



# 结构远程协同试验

原理、方法和应用

**Networked Structural  
Laboratories (NetSLab)**

Principles, Methods and Applications

肖 岩 郭玉荣 范云蕾 胡 庆 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

# 结构远程协同试验 原理、方法和应用

Networked Structural Laboratories (NetSLab)  
Principles, Methods and Applications

肖 岩 郭玉荣 范云蕾 胡 庆 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了结构远程协同试验的原理、方法和典型的试验案例。主要包括:结构远程协同试验在国内外的的发展状况,网络化结构实验室 NetSLab 建设中的相关技术问题,如试验通讯平台的开发、远程协同拟动力试验方法及控制技术、复杂结构试验的子结构划分技术、边界条件处理技术、远程协同试验应用程序开发,以及在多个高等学校之间开展的远程协同拟动力试验研究。此外,本书还介绍了网络化结构实验室系统在远程健康监测中的应用。

本书可供从事结构抗震的研究的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

结构远程协同试验原理、方法和应用 / 肖岩等著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033623-1

I. ①结… II. ①肖… III. ①计算机网络-应用-建筑工程-工程试验  
IV. ①TP393②TU-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 029890 号

责任编辑:任加林 / 责任校对:王万红

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

\*

2012年3月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2012年3月第一次印刷 印张:11

字数:202 000

定价:42.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

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

结构远程协同试验是近年来拟动力试验研究最重要的发展之一,解决了现代工程结构日趋复杂化和大型化与单个实验室的规模及试验能力之间的矛盾。利用先进的计算机及通讯技术,将大型结构分解成若干个子结构,每个子结构在不同的实验室进行试验,整个试验通过互联网进行数据交换和远程控制来达到各个实验室之间的多地协同工作,各个子结构试验通过网络化的方法集成为整体结构。这样不仅大大降低了大型结构对单个实验室设备条件的要求,突破了单个实验室的规模限制,更重要的是将分散在不同实验室的设备资源和计算资源进行整合与协同,形成一个规模庞大的网络化结构实验室,一方面达到硬件设备、计算软件和专家资源共享的目的,另一方面可以提高实验室综合试验能力,实现以前单个实验室无法进行的大比例复杂结构试验。随着计算机网络技术的不断发展和应用普及,结构试验的网络化已成为未来的发展趋势。目前已有多个国家在逐步构建网络化结构实验室,并开展了一些尝试性的远程协同结构试验。我国主要高校和科研单位的结构试验室建设快速发展,在此基础上发展远程协同试验可避免重复投入、实现资源共享,有利于提高设备的使用效率,进一步发挥在科研、教学及工程应用方面的重要作用。因此,进行结构远程协同试验的理论和方法研究,为我国开展网络化结构试验、建立通用开放及共享的新一代结构试验系统提供理论和技术支持,具有重要的意义。

在过去的 10 年里,作者及其研究团队在结构远程协同试验原理、方法及应用方面开展了大量的研究工作,并取得了相应的成果,建立的网络化结构实验室系统 NetSLab 应用于高等学校和其他科研机构的实验室,可以将现有试验设备通过网络连接起来,实现远程协同试验;另外,还可应用于远程健康监测、远程监控、远程教学和科研等方面,产生直接的经济效益。为了向广大的研究人员及工程技术人员介绍结构远程协同试验的最新研究成果,同时为我国高校和科研单位建立类似的网络化结构实验室提供参考,特撰写了本书。本书共 6 章,主要论述了远程协同试验方法和应用以及网络化结构实验室系统构建等问题。主要内容有:①远程协同试验在国内外的的发展状况,以及远程协同试验的一些挑战,重点介绍了美国 NEES 计划以及作者及其研究团队开发的 NetSLab 系统;②网络化结构实验室 NetSLab 的系统构建,包括 NetSLab 网络通讯平台的开发、复杂网络环境下穿越网络中间盒的通讯技术、远程协同试验的通讯框架、试验结果的网上发布以及基于 NetSLab 网络通讯平台的程序开发原理;③远程协同试验应用程序的开发,论述

了远程协同拟动力试验方法及控制技术、复杂结构试验的子结构划分技术、边界条件处理技术,重点介绍了作者及其研究团队开发的数个应用程序,包括单层结构远程协同试验程序、考虑扭转情况的远程协同试验程序、多层结构远程协同试验程序、桥梁结构远程协同试验程序、桥梁桩基远程试验程序,以及应用程序的事务处理和应用程序与试验设备的连接;④利用 NetSLab 各种应用试验程序进行的远程协同拟动力试验研究;⑤网络化结构试验系统 NetSLab 的功能扩充,主要介绍 NetSLab 应用于远程健康监测、远程监控、远程教育和科研等方面;⑥远程试验系统的展望,结合美国 NEES 的研究动向探讨未来结构远程协同试验的发展方向。

