

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.122

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



桥梁模型试验与新型测试技术 2019 年度研究进展

洪彧^{a,b}, 杨仕力^a, 刘雨^a, 杨永清^a, 蒲黔辉^{a,b}

(西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 陆地交通地质灾害防治技术国家工程实验室, 成都 610031)

摘要:桥梁结构模型试验作为了解结构真实受力行为及传力机理最有效的手段之一,在学术界和工程界应用广泛。总结了2019年桥梁模型试验的研究进展,从静力模型试验、疲劳模型试验、振动台模型试验和混合试验4个方面评述了典型案例以及依托模型试验开展的关键科学问题研究;并总结了模型试验相关的新型测试技术。总结发现,桥梁模型试验是探究桥梁结构新设计、新工艺、新材料安全性、耐久性及适用性的重要手段,也是准确估计桥梁结构剩余寿命或承载能力的有效方式;针对模型试验发展的测试技术主要集中在结构应变、变形、加速度、温度测试,以及结构缺陷识别等方面。对桥梁模型试验与新型测试技术的发展进行了展望。

关键词:桥梁;模型试验;测试技术;静力模型试验;疲劳模型试验;振动台模型试验;混合试验

中图分类号:U446.1 **文献标志码:**R **文章编号:**2096-6717(2020)05-0001-13

State-of-the-art review of bridge model test and new testing technology in 2019

Hong Yu^{a,b}, Yang Shili^a, Liu Yu^a, Yang Yongqing^a, Pu Qianhui^{a,b}

(a. School of Civil Engineering; b. National Engineering Laboratory for Technology of Geological Disaster Prevention in Land Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: As one of the most effective means to understand the real mechanical behavior and transmission mechanism of the structure, the bridge structure model test has been widely used in the academic and engineering fields. In this paper, the research progress of bridge model test in 2019 is summarized. The typical model test applications and the key scientific issues based on model test are reviewed from four aspects: static model test, fatigue model test, shaking table model test and hybrid test. In addition, this paper also summarized the new testing technology related to model test. Through the summary of this article, model test is an important method to investigate the safety, durability and suitability of bridge structures which use new design, new technology, and new material. And its also an effective method to evaluate the residual life or bearing capacity. The testing technology related to the development of model test mainly focus on measurement of strain, deflection, accelerated velocity, temperature, defect identification and so on. In the end of this paper, the development of bridge model test and new testing technology is prospected.

Keywords: bridge; model test; testing technique; static model test; fatigue model test; shaking table model test; hybrid test

收稿日期:2020-04-23

作者简介:洪彧(1989-),女,博士,主要从事桥梁结构受力性能研究、结构健康监测,E-mail: hongyu@swjtu.edu.cn.

蒲黔辉(通信作者),男,博士,教授,博士生导师,E-mail: qhpu@vip.163.com.

Received:2020-04-23

Author brief: Hong Yu (1989-), PhD, main research interest: mechanical behavior of bridge structure, SHM, E-mail: hongyu@swjtu.edu.cn.

Pu Qianhui (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: qhpu@vip.163.com.

随着交通事业的发展,线路对跨越江河湖海、山川沟壑的需求不断增加,为适应复杂多变的地理环境,各种形式的大跨桥梁应运而生。随着桥梁设计中新材料、新工艺的不断引入,结构关键部位的受力特性、安全性、耐久性、适用性等需特别关注。尽管现代仿真计算已十分先进,但研究人员仍常采用模型试验与仿真模拟相结合的方式掌握结构真实的受力情况。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、数据易收集等优点,其对桥梁工程的发展有着不可替代的作用^[1]。

近年来,伴随新材料、智能化装备以及 5G 技术的发展,桥梁模型试验技术水平不断提高。笔者通过文献调研的方式,梳理了 2019 年度在静力、疲劳、振动台、混合试验等方面桥梁模型试验与新型测试技术的发展情况,针对典型工程案例模型试验及开展的相关关键科学问题研究进行评述,以期为广大同行开展类似研究工作提供参考与思路。

1 静力模型试验

1.1 主梁静力试验

主梁作为重要受力构件,其承载性能关系到整桥结构的安全。为最大程度还原主梁结构的真实受力状态,许多试验采取了对主梁全截面缩尺或截取局部截面进行直接加载的方式。

探索新结构、新材料性能方面,Wang 等^[2]设计并制作了 3 种考虑剪跨比的波形钢腹板组合梁缩尺模型,研究了该结构在荷载作用下的变形恢复能力、剪切力分布和应变响应等;张冬冬等^[3]为研究基于新型纤维增强复材-金属空间桁架结构的力学性能,对一座跨度为 24 m 的轻量化、模块化的应急桥梁足尺模型进行了结构弯曲性能试验。

验证复杂结构受力方面,唐细彪^[4]等对主跨 730 m 的大跨度箱形混合梁斜拉桥钢-混结合段展开模型试验,测试了钢-混结合段应力、变形及界面滑移;He 等^[5]采用试验手段研究了云南怒江大桥钢-UHPC 结合段在轴、弯、扭共同作用下的力学性能。对于诸如钢-混结合段的组合结构,钢-混凝土交界面之间的滑移测试是研究组合性能与剪力连接件力学性能的关键,但现有设备往往很难直接从内部测得钢-混凝土交界面的滑移分布情况,因而常采用外伸钢筋法测量交界面的滑移^[6]。同时,在混凝土浇

筑过程中,如何保证内部测试仪器的有效性也是难点之一。

维修加固方面,李艳等^[7]通过工程纤维增强水泥基复合材料修复既有混凝土梁的弯曲试验,分析了界面粗糙度、ECC 层厚度与既有混凝土梁损伤参数对修复梁界面粘结和受弯性能的影响。

主梁受力理论研究方面,邓文琴等^[8]对 1 片单箱三室波形钢腹板双悬臂梁进行偏载和对称加载试验,验证了该梁扭转与畸变微分方程的正确性;李立峰等^[9]通过模型试验研究了钢-混筒支组合梁的弯曲破坏模式和破坏特征,验证了其提出的完全剪力连接的钢-混筒支组合梁抗弯承载力计算方法。

1.2 锚固区静力试验

索梁(塔/拱、锚)及预应力锚固区等锚固结构是传力的关键结构之一,通常具有应力分布集中、结构构造复杂等特点,其力学性能将直接影响桥梁的安全性与耐久性。锚固区静力试验通常直接对所截取的锚固区结构进行加载,因而对锚固区结构试验模型边界条件的模拟、加载的方式显得尤为重要。同时,对于缩尺模型试验,在狭小的内部空间如何布设测试仪器和如何通过缩尺模型准确还原结构行为也是此类静力试验需要关注的重点。因而,试验时常采用增加非考察区域截面积的方式模拟原桥结构的边界条件,并减小圣维南效应的影响,以达到应力等效的目的。试验时也常通过在模型制作过程中提前布设测试仪器的方式来避免模型制作完成后测试仪器难布设的问题。

