

重庆市科技计划项目

新型柔性纤维混凝土薄层路面性能
及应用研究

研究报告

重庆北方高速公路有限公司

重庆交通学院

二〇〇四年二月

重庆市科技计划项目

新型柔性纤维混凝土薄层路面性能 及应用研究

研究报告

重庆北方高速公路有限公司

重庆交通学院

二〇〇四年二月

项目名称：新型柔性纤维混凝土薄层路面性能
及应用研究

任务来源：重庆市科学技术委员会

承担单位：重庆北方高速公路有限公司
重庆交通学院

项目负责人：

李祖伟 易志坚

主要研究人员：

钟宁 杨庆国 霍晓春 邓卫东 何兵 巫祖烈 蔺陵
马银华 郝祎 何琳 韩合轩 何小兵 陈舫亦 车承志
赵凤杰 侯伟 侯钦涛

目 录

第一章 绪论

1.1 项目的研究背景	1
1.2 纤维混凝土的概念	2
1.2.1 纤维混凝土的定义	2
1.2.2 纤维混凝土的种类	3
1.3 纤维混凝土的发展史	4
1.3.1 朴素的“纤维混凝土”思想	4
1.3.2 日趋兴起的“纤维热”	4
1.3.3 “柔性纤维混凝土”的发展阶段	5
1.4 柔性纤维混凝土的优良性能	6
1.4.1 柔性聚丙烯纤维的性能	6
1.4.2 柔性纤维混凝土材料性能研究	6
1.5 柔性纤维混凝土的工程应用现状	7
1.5.1 道路和桥梁工程	8
1.5.2 工业与民用建筑	9
1.5.3 水工建筑物的应用	10
1.5.4 喷射混凝土工程的应用	10
1.6 本项目的研究内容和工作	11
1.6.1 研究中存在的问题	11
1.6.2 本项目的研究内容和工作	11
1.6.3 本项目的研究前景	12

第二章 柔性纤维混凝土的增强及阻裂机理

2.1 柔性纤维的加入对水泥混凝土结构和性能的影响	13
2.1.1 普通水泥混凝土的微观缺陷和成因	13
2.1.2 柔性纤维在改善水泥混凝土微观结构方面的作用	14
2.2 基于断裂力学的柔性纤维阻裂增强机理	15
2.2.1 断裂过程及 K_I 的大小	16
2.2.2 纤维增强混凝土的抗疲劳机理	19

第三章 柔性纤维混凝土薄层路面结构形式

3.1 概述	21
3.2 水泥混凝土路面破坏过程分析	22
3.2.1 水泥混凝土路面结构的理想模型	22
3.2.2 过渡层的概念及其形成过程	22
3.2.3 过渡层破坏过程分析	23
3.2.4 常规强度理论和断裂力学理论对过渡层的不同认识	25
3.2.5 从疲劳的角度进一步阐述过渡层对混凝土面层破坏的影响	25
3.2.6 面层与基层互相作用引起的三种基本破坏形式及其影响	26
3.3 路面合理结构形式的确定	28