本书的主要内容源自以下结构远程协同试验研究项目的部分研究成果:①国家自然科学基金重点项目——现代结构拟动力地震模拟协同试验方法与系统(项目批准号:50338020);②国家自然科学基金重点项目——大型建筑及桥梁结构动力损伤过程的实时混合试验方法与技术(项目批准号:90715036)。

本书中的部分远程协同试验得到了我国哈尔滨工业大学、清华大学,以及美国南加州大学和加州大学戴维斯分校的合作支持,在此表示感谢!参与部分相关研究工作的还有湖南大学易伟建教授、刘一江高级工程师和柯庆峰博士,哈尔滨工业大学田石柱教授、吴斌教授和李喧教授,清华大学邱法维教授和赵作周副教授,加州大学戴维斯分校 Kunnath 教授,在此一并致谢!

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,衷心希望读者不吝赐教。

作 者

2011 年 5 月于岳麓山下自卑亭

# 目 录

## 前言

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                    | 1  |
| 1.1 结构试验的网络化发展趋势 .....                   | 1  |
| 1.2 基于网络的结构远程协同试验研究现状 .....              | 3  |
| 1.2.1 韩国和日本的远程试验网络 .....                 | 3  |
| 1.2.2 美国的 NEES 计划 .....                  | 6  |
| 1.2.3 减轻地震风险的欧洲网络 .....                  | 17 |
| 1.2.4 韩国的 KOCED 计划 .....                 | 18 |
| 1.2.5 中国台湾的 ISEE 平台 .....                | 19 |
| 1.2.6 国际跨平台交流 .....                      | 22 |
| 1.3 中国内地的 NetSLab 系统 .....               | 24 |
| 1.4 远程协同试验的一些挑战 .....                    | 25 |
| <b>第 2 章 网络化结构实验室 NetSLab 系统构建</b> ..... | 27 |
| 2.1 总体构思 .....                           | 27 |
| 2.2 网络通讯平台的开发 .....                      | 28 |
| 2.3 湖南大学开发的 NetSLab 网络通讯平台 .....         | 31 |
| 2.3.1 数据模型和通讯协议 .....                    | 32 |
| 2.3.2 网络通讯平台的执行 .....                    | 34 |
| 2.3.3 其他的系统功能 .....                      | 36 |
| 2.4 远程协同试验的通讯框架 .....                    | 37 |
| 2.4.1 国内网络状况及面临的问题 .....                 | 38 |
| 2.4.2 实现防火墙穿越的两种通讯框架 .....               | 40 |
| 2.4.3 通讯测试 .....                         | 43 |
| 2.5 试验结果的网上发布 .....                      | 46 |
| 2.6 基于 NetSLab 网络通讯平台的程序开发原理 .....       | 47 |
| 2.6.1 NetSLab 网络通讯平台的安装 .....            | 48 |
| 2.6.2 NetSLab 网络通讯平台的接口函数和事件 .....       | 49 |
| 2.6.3 NetSLab 网络通讯平台的网络监听及通讯接入原则 .....   | 52 |
| 2.6.4 通讯数据包 .....                        | 53 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| <b>第 3 章 远程协同试验应用程序开发</b> | 55  |
| 3.1 引言                    | 55  |
| 3.2 远程协同拟动力试验方法           | 55  |
| 3.2.1 基本原理                | 55  |
| 3.2.2 数值积分方法              | 58  |
| 3.3 远程协同试验程序开发            | 62  |
| 3.3.1 系统构架                | 62  |
| 3.3.2 单层结构远程协同试验程序        | 67  |
| 3.3.3 考虑扭转情况的远程协同试验程序     | 71  |
| 3.3.4 多层结构远程协同试验程序        | 75  |
| 3.3.5 桥梁结构远程协同试验程序        | 86  |
| 3.3.6 桥梁桩基远程试验程序          | 91  |
| 3.4 应用程序的事务处理             | 94  |
| 3.4.1 通讯故障事务处理            | 95  |
| 3.4.2 网络中断事务处理            | 95  |
| 3.5 应用程序与试验设备的连接          | 96  |
| 3.5.1 MTS 控制系统            | 96  |
| 3.5.2 应用程序与 MTS 控制系统的对接方法 | 98  |
| <b>第 4 章 远程协同拟动力试验案例</b>  | 101 |
| 4.1 引言                    | 101 |
| 4.2 钢管混凝土柱远程协同拟动力试验       | 101 |
| 4.3 FRP 加固柱的桥梁结构远程协同拟动力试验 | 104 |
| 4.4 单层框架结构远程协同拟动力试验       | 107 |
| 4.4.1 试验方案                | 107 |
| 4.4.2 地震波输入               | 109 |
| 4.4.3 试验的网络环境             | 109 |
| 4.4.4 试验结果                | 110 |
| 4.5 十层钢管混凝土柱钢梁框架的远程拟动力试验  | 111 |
| 4.5.1 结构模型                | 111 |
| 4.5.2 加载装置                | 112 |
| 4.5.3 试验子结构刚度测试           | 113 |
| 4.5.4 地震加速度记录选取           | 114 |
| 4.5.5 试验结果                | 115 |
| 4.5.6 模拟分析对比              | 123 |
| 4.6 多跨桥网上公开远程协同拟动力试验      | 124 |

