

## 同济大学

### 抗震模拟方法的开山劈岭

同济大学、加州大学伯克利分校、MTS系统公司共同合作开创混合仿真试验技术在抗震模拟领域的新篇章。

#### 客户面临的挑战

同济大学在土木工程和建筑学领域具有悠久的历史并且久负盛名，在国际国内始终处于领先地位。同济大学土木工程学院是桥梁工程系和土木工程防灾国家重点试验室的所在地。在这里，杨澄宇博士是桥梁抗震设计研究领域的资深学者，他的专业是开展相关的抗震测试，减少破坏性地震对桥梁、楼宇、隧道等结构的破坏影响，同时，他也致力于开发新型的测试技术来应对越来越复杂的测试挑战。

他所在的试验室面临最大的挑战之一在于实际的建筑结构往往尺寸和自重非常巨大，一般的试验室环境下根本无法使用足尺建筑结构进行振动台测试。传统的振动台测试不得不选择缩比模型，随着建筑结构越来越庞大，缩比比例尺越来越高，一般为1:100甚至1:200。但是缩比模型的抗震测试弊端就是比例尺越高，测试的结果越没有意义。过高比例尺模型对动态地震输入的响应方式与低缩比模型或者足尺结构或许存在很大不同，导致难以将缩比模型测试数据外推和应用到真实世界之中。



“我们具备开展更大尺度样件的测试能力，可以获取更加真实的仿真数据，我们不再费时费力地搭建完整的建筑模型，只需做几个子结构或者做个局部的模型就可以完成整个建筑物的抗震模拟测试。这项技术的发展可能开启了工程结构测试与仿真的一个新时代。”

— 杨澄宇博士  
同济大学 土木工程学院桥梁工程系

混合仿真技术可以成为解决此类问题的正道。混合仿真技术可以将低缩比模型或者足尺结构的结构加载测试、振动台测试以及建筑剩余部分的有限元分析相结合，将数值模拟与各种物理测试混合在一起。尽管这一概念不甚新鲜，但是缺乏在低缩比或者足尺结构上进行有意义的抗震模拟测试的应用实例。

2014年，同济大学、加州大学伯克利分校、MTS系统公司一同合作，将实时混合仿真技术与结构加载测试、振动台测试组合在一起，将这一测试技术从基础概念转变为实际应用。

#### MTS的解决方案

为了证明这一概念可以在低缩比模型的抗震测试中实际应用，来自三个不同团体的工程师精诚合作，分担风险。同济大学提供了必要的场地和试验设备，准备了测试对象；加州大学伯克利分校提供了专业建模工具和数值模拟知识；MTS系统公司提供力学测试系统的专业经验和先进的伺服控制技术和咨询。

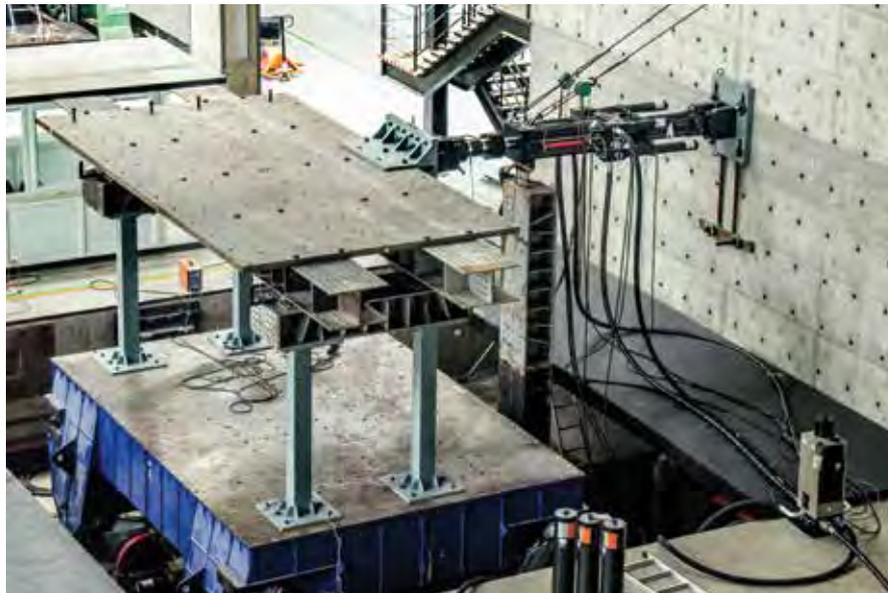
该测试项目需要使用一套三自由度的振动台，作动缸加载系统以及实时混合仿真系统。这里包含了诸多控制、集成以及同步的挑战。MTS系统公司首席工程师游绍剑(Shawn You)博士表示，这项测试项目需要解决包括级联控制、负阻尼补偿等控制难题，这其实是一项非常复杂的任务，需要对同济大学现有的测试设备进行精心的调试，也需要三个团队紧密合作，把不同智力资源组合在一起，一同努力，这是这一项目成功的关键。

