

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.02.012

高性能水泥基复合材料梁疲劳性能的研究进展

于跟社¹, 邓宗才², 王珏³, 王亚楠³

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124;
3. 中交第三公路工程局有限公司, 北京 101304)

摘要: 具有应变硬化和多裂缝扩展特性的水泥基复合材料, 适用于承受疲劳和冲击等动载的工程领域, 有利于提高结构的基本力学性能、疲劳寿命和耐久性。高性能混凝土、高性能水泥基复合材料是建设长寿命桥梁结构的理想材料。为了合理使用高性能水泥基复合材料等新型材料, 对高性能水泥基复合材料在桥梁工程和吊车梁中的应用状况、基本力学性能、疲劳特性试验研究和疲劳寿命预测模型等进行了梳理, 重点关注了高性能混凝土、高性能水泥基复合材料组份及配合比设计、高性能水泥基复合材料在桥梁工程中的应用现状、混杂纤维高性能水泥基复合材料受弯构件的基本力学性能和疲劳破坏特征、高性能水泥基复合材料的疲劳破坏机制、疲劳寿命预测模型和疲劳设计方法等国际前沿问题的最新研究进展, 分析了当前研究中存在的问题, 展望了今后拟关注的研究重点。结果表明: 今后拟开展的研究工作包括, 需要在大量试验研究和理论分析的基础上, 明确水泥基复合材料的疲劳损伤机理, 建立具有物理基础的疲劳损伤演化模型, 提出基于疲劳损伤本构模型的寿命预测方法, 以丰富和发展仅仅基于试验的统计意义上的疲劳方程式和疲劳设计方法, 为工程应用提供理论支持。

关键词: 桥梁工程; 疲劳; 综述; 水泥基复合材料; 纤维; 疲劳损伤; 疲劳寿命预测

中图分类号: TU528

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 02-0089-12

Study Progress of Fatigue Behavior of High Performance Cement-based Composite Beam

YU Gen-she¹, DENG Zong-cai², WANG Jue³, WANG Ya-nan³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;
2. School of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
3. CCCC Third Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 101304, China)

Abstract: The cement-based composite materials with strain hardening and multi-crack propagation characteristics are suitable for the engineering field of bearing dynamic loads such as fatigue and impact, which is beneficial to improve the basic mechanical properties, fatigue life and durability of structures. High-performance concrete and high-performance cement-based composites are ideal materials for long-life bridge construction. In order to use high-performance cement-based composites and other new materials reasonably, the application in bridge engineering and crane beam, the basic mechanical properties, the fatigue test study and the fatigue life prediction model of high performance cement-based composites are reviewed, focused on the latest study progress of advanced international issues such as high-performance concrete, composition and mix design of high-performance cement-based composites, application status of high-performance cement-based composites in bridge engineering, basic mechanical properties and fatigue failure characteristics of hybrid fiber high-performance cement-based composites in bending members, fatigue failure mechanism,

收稿日期: 2021-01-04

基金项目: 北京市教委科技重点项目 (KZ201810005008)

作者简介: 于跟社 (1971-), 男, 陕西富平人, 硕士, 教授级高级工程师. (Yuer19213@163.com)

fatigue life prediction model and fatigue design method of high-performance cement-based composites, etc. The existing problems in the current study are analyzed, and the future study focus is prospected. The result shows that the studies to be carried out in the future includes: on the basis of a large number of experimental research and theoretical analysis, clarify the fatigue damage mechanism of cement-based composites, establish the fatigue damage evolution model, and propose the life prediction method based on the fatigue damage constitutive model, so as to enrich and develop the fatigue equation and fatigue design method in the statistical sense based on test, and provide theoretical support for engineering application.

Key words: bridge engineering; fatigue; review; cement-based composite material; fiber; fatigue damage; fatigue life prediction

0 引言

高性能混凝土、高性能水泥基复合材料被广泛应用于公路、铁路、吊车梁、海洋平台等结构物中。在实际工程中,混凝土结构不但受到静载作用,还受到随机车辆、工作吊车及海洋波浪等反复荷载作用。疲劳荷载作用会导致结构材料性能的不断退化,最终在低于静载强度的情况下发生脆性破坏。

由于桥梁、吊车梁等所采用的混凝土材料并非均匀和连续的,存在许多原始缺陷和微细裂纹,因而在疲劳、冲击荷载作用下,这些微缺陷会逐渐累积、发展,并逐步形成宏观裂纹。如果不能有效控制宏观裂纹的扩展,将会导致桥梁发生疲劳损伤和脆性断裂,其后果是灾难性的。许多混凝土桥梁在使用20~30 a后,出现了抗疲劳、抗震等力学性能衰退、安全性降低等问题。因此,疲劳、冲击引起的损伤破坏已经引起人们的重视。

桥梁结构设计不仅要重视其静载特性,还要重视疲劳、冲击等动力特性。由于疲劳破坏的脆性特征,破坏前没有明显预兆。公路桥梁上车辆的超载问题比较突出,这也是引起桥梁损伤的主要原因。超载会使桥梁疲劳应力幅度明显加大,疲劳损伤加剧。超载诱发的混凝土裂缝,在疲劳荷载下不断扩展,疲劳累积损伤加剧,从而危及桥梁的安全性和耐久性。为了提高桥梁、吊车梁等结构的疲劳寿命,采用高性能水泥基复合材料 and 高效预应力技术,有利于改善结构的疲劳特性,延长服役寿命。

桥梁承受变幅疲劳荷载,钢纤维对承受较高应

力幅作用明显,而合成纤维对承受较低应力幅作用显著,即钢纤维和高性能合成纤维在承担不同疲劳应力幅时具有其各自的优势,混杂有利于充分发挥各自的抗疲劳优势,提高结构疲劳寿命。公路桥梁、高速铁路桥梁、跨海桥梁等在运营情况下处于高周应力疲劳状态,人们希望其具有高疲劳寿命。因此,采用新型混杂纤维高性能水泥基复合材料,以显著提高结构疲劳寿命,具有非常重要的工程意义和科学价值。

1 高性能水泥基复合材料在吊车梁、桥梁工程中的应用

高性能水泥基复合材料包括纤维增强超高性能混凝土(Ultra-high-performance Concrete, UHPC)和具有应变硬化特性的纤维增强超高韧性混凝土(Strain Hardening Cementitious Composites, SHCC)等。UHPC不仅具有超高的抗压强度,而且具有良好的耐久性、阻裂能力、韧性和能量吸收能力。本节重点总结UHPC应用于吊车梁、桥梁的现状。UHPC是根据堆积密度理论和纤维增强技术发展起来的一种高性能水泥基复合材料。其采用高效减水剂,降低水灰比,水胶比一般控制在0.2以内;采用硅灰、矿粉等工业副产品,降低水泥用量和收缩值等。UHPC具有良好的施工性能,可采用现浇和预制的方式。下面列举2种超高性能混凝土的配合比,一种是不含粗骨料的超高性能混凝土,列于表1;一种是含粗骨料的超高性能混凝土,典型的配合比列于表2。

表1 超高性能混凝土的配合比

Tab.1 Mix proportion of UHPC

水胶比	砂胶比	胶凝材料用量/kg		石英砂/kg			减水剂/kg	消泡剂/kg	用水量/kg
		水泥	矿物掺合料	10~20目	20~40目	40~80目			
0.18	1.2	520	455	485	388	340	11	12	175.5

UHPC 基体配合比中, 水泥和复合矿物掺合料为胶凝材料, 水泥为 P · O52.5 普通硅酸盐水泥, 复合矿物掺合料主要由硅灰 (比表面积为 $16\ 000\ \text{m}^2/\text{kg}$)、S95 级矿粉 (比表面积为 $450\ \text{m}^2/\text{kg}$) 按一定比例配制而成; 细骨料为不同目数组别的河砂。钢纤维体积率为 1.3%。