|                                            |            |
|--------------------------------------------|------------|
| 4.6.1 试验设计 .....                           | 124        |
| 4.6.2 地震波输入 .....                          | 126        |
| 4.6.3 试验结果及分析 .....                        | 126        |
| 4.7 Russion River 桥远程协同拟动力试验 .....         | 127        |
| 4.8 桥墩与预制桩基础的远程协同拟动力试验 .....               | 129        |
| 4.8.1 概述 .....                             | 129        |
| 4.8.2 桥梁模型 .....                           | 130        |
| 4.8.3 试验模型 .....                           | 131        |
| 4.8.4 试验细节 .....                           | 132        |
| 4.8.5 试验结果 .....                           | 134        |
| <b>第 5 章 网络化结构试验系统 NetSLab 的功能扩充 .....</b> | <b>138</b> |
| 5.1 远程健康监测 .....                           | 138        |
| 5.1.1 远程健康监测研究和应用简介 .....                  | 138        |
| 5.1.2 基于 NetSLab 的远程监测和识别 .....            | 139        |
| 5.1.3 数据远程传输模拟试验 .....                     | 140        |
| 5.2 远程监控 .....                             | 143        |
| 5.2.1 湘江二桥的远程监控 .....                      | 143        |
| 5.2.2 风场和建筑结构风致响应的远程监控 .....               | 143        |
| 5.2.3 美国文生汤玛斯大桥的远程实时监控 .....               | 147        |
| 5.2.4 远程控制 .....                           | 151        |
| 5.3 远程教育和科研 .....                          | 151        |
| <b>第 6 章 远程试验系统的展望 .....</b>               | <b>156</b> |
| <b>参考文献 .....</b>                          | <b>159</b> |



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 结构试验的网络化发展趋势

现代结构工程的发展与结构试验密不可分,特别是结构工程的抗震性能研究在这方面表现的尤为突出<sup>[1]</sup>。由于地震发生机制和结构抗震性能的复杂性,仅凭理论分析的手段很难把握结构在地震作用下的性能、反应过程和破坏机理。经常是理论分析与实际地震作用下结构的反应、破坏现象差别较大,这样人们不得不寻求先进的试验方法以解决理论分析的不足。特别是对于大型复杂结构、超出抗震设计规范规定的结构和新型结构体系,人们通过结构试验探索结构性能的规律为结构设计、施工和运行提供必不可缺的依据。随着先进的传感技术、机械工程、计算机和系统控制工程的发展,结构实验学也出现了如下趋势:结构抗震试验的大型化和复杂化;更为精确地、准确地模拟复杂工作条件,如地震台模拟试验、离心机试验等;结构分析和试验的联机混合试验等。特别是 20 世纪 60 年代末以来逐渐发展起来的子结构试验更为我们研究整体结构的抗震性能提供了切实可行的试验手段。

随着计算机网络的日益普及,各种基于计算机网络的应用系统也在蓬勃发展。电子商务、电子政务、电子银行、网络化远程教育等都是些在 Internet 上应用的实例,除此以外,计算机网络还广泛地应用在医疗、保健、保险、教育等各行各业的数据传送交换之中。近年来,国际上又出现了远程结构试验的研究动向。计算机的普及、Internet 技术的发展和应用为这一领域的研究提供了必要的物质基础。

远程实时监测技术是从 20 世纪中期发展起来的一种综合性技术,主要应用于重要土木工程结构、重要工业设备、工业生产过程和航天器的运行监测。对于重要结构的监测越来越受到各国科学家的重视。由于现场条件的限制,希望把监测获得的现场数据传输到领域专家、大型计算机中心和大型实验室。这样不但可以对数据进行必要的有效处理,同时可进行相应的实验室模型协同试验,即进行原型结构与模型结构的对比试验,充分发挥现场监测数据的作用。利用所建立的系统可以进行异地试验和监测,充分发挥有限的试验资源和现场监测资源,达到资源共享。实时监测模式经历了从单机监测系统到分布式监测系统,再到基于网络的远程实时监测系统这样的—个发展历程。随着信息高速公路的发展,状态监测与协同试验的网络化成为可能,已经出现了基于 Internet 的远程监测与协同试验系统,

并应用到了许多领域中。这使得一个工程师可以在世界任何地方,用最少的硬件设施(一台笔记本电脑、一个调制解调器和网络账号)就可以遥控和监测一个或多个与自己相隔万里的土木工程结构。

