

公路隧道纤维混凝土衬砌

关键技术

袁 松 张 生 王希宝

李 杰 廖沛源 张廷彪

◎ 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

公路隧道纤维混凝土衬砌关键技术 / 袁松等著. —
成都: 西南交通大学出版社, 2022.12
ISBN 978-7-5643-9041-9

I. ①公… II. ①袁… III. ①寒冷地区—公路隧道—
纤维增强混凝土—混凝土衬砌 IV. ①U455.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 240034 号

Gonglu Suidao Xianwei Hunningtu Chenqi Guanjian Jishu
公路隧道纤维混凝土衬砌关键技术

袁松 张生 王希宝 | 著
李杰 廖沛源 张廷彪

| | |
|-------|---|
| 责任编辑 | 韩洪黎 |
| 封面设计 | 吴兵 |
| 出版发行 | 西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼) |
| 发行部电话 | 028-87600564 028-87600533 |
| 邮政编码 | 610031 |
| 网 址 | http://www.xnjdcbs.com |
| 印 刷 | 四川煤田地质制图印务有限责任公司 |
| 成品尺寸 | 170 mm × 230 mm |
| 印 张 | 9.5 |
| 字 数 | 184 千 |
| 版 次 | 2022 年 12 月第 1 版 |
| 印 次 | 2022 年 12 月第 1 次 |
| 书 号 | ISBN 978-7-5643-9041-9 |
| 定 价 | 58.00 元 |

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前言

随着新一轮西部大开发的推进和“一带一路”倡议的推动，我国广大西部高原地区的公路、铁路、航空、水利、电力、通信等基础设施得到了又好又快的建设，高寒地区公路隧道技术研究进入了一个新的阶段。高寒高海拔公路隧道主要集中在青藏高原，50%以上的隧道位于海拔 3000 m 以上，仅四川海拔超过 3800 m 的公路隧道就超过 14 座。高原冻土等特殊地质条件，使工程施工面临前所未有的复杂环境和巨大挑战。尽管地形地质、气候条件复杂诱发多种问题，但是“要致富，先修路”的观念深入人心，交通作为经济发展的“先行官”，可适度超前发展。

交通运输部计划“十四五”时期新建通车公路 30.2 万 km，其中新建高速公路 2.9 万 km；加快出疆入藏大通道战略性重大项目的建设；完善干线路网服务功能，打通沿边国道 G219 和 G331，实施川藏、新藏、滇藏、青新、甘新等公路提质改造以及涉藏州县、南疆四地州内通外联干线通道建设。这些高寒高海拔区域交通项目，隧道占比都很高。

四川省西部涉藏地区面积占全省总面积的 49%，为青藏高原的组成部分，海拔一般在 3000 m 以上，公路项目众多，其地形起伏剧烈、地质构造复杂、地震频发、气候恶劣。四川省建成或在建的一大批高原高海拔公路，其隧道占比也越来越高，例如雅康高速隧道占比 53%、映汶高速隧道占比 54%、汶马高速隧道占比 54%。典型的高海拔隧道从 2002 年建成的海拔 2200 m 的二郎山隧道到 2017 年建成的海拔 4400 m 的雀儿山隧道。

高寒隧道在建设方面取得了一定的成绩，但也存在一些问题，主要是高寒隧道衬砌耐久性问题，需要对设计、施工等进行规范性指导。自 2009 年以来，在四川省交通运输厅的大力支持下，立项相关科研课题进行专题研究，高寒隧道建设体系逐步完善，并取得了良好的应用效果，有效保障了公路的运营安全。我们隧道工程设计研究团队在长期从事高寒隧道勘察设计、工程咨询、病害整治及科学研究的基础上，结合十余年的工程实践与科研，总结形成了《公路隧道纤维混凝土衬砌关键技术》一书。本书是高寒公路隧道设计重要的参考书，建立在大量的工程实践经验和科研成果的坚实基础之上，同时符合国家现行规范的规定和要求，具有较好的系统性、全面性和可靠性。本书从设计者的角度出发，旨在将高寒隧道纤维混凝土冻融各环节说清楚，将室内试验和现场试验所形成的冻融当量关系讲明白，具有很好的实用性和参考性。

