

智能贴片用于检测钢架节点的完整性

摘要

Acellent 技术有限公司开发了一种智能结构健康监控 (SHM) 传感器网络, 该网络可以实时自动评估建筑物的结构稳定性。传感器网络使用压电激励器和传感器来表征损坏情况, 并监测建筑物主要结构各组成部分的刚度。此外, 温度传感器已集成到建议的传感器网络中, 以监测结构部件的温度。Acellent 现有的传感器网络智能层技术被用作建议的开发的开发的基础。对我们现有技术的修改包括重新设计的传感器/激励器布置、开发了具有所需传感器和电子设备的智能 DAQ 传感器套件, 以及提供了结构损坏、温度和刚度信息图的附加软件。这将有助于实时评估建筑结构的完整性。这些数据将可供显示, 以便在进入大楼前, 向急救人员和应急人员提供和预警, 以确保他们的安全。

关键词: 结构健康监测、SMART Layer 智能层、压电、激励器、传感器、建筑物安全

1. 引言

2001 年 9 月 11 日的恐怖袭击导致世界贸易中心双子塔倒塌, 以及随后纽约市消防局人员的丧生都强调了开发方法的重要性, 以便为应急人员和急救人员提供严重的结构不稳定, 或即将倒塌的早期预警。塔楼的灾难性倒塌很可能是由于飞机撞击造成的结构损坏和燃烧的喷气燃料导致的结构高温共同造成的。这显著地表明, 我们多层办公楼的建设比以前认为的更容易受到结构稳定性问题的影响。这些类型的建筑物通常使用的建筑技术采用如图 1 所示的焊接钢矩框架 (WSMF) 作为主要的承重结构。

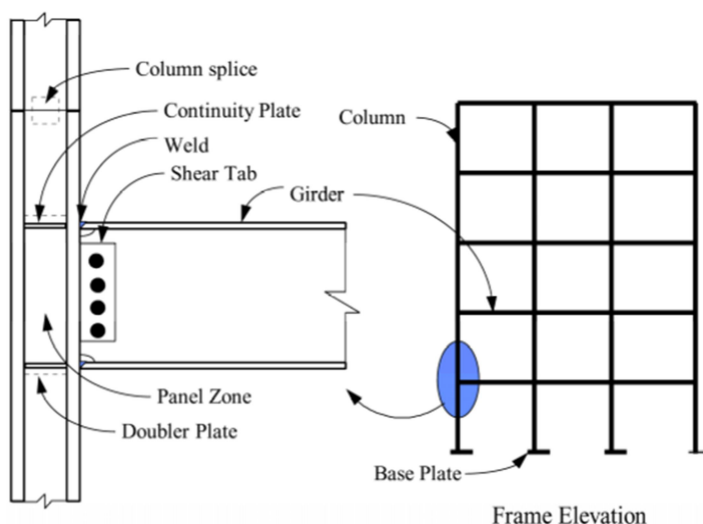


图 1 焊接钢矩框架 (WSMF) 的关键梁柱接合点单元

对这类在地震中受损的建筑物的研究 (例如 1994 年 1 月 17 日的 Northridge 地震) 表明, 焊接钢制力矩框架的建造中常用的经过预先评定的焊接梁柱力矩连接比先前预期的更容易受到损坏 [1]。在地震作用下, 力矩框架结构的稳定性取决于梁柱连接保持完整并抵抗梁和柱相对于彼此旋转的能力。预检合格的连接应具有延展性, 并能够承受建筑规范中明确规定的用于这些结构设计重复大变形循环。但是, 确实发生了各种意想不到的脆性连接断裂, 从穿过或靠近梁翼缘到