结构远程协同试验的思想在 20 世纪 90 年代由日本和韩国学者最早提出,随后世界各国研究人员竞相在这一领域展开了研究。基于网络的远程协同结构试验可以将异地分布的结构实验室通过 Internet 整合为功能强大的网络化结构实验室,一方面达到硬件设备、计算软件和专家资源共享的目的,另一方面可以提高实验室综合试验能力,实现以前单一实验室无法进行的大比例复杂结构试验。此外,也为本身试验设备不足的单位提供利用网络化结构实验室进行试验研究,减少实验室硬件的重复建设,节省国家投资。美国国家科学基金委员会于 1999 年投入 8000 万美元的巨额研究经费资助建立地震工程网络模拟系统(Network for Earthquake Engineering Simulation,简称 NEES),其目标是要通过网络实现实验室资源,包括试验设备、数据库以及模型模拟的共享和整合<sup>[2~4]</sup>。欧洲建立了名为“减轻地震风险的欧洲网络”的协同研究系统(European Network for Seismic Risk Mitigation,简称 EUROSEISMICNET)<sup>[5]</sup>,目标是集合全欧洲在结构工程领域和地震工程领域的所有开发和研究力量,并从各国相互学习防灾减灾经验中获得效益。中国台湾地震中心研究中心建立了类似的网络平台 ISEE(Internet-based Simulation for Earthquake Engineering)<sup>[6,7]</sup>,实现世界范围内的网络化结构试验。受 NEES 计划的鼓舞,2003 年韩国营建与运输部起草了建设工程发展计划(Korea Construction Engineering Development Program,简称 KOCED)<sup>[8]</sup>,它将在遍布韩国的主要大学里面建设 12 个大型的试验设施,并用高速网络连接起来,以资源共享的协同工作方式对整个土木工程服务。日本国家防灾科学技术研究所建立了世界上最大的 3D 大型振动台 E-Defense 的同时,建设了 E-Defense 网络(ED-Net),以充分利用该振动台开展国际合作研究及远程协同研究<sup>[9]</sup>。另外,在 NEES 协作下,奥克兰大学土木环境工程系启动了新西兰地震工程模拟网络系统(New Zealand Network for Earthquake Engineering Simulation,简称 NZ-NEES)研究项目<sup>[10]</sup>。该项目的目标是为了整合新西兰现有的所有地震工程网络及未来国际合作研究的实验、计算和模拟资源。在英国,通过 UK-NEES(The UK Network for Earthquake Engineering Simulation),布里斯托大学、牛津大学及剑桥大学的地震工程实验室将成为 NEES 网络的站点<sup>[11]</sup>。湖南大学在我国率先提出 e-test 的构思<sup>[12]</sup>,随后建立了一个通用开放及共享的网络化结构实验室系统(Networked Structural Laboratories,简称 NetSLab),其目标是利用高速发展的 Internet 通信技术将异地的实验室连接起来联合开展远程协同试验研究,达到试验资源共享、综合试验能力提高的目的<sup>[13]</sup>。

结构远程协同试验研究的关键任务是开发具有分布式拟动力试验能力的试验

平台,拟动力试验获取结构动力响应的一种重要手段,而进行分布式的拟动力试验对于评估大型结构系统的抗震性能则非常有效。另外,子结构技术在拟动力试验中的成熟应用,使得我们可以很方便地对结构进行子结构划分。有人可能会对异地实验室之间联合进行一次分布式拟动力试验中可能发生的时间延迟表示怀疑,但是根据目前的研究发现,这个时间延迟对于一般的钢或者混凝土结构的拟动力试验还是可以接受的。

由于各个实验室设备的差异性,使得各国研究人员所开发的基于 Internet 的协同结构试验平台还不具有普遍性。美国 NEES 利用一个名为 NEESgrid 的网格将 NEES 的各个设备站点连接起来形成一个中心数据库,主要由两类组成。第一类是用来使“节点”(试验站点或者其他资源)整合到 NEES 网格所必需的基本组成部分,包括远程操作控制协议(NEESgrid Teleoperations Control Protocol,简称 NTCP),相关的软件、流数据服务(The NEESgrid Streaming Data Service,简称 NSDS),相关的软件、数据库服务及相关的软件、数据采集(Data Acquisition,简称 DAQ)实施参考、信息服务、E-notebook 服务、网真模式(Telepresence Mode,简称 TPM)服务、管理工具及其他软件;第二类是用来支持整个 NEES 团队操作 NEES 网格本身基本建设的组成部分,包括结构非线性分析软件 OpenSees 及 Fedea-sLab、NEES 网格模拟入口、网站材料、用户邮件列表、计算机并行版本系统(Concurrent Version System,简称 CVS)仓库等。

湖南大学所开发的网络化结构实验室系统 NetSLab,包含一个相对独立的网络通信平台和基于该网络通信平台开发的各种远程应用程序。应用程序提供了与各种不同试验设施控制系统的连接。

