

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.202



混凝土桥及其高性能材料 2020 年度研究进展

赵人达, 占玉林, 徐腾飞, 李福海, 赵成功, 张建新, 杨世玉, 原元, 文希

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 为了解 2020 年混凝土桥及其高性能材料研究方向的发展动态, 并在总结其研究内容、方法和成果的基础上更好地开展后续研究, 从混凝土桥、高性能混凝土材料及高性能加劲筋材 3 方面着手, 查阅近期文献, 并进行分类、总结和评述。研究发现: 目前, 混凝土桥方向较为关注运维阶段的耐久性能、极端环境下的工作性能及混凝土桥运营事故等问题; 高性能混凝土材料的研究进展在高性能、绿色环保以及智能化 3 个方面表现突出; 高性能筋材则主要围绕强度更高、更耐久的 FRP 筋展开研究, 其在梁、板、柱等构件上的应用得到积极的探索。对现有研究的不足和有待深化的问题提出初步建议, 期待与相关学者共同努力, 为该方向的进一步发展做出贡献。

关键词: 混凝土桥; 高性能混凝土; 高性能筋材; 研究进展

中图分类号: U444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2022)01-0012-11

State-of-the-art review of concrete bridges and its high performance materials in 2020

ZHAO Renda, ZHAN Yulin, XU Tengfei, LI Fuhai, ZHAO Chenggong, ZHANG Jianxin, YANG Shiyu, YUANG Yuan, WEN Xi

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

Abstract: In order to understand the development trend of the research direction of concrete bridge and high-performance materials in 2020, and on the basis of summarizing the research contents, methods and achievements, the follow-up research will be carried out better, this paper reviews the recent literatures from the three aspects of concrete bridges, high-performance concrete materials and high-performance reinforced materials. Furthermore, the literature are classified, summarized and commented. The results show that the current research on concrete bridges pays more attention to durability in the operation stage, working performance in extreme environments, and concrete bridge accidents. For high-performance concrete materials, great progress has been made in the three aspects of high performance, green environmental protection and intelligence. The related high-performance reinforced materials have been mainly focused on the FRP bars with higher strength and better durability. Its application in beams, slabs, columns and other components has been widely studied. Finally, the paper points out shortcomings of the existing research and the work to be done in the future.

Keywords: concrete bridges; high-performance concrete; high-performance reinforced materials; research progress

混凝土桥作为桥梁工程领域较早发展的分支, 相对其他分支已趋于成熟, 但并未过时, 关于混凝土桥的研究依然较多, 并且也围绕新结构形式和新材料产生了较多新课题。继赵人达等^[1]在其混凝土桥及其高性能材料 2019 年度研究进展一文中总结和概述了 2019 年混凝土桥梁的相关研究工作

后, 混凝土桥及高性能材料引起业界同行关注。2020 年度研究进展指出混凝土桥及其高性能材料的研究, 应继续围绕分析理论、多极端因素耦合下的性能及新材料在桥梁工程中的运用展开, 而高性能混凝土材料将从高性能、绿色环保以及智能化 3 个方面阐述。

收稿日期: 2021-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(51778531)

作者简介: 赵人达(1961-), 男, 博士, 教授, 主要从事桥梁结构行为、高性能混凝土及其结构应用研究, E-mail: rendazhao@home.swjtu.edu.cn.

1 混凝土桥相关研究

1.1 混凝土桥力学性能研究方面

近年来,虽然混凝土桥的力学性能,尤其是整体力学性能的研究趋于成熟,但是依然有学者在持续地对其进行完善,如:在预应力混凝土连续梁桥方面,Breccolotti^[2]指出预应力钢筋的腐蚀引起的应力损失是造成桥梁坍塌的主要原因,并以此提出了新的数值方法来评估预应力损失对连续预应力混凝土桥振动频率的影响;Yuen 等^[3]围绕无粘结体外预应力混凝土桥提出三维离散有限元模型(图 1),并通过前人成果对该模型进行验证,随后,采用验证后的模型分析得出结论:预应力增加/减少 20%,可导致抗弯能力增加 10%/减少 16.8%,但弯曲变形能力减少 30.2%/增加 36.6%。在混凝土拱桥分析研究方面,Abd Elrehim 等^[4]利用 MATLAB 编程平台开发了遗传算法优化技术,并将优化结果与传统设计进行了比较,成本明显降低;René 等^[5]借助断裂力学中的应力强度因子,用新的方法预测了铁路素混凝土拱桥的最大使用荷载,该方法可较好地运用于混凝土拱桥的安全状态评估。

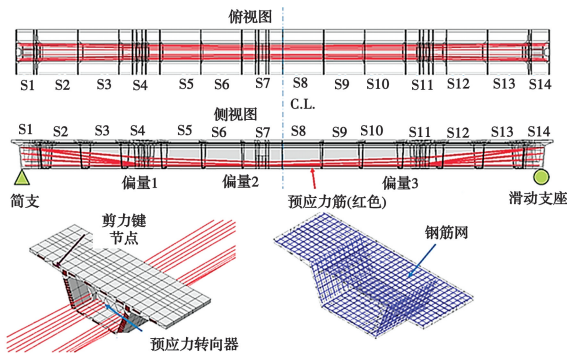


图 1 PT-PCSB 模型的概述和网格划分^[3]

在混凝土桥构件及局部受力研究方面:Kuryłowicz-Cudowska 等^[6]基于现场温度监测、数值模拟及成熟度函数复合的方法,准确估计混凝土桥面的抗压强度,并确定了现浇混凝土桥面板的实际强度和施加预应力的最佳日期。Wang 等^[7]通过现场量测和有限元分析(图 2)准确地开展混

凝土箱梁桥底板破坏机理研究,确定了 3 种典型的破坏模式(弯曲开裂、冲切破坏、底板开裂和混凝土破碎),并针对破坏模式提出了相应的加固方法。在混凝土桥梁抗震及抗冲击性能分析研究方面:Homaei 等^[8]通过对一座既有中跨混凝土拱桥地震响应研究指出:忽略土壤-结构相互作用会导致高估桥梁承载力和满足安全状态的置信度。Pang 等^[9]建立了不同纤维类型加固的 FRC 桥墩的地震易损性曲线,并据此指出:与钢纤维增强桥墩相比,聚丙烯纤维增强桥墩在不同损伤状态下对弯曲性能和脆性破坏机理的改善更优(图 3)。贾毅等^[10]利用非线性动力时程分析方法对比分析了(177+360+177) m 的结合梁斜拉桥在延性抗震体系和减隔震体系下的地震响应,选择出适合该桥的减隔震体系。Hájek 等^[11]通过数值模拟和试验手段开展了非均质混凝土-纤维网(玄武岩纤维、芳纶纤维)复合桥面对近场爆炸响应的数值评估研究,并指出在预定的损伤区域,高度不均匀的混凝土基复合材料桥面通过分层消耗爆炸能量。

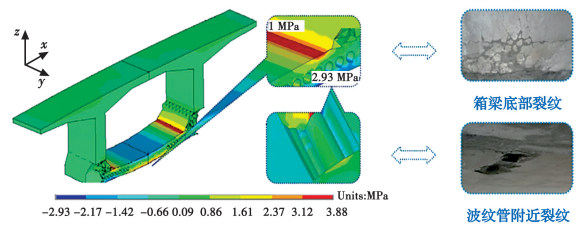


图 2 箱梁底板应力分析及现场实测示意图^[7]