立柱的焊缝的孤立断裂，到延伸至整个立柱深度的大断裂。受损构件包括大梁、立柱、柱面板区域（包括大梁翼缘连续性和立柱腹板加强板）、梁与柱翼缘的焊缝以及连接大梁腹板与立柱翼缘的剪力片。严重的连接断裂可能会导致局部塌陷和危及生命安全的重大风险。幸运的是，在1994年北岭地震中，没有焊接钢制力矩框架建筑物倒塌。但是，不幸的是，在1995年神户地震中，许多焊接钢制力矩框架建筑物确实发生了倒塌。

搜救人员通常无法事先评估结构的稳定性，也无法确定为将人员风险降到最低所需的适当的结构危险缓解量和类型。为了可靠地确定建筑物是否已遭受到连接损坏，有必要去除建筑饰面和防火层并进行无损检查，包括外观检查、磁粉测试(MT)、液体染料渗透测试(PT)、射线照相测试(RT)，以及超声波测试(UT)。这是一个非常耗费时间和劳力的过程，不能用于支持发生恐怖袭击或地震等灾难性事件后的搜索和救援行动。即使没有发现损坏，这也是一个非常昂贵的过程。例如，地震引起的建筑损坏造成的经济损失包括为确定损坏程度而进行检查所产生的直接费用、工程设计费用、与结构维修有关的实际费用、建筑饰面和公用事业的拆除和更换费用（必须清除以便进行检查和维修），损坏的非结构性部件的维修，以及因使用损失、业务中断、未在维修期间腾出的空位上收取租金的收入损失，和项目融资成本等导致的间接费用。

使用先进的传感器网络对焊接钢制力矩框架结构中的梁柱力矩连接进行监测，可以取得巨大的效益。与现有的检查和评估建筑物结构完整性的方法相比，综合的结构健康监测系统(SHMS)具有以下优点：

- 实时评估结构稳定性和即将倒塌
- 停机模式可确保安全操作，对应急人员的风险较小
- 结构损坏和温度图，以识别和[定位](#)热点
- 缩短确定建筑物中幸存者确切位置的时间
- 与幸存者沟通的能力
- 减少了结构检查的成本和时间
- 提高结构可靠性
- 最小化灾难性结构破坏
- 检查的便利性和自动化

就在过去的几年中，结构健康监测已经从研究环境发展到了从民用基础设施到航空航天等许多领域的初始应用。结构健康监测(SHM)技术被认为是一种确定结构完整性的革命性方法，涉及[传感器](#)、材料、信号处理、系统集成和信号解释等多学科领域的使用。该技术的核心是开发自给自足的系统，以便在最少的劳动力投入下对结构进行[连续监测](#)、检查和损伤检测。这项技术的目的不仅仅是检测结构故障，而且还可以提供物理损坏的早期指示。然后，可以使用SHM系统提供的预警来确定结构损坏导致故障之前的补救策略。

2. 技术方法

SMART技术为解决检查钢制力矩框架(WSMF)结构中的焊接梁柱力矩连接相关的问题提供了解决方案。通过采用利用Acellent的SMARTLayer®概念的技术，位于梁柱连接处及其周围的传感器可以自主评估[接头](#)的完整性和长期耐久性(图2)。