表 2 超高性能混凝土组份及配合比 (单位: kg/m^3)

Tab. 2 Composition and mix proportion of UHPC (unit: kg/m^3)

水胶比	胶凝材料		石英砂	粗集料	钢纤维	减水剂
	水泥	掺合料				
0.2	420	280	630	940	118	26.25

承受疲劳荷载的构件或结构包括吊车梁和桥梁等。采用 UHPC 生产吊车梁具有得天独厚的优势, UHPC 吊车梁自重轻、抗疲劳性能优异、耐腐蚀和耐火性优于钢吊车梁。钢吊车梁大部分未达到使用年限就出现早期破坏, 其中 80%~90% 是由疲劳引起的。吊车梁是工业厂房一个非常重要的构件, 其结构性能良好与否, 直接关系到厂房的安全生产。钢吊车梁焊接时, 高温作用会使焊接部位的钢组织性能劣化、材质变脆、韧性降低, 易发生脆性断裂。焊接总是存在缺陷和残余应力, 在疲劳荷载下, 产生新的裂纹, 导致裂缝不断扩展, 一旦裂缝失稳扩展, 钢吊车梁将会发生脆性断裂, 后果很严重。

采用超高性能混凝土制作大跨度工业厂房的吊车梁, 可较好地解决钢吊车梁的疲劳问题, 从而提高吊车梁疲劳寿命, 降低维修费用。

高性能水泥基复合材料是建设长寿命桥梁的理想材料。高性能水泥基复合材料具有高强度、高耐久、高抗裂和自重轻等特征, 是发展高效预应力混凝土桥梁的理想材料, 已引起桥梁界的极大兴趣和高度重视。在桥梁工程中, 采用高性能水泥基复合材料, 可有效提高桥梁的疲劳寿命和抗冲击性能; 可明显降低桥梁自重, 适当增加梁跨径, 使桥梁结构日趋耐久、轻盈美观。

目前, 水泥基复合材料已被应用于主梁结构、拱桥主拱、华夫板桥面结构、桥梁接缝及旧桥加固等诸多方面。据不完全统计, 到 2019 年底为止, 全球已有超过 700 座桥梁采用高性能水泥基复合材料作为主要或部分材料。目前将高性能水泥基复合材料作为主要或部分建筑材料的桥梁主要分布在亚洲、欧洲、北美洲和大洋洲。

截止至 2019 年底, 马来西亚已建成 100 余座高性能水泥基复合材料桥梁。加拿大和美国等北美洲

国家主要将高性能水泥基复合材料应用于桥梁接缝, 有 300 余座桥梁采用高性能水泥基复合材料, 其中 30 余座桥梁采用预制的预应力装配式高性能水泥基复合材料, 将高性能水泥基复合材料应用于桥面板湿接缝等局部构造的约 200 余座, 结果表明高性能水泥基复合材料湿接缝的使用性能良好。

2006 年我国在迁曹铁路工程中修建了第 1 座 UHPC 桥梁, 生产了 12 片跨径为 20 m 的超高性能混凝土 T 型梁, 梁高 1.35 m, 高跨比为 1/14.8。蓟港铁路工程中, 采用 19 孔 UHPC 铁路 T 梁, 其中 14 孔 32 m, 5 孔 24 m。到目前为止, 中国采用的钢-高性能水泥基复合材料轻型组合桥面, 涵盖了梁桥、拱桥、斜拉桥和悬索桥等各类桥型。2011 年我国在肇庆马房大桥桥面维修中首次将含钢纤维的超高性能混凝土与钢箱梁组合形成轻型组合桥面。

2016 年, 长沙建成了一座主跨长 36.8 m、宽 6.5 m 的高性能水泥基复合材料跨街天桥。其上部结构采用预应力高性能水泥基复合材料鱼腹式单箱三室连续箱梁。2017 年 11 月完工的岳阳洞庭湖二桥的正交异性轻型组合桥面, 由 12 mm 厚的钢面板和 45 mm 厚的高性能水泥基复合材料板组成, 湖南大学、清华大学分别对钢-高性能水泥基复合材料组合桥面结构开展了疲劳试验, 高性能水泥基复合材料弯拉及钢-高性能水泥基复合材料结合面均经历了设计应力下千万次的疲劳荷载循环试验, 未出现开裂、滑移等现象, 远超出现行规范中规定的 200 万次疲劳寿命的要求。

2 高性能混凝土和水泥基复合材料疲劳性能研究进展

2.1 高性能混凝土梁疲劳性能

高性能混凝土桥梁的疲劳破坏机制和破坏规律对研究水泥基复合材料疲劳破坏特性具有重要的参考价值。因此有必要梳理高性能混凝土梁的疲劳特性研究成果, 为深入研究水泥基复合材料的疲劳性能提供借鉴。近年来, 国内外学者进行了高性能混凝土梁等幅、变幅疲劳试验, 研究了预应力度、疲劳应力水平、疲劳荷载形式和截面形式等对梁疲劳性能的影响, 主要分析了疲劳荷载下正截面破坏形态、应力状态和裂缝宽度、挠度变化规律等。

文献 [1] 中对仅配置预应力筋的预应力高性能混凝土梁进行了弯曲疲劳试验, 得出梁疲劳破坏均由预应力筋的疲劳脆性断裂引起; 而对于配有非预应力筋的混合配筋预应力混凝土结构, 其破坏始于非预应力筋的疲劳断裂。文献 [2] 中试验研究了后

张预应力高性能混凝土 T 型梁的疲劳性能, 得出试件疲劳破坏都是由非预应力筋屈服引起的, 预应力度介于 0.4~0.6 之间, 试件的疲劳行为和裂缝发展较为理想。文献 [3] 中试验研究了高性能混凝土梁随机变幅和等幅的疲劳特性, 得出当随机试验中荷载幅值的期望与等幅加载试件的加载幅值相等时, 高性能混凝土梁的随机变幅加载疲劳寿命明显小于等幅加载试件; 对于加载幅值大于随机荷载幅值期望的等幅加载试件, 其疲劳寿命会明显小于变幅加载试件。Foo 等^[4]通过对 6 根高性能混凝土梁进行弯曲疲劳试验, 得出疲劳破坏模式有 2 种: 普通筋疲劳断裂和普通筋、预应力筋相继断裂, 2 种疲劳破坏均始于普通钢筋断裂。文献 [5] 中指出, 高性能混凝土的疲劳损伤与加载顺序有关, 当加载顺序由低应力幅向高应力幅变化时损伤较小, 当加载顺序由高应力幅向低应力幅变化时损伤较大。

文献 [6-7] 为探究疲劳荷载下混合配筋高性能混凝土梁内预应力筋与非预应力筋的破坏关系, 对疲劳加载过程中 2 种钢筋应力幅的变化规律进行研究, 结果表明: 2 种不同类型钢筋不同步破坏的主要原因是钢筋与混凝土之间黏结性能的退化和有效预应力的不断降低。文献 [8] 中研究了高性能混凝土梁变幅疲劳性能, 得出疲劳荷载级别的增加会使混凝土应变在短时间内增大, 而后趋于稳定, 且应力水平越高, 混凝土累积疲劳损伤越大。文献 [9] 中对随机幅值荷载作用下高性能混凝土梁的疲劳寿命进行了试验研究, 结果表明, 不同幅值加载的先后顺序对试件的疲劳寿命影响很大, 初始加载幅值较高会缩短试件的寿命。

