

宁夏自然科学基金资助项目 (NZ13002)

宁夏大学人才引进科研启动基金 (BQD2012005)

粉煤灰混凝土力学性能的 试验研究及其强度预测式

张文博 毛明杰 著

中国矿业大学出版社

宁夏自然科学基金资助项目(NZ13002)

宁夏大学人才引进科研启动基金(BQD2012005)

粉煤灰混凝土力学性能的试验研究 及其强度预测式

张文博 毛明杰 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书以现场环境下浇筑和养护的粉煤灰混凝土的力学性能为中心展开研究讨论。在对不同季节条件下粉煤灰混凝土的热力学和物理力学性能进行试验研究的同时,通过文献综述,提出了粉煤灰混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的预测式。以试验和分析结果为例进行了粉煤灰混凝土结构的温度应力解析,证实了粉煤灰的掺加有利于提高混凝土构件的抗裂性能。

本书内容翔实、衔接紧凑、层次分明,有较强的工程实用性和研究参考价值,对粉煤灰混凝土的设计、施工和管理具有一定的指导作用。

图书在版编目(CIP)数据

粉煤灰混凝土力学性能的试验研究及其强度预测式/张文博,
毛明杰著. — 徐州:中国矿业大学出版社,2015.11

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2794 - 2

I. ①粉… II. ①张… ②毛… III. ①粉煤灰混凝土—力学性能—实验研究 IV. ①TU528.2-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第192264号

书 名 粉煤灰混凝土力学性能的试验研究及其强度预测式

著 者 张文博 毛明杰

责任编辑 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 850×1168 1/32 印张 4.875 字数 200 千字

版次印次 2015 年 11 月第 1 版 2015 年 11 月第 1 次印刷

定 价 20.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

目前,我国已成为世界最大的排灰国,燃煤热电厂所排放的粉煤灰总量仍在逐年增加。对粉煤灰进行综合利用已成为我国经济建设中一项重要的技术经济举措。其中,粉煤灰在混凝土中的有效利用相关研究和实践已持续近 100 年,粉煤灰掺加到混凝土中,其环境效益、经济效益和社会效益已为人所共识,很长一段时期以来,研究者们已主要将目光转移到粉煤灰对混凝土的和易性和力学性能等的贡献上。随着研究的不断深入,先后出现了利用粉煤灰的高流动混凝土、耐高温混凝土以及大体积粉煤灰混凝土等。迄今为止,虽然粉煤灰替代部分水泥应用于混凝土中可降低混凝土的初期温度应力,但混凝土的早龄期力学性能也随之下降,粉煤灰对早龄期混凝土温度开裂的影响仍未明确。而长龄期粉煤灰混凝土的力学性能增长又与养护条件直接相关,对于实际粉煤灰混凝土构件的力学性能把握也尚不充分。因此,在基础设施建设和城镇化发展的大背景下,对粉煤灰混凝土的热力学性能和全龄期物理力学性能的研究仍是目前一项重大而又紧迫的课题。

本书在对不同季节条件下全龄期粉煤灰混凝土力学性能进行试验研究的基础上,通过文献综述提出了全龄期粉煤灰混凝土

的抗压强度预测式,并根据混凝土抗压和劈裂抗拉强度的关系建立了劈裂抗拉强度预测式。作为试验结果和预测式的应用案例,进行了粉煤灰混凝土构造物的温度应力解析,定量分析了粉煤灰混凝土的抗裂性能。主要内容如下:

① 对以往研究中关于粉煤灰混凝土力学性能的进展进行了概述,整理了目前为止的研究和实际应用中粉煤灰混凝土的现状和问题点。重点对温湿度等养护条件对粉煤灰混凝土力学性能的影响,以及粉煤灰混凝土力学性能预测及温度应力解析进行了文献综述。

② 利用简易绝热温升试验方法考察了夏季、秋季和冬季环境下混凝土的绝热温升速率和最终温升量等热力学性能。开发了可直接测试混凝土纯抗拉强度和抗拉弹性模量的单轴抗拉试验机,以早龄期混凝土的单轴抗拉强度为中心展开了一系列力学性能试验研究。根据积算温度计算而来的有效龄期对不同季节条件下现场养护混凝土抗压、劈裂抗拉、单轴抗拉强度和拉压弹性模量进行了分析和比较。结合以往研究结果和各国规范公式重点分析了单轴—劈裂抗拉强度以及拉压弹性模量之间的关系。

