

DOI: 10.7672/sgjs2026010141

改性聚氨酯混凝土弯曲疲劳性能研究*

王路杰¹, 徐斌², 徐速², 陈仕伟¹, 丁勇¹

(1. 宁波大学土木工程系, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波路宝科技实业集团有限公司, 浙江 宁波 315800)

[摘要] 改性聚氨酯混凝土的力学性能还不明确, 特别是对其疲劳性能的了解还很薄弱。对一种新型的改性聚氨酯混凝土在室温下的抗折强度和弯曲疲劳性能展开研究。首先制备了长方体的改性聚氨酯混凝土试件, 并通过抗折试验获取了抗折强度。然后, 对改性聚氨酯长方体试件进行了四点弯曲疲劳试验, 获取了其在循环荷载下的疲劳寿命。最后, 引入失效概率的概念, 建立了改性聚氨酯混凝土的疲劳方程。研究表明: 改性聚氨酯混凝土的疲劳破坏形式为脆性破坏, 其疲劳寿命服从双参数 Weibull 分布, 通过构建不同失效概率下的双对数疲劳寿命方程, 建立了改性聚氨酯混凝土疲劳性能的分析方法与基础数据。

[关键词] 混凝土; 改性聚氨酯; 失效概率; 疲劳方程; 抗折强度; 试验

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)01-0141-05

Research on Flexural Fatigue Property of Modified Polyurethane Concrete

WANG Lujie¹, XU Bin², XU Su², CHEN Shiwei¹, DING Yong¹

(1. Department of Civil Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

2. Ningbo Roaby Technology Industrial Group Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315800, China)

Abstract: The mechanical properties of modified polyurethane concrete are, however, not clear, especially the understanding of its fatigue performance, which is still very weak. The flexural strength and flexural fatigue properties of a new type of modified polyurethane concrete at room temperature were studied. Firstly, the cuboid modified polyurethane concrete specimens were prepared, and the flexural strength was obtained by flexural test. Then, the four-point bending fatigue test of the modified polyurethane cuboid specimen was carried out to obtain its fatigue life under cyclic loading. Finally, the fatigue equation of modified polyurethane concrete was established by introducing the concept of failure probability. The results indicate that the fatigue failure mode of modified polyurethane concrete is brittle failure, and its fatigue life follows the two-parameter Weibull distribution. By constructing the double logarithmic fatigue life equation under different failure probabilities, the analysis method and basic data of the fatigue performance of modified polyurethane concrete are established.

Keywords: concrete; modified polyurethane; failure probability; fatigue equation; flexural strength; tests

0 引言

桥面铺装是钢桥的重要组成部分, 它具有直接承受车辆荷载、保护钢结构的重要作用^[1]。我国的钢桥面铺装材料多采用沥青玛蹄脂碎石、环氧沥青混凝土、高温浇筑式沥青混合料等柔性材

料^[2]。但是, 工程实践表明, 这些铺装材料在车辆荷载的循环作用下, 容易产生脱层、推移、凹坑和车辙等病害, 特别是在重载交通情况下, 使用寿命较短^[3]。为此, 研发一种新型的非水泥基复合材料——改性聚氨酯混凝土, 用于解决钢桥面铺装的易损性问题^[4]。

因为聚合物混凝土具有抗渗性及抗冻性突出、耐磨、抗冲击、干缩较小、后期强度高、浇筑时流动性好等优点, 逐渐应用于桥梁工程中^[5]。1970年, 芬兰 URETEK 公司研发了一种新型的聚氨酯混凝

* 国家自然科学基金(52078256); 浙江省自然科学基金(LTGS24E080002); 宁波市交通运输科技项目(202447)