3.4 柔性纤维混凝土薄层路面的合理结构形式.....29

第四章 柔性纤维混凝土的物理力学性能试验及分析

4.1 柔性纤维混凝土的物理性质.....31

4.1.1 收缩.....31

4.1.2 温变.....34

4.2 柔性纤维混凝土的力学性能.....35

4.2.1 抗压强度.....36

4.2.2 抗折强度.....37

4.2.3 劈裂抗拉强度.....38

4.2.4 抗折疲劳性能.....39

4.2.5 冲击性能.....45

4.2.6 耐磨性能.....52

4.3 柔性纤维混凝土的变形性能及裂纹扩展.....52

4.3.1 柔性纤维混凝土的弹性模量.....52

4.3.2 柔性纤维混凝土破坏过程中的裂纹扩展.....55

4.4 路用柔性纤维混凝土的合理配比确定.....58

4.4.1 柔性纤维的选型.....58

4.4.2 柔性纤维掺量的确定.....59

4.4.3 柔性纤维混凝土的配合比和施工要点.....59

第五章 柔性纤维混凝土路面结构试验研究及计算分析

5.1 设置隔离层路面结构的试验研究.....61

5.1.1 前期研究及主要结论.....61

5.1.2 设置隔离层的柔性纤维混凝土路面结构试验.....61

5.1.3 试验结论.....64

5.2 设置隔离层路面结构的有限元计算分析.....65

5.2.1 隔离层路面结构有限元计算模型的建立.....65

5.2.2 设置隔离层的普通混凝土路面板计算及对比分析.....70

5.2.3 设置隔离层的柔性纤维混凝土路面板计算及对比分析.....72

5.2.4 计算分析得出的结论.....73

5.3 设置隔离层的柔性纤维混凝土路面结构的荷载应力和翘曲应力复合应力计算.....73

5.3.1 模型建立时的相关问题.....74

5.3.2 汽车荷载作用下的计算结果.....75

5.3.3 汽车荷载与温度荷载共同作用下的计算结果.....76

5.3.4 柔性纤维混凝土隔离层路面结构面板平面尺寸的确定.....77

5.3.5 柔性纤维混凝土薄层路面面板厚度的初步确定.....77

5.4 设置隔离层的柔性纤维混凝土路面设计方法.....78

5.4.1 设计步骤.....78

5.4.2 设计参数选取.....79

第六章 柔性纤维混凝土试验路情况及经济效益分析

6.1 工程概况.....81

6.1.1 渝合路路面工程概况.....81

6.1.2 试验路段选择	81
6.2 试验路方案	82
6.3 试验路修筑	83
6.3.1 试验路修筑	83
6.3.2 试验路施工技术总结	84
6.4 试验路跟踪观察	84
6.5 经济效益分析	85
6.5.1 新型柔性纤维混凝土薄层路面的经济性需要考虑的问题	85
6.5.2 柔性纤维混凝土薄层路面结构的经济效益分析	85

第七章 结束语	87
---------	----

主要参考文献	89
--------	----

第一章 绪论

1.1 项目的研究背景

近年来,随着我国市场经济的迅猛发展,人们日益认识到交通基础设施建设对发展经济的重要作用——要快速发展经济,必须首先突破交通基础设施的瓶颈。基于这种认识,高等级公路在我国得到了飞速的发展。

水泥混凝土路面是高等级公路的重要路面结构形式之一,在高等级公路建设中得到了广泛的应用。

传统的水泥混凝土路面是一种刚性路面,用混凝土材料修筑的路面具有强度高、耐久性好、成本低等特点。但是由于混凝土又是一种多孔性的脆性材料,其抗拉强度远远低于抗压强度,韧性差,对冲击、开裂、疲劳的抵抗能力差;且由于裂纹的存在使水的渗入成为可能,从而引起基层、路基破坏。长期以来人们从原材料、配合比、外加剂、制造工艺、浇捣方法和养护工艺等方面对其进行了研究和改进,取得了很大成果,但是这些方法并未从根本上改变混凝土的性能弱点。正因为如此,水泥混凝土路面在使用过程中常常出现这样那样的问题、使用效果常常不能令人满意。

70 年代,纤维增强水泥基复合材料发展了起来,人们发现:钢纤维、玻璃纤维、合成纤维等纤维材料应用于水泥混凝土中,可以多方面地改善混凝土的性能^{[1]~[32]}。

根据纤维的弹性模量,纤维分为刚性纤维(纤维的弹性模量约为混凝土弹性模量的 10 倍)和柔性纤维(纤维的弹性模量约为混凝土弹性模量的 1/10)两种。

目前对于以钢纤维为代表的刚性纤维加入混凝土形成的钢纤维混凝土的研究工作进行得较多,取得了许多研究成果。国内在道路工程中用得比较成功的是钢纤维混凝土,国外在 90 年代初以前也主要将钢纤维混凝土应用于道路工程。钢纤维混凝土和普通混凝土相比具有较高的开裂荷载和极限承载力,具有优良的抗收缩、抗开裂能力。然而钢纤维混凝土中的钢纤维必须达到一定的体积掺量(比如:体积率的 1%,每立方米混凝土需要钢纤维约 78 公斤),才能使钢纤维混凝土的性能发生明显的改变,因此钢纤维混凝土的造价相对较高;另一方面,钢纤维混凝土在施工中不易拌和、振捣困难,阻碍了钢纤维混凝土的进一步推广运用。由于钢纤维混凝土昂贵的价格和施工困难使其在道路工程的应用中极大地受到限制^[3]。

随着化工技术的发展,人造低弹模高强纤维的出现使人们开始了对柔性纤维混凝土的探索。将以聚丙烯纤维为代表的柔性纤维加入混凝土中后,只要很小的

体积掺量(0.05%，每立方米混凝土需要柔性纤维约为0.455公斤)，柔性纤维混凝土就会产生明显的抗收缩和抗裂效果，柔性纤维混凝土在低掺量的情况下具有优良的抗冲击、耐疲劳性能。柔性纤维混凝土性能优良、造价较低，施工方便，是一种良好的建筑材料，尤适用于承受反复荷载的道路及铺面工程的修建。

