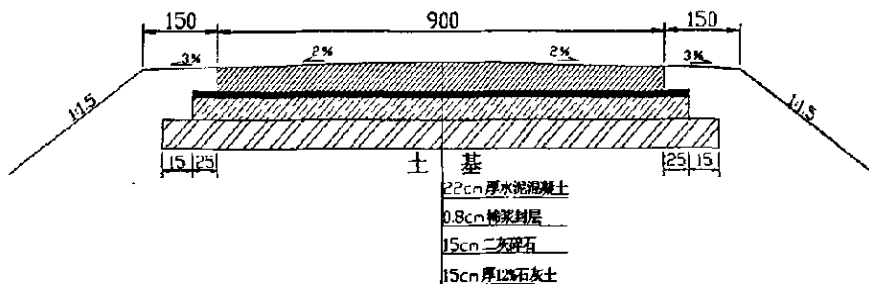


图 4-1 水泥混凝土路面结构图

在水泥混凝土路面结构中,水泥混凝土路面面层直接承受行车荷载和环境因素(温度和湿度)的作用,应具有足够的强度、耐久性和良好的表面特性(耐磨、抗滑、平整、低噪声等)。

##### (1) 强度

混凝土路面设计中,由于面层板承受行车荷载和温度荷载的共同作用,面层底面所产生的弯拉应力和混凝土的弯拉强度确定了面层所需要的厚度。因此,采用弯拉强度试验确定的弯拉强度能更好地同路面受力状况相匹配。现行水泥混凝土路面设计规范中,水泥混凝土的设计弯拉强度标准值为 28 天龄期的弯拉强度。当混凝土浇筑 90 天内不开放交通时,可采用 90 天龄期的弯拉强度,约为 28 天强度的 1.15 倍。对于不同等级的公路,面层混凝土强度要求如表 4-1 所示。

表 4-1 水泥混凝土设计弯拉强度和抗压强度

公路等级	二、三级公路	四级公路
设计弯拉强度 (MPa)	4.5	4.0
设计抗压强度 (MPa)	30	25

如果在二、三级公路面层应用橡胶混凝土,结合各阶段的试验结果,符合弯拉强度要求的橡胶混凝土如表 4-2 所示。

表 4-2 橡胶混凝土弯拉强度和抗压强度

组编号	弯拉强度 (MPa)	抗压强度 (MPa)
50-D-10	5.1	30.8
50-D-20	5.1	30
50-D-30	5.0	23.9
50-E-10	5.2	35.6
50-E-20	4.4 (略小)	19.9
C50	6.4	43.2

说明: C50 代表基准混凝土; D 代表 1~3mm 胶粒; E 代表 5~12mm 胶块; 组编号中末尾数字 (如 10、20、30) 为胶粒 (块) 掺量。

表 4-2 的试验数据说明, 橡胶混凝土 50-D-10 组、50-D-20 组和 50-E-10 组均达到二、三级公路弯拉强度和抗压强度的要求, 50-D-30 组达到弯拉强度的要求。所以, 橡胶混凝土经过适当的配合比设计, 完全可以满足混凝土路面面层的强度要求。

(2) 耐久性

路面面层混凝土直接受到大气温度和湿度的反复作用, 在季节性冰冻地区, 还受到冻融反复作用, 为使混凝土具有较好的耐久性 (主要是抗冻性), 需要适当提高水泥用量、降低水灰比和改善混合料组成。

从已有的研究成果<sup>[3]</sup>来看, 橡胶混凝土的抗冻性能与胶粉 (粒) 的掺量有直接关系, 掺量在一定范围以内有利于提高其抗冻性。所以, 橡胶混凝土要满足路面面层在耐久性方面的要求, 应控制橡胶粒 (块) 的掺量。

(3) 耐磨性

路面面层混凝土承受车轮荷载的反复作用, 因而要求混凝土具有较高的耐磨性。作为间接反映耐磨性能的抗压强度, 对于二、三级公路应不低于 30MPa, 四级公路不低于 25MPa。混凝土耐磨性评价, 以试件磨损面上单位面积的磨损量作为评定混凝土耐磨性的相对指标。

按现行试验法 (JTJ 053 T0527-94), 是以 150mm×150mm×150mm 立方体试件, 养护至 27 天龄期, 在 60℃ 烘干恒重, 然后在带有花轮磨头的混凝土磨耗试验机上, 在 200N 负荷下磨削 50 转。按下式计算磨耗量:

$$G = \frac{m_0 - m_1}{0.0125} \times 100 \tag{4-1}$$

式中:  $G$ ——单位面积磨耗量,  $kg/m^2$ ;  
 $m_0$ ——试件的原始质量,  $kg$ ;  
 $m_1$ ——试件磨损后的质量,  $kg$ ;  
 0.0125——试件磨损面积,  $m^2$ 。