该项目的测试对象为某型桥梁1:4模型组合桥梁承重隔振元件。研发团队将模型安装在同济大学试验室的一台三自由度地震模拟器之上，在模型顶部布置合适的配重，同时使用高动态结构加载作动缸将模型与反力墙连接在一起以模拟其受力的边界条件。测试系统采用了实时混合仿真解决方案，包括MTS FlexTest®结构加载系统控制器，469D地震模拟系统控制器。该物理系统由实时混合仿真系统驱动，具有强大的 MTS FlexTest控制器、469D控制器、桥梁结构数字模型以及土壤/岩石数字模型，所有这些系统均通过OpenFRESCO协议，利用反射内存网络联系在一起。经过测试以及研究团队严谨的分析，表明该测试解决方案有效地利用了结构加载作动缸，对被测模型施加了缺失的桥面重量，对整体结构进行了精确的抗震模拟仿真。

加利福尼亚大学伯克利分校研究工程师，兼 ASSES 高级结构工程解决方案负责人 Andreas Schellenberg 博士在项目中负责提供虚拟建模和 OpenFresco 专业支持，他称赞了项目的成功。

“在这之前，混合振动台与结构加载作动缸实现精确、同步控制的应用实例都是在相对较小的样件上实现。而我们这个项目是首次在如此低缩比大尺度的样件上实现了研究目标。这会

Photos courtesy of Tongji University



在同济大学试验室内开展桥梁隔振元件抗震模拟测试：使用实时混合仿真技术组合结构加载作动缸实现低缩比样件的地震模拟测试。

为相关领域的研究人员提供一个宝贵的工具，让他们在较大的结构上进行高保真的地震仿真，产生更优质、更真实的数据。这项测试技术的潜在应用非常引人关注、影响深远，并将促进研究人员在众多领域中的进一步深入合作。”

#### 客户的收益

杨澄宇博士对合作的成功，精确的仿真结果感到非常满意，他认为这种新方法将会给土木工程结构抗震仿真的未来带来广阔的前景。“我们具备开展更大尺度样件的测试能力，可以获取更加真实的仿真数据，我们不再费时费力地搭建完整的建筑模型，只需

做几个子结构或者做个局部的模型就可以完成整个建筑物的抗震模拟测试。实施这种新方法将大幅降低测试成本、节省大量时间，并提高我们试验室的运营效率。”

将振动台与结构加载作动缸组合起来实现实时混合仿真应用不仅局限于复现结构质量这一应用。例如，可以利用多通道作动缸的协调加载来复现风载荷和/或波流载荷，也可以组合振动台阵系统实现有跨距的测试对象振动试验，实现低缩比乃至足尺样件的测试应用。这样可以获取更加精确的仿真测试结果，正如杨博士所言，“这项技术的发展可能开启了工程结构测试与仿真的一个新时代。”



美特斯工业系统(中国)有限公司  
MTS Systems(China) Co., Ltd.

上海  
电话: 021-24151000  
传真: 021-24151199

北京  
电话: 010-65876888  
传真: 010-65876777

电邮: MTSC-Info@mts.com  
http://www.mts.com  
https://www.mtschina.com/

ISO 9001 Certified QMS

MTS、FlexTest是MTS系统公司的注册商标，该商标在美国境内注册，在其他国家和地区也受到法律保护。RTM No. 211177.

其余产品或者公司名称的权益归属于相应的权益所有人。

©2021 MTS Systems Corporation  
100-642-489 TongjiUniversity 3/21