## 1.2 基于网络的结构远程协同试验研究现状

### 1.2.1 韩国和日本的远程试验网络

如前所述,日本和韩国最先开始在两国的实验室之间进行拟动力试验研究<sup>[14~18]</sup>。日本京都大学 Sugiura 等人发表了有关网络化拟动力试验技术的论文<sup>[14]</sup>,阐述了在日本京都大学校园网下多个站点的协同网络试验。Yun 等人发表了网络化拟动力试验框架的论文<sup>[15]</sup>,阐述了在韩国科学技术院、大阪市立大学、日本京都大学三所高校之间进行的远程协同拟动力试验。随后,在日本京都大学和韩国科学技术院之间进行的远程协同试验进一步阐述了网络化拟动力试验技术的可行性<sup>[16~18]</sup>。

在日本京都大学的试验网络中<sup>[14]</sup>,研究者们采用了基于 Samba 软件的文件系统进行通信。这个文件系统被多个试验站点共享,这样所有的试验数据及可视化

数据可以通过这个共享的文件系统进行交换。Samba 软件是一个非常流行的软件,它允许用户端通过公司的局域网或者因特网进入并使用文件、打印设施或者其他共享的资源。

日本京都大学的试验网络包括多个子系统,如图 1.1 所示。一台基于 UNIX 操作系统的服务器进行数值分析,同时运行一个名为 AVS(虚拟化应用系统)的软件来操纵数据信息。在某一个典型试验案例中,其中一个桥柱试件由三维的结构试验系统控制和测量,同时另外一个桥柱试件由一个大型的结构试验系统控制和测量。这两个结构试验系统均基于 Windows-NT 操作系统,并同时运行了 Samba 软件。

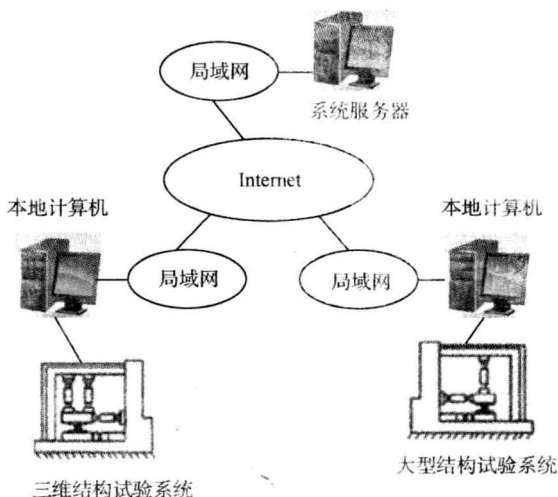
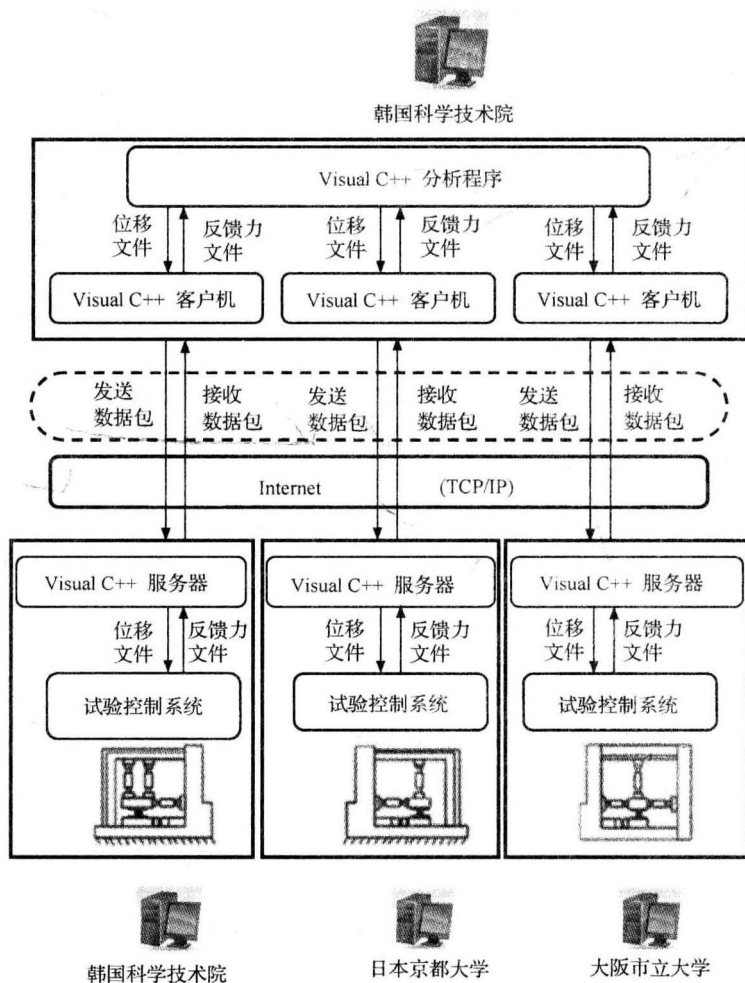