③ 收集了利用相当于Ⅱ类粉煤灰的混凝土的力学性能数据,通过抗压强度与灰水比的关系和 Goral 曲线确定了龄期 7 d 内的抗压强度预测式,并利用各龄期与龄期 7 d 的强度比建立了 7~365 d 粉煤灰混凝土抗压强度关系式。通过抗压强度与劈裂抗拉强度的相关关系提出了粉煤灰混凝土劈裂抗拉强度的简易预测式。通过与各国规范公式的比较分析,论证了所提出公式的正确

性和可行性。

④ 以上述试验和分析结果为参数,通过变换浇筑和养护条件以及粉煤灰对水泥的置换率等进行了两个系列粉煤灰混凝土构造物的温度应力解析,对不同条件下粉煤灰混凝土绝热温升和最小抗裂能力指数等进行了定量考察。

本书撰写分工如下:第2、6章由毛明杰撰写,计6万字,其余章节由张文博撰写,计14万字。

限于作者的学识和经验,书中难免存在一些不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

2015年6月于宁夏大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的与内容	7
1.3 本书构成	9
1.4 本章参考文献	11
第 2 章 粉煤灰混凝土的力学特性及温度应力解析文献综述	14
2.1 粉煤灰混凝土的力学性能	14
2.2 粉煤灰混凝土的强度预测	24
2.2.1 粉煤灰混凝土的抗压强度	25
2.2.2 粉煤灰混凝土的劈裂抗拉强度	30
2.3 混凝土温度应力解析	34
2.4 本章参考文献	36
第 3 章 试验方法及试验条件	52
3.1 概述	52
3.2 试验方法	53
3.2.1 试验内容及养护方法	53
3.2.2 单轴抗拉试验	55
3.2.3 圆环约束试验、绝热温升试验及其他	57

3.3	试验材料与配合比	61
3.4	养护条件	63
3.5	本章参考文献	65

第4章 现场条件下浇筑和养护的粉煤灰混凝土的力学性能

		67
4.1	新拌混凝土性能及圆环约束试验结果	67
4.2	绝热温升试验结果	69
4.3	应变计测结果及力学性能的计算	72
4.3.1	钢筋、混凝土应变分布	72
4.3.2	混凝土抗拉力学性能的计算方法	77
4.4	抗压强度	78
4.5	劈裂抗拉及单轴抗拉强度	83
4.6	抗拉、抗压弹性模量	87
4.7	本章小结	93
4.8	本章参考文献	94

第5章 粉煤灰大范围置换水泥混凝土的强度预测式

5.1	概述	98
5.2	强度数据的收集和分析	99
5.2.1	强度数据的收集方法	99
5.2.2	试件形状和尺寸的换算	99
5.2.3	强度值的分析方法	102
5.3	抗压强度的简易预测式	103
5.3.1	强度比	103
5.3.2	简易预测式的提出	105
5.3.3	简易预测式的评价	110

目 录

5.4	劈裂抗拉强度预测式	112
5.5	本章小结	114
5.6	本章参考文献	115
第 6 章	粉煤灰混凝土温度应力解析	125
6.1	概述	125
6.2	解析方法	126
6.2.1	解析模型及边界条件	127
6.2.2	解析用混凝土性能	128
6.3	解析结果与分析	130
6.3.1	温度解析结果	130
6.3.2	抗裂能力指数	133
6.4	本章小结	138
6.5	本章参考文献	139
第 7 章	结论与展望	140
7.1	研究总结	140
7.2	研究展望	143
后记		145

第1章 绪 论

1.1 研究背景

火电厂所产生的粉煤灰因具有火山灰活性,且能满足混凝土的材料性能要求,在混凝土中发挥着非常重要的作用。作为细骨料或水泥的替代品时,粉煤灰可改善新拌混凝土的流变性能,改变硬化后混凝土的早龄期强度及长期强度,减小混凝土的孔隙率、增强其耐久性等。同时,粉煤灰混凝土的大量应用还对混凝土建筑物和构造物的造价及环境保护等有积极的贡献^[1,2]。