柔性纤维混凝土在国外的道路工程中运用十分普遍，其中运用柔性纤维混凝土修筑的白色超薄路面(UWP)的厚度仅有5-7cm，使用效果良好。然而在国内柔性纤维混凝土的应用才刚刚起步，只有一些分散的、零星的工程运用^{[1]~[20]}。

形成这种局面的原因主要是：一、柔性纤维混凝土的阻裂机理长期以来未能得到明晰的揭示，阻碍了其进一步应用；二、缺乏有组织的专项工程研究，使得既有的应用仅表现为一种经验，而不能形成专项工程的设计、应用理论。

基于这种情况，本项目主要围绕柔性纤维混凝土在道路工程中的运用，研究柔性纤维混凝土的阻裂机理；研究柔性纤维混凝土的物理力学性能；分析路面破坏过程；研究柔性纤维混凝土路面的典型结构形式和工程应用，最终形成系统的柔性纤维混凝土薄层路面结构的设计、应用理论。

薄层柔性纤维混凝土路面具有卓越的抗裂性耐久性，取材容易，施工方便，成本低廉，在西部大开发及高等级公路大量兴建的时代背景下，及时进行柔性纤维混凝土路面材料及结构性能的研究和应用研究，不仅能增强地域科技优势和竞争能力，而且具有显著的技术、经济和社会效益，具有广阔的应用前景。这即是本项目研究的背景。

1.2 纤维混凝土的概念^{[1]~[20]}

1.2.1 纤维混凝土的定义

纤维混凝土，是纤维增强混凝土的简称，通常是指以水泥净浆、砂浆或者混凝土为基体，以非连续的短纤维或者连续的长纤维作增强材料所组成的水泥基复合材料。

纤维混凝土是一种复合材料。复合材料是指由若干种不同材料组合而成的，可最大限度发挥出各种材料独自特性并赋予整体单一材料所不具备的优良特性的材料。混凝土本身就是复合材料，而纤维混凝土只不过是在混凝土的各种原有组分中增加了一种组分而已。在普通混凝土中掺入纤维体现了复合材料设计的思想，既保留了混凝土原有的高抗压性的特点，又能大大增加其抗裂性能、韧性及抗渗性，使之更能符合新型建筑材料的要求。中国工程院院士吴中伟教授认为，

复合化是水泥基材料高性能化的主要途径,纤维增强是其核心。复合化的技术思路——超叠加效应,对材料高性能化有重要意义,可用公式 $1+1>2$ 表示。

1.2.2 纤维混凝土的种类

根据纤维弹性模量的高低可将纤维混凝土分为高弹模纤维(刚性纤维)混凝土和低弹模纤维(柔性纤维)混凝土。高弹模纤维,如钢纤维、玻璃纤维、碳纤维等,能够显著提高混凝土的抗拉、抗压以及刚性等多方面性能;而低弹模纤维,如机纤维、尼龙、聚丙烯、聚乙烯等,在提高混凝土基本的物理力学性能的同时,增强了混凝土的韧性、抗冲击性能、抗热爆性能等与韧性有关的物理性能。这两类纤维混凝土常常被应用于不同的场合。

1、钢纤维混凝土^[9]

钢纤维是发展最早的一种纤维。早在 1910 年美国 Poeter 就提出了把钢纤维均匀地撒入混凝土中以强化材料的设想,1963 年美国 Ramualdi 等发表了一系列研究成果从理论上阐述了钢纤维对混凝土的增强机理。我国对钢纤维的应用研究相对于其他几种纤维比较早。赵国藩等人最近出版的《钢纤维混凝土结构》中,对组成材料与工艺特性、基本性能、结构强度计算、抗剪承载力计算、复杂应力下钢纤维混凝土的性能和计算、正常使用极限状态验算方法以及其应用施工等内容都作了较完整的说明。

2、玻璃纤维混凝土

尽管玻璃纤维已用于铺设混凝土路面,但是对玻璃纤维混凝土的物理性能研究得较少,这是因为玻璃纤维混凝土在使用中也暴露出很大的缺点,即玻璃纤维混凝土暴露于大气中一段时间以后,其强度和韧性会有大幅度下降,即由早期的高强度、高韧性向普通混凝土退化,加之其耐碱性不过关,现多应用于结构加固。

3、碳纤维混凝土

碳纤维是 20 世纪 80 年代开发研制的一种高性能纤维,具有抗拉强度和弹性模量很高、化学性质稳定、与混凝土粘结良好的优点。但由于碳纤维生产成本较高,价格昂贵,因此应用受到了较大的限制。同济大学纤维混凝土应用研究所曾对碳纤维增强混凝土的机理、基本力学性能、碳纤维增强混凝土框架节点的抗震性能以及碳纤维增强混凝土的生产工艺等诸方面进行比较系统的研究。