2.2 高性能水泥基复合材料梁疲劳性能

余自若、刘问等^[10-12]研究了超高性能混凝土、高韧性混凝土的抗疲劳性能, 得出其疲劳寿命显著高于普通混凝土和高强混凝土。

徐海滨、薛会青、邓宗才等^[13-15]研究表明: 超高性能混凝土与高强钢筋是适配的, 可充分发挥高强钢筋的作用, 高强钢筋与超高性能混凝土具有良好的黏结性能; 预应力超高性能混凝土梁的抗震性能良好, 可施加较高水平预应力, 提高预应力效果。

罗许国等^[16]研究了普通钢筋高性能水泥基复合材料梁的疲劳性能, 其疲劳寿命值都达到 200 万次以上, 未破坏; 钢筋破坏常起源于局部化的高应力, 随着疲劳荷载作用次数的增加, 高应力处率先出现裂纹。张哲^[17]研究了配筋高性能水泥基复合材料的受弯性能, 表明破坏过程分为线弹性阶段、多缝开

裂的非线性阶段和宏观裂缝发育阶段 3 个阶段。杨剑等^[18]研究了碳纤维筋预应力筋高性能水泥基复合材料梁的抗疲劳性能, 认为需要从静载和疲劳 2 个方面综合研究预应力高性能水泥基复合材料梁的设计方法, 以确定合理的预应力水平、预应力度等, 使梁具有良好的抗疲劳性能。

罗璐等^[19]试验表明, 同等应力水平条件时, 在高应力水平下, 合成纤维增强高韧性混凝土的疲劳寿命高于普通混凝土是由于多缝开裂及纤维桥联作用, 但低应力水平下二者相差不大。其原因为: 高应力水平下, 微细裂缝较多, 这些微细裂缝延缓了主裂缝的形成, 并且由疲劳荷载产生的能量分散到众多微细裂缝中, 纤维对分散能量、延缓疲劳应力集中、延长疲劳寿命作用明显; 在低应力水平下, 微细裂缝数目较少, 易出现应力集中, 使得纤维对高韧性混凝土的疲劳寿命作用不明显。

曹霞等^[20]对高性能水泥基复合材料未配筋梁进行了疲劳试验, 最大应力水平为 0.75, 0.8, 0.85 和 0.9, 疲劳破坏经历 3 个阶段: (1) 疲劳潜伏期, 占整个寿命的 15%; (2) 裂纹稳定扩展阶段, 占整个寿命的 75%; (3) 裂纹失稳扩展阶段, 占整个寿命的 10%; 由于裂缝在疲劳过程中经反复摩擦和挤压, 有热量释放, 因此断裂截面温度较高。

Al-Azzawi 等^[21]通过未配筋高性能水泥基复合材料梁疲劳试验得出: 纤维分布均匀性直接影响疲劳寿命, 当钢纤维分布不均时, 疲劳寿命较低; 疲劳断裂面钢纤维有拔出和断裂 2 种情况, 当疲劳次数较高 (应力幅较低) 时钢纤维发生疲劳脆性断裂。

Parant 等^[22]对未配筋高性能水泥基复合材料梁进行了疲劳试验, 得出当应力水平小于 0.65 时, 所有试件的疲劳寿命均大于 200 万次, 该疲劳强度远高于普通混凝土梁。

文献 [23] 中研究了正交异性钢箱梁铺装层采用超高性能混凝土后的疲劳特性, 超高性能混凝土显著降低了正交异性钢箱梁的截面尺寸和形状改变处的应力集中, 提高了桥梁抗弯疲劳寿命。

文献 [24] 中通过有限元模拟计算了将超高性能混凝土用于钢箱梁面层时的疲劳寿命、疲劳裂缝扩展情况, 研究表明超高性能混凝土有利于提高桥梁的抗弯刚度, 改善疲劳寿命。

文献 [25] 中研究了超高性能混凝土铺装层对钢桥面板疲劳抗弯刚度的影响规律, 采用超高性能混凝土铺装层后, 显著提高了桥梁疲劳刚度, 减小了疲劳宏观裂缝宽度。

孙美丽^[26] 试验研究了多级等幅疲劳荷载作用下超高性能混凝土的疲劳累积损伤, 结果表明: 超高性能混凝土的变幅疲劳损伤过程符合三阶段规律, 即裂纹潜伏阶段、裂纹稳定扩展阶段、失稳破坏阶段, 并在试验基础上建立了 $S-N$ 疲劳设计方程。

文献 [26-30] 中进行了钢纤维超高性能混凝土棱柱体和圆柱体试件的受压疲劳试验, 其立方体抗压强度范围为 121 ~ 156.25 MPa, 疲劳试验共计 91 组数据, 疲劳应力比为 0.05 ~ 0.27, 并给出了不同应力比下钢纤维体积掺量为 2% 时的超高性能混凝土 $S-N$ 方程式。对这些受压疲劳试验结果进行分析, 获得了超高性能混凝土可承受等幅疲劳 200 万次的疲劳强度设计值。疲劳强度设计值由超高性能混凝土的轴压强度设计值乘以疲劳强度修正系数后获得。对试验结果进行统计分析, 发现当疲劳应力比约为 0.1 时, 对应 200 万次疲劳寿命的疲劳强度修正系数平均值约为 0.55 ~ 0.57。当疲劳应力比介于 0.1 ~ 0.5 之间时, 采用线性插值确定疲劳强度修正系数。

余自若等^[27] 进行了超高性能混凝土在等幅单向压缩循环作用下的疲劳性能试验, 结果表明: (1) 最终破坏形态为单一的疲劳主裂纹。(2) 疲劳裂纹发展分为裂纹潜伏、裂纹稳定扩展和裂纹失稳破坏, 各阶段占比分别为 15%、75% 和 10%。超高性能混凝土的抗疲劳开裂能力明显优于普通混凝土, 且稳定扩展阶段延长。(3) 疲劳极限强度可取为轴心抗压强度的 57%。

文献 [28] 中通过对 3 种不同钢纤维含量的超高性能混凝土进行单向受压等幅疲劳试验, 研究了钢纤维含量对其抗疲劳性能的影响, 结果表明: 在疲劳荷载作用下, 素超高性能混凝土的破坏形态表现为劈裂破坏, 钢纤维含量分别为 1.5% 和 3% 的超高性能混凝土均表现为剪切破坏。随着钢纤维含量的提高, 超高性能混凝土的疲劳寿命和疲劳强度相应提高。随着钢纤维含量的提高, 裂缝萌生的第 1 阶段和裂缝失稳扩展的第 3 阶段延长。疲劳变形模量随钢纤维含量的增大而显著提高。对超高性能混凝土构件进行抗疲劳验算时, 建议钢纤维含量分别为 1.5% 和 3% 时, 疲劳弹性模量与初始弹性模量的比值分别取 0.70 和 0.75。文献 [29] 中研究了活性粉末混凝土受疲劳荷载作用后的剩余强度和变形能力等。

文献 [30] 中研究了含粗骨料超高性能混凝土的单轴受压疲劳特性。文献 [31] 中试验研究了超高性能混凝土在等幅疲劳循环下的拉伸疲劳性能, 进行了 3 组单轴拉伸疲劳试验, 最大循环次数为

1 000 万次, 目的是确定超高性能混凝土的疲劳极限。试验表明, 在应力比为 0.45 ~ 0.70 时, 超高性能混凝土拉伸性能在所有疲劳的 3 个阶段, 其可承受的受拉次数均增加, 疲劳过程中应力的重新分布提高了疲劳寿命; 证明 UHPC 的疲劳机制是由水泥基复合材料的微振磨损、碾磨以及摩擦腐蚀引起的疲劳损伤。

