

# 现代混凝土结构环境模拟试验室技术

李云峰, 吴胜兴

(河海大学土木工程学院, 南京 210098)

**[摘要]** 为了在试验室人工模拟环境下进行混凝土早期特性、裂缝控制及耐久性的试验, 需对混凝土结构环境模拟试验室技术进行研究。分析了环境模拟技术在诸多领域的成功应用, 认为建设混凝土环境试验室是可行的。通过研究混凝土结构的环境模拟、试验设计、耦合环境的实现以及特种设备仪器的应用等关键技术, 提出大型多功能自动控制混凝土环境试验室的建设方案, 合理确定试验室的布局、功能、技术性能指标, 并探讨了人工气候环境试验室设备、仪器的优化配置, 为下一步混凝土耐久性、裂缝控制的环境试验研究奠定了基础。

**[关键词]** 混凝土结构; 环境试验; 耐久性; 裂缝控制; 人工气候

**[中图分类号]** TU375 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)02-0081-05

## 1 引言

混凝土结构结合了钢筋与混凝土的优点, 造价较低, 是土木工程结构设计中的首选形式之一, 其应用范围日益广泛, 不仅应用于工业与民用建筑、道路、桥梁、水利工程等建筑和构筑物, 而且越来越多地应用于海洋、严寒地区、遭受化学腐蚀等复杂工业环境及特殊建筑中。环境的恶化使混凝土结构的耐久性受到严重影响, 在施工建设和服役过程也暴露出许多值得关注的新问题。其中混凝土结构的耐久性不足致使加固维修费用高昂, 混凝土的早期开裂导致结构性能的劣化等问题尤为严重<sup>[1~3]</sup>。混凝土结构耐久性、早期开裂及裂缝控制不仅与材料内在特性有关, 更受控于各种环境参数(温度、湿度等)的变化<sup>[4]</sup>, 而现场进行混凝土耐久性试验, 周期长、费用高, 实现困难, 因此需要创建室内模拟环境进行长期的或加速的混凝土耐久性仿真研究及结构开裂机理的研究。

环境模拟技术是研究各种自然环境的人工再现技术和在模拟环境下的试验技术的一门新的综合性

工程技术。环境模拟技术吸取多门学科(热学、力学、电学、生物学、光学、医学等)和多项技术(制冷、真空、空调、加温、自动控制和计量等)的相关理论和方法, 是在解决环境模拟和环境试验的理论及实践中形成的独立的技术理论体系<sup>[5]</sup>。目前, 环境模拟技术已广泛应用于各种科学实验<sup>[6~8]</sup>, 在科学研究中具有自然界无法实现的时间可控性、条件重复性和数据精确性等突出优点, 可以大大加快试验的进程。

利用环境模拟技术, 建设大型多功能自动控制混凝土结构环境模拟室, 可以人工模拟各种大气环境、工业环境的单一因素或综合因素作用, 开展混凝土环境试验及相关理论研究。在实验室对混凝土材料、结构的基本的热学、力学、收缩、徐变、损伤等特性及其与各种气候环境、海洋环境、腐蚀环境的定量关系进行全面系统的仿真研究, 加强材料与结构的学科交叉。针对小型构件或大型结构仿真模型, 真实再现工程实际环境, 进行结构裂缝的开裂机制、开裂应力发展变化、裂缝形成、结构破坏的全过程跟踪试验研究, 达到从表观至本质、微观

[收稿日期] 2004-04-27; 修回日期 2004-07-01

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50278031)

[作者简介] 李云峰(1971-), 男, 山东广饶县人, 河海大学土木工程学院副教授, 博士生

至宏观的规律解析,裂控研究将会有较大的突破。因此研究混凝土环境模拟实验室技术是非常必要的,对保证结构的安全性、耐久性有重要意义。

## 2 环境模拟技术应用概述

环境模拟试验技术在农业、林业、生物、气象、航空航天<sup>[9~11]</sup>、车辆设备<sup>[12]</sup>、电子产品以及有关材料结构<sup>[13]</sup>等领域中都有广泛的应用<sup>[14,15]</sup>。

