

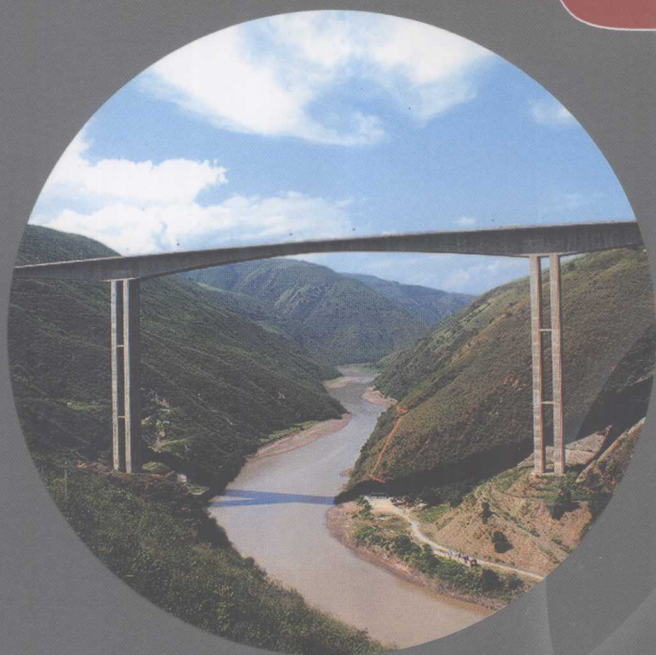


21世纪技术与工程著作系列·土木工程

High-Strength Lightweight Aggregate Concrete Structures
Behaviors, Analysis and Calculation

高强轻骨料混凝土结构 ——性能、分析与计算

叶列平 孙海林 陆新征 等 著



科学出版社
www.sciencep.com

21 世纪技术与工程著作系列·土木工程



高强轻骨料混凝土结构 ——性能、分析与计算

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书结合作者近年来的研究成果,对高强轻骨料混凝土的材料力学性能、变形性能、长期受力性能和结构设计计算方法进行了系统全面的研究。全书共九章,包括绪论、轻骨料混凝土的材料性能、梁的正截面受弯性能、梁的斜截面受剪性能、黏结锚固、轻骨料混凝土的收缩和徐变、高强轻骨料混凝土梁的长期变形和预应力轻骨料混凝土梁的预应力损失,以及轻骨料混凝土刚构桥的受力性能等内容。

本书可供从事结构工程和桥梁工程的研究、设计和工程技术人员阅读,也可供广大土建工程技术人员以及大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高强轻骨料混凝土结构:性能、分析与计算/叶列平等著. —北京:
科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-023662-3

I. 高… II. 叶… III. 高强度-轻骨料-混凝土结构-研究 IV. TU528.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 196406 号

责任编辑:任加林 / 责任校对:赵燕

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 3 月 第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2009 年 3 月第一次印刷 印张: 18 3/4

印数: 1—2 500 字数: 366 000

定价: 46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026 (BA08)

版权所有 侵权必究

举报电话: 010-64030229 010-64034315; 13501151303

前 言

与普通混凝土相比,高强轻骨料混凝土具有轻质高强、隔热保温、耐火抗冻等优点,虽然单方造价比普通混凝土高,但可减轻结构自重,减小基础荷载,提高运输、吊装、施工效率等,对自重占比较大比例的结构,尤其自重占很大比例的大跨径桥梁,其综合经济技术效益十分显著。

发达国家在高强轻骨料混凝土的研究和应用上已取得很大进展和工程实践经验。美国已用轻骨料混凝土修建了几百座桥梁。挪威是世界上轻骨料混凝土应用最先进的国家之一,自1987年以来,已用高强轻骨料混凝土建造了11座桥梁,强度等级为LC55~LC60,其中1999年建成的Stolma桥和Raftsund桥是当时世界上跨度最长的悬臂桥,主跨分别为301m和298m。

20世纪90年代以来,我国高强轻骨料的生产取得突破性进展,可以配制出密度等级为1900、强度等级为LC40~LC60的高强轻骨料混凝土,但对材料性能、结构性能、施工性能、设计方法、施工控制等缺乏系统深入的研究,使高强轻骨料混凝土在实际工程应用时缺乏足够的可靠依据,影响到高强轻骨料混凝土的推广应用。国内目前尚未有在跨径100m以上的大跨桥梁主结构中使用轻质混凝土的工程实例,在建筑工程中的应用比例也不高。