上述研究分别从整体、局部、静力、动力、理论、试验等方面对混凝土桥梁的受力性能进行研究,建议可进一步完善混凝土结构空间受剪力学行为相关研究,并在仿真分析方面进一步发展离散元模拟方法,以削弱现行研究中对有限元模拟的过度依赖,提高计算精度。

1.2 混凝土桥运营与维护研究方面

除了混凝土桥的整体、局部力学分析研究外,国内外学者还在耐久性和使用性能方面做了如下研究:Koneč 等^[12]研究发现,在役混凝土桥梁构件中单位质量混凝土中氯化物的含量导致钢筋腐蚀对混凝土性能的非线性退化影响巨大,并指出筋-网重叠区域等为腐蚀退化“关键”区域。Srikanth

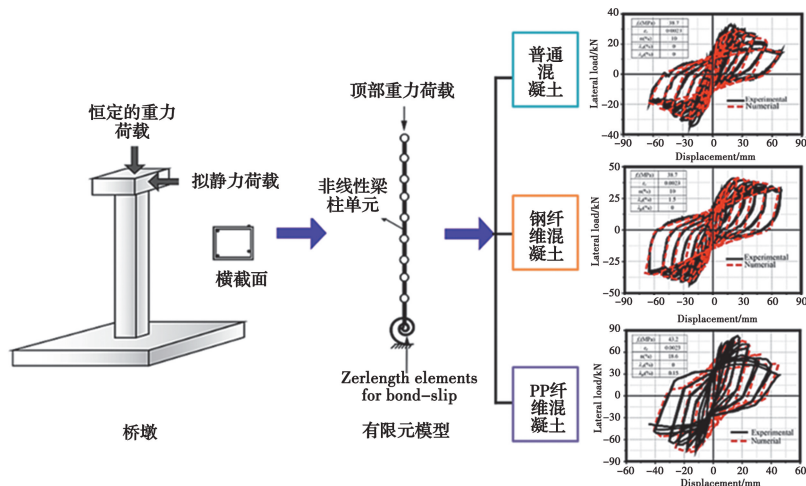


图 3 纤维单元和粘结滑移模型建立桥墩有限元模型的方案^[9]

等^[13]对不同的桥梁劣化模型进行了对比,指出每种模型的优点和局限性。Yazdani 等^[14]研究指出:运营桥梁在高速列车作用下的动力性能受跨度、车辆运动速度、材料刚度、列车车厢分布和轴距的影响。Zhou 等^[15]提出了基于挠度的多级评估方法(交通诱导、温度诱导和时变效应诱导)来评估预应力连续刚构桥的运营状态。

在时变性能研究方面:王永宝等^[16]基于弹性相似理论和混凝土结构徐变变形计算公式,提出了徐变相似常数调整系数的概念,并推导出混凝土柱、钢筋混凝土柱、钢管混凝土柱、钢筋和预应力混凝土梁的徐变相似常数调整系数公式。郭安娜^[17]通过有限元研究了楠溪江特大桥在运营阶段主梁、桥塔、斜拉索在混凝土收缩徐变影响下结构内力和线形变化规律,并基于此提出了徐变变形控制措施。Yuan 等^[18]通过考虑非平稳车辆载荷的时间历程和抗力退化过程的非平稳

性,开展了混凝土桥极值建模、非平稳电阻劣化过程建模及其模型修正等工作,并以此提出时变可靠性评估方法。

此外,2019 年无锡独柱墩桥梁倾覆事件使得混凝土桥梁偏位与倾覆(尤其是曲线独柱墩桥)研究成为热门。本文课题组近年来也对防偏移、抗倾覆方面做了一些研究,如:赵成功等^[19-21]系统地研究了混凝土曲线梁桥偏移成因机理^[19]、顶升与纠偏复位方法^[20]及防偏移抗倾覆设备^[21]等,主要包括以下方面:基于曲线梁桥的横向爬移对于温度作用的敏感度极高的结论,提出了开展桥梁保温措施研发的倡议,依据引发偏位的方向划分出良性偏位诱因和不良偏位诱因^[19];分析了纵向顶升和横向顶推复位的最佳施工方案^[20];开发了桥梁防偏移设备,并采用边界条件模拟的方法建模分析,验证了设备的静力、动力作用下的效果^[21];最后就防偏移^[22]及顶升复位设备进行研发^[23-24],如图 4 所示。

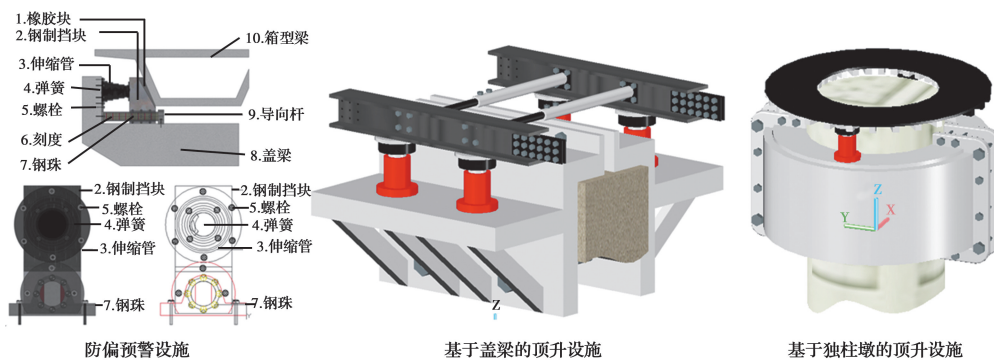


图 4 桥梁防偏移及顶升设备^[23-24]

上述研究主要围绕各类影响桥梁运营阶段工作性能的种种因素开展,建议在维修与养护研究的基础上开展混凝土桥管理相关课题研究及桥梁使用者使用规范课题研究,从多维度解决或减少事故的发生。

1.3 混凝土桥其他方面研究

除了上述研究外,多极端因素耦合作用下桥梁结构性能研究、FRP-混凝土组合桥梁研究也是目前较为热门的研究。在极端因素作用下混凝土桥的性能研究方面,开始主要集中在多极端因素耦合作用(主要是双因素耦合)方面,如:船舶撞击-腐蚀耦合^[25](在有限元模型生成的响应数据的驱动下,开发既能精确估计船舶撞击响应,又能降低计算成本的代理模型)、海洋环境-机械损伤耦合^[26](开发三维化学-湿-热-力学模型对氯化物通过混凝土保护层的传输进行数值模拟,以预测暴露于氯化物和机械损伤的钢筋混凝土结构的使用寿命)、冲刷-地震耦合^[27](采用离散元法评价桥桩周围的局部冲刷机理,并根据非线性时程分析对桥梁的抗震性能和相关破坏机制进行评估)、腐蚀-地震耦合^[28](提出概率方法,评估含 FRC 墩的桥梁生命周期性能)、碳化-钢筋锈蚀耦合^[29](采用改进的混凝土碳化和钢筋腐蚀模型,建立城市大气条件下钢筋混凝土桥梁腐蚀开裂易损性分析的综合概率方法)等。

在 FRP-混凝土桥混合设计理念研究方面:Zou 等^[30]分别就 FRP-混凝土抗剪连接件、FRP-混凝土组合截面的 3

种典型破坏模式和变形及其未来发展前景进行讨论。Muc 等^[31]对 FRP-混凝土桥进行了初步的参数优化,还验证了混凝土收缩的两种不同效应对混合结构强度性能的影响。Al-Rousan 等^[32]采用三维非线性有限元分析方法,模拟了全尺寸 FRP 筋混凝土桥面板的响应,并根据公布的独立实验结果进行了适当的校准和验证。

