

doi: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.111

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



混凝土桥及其高性能材料 2019 年度研究进展

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

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要: 为了解过去一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三方面着手,查阅了近期文献,并进行了分类、总结和评述。研究发现:目前,混凝土桥方向更加注重其耐久性、全生命周期设计、寿命预测及极端环境下的性能劣化等问题;高性能混凝土材料方面更加注重绿色环保、增强增韧和自密实等性能研究;与其配套的高性能筋材则主要围绕强度更高、更耐久的FRP筋展开。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:** R **文章编号:** 2096-6717(2020)05-0037-19

State-of-the-art review of concrete bridges and its high performance materials in 2019

Zhao Renda, Zhan Yulin, Xu Tengfei, Li Fuhai, Wen Xi, Yang Shiyu,
Yuan Yuan, Zhao Chenggong, Zhang Jianxin

(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 its high-performance materials in the past year, 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 three aspects of concrete bridges, high-performance concrete materials and high-performance reinforced materials. Furthermore, the literatures are classified, summarized and commented. The results show that the current research on concrete bridges pays more attention to durability, life cycle design, life prediction and performance degradation in extreme environments. For high-performance concrete materials, more attention has been paid to research of green environmental protection, strength/toughness improvement and self-compaction. The related high-performance reinforced materials have been mainly focused on the FRP bars with higher strength and better durability. Finally, the paper points out

收稿日期: 2020-04-06

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.

Received: 2020-04-06

Foundation item: National Nature Science Foundation of China (No. 51778531)

Author brief: Zhao Renda (1961-), PhD, professor, main interests: bridge structural behaviors, high performance concrete and its structural applications, E-mail: rendazhao@home.swjtu.edu.cn.

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 advances

桥梁建设与人类文明发展息息相关,其不仅是人类跨越沟壑的重要途径,更是人类文明碰撞和交流的重要途径。混凝土桥梁一直为桥梁的主要桥式,近年来,中国混凝土桥的发展规模、建造技术及相关新材料的研究已走在世界前列,以其为基础的一些超级工程已经具备世界级地标的水准。

然而,发展总是伴随着问题,未来的桥梁建设必须把极端建设及使用环境纳入重点考虑对象,并进行相应研究,如:强风、强震及深水、高腐蚀的海洋环境等;同时,在结构技术研究遇到发展瓶颈之后,桥梁高性能材料的发展将成为突破现有桥梁技术瓶颈的关键,因此,对于桥梁用高性能混凝土及其筋材的运用研究也将成为重点。

为了在过去一年混凝土桥及其高性能材料方向研究新进展的基础上继续深入研究,有必要对该方向的部分重点研究进行分析、总结和展望,以期为广大研究者在新的一年里开展工作提供些许参考和思路,并期待与广大同行共同促进混凝土桥及其高性能材料方向的进一步发展。

1 混凝土桥相关研究

从时间尺度上看,混凝土桥梁的研究重点集中在桥梁建设期,在建设峰值点之后将进入运营与养护阶段。高宗余等^[1]在“中国海洋桥梁工程技术发展现状、挑战及对策研究”一文中指出:中国桥梁结构的进一步发展应高度重视其与环境作用的组合、结构耐久性、抗疲劳和全寿命设计理论等方面,以此解决现有结构关键技术瓶颈。混凝土桥运营性能,特别是服役期复杂运营环境下的使用性能(主要是耐久性)、全寿命周期及其理念下混凝土桥的寿命预测理论、服役期抵抗极端灾害(地震、洪水和台风等)的能力等应受到重点关注。

1.1 混凝土桥耐久性研究

近年来,随着路网交通荷载的增加,桥梁在材料耐久性、结构可靠性、整桥使用寿命等方面都存在不同衰变。据调查,中国高速公路桥梁一般在运营 5 年左右即会不同程度出现钢筋混凝土病害^[2],因此,混凝土桥梁结构的耐久性降低已成为一个亟待解决

的问题。耐久性的提升往往从设计(尤其是细部设计)、抗环境影响、计算理论及材料层面(抗裂、增韧、抗渗等微观机理)等角度展开。

在桥梁耐久性设计方面:有学者提出应从暴露环境、耐久性龄期及耐久性性能测试方法等方面开展研究^[3],并应基于使用寿命估算工具建立可被广泛接受的耐久性设计理论^[4],并基于此对现有规范进行修正。为此,Li 等^[5]依托港珠澳大桥,采用基于模型的方法和多层次原理对其不同耐久性风险进行研究。连新奇^[6]开展了面向结构部位(含灌注桩、墩身等强腐蚀部位)的铁路混凝土结构耐久性研究,提出了特殊工况下混凝土耐久性评价指标体系及高温高湿、强腐蚀海洋环境下混凝土结构的防腐强化措施。阙磊等^[7]从桥梁结构的设计年限、构造物设计要求、材料要求和其他保护性的耐久性设计措施等角度对跨海大桥混凝土结构耐久性设计展开分析,并指出氯离子渗透是影响混凝土耐久性的关键因素,应严格控制。

耐久性理论研究方面,邬晓光等^[8]针对目前混凝土梁式桥耐久性预测方法考虑因素单一的问题,整合了氯离子含量、混凝土碳化、保护层厚度、裂缝、钢筋锈蚀和混凝土强度等指标,并引入耐久性指标时变预测模型,基于可拓理论实现对混凝土梁式桥耐久性的预测。黄腾腾等^[9]提出了在役混凝土梁桥耐久性的三方面评估指标体系和“桥梁整体-组成部分-构件”的三层次评估体系;研究了基于模糊理论的既有梁桥耐久性综合评价方法等。黄海新等^[10]基于贝叶斯动态更新技术,以混凝土碳化深度为随机变量,利用体现结构个性特征的实桥检测信息对传统静态碳化模型进行修正,并利用碳化试验模拟实桥检测数据,对钢筋混凝土拱桥进行体系动态耐久性评估。

在海洋环境下混凝土桥梁结构耐久性研究方面,Yi 等^[11]综述了海水中氯离子、镁离子等引起的混凝土相变引发的问题,如:镁离子可以取代镁黄铁矿中的钙,降低孔隙溶液碱度,最终破坏 C—S—H 凝胶的稳定性。这些表面相变使得潮汐区混凝土发生剥落和分层。随后,基于现有的劣化机理,通过提

高水泥水化物的化学稳定性、快速自愈和智能碱度控制,设计一种更耐用的混凝土保护层体系的构想(图1)。Umar等^[12]探讨了沿海地区改性水泥基复合材料的抗菌性能及防腐性能,筑造了4种改性水泥复合立方体试块来评估其抗菌及力学性能。研究发现,亚硝酸钠复合缓蚀剂水泥基复合材料(PPC-SN)与其他改性水泥基复合材料相比,具有更好的抗菌及力学性能,为海洋环境下混凝土桥在微生物侵蚀下的研究提供了新思路。吴智深等^[13]从轻质、高强、耐久材料发展的角度出发,为海洋环境下大跨桥梁长期服役性能问题的解决提出了努力的方向。

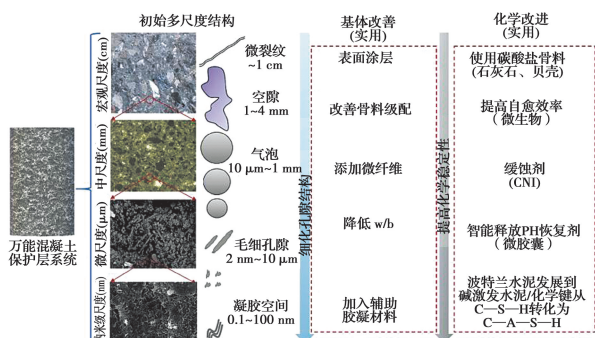


图1 混凝土抗海水侵蚀保护层体系构想示意图^[11]

Fig. 1 Schematic diagram of concrete protective layer system against seawater erosion^[11]

Janotka等^[14]在调查两座百年桥梁过程中意外地发现:覆盖在老桥混凝土外表面约2~3 mm厚的致密灰泥层有效地防止了桥梁碳化的发生,确保了其耐久性。主要因为:灰泥层主要由致密的碳酸盐微粒组成,其随着时间的推移可形成没有张开孔隙且很薄的保护层,从而起到防止碳化的作用。

通过上述总结可以发现,近几年在混凝土桥耐久性研究方面获得了不少有价值的成果,但也存在一些不足,主要有:1)耐久性设计方面的研究还不够系统,过于片面,如目前的研究大多是基于材料的耐久性研究,基于结构与材料耦合作用的耐久性研究较少;2)理论研究方面成果较少,且目前更多的研究是基于构件的耐久性设计,基于“桥梁整体-组成部分-构件”的耐久性设计理念的研究还有待进一步深入;3)极端环境下耐久性研究针对面较窄,如目前主要研究都是针对腐蚀及海洋环境方面,对于高温、高热等其他极端环境下的研究并不多见,还有待进一步拓展。

1.2 混凝土桥寿命预测研究进展

为更好地满足对既有桥梁的承载力和通行能力

的新要求,很有必要对桥梁长寿命服役进行系统性研究。李亚东等^[15]指出,由于经济高速发展的起点不同,桥梁老龄化问题首先在发达的工业化国家受到重视,近年来欧美和日本等国家和地区开展了延长桥梁寿命、维持桥梁长期性能的研究。因此,中国作为土木工程大国,理应跟上桥梁寿命周期研究的步伐。

在全寿命周期研究方面,Akhnouk^[16]指出,应从高性能混凝土、预制梁构件及快速施工方法相结合的理念出发,研究具有更长使用寿命的桥梁。另有学者分别从建立寿命预测模型及预测理念^[17]和可靠性理论^[18]出发,开发出了更为合理的使用寿命预测及成本分析方法。陈开利^[19]通过收集日本有关桥梁长寿命研究方面的技术资料,分析归纳了桥梁长寿命研究的新进展。张劲泉等^[20]对公路桥梁可靠性和耐久性的研究成果及现行评估规范、标准以及指南进行了梳理、总结,并对其应用现状进行阐述。王京京^[21]基于生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)基本理论,以粉煤灰钢筋混凝土梁作为研究对象,对其生命周期内的碳排放和成本进行量化分析,并构建了粉煤灰混凝土结构全生命周期综合、可持续性评价指标和设计方法。Navarro等^[22]以预应力桥的桥面板为研究对象,通过对其生命周期评估(图2),分析了几种对环境影响的预防策略。寿命周期分析结果表明:通过掺入硅灰、降低水灰比及对混凝土表面进行憎水或密封胶处理等措施,可以有效地降低氯离子对结构的影响(30%~40%)。