在西部交通建设科技项目“轻质混凝土用于大跨径桥梁的研究”(项目编号:2002-318-767-31)的支持下,清华大学与云南省公路科学技术研究所等有关方面配合,对高强轻骨料混凝土的材料力学性能、变形性能、长期受力性能和结构设计计算方法展开了系统全面的研究。本书汇总了这些研究成果,希望对从事轻质混凝土的研究、设计和工程技术人员有所帮助。

除本书的课题组外,直接参与本项目研究工作的有郭玉顺、丁建彤、冯鹏、逯晔、刘英奎、李渝军、黄盛楠、宋培晶、王振宇等。在本书课题的研究中,云南省公路科学技术研究所的余庆平、粟海涛等对本项目的实施和开展给予了大力支持,并提供了工程应用技术支

持,此外中国建筑科学研究院的徐有邻、程志军、王晓锋等对本书课题的有关研究工作也给予了大力支持,作者在此对他们表示衷心感谢。

由于水平有限,本书还会存在不足之处,望读者给予指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 轻骨料混凝土的定义和类别	1
1.2 轻骨料混凝土结构工程应用概况	2
1.3 轻骨料混凝土应用中的问题	4
第二章 轻骨料混凝土的材料性能	7
2.1 破坏机理	7
2.2 抗压强度	7
2.3 抗拉强度试验研究	8
2.4 弹性模量	12
2.5 受压应力-应变关系	13
2.6 受拉应力-应变关系	15
2.7 强度换算关系	19
第三章 梁的正截面受弯性能	24
3.1 概述	24
3.2 试验研究	24
3.3 受弯承载力计算	28
3.4 小结	30
第四章 梁的斜截面受剪性能	31
4.1 概述	31
4.2 试验研究	37
4.3 斜向开裂荷载计算分析	57
4.4 无腹筋梁抗剪承载力计算分析	63
4.5 有腹筋梁抗剪承载力计算分析	69
4.6 正常使用状态斜裂缝控制	77
4.7 小结	79
第五章 黏结锚固	82
5.1 概述	82
5.2 拔出试验	88

5.3	钢筋内贴片拔出试验	103
5.4	数值模拟	110
5.5	小结	119
第六章	轻骨料混凝土的收缩和徐变	122
6.1	概述	122
6.2	收缩试验研究	130
6.3	徐变试验研究	146
6.4	小结	154
第七章	高强轻骨料混凝土梁长期变形	157
7.1	概述	157
7.2	长期变形的计算方法	159
7.3	试验方案	162
7.4	试验结果及有限元分析	166
7.5	建议公式	173
第八章	预应力轻骨料混凝土梁的预应力损失	179
8.1	概述	179
8.2	收缩徐变预应力损失的计算方法	180
8.3	试验研究	184
8.4	试验结果及有限元分析	187
8.5	预应力损失计算方法的对比	193
第九章	轻骨料混凝土刚构桥的受力性能	197
9.1	概述	197
9.2	模型试验设计	198
9.3	预应力张拉及长期加载试验	230
9.4	加载试验	232
9.5	有限元分析	251
9.6	长期性能	267
9.7	试验研究结论	268
附录 A	砂轻混凝土梁抗剪试验资料	270
附录 B	收缩和徐变模型	277

第一章 绪 论

1.1 轻骨料混凝土的定义和类别

我国《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ 51—2002)^[1]对轻骨料混凝土的定义为：“用轻粗骨料、轻砂(或普通砂)、水泥和水配制而成的干表观密度不大于 1950kg/m³ 的混凝土。”由普通砂或部分轻砂做细骨料的称为砂轻混凝土，全部由轻砂做细骨料的称为全轻混凝土。表 1.1 列出了一些国外规范对轻骨料混凝土的定义。

表 1.1 轻骨料混凝土定义^[2]