4、合成纤维混凝土

合成的聚合纤维来源于有机聚合物,在波特兰水泥混凝土中进行过试验并使用的聚合纤维有聚丙烯、尼龙(酷胶纤维)、聚酯和聚乙烯等。尼龙、聚乙烯、聚丙烯纤维的弹性模量均较低,均属于柔性纤维,即低弹模纤维,其加入混凝土后的研究主要集中于对混凝土改性方面。

1.3 纤维混凝土的发展史^{[4][6][10][17]}

1.3.1 朴素的“纤维混凝土”思想

混凝土或砂浆中的纤维增强原理,在世界各国建筑业中早有应用,因此在混凝土中掺加纤维以便改善其性能的想法甚至早于水泥混凝土的问世。可以这样说,自从水泥来到人间,人类开始采用水泥混凝土作为建筑材料的时候开始,就在探索试验向其中掺入各种各样的纤维。在民间,老百姓用黄土白灰拌合起来抹墙砌砖时就有掺入“麻刀”的做法。麻刀是典型的植物纤维。除了麻刀,还有稻草、猪鬃、头发、纸屑、棉絮,几乎所有的纤维都曾经被用作增强建筑材料的试验品。我国许多农村地区建造的房屋,在泥巴当中掺入稻草,使泥巴这种强度很低的材料增加了韧性。

1.3.2 日趋兴起的“纤维热”

20 世纪 50 年代以来,世界上许多工业发达国家关于纤维混凝土的研究取得了明显的成就,其中包括:钢纤维混凝土、玻璃纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土和碳纤维混凝土等。

从 70 年代起,美国等发达国家便已开始了把纤维混凝土应用于道路工程的研究,到了 80 年代,纤维混凝土已应用于新建道路、旧路改造或桥面铺装的罩面层。受到钢筋混凝土的启发,人们最早期是主要是钢纤维增强混凝土应用于道路工程。1849 年,法国花匠莫尼尔(1823~1906)在水泥中加入细铁丝网制成花盆和种桔树用的铁丝水泥桶。1855 年法国工程师用细铁条增强水泥,制成一艘水泥船并获得专利。1910 年美国波特(Porter)把薄钢片掺入混凝土中改善混凝土的抗拉强度和抗冲击性并获得专利。这些都是钢纤维混凝土的早期应用。而我国从上世纪 70 年代末也开始引入纤维混凝土,到了 80 年代末 90 年代初,逐渐掀起了一股纤维混凝土研究热。目前,国内已进行了不少薄层纤维混凝土路面材料及结构的性能研究和应用研究,取得了不少成果。

但是,国内在道路工程中用得比较成功的是钢纤维混凝土,国外在 90 年代初以前也主要将钢纤维混凝土应用于道路工程。钢纤维混凝土是一种优良的路用混凝土复合材料,即使厚度减薄 $1/3$ 至 $1/2$,钢纤维混凝土薄层路面综合性能往往仍优于普通混凝土路面。但是,钢纤维混凝土在应用时必须保证其钢纤维的高掺量,通常应用于道路工程的钢纤维体积掺量往往在 1% 以上, 1m^3 钢纤维混凝土中钢纤维的材料成本往往高于混凝土本身的成本。钢纤维混凝土昂贵的价格极大地限制了其在道路工程中的应用,因此,无论国内还是国外,钢纤维混凝土在道路工程中的推广应用均受到了极大的限制。

1.3.3 “柔性纤维混凝土”的发展阶段

随着化工技术的发展,人造低弹模高强纤维的出现使人们开始了对柔性纤维混凝土的探索。20 世纪 60 年代中期 Goldfein 研究用合成纤维作水泥砂浆增强材的可能性,发现尼龙、聚丙烯与聚乙烯等纤维有助于提高砂浆的抗冲击性。Zollo 等的实验结果表明,若在混凝土中掺加体积率为 0.1%~0.3%的聚丙烯纤维时,可使混凝土的塑性收缩减少 12%~25%^{[10] [13]}。

20 世纪 70 年代初美、英等国已开始将聚丙烯单丝纤维用于某些混凝土制品与工程中,所用纤维的直径与钢纤维相近(0.22~0.25mm)纤维的体积率为 0.5%左右。20 世纪 70 年代中期美国开发成功聚丙烯膜裂纤维(fibrillated polypropylene fiber),这是一种直径为 2mm 以上的束状纤维,在与混凝土拌合过程中可分裂成为若干细纤维束,且束内纤维展开成为相互牵连的网络,其中单丝直径为 48~62 μm ,使用此种纤维不仅有助于降低单丝的直径,并且还可使纤维体积率减少至 0.1%~0.2%。近十几年来,美国与加拿大已在混凝土工程中广泛使用加有低掺率合成纤维(聚丙烯单丝、聚丙烯膜裂纤维与尼龙纤维等)的预拌混凝土。目前美国所用混凝土总量中合成纤维混凝土约占 7%,而钢纤维混凝土只占 3%左右的。

