

基于 CT 三维重构技术的沥青混凝土 疲劳损伤演化

周兴林^{1,2,3}, 刘洋^{1,2,3}, 柳璐^{1,2,3}

(1. 武汉科技大学机械自动化学院, 武汉 430081; 2. 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室, 武汉 430081; 3. 武汉科技大学教育部冶金设备与控制技术重点实验室, 武汉 430081)

摘要: 由于沥青混凝土内部结构极其复杂, 会在不同疲劳阶段呈现出不同的变化特征, 为了解沥青混凝土的疲劳损伤演化过程, 在 CT 三维重构技术的基础上对其展开研究。对沥青混凝土展开疲劳实验, 得到不同疲劳阶段的 CT 扫描图像和三维重构图像; 利用差分盒维数法计算 CT 三维重构图像分形维数, 得到疲劳损伤次数与分形维数之间的关系; 利用 Miner 线性疲劳损伤模型重新定义沥青混凝土的损伤变量, 得到疲劳损伤演化过程呈线性变化的结论。通过构造环氧沥青混凝土试件展开实验测试, 结果表明: 本文方法能准确计算出沥青混凝土压缩位移和裂缝体积与疲劳损伤之间的关系, 推理得到沥青混凝土的疲劳损伤演化过程。

关键词: CT 三维重构技术; 沥青混凝土疲劳损伤; 损伤变量; 线性变化

中图分类号: U334 文献标志码: A 文章编号: 1671-5497(2024)11-3192-07

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230631

Fatigue damage evolution of asphalt concrete based on CT 3D reconstruction technology

ZHOU Xing-lin^{1,2,3}, LIU Yang^{1,2,3}, LIU Lu^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 2. Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China; 3. Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Due to the extremely complex internal structure of asphalt concrete, it exhibits different changing characteristics at different fatigue stages. In order to obtain the fatigue damage evolution process of asphalt concrete, research was conducted based on CT three-dimensional reconstruction technology. Conducting fatigue tests on asphalt concrete, obtaining CT scan images and 3D reconstruction images of different fatigue stages; The difference box dimension method is used to calculate the Fractal dimension of 3D CT

收稿日期: 2023-06-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778509; 51827812; 52172392).

作者简介: 周兴林(1965-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 先进测控技术与应用及交通信息与控制.

E-mail: zhoujhsbf123@163.com

reconstruction image, and the relationship between fatigue damage times and Fractal dimension is obtained; Using Miner's linear fatigue damage model to redefine the damage variables of asphalt concrete, it is concluded that the fatigue damage evolution process exhibits linear changes. By constructing epoxy asphalt concrete specimens for experimental testing, the results show that the proposed method can accurately calculate the relationship between compressive displacement and crack volume of asphalt concrete and fatigue damage, and infer the fatigue damage evolution process of asphalt concrete.

Key words: CT 3D reconstruction technology; fatigue damage of asphalt concrete; damage variables; linear variation

0 引言

近年来,随着我国交通运输业的大力发展,对沥青混凝土的需求越来越大,对其疲劳损伤演化过程的分析就显得尤为重要。沥青混凝土有着非常复杂的内部结构,在不同的环境和作用下呈现出的特征也完全不同。从宏观层面来说,沥青混凝土表现出非线性、不规则形等特征,正好说明了其内部结构的复杂性。利用非均匀、不连续、疲劳损伤等概念对其内部结构进行分析,对沥青混凝土的性能提升和评价具有非常重要的意义。正因如此,国内外相关专家学者对沥青混凝土的内部结构展开了深入分析。

赵国良等^[1]针对钢筋混凝土的疲劳损伤和腐蚀问题,将杂散电流强度、应力水平以及氯离子浓度作为荷载控制的主要参数,对钢筋混凝土进行了腐蚀-弯曲疲劳损伤实验。实验结果表明:不同钢筋混凝土实验梁有着相同的挠度发展过程,基本都呈现为三阶段“S”形特征;根据实验梁挠度演化过程,建立了钢筋混凝土挠度演化半经验解析模型,进一步分析后得到疲劳损伤模型和使用寿命预测模型。陈双等^[2]利用有限元软件 ABAQUS 计算了混凝土道面的温度应力,得到混凝土道面温度应力与飞机尾喷温度场之间的变化规律;利用 MTS (Mechanical testing & simulation) 疲劳实验系统对混凝土道面的疲劳损伤特性进行研究,得到线性累积损伤曲线,从而得到使用年限与荷载之间的关系。