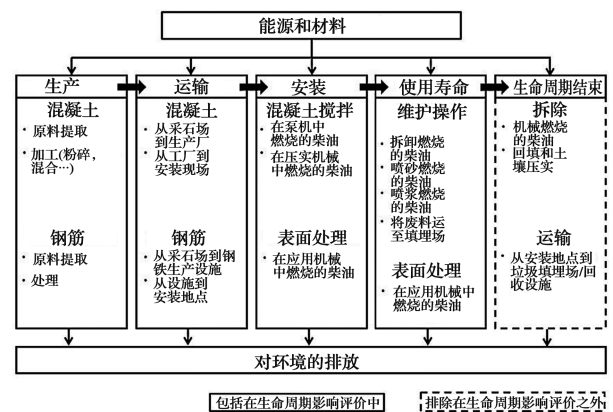


图2 桥面板的生命周期示意图^[22]

Fig. 2 Life cycle diagram of bridge deck^[22]

在寿命预测研究方面,郑鹏^[23]从耐久性的评判指标入手,运用熵权可拓理论对混凝土梁桥进行耐久性评估,实现了对不同使用年限的混凝土梁桥耐

久性水平的预测。李双营等^[24]基于 Fick 第二扩散定律理论,得到一种可对盐湖地区既有 RC 桥梁结构使用寿命进行准确预测的模型。在混凝土材料的寿命预测方面,王少鹏^[25]通过微观机理分析,调研和统计典型环境中混凝土强度时变规律及试验与数值模拟等工作,分析了不同碳化系数下混凝土收缩裂缝宽度与碳化深度及时间的关系,为公路桥梁混凝土材料的工程使用年限预测提供了可参考的依据。

上述研究表明,现有关于混凝土桥寿命周期的研究主要集中在两个方面:一是对桥梁全寿命周期相关理论的综述、总结和分析;二是开展典型环境和病害下的寿命周期与寿命预测研究(如腐蚀环境或开裂等情况)。关于桥梁全寿命周期设计理念、使用寿命及其性能预测的研究还处于学习和成长阶段,后续还应继续在基于寿命周期费用与结构性能化的使用寿命设计理念上做出相应研究,以实现桥梁在整个寿命周期总成本最低、风险最小这一目标。

1.3 极端灾害下混凝土桥的研究

极端灾害包括地震、飓风、船撞、洪水、恐怖袭击和由地震等引起的次生灾害(爆炸、海啸)等,这些极端灾害均对混凝土桥造成潜在的威胁。从研究趋势上看,目前,学者们倾向于从桥梁结构受单个极端灾害作用情况下的研究逐渐向多灾害耦合作用的研究发展^[26]。

在理论研究方面:Ramanathan 等^[27]通过研究抗震设计原则和细节的演变对多跨连续混凝土箱梁桥抗震性能的影响,基于洛马普里塔地震建立了桥梁非线性分析模型,研究桥梁振动特性在抗震设计思路演变下的特点,并采用非线性时程分析法绘制了其脆弱性分析曲线。Kameshwar 等^[28]提出一种基于参数化的多危险度脆弱性风险评估(PF-MHRA)方法,用于地震和飓风耦合作用下公路桥梁的风险评估。该方法利用有限元模型和带有非线性 logit 函数的逐步 logistic 回归,推导出桥梁脆弱性函数;并基于此提出一种新的桥梁在飓风和浪涌荷载耦合作用下的风险评估方法,并将其应用于南卡罗来纳州的多跨混凝土简支梁桥。Eslami 等^[29]为了检查洪水前后桥梁的稳定性,比较了确定性方法和蒙特卡罗模拟方法的失效分析结果,还通过土体抗剪强度参数(即 c 和 φ)之间的互相关系数,研究了该系数和抗力系数对极限承载力、安全系数和破

坏概率的影响。任明杰^[30]开展了洪水波流耦合荷载作用下桥梁破坏机理研究,为实际工程中的防洪措施提供依据。除此之外,梅恒^[31]开展了全寿命周期桥梁多灾害概率风险研究,并结合中国几座实际桥梁,对桥梁结构进行多灾害耦合危险性分析,得到不同灾害的设防水准。陈希虎^[32]依托映秀至彻底关段混凝土桥梁,采用灰色系统评价模型对公路沿线 9 座桥梁的易损性进行评价与分析。

在试验研究方面:Beneberu 等^[33]开展了外裹防火材料的 CFRP 加固预应力混凝土桥的抗弯能力研究,总结出很好的桥梁抗火方法。还有学者对火灾后预应力混凝土桥梁^[34]及持续高温下 UHPC 梁^[35]的性能进行研究,发现高温对刚度、抗弯强度影响较大,对抗压强度、韧性及结构基频影响不大。Shiravand 等^[36]选取 150、355、550、700、1 200 kg TNT(以此为荷载变量),对其爆炸情况下箱梁的响应进行参数分析。发现由于箱梁内空间的限制,爆炸产生的冲击波被放大约 2.7 倍。在大多数荷载情况下,部分预应力筋的锚固区混凝土受损,导致其有效后张力损失;另外,暴露在爆炸冲击中的钢筋束失效,因此,整个桥梁容易处于失稳状态。鉴于此,提出应该开发一种能量吸收设施,辅助梁体抵抗冲击。Pan 等^[37]介绍了一种新型的能量吸收装置,它是由“U”形薄壁钢板和玻璃钢蜂窝填充而成。为了验证所设计的吸能结构的抗小车碰撞性能,对其进行了导向系统水平冲击试验(图 3)。结果表明,所设计的薄壁钢板纤维复合材料防护结构具有良好的抗碰撞性能,可有效地用于桥墩防撞。

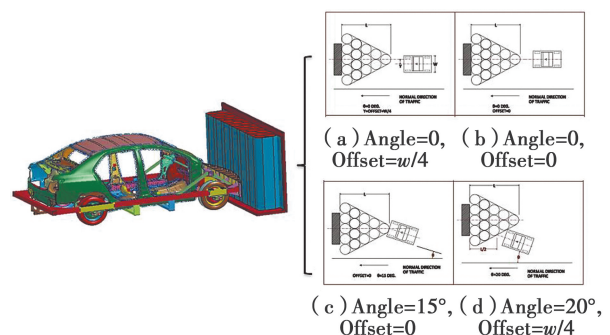


图 3 桥墩吸能防撞装置示意图^[37]

Fig. 3 Schematic diagram of energy absorption and anti-collision device for pier^[37]

总结上述文献可知,目前,混凝土桥在极端灾害防治领域的研究均基于统计学理论及实验开展,其自身统计学方法及实验方案是否最优,样本采集及

试验数据是否科学合理等还存在一定疑问。因此,建议将此部分研究与大数据理论进行深入结合,并基于现有试验继续开发新的试验方法;同时,还应基于人工智能和5G技术积极开发智能化应对设施,如:实时监控与检测系统等,为服役桥梁提供保障,也可对相关研究提供样本数据。此外,现有研究中,对于多因素耦合作用下桥梁结构响应的研究较浅,还应继续深入探索。

2 高性能混凝土材料

高性能混凝土具有独特的高工作性能,势必成为未来混凝土桥技术短板上的支撑。因此,很有必要探讨和研究目前数量繁多、功能性强的高性能混凝土如何用于混凝土桥领域。

高性能混凝土在桥梁工程中的运用方面,邵旭东^[38]开展了基于UHPC材料的高性能装配式桥梁结构研发,针对现有装配式桥梁结构中中共性的技术难题,研发了具有高施工性能、高使用性能和高耐久性能的高性能装配式桥梁结构体系。蒋蕾^[39]对高性能混凝土的特点进行分析,探讨其在桥梁工程建设中的应用。He等^[40]研究了UHPC短柱在抗震条件下的性能。结果表明,高强度提高了UHPC柱的延性和能量吸收能力。此外,超高韧性混凝土(STC)等材料也已有部分工程应用。例如,邵旭东等^[41]提出的钢-STC轻型组合桥面结构方案可以延缓正交异性钢桥面板疲劳开裂问题。Zhan等^[42]认为将STC层的厚度从45 mm增加到60 mm可以减小钢甲板中易疲劳部件的疲劳应力幅。

结合以往研究及上述研究不难发现,高性能混凝土在桥梁工程中的运用主要以UHPC为主,其他大部分材料仍停留在实验室阶段及局部小体量运用方面。因此,将高性能混凝土应用于桥梁工程的探索与研究依然需继续努力。

2.1 绿色高性能混凝土

一般认为,绿色混凝土可以节约资源、降低碳排放量或者实现资源的可持续发展。近几年,绿色混凝土的研究取得了一定的进展^[43]。其中,研究再生混凝土和地聚物混凝土是当下混凝土与环境协调发展的一种趋势。

朱雪锋等^[44]比较了不同养护方法对再生混凝土力学性能的影响。结果表明,CO₂养护下的再生混凝土比标准养护下28 d的强度明显提高。于巾

茹等^[45]研究了再生混凝土的抗SO₄²⁻盐侵蚀性能。结果表明,矿渣掺和料比粉煤灰掺和料更有利于再生混凝土的抗SO₄²⁻盐性能。提高水灰比或增大孔隙率均会导致混凝土的耐腐蚀性降低。

赵人达^[46]研究了桥梁结构中地聚物混凝土性能劣化机理和时变变形规律,通过冻融试验找到了提升抗冻能力的方法,为地聚物混凝土用于高寒地区桥梁建设打下了基础。除此之外,赵人达等^[47]研究了早龄期低钙粉煤灰基地聚物混凝土拉伸徐变特性,为受拉状态地聚物混凝土的应力-应变关系、开裂预测及其今后用于桥梁上部结构提供重要的参数依据。徐腾飞等^[48]开发了直接拉伸徐变试验装置,研究普通混凝土、加入掺和料混凝土^[49]以及地聚物混凝土^[50]的早龄期约束收缩与拉伸徐变特性,探索约束收缩作用下混凝土的开裂风险,以及改善约束收缩的相关措施^[51]。

综上,绿色混凝土的研究已经从最初的降低水泥用量来缓解环境污染,逐渐发展到再生骨料的利用以及环境友好的新型绿色无机胶凝材料(如地聚物)的开发等,以期从根本上解决对环境的破坏和二次污染。但是,再生骨料混凝土的力学性能不稳定,地聚物的研究尚不成熟,大范围的使用面临着诸多挑战。这也是绿色高性能混凝土研究的热点问题。

2.2 纤维增强混凝土

混凝土是当今用量最大的建筑材料,但其存在突出的缺陷,在混凝土中加入纤维以改善其脆性大、抗拉强度低等缺点是提高混凝土性能的常用途径。纤维的种类丰富、力学性能差异较大,按弹性模量可分为高弹性模量纤维(如钢纤维、玻璃纤维、碳纤维、玄武岩纤维)和低弹性模量纤维(如有机纤维)。高弹性模量纤维的刚度大于混凝土,基体产生微裂缝后,纤维开始受力,分担混凝土所受应力,提高材料强度。纤维刚度越大,强度提高越明显。低弹性模量纤维的刚度小于混凝土,受力一般在混凝土开裂之后,主要用于提高材料延性。钢纤维混凝土的破坏以纤维拔出为主,它能显著改善混凝土的韧性和抗弯强度。但钢纤维在混凝土中难以分布均匀,在实际运用中效果欠佳。相较于普通钢筋混凝土构件,钢纤维混凝土构件的裂缝宽度可降低50%以上^[52]。杨娟等^[53]从废弃轮胎中分离出钢纤维,并将这种再生钢纤维掺和在混凝土中,结果表明,再生钢纤维对混凝土的弹性模量及劈裂抗拉强度的增强效