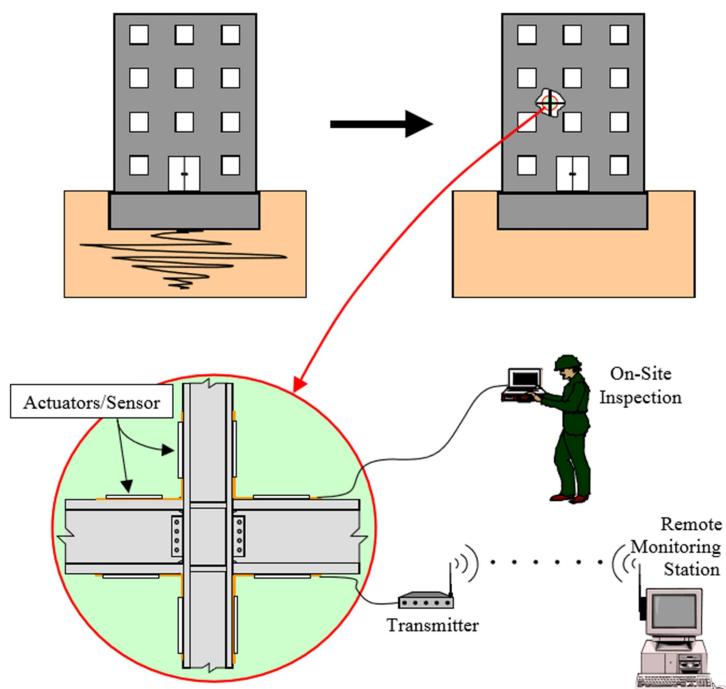


图 2. 智能片联合监测系统开发模型

SMART Layer 技术目前可用于使用压电传感器 (PZT) 的主动和被动感应功能。在主动感应模式下, 每个压电单元都可以用作激励器, 以在相邻传感器监听时激发结构。然后可以根据损坏的位置和大小, 或结构内材料属性的变化来解释传感器的响应。在被动传感模式下, SMART 层可用作连续监测的传感器网络, 以“监听”撞击事件。两种模式都允许在结构/车辆使用期间实时进行结构分析和评估, 并不断收集结构数据和信息。图 3 显示了主动和被动感应的工作原理。

SMART 层技术已被成功证明可检测结构中的损坏。该技术利用嵌入式压电设备向邻近的压电传感器发出诊断信号。通过测量传感器测量值相对于恒定诊断信号的变化, 已成功检测出飞机结构上紧固件孔所产生的裂缝。SMART 层已经使用了类似的技术来分别检测复合材料和铝板上的碰撞诱发的分层和裂纹[2-8]。

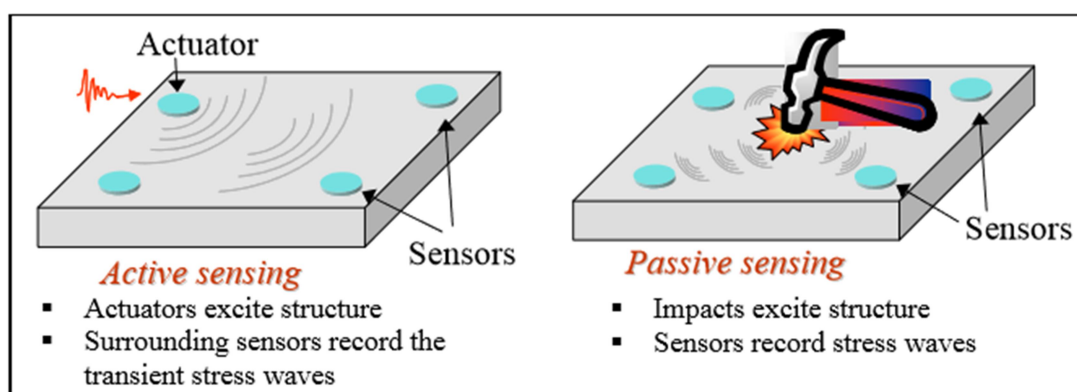


图 3. 主动和被动感应方法

3. 潜在的应用

Smart Patch (智能片) 系统可用于从建筑物、桥梁到近海结构的多种应用。Acellent 已经确定了一些可以充分利用此技术的应用, 例如:

A) 地震多发地区的建筑物监测: 加州等地区的建筑物极易受到地震破坏。加州有数百条已识别出的断层。根据最近地质时期(过去一万年)的滑移率, 大约有 200 条断层被认为具有潜在危险。该州超过 70% 的人口居住在断层 30 英里范围内, 在未来 50 年内可能发生高地震动。国家地震信息中心(美国)报告说, 全球每年发生 12,000-14,000 次地震, 即每天发生 35 次。全世界平均每年发生一次“极强”(8.0 级或以上), 18 次“甚强”(7.0-7.9), 120 次“强”(6.0-6.9) 和 1,000 次“中”(5.0-5.9) 地震。每年, 加州通常会发生两到三场足以对建筑物造成中等程度的破坏(5.5 级及以上)的大地震。确定地震后建筑物的结构完整性一直是一个挑战。Smart Patch 智能贴片 系统可用于评估建筑物的完整性, 并确保救援人员的安全。