CT (Computed tomography) 三维重构技术的出现,为沥青混凝土疲劳损伤研究提供了一种新的思路,可以更加科学合理地给出沥青混凝土内部结构分布情况。将 CT 三维重构技术应用在沥青混凝土疲劳损伤演化的分析中,通过扫描沥青混凝土内部结构,得到不同疲劳阶段的结构变化

趋势;引入差分盒维数法,计算 CT 三维重构图像的灰度值变化情况,同时结合 Miner 线性疲劳损伤模型,得到沥青混凝土疲劳损伤呈线性变化的结论。通过构造沥青混凝土试件,利用本文方法对其进行实验测试,结果表明:压缩位移和裂缝体积的增加都会导致试件疲劳损伤值的增加,当出现快速增长趋势时,说明试件已经濒临损坏。

1 沥青混凝土疲劳实验及 CT 三维重构

1.1 沥青混凝土疲劳实验

利用应力控制的方法对沥青混凝土进行疲劳实验。设置加载频率为 60 Hz,荷载峰值和谷值^[3]保持不变,随着实验的进行逐渐增加加载频率,直至沥青混凝土出现损伤后停止。将沥青混凝土承受的强度极限^[4]设定为 $\sigma_b = 2.5 \text{ MPa}$,利用 $0.7\sigma_b$ 对混凝土进行加压,同时引入正弦波荷载完成对混凝土的疲劳实验。

1.2 CT 三维重构过程

利用 PHL IPS16 层螺旋 CT 机对沥青混凝土进行扫描,加载设备选用的是 CT-500 型便携式三轴试验机。将扫描层和层间隔设定为 5 mm、扫描电流设定为 300 μA 、扫描电压设定为 200 kV。在对试件进行不同次数的加载后,得到不同疲劳损伤阶段的 CT 扫描图像,如图 1 所示。

