

火灾后钢筋混凝土结构的 力学性能

— 吴 波 著 —

.01



科学出版社

www.sciencep.com

火灾后钢筋混凝土结构的力学性能

吴 波 著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了作者近年来从事混凝土结构火灾损伤评估与抗震修复研究的部分成果,以及国内外其他学者的相关研究工作。主要内容包括:室内火灾温度发展过程与构件内部温度场的评估方法,高温下与高温后钢筋和普通混凝土的力学性能,高温后高强混凝土的力学性能,火灾后混凝土结构的损伤评估办法,火灾后混凝土结构的剩余抗震性能,以及火灾后混凝土构件的抗震修复技术。

本书可供土建专业的科研人员、设计人员和研究生,以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

火灾后钢筋混凝土结构的力学性能/吴波著. —北京:科学出版社,2003.9

ISBN 7-03-011492-2

I. 火… II. 吴… III. 钢筋混凝土结构-耐火-力学性能
N. TU375.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 042256 号

责任编辑:杨家福 / 责任校对:钟 洋
责任印制:刘士平 / 封面设计:张 放

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>

陈海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年9月第 一 版 开本:850×1168 1/32

2003年9月第一次印刷 印张:6 1/4

印数:1—2 500 字数:162 000

定价:18.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

前 言

在众多灾种中,火灾的发生频度高居各灾种之首。国际上每年均有大量钢筋混凝土结构过火。高温后钢筋和混凝土的力学性能会呈现不同程度的降低,致使结构产生一定程度的损伤甚至严重破坏。系统地研究火灾温度场的实用评估办法,以及高温后钢筋和混凝土的力学性能,对于全面正确地评价火灾后钢筋混凝土结构的损伤状况,进而制定科学合理的修复加固策略,具有重要的理论意义和实用价值。

对此,作者就室内火灾温度发展过程与构件内部温度场的评估方法、高温后钢筋和普通混凝土的力学性能、高温后多种高强混凝土的力学性能等方面进行了较系统的试验研究和数值分析,提出了全盛期隔间内火灾温度发展的实用模型,建立了普通混凝土构件及考虑爆裂影响时高强混凝土构件的截面温度场实用评估方法,建议了高温后热轧钢筋、普通混凝土和多种高强混凝土的应力-应变本构模型。

虽然火灾后的钢筋混凝土结构在未来长期服役过程中还可能进一步遭受地震作用的破坏,但目前国内外在进行火灾后结构的损伤评估与修复加固时,通常只考虑静荷载的作用,忽略了火灾后结构抗震性能降低可能导致的安全隐患,致使修复后的结构一旦在未来遭受地震作用很可能产生严重的人员伤亡和财产损失。对此,作者近年来还就火灾后钢筋混凝土结构的剩余抗震性能及抗震修复技术进行了探讨,取得了一些初步的研究结果。

除作者自己的研究工作上,本书还适当介绍了国内外其他学者的部分研究成果,目的是使读者对本研究领域有一个更全面的了解。本书内容中涉及作者研究工作的部分曾得到国家自然科学基金项目和黑龙江省自然科学基金项目的资助,相关研究成果“混

“混凝土结构火灾损伤评估与抗震修复的关键技术”曾于 2001 年通过国家建设部组织的鉴定,并于 2002 年获广东省科学技术二等奖。作者在从事这部分研究工作时曾得到导师王光远院士和欧进萍研究员的热情鼓励 and 大力支持,他们曾给予作者很多的建议和指导,使作者受益匪浅;同时作者还得到李惠研究员、林立岩总工以及作者的研究生——马忠诚博士、袁杰博士、宿晓萍硕士、周文松硕士的大力协助,他们均对本书做出了贡献。特借此机会对自己的恩师和所有合作者表示诚挚的谢意。