基于上述多因素耦合作用下桥梁结构性能的研究成果,建议进一步加深研究维度,如:极端环境与多种一般病害耦合下的性能研究、极端作用与其次生灾害耦合下的性能研究等。目前,关于 FRP-混凝土组合桥梁的研究还处于起步阶段,对于该类型组合桥梁的各类型截面形式的研究还不够深入,对两种材料结合面的作用(剥离、滑移等)问题及其解决方法还有待进一步研究,因此,建议进一步开展其结合面力学行为及与截面形式相关的空间力学行为的研究,并在已有研究的基础上,探索计算模型的合理优化,实现有限元软件对其力学行为的精确模拟。

2 高性能混凝土材料

2.1 超高性能混凝土

超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC),一般需要掺入纤维,也被称作超高性能纤维增强混凝土(Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete, UHPFRC)。UHPC 是一种具有超高力学性能和优异耐久性的混凝土,近些年来一直是研究的热点。

UHPC 本身在破坏时呈现出脆性特征,通常在基体中掺入纤维以提高其韧性,近年来,有学者采用 FRP 约束 UHPC 的形式来提高其韧性。邓宗才等^[33]将 UHPC 置于纤维增强复合材料(FRP)-钢复合管中,并研究了碳纤维布(CFRP)和玻璃纤维布(GFRP)对 FRP-钢复合管约束 UHPC 短柱的轴压试验,结果表明,FRP 的约束能有效提高短柱的承载力,并改善轴向变形性能。梁旭宇等^[34]研究了受 GFRP 管约束 UHPC 的单轴应力-应变关系,发现 GFRP 管能够显著提高试件的极限强度和极限应变。韦建刚等^[35]研究了高强钢管 UHPC 短柱的轴压性能,结果表明,与普通钢管 UHPC 柱和高强钢管普通混凝土柱相比,高强钢管 UHPC 柱中钢管的局部鼓曲和 UHPC 的脆性特征都得到明显改善。

关于 UHPC 在桥梁工程中的应用研究方面,邵旭东等^[36]提出将短钢筋作为钢-超薄 UHPC 组合桥面板的新型连接件,并通过静力推出以及疲劳推出试验初步研究了该连接件的抗剪性能。结果表明,短钢筋连接件存在焊缝剪断和 UHPC 局部破坏(短钢筋拔出)两种破坏模式,其抗剪承载力介于栓钉和钢筋网焊接件之间,且其疲劳寿命略低于规范。王立国等^[37]将超短栓钉应用于钢-超薄 UHPC 组合桥面板,通过负弯矩试验研究了钢板厚度、钢筋直径、钢筋间距以及配筋率对该体系桥面板的抗裂性能的影响,并基于试验结果确定了裂缝宽度建议计算公式,同时,以某特大跨径悬索桥为工程背景进行有限元分析来验证超短栓钉作为钢-超薄组合桥面板的适用性。蔡文平^[38]提出基于钢管连接件的钢-UHPC 组合桥面板结构,并开展了推出试验以及非线性数值模拟,研究表明,钢管连接件的破坏形态为下缘焊缝附近的钢管壁沿焊缝方向被剪断,其下部 UHPC 被压碎,钢管连接件的抗剪性能随壁厚和钢材强度均呈线性增长。李立峰等^[39-40]为解决传统混凝土盖梁自身重大、吊装困难和难以实现全预制拼装的问题,提出将 UHPC 应用于盖梁结构,并结合实际工程进行模型试验和有限元模拟。结果表明,新型全预制预应力 UHPC 盖梁结构有良好的受力和变形性能,抗裂性能好。此外,一些学者研究了部分采用 UHPC 的梁在不同条件下的受弯性能。Sturm 等^[41]对配有钢筋和 CFRP 筋的 UHPFRC 梁进行了四点弯曲试验,结果表明,配有 CFRP 筋的梁在大变形下具有更大的承载力,在屈服前的主裂缝宽度更小,但开裂刚度降低。刘新华等^[42]、Zhang 等^[43]研究了钢-UHPC 组合梁负弯矩区的受力性能,结果均表明,UHPC 能提高负弯矩区的开裂荷载,使裂缝间距减小,并抑制裂缝发展。Li 等^[44]研究了混杂纤维、水胶比、骨料尺寸和温度对 UHPFRC 梁的抗弯性能,结果表明,具有 0.5%(体积)PE 和 2.0%(体积)钢纤维的 UHPFRC 显示出最佳的弯曲性能,较高的水胶比和较小的骨料会降低 UHPFRC 的弯曲性能,高温会降低 PE-钢混合 UHPFRC 的弯曲性能。Qiu 等^[45]分析了配筋率、纤维长径比以及纤维类型对 UHPFRC 薄型 T 梁的抗弯性能的影响,结果表明,与直纤维相比,弯钩形纤维可以有效提高开裂荷载,而纤维长径比对此影响不大。同时提高配筋率和使用弯钩形纤维能够增加构件的承载力和弯

曲刚度,并减小裂缝宽度。

综上,目前学者对于 UHPC 在桥梁构件上的多方面应用进行了不断的探索和创新,然而,UHPC 结构造价高等问题仍是制约其广泛应用的一大障碍。

2.2 自密实混凝土

自密实混凝土(SCC)可依靠自身重力充满模板并且充分密实,以避免人工振捣的工序,进而提高生产效率,是近些年来国内外研究的热点之一。

在 SCC 材料的研究方面。赵行立等^[46]研究了粉煤灰掺和料和早期养护条件对 SCC 性能的影响,研究表明,粉煤灰对 SCC 的早期基本力学性能存在明显的负作用,但早期高温养护对 SCC 的早期力学性能有益。包丽丽^[47]重点调查了细骨料品质对 SCC 的影响规律,研究表明,细骨料品质对 SCC 的工作性影响较大,但对抗压强度的影响不显著。潘长春等^[48]分析了粗细骨料用量对高掺合料 SCC 性能的影响。试验结果表明,当粒径 10~20 mm 的粗骨料占其总量接近 50%时,高掺合料 SCC 的综合性能较好。Sayahi 等^[49]研究了缓凝剂、稳定剂、引气剂和减缩剂(SRA)对 SCC 塑性收缩开裂的影响。结果表明,通过添加引气剂和 SRA 可获得无裂缝的混凝土,而促进剂和缓凝剂则增加了裂缝面积。同时观察到,无裂纹的混凝土具有中等程度的沉降和水平收缩,而开裂的试样在垂直或水平方向上都表现出明显的变形。吕圆芳等^[50]探讨了冻融作用对纤维混杂增强效应系数的影响,结果表明,纤维的掺入能有效提高混凝土的抗冻性能,且 PP 纤维对表观质量的改善作用大于钢纤维,混杂纤维的抗冻融能力优于单掺纤维。此外,Gupta 等^[51]研究了铜渣制成的 SCC 的干燥收缩,结果表明,含有最多 60%铜渣的 SCC 的干缩值低于对照 SCC 的。Kandasamy 等^[52]介绍了可控渗透模板(CPF, the controlled permeable formwork)衬里对增强 SCC 的耐久性的影响,结果表明,CPF 混凝土对氯离子的侵入具有出色的抵抗力。