[作者简介] 王路杰, 硕士研究生, E-mail: 756767924@qq.com

[通信作者] 丁勇, 教授, 博士生导师, E-mail: dinyong@nbu.edu.cn

[收稿日期] 2025-06-25

土(Polyurethane Concrete, PUC), 该材料可用于房屋、桥梁和道路加固。2005年, Nelsen^[6]总结了1995—2003年间各种美国桥梁关于表面处理的案例, 发现经过聚氨酯材料处理的桥面, 相比于硅基密封剂和环氧树脂这两种材料处理的桥面, 使用寿命明显更长。Hussain等^[7]评估了PUC材料的抗压强度、弯曲强度、应力应变关系和粘结强度等性能, 并与传统混凝土进行了比较, 结果显示该材料相比于传统混凝土, 拥有更好的强度和粘结性能。近年来, 我国在这种新材料的研发上也取得了较大进展, 并在钢桥面铺装、路面铺装上有了一些成功应用^[8-10]。雷建华等^[11]研究了不同温度状态下改性聚氨酯混凝土的单轴受压性能和本构关系。赵玺等^[12]研究了改性聚氨酯混凝土抗渗性、抗冻性和耐久性, 发现这些性能都很优异。

综合以往的研究可以发现, 改性聚氨酯混凝土的拉压、抗渗、抗冻等基本力学性能都已展开。但是, 对传统混凝土已经进行了大量的疲劳性能研究^[13-15], 改性聚氨酯混凝土的相关研究还非常少。因此, 当改性聚氨酯混凝土用于钢桥面铺装, 承受反复作用的车辆动力荷载时, 其疲劳耐久性成为研究重点。基于此, 本文对一种用于钢桥面铺装的改性聚氨酯混凝土进行了抗折试验和弯曲疲劳性能试验, 获取了材料的疲劳寿命。在此基础上, 提出了考虑失效概率的改性聚氨酯混凝土疲劳方程, 从而为其长期服役性能提供了理论依据。

1 改性聚氨酯混凝土制备

试验采用的改性聚氨酯混凝土由如下原材料制备而成: ①集料, 根据测试标准, 含水率<3%, 粗骨料为连续级配的天然砾石与机制砂, 骨料粒径约5~10mm, 颗粒整体圆润扁平, 针片状颗粒含量<8%, 细度模数约为3.4, 表观密度约为2 660kg/m³, 细骨料为连续集配的天然河砂, 细度模数约为2.5, 表观密度约为2 580kg/m³; ②改性聚氨酯结合料, 由异氰酸酯、多元醇、甲基乙二醇胺、异丁酸锌等多组热固性高分子材料按比例混合而成; ③助剂, 包括甲苯二异氰酸酯、乙酸乙酯等添加剂。

上述原材料在混合反应器中搅拌反应形成改性聚氨酯混凝土, 倒入模具后形成试验试件(见图1), 试件为400mm(长)×100mm(宽)×100mm(高)的长方体。

2 改性聚氨酯混凝土抗折试验

2.1 试验方案

对试件进行抗折试验, 试验温度为20℃。试验参照GB/T 50081—2019《混凝土物理性能

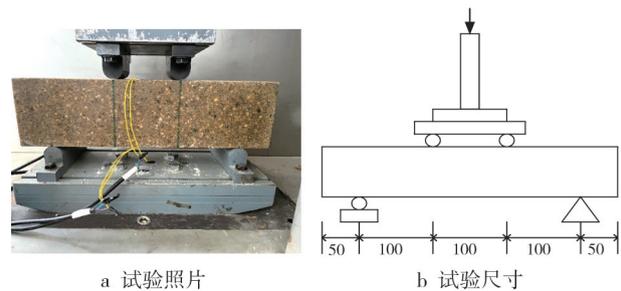


图1 抗折试验

Fig. 1 Flexural experiment

试验方法标准》中的混凝土抗折试验方法, 采用三分点加载方式测定改性聚氨酯混凝土的弯曲抗折强度, 如图1a所示。试验底座及加载头采用定制硬钢支承, 顶部圆弧直径为15mm, 通过螺栓固定在底部钢板上。试验前, 需将试件表面擦拭干净, 按图1b所示的形式固定试件, 在试件受力点做好标记, 安装时偏差在1mm以内, 以保证试验的准确性。在试件受拉边缘底面贴应变片, 用应变箱全程采集并记录试件底部试验段的拉伸应变。

2.2 改性聚氨酯混凝土抗折试验结果

抗折试验结果如表1所示。由表1可知, 常温下改性聚氨酯混凝土的抗折强度平均值为10.84MPa, 远大于C50混凝土的抗折强度5.5MPa。

表1 试件抗折强度

Table 1 Flexural strength of specimens

编号	破坏荷载/ kN	抗折强度/ MPa	抗折强度 均值/MPa
试件1	42.58	10.86	
试件2	41.05	10.47	10.84
试件3	43.86	11.18	