中国建筑科学研究院防火所的李引擎研究员对书稿进行了审查,并提出了宝贵意见,在此谨表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中的错误和疏漏之处难免,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 火灾的温度发展过程与构件内部温度场	5
1.2 高温下与高温后钢筋和混凝土的力学性能	7
1.3 高温下与高温后钢筋混凝土构件和结构的 力学性能	10
1.4 高温后钢筋混凝土构件和结构的损伤 评估与修复	13
参考文献	14
第二章 室内火灾的温度发展过程与构件内部温度场	18
2.1 室内火灾的温度发展过程	18
2.2 等效爆火时间	25
2.3 构件内部温度场	28
2.4 防火饰面层对构件内部温度场的影响	35
2.5 高强混凝土爆裂对构件内部温度场的影响	36
参考文献	40
第三章 高温下与高温后钢筋和普通混凝土的力学性能	43
3.1 高温下与高温后钢筋的力学性能	43
3.2 高温下与高温后普通混凝土的力学性能	53
3.3 高温下与高温后钢筋和普通混凝土的粘 结滑移性能	66
3.4 高温后普通混凝土力学性能的自然恢复	69
3.5 高温后普通混凝土在重复荷载作用下的 力学性能	72
3.6 高温后普通混凝土的疲劳性能	74

参考文献	76
第四章 高温后高强混凝土的力学性能	78
4.1 高温下高强混凝土的爆裂	79
4.2 高温后无约束高强混凝土的力学性能	85
4.3 高温后约束高强混凝土的力学性能	94
4.4 高温后掺 PP 纤维高强混凝土的抗压强度	106
4.5 高温(非均匀温度场)后约束高强混凝土的力学性能	111
参考文献	119
第五章 火灾后钢筋混凝土结构的损伤评估	122
5.1 火灾现场勘查	122
5.2 混凝土烧失量试验	132
5.3 火灾后钢筋混凝土构件的力学性能	135
参考文献	141
附表	141
第六章 火灾后钢筋混凝土结构的抗震性能	146
6.1 高温后钢筋混凝土柱的抗震性能试验	146
6.2 火灾后钢筋混凝土构件的恢复力骨架曲线	153
6.3 火灾后钢筋混凝土构件的轴压比广义上限值	165
6.4 火灾前、后钢筋混凝土构件的恢复力骨架曲线比较	166
6.5 火灾后钢筋混凝土框架结构的地震反应分析	167
6.6 火灾后已初步修复高强混凝土框架结构的地震反应分析	170
参考文献	183
第七章 火灾后钢筋混凝土构件的抗震修复	185
7.1 火灾后钢筋混凝土柱的增大截面修复法	185
7.2 高温后钢筋混凝土柱的抗震修复试验	189
参考文献	191

第一章 绪 论

火的发明是人类进入文明社会的标志,有效地利用火是人类文明进步的象征。然而,火一旦失去控制,发展成为火灾,就会给人类的生命财产和自然资源造成严重的损失。

火灾是一种包括流动、传热、传质和化学反应及其相互作用的复杂燃烧过程,是各种灾害中发生频率最大且极具毁灭性的灾害之一。火灾会给人类的生命财产造成极大的损失,火灾造成的直接损失仅次于干旱和洪涝,而发生的频度则位居各灾种之首^[1]。常见的火灾有建筑火灾、森林火灾、可燃材料堆场火灾、交通工具火灾等。火灾损失统计表明,发生次数最多、损失最严重当属建筑火灾^[2]。近年来,随着我国国民经济和现代化建设的发展,高层建筑不断涌现,房屋密度加大,加之大量新型材料广泛应用于建筑业以及燃气、电器的普遍使用,大大增加了建筑物发生火灾的可能性,人们预测和控制火灾的压力越来越大。城市现代化程度越高,发生火灾的隐患也就越多。

火灾时可燃物质的燃烧除释放出大量热能外,还产生大量有毒有害的烟尘。多数可燃物质属于有机化合物,主要由碳、氢、硫、磷、氮等元素所构成,如家庭和公共场所火灾的主要燃烧物木材、油漆、化纤材料、塑料、服装、装饰材料、沥青等就是如此。这些物质燃烧时释放出大量烟尘和有毒气体,它们与水蒸气混合后借着火势形成向上的热气流,向周围释放出大量有强烈气味和不同颜色的浓烟。浓烟中携带有悬浮微粒、蒸汽及根据燃烧物不同而含量不同的一氧化碳、二氧化碳、二氧化硫、氨、硫化氢、氮氧化物、氰化物等成分复杂的有毒气体,作用于人体后会引引起轻重不等的中毒表现,同时伴随着缺氧。近年来大量新型合成材料的广泛应用进一步增加了烟雾成分的复杂性,常常使人中毒昏迷,严重者甚至迅速致

