

纤维加固土路面 基层的研究与应用

陈 晔 张起森 编著



人民交通出版社

Xianwei Jiagutu Lumian Jicengde
Yanjiu yu Yingyong

纤维加固土路面基层的
研究与应用

人民交通出版社

纤维加固土路面基层的研究与应用

陈 晔 张起森 编著

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

北京云浩印制厂印刷

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 印张: 6.25 插页: 2 字数: 145 千

1995 年 9 月 第 1 版

1995 年 9 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001—2400 册 定价: 12.50 元

ISBN 7-114-02166-6

U · 01481

内 容 提 要

本书较系统地介绍了纤维加固土技术的基本知识,集中反映了 80 年代末 90 年代初该领域的最新研究成果。全书共十一章,包括总论、纤维半刚性基层材料物理力学性能、抗温度收缩性能、抗干燥收缩性能、抗温度和干燥混合收缩性能,纤维土材料的收缩性能与力学性能的关系以及抗裂设计研究,收缩性能实验方法和纤维土材料温度收缩机理和干燥收缩机理的理论等内容。同时,还介绍了纤维半刚性材料基层沥青路面的施工方法、工程实例、实用效果及工程经济效益分析。

本书可供土木工程技术人员与科研工作者使用,亦可作为高等院校教学参考书。

前 言

60年代以来,岩土工程中的重要新进展之一就是加筋土技术的广泛采用。尤其是近20年来,土工合成材料的大量涌现,更将这个新发展推向了“岩土工程领域革命”的高潮。纤维加固土技术正是加筋土技术深入发展的结果。目前,纤维加固土技术应用广泛,由于其力学性能好、造价低廉、施工简便,因此,颇受工程界的欢迎;国内外工程界都在不同程度地积极研究和推广应用这项新技术。然而,目前国内尚无一本全面系统地反映纤维加固土技术方面的专著,本书的目的就是试图填补这一空白。本书在综合国内外纤维加固土技术的基础上,系统地介绍了纤维加固土的原理、收缩特性、力学性能与试验,以及工程设计,集中反映了80年代末90年代初的最新研究成果,取材于科研和生产实践,并列举了工程实例。但由于作者水平和能力有限,漏误、不妥之处,敬请读者批评指正。

编 著 者

1994年8月于长沙

1994.8.10

目 录

第一章 总论	1
第一节 纤维加固土路面基层研究与应用的必要性	1
第二节 国内外纤维土技术研究动态与应用	2
第二章 纤维半刚性基层材料物理力学性能分析	10
第一节 试验材料的选取	10
第二节 原材料的性质分析	11
第三节 纤维土材料的物理力学性能	16
第四节 纤维土材料的纤维掺量(r)、纤维长度(L) 与强度的关系	17
第五节 纤维土材料的强度和刚度与龄期的关系	30
第六节 纤维土材料强度形成原理分析	34
第七节 结论	37
第三章 纤维半刚性基层材料抗温度收缩性能分析	39
第一节 纤维土材料温度收缩性质与龄期的关系	39
第二节 纤维土材料温度收缩性质与纤维掺量、纤维 长度的关系	47
第三节 干湿状态对纤维土材料温度收缩性质的 影响	52
第四节 结论	67
第四章 纤维半刚性基层材料抗干燥收缩性能分析	69
第一节 纤维土材料及相应的半刚性材料干燥收缩	

性能随含水量的变化规律	69
第二节 纤维土材料及相应半刚性材料的干燥收缩 性能与龄期的变化规律	77
第三节 纤维土材料的干燥收缩性能与纤维掺量、 纤维长度的关系	81
第四节 结论	84
第五章 纤维半刚性基层材料的温度和干燥混合收缩 性能分析	86
第一节 纤维土材料的温度和干燥混合收缩试验	86
第二节 纤维土材料混合收缩规律性分析	91
第三节 混合收缩与非混合收缩的比较分析	94
第六章 纤维半刚性基层材料的收缩性能与力学性能 关系的研究	96
第一节 纤维土材料及相应半刚性材料的干燥收缩 性能与材料力学性能指标的关系	96
第二节 纤维土材料及相应半刚性材料 $\varepsilon_m / \alpha_d $ 与材料的力学性能指标 (R_c 、 S 、 E_s) 之间 关系	109
第三节 纤维土材料及相应半刚性材料的温度收缩 性能与材料力学指标关系	112
第四节 纤维土材料及相应半刚性材料的 $\varepsilon_m / \alpha_t $ 与材料力学指标 (S 、 E_s) 之间的关系	118
第五节 结论	120
第七章 纤维半刚性基层材料的抗裂设计研究	122
第一节 纤维土材料抗裂设计的基本思想和基本 要求	122
第二节 纤维土材料抗收缩开裂最佳配合比设计	128

