

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.201



桥梁结构试验技术 2020 年度研究进展

蒲黔辉, 徐希堃, 吴怡宁, 黄胜前, 洪彧

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:桥梁结构试验主要是通过对桥梁结构本身或模型施加静力或动力作用,利用测试技术采集精确可靠的试验数据,获取桥梁结构真实行为,以解决桥梁工程领域科研与设计中的问题。桥梁结构试验作为推动桥梁工程领域发展的重要手段,长期以来一直起着举足轻重的作用。随着测试技术的进步,桥梁结构试验技术也受到了学者们的广泛关注。为了促进该领域的进一步发展,指导先进测试技术在桥梁结构试验领域中的推广和应用,对桥梁模型试验、桥梁现场试验、桥梁测试技术三个关键方面的技术方法进行了系统的介绍,并对 2020 年度内较有启发性的相关研究进行了介绍与总结,发现桥梁结构试验技术正进一步朝着多学科交叉融合的大方向发展。

关键词:桥梁模型试验;桥梁现场试验;桥梁测试技术

中图分类号:U446 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0001-11

State-of-the-art review of the technology in bridge structure test in 2020

PU Qianhui, XU Xikun, WU Yining, HUANG Shengqian, HONG Yu

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: The bridge structure test is mainly a means to obtain the behavior of the bridge structure by applying static or dynamic action on the prototype or model of the bridge structure and using measuring and test techniques to collect precise and reliable test data, so as to solve the problems existed in scientific research and design in the field of bridge engineering. As an important means to promote the development of the bridge engineering field, the bridge structure test has been playing an important role for a long time. In recent years, with the progress of measuring and test technology, the technology in bridge structure test has also been widely concerned by scholars. In order to promote the further development of this field and guide the popularization and application of advanced measuring and test techniques in the field of bridge structure test, this paper systematically introduces the technical methods of three critical aspects: bridge model test, bridge field test and measuring and test technology of bridge, and reports and summarizes the enlightening related research in 2020. Finally, it is found that the technology in bridge structure test is further developing towards the integration of multi-disciplines.

Keywords: bridge model test; bridge field test; testing technique of bridge

随着桥梁事业的快速发展,越来越多的新技术出现,使得桥梁工程具有了更大的跨越能力和更强的耐久性。试验测试技术作为经验获取和技术验证的重要手段,在桥梁结构工程领域的研究中一直处于不可缺少的地位。

桥梁结构在外部作用下(如静荷载、动荷载、强迫位移、温度场等)会产生位移、应变、振动等响应。为了保证桥梁的

安全性和使用需求,需要监控桥梁的响应是否超限。因此,为了了解桥梁在外部作用下的响应特征,通常采用模拟分析联合结构试验的方法进行研究。通过对比试验结果与分析结果,能够检验分析结果的合理性和正确性。试验研究内容是非常丰富的,其中,试验目的主要包括:分析理论与计算方法的验证;新结构与新工艺的研发;为规范制定提供依据;对

收稿日期:2021-07-09

基金项目:四川省科技计划(2021YJ0054);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划(P2019T001);广西科技计划(2021AA01007AA)

作者简介:蒲黔辉(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事新建桥梁及既有桥梁结构的研究与评估,E-mail:qhpu@vip.163.com.

洪彧(通信作者),女,博士,E-mail:hongyu@swjtu.edu.cn.

新建或既有桥梁状态的评估。若按测试对象为桥梁结构试验进行分类,可以分为原型试验和模型试验。其中,原型试验(实桥试验)是以实际的桥梁结构为试验对象,其优点是能够真实地反映实际结构的工作状态,试验结果相对直接可靠,但也存在无法进行破坏工况研究、现场测试条件差等缺点;模型试验则是仿照真实结构,以相似理论为基础,以建成的足尺或缩尺模型为试验对象,通过施加等效荷载进行的类比试验研究,但其也存在成本高、试验周期长、模型边界条件难以与真实结构等效等不足。若按桥梁结构的测试内容分类,则可以分为静力试验、动力试验(包括拟静力试验、拟动力试验、振动台试验、风洞试验等)、疲劳试验、温度场试验等。总的来说,桥梁结构试验是需要多方协作配合的系统性工作,往往需要统筹设计,包含:试验目的;测试内容;加载方法;测量方法;试验程序;试验进度;试验分工;试验安全等方面。

由于信息化的普及、新材料新工艺的应用、智能化的引入和各个学科之间的交叉融合,桥梁试验技术也发生着巨大的改变。近年来,桥梁领域的研究对试验的灵活性、准确性、安全性、经济性等方面的要求愈来愈高,从而不断出现大量的新设备和新方法。现阶段,桥梁结构试验技术的研究热点主要有:新型传感设备开发;基于机器视觉的检测技术;自动化及智能化检测技术;复杂环境下快速稳定检测技术;基于大数据的试验新方法;多场耦合试验技术。

1 桥梁模型试验

桥梁模型是仿照真实桥梁,按照一定的比例关系复制建成的代替结构物。它代表原始桥梁结构的全部或部分特征。通过进行桥梁模型试验,能够得到与真实桥梁结构相似的工作情况,从而掌握真实桥梁的工作性能。模型试验与原桥试验相比,具有参数易控制、环境条件限制少、经济性好、针对性强、数据准确、可以预埋传感器等优点。

1.1 静力模型试验

静力模型试验是桥梁结构试验中最常见的基本试验。通过静力模型试验可掌握桥梁在静载作用下的性能、传力机理、破坏机理及安全度等问题。静力模型试验的复杂程度是根据所研究的结构本身、外部作用和研究目的等复杂程度决定的。近年来,随着新材料、新结构、新应用场景等出现,相应的模型试验也在逐步多样化。为了研究受薄膜效应作用的组合箱梁板的横向受力性能,Zhu 等^[1]制作了 6 块 1:2.5 的组合箱梁桥面板模型,并通过静载试验进行了验证。为了研究钢-混凝土组合梁的竖向抗剪性能,Zhou 等^[2]对 5 根简支组合梁和 1 根纯钢梁进行了负弯矩作用下的力学性能试验研究。该试验将整个试件翻转了 180°(即底部为混凝土板,顶部为钢梁),集中荷载作用于跨中钢梁的下翼缘,以此来模拟试件受到负弯矩(混凝土板受拉)的情况。为了研究高速铁路混合梁斜拉桥钢-混结合段(SCCJ)的受力性能,Yang 等^[3]以深茂铁路潭江特大桥为背景,制作了 1:2.5 的 SCCJ 缩尺模型(该模型试样长 8.4 m,由 2.6 m 钢梁、2.8 m SCCJ