全书共分为六章。第一章介绍了纤维混凝土的应用现状及相关技术未来的发展趋势；第二章阐述纤维混凝土基础研究，介绍混凝土配合比设计、抗压强度试验和纤维初选；第三、四章分别从室内试验、现场试验介绍纤维混凝土冻融试验；第五章详细介绍了纤维混凝土冻融损伤理论；第六章对纤维种类及掺量对混凝土抗压强度的影响、最优纤维种类选取、最优纤维掺量、冻融循环对纤维混凝土力学性能的影响、纤维混凝土的抗冻机理等研究结论进行了总结。

本书在撰写过程中得到了四川省交通运输厅、四川省交通勘察设计研究院有限公司的大力支持和帮助，在此表示诚挚的感谢。

鉴于作者水平和经验的局限性，疏漏和不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

作 者

2022 年 7 月 27 日

目 录

| | | |
|-------|-------------------------------|-----|
| 第 1 章 | 绪 论 | 001 |
| | 1.1 研究背景 | 001 |
| | 1.2 研究现状 | 002 |
| | 1.3 研究问题 | 009 |
| 第 2 章 | 基础研究 | 011 |
| | 2.1 混凝土配合比设计 | 011 |
| | 2.2 混凝土抗压强度试验 | 016 |
| | 2.3 纤维材料初选 | 020 |
| 第 3 章 | 室内试验研究 | 022 |
| | 3.1 纤维种类试验研究 | 022 |
| | 3.2 纤维掺量试验研究 | 076 |
| | 3.3 冻融循环对纤维混凝土力学性能的影响研究 | 104 |
| 第 4 章 | 现场试验研究 | 121 |
| | 4.1 现场环境及试件制作 | 121 |
| | 4.2 试验设备及方法 | 123 |
| | 4.3 现场冻融循环试验结果与分析 | 124 |
| 第 5 章 | 纤维混凝土冻融损伤理论 | 125 |
| | 5.1 冻融损伤本构模型 | 126 |
| | 5.2 现场混凝土冻融耐久性预测初探 | 134 |
| | 5.3 小 结 | 135 |
| 第 6 章 | 结 论 | 137 |

参考文献140

【 第 1 章 】 >>>>

绪 论

1.1 研究背景

混凝土自 19 世纪末被发明以来,便由于其原料易得、可塑性好、综合能耗较低等优点而被迅速应用于土木行业。随着社会经济的持续增长,基础设施的广泛修建,混凝土已发展成当今世界上应用最为广泛的建筑材料。强度和耐久性评价混凝土性能的两大指标。在混凝土发展初期,人们更多的是关注其强度问题,相对而言耐久性并未得到足够的重视。1987 年,美国国家材料顾问委员会提交的研究报告指出,约 25.3 万座混凝土桥梁的桥面板,其中部分仅使用了不到 20 年便发生了不同程度的损坏,远低于 40~50 年的设计寿命^[1]。这一报告使混凝土结构耐久性问题在世界范围内引起轰动,随后,大量关于混凝土耐久性的研究被许多学者提出,也促使了混凝土理论和技术的快速发展。

混凝土抗冻性作为其耐久性的一项重要指标,一直以来广受人们的关注与重视。一般而言,当混凝土内部含水率较高且处于正负温交替环境中时,混凝土均会承受冻融循环作用,甚至引起混凝土结构物的冻融破坏,这一现象在我国广泛存在,而在我国“三北地区”(华北、东北、西北)、西南高山等高寒地区,混凝土冻融破坏现象尤为突出^[2]。调查发现,对于水工建筑物,几乎所有工程都遭受了不同程度的冻融破坏,此外,桥梁结构、隧道等水泥混凝土结构也遭受着不同程度的冻融破坏^[3]。据统计,仅