2 实验结果的分形维数计算及分析

2.1 分形维数的计算方法

沥青混凝土 CT 三维重构图像从本质上来说属于灰度图像的一种,本文利用盒维数法^[5,6]计算 CT 三维重构图像的分形维数。

盒维数法是利用 $r \times r$ 个盒子组成一个整体,覆盖物体后计算非空盒子的数量 $N(r)$ 。如果减小盒子尺寸,非空盒子的数量势必会增加,盒子个

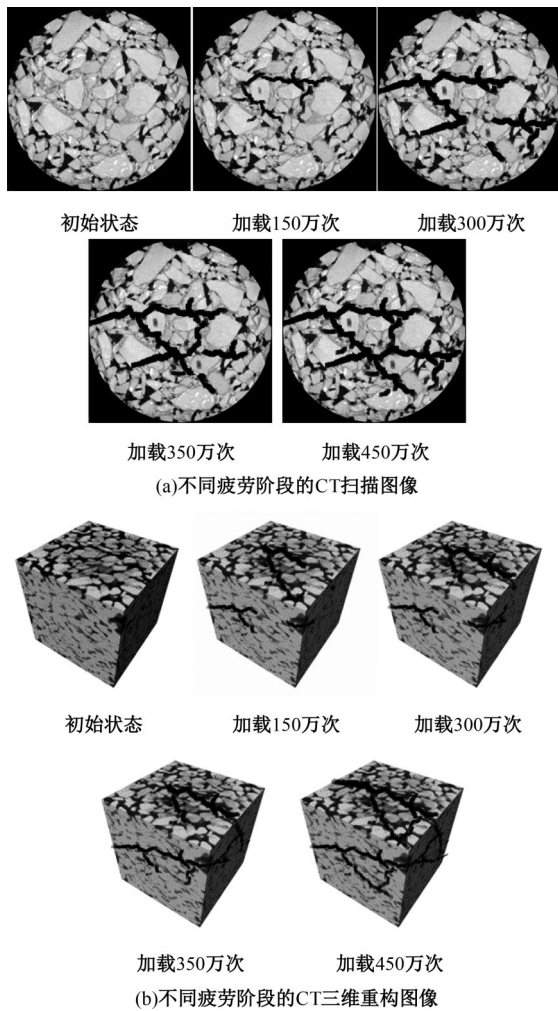


图1 沥青混凝土CT三维重构过程

Fig. 1 3D Reconstruction process of asphalt concrete CT

数取决于图像最小像素。为了控制误差,应根据图形大小选择合适的盒子尺寸。盒维数法在有限范围内具有标度不变性^[7],定义公式如式(1)所示:

$$\ln N(r) = \ln a - D \ln r \quad (1)$$

式中: D 为不规则闭区域内盒子的分形维数; a 为一个常数项。

由于CT三维重构图像灰度区域较大,盒维数法难以取得理想的分维结果,因此,对其做出部分改进,使其成为差分盒维数法^[8,9](DBC)。

DBC是在式(1)基础上延伸得到的。假设CT三维重构图像面积为 $M \times M$,当被分解后得到边长为 $s \times s$ 的小块(其中, s 是1与 $M/2$ 之间的整数),此时 $r = s/M$ 。从三维空间角度分析CT三维重构图像,假设像素点的平面位置为 (x, y) ,将 (x, y) 分割成 $s \times s$ 的小网格,每个小网格中都

有体积为 $s \times s \times s'$ 的小盒子。假设第 (i, j) 个小网格内最大灰度值位于小盒子 L 内,最小灰度值位于小盒子 K 内,即可得到盒子 N_r 在第 (i, j) 个小网格内的分布 $n_r(i, j)$ 为:

$$n_r(i, j) = L - K + 1 \quad (2)$$

利用式(2)计算所有盒子的分布,汇总后得到:

$$N(r) = \sum_{i,j} n_r(i, j) \quad (3)$$

引入最小二乘法^[10],对 $\lg N(r) - \lg(1/r)$ 进行拟合得到斜率^[11],即CT三维重构图像的分形维数值 W 。

2.2 CT三维重构图像的分形维数计算及结果分析

根据分形维数理论得知,分形维数值 W 可以在一定程度上反映CT三维重构图像所包含的信息^[12,13]。因此,可通过 W 值的变化得到沥青混凝土内部结构的变化趋势。在不同的疲劳阶段,CT三维重构图像所对应的分形维数如表1所示。

沥青混凝土疲劳损伤次数与分形维数之间的关系如图2所示。

表1 不同疲劳阶段的CT图像分形维数

Table 1 Fractal dimension of CT images in different fatigue stages

疲劳阶段	分形维数
初始状态	2.49
加载150万次	2.50
加载300万次	2.52
加载350万次	2.56
加载450万次	2.60

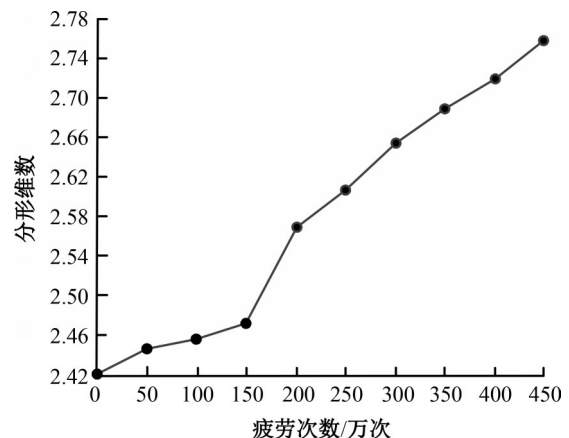


图2 沥青混凝土疲劳损伤次数与分形维数之间的关系
Fig. 2 Relationship between fatigue damage times of asphalt concrete and Fractal dimension

观察图 2 中分形维数的变化曲线可知,在疲劳次数为 0~150 万次时,分形维数增加较为缓慢,说明沥青混凝土内部仍然处于稳定状态,没有发生较大损伤;当疲劳次数为 150 万次以上时,分形维数增加迅速,直至沥青混凝土损坏时停止。说明沥青混凝土这一阶段中损伤急剧加重,内部结构变得更加复杂。