第三节	结论与建议	137
第八章	纤维土基层材料收缩性能实验方法探讨	138
第一节	纤维土材料及相应半刚性材料的温度收缩 实验方法	139
第二节	纤维土材料及相应半刚性材料的干燥收缩 实验方法	143
第九章	纤维半刚性基层材料温度收缩机理理论 分析	146
第一节	纤维土材料的固相复合材料的热胀缩性	147
第二节	水对纤维土基层材料热胀缩性的影响	149
第三节	纤维土材料温度收缩性质影响因素的 探讨	153
第十章	纤维半刚性基层材料干燥收缩机理理论分析	156
第一节	纤维土材料内部水分的变迁	156
第二节	纤维土材料中毛细管张力的作用	159
第三节	纤维土材料中吸附水和分子间力作用	163
第四节	纤维土材料中层间水作用和碳化收缩 作用	168
第五节	纤维土材料干燥收缩系数的一般变化 规律	169
第六节	影响纤维土材料干燥收缩的主要因素	170
第十一章	纤维半刚性材料基层沥青路面试验路修筑 及研究和纤维土材料基层经济效益分析	172
第一节	安黄线公路纤维半刚性材料基层沥青路面 推广试验路的修筑及研究	172

第二节	207 国道纤维半刚性材料基层沥青路面推广 试验路的修筑及研究	182
第三节	湖南省 1804 线公路纤维半刚性基层沥青路 面试验路的追踪检测	184
第四节	纤维土材料基层沥青路面经济效益分析	185
参考文献		188

第一章 总 论

第一节 纤维加固土路面基层 研究与应用的必要性

随着我国国民经济的不断发展,要求公路运输事业向大吨位、高速度的方向发展,公路建设向高等级、高标准的方向发展。这些必然给公路设计者和建设者在经济效益和技术要求方面提出了更高的要求。高等级公路沥青路面用半刚性类材料作为基层或底基层,也正是适应于这两种要求。半刚性类材料以其优良的工程性能和显著的经济效益在我国公路建设中得到了广泛的应用,并在目前公路建设中越来越占有特殊的重要地位。

国外在应用半刚性材料作为道路的基层比我国早,美国在 30~40 年代就开始应用水泥稳定土和石灰粉煤灰类材料。现在用半刚性类材料及贫水泥混凝土所修筑的道路基层和底基层已占所修道路的一半以上^[1]。我国从 50 年代开始修筑沥青路面时,推广应用石灰土,70 年代开始在某些道路上开始较大量地应用水泥类及石灰粉煤灰类半刚性材料作为基层或底基层。半刚性材料以其高强度和良好的稳定性,延长了道路的使用寿命,大大地减轻了道路面层的龟裂、坑槽和冻害。但随之却在早期出现比柔性基层上沥青路面多而频繁的裂缝,这些裂缝部分是基层的反射裂缝和由基层的干湿、温度性质所引起的^[2]。裂缝的出现,特别是反射裂缝的出现,会

使水危及整个路面路基结构,还易引起沥青面层较快地出现龟裂等,对以半刚性材料作为基层的公路建设造成了潜在的危险。为此,尽快地搞清半刚性基层材料的收缩原理及其发展变化规律,以便提出合理而实用的防治半刚性基层路面裂缝的措施,是当前沥青路面修建中亟待解决的问题之一。纤维加固土路面基层的研究与应用正是为解决半刚性基层材料的收缩开裂而进行的工作。

第二节 国内外纤维土技术 研究动态与应用

纤维加固土是一种复合材料,它是由两种或两种以上原材料复合而成的一类多相材料。这种新型材料的性能不同于组分材料,它可以根据使用的要求进行设计以满足多种特殊用途,从而能够极大地提高工程结构的效能。现代复合材料自本世纪40年代出现以来,已经得到了飞速的发展,它在建筑、化工、能源、交通等部门大显身手,迄今已推广应用于生产和生活的各个领域。由于纤维复合材料的独特力学特点,最近这方面的研究工作吸引了很多学者,其文献数量正以惊人的速度增长,哈尔滨工业大学顾震隆教授用计算机检索最近10年的文献时,就找到1000多篇^[3]。实际上还有很多文献并未包括在内。