在 SCC 结构的研究方面。马昆林等^[53]测试了典型服役环境下 SCC 充填层的疲劳性能,结果表明,应力比为 0.35 的疲劳荷载作用 200 万次后,单独动荷载、水与动荷载共同作用、酸溶液与动荷载共同作用下,SCC 极限抗压强度分别降低了 6.97%、11.19%和 25.21%。张霁颜等^[54]研究了自密实混凝土桥墩的抗震性能。结果表明,钢筋与 SCC 试件间的粘结性能比普通混凝土差,SCC 桥墩试件的延性能力和耗能能力也更弱。胡强等^[55]比较了钢管 SCC 柱与钢管自密实轻骨料混凝土柱的轴压性能,结果表明,两者皆为延性破坏,并且前者的轴心受压承载力高于后者。

综上可知,粉煤灰对 SCC 的强度发展不利,细骨料的品质对 SCC 的强度影响不明显,提高 10~20 mm 粗骨料的含量对提升 SCC 的性能有利。引气剂、SRA 对 SCC 可以较好地控制 SCC 的塑性开裂,纤维对 SCC 的抗冻性有益。但是 SCC 与钢筋的粘结性相对较差,抗震能力相对较弱,在酸性溶液和动荷载下的强度退化较大。

此外,以下方面值得进一步研究:1)在 SCC 中经常使用

粉煤灰,改善粉煤灰反应活性的措施和机理问题;2)优化 SCC 的抗震耗能问题;3)SCC 在不同环境条件下的本构关系问题。

2.3 再生混凝土

在再生混凝土研究领域,再生骨料的性能提升及其对混凝土强度、耐久性等的规律是当前的研究重点。

Zhang 等^[56]研究了再生骨料混凝土(RAC)的抗硫酸盐侵蚀能力,试验设计完全浸泡和干湿循环两种侵蚀方案。发现旧灰浆比新灰浆的降解程度更大;与自然骨料混凝土(NAC)相比,RAC 的抗硫酸盐侵蚀能力较差。段珍华等^[57]指出再生粗骨料具有吸水率高、吸水速度快的特性,对新拌混凝土流变性能有重要影响,并开展了 RAC 工作性能的研究。

用 CO₂ 强化再生骨料的性能是备受关注的研究方向。高越青等^[58]发现碳化后再生骨料的碱度降低,抗压强度和抗渗性显著提高,并分析了再生骨料的品质和粒径对碳化效果带来的影响,影响关系为:碳化率随再生骨料水灰比的增加而增加;骨料粒径越小,比表面积越大,碳化程度越高。蒲云辉等^[59]总结目前相关的研究成果得出如下结论:CO₂ 强化能够改善再生骨料内部的界面过渡区,使其更加致密,这对 RAC 的抗硫酸盐侵蚀、抗氯盐侵蚀和抗冻融循环等多方面耐久性能都有明显的提升作用。

肖建庄等^[60]认为在建筑结构中使用 RAC 的时机已经基本成熟,但考虑到当前设计中存在的不足,对分析过程中的关键参数,包括力学参数、本构模型、阻尼比等提出了优化路径。

曹万林等^[61]分析再生骨料在钢筋混凝土结构中的应用,指出目前研究的一些不足之处,包括:1)多数制备的 RAC 强度偏低,应适当提升其强度。2)通过缩尺模型得到的分析结果存在误差,建议补充足尺试件研究。3)防火性能和长期工作性能方面的研究较少,有待完善。4)应考虑结构实际所处环境,开展多因素耦合作用对 RAC 构件或结构性能影响的研究。

2.4 地聚物混凝土

2020 年对地聚物混凝土(GPC)的研究也有诸多积极进展,例如 Liu 等^[62]发现可以利用以矿渣为主、掺入少量粉煤灰的地聚物制备超高性能混凝土(UHPC),从而降低 UHPC 的造价。通过掺入硅灰和钢纤维,使得超高性能地聚物混凝土(UHPGC)的抗压强度达到 150 MPa 以上,同时具备高韧性。

Wu 等^[63]认为,当前对 GPC 的研究大多属于材料层面,而构件层面的研究相对滞后,从而对 GPC 配筋梁的力学性能开展了研究,试验发现采用普通混凝土梁的设计规范低估了 GPC 梁的承载能力,GPC 配筋构件具备良好的力学性能。

将地聚物用于 3D 打印也是当前的研究热点,Sun 等^[64]通过测试塑性黏度和屈服应力发现地聚物的工作性和力学性能满足 3D 打印材料的要求。碱激发矿渣地聚物具有快硬早强的特点,Panda 等^[65]通过掺入纳米黏土对其进行改性并

制作了 3D 打印实物,验证了地聚物用于 3D 打印的可行性。

Zakka 等^[66]分析 GPC 当前的发展,认为应解决以下问题:1)研究可用于现场浇筑的 GPC,具备合适的凝结时间以及较快的早期强度发展速度。2)建立一种统一的配合比设计方法,该方法应考虑到 GPC 生产中涉及的所有变量。3)氢氧化钠生产成本较高,因此需要新的途径来合成碱激发剂或采用其他类型成本较低的激发剂。4)由于材料和制备方法多样,学者对 GPC 强度和耐久性的认识依旧存在分歧,同时缺乏强度和耐久性的预测模型。5)需要开发适合改善 GPC 性能的外加剂。6)关于地聚物的微观结构特性需要进一步研究,以充分了解地聚物的微观结构行为。7)工程中使用 GPC 的案例较少,缺乏相应资料以供验证分析。

笔者认为,目前学者已就 GPC 划分为高钙体系和低钙体系达成一致认识。虽然原材料的来源多种多样,但可根据钙含量多少,将由其制备的 GPC 进行分类。对制备方法以及耐久性的研究也应基于分类之后再讨论,而制定分类的标准也是当前迫切需要完成的工作。分析发现,耐久性问题集中出现在以 F 级粉煤灰基地聚物为代表的低钙体系中。

Noushini 等^[67]研究发现氯离子在 F 级粉煤灰基 GPC 中扩散较快,不适用于有氯盐侵蚀的环境。另外,它还存在抗冻性薄弱问题,有研究通过掺入钢纤维改善了地聚物的力学性能^[68],Yuan 等^[69]研究了掺入纤维对其抗冻性的影响,发现弹性模量大的钢纤维对抗冻性改善显著,但其分散性不如 PVA 纤维,PVA 纤维对抗冻性的改善作用略逊于钢纤维,但在提升抗压强度方面比钢纤维的作用明显。PP 纤维的弹性模量较低,对抗冻性改善甚微。

矿渣-粉煤灰基地聚物显示出较好的力学性能与耐久性,成为目前研究的主流。随着矿渣掺量的提高,地聚物由低钙体系向高钙体系转变,但是过高的掺量又会使地聚物表现出较强的脆性^[70-71]。

另外,一些学者努力尝试对地聚物混凝土的强度进行设计与预测,采用的方法包括:田口设计方法、基因表达编程算法、人工神经网络模型及机器学习等^[72-75]。

总的来说,地聚物在被不断完善其自身力学性能及耐久性能的同时,也在向其他高性能混凝土领域渗透,例如:UHPC、ECC、自密实混凝土、3D 打印混凝土、再生骨料混凝土、轻骨料混凝土等。

2.5 智能混凝土材料

智能混凝土材料的特性包括自诊断、自调节、自修复等功能,是传统混凝土材料发展的高级阶段。

在混凝土中掺入导电纤维,可以使材料具有感知应力和断裂损伤的能力。Allam 等^[76]研究了碳纤维机敏混凝土在干燥过程中的阻抗变化。研究发现,在失水过程中,随着材料的劣化阻抗增大;此外,测试结果的准确性与纤维掺量和电流频率有关。在纤维掺量为 0.5% 以及电流为 40 kHz 条件下,测试的准确性得到显著提升。