针对斜拉桥锚固区,刘新华等^[10]以芙蓉江大桥塔顶 5 对斜拉索的锚固区段为对象,进行 1:4 的缩尺模型静载试验,分析了锚固区塔壁和锚块的应力分布。黄运林等^[11]提出了一种可用于钢牛腿支承型钢锚梁的新型箱格式斜拉桥索塔连接构造,通过 1:2 缩尺模型试验对其受力机理与承载性能进行了研究;肖林等^[12]通过足尺模型试验及数值模拟方法对斜拉桥钢-混组合索塔锚固结构的力学性能、荷载传递机理进行了研究,并采用正交试验方法对索塔锚固区混凝土主拉应力进行参数敏感性分析,进而提出了结构优化设计参数,试验模型构造如图 1。

针对悬索桥缆索锚固系统,王东英等^[13]依托绿枝江大桥隧道锚工程,开展隧道锚 1:100 室内三维地质力学模型试验,通过将转向后的两锚碇散股合束来控制两锚碇荷载的同步施加,控制油压泵和空

心千斤顶分级加载,通过有效模拟散索鞍、主缆散股、预应力管道、钢绞线等传力构件,真实地还原了桥梁隧道式锚碇的传力路径和特征。

针对拱桥吊杆锚固区,詹刚毅等^[14]采用静载试验对刚架拱连续梁组合桥的销铰索梁锚固区传力机理进行了研究,试验采用逐级加载观测其应变和裂纹,探究模型试件在试验过程中的应力变化,明确了吊杆中力的传递途径。

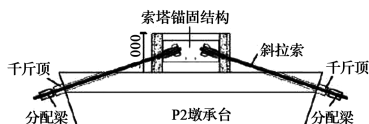


图1 斜拉桥钢-混组合索塔锚固结构试验模型构造^[12]

Fig.1 Experimental model of the steel-concrete composite cable pylon anchorage structure of a cable stayed bridge^[12]

1.3 桥塔静力试验

桥塔可分为混凝土桥塔、钢桥塔、钢-混组合桥塔和钢管混凝土桥塔等。近年来,钢-混组合桥塔因施工方便、力学性能好等优点在桥梁结构中得到广泛应用。学者们在研究此类结构的传力机理时,往往都采用了静力模型试验。

为研究组合桥塔的力学性能,彭强^[15]开展南京长江五桥钢壳混凝土桥塔足尺模型工艺试验,模拟并测试了施工过程中混凝土的工作性能及温度、应变变化规律;邓露等^[16]以某独塔斜拉桥为背景,针对椭圆形钢-混组合桥塔,进行了1:8的缩尺桥塔局部模型偏心受压试验(如图2),研究了设计荷载下钢塔壁和塔内混凝土的应变变化规律及桥塔的承载力。

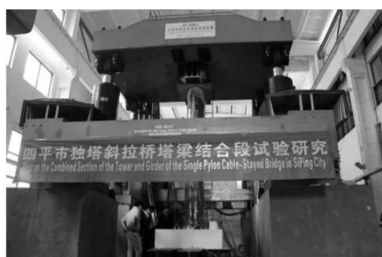


图2 独塔斜拉桥塔梁结合段试验^[16]

Fig.2 Test on the pylon girder joint section of a single pylon cable stayed bridge^[16]

1.4 缆索静力试验

缆索是斜拉桥和悬索桥等大跨度桥梁的主要承重构件,李传习等^[17]通过缩尺模型试验研究了空间钢丝绳主缆在三向荷载作用下截面的扭转特性及扭转角变化规律,揭示了空间主缆扭转及正反扭原理;

沈锐利等^[18]通过缩尺模型试验研究了主缆力作用下的索鞍位移、辊轴接触应力分布规律和辊轴活动性能;徐玉林等^[19]对外包30 mm厚陶瓷纤维的碳纤维增强复合材料(CFRP)缆索的耐火性能进行了火灾试验研究;De Abreu等^[20]对用于斜拉系统或预应力混凝土结构的高强度冷拔型钢进行了拉伸和横向静力加载试验,研究了其在承受静态横向和静态及循环轴向载荷的失效行为。

1.5 支座静力试验

桥梁支座是桥梁的重要传力装置,起着传递荷载和变形的作用。石开荣等^[21]通过足尺模型试验对大吨位复杂钢结构球型铰支座力学性能进行了研究,并提出了轴压荷载下的支座转动刚度模型。摩擦摆支座(FPS)支座是一种新型减隔震支座,具有自复位能力、隔震和消能能力强的特点。焦驰宇等^[22]对FPS支座进行了双向加载拟静力试验研究,得到了FPS支座的荷载-位移滞回曲线与摩擦耗能情况。

1.6 剪力键推出试验

针对剪力钉或PBL连接件,Fang等^[23]对26个不同螺柱高度、不同螺柱直径、不同螺柱布置方式、不同桥面厚度、不同类型混凝土抗剪承载力、不同浇筑方式的抗剪混凝土钢纤维体积进行了试验研究。试验结果表明,大螺柱直径和高强混凝土提高了混凝土的抗剪能力和刚度,但失去了延性;熊炫伟等^[24]对8个插入式试件进行了推出试验,深入研究了基于活性粉末混凝土材料的PBL剪力键的受力性能。针对波形钢板剪力键,宋瑞年等^[25]参考Eurocode 4规范对开孔和无孔2类波形钢板剪力键试件进行了推出试验,测试了试件的抗剪刚度、抗剪承载力、加载过程及破坏模式;王威等^[26]设计了8个推出试件,研究波角和波谷长度因素对黏结滑移性能的影响,考察了波形钢板波角、波脊和波谷处混凝土黏结性能。在新型剪力连接件方面,Bamaga等^[27]设计了推出试验以研究用于C形槽型钢-混凝土组合梁的新型剪力连接件(如图3)的延性与强度;Kozma等^[28]提出了可拆卸剪力连接件并进行了相应的推出试验,对其剪切强度、刚度、滑移能力、延展性和拆卸能力进行了评估。

综上所述,模型试验在探究各种桥梁构件的静力力学性能中发挥着重要作用。随着桥梁结构呈现出轻型化、大型化的发展趋势,更加复杂的桥梁结构

构件也随之出现,必然对试验场地、试验设备、边界条件模拟等有了更高的要求。

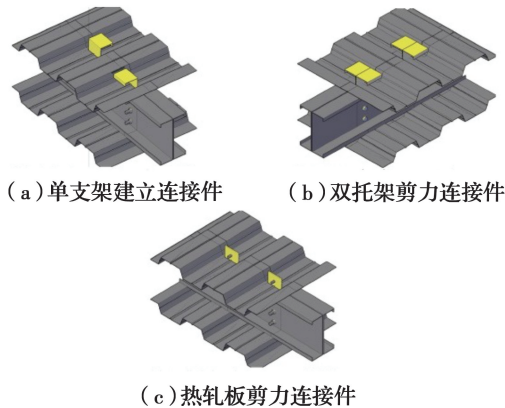


图 3 Bamaga 设计剪力连接件布置^[27]

Fig. 3 Arrangements of shear connectors.^[27]