### 2.1 常规兵器、车辆及设备环境模拟实验室

某兵器试验中心拥有国内最大的气候环境模拟实验室,主要承担火炮、坦克、雷达、火箭、导弹、光学仪器、电子设备等军用武器装备的气候环境试验,环境模拟实验室主要有:高温湿热试验室、低温试验室、淋雨试验室、低温射击室、高温射击室、光电试验室等。

随着车辆技术的发展,为考核各种车辆在太阳辐射条件下的性能,相继建立了大型太阳辐射模拟设备<sup>[12]</sup>。奥地利维也纳亚森纳尔国际车辆试验中心建造的环境模拟室,能模拟世界各地的气候条件,能满足用户的各种特殊需要。试验站主要由静止试验室和运行试验室及其他辅助设施组成。静止试验室可完成高温、低温、湿度、雨、雪、雾及结冰等试验,运行试验室可完成太阳辐射等一定气候条件下的动态试验和制动试验。

日本三菱重工神户造船所的综合环境试验室,主要进行温、湿度日变化的模拟,试品分别经受雨、雪、雾、太阳辐射的环境试验,试品在酸雨、酸雾及固体液体悬浮微粒环境的试验以及综合性环境试验等。美国麻萨诸塞州国防航空工业公司 Raytheon 建设的环境试验室可进行高精度高强度的静态、动态、气候及综合性的环境试验研究。

### 2.2 农业、林业、生物气候环境模拟室

江西省农科院水稻研究所建设的智能化人工气候室,陕西杨陵农业科技示范园温室大棚,浙江大学植物科学实验中心智能玻璃温室等,都是现代农业利用环境模拟技术的应用成果,为植物科学研究提供控温、控光、控湿的高标准科研条件。俄罗斯生物有机化学协会(Branch of Shemyakin & Ovchinnikov Institute of Bioorganic Chemistry)建设的生物人工气候室,用于研究生物工艺学、先进的种植材料以及现代温室植物生长技术。日本森林综合研究所建设了人工气候试验室进行自然环境下树木生长的研究,可进行不同光照强度、温度和湿度

环境条件的树木生长对比试验。

### 2.3 建筑材料环境模拟实验室

应用环境模拟技术进行混凝土的环境试验,是一项新的尝试性的工作。中国矿业大学于20世纪90年代末建设了人工气候室,用以在不同的气候条件下模拟工业腐蚀环境,进行混凝土耐久性测试<sup>[13]</sup>。所建设的人工气候室包括空调机房,共占地55.8 m<sup>2</sup>,试验用的人工气候室长6 m,宽4 m,高3.2 m。人工气候室可在一定范围模拟自然环境中的温湿度、日照、淋雨、盐雾、大气污染等环境(CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>气体)。该试验室利用一台机组,完成制冷、加热、除湿、加湿功能,并辅以自制的抽屉式硅胶吸湿器进行辅助深度除湿;利用简易辐射灯具模拟太阳光照;在试验室内布置喷液管、喷气管,用以喷入盐雾和低浓度的CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>气体等。

根据所要模拟的各种环境,人工气候室在工艺及建筑上均有特殊要求。为达到保温要求,气候室的墙体采用双层120 mm厚砖墙加防潮层,内嵌120 mm厚聚苯乙烯泡沫保温板,内墙面用环氧胶泥抹面;楼板采用120 mm厚的空心板加120 mm厚聚苯乙烯泡沫保温板;地面的构造设计成100 mm厚混凝土垫层,中间200 mm厚泡沫混凝土保温层,上部100 mm厚混凝土面层;并采用双层保温门。为了便于观察室内的情况,在一侧墙上安装了一个固定的双层玻璃观察窗。人工气候室主机放于机房内,风冷式冷凝器置于室外。室内机组的布置紧凑、合理,充分考虑使用空间的要求和便于检修。人工气候室的气流组织采用上送下回式,除了送回风的管道外,还专门设置一条排风管用于试验结束时气候室的排风。空调制冷系统的设计与常规空调制冷相比,在技术要求、系统形式、设计方法等方面均有较大差别。由于受到资金的限制,完全达到工艺要求难度比较大,尤其对于低温低湿和高温高湿的处理实现起来比较困难。对腐蚀环境的模拟,无疑对机组的防腐提出更高要求,需要采用防腐设备及有效的防腐措施。