果均胜于普通钢纤维。同时,附着橡胶颗粒的再生钢纤维可将混凝土的断裂能提高 4 倍左右。有研究指出,混杂纤维可以充分发挥各纤维的优点,从而制备性能更加全面的纤维混凝土,蒋威等^[54]对其进行了系统的梳理。聚丙烯纤维是一种人工合成纤维,密度较小,具有一定的强度。聚丙烯纤维混凝土主要以纤维拉断而发生破坏。罗洪林等^[55]比较了聚丙烯纤维的长径比对混凝土力学性能的影响,结果表明,混凝土的基本力学性能随纤维长径比的增大而先增大后减小,但最优长径比并不相同。王磊等^[56]运用聚丙烯纤维改善快干混凝土的抗渗性,并取得良好的效果,相较于对照组,0.2%的纤维掺量使混凝土的抗渗系数降低了 62.4%。此外,崔光耀等^[57]在隧道衬砌混凝土的抗错断性能研究中发现,钢-聚丙烯混杂纤维混凝土的抗错断性能要优于单一的钢纤维混凝土,这对高烈度活动断裂区隧道建设具有重要意义。玄武岩纤维在中国分布较广,价格便宜,开发潜力巨大,是近几年研究的热点之一。焦华等^[58]分析了玄武岩纤维对喷射混凝土力学性能的影响,结果表明:适量的玄武岩纤维可以显著提高喷射混凝土的抗压强度和抗弯强度,这可能是由于玄武岩纤维细化了混凝土中的孔隙。李趁趁等^[59]研究了玄武岩纤维的体积分数和长度对高强混凝土抗冻性能的影响,结果表明,混凝土的抗冻性随玄武岩纤维(18 mm)体积分数的增大而提高,加入玄武岩纤维可减小混凝土的表面剥落程度。然而,6、30 mm 的玄武岩纤维对混凝土抗冻性能的影响并不明显。张振雷^[60]分析了玄武岩-纤维素混杂纤维混凝土的力学性能,结果表明,混杂纤维的掺入使得混凝土的基本力学性能均有所提升。如图 4 所示,当玄武岩纤维和纤维素纤维的掺量分别为 4.0、1.6 kg/m³ 时,混凝土的抗压、抗弯及劈裂抗拉强度分别较普通混凝土提高了 13.94%、35.46%、18.75%。

ECC(工程用水泥基复合材料)全称 Engineered Cementitious Composites,是一种基于微观结构和断裂力学原理而研制出的具备超高韧性和多裂缝开展机制的新型建筑材料。贾毅等^[61]将 PP-ECC 用于桥墩的墩底塑性铰区域,使桥墩在地震作用下的抗裂性能得到显著提升。Hosseini 等^[62]进一步将 ECC 与超弹性合金结合使用,控制了桥墩在地震作用下的残余变形,并使其自复位能力得到提升。

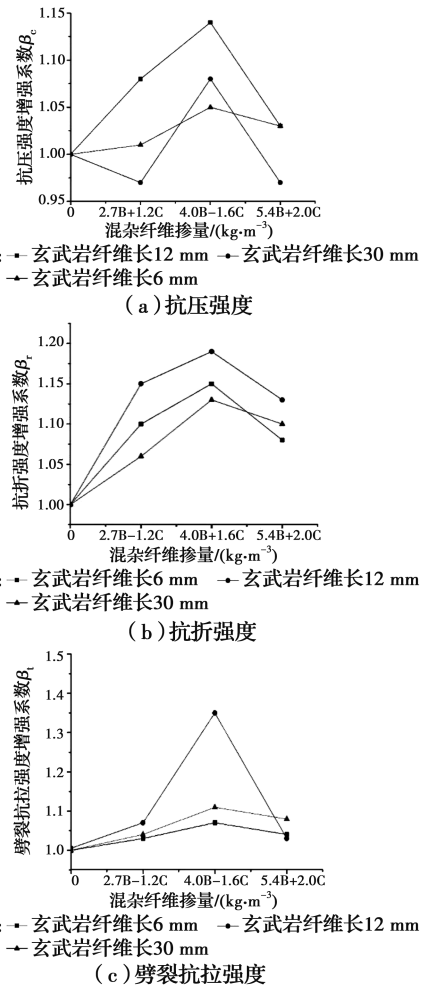


图 4 混凝土强度与混杂纤维掺量的关系^[60]

Fig. 4 The relationship between concrete strength and hybrid fiber content

Kabir 等^[63]用 PVA-ECC 加固钢梁的受压翼缘,研究证实了 ECC 层在受压翼缘屈服后被压碎,从而防止了侧向扭转屈曲的发生,并使组合梁的抗弯性能得到改善。王彦平等^[64]研究了 PVA-ECC 修补砂浆冲蚀磨损性能,确定了一种施工性良好,强度和冲蚀抗力均较高的修补砂浆配方。崔涛等^[65]和任亮等^[66]研究了 ECC 与既有混凝土结合面的黏结性能,发现 ECC 与既有混凝土结合面的抗剪性能强于普通混凝土,在 ECC 用于桥梁的修复与加固方面做了初步探索。

由于纤维在提升混凝土性能方面成效显著,纤维混凝土历来是学者们研究的热点问题之一。从目前的研究来看,高弹模纤维(如钢纤维)在提高混凝土强度方面有巨大优势,但钢纤维在混凝土中难以分布均匀,进而影响使用效果。低弹模纤维(如聚丙烯纤维)可以很好地抑制混凝土微裂缝的发展,大大

增加混凝土的延性,并在 ECC 中获得了良好的应用。鉴于目前市面上的纤维种类、性能和价格的巨大差异,采用多种纤维混合使用的方式,以优化混凝土的各项性能,这将是未来纤维混凝土的发展趋势。此外,中国玄武岩储量巨大,发展高性能的玄武岩纤维混凝土对控制工程经济成本和发展纤维混凝土桥梁结构具有重大现实意义。

2.3 自密实混凝土

自密实混凝土(SCC)是一种在重力作用下自行密实的高流动性混凝土,它为施工操作带来了极大的方便,被称为“最近几十年中混凝土技术最具革命性的发展”。然而,由于原材料的质量控制、早期收缩开裂及经济性问题,导致自密实混凝土没有得到广泛运用。近些年,对自密实混凝土开展了大量的研究工作。Agwa 等^[67]将稻草灰(RSA)和棉秆灰(CSA)掺入 SCC 中,随着 RSA 和 CSA 比率的增加,SCC 的流动性降低。相比之下,SCC 的力学性能随着 RSA 和 CSA 百分比的增加而增加。张永军等^[68]研究了污水处理厂污泥对 SCC 强度和耐久性的影响,结果表明:在 0.25%~1.0% 掺量范围内,污水处理厂污泥导致早期强度显著降低,但对后期的影响较小。并且随污泥掺量增加,SCC 的抗氯离子渗透性逐渐增强。El Mir 等^[69]评估了珍珠岩废料(WP)对 SCC 耐久性的影响,结果表明,这种粉末的火山灰反应和多孔性质与冻胀侵蚀引起的破坏性膨胀应力相适应,因此,其抗冻融性显著提高。Sasanipour 等^[70]通过增加再生细骨料的替代率大大降低了 SCC 对氯离子渗透的抵抗力。张立群等^[71]研究了冻融和碳化共同作用下硅灰自密实混凝土的耐久性。试验结果表明:硅灰自密实混凝土的抗冻性能高于相同强度等级的普通混凝土,虽然前者的抗碳化性能略低于后者,但经过冻融作用后,前者表现出更好的抗碳化性能。Hossain 等^[72]通过加速腐蚀测试研究了聚乙烯醇(PVA)、橡胶屑(CR)和高密度聚乙烯(HDPE)纤维增强的 SCC 梁的耐久性。结果表明,与 SCC-PVA 和 SCC-CR 梁相比,SCC-HDPE 梁表现出优异的耐腐蚀性。SCC-HDPE 梁的钢筋质量损失较少,裂缝和剥落较少。Hossain 等^[73]采用两种不同的 ECC 与 SCC 深度比制成了复合梁,同时,还制作了单层 SCC 或 ECC 组成的全深度梁,以比较它们与混合复合梁的性能。与全深度 SCC 梁和全深度 ECC 梁相比,混合复合

材料梁具有更高的延展性和能量吸收能力,这表明该混合复合材料适用于抗震元件。此外,混合复合梁还显示出更多的裂纹数量和更小的裂纹宽度。

随着自动化施工技术的推广和特殊环境下混凝土工程的建设,自密实混凝土的运用越来越多。在自密实混凝土中掺入固废材料可以改善其力学性能、降低经济成本。但自密实混凝土仍面临着收缩开裂等问题,这严重影响了其耐久性。此外,自密实混凝土的原材料控制技术和密实性能评价体系的欠缺也妨碍了自密实混凝土技术的发展。

2.4 自修复混凝土

自修复混凝土模仿生命系统受伤后再生自修复机理,使混凝土材料对损伤破坏具有自感知、自记忆、自诊断、自适应、自调节、自恢复和自修复等特性的智能材料。混凝土自修复技术能使混凝土表面裂缝有效愈合,改善内部结构,提高服役期间的力学性能和耐久性,在土木工程领域中发挥着重要作用。

现有的自修复混凝土有很多种,包括自然自修复混凝土、电解自修复混凝土、微生物自修复混凝土、仿生自修复混凝土和智能自修复混凝土等^[74-77]。近年来,对自修复混凝土研究主要集中于自然自修复混凝土和仿生自修复混凝土两个方面。

关于自然自修复混凝土,Hong 等^[78]研究了高炉矿渣基水泥砂浆的自修复性能,发现自修复可使砂浆早期产生的裂缝愈合,从而抑制海洋环境中有害离子的侵入,提高结构的使用寿命。Qiu 等^[79]研究了自修复对 ECC 弯曲疲劳性能的影响,结果表明,自修复大大延长了 ECC 的疲劳寿命。

仿生自修复的过程为:微胶囊或微纤维破裂,修复剂流出并渗入基体裂纹中,修复剂固化并修复裂纹。其中,微胶囊外壳与基体界面粘结的问题值得关注,Livia 等^[80]通过改善微胶囊外壳的亲水性能防止微胶囊与基体在外力作用下脱离,优化水泥基复合材料的自修复作用。Abir 等^[81]利用微胶囊基自修复混凝土进行了大尺寸户外试验。结果表明,户外试验也表现出与实验室类似的自修复过程,具体为裂纹宽度和深度降低,渗透率降低,以及强度恢复。

