

TIANRAN FUSHI HUNNINGTU XINGNENG DE
SHIYAN YANJIU YU TANTAO

天然浮石混凝土性能的 试验研究与探讨

王海龙 申向东 / 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

天然浮石混凝土性能的 试验研究与探讨

王海龙 申向东 著

 中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书利用内蒙古地区丰富的天然浮石资源作为粗骨料,利用其轻质、高强、保温隔热功能强、耐久性能好、变形性能良好、结构效益好、经济性优良等突出优点,系统地天然浮石混凝土的性能展开了深入的试验研究与探讨。

本书通过轻骨料混凝土、纤维轻骨料混凝土和碎石轻骨料混凝土的大量对比试验,结合工程应用实际情况,研究了它们的立方体抗压强度、轴心抗压强度、抗折强度、弹性模量等物理力学性能,以及抗碳化、抗渗性、氯离子渗透性、冻融循环作用下轻骨料混凝土的损伤机理等。本书提出开放系统下利用三向可控温的三温冻融循环试验机模拟内蒙古寒冷地区的温度环境和冻胀时间,得出天然浮石混凝土的温度传导规律和冻胀量发育情况。

本书可供建筑、水利、交通等工程技术人员和研究人员使用,也可供有关科研和工程设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然浮石混凝土性能的试验研究与探讨/王海龙,申向东著. — 北京:中国水利水电出版社,2017.6
ISBN 978-7-5170-5482-5

I. ①天… II. ①王… ②申… III. ①浮岩—建筑材料—材料试验 IV. ①TU521

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第137289号

书 名	天然浮石混凝土性能的试验研究与探讨 TIANRAN FUSHI HUNNINGTU XINGNENG DE SHIYAN YANJIU YU TANTAO
作 者	王海龙 申向东 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京智博尚书文化传媒有限公司
印 刷	三河市龙大印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10.75印张 189千字
版 次	2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

前言

FOREWORD

本书利用天然浮石混凝土作为一种新型建筑材料具有轻质、高强、保温隔热功能强、耐久性能好、变形性能良好、结构效益好、经济性优良等突出优点，弥补了普通混凝土的诸多缺陷，成为当今绿色混凝土材料学科新的增长点。内蒙古农业大学王海龙和申向东组建的课题组以内蒙古地区丰富的天然浮石资源为研究对象对天然浮石混凝土展开了深入的试验研究与探讨。

本书通过对浮石的基本性质进行试验，检测其成分、表观形貌、物理力学性能等，为天然轻骨料的应用开发提供可靠的理论依据；本课题结合了纤维和轻骨料混凝土的优点，发挥各自的优良性能来增强和改善混凝土。通过在轻骨料混凝土中掺入聚丙烯纤维来提高轻骨料混凝土的韧性，解决轻骨料混凝土的脆性问题；通过在冻融循环试验，研究冻融循环对轻骨料混凝土强度、抗冻性的具体影响程度，并对不同掺量的纤维轻骨料混凝土在标准冻融环境和模拟实际环境下的抗冻性的影响效果进行系统地研究。

本书的主要研究成果如下：

(1) 在早期性能研究中配制 LC30、LC25、LC20 的轻骨料混凝土，得出轻骨料混凝土的破坏形态；轻骨料混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度比值较普通混凝土略高，其值大致为 0.79 ~ 0.87，弹性模量较普通混凝土降低了 15% ~ 20% 左右。

(2) 采用浮石轻骨料、选用粉煤灰包裹轻骨料技术，粉煤灰取代部分水泥 (0%、20%、30%、40%、50%、60%、70%)，分别进行了抗碳化试验、抗渗试验、氯离子渗透试验、pH 值测定以及粉煤灰混凝土的强度试验，得出不同粉煤灰掺量对轻骨料混凝土力学性能和耐久性能的影响规律。

(3) 本书进行了纤维轻骨料混凝土和碎石取代部分骨料的轻骨料混凝土的

立方体抗压强度、轴心抗压强度、抗折强度和弹性模量等试验，分析了聚丙烯纤维、碎石对轻骨料混凝土的增强、增韧效果，以及对纤维增强轻骨料混凝土与碎石轻骨料混凝土的破坏形式进行对比。