文献 [32] 中试验研究了具有应变硬化特性的水泥基复合材料的疲劳特性, 证明多裂缝开展的材料有利于疲劳寿命的显著提升。文献 [33] 中在大量试验研究的基础上, 系统分析了水泥基复合材料多裂缝开展和高性能纤维的桥联作用对改善疲劳性能的贡献和纤维的阻裂、抗疲劳作用机制。

2.3 混杂纤维高性能水泥基复合材料梁疲劳破坏特征

高性能水泥基复合材料梁比普通混凝土梁具有更高的疲劳寿命, 原因是高性能水泥基复合材料梁的疲劳破坏机制与普通混凝土梁相比有一定区别, 高性能水泥基复合材料具有受拉应变强化特征, 使梁在裂缝处受力钢筋应变幅值整体呈下降趋势; 当底部混凝土开裂后, 受拉区的高性能水泥基复合材料未退出工作, 仍与钢筋共同承受拉力, 且复合材料的应变强化特性使其能持续不断地替钢筋分担更多的拉力, 因而钢筋应变呈现平稳趋势, 甚至出现应变幅值减小的现象。钢纤维水泥基复合材料梁, 当疲劳应力值小于某阈值时, 疲劳应力基本由高强度钢纤维和受力筋共同承担, 但当疲劳应力值大于某阈值后, 钢纤维产生滑移和拔出现象, 疲劳应力由钢筋承担, 这时钢筋应力突增, 高性能水泥基复合材料裂缝进一步开展; 随着高性能水泥基复合材料不断退出工作, 钢筋承受的拉力越来越大, 应变不断增长, 最终导致钢筋疲劳破坏。而普通混凝土梁在疲劳荷载下开裂后, 混凝土的拉应力完全转移给钢筋, 使得钢筋应力突然增加, 导致梁疲劳寿命明显降低。

高性能水泥基复合材料在疲劳荷载作用下, 具有比普通混凝土更优异的疲劳性能, 即使在开裂状态下仍然能够承担数十到数百万的疲劳循环加载。但是单一钢纤维增强高性能混凝土梁在高周疲劳应力作用下, 疲劳中后期的钢纤维会发生类似于钢筋一样的疲劳断裂破坏, 钢纤维对改善高性能混凝土中后期疲劳寿命的作用明显降低, 因此单一钢纤维高性能水泥基复合材料的抗疲劳性能仍有必要进一步提升和改善。采用钢纤维与较高弹性模量的聚乙

烯、聚乙烯醇纤维增强高性能混凝土,是进一步提升梁疲劳寿命的有效途径之一。

钢纤维与高性能聚乙烯醇、聚乙烯纤维等混杂使用,当基体开裂后,纤维能够有效传递应力和阻止疲劳裂缝的扩展,表现出很强的应力和变形重分布能力;混杂纤维高性能水泥基复合材料在疲劳荷载下具有更加显著的多裂缝扩展特征,使得裂缝处受力钢筋应变幅值整体呈下降趋势,增加了疲劳寿命。混杂纤维高性能水泥基复合材料梁在疲劳发展的中后期,合成纤维的桥联作用仍然发挥作用。合成纤维的疲劳寿命远高于钢材类材料,不会发生类似于钢筋(钢纤维)一样的疲劳断裂,从而有效延缓了疲劳裂缝的失稳扩展。在较大的疲劳变形时,合成纤维的桥联作用使高性能水泥基复合材料具有良好的疲劳性能,或者说较高模量的合成纤维在疲劳次数较高时仍然发挥对裂缝的桥联作用(不会发生脆性断裂),延缓疲劳失效裂缝的发展,从而承受更高次数的疲劳循环作用。

单一钢纤维高性能水泥基复合材料在静载下纤维以拔出为主,纤维在拔出过程中吸收能量和增加变形能力;而钢纤维增强混凝土在疲劳循环加载次数多时,大多数钢纤维在拔出之前已经发生疲劳断裂,因此明显影响了高性能水泥基复合材料的应变硬化和多缝开裂过程;随着疲劳循环次数的增加,钢纤维桥联作用退化,钢纤维高性能水泥基复合材料的多缝开裂特征也显著弱化,且变形能力大幅下降。

文献[34]中研究了单掺钢纤维、钢纤维与细聚丙烯纤维混掺、单掺细聚丙烯纤维增强UHPC的弯曲疲劳性能。单掺钢纤维体积掺率为2.0%,混掺试件中钢纤维和细聚丙烯纤维掺率均为1.0%,单掺细聚丙烯纤维掺率为1.5%。研究表明:(1)单掺钢纤维增强UHPC的力学性能和弯曲疲劳性能最好,其次为钢纤维与细聚丙烯纤维混掺,最后为单掺细聚丙烯纤维UHPC梁。(2)3种纤维增强UHPC的弯曲疲劳强度 S_f 分别为58.5%,59.1%和50.9%。(3)单掺钢纤维UHPC裂缝周围破损程度比钢纤维与细聚丙烯纤维混掺大。

一些学者^[35-36]在研究合成纤维与钢纤维混杂使用时的桥联作用以及混杂纤维增强水泥基复合材料的疲劳拉伸性能后认为:通过改变钢纤维与合成纤维的混杂比例,可以协调复合材料疲劳强度与变形能力的关系。采用高性能合成纤维(如粗聚乙烯醇/PVA、较高模量聚乙烯/PE等合成纤维)取代部分

微细钢纤维,用混杂纤维增强的方式,以改善水泥基复合材料结构在不同疲劳应力下的服役寿命。混杂纤维在不同疲劳应力水平和疲劳加载阶段中充分发挥混杂纤维的作用,使得不同弹性模量、不同尺度的纤维在不同疲劳发展阶段和不同疲劳应力幅下,发挥各自的抗疲劳优势。

合成纤维的品种较多,较高弹性模量的聚乙烯醇、聚乙烯纤维有利于改善高性能混凝土的静载与疲劳性能。目前,研究人员关于PVA、PE等合成纤维与钢纤维混杂增强高性能水泥基复合材料的断裂特性进行了一系列试验研究,如文献[37-39]中研究了混杂纤维高性能水泥基复合材料的断裂性能、增强增韧机制,其中钢纤维掺率为1.3%,聚烯烃纤维掺率为0.5%,得出混杂纤维对改善高性能水泥基复合材料的变形能力和提高抵抗断裂的能力效果显著,梁在小变形(小于50倍素高性能水泥基复合材料峰值荷载对应的裂缝张开位移值)时,高性能水泥基复合材料抵抗断裂的能力和韧性取决于钢纤维的掺率,粗合成纤维主要在中等变形和大变形阶段(大于50倍素高性能水泥基复合材料峰值荷载对应的裂缝张开位移值)发挥其抵抗断裂和增强与增韧效用。混杂纤维高性能混凝土具有高断裂韧度和耗能能力^[40-42]。

3 水泥基复合材料疲劳破坏机理的研究

水泥基复合材料疲劳破坏机理的分析模型大致分为4类:基于疲劳试验分析的现象学模型、基于断裂力学的疲劳裂纹扩展模型^[43]、基于损伤力学的疲劳损伤模型和采用速率过程理论的模型等。