Kim 等^[77]研究了钢纤维增强水泥基复合材料(SSFRC)在拉伸作用下的机敏性,并提出模型用于表征力学性能与电

学响应之间的关系,且得到拉伸应变与纤维滑移长度的相关系数方程。

Demircilioğlu等^[78]采用铜纤维制备了机敏混凝土,内部包含粒径为 15 mm 的粗骨料。结果表明,成本不高的铜纤维机敏混凝土在单调和循环加载条件下均表现出较高的压变敏感性。

但是,自诊断智能混凝土在投入使用前还有诸多问题需要解决,其电阻率-应力关系的稳定性和准确性尚需通过实际工程进行检验。

近年来,用形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)制备智能建筑材料得到了极大关注。形状记忆合金具有超弹性、形状记忆效应、高阻尼、耐腐蚀性和耐疲劳性等优点。目前,土木工程领域主要利用 SMA 的超弹性和高阻尼进行地震损伤控制,而对其形状记忆效应的开发利用较少。例如,张哲熹等^[79]提出了一种采用 SMA 拉索的摇摆-自复位(SCR)桥墩,如图 5 所示。研究发现,得益于摇摆机制以及 SMA 拉索的超弹性,桥墩试件在 4% 滑移率内几乎不产生损伤;采用 SMA 拉索可有效降低结构残余变形以及桥墩本身的损伤。

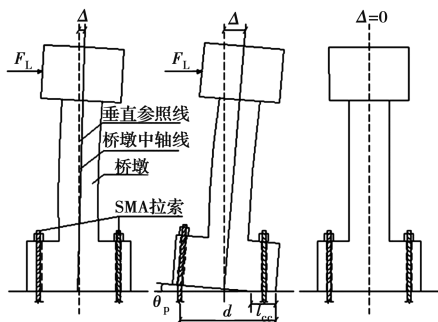


图 5 SMA-SCR 桥墩构造^[79]

钱辉等^[80]提出了基于超弹性 SMA 筋的功能自恢复梁柱节点,考虑 SMA 材料的配置数量、配置长度和屈服强度等参数,分析了 SMA 材料参数对节点的滞回性能和自复位能力等性能的影响。结果表明,超弹性 SMA 筋混凝土梁柱节点具有较高的耗能能力和自复位能力。

形状记忆合金需要热处理才能完全消除变形。因此,还要根据实际需求,开发便捷的热处理方式或调节 SMA 材料的相变温度,使其良好的材料特性得以发挥。在材料研发方面,可将 SMA 纤维掺入混凝土,利用其形状记忆效应,制备自修复混凝土。

另外,自愈合/自修复混凝土的研究也在逐渐兴起,回顾 2020 年的进展,微生物矿化自愈合技术和微胶囊自愈合技术占大多数。Mondal 等^[81]以一种耐辐射球菌作为自愈合剂制备自修复混凝土,解决了主流的芽孢杆菌自愈合混凝土在低温下愈合效果差的问题,使混凝土裂缝可在 $(4 \pm 1)^\circ\text{C}$ 环境下得到修复。但是,微生物自愈合技术以裂缝表层封闭为主,能有效阻隔有害介质侵入,但使强度恢复的作用有限。Sidiq 等^[82]用包裹硅酸钠的微胶囊制备自修复混凝土。结果表明,当微胶囊含量占水泥重量的 2.5% 和 5% 时,分别可修复宽

度为 132 μm 和 203 μm 的裂缝,且材料的性能达到完全恢复。

未来,自修复混凝土还需要在微观结构无损表征、修复程度评估及现场验收方法等方面改进。同时,需要优化材料制备工艺、降低成本以加快实现大范围工程应用。

3 高性能筋材

纤维增强复合材料(fiber-reinforce polymer, FRP)筋具有轻质高强、耐疲劳、抗腐蚀性好等优点,已成为在酸、碱、氯盐环境下,解决钢筋锈蚀问题、代替钢筋的最佳选择,被广泛用于混凝土构件中。

FRP 筋粘结性能研究:魏伟等^[83]通过对 GFRP 筋、CFRP 筋、BFRP 筋 3 种筋材的混凝土试件进行拉拔试验,分析其损伤机理和粘结强度,推导出不同 FRP 筋的锚固长度计算公式。胡长顺^[84]基于实验数据和已有经典的 FRP 筋与混凝土的粘结滑移本构模型,建立了符合 FRP 筋与全珊瑚骨料海水混凝土的 3 段式粘结-滑移本构关系模型,并利用试验数据推导 FRP 筋与珊瑚混凝土的基本锚固长度公式。李皓天^[85]通过直接拔出试验和两端拉伸试验研究了 FRP 筋增强高粉煤灰掺量自密实混凝土(High-Volume Fly Ash Self-Compacting Concrete, HVFA-SCC)的粘结-滑移和拉伸劲化性能。胡成超等^[86]通过 120 个拉拔试验重点研究了箍筋约束作用对 GFRP 筋粘结破坏和粘结强度的影响规律,并利用 Bertero-Popov-Eligehausen(BPE)模型和 Cosenza-Manfredi-Realfonzo(CMR)模型对 GFRP 筋在箍筋约束混凝土中粘结应力-滑移(τ - s)关系上升段进行分析。Solyom 等^[87]对砂涂、螺旋缠绕、螺旋缠绕和砂涂、锯齿状和肋状等不同表面特性的 FRP 筋在混凝土中的粘结性能进行了研究分析。

FRP 筋混凝土梁受弯性能研究:谷圣杰等^[88]考虑了 FRP 筋与混凝土之间的拉伸劲化现象,采用有限条带法建立 FRP 筋混凝土梁的弯矩-曲率分析模型,对 FRP 筋混凝土梁的弯曲过程进行数值模拟分析,并依据数值模拟结果提出了 FRP 筋混凝土的弯矩-曲率三线性简化模型。赵秋红等^[89]对 GFRP 筋橡胶集料混凝土梁的受弯性能进行了有限元模拟及参数分析,探究橡胶掺量、FRP 筋配筋率、混凝土强度等级及截面高度对梁受弯性能的影响。华云涛^[90]研究了 BFRP 筋海水海砂混凝土构件的力学性能,采用纤维编织网增强 ECC(Textile Reinforced ECC,简称 TRE)替代受拉区混凝土保护层来提升梁的使用性能。郭盛等^[91]在综合考虑 FRP 筋与混凝土间的粘结-滑移效应、裂缝间混凝土拉伸劲化效应以及材料非线性本构关系等问题的基础上,建立 FRP 筋混凝土梁裂缝宽度计算的数值模型。

FRP 筋混凝土梁抗剪性能研究方面,张智梅等^[92]基于收集到的 171 根 FRP 筋试验梁(包括无箍筋梁和配 FRP 箍筋梁)的抗剪承载力,分析了影响 FRP 筋试验梁受剪承载力的主要因素,同时,对《纤维增强复合材料建设工程应用技术规范》(GB 50608—2010)的抗剪承载力计算公式进行了修正。张继旺^[93]研究了不同剪跨比和配箍率因素下,CFRP 筋