和 3 m 混凝土梁组成。试件由尺寸为 3.2 m×2.4 m×2.6 m 的反力墙支撑,以保持其稳定性),并在西南交通大学陆地交通地质灾害防治技术国家工程试验室进行了静力试验,如图 1 所示。为了研究圆钢管混凝土弯翼梁(CRCFTFG)和相应的曲线工字梁(CIG)在跨中集中荷载作用下的受弯性能,华中科技大学的 Gao 等^[4]制作了两个 CRCFTFG 试件和一个 CIG 试件并进行了静力加载试验,该试验设计了一种特殊的滚动轨道装置(RTD),保证载荷方向垂直向下。为了研究双钢箱梁桥在集中荷载作用下的冗余度,Pham 等^[5]设计制作了典型双钢箱梁桥的 1:3 缩尺模型,并进行了一系列弹性荷载试验、循环荷载试验和极限荷载试验。易伟建等^[6]以配箍率、剪跨比和混凝土强度为变量,完成了集中荷载作用下 36 根钢筋混凝土筒支梁、12 根无腹筋梁和 24 根有腹筋梁的受剪性能试验,对其裂缝发展、破坏形态、临界斜裂缝倾角、主斜裂缝荷载、抗剪承载力、跨中挠度等进行了观察和测量,并对我国现行混凝土结构设计规范(GB 50010-2010)中最小配箍率取值的合理性进行了分析。Scandella 等^[7]对钢板梁在剪切过程中剪切承载力临界状态前后的变形行为进行了新的试验研究。试验设计了 4 根常用尺寸的试验梁,并在过程中利用光学测量系统进行了试验数据的采集。Man 等^[8]对混凝土板和梯形波纹钢腹板的非棱柱悬臂梁的全过程剪切性能进行了试验和理论研究。试验选择长度为 5.4 m 的简支悬臂梁作为测试梁,测试梁的悬臂侧为 1.6 m,而简支跨长度为 3.8 m,并由两个 100 吨的千斤顶在液压伺服控制系统的控制下实现了同步加载。为了研究水平弯曲的超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)梁在垂直于梁平面的集中荷载下的结构性能,Xie 等^[9]对 4 根曲率分别为 0°、60°、90°和 120°的 UHPFRC 梁进行了试验,并使用 8 个激光传感器和位移传感器(LVDT)测量了结构的垂直偏转情况。为了研究带栓钉的波纹钢板与混凝土之间的粘结滑移行为,西安建筑科技大学的 Song 等^[10]设计制作了 12 个波纹钢板混凝土(CSPC)组合试件,并进行了推出试验。该试验中 CSPC 试样垂直布置在加载装置中,为了均匀地分配施加在试样上的荷载,在试样波纹钢板的顶部水平放置了一个加载板。在试件底部设置了两个厚度为 30 mm 的钢块,以保持稳定并留出足够的滑动空间。为了研究固定式钢管混凝土抛物线拱(CFST 拱)的面内稳定性,Hu 等^[11]对三个跨度相同但矢跨比不同的钢管混凝土拱桥进行了全跨五点对称集中荷载试验,其中所有荷载均采用同步加载控制。为了研究不同纤维类型钢筋混凝土空心梁的抗扭性能,Hassan 等^[12]分别设计制作了不同合成纤维和钢纤维的混凝土空心梁,并且对试验样品施加了纯扭转荷载。在梁的两端使用钢框架来施加扭转荷载,为了在整个试验过程中消除荷载偏心,在钢梁顶部居中放置了一个半球形支座,以确保梁上的应力完全处于扭转模式。结果表明,该扭转试验可以应用于研究不同纤维增强空心钢筋混凝土构件的抗扭性能。

1.2 动力模型试验

桥梁在实际服役过程中,常常会受到各种各样的动荷载

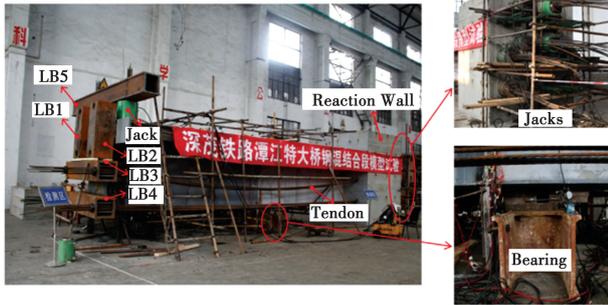
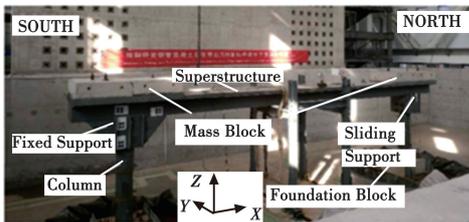


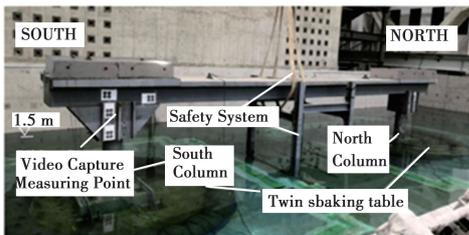
图 1 潭江大桥钢-混结合段模型试验^[3]

作用,为了了解桥梁结构在动载作用下的工作性能,通常采用对结构施加动荷载来进行研究,试验主要包括:拟静力试验、拟动力试验、振动台试验、风洞试验等。由于结构动力学特征对结构参数的敏感性,结构动力模型试验对于模型的精度、边界条件的可靠性及动力荷载的模拟方法提出了更高的要求。为了减轻地震灾害对桥梁的破坏,桥梁抗震性能也成为了桥梁设计考察的重要因素之一。

为了了解桥梁在地震作用下的响应规律,学者们进行了大量的桥梁抗震试验。Wang 等^[13]根据地震激励下主梁水平地震惯性力的传递路径,制作了两个 1:75 比例的模型:一个浮动体系(FS)斜拉桥和一个固定铰接体系(HS)斜拉桥,并进行了振动台测试,探究了双塔低重心斜拉桥的地震响应特征。为了验证基于合成响应的曲线桥梁临界激励方向估计方法(RRB)在实际抗震设计中的可行性,Feng 等^[14]设计制作了 1:62.5 的缩尺三跨曲线桥模型,并进行了多角度振动台试验。为了研究跨断层桥梁在地震作用下的受力性能,Lin 等^[15]根据一座双层钢管混凝土桥墩钢-混凝土组合刚构桥(SCCRFB)制作了 1:10 比例的三跨桥梁模型,并进行了振动台试验。为了探索预制段结构在大地震危险区和复杂富水地区的抗震性能,Zhang 等^[16]对一座 1:4 的新型自定心节段单跨桥梁进行了水下振动台试验,并且研究了在水深 1.2、1.5、1.8 m 和无水 4 种水环境下,桥梁在不同强度地震动作下的受力性能,如图 2 所示。



(a) Bridge model w/o water



(b) Bridge model w/1.5 m depth water

图 2 单跨桥梁新型自定心节段水下振动台试验^[16]

为了探索对称桥梁结构在地震反应中的行波共振现象,Xie 等^[17]根据一座主跨 1 400 m 斜拉桥的初步设计,制作了比例为 1:70 的桩-土-斜拉桥模型,并进行了振动台试验。Lin 等^[18]为了研究桥梁在强震作用下的破坏过程和潜在的倒塌机制,帮助桥梁的检查和维修,提出了一种基于非线性有限元模型修正的大跨度斜拉桥倒塌预测方法。以苏通长江大桥为例,制作了 1:35 的全桥模型,结构缩放后的总长度为 59.66 m,主塔的高度为 8.58 m,并进行了振动台试验。在试验过程中,基于桥梁的精细有限元模型,结合实测数据进行了非线性模型修正,将预测的结构响应和最终破坏机理与实测响应和试验观测结果进行了比较,两者达到了较好的吻合效果,如图 3 所示。该试验将模型试验与模拟计算进行了实时融合,是一种模型试验的新思路。