3 改性聚氨酯混凝土疲劳试验

3.1 试验方案

疲劳试验试件与抗折试验相同, 试验温度为20℃。弯曲疲劳试验的加载位置与图1相同, 加载设备为PWS-250结构疲劳试验机。

疲劳试验时, 对不同应力水平分组试验, 应力水平 S 定义为:

$$S = \frac{\sigma_{\max}}{f_t} \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 为试验中采用的疲劳应力上限; f_t 为试件抗折强度, 由表1确定。

疲劳试验中的试验应力水平 S 分别采用0.8, 0.75, 0.65, 0.55这4组数值, 每组试验加载3个试件, 因此共计12个疲劳试件。为了防止试验时因压

力不足导致加载点与试件表面脱空,设置应力比 r , 其表达式为:

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (2)$$

式中: σ_{\min} 为疲劳试验应力下限; σ_{\max} 为疲劳试验应力上限。

本试验中应力比 r 设置为 0.1, 荷载波形采用正弦波, 加载曲线如图 2 所示。

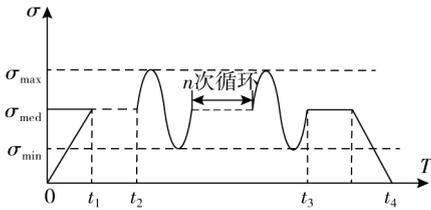


图 2 疲劳试验加载曲线

Fig. 2 Loading curve of fatigue test

3.2 改性聚氨酯混凝土弯曲疲劳试验结果

试验过程中发现, 所有试件均表现为脆性破坏, 在上部两个加载点之间突然断裂为两段且完全分离, 破坏状态如图 3 所示。



图 3 典型的弯曲疲劳破坏

Fig. 3 Typical bending fatigue failure

弯曲疲劳试验结果如表 2 所示。结果表明, 改性聚氨酯混凝土的弯曲疲劳寿命随着应力水平的提高而降低, 当应力水平为 0.55 时, 平均疲劳寿命为 31.3 万次, 当应力水平升高到 0.65 及以上时, 疲劳寿命下降到 5 万次以下。

4 弯曲疲劳寿命结果分析

4.1 疲劳寿命统计分析

改性聚氨酯混凝土疲劳破坏是个随机过程, 针对这一特点, 可以将可靠度理论应用于改性聚氨酯混凝土的疲劳分析中。因此, 可以在混凝土的疲劳方程中引入概率统计方法, 建立相关模型, 以便为实际工程材料设计提供理论指导。作为一种概率密度分布函数, Weibull 分布能够在指定失效概率的基础上给出构件的最小安全寿命, 在材料疲劳性能研究领域得到越来越广泛的应用^[16]。

表 2 改性聚氨酯混凝土疲劳寿命

Table 2 Fatigue life of modified PUC

应力水平	荷载上限/kN	试件编号	疲劳寿命/万次	平均疲劳寿命/万次
0.55	23.38	1	28.4	31.3
		2	30.4	
		3	35.2	
0.65	27.63	4	3.4	4.1
		5	4.3	
		6	4.5	
0.75	31.88	7	1.8	2.6
		8	2.5	
		9	3.5	
0.8	34.00	10	0.6	1.1
		11	1.2	
		12	1.5	

双参数 Weibull 分布函数表达式为:

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{N}{N_a}\right)^b\right] \quad (3)$$