人死亡,例如 2000 年圣诞夜河南洛阳东都商厦特大火灾中的 309 名遇难者全部都是被浓烟熏死的。

1978 年美国发生火灾 307 万起,损失 44 亿美元;1980 年美国发生火灾 300 万起,直接经济损失 62.5 亿美元,同年日本发生火灾 6 万多起,直接经济损失约 1460 亿日元;1989~1991 年三年间,美国因火灾造成的直接经济损失分别为 92 亿美元、82 亿美元和 100 亿美元,日本为 4500 亿日元、5200 亿日元和 7900 亿日元^[3]。英国、加拿大、澳大利亚等国家的情况与之类似。

我国的火灾损失虽然比发达国家少得多,但也相当严重,且呈现出明显上升的趋势。20 世纪 50 年代我国的年平均火灾直接经济损失为 0.5 亿元,60 年代为 1.5 亿元,70 年代为 2.5 亿元,80 年代为 3.2 亿元。进入 90 年代后,我国的火灾损失更为严重,1990~1996 年七年间,我国因火灾造成的直接经济损失分别为 5.4 亿元、5.2 亿元、6.9 亿元、11.2 亿元、12.4 亿元、11.0 亿元和 10.3 亿元^[3],其中 1994 年 11 月 27 日辽宁阜新艺苑歌舞厅火灾死亡 233 人,同年 12 月 8 日新疆克拉玛依友谊馆火灾死亡 325 人。1999 年全国发生的火灾(不含森林、草原等火灾)共有 18.86 万起,比前一年增加 4 成以上,造成 3021 人死亡,4404 人受伤,比前一年大约增长 15%,造成的直接经济损失高达 15.2 亿元。

上述情况表明,无论是发达国家还是发展中国家,火灾发生次数之多均令人吃惊。因此,各国从 19 世纪末开始就极为重视火灾问题的研究,并进行了广泛的合作,取得了大量研究成果。美国于 1890 年成立了国家火灾防护协会(National Fire Protection Association)和保险商实验室(Underwriters Laboratories),1901 年美国国家标准局(Nation Bureau of Standards)成立后陆续开展了许多与火灾有关的研究工作。1914 年美国发现其火灾损失是欧洲发达国家的 10 倍以上,于是国会资助国家标准局与其他两个机构一起开展了建筑材料的耐火性能研究,该项工作所取得的成果为美国后来的火灾研究奠定了坚实的基础。第二次世界大战以后,美国国家标准局对各种有机物的火灾安全问题以及烟气运动规律和光

谱火灾探测器等进行了研究并取得进展。1973 年一份以“美国在燃烧”为题的报告提交给了美国总统,报告中陈述了美国火灾问题的严重性以及美国对这个问题的冷漠,强调美国人需要在火灾中得到保护,并建议了具体步骤。1974 年美国组织了防止与控制火灾联合行动,并在国家标准局成立了火灾研究中心(Center for Fire Research),国家标准局更名为国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology),同年还成立了美国阻燃化学制品协会(Fire Retardant Chemicals Association)。从那以后,美国的火灾研究取得了很大进展。1990 年火灾研究中心与建筑技术中心(Center for Building Technology)合并成今天的建筑与火灾研究实验室(Building and Fire Research Laboratory),继续从事与火灾有关的研究工作。除此之外,美国许多大学(如哈佛大学、麻省理工学院、加州大学伯克利分校、马里兰大学、伍斯特理工学院等)也都先后开展了与火灾有关的研究工作,取得了丰硕的研究成果^[4~6]。