关于橡胶混凝土的耐磨性的研究成果较少, 尚待进行相关的试验研究。

## 4.2 橡胶混凝土在桥面铺装层中的应用

桥面铺装也称行车道铺装,其功能是保护属于主梁整体部分的行车道板不受车辆轮胎(或履带)的直接磨损,防止主梁遭受雨水及其他有害物质的侵蚀,并能使车辆轮重的集中荷载起一定的分布作用。桥面铺装的好坏和使用性能及耐久程度将直接影响到车辆的形式质量和桥梁的使用寿命。因此,桥面铺装材料应具有以下的特点:较高的抗折强度、良好的抗冲击韧性、耐久性好、不透水和抗滑性好等性能。

钢筋混凝土桥或预应力混凝土梁桥的桥面铺装层常见的有沥青混凝土、普通水泥混凝土、防水混凝土、钢纤维混凝土(SFRC)、连续配筋混凝土等形式。一般装配式空心板桥横截面如图 4-2 所示。由图可看出其结构形式:空心板上为 10cm 厚的现浇 CF40 钢纤维混凝土铺装层,最上层为 10cm 厚的沥青混凝土面层。

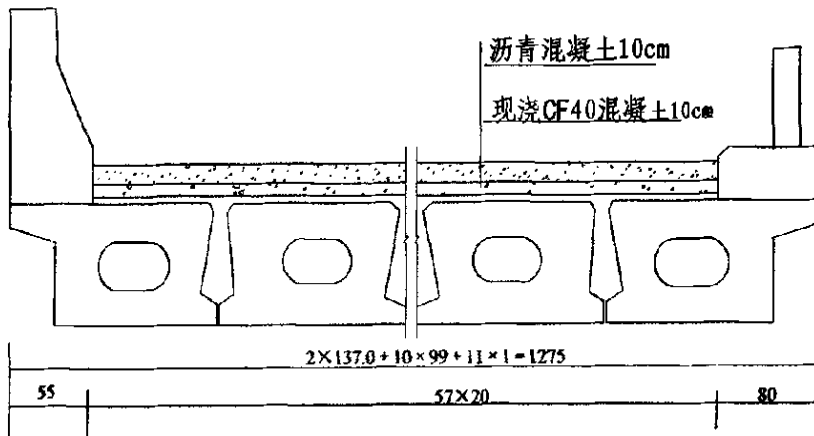


图 4-2 装配式空心板桥横截面图

钢筋混凝土桥面铺装厚度受到铺装层本身的耐用年限和主梁恒载两方面的制约,一般厚度宜在 8~12 cm。考虑超载、偏载和高应力疲劳等对桥面使用年限的影响,桥面钢筋混凝土铺装层的厚度一般应在 9~15 cm 之间,极限最薄厚度不得小于 9 cm。

橡胶混凝土应用于水泥混凝土桥面铺装层,应满足相应的强度要求。桥面铺装层中混凝土强度等级一般为 C30 或 C35。从试验结果可知,50-D-10 组、50-D-20 组、50-E-10 组的强度均超过 30 MPa,完全符合强度的要求。此外,橡胶混凝土强度虽然比基准混凝土小,但其韧性较好、变形能力较强,能明显减少破坏时出现的裂缝数量,改善其破坏形态,提高桥面的通行质量,很好地发挥桥面铺装层的功能。当然,桥面铺装层应具有较高的耐久性、较低的渗透性和较高的抵抗脱空或剥离等性能,而橡胶混凝土相关的性能尚待进一步研究。

### 4.3 本章小结

参考现有的试验结果,橡胶混凝土在路面面层或桥面铺装层等工程上的应用尚未形成全面的理论基础,但从配合比设计、施工工艺等方面改进,可以完全满足工程应用的要求。另外,橡胶混凝土工程应用的实际状况,尚需对实际工程的使用过程进行跟踪调查。

## 第五章 结论与展望

本文以 C35 和 C50 为基准混凝土,采用五种不同粒径的橡胶粒(块),以不同的掺量代替细(粗)骨料,制备橡胶混凝土试件,对其和易性、力学性能和容重等性能开展试验研究,探讨不同因素对其性能的影响。并以此为基础,对橡胶混凝土在水泥混凝土路面面层和桥面铺装层等工程应用进行了相应的探讨。

本文的主要结论有以下几点:

(1) 橡胶混凝土的坍落度受胶粒(块)形态、掺量和混凝土内部引入气泡数量等因素的影响,随掺量的增加总体上呈现下降的趋势,但在一定的掺量范围内存在反复变化的情况。

(2) 橡胶混凝土相同龄期下的抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、轴心抗压强度和弹性模量均随胶粒(块)掺量的增加整体上都呈现下降的趋势。其中橡胶混凝土胶粉组 28 天龄期抗压强度在掺量为 70% 时下降幅度最大,达到 84.1%。同时橡胶的掺入改善了橡胶混凝土在极限荷载下的破坏形态,其韧性和变形能力高于基准混凝土。

(3) 橡胶混凝土的容重随胶粒(块)掺量的增加呈现下降的趋势,下降幅度因胶粒(块)掺入后混凝土内部引入气泡数量不等而略有差异。其中橡胶混凝土胶粉组在掺量为 70% 时下降幅度最大,达到 19.35%;胶粒-1 组次之,掺量为 70% 降幅达到 17.2%。

(4) NaOH 溶液浸泡处理对橡胶混凝土强度的影响不大,但明显改善了橡胶混凝土在极限荷载下的破坏形态。

(5) 橡胶混凝土从配合比设计、施工工艺等方面进行改进,完全能满足水泥混凝土路面面层和桥面铺装层等工程应用的要求。

受诸多因素的影响,本文仅对橡胶混凝土材料性能进行了初步的试验研究,试验结论进一步完善了国内关于橡胶混凝土的研究成果。同时,关于橡胶混凝土的研究尚待深入和完善,其工程应用尚待开展,有待解决问题有以下几个方面:

(1) 试验研究方面:橡胶混凝土的耐久性(主要是抗冻性)尚待深入研究,其耐久性能直接影响橡胶混凝土在工程中的应用。

(2) 理论体系方面:建立橡胶混凝土的微观模型,对其力学性能和耐久性性能进行理论分析,从而在设计、施工工艺方面改善其性能,以便满足工程应用的要求。

(3) 工程应用方面:在水泥混凝土路面面层或桥面铺装层等工程中采用橡胶混凝土,对其实际使用状况进行跟踪调查,以便进一步改善其性能,最终大规模应用于实际工程。

## 参考文献

- [1] 邓海燕. 循环利用废旧轮胎的重点应放在国内[J]. 中国橡胶, 2005,21(4):3~4.
- [2] 夏云标. 我国废橡胶综合利用的市场分析和投资建议[J]. 橡胶科技市场, 2006,(3):8~9.
- [3] 翟跃. 中橡协会议纪要提出: 坚持禁止进口废旧轮胎集中全力解决我国近亿条废旧轮胎无害化问题[R]. 协会工作, 2005,21(4):3~5.
- [4] 张增力. 四部委联手推动废旧轮胎再利用[J]. 中国橡胶, 2005,21(16):10.
- [5] 郭廷杰. 借鉴国际经验促进我国废旧轮胎的再生利用[J]. 再生资源研究, 2005,(1):13~14.
- [6] 苏珊. 全球废旧轮胎再利用[J]. 生态经济, 2004,3:62~63.
- [7] 袁立. 橡胶的回收利用[J]. 橡胶的回收利用, 1998,1(1):29~36.
- [8] 范仁德. 橡胶的回收利用续[J]. 中国橡胶, 1995,16:30~32.
- [9] 刘一光. 2004年废橡胶综合利用产业回顾及展望[J]. 橡胶资源利用, 2005,2:21~24.
- [10] 李汉堂. 废轮胎的回收再利用[J]. 橡胶技术与装备, 1996,22(3):19~24.
- [11] 王京刚等. 废旧橡胶轮胎的处理与利用[J]. 中国粉体技术, 2001,7(3):41~44.
- [12] 刘增元. 技术创新和节能是废橡胶利用产业当前主要任务[J]. 橡胶科技市场, 2006,(5):10~14.
- [13] 李如林. 我国橡胶粉生产应用现状及发展[J]. 中国橡胶, 2000,15(375):14~18.
- [14] 曹卫东等. 废旧轮胎在道路工程中的应用综述[J]. 交通标准化, 2005,(6):78~82.
- [15] 刘增元. 国内外废橡胶资源利用趋势及胶粉的应用现状[J]. 再生资源研究, 2000,(5):15~20.
- [16] 刘玉强, 殷晓玲. 胶粉的生产方法[J]. 弹性体, 2001,11(3):40~43.
- [17] 罗玉祥. 利用废轮胎橡胶铺筑快速路试验段[J]. 天津建设科技, 2005,6:51.
- [18] 陈光量. 由废轮胎胶粉与混凝土组成的建筑材料[J]. 特种橡胶制品, 2006,16(6):50.
- [19] 朱涵. 新型弹性混凝土的研究综述[J]. 天津建设科技, 2004,(2):35~37.
- [20] Neil N. Eldin, Ahmed B. Senouci. Rubber-tire practices as concrete aggregate [J]. J. Mater. Civ. Eng., 1993, 5(4): 478~496.
- [21] I.B. Topcu. The properties of rubberized concrete [J]. Cem. Concr. Res., 1995, 25(2):304~310.
- [22] Hai Huynh, Dharmaraj Raghavan. Rubber particles from Recycled Tires in