(4) 本书针对内蒙古寒冷地区自然环境（尤其是寒冷地区的水工建筑所处于饱水环境）的特点，研究了轻骨料混凝土在掺入聚丙烯纤维（ $0.6\text{kg}/\text{m}^3$ ， $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ ， $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ ）后在抗冻性试验中耐久性特征，重点研究冻融循环作用对轻骨料混凝土强度、抗冻性的影响，得出轻骨料混凝土的力学性能随纤维体积率增加而提高，其抗折性能的提高较为明显；抗冻性能的规律为：碎石轻骨料混凝土抗冻性 < 轻骨料混凝土抗冻性 < 纤维轻骨料混凝土抗冻性，其中纤维掺量为 $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ 的轻骨料混凝土性能保持较好。

(5) 本书通过纤维轻骨料混凝土试件在开放系统下的冻胀性能试验，研究了纤维轻骨料混凝土冻胀量的发育情况，分析了纤维轻骨料混凝土在冻结过程中温度变化特点及影响纤维轻骨料混凝土冻胀变化的原因。

本书得到了国家自然科学基金（51369023，51669026），内蒙古自然科学基金（2015MS056）的资助。

本书的成果在国家核心期刊及大型国际会议共发表学术论文 15 篇，被两大国际检索系统收录 3 篇，其中 SCI 1 篇，EI 2 篇。

全书由王海龙、申向东统稿。参加本项目研究人员有：内蒙古农业大学额日德木、刘瑾菡、张克、王培、王磊等。由于编者水平有限，对书中可能存在的不足和错误之处，敬请读者批评指正。

编者
2017 年 5 月

目录

CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 课题的提出和研究背景	1
1.2 轻骨料混凝土结构抗冻性的研究现状	3
1.2.1 冻融循环作用下混凝土相关理论	3
1.2.2 混凝土抗冻耐久性的主要影响因素	3
1.2.3 混凝土温度场及温度应力的研究	5
1.3 我国天然轻骨料的形成及特性	7
1.3.1 天然轻骨料的开发和应用	9
1.3.2 轻骨料混凝土标准和规程的编制	9
1.3.3 轻骨料混凝土分类及优点	10
1.4 纤维增强混凝土的特性及应用	12
1.5 矿物掺合料对混凝土受冻的影响	13
1.6 项目选题的意义	14
1.7 主要研究内容	15
第2章 试验材料与方法	17
2.1 主要原材料及其性质	17
2.1.1 水泥、骨料及外加剂等材料性能	17
2.1.2 纤维物理性能	21
2.2 浮石的主要成分及性能	22
2.2.1 浮石的形成	22

2.2.2	浮石的化学成分	23
2.3	试验方案设计	24
2.3.1	轻骨料混凝土的早期力学性能研究的必要性	24
2.3.2	粉煤灰掺入对轻骨料混凝土耐久性能影响研究	25
2.3.3	纤维增强轻骨料混凝土的抗冻性研究	26
2.3.4	开放系统下轻骨料混凝土冻胀性能研究	27
2.3.5	成型工艺	27
2.3.6	试验仪器	28
2.4	试验方法	31
2.4.1	轻骨料混凝土早期力学性能试验	31
2.4.2	轻骨料混凝土耐久性能试验	32
2.4.3	轻骨料混凝土冻融循环试验	32
2.4.4	轻骨料混凝土三温冻胀性能试验	34
2.5	本章小结	34
第3章	轻骨料混凝土 28 天早期性能及耐久性试验研究	36
3.1	轻骨料混凝土早期力学性能研究	36
3.1.1	试验概况	36
3.1.2	试验数据统计结果	37
3.1.3	轻骨料混凝土轴心与立方体抗压强度关系	38
3.1.4	轻骨料混凝土在龄期内受压破坏形态	41
3.1.5	轻骨料混凝土 28 天应力应变关系曲线	46
3.1.6	轻骨料混凝土早期弹性模量增长规律	50
3.1.7	轻骨料混凝土强度对减水剂反应情况	58
3.1.8	轻骨料混凝土早期性能研究结论	59
3.2	轻骨料混凝土耐久性能的试验研究	60
3.2.1	试验概况	60
3.2.2	轻骨料混凝土试验结果	61