图 1.1 日本京都大学远程试验系统网络图<sup>[14]</sup>

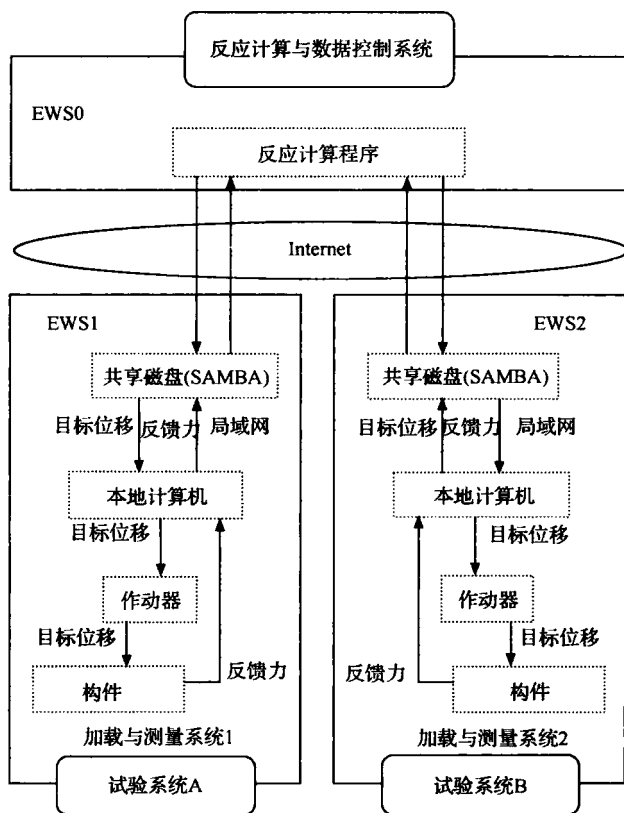
韩国科学技术院的远程试验网络采用 Microsoft Visual C++ 开发的程序来实现试验站点与分析程序之间的数据交换<sup>[15]</sup>。图 1.2 显示了该试验网络构造图。韩国科学技术院的试验目的是模拟桥梁在地震作用下的响应。该桥是由混凝土箱梁及四个不同的桥梁支座组成的五跨连续桥。每个桥梁支座分别由位于大阪市立大学、日本京都大学及韩国科学技术院的计算机系统模拟分析。其中,主系统服务器负责整体结构动力方程的求解,计算出各个支座每步的位移指令。在本次远程协同拟动力试验中,四台计算机分别位于 250km 之外,通过 Internet 进行通信。本次试验共 4000 步,耗时 35min,每步大概消耗 0.53s。

在日本京都大学和韩国科学技术院的合作研究中<sup>[18]</sup>,完成了三跨基础隔震桥梁结构系统的远程协同拟动力试验。每个实验室分别模拟一个桥梁支座(如图 1.3 中日本京都大学的 EWS1 及韩国科学技术院的 EWS2)。位移和反馈力数据通过实验室共享的磁盘单元进行交换。图 1.3 显示了其试验网络构造图。

图 1.2 韩国科学技术院远程平行试验框架<sup>[15]</sup>

根据掌握的公开文献,日本(京都大学)和韩国(科学技术院)的学者们是世界上最早尝试通过 Internet 进行网络化拟动力试验技术研究的人员。这一系列研究的成功也是网络化拟动力试验技术的象征。当然,这些研究还不是网络化拟动力试验技术的最后目的。它们在许多方面还需要更多的改进,如通过 Internet 实时试验数据的传输、数据管理及网络性能。在这之后所做的一些研究,如美国的 NEES、中国台湾的 ISEE、湖南大学的 NetSLab,包括韩国的 KOCED、日本的 E-Defense,都是以这些为目标的。

2005 年日本建成了世界上最大的三维大型地震工程设备 E-Defense。该振动台尺寸为 20m×15m,最大荷载 1200t。利用地震工程网络系统(EE-net),该设备

图 1.3 京都大学、韩国科学技术院试验网络图<sup>[18]</sup>

可在世界范围内共享。EE-net 通过高性能的因特网提供远程观摩及操作<sup>[9]</sup>。

### 1.2.2 美国的 NEES 计划

#### 1. NEES 计划构想

2004 年,美国国家自然科学基金委员会投入 8000 万美元巨资建立地震工程网络模拟系统。NEES 计划的目标是建立一种网络化资源,这一资源是在地理上分布于各个地区并被共享的具有远程观测和远程控制能力的新一代试验研究系统。NEES 将成为一个试验设备、计算资源和工具、协作通信技术和工具、诊断数据库系统的集成系统,并全面发展以支持从事地震工程研究和教育的团体成员的合作。NEES 将提供先进的试验能力,使研究人员能进行试验以及验证更为复杂、综合性更高的理论分析和数值计算模型,从而改善结构抗震设计。