在我国东北和西北地区就有 33 座铁路隧道和多座公路隧道遭受不同程度的冻害^[7]。这些冻害问题都将直接威胁到隧道结构及行车安全，造成严重的经济损失。因此，在寒区隧道中采取有效措施，避免或减轻冻害的发生显得尤为重要^[8]。

国道 318 线上海至樟木口岸公路甘孜境段（又称“川藏公路”或“川藏南线”），是我国 8 条西部开发省际公路通道之一，是四川通往西藏的重要通道，不但承担着区域间的客货运输，同时也是一条重要的国防战备通道。但由于东俄洛至海子山段处于高海拔地区，地形地质条件复杂，公路病害多，加之没有相对大的投入，整体路况差，通行能力弱，难以保障车辆正常通行。因此，加快该路段的改造对保障川藏公路通畅，巩固边防，完善区域干线路网，提高运输效率具有十分重要的意义。

该段地理位置特殊，基本处于高海拔地区，剪子湾山隧道及脱洛拉卡山隧道洞口海拔均在 4000 m 以上，是目前国内已建或在建项目中少数几座海拔超过 4000 m 的隧道之一。隧道衬砌结构在这类地区将面临反复的冻融循环作用，当冻融循环达到一定次数后，将有可能在衬砌结构内萌生新的孔裂隙或促使原有孔裂隙生长、扩张，逐步降低材料的力学性能，使得混凝土表面剥落，这将会引发一系列不利影响（如加速混凝土碳化、钢筋锈蚀等），进一步加深材料的冻害，从而使结构陷入恶性循环，其耐久性难以得到保证，严重影响工程的使用安全及寿命。目前，国内外学者虽然提出了许多的防冻措施，然而通过调查发现，仅采用防冻保温措施并不能根绝隧道冻害现象。因此，在隧道采用防冻措施的同时开展对衬砌材料性能的研究，提高材料的抗冻性能，对保障混凝土结构的安全运营具有重要意义。

1.2 研究现状

1.2.1 纤维混凝土抗冻理论研究

1. 混凝土冻融破坏理论

混凝土冻融破坏是国内外研究较早的课题，虽然对混凝土冻融破坏机理尚有争议，但一般认为，混凝土的冻融是一个物理作用过程^[12]。目前比较经典的冻融破坏理论主要是静水压理论、渗透压理论等。

研究初期，人们主要是通过水结冰后体积膨胀约 9% 这一自然现象来解释冻融破坏，这一时期主要是 1944 年 Collins^[13] 提出的“冰晶体膨胀”理论，但实验研究却表明混凝土含水饱和度低于 91% 时，仍有可能发生冻融破坏，因此这一理论并未得到广泛接受。而在 1945 年 Powers^[15] 则提出了静水压理论，后来在 1953 年 Powers 与 Helmuth^[16] 一起又针对混凝土的冻融破坏机制提出了渗透压理论，这两种理论是目前较为完善的混凝土冻害机理。这两种理论均认为混凝土在受冻过程中内部总存在着水分迁移的现象，静水压理论认为混凝土孔裂隙中的自由水受冻结冰膨胀后迫使周围自由水向结冰体外围扩展，从而形成静水压力，对混凝土产生破坏；而渗透压理论则认为自由水结冰后，混凝土内部孔溶液会存在浓度差，使得周围自由水向结冰体迁移，形成渗透压力。这两种理论无论哪一种占据主导地位，其内部均存在着水分迁移，由此可见水分迁移是造成混凝土受冻损伤的主要原因^[14]。国内部分学者则从理论计算及客观存在的试验现象出发来论证静水压、渗透压的大小，最后得出静水压是混凝土冻害的主要因素^[14]。瑞士学者 Fagerlund^[17, 18] 认为混凝土受冻后是否破坏取决于水泥浆体中是否含水、含水量以及水结冰过程中能否产生足够应力破坏水泥石基体，从而在 1975 年提出了“临界饱水度”理论，即是说混凝土能够容纳的可冻结水含量存在一个临界值，当内部含水量未达到临界值时，即便出现冻害环境，混凝土也不会发生冻害，而当达到临界值后，混凝土将会发生冻融破坏。其他学者如 Litvan^[19] 还提出了气动受阻理论，苏联学者^[57] 根据混凝土受冻现象学观点提出了相关的冻融理论等。