式中: P 为试件产生疲劳破坏的概率; N 为试件在应力水平 S 下经历的循环荷载次数; b 为威布尔形状参数; N_a 为威布尔尺度参数。

对式(3)两次取自然对数可得:

$$\ln \ln \frac{1}{1-P} = b \ln N - b \ln N_a \quad (4)$$

对于式(4), 令 $Y = \ln \ln \frac{1}{1-P}$, $X = \ln N$, $A = -b \ln N_a$,

可得:

$$Y = bX + A \quad (5)$$

改性聚氨酯混凝土弯曲疲劳寿命 N 对应的失效概率 P 又可表示为:

$$P = \frac{k}{m+1} \quad (6)$$

式中: m 为在某一应力水平下所用的疲劳试件总数; k 表示该应力水平下试件疲劳寿命值从低到高的排列序数^[17]。

根据式(5), 利用数据处理软件对疲劳试验所得不同应力水平下所有组别的弯曲疲劳寿命值进行线性拟合, 所得的双参数威布尔分布回归方程的各项参数值如表 3 所示。

表中 R^2 被称为决定系数, 又称拟合优度, 被用来描述数据对模型拟合程度的好坏, 表示自变量 X 对因变量 Y 的解释程度。 R^2 的取值在 $[0, 1]$ 之间, 越接近于 1, 说明线性回归拟合效果越好。 R^2 的计算公式^[18]:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

式中: n 为样本数量; y_i 为样本值; \hat{y} 为拟合值; \bar{y} 为样本平均值。

表 3 改性聚氨酯混凝土疲劳寿命的威布尔分布检验结果

Table 3 Weibull distribution test results for fatigue life of modified PUC

应力水平	b	A	N_a	R^2
0.80	1.678	-15.93	132 612	0.945
0.75	2.418	-24.95	30 302	0.990
0.65	5.308	-56.74	43 853	0.921
0.55	6.911	-87.86	332 032	0.928

在试验所选每一组应力水平下,决定系数 R^2 均大于 0.9,说明该试验结果线性相关性较好,试验所得的改性聚氨酯混凝土疲劳寿命在双参数 Weibull 分布理论检验下是符合要求的,获取的疲劳寿命结果具有可信度。

4.2 S-N 疲劳方程

不同应力水平 S 下,通过疲劳试验均可得到对应的疲劳寿命值 N ,可以组成纵坐标为循环应力幅 S 、横坐标为疲劳寿命 N 的 $S-N$ 曲线,通常采用单对数疲劳方程或者双对数疲劳方程拟合 $S-N$ 曲线。使用单对数疲劳方程时不能满足 N 趋于无穷大而 S 趋于无穷小时的边界条件,而双对数方程则可以很好地满足上述条件,故本文采用双对数疲劳方程对改性聚氨酯混凝土的疲劳性能进行描述。

双对数疲劳方程的表达式如下:

$$\lg S = a - b \lg N \tag{8}$$

式中: S 为应力水平; N 为试件在应力水平 S 下经历的循环荷载次数; a, b 为常数。

将不同应力水平下的改性聚氨酯混凝土疲劳寿命值代入式(8)中进行线性回归,即可得到常温状态下改性聚氨酯混凝土的 $S-N$ 疲劳方程,具体回归曲线如图 4 所示。回归分析得到常温下改性聚氨酯混凝土弯曲疲劳方程为:

$$\lg S = -0.113\ 911 \lg N + 0.361\ 6 \tag{9}$$

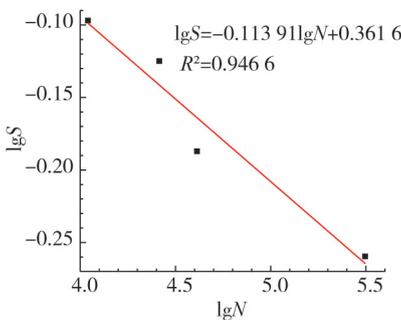


图 4 改性聚氨酯混凝土弯曲疲劳方程曲线
Fig. 4 S-N curve of modified PUC

4.3 不同失效概率的 P-S-N 疲劳方程

对式(3)两边取两次对数可得:

$$\ln \ln \frac{1}{1-P} = b \ln \left(\frac{N}{N_a} \right) \tag{10}$$

进一步可以推导出不同失效概率下疲劳寿命预测值表达式:

$$N_p = N_a \left[\ln \frac{1}{1-P} \right]^{\frac{1}{b}} \tag{11}$$

式中: N_p 为失效概率 P 对应的改性聚氨酯混凝土疲劳寿命预测值; b 为 Weibull 分布形状参数; N_a 为 Weibull 分布尺度参数; P 为试件产生疲劳破坏的概率。