规范名称	定义
ACI 318—95(美国)	使用轻骨料并且气干密度不超过 1840kg/m ³ ，不使用普通砂的称为“全轻混凝土”，全部细骨料采用普通砂的称为“砂轻混凝土”
ACI 213—87(美国)	结构轻骨料混凝土 28 天圆柱体抗压强度不低于 17.24MPa，气干密度不超过 1850kg/m ³ ，全部或部分骨料采用轻骨料
UNI 7548—part 1(意大利)	轻骨料混凝土是由轻骨料代替部分或全部普通骨料，轻骨料混凝土的密度不大于 1850kg/m ³
PN-91/B—06263(波兰)	由水泥、轻骨料、水、矿物添加剂和化学外加剂配制而成的干表观密度不大于 2000kg/m ³ 的混凝土
ENV 1992-1-4	由颗粒容重小于 2000kg/m ³ 的人造或天然轻骨料制成的绝干密度小于 2000kg/m ³ 的混凝土
prEN 206	全部或部分骨料采用轻骨料，干表观密度大于 800kg/m ³ ，小于 2100kg/m ³

关于高强轻骨料混凝土与普通轻骨料混凝土的划分标准，国内外略有区别。曹刚^[3]认为强度等级达到 LC30 及以上者称为高强轻骨料混凝土；1991 年 Zhang Min-Hong^[4]则定义圆柱体抗压强度 $f'_c = 17.24 \sim 27.58\text{MPa}$ 的为低强， $f'_c = 27.58 \sim 41.37\text{MPa}$ 的为中强， f'_c 大于 41.37MPa 的为高强。根据我国轻骨料混凝土应用的实际情况，强度等级达到 LC40 及以上的称为高强轻骨料混凝土。

轻骨料可以使用天然轻骨料(如浮石、凝灰岩等)、工业废料轻骨料(如炉渣、粉煤灰陶粒、自燃煤矸石等)、人造轻骨料(页岩陶粒、黏土陶粒、膨胀珍珠岩等)等。因陶粒为人造轻骨料，质量稳定可靠，因此目前使用的轻骨料主要是陶粒。与普通骨料(天然密实石子)相比，陶粒的密度小、强度低且弹性模量小。

本书主要研究以陶粒作为轻骨料、并用于受力构件的结构用高强轻骨料混凝土。

1.2 轻骨料混凝土结构工程应用概况

1.2.1 国外应用

在西方发达国家,高强轻骨料混凝土的应用比较多^[5~7]。美国已用轻骨料混凝土修建了几百座桥梁,在高层建筑结构中的应用也非常广泛,如美国著名的休斯敦贝壳广场大厦,用高强轻骨料混凝土取代普通混凝土后,取得了显著的效益。

挪威是世界上轻骨料混凝土应用水平最先进的国家之一。自1987年以来,已用高强轻骨料混凝土建造了11座桥梁,强度等级为LC55~LC60,其中1999年建成的2座预应力混凝土刚构桥(Raftsund桥和Stolma桥)是当时世界上跨度最长的连续刚构桥,主跨分别为298m和301m^[8,9]。图1.1是挪威Stolma桥,主跨中部184m采用LC60高强轻骨料混凝土。此外,挪威还用高强轻骨料混凝土修建了很多石油平台,如1996年修建的Heidrun TLP浮体石油平台等,均取得了显著的经济效益。

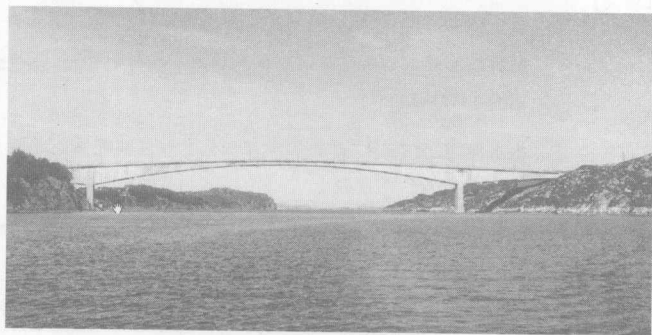


图 1.1 挪威的 Stolma 桥

1.2.2 国内应用

轻骨料混凝土在国内也得到了广泛应用。早在20世纪50年代,我国就开始研究将轻骨料混凝土用于桥梁工程,如湛江大桥、山东黄河大桥、南京长江大桥和九江长江大桥公路桥桥面板等都使用了轻骨料混凝土,但这些轻骨料混凝土的强度都比较低,强度等级为LC25~LC30^[10,11],主要用来减轻桥梁上部结构重量。