2. 基于现象学的混凝土冻融损伤理论

2006 年，唐光普^[20] 在蔡浩的基础上忽略了混凝土的初始损伤，并以混凝土动弹模损失 40% 所对应的冻融循环次数为人为规定的疲劳寿命，得到

了在冻融循环作用下，混凝土的疲劳损伤演化方程，如式（1-2-1）所示。

$$D = 1 - \left[1 - \frac{N}{N_{0.4}} (1 - 0.6^{\xi+1}) \right]^{\frac{1}{\xi+1}} \quad (1-2-1)$$

式中： D ——损伤变量；

N ——冻融循环次数；

$N_{0.4}$ ——冻融循环疲劳寿命；

ξ ——材料参数。

洪锦祥^[21]等通过试验及数据回归分析得到了冻融循环后混凝土的抗折、抗压剩余强度与损伤度之间的关系，如式（1-2-2）、式（1-2-3）所示。

$$f_{r, \text{res}} = e^{-D/t} \cdot f_r \quad (1-2-2)$$

$$f_{c, \text{res}} = (1-D) \cdot f_c \quad (1-2-3)$$

式中： $f_{r, \text{res}}$ 、 $f_{c, \text{res}}$ ——混凝土冻融后的抗折、抗压剩余强度；

f_r 、 f_c ——混凝土冻融前的抗折、抗压强度；

t ——回归系数。

贺东青^[22]等通过冻融前后混凝土动弹性模量的比值与冻融循环次数的关系，推导出了层布式纤维混凝土的冻融损伤演化方程，如式（1-2-4）所示。

$$D = b \cdot e^{cN} \quad (1-2-4)$$

式中： b 、 c ——由试验确定的常数。

3. 冻融环境下混凝土结构耐久性量化设计

目前，国内外以快速冻融循环试验为基础已经累积了许多标准的室内冻融试验数据，然而混凝土冻融破坏受许多因素影响，室内冻融环境与工程现场所处环境差异巨大，室内的标准冻融试验数据难以直接应用于现场混凝土的冻融耐久性预测^[23]。如何确立现场冻融与室内冻融之间的关系，开展混凝土的抗冻性量化设计一直困扰着人们。1996年，以 A. Sarja 和 E. Vesikari 为首的材料及结构实验室国际联合会组织了多个国家的混凝土

专家，共同编写了《混凝土结构耐久性设计》一书，初步提出了混凝土耐久性量化设计方法^[27]。

我国许多学者在混凝土抗冻性量化设计方面也做了许多工作，李金玉^[24]等在 20 世纪 90 年代末通过国家“九五”攻关项目“重点工程混凝土安全性研究”，以北京十三陵抽水蓄能电站为工程背景，通过室内快速冻融循环试验机现场冻融循环试验，建立了室内外相对动弹性模量的关系，指出室内一次快速冻融循环相当于自然条件下 12 次冻融循环。刘西拉^[23]等则认为室内外冻融温度差异的本质是在混凝土内部进行恒幅周期性静水压加载和随机多级静水压加载之间的差异，并在 Miner^[25]线性损伤累积法则的基础上，得到了室内外冻融循环次数之间的关系，并给出了室内外冻融的关键参数 κ 的计算方法。武海荣^[26]等通过研究现场环境下冻融循环次数与室内快冻条件下的冻融循环次数的等效关系，以及对全国混凝土结构冻融环境进行耐久性区域等级划分，给出了混凝土抗冻寿命预测的概率方法。