2.5 3D 打印混凝土

3D 打印混凝土技术是将 3D 打印技术与混凝土制备技术相结合而产生的新型应用技术。该技术运用计算机全自动控制建造过程,在数字模型的基础

上,逐层打印构造三维实体,具有建筑效率高、人工成本低和建筑废料少的优点^[82]。第一套 3D 打印多层公寓由荷兰埃因霍温理工大学建造, Salet 等^[83]使用埃因霍温理工大学的 3D 打印设备制作了一座跨度为 6.5 m,宽度为 3.5 m 的简支梁桥(图 5),满足实用要求。



图 5 3D 打印混凝土桥^[83]

Fig. 5 The 3D printed bridge^[83]

3D 打印混凝土技术中,打印材料的研发是重中之重。3D 打印建筑材料应满足强度、流动性、凝结性和经济性要求。不仅要有较高的早期强度,较快的凝结时间,同时应具备适当的流动性及较高的可塑性。研究者们研究了 3D 打印混凝土的工作性^[84-87]和力学性能^[88-89],并探讨了它们之间的关系^[90]。Wolfs^[91]等建立数值模型,具体分析了新拌打印混凝土 90 min 内的强度发展,并研究了各工艺参数对 3D 打印混凝土的粘结强度的影响。值得注意的是,地聚物除了绿色节能,还具有早强快硬的特点, Xia 等^[92]和 Panda 等^[93]在地聚物应用于 3D 打印研究方面做了开创性工作。

3 高性能筋材

纤维增强复合材料(Fiber Reinforced Polymer/Plastic,简称 FRP)筋是以连续纤维为增强体、聚合物树脂为基体,经过浸润、固化等工序制备而成的新型复合材料。近年来,FRP 以其高强、轻质、耐腐蚀等特性在工程中得到应用。FRP 筋中纤维体积含量可达到 60%,重量约为普通钢筋的 1/5,强度为普通钢筋的 6 倍。相比于普通钢筋,FRP 筋轻质高强,但其应力-应变关系为线弹性,没有屈服平台,极限延伸率较低。此外,多数 FRP 筋的弹性模量也要低于普通钢筋。在桥梁工程中,FRP 索还可用作悬索桥的吊索及斜拉桥的斜拉索,以及预应力混凝土桥中的预应力筋^[94]。

3.1 FRP 筋耐久性研究

碱环境研究方面:张秀丽等^[95]对 4 种直径的

GFRP 筋在 40、80℃的碱溶液中进行加速老化试验,研究直径对试件表面形貌、破坏形态和抗压强度的影响。提出了碱环境中考虑尺寸效应的 GFRP 筋抗压强度退化模型。齐俊伟^[96]开展了 GFRP 筋在盐碱腐蚀环境下的试验研究,推导出 GFRP 筋抗拉强度的退化模型和 GFRP 混凝土构件粘结力退化模型。

海洋环境研究方面:陈爽^[97]对玻璃纤维增强复合材料筋(GFRP 筋)、碳纤维增强复合材料筋(CFRP 筋)与珊瑚混凝土间粘结性能进行试验研究,建立了一种适用于 FRP 筋-珊瑚混凝土粘结滑移的本构关系模型。同时,对湿热海洋环境下 FRP 筋-珊瑚混凝土粘结性能劣化进行研究。提出了 FRP 筋-珊瑚混凝土在湿热海洋环境下的粘结强度折减系数计算公式。史健喆^[98]通过试验分析研究了玄武岩纤维增强复合材料筋(BFRP 筋)在海洋环境下的蠕变、松弛、疲劳性能,得出 BFRP 筋的力学性能退化机理和规律,同时,结合体外预应力 BFRP 筋的关键区域力学性能研究和长期性能研究,提出了 BFRP 筋体外预应力结构的关键参数及长期性能设计的方法。薛伟辰^[99]等开展了碱环境及海水环境下 GFRP 筋抗拉性能的加速老化试验,通过试验对比分析了两种环境下 GFRP 筋的劣化机理和劣化程度。

高低温环境研究方面:李光辉^[100]研究了不同高温条件作用后 FRP 筋的拉伸疲劳性能以及高温暴露后静载和疲劳荷载作用下 FRP 筋混凝土梁的抗弯性能,以及高温对不同 FRP 筋混凝土梁的最大裂缝宽度、刚度和剩余承载力的影响规律。提出了高温后 FRP 筋混凝土梁的最大裂缝宽度、刚度及剩余抗弯承载力的计算方法及 FRP 筋混凝土梁疲劳寿命的预测模型。李扬等^[101]研究了低温下 FRP 筋与混凝土的粘结性能,设计研发了可实现低温下力学加载和应变测试的试验装置,对 FRP 筋混凝土试件进行梁式拉拔试验。徐惟雄^[102]通过梁式拉拔试验对低温环境下 GFRP 筋与混凝土之间的粘结性能进行了研究,结果表明,随着温度的降低,在相同荷载作用下,GFRP 筋与混凝土的粘结性能将随温度的下降而提高。

循环荷载环境研究方面:高建雄^[103]研究建立了 FRP 在多种循环荷载作用情况下的剩余强度模型以及 FRP 在疲劳荷载和自然老化双因素环境下的

剩余强度模型,提出了随机循环载荷作用下 FRP 的疲劳寿命预测方法。赵杏^[104]通过 BFRP 复合材料拉-拉疲劳试验,研究了 BFRP 复合材料在 10^7 次以上循环荷载作用下的疲劳特性、损伤模式和疲劳损伤线性累积规律,同时,推导出基于中长寿命(10^6 次循环)、长寿命(10^7 次循环)和概率分布的疲劳强度折减系数,探究了 FRP 拉索结构疲劳寿命可控设计方法。

耐久性理论研究方面:Liu 等^[105]研究了 FRP 复合材料在长期环境影响下的机械性能,包括水/湿气、碱性溶液、酸性溶液、低温/高温、紫外线辐射、冻融循环、湿润-干燥循环和现场环境。收集了 1 900 多个实验确定的 FRP 材料的机械性能,包括拉伸、压缩、弯曲和剪切的强度与模量。讨论了每种环境影响的退化机理,并提出了相应的设计方法。

综上所述,目前 FRP 筋耐久性研究主要针对碱环境、海洋环境、循环荷载环境等方面,对于酸性环境、冻融循环高温、湿润-干燥循环和现场环境的研究较缺乏,并且缺乏一套有效的 FRP 材料耐久性标准测试程序,对 FRP 材料耐久性进行评估还有待进一步研究。

3.2 FRP 筋粘结性能研究

曾宪桃等^[106]为建立相对准确的 FRP-混凝土界面粘结滑移模型,提出内嵌 CFRP 筋加固混凝土梁界面特性研究新的试验方法,并开展了相应的试验(见图 6)。司豆豆等^[107]通过开展 FRP 筋与不同强度、韧性的 ECC 材料的拉拔试验,测试了 FRP 筋拔出承载力和端部黏结滑移,分析了 FRP 与 ECC 材料之间的黏结滑移曲线特征以及 ECC 材料的强度和韧性变化对 FRP-ECC 黏结性能的影响。高丹盈等^[108]通过对 GFRP 筋、GFRP-钢绞线复合筋与混凝土的拉拔试验,对比分析了在不同直径、钢绞线体积率、保护层厚度和混凝土强度下 GFRP 筋、GFRP-钢绞线复合筋与混凝土的黏结强度及破坏形态,建立了带肋 FRP 筋与混凝土最大黏结应力的理论模型。根据该理论模型和试验结果,提出了适用于带肋 FRP 筋与混凝土黏结强度的计算模型。宋金华等^[109]开展了针对 30 种不同肋参数的 GFRP 带肋筋粘结性能的拉拔试验,通过试验数据分析出 GFRP 带肋筋与混凝土之间的粘结强度主要影响因素为 FRP 带肋筋表面凸肋与混凝土之间的胶着力。

从上述研究可见,对于 FRP 筋粘结性能仍有待

进一步展开研究,对不同类型 FRP 筋和不同表面形式的 FRP 筋(光滑、凸肋、喷砂、压痕、缠绕等表面形式)与混凝土粘结机理需要进一步细化研究。

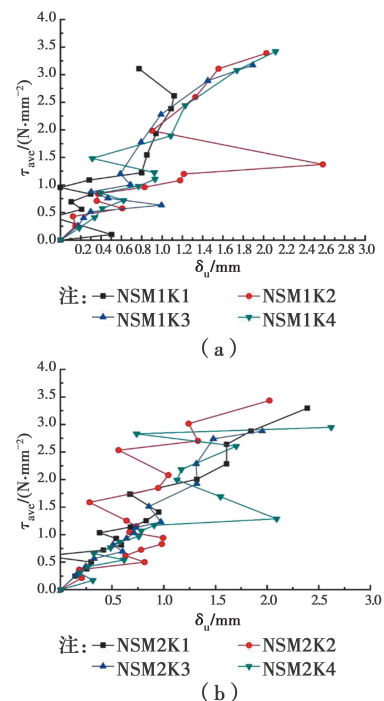


图 6 8 根加固混凝土梁 CFRP 筋-混凝土界面粘结-滑移关系实测曲线^[106]

Fig. 6 Bond-slip curves of the CFRP-concrete interface of 8 reinforced concrete beams^[106]

3.3 FRP 筋混凝土梁性能研究

FRP 筋混凝土梁抗剪性能理论研究方面:陈升平等^[110]以钢纤维体积率(0%、0.5%、1.0%、0%/1.0%)为试验变量,进行了 4 根 FRP 筋钢纤维混凝土梁试件的抗剪性能试验,主要研究了梁的破坏过程、破坏形态、裂缝的发展规律以及跨中的挠度特征。李根喜等^[111]进行了以玄武岩纤维体积掺量及 GFRP 纵筋配筋率为变量的 GFRP 纵筋-玄武岩纤维混凝土梁受剪试验,并基于试验获得了试验梁的典型破坏特征、截面应变、跨中挠度、纵筋及箍筋应变的变化规律。韩定杰等^[112]采用正交试验法分析了梁的剪跨比、纵向配筋率、截面有效高度、混凝土抗压强度对无腹筋 FRP 筋混凝土梁抗剪承载力的影响。

FRP 筋混凝土梁抗弯性能理论研究方面:孙艺嘉等^[113]基于 328 组 FRP 筋混凝土梁抗弯试验数据,系统地对比分析了规范中 FRP 筋梁正截面受弯承载力计算模型的准确性和离散程度,通过拟合分析,建立了 FRP 筋混凝土梁正截面受压区等效矩形

高度 x 的经验公式,改进了 FRP 筋混凝土梁正截面受弯承载力计算公式。陈升平等^[114]以钢纤维体积率与玻璃纤维增强复合材料筋(GFRP 筋)和碳纤维增强复合材料筋(CFRP 筋)两种筋材为试验变量,进行了 6 根纤维增强复合材料筋(FRP 筋)混凝土构件的抗弯性能试验,用以评价钢纤维体积率对 FRP 筋混凝土构件的延性提升效果。彭飞等^[115]开展了 GFRP 筋混凝土梁抗弯承载力极限状态的可靠度分析,并基于可靠度分析数据,改进了 GFRP 筋混凝土梁抗弯承载力的计算公式。