关于粉煤灰混凝土(Fly Ash Concrete)的研究与应用,已有近百年的历史。粉煤灰所具备的诸多优势使其一直在混凝土中被广泛应用^[1]。

(1) 作为水泥的替代品而降低成本

粉煤灰代替混凝土中的部分水泥后,一方面减少了水泥制造过程中的能源消耗及CO₂的排放,另一方面对粉煤灰进行了有效利用,减少了粉煤灰的占地成本以及对环境的污染。但受地域限制,粉煤灰的流通存在局限性,其有效利用也存在一定的限界^[3]。包括中国在内的很多国家和地方政府十分重视粉煤灰的有效利用。国内外一些地方政府将本部门、电力部门和混凝土生产厂家联合起来,形成了完善的粉煤灰混凝土的供给、应用体制。很多研究组织和个人均对粉煤灰应用于混凝土时的二氧化碳削减效果进

行了研究。研究结果表明,粉煤灰等质量替代 20% 的水泥,混凝土达到同一设计强度时,可将二氧化碳排放量削减 10% ~ 15%^[4,5]。从建筑物的整个生命周期费用角度来看,使用粉煤灰替代部分水泥,无疑降低了混凝土的用料成本和环境改善成本。

(2) 龄期 91 d 后的强度增进效果

粉煤灰的主要化学成分主要是 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 和 Fe_2O_3 。粉煤灰掺入混凝土后,溶出的 Si 和 Al 等还能与水化反应主产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 继续发生火山灰反应 (Pozzolanic reaction), 生成 Ca—Al—Si 水化物,促进混凝土长期强度的进一步增长。

(3) 抑制混凝土的早龄期温升

已有研究结果表明,龄期 28 d 时粉煤灰的火山灰反应只完成约 10%^[6]。也就是说,早龄期内几乎不发生火山灰反应,以粉煤灰替代部分水泥将大大减少混凝土的温度上升。特别是对于大体积粉煤灰混凝土来说,粉煤灰的掺入可在很大程度上减小温度开裂的风险。

(4) 改善新拌混凝土的和易性

粉煤灰为微细的球形粉末,掺入混凝土中可使新拌混凝土的流动性明显改善,从而提高混凝土浇筑、振捣及成型的工作效率,缩短建设周期。另外,有研究指出,混凝土中掺入密度较小的粉煤灰后,水与胶体的容积比下降将使新拌混凝土的黏聚性进一步提高。近年来,随着混凝土建筑物、构造物的高性能化发展,粉煤灰的这种优异性也广泛应用在配置自充填混凝土等方面^[4,7]。

(5) 提高混凝土的耐久性

粉煤灰用于混凝土后,对混凝土的耐久性有改善作用。主要表现在达到所需的和易性时混凝土的单位水量有所减少,且通过火山灰反应使其内部组织更加致密,从而降低混凝土的碳化速率,提高其抗蚀性。

另外,粉煤灰混凝土因还具有抑制碱骨料反应、增强水密性和化学抵抗性等特点,自1930年以来一直被广泛应用于混凝土建筑物和构造物中^[8,9]。

粉煤灰不但可以改善混凝土的和易性和力学性能,还具有显著的经济效益、环境效益和社会效益。为推广和普及粉煤灰在混凝土中的应用,很多国家都出台了相应的规范和标准等。例如我国国家规范《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2005)和《粉煤灰综合利用管理办法》(2013年修订)等,以及日本 JISR 5213—2009,美国 ASTM C595 和 ASTM C1157 等标准。很多国家还专门出台了促进粉煤灰在混凝土中应用的标准,例如日本 JIS A6201,美国 ASTM C618 及欧盟 EN450—1 等^[2,10-12]。

目前为止,粉煤灰混凝土主要用在大坝、防波堤、桥台、道路和构造物基础等的建设中。近年来,基于其良好的黏聚性和充填性,混凝土在隧道喷射混凝土和衬砌中的应用逐渐增多^[2,4]。随着粉煤灰混凝土的广泛应用,关于其相关性能的研究也层出不穷。1985年,CANMET 开发了粉煤灰等体积置换 50%水泥的大体积粉煤灰混凝土(High Volume Fly Ash Concrete)^[1]。W. S. Langley 等^[13]以 ASTM 规范中 F 类粉煤灰等质量置换 56%水泥的混凝土为对象,对新拌混凝土及硬化混凝土的力学性能进行了系列研究。D. P. Bentz^[14]与 T. R. Naik 等^[15]分别对利用粉煤灰的高性能砂浆及混凝土进行了深入研究。此外,S. Yoshioka 等^[16]与 Y. Kato 等^[17]也分别对大体积粉煤灰混凝土的绝热温升性能及铺装混凝土的力学性能进行了研究。