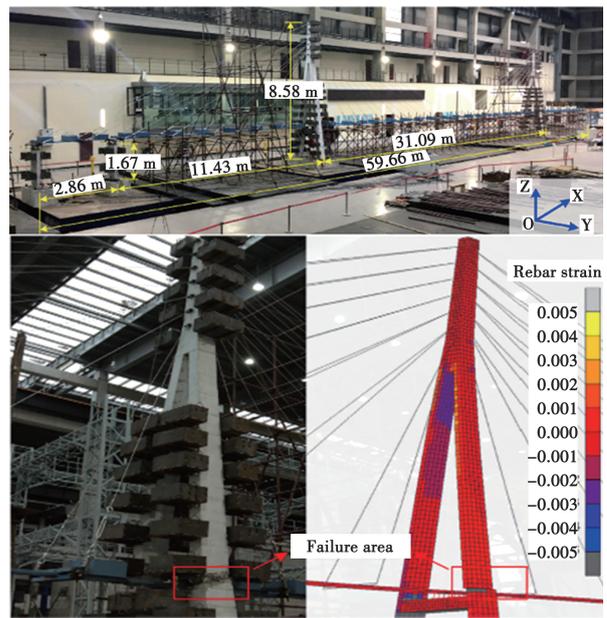


图 3 苏通长江大桥模型试验,实测与预测结果对比图^[18]

Liu 等^[19]通过拟静力循环加载试验,比较了钢筋混凝土柱(RC 柱)、无粘结预应力钢筋混凝土柱(UBPRC 柱)和全预应力混凝土柱(FPC 柱)的抗震性能。试验中,为了避免预应力钢筋锚固与垂直加载器之间的相互作用,两个垂直加载器的一端被固定在反力架上,另一端被固定在盖梁上,再通过滑轨将垂直加载器与反力架相连,这样当水平作动器施加横向荷载时,垂直加载器可以与盖梁一起移动。Liu 等^[20]以一座预制装配式桥梁为例,制作了三个 1:4 的桥墩模型,并通过缓慢的循环加载试验研究了灌浆套管(GS)连接的预制构件的抗震性能。Lopez 等^[21]通过对 6 个 1:2 尺度的大型钢筋混凝土圆形桥墩试样的振动台试验,研究了俯冲型地震作用下,地震动持续时间对钢筋混凝土桥墩性能的影响。为了研究圆形矩形空心高墩在不同水平地震作用下的损伤模式和动力响应,Qi 等^[22]基于西南交通大学陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室(NEDL)地震台,对三个 1:6 的桥墩缩尺模型进行了振动台试验,如图 4 所示。该振动台可产生 1.2g 的最大水平加速度和 1.0g 的垂直加速度,对应 160 t 的全承载能力,频率范围为 0.1~50 Hz。

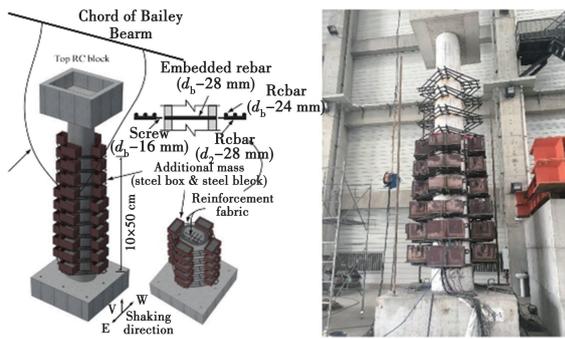


图 4 圆形矩形空心高墩振动台试验^[22]

除了抗震研究以外,桥梁抗风性能研究也是桥梁动力学领域的关键研究方向之一。由于桥梁风灾的不时发生,桥梁抗风性能在大型桥梁的设计中逐步成为主导因素之一。为了进一步了解桥梁的风致特性,以改善桥梁的抗风性能,桥梁风洞试验逐步发展成为了研究桥梁风致特性的重要手段。

1.3 疲劳试验

由于桥梁会因长期反复疲劳荷载作用而产生开裂(即疲劳破坏),从而影响桥梁行车的舒适性和安全性。因此,随着交通量的不断增长,对在役和新建桥梁结构的疲劳力学性能的要求也不断地提高。为了研究新型回旋形复合销钉在循环荷载作用下的性能,Loren^[23]进行了循环荷载作用下的足尺梁模型试验,试验期间使用了LVDT来跟踪钢和混凝土之间的相对滑动。为了研究反复超载对纤维增强聚合物(FRP)加固钢筋混凝土梁疲劳寿命的影响,Al-Qaralleh等^[24]制作了6根钢筋混凝土梁,并对试件施加周期性超载的疲劳荷载。试验为了模拟公路桥上的交通荷载,提出了新的疲劳荷载模式。由于复合钢桥面板的混凝土层开裂会影响其抗疲劳性能,Liu等^[25]提出了一种采用工程水泥基复合材料(ECC)和大型U肋的复合材料桥面板,并制作了两个足尺模型,在西南交通大学高速铁路工程重点试验室进行了疲劳性能试验。在试验中,采用的试验装置合理地模拟了桥面板在荷载作用下的弯曲效应。为了研究高强度钢丝的腐蚀疲劳失效,Xue等^[26]设计了不同腐蚀程度钢丝的疲劳试验,如图5所示。在试验中,通过加速腐蚀的方法,将溶液注入盐雾室以模拟大气,试样置于盐雾腐蚀室内不同时间长短以模拟不同腐蚀程度,每隔一段时间旋转试样以获得均匀腐蚀。

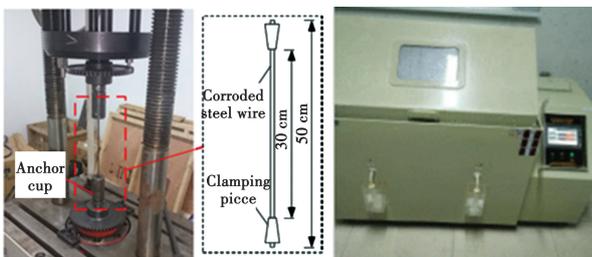


图 5 钢丝的疲劳试验和盐雾室^[26]

张清华等^[27]在对钢桥面板结构疲劳试验成果统计并系统研究的基础上,设计了9个足尺节段试验模型,并采用扫描电子显微镜(SEM)对传统单面焊构造细节和新型双面焊构造细节横断面的初始制造缺陷进行了观测和分析,通过疲

劳试验研究了引入纵肋-顶板新型双面焊构造细节和纵肋-横隔板新型交叉构造细节的钢桥面板结构的疲劳开裂模式和疲劳抗力等关键问题。横隔板弧形切口疲劳裂纹是正交异性钢桥面板的主要疲劳病害之一,为了探索该细节的疲劳抗力,李传习等^[28]开展了正交异性钢桥面足尺模型疲劳试验,对横隔板光滑弧形切口、含人工缺陷的弧形切口,以及碳纤维增强树脂基复合材料单面加固的含人工缺陷的弧形切口的疲劳性能进行了比较研究。Pu等^[29]通过全尺寸模型试验,对大跨度铁路箱形混合梁斜拉桥钢-混结合段(SCJ)的疲劳性能进行了研究。试验中,模型使用的所有材料与实桥(甬江大桥)中使用的材料等级一致。为了使SCJ能紧紧地固定在支座上,试件的混凝土部分与支架一起浇筑,并通过两种纵向预应力筋保证了试件与实桥恒载的等效。

1.4 其他模型试验

为了研究跨海大桥高桩承台桩基的波浪荷载,Xu等^[30]介绍了一个波浪水槽的试验方案,该试验在西南交通大学深水大跨桥梁试验室多功能中型波流水槽中进行,水槽配有活塞式波浪发生系统,长60 m,宽2 m,高1.8 m,侧壁由钢架和钢化玻璃组成,在试验过程中可以提供清晰和广阔的视野,如图6所示。