1897 年在当时的不列颠防火委员会(British Fire Prevention Committee)和火灾保险委员会(Fire Offices' Committee)主持下,英国的火灾实验场在 Regens Park 建成,该实验场可以进行各种构件的抗火性能试验和材料燃烧性能试验。1918 年英国的火灾工程师协会(Institute of Fire Engineers)成立。1935 年火灾保险委员会新的火灾试验炉在 Borehamwood 建成。第二次世界大战期间,出于战争的需要,英国加强了火灾方面的研究,其间里兹大学做了很多工作。1947 年英国火灾研究所(Fire Research Station)成立,该研究所成立后开展了大量的研究工作,为推动本领域的发展做出了重要贡献。除此之外,英国其他一些大学(如爱丁堡大学、谢菲尔德大学、帝国大学、阿斯顿大学等)也都先后开展了与火灾有关的研究工作,在钢结构抗火设计方法等方面取得重要进展。目前,英国拥有世界上最先进的建筑火灾实验室,可以对高达十层的钢结构进行足尺的抗火性能试验^[6,7]。

除了美国和英国,世界上其他国家(如日本、加拿大、瑞典、挪

威、新西兰、澳大利亚、法国、前苏联等)也先后对火灾问题进行了广泛的研究。20世纪50年代前苏联首先颁布了耐热钢筋混凝土的设计暂行指示(Y-151-56MCHIMXII),随后美国(1962)、瑞典(1983)、法国(1984)等也相继颁布了钢筋混凝土抗火的设计标准^[8]。

在我国,20世纪60年代冶金部建筑科学研究总院进行过高温下混凝土强度的试验研究,同时调研和分析了高温对厂房结构和烟囱的影响^[6,9]。1972年公安部四川消防科学研究所率先开展了结构构件的抗火性能研究,1973年该所建立了两座燃烧试验炉,对梁、板、墙等构件的耐火等级开展了试验研究^[6,10]。20世纪70年代末由冶金部建筑科学研究总院等单位编制了《冶金工业厂房钢筋混凝土结构抗热设计规程》(YS12-79),该规程给出了60~200℃范围内的设计计算方法、设计措施、材料指标等规定^[11]。80年代末,公安部天津消防科学研究所建起了大型的构件耐火试验装置,主要用于建筑产品的检验和结构构件耐火极限的研究,但它只能对梁、板等构件进行耐火极限实验,1992年该所又建成了承重柱的耐火性能试验装置^[12]。1989年火灾科学国家重点实验室在中国科技大学成立,目前该实验室拥有大型燃烧风洞、大空间火灾模型实验厅、全尺寸典型客房火灾实验台等先进的火灾试验设备^[6]。与此同时,公安部上海消防科学研究所和沈阳消防科学研究所、中国建筑科学研究院、清华大学、同济大学、浙江大学、西南交通大学、原哈尔滨建筑大学、中国人民解放军武装警察学院、江苏省建筑科学研究院等单位也先后开展了火灾报警系统、自动灭火系统、建筑排烟系统、高温下与高温后建筑材料的力学性能和热工性能,以及各类结构(如普通混凝土结构、高强混凝土结构、钢结构、组合结构)的抗火性能等方面的研究工作。

在钢筋混凝土结构抗火及其灾后损伤评估与修复方面,目前各国学者已分别就火灾的温度发展过程及构件内部温度场、高温下与高温后钢筋和混凝土的力学性能及热工特性、构件与结构在高温下的反应、构件与结构的抗火设计方法、火灾后构件与结构的

损伤评估及修复等问题进行了广泛的研究。其中大部分研究成果集中在普通混凝土材料、构件和结构方面,高强混凝土方面由于起步较晚(国外大致始于 20 世纪 80 年代末期,我国大致始于 90 年代中期),研究成果相对较少,特别是以定量形式表达的研究成果更少。