随着纤维混凝土在中国的应用推广,建筑材料理论界也在国外学术界研究成果的基础上开始关注并研究相关的理论问题。例如:中国建筑材料科学研究院沈荣熹研究了低掺率合成纤维在混凝土中的作用机制,归纳总结了合成纤维作为混凝土增强材的特点,明确指出低掺率合成纤维在混凝土中具有阻裂作用和增韧作用^[12]。大连理工大学戴建国、黄承逵、赵国藩研究了低弹性模量纤维混凝土的剩余弯曲强度问题,给出了可用于计算低弹性模量纤维混凝土构件抗弯承载力的指标和计算方法,同时说明聚丙烯纤维在工程中不但可以作为非结构性补强材料来防止塑性收缩裂缝,而且可以作为结构性补强材料用于增强构件的抗弯承载力,改善结构延性^[11]。

关于纤维混凝土的理论研究表明,纤维对混凝土综合性能改善的主要贡献很可能不是增加强度而是抗裂增韧,那种不加区分地一味强调纤维对混凝土强度指标改善效果的观点可能会把纤维混凝土的应用推广引人歧途。本项目也从力学角度详细解释了纤维增强混凝土的阻裂增韧机理,说明了柔性纤维混凝土应用于道路工程具有广阔的前景。

1.4 柔性纤维混凝土的优良性能

1.4.1 柔性聚丙烯纤维的性能^{[1][6][10]}

柔性聚丙烯纤维是由丙烯聚合物或共聚物制成的烯泾类纤维。根据其生产过程可以分为两种。聚丙烯在熔融状态下挤压成薄片（flat sheet）或进行抽取成为长丝（filament），在经过牵伸使纤维分子定向。前者经过破碎、切断成为原纤维（fibrillated fiber），其断面一般为不规则、近似矩形，纤维之间互相关联或成束状；后者则切断后成为圆形断面的复丝或单丝纤维。

然而并非所有的聚丙烯纤维都适合作为柔性纤维混凝土材料的。因为纤维的选择往往是柔性纤维混凝土成败的关键！纤维混凝土发展的历史，其实就是人类寻找和发现能够适应混凝土高碱性环境，又能在混凝土中均匀分散的纤维的历史。

可供采纳的柔性聚丙烯材料必须具备的优点是：

①具有较高的抗拉强度 与水泥基体相比至少高出两个数量级。

②具有较高的变形能力 既其受拉时的极限伸长率与水泥基体的极限伸长率相比，至少高出一个数量级，只有这样，纤维加入混凝土中才有利于复合体韧性与抗冲击能力的提高。

③高耐碱性 纤维混凝土所用的纤维必须具有足够的耐碱性，不受混凝土中碱集料和水泥碱性水产物化物的侵蚀。具有化学稳定性，只有如此，才能保证纤维以纯物理的方式在混凝土中发挥作用，避免因物料之间交叉的化学反应使得纤维混凝土体内发生不良变化。

④优良的自分散性 纤维混凝土中所使用的纤维，在水泥基体中必须具有优良的自分散性，既不结团，不成束。只有这样才能在实际的工程中使纤维混凝土的效果达到令人满意的程度。

⑤较好的粘结强度

目前国际上比较流行的是美国的杜拉纤维（Durafiber），但由于进口的纤维价格不菲，限制了它的使用范围，使这一技术得不到长足发展。近几年我国已经研制出改性聚丙烯纤维，其价格只相当于进口纤维价格的 1/2~1/3，而物理力学性能完全可以和进口纤维媲美。

1.4.2 柔性纤维混凝土材料性能研究^[8]

柔性纤维掺入于混凝土中可以起到以下几个方面的作用；

①保证混凝土的均质性：通常混凝土在浇灌后会发生离析现象，即比重较大的骨料下沉与水泥砂浆有所分离，同时混凝土表面出现析水，因而降低了混凝土的均质性，使混凝土上、下部位的性能存在一定的差异，严重时还会使混凝土出