B) 桥梁和近海结构的监测: 尽管全国范围内 50 多万座桥梁中 40% 以上存在主要由老化引起的结构缺陷或功能陈旧, 但修复这些桥梁成为唯一可行的解决方案。在各种可用的修复技术中, 外部粘合碳纤维增强塑料(CFRP)复合带材料已被证明是大规模修复和/或增强受损结构以延长其使用寿命并避免生命财产损失的最有前途的方法之一。最近, Acellent 的结构健康监测(SHM)系统已用作无损评估工具, 用于检测桥梁修复过程中复合材料修补片与混凝土面板之间的剥离(图 4) [15]。除了监测桥梁维修之外, 桥梁和海上平台(如石油钻塔)上容易损坏的区域也是 Smart Patch 智能贴片系统的潜在应用。

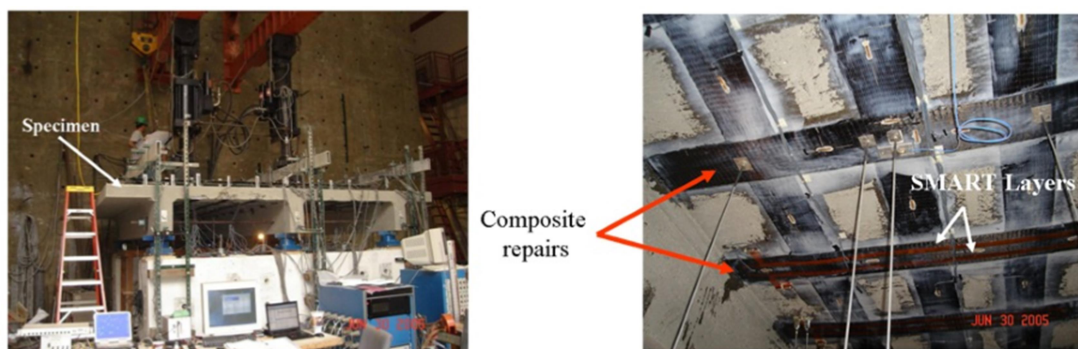


图 4. Acellent 的 SHM 系统, 用于评估复合材料桥梁维修

4. 概念证明和实验室实验

4.1 内部梁柱接合点试件试验

A) 内框接合点样品制作

Acellent 通过首先获取典型的焊接钢矩框架接合点的试样开始了 Smart Patch 智能片系统的开发。该样品是根据 AISI 标准制造的, 横截面为 4 英寸 x 6 英寸, 长度为 4 英尺, 横梁和立柱接头, 热轧 A36 钢, 由机械加工车间制造, 布局如图 6 所示。

B) 传感器和配置

可从适当的供应商处获得尺寸为 2 英寸 x 3 英寸且厚度为 0.1 英寸的压电换能器。如下图所示, 将它们安装在钢制试样上。安装了八个换能器以进行初步测试, 每条腿上两个。传感器使用现有的数据采集硬件获取了一组基准参考信号。

C) 监测接合点刚度的试验

设计了一个测试装置，以使装有传感器的测试物品变形。测试设置的图片如下(图 5)所示。目的是确定样品的刚度。为此，需要在应力作用下弯曲样品。为了确保刚度的变化，在试样的接缝处进行了切割。弯曲是通过在试样和基础大梁周围使用链条完成的。使用 30 吨千斤顶施加力，并使用测力计进行测量(图 6)。在设定的力水平下测量试样边缘之间的距离。