20世纪90年代以来,我国高强轻骨料混凝土的研究取得突破性进展,并在高层、大跨房屋建筑和桥梁工程中的应用越来越多。例如,珠海国际会议中心20层以上的结构全都采用LC40级轻骨料混凝土;阜新22层的商业大厦、本溪24层的

建溪大厦的主体结构采用了 CL30 级天然煤矸石轻骨料混凝土;卢浦大桥部分引桥使用了 LC30~LC40 级的轻骨料混凝土^[12]。

2000 年竣工的天津永定新河大桥南北引桥,是我国目前轻骨料混凝土用量最大、强度等级最高的桥梁,总长度约 1.2km,原设计方案为普通混凝土预应力箱梁结构,经优化设计后由密度等级 1900 级的 LC40 级高强轻骨料混凝土取代普通混凝土,桥面也采用轻骨料混凝土,跨度由原来的 24m 增至 35m^[13]。

1.2.3 经济性评价

高强轻骨料混凝土在桥梁应用中具有很好的综合技术经济效果。尽管高强轻骨料混凝土单方造价比同强度的普通混凝土高,但由于减轻了结构自重,可使下部结构断面减小,并降低基础造价。随着高强轻骨料混凝土的广泛应用,单方造价必然会进一步降低,其综合经济优势将更高。

表 1.2 是天津永定新河大桥总长约 1.2km 的南北引桥采用高强轻骨料混凝土的优化设计方案与采用普通混凝土的原设计方案的工程量对比,可见采用高强轻骨料混凝土后,下部结构的混凝土量和钢筋用量大幅减少,工程总造价节约了 11.3%^[13]。

表 1.2 天津永定新河大桥的南北引桥优化设计前后的工程量比较^[13]

	项目	单位	原方案工程量	优化方案工程量
上部结构	混凝土	m ³	12 135	13 087
	普通钢筋	t	2133	2288
	预应力钢筋	t	521	356
	锚 具	套	6880	2288
	沥青混凝土	m ³	2228	—
	铺装混凝土	m ³	2228	—
结构下部	混凝土	m ³	16 358	6354
	普通钢筋	t	806	396

美国 T. Y. Lin 国际咨询公司设计了多座轻骨料混凝土桥梁。在他们受美国联邦高速公路管理局委托制定的“轻骨料混凝土桥梁设计指南”中^[14],对采用变截面非等高箱形梁的分段悬臂拼装连续刚构桥进行了经济分析,认为这种桥使用轻骨料混凝土后,所需预应力筋比使用普通混凝土减少 21%左右,基础、配筋及桩基等下部结构的混凝土用量也可降低约 20%。

挪威修建的 Rugsund 桥,采用高强轻骨料混凝土替代普通混凝土设计后,造价比使用普通混凝土降低 10%^[15]。荷兰对约 15 座轻骨料混凝土大跨度桥梁的计算表明,这些桥的总造价(包括基础)比使用普通混凝土降低了 5%~10%^[16]。

1.2.4 应用优势

对于大跨度桥梁,恒载占有很大比重,减轻自重可以有效地降低结构内力,使桥梁跨度增大,减少桥墩数量;可以减少上部结构的预应力钢筋数量,降低基础处理的费用。LC40 以上的高强轻骨料混凝土比相同强度等级的普通混凝土轻 25%~30%,因此具有显著的综合经济效益。

对于地震区的桥梁工程,由于地震作用与上部结构的自重成正比,当采用高强轻骨料混凝土,可显著降低地震作用。

此外,与普通混凝土相比,轻骨料混凝土还具有隔热保温性能好、耐火性好、耐久性更好等优点^[17]。

1.3 轻骨料混凝土应用中的问题

1.3.1 工作性

由于轻骨料与其他组分的密度不同,800~900 级轻骨料的表观密度只有 1300~1400kg/m³,小于普通砂浆(约 2200kg/m³),因此轻骨料混凝土拌和物的分层问题比普通混凝土更严重,过大的坍落度和过分振捣会促使砂浆离开表层下沉,导致粗骨料上浮。轻骨料聚集在拌和物表面,不仅使轻骨料混凝土抹面困难,且拌和物上层缺少砂浆填充轻骨料空隙,导致混凝土匀质性降低,影响混凝土强度和耐久性。