关于粉煤灰混凝土的应用与研究虽然取得了丰硕的成果,但值得注意的是,粉煤灰的理化性能在很大程度上受到煤炭产地及发电设备等的影响。如表 1-1 所示,对于其分类方法,包括我国在内,许多国家都存在很大差异,为尽量阐述各国规范的不同,表中

省略了常见的我国对粉煤灰的分类方法。

表 1-1 混凝土用粉煤灰的分类^[2]

国家名		日本				欧盟			美国		
规范		JIS A6201				EN450—1			ASTM C618		
修订年		1999				2005			2008		
分类	I	II	III	IV	依据烧失量分类			N	F	C	
					A	B	C	天然 火山灰	无烟炭 沥青炭	褐煤、亚沥 青炭	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ / %						≥70			≥70		≥50
SiO ₂ / %		≥45									
SO ₃ / %						≤3			≤4	≤5	
含水量 / %		≤1 %				N/A			≤3		
烧失量 / %		≤3	≤5	≤8	≤5	≤5	2≤ ≤7	4≤ ≤9	≤10	≤6	≤6
Cl ⁻ / %						≤0.1					
游离 CaO / %						≤2.5					
活性 CaO / %						≤10					
MgO / %						≤4					
R ₂ O / %						≤5					
密度 / (g/cm ³)		≥1.95									
细度	比表面积 /(cm ² /g)	5 000 ≤	2 500 ≤	2 500 ≤	1 500 ≤						
	45 μm 筛分残余 /%	≤10	≤40	≤40	≤70	根据粉末度区分 N类 ≤40 S类 ≤12			≤34		

通过对以往研究的总结分析,为进一步促进粉煤灰在混凝土中的应用,认为除应对粉煤灰的分类进行深入研究外,至少还应对以下几个方面进行深入探究^[1,9,10,18]。

(1) 粉煤灰的火山灰反应

- ① 火山灰反应中粉煤灰粒子的尺寸效应;
- ② 非晶质相(玻璃质相)的含有量及其特性对火山灰反应的影响;
- ③ 粉煤灰的化学成分(特别是碱等微量成分)对火山灰反应的影响;
- ④ 未燃烧碳及其他成分对混凝土的空气量和化学添加剂的影响。

(2) 新拌混凝土的性能

- ① 缓凝作用的改善;
- ② 流变性能及和易性。

(3) 硬化混凝土的性能

- ① 早龄期混凝土的温升抑制效果以及温度对火山灰反应的影响;
- ② 养护方法的影响;
- ③ 火山灰反应生成物的形态与构成;
- ④ 渗透性;
- ⑤ 耐磨耐腐蚀性;
- ⑥ 中长龄期大体积粉煤灰混凝土的性能。

(4) 与其他混合材和混合剂的互掺

- ① 粉煤灰成分对混合剂的影响;
- ② 高性能减水剂在大体积粉煤灰混凝土中的作用;
- ③ 为增强粉煤灰混凝土的早龄期性能而掺加的混合材料的影响;

④ 不同环境下与其他混合材料互掺时粉煤灰混凝土的力学性能。

(5) 耐久性

① 碱骨料反应引起混凝土胀裂的抑制效果；

② 钙含量较高的粉煤灰混凝土；

③ 抗硫酸盐腐蚀性能；

④ 粉煤灰对海工混凝土或其他侵蚀性环境中混凝土性能的贡献程度。

为进一步明确粉煤灰混凝土的性能,有关的国际会议、研究发表及各国规范的更新都十分频繁,取得了很好的成效。但值得肯定的是,现有的规范、标准及品质管理手段等仍有一定的提升空间。通过研究与实际应用,找出合理的分类方法和高精度的测试方法,以及可以正确、快速地把握粉煤灰混凝土各种性能的方法仍需探索。

首先,在混凝土构造物的施工管理中,早龄期粉煤灰混凝土的强度增长对于构件脱模、脚手架拆除等缩短施工周期的主要步骤十分重要,也是混凝土构造物早期开裂抵抗性的根据。但目前,虽然普遍认为粉煤灰混凝土的早龄期强度低于无粉煤灰置换混凝土(以下简称为无置换混凝土),但仍只停留在定性评价上,科学研究中尚需足够的数据支撑。如前所述,粉煤灰混凝土的力学性能随粉煤灰理化成分、置换率、所处自然环境条件和养护方法的变化起伏较大。因此,一般以与构造物同条件养护的混凝土试块的抗压强度为依据判断构件混凝土的力学性能。