2 疲劳模型试验

2.1 钢结构桥梁疲劳模型试验

虽然正交异性钢桥面板在设计、制造、检验和维护方面进行了许多改进,但由于直接受车轮的反复加载而导致其疲劳开裂仍然是一个突出的问题。

Shi 等^[29]为研究铁路正交异性钢桥面加劲肋与横隔板连接处疲劳敏感区的疲劳性能,进行了同时包含 2 个 U 肋及 2 个 V 肋的正交异性桥面足尺疲劳试验模型,如图 4 所示,并进行了 560 万次疲劳加载,该模型将两种不同形式的闭口肋合并在一起,保证了模型和原桥结构的等效性,突出了闭口肋结构形式对该疲劳敏感部位疲劳性能的影响,并减少了试验模型数量和试验流程,提高了试验效率。王会利等^[30]为了研究某斜拉桥锚箱结构的疲劳性能,采用结构应力法评估了锚箱的疲劳寿命,并通过足尺模型试验研究了锚箱超长期服役的疲劳性能。

为改善正交异性钢桥面的疲劳开裂问题,学者们提出了新型组合桥面结构体系,希望能够更全面解决桥面板的疲劳问题。樊健生等^[31]通过 14 块板件在集中荷载作用下的冲切试验,研究了 UHPC 组合板的抗冲切性能,如图 5 所示。邵旭东等^[32]通过疲劳推出试验对钢-超薄 UHPC 轻型组合桥面板的短钢筋连接件的抗剪性能和疲劳性能进行了研究。Yuan 等^[33]在通过疲劳试验对修复裂纹后并覆盖 UHPC 层的桥面板的疲劳性能进行了探究,试验结果表明修复后 UHPC 覆盖层能够改善正交异性桥面板的疲劳性能。组合桥面结构的研究丰富了桥面结构形式和理论体系,在桥梁工程领域具有较为广

阔的发展前景。

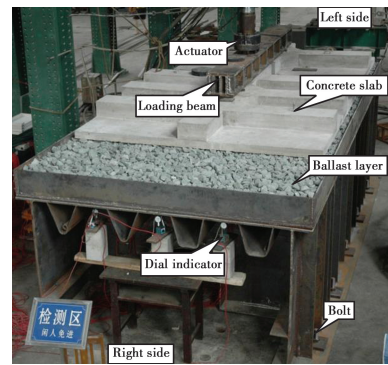


图 4 正交异性桥面足尺疲劳试验模型^[29]

Fig. 4 Full-scale fatigue test model of the orthotropic bridge deck^[29]

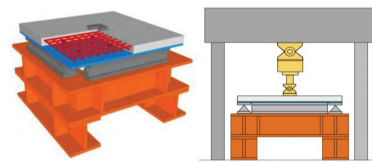


图 5 UHPC-钢组合桥面体系典型构造形式(左)及加载示意图(右)^[31]

Fig. 5 Typical structural form of UHPC-steel composite bridge deck system (Left) and loading schematic diagram (Right)^[31]

2.2 混凝土结构桥梁疲劳模型试验

在长期反复疲劳荷载作用下,混凝土结构桥梁也会发生疲劳破坏。宋力等^[34]基于现有的测试方法,结合光纤光栅传感技术和 FRP 智能钢绞线感知原理,提出了重载铁路预应力混凝土梁疲劳试验测试方法,并通过 2 根大比例模型梁验证了光纤光栅传感技术在预应力混凝土梁疲劳试验中应用的可行性,分析了重载铁路预应力混凝土梁疲劳损伤演化机理和特征,为既有重载铁路桥梁评估和加固提供了参考。Pu 等^[35]对 24 m 全预应力比亚迪新型跨座式轨道梁足尺模型进行了 600 万次疲劳加载试验(如图 6),研究了该轨道梁疲劳后的刚度衰减程度。

2.3 缆索腐蚀疲劳试验

缆索是悬索桥、斜拉桥的重要组成部分,起着承重连接的重要作用,但缆索的腐蚀疲劳极大地降低了桥梁的使用寿命,影响了结构的使用安全。缆索腐蚀疲劳是交变机械作用和腐蚀化学作用共同影响下的脆性断裂过程,这种相互作用会导致材料的抗疲劳性能大大降低,是一种非常恶劣的失效形式。Ma 等^[36]讨论了腐蚀钢丝缺口尺寸与疲劳寿命的关系,并使用临界区法预测了不同腐蚀等级下缆索钢



(a) 轨道梁全景 (b) 轨道梁疲劳加载

图6 轨道梁模型试验装置及 MTS 加载系统^[35]

Fig. 6 Model test device of the track beam and MTS loading system^[35]

丝的疲劳寿命,该方法考虑了缺口试样的临界距离和平均应力幅值,并在 MTS 平台进行疲劳加载试验以验证该理论。Wang 等^[37]建立了带腐蚀坑钢丝的数值模型,提出了腐蚀介质与疲劳载荷耦合的损伤演化模型,描述了钢丝的腐蚀疲劳损伤演化过程,并通过电镜扫描验证了该理论。

除上述钢桥结构疲劳、混凝土结构疲劳和缆索腐蚀疲劳研究外,关于组合结构疲劳性能的研究逐渐增多,主要集中在研究疲劳引起不同材料界面滑移的机理、组合结构疲劳寿命预测,以及疲劳可靠度等。但疲劳模型存在试验周期长,加载方式相对单一,难以模拟多作动器复杂工况下结构的受力等不足。因此,适应复杂工况的疲劳加载设备,新的疲劳试验技术是适应桥梁发展趋势的研究方向。

3 基于振动台的桥梁抗震模型试验

3.1 桥梁整体结构抗震模型试验

相比拟静力试验和拟动力试验,振动台能较真实地再现实际结构在地震下的响应全过程,是目前抗震研究中应用最广泛的试验方法之一。因此,众多学者从桥梁结构形式、施工方法和地震激励模式等角度出发进行了大量振动台试验研究。邵长江等^[38]为研究独柱桥墩的抗震性能,设计并制作了缩尺圆形截面独柱墩筒支梁桥模型,利用振动台试验测试并分析了桥梁在不同等级加速度下的损伤状态及动力响应规律,如图 7 所示。

孙利民等^[39]在进行桩-土-桥梁抗震性能研究时,制作了 1/70 的超大跨斜拉桥模型(包括上部结构、桩基础和场地土等在内),选取 7 条地震波对模型结构分别进行了纵向和横向多点激励的振动台试验,研究了多点激励对斜拉桥地震响应的影响及其规律,以及地震波的峰值加速度和频谱特性对桩-



图7 独柱桥墩筒支梁桥模型^[38]

Fig. 7 Model of the simply supported beam bridge with single column pier^[38]

土-斜拉桥动力相互作用体系振动特性的影响及其规律。管仲国等^[40]以苏通大桥为背景,设计了 1/35 几何相似比的斜拉桥全桥模型,并分别进行横向减震体系、纵向减震体系以及传统固定体系的振动台试验,测试了桥梁新型钢阻尼器减震耗能装置的性能。Yang 等^[41]通过振动台试验对铁桥梁在地震激励下的减隔震性能进行了研究。