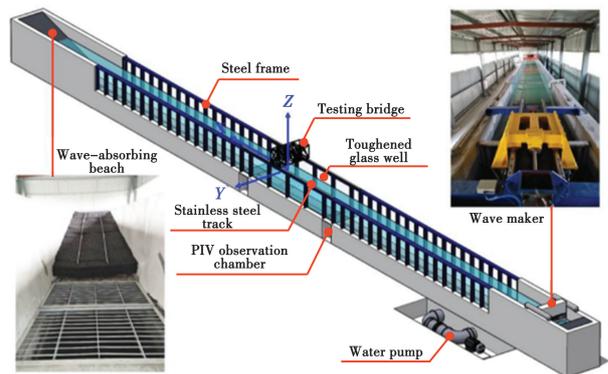


图 6 多功能中型波流水槽^[30]

为了研究在碳氢化合物火灾作用下两种粘结后张法混凝土梁(箱梁和T梁)的力学性能变化,Wu等^[31]对6个样本进行了试验,考虑的因素包括负荷水平和火灾暴露时间,试验装置如图7所示。结果表明,在使用荷载作用下,倒塌前箱梁能承受184 min的火灾,而T梁仅能承受105 min的火灾。

为了研究循环温度荷载下无砟轨道结构层间离缝的产生与扩展规律,以及离缝对轨道结构受力性能的影响,周凌宇等^[32]制作了三跨1:4的无砟轨道-简支梁桥结构的缩尺模型,开展了18次循环温度荷载试验,并在循环温度试验前后分别对结构进行了2次静力加载试验,对比分析了结构体系受力特性发生的变化。试验借助远红外加热灯管结合温控开关及温度传感器,设计了一套能够实现对轨道结构升温 and 控温的温度加载设备。在海洋环境中,RC墩的腐蚀通常沿桥墩的高度而分布不均匀。由于较高的表面氯化物浓度、氧气含量和干湿循环的综合因素,码头飞溅区和潮汐区的腐蚀总是比其他部位严重,严重腐蚀降低了RC墩的机械性能。

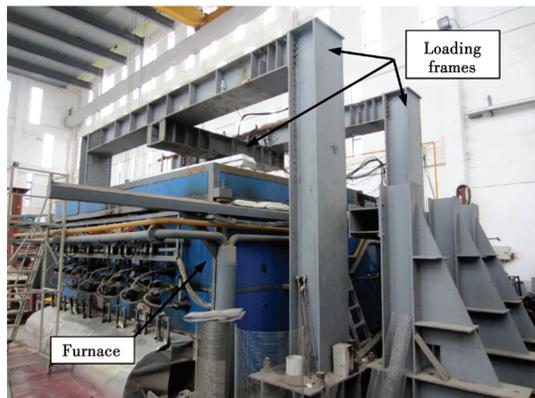


图7 耐火试验炉及加载架^[31]

为了研究飞溅区和潮汐区的严重腐蚀对钢筋混凝土桥墩性能退化的影响,Zhou 等^[33]设计制作了 12 个钢筋混凝土桥墩试件,通过用电化学加速腐蚀技术模拟了飞溅区和潮汐区的严重腐蚀,并进行了轴向压缩荷载和循环荷载试验。桥墩试件局部腐蚀的加速是在腐蚀区表面依次包裹铜网、保水海绵和塑料膜来实现的。由于拉索经常受到拉应力变化作用、内部接触应力和腐蚀环境的影响,为了研究拉索在腐蚀、微动和疲劳耦合作用下的行为,Liu 等^[34]开发了腐蚀微动疲劳试验系统,新型测试系统由疲劳试验机、摩擦装置和一组电化学腐蚀组件组成,该测试系统可以实现同步腐蚀和微动疲劳。Brito 等^[35]研制出了一种低成本双向激励摩擦滑动系统,以提高钢筋混凝土桥墩的抗震性能。该滑动系统是由中心平面和倾斜的球面段组合而成的,其特点是稳定振荡,并且能大幅减小平面上的响应加速度。试验中较有特色的是该模型是利用 3D 打印的模具制作而成的,能够快速高效地使用传统混凝土来构造球面,如图 8 所示。

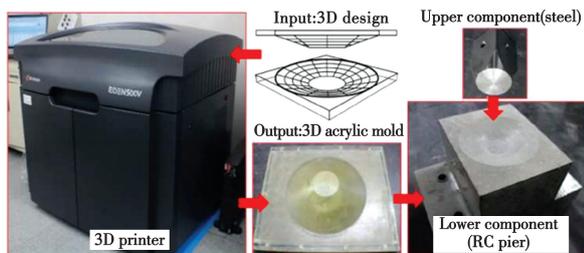


图8 3D 打印机和打印的试验模具^[35]

Ozdogli 等^[36]提出了一种试验研究方法,用于评估各种防撞梁在减轻超高车辆碰撞对铁路桥梁的撞击影响方面的有效性。试验设置了 1:5 的缩尺板梁模型,通过摆动的冲击摆锤(TPG)撞击桥梁,来模拟真实的碰撞事件。通过调整 TPG 跌落高度,从而改变碰撞速度和 TPG 的冲击力。

1.5 小结

通过上述文献调研可以发现,如今的桥梁模型试验技术正朝着跨学科交叉的大方向发展,主要特点有以下几个方面:

- 1) 桥梁设计复杂化导致研究内容越来越丰富与细致,模型试验的形式也变得多种多样;
- 2) 模型试验的体量逐渐增大,主要体现在试验参数的设

计、模型尺寸的大小等方面;

3) 试验测量水平逐步提高,主要体现在高精度传感设备、高科技探测设备、新型测试方法的应用等方面;

4) 模型制造工艺的进步,主要体现在 3D 打印技术的引进;

5) 试验条件的不断提高,主要体现在试验场地的多样化、试验室设备的创新与升级、加载量级的提高、模型约束技术的创新等方面;

6) 加载形式的复杂化。为了更加准确地模拟真实情况,模型试验不再针对简单的外荷载作用进行研究,越来越多的试验开始关注复杂环境耦合以及多荷载类型联合作用的研究;

7) 实时模型修正技术的应用。为了进一步提升试验精度,对模型修正技术与模型试验技术进行了融合的尝试,并取得了较好的结果。

2 桥梁现场试验

桥梁现场试验是了解桥梁实际工作状态最直接的测试手段,试验的目的和内容往往是由实际工程问题所决定的。现场试验的目的的一般包括:桥梁设计及施工质量检验、桥梁实际承载能力判断、桥梁设计理论验证、桥梁动力特性研究。近年来,随着测试分析技术的发展,桥梁现场试验技术也取得了相应的进步。Zani 等^[37]为了研究多跨砌体拱桥的结构承载力影响因素,对一座历史悠久的多跨砌体拱桥(Azzone Visconti 桥)进行了现场荷载试验。试验中,基于激光扫描、地质勘测及历史资料等,分别建立了三种不同的精细有限元模型,基于荷载试验进行了竖向沉降结果对比,最终发现有限元模型缺少土体部分或土-结构相互作用部分,则会低估桥梁的竖向位移和损伤程度。为了更全面地评估铁路桥梁的结构完整性,D'Amico 等^[38]提出了将探地雷达(GPR)和干涉合成孔径雷达(InSAR)技术相结合的铁路桥梁与桥台过渡区监测法,并通过一座铁路桁架桥的现场试验证明了该综合方法的可行性。Zhang 等^[39]研制了一种地基微波干涉雷达系统,通过对一座大跨度悬索桥进行现场试验(包括静力、环境振动和移动荷载试验),获得了桥梁主梁、塔架和拉索的多点位移,并对主梁的多点位移影响线进行了同步测量,同时提出了利用三个参考点测量桥梁主梁位移的方法。为了验证一种新的桥梁结构损伤检测与定位方法(变形面积差法,DAD)的适用性,Erdenebat 等^[40]在一座跨度约 27 m 的预应力混凝土板桥上进行了原桥试验,使用近距离无人机摄影的测量方法对结构刚度变化和损伤进行了检测和定位,如图 9,根据测量精度、偏转尺寸、损伤位置等,对损伤程度进行了评估。