全珊瑚混凝土梁的受剪性能,并将其与钢筋混凝土试验梁进行对比。

FRP 筋混凝土板力学性能研究:范兴朗等^[94-95]通过已有的 FRP 筋混凝土板试验数据,分析评估了已有设计规范和文献中的 FRP 筋混凝土板冲切承载力计算模型的精度。并基于临界剪切裂缝理论,提出了考虑拉伸软化效应的 FRP 筋混凝土板冲切承载力的计算方法。董鹏程等^[96]根据实际桥面板受力状况,采用截面贯入式加固方法并结合 FRP 筋对桥面板进行了抗剪加固,并针对此加固方法提出相应的承载力计算公式。

FRP 筋混凝土柱力学性能研究:朱春阳等^[97]在已有试验数据的基础上建立了 FRP 筋混凝土偏压柱有限元模型,并引入改进的 BPE(Bertero-Popov-Eligehausen)模型,研究了 FRP 筋-混凝土粘结滑移对压弯柱受力全过程的影响。高华硕^[98]对一种封闭连续缠绕成型的新型 FRP 箍筋展开了相应的混凝土方柱轴压试验,并研究了在该类箍筋约束下的 FRP 筋混凝土柱的极限强度和变形能力。

综上,目前学者对于 FRP 筋在工程上的多方面应用进行了不断的研究和完善。此外,建议对不同种类、不同表面形式的 FRP 筋与混凝土的粘结-滑移本构关系模型及粘结机理、FRP 筋在不同环境条件下的本构关系、以及 FRP 筋混凝土构件的抗震性能开展进一步的研究。

4 热点与展望

根据笔者查阅的 2020 年混凝土桥及其高性能材料的相关研究,结合近年来相关领域的研究热点,现将上述研究进展总结、展望如下:

1)在混凝土桥研究方面:文中所引文献分别从整体、局部、静力、动力、理论、试验等方面对其受力性能进行研究,进一步完善了混凝土桥力学性能方面的分析理论和方法,建议可继续开展并完善混凝土结构空间受剪力学行为相关研究,并进一步发展离散元模拟方法,以削弱现行研究中对有限元模拟的过度依赖,提高计算精度。

所引文献在混凝土桥运营与维护研究方面围绕运维阶段的耐久性能、极端环境下的工作性能及混凝土桥运营事故等热点问题开展了探讨,建议在此基础上进一步加深研究维度,如:极端环境与多种病害耦合下的性能研究;极端作用与其次生灾害耦合下的性能研究等,另外,还应在维修与养护研究的基础上,开展混凝土桥管理及规范使用等方面的研究,从多维度解决或减少事故的发生。

关于 FRP-混凝土组合桥梁的研究还处于起步阶段,应用较少,对于该类组合桥梁的各类型截面形式的研究还不够深入,对两种材料结合面的力学行为(如:剥离、滑移等)及其改进方法还有待进一步研究;并在已有研究的基础上开展计算模型的合理优化,实现有限元软件对其精确模拟与分析。另外,在混凝土桥的智能化发展方面,应该突破现有基于智能检测与监控条件下的被动调控现状,逐步实现桥梁结构的智能化主动监控及调控,为桥梁全智能化运营及维护的到来

打好基础。

2)混凝土材料方面:现阶段诸多工程应用都反映出 UHPC 能达到各项要求,但成本居高不下的现实问题,限制了其在实际工程中的推广。建议在保证其优良性能的基础上,寻找降低成本的方法。

混凝土是资源和能源的消耗大户,未来应继续重视混凝土对天然资源、能源的消耗,促进绿色生产和绿色建造。目前,中国的粉煤灰囤积量巨大,且每年都会增加。对于普通水泥混凝土,粉煤灰是可以改善其性能的绿色矿物掺和料,对于地聚物混凝土,粉煤灰是主流原材料。建议进一步研究优化粉煤灰在混凝土中的应用,这不仅能在降低混凝土造价的同时改善混凝土的各方面性能,而且可以减轻环境污染,具有良好的经济效益和社会效益。

对于具有巨大发展潜力的再生混凝土和地聚物混凝土,耐久性依旧是当前的研究重点,只有做好耐久性研究工作,才能确保混凝土材料的质量,为工程建设质量提供可靠保障。另外,目前对混凝土耐久性的研究大多是在材料层面,建议将关注点延伸到结构的耐久性,考虑如何设计和评估(新建和既有)混凝土结构的耐久性和服役年限。

未来混凝土材料将继续向着高性能和绿色节能两个方向发展。同时,特殊功能混凝土也在交叉学科的支持下得到快速发展,如:自修复混凝土、导电混凝土、耐热混凝土、植生混凝土、防辐射混凝土和装饰混凝土等。建议土木工程工作者关注这些方向的发展,适时地将一些新技术引入工程建设领域。

混凝土材料具有无穷的魅力和无限的发展空间,值得研究者们孜孜不倦地去探索,以在建筑与交通领域将人类文明推向更高的水平。

参考文献:

- [1] 赵人达, 占玉林, 徐腾飞, 等. 混凝土桥及其高性能材料 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 37-55.
- [2] BRECCOLOTTI M. Eigenfrequencies of continuous prestressed concrete bridges subjected to prestress losses [J]. Structures, 2020, 25: 138-146.
- [3] YUEN T Y P, HALDER R, CHEN W W, et al. DFEM of a post-tensioned precast concrete segmental bridge with unbonded external tendons subjected to prestress changes [J]. Structures, 2020, 28: 1322-1337.
- [4] ABD ELREHIM M Z, EID M A, SAYED M G. Structural optimization of concrete arch bridges using Genetic Algorithms [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2019, 10(3): 507-516.
- [5] RENÉ P N, YAZDANI M. Estimation of the service load capacity of plain concrete arch bridges using a novel approach: Stress intensity factor [J]. Structures,