3.2 桥梁局部构件抗震模型试验

韩国庆等^[42]通过振动台双向加载对成兰铁路空心桥墩的动力特性及抗震性能进行了研究(如图 8 所示),并对比分析了设计参数对圆端形薄壁空心墩抗震延性的影响。李佳文等^[43]以配筋为 0.3% 和 0.5% 的少筋混凝土重力式矩形桥墩为原型设计制作了 2 个缩尺模型,以探究混凝土重力式桥墩的抗震性能。罗敏敏等^[44]为研究加筋土柔性桥台复合结构抗震性能,以美国特拉华州的 Guthrie Run 桥的桥台为原型制作了缩尺模型,并进行了振动台试验,结果表明加筋土柔性桥台复合结构具有良好的抗震性能。Wen 等^[45]通过振动台试验研究了传统摩擦摆支座(FPB)和新型三摩擦摆支座(TFPB)在桥梁上应用的抗震性能和隔震效果,结果表明,TFPB 能可靠地用于被动控制桥梁的地震响应,满足高地震区基于性能抗震设计理念的要求。Brito 等^[46]通过单向振动台试验对所提出的一种具有低成本滑动摆系统的新型钢筋混凝土桥墩的抗震性能进行了评价。试验结果表明,可以通过建立适当的滑动面半径,减小传递给下部结构的剪力和残余位移。

目前,振动台试验多采用单个振动台对桥墩、桥塔以及支座进行试验,且试验成本较高。随着复杂地理环境下桥梁的规划和修建,针对地震动空间效应的研究将会增多,采用地震台阵对试验模型进行多点激励将是抗震试验进一步的发展方向。

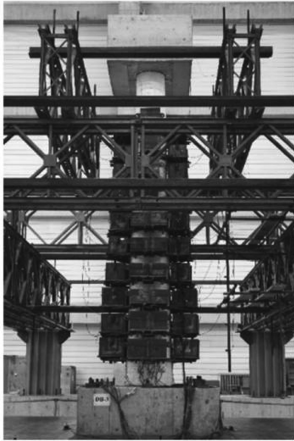


图 8 铁路空心桥墩模型及振动台模型试验系统^[42]

Fig. 8 Railway hollow pier model and shaking table test system^[42]

4 混合试验

结构混合试验(hybrid testing),又称拟动力试验(pseudo-dynamic testing)或联机试验,是一种将数值模拟与物理试验相结合的新兴结构抗震试验方法。自 1992 年提出以来,广泛应用于房屋结构的抗震性能研究中,并逐渐应用于桥梁结构抗震性能研究中。清华大学、武汉理工大学、哈尔滨工业大学、中国地震局工程力学研究所、福州大学、北京建筑大学、湖南大学等团队在混合试验技术方面均卓有成就。

袁辉辉等^[47]对雅西高速干海子特大桥钢管混凝土格构柱桥墩缩尺模型进行了拟动力试验,研究在不同强度地震和主余震作用下此类结构的变形、强度、刚度、耗能等抗震性能。研究表明:平级管式钢管混凝土格构柱具有良好的抗震性能,在 9 度罕遇地震作用下,钢管混凝土柱才会发生屈服,进入弹塑性工作状态。通过钢管混凝土格构柱在各地震工况下的强度与变形的验算,进一步表明此类结构具有足够的强度储备和良好的变形能力,在经历多次强震后仍能保持一定的承载能力,在高烈度地区的桥梁工程中具有极大的应用前景。Mei 等^[48]为研究刚构桥薄壁空心截面高墩的抗震性能,提出了一种基于子结构数据的混凝土本构参数的在线修正混合仿真(UHS)方法,如图 9 所示。采用该识别方法对一层楼框架内的 UHS 进行了数值验证并将 UHS 应用于钢筋混凝土桥梁。结果表明,与未进行模型更新的标准方法相比,所提出的参数辨识方法和相应的在线更新方法具有良好的性能和鲁

棒性。针对模拟桥梁的地震反应,给出了结构的损伤演化和破坏模式。

混合试验可以解决实际结构因尺寸、质量等过大而引起的超过试验设备负荷等问题,相较于纯有限元模拟,混合试验中模型的刚度由试验反推得到,它能够记录结构在破坏过程中刚度的真实变化;相较于拟静力试验,混合试验能够更好地揭示结构在实际地震荷载作用下的响应;相较于传统拟动力试验,混合试验能提高动力方程的求解效率和精度;相较于振动台试验,混合试验可以提前定义质量参数,不用担心配重不足所引起的结构地震响应失真问题。然而,目前混合试验在桥梁结构抗震性能研究中较少,还需进一步开发试验设备、加载控制系统以及优化分析求解方法。

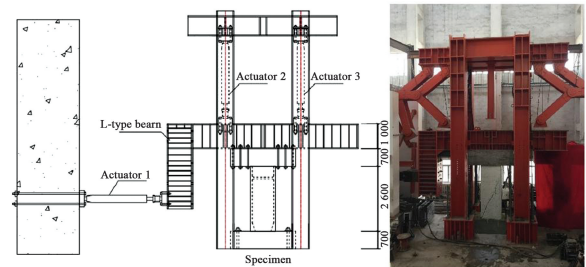


图 9 子结构试验装置^[48]

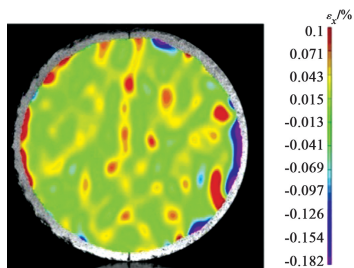
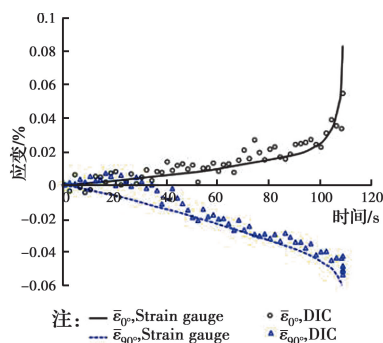
Fig. 9 Test system of the substructure^[48]

5 新型测试技术

随着各种数字化、自动化、智能化现代设备和仪器的快速发展,新型测试技术不断涌现,对模型测试工作(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:1)应力应变;2)几何位移;3)振动加速度;4)混凝土裂缝及内部缺陷探测;5)金属裂纹探测;6)材料破坏探测等。

5.1 应力应变测试

光纤法由于其优秀的经济性,被广泛应用于结构应变监测。Ye 等^[49]通过分布式和离散光纤传感器(FOS)系统,测量结构受力过程中的应变变化过程,与传统应变片相比,大幅提高了测量精度。数字图像相关技术同样可应用于应变测试,Guo 等^[50]测试不同抗压强度的高强混凝土抗拉性能时,采用了应变测量和数字图像相关(DIC)技术来确定试样的变形,如图 10~图 11 所示。

图 10 基于 DIC 技术观测的 C80 混凝土应变分布图^[50]Fig. 10 Strain distribution diagram of the C80 concrete based on DIC technology^[50]图 11 传统应变仪与 DIC 技术测得的应变对比^[50]Fig. 11 Comparison of strain measured by traditional strain gauge and DIC technology^[50]