1.1 火灾的温度发展过程与构件内部温度场

研究火灾的温度发展过程,主要是把握火灾现场的气体温度随时间的变化历程以及相关因素的定量影响规律,从而为建筑结构抗火设计及火灾后结构的损伤评估与修复加固提供科学依据。火灾温度发展过程在火工程中的作用与地震地面运动在地震工程中的地位十分相似,都是导致结构发生灾害性破坏的一种“能量输入”,在各自学科领域都处于重要的基础性地位。

研究火灾的温度发展过程可以有两条途径——试验研究和数值模拟。试验研究具有直接、可靠的优点,可以较好地把握火灾温度发展过程的定性变化趋势,利用试验数据可以建立一些经验或半经验性的定量变化模型,同时还可以为数值模拟结果的检验提供依据。20 世纪 60~80 年代,国际上进行了几次比较大的火灾试验,多数均为足尺试验,获得了一批宝贵的试验数据^[8]。例如 1972 年美国哈佛大学 Emmons 等人进行了两次足尺火灾试验,建立了现代火灾试验标准,同时试验数据还为哈佛大学开发的火灾模拟软件提供了可靠的数据支持^[6,13,14]。

由于火灾试验的费用十分昂贵,加之影响火灾试验结果的因素繁多,要想完全依靠试验就各种因素对火灾温度发展过程的影响规律进行细致的研究,几乎是不现实的,此时数值模拟自然成为一种有效的选择。数值模拟时首先需要根据物理、化学、流体力学等基本原理抽象出火灾发展过程的理论模型,然后结合相应的初始条件和边界条件,利用一定的数值计算方法编程求解出火灾的温度发展过程。由于问题的复杂性,数值模拟过程中通常会采用一

定的假设以简化理论模型和求解过程,因而计算结果与实际情况之间不可避免地存在一定差异。此时,需要利用相关试验数据对计算结果的可靠性进行验证,并据此对理论模型进行完善,或者通过少量经验参数对计算结果进行修正。利用数值模拟方法可重复性好的优点,可以就各种因素对火灾温度发展过程的定量影响规律进行全面深入的探讨,从而为结构抗火设计和火灾后结构的损伤评估与修复加固提供可靠的依据。

火灾过程中产生的热量通过热辐射、热对流及热传导方式首先传递给结构的构件表面,然后通过热传导在构件内部传递,形成一个时变的构件内部温度场。随着温度升高,组成构件的建筑材料的强度、刚度、耐久性等指标明显劣化,同时相邻构件之间的相互约束还可能产生较大的温度应力,从而导致结构的变形增大,承载能力、抗震能力和耐久性能等显著降低。因此,继火灾的温度发展过程之后,构件内部温度场研究也是结构抗火及灾后损伤评估与修复领域的又一基础性工作。

在给定的火灾温度发展过程的前提下,一般可根据傅里叶导热微分方程通过数值方法获得任一时刻构件内部的温度分布。有限差分法是求解傅里叶导热微分方程的传统数值方法,求解精度较高且易于实现,但通常要求求解区域比较规则。针对这一问题,有学者将有限差分法与有限单元法结合,空间域上采用有限单元法,时间域上采用有限差分法,充分利用两者的优点来求解构件内部的时变温度场,取得了较好的效果^[15,16]。

试验结果表明,火灾中构件内部某截面上各点曾经历的最高温度可近似表示为构件表面最高温度和该截面中心点最高温度的函数,后两者可通过火灾现场检测获得^[17]。由于火灾后构件与结构的剩余力学性能主要与构件内部各点曾遭受的最高温度有关,因此利用上述函数关系即可大大方便火灾后结构的损伤评估与修复加固工作。