传统的悬索桥吊索张力通常是采用振动法进行测试的,由于吊索可达性差、传感器安装不便,Kim 等^[41]利用数码相机作为采集系统,提出了基于图像的反分析方法,即以非接触的间接方法来计算拉索张力。通过对一座悬索桥进行的环境振动试验,验证了基于图像的反分析方法的有效性。为



图 9 定位目标及测试无人机^[40]

了探究粘弹性阻尼器(VEs)和粘滞阻尼器(VDs)的综合性能,Chen 等^[42]在苏通大桥进行了现场比较试验。类似的,为了验证双转子阻尼器(TRD)设计的有效性,Terrill 等^[43]在人行天桥上进行了现场评估试验。为了揭示真实环境中氯化物对桥梁的影响情况,Zhou 等^[44]在 Amatori 桥所处的大气海洋环境中进行了 3 次为期 4 年的室外暴露试验。试验采用了特殊的管式收集装置(TCD)和电位滴定法,定量地讨论了含盐空气中的氯化物与渗入混凝土试样中的氯化物之间的关系,并探讨了季节性降雨分布对砂浆试件氯离子扩散行为的影响。

由以上研究可以发现,目前桥梁现场试验技术的发展呈现出了明显的多学科交叉融合趋势。除了在试验理论、模拟计算方面的改进外,现场试验的内容在逐步扩充增加;在检测设备的应用上,越来越多的高科技设备被用于现场试验;伴随着机器视觉技术与智能设备的飞速发展,也有越来越多的基于新一代智能检测设备的桥梁现场试验方法不断涌现。

3 桥梁检测技术

随着科技的进步、仪器设备与数据处理技术的发展,越来越多的新技术被应用于桥梁测试中。这些新兴技术对桥梁的测试工作(包括受力状态、微小变形、钢及混凝土材料细微开裂破损等方面的探测和获取)的效率和质量有着明显提升作用。按测试目的大致可以分为以下几类:几何位移测量;应力应变测量;加速度测量;混凝土裂缝及内部缺陷探测;材料破坏探测;基于大数据方法的检测手段等。

目前,基于非接触式测试方法为主的大量新式桥梁检测技术的出现, Lee 等^[45]提出了一种基于计算机视觉的自我运动补偿的长期位移测量系统,解决了传统方法不能长期测量的局限性。Ngeljaratan 等^[46]利用了目标追踪数字光电技术(DIC)来测量桥梁振动台试验中不同地震烈度峰值下的残余桥面转动及变形,可以确定桥梁的 3D 动态响应以及模态特征(即固有频率、阻尼比和模态形状)。Kwiatkowski 等^[47]利用地面激光扫描(TLS)和摄影测量技术对被检测结构的准连续表面进行了测量,减少了现场作业时间,并获得了具有

满意精度的结构三维模型。Meng 等^[48]提出了一种近距离摄影测量技术,利用带倾斜补偿装置的固定相机以及沉降标志来测量小区域的高度变化,并结合多种图像处理算法进行识别和定位,实现了对沉降标志的实时自动测量。Dong 等^[49]提出了一种基于深度学习的全场光流法测量结构位移的新方法,该方法相比传统光流算法具有更高的精度。Garg 等^[50]通过在无人机上安装激光多普勒测振计,实现了铁路桥梁的无接触横向动态位移测量。该方法具有低成本、无约束影响且干扰铁路交通运行的优点。Chen 等^[51]提出了一种将无人机与数字图像相关技术相结合的桥梁振动测量方法。该方法利用数字图像相关技术对无人机捕获的桥梁模型视频进行分析,跟踪测量点的位移,并从中提取出了频率和振型信息。传统的缆索张力测量方法是通过附加的加速度计或弹性磁力传感器,但将这些传感器应用到工程实践中是属于耗时、劳动密集型和高度危险性的。针对这些问题,Tian 等^[52]提出了一种基于无人机与计算机视觉技术的非接触式缆索力估计方法。Wang 等^[53]设计了一种依靠转子提供的升力来紧贴在桥梁底部,同时可以利用框架结构来保证镜头焦距的新型飞行爬行测量机器人,可以实现对桥梁底部裂缝无限航时的高精度遍历测量。其中,无人机的应用大大缩短了所需的检测时间,消除了主观性,大幅减少了检测人员暴露在危险实时交通环境中的可能性。

在大跨度桥梁位移形态测量中,使用传统的位移传感器很难提供固定的传感器布置“参考点”。基于这样的工程背景,以光纤光栅位移传感器为主的新型传感设备得到了广泛的应用。Ye 等^[54]将分布式和离散的光纤传感器安装在预应力梁上,详细研究了预应力损失机理。Hong 等^[55]提出了一种利用长径光纤传感器监测连续梁桥位移形态的无参考点方法,如图 10 所示。通过该方法可由沿整个连续梁桥布置的长径光纤传感器确定其位移形态,且能够高精度地监测各截面的位移时间序列。

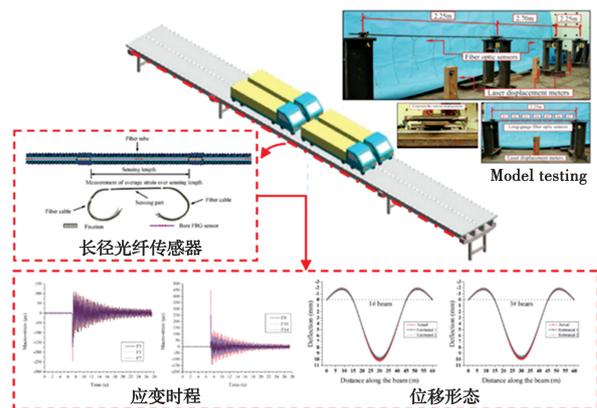


图 10 基于长径光纤传感的连续梁桥位移形态测量法^[55]

为了克服大跨度悬臂梁桥施工过程中挠度监测存在的诸多不足,如施工工序多、布线困难、数据无法实时采集等,Zhang 等^[56]设计了一种基于“等摆强度梁”的光纤光栅倾角传感器和一种基于倾角传感器的挠度监测系统,该系统可以通过倾角变化来测量挠度,能够满足大跨度悬臂桥施工健康监测挠度测量的精度要求。Zhang 等^[57]提出了一种同步识

别简支梁桥损伤和车辆荷载的新方法,使用一组长径光纤布拉格光栅传感器,以减少传感设备、传感器的使用和成本,并且能同时识别桥梁模型的损伤和荷载。Chen 等^[58]提出了一种利用长径光纤光栅传感器进行高速公路桥梁损伤识别的多交叉参考方法,该方法能准确地识别出损伤位置。与传统应变计相比,光纤传感器具有较高的精度和长期耐用性,是提取桥梁构件精确实时应变和温度数据的理想选择。Khandel 等^[59]提出了一种利用光纤光栅传感器对预应力混凝土梁进行损伤检测和定位的统计方法,该方法能够识别在测试期间发生的开裂情况。Berrocal 等^[60]提出了一种基于瑞利后向散射光频域反射仪的分布式光纤传感器的混凝土结构裂缝监测方法。Li 等^[61]基于光纤传感连续挠度监测信息,利用深度卷积神经网络对一座桥梁模型进行了结构损伤检测。Wu 等^[62]基于瑞利分布式光纤传感技术,对混凝土结构中裂纹萌生和扩展的应变场演化进行了测量,并对混凝土结构内部的裂缝路径进行了评估。