5.2 几何位移测试

以往位移计是测试结构几何位移最常用的仪器,随着激光扫描技术、光纤传感技术等的发展,新的测试技术开始在位移测试中逐步扩展。Bonopera 等^[51]运用光纤光栅差分沉降量测传感器监测了预应力混凝土工字梁位移,避免了监测过程受环境影响和需要外部参考的问题。Ghaffar 等^[52]提出了一种基于宏观弯曲损耗和光功率耦合效应的二维位移传感器设计方法。此外,雷达技术也可以用于变形、位移测试,王鹏等^[53]将雷达技术引入了桥梁振动变形测量与模态分析中,实现了对桥梁动静载试验时的连续变形监测与模态分析。

5.3 振动加速度测试

加速度计作为一种成熟技术被广泛应用在结构振动加速度测试,当前不少学者对其进行改进开发以适应新的振动测试需求。Zhang 等^[54]采用绝缘体上硅技术对已有加速度计进行改造,研发了一种用于结构地震响应测试的电容式加速度计,有效提高了测试灵敏度。目前,还有基于视觉的振动加速度测试技术。Luna 等^[55]使用 DIC 和常规方法对桥梁模型的三维动态响应以及模态特性进行了测量,比较发现 DIC 技术可以更精确地监测和捕捉桥梁

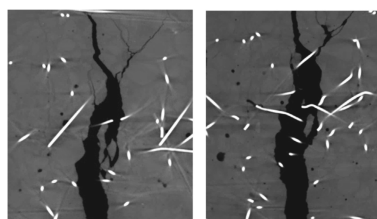
的动态响应。

5.4 结构温度测试

在土木工程中,对温度测量的精度和范围一般要求都不高,一般精度在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之内且测量范围在 $-60\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度传感器均可。常用温度传感器有:热电偶、集成温度传感器和光纤光栅温度传感器。其中,光纤光栅温度传感器不仅具有易与光纤连接和可靠性高的特点,而且传输损耗低、易阵列,能实现温度的多点测量。温度传感器可用于监测桥梁温度场分布,以及测试混凝土产生的水化热和温度变化对桥梁受力影响^[56]。

5.5 混凝土缺陷探测

混凝土模型结构探伤最新技术包括超声波、放射线法等。Nimrat 等^[57]运用超声波回弹技术探测了混凝土内部损伤情况,并监测、记录了模型试验中愈合混凝土裂缝恢复过程。Miguel 等^[58]借助计算机断层扫描技术(CT)观测了循环荷载对纤维混凝土内部微观结构的影响(如图 12)。Carreras 等^[59]借助 X 射线照相法良好的记录了复合材料载荷-位移曲线及其分层生长过程中裂纹前沿的形状变化,观测到丰富的裂纹扩展现象,如图 13 所示。此外,声发射技术也可用于混凝土结构损伤评定,袁明等^[60]实现了使用声发射技术对混凝土梁损伤的定量评估。



(a) 纤维开裂 (b) 纤维剥离

图 12 计算机断层扫描技术拍摄的纤维混凝土开裂照片^[58]Fig. 12 Cracking of fiber concrete taken by computer tomography^[58]

5.6 金属裂纹探测

红外线、金属磁记忆、声发射、涡流法等技术是金属裂纹探测新技术中的主流,孙杰等^[61]提出了采用主动式红外热成像技术对桥梁钢结构涂装进行检测的方法,有效进行钢结构涂装质量的表征,并准确判断出涂装、是否有缺陷及缺陷的形式位置,更可检测并放大肉眼不可见缺陷。苏三庆等^[62]进行 Q235 门式刚架拟静力试验时,研究了金属磁信号在不同受力阶段的变化特征,并建立了磁信号及其梯度值

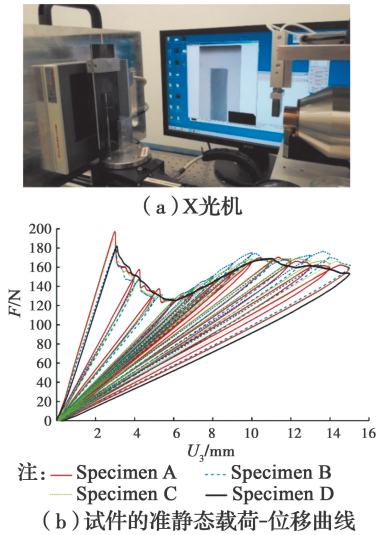


图13 X射线照相法技术监测的复合材料载荷-位移曲线^[59]

Fig. 13 Load-displacement curve of composite materials monitored by X-ray photography^[59]

与应力集中部位的对应关系,通过金属磁记忆技术较好的判断了刚架应力集中部位,以预防裂纹产生。涡流法一般用于监测金属劣化阶段,Koichi等^[63]分析调查涡流密度和磁场的分布,提出了一种涡流测试方法,提高了测试时对高碳纤维增强塑料的分层敏感性,如图14所示。

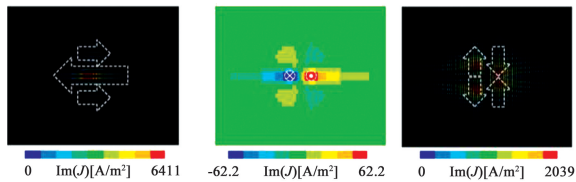


图 14 涡流密度的分布^[63]

Fig. 14 Distribution of eddy current density^[63]

5.7 材料破坏检测

扫描电镜常用来观测材料的破坏界面,Pedram等^[64]使用扫描电镜研究了暴露一年之后环氧聚合物混凝土微观结构的变化,Maricely等^[20]使用扫描电镜确定了静态横向载荷与静态-循环拉伸载荷结合时双相不锈钢丝破坏和疲劳损伤机制,如图15所示。金属磁记忆技术同样可用于金属内部腐蚀探伤,周建庭等^[65]提出的基于金属磁记忆技术的镀锌钢绞线拉索腐蚀检测新技术,成功解决了常规探测技术难以检测镀锌钢绞线拉索内部腐蚀的问题。

现代高科技的引入让高精度的无损测试逐渐成为主流,可更好的保证试验结果的准确性和科学性。主要体现在基于视觉技术的结构响应无接触测试、基于放射线、金属磁记忆等技术的材料缺陷无损测

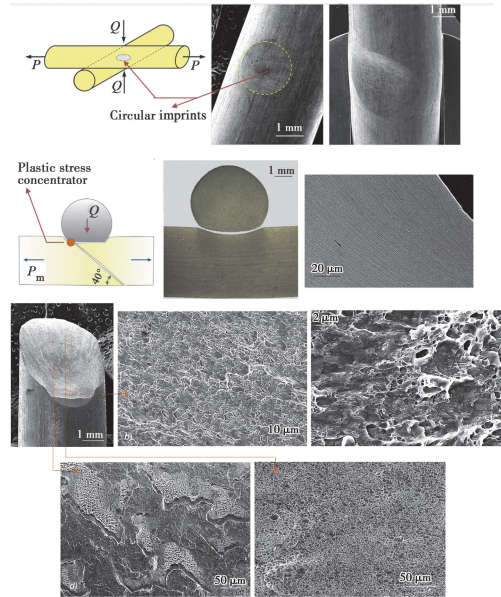


图 15 扫描电镜观测下的钢丝变形及断裂缺口^[20]