D) 测试结果

如上所述，通过对样品施加载荷，并测量框架角之间的诱导位移 d ，可获得接合点刚度的测量值。这是在对试样增加损伤(接头处的切口)之前和之后进行的。图 6 显示了未损坏和损坏框架的载荷-位移曲线。该图清楚地显示了损坏后接头刚度的损失。

图 7 显示了根据弯矩测试实验计算出的信号能量比。此外，还收集了结构损坏前后的传感器数据。一条腿上，两个极性相反的压电激励传感器被一个 4 kHz 正弦波脉冲激励。对于损坏状态，计算出驱动和感应传感器对 1→2、1→3 和 1→4 的传输信号能量。这些值针对未损坏状态的传输信号能量进行了归一化处理。可以看出，激励器和传感器对 1→2 和 1→4 的信号能量比降低(低于 1.0)，而激励器和传感器对 1→3 的信号能量比增加(高于 1.0)。这是因为，随着损坏的累积和接头的刚度降低，从力柱到梁的能量传输量会减少，从而导致激励器和传感器对 1→2 和 1→4 的信号能量比降低。此外，由于较少的能量传输到横梁，因此更多的能量留在了柱子中，从而导致激励器和传感器对 1→3 的信号能量比更高。

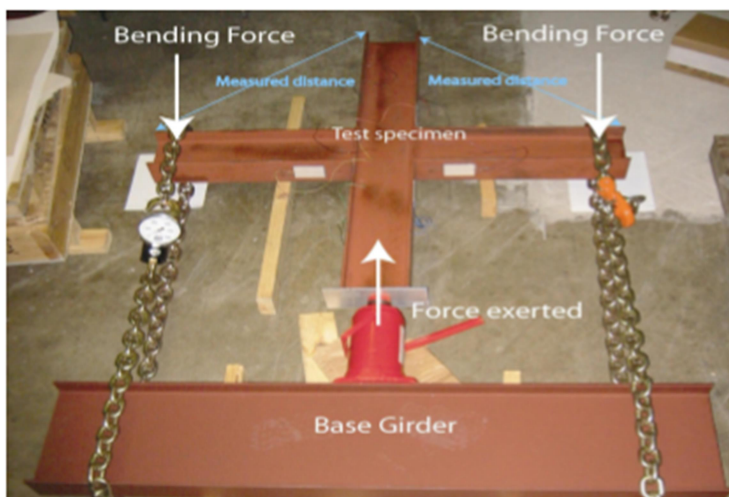


图 5. 焊接钢制力矩框架试件及试验方法

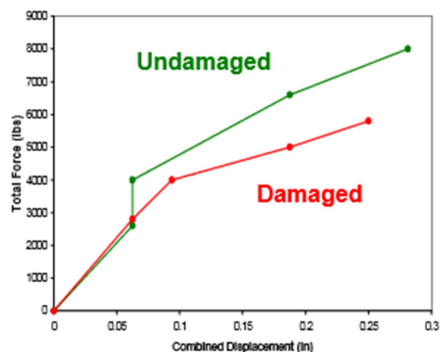


图 6. 未损坏和损坏状态下的位移