通过图 2 所示的疲劳损伤次数与分形维数之间的关系,计算沥青混凝土的损伤变量^[14,15] D :

$$D = \frac{D_m - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (4)$$

式中: D_m 为第 m 个图像块的分形维数; D_{\max} 、 D_{\min} 分别为图像块分形维数的最大值和最小值。

利用 Miner 线性疲劳损伤模型^[16,17]对损伤变量 D 重新作出定义,如式(5)所示:

$$D(M) = \frac{M}{M_f} \quad (5)$$

式中: M 为沥青混凝土承受的荷载次数^[18]; M_f 为沥青混凝土的疲劳寿命。

由式(5)可知,在荷载状态一定的前提下,沥青混凝土的疲劳损伤呈现线性变化趋势,每个荷载周期内的损伤是相同的,因此,认为沥青混凝土的疲劳损伤演化过程是线性^[19]的。

综上所述,通过计算 CT 三维重构图像的分形维数和沥青混凝土的损伤变量,得到不同阶段沥青混凝土的疲劳损伤演化特征^[20]。

3 疲劳损伤演化研究实验

为了验证本文方法在实际应用中是否可以针对沥青混凝土进行有效的疲劳损伤演化研究,对其展开实验测试。实验材料选择的是 A-70 沥青、环氧树脂、矿粉和辉绿岩,主剂与固化剂按照 56:44 的比例调配,沥青与环氧树脂按照 1:1 的比例调配。

3.1 制作试件

将材料清洗干净后进行烘干再筛分,称取一定的量进行加热处理。将加热完成的材料混合在一起,在 170 °C 的保温箱中放置 1 h。在温度为 165~170 °C 的环境中对材料进行双面击实 75 次,然后静置 1 d,再放入 60 °C 的保温箱中放置 4 d 即可得到实验试件。

3.2 实验过程及参数设置

3.2.1 材料压缩

微机控制电子万能试验机以 1 mm/min 的速

度对试件进行压缩,在 1.5~1.6 mm 时达到位移峰值,试件出现细微裂缝,肉眼难以识别到。因此,将位移设定为 2.0、2.2、2.4 mm,继续进行压缩,得到更加明显的裂缝。

3.2.2 CT 扫描

CT 扫描选用的是 ZKKS-MCT-Shaper 显微 CT 仪,能量为 60 kV、强度为 0.667 mA,调整层距到 0.1 mm,对沥青混凝土试件进行扫描。从扫描的图像中分别选取上部、中部、下部 3 幅图像用于实验分析。

3.3 实验结果及分析

3.3.1 CT 扫描结果分析

沥青混凝土试件 CT 扫描结果如图 3 所示,可以看出,试件中部产生的裂缝比上部和下部都要大,随着压缩位移的不断增大,裂缝也在不断扩展,直至损伤时才产生了较为明显的裂缝。

3.3.2 疲劳损伤演化结果分析

利用 Aviao 软件对沥青混凝土试件压缩前、后的孔隙体积进行整理计算,用压缩后的孔隙体积减去压缩前的孔隙体积,得到不同压缩位移下的沥青混凝土裂缝体积变化情况,结果如图 4 所示。