3.1 基于断裂力学的水泥基复合材料疲劳断裂分析模型

混凝土疲劳损伤的发展主要源于微裂纹和微缺陷的发展。因此,从裂纹扩展的角度研究混凝土疲劳问题是抓住了其主要物理机理^[44]。描述疲劳裂纹扩展的Paris公式被运用于混凝土疲劳分析中^[45],Paris公式认为裂缝扩展、疲劳循环次数与应力强度因子幅值密切相关,见式(1)。由于Paris公式建立在线弹性断裂力学之上,其核心物理量是应力强度因子,而混凝土裂纹尖端具有显著的非线性特征^[46],Perdikaris等^[47]通过试验测定了裂纹张开位移与裂纹扩展速率,但未从物理机制上说明混凝土疲劳裂纹是如何发生和扩展的。因此,线弹性断裂力学给出的裂纹尖端应力场分布并不能描述混凝土断裂过程中真实的应力分布。在各种混凝土非线性

断裂力学模型中, 虚拟裂缝 (黏聚裂缝模型 Cohesive Crack Model) 在物理描述和数值模拟上均有明显进步, 得到了认可^[48]。混凝土黏聚裂缝模型建立了应力与裂纹尖端张开位移的关系, 可通过试验给出在疲劳循环荷载作用下应力与裂纹尖端张开位移曲线演化的经验表达式, 解释混凝土疲劳裂缝扩展过程。

$$da/dN = C (\Delta K)^m, \quad (1)$$

式中, a 为裂纹尺寸; N 为疲劳循环次数; ΔK 为单个加载循环过程中应力强度因子的变化幅值; C 和 m 为材料常数。

由此可见, 混凝土疲劳断裂力学模型从单个裂缝扩展出发, 研究宏观裂缝从扩展到失效的规律, 反映了疲劳破坏的一些物理机理, 这对于理解疲劳问题的本质有很大推动作用。但迄今为止, 仅从经验的角度来解释单一裂缝疲劳演化的累积效应; 而混凝土疲劳裂缝扩展, 在前期以及中期的疲劳演化都是由众多微裂纹及宏观裂纹同时扩展引起的, 单个疲劳裂纹的端部又有众多微细裂缝。对于混凝土单个裂纹扩展模型, 虽然有助于理解疲劳裂缝的物理机理, 但不能很好地描述混凝土裂纹萌生、多裂纹、不同尺度裂缝的扩展问题, 存在先天不足。

3.2 纤维混凝土的疲劳累积损伤理论

对于众多因疲劳微裂纹的萌生与扩展所引起的混凝土疲劳破坏, 连续损伤力学的发展给出了一条新的分析途径, 即通过损伤变量的演化规律来表征由于多裂纹萌生、扩展到失效的全过程。损伤意味着能量的耗散, 早期人们将损伤演化与损伤能释放率联系起来, 建立了以损伤能释放率为基本变量的演化模型。显然此理论对于单调加载有效, 而对于疲劳不适用。Marigo^[49]用材料当前应力状态下的损伤空间距损伤边界的距离来衡量疲劳损伤快慢。之后在连续介质损伤力学框架下研究疲劳损伤演化时, 基本都采用此思路。

另一种基于连续损伤力学研究疲劳损伤演化的方法是由以 Lemaître 为代表的法国卡尚力学研究所提出的^[50-53]。其选取与材料疲劳性能退化相关的某个物理量或物理过程来描述疲劳问题; 认为裂缝内部的滑移和摩擦是造成混凝土疲劳损伤演化的原因, 并建立了一些经验的疲劳损伤演化法则。

关于确定性疲劳损伤理论, 人们最先提出了线性疲劳累积损伤理论, 即疲劳损伤与荷载循环次数是线性规律, 疲劳损伤可以线性累积, 各个应力之间相互独立, 当损伤累积到一定程度时, 构件发生疲劳破坏, 典型的模型是 Miner 理论^[54]。Miner 理论

简单实用, 但未考虑加载顺序、非线性因素等, 得到的预测结果与试验值相差较大, 见式 (2) 和式 (3)。

等幅荷载下 n 个循环造成的损伤 D 为:

$$D = n/N, \quad (2)$$

变幅荷载下 n_i 个循环造成的损伤 D 为:

$$D = \sum n_i / N_i, \quad (3)$$

式中, N_i 为变幅应力下的疲劳寿命。鉴于线性疲劳损伤理论存在的缺点, 之后不少学者提出了非线性疲劳累积损伤理论。非线性疲劳累积损伤理论分为 5 类^[55]:

一是基于损伤曲线法的非线性疲劳累积损伤理论^[56-57]。其最早由 Marco-Starkey 提出, 见式 (3)。之后 Manson 等^[58]基于有效微观裂纹增长的概念完善了 Marco-Starkey 模型 (损伤幂指规律)。该理论与两级荷载试验结果吻合较好, 但未证明对多级或随机荷载的有效性, 无法考虑荷载间的相互作用。

1 个循环造成的损伤为:

$$\begin{cases} D = \left(\frac{1}{N_i}\right)^{q_i} \\ q_i = BN_i^\beta \end{cases}, \quad (4)$$

式中, N_i 为对应于当前荷载水平的疲劳寿命; B 和 β 为材料常数。

二是基于材料物理性能退化概念的非线性疲劳累积损伤理论。早在 1938 年和 1955 年, Henry^[59]将疲劳极限的变化作为损伤量, Carpinteri 和廉伟等^[60-61]将疲劳损伤过程中材料韧性的耗散、刚度退化作为疲劳损伤量, 推导了疲劳累积损伤模型。邓宗才^[62]以纤维混凝土不可逆变形作为损伤变量, 预测了其疲劳寿命。

$$D = \frac{Z\sigma_{eq}^{r-1}\sigma_{eq}}{\beta^m(1-D)^{r+\alpha}} \quad (5)$$

式中, $Z = \left(\frac{S_1}{2ES_1}\right)^{S_1} \frac{m}{K}$; $r = 2S_0 + m$; α , β , m , S_0 , S_1 为材料常数; E 为弹性模量; S_1 为三轴应力因子; σ_{eq} 为有效应力; D 为损伤。

三是考虑荷载间相互作用效应的非线性疲劳累积损伤理论。考虑荷载间相互作用效应的非线性疲劳累积损伤理论有 3 类: 第 1 类包括 Corten-Dolan 模型^[63]和 Freudenthal-Heller 模型^[64], 这 2 种模型均对 $S-N$ 曲线进行了修正; 第 2 类和第 3 类模型由 Bui-Quoc^[65]提出, 第 2 类模型称为假想荷载法, 第 3 类模型基于对循环比的修正。目前应用较广泛的

Corten-Dolan 模型考虑了加载顺序及非线性因素的影响。

等幅载荷下 n 个循环造成的损伤为:

$$D = nm^c r^d, \quad (6)$$

式中, n 为等幅荷载的循环次数; m 为材料损伤核的数目, 应力越大, m 越大; r 为损伤发展速率, 其正比于应力水平 S , 即 $r \propto S$; c, d 为材料常数。

四是基于能量法的非线性疲劳累积损伤理论。Halford^[66]和 Niu 等^[67]发展了基于能量法的疲劳累积损伤理论。能量及其平衡关系是力学机理分析中最常用的关系, 因此从能量角度来分析损伤演化的驱动力是很有说服力的。但是从能量平衡关系中只能得到发生损伤演化的条件, 而不能得出损伤演化律。

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = K^* \left(\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \right)^{n^*} r\beta, \quad (7)$$

式中, $\Delta\sigma$ 为应力变程; $\Delta\varepsilon_p$ 为塑性应变程; K^* 和 n^* 分别为接近失效时 ($r = n/N_f = 1$) 的循环硬化系数和循环硬化指数; β 为循环硬化速率, 其表达式为:

$$\beta = a \left(\frac{\Delta\sigma}{2} \frac{\Delta\varepsilon_p}{2} \right)^b, \quad (8)$$