目前,随着桥梁检测需求的提高,探地雷达、扫描电镜、超声 CT、磁检测等方法无损检测技术也逐渐被应用于桥梁结构检测当中。Larsen 等^[63]设计、制造并展示了一种新型的多通道、自动化、空气耦合、冲击回波探测装置。该装置能根据每次撞击响应计算出的带限声能值来区分完整混凝土和分层混凝土。Ahmed 等^[64]将地质雷达传感器所收集的资料作为钢筋检测与定位系统的输入,提出了一种新型的钢筋检测和定位系统。Alani 等^[65]结合探地雷达和干涉合成孔径雷达的优点对石拱桥进行了挠度和位移的测量。Kowal 等^[66]对某拆除的铁路桥梁部件进行了疲劳、断裂、硬度和拉伸测试,并利用电子扫描显微镜确定了该百年钢桥部件的微观结构和机械性能。Chen 等^[67]以古老的石桥为例,提出了一种基于超声波 CT 技术的石质文物风化程度和稳定性的评估方法——腐蚀评估磁法(iCammTM)。Mosharafi 等^[68]研究了 iCammTM 技术在评估钢筋开裂、疲劳、应力集中和腐蚀方面的实际能力。Liu 等^[69]发现剪应力分布和由此产生的声发射分布之间具有强烈的相关性,并通过声发射测量了混凝土梁的剪应力状态。

除了测试仪器上的突破,数据处理方法及测试理论发展也激发了桥梁测试技术的进步。Huang 等^[70]基于超声波测量仪与波浪计测得的数据,利用压缩感知算法的正交匹配追踪进行了数据重构,得出稳定准确的水位数据,并通过建立能够反映现实波谱的波谱族,评估了跨海大桥上部结构和下部结构的波浪力。Sodeqhi 等^[71]首次利用移动车辆的加速度测量值对桥梁进行了全面模态识别。Huseynov 等^[72]利用高精度单轴加速度计提出了一种基于直接转动测量的桥梁梁态评估方法。Tan 等^[73]将一个加速度计安装在检测车辆上,并利用提取出的桥梁模态振型诊断出了桥梁的损伤状况。Kullaa 等^[74]将贝叶斯方法应用于传感器网络,利用每个传感器的测试数据依次对网络中剩余的传感器进行评估,然后生成了每个传感器的残差,并提出了基于时域信号的损伤检测方法。近年来大数据技术发展迅猛,应用成效显著。大数据独特的思维方法,为科学研究与探索提供了全新的范式。数

据挖掘技术、深度学习技术、云计算技术的应用让桥梁检测也变得更加高效。Gordan 等^[75]基于跨行业的数据挖掘标准流程(CRISP-DM)提出了一种基于神经网络和独立分量分析的混合模型,并将其应用于基于模态参数的板梁式桥梁结构的损伤预测当中。Dorafshan 等^[76]第一次将深度学习用于冲击回波信号的分类,避免了人工特征选择,并得到了更好的混凝土表面缺陷识别效果。Hou 等^[77]利用计算机视觉和云计算技术,联合了公路桥梁车辆诱发响应监测数据与相应的车辆重量信息,提出了网络物理系统框架。为了减小当前无人机技术在桥梁检查任务中数据处理的局限性,Perry 等^[78]提出了整体检查系统,将无人机的现场检查与先进的数据分析工具相结合,为桥梁管理者提供了简化的决策系统支持,如图 11 所示。

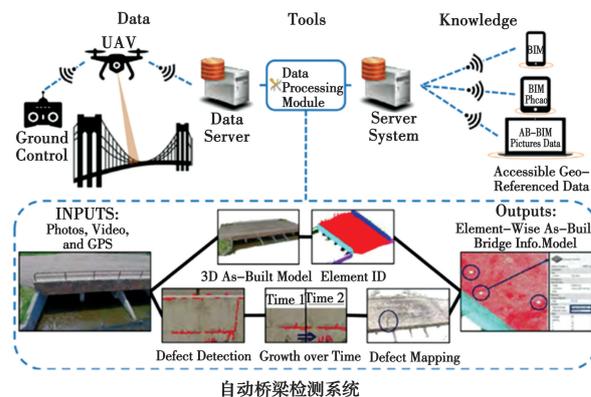


图 11 基于无人机和机器学习的桥梁检查系统^[78]

由以上调研可以看出,目前桥梁检测技术是桥梁试验技术研究的热点方向之一,主要集中在以下几个方面:

- 1) 基于机器视觉的测量方法的研究;
- 2) 传感器的集成开发研究;
- 3) 检测技术的自动化及智能化研究;
- 4) 无损检测技术进一步的研究开发;
- 5) 基于人工智能技术、大数据技术等测试数据处理方法研究。

4 总结与展望

笔者认为桥梁试验技术未来的发展将沿着以下几个方面进行拓展:

- 1) 智能化试验

将模拟计算、机器学习与试验研究相融合,不再局限于模拟计算指导试验设计的固定范式。不仅可以通过模拟计算指导试验进程,同时可以利用实测数据修正模拟计算的结果,实现两个过程的交互,进而通过机器学习的手段改进传统试验思路。目前,自动化测试、结构参数识别、模型修正、机器学习等技术的研究已经为智能化试验的可行性奠定了初步的理论基础。未来,在机器人、大数据、人工智能等新兴技术与桥梁试验技术进一步的交叉融合下,试验研究将会在自动化的操作辅助下,以及智能化、智慧化的决策帮助下,实现质量与效率的大幅提升,实现“智慧试验”。

- 2) 全场试验

随着机器学习、深度学习在各个领域发挥出的巨大潜力,对于试验数据的“质”与“量”的要求也越来越高。因此,大数据的新需求也为试验技术带来了新的挑战。全场测试是近年来试验测试领域提出的全新概念,旨在获取试验过程中更加全面的试验数据。传统试验主要根据前期计算设计,布置少量关键测点来获取试验信息(如应变、温度、位移等),而全场试验则不仅仅针对个别的测点进行测量。目前,众多无损检测手段(如摄影测量技术、激光测量技术、红外成像技术、雷达测量技术等)均为全场测试提供了可能。其中,通过摄影测量技术发展而来的机器视觉测量技术的研究已成为了如今研究的热点之一。但如何提高测试精度;如何对大型结构进行全场测试;如何减少噪声干扰;如何实现更多测试功能等方面还存在深究的问题。

3) 试验模型精确制造

为了进一步提高模型试验的可靠度,有必要提高模型的精确度,特别是研究问题类型、构造形式的多样化,这对于试验模型还原度的要求也越来越高,也对模型制造技术提出了新的要求。目前,3D打印技术已经有了运用于工程的成功案例,如3D打印结构模具、3D混凝土打印、3D钢结构模型桥打印等。然而,目前3D打印技术的应用还只是停留在材料单一、体积小的阶段,缺陷明显,例如3D混凝土打印技术无法选择打印材料强度,也无法植入钢筋等。

4) 多场耦合复杂试验

如今桥梁不仅结构形式越来越丰富,且受力形式也越来越复杂。在这样的前提下,试验设备(如加载装置、约束装置等)的精确性、灵活性、稳定性以及其控制技术等都对研究者们提出了更高的要求。在复杂条件下,考虑到较小的扰动就可能对所研究参数的试验结果造成较大的影响。此外,多荷载类型联合作用的研究也是如今研究的热门之一(如地震-波浪-桥、风-地震-桥、风-车-桥、地震-车-桥等)。随着试验需求进一步的复杂化,耦合型、综合型试验必将得到广泛关注。