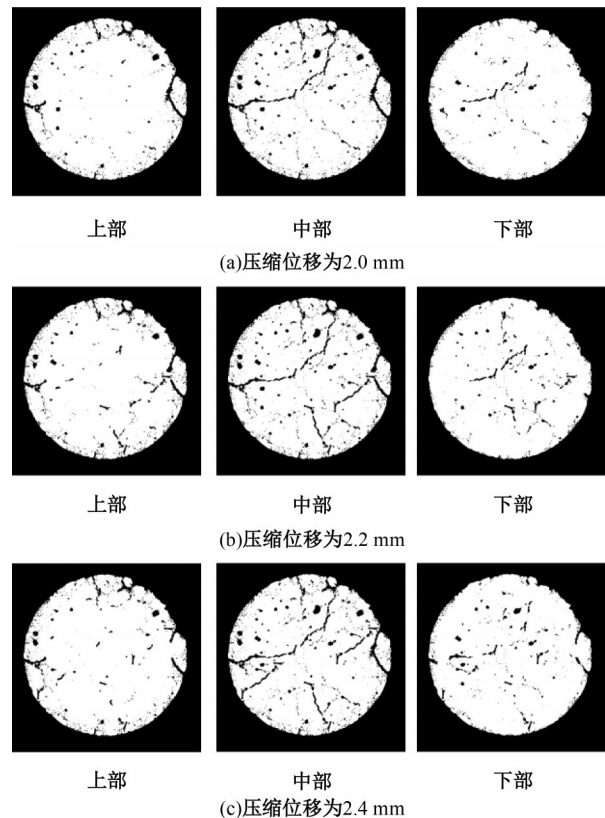


图 3 沥青混凝土试件 CT 扫描结果

Fig. 3 CT scan results of asphalt concrete specimens

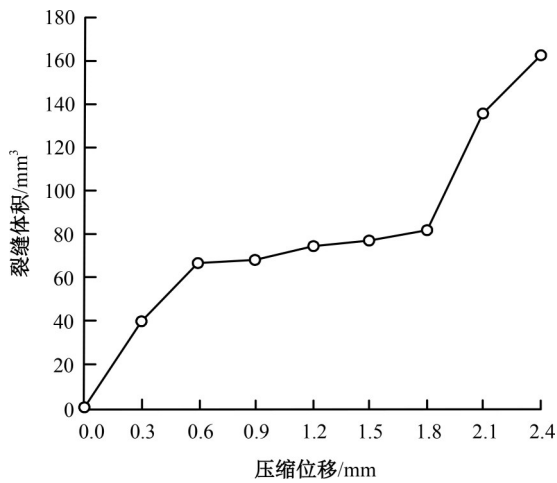


图4 压缩位移与沥青混凝土裂缝体积之间的变化曲线

Fig. 4 Curve of variation between compressive displacement and crack volume of asphalt concrete

通过观察图4可以看出,压缩位移的增加带动裂缝体积的增加,两者呈显著的正相关性。当压缩位移处于0.6~1.8 mm时,试件裂缝体积增加缓慢;而当压缩位移大于1.8 mm时,试件裂缝体积迅速扩大,说明此时试件已经接近损坏。

当沥青混凝土投入使用后,在有车辆经过时,沥青混凝土将处于移动荷载状态下,相较于静载状态来说,移动荷载更加复杂。为了对荷载状态下的沥青混凝土疲劳损伤演化过程进行研究,对不同车速下的静载和移动荷载之间的关系进行分析,具体如表2所示。

当车速为60 km/h时,静载压缩位移为0.43 mm,计算移动荷载下的压缩位移为 $0.43 \times (1 + 10.8\%) = 0.48$ mm,对应图4得到相应的裂缝体积。当处于移动荷载下,压缩位移和裂缝体积与试件疲劳损伤之间的关系如图5、图6所示。

由图5可知,当压缩位移大于1.5 mm时,沥青混凝土的疲劳损伤值迅速增加,二者之间呈线性增长趋势。再观察图6,随着裂缝体积的不断增长,沥青混凝土疲劳损伤值同样增加,但是增加趋势较为平缓,当裂缝体积为100 mm³时,疲劳损

表2 车速不同时,静载与移动荷载之间的关系

Table 2 Relationship between static load and moving load at different vehicle speeds

车速/ (km·h ⁻¹)	沥青混凝土 竖向位移/mm	与静力作用 相比/%
20	1.40	+7.7
60	1.44	+10.8
100	1.57	+20.8
140	1.72	+32.2