现裂缝（即所谓“沉降裂缝”）。当在混凝土中掺加适量柔性纤维后，均匀分布于混凝土中的纤维可以起到承托作用，阻止上述离析现象的发生，从而保证混凝土的均质性。

②减少混凝土的收缩裂缝，提高混凝土的抗渗性与耐久性：混凝土在浇灌后的 24 小时内，若其表面暴露于大气中，因为气候干燥或刮风等原因会使混凝土表面失水较多，从而发生塑性收缩并出现裂缝；混凝土在硬化后，如果周围环境湿度较低，则会因为失水而引起干燥收缩并出现干缩裂缝。在上述两种情况下混凝土之所以会出现裂缝，主要是由于混凝土内部因为收缩而出现局部的拉应变，当拉应变超过其极限应变值时，裂缝就会不可避免地产生。众所周知，混凝土的极限拉伸率相当低，一般仅为 0.01-0.02%，而柔性纤维的极限拉伸率则可高达 15-18%。这样，当有大量的单丝纤维均匀地分布于混凝土当中时，即可承受因混凝土收缩而产生的拉应变，延缓或阻止混凝土出现裂缝。由于柔性纤维在混凝土内分布均匀，产生显著的阻裂效应，所以能提高混凝土的抗渗性、耐蚀性与抗冻性。

③降低混凝土的脆性，使其变形及韧性明显改善：柔性纤维混凝土故在动荷载与冲击荷载作用下可吸收能量，从而提高了混凝土的变形能力，并相应地降低了混凝土的脆性。这由掺有柔性纤维的混凝土在受弯时韧性的提高可以得到佐证。混凝土的脆性是其与生俱来的弱点，降低混凝土脆性具有十分重要的工程价值。

④提高混凝土的耐火性、耐水性和耐腐蚀性：高强混凝土具有相当高的密实度，在火焰中因混凝土内部的自由水与分解的化学水所形成的水汽难于溢出，而常导致混凝土构件的爆裂。当混凝土内含有大量均匀分布的柔性纤维单丝时，在火焰中因纤维的熔化（其熔点为 165℃）而形成水汽可由混凝土内部溢出的通道，防止构件在火灾中发生爆裂。同时，柔性纤维掺入混凝土中，对于防止和延缓渗水、潮湿气体和氯化物等有害介质对混凝土的侵蚀和受力钢筋的防锈蚀起了良好的作用，可延长建筑物的使用寿命。

⑤其他方面性能的提高：柔性纤维的掺入，不仅使得混凝土抗拉、抗压、抗劈裂、抗弯曲等强度指标有一定提高，并且在其他性能包括纤维混凝土抗冻融性能的提高；增强混凝土的耐磨损性能、抗碎裂性能等方面都有显著作用。

总的研究表明：纤维在混凝土进入塑性阶段能有效减小收缩，抑制裂缝，在硬化后期能在一定程度上抑制干缩裂缝，使裂缝变细。此外，纤维混凝土的变形特性和韧性、极限拉伸率、抗破碎性、抗冲击力、抗磨损能力、抗渗、抗冻融性都高于普通混凝土。大量的实验研究和工程实践表明，纤维混凝土在技术性能上明显优于普通混凝土，可以明显提高混凝土的变形能力和耐久性，并且所需要增

加的费用不多, 具有较高的性价比, 值得在实际工程中采用。

1.5 柔性纤维混凝土的工程应用现状^{[3][4][13]}

1.5.1 道路和桥梁工程

1、路面及桥面铺装中的应用

实践证明, 柔性纤维对于改善混凝土路面性能有明显作用, 目前已经有过一些具体的工程运用。

1996 年底正式在中国开始进行推广应用。首先成功应用于广州东环高速公路, 主要用于解决收费站无磁路面抗裂、耐磨、抗冲击的要求。该路段由于下面埋设自动测试磁性感应线圈, 不能铺设钢筋网, 不能采用钢纤维, 同时路面厚度受到限制。基于数年前广佛高速公路试用经验建立的信心, 大胆采用了每立方米 C50 混凝土掺加 0.9 公斤柔性纤维、路面厚度为 33cm 的方案。在解决工程难题的同时, 还因省去一层钢丝网而减少了材料及施工成本。收费站建成投入后使用近两年多来, 广州高速公路繁忙的车流未对路面造成明显的损坏, 有关方面给予了充分的肯定, 并决定将该技术应用于广州西环、南环收费站工程。此后, 在纤维混凝土国际会议示范工程——广东南海鲁岗大桥、重庆嘉陵江高家花园大桥桥面及引桥路面、福建厦门保税区象屿码头海港软基层路面、建设部示范小区湖北武汉南湖花园小区主干道、广东省交通厅难题工程肇庆西江大桥桥面维修工程、广州北环高速公路维护工程、广州白云国际机场波音 777 大型机库停机坪等大量桥面铺装层、软基路面等要求较高抗裂、抗冲击性能的路桥工程和其它工程中, 柔性纤维都相继得到了应用。