- 2020, 27: 1521-1534.
- [6] KURYLOWICZ-CUDOWSKA A, WILDE K, CHRÓŚ CIELEWSKI J. Prediction of cast-in-place concrete strength of the extradosed bridge deck based on temperature monitoring and numerical simulations [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 254: 119224.
- [7] WANG D, WANG L, LIU Y M, et al. Failure mechanism investigation of bottom plate in concrete box girder bridges [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 116: 104711.
- [8] HOMAEI F, YAZDANI M. The probabilistic seismic assessment of aged concrete arch bridges: The role of soil-structure interaction [J]. *Structures*, 2020, 28: 894-904.
- [9] PANG Y T, CAI L, ZHONG J. Seismic performance evaluation of fiber-reinforced concrete bridges under near-fault and far-field ground motions [J]. *Structures*, 2020, 28: 1366-1383.
- [10] 贾毅, 赵人达, 赵成功, 等. 大跨度结合梁斜拉桥抗震体系[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2020, 50(6): 2167-2177.
- [11] HÁJEK R, HORNÍKOVÁ K, FOGLEAR M. Numerical assessment of the response of a heterogeneous concrete-based composite bridge deck to a near field explosion [J]. *Engineering Structures*, 2020, 225: 111206.
- [12] KONEČNÝ P, VOŘECHOVSKÁ D, ŠOMODÍKOVÁ M, et al. Extended evaluation of durability-related field inspection data from concrete bridges under service [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2020, 26: 430-438.
- [13] SRIKANTH I, AROCKIASAMY M. Deterioration models for prediction of remaining useful life of timber and concrete bridges: A review [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2020, 7(2): 152-173.
- [14] YAZDANI M, AZIMI P. Assessment of railway plain concrete arch bridges subjected to high-speed trains [J]. *Structures*, 2020, 27: 174-193.
- [15] ZHOU J Y, SUN Z, WEI B, et al. Deflection-based multilevel structural condition assessment of long-span prestressed concrete girder bridges using a connected pipe system [J]. *Measurement*, 2021, 169(6): 108352.
- [16] 王永宝, 原元, 赵成功, 等. 混凝土结构徐变模型试验与原型对比关系[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(3): 465-473.
- [17] 郭安娜. 大跨度铁路预应力混凝土斜拉桥收缩徐变影响及控制措施研究[J]. *铁道标准设计*, 2021, 65(6): 73-77.
- [18] YUAN Y G, HAN W S, LI G L, et al. Time-dependent reliability assessment of existing concrete bridges including non-stationary vehicle load and resistance processes [J]. *Engineering Structures*, 2019, 197: 109426.
- [19] 赵成功, 王小冬, 杨德厚, 等. 既有中小跨径曲线梁桥梁体径向爬移机理分析[J]. *中外公路*, 2018, 38(3): 162-167.
- [20] 赵成功, 赵人达, 王永宝, 等. 曲线连续梁桥梁体顶升及顶推复位关键技术研究[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(3): 395-403.
- [21] 赵成功, 赵人达, 贾毅, 等. 基于弹性防偏-塑性卸载机理的梁体横向限位设备[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(4): 760-768.
- [22] 贺喜, 柯运桂, 李剑, 等. 一种桥梁结构健康监测与预警系统及方法: CN107860425A[P]. 2018-03-30.
- [23] 赵成功, 翟磊, 黄谦, 等. 一种基于盖梁的桥梁顶升设备: CN201821440872.X[P]. 2020. 4. 14.
- [24] 赵成功, 王小冬, 黄谦, 等. 一种安装在桥墩上的桥梁梁体抬升系统: CN109024316B[P]. 2020-07-28.
- [25] FAN W, SUN Y, YANG C C, et al. Assessing the response and fragility of concrete bridges under multi-hazard effect of vessel impact and corrosion [J]. *Engineering Structures*, 2020, 225: 111279.
- [26] KUŠTER MARIĆ M, OŽBOLT J, BALABANIĆ G. Reinforced concrete bridge exposed to extreme maritime environmental conditions and mechanical damage: Measurements and numerical simulation [J]. *Engineering Structures*, 2020, 205: 110078.
- [27] ZAKY A, ÖZCAN O, AVŞAR Ö. Seismic failure analysis of concrete bridges exposed to scour [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 115: 104617.
- [28] PANG Y T, WEI K, YUAN W C. Life-cycle seismic resilience assessment of highway bridges with fiber-reinforced concrete piers in the corrosive environment [J]. *Engineering Structures*, 2020, 222: 111120.
- [29] SUN B, XIAO R C, RUAN W D, et al. Corrosion-induced cracking fragility of RC bridge with improved concrete carbonation and steel reinforcement corrosion models [J]. *Engineering Structures*, 2020, 208: 110313.
- [30] ZOU X X, LIN H W, FENG P, et al. A review on FRP-concrete hybrid sections for bridge applications [J]. *Composite Structures*, 2021, 262: 113336.
- [31] MUC A, STAWIARSKI A, CHWAŁ M. Design of the hybrid FRP/concrete structures for bridge constructions [J]. *Composite Structures*, 2020, 247: 112490.

- [32] AL-ROUSAN R Z, ALHASSAN M, AL-WADI R. Nonlinear finite element analysis of full-scale concrete bridge deck slabs reinforced with FRP bars [J]. *Structures*, 2020, 27: 1820-1831.
- [33] 邓宗才, 张亚宁. FRP-钢复合管约束 UHPC 轴压短柱试验研究[J]. *混凝土*, 2020(5): 36-39.
- [34] 梁旭宇, 池寅, 曾彦钦, 等. GFRP 管约束超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系试验研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2020, 53(6): 498-506.
- [35] 韦建刚, 罗霞, 欧智菁, 等. 圆高强钢管超高性能混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(11): 16-28.
- [36] 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.
- [37] 王立国, 邵旭东, 曹君辉, 等. 基于超短栓钉的钢-超薄 UHPC 组合桥面性能[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2020, 54(10): 2027-2037.
- [38] 蔡文平. 基于钢管连接件的钢-UHPC 组合桥面板抗剪性能研究[J]. *公路工程*, 2020, 45(2): 14-20.
- [39] 李立峰, 叶萌, 胡方健, 等. 预制大悬臂预应力 UHPC 薄壁盖梁抗弯性能的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(2): 92-104.
- [40] 李立峰, 唐金良, 胡方健, 等. 全预制轻型预应力 UHPC 薄壁盖梁抗剪性能试验[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(8): 144-158.
- [41] STURM A B, VISINTIN P, SERACINO R, et al. Flexural performance of pretensioned ultra-high performance fibre reinforced concrete beams with CFRP tendons [J]. *Composite Structures*, 2020, 243: 112223.
- [42] 刘新华, 周聪, 张建仁, 等. 钢-UHPC 组合梁负弯矩区受力性能试验[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(5): 110-121.
- [43] ZHANG Y, CAI S K, ZHU Y P, et al. Flexural responses of steel-UHPC composite beams under hogging moment [J]. *Engineering Structures*, 2020, 206: 110134.
- [44] LI Y, YANG E H, TAN K H. Flexural behavior of ultra-high performance hybrid fiber reinforced concrete at the ambient and elevated temperature [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 250: 118487.
- [45] QIU M H, SHAO X D, WILLE K, et al. Experimental investigation on flexural behavior of reinforced ultra high performance concrete low-profile T-beams [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2020, 14(1): 5.
- [46] 赵行立, 董鹏程, 罗远彬, 等. 早期高温养护对粉煤灰基自密实混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(9): 2821-2829, 2843.
- [47] 包丽丽. 细骨料对自密实混凝土性能的影响研究[J]. *低温建筑技术*, 2020, 42(7): 62-64, 87.
- [48] 潘长春, 宗琦, 方跃. 骨料参数对高掺合料自密实混凝土性能的影响[J]. *混凝土*, 2020(11): 75-78.
- [49] SAYAHI F, EMBORG M, HEDLUND H, et al. Effect of admixtures on mechanism of plastic shrinkage cracking in self-consolidating concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2020, 117(5): 51-59.
- [50] 吕圆芳, 杨永东. 混杂纤维自密实混凝土冻融性能试验研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2020(11): 52-56.
- [51] GUPTA N, SIDDIQUE R. Sulfate resistance and drying shrinkage of self-compacting concrete incorporating copper slag [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(12): 04020389.
- [52] KANDASAMY S, KOTHANDARAMAN S. The effect of formwork liner on the service life of self-compacting concrete [J]. *Asian Journal of Civil Engineering*, 2020, 21(7): 1239-1247.
- [53] 马昆林, 万镇昂, 龙广成, 等. 板式轨道充填层 SCC 疲劳损伤本构模型[J]. *铁道学报*, 2020, 42(11): 139-145.
- [54] 张霁颜, 逯宗典, 段洪亮, 等. 自密实混凝土桥墩抗震性能试验研究[J]. *石家庄铁道大学学报(自然科学版)*, 2020, 33(4): 10-17, 43.
- [55] 胡强, 王痛快, 贾松林, 等. 自密实混凝土与角钢联合加固混凝土柱轴心受压承载力试验研究[J]. *建筑科学*, 2020, 36(7): 45-52.
- [56] ZHANG H R, JI T, LIU H. Performance evolution of recycled aggregate concrete (RAC) exposed to external sulfate attacks under full-soaking and dry-wet cycling conditions [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118675.
- [57] 段珍华, 江山山, 肖建庄, 等. 再生粗骨料含水状态对混凝土性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(3): 545-550.
- [58] 高越青, 潘碧豪, 梁超锋, 等. CO₂ 强化再生骨料的特性及其对再生混凝土性能的影响[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2021(6): 95-102.
- [59] 蒲云辉, 石膏爽, 王清远, 等. CO₂ 强化再生混凝土骨料的研究进展[J]. *混凝土*, 2020(6): 65-69.
- [60] 肖建庄, 王春晖, 郑振鹏, 等. 再生骨料混凝土结构抗震设计关键问题[J]. *土木工程学报*, 2020, 53(11): 46-54.
- [61] 曹万林, 肖建庄, 叶涛萍, 等. 钢筋再生混凝土结构研究进展及其工程应用[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41