3.2.3	粉煤灰对轻骨料混凝土抗碳化性能影响	63
3.2.4	粉煤灰对轻骨料混凝土抗渗透性影响	65
3.2.5	轻骨料混凝土抗氯离子渗透能力	67
3.2.6	掺粉煤灰对混凝土强度的影响	71
3.2.7	粉煤灰对轻骨料混凝土耐久性能总结	73
3.3	本章小结	74
第4章	冻融环境下轻骨料混凝土损伤研究	76
4.1	冻融循环的影响因素及试验设计	76
4.1.1	轻骨料混凝土冻融循环试验	76
4.1.2	试验设计	76
4.1.3	试验配合比及制备过程	77
4.1.4	冻融循环试验仪器	79
4.2	力学性能试验	79
4.2.1	基本力学性能测试结果	79
4.2.2	三类混凝土棱柱体受压裂缝扩展形式及破坏形态	81
4.3	轻骨料混凝土抗冻性试验	83
4.3.1	纤维轻骨料混凝土冻融循环后的力学性能试验结果	83
4.3.2	纤维对冻融后混凝土的力学性能的影响	85
4.4	冻融后轻骨料混凝土的性能情况	87
4.4.1	碎石轻骨料混凝土的冻融后质量、强度	87
4.4.2	纤维轻骨料混凝土和碎石轻骨料混凝土的冻融后破坏形式	89
4.5	纤维轻骨料混凝土冻融损伤试验研究	90
4.5.1	混凝土冻融循环损伤	91
4.5.2	轻骨料混凝土损伤试验	92
4.5.3	聚丙烯纤维对轻骨料混凝土冻融损伤的抑制作用	96
4.5.4	纤维轻骨料混凝土冻融损伤破坏机理分析	99
4.5.5	纤维轻骨料混凝土冻融损伤特性的研究	100

4.6 本章小结	117
第5章 开放系统下轻骨料混凝土冻融循环试验研究	118
5.1 影响混凝土抗冻的因素	118
5.2 试验设计	120
5.2.1 试验仪器及试件设计	120
5.2.2 轻骨料混凝土配合比方案及试件冻结状态	122
5.3 轻骨料混凝土在开放系统下冻融循环性能衰减情况	124
5.3.1 开放系统下冻融循环试验数据及分析	124
5.3.2 混凝土在开放系统下冻融过程中超声波变化情况	127
5.4 轻骨料混凝土冻胀性能及降温传导性的试验研究	133
5.4.1 单次冻胀过程中试验数据	133
5.4.2 纤维轻骨料混凝土冻胀量的发育情况	143
5.4.3 纤维轻骨料混凝土冻结过程测试点温度传导过程	146
5.5 本章小结	148
第6章 结论与展望	150
6.1 结论	150
6.2 进一步开展工作的设想和思路	152
参考文献	154
附录	162

第 1 章 绪 论

1.1 课题的提出和研究背景

在 21 世纪以至更长的时期内，混凝土材料仍是最主要的建筑材料，但是普通混凝土具有自重大、保温隔热性能差等缺点，影响了它在某些工程领域中的应用。随着现代土木工程结构日益朝着高耸、大跨、重载的方向发展，以及建造各种新型特种结构需求的增加，普通混凝土自重大的缺点也日益明显，限制了混凝土结构在高层建筑、大跨度桥梁、海洋浮式采油平台等结构物中的应用，因此发展轻集料混凝土就变得尤为乐观，但是目前现有的研究还未完全。

据初步估计，目前全世界每年生产的混凝土材料超过 100 亿吨，它不仅广泛应用于工业与民用建筑、水工建筑和城市建设，而且还可以制成轨枕、电杆、压力管、地下工程、宇宙空间站及海洋开发用的各种构筑物。同时，它也是一系列大型现代化技术设施和国防工程不可缺少的材料^[1]。