人工气候室内安装温湿度传感器,通过设在控制室内的计算机进行远程控制。机组内也装有可编程序控制器进行控制,也可以手动控制。

### 2.4 结论

环境模拟试验室可为人们提供一种摆脱自然规律、从时间到空间按主观的意愿去模拟各种理想环境,服务于科学实验。在试验室内模拟各种实际环

境作用, 研究考核材料、结构或设备等实验对象所处的环境产生的环境效应, 可获得实验对象各种环境条件下的特性、环境适应性<sup>[8]</sup>。

目前, 环境模拟技术已趋成熟。利用单一因素的环境模拟试验, 如温度、湿度、气压、沙尘、盐雾、淋雨、风、太阳辐射、空间环境等气候环境模拟试验以及静载、振动、冲击等力学环境模拟试验, 易于找出单一环境因素对结构性能的影响规律; 综合环境模拟是指2个以上环境参数同时作用的模拟试验, 可以真实地模拟实验对象实际经受综合环境的影响, 增加试验的真实性和可靠性。国内外对于环境试验也相继颁布了有关的针对各种研究领域的环境试验标准<sup>[5,9]</sup>, 但在实际应用中还要进行试验标准的剪裁、试验应力筛选等工作, 以得到更加可靠适用的试验成果。

用环境模拟技术, 建设混凝土材料、结构的环境模拟试验室是完全可行的。混凝土结构耐久性、早期特性及裂缝控制研究所需要的各项环境指标, 如气候环境、工业腐蚀环境、海洋侵蚀环境等等, 都是可以实现的。因此, 开展混凝土结构环境模拟试验室技术的研究, 深入探讨混凝土结构环境模拟试验的关键技术, 定能建成高标准高水平的混凝土结构试验研究平台, 促进混凝土相关学科的发展。

### 3 现代混凝土结构环境试验的关键技术

现代混凝土结构环境试验技术包括环境模拟试验的设计、多种耦合环境的实现、加速试验与自然试验的相关性以及特种检测设备、仪器的应用等诸多关键环节。

#### 3.1 利用环境试验剪裁方法, 合理确定环境因子

环境试验的剪裁<sup>[16,17]</sup>为根据产品寿命期内将遇到的各种环境及其影响严重程度和可以搜集到的有关的环境数据和信息, 按照环境试验不同阶段的具体目的, 选择各阶段环境试验项目, 确定各项目试验条件和试验程序, 合理安排各阶段试验项目实施次序的过程, 以使设计和安排的环境试验满足检测要求, 保证产品的环境适应性。进行混凝土结构环境试验, 要根据混凝土材料的特性、使用环境、寿命期内所经历的环境因素, 按科学的逻辑推理步骤设计出所需要的试验项目, 试验的参数、程序、顺序和失效准则。试验设计时要确定合理的试验条件, 人工环境试验对混凝土结构性能产生影响的机

理、模式应该与实际工程结构在自然环境条件的性能变化机理相同; 对不同使用目的、重要性程度不同的混凝土结构要建立不同的失效准则。

#### 3.2 加速试验与自然试验的相关性

加速试验可以相对快速地测试材料结构在长期使用中的特性变化。混凝土环境试验中加速耐久性试验考虑环境效应的强度和时间因素, 利用加速试验计算模型评估性能寿命, 可节省试验时间和费用<sup>[18]</sup>。加速试验要根据混凝土材料的不同成分、使用的方式以及实际环境等情况设计不同的加速速率, 并选用不同的加速试验计算分析模型<sup>[19]</sup>。

加速试验与自然试验的相关性可反映出两种试验结果趋同的能力。根据多种基础试验(包括自然环境长期试验、各种影响因素的初步加速试验等)确定影响因素的作用效果、作用机理, 建立起自然环境试验与加速试验的相似性准则, 为加速模拟试验提供理论上的依据。通过相关性的研究, 可指导改变各种试验条件获得任意的加速试验方法, 同时根据加速试验结果来预测和评价混凝土结构在自然环境条件下的性能及寿命。