其次,粉煤灰混凝土的长期强度有望进一步增长,但因其影响因素众多,目前为止仍没有定量化的研究成果。T. Yamamoto 和 T. Kanazu^[18]的研究结果表明,龄期 91 d 后因火山灰反应程度的提高,粉煤灰混凝土的强度将有较大提升。但吴富荣等^[19]的研究

结果却表明,使用C类粉煤灰的混凝土,其龄期91 d内的火山灰反应不超过12%~16%。若将长期强度而非28 d强度作为设计强度,则有必要对粉煤灰混凝土的长期强度进行贴切的评价。在实际工程中,关于粉煤灰混凝土强度增长特性的评价,一般要先在试验室进行室内试验确定其增长曲线,而后还需在实际环境下通过实际构件进行确认才能应用于混凝土建筑物^[2,10,20]。

另外,粉煤灰在抑制混凝土温升方面有较明显的效果,但粉煤灰混凝土的早龄期强度偏低,由此也可能引发粉煤灰混凝土构件开裂抵抗性较低的后果。关于粉煤灰混凝土的抗裂性能,已成为很多国家在混凝土结构设计及施工阶段必须通过温度解析和应力解析等手段事先确认的主控项目之一。普遍流行的做法是全盘考虑粉煤灰混凝土的力学性能、热力学性能和环境条件等,通过计算混凝土的体积变化以及由此引发的应力,最终以抗裂性能指数等对其进行定量评价^[21]。

1.2 研究目的与内容

与普通混凝土构造物相比,粉煤灰混凝土所需要的养护条件更加严格。因此,在实际环境下对粉煤灰混凝土全龄期力学性能的考察,对粉煤灰混凝土构造物的设计和施工管理等有重要作用。基于此,本研究为考察与施工现场同样养护条件下粉煤灰混凝土的力学性能,分别在夏季、秋季和冬季环境下进行了室外试验,尤其是对作为抗裂指标的抗拉力学性能进行了考察,并与抗压力学性能进行了比较分析。为准确预测混凝土的初期开裂,需正确测试早龄期(本研究将早龄期定义为龄期7 d之内,包括7 d)粉煤灰混凝土抗拉强度的真实值。另外,为从应变计算应力,对于抗拉弹性模量的测试也十分重要。但至今关于混凝土的抗拉强度的评

价,各国主要以劈裂抗拉强度试验来推定其抗拉强度。例如我国采用边长为 150 mm 的立方体试件,美国采用直径 150 mm、高 300 mm 的圆柱体试件,而日本则采用直径 100 mm、高 200 mm 的圆柱体进行劈裂抗拉试验。虽然有学者指出,劈裂抗拉强度结果与试件的形状及尺寸关系不大,主要与劈裂面面积有关^[22-24],但这种方法在推定混凝土的抗拉强度时仍存在的问题。劈裂抗拉强度试验在理论上将混凝土假定为弹性体,在计算抗拉强度时将二轴应力状态和单轴应力状态下的试验值相混淆。另外,通过劈裂抗拉强度试验难以直接测得抗拉弹性模量,有必要通过直接拉伸试验全面测试混凝土受拉状态下的力学性能^[25,26]。因此,本书通过钢筋与混凝土黏结的单轴拉伸试验方法,对粉煤灰混凝土的拉伸变形及相关力学性能进行了研究。为考察不同养护环境下混凝土的收缩及开裂,同时进行了圆环约束收缩试验。此外,对不同浇筑环境下各混凝土的绝热温升进行了测试,考察了混凝土的热力学性能。

对于粉煤灰混凝土构造物,为加快施工进度、保证安全,确定脱模时期,对粉煤灰混凝土的强度增长的研究十分必要。因为同一等级的粉煤灰其组成成分、烧失量、粒径、养护时间和养护条件等均有较大差异,应用于混凝土时对其力学性能有不同程度的影响。因此,有必要在统一上述影响因素的前提下对粉煤灰混凝土的强度进行预测。通过文献综述,以含有被广泛使用的Ⅱ级灰的混凝土为研究对象,对包含大范围粉煤灰置换率、标准养护条件下粉煤灰混凝土的强度增长进行了整理,最终提出了粉煤灰混凝土的简易抗压、劈裂抗拉强度的预测式。

粉煤灰掺入混凝土中时,除了进行适当的养护以促进混凝土力学性能的改善以外,还可以防止和制御温度开裂。因此,以所取得的试验数据和所提出的预测式为基础进行了温度应力解析。首