复合材料是现代科学技术发展的产物,它既是多种学科成果的综合,又与其他学科互相渗透,互相推动,为解决现代科技发展中愈来愈苛刻的材料问题立下了汗马功劳,业已成为新技术革命的前沿和支柱。社会的进步始终是和当时新材料的发明与应用密切相关的。人类的文明、发明发展史,曾经用材料作为划分时代的标志,例如石器时代、青铜时代、铁器

时代,可见,复合材料的发展,必将把人类文明推向更高的境界。

几种材料的“复合”,改变并提高了单一材料的物理、化学、力学及人们所要求的其他性能,可以解决工程结构中常规材料难以解决的关键问题。而这种复合材料效能与潜力的充分发挥又有赖于对其力学、物理、化学性能及复合机理、设计方法、成型工艺和性能测试等的深入研究。因此,这一新兴的科技领域吸引了大批有为之士辛勤耕耘,在这个领域内充分发挥其聪明才智。

在土木工程中,复合材料的应用愈来愈广泛,如土工布、加筋土、钢纤维混凝土等,研究工作亦越来越深入。

纤维复合材料是由纤维与基体两部分组成的。纤维的种类很多,有钢纤维、玻璃纤维、石棉纤维、聚丙烯、维尼纶、硼纤维、涤纶、棉、麻等。作为复合材料的基体有水泥、砂浆、混凝土、环氧树脂、石膏、土、半刚性材料等。

复合材料与原有基体比较,抗压、抗拉、抗挠曲、抗冲击、抗疲劳、抗冲刷强度都有所改善,某些强度几乎成倍或成十倍地增加。如常见的有以石棉为纤维,以水泥砂浆为基体的石棉纤维水泥;以棉纱为纤维,以石膏为基体的石膏绷带,这些材料都是在基体中掺入纤维后,使原有的脆性材料改变了力学性质,变得富有韧性,并增强了抗裂性能。施加在基体上的荷载,借助于作用在界面上的粘着力传递到纤维上,如果纤维的弹性模量大于基体的弹性模量,那么基体开裂后,大部分由纤维来承受,所以复合材料的强度与纤维体积的含量成正比。钢纤维的弹性模量比混凝土高 10 倍以上,是有效的增强材料之一;玻璃纤维的弹性模量比混凝土高 2 倍以上,比石膏高 3 倍,也是一种有效的增强材料。聚丙烯、尼龙纤维等的弹性模量低于普通混凝土。一般钢、玻璃、石棉、碳等纤维为高

弹性模量纤维; 尼龙、聚乙烯、聚丙烯等纤维为低弹性模量纤维。弹性模量比混凝土高的纤维掺入后, 可使复合材料获得较高的韧性, 并增加抗拉强度、刚度和承担动荷载的能力。比混凝土弹性模量低的纤维掺入混凝土后, 只能增加韧性, 强度提高不大^[4]。因此, 从 20 年代初, 特别是近 10 年来, 钢纤维混凝土得到了迅速发展。

最早对钢纤维混凝土进行研究的是美国人波特 (Porter)。1910 年, 他把薄钢片掺入混凝土中, 以改善混凝土的抗拉强度及抗冲击性能, 并于 1914 年获得专利权。1911 年美国人格莱汉 (Graham), 1914 年菲克利 (Ficklim) 亦用相同的方法获得了成功, 并在某些方面进行了改进。但只有到了 1963 年罗缪弟 (Romualdi) 和巴特森 (Batson) 发表了混凝土开裂机理中钢纤维间距影响的著作后, 才引起了工程界广泛的重视。随着钢纤维混凝土的迅速推广, 1966 年美国混凝土学会增设了纤维混凝土委员会 (ACI Commitee 544), 1973 年在加拿大渥太华举办了纤维混凝土国际会议, 1975 年在伦敦由国际材料及结构试验联合会主办召开了纤维水泥及混凝土的国际讨论会。在众多的论文中, 钢纤维混凝土的论文占多数, 说明了钢纤维混凝土迅速发展的趋势。在国外, 以美国和英国发展最快。近年来, 日本亦有较快发展, 其他国家如俄罗斯、西欧各国以及澳大利亚等国也都在进行研究和应用。