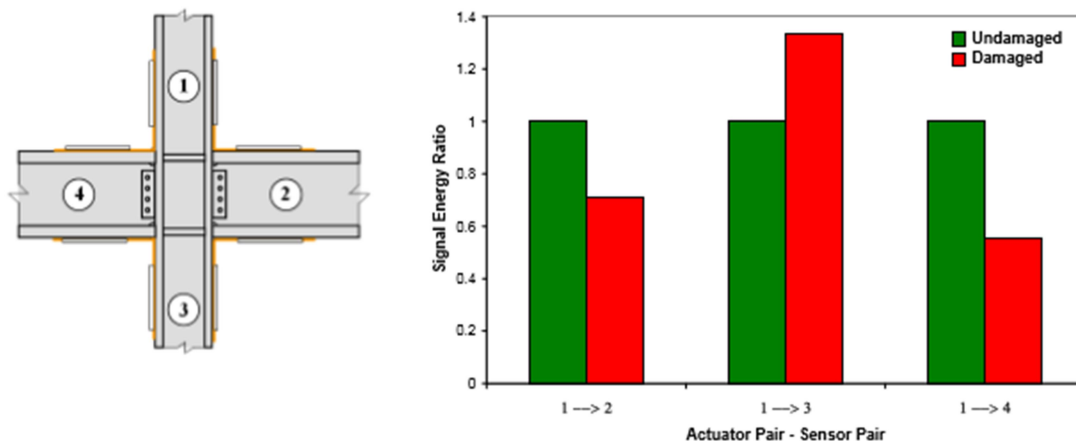


图 7. 信号路径的信号能量比

4.2 外部梁柱接合点构件测试

A) 外部接合点零件制造

Acellent 与 Leighton 集团工程公司和 Testing 工程师有限公司一起制造了一个外部梁柱接合点试样，用于测试 Smart Patch 智能片系统。梁构件遵循美国钢结构学会 (AISC) W-8x31 宽梁规范，柱子为 W-10x49。梁与柱之间的接合点界面是完全穿透的坡口焊缝，其工作由持证焊工完成。试样的设计如图 8 所示。

B) 传感器和配置

图 9 显示了用于传感器和配置的智能层的类型。在前期试件测试中，基于其最佳信号性能，选择圆形压电换能器和直径为 1/4 英寸、厚度为 0.1 英寸的传感器嵌入智能层，以用于外部梁柱接合点样品。使用了两种类型的层：类型 1，带有 5 个 PZT 压电传感器磁盘的 T 形，以及类型 2，具有嵌入 4 个 PZT 压电传感器磁盘的条带。安装了两对类型 1 的智能层，以监测梁和柱之间的焊接界面。一对类型 2 的智能层安装在立柱和梁截面中部的抗剪螺栓板之间。最后安装了一对类型 2 的智能层，以检测梁腹板和柱子界面附近的损坏。将另一对类型 2 的智能层安装在柱子腹板上，以监控柱子在接合点中心附近的旋转。使用 ScanGenieTM 系统获取基线信号[17]。