水工方面，近年混凝土耐久性调查总结报告中指出^[2]：在我国三北地区即东北、华北和西北，水工混凝土的冻融破坏的工程中占有的比例相对较大。这些大型混凝土工程一般运行 30 年左右，有的甚至达不到 20 年，特别是接触盐碱性水的工程受冻害现象尤为严重。在这些工程中，东北和西北的水工混凝土受冻融破坏较华北的更严重。如果采用普通混凝土的部分结构，那么经十几年运行后就会发生冻融破坏而导致不能发挥作用。地处寒冷地区的水工混凝土建筑结构，包括闸房、护墙、厂房、桥梁、桥墩、路面等，接触了河水、水库收集的雨水或受深水作用的部分，也会遭到冻融破坏。

另外，除上述谈到的三北地区以外，我国长江北部、黄河以南的华中、中南地区每年也会有负温天气出现，尽管存在的时间较短，发生的频率较低，也有可能使得混凝土建筑物出现冻融损伤。因此关于水工混凝土结构的抗冻耐久性问

题,是我国混凝土建筑结构中较为普遍,也是非常重要的问题^[3]。

近年来,混凝土冻融破坏的研究引起国内外大多数混凝土研究学者和工程技术人员的高度重视,也开展了大量研究工作,其中对北方地区水工混凝土的抗冻性研究也得到了较快的发展。由于混凝土结构在冻融循环中的复杂性和较多的不确定性,时至今日,尚未发现公认的完全能够反应混凝土冻害的机理理论。但是在各种冻融破坏的研究机理假说中,较为显著的是包括 T. C. Powers 提出的静水压假说理论,以及 Powers 与 Helmut 通过联合实验提出的渗透压假说理论。渗透压假说理论指出处于饱水状态的混凝土在受冻时,毛细孔壁同时承受了膨胀压力和渗透压力两种压力的作用,当这两种压力达到一定的极限,超过混凝土的抗拉强度时混凝土就会开裂^[4]。

在反复冻融循环后,由于水分的不断进入,混凝土中的裂缝随着冻融出现互相贯通,致使强度逐渐降低,最后甚至可能完全丧失,使混凝土由表及里破坏,该假说很大程度上推动了混凝土材料抗冻耐久性的研究。

另外,我国大部地区属于寒冷或严寒地区,这些地区主要集中于西部和北部,同时这些地区又属于缺水或严重缺水地区,近些年来随着我国西部开发力度的加大,水利工程建设迅猛发展,水利设施得以逐步的完善。然而水利工程在发挥其功能的同时,随着使用年限的增加,水工混凝土也渐渐地出现破坏,而这些破坏主要集中于冻害。冻融破坏现象在北方地区水工建筑物上表现出逐渐加剧的态势。影响水工混凝土冻融的因素很多,要解决这一问题,就需要根据使用建筑物的地区特点,因地制宜地发展适合本地的水工混凝土材料。

随着冻融破坏现象被人们不断深入认识,很大程度上指导了混凝土抗冻耐久性研究以及抗冻性保护措施的进一步开展。科研人员提出了多种提高混凝土抗冻性的措施,如掺加超细矿物掺合料、控制混凝土水胶比、适当加入引气剂等,并且取得了一定的工程抗冻效果。然而,即使实施了抗冻设计,混凝土的结构并非绝对能够抵抗冻融作用,这些抗冻措施虽然在一定程度上能够减少混凝土表面破损、剥离、脱落等现象的出现,但混凝土内部结构的劣化、损伤趋势却依然存在。

从本质上讲,冻融循环作用是一个渐近、时变、周期性的传热传质过程,前

面提到的各种冻害假说大多是从质量传输以及物质相变的角度来解释冻融破坏的机理,未能综合考虑冻融循环中热量传递过程。混凝土复杂的多相体结构以及由于其体积庞大造成温度传导过程中的滞后,均决定了冻融过程中结构温度场特有的分布、变化规律,各部位之间温度场变化的不均匀性将导致局部温度应力的产生。冻融作用是一个循环往复的过程,由此产生的冻融温度应力也将周期反复作用于混凝土结构本身。本文在此背景下,通过试验实测和模拟两种途径,研究混凝土结构的温度损伤随冻融循环过程的分布及变化规律,旨在从传热过程的角度分析、探讨混凝土冻融破坏的损伤机理,为进一步建立混凝土冻融耐久性劣化预测模型提供理论依据,具有重要的理论意义和深远的工程应用前景。