与普通混凝土不同,轻骨料混凝土的用水量由两部分组成:轻骨料吸附水和自由水。配合比设计时,水胶比计算仅考虑自由水部分,轻骨料吸附水对拌和物流动性没有直接影响。但轻骨料吸附水在搅拌过程中会影响自由水损失,影响混凝土的坍落度。为了控制轻骨料上浮,通常需引入约 5%~7% 的空气以减小拌和用水,并控制轻骨料混凝土拌和物的最大坍落度,减少泌水和离析趋势^[18]。

1.3.2 泵送问题

与普通混凝土相比,泵送轻骨料混凝土相对较为困难,主要有两个原因:一是由于轻骨料的多孔结构,吸水率大,在泵送压力作用下,轻骨料饱和吸水率进一步增大^[19],吸水率没有达到饱和的轻骨料从浆体内吸收拌和水,砂浆中的水和空气被挤入轻骨料,使拌和物有效水灰比降低,流动性变差;二是由于轻骨料密度轻,如果拌和物流动性过大,浆体黏度低,轻骨料离析上浮严重,聚集在泵送管道的拐角或变截面位置,减小泵送管道的有效直径,容易造成泵送管道堵塞。

决定轻骨料混凝土泵送性的重要因素是骨料含水状态和浆体黏度。通过提高砂浆的黏度,如掺加增黏剂等,可以减少泌水和拌和物的分层离析;通过充分预吸

水处理,可以避免泵送过程轻骨料继续吸水,同时含水率大的轻骨料密度增加,与浆体的密度差减小。

1.3.3 特殊的施工工艺

为保证轻骨料混凝土的工作性,轻骨料需要预吸水,而普通骨料通常不需要预吸水。

1.3.4 收缩和徐变问题

轻骨料由于需要预湿,材料特性与普通混凝土不一样,对收缩和徐变的影响也不同。由于高强轻骨料混凝土比同等级普通混凝土的弹性模量小,其收缩和徐变是否会引起较大的预应力损失或较大的长期结构变形,并是否可能成为工程应用的主要矛盾,也是结构设计人员非常关心的问题。

参 考 文 献

- [1] 中国建筑科学研究院. 轻骨料混凝土技术规程(JGJ51—2002)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [2] EuroLightCon. Definition and international consensus report [Z]. Document BE96-942/R1, 1998: 18—19.
- [3] 曹刚. 高强轻骨料混凝土试验研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.
- [4] Zhang Min-Hong, Gjorv Odd E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete[J]. ACI Materials Journal, 1991, 88(3):240—247.
- [5] 孙海林,丁建彤,叶列平. 高强轻骨料混凝土在桥梁工程中的应用及发展. 第十五届全国桥梁学术会议论文集[C]. 上海:同济大学出版社,2002,12.
- [6] 丁建彤,郭玉顺,木村薰. 结构轻骨料混凝土的现状与发展趋势[J]. 混凝土,2000,12: 23—26.
- [7] ESCSI(Expanded Shale, Clay and Slate Institute). Building bridges and marine structures with structural lightweight aggregate concrete. Publication No. 4700, 2001.
- [8] 楼庄鸿译. 挪威 Stolma 桥[S]. 国外公路,2000,(1): 29—32.
- [9] 周军生,宋桂峰. 挪威 Raftsundet 桥[S]. 国外公路,2000,(5): 18—21.
- [10] 龚洛书等. 轻骨料混凝土的研究和应用文集[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1981.
- [11] 翟红侠,李美娟. 高强轻集料混凝土的发展与分析[J]. 安徽建筑工业学院学报,1997,(3):64—67.
- [12] 肖汉光,卢俊辉,高斌. 宜昌高强陶粒的应用研究. 第六届全国轻骨料及轻骨料混凝土学术讨论会论文集[C]. 2000.
- [13] 曹诚,杨玉强. 高强轻质混凝土在桥梁工程中应用的效益和性能特点分析[J]. 混凝土,2000,(9): 27—29.
- [14] FHWA(Federal Highway Administration). Criteria for designing lightweight concrete bridges[J]. Report No. FHWA/RD-85/045, McLean, VA, 1985.
- [15] Lars Toverud, Torbjørn T. Moe, Einar Hovland. Use of lightweight aggregate concrete gives a chea-