- Cementitious Composite Materials [J]. 1996,5:1~19.
- [23] H. Huynh, D. Raghavan. Durability of simulated shredded rubber tire in highly alkaline environments [J]. *Advn. Cem. Bsa. Mat.*,1997, 6:138~143.
- [24] G. Goulias, A.H. Ali. Evaluation of rubber-filled concrete and correlation between destructive and nondestructive testing results [J]. *Cem. Concr. Aggreg.*, 1998, 20 (1): 140~144.
- [25] Z.K. Khatib, F.M. Bayomy. Rubberized Portland cement concrete [J]. *J. Mater. Civ. Eng.*, 1999, 11 (3): 206~213.
- [26] N. Segre, I. Joekes. Use of tire rubber particles as addition to cement paste [J]. *Cem. Concr. Res.*, 2000, 30 (9):1421~1425.
- [27] Nadia Segre. Paulo J. M. Monteiro. Garrison Sposito. Surface characterization of recycled tire rubber to be used in cement paste matrix [J]. *Colloid and Interface Science*, 2002, 248: 521~523.
- [28] Guoqiang Li, Gregory Garrick, John Eggers, Christopher Abadie, Michael A. Stubblefield, Su-Seng Pang. Waste tire fiber modified concrete [J]. *Composites: Part B*, 2004, 35: 305~312.
- [29] 宋少民等. 橡胶粉改性的高韧性混凝土研究[J]. *混凝土与水泥制品*,1997, (1):1011.
- [30] 孙家瑛等. 橡胶混凝土研制及物理力学性能研究[J]. *混凝土*, 2001,11(10):30~32.
- [31] 陈振富等. 橡胶混凝土小变形阻尼研究[J]. *噪声与振动控制*, 2004,6(3):32~34.
- [32] 熊杰等. 废橡胶混凝土抗压强度试验研究[J]. *混凝土*, 2004, (12):40~42.
- [33] 陈波等. 橡胶混凝土性能的初步研究[J]. *混凝土*, 2004, (12):37~39.
- [34] 袁琳. 橡胶集料钢筋混凝土梁受弯性能初探[J]. *混凝土*, 2005,6:70~76.
- [35] 张亚梅等. 浸-烘循环作用下橡胶水泥混凝土的性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2005,8(6):665~671.
- [36] 于利刚等. 废橡胶胶粉对砂浆混凝土性能的影响[J]. *广东建材*, 2006,2:9~11.
- [37] 欧行进, 朱涵. 橡胶集料混凝土氯离子渗透性试验研究[J]. *混凝土*, 2006,3:46~49.
- [38] 郭成举. *混凝土的物理和化学*[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004,3: 147.
- [39] 孙小兵. 废旧轮胎橡胶混凝土的材料性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006,5: 20~21.



## 致谢

回首三年研究生的学习，因自身的惰性和不思进取的心态，我在学业上未有小成，为人处事方面尚需多多历练。进步虽小，但我从老师、同学身上获益良多。

在此，首先感谢我的导师乐金朝教授！乐老师学识渊博、治学严谨，且为人随和、细心周到，在学习和生活上无微不至地关爱学生。研究生期间我未能与乐老师多沟通、多学习，现在想想，甚为遗憾！

感谢河南省道路检测工程技术研究中心的王复明教授、张蓓教授、陈运明教授、周振红教授、蔡老师等在学业上的指导！

感谢韩菊红教授、朱海堂教授在试验上给予的指导！

感谢师兄崔建伟、孙小兵、崔聚印，师姐王婷、朱秋菊、华淼颖，同窗张利军、潘名伟，师弟张昊、黄江华，师妹张琼、姜燕等人，他们或在学习、科研上给予我指导和帮助，或在生活上关心我！

感谢研一时的室友张云、耿建华、刘广亮、王振峰、弋明涛，研二研三时的室友贾洪涛、许法轩、潘名伟，他们或为我创造一个舒适的住宿环境，或为我提供了诸多的劳动机会！

感谢同学寇磊，当然还有潘名伟、许法轩、贾洪涛和张云，他们为我的研究生生活增添了许多快乐！

感谢张小旺、冯晋利、祝站东、张波、刘志远等同学，他们让我度过了一段美好的时光！

最后，感谢我的家人和滕旭，他们的默默支持和关心使我顺利完成学业！

致谢人：范国兵

2007年5月10日