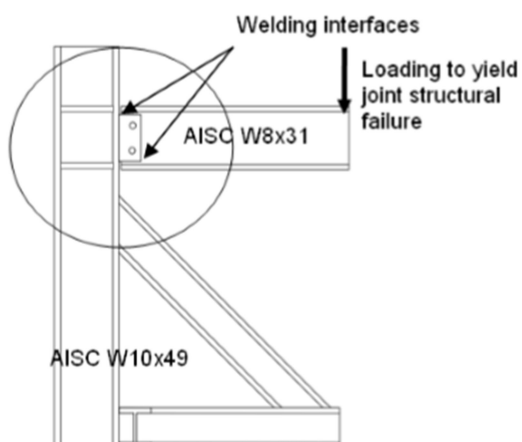


图 8. 梁柱接合点试件

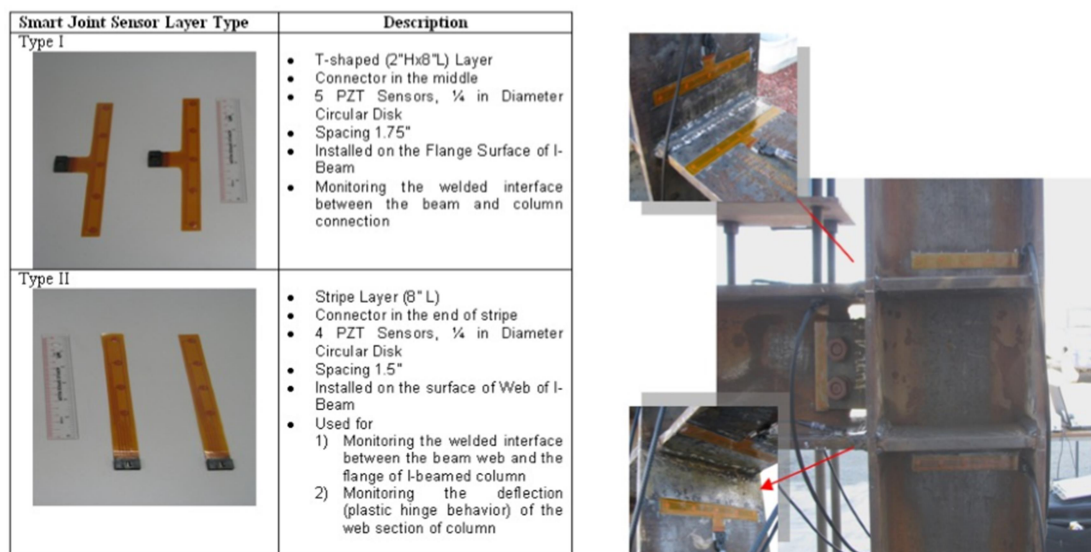


图 9. 用于外部梁柱接合点组件的智能贴片传感器安装

C) 监测接合点刚度的测试

试件测试是在位于加州圣莱安德罗的测试工程师公司的认证测试中心中进行的。在测试过程中，我们将载荷施加到梁单元上，以使梁柱节点中产生最大弯矩。施加测试负载时，初始负载为 20 kips，每个间隔增加 10 kips (图 10 (a))。该结构最终在加载至 114 kips 后，即加载 110 kips 后失败。数据是在 20、30、40、50、60、70、80、90、100、110 和 114 公斤的负载下采集的。在此载荷下，我们检查了结构，并在加劲杆和立柱截面的翼缘之间的界面中发现了一个裂纹，如图 10 (b) 所示。

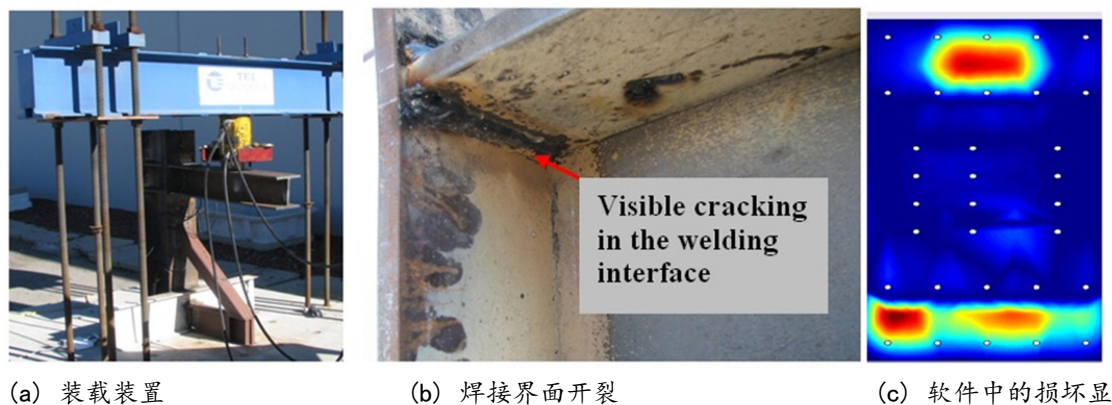


图 10. 来自 Acellent ACCESS 软件的外部梁柱接合点部件测试和损伤图像显示

D) 测试结果

Acellent 软件套件(ACCESS)是 Acellent 主动结构健康监测系统智能包中开发的标准软件[17-18]。该系统可以实现压电超声传感器的数据管理平台。通过信号处理模块的设计和损伤检测算法，我们可以根据损伤指数量化损伤程度。图 11 示出了在第一模式到达时间窗口 (FAW) 中使用散射信号的总信号能量 (TSE) 的结果，称为时间窗口分析。