- per bridge. Proceedings 2nd International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete [C]. Norway, 2000, 416—422.
- [16] Ramakrishnan V, Bremner T W, Malhotra V M. Fatigue strength and endurance limit of lightweight concrete. Proceedings of the American Concrete Institute Symposium on "Performance of Lightweight Concrete"[C]. TX, November 14, 1992.
- [17] ACI Committee 213. Guide for structural lightweight aggregate concrete[Z]. ACI 213R-03, 2003.
- [18] Mehta P K. Concrete structural, properties and materials[M]. 祝永年等译. 上海:同济大学出版社出版, 1991.
- [19] Frank Dehn. Particular features on the production of lightweight aggregate concrete with open structure [Z]. LACER No. 3, 1998.

第二章 轻骨料混凝土的材料性能

2.1 破坏机理

混凝土的力学性能由下列三个因素决定:骨料的性能、硬化水泥浆体的性能、骨料与水泥石的黏结性能。对于普通混凝土,骨料强度通常大于水泥石强度,骨料与水泥石的界面区是普通混凝土中的最薄弱环节(图 2.1),即普通混凝土通常以界面破坏为主。而对于轻骨料混凝土,骨料强度往往小于水泥石强度,因此轻骨料混凝土往往产生骨料破坏(图 2.2),即骨料强度是混凝土强度的决定因素^[1]。

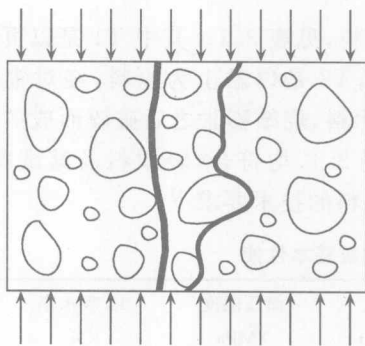


图 2.1 普通混凝土的破坏

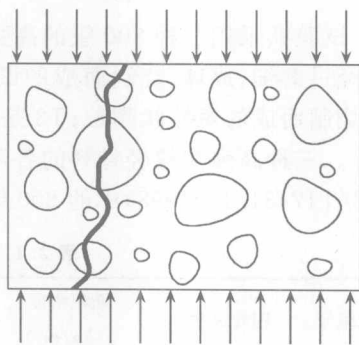


图 2.2 轻骨料混凝土的破坏

2.2 抗压强度

图 2.3 是王振宇 2005 年^[2]汇总的轻骨料混凝土抗压强度与密度的关系,可以看出轻骨料混凝土抗压强度随着密度增加而增大。

Zhang^[3]研究了密度为 1865kg/m^3 、最高强度为 100MPa 的高强轻骨料混凝土的力学特性。通过对 5 种不同类型轻骨料混凝土的研究,他认为骨料强度是控制高强轻骨料混凝土强度的主要因素。Bremner^[4]、Yang^[5]等研

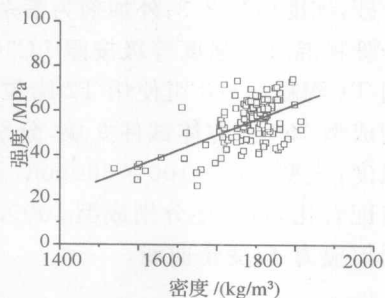


图 2.3 轻骨料混凝土抗压强度与密度的关系

究者也指出骨料强度是高强轻骨料混凝土强度的控制因素,如果轻骨料已达到强度峰值,混凝土强度会达到最大值,这时加入再多的水泥也不会提高混凝土的强度。

2.3 抗拉强度试验研究

轻骨料混凝土抗拉性能的研究还比较缺乏,一般认为轻骨料混凝土抗拉强度要低于普通混凝土。较早使用结构轻骨料混凝土的英国、美国和挪威等国家,建议轻骨料混凝土的抗拉强度在相同抗压强度等级的普通混凝土抗拉强度计算公式的基础上乘以一个折减系数^[6]。为获得高强轻骨料混凝土的抗拉性能,本课题组进行了一系列的试验研究,以下详细介绍。