1.2 轻骨料混凝土结构抗冻性的研究现状

1.2.1 冻融循环作用下混凝土相关理论

目前有关混凝土冻融的研究工作主要包括混凝土冻融破坏机理的研究、提高混凝土抗冻性的措施和冻融耐久性劣化预测模型等方面。目前,各国学者对于混凝土冻融破坏机理的认识仍不完全一致,而且在前面学者研究成果的基础上又提出了一些新理论,如热弹性应力理论、低温腐蚀理论等,每一项新理论的出现都将进一步推动混凝土抗冻耐久性研究的发展,为完善混凝土结构的抗冻耐久性设计方法和防护措施提供理论依据。

1.2.2 混凝土抗冻耐久性的主要影响因素

混凝土的抗冻性与内部孔结构、水饱和程度、受冻龄期、混凝土的强度等因素有关,其中最主要的因素是孔结构^[7]。而混凝土的孔结构及强度主要取决于其水胶比、有无外加剂、养护方法等。

1. 水胶比

孔结构是影响混凝土性能的重要因素,而孔结构中最简单且最重要的参数就是孔隙率。影响混凝土的孔隙率最直接的是水胶比、水胶比较大使得混凝土浆体

中毛细孔径变大,逐渐形成了连通的毛细孔体系,就会减少其自身的缓冲作用,而且会增加混凝土中可冻水的含量,使得混凝土具有较快的结冰速度,冻结后产生较大的膨胀压力,随着反复的冻融循环,混凝土内结构就会遭受破坏^{[8][3]}。

2. 含气量

含气量是影响混凝土抗冻性的主要因素之一。目前引气剂在工程实际与室内试验研究中比较常见,也是提高混凝土抗冻性的一个非常重要而有效的措施。引气剂具有增水作用,它可以降低拌合水的表面张力和表面性能,使混凝土内部产生封闭气泡。这些气泡能使混凝土结冰时产生的膨胀压力得到缓解,保护混凝土不会遭到破坏,起到缓冲减压的作用。这些气泡也可以阻断与外界的通路,使水份不易浸入。

3. 混凝土的饱水状态

混凝土的受冻破坏与其所处的环境有关,也与其内部孔隙中饱水程度有关。普遍认为当含水量小于孔隙总体积的一定百分比时,就不会产生冻结膨胀压力,也被称为极限饱水度。但是当混凝土处于完全饱水状态下,其冻结冻胀压力最大。我们研究的水工混凝土主要处于含水量较大的环境中,饱水状态的程度较高^{[9][3][4]}。

4. 骨料

骨料是混凝土中起骨架和支撑作用或填充作用的粒状松散材料。好的骨料能对混凝土的抗冻性有很大的帮助作用。并且骨料尺寸对受冻后的性能也有一定的影响,孔隙率较高的骨料对混凝土抗冻性较为有利。

5. 掺合料

在混凝土中用粉煤灰替代部分水泥,粉煤灰能吸收水泥水化生成的氢氧化钙而改善界面结构,同时能使混凝土的浆体结构比较致密,一方面能显著改善抗氯离子、硫酸盐侵蚀的能力,另一方面其密实性对提高混凝土抗冻性也十分有利^[4]。

粉煤灰在国内外应用已有几十年的历史。最早研究粉煤灰在混凝土中应用的是美国加州理工学院的 R. E. Davis, 1933 年他首次发表了关于粉煤灰用于混凝土的研究报告。到 20 世纪五六十年代,粉煤灰作为一种工业废料,其活性性能被

进一步研究和推广,不仅是为了节约水泥,更主要是为了改善和提高混凝土的性能。美国加州大学 Mehta 教授指出,应用大掺量粉煤灰(或磨细矿渣),是今后混凝土技术进展最有效、最经济的途径^[10]。