5) 集成试验测控系统

由于各学科之间不断的交叉融合、迭代创新,越来越多的新理念、新技术、新设备被引入到桥梁试验技术中来,因此,集成测试设备开发将为桥梁试验技术的发展开辟新的道路,例如无人机+智能检测设备、传感器+5G网络等。此外,集成试验平台开发(如风洞+振动台+波浪水槽等)和集成控制系统开发(如BIM+数值分析软件+试验控制系统)也将是未来试验技术提升的重要方向。

参考文献:

- [1] ZHU Y J, WANG J J, NIE X, et al. Structural performance of slabs in composite box girder considering compressive membrane action [J]. *Engineering Structures*, 2020, 212: 110457.
- [2] ZHOU X H, MEN P F, DI J, et al. Experimental investigation of the vertical shear performance of steel-concrete composite girders under negative moment [J]. *Engineering Structures*, 2021, 228: 111487.
- [3] YANG S L, PU Q H, SHI Z, et al. Mechanical behavior of steel-concrete composite joints in railway hybrid cable-stayed bridges [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 173: 106242.
- [4] GAO F, ZUO G J, DENG L X, et al. Flexural behaviour of horizontally curved I-girders with round concrete-filled tubular flange [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 170: 106090.
- [5] PHAM H V, YAKEL A, AZIZINAMINI A. Experimental investigation of redundancy of twin steel box-girder bridges under concentrated loads [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 177: 106440.
- [6] 易伟建, 刘莎. 最小配箍率下钢筋混凝土筒支梁受剪性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(1): 128-137.
- [7] SCANDELLA C, NEUENSCHWANDER M, MOSALAM K M, et al. Structural behavior of steel-plate girders in shear: Experimental study and review of current design principles [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(11): 04020243.
- [8] MAN Z, LIN A. Full-range shear behavior of a nonprismatic beam with steel trapezoidal corrugated webs: Experimental tests and FE modeling [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(8): 04020162.
- [9] XIE T, MOHAMED ALI M S, ELCHALAKANI M, et al. Experimental and analytical study of ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete curved beams [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(2): 04019192.
- [10] SONG J L, WANG W, SU S Q, et al. Experimental study on the bond-slip performance between concrete and a corrugated steel plate with studs [J]. *Engineering Structures*, 2020, 224: 111195.
- [11] HU Q, LIU C Y, YUAN C C, et al. Experimental investigation into in-plane stability of concrete-filled steel tubular parabolic Arches under five-point concentrated loads [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2020, 20(6): 2038-2050.
- [12] HASSAN R F, JABER M H, AL-SALIM N H, et al. Experimental research on torsional strength of synthetic/steel fiber-reinforced hollow concrete beam [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 110948.
- [13] WANG Z, ZHANG W X, FANG R, et al. Dynamic model testing of low-gravity-center cable-stayed bridges with different girder-to-tower connections [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(1): 04020112.
- [14] FENG R W, DENG T F, LAO T P, et al. Theory and experimental verification of a resultant response-based

- method for assessing the critical seismic excitation direction of curved bridges [J]. *Engineering Structures*, 2020, 216: 110713.
- [15] LIN Y Z, ZONG Z H, BI K M, et al. Experimental and numerical studies of the seismic behavior of a steel-concrete composite rigid-frame bridge subjected to the surface rupture at a thrust fault [J]. *Engineering Structures*, 2020, 205: 110105.
- [16] ZHANG D, LI N, LI Z X, et al. Seismic performance of bridge with unbonded posttensioned self-centering segmented concrete-filled steel-tube columns: An underwater shaking table test [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 138: 106350.
- [17] XIE W, SUN L M, LOU M L. Shaking table test verification of traveling wave resonance in seismic response of pile-soil-cable-stayed bridge under non-uniform sine wave excitation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2020, 134: 106151.
- [18] LIN K Q, XU Y L, LU X Z, et al. Cluster computing-aided model updating for a high-fidelity finite element model of a long-span cable-stayed bridge [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2020, 49(9): 904-923.
- [19] LIU X X, LI J Z, TSANG H H, et al. Experimental evaluation of seismic performance of unbonded prestressed reinforced concrete column [J]. *Engineering Structures*, 2020, 208: 109913.
- [20] LIU Y, LI X P, ZHENG X H, et al. Experimental study on seismic response of precast bridge piers with double-grouted sleeve connections [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111023.
- [21] LOPEZ A, DUSICKA P, BAZAEZ R. Performance of seismically substandard bridge reinforced concrete columns subjected to subduction and crustal earthquakes [J]. *Engineering Structures*, 2020, 207: 110216.
- [22] QI Q M, SHAO C J, WEI W, et al. Seismic performance of railway rounded rectangular hollow tall piers using the shaking table test [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 110968.
- [23] LORENC W. Concrete failure of composite dowels under cyclic loading during full-scale tests of beams for the “Wierna Rzeki” bridge [J]. *Engineering Structures*, 2020, 209: 110199.
- [24] AL-QARALLEH M, TOUTANJI H, ELJUFOUT T. Overloading impact on the flexural behavior of RC beams strengthened with FRP composites under fatigue: Experimental study [J]. *Engineering Structures*, 2020, 221: 111045.
- [25] LIU Y M, ZHANG Q H, BAO Y, et al. Fatigue behavior of orthotropic composite deck integrating steel and engineered cementitious composite [J]. *Engineering Structures*, 2020, 220: 111017.
- [26] XUE S L, SHEN R L, CHEN W, et al. Corrosion fatigue failure analysis and service life prediction of high strength steel wire [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 110: 104440.
- [27] 张清华, 李俊, 袁道云, 等. 深圳至中山跨江通道钢桥面板结构疲劳试验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(11): 102-115.
- [28] 李传习, 柯璐, 陈卓异, 等. 正交异性钢桥面板弧形切口及其 CFRP 补强的疲劳性能[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(5): 63-75.
- [29] PU Q H, YANG S L, SHI Z, et al. Fatigue performance of an innovative steel-concrete joint in long-span railway hybrid box girder cable-stayed bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2021, 26(2): 04020129.
- [30] XU B, WEI K, QIN S Q, et al. Experimental study of wave loads on elevated pile cap of pile group foundation for sea-crossing bridges [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106896.
- [31] WU X Q, HUANG T, AU F T K, et al. Posttensioned concrete bridge beams exposed to hydrocarbon fire [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2020, 146(10): 04020210.
- [32] 周凌宇, 张广潮, 余志武, 等. 循环温度荷载下无砟轨道结构模型试验研究[J]. *铁道学报*, 2020, 42(1): 82-88.
- [33] ZHOU H J, XU Y N, PENG Y R, et al. Partially corroded reinforced concrete piers under axial compression and cyclic loading: An experimental study [J]. *Engineering Structures*, 2020, 203: 109880.
- [34] LIU Z X, GUO T, HAN D G, et al. Experimental study on corrosion-fretting fatigue behavior of bridge cable wires [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(12): 04020104.
- [35] BRITO M B, AKIYAMA M, ICHIKAWA Y, et al. Bidirectional shaking table tests of a low-cost friction sliding system with flat-inclined surfaces [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2020, 49(8): 817-837.
- [36] OZDAGLI A I, MOREU F, XU D, et al. Experimental analysis on effectiveness of crash beams for impact attenuation of overheight vehicle collisions on railroad bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2020, 25(1): 04019133.
- [37] ZANI G, MARTINELLI P, GALLI A, et al. Three-dimensional modelling of a multi-span masonry arch bridge: Influence of soil compressibility on the structural response under vertical static loads [J].