2.3.1 试验原材料及混凝土配合比

试验共采用三种 800 级的高强陶粒轻骨料,见表 2.1。其中 T1 是以页岩为原料,经过磨细、成球、烧制而成的圆球形陶粒;T2 是以黏土为原料,经对辊挤出造粒、烧制而成的短柱状陶粒;T3 是以页岩为原料,烧结膨胀之后破碎而成的碎石形陶粒。三种高强陶粒轻骨料的各项指标见表 2.1,均符合《轻集料及其试验方法》(GB/T17431.1—1998)中的 800 级高强轻骨料的技术要求^[7]。

表 2.1 试验所用陶粒基本性能

陶粒编号	陶粒品种	堆积密度 /(kg/m ³)	表观密度 /(kg/m ³)	筒压强度 /MPa	1h 吸水率 /%	粒级 /mm
T1	圆球形页岩陶粒	820	1400	18.0	2.5	5~20
T2	短柱状黏土陶粒	820	1543	12.0	12.0	5~20
T3	碎石形页岩陶粒	770	1470	6.1	2.5	5~20

水泥为 P. O. 42.5 水泥;硅粉 SiO₂ 含量超过 90%;粉煤灰为 I 级灰;细骨料为天然中砂,细度模数 2.3;外加剂为萘系高效减水剂。

轻骨料混凝土强度等级按照 LC30~LC60 设计,配合比见表 2.2,其中 1~4 组使用 T1 陶粒,5~8 组使用 T2 陶粒,9~11 组使用 T3 陶粒。每组混凝土配合比分别成型 150 立方体试件 9 块,分别测量 7d、28d 立方体抗压强度和 28d 劈裂抗拉强度;成型 100×100×300mm³ 试件 3 块,测量轴心抗压强度。此外对于 5~8 组配合比,每组还分别成型 100×100×300mm³ 试件 2 块,测量轴心抗拉强度和受拉应力-应变全曲线。

表 2.2 轻骨料混凝土配合比(kg/m³)

组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
骨料	T1				T2				T3		
水泥	466	339	230	178	461	493	406	419	495	402	357
粉煤灰	46.6	82.5	124	160.5	—	—	75	—	—	—	—
硅粉	28	—	—	—	40	43	25	36	45	42	32
砂	671.6	701.6	682	696	782	795	885	885	782	709	702
陶粒	485	541	584	597	547	547	517	517	553	521	572
水	140	132	144	153	150	162	152	137	147	155	157

轻骨料混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和干表观密度均按照《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T50081—2002)的相关规定进行^[8]。单轴抗拉强度的测定在 3000kN 的 INSTRON8506 四立柱液压伺服材料实验机上采用单轴拉伸试验进行。按恒位移控制加载,加载速率为 5με/min,分别在试件四周安置 4 个变形引伸仪,数据采集及加载均采用计算机进行控制。

2.3.2 试验结果分析

1. 轻骨料混凝土强度的发展

轻骨料混凝土的有关力学性能的试验结果见表 2.3。由图 2.4 可知,轻骨料混凝土 7d 与 28d 的立方体抗压强度的比值随强度的提高而逐渐增大。当 28d 立方体抗压强度 $f_{cu,28d}$ 达到 68.2MPa 时,7d 强度 $f_{cu,7d}$ 为 $f_{cu,28d}$ 的 90%。

表 2.3 轻骨料混凝土力学性能

试件编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$f_{cu,7d}/\text{MPa}$	52.8	41.6	30.5	25.0	48.7	43.1	35.3	28.7	61.4	41.3	27.5
$f_{cu,28d}/\text{MPa}$	62.5	50.4	41.3	34.8	57.7	52.5	44.7	40.4	68.2	49.8	38.7
$f_{cu,7d}/f_{cu,28d}$	0.84	0.83	0.74	0.72	0.84	0.82	0.79	0.71	0.90	0.83	0.71
$\rho_d/(\text{t}/\text{m}^3)$	1.806	1.750	1.722	1.711	1.755	1.776	1.76	1.732	1.875	1.698	1.692
$f_{cu,28d}/\rho_d$	34.6	28.8	24.0	20.3	32.9	29.6	25.4	23.3	36.3	29.3	22.9
$f_{c,28d}/\text{MPa}$	57.0	45.9	38.8	33.0	46.3	42.0	36.8	33.2	52.0	40.1	34.2
f_{ts}/MPa	3.48	3.01	2.69	2.39	2.67	2.67	2.81	2.54	3.31	2.67	2.28
f_t/MPa	—	—	—	—	3.29	3.11	2.72	2.64	—	—	—