1.2.2 纤维混凝土抗冻试验研究

1. 钢纤维混凝土

早在 1911 年，美国 Graham 曾把钢纤维掺入普通混凝土中，得到了其可以提高混凝土的强度及稳定性的结论^[28]。随后在 20 世纪 40 年代，欧美等许多国家也先后发明了许多有关钢纤维增强混凝土结构方面的专利。1969 年，美国批准了“混凝土与钢材组成的二相材料”专利，为现今钢纤维混凝土技术奠定了基础^[29]。相比发达国家，我国的钢纤维混凝土起步较晚，但相较于其他纤维混凝土，钢纤维混凝土是我国研究较早、较为成熟的纤维混凝土。

谢晓鹏^[30]等研究了在冻融循环作用下钢纤维混凝土的基本力学性能，其研究表明：随着钢纤维体积率的增加，钢纤维混凝土的抗压、劈拉、抗折强度得到提高。相对于钢纤维混凝土的抗压强度，钢纤维对混凝土在冻融循环作用下的抗拉、抗折强度改善更为明显。

Ru Mu 错误!未找到引用源。等研究了混凝土与钢纤维混凝土在荷载、冻融循环、水或氯盐溶液共同作用下的劣化规律，其研究表明：相比水溶液，混凝土在氯盐环境下其表面损伤更为严重，质量损失率也明显增大；但是由于氯盐溶液的冰点更低，混凝土动弹性模量的下降速度却要缓一些。同时也指出，在高应力比作用下，混凝土抗冻能力明显下降，而且当钢纤维体积含量达到 1.5%时，钢纤维混凝土的损伤累积会明显降低。牛荻涛^[32, 33]等也得到了类似的结论，即掺量为 1.5%时钢纤维对混凝土的抗冻性能改善效果最好。他们还通过压泵法及 SEM（扫描电子显微镜）从微观上研究了钢纤维混凝土的孔径分布特征，其认为在混凝土中掺入适量的钢纤维能够减小混凝土内部孔隙率、增加密实度，阻止混凝土内部微裂纹的产生与发展，从而提高混凝土的抗冻性能。

高丹盈等也通过试验探讨了在冻融环境下钢纤维混凝土的力学性能^{错误!未找到引用源。}以及与老混凝土黏结面的劈拉性能^[35, 36]。其研究指出：① 当冻融循环次数较少时，钢纤维对混凝土的劈拉、抗折强度的增强作用比较明显，但当冻融循环次数较大且钢纤维掺量较高时，钢纤维对混凝土的劈拉及抗折强度反而产生负面影响。② 由于部分钢纤维在界面剂的作用下伸入老混凝土表面，且与老混凝土黏结良好，从而提高了黏结强度；然而黏结面的劈拉强度随冻融循环次数的增加急剧降低，其下降程度与黏结面的特征有很大的关系；在一定范围内，随钢纤维体积率的增加，黏结面的抗冻劈拉强度不断提高。

2. 无机非金属纤维混凝土

目前，用于增强混凝土性能的无机非金属纤维主要包括碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等。相对于钢纤维混凝土，无机非金属混凝土的发展相对较晚，但由于其具有高强度、高弹模、高性能等优良性能而广受工程界重视。相比其他纤维，将无机非金属纤维作为原材料掺入混凝土基体中，直接研究无机非金属纤维混凝土的抗冻性较少，而是将其制作成纤维布、纤维板等形式用于加固混凝土结构，从而研究这样一种加固形式抵抗冻融

的能力。

徐东宇^{错误!未找到引用源。}等将碳纤维掺入水泥中,并研究了该复合材料在冻融作用下的抗压强度,并指出碳纤维质量分数掺量为 0.2% 时有较好的抗冻能力。谢永亮^{错误!未找到引用源。}与李文哲^{错误!未找到引用源。}等研究了玄武岩纤维对机场道面混凝土抗冻性能的影响,两者结果均表明,在混凝土中掺入玄武岩纤维可明显提高混凝土的抗冻能力。何军拥^{错误!未找到引用源。}等也指出在掺量基本相同的情况下,玄武岩纤维与聚丙烯纤维混凝土的耐久性大体一致。