具有显著阻裂效应的聚丙烯纤维用于路面、桥面等易开裂的薄板混凝土结构, 但其作用并不仅局限于抑制混凝土塑性开裂。当混凝土板表面的宏观塑性裂缝和尺度大幅下降后, 路面、桥面混凝土的整体性将有显著提高, 抵抗动荷载的能力也将显著增强。可以说, 聚丙烯纤维阻裂效应对混凝土性能的改善作用最终体现在通过提高混凝土材料介质的连续性、整体性使路面、桥面混凝土的综合性能得以改善^{[9][18]}。

2、半刚性路面基层材料的应用

纤维加固土作为路面基层材料可以明显提高抗弯拉强度和抗弯拉模量, 对于减少半刚性路面基层的裂缝, 提高抗裂性具有良好的效果, 已有较长的应用历史。1992 年在湖南常德境内 207 国道高等级公路上, 修建了纤维加固土基层沥青路

面推广实验路段,对实验路段测定结果表明,纤维加固土基层沥青路面从开放交通开始仅3个月时间内,整体结构的弯沉值减小一倍,抗压弹模值增长一倍,表明纤维加固土基层板体性形成很快,强度提高很明显。

1.5.2 工业与民用建筑

柔性纤维用于混凝土工程始于20世纪70年代后期,美国、加拿大最先采用,并迅速推广至墨西哥、澳大利亚、日本、韩国以及东南亚若干国家与地区。由于纤维原料来源广泛,生产工艺成熟,使用效果较好,并且价格较低,故获得广泛应用。我国于20世纪90年代初期在广州至佛山的混凝土路面高速公路的部分地段试用了柔性纤维,20世纪90年代中期后即已在大量土木与建筑工程中使用。

1、结构刚性自防水

采用柔性纤维混凝土实现刚性自防水,通常用于浇筑地下室底板、侧墙、顶板以及屋面、水池、化污池、游泳池和渡槽等抗裂自防水混凝土。

广州新中国大厦,面积8000多平方米、平均厚度超过600mm的地下底板的施工,采用柔性纤维增强C60混凝土的方案,在结构自防水效果方面,现场实际情况表明,整个大面积底板未发现明显裂缝,完全达到了设计要求。有关方面认为,这种纤维增强混凝土的抗渗性并能提高混凝土表面的坚韧度和抗冲击能力,比之以前较常用的钢网更经济、更有效。广州另一座50层高的大厦—中水广场大厦,每层地下室面积4500平方米,平均厚度800mm的四层地下室的底板、侧墙、楼板等大量采用C40柔性纤维改性混凝土。地下室完工后,极少发现明显裂缝及渗漏,取得了良好的效果。在广州棠下安居工程8000平方米的地下室(底板厚30cm, C35混凝土)、西安市南大街地下商业街、重庆市重点项目重庆世界贸易中心地下停车场地坪工程和朝天门广场17000平方米观景平台工程等众多工程中都取得了成功应用。

2、抗裂防渗砂浆及素浆

柔性纤维砂浆主要用作空心砌块、轻质砖、加气混凝土等新型墙体材料砌筑的建筑物外墙的抹灰砂浆,解决裂、渗、漏等弊端,也用于内墙抹灰、厨卫卫浴墙面抹灰、修补墙面裂缝、填补窗框与墙体间的空腔等。此类用途的使用范围已经覆盖全国20多个省、市、自治区的众多工程,其中包括著名的北京望京新城住宅区、回龙观住宅区等国家重点住宅建设项目。在冶金工业建设系统,有应用柔性纤维水泥素浆制作薄壳结构的实例,主要解决以往薄壳结构水泥面层开裂、破碎等问题。由于壳体比较薄,每立方米砂浆/素浆的成壳面积较大,分摊以后每 $1m^2$ 柔性纤维砂浆/素浆掺用柔性纤维所增加的成本极为有限,技术经济效果十分显著。

3、大体积混凝土结构:

特别值得一提的是杜拉纤维在重庆地区的应用。重庆地区由于工程用砂为特

细砂,混凝土的收缩更大,长期以来对抗裂就有更突出的要求。1998年6月,西南第一高楼—重庆世界贸易中心工程中,其特大型转换层大梁(1500×4000mm,15跨)的大体C60混凝土面临如何防止收缩裂纹及增强韧性的严峻问题。经慎重考虑,他们采用了柔性纤维来改善高性能C60混凝土,严密设计,严格施工,取得了满意的效果,为特细砂混凝土的抗裂摸索了一条有效途径。