我国在 70 年代开始引进这一新技术, 以国防科委及建筑研究院为最早。河海大学、西安航空工程学院等单位在 1978 年左右进行了大量的试验研究。浙江省水利水电科学研究所及杭州市水利局亦在这段时间内进行了若干基本物理力学性能的试验研究及现场施工工艺的研究。80 年代, 我国这一技术发展较快, 研究单位大量增加, 应用亦有所发展。如南京梅山铁矿溜井巷道、江西都昌县大港水库溢洪道、浙江省百丈漈

水电站、葛洲坝、都江堰、南京市五台山体育场等都采用了纤维混凝土,并获得了成功。

在公路工程建设中,钢纤维混凝土在桥梁、路面已部分开始使用,但由于纤维增强机理尚不够完善,钢纤维混凝土的拌和、振捣、成型比较困难,纤维价格太高,钢纤维混凝土的耐久性也缺乏令人信服的数据,因而影响了钢纤维混凝土在公路工程中的推广应用。而聚丙烯纤维加固土,由于纤维价格低廉,施工、拌和、成型比较简便,作为沥青路面的基层,具有可以提高韧性、抗裂性及强度、使用范围广等优良特性,成为公路工程建设中具有很大发展前景的筑路材料。

对改善沥青路面半刚性基层抗裂性的聚丙烯纤维加固土,目前国内外均研究很少,对纤维土复合材料的收缩性能研究的报导更少。但国内外曾对半刚性基层材料的收缩性能及规律进行过大量的工作,现将国内外研究成果及动态分述如下:

一、半刚性基层材料收缩性能及规律的研究状态

(一)干燥收缩机理及研究现状

1. 30年代初,国外(如美国等)首先采用水泥稳定土材料修筑道路,对水泥稳定土的干燥收缩特性研究较多^[5],通过对水泥土的大量实验,得出以下结论:

1)水泥土的收缩率先随水泥含量的增加而减小,并达到一个最小值;而后又随水泥含量的增多而略有增多,为此可找出一个收缩最小的最佳配比。

2)粘性土收缩主要是土样中的细粒部分起作用;但在砂土中,已水解的水泥浆粘体收缩是水泥土收缩的主要原因。

3)总收缩率基本上是粘土成分的数量和种类的函数;而高岭土水泥土中的收缩较蒙脱土水泥土快。

4) 收缩率可用改进压实的方法使其减小。

5) 长时间的养护可增加砂质粘土的总收缩率, 但对粘土质土则相反。

6) 收缩是水泥土内水分的损失所引起, 在收缩和蒸发损失之间存在着相互关系。

国外对石灰土类、二灰土类干燥收缩方面的研究较少。

2. 1986 年交通部公路科学研究所协同北京、广东、黑龙江、广西等省市公路研究和生产部门, 分别修建了一批水泥稳定土类、石灰稳定土类、石灰粉煤灰土类基层试验路, 在对其力学性质和稳定性检测的同时, 也对裂缝进行了观测分析, 得出了比较一致的定性结论。

1) 三类半刚性材料中, 干燥收缩系数的大小顺序为: 石灰土大于石灰粒料土; 水泥土大于水泥粒料土大于水泥粒料; 石灰粉煤灰土大于密实式二灰粒料。

2) 一定的集料含量下, 可减少或防止干燥收缩裂缝的出现。

3) 含水量是影响干燥收缩的主要原因之一, 混合料碾压时, 含水量越大干缩越严重。

4) 压实度大的路段, 不易产生干燥收缩。

3. 1987 年以来, 西安公路研究所、天津市政工程研究所和河北工学院等单位进行了大量的室内实验, 得出了一些定量结论。

1) 石灰土类和石灰粉煤灰类半刚性材料的干燥收缩值一般大于温度收缩值。

2) 影响石灰土和二灰类土的干燥收缩性能的主要因素是土质情况、压实度和含水量。

3) 集料可在一定程度上降低干燥收缩值。

4) 石灰稳定塑性指数低的土, 其干缩系数值在 (150~

$200) \times 10^{-6}[\varepsilon / \omega(\%)]$ 之间;而石灰稳定高塑性指数的土,在初期为 $400 \times 10^{-6}[\varepsilon / \omega(\%)]$ 左右,且随龄期的增加而减小到 $140 \times 10^{-6}[\varepsilon / \omega(\%)]$ 。二灰土干燥收缩值为石灰土的一半左右,其值为 $(80 \sim 300) \times 10^{-6}[\varepsilon / \omega(\%)]$,二灰砾石在 $40 \times 10^{-6}[\varepsilon / \omega(\%)]$ 左右。