纤维增强塑料(Fiber Reinforced Plastics, FRP)加固混凝土结构是 20 世纪 80 年代由德国、瑞士等发达国家所兴起的混凝土修补技术,由于其具有高强高效、防腐耐久等特点而被工程界广泛采用^{错误!未找到引用源。}。由于在寒冷地区,混凝土结构性能劣化较快,往往需要对其进行加固修补,然而 FRP 复合材料加固混凝土结构的抗冻耐久性受混凝土的抗冻能力、FRP 抗冻能力,以及两者之间的黏结抗冻能力的影响。因此,学者们开展了许多这方面的研究,并得到了不少有益的结论。张勇^{错误!未找到引用源。}与陈建伟^{错误!未找到引用源。}通过试验研究指出:未经冻融的试件经过碳纤维(玄武岩纤维)加固后,其开裂荷载及极限荷载均得到了明显提高,且碳纤维提高幅度更大;由于冻融循环对纤维和混凝土之间的黏结产生了不利影响,使得 FRP 加固混凝土试件在经受 50 次冻融循环后,承载力有较大下降。任慧韬^{错误!未找到引用源。}等研究了冻融循环对玻璃纤维布材料、玻璃纤维布与混凝土黏结强度的影响,其研究表明:玻璃纤维布在经过冻融循环作用后,抗拉强度下降,极限变形降低,但弹性模量无明显变化;由于混凝土在受冻后,其内部产生了许多微裂纹而导致玻璃纤维布与混凝土的剪切黏结强度明显下降。同时也指出:冻融循环虽然对加固混凝土的受力性能有不利影响,但在正常使用极限状态下,纤维布与混凝土黏结良好,其加固效果仍有一定保障^[44-45]。王苏岩^{错误!未找到引用源。}等则研究了冻融环境下 CFRP-高强混凝土的抗剪性能,并指出随着冻融循环次数的增加,CFRP-高强混凝土的黏结强度加速下降,在相对较低的荷载水平下便发生剥离现象。

3. 合成纤维混凝土

合成纤维是将人工合成的线型聚合物，经过一系列处理后得到的化学纤维，按其化学结构可分为碳链合成纤维与杂链合成纤维。而用于混凝土的纤维主要是碳链合成纤维（聚丙烯纤维、聚乙烯醇纤维、聚丙烯腈纤维等），目前，在混凝土抗冻方面（改性）聚丙烯纤维混凝土的研究相对较多，而其他合成纤维混凝土抗冻研究较少。

乔匡义^{错误!未找到引用源。}通过大量的试验研究，对比了PVA（聚乙烯醇）纤维混凝土与普通混凝土的抗渗、抗冻性能（慢冻法）的差异，PVA纤维混凝土的抗渗、抗冻性能均优于普通混凝土。姚武^{错误!未找到引用源。}等人研究了聚丙烯腈纤维高强混凝土的抗冻融性能，研究结果指出：掺入聚丙烯腈纤维后能够明显提高混凝土的抗冻性能，而且当纤维掺量为0.1%时，聚丙烯腈纤维混凝土的抗冻性能得到大幅提高；500次冻融循环后，素混凝土的相对动弹性模量仅有63.0%，而掺0.1%的纤维混凝土的相对动弹性模量仍有98.9%。

程红强等^{错误!未找到引用源。}研究了不同掺量的聚丙烯纤维混凝土的抗冻性能，并与普通混凝土进行了对比，试验结果表明：加入聚丙烯纤维能有效提高混凝土抗冻性能。英国学者Richardson等^{错误!未找到引用源。}通过系列试验也得到了在混凝土中掺入聚丙烯纤维能够起到引气的作用，其抗冻融耐久性明显优于普通混凝土。王玲等^{错误!未找到引用源。}通过大量系统试验也得出了在混凝土中掺入一定量的聚丙烯纤维，可以提高其耐久性。李双^{错误!未找到引用源。}等人则指出某些性能的聚丙烯纤维的掺入不但不能提高混凝土的抗冻性能，反而会使其有所降低。谢国梁^{错误!未找到引用源。}等人将粉煤灰及纤维同时掺入混凝土中使其变成三相复合材料，研究结果表明：纤维、粉煤灰的掺入能明显提高混凝土的抗冻融循环能力。Peng Zhang^{错误!未找到引用源。}等则将聚丙烯纤维掺入粉煤灰-硅灰混凝土中，并研究了冻融环境下不同纤维掺量的聚丙烯纤维-粉煤灰-硅灰混凝土与粉煤灰-硅灰混凝土的不同，研究结果表明：纤维掺入后会降低混凝土的工作性能，但掺入纤维后纤维-粉煤灰-硅灰混凝土的抗冻融能力明显优于粉煤灰-硅灰混凝土。