另外,此类工程的典型实例包括:广州天河名门大厦的三层停车场面层;新疆某机场停机坪工程;广州天河体育中心、岭南会馆与东方宾馆的10多个地面与屋面网球场等。

此外,也有为数不少的生产厂家将一定量的柔性纤维掺入建筑用胶、嵌缝腻子粉当中作为填充性的微骨架材料,既能减少塌缩,又有一定的抗裂作用,效果很好。

1.5.3 水工建筑物的应用^{[14][20]}

柔性纤维网混凝土目前得到最广泛应用的主要是面支承平板结构,作为非受力的次要增强筋。美国普林斯顿ACE硬件销售中心地板面积达到一百万平方英尺,采用了聚丙烯纤维网混凝土。采用纤维混凝土即能抑制混凝土的塑性龟裂,又提高了抗渗性能,对薄壁结构尤为适宜。湛江码头作业区,在厚20cm混凝土的表层5cm掺入聚丙烯纤维,有效地提高了抗冲击和耐磨损能力。

1999年上海市闵行污水处理厂进行老厂技术改造,新建污水池池高8米,周长200多米,不设沉降缝,由上海市政设计院设计,采用C23S8混凝土,上海东平建筑安装公司施工。为防止开裂,实际要求用膨胀水泥,商品混凝土供应商——上海嘉环混凝土有限公司鉴于以往经验,估计用膨胀水泥仍会开裂,力争要求用聚丙烯纤维混凝土代替。最后共用纤维混凝土3000多立方,浇后情况很好,整个污水池未发现一条裂缝,各方均非常满意,在此后的设计中,该设计院也主动提出要求采用聚丙烯纤维混凝土。

1.5.4 喷射混凝土工程的应用

聚丙烯混凝土有较高的粘稠性,易于施工,用于喷射混凝土极为适宜,纤维混凝土与普通喷射混凝土比较,能显著减少回弹损失,提高生产能力,降低总成本,并能防止产生裂纹。可用于隧道的喷锚支护,护坡工程,水处理的各種水池及筒仓结构的预应力绕丝喷浆护面等。

例如,香港新隧道工程出于环保、电力和商业要求,用聚丙烯纤维取代钢纤维,喷射混凝土厚度75mm,效果非常好。菲律宾的某隧道改用聚丙烯纤维混凝土加固洞门仰坡和作洞内初期支护,都很成功。

1.6 目前研究中存在的问题及本项目的主要研究工作

1.6.1 研究中存在的问题

从国内柔性纤维混凝土的研究和应用情况可以看出,柔性纤维混凝土虽然在很多方面有了一些工程运用和研究,但是也存在着一些问题:

1、基础研究明显滞后,柔性纤维混凝土的阻裂、疲劳等机理未得到进一步的揭示,阻碍了柔性纤维混凝土的进一步应用;

2、柔性纤维混凝土的研究至今大都围绕混凝土材料改性进行,仅有一些关于柔性纤维混凝土材料性质的结论,未能充分认识柔性纤维混凝土材料优良的物理力学性能及其工程应用的潜力。

3、针对柔性纤维混凝土的应用研究往往停留在工程运用经验的总结,缺乏针对专项工程,诸如混凝土结构、大体积混凝土、道路工程等的专门、系统、深入研究,未形成相关的理论和方法,未能充分显示出新材料应有的技术经济效益。

以上问题的存在制约了柔性纤维混凝土这种性能优良的材料在工程中的推广和应用。

在道路工程中的运用亦是如此。

1.6.2 本项目的主要研究内容和工作

基于以上情况,本项目的研究是在研究柔性纤维混凝土阻裂机理和性能的基础上,针对柔性纤维混凝土在道路工程中的应用展开的,旨在得出适宜于柔性纤维混凝土的路面新结构和其设计计算方法,为柔性纤维混凝土在路面中的应用提供理论基础。

具体地,项目的主要研究内容和工作有:

1、运用断裂力学,从理论上揭示了柔性纤维混凝土材料全新的增强及阻裂机理。

2、通过实验室大量的试验研究,研究了柔性纤维混凝土材料的力学性能,进行抗压强度、劈裂强度、抗折强度,抗折疲劳强度实验,收缩、温度、耐磨、冲击性能实验;进行了抗压弹模、抗折弹模和高应力下柔性纤维混凝土的裂纹稳定扩展试验。找出了路用柔性纤维混凝土满足使用性能及经济指标的最佳配合比。

3、用破坏力学原理分析混凝土路面结构的破坏过程,提出了柔性纤维混凝土薄层路面结构的典型结构形式。

4、模拟路面实际情况进行了大量的柔性纤维混凝土薄层路面的结构实验,并在此基础上对柔性纤维混凝土薄层路面结构进行了计算分析,得出了柔性纤维混凝土薄层路面结构的设计和计算方法。

5、修筑了柔性纤维混凝土薄层路面试验路,并对其进行了现场观察,在此