由于高强混凝土的内部微观结构非常致密,阻碍了高温下内部蒸汽压力的有效释放,导致火灾过程中常常出现严重的爆裂现

象。所谓爆裂,就是当高强混凝土遭受快速升温时,致密的硬化水泥浆体在高温下阻止了水蒸气的逸出,致使混凝土内部孔洞内产生相当大的蒸汽压力,当蒸汽压力超过混凝土的抗拉强度时,混凝土瞬间裂成大小不一的碎块而四处飞散,并伴有巨大的响声。试验结果表明,火灾作用下高强混凝土构件的表面爆裂深度常常可涵盖整个钢筋保护层。爆裂发生后,构件的截面尺寸减小,内部混凝土和部分钢筋直接暴露于明火中,致使构件的内部温度场发生突变。因此,在求解高强混凝土构件的内部时变温度场时,必须考虑表面混凝土爆裂所带来的影响,该问题的关键是定量确定爆裂发生的时间和爆裂深度。由于影响高强混凝土高温爆裂的因素十分复杂(如含水率、升温速率、水灰比、混凝土强度等级、外加预应力、构件截面尺寸、骨料种类、钢筋保护层厚度、养护方式、养护时间等),目前国内外学者虽然进行了大量试验,但试验结果比较离散,尚无法较准确地建立起爆裂发生时间及爆裂深度与各主要影响因素之间的定量关系。本书第 2.5 节在分析高强混凝土高温爆裂对构件内部温度场的影响时,也只是在一定近似处理的基础上对此进行了初步探讨。

1.2 高温下与高温后钢筋和混凝土的力学性能

高温下与高温后钢筋和混凝土的力学性能是钢筋混凝土结构火灾反应分析及火灾后结构损伤评估与修复加固的基础。到目前为止,国内外对高温下与高温后钢筋和混凝土的力学性能进行了大量的试验研究,同时通过微观结构分析对宏观试验结果的产生机理进行了一定的解释。

试验结果表明,高温下钢筋和混凝土的力学性能总体上呈现随温度升高逐渐劣化的趋势,主要表现为随温度升高,钢筋和混凝土的强度和弹性模量逐渐降低(其中弹性模量的降低速率通常比强度更大),混凝土的峰值应变逐渐增大,混凝土的单轴应力-应变曲线越来越扁平,钢筋和混凝土的粘结强度下降,极限滑移量增

加,混凝土的徐变明显加快。

随温度升高,高温后钢筋的强度虽然仍呈现逐渐下降的趋势,但与高温下相比已有较大程度的恢复。与钢筋不同,高温后混凝土的力学性能在短时间内通常比高温下更差,强度和弹性模量进一步下降。随着时间的推移,遭受 500~600℃ 以下高温作用后的混凝土的力学性能有可能出现部分恢复,不过不同文献对此有不同的看法,有的文献认为恢复程度比较明显,而有的学者却认为回升幅度不大,有些指标几乎没有表现出自然恢复的迹象。高温后钢筋与混凝土的粘结强度不再回升,且随受热温度升高,高温后粘结强度的降低幅度比高温下更为明显。高温后高强混凝土的耐久性损失比普通混凝土更为严重,同时也大于高强混凝土的强度损失^[18]。

影响高温下与高温后钢筋力学性能的因素主要有钢筋种类(普通热轧钢筋、高强热轧钢筋、冷拔低碳钢丝、冷拔高强钢丝等)、加热方式(裸露加热、埋入混凝土中加热等)、冷却方式(炉中冷却、空气中冷却、水中冷却等)等。影响高温下与高温后混凝土力学性能的因素则主要有混凝土强度等级(普通混凝土、高强混凝土)、骨料类型(碳酸质骨料、硅质骨料等)、加热速度、预加荷载、箍筋约束程度、冷却方式等。

目前,国内外在高温下与高温后钢筋和混凝土的力学性能研究方面普遍存在以下几个问题:

(1) 试验数据离散性很大,缺乏统一的试验标准。

从定性趋势上看,国内外有关高温下与高温后钢筋和混凝土力学性能的研究结果基本一致,但在具体定量方面却相差较大,特别是混凝土力学性能的研究结果。这一方面是由于试验过程中众多随机因素的影响,另一方面也是因为缺乏一个统一的试验标准,不同学者在试验过程中所采用的加热速度、恒温时间、冷却方式等常常互不相同,导致相互之间的试验结果差别较大。作者曾对国内不同单位完成的高温下与高温后钢筋和混凝土力学性能试验的试验数据进行过收集、整理和统计分析,初步给出了高温下与高温后