式中, a 和 b 为常数。

五是基于连续损伤力学概念的非线性疲劳累积损伤理论。该理论是在较为严谨的不可逆热力学和连续介质力学基础上建立起来的。疲劳损伤的发展是一个不可逆的能量耗散过程, 耗散的能量可分解为由外状态变量与内状态变量所引起的。内状态变量反映材料内部结构状态的变化, 当其变化到一定程度时, 材料便丧失了抗疲劳的能力, 以致发生疲劳破坏。近年来, 许多学者综合应用损伤力学和塑性力学理论来描述材料的刚度退化和滞回性能。具有代表性的是龙渝川等^[68], 其在传统损伤力学模型中引入非线性卸载-线性重加载路径, 模拟了混凝土滞回行为, 建立了往复加载作用下的损伤模型。

$$\dot{d} = \left(\frac{Y}{S} \right)^s \dot{p}, \quad (9)$$

式中, 损伤变量 d 的演化与损伤能释放率 Y 以及累积塑性应变 $\dot{p} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p}$ 有关 ($\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ 为塑性应变率分量), 而 S 和 s 为材料常数, 与温度有关。基于连续损伤力学的疲劳损伤模型, 虽可用损伤变量的演化来描述混凝土因不同尺度裂纹发展所引起的力学性能退化, 但用来描述疲劳损伤变量的演化方程在迄

今为止的研究中并不具有坚实的理论基础, 即对关键的疲劳损伤演化依然只能通过经验推论获得, 极大地限制了模型的普适性。唯象的损伤力学模型, 不论是损伤面还是边界面, 其本质都是由类比塑性力学中的屈服面概念引入的, 缺乏事实支撑。而损伤力学的核心问题为损伤变量的选取和损伤演化律。李杰等^[44]将随机过程引入疲劳损伤分析中, 该方法通过引入随机损伤内变量及其演化来描述混凝土由于疲劳微裂纹的萌生、扩展而导致的疲劳性能劣化直至失效的过程。

目前大多数损伤模型是在混凝土结构或普通钢筋混凝土结构上建立起来的, 但预应力混凝土桥梁与普通钢筋混凝土结构不同的是, 由于预应力钢筋的存在, 预应力混凝土结构的初始应力较大, 构件始终处于较高的应力状态下工作, 所以大多数损伤模型并不适合预应力混凝土结构。在疲劳荷载作用下, 有可能引发比普通钢筋混凝土构件更严重的疲劳损伤问题。

大多数损伤模型是从宏观角度定义结构的损伤, 而桥梁结构劣化的因与果实际上是位于局部微观尺度与整体结构尺度 2 个不同量级的空间尺度内, 即大多数现有模型未从材料的劣化尺度到结构整体性能退化尺度去综合度量疲劳损伤, 也未考虑高性能水泥基复合材料的多裂纹开展和应变硬化行为对疲劳损伤的影响。

3.3 速率过程理论与混凝土疲劳损伤

速率过程理论是针对单个宏观疲劳裂纹扩展的, 如何考虑混凝土多裂纹疲劳扩展, 仍是未被解决的问题。不同尺度上多裂纹扩展问题包含损伤的演化过程, 用具有物理基础的疲劳损伤演化模型代替经验的疲劳损伤模型, 是迫切需要研究的课题^[45]。

$$-\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \frac{kT}{h} \exp\left(\frac{Q_0}{RT}\right) \exp\left(\frac{\sigma\lambda}{2Nkt}\right), \quad (10)$$

式中, N 为材料单位截面上分子间连接的数量; Q_0 为激活自由能; k, h, R 和 T 分别为 Boltzmann 常数、Plank 常数、气体常数和绝对温度; σ 为总应力; λ 为构造敏感系数; t 为时间。综上所述, 关于高性能纤维混凝土结构性能的研究不过 10 余年, 要明确高强度钢筋高性能水泥基复合材料的疲劳破坏机制及其影响疲劳寿命的主要因素等, 建立相应的设计计算理论, 还需要开展大量的试验和理论研究

4 结论

目前关于混杂纤维增强高性能混凝土疲劳和冲

击等动载性能的试验和理论研究不够系统深入,无论是宏观角度还是微观角度,均未明确高性能水泥基复合材料在反复受拉荷载下的多裂缝扩展和应变硬化行为对梁疲劳断裂性能的影响规律和影响机制,未揭示高性能水泥基复合材料梁与普通混凝土梁在疲劳破坏机制方面的差异。

至今未揭示混杂纤维高性能水泥基复合材料的疲劳损伤破坏机制,未从本质上揭示不同品种纤维混杂改善高性能水泥基复合材料疲劳寿命的内在机制。

因此,研究高性能水泥基复合材料的疲劳损伤模型和寿命预测方法具有重要的学术价值和应用意义,属于国际前沿课题。目前对高性能水泥基复合材料梁疲劳破坏机理、破坏模式的认识远未达到揭示其物理机制的程度,未建立起基于疲劳损伤理论的疲劳寿命预测模型。断裂力学可用于分析形成单一宏观裂缝后的断裂失效过程,无法反映微细裂缝的萌生到出现宏观裂缝这一疲劳阶段的损伤过程。而损伤力学可分析微细裂缝萌生、开展到失效的全过程。因此,迫切需要在大量试验研究和理论分析的基础上,明确其疲劳损伤机理,基于弹塑性损伤理论等,建立具有物理基础的疲劳损伤演化模型,提出基于疲劳损伤本构模型的寿命预测方法,以丰富和发展仅仅基于试验的统计意义上的疲劳方程式。从科学发展的角度出发,建立基于疲劳损伤本构的高性能水泥基复合材料疲劳寿命预测模型,为工程应用提供理论支持。

参考文献:

References:

- [1] BENNETT E W, JOYNES H W. Fatigue Strength of Cold-worked Non-prestressed Reinforcement in Prestressed Concrete Beams [J]. Magazine of Concrete Research, 1979, 31 (106): 13-18.
- [2] EL SHAHAWI M, DE V BATCHELOR B. Fatigue of Partially Prestressed Concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1986, 112 (3): 524-537.
- [3] 冯秀峰,宋玉普,朱美春. 随机变幅疲劳荷载下预应力混凝土梁疲劳寿命的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2006, 39 (9): 32-38.
FENG Xiu-feng, SONG Yu-pu, ZHU Mei-chun. An Experimental Study on the Fatigue Life of Prestressed Concrete Beams under Random-amplitude Fatigue Loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (9): 32-38.
- [4] FOO M H, WARNER R F. Fatigue Tests on Partially Prestressed Concrete Beams [R]. Adelaide: University of Adelaide, 1984.
- [5] 王瑞敏. 混凝土结构的疲劳性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 1989.
WANG Rui-min. Research on Fatigue Performance of Concrete Structures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1989.
- [6] 宋玉普,韩基刚. 疲劳荷载作用下梁内不同类型钢筋破坏关系 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44 (8): 96-100.
SONG Yu-pu, HAN Ji-gang. The Failure Relationship between Different Types of Steel in Beams under Fatigue Loading [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44 (8): 96-100.
- [7] 冯秀峰,宋玉普,章坚洋,等. 疲劳荷载下预应力混凝土梁中钢筋应力重分布的试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2006, 27 (2): 94-99.
FENG Xiu-feng, SONG Yu-pu, ZHANG Jian-yang, et al. Experimental Study on Stress Redistribution of Reinforcing Steel in Prestressed Concrete Beams under Fatigue Loading [J]. Journal of Building Structures, 2006, 27 (2): 94-99.
- [8] 雷俊卿,肖赟,张坤,等. 预应力混凝土梁变幅疲劳性能试验研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32 (18): 95-100.
LEI Jun-qing, XIAO Yun, ZHANG Kun, et al. Test for Fatigue Performance of a Prestressed Concrete Beam under Variable Amplitude Fatigue Loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32 (18): 95-100.
- [9] NAAMAN A E, FOUNAS M. Partially Prestressed Beams under Random-amplitude Fatigue Loading [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117 (12): 3742-3761.
- [10] 余自若,安明喆,阎贵平. 活性粉末混凝土的疲劳强度研究 [J]. 混凝土, 2008 (7): 3-6.
YU Zi-ruo, AN Ming-zhe, YAN Gui-ping. Study on the Fatigue Strength of Reactive Powder Concrete [J]. Concrete, 2008 (7): 3-6.
- [11] 余自若,要荆荆,安明喆. 活性粉末混凝土桥梁的疲劳可靠性验算 [J]. 铁道学报, 2012, 34 (3): 94-98.
YU Zi-ruo, SHUA Jing-jing, AN Ming-zhe. Fatigue Reliability Checking of Reactive Powder Concrete Bridge [J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34 (3): 94-98.
- [12] 刘问,徐世焯,李庆华. 等幅疲劳荷载作用下超高韧性水泥基复合材料弯曲疲劳寿命试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33 (1): 119-127.
LIU Wen, XU Shi-lang, LI Qing-hua. Study on Flexural