NEES 的地震研究设备包括建立新一代振动台、岩土离心试验机、海啸波浪水

池、大型实验室系统,以及通过高效 Internet 连接的现场实验和监控体系。除了可以通过网络对 NEES 设备站点实行远程操作,还可以在网上连接高性能计算和数据存储设备,包括一个地震工程及其相关领域的试验和分析方面的诊断数据库<sup>[19,20]</sup>。此外,分布式实物和数值模拟能力及使试验和计算数据可视化的资源也可以从网络上获得。

## 2. NEES 网络

NEES 网络(NEESgrid)的节点即为 NEES 试验站点。NEES 网络是一个基于 Internet 的虚拟实验室,在全国范围内联合多种机构和共享资源来实现远程观测、远程协同控制、合作、数据存取以及试验、模型模拟和数据的整合<sup>[21]</sup>。其目标是提供一个软件环境和工具,以支持不足资源的共享和使用,包括贵重的试验设备、数据采集装置、仿真代码或者专家。NEES 网络节点包含了以下组成部分:

1) 试验设备:由先进技术提供的试验设备能够保证协同试验和远程监测试验的进行;网络管理保证了具有仿真能力的试验数据的存储和综合;控制界面保证了远程操作的实现。

2) 信息管理系统:信息管理系统保证了数据共享及元数据在集中或分散的数据库中的存储,包括在一些试验设备和其他远程站点存储系统中的存储,信息管理软件能够保证试验和模拟数据在快速的、可控制情况下进行公布。

3) 模拟系统和软件库:无论在中心超级计算机上还是高速串接的用户站点,模拟系统和软件能够保证功能强大的仿真代码的高速开发。

4) 用户站点:NEES 网络用户界面为每一位用户提供了协同实验室的试验、协作、模拟和数据存储的接口。

5) 支持节点:在线知识库包含了 NEES 网络中许多元件的操作指南信息,并提供了 NEES 网络的一些底层技术的接口。

NEES 网络的最终目标是建立一个用于地震工程研究的协同实验室,或称为“无墙实验室”(laboratory without walls)。NEES 协同实验室将把全国范围的地震工程研究团体和 20 个实验室链接在一起,通过 Internet 实现试验设备的远程操作和远程监测,提供试验设备和数据的接口,以及实现模型模拟和数值模拟相结合的混合操作。

NEES 网络在地理上表现为试验设备站点的地理分布,这些试验设备站点即各研究机构的实验室设备系统,也是 NEES 网络的核心。图 1.4 显示了 NEES 计划列入的 14 个 NEES 试验设备站点。

## 3. 试验站点

NEES 试验站点是在 NSF 资助下建立的工程实验室,通过创造或提高这些试

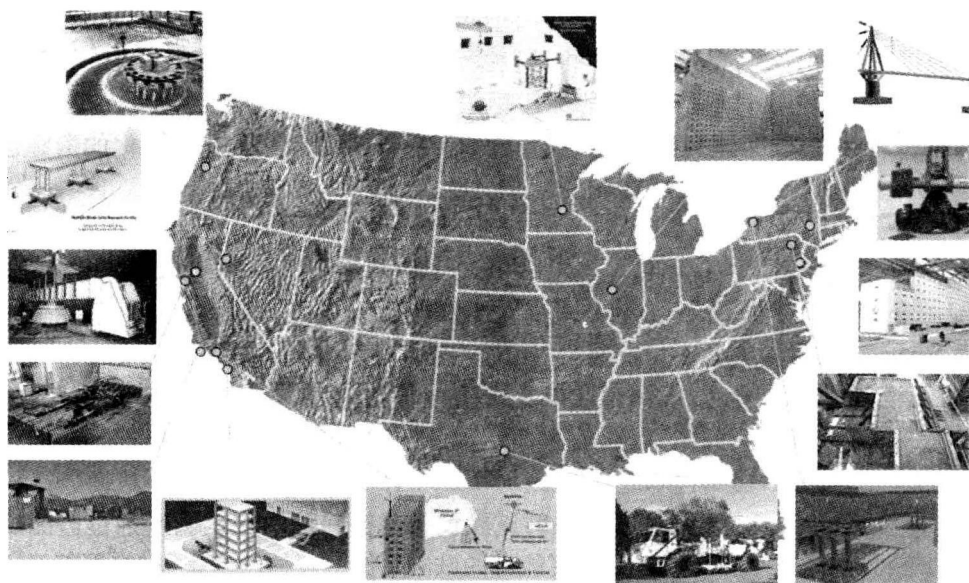


图 1.4 NEES 试验设备站点的地理分布图

验设备并用到 NEES 协作中去。目前有 14 个大学加入到 NEES 网络,包括:6 个大型实验室系统、3 个振动台、3 个野外试验和监测设施、1 个岩土离心试验机和 1 个海啸波浪水池。