FRP 筋混凝土梁工程实践方面:王菊蕊等^[116]通过在混凝土梁中加入不同含量的 FRP 筋,研究 FRP 筋对混凝土梁抗弯性能的影响,分析了 FRP 筋高强混凝土梁的抗弯性能及其在 T 型桥梁施工中的应用。周玲珠等^[117]采用压电陶瓷传感器对 FRP/Steel 增强混凝土梁进行损伤监测(图 7)。利用时间反演法的自适应聚焦性质和良好的抗噪性质,分析四点弯曲加载下梁的损伤程度与归一化聚焦信号幅值的关系。Yuan 等^[118]通过钢筋混凝土抗弯理论分析,得出了 FRP 筋混凝土构件的应力块参数,有助于工程师使用常规的应力块方法对 FRP 增强混凝土构件的抗弯强度进行更准确、更方便的设计。Siwowski^[119]对基于 FRP 复合材料的新型轻便式车行桥梁混凝土结构体系进行测试评估,并对混合 FRP 混凝土桥梁设计提出相应建议。

从上述研究可见,目前,主要对 FRP 筋混凝土构件的受力性能及承载力的计算方法进行研究,缺乏对 FRP 筋混凝土结构体系整体的受力分析研究,同时,现行规范中 FRP 筋构件承载力计算方法相对保守,需进一步完善。

3.4 FRP 筋混凝土板/柱性能研究

FRP 筋混凝土板方面:陈佳醒等^[120]研究了碳纤维增强复合材(CFRP)不同配筋率以及受压区配置 BFRP 栅格约束下活性粉末混凝土(RPC)单向板的抗弯性能。张黎飞等^[121]对 GFRP 筋、BFRP 筋水泥基复合筋材桥面连接板和钢筋增强桥面连接板的工作性能、裂缝发展、应变及变形能力进行对比研究,针对 GFRP 筋连接板设置低配筋率对照组,研究其对整体性能的影响(图 8)。王国强等^[122]对 GFRP 筋混凝土板在适筋及适量超筋两种配筋设计情形下的正截面抗弯承载力计算公式进行了推导和验证。

FRP 筋混凝土柱方面:邓宗才等^[123]研究了配筋率、偏心距和混杂配筋面积比对混凝土柱的破坏

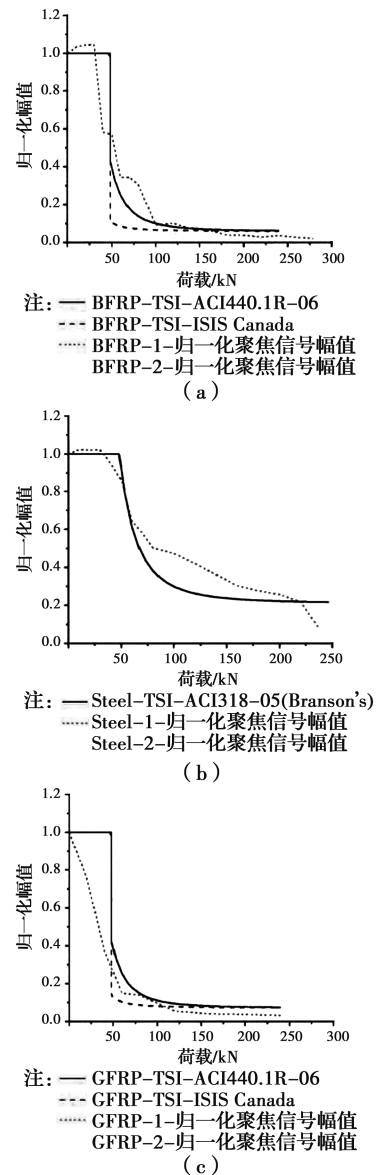


图 7 理论刚度指数与归一化聚焦信号幅值对比^[117]

Fig. 7 The comparison between the theoretical stiffness index and the amplitude of normalized focusing signal^[117]

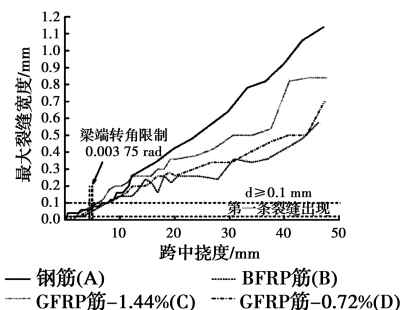


图 8 连接板侧面裂缝最大宽度统计结果^[121]

Fig. 8 Statistical results of maximum width of cracks in link slabs^[121]

形式、侧向位移和正截面承载力的影响,建立了混杂配筋柱正截面承载力计算公式。彭飞等^[124]研究推

导出 FRP 筋混凝土偏压柱的弯矩放大系数修正计算公式和 FRP 筋混凝土柱正截面承载力计算公式,建立了 FRP 筋混凝土偏压柱承载力计算公式。

从上述研究可见,目前,不同类型 FRP 筋的混凝土板/柱力学性能及计算方法研究相对较少,工程应用实践不足,有待进一步研究。

3.5 其他 FRP 筋构件性能研究

预应力构件方面:史健喆等^[125]针对体外预应力 BFRP 筋,提出一种可减小 BFRP 筋锚固端应力集中的组装式同源材料夹片锚具,同时,优化了体外预应力 BFRP 筋在转向区域的转向角度与转向半径。程君^[126]通过试验研究提出了体外预应力 CFRP 筋混凝土连续梁疲劳寿命分析的“两阶段”疲劳寿命理论预测法。

加固混凝土构件方面:Carter^[127]使用三维有限元分析了3个已经试验过的 BFRP 筋加固混凝土梁,提出了一种 BFRP 混凝土梁非线性有限元分析的校准模型,以考虑其准确性和计算效率来预测其响应。Zhou 等^[128]提出了一种改进的有限差分法来预测爆炸工况下 FRP 筋混凝土构件的动力响应。

从上述研究可见,目前研究者对 FRP 筋的多方面应用进行了不断的探索和创新,但 FRP 筋混凝土结构的力学理论还不完善,对 FRP 筋的多方面应用尚显存在制约。

3.6 FRP 筋混凝土构件抗震性能研究

江世永等^[129]研究了 CFRP 筋高韧性纤维混凝土柱的可修性能,并对加固修复后的 CFRP 筋高韧性纤维混凝土柱的抗震性能进行了研究。邓宗才等^[130]通过试验研究了体积配箍率、轴压比、剪跨比和纵筋种类等因素对 GFRP 筋混凝土柱抗震性能的影响,并将规范抗剪承载力计算方法得出的理论值与试验值进行对比。Jia 等^[131]进行了 FRP /钢双筋桥墩抗弯承载力设计方法的研究,同时,对 FRP /钢双筋桥墩抗震性能进行了评估。Cai 等^[132]对 BFRP 筋增强预制分段桥墩(FSR-PSBC)的抗震性能进行了研究,并且分析了在循环荷载环境下 FRP 筋与钢筋的配置比例变化对 FSR-PSBC 构件力学性能的影响。

从上述研究可见,目前 FRP 筋混凝土构件抗震性能的研究主要集中在混凝土柱方面,对梁、板等构件的抗震性能研究不多,同时,也缺乏对 FRP 筋结构体系整体抗震性能的研究,需要通过更加深入的研究来形成一套完整的抗震设计体系。

4 热点与展望

专门针对纯混凝土桥的研究正在逐年减少,大多桥梁工程方向的文献都趋于交叉学科研究。关于混凝土桥方向的未来发展,可从以下几个方面开展工作:

1)混凝土桥领域相关基础理论和方法的继续完善与拓展研究,如:抗剪及抗裂理论研究、适用于 OPC 和 HPC 的基于性能的试验方法研究、长期侵蚀环境下混凝土性能劣化非加速试验方法设计研究(目前很多加速试验存在结论不准确的问题)、混凝土桥梁可靠性评估及寿命预测研究、极端环境下混凝土桥的运营性能及性能劣化研究等。

2)高性能混凝土桥梁研究,如:全 UHPC 桥梁(例:美国的爱荷华州的马斯希尔桥,英文:Mars Hill Bridge)、含高韧性构件的桥梁、以纤维复合混凝土为基材的桥梁、完全无钢筋的复合材料增强混凝土桥梁等。

3)新型混凝土材料及其桥梁研究,如:太空混凝土及其桥梁研究(为月球、火星空间站建设提前做准备)、智能混凝土及其桥梁研究(裂缝自修复混凝土桥等)、水下混凝土及其桥梁研究(海洋内部漂浮景观桥梁等)。

4)混凝土桥发展新理念研究,如:混凝土桥+智能设备研究(混凝土桥+智能张拉设备、混凝土桥+智能检测设备等)、混凝土桥+5G 理念研究(混凝土桥+大数据、混凝土桥+云平台等)、生态混凝土桥理念研究(混凝土桥梁+环境学+生态学交叉学科研究)等。

5)混凝土桥的仿真分析研究,如:基于整体及局部的精细化分析模型研究、混凝土桥分析软件集成开发研究、BIM 在混凝土桥梁中的应用研究等。

6)废旧混凝土桥预后研究,如:废旧混凝土桥的爆破及非爆破拆除方法研究(环境污染、噪声阻断及周边振动抑制等)、废旧混凝土桥的材料和构件回收及其再利用研究(筋材回收、降级使用及制作景观饰品)。

7)新型混凝土材料对多种极端环境耦合作用下的适应性研究及材料与结构协同全寿命期设计理论和方法研究。

8)新材料与结构结合方面的研究,如超高弹性和韧性的混凝土新型材料在无缝混凝土桥方面的应用,解决伸缩缝破坏及行车过程中的跳车问题。

9)绿色混凝土将围绕节约资源、降低排放和智能化等方面开展研究。如,激发具有潜在活性的无机固废物的活性,开发碱激发混凝土;研究再生骨料混凝土力学性能的改善和提高循环利用率;开发性能自感知、自调节及自修复等智能性混凝土。

10)鉴于纤维的性能和价格差异较大,目前多倾向于多种纤维混合使用的方式,以综合优化混凝土的多方面性能。自密实混凝土在钢筋密集、振捣困难以及不需要振捣的工程结构中都可取得较好的技术和经济效果。今后如何量化和保证自密实混凝土的性能将仍然是自密实混凝土研究的重点。

参考文献:

- [1] 高宗余,阮怀圣,秦顺全,等. 中国海洋桥梁工程技术发展现状、挑战及对策研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 1-4.
GAO Z Y, RUAN H S, QIN S Q, et al. Technical status, challenges, and solutions of Marine bridge engineering [J]. Engineering Science, 2019, 21(3): 1-4. (in Chinese)
- [2] 罗倩. 公路桥梁混凝土结构耐久性研究现状[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(8): 139-142.
LUO Q. Research status of durability of highway bridge concrete structure [J]. Highway transportation technology (Application Technology Edition), 2019, 15(8): 139-142. (in Chinese)
- [3] HOOTON R D. Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 124: 105827.
- [4] SOTIRIS D, VAGELIS G. P. Durability design process of reinforced concrete structures - Service life estimation, problems and perspectives [J]. Journal of Building Engineering, 2019, 26: 100876.
- [5] LI K F, ZHANG D D, LI Q W, et al. Durability for concrete structures in marine environments of HZM project: Design, assessment and beyond [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 115: 545-558.
- [6] 连新奇. 面向结构部位的铁路混凝土结构耐久性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(6): 1454-1458.
LIAN X Q. Study on the durability of different members of railway concrete structures [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(6): 1454-1458. (in Chinese)
- [7] 阙磊,李健. 跨海大桥混凝土结构耐久性设计措施分析[J]. 建材发展导向, 2019, 17(24): 68-70.
QUE L, LI J. Analysis of durability design measures for concrete structure of cross sea bridge [J]. Development Guide to Building Materials, 2019, 17(24): 68-70. (in Chinese)
- [8] 郭晓光,郑鹏,黄成. 基于可拓理论的混凝土梁式桥耐久性预测[J]. 河南城建学院学报, 2019, 28(2): 7-15.
WU X G, ZHENG P, HUANG C. Durability prediction of concrete beam bridge based on extension theory [J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2019, 28(2): 7-15. (in Chinese)
- [9] 黄腾腾,徐祖恩,张大伟,等. 基于模糊理论的混凝土梁桥耐久性综合评估[J]. 公路, 2019, 64(3): 141-145.
HUANG T T, XU E Z, ZHANG D W, et al. Comprehensive evaluation of durability of concrete beam bridge based on fuzzy theory [J]. Highway, 2019, 64(3): 141-145. (in Chinese)
- [10] 黄海新,孙文豪,李环宇,等. 基于微分等价递归算法的桥梁体系耐久性可靠度动态评估[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(6): 80-88.
HUANG H X, SUN W H, LI H Y, et al. Dynamic evaluation on durability reliability of bridge system based on differential equivalent recursive algorithm [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(6): 80-88. (in Chinese)
- [11] YI Y, ZHU D J, GUO S C, et al. A review on the deterioration and approaches to enhance the durability of concrete in the marine environment [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 113: 103695.
- [12] UMAR M, FATHIMA N, HAJI SHEIK MOHAMMED M S, et al. Modified cement composites for protection against microbial induced concrete corrosion of marine structures [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019, 20: 101192.
- [13] 吴智深,刘加平,邹德辉,等. 海洋桥梁工程轻质、高强、耐久性结构材料现状及发展趋势研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 31-40.
WU Z S, LIU J P, ZOU D H, et al. Status quo and development trend of light-weight, high-strength, and durable structural Materials Applied in marine bridge engineering [J]. Engineering Science, 2019, 21(3): 31-40. (in Chinese)
- [14] JANOTKA I, BAČUVČÍK M, PAULÍK P. Low carbonation of concrete found on 100-year-old bridges [J]. Case Studies in Construction Materials, 2018, 8: 97-115.
- [15] 李亚东,王崇交. 中外桥梁长寿命化研究进展及其思

- 考[J]. 桥梁建设, 2019, 49(2): 17-23.
- LI Y D, WANG C J. Research advances in long-life of worldwide bridges and corresponding reflections [J]. Bridge Construction, 2019, 49(2): 17-23. (in Chinese)
- [16] AKHNOUKH A K. Accelerated bridge construction projects using high performance concrete [J]. Case Studies in Construction Materials, 2020, 12: e00313
- [17] ALEXANDER M, BEUSHAUSEN H. Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures - review and critique [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 122: 17-29.
- [18] SAJEDI S, HUANG Q D. Reliability-based life-cycle-cost comparison of different corrosion management strategies [J]. Engineering Structures, 2019, 186: 52-63.
- [19] 陈开利. 日本桥梁长寿命研究新进展[J]. 世界桥梁, 2019, 47(2): 50-54.
- CHEN K L. New progress in research on long life of bridges in Japan [J]. World Bridges, 2019, 47 (2): 50-54. (in Chinese)
- [20] 张劲泉, 李鹏飞, 董振华, 等. 服役公路桥梁可靠性评估的若干问题探究[J]. 土木工程学报, 2019, 52 (Sup1): 159-173.
- ZHANG J Q, LI P F, DONG Z H, et al. Study on some reliability evaluation problems of existing highway bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52 (Sup1): 159-173. (in Chinese)
- [21] 王京京. 粉煤灰钢筋混凝土梁全寿命可持续设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- WANG J J. Integrated life cycle design of fly ash reinforced concrete beam based on sustainability [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [22] NAVARRO I J, YEPES V, MARTÍ J V, et al. Life cycle impact assessment of corrosion preventive designs applied to prestressed concrete bridge decks [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 196: 698-713.
- [23] 郑鹏. 基于可拓理论的混凝土梁桥耐久性评估和预测研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- ZHENG P. Research on durability evaluation and prediction of concrete beam bridge based on extension theory [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [24] 李双营, 赵建昌. 盐湖地区 RC 桥梁结构时变车桥耦合振动寿命预测研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(12): 9-16.
- LI S Y, ZHAO J C. A study on the life prediction of time-varying vehicle-bridge coupling vibration of reinforced concrete (RC) bridge structures in salt lake area [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38 (12): 9-16. (in Chinese)
- [25] 王少鹏. 公路桥梁混凝土材料的工程使用年限研究[D]. 北京: 交通运输部公路科学研究所, 2019.
- WANG S P. Research on engineering service life of concrete material for highway bridge [D]. Beijing: Research Institute of Highway M. O. T, 2019. (in Chinese)
- [26] 马婧, 周应新, 汪永林, 等. 多灾害桥梁设计研究与发展[J]. 建筑结构, 2018, 48(Sup2): 948-952.
- MA J, ZHOU Y X, WANG Y L, et al. A summary review of study on multiple-hazard design for bridges [J]. Building Structure, 2018, 48(Sup2): 948-952. (in Chinese)
- [27] RAMANATHAN K, PADGETT J E, DESROCHES R. Temporal evolution of seismic fragility curves for concrete box-girder bridges in California [J]. Engineering Structures, 2015, 97: 29-46.
- [28] KAMESHWAR S, PADGETT J E. Multi-hazard risk assessment of highway bridges subjected to earthquake and hurricane hazards [J]. Engineering Structures, 2014, 78: 154-166.
- [29] ESLAMI A, GOLAFZANI S H, CHENARI R J. Assessment of babolsar concrete pedestrian bridge failure for 1964 flood event and retrofitting practice [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 68: 101-112.
- [30] 任明杰. 洪水波流耦合荷载作用下桥梁破坏机理研究[D]. 辽宁 大连: 大连理工大学, 2019.
- REN M J. Study on bridge failure mechanism under flood wave-current coupled stress [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology. (in Chinese)
- [31] 梅恒. 全寿命周期桥梁多灾害概率风险研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- MEI H. Probability analysis of mutiple hazard action on bridges in life-span service period [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [32] 陈希虎. 都汶公路泥石流灾害桥梁易损性评价-以映秀至彻底关段为例[D]. 湖南 湘潭: 湘潭大学, 2019.
- CHEN X H. Bridge vulnerability assessment of debris flow disaster on Duwen Highway [D]. Xiangtan, Hunan: Xiangtan University, 2019. (in Chinese)
- [33] BENEBERU E, YAZDANI N. Residual strength of CFRP strengthened prestressed concrete bridge girders

- after hydrocarbon fire exposure [J]. *Engineering Structures*, 2019, 184: 1-14.
- [34] LIU X Z, YU C X, QUAN W, et al. Inspection, materials testing and field testing of a prestressed concrete box bridge after fire exposure [J]. *Fire Safety Journal*, 2019, 108: 102852.
- [35] AHMAD S, RASUL M, ADEKUNLE S K, et al. Mechanical properties of steel fiber-reinforced UHPC mixtures exposed to elevated temperature: Effects of exposure duration and fiber content [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 168: 291-301.
- [36] SHIRAVAND M R, PARVANEHRO P. Numerical study on damage mechanism of post-tensioned concrete box bridges under close-in deck explosion [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2017, 81: 103-116.
- [37] PAN J, FANG H, XU M C, et al. Study on the performance of energy absorption structure of bridge piers against vehicle collision [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 130: 85-100.
- [38] 邵旭东, 邱明红. 基于 UHPC 材料的高性能装配式桥梁结构研发[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(2): 160-167.
SHAO X D, QIU M H. Research of high performance fabricated bridge structures based on UHPC [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Nature Science Edition)*, 2019, 51(2): 160-167. (in Chinese)
- [39] 蒋蕾. 高性能混凝土在桥梁工程施工中的应用分析[J]. *建材与装饰*, 2019(29): 250-251.
- [40] HE S F, DENG Z C. Seismic behavior of ultra-high performance concrete short columns confined with high-strength reinforcement [J]. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(12): 5183-5193.
- [41] 邵旭东, 郭程, 曹君辉. 钢-STC 轻型组合桥面螺栓连接接头区域设计[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(1): 57-66.
SHAO X D, GUO C, CAO J H. Design of bolted joint region for steel-STC lightweight composite bridge deck [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(1): 57-66. (in Chinese)
- [42] ZHAN J, SHAO X D, QU W T, et al. Multiparameter fatigue analysis of a steel-super-toughness-concrete lightweight composite bridge deck [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 2019, 13(1): 50-59.
- [43] HARILAL M, RATHISH V R, ANANDKUMAR B, et al. High performance green concrete (HPGC) with improved strength and chloride ion penetration resistance by synergistic action of fly ash, nanoparticles and corrosion inhibitor [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 198: 299-312.
- [44] 朱雪峰. 养护方式对再生混凝土力学性能影响试验研究[J]. *公路*, 2019, 64(3): 241-245.
ZHU X F. Experimental study on the effect of curing methods on the mechanical properties of recycled concrete [J]. *Highway*, 2019, 63(3): 241-245. (in Chinese)
- [45] 于巾茹, 黄巍林, 张鹏. 生态再生混凝土抗硫酸盐侵蚀性能研究[J]. *混凝土*, 2019(6): 23-26.
YU J R, HUANG W L, ZHANG P. Study on the resistance to sulphate erosion of recycled concrete [J]. *Concrete*, 2019(6): 23-26. (in Chinese)
- [46] ZHAO R D, YUAN Y, CHENG Z Q, et al. Freeze-thaw resistance of Class F fly ash-based geopolymer concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 222: 474-483.
- [47] 赵人达, 成正清, 文甜, 等. 早龄期低钙粉煤灰基地聚物混凝土拉伸徐变特性[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(6): 111-117.
ZHAO R D, CHENG Z Q, WEN T, et al. Tensile creep characteristics of early-age low-calcium fly ash-based geopolymer concrete [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(6): 111-117. (in Chinese)
- [48] KHAN I, XU T F, CASTEL A, et al. Early-age tensile creep and shrinkage-induced cracking in internally restrained concrete members [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2019, 71(22): 1167-1179.
- [49] KHAN I, XU T F, KHAN M S H, et al. Effect of various supplementary cementitious materials on early-age concrete cracking [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(4): 04020049.
- [50] KHAN I, XU T F, CASTEL A, et al. Risk of early age cracking in geopolymer concrete due to restrained shrinkage [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 116840.
- [51] NGUYEN Q D, KHAN M S H, XU T F, et al. Mitigating the risk of early age cracking in fly ash blended cement-based concrete using ferronickel slag sand [J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2019, 17(6): 295-308.
- [52] 王志杰, 徐海岩, 李志业, 等. 钢纤维混凝土裂缝宽度影响系数试验探究[J]. *铁道工程学报*, 2019, 36(7):