1.2.3 混凝土温度场及温度应力的研究

随着环境温度因素导致的工程病害问题大量出现,人们越来越意识到温度作用给工程结构带来的严重负面影响。近年来,国内外学者对温度问题作了大量理论、实验和数值分析研究。

1. 国外关于混凝土温度场及温度应力研究现状

早在 20 世纪 30 年代美国、前苏联就开展了此方面的有关研究。1934 年,前苏联的马斯洛夫为解决水坝的温度应力问题,应用弹性力学理论得出在基岩上矩形平面墙体的温度应力计算公式。

郑晓燕^[12]等分析了拱桥拱顶截面下缘开裂的原因,指出了传统温度应力计算方法在计算中的不足,提出了既考虑温度变化引起的外约束应力又考虑截面温差不同引起的内约束应力的改进方法,并推出温度自约束应力计算公式。通过实例比较了两种方法的差别,得出温度自约束应力等是不容忽视方面的结论。

陆培毅^[13]等在采用有限元方法模拟基坑开挖过程中支护结构与土的相互作用的基础上,提出将温度场耦合到应力场中来分析基坑支护支撑温度效应。结合工程实例,采用修正剑桥弹塑性模型并考虑开挖过程模拟支撑温度效应,分析了不同施工阶段的温度变化对支撑温度应力的影响,指出支撑的温度应力应按照各种工况的最不利组合进行设计。

Frank Vecchio (1990)^{[14][3]}对混凝土框架的温度应力进行了研究,得出的结论认为当混凝土经历热荷载的作用下会引起明显的变形,以及应力与裂缝,同时热应力引起的内力受结构刚度的影响很大。

K. van Breugel (1998)^{[15][3]}根据试验,分析了混凝土在硬化期间,自身温度与龄期之间的变化关系,得出混凝土的温度变化和水化度有一定的关系,并且对不同混凝土材料进行实验,分析了水胶比、水化过程的温度对水化程度的影响,在此基础上提出控制混凝土温度变化的相关措施。

M. Emborg (1998)^{[16][3]}详细地探讨了混凝土硬化期间的抗压强度以及抗拉强度和线性膨胀系数,利用数学模型详细分析了计算这些参数,重点研究了早龄期的混凝土所具有的徐变变形性质,提出了一个包括温度变形和收缩变形以及粘弹性与断裂变形的混凝土的计算模型。

T. Tanabe (1998)^{[17][3]}对实测的温度应力进行了研究,对实测的温度场与应力场进行了比较和分析。

S. Bemander (1998)^[18]分析了温度裂缝成因,根据裂缝控制的原则,将影响裂缝发展的因素进行了对比分析,并根据相应的成因总结出裂缝控制措施^[3]。

2. 国内关于混凝土温度场及温度应力研究现状

国内近几年来对混凝土温度场及温度应力的研究也取得了长足发展。朱伯芳^[21-23]等人针对大体积的水工混凝土问题,对结构的温度应力以及裂缝控制方面进行了深入的研究,并对混凝土温度应力问题作了系统研究,提出了混凝土浇筑块、基础梁、重力坝、船坞、孔口、库水温度、寒潮、水管冷却等一系列计算方法,阐述和说明了混凝土温度应力发展的基本规律;在混凝土的徐变力学计算及分析的方法和应用方面,提出了徐变应力分析的隐式解法、简谐徐变应力分析的等效模量法和子结构法;针对混凝土坝分层施工,各层材料性质不同并随时间变化的特点,提出了并层算法和分区异步算法。其多数成果已纳入我国水工结构设计规范。

同济大学田敬学^[24]利用结构温度变形约束系数的解析计算方法,演绎了有水冷却情况下,在边界上的有限元迭代方法,并且在上海外环线越江隧道的混凝土工程中进行了应用,提出了在温度作用下,基坑的围护结构中内力与变形方面的相关计算方法。王雍等^[25]提出了用等效徐变的方法考虑弹性模量随龄期的变化,而且设置了虚实两种时间轴作为研究的方法,复杂过程借助 ADINA 软件模拟,对施工期混凝土的温度场和温度应力场进行计算^[3]。