钢筋屈服强度、极限强度和弹性模量的均值,以及高温下与高温后混凝土抗压强度、峰值应变(抗压强度对应的应变)和弹性模量的均值,同时还给出了高温后钢筋屈服强度、高温下混凝土抗压强度和弹性模量、高温后混凝土抗压强度和峰值应变的概率分布模型及其相应的模型参数。但由于样本数量不足,高温下与高温后钢筋和混凝土其他力学性能指标的概率分布形式暂时还无法确定。在统计样本的收集和整理过程中,作者深切体会到试验标准不统一所带来的弊端,不仅数据的离散性很大,而且很多数据的可比性不强。

(2) 随机特性考虑不够。

虽然高温下与高温后钢筋和混凝土的力学性能不可避免地存在一定的随机性,但到目前为止国内外的研究方法却几乎都是确定性的。人们在进行结构火灾反应分析或火灾后结构的损伤评估与修复加固时,常常是将某个学者根据自己的试验数据所给出的回归公式作为高温下与高温后钢筋和混凝土力学性能的计算依据。由于回归公式只是在一定平均意义上反映了该研究者的试验结果,忽略了试验数据固有的随机性,丢掉了一些重要的统计信息,加之该研究者的试验结果仅为一家之言,因此上述做法难免有失偏颇。更为科学和合理的做法应是对国内外的大量试验结果进行挑选、归纳、整理和统计分析,将有关回归公式建立在不同学者大量试验数据的基础上,并给出相应的概率分布,然后在此基础上开展钢筋混凝土结构的随机火灾反应分析(例如构件的耐火极限将由现在的确定性量转化为具有一定概率分布的随机量),同时在火灾后结构的损伤评估与修复加固中充分考虑各主要随机因素,根据一定的可靠度要求制定相应的修复加固方案。

(3) 多轴力学性能的研究结果不足。

实际构件中混凝土常常处于多向应力状态,为了更好地进行结构火灾反应分析和火灾后结构的损伤评估与修复加固,研究高温下与高温后多向应力作用下混凝土的力学性能是必要的,这将为结构的三维非线性有限元分析奠定坚实的基础。但到目前为止,

国内外有关高温下与高温后混凝土力学性能的研究结果几乎都是针对单向受力情况,多轴力学性能的研究成果只见到极少的文献报道,与实际需要相差甚远,还有待进一步深入研究。

作为一种简化,高温下与高温后混凝土多轴力学性能的研究在某些情况下可近似转化为高温下与高温后箍筋约束混凝土的力学性能研究。但到目前为止,国内外的大部分研究成果都是针对无约束混凝土得到的,箍筋约束混凝土的研究工作极少。实际火灾过程中,钢筋混凝土构件由表及里通常存在一定的温度梯度,构件内部属于非均匀温度场情况,此时箍筋温度与内部各点混凝土的温度不完全相同,箍筋内部不同部位混凝土的温度也不完全相同,致使不同部位混凝土的力学性能劣化程度相差较大。由于箍筋对“强”、“弱”混凝土的相对约束作用不同,如何在非均匀温度场情况下合理地考虑箍筋的作用,是高温下与高温后约束混凝土力学性能研究与无约束混凝土力学性能研究之间的主要区别。作者曾对此进行过一点初步的探讨^[19],但仍有大量深入的理论和试验工作有待开展。

(4) 高强混凝土方面的定量研究结果偏少。

虽然国外和国内分别于 20 世纪 80 年代和 90 年代开始了高温下与高温后高强混凝土力学性能的研究,但大部分文献都只是根据自己的试验结果定性地给出高强混凝土力学性能随温度的变化趋势及相关因素的影响规律,可供计算分析时采用的定量模型偏少。作者曾经试图对高强混凝土构件的耐火极限进行数值分析,但苦于一时无法找到高温下高强混凝土合适的定量应力-应变本构关系,只能在一定近似基础上对高强混凝土构件的“准耐火极限”进行了初步的探讨^[12]。

1.3 高温下与高温后钢筋混凝土构件 和结构的力学性能

为了把握钢筋混凝土构件和结构的火灾行为与灾后性能,国