- (12): 1-16, 27.
- [62] LIU Y W, SHI C J, ZHANG Z H, et al. Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 112: 103665.
- [63] WU C, HWANG H J, SHI C J, et al. Shear tests on reinforced slag-based geopolymer concrete beams with transverse reinforcement [J]. *Engineering Structures*, 2020, 219: 110966.
- [64] SUN C C, XIANG J C, XU M X, et al. 3D extrusion free forming of geopolymer composites: Materials modification and processing optimization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120986.
- [65] PANDA B, RUAN S Q, UNLUER C, et al. Investigation of the properties of alkali-activated slag mixes involving the use of nanoclay and nucleation seeds for 3D printing [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 186: 107826.
- [66] ZAKKA W P, ABDUL SHUKOR LIM N H, CHAU KHUN M. A scientometric review of geopolymer concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 280: 124353.
- [67] NOUSHINI A, CASTEL A, ALDRED J, et al. Chloridediffusion resistance and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymer concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 105: 103290.
- [68] FARHAN N A, SHEIKH M N, HADI M N S. Effect of Steel Fiber on Engineering Properties of Geopolymer Concrete [J]. *ACI Materials Journal*, 2020, 117(3): 29-40.
- [69] YUAN Y, ZHAO R D, LI R, et al. Frost resistance of fiber-reinforced blended slag and Class F fly ash-based geopolymer concrete under the coupling effect of freeze-thaw cycling and axial compressive loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 250: 118831.
- [70] MENG Q F, WU C Q, HAO H, et al. Steel fibre reinforced alkali-activated geopolymer concrete slabs subjected to natural gas explosion in buried utility tunnel [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 246: 118447.
- [71] WANG H L, WU Y H, WEI M, et al. Hysteretic behavior of geopolymer concrete with active confinement subjected to monotonic and cyclic axial compression: An experimental study [J]. *Materials*, 2020, 13(18): 3997.
- [72] DAVE S V, BHOGAYATA A. The strength oriented mix design for geopolymer concrete using Taguchi method and Indian concrete mix design code [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 120853.
- [73] SHAHMANSOURI A A, AKBARZADEH BENGAR H, GHANBARI S. Compressive strength prediction of eco-efficient GGBS-based geopolymer concrete using GEP method [J]. *Journal of Building Engineering*, 2020, 31: 101326.
- [74] SHAHMANSOURI A A, YAZDANI M, GHANBARI S, et al. Artificial neural network model to predict the compressive strength of eco-friendly geopolymer concrete incorporating silica fume and natural zeolite [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 279: 123697.
- [75] NGUYEN K T, NGUYEN Q D, LE T A, et al. Analyzing the compressive strength of green fly ash based geopolymer concrete using experiment and machine learning approaches [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: 118581.
- [76] ALLAM H, DUPLAN F, CLERC J P, et al. About electrical resistivity variation during drying and improvement of the sensing behavior of carbon fiber-reinforced smart concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 264: 120699.
- [77] KIM M K, PARK J, KIM D J. Characterizing the electro-mechanical response of self-sensing steel-fiber-reinforced cementitious composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 240: 117954.
- [78] DEMIRCILIOĞLU E, TEOMETE E, OZBULUT O E. Characterization of smart brass fiber reinforced concrete under various loading conditions [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120411.
- [79] 张哲熹, 梁栋, 方成, 等. 采用 SMA 拉索的摇摆自复位桥墩试验研究与动力分析[J]. *世界地震工程*, 2020, 36(4): 138-146.
- [80] 钱辉, 李宗翱, 裴金召, 等. 自复位超弹性 SMA 筋梁柱节点数值模拟研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(11): 135-145.
- [81] MONDAL S, DAS P, DATTA P, et al. *Deinococcus radiodurans*: A novel bacterium for crack remediation of concrete with special applicability to low-temperature conditions [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 108: 103523.
- [82] SIDIQ A, SETUNGE S, GRAVINA R J, et al. Self-repairing cement mortars with microcapsules: A microstructural evaluation approach [J]. *Construction*

- and Building Materials, 2020, 232: 117239.
- [83] 魏伟, 熊哲. FRP 筋混凝土锚固长度的试验研究[J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(3): 101-105.
- [84] 胡长顺. 全珊瑚骨料海水混凝土与 FRP 筋粘结性能试验研究[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [85] 李皓天. FRP 筋增强自密实混凝土粘结滑移和拉伸刚化性能研究[D]. 广东 深圳: 深圳大学, 2020.
- [86] 胡成超, 高奎, 涂建维, 等. GFRP 筋与箍筋约束混凝土之间粘结性能的试验研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(10): 13-20.
- [87] SOLYOM S, BALÁZS G L. Bond of FRP bars with different surface characteristics [J]. Construction and Building Materials, 2020, 264: 119839.
- [88] 谷圣杰, 范兴朗, 荣华, 等. 复材纤维筋混凝土梁抗弯力学性能研究[J]. 工业建筑, 2020, 50(4): 151-155.
- [89] 赵秋红, 刘凯, 王菲, 等. GFRP 筋橡胶集料混凝土梁受弯性能 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(5): 1611-1622.
- [90] 华云涛. TRE 复合 BFRP 筋海水海砂混凝土梁受弯性能研究[D]. 江苏 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [91] 郭盛, 陈俛, 涂建维. 考虑黏结-滑移效应的 FRP 筋混凝土受弯构件裂缝宽度计算方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 46-51.
- [92] 张智梅, 陈刚, 王卓. FRP 筋混凝土梁的抗剪承载力 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2020, 26(2): 301-310.
- [93] 张继旺. CFRP 筋全珊瑚混凝土梁受剪性能试验研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
- [94] 范兴朗, 周旭晓, 周欣竹. 既有 FRP 筋混凝土板抗冲切承载力计算模型评估[J]. 浙江工业大学学报, 2020, 48(4): 441-449.
- [95] 范兴朗, 谷圣杰, 江佳斐, 等. FRP 筋混凝土板冲切承载力计算方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(6): 1058-1067.
- [96] 董鹏程, 夏立鹏, 王绪纲, 等. 截面贯入式 FRP 筋加固混凝土桥面板抗剪性能试验研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(10): 5-12.
- [97] 朱春阳, 王可心, 孙天娇, 等. 考虑粘结滑移的 FRP 筋混凝土柱偏压性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 220-228.
- [98] 高华硕. 新型 FRP 筋混凝土柱的偏压性能与计算方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.

(编辑 邓云)