- Engineering Structures, 2020, 221: 110998.
- [38] D'AMICO F, GAGLIARDI V, BIANCHINI CIAMPOLI L, et al. Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges [J]. NDT & E International, 2020, 115: 102291.
- [39] ZHANG G W, WU Y L, ZHAO W J, et al. Radar-based multipoint displacement measurements of a 1200-m-long suspension bridge [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 167: 71-84.
- [40] ERDENEBAT D, WALDMANN D. Application of the DAD method for damage localisation on an existing bridge structure using close-range UAV photogrammetry [J]. Engineering Structures, 2020, 218: 110727.
- [41] KIM S W, CHEUNG J H, PARK J B, et al. Image-based back analysis for tension estimation of suspension bridge hanger cables [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(4): e2508.
- [42] CHEN L, SUN L M, XU Y Y, et al. A comparative study of multi-mode cable vibration control using viscous and viscoelastic dampers through field tests on the Sutong Bridge [J]. Engineering Structures, 2020, 224: 111226.
- [43] TERRILL R, BÄUMER R, VAN NIMMEN K, et al. Twin rotor damper for human-induced vibrations of footbridges [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(7): 04020119.
- [44] ZHOU M, LIAO J C, AN L. Effect of multiple environmental factors on the adhesion and diffusion behaviors of chlorides in a bridge with coastal exposure: Long-term experimental study [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(10): 04020081.
- [45] LEE J, LEE K C, JEONG S, et al. Long-term displacement measurement of full-scale bridges using camera ego-motion compensation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 140: 106651.
- [46] NGELJARATAN L, MOUSTAFA M A. Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation [J]. Engineering Structures, 2020, 213: 110551.
- [47] KWIATKOWSKI J, ANIGACZ W, BEBEN D. A case study on the noncontact inventory of the oldest European cast-iron bridge using terrestrial laser scanning and photogrammetric techniques [J]. Remote Sensing, 2020, 12(17): 2745.
- [48] MENG L Y, ZOU J G, LIU G J. Research on the design and automatic recognition algorithm of subsidence marks for close-range photogrammetry [J]. Sensors, 2020, 20(2): 544.
- [49] DONG C Z, CELIK O, CATBAS F N, et al. Structural displacement monitoring using deep learning-based full field optical flow methods [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(1): 51-71.
- [50] GARG P, NASIMI R, OZDAGLI A, et al. Measuring transverse displacements using unmanned aerial systems laser Doppler vibrometer (UAS-LDV): Development and field validation [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(21): 6051.
- [51] CHEN G F, LIANG Q, ZHONG W T, et al. Homography-based measurement of bridge vibration using UAV and DIC method [J]. Measurement, 2021, 170: 108683.
- [52] TIAN Y D, ZHANG C, JIANG S, et al. Noncontact cable force estimation with unmanned aerial vehicle and computer vision [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2021, 36(1): 73-88.
- [53] WANG H F, ZHAI L, HUANG H, et al. Measurement for cracks at the bottom of bridges based on tethered creeping unmanned aerial vehicle [J]. Automation in Construction, 2020, 119: 103330.
- [54] YE C, BUTLER L J, ELSHAFIE M Z E B, et al. Evaluating prestress losses in a prestressed concrete girder railway bridge using distributed and discrete fibre optic sensors [J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118518.
- [55] HONG W, LV Z, ZHANG X Y, et al. Displacement shape measurement of continuous beam bridges based on long-gauge fiber optic sensing [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 56: 102178.
- [56] ZHANG C R, GE Y X, HU Z C, et al. Research on deflection monitoring for long span cantilever bridge based on optical fiber sensing [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 53: 102035.
- [57] ZHANG L, WU G, LI H L, et al. Synchronous identification of damage and vehicle load on simply supported bridges based on long-gauge fiber Bragg grating sensors [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, 34(1): 04019097.
- [58] CHEN S Z, WU G, FENG D C, et al. Multi-cross-reference method for highway-bridge damage identification based on long-gauge fiber Bragg-grating sensors [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(6): 04020023.
- [59] KHANDEL O, SOLIMAN M, FLOYD R W, et al. Performance assessment of prestressed concrete bridge girders using fiber optic sensors and artificial neural networks [J]. Structure and Infrastructure

- Engineering, 2021, 17(5): 605-619.
- [60] BERROCAL C G, FERNANDEZ I, REMPLING R. Crack monitoring in reinforced concrete beams by distributed optical fiber sensors [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2021, 17(1): 124-139.
- [61] LI S, SUN L Z. Detectability of bridge-structural damage based on fiber-optic sensing through deep-convolutional neural networks [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(4): 04020012.
- [62] WU J H, LIU H, YANG P, et al. Quantitative strain measurement and crack opening estimate in concrete structures based on OFDR technology [J]. Optical Fiber Technology, 2020, 60: 102354.
- [63] LARSEN J L, MCELDERRY J, BAXTER J S, et al. Automated sounding for concrete bridge deck inspection through a multi-channel, continuously moving platform [J]. NDT & E International, 2020, 109: 102177.
- [64] AHMED H, LA H M, TRAN K. Rebar detection and localization for bridge deck inspection and evaluation using deep residual networks [J]. Automation in Construction, 2020, 120: 103393.
- [65] ALANI A M, TOSTI F, CIAMPOLI L B, et al. An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies [J]. NDT & E International, 2020, 115: 102288.
- [66] KOWAL M, SZALA M. Diagnosis of the microstructural and mechanical properties of over century-old steel railway bridge components [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 110: 104447.
- [67] CHEN X, QI X B, XU Z Y. Determination of weathered degree and mechanical properties of stone relics with ultrasonic CT: A case study of an ancient stone bridge in China [J]. Journal of Cultural Heritage, 2020, 42: 131-138.
- [68] MOSHARAFI M, MAHBAZ S B, DUSSEAUULT M B. Bridge deck assessment using infrastructure corrosion assessment magnetic method (iCamm™) technology, a case study of a culvert in Markham city, Ontario, Canada [J]. NDT & E International, 2020, 116: 102356.
- [69] LIU S M, WU C X, ZHOU J T, et al. Relation between the shear stress distribution and the resulting acoustic emission variation in concrete beams [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(6): e2528.
- [70] HUANG B, REN Q Y, CUI X L, et al. Wave characteristics and spectrum for Pingtan Strait Bridge location [J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108367.
- [71] SADEGHI ESHKEVARI S, MATARAZZO T J, PAKZAD S N. Bridge modal identification using acceleration measurements within moving vehicles [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 141: 106733.
- [72] HUSEYNOV F, KIM C, OBRIEN E J, et al. Bridge damage detection using rotation measurements-Experimental validation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 135: 106380.
- [73] TAN C J, ZHAO H, OBRIEN E J, et al. Extracting mode shapes from drive-by measurements to detect global and local damage in bridges [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020: 1-15.
- [74] KULLAA J. Robust damage detection in the time domain using Bayesian virtual sensing with noise reduction and environmental effect elimination capabilities [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 473: 115232.
- [75] GORDAN M, RAZAK H A, ISMAIL Z, et al. A hybrid ANN-based imperial competitive algorithm methodology for structural damage identification of slab-on-girder bridge using data mining [J]. Applied Soft Computing, 2020, 88: 106013.
- [76] DORAFSHAN S, AZARI H. Deep learning models for bridge deck evaluation using impact echo [J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: 120109.
- [77] HOU R, JEONG S, LYNCH J P, et al. Cyber-physical system architecture for automating the mapping of truck loads to bridge behavior using computer vision in connected highway corridors [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 111: 547-571.
- [78] PERRY B J, GUO Y L, ATADERO R, et al. Streamlined bridge inspection system utilizing unmanned aerial vehicles (UAVs) and machine learning [J]. Measurement, 2020, 164: 108048.