4. 植物纤维混凝土

植物纤维是以植物为原料,经一系列独特的化学处理和机械加工而成,当前用于建筑材料的植物纤维主要是纤维素纤维。由于纤维素纤维是从植物中提取而出,其自身便具有卓越的亲水性能,掺入混凝土后,其表面黏结着大量的水泥浆体颗粒,能够大幅增强混凝土与纤维间的握裹力。由于纤维素纤维是近年来才发展起来的高性能纤维,因此有关纤维素纤维混凝土的抗冻性能研究较少。目前,国内公开发表的纤维混凝土文献中仅邓宗才^[55-57]研究了纤维素纤维混凝土的抗冻性能。邓教授的课题组研究了不同掺量的纤维素纤维混凝土的抗冻性能,并与聚丙烯纤维混凝土的抗冻性能进行了比较,其研究结果表明:纤维素纤维可以显著改善混凝土的抗冻性能,且随着冻融循环次数的增加,其增强效果越明显;相比聚丙烯纤维混凝土,纤维素纤维混凝土的抗冻性能更优;同时还指出:纤维掺量为 $0.9 \sim 1.3 \text{ kg/m}^3$ 时,几种纤维掺量的混凝土抗冻性相差不大,因此建议使用经济掺量 0.9 kg/m^3 。

1.3 研究问题

1.3.1 主要研究内容

本书拟以国道 G318 线东俄洛至海子山段公路改建工程中洞口海拔 4000 m 以上的剪子湾山隧道以及脱洛拉卡山隧道为依托,采用文献调研、现场试验、室内试验、理论分析相结合的手段,对高寒隧道纤维混凝土抗冻防裂技术进行研究,提出适用于高寒隧道衬砌的纤维混凝土及相关配合比,为高寒地区公路隧道抗冻防裂型衬砌的修筑提供参考。

本书主要研究内容包括:

- (1) 针对前期调研,提出高寒地区隧道衬砌抗冻防裂技术要求;
- (2) 通过纤维混凝土的冻融循环试验找出适用于隧道衬砌的纤维混凝土类型;

(3) 通过冻融循环试验，找出最优的纤维掺量；

(4) 通过纤维混凝土冻融试验，测定混凝土的抗压及劈裂抗拉强度，并研究其相关规律；

(5) 对纤维混凝土的抗冻防裂性能的影响因素进行研究，并对其抗冻防裂机理进行初步探讨；

(6) 结合依托工程，提出高寒地区抗冻、防裂的设计要求，为进一步形成纤维混凝土抗冻防裂型隧道衬砌设计理论体系打下基础。

1.3.2 研究方法

本书主要采用室内试验、现场试验、理论分析等三大主要研究手段进行研究，主要研究方法如下：

1. 室内试验

通过室内试验进行不同纤维混凝土的冻融循环试验及相关配合比试验，得到抗冻性能最优纤维混凝土纤维种类及掺量；通过研究冻融循环后最优纤维混凝土的力学性能损失，进一步深入研究纤维混凝土的抗冻性能。

2. 现场试验

通过在现场研究不同种类及掺量的纤维混凝土的抗压强度，与室内试验形成对比、相互验证；同时通过现场冻融循环试验与室内相关试验的对比，获取相关设计参数。

3. 理论分析

在室内外冻融循环、强度测试等试验的基础上，进一步分析纤维混凝土的冻融损伤规律及室内外等效系数，为今后进一步深入研究奠定基础。