#### 3.3 多种环境的耦合

进行混凝土结构环境模拟试验, 需要模拟的实际环境多种多样, 如单一环境因素的模拟, 包括高温、低温、温度循环、湿度循环、寒潮袭击、剧烈干燥、淋雨、结露、冻融循环、盐类及化学物质侵蚀、酸性气体腐蚀等各种气候及腐蚀环境, 以及力学加载环境等。此外, 还要实现多种耦合环境的模拟, 包括气候环境与力学荷载作用的综合、气候环境与腐蚀工业环境的综合, 等等, 充分考虑试验的综合环境设置、荷载施加反力架的布置、腐蚀环境下加载方式和设备防护等技术问题。

#### 3.4 设备的优化布置及特种检测仪器应用技术

混凝土环境模拟试验室是综合性的环境试验室, 要体现大型、多功能及自动化的特点。试验室设备种类多, 不能将各类单项的环境模拟设备进行罗列, 需要进行设备的配置优化研究, 充分发挥设备的性能, 达到最优的环境模拟效果。根据混凝土环境试验的特点, 并且考虑节省能源, 较大的试验空间要进行分割, 可进行全空间试验, 也可单独进行每个隔段小空间的试验。因此需要进行环境控制设备的配置实验, 分别考虑在端部集中布置或者在各个隔断空间分别布置两种方案的技术、经济及可靠性比较, 优化选择。

混凝土环境模拟试验室根据研究的需要进行各种各样复杂环境的模拟,因此所用的检测设备仪器也要能经受各种极端环境的考验。应根据实际的模拟环境,选择相应的检测设备仪器。

## 4 大型多功能自动控制混凝土环境试验室建设方案

### 4.1 试验室主要功能

- 1) 模拟自然条件下的气候环境、海洋环境、工业环境;
- 2) 人工气候环境下各种工程材料、结构的耐久性试验;
- 3) 人工气候环境混凝土结构热学性能及早期特性试验;
- 4) 人工气候环境混凝土结构裂缝控制研究;
- 5) 海洋环境下工程材料、结构的耐久性试验;
- 6) 海洋环境混凝土结构裂缝控制研究;
- 7) 工业腐蚀环境下工程材料、结构耐久性试验;
- 8) 其他有关的环境试验(综合环境、可靠性试验等)。

### 4.2 试验室布局及协调控制

环境模拟试验室分为2部分,一部分为高低温湿热交变日照雨淋实验区,另一部分为盐雾、腐蚀气体环境、海洋环境实验区,见图1。两部分可独立运行,单独进行有关试验,也可交替进行同批次结构模型试件的试验,即实现试验环境的综合性。两实验区有效试验空间分别为:10 m×4 m×3 m和4 m×4 m×3 m。

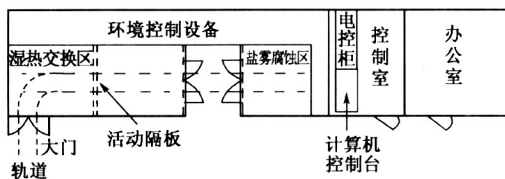


图1 试验室布局示意图

Fig.1 The project of laboratory

试验室各分系统主要有:主室体、空气循环系统、新风系统、日照系统、淋雨系统、加湿系统、除湿系统、制冷系统、加热系统、控制系统等。研究各分系统的技术及设备配套,在保证各分系统协调控制的基础上,进行智能化操作控制。试验室设备应使用防腐材料,以适应所模拟的腐蚀环境,保