(二)国内外半刚性材料温度收缩性能研究状况

国外在温度收缩方面研究工作进行较少,特别是二灰类、石灰类半刚性材料的温度收缩方面的工作进行得更少。

我国交通部公路科学研究所、北京市公路局、天津市政工程研究所、西安公路研究所、山西省交通科学研究所、辽宁、吉林、黑龙江等省公路研究和建设单位,通过对大量试验路和工程路的沥青路面开裂情况的分析调查和大量的室内试验,得出了部分半刚性基层温度收缩结论:

1. 半刚性基层类型、土质情况、半刚性材料的集料含量及种类、环境因素、施工质量等是影响整个半刚性基层路面温度收缩的主要因素。稳定细粒土和高塑性土基层路面比稳定砂性土和粗粒土基层路面有较高的开裂率;较多集料含量的半刚性基层比集料含量低的基层路面有较小的开裂率。

2. 初冬季节是半刚性沥青路面裂缝大量产生的季节,为此在冰冻地区半刚性基层沥青路面裂缝的主要原因是温度收缩。

3. 在 0°C 以上时,石灰土的温度收缩系数较大地受到温度的影响,约为 $20 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$,比水泥土的收缩系数 ($10 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$) 大一倍。在 $0^{\circ}\text{C} \sim -2^{\circ}\text{C}$ 时收缩系数突然大量增加,达到 $660 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$;在 -2°C 以下时,温度系数又随之逐渐变小,约自 $420 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ 减小到 $140 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$ 。

4. 半刚性基层种类的影响:石灰粉煤灰、煤渣石灰土的温度收缩系数比石灰土的温度收缩系数 (α_t) 小。

$$\alpha_{t\text{煤渣石灰土}} = (0.2 \sim 0.7) \cdot \alpha_{t\text{石灰土}};$$

$$\alpha_{t\text{二灰}} = 10 \times 10^{-6} 1 / ^\circ\text{C} \quad (t < 0^\circ\text{C});$$

$$\alpha_{t\text{二灰}} = 500 \times 10^{-6} 1 / ^\circ\text{C} \quad (t = 0 \sim -2^\circ\text{C});$$

$$\alpha_{t\text{二灰}} = 80 \times 10^{-6} 1 / ^\circ\text{C} \quad (t = -2 \sim -20^\circ\text{C})^{[6]};$$

1988年西安公路学院张登良教授、郑南翔讲师课题组对石灰土类和石灰粉煤灰类半刚性基层材料的干燥收缩及温度收缩规律及其影响因素进行了较为系统的研究,获得了一些可喜的成果。

以上的研究结论无疑对今后的研究和当前公路中的半刚性材料的设计有一定的积极意义。对半刚性材料干燥收缩和温度收缩的机理和规律的研究,目前主要通过两个途径:一是通过实地公路的调查资料及试验路上统计资料的分析研究,从而得出部分结论;二是以较为系统的室内实验为主,以调查资料为辅的研究途径。

二、防裂措施的研究现状

国内外在防止半刚性基层路面的裂缝方面先后采取了很多措施,如橡胶沥青膜、橡胶沥青、纤维沥青、土工布、土工格栅及面基层之间设碎石过渡层等。就基层半刚性材料的防裂而言,可归纳为如下几个方面:

1. 选用温度收缩和干燥收缩系数小、抗拉强度大的混合料作为沥青路面的基层材料。
2. 减小碾压成型时的含水量,且采用重型击实标准。
3. 增加半刚性基层的厚度。
4. 推荐掺集料的半刚性材料作基层。
5. 向半刚性基层材料中加 Na_2SO_4 、 CaSO_4 、 MgSO_4 、膨胀水泥等化学外加剂。

以上各项措施在近几年的应用中已证明大部分有一定防