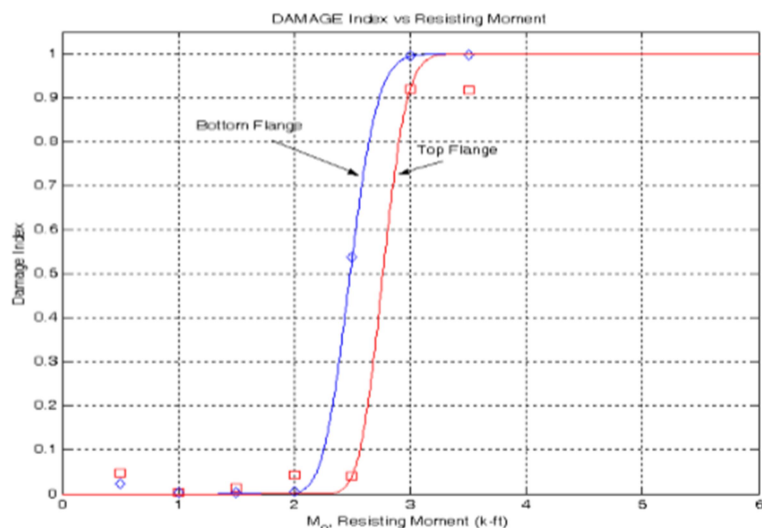


图 11. Smart Patch ACCESS 软件的定量诊断结果

5. 结论

当前的研究集中在确定智能片系统概念验证的可行性以及系统设计架构的建立上。目前的成就是：

- 使用 Acellent 声波超声技术评估 WSMF 梁柱接合点弯矩超过而引起的渐进式损伤
- Smart Patch 智能片传感器可以检测损坏，并监视损坏的进度，例如柱子的塑料铰链行为以及焊接界面中裂纹长度的增长
- 由 ScanGenie 硬件和软件组成的当前系统已通过完整结构子组件进行了验证。
- 原则上，可以通过评估梁柱接合点的刚度，并通过评估智能贴片系统的破坏指数来确定结构整体功能。

已经完成了系统验证，并在实际的建筑应用中演示了智能片系统的实用且易于使用的原型。但是，原型系统仍然有几个值得改进的方面：1) 使系统能够执行自动结构扫描和来自传感器网络周围扫描站的数据分发。2) 事实证明，该硬件系统能够与压电传感器和温度传感器配合使用，从而具有固有的自主结构完整性监测功能。为了使系统在现场可部署的规模最小化，需要使用最新的电子制造技术，即用于连接监测单元的专用集成电路设计 (ASIC) 来简化系统模块。3) 传感器套件有待改进，使其成为用于现场部署的独立系统。这些传感器将与印刷电路和微型电子电路集成在一起，用于处理器、数据采集设备、无线电通信和 GPS 功能。

6. 未来的工作

为了使该系统开发成功，未来的工作将朝以下方向努力：

- 系统需要 3D 结构模型图形和可视化功能，这些功能将集成在下一个 Smart Patch 软件版本中。

- 为了进一步实施建筑结构健康监测的预测，需要将结构清单信息（例如结构特征、设计规范和其他工程因素）存储在清单数据库中，以进行预测过程。可以对此进行调查并将其集成到 Smart Patch 应用程序中。
- 该系统有可能将生命周期成本分析纳入长期管理策略。
- Acellent 将与建筑业主或管理人员合作进行全面验证。
- Acellent 将收集来自最终用户的反馈和建议，并为建筑管理行业和应急部门创造变革性成果。

致谢

这项研究得到了国土安全部科学技术局小企业创新研究（SBIR）计划的支持，项目号为 NBCHC070100。

Acellent Technologies, Inc. 代理商联系方式:

样品,评估板,参考设计,报价,技术支持

电话:0755-82565851

邮件:dwin100@dwintech.com

手机:156-2521-4151

网址: www.dwintech.com/acellent_technologies_inc.html

深圳市南频科技有限公司

D-Win Technology(HongKong) Co.,Ltd