- 81-86.
- WANG Z J, XU H Y, LI Z Y, et al. Experimental research on the influence factor of crack width of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(7): 81-86. (in Chinese)
- [53] 杨娟, 朋改非, 税国双. 再生钢纤维增韧超高性能混凝土的力学性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1949-1956.
- YANG J, PENG G F, SHUI G S. Mechanical properties of recycled steel fiber reinforced ultra-high-performance concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1949-1956. (in Chinese)
- [54] 蒋威, 姜景山, 滕长龙, 等. 混杂纤维混凝土的研究现状[J]. 建材发展导向, 2019, 17(20): 13-16.
- JIANG W, JIANG J S, TENG C L, et al. Research status of hybrid fiber concrete [J]. Development Guide to Building Materials, 2019, 17(20): 13-16. (in Chinese)
- [55] 罗洪林, 杨鼎宜, 周兴宇, 等. 不同长径比聚丙烯纤维增强混凝土的力学特性[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1935-1948.
- LUO H L, YANG D Y, ZHOU X Y, et al. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete with different aspect ratios [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1935-1948. (in Chinese)
- [56] 王磊, 王超. 聚丙烯纤维快硬混凝土抗渗性能研究[J]. 混凝土, 2019(5): 153-156.
- WANG L, WANG C. Study on impermeability of polypropylene fiber fast-hardening concrete [J]. Concrete, 2019(5): 153-156. (in Chinese)
- [57] 崔光耀, 王李斌, 王明年, 等. 隧道纤维混凝土衬砌抗错断性能模型试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(13): 50-56, 80.
- CUI G Y, WANG L B, WANG M N, et al. Model tests for anti-breaking performance of a fiber reinforced concrete tunnel lining [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(13): 50-56, 80. (in Chinese)
- [58] 焦华喆, 韩振宇, 陈新明, 等. 玄武岩纤维对喷射混凝土力学性能及微观结构的影响机制[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1926-1934.
- JIAO H Z, HAN Z Y, CHEN X M, et al. Influence mechanism of basalt fibre on the toughness and microstructure of spray concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1926-1934. (in Chinese)
- [59] 李趁趁, 胡婧, 元成方, 等. 纤维/高强混凝土抗冻性能试验[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1977-1983.
- LI C C, HU J, YUAN C F, et al. Experimental study on the freezing resistance of fiber reinforced high strength concrete [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(8): 1977-1983. (in Chinese)
- [60] 张振雷. 混杂纤维混凝土力学性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2019(6): 43-48.
- ZHANG Z L. Experimental study on mechanical properties of basalt-cellulose hybrid fiber reinforced concrete [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(6): 43-48. (in Chinese)
- [61] 贾毅, 赵人达, 廖平, 等. PP-ECC用于墩底塑性铰区域的抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2019, 32(7): 100-110.
- JIA Y, ZHAO R D, LIAO P, et al. Experimental investigation on seismic behavior of bridge piers with polypropylene-engineered cementitious composite in plastic hinge regions [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(7): 100-110. (in Chinese)
- [62] HOSSEINI F, GENCTURK B, JAIN A, et al. Optimal design of bridge columns constructed with engineered cementitious composites and Cu-Al-Mn superelastic alloys [J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109531.
- [63] KABIR M I, LEE C K, RANA M M, et al. Strength enhancement of high strength steel beams by engineered cementitious composites encasement [J]. Engineering Structures, 2020, 207: 110288.
- [64] 王彦平, 陈昶旭, 张戎令, 等. PVA纤维增强水泥基修补砂浆冲蚀磨损性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(12): 3752-3758.
- WANG Y P, CHEN C X, ZHANG R L, et al. Experimental study on erosion wear properties of PVA fiber reinforced cement matrix mortar [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(12): 3752-3758. (in Chinese)
- [65] 崔涛, 何浩祥, 闫维明, 等. ECC与既有混凝土结合面抗剪性能试验及力学性能分析[J/OL]. 建筑材料学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20190827.0912.004.html>.
- CUI T, HE H Y, YAN W M, et al. Experimental research on shear resistance of ECC-existed concrete interface [J/OL]. Journal of Building Materials, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.TU.20190827.0912.004.html>. (in Chinese)
- [66] 任亮, 方葦, 王凯, 等. 超高性能混凝土与水泥基材料界面粘结性研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2087-2094.
- REN L, FANG X, WANG K, et al. Research

- progress on interface bond behavior between ultra high performance concrete and cement-based materials [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 2087-2094. (in Chinese)
- [67] AGWA I S, OMAR O M, TAYEH B A, et al. Effects of using rice straw and cotton stalk ashes on the properties of lightweight self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2020, 235: 117541.
- [68] 张永军, 楼映珠, 杨晓华, 等. 掺污水处理厂污泥对硬化自密实混凝土性能的影响及机理[J]. 四川建筑科学研究, 2019, 45(6): 69-73.
ZHANG Y J, LOU Y Z, YANG X H, et al. Influences and mechanisms of sludge from sewage treatment plant on properties of hardened self-compacting concrete [J]. Sichuan Building Science, 2019, 45(6): 69-73. (in Chinese)
- [69] EL MIR A, NEHME S G, ASSAAD J J. Durability of self-consolidating concrete containing natural waste perlite powders [J]. Heliyon, 2020, 6(1): e03165.
- [70] SASANIPOUR H, ASLANI F. Durability properties evaluation of self-compacting concrete prepared with waste fine and coarse recycled concrete aggregates [J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 117540.
- [71] 张立群, 穆柏林, 孙婧, 等. 冻融和碳化共同作用下硅灰自密实混凝土耐久性试验研究[J]. 混凝土, 2019(11): 90-93.
ZHANG L Q, MU B L, SUN J, et al. Experimental study on durability of silica fume self-compacting concrete under joint action of freeze-thawing and carbonization [J]. Concrete, 2019(11): 90-93. (in Chinese)
- [72] HOSSAIN K M A, HOSSAIN M A, MANZUR T. Structural performance of fiber reinforced lightweight self-compacting concrete beams subjected to accelerated corrosion [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 30: 101291.
- [73] HOSSAIN K M A, HASIB S, MANZUR T. Shear behavior of novel hybrid composite beams made of self-consolidating concrete and engineered cementitious composites [J]. Engineering Structures, 2020, 202: 109856.
- [74] 彭慧, 张金龙, 刘冰, 等. 混凝土的微生物自修复技术研究进展[J]. 混凝土, 2014(8): 38-42, 48.
PENG H, ZHANG J L, LIU B, et al. Development of microbial self-healing technique in concrete [J]. Concrete, 2014(8): 38-42, 48. (in Chinese)
- [75] 杨振杰, 齐斌, 刘阿妮, 等. 水泥基材料微裂缝自修复机理研究进展[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 124-128.
- YANG Z J, QI B, LIU A, et al. Research on mechanisms of crack self-healing in cement matrix [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3): 124-128. (in Chinese)
- [76] 欧进萍, 匡亚川. 内置胶囊混凝土的裂缝自愈行为分析和试验[J]. 固体力学学报, 2004, 25(3): 320-324.
OU J P, KUANG Y C. Experiments and analysis of concrete material with crack self-repairing performance using embedded capsules filled with adhesive [J]. Acta Mechica Solida Sinica, 2004, 25(3): 320-324. (in Chinese)
- [77] SIDIQ A, GRAVINA R, GIUSTOZZI F. Is concrete healing really efficient? A review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 205: 257-273.
- [78] KIM H G, QUDOOS A, RYOU J S. Self-healing performance of GGBFS based cementitious mortar with granulated activators exposed to a seawater environment [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 569-582.
- [79] QIU J S, AW-YONG W L, YANG E H. Effect of self-healing on fatigue of engineered cementitious composites (ECCs) [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 94: 145-152.
- [80] SOUZA L, AL-TABBAA A. Microfluidic fabrication of microcapsules tailored for self-healing in cementitious materials [J]. Construction and Building Materials, 2018, 184: 713-722.
- [81] AL-TABBAA A, LITINA C, GIANNAROS P, et al. First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 208: 669-685.
- [82] ZHANG J C, WANG J L, DONG S F, et al. A review of the current progress and application of 3D printed concrete [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 125: 105533.
- [83] SALET T A M, AHMED Z Y, BOS F P, et al. Design of a 3D printed concrete bridge by testing [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2018, 13(3): 222-236.
- [84] HAMBACH M, VOLKMER D. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste [J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 79: 62-70.
- [85] SOLTAN D G, LI V C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing [J]. Cement and Concrete Composites, 2018, 90: 1-13.