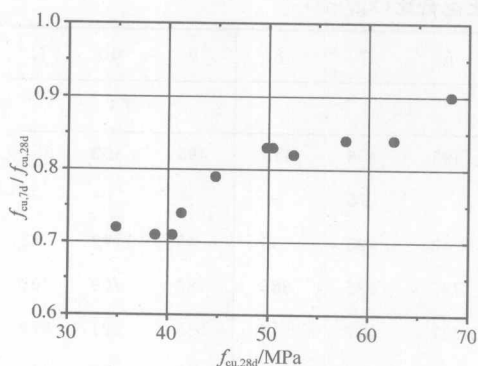


图 2.4 轻骨料混凝土强度发展

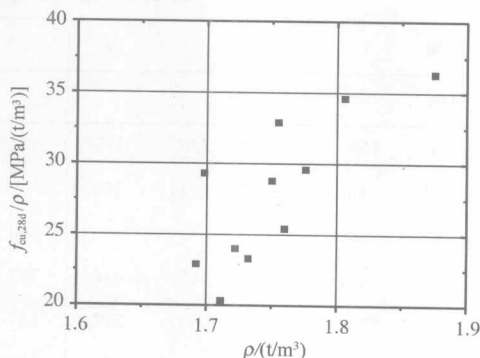


图 2.5 轻骨料混凝土的比强度

2. 轻骨料混凝土的“比强度”

混凝土立方体抗压强度与其干表观密度 ρ_d 的比值称为“比强度”。由图 2.5 可见,随着混凝土的干表观密度从 1700 级提高到了 1900 级,混凝土强度也得到提高。比强度随着混凝土抗压强度的提高而增加,表明以各种 800 级高强陶粒配制的高强混凝土将具有较好的经济效益,这与其他学者的研究结论一致^[9,10]。

3. 轻骨料混凝土的抗拉性能

由于轴心抗拉试验条件较为苛刻,所以一些学者研究轻骨料混凝土的抗拉强度时,采用的是更加简便易测的劈拉强度。对于 $f_{cu}=15\sim43\text{MPa}$ 的普通混凝土,我国混凝土基本力学性能研究组根据试验结果回归分析给出的轴心抗拉强度 f_t 与劈裂抗拉强度 f_{ts} (图 2.6)的经验公式为^[11]

$$f_t/f_{ts} = 1.368f_{cu}^{-0.083} = 1.09 \sim 1.0 \quad (2.1)$$

对于轻骨料混凝土,根据表 2.3 的抗拉强度试验结果和李平江等(2004)^[9]的试验数据回归分析后得到的轴心抗拉强度 f_t 与劈裂抗拉强度 f_{ts} 的经验公式为

$$f_t/f_{ts} = 1.12 \quad (2.2)$$

为了更好的和其他学者的研究结果进行比较,进一步对轻骨料混凝土的劈裂抗拉强度 f_{ts} 和立方体抗压强度 f_{cu} 进行回归分析,结合李平江等^[9,10]的试验结果,得到关系式

$$f_{ts} = 0.25f_{cu}^{0.63}, R^2 = 0.89 \quad (2.3)$$

我国混凝土基本力学性能研究组 1977 年^[11]给出的普通混凝土的劈裂抗拉强度与立方体抗压强度 f_{cu} 的关系为 $f_{ts}=0.19f_{cu}^{0.75}$ 。由图 2.7 可知,轻骨料混凝土的劈裂抗拉强度要比相同强度等级的普通混凝土低。当立方体抗压强度 $f_{cu}=60\text{MPa}$ 时,轻骨料混凝土的劈裂抗拉强度要比普通混凝土低约 20%。