#### (1) 大型实验室系统

康奈尔大学(Cornell University)的大型生命线模拟试验系统是世界上唯一可以用来进行大位移生命线研究、教育及拓展的设备,包括可重组的反力墙、大行程作动器、土的存储及输送系统、视频捕获及视频数据流系统等,主要用于研究土-管道的相互作用。针对管线、管道设施及重要的基础设施网络,提出改进的模拟方法、创新的测试技术及试验研究,先进的材料和施工技术以及被世界广泛采用的规范和执行方法。

理海大学(Lehigh University)建立的实时多向试验系统(RTMD)包括一个平面尺寸为  $31.1\text{m} \times 15.2\text{m}$  的地板和高  $15.2\text{m}$  的反力墙。每个锚点可以承受  $1.33\text{MN}$  张力和  $2.22\text{MN}$  剪力。采用额外的钢框架,再配合板和墙,可以构造出不同的试验配置。该试验系统还包括两个  $200\text{t}$  及三个  $150\text{t}$  的动态作动器、基于微电子机械系统(MEMS)的无线加速度感应器等,可用来进行多方向的实时抗震试验。

基于现有的地震模拟设备,加利福尼亚大学伯克利分校(University of California Berkeley)建立了一个可重组的反力墙。利用 12 个螺杆,每个螺杆上施加  $445\text{kN}$  预应力即可建立一个或多个高达  $13\text{m}$  的反力墙。该墙的最大剪力和弯矩



分别是 1780kN 和 5420kN/m。

伊利诺伊大学厄本那-香槟分校 (University of IUinois at Urbana-Champaign, UIUC) 建立的多轴大型子结构试验及模拟设备系统 (MUST-SIM) 由一个 T 型反应墙、三个六自由度控制箱及边界条件箱 (LBCB) 组成。每个 LBCB 箱长、宽、高分别是 4m、2m、2m, 由六个内部作动器控制。相比明尼苏达大学 MAST 系统, 虽然两者都是六个自由度的控制设备, 但是却具有不同的特征。MAST 系统主要针对单个大型试件, 而 MUST-SIM 更适合于三个小尺寸的试件, 但是需要六个方向上的控制。

明尼苏达大学 (University of Minnesota) 建立了多轴部件试验系统 (MAST)。MAST 系统可以进行大型部件的多轴往复静力试验。在传统的结构试验方法中, 很难施加多自由度的位移和荷载, 所以边界条件往往缩减为单轴加载。该系统可以控制六个自由度的试件, 这样可提高现有的加载技术。

## (2) 振动台

纽约州立大学布法罗分校 (University at Buffalo, the state University of New York) 建立的高性能混合试验系统主要包括两个高性能的六自由度振动台 ( $7.0\text{m} \times 7.0\text{m}$ )、大型反力墙 ( $175\text{m}^2$ ) 和一个大容量高性能液压供给和分布系统 (高达 1600gpm 或 6060lpm)。两个六自由度振动台可以从直接相连的位置迅速地重新布置到相隔高达 30m 的位置。当联合使用时, 可用于重 100t、长达 36m 构件的动力试验, 并且可与作动器联机进行完全同步或者完全不关联的动力试验。

加利福尼亚大学圣地亚哥分校 (University of California, San Diego) 建立了尺寸为  $7.6\text{m} \times 12.2\text{m}$  的大型高性能户外单自由度振动台。振动台可达到  $1.8\text{m/s}$  的峰值速度, 最大行程为正负  $0.75\text{m}$ , 最大重力 (竖向) 荷载为 20MN, 最大倾覆弯矩为  $50\text{MN} \cdot \text{m}$ , 作动器最大量程为 6.8MN, 频率带宽为  $0 \sim 20\text{Hz}$ 。该设备可以用来进行结构系统的大型或足尺试验、结构-基础-土体相互作用试验及近场地震下大型系统的动力响应。

内华达大学里诺校区 (Univorsity of Nevada, Reno) 建立的大型结构实验室 (LSSL) 包括三个双轴振动台。每个振动台的尺寸为  $4.35\text{m} \times 4.50\text{m}$ , 在 45t 双向全负荷的情况下峰值速度可达到  $1\text{m/s}$ , 加速度也可达到  $1g$ 。每个振动台可与其他两个振动台分开单独使用, 或者一起形成一个新的大型振动台, 还可以和另外两个振动台区别开来, 用来模拟地震下地面运动的空间变化。

## (3) 现场测试及监测

加利福尼亚大学洛杉矶分校 (University of California, Los Angeles) 建立的结构性能监测及现场测试系统包括结构系统强迫振动试验设备, 结构传感器 (如加速度、位移、应变), 土传感器 (如稠度、重度、横波速度、孔隙压力等), 数据的接收快