Fig. 15 Deformation and fracture notch of steel wire observed by scanning electron microscope^[20]

试,以及基于高精度传感器的结构应力应变和变形监测等。然而,此方面也面临一些问题,例如精度较高且灵敏度好的无损检测仪器价格都比较昂贵;多技术综合测试方法虽已出现,但总体来说还比较缺乏。

6 展望

基于上述研究可知,模型试验是探究各类新结构或新材料力学性能的最有效手段之一,也是研究复杂受力结构体系安全性、耐久性、功能性的常用手段,新型测试技术的出现也为更深入地探析桥梁结构的力学性能、传力机理奠定了基础,但桥梁模型试验存在试验周期长、成本高、边界条件难模拟、测试手段常规等问题,因而需要结合多种分析及测试手段开展模型试验。关于桥梁模型试验及测试技术的未来发展方向,笔者提出以下几个建议:

1) 试验设备的发展与建设:随着桥梁跨径、规模的不断发展,桥梁关键结构构件的尺寸同样不断发展,试验模型的尺寸与规模同样越来越大;相应地,试验模型规模越大,试验加载模式亦更复杂,因此,对静动力的多向、复杂加载设备进行研发的需求增多,如:大吨位多功能液压伺服机(以实现对复杂工况的模拟)、双向/三向异相位加载系统(在疲劳试验中,需要考虑竖向、横向、纵向多方向下不同加载力、加载频率、加载相位的复杂受力模拟)、大尺寸盐雾

试验箱(温、湿、盐侵蚀、荷载耦合模拟复杂侵蚀环境)等。

2)高精度新型测试传感器的发展:随着试验要求的提高,为更深入地研究桥梁结构力学性能,需要发展更经济的高精尖测试传感器技术,同时也将结合AI进行智能测试,减少人为干扰,也一定程度保障了操作者的人身安全;此外,未来桥梁模型试验可能引入更多的医疗、机械、航天航空方面的测试方法,并结合5G技术实现检测、监测数据的高速无损传输。

3)无损探伤及金属断口电镜设施:为了更深入地探究开裂或损伤的物理机理,需利用无损探伤设备及时准确探测试验过程中混凝土开裂、钢构件开裂等现象;同时,后期试验结束后对材料、结构构件破坏形态进行分析,发展高精度电子显微镜也将越来越重要。

4)模型试验成套技术的发展:针对不同种类的模型试验,从试验模型的设计、制作、加载,试验测试控制与试验后数据分析方面发展成套的试验技术体系,并结合数值分析手段进一步拓展模型试验成果。同时,随着试验测试数量的增多,发展相关数据的快速处理、测试误差分离技术十分重要,将直接影响试验结果分析的准确性。

参考文献:

- [1] 刘自明. 桥梁结构模型试验研究[J]. 桥梁建设, 1999, 29(4): 1-7, 12.
LIU Z M. Test study of bridge structure models [J]. Bridge Construction, 1999, 29(4): 1-7, 12. (in Chinese)
- [2] WANG S H, LIU Y Q, HE J, et al. Experimental study on cyclic behavior of composite beam with corrugated steel web considering different shear-span ratio [J]. Engineering Structures, 2019, 180: 669-684.
- [3] 张冬冬, 袁嘉欣, 赵启林, 等. 新型纤维增强复材-金属组合空间桁架结构及弯曲性能研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 102-108, 166.
ZHANG D D, YUAN J X, ZHAO Q L, et al. A novel FRP-metal space truss structure and its flexural performance [J]. Industrial Construction, 2019, 49(9): 102-108, 166. (in Chinese)
- [4] 唐细彪, 王亚飞, 伍贤智, 等. 混合梁斜拉桥钢-混凝土合段模型试验研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(Sup1): 92-97.
TANG X B, WANG Y F, WU X Z, et al. Model test for steel-concrete joint section of hybrid girder cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2019, 49(Sup1): 92-97. (in Chinese)
- [5] HE S H, MOSALLAM A S, FANG Z, et al. Structural evaluation of steel-concrete joint with UHPC grout in single cable-plane hybrid cable-stayed bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(4): 04019022.
- [6] 陈俊, 汪威, 丁发兴, 等. 钢-混凝土组合梁高强螺栓抗剪连接件受剪性能[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(10): 2553-2561.
CHEN J, WANG W, DING F X, et al. Shear bearing capacity of high-strength bolt connectors in steel-concrete composite beams [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(10): 2553-2561. (in Chinese)
- [7] 李艳, 赵一多, 周明杨. ECC修复既有RC梁界面粘结与受弯性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 2794-2800.
LI Y, ZHAO Y D, ZHOU M Y. Experimental study on interfacial bonding and flexural properties of reinforced concrete beams repaired with ECC [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(9): 2794-2800. (in Chinese)
- [8] 邓文琴, 毛泽亮, 刘朵, 等. 单箱三室波形钢腹板悬臂梁扭转与畸变分析及试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(2): 173-181.
DENG W Q, MAO Z L, LIU D, et al. Analysis and experimental study on torsion and distortion of single box three-cell cantilever girder with corrugated steel webs [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(2): 173-181. (in Chinese)
- [9] 李立峰, 王孝亮, 冯威, 等. 考虑钢梁应变强化的钢-混组合梁抗弯承载力计算[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(11): 2822-2831.
LI L F, WANG X L, FENG W, et al. Calculation of flexural capacity of steel-concrete composite beams considering strain strengthening of steel beams [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(11): 2822-2831. (in Chinese)
- [10] 刘新华, 舒江, 彭元诚, 等. 独塔斜拉桥索塔交叉锚固区模型试验研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(3):