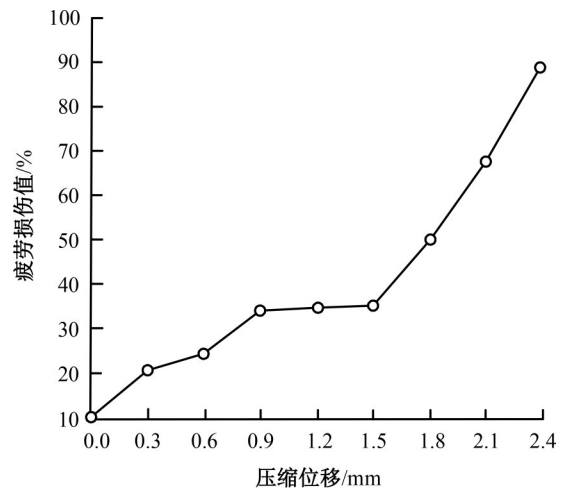


图5 压缩位移与疲劳损伤的关系图

Fig. 5 Diagram of the relationship between compressive displacement and fatigue damage

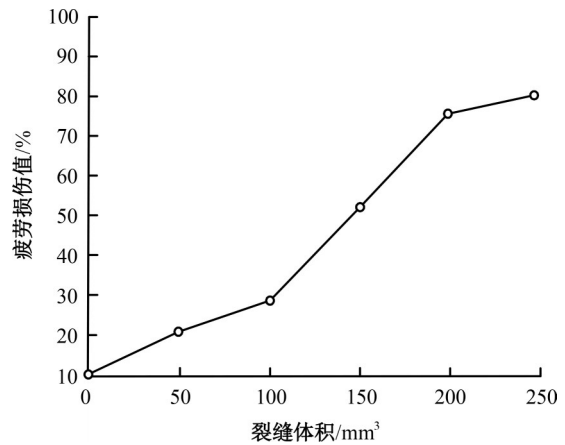


图6 裂缝体积与疲劳损伤的关系图

Fig. 6 Diagram of the relationship between crack volume and fatigue damage

伤值迅速增加,当达到75%时,又回归平缓状态。

综合图5和图6可得,沥青混凝土试件在移动荷载的作用下,裂缝体积和疲劳损伤值都出现了增长趋势,当达到一定值后,疲劳损伤值增加迅速,说明此时试件已经濒临报废。

4 结 论

(1) 沥青混凝土的疲劳损伤演化过程具有一定的分形特征。通过对试件的分形维数进行计算,可以更加清楚地了解不同疲劳阶段的沥青混凝土内部结构变化情况。

(2) 由于CT三维重构图像的灰度区域范围较大,在对传统盒维数法做出部分改进后,利用差分盒维数法更加精确地计算出图像中的灰度值分布情况。

(3) 实验测试结果表明:随着压缩位移的不断

增加,沥青混凝土的疲劳损伤值也随之增加;不仅如此,裂缝体积的增加也使疲劳损伤值增加。当损伤值出现快速增长时,说明沥青混凝土已经濒临损坏。

参考文献:

- [1] 赵国良,董成,王雷. 荷载多变的混凝土弯曲疲劳数值仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 343-347.
Zhao Guo-liang, Dong Cheng, Wang Lei. Numerical simulation of bending fatigue of concrete with variable load[J]. Computer Simulation, 2022, 39(9): 343-347.
- [2] 陈双,莫忧,胡建. 高温尾喷作用下水泥混凝土道面的疲劳损伤[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2021, 53(2): 194-201.
Chen Shuang, Mo You, Hu Jian. Fatigue damage of cement concrete pavement under high temperature tail spray[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology(Natural Science Edition), 2021, 53(2): 194-201.
- [3] 马海鹏,余沛. 高寒高海拔地区玄武岩纤维沥青混凝土损伤自愈合性能分析[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(8): 2803-2810.
Ma Hai-peng, Yu Pei. Analysis of damage self-healing performance of basalt fiber asphalt concrete at high-cold and high-altitude area[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(8): 2803-2810.
- [4] 杨荣周,郑强强,陈佩圆,等. 分级等荷循环受压下橡胶水泥砂浆的疲劳损伤演化[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 961-969.
Yang Rong-zhou, Zheng Qiang-qiang, Chen Pei-yuan, et al. Fatigue and damage evolution characteristics of rubber cement mortar under graded constant load cyclic compression[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 961-969.
- [5] 张培,任青文. 循环荷载下混凝土疲劳损伤累积分析的颗粒流黏结退化模型[J]. 工程力学, 2021, 38(S1): 100-109.
Zhang Pei, Ren Qing-wen. Particle bond-degradation model for cumulative damage analysis of concrete under cyclic loading[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(S1): 100-109.
- [6] 许见超,吴洁琼,刁波,等. 配筋率和氯腐蚀环境对钢筋混凝土梁疲劳损伤累积的影响[J]. 铁道建筑, 2021, 61(2): 16-19.
Xu Jian-chao, Wu Jie-qiong, Diao Bo, et al. Impact of reinforcement ratio and chloride-corrosion environment on fatigue damage accumulation of reinforced concrete beams[J]. Railway Engineering 2021, 61(2): 16-19.
- [7] 丁兆东,刘剑锋. 基于疲劳损伤模型的钢筋混凝土梁疲劳可靠度分析[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2022, 45(7): 931-938.
Ding Zhao-dong, Liu Jian-feng. Fatigue reliability analysis of reinforced concrete beams based on fatigue damage model[J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science Edition), 2022, 45(7): 931-938.
- [8] 吴洁琼,陈圣刚,赵体波,等. 疲劳损伤与氯腐蚀作用后钢筋混凝土梁疲劳寿命预测[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(S1): 69-76.
Wu Jie-qiong, Chen Sheng-gang, Zhao Ti-bo, et al. Fatigue life prediction of fatigue damaged and chloride corroded RC beams[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(S1): 69-76.
- [9] 丑佳璇,张智涛,张建仁,等. NSM CFRP-混凝土界面疲劳黏结性能研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(2): 234-246.
Chou Jia-xuan, Zhang Zhi-tao, Zhang Jian-ren, et al. Study on fatigue bond behavior of NSM CFRP-concrete interface[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(2): 234-246.
- [10] 徐晨,肖涵,王巍. 超高性能混凝土组合桥面板集群化短焊钉抗疲劳特性[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2022, 50(5): 667-677.
Xu Chen, Xiao Han, Wang Wei. Anti-fatigue characteristics of short grouped-stud in ultra-high performance concrete composite bridge decks[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2022, 50(5): 667-677.
- [11] Xu L, Liu H, Yu Z. A coupled model for investigating the interfacial and fatigue damage evolution of slab tracks in vehicle-track interaction[J]. Applied Mathematical Modelling, 2022, 101: 772-790.
- [12] Zhang D, Xie Z, Ueda T, et al. Assessment of fatigue damage of prefabricated concrete composite beams with piezomagnetic signal[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 547: No. 168931.
- [13] Jia M, Wu Z, Yu R C, et al. Residual fracture energy of concrete suffering from fatigue loading[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 255: No. 107956.
- [14] Song Z, Konietzky H, Cai X. Modulus degradation of concrete exposed to compressive fatigue loading: insights from lab testing[J]. Structural Engineering and

- Mechanics, 2021, 78(3): 281-296.
- [15] Sultani M M, Dong L, Chang W G. Corroded post-tensioned concrete beams fatigue behavior under high cyclic loading[J]. International Organization of Scientific Research, 2022, 12(3): 1-15.
- [16] Li W, Xiong L, Wang X, et al. Theoretical study on fatigue cumulative damage model of nanometer concrete[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 787(1): No. 012183.
- [17] Wang W, Shen A, He Z, et al. Mechanism and erosion resistance of internally cured concrete including super absorbent polymers against coupled effects of acid rain and fatigue load[J]. Construction and Building Materials, 2021, 290(12): No. 123252.
- [18] Song Z, Konietzky H, Herbst M, et al. Fatigue and micro-seismic behaviors of concrete disks exposed to cyclic brazilian testing: a numerical investigation based on a 3D particle-based model[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 155: No. 106629.
- [19] Dong G, Wu J, Zhao X. Fatigue performance of recycled aggregate concrete beams with corroded steel reinforcement[J]. ACI Structural Journal, 2022, 119(2): 123-137.
- [20] Sainzaja J A, Carrascal I A, Polanco J A, et al. Effect of temperature on fatigue behaviour of self-compacting recycled aggregate concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2022, 125: No. 104309.