- [86] MA G W, WANG L. A critical review of preparation design and workability measurement of concrete material for largescale 3D printing [J]. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2018, 12 (3): 382-400.
- [87] BUSWELL R A, LEAL DE SILVA W R, JONES S Z, et al. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 112: 37-49.
- [88] TAY Y W D, TING G H A, QIAN Y, et al. Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete [J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2019, 14 (1): 104-113.
- [89] ALI K, XIAO Y, RYAN M, et al. Construction-scale 3D printing: Shape stability of fresh printing concrete [C]// *Asme International Manufacturing Science & Engineering Conference*, 2017.
- [90] MA G W, LI Z J, WANG L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 162: 613-627.
- [91] WOLFS R J M, BOS F P, SALET T A M. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 106: 103-116.
- [92] XIA M, SANJAYAN J. Method of formulating geopolymers for 3D printing for construction applications [J]. *Materials & Design*, 2016, 110: 382-390.
- [93] PANDA B, TAN M J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymers for 3D concrete printing [J]. *Ceramics International*, 2018, 44(9): 10258-10265.
- [94] 黄华, 郝润奇, 黄敏. FRP 筋混凝土结构的研究现状分析[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2018(7): 108-116.
HUANG H, HAO R Q, HUANG M. Research status analysis of FRP reinforced concrete structures [J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2018(7): 108-116. (in Chinese)
- [95] 张秀丽, 邓宗才. 长期碱环境下 GFRP 筋抗压性能的尺寸效应[J]. *中国科技论文*, 2019, 14(4): 435-440.
ZHANG X L, DENG Z C. Size effect on the long-term compressive performance of the GFRP bars in alkaline environment [J]. *China Sciencepaper*, 2019, 14(4): 435-440. (in Chinese)
- [96] 齐俊伟. 盐碱环境下 GFRP 筋及其混凝土构件的耐久性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
QI J W. Study on durability of GFRP bars and GFRP reinforced concrete members under salt and alkaline environment [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [97] 陈爽. 湿热海洋环境下 FRP 筋-珊瑚混凝土粘结滑移性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019.
CHEN S. Study on bond property between FRP bars and coral concrete under marine environment [D]. Nanning: Guangxi University, 2019. (in Chinese)
- [98] 史健喆. 海洋环境下 BFRP 筋体外预应力加固钢筋混凝土梁长期性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
SHI J Z. Long-term behaviors of RC beam prestressed with external BFRP tendons in marine environment [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [99] 薛伟辰, 刘亚男, 付凯, 等. 碱和海水环境下 GFRP 筋的抗拉性能加速老化试验研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(1): 38-42.
XUE W C, LIU Y N, FU K, et al. Experimental research on accelerated ageing of tensile properties of GFRP bars in alkaline and seawater environment [J]. *North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2015, 36 (1): 38-42. (in Chinese)
- [100] 李光辉. 高温后 FRP 筋混凝土梁静力与疲劳受弯性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
LI G H. Flexural behavior of fiber reinforced polymer (FRP) bars reinforced concrete beams under static and fatigue loads after elevated temperature exposure [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019. (in Chinese)
- [101] 李扬, 黄中华, 沈子豪, 等. 低温下纤维增强塑料筋混凝土粘结性能试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(8): 256-261.
LI Y, HUANG Z H, SHEN Z H, et al. Experimental investigation on bond behavior of fiber reinforced plastic reinforced concrete at low temperatures [J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, 19(8): 256-261. (in Chinese)
- [102] 徐惟雄. 低温环境 FRP 筋与混凝土粘结性能研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2018.
XU W X. Study on bonding performance between FRP and concrete at low temperature [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [103] 高建雄. 纤维增强复合材料剩余强度模型及寿命预测方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
GAO J X. Research on residual strength model and life prediction method of fiber reinforced polymer [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [104] 赵杏. FRP 拉索疲劳损伤演化规律和寿命可控设计方

- 法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- ZHAO X. Study on fatigue damage evolution and life controllable design method of FRP cables [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [105] LIU T Q, LIU X, FENG P. A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191: 107958.
- [106] 曾宪桃, 任振华, 鄢熒. 求取内嵌 FRP 加固混凝土梁界面滑移量的一种新方法[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(4): 13-21.
- ZENG X T, REN Z H, YAN Q. A new innovation of research on the interface slip of concrete beam strengthened with near-surface mounted fiber reinforced plastics bars [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(4): 13-21. (in Chinese)
- [107] 司豆豆, 张普, 孙新茂, 等. GFRP 筋与超高韧性水泥基复合材料黏结性能试验研究[J]. *混凝土*, 2019 (8): 108-111.
- SID D, ZHANG P, SUN X M, et al. Experimental study on bond properties between GFRP bar and ECC [J]. *Concrete*, 2019(8): 108-111. (in Chinese)
- [108] 高丹盈, 房栋, 谷泓学. GFRP-钢绞线复合筋与混凝土黏结机理及强度计算模型[J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(4): 130-139.
- GAO D Y, FANG D, GU H X. Bonding mechanism and strength calculation model of GFRP-steel composite rebars embedded in concrete [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39 (4): 130-139. (in Chinese)
- [109] 宋金华, 杨涛, 倪东绪. FRP 带肋筋粘结性能试验研究[J]. *河北工业大学学报*, 2018, 47 (1): 90-94, 102.
- SONG J H, YANG T, NI D X. Experimental study on bond behavior of FRP ribbed bars [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2018, 47(1): 90-94, 102. (in Chinese)
- [110] 陈升平, 马小霞, 罗寒寒, 等. FRP 筋钢纤维混凝土梁抗剪性能试验研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2019, 45(4): 60-64.
- CHEN S P, MA X X, LUO H H, et al. Experimental study on shear behavior of steel fiber reinforced concrete beams reinforced with FRP bars [J]. *Sichuan Building Science*, 2019, 45(4): 60-64. (in Chinese)
- [111] 李根喜, 许星, 王立帅, 等. GFRP 纵筋-玄武岩纤维混凝土梁受剪性能试验研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2019, 45(3): 22-26.
- LI G X, XU X, WANG L S, et al. Experimental study on shear performance of basalt fiber reinforced concrete beams with GFRP longitudinal reinforcement [J]. *Sichuan Building Science*, 2019, 45(3): 22-26. (in Chinese)
- [112] 韩定杰, 刘华新, 彭长岭, 等. 正交法分析无腹筋 FRP 筋混凝土梁抗剪强度[J]. *混凝土*, 2018(7): 42-45.
- HAN D J, LIU H X, PENG C L, et al. Shear strength of FRP reinforced concrete beams without stirrups based on orthogonal experiment method [J]. *Concrete*, 2018(7): 42-45. (in Chinese)
- [113] 孙艺嘉, 吴涛, 王征, 等. FRP 筋混凝土梁正截面受弯承载力模型分析[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(1): 83-90.
- SUN Y J, WU T, WANG Z, et al. Analysis on the flexural capacity model of FRP-reinforced concrete beams [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 51 (1): 83-90. (in Chinese)
- [114] 陈升平, 马小霞, 卢应发, 等. FRP 筋钢纤维混凝土梁延性性能研究[J]. *混凝土与水泥制品*, 2019(5): 59-63.
- CHEN S P, MA X X, LU Y F, et al. Research on ductility of steel fiber concrete beams reinforced with FRP bars [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2019(5): 59-63. (in Chinese)
- [115] 彭飞, 薛伟辰. 基于可靠度的 GFRP 筋混凝土梁抗弯承载力设计方法[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(5): 60-67.
- PENG FEI XUE WEICHEN. Reliability-based design method for ultimate load-bearing capacity of GFRP reinforced concrete beams under flexure [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(5): 60-67. (in Chinese)
- [116] 王菊蕊, 周立群. FRP 筋钢纤维高强混凝土梁抗弯性能及在 T 型梁桥施工中的应用研究[J]. *公路工程*, 2019, 44(5): 130-134.
- WANG J R, ZHOU L Q. Bending behavior of FRP reinforced steel fiber high strength concrete beam and its application in construction of T-beam bridge [J]. *Highway Engineering*, 2019, 44 (5): 130-134. (in Chinese)
- [117] 周玲珠, 郑愚, 罗远彬, 等. 基于时间反演法的纤维增强复材/钢筋增强混凝土梁损伤监测研究[J]. *工业建筑*, 2019, 49(9): 196-201.
- ZHOU L Z, ZHENG Y, LUO Y B. Investigation of the damage monitoring of FRP/steel reinforced concrete beam based on time reversal method [J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(9): 196-201. (in Chinese)

- [118] YUAN F, WU Y F. Analytical method for derivation of stress block parameters for flexural design of FRP reinforced concrete members [J]. Composite Structures, 2019, 229: 111459.
- [119] SIWOWSKI T, RAJCHEL M, KULPA M. Design and field evaluation of a hybrid FRP composite - Lightweight concrete road bridge [J]. Composite Structures, 2019, 230: 111504.
- [120] 陈佳醒, 方志, 蒋正文. 纤维增强复材筋活性粉末混凝土单向板受弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 70-74, 39.
CHEN J X, FANG Z, JIANG Z W. Experimental research on the flexural performance of RPC one-way slab reinforced with FRP [J]. Industrial Construction, 2019, 49(9): 70-74, 39. (in Chinese)
- [121] 张黎飞, 郑愚, 吴镇铎, 等. 纤维增强复材筋增强纤维水泥基复材桥面连接板工作性能研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 82-89.
ZHANG L F, ZHENG Y, WU Z D. Investigation of working performance of FRP reinforced ECC link slab [J]. Industrial Construction, 2019, 49(9): 82-89. (in Chinese)
- [122] 王国强, 孙理想. GFRP 筋混凝土板正截面抗弯承载力研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(7): 29-34.
WANG G Q, SUN L X. Research on the flexural behavior of concrete slabs with hybrid reinforcement of gfrp bars [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(7): 29-34. (in Chinese)
- [123] 邓宗才, 高伟男. 玻璃纤维筋与钢筋混杂配筋柱正截面承载力[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(9): 1622-1628.
DENG Z C, GAO W N. Cross-sectional bearing capacity of column with hybrid reinforcement of glass fiber-reinforced polymer bars and steel bars [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(9): 1622-1628. (in Chinese)
- [124] 彭飞, 薛伟辰. FRP 筋混凝土偏压柱承载力计算方法[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(10): 147-155.
PENG F, XUE W C. Calculation approach of ultimate capacity of FRP reinforced concrete columns under eccentric compression [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(10): 147-155. (in Chinese)
- [125] 史健喆, 汪昕, 吴智深. 采用同源材料夹片锚具的玄武岩纤维复材筋体外预应力加固混凝土梁受弯性能研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(9): 156-160.
SHI J Z, WANG X, WU Z S. Flexural behavior of RC beams prestressed with external basalt fiber-reinforced polymer tendons using a composite-wedge anchorage [J]. Industrial Construction, 2019, 49(9): 156-160. (in Chinese)
- [126] 程君. 体外预应力 CFRP 筋混凝土连续梁疲劳性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
CHENG J. Study on the fatigue behavior of reinforced concrete continuous beams prestressed with external CFRP tendons [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [127] CARTER J, GENIKOMSOU A S. Investigation on modeling parameters of concrete beams reinforced with basalt FRP bars [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13(6): 1520-1530.
- [128] ZHOU Y Z, LIU S F, FENG J, et al. Improved finite difference analysis of dynamic responses of concrete members reinforced with FRP bars under explosion [J]. Composite Structures, 2019, 230: 111518.
- [129] 江世永, 陶帅, 飞渭, 等. 碳纤维布加固震损 CFRP 筋高韧性纤维混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(6): 109-124.
JIANG S Y, TAO S, FEI W, et al. Experimental study on seismic performance of damaged engineered cementitious composite columns reinforced with CFRP bars and strengthened by CFRP sheets [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(6): 109-124. (in Chinese)
- [130] 邓宗才, 高磊, 王献云. 配置 GFRP 筋的混凝土矩形截面柱抗震试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(5): 1065-1076.
DENG Z C, GAO L, WANG X Y. Experiments on seismic behavior of rectangular glass fiber-reinforced polymer-reinforced concrete columns [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(5): 1065-1076. (in Chinese)
- [131] JIA D G, MAO J Z, GUO Q Y, et al. A flexure-capacity design method and seismic fragility assessment of FRP/steel double-reinforced bridge piers [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020, 16(9): 1311-1325.
- [132] CAI Z K, WANG Z Y, YANG T Y. Cyclic load tests on precast segmental bridge columns with both steel and basalt FRP reinforcement [J]. Journal of Composites for Construction, 2019, 23(3): 04019014.

(编辑 王秀玲)