- Fatigue Life of Ultra-high Toughness Cementitious Composites under Constant Amplitude Cyclic Loading [J]. *Journal of Building Structures*, 2012, 33 (1): 119-127.
- [13] 徐海宾, 邓宗才. 预应力超高性能钢纤维混凝土梁受弯性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2014, 35 (12): 58-64.
XU Hai-bin, DENG Zong-cai. Experimental Research on Flexural Behavior of Prestressed Ultra-high Performance Steel Fiber Concrete Beams [J]. *Journal of Building Structures*, 2014, 35 (12): 58-64.
- [14] 薛会青, 邓宗才. HRECC 梁弯曲性能的试验研究和理论分析 [J]. *土木工程学报*, 2013, 46 (4): 10-17.
XUE Hui-qing, DENG Zong-cai. Experimental and Theoretical Studies on Bending Performance of HRECC Beams [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46 (4): 10-17.
- [15] 邓宗才, 袁常兴. 高强钢筋与活性粉末混凝土黏结性能的试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2014, 47 (3): 69-78.
DENG Zong-cai, YUAN Chang-xing. Experimental Study on Bond Capability between High Strength Rebar and Reactive Powder Concrete [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, 47 (3): 69-78.
- [16] 罗许国, 徐望国. 钢筋活性粉末混凝土梁全寿命周期疲劳应力计算方法研究 [J]. *土木工程学报*, 2015, 48 (11): 61-67.
LUO Xu-guo, XU Wang-guo. Study on Calculation Method for Fatigue Stress in Reinforced Reactive Powder Concrete Beam in Life Cycle [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48 (11): 61-67.
- [17] 张哲. 钢-配筋 UHPC 组合桥面结构弯曲受拉性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
ZHANG Zhe. Research on Bending and Tensile Performance of Steel-reinforced UHPC Composite Bridge Deck Structure [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [18] 杨剑, 方志. 预应力超高性能混凝土梁的受弯性能研究 [J]. *中国公路学报*, 2009, 22 (1): 39-46.
YANG Jian, FANG Zhi. Research on Flexural Behaviors of Prestressed Ultra High Performance Concrete Beams [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2009, 22 (1): 39-46.
- [19] 罗璐, 刘问, 徐世焱, 等. 基于连续损伤力学的 UHTCC 疲劳损伤扩展模型研究 [J]. *工程力学*, 2017, 34 (1): 22-27.
LUO Lu, LIU Wen, XU Shi-lang, et al. Fatigue Damage Propagation Models for Ultra-high Toughness Cementitious Composites with Continuum Damage Mechanics [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34 (1): 22-27.
- [20] 曹霞, 唐婷, 刘雅琼, 等. 活性粉末混凝土的抗折疲劳性能研究 [J]. *工业建筑*, 2015, 45 (5): 93-96, 75.
CAO Xia, TANG Ting, LIU Ya-qiong, et al. Analysis of the Flexural Fatigue Property of Reactive Powder Concrete [J]. *Industrial Construction*, 2015, 45 (5): 93-96, 75.
- [21] AL-AZZAWI B S, KARIHALOO B L. Flexural Fatigue Behavior of a Self-compacting Ultrahigh Performance Fiber-reinforced Concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29 (11): 04017210.
- [22] PARANT E, ROSSI P, BOULAY C. Fatigue Behavior of a Multi-scale Cement Composite [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37 (2): 264-269.
- [23] ZHU Z W, YUAN T, XIANG Z, et al. Behavior and Fatigue Performance of Details in an Orthotropic Steel Bridge with UHPC-deck Plate Composite System under In-service Traffic Flows [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 23 (3): 04017142.
- [24] SHAO X D, CAO J H. Fatigue Assessment of Steel-UHPC Lightweight Composite Deck Based on Multiscale FE Analysis: Case Study [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23 (1): 05017015.
- [25] ZHU Z W, XIANG Z, ZHOU Y E. Fatigue Behavior of Orthotropic Steel Bridge Stiffened with Ultra-high Performance Concrete Layer [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 157: 132-142.
- [26] 孙美丽. 多级等幅疲劳荷载作用下 RPC 的疲劳累积损伤研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
SUN Mei-li. Research on Fatigue Cumulative Damage of RPC under Multi-level Constant Amplitude Fatigue Loads [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [27] 余自若, 安明喆, 阎贵平. 活性粉末混凝土的疲劳性能试验研究 [J]. *中国铁道科学*, 2008, 29 (4): 35-40.
YU Zi-ruo, AN Ming-zhe, YAN Gui-ping. Experimental Research on the Fatigue Performance of Reactive Powder Concrete [J]. *China Railway Science*, 2008, 29 (4): 35-40.
- [28] 方志, 向宇, 匡镇, 等. 钢纤维含量对活性粉末混凝土抗疲劳性能的影响 [J]. *湖南大学学报 (自然科学版)*, 2011, 38 (6): 6-12.
FANG Zhi, XIANG Yu, KUANG Zhen, et al. Fatigue Properties of Reactive Powder Concrete with Different Steel Fiber Ratios [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science Edition)*, 2011, 38 (6): 6-12.
- [29] 郑帅泉. RPC 疲劳后剩余强度试验及理论研究 [D].