证其使用寿命。

试验室大门与浇筑场地之间的通道设置专门的带滚轮平板小车及滑移轨道,试件或结构模型在小车上的模具内直接浇筑,拆模后移入试验室内。

### 4.3 试验室的主要技术性能指标

依据试验室所要实现的功能以及混凝土材料、结构的实际工程环境,确定其主要技术性能指标如表1所示。

表1 混凝土环境模拟试验室主要技术性能指标

Table 1 Specifications and performance of concrete environment laboratory

项 目	高低温湿热交变	盐雾、腐蚀气体
	日照雨淋实验区	环境实验区
容积/m <sup>3</sup>	10×4×3	4×4×3
温度/℃	-20~70	+5~60
升降速率/℃·h <sup>-1</sup>	0~5	0~5
相对湿度/%	20~95	60~95
风速/m·s <sup>-1</sup>	0~7	新风换气
最大热辐射强度/kW·m <sup>-2</sup>	1.12±10%	
盐雾沉降量/ml·cm <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup>		0.0125~0.025
雨淋	简易喷淋装置	
腐蚀气体		CO <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 浓度可调
控制系统	计算机自动控制、 手动控制	计算机自动控制、 手动控制
加载系统	加载反力架、液压加载	加载反力架

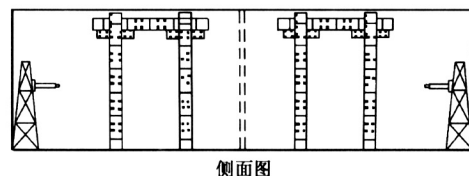
## 5 试验室的配套设备

### 5.1 加载反力架

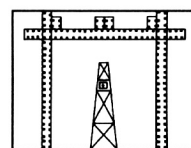
试验室内设计布置水平、竖向反力架及加载千斤顶等。加载反力架初步布置方案如图2所示。

### 5.2 混凝土早期特性(热学、力学)试验设备

混凝土环境试验室进行混凝土早期特性(热学、力学)及裂缝控制试验研究,需配备包括导温



侧面图



正面图

图2 反力架简图

Fig.2 Load frame

仪、导热仪、绝热量热器、绝热温升仪、线膨胀系数测定仪、干缩仪、混凝土早期自收缩测定系统、徐变加荷仪、开裂试验架、拉伸仪等设备。

### 5.3 试验检测设备仪器

根据试验要求和所设计的模拟环境,选择相适应的各种检测设备仪器:温湿度检测仪、光照强度测定仪、风速仪、荷载传感器、位移传感器、气体含量检测仪、数据采集系统等。

### 5.4 环保设施

试验室部分实验空间存在噪声、腐蚀气体等环保问题,应采取减震降噪措施及污染气体回收净化措施,配备环保设备,将噪音、空气污染控制到国家标准允许的水平。

## 6 结语

利用环境模拟技术,建设大型多功能混凝土结构环境模拟试验室,是一项创新的、有意义的尝试。通过对现代混凝土结构环境模拟试验室技术的研究应用,可从时间到空间模拟所需要的各种环境,如自然气候环境、工业环境、海洋环境等,并实现多种耦合环境的共同作用。在模拟的实际环境中进行各种工程材料的试验,可对环境效应进行定性定量的、全面系统的仿真分析,对混凝土的耐久性、裂缝控制、各种早期特性的研究实现从源头创新,有积极的推动作用。

目前环境模拟试验技术发展迅速,科技成果不断涌现,需要掌握环境模拟技术最新的发展动态和技术水平,根据混凝土结构环境试验的具体要求,研究混凝土环境模拟试验室关键技术。在此基础上,建设高标准、高水平混凝土环境模拟试验室,制定详细的混凝土早期特性试验、耐久性试验、裂缝控制试验的规划蓝本,为下一步科学研究奠定基础,促进结构工程学科快速发展。