在地下室墙板混凝土的温度应力和裂缝开展的研究现状中,刘杰^[26]对混凝土早期力学性能的实验展开研究,根据实际条件以及可能存在的荷载情况,探讨了地下室墙板温度场和温度应力的解析法以及有限元法的相关解法。

在超厚超长钢筋混凝土结构施工的温控技术基础上,认为温度收缩应力是混

凝土结构裂缝产生的主要原因,并且提出相应的控制温度裂缝公式,提出了相关的施工技术措施^{[27][3]}。

大面积混凝土(例如水工建筑物类的建筑物)在荷载作用下的应力计算情况,建立了三维应力求解模型,利用不同构筑物边界条件,可以推导出大面积混凝土在荷载作用下应力的近似解,有利于顺利地完成求解过程^[29]。

在弹性地基板块的温度应力分析中运用了半解析元方法,而且将三维温度场和应力场的相关计算公式进行了相应的推导^[28]。

为了建立适用于连续以及不连续温度场,文献^[30]用刚体界面元法推导了求解温度场问题的方程,该算法建立了刚体界面元法来求解温度应力。

在弹性地基上的垂直和水平方向约束的混凝土结构提出了一种计算温度应力的近似解析方法,利用计算机程序分析板中温度应力随各种不同参数变化的规律,强调软土地基^[31],尤其是上海淤泥质土上基础板的非均匀温度场下的温度应力^[4]。

清华大学对水工大体积混凝土的温度应力问题的研究。其中文献^[34]根据大体积混凝土在施工中以分层和分块浇注为主的施工方法,制作了三维条件下有限元计算程序,并对混凝土热力学参数以及散热和吸热的边界条件的系统参数进行了分析,从而来计算大体积混凝土的温度场以及温度应力场。文献^[35]针对碾压混凝土坝的成层结构特点,提出了碾压混凝土坝层合单元浮动仿真分析模型。文献^[36]在引入水管冷却效应作为子结构单元来模拟,演绎了在有冷却管效应的条件下,混凝土结构温度场和应力场的三维有限元计算公式^[4]。

1.3 我国天然轻骨料的形成及特性

在我国可利用的火山资源极其丰富,分布很广,尤其内蒙古地区。从已开采的11个火山群中查明储量约为20亿 m^3 。还有17个火山群和吉林两个大火山群的大部分资源尚未统计在内。浮石、火山渣是我国资源量大且分布较广的一类非金属矿产,主要分布在东北、华北与华南地区。目前已经开始开发应用的有吉林辉南火山矿渣、安图园池浮石矿、黑龙江克东二克山浮石矿、内蒙古兰哈达浮石

矿和海南浮石矿。仅黑龙江、吉林、山西、辽宁和内蒙等五省区按每年开采利用 500 万 m^3 计算, 尚可开采 100 年, 其开发应用潜力很大。

根据这些天然轻骨料的分布地区现状来看, 其当地的天然石灰石等普通骨料来源都比较匮乏, 而且处于我国北方地区, 对于建筑物保温要求较高, 因此这些地区也十分需要充分开发和利用这些轻骨料, 如果每年利用 500 万 m^3 天然轻骨料, 则可建新型节能住宅 1000 万 m^2 , 这将对我国的建筑墙体材料改革和促进建筑业的技术进步发挥很大的作用^[1]。

天然轻骨料因种类不同, 性能有较大差异。浮石和火山渣因为产地的不同, 差异较大。例如, 长白山的浮石呈现浅灰色, 其外表面及其内部 1~3mm 的圆形气孔极多, 松散容重小, 因表面粗糙, 敞开气孔多, 所以其筒压强度较低, 吸水率也较大; 吉林辉南的火山渣, 大多为铁黑色, 颗粒较小, 圆至椭圆型气孔极多, 故松散容重较大, 吸水率较低, 但因表面积不规则, 棱角较多, 所以其筒压强度也不高, 蒙、晋、冀地区所储存的浮石多为褐红色的多孔结构材料 (见图 1.1), 其孔隙和密度分布不匀, 需要科学分选才能获得较一致的级配和稳定的性能。



图 1.1 内蒙古锡林郭勒盟浮石轻骨料