- 北京: 北京交通大学, 2009.
- ZHENG Shuai-quan. Experimental and Theoretical Research on Residual Strength of RPC after Fatigue [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [30] 李力剑, 徐礼华, 池寅, 等. 含粗骨料超高性能混凝土单轴受压疲劳性能 [J]. 建筑材料学报, 2022, 25 (4): 381-388.
- LI Li-jian, XU Li-hua, CHI Yin, et al. Fatigue Performance of Ultra-high Performance Concrete Containing Coarse Aggregate under Uniaxial Cyclic Compression [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25 (4): 381-388.
- [31] MAKITA T, BRÜHWILER E. Tensile Fatigue Behaviour of Ultra-high Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) [J]. Materials and Structures, 2014, 47: 475-491.
- [32] MÜLLER S, MECHTCHERINE V. Fatigue Behaviour of Strain-hardening Cement-based Composites (SHCC) [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 92: 75-83.
- [33] SUTHIWARAPIRAK P, MATSUMOTO T, KANDA T. Multiple Cracking and Fiber Bridging Characteristics of Engineered Cementitious Composites under Fatigue Flexure [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16 (5): 433-443.
- [34] 金文. 超高性能混凝土弯曲疲劳性能及破坏中裂缝发展研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- JIN Wen. Research on Bending Fatigue Performance and Crack Development in Failure of Ultra-high Performance Concrete [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [35] AHMED S F U, MAALEJ M, PARAMASIVAM P. Analytical Model for Tensile Strain Hardening and Multiple Cracking Behavior of Hybrid Fiber-engineered Cementitious Composites [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19 (7): 527-539.
- [36] AHMED S F U, MAALEJ M. Tensile Strain Hardening Behaviour of Hybrid Steel-polyethylene Fiber Reinforced Cementitious Composites [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (1): 96-106.
- [37] 邓宗才, 冯琦. 混杂纤维活性粉末混凝土的断裂性能 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19 (1): 14-21.
- DENG Zong-cai, FENG Qi. Fracture Properties of Hybrid Fibers Reinforced Reactive Powder Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19 (1): 14-21.
- [38] 邓宗才, DAUD J R. 混掺纤维 RPC 增韧特性试验研究 [J]. 建筑材料学报, 2015, 18 (2): 202-207.
- DENG Zong-cai, DAUD J R. Experimental Study on the Flexural Toughness of RPC Reinforced by Hybrid Fibers [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18 (2): 202-207.
- [39] 邓宗才. 一种钢纤维与高性能合成纤维混杂的增韧型 RPC 及制备方法: CN201310422137.1 [P]. 2014-01-08.
- DENG Zong-cai. A Toughened RPC Mixed with Steel Fiber and High-performance Synthetic Fiber and Its Preparation Method: CN201310422137.1 [P]. 2014-01-08.
- [40] DENG Z C, DAUD J R, GAO L. Flexural Toughness Performance of Hybrid Fiber-reinforced RPC [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39 (1): 279-288.
- [41] DENG Z C, SHI F, YIN S, et al. Characterisation of Macro Polyolefin Fibre Reinforcement in Concrete through Round Determinate Panel Test Flexural Toughness Performance of Hybrid Fiber-reinforced RPC [J]. Construction and Building Materials, 2016, 121: 229-235.
- [42] DENG Z C, QU J L. The Experimental Studies on Behavior of Ultrahigh-performance Concrete Confined by Hybrid Fiber-reinforced Polymer Tubes [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 2015: 201289.
- [43] SOE K T, ZHANG Y X, ZHANG L C. Material Properties of a New Hybrid Fibre-reinforced Engineered Cementitious Composite [J]. Construction and Building Materials, 2013, 43: 399-407.
- [44] 丁兆东, 李杰. 混凝土疲劳分析方法综述 [J]. 力学与实践, 2015, 37 (1): 40-48.
- DING Zhao-dong, LI Jie. Review of the Analysis Methods of Fatigue of Concrete [J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37 (1): 40-48.
- [45] PARIS P C, GOMEZ M P, ANDERSON W P. A Rational Analytic Theory of Fatigue [J]. The Trend in Engineering, 1961, 13 (1): 9-14.
- [46] BAZANT Z P, PLANAS J. Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials [M]. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [47] PERDIKARIS P C, CALOMINO A M. Kinetics of Crack Growth in Plain Concrete [C] //Proceedings of the SEM/RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock. Berlin: Springer, 1987.
- [48] HILLERBORG A, MODEER M, PETERSSON P E. Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6 (6): 773-781.
- [49] MARIGO J J. Modelling of Brittle and Fatigue Damage for

- Elastic Material by Growth of Microvoids [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21 (4): 861-874.
- [50] LEMAITRE J. A Course on Damage Mechanics [M]. Berlin: Springer, 1996.
- [51] MAI S H, LE-CORRE F, FORET G, et al. A Continuum Damage Modeling of Quasi-static Fatigue Strength of Plain Concrete [J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 37: 79-85.
- [52] SUARIS W, OUYANG C S, FERNANDO V M. Damage Model for Cyclic Loading of Concrete [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1990, 116 (5): 1020-1035.
- [53] AL-GADHIB A H, BALUCH M H, SHAALAN A, et al. Damage Model for Monotonic and Fatigue Response of High Strength Concrete [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 2000, 9 (1): 57-78.
- [54] MINER M A. Cumulative Damage in Fatigue [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1945, 12 (3): 159-164.
- [55] 杨晓华, 姚卫星, 段成美. 确定性疲劳累积损伤理论进展 [J]. *中国工程科学*, 2003, 5 (4): 81-87.
YANG Xiao-hua, YAO Wei-xing, DUAN Cheng-mei. The Review of Ascertainable Fatigue Cumulative Damage Rule [J]. *Strategic Study of CAE*, 2003, 5 (4): 81-87.
- [56] BAZANT Z P, SCHELL W F. Fatigue Fracture of High-strength Concrete and Size Effect [J]. *ACI Materials Journal*, 1993, 90 (5): 472-478.
- [57] LEMAITRE J, PLUMTREE A. Application of Damage Concepts to Predict Creep-fatigue Failures [J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1979, 101 (3): 284-292.
- [58] MANSON S S, HALFORD G R. Practical Implementation of the Double Linear Damage Rule and Damage Curve Approach for Treating Cumulative Fatigue Damage [J]. *International Journal of Fracture*, 1981, 17 (2): 169-192.
- [59] HENRY D L. A Theory of Fatigue-damage Accumulation in Steel [J]. *Transaction of the ASME*, 1955, 77 (6): 913-918.
- [60] CARPINTERI A. Scaling Laws and Renormalization Groups for Strength and Toughness of Disordered Materials [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1994, 31 (3): 291-302.
- [61] 廉伟, 姚卫星. 复合材料层压板剩余刚度-剩余强度关联模型 [J]. *复合材料学报*, 2008, 25 (5): 151-156.
LIAN Wei, YAO Wei-xing. Residual Stiffness-residual Strength Coupled Model of Composite Laminates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25 (5): 151-156.
- [62] 邓宗才. 钢纤维混凝土等幅与变幅疲劳特性的试验研究 [J]. *山东建材学院学报*, 2000, 14 (1): 45-48.
DENG Zong-cai. Fatigue Fracture and Damage Properties of Steel Fiber Reinforce under Equal and Variable Amplitude Low Cyclic Loading [J]. *Journal of Shandong Institute of Building Materials*, 2000, 14 (1): 45-48.
- [63] CORTEN H T, DOLAN T J. Cumulative Fatigue Damage [C] // *Proceedings of the International Conference on Fatigue of Metals*. London: Institution of Mechanical Engineers, 1956.
- [64] FREUDENTHAL A M, HELLER R A. On Stress Interaction in Fatigue and a Cumulative Damage Rule [J]. *Journal of the Aerospace Sciences*, 1959, 26 (7): 431-442.
- [65] BUI-QUOC T. A Simplified Model for Cumulative Fatigue Damage with Interaction Effect [C] // *Proceedings of the 1982 Joint Conference on Experimental Mechanics*. Brookfield: Society for Experimental Stress Analysis, 1982: 144-149.
- [66] HALFORD G R. The Energy Required for Fatigue [J]. *Journal of Materials*, 1996, 3 (1): 13-18.
- [67] NIU X D, LI G X, LEE H. Hardening Law and Fatigue Damage of a Cyclic Hardening Metal [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1987, 26 (2): 163-170.
- [68] 龙渝川, 李正良. 模拟混凝土滞回行为的各向异性损伤模型 [J]. *工程力学*, 2011, 28 (8): 62-69.
LONG Yu-chuan, LI Zheng-liang. An Anisotropic Damage Model for Simulating the Hysteretic Behavior of Concrete under Cyclic Loading [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28 (8): 62-69.