### 参考文献

- [1] 金伟良,赵羽习.混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J].浙江大学学报(工学版),2002,36(4):371~380
- [2] B·M·莫斯科文(苏)等.混凝土和钢筋混凝土的腐蚀及其防护方法[M].北京:化学工业出版社,1988
- [3] 袁迎曙.钢筋混凝土结构耐久性研究策略[R].土建结构工程的安全性与耐久性(工程科技论坛),北京,2001.384~387
- [4] 王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,1997
- [5] 王浚,黄本诚,万才大.环境模拟技术[M].北京:国防工业出版社,1996
- [6] 王浚.环境模拟技术——一门新的综合性工程技术[J].中国工程科学,2003,5(3):1~5
- [7] 王丽,祝耀昌.环境试验及其应用综述[J].环境技术,1998,(2):5~8
- [8] Adams L. A look at environmental testing [J]. Quality, 2002, 41(4):24~26
- [9] Caruso H. MIL - STD - 810F, test method standard for environmental engineering considerations and laboratory tests [J]. Journal of the IEST, 2001, 44 (3):30~34
- [10] Romanchik D. Space simulation needs multiple chambers [J]. Test & Measurement World, 2003, 23 (3):A6~8
- [11] 魏铭炎.法国宇航环境工程试验中心简介[J].环境技术,2002,(1):17~18
- [12] 魏铭炎.国外汽车环境试验设备一瞥[J].环境技术,2001,(2):5~8
- [13] 吴延鹏.建筑材料与结构耐久性实验小型人工气候室设计[J].建筑热能通风空调,2001,(2):63~64
- [14] Li J, Li M, Sun Z. Development of an artificial climatic complex accelerated corrosion tester and investigation of complex accelerated corrosion test methods [J]. Corrosion, 1999, 55(5):498~502
- [15] Litsikas M. Put products through their environmental paces [J]. Quality, 1997, 36(2):40~44
- [16] 王欣,夏越美.环境试验剪裁方法及其应用分析[J].环境技术,1998,(2):9~16
- [17] Aldridge D S. A strategy to integrate the 'tailoring' and 'stimulation' test philosophies [J]. Journal of the Institute of Environmental Sciences, 1997, 40(6):15~22
- [18] Caruso H, Dasgupta A. A fundamental overview of accelerated testing analytical models [J]. Journal of the Iest. 1998,41(1):16~20
- [19] Cluff K D, Barker D B. Tailoring temperature/humidity life tests with in-service environment data [J]. Journal of the Iest,1998, 41(4):36~42

- [14] Jones W W, Forney G P, Peacock R D. A technical reference for CFAST: an engineering tool for estimating fire and smoke transport [M]. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, January 2000
- [15] Chow W K. Simulation of tunnel fires using a zone model [J], *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(2): 221~236
- [16] 胡隆华, 霍然, 李元洲, 等. 大尺度空间中烟气运动工程分析的多单元区域模拟方法[J], *中国工程科学*, 2003, 5(8): 59~63
- [17] Gann R G, Babrauskas V, Peacock R D, et al. Fire conditions for smoke toxicity measurement [J], *Fire and Materials*, 1994, 18: 193~199

## Study on Fire Smoke Properties of Subway Station Passageway by Simulation Experiments

Zhu Wei, Lu Ping, Liao Guangxuan, Li Peide, Hong Yixiu

(*State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

[**Abstract**] A series of simulation experiments, carried out on the scale model of subway station passageway are described, in which wood crib fires are used as the evolution process of subway fire. Temperature relative value is provided to analyze the law of smoke temperature along the station passageway in subway fire and its affecting factors. Based on images collected, the conditions needful for coming into being smoke layer and the applicability of zone model are discussed in the investigation of smoke properties in subway fire. Otherwise, it is also indicated from the results of smoke component measurements that CO concentration at the exit rises with stepwise change.

[**Key words**] subway fire; scale model; smoke temperature; smoke configuration; CO concentration

---

(cont. from p.85)

## Environmental Simulation Test Technology of Modern Concrete Structures

Li Yunfeng, Wu Shengxing

(*College of Civil Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China*)

[**Abstract**] In order to study durability, crack controlling of concrete structures and characteristics of concrete at early age in simulated environment, environmental simulation test technology is discussed. This paper describes the successful applications of environmental simulation technique in some fields. The key techniques of environmental test of concrete structures are analyzed. The basic scheme is put forward to construct artificial climatic environmental laboratory with autocontrol and multifunction. Then the layout, function and performance of the lab is determined suitably. Finally, the equipments and instruments of the lab are discussed. Based on the research, environmental test of concrete durability and crack controlling will be better performed in the future.

[**Key words**] concrete structure; environmental test; durability; crack controlling; artificial climate