- 40-45.
LIU X H, SHU J, PENG Y C, et al. Model test study on crossing cable anchorage zone for single-oblique-pylon cable-stayed bridge [J]. Bridge Construction, 2019, 49(3): 40-45. (in Chinese)
- [11] 黄运林, 刘明虎, 刘玉擎, 等. 斜拉桥组合索-塔锚固箱格式连接受力机理试验研究[J]. 公路交通科技, 2019, 15(11): 68-74.
HUANG Y L, LIU M H, LIU Y Q, et al. Experimental study on stress mechanism of steel box joint in cable-pylon composite anchorage of cable-stayed bridge [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 15(11): 68-74. (in Chinese)
- [12] 肖林, 刘丽芳, 卫星, 等. 钢-混组合索塔锚固结构的力学行为及结构优化[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 923-930, 944.
XIAO L, LIU L F, WEI X, et al. Mechanical behavior and structural optimization of steel-concrete composite cable-pylon anchor [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(5): 923-930, 944. (in Chinese)
- [13] 王东英, 汤华, 尹小涛, 等. 隧道式锚碇承载机制的室内模型试验探究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(Sup1): 2690-2703.
WANG D Y, TANG H, YIN X T, et al. Study on the bearing mechanism of tunnel-type anchorage based on laboratory model test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(Sup1): 2690-2703. (in Chinese)
- [14] 詹刚毅, 廖轩, 肖林, 等. 销铰式索梁锚固结构传力机理及疲劳性能研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 9: 65-69, 74.
ZHAN G Y, LIAO X, XIAO L, et al. Mechanical behavior and fatigue performance of pin-hinge cable-beam anchorage [J]. 2020, 9: 65-69, 74. (in Chinese)
- [15] 彭强. 南京长江五桥钢壳混凝土桥塔足尺模型工艺试验[J]. 桥梁建设, 2019, 49(3): 46-50.
PENG Q. Full-Scale model test of construction process for steel shell-concrete composite pylon of Fifth Changjiang River Bridge in Nanjing [J]. Bridge Construction, 2019, 49(3): 46-50. (in Chinese)
- [16] 邓露, 张利. 椭圆形钢-混凝土组合桥塔受力性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(2): 57-61.
DENG L, ZHANG L. Experimental study on mechanical behavior of steel-concrete composite bridge pylon with elliptical section [J]. Bridge Construction, 2019, 49(2): 57-61. (in Chinese)
- [17] 李传习, 李游, 高辰, 等. 悬索桥钢丝绳空间主缆扭转性能试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(6): 67-77.
LI C X, LI Y, GAO C, et al. Experimental on torsion performance of spatial main cables of wire rope in suspension bridges [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(6): 67-77. (in Chinese)
- [18] 沈锐利, 薛松领, 马健, 等. 独塔单跨地锚式悬索桥复合索鞍试验研究[J]. 桥梁建设, 2019, 49(5): 15-20.
SHEN R L, XUE S L, MA J, et al. Experimental study of composite saddle of a single-tower single-span earth-anchored suspension bridge [J]. Bridge Construction, 2019, 49(5): 15-20. (in Chinese)
- [19] 徐玉林, 诸葛萍, 孙莉莉, 等. 桥梁 CFRP 缆索外包陶瓷纤维的防火性能研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2019, 32(2): 91-96.
XU Y L, ZHUGE P, SUN L L, et al. Fire safety of CFRP cable system under the bridge fire [J]. Journal of Ningbo University (Natural Science and Engineering Edition), 2019, 32(2): 91-96. (in Chinese)
- [20] DE ABREU M, IORDACHESCU M, VALIENTE A. Influence of transversal loading on tensile and fatigue behaviour of high-strength lean duplex stainless steel wires [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 102: 417-424.
- [21] 石开荣, 潘文智, 姜正荣, 等. 大型复杂钢结构球型铰支座的力学性能: 轴压荷载下的转动性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 9-15.
SHI K R, PAN W Z, JIANG Z R, et al. Mechanical behaviors of large-tonnage complex steel spherical hinged support: rotation behavior subjected to axial compressive load [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(8): 9-15. (in Chinese)
- [22] 焦驰宇, 马银强, 刘陆宇, 等. FPS 支座双向加载拟静力试验与数值模拟研究[J]. 工程力学, 2019, 36(Sup1): 86-91.
JIAO C Y, MA Y Q, LIU L Y, et al. Study on quasi-static test and numerical simulation of FPS bearings under two-way loading [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(Sup1): 86-91. (in Chinese)
- [23] FANG Z C, JIANG H B, CHEN G F. Behavior of

- grouped stud shear connectors between precast high-strength concrete slabs and steel beams [J]. *Steel and Composite Structures*, 2020, 36(4): 837-851.
- [24] 熊炫伟, 经柏林, 刘勇, 等. 基于 RPC 材料的 PBL 剪力键力学性能试验研究[J]. *公路工程*, 2019, 44(6): 240-245.
- XIONG X W, JING B L, LIU Y, et al. Experimental study on mechanical performance of PBL shear connectors in reactive powder concrete [J]. *Highway Engineering*, 2019, 44(6): 240-245. (in Chinese)
- [25] 宋瑞年, 占玉林, 赵人达, 等. 嵌入式波形钢板剪力键推出试验及数值分析[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(5): 88-99.
- SONG R N, ZHAN Y L, ZHAO R D, et al. Push-out test and numerical analysis of embedded shear connectors with corrugated steel plates [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(5): 88-99. (in Chinese)
- [26] 王威, 李元刚, 苏三庆, 等. 波形钢板混凝土黏结滑移性能试验研究与数值模拟分析[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(11): 13-24, 44.
- WANG W, LI Y G, SU S Q, et al. Experimental study and numerical simulation on bond-slip behavior between corrugated steel plate and concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(11): 13-24, 44. (in Chinese)
- [27] BAMAGA S O, TAHIR M M, TAN C S, et al. Push-out tests on three innovative shear connectors for composite cold-formed steel concrete beams [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 288-298.
- [28] KOZMA A, ODENBREIT C, BRAUN M V, et al. Push-out tests on demountable shear connectors of steel-concrete composite structures [J]. *Structures*, 2019, 21: 45-54.
- [29] SHI Z, YANG S L, PU Q H, et al. Fatigue performance of orthotropic steel decks in long-span cable-stayed steel-box girder railway bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(5): 04019035.
- [30] 王会利, 谢常领, 秦泗凤. 基于结构应力法的斜拉桥锚箱疲劳寿命评估与试验研究[J]. *公路工程*, 2019, 44(5): 162-168.
- WANG H L, XIE C L, QIN S F. Fatigue life assessment and test study of anchor box in cable-stayed bridges based on structure stress method [J]. *Highway Engineering*, 2019, 44(5): 162-168. (in Chinese)
- [31] 樊健生, 白浩浩, 韩亮, 等. 钢-UHPC 组合板冲切性能试验研究和承载力计算[J/OL]. *建筑结构学报*, <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.0231>.
- FAN J S, BAI H H, H L, et al. Experimental research on punching shear behavior and bearing capacity analysis of steel-UHPC composite slabs [J/OL] *Journal of Building Structures*, <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2019.0231>. (in Chinese)
- [32] 邵旭东, 张瀚文, 李嘉, 等. 钢-超薄 UHPC 轻型组合桥面短钢筋连接件抗剪性能研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(1): 39-51.
- SHAO X D, ZHANG H W, LI J, et al. Research on shear performance of short rebar connectors in steel-ultra thin UHPC lightweight composite deck [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2020, 53(1): 39-51. (in Chinese)
- [33] YUAN Y, WU C, JIANG X. Experimental study on the fatigue behavior of the orthotropic steel deck rehabilitated by UHPC overlay [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 157: 1-9.
- [34] 宋力, 余志武. 基于光纤光栅传感技术的重载铁路预应力混凝土梁疲劳损伤试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(1): 58-66.
- SONG L, YU Z W. Fatigue damage experiments of heavy haul railway prestressed concrete beams using fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(1): 58-66. (in Chinese)
- [35] PU Q H, WANG H Y, GOU H Y, et al. Fatigue behavior of prestressed concrete beam for straddle-type monorail tracks [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(7): 1136.
- [36] MA Y F, WANG G D, GUO Z Z, et al. Critical region method-based fatigue life prediction of notched steel wires of long-span bridges [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 601-610.
- [37] WANG Y, ZHENG Y Q. Research on corrosion fatigue performance and multiple fatigue sources fracture process of corroded steel wires [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 1-24.
- [38] 邵长江, 漆启明, 韦旺, 等. 独柱墩简支梁桥抗震性能的振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(16): 49-55.
- SHAO C J, QI Q M, WEI W, et al. Shaking table test

- of seismic performance of a simply-supported girder bridge with single column [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(16): 49-55. (in Chinese)
- [39] 谢文, 孙利民. 桩-土-斜拉桥动力相互作用体系振动反应特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(7): 1319-1328.
- XIE W, SUN L M. Experimental studies on seismic response characteristics of dynamic interaction system of pile-soil-cable-stayed bridges [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(7): 1319-1328. (in Chinese)
- [40] GUAN Z G, LI J Z, GUO W, et al. Design and validation of a shaking-table test model on a long-span cable-stayed bridge with inverted-Y-shaped towers [J]. *Engineering Structures*, 2019, 201: 109823.
- [41] YANG M G, MENG D L, GAO Q, et al. Experimental study on transverse pounding reduction of a high-speed railway simply-supported girder bridge using rubber bumpers subjected to earthquake excitations [J]. *Engineering Structures*, 2019, 196: 109290.
- [42] 韩国庆, 李明清, 邵长江, 等. 铁路圆端形空心墩振动台试验研究[J]. *铁道工程学报*, 2019, 36(2): 60-63, 69.
- HAN G Q, LI M Q, SHAO C J, et al. Research on the shaking table test of railway round-end hollow piers [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, 36(2): 60-63, 69. (in Chinese)
- [43] 李佳文, 丁明波, 鲁景华, 等. 塑性铰区纵筋加密的少筋混凝土桥墩振动台试验研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2019, 16(7): 1728-1734.
- LI J W, DING M B, LU J H, et al. Shaking table test of reinforced concrete pier with longitudinal reinforcement encrypt in plastic hinge area [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2019, 16(7): 1728-1734. (in Chinese)
- [44] 罗敏敏, 徐超, 杨阳, 等. 加筋土柔性桥台复合结构抗震性能试验[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(11): 1541-1547.
- LUO M M, XU C, YANG Y, et al. Seismic performance of geosynthetic reinforced soil-integrated structure in shaking table test [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(11): 1541-1547. (in Chinese)
- [45] WEN J N, HAN Q, DU X L. Shaking table tests of bridge model with friction sliding bearings under bi-directional earthquake excitations [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019, 15(9): 1264-1278.
- [46] BRITO M B, ISHIBASHI H, AKIYAMA M. Shaking table tests of a reinforced concrete bridge pier with a low-cost sliding pendulum system [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2019, 48(3): 366-386
- [47] 袁辉辉, 吴庆雄, 陈宝春, 等. 平级管式钢管混凝土格构柱拟动力试验研究[J]. *工程力学*, 2019, 36(7): 67-78.
- YUAN H H, WU Q X, CHEN B C, et al. Pseudo-dynamic test of CFST lattice columns with flat lacing tubes [J]. *Engineering Mechanics*, 2019, 36(7): 67-78. (in Chinese)
- [48] MEI Z, WU B, BURSI O S, et al. Hybrid simulation with online model updating: Application to a reinforced concrete bridge endowed with tall piers [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 123: 533-553.
- [49] 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.
- [50] GUO Y B, SHIM G F B C P W. Quasi-static and dynamic splitting of high-strength concretes - tensile stress-strain response and effects of strain rate [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 188-211.
- [51] BONOPERA M, CHANG K C, CHEN C, et al. Fiber bragg grating-differential settlement measurement system for bridge displacement monitoring: case study [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(10): 05019011.
- [52] GHAFAR A, HOU Y L, LIU W Y, et al. Two-dimensional displacement optical fiber sensor based on macro-bending effect [J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 120: 105688.
- [53] 王鹏, 邢诚, 项霞. 地基干涉雷达 IBIS-S 桥跨结构振动变形测量与模态分析[J]. *测绘通报*, 2019(10): 35-39.
- WANG P, XING C, XIANG X. Vibration deformation measurement and modal analysis for large bridge span using ground-based interferometric radar IBIS-S [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(10): 35-39.

- (in Chinese)
- [54] ZHANG H C, WEI X Y, DING Y Y, et al. A low noise capacitive MEMS accelerometer with anti-spring structure [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 296: 79-86.
- [55] 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.
- [56] 张宁, 周鑫, 刘永健, 等. 基于点阵式测量的混凝土箱梁水化热温度场原位试验[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(3): 76-86.
- ZHANG N, ZHOU X, LIU Y J, et al. In-situ test on hydration heat temperature of box girder based on array measurement [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(3): 76-86. (in Chinese)
- [57] PAL KAUR N, KUMAR SHAH J, MAJHI S, et al. Healing and simultaneous ultrasonic monitoring of cracks in concrete [J]. *Materials Today Communications*, 2019, 18: 87-99.
- [58] VICENTE M A, MÍNGUEZ J, GONZÁLEZ D C. Computed tomography scanning of the internal microstructure, crack mechanisms, and structural behavior of fiber-reinforced concrete under static and cyclic bending tests [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 121: 9-19.
- [59] CARRERAS L, RENART J, TURON A, et al. A benchmark test for validating 3D simulation methods for delamination growth under quasi-static and fatigue loading [J]. *Composite Structures*, 2019, 210: 932-941.
- [60] 袁明, 黄练, 彭卓, 等. 基于声发射技术的混凝土梁桥弯剪受力状态下损伤试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(2): 73-81.
- YUAN M, HUANG L, PENG Z, et al. Experimental investigation of static damage of concrete beam under bending-shear based on acoustic emission technology [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(2): 73-81. (in Chinese)
- [61] 孙杰, 甄宗标. 红外热成像技术在桥梁钢结构涂装检测中的应用[J]. *世界桥梁*, 2019, 47(5): 69-73.
- SUN J, ZHEN Z B. Application of infrared thermal imaging technology to steel structure coating inspection for bridges [J]. *World Bridges*, 2019, 47(5): 69-73. (in Chinese)
- [62] 苏三庆, 葛静, 王威, 等. 门式刚架工字钢柱应力集中与磁记忆效应对应关系的试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(6): 771-774, 796.
- SU S Q, GE J, WANG W, et al. Experimental research on the corresponding relationship between stress concentration and magnetic memory effect of steel I-column of gabled framed [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2019, 51(6): 771-774, 796. (in Chinese)
- [63] MIZUKAMI K, IBRAHIM A S B, OGI K, et al. Enhancement of sensitivity to delamination in eddy current testing of carbon fiber composites by varying probe geometry [J]. *Composite Structures*, 2019, 226: 111227.
- [64] GHASSEMI P, TOUFIGH V. Durability of epoxy polymer and ordinary cement concrete in aggressive environments [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 117887.
- [65] 周建庭, 赵亚宇, 何沁, 等. 基于磁记忆的镀锌钢绞线腐蚀检测试验[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2019, 39(1): 81-89.
- ZHOU J T, ZHAO Y Y, HE Q, et al. Experimental of corrosion detection of galvanized steel strands based on magnetic memory [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2019, 39(1): 81-89. (in Chinese)

(编辑 胡玲)