材料的弯曲疲劳寿命预测值可由式(11)结合表 3 中的具体参数得出。不同失效概率下的改性聚氨酯混凝土弯曲疲劳寿命设计值如表 4 所示。

表 4 考虑失效概率的改性聚氨酯混凝土弯曲疲劳寿命 N_p

Table 4 Flexural fatigue life of modified PUC with probability of failure

应力水平 S	失效概率 P				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
0.80	0.35	0.54	0.72	0.89	1.07
0.75	1.19	1.63	1.98	2.30	2.60
0.65	2.87	3.31	3.61	3.86	4.09
0.55	24.00	26.70	28.60	30.10	31.50

对于不同的失效概率 P ,都有对应的 $S-N$ 曲线,将其称为 $P-S-N$ 曲线。根据式(8),对表 4 中的数据进行线性回归拟合,可以得到不同失效概率下的改性聚氨酯混凝土 $P-S-N$ 疲劳方程曲线,具体回归曲线如图 5 所示。所得的回归方程对应的各项参数具体值如表 5 所示。

表 5 改性聚氨酯混凝土考虑失效概率的弯曲疲劳方程

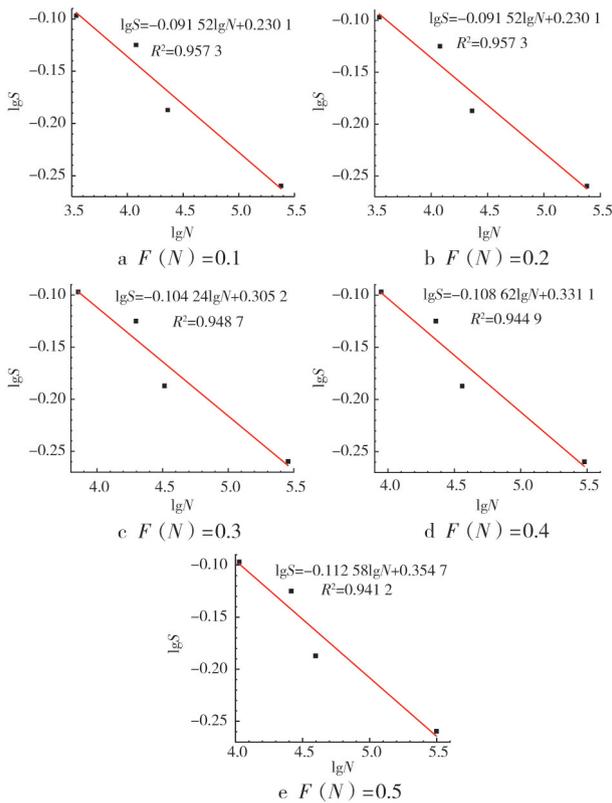
Table 5 Flexural fatigue equations for modified PUC with failure probabilities

弯曲疲劳方程	P	R^2
$\lg S = -0.092\ 021 \lg N + 0.234\ 4$	0.1	0.973\ 7
$\lg S = -0.099\ 641 \lg N + 0.278\ 6$	0.2	0.966\ 9
$\lg S = -0.104\ 881 \lg N + 0.309\ 2$	0.3	0.960\ 3
$\lg S = -0.109\ 151 \lg N + 0.334\ 3$	0.4	0.953\ 5
$\lg S = -0.112\ 941 \lg N + 0.356\ 7$	0.5	0.946\ 3

5 结语

1) 改性聚氨酯混凝土具有优异的抗折性能,其抗折强度约为普通混凝土的 2 倍。

2) 改性聚氨酯混凝土的疲劳破坏形式均表现为脆性破坏,其弯曲疲劳寿命随应力水平的提高而降低,应力水平高于 0.55 时疲劳寿命快速下降。

图5 改性聚氨酯混凝土 $P-S-N$ 疲劳方程Fig. 5 $P-S-N$ fatigue equation for modified PUC

3) 改性聚氨酯混凝土疲劳寿命基本服从双参数 Weibull 分布, 并通过数学模型建立了双对数的 $S-N$ 疲劳方程曲线和不同失效概率下的 $P-S-N$ 双对数疲劳方程曲线, 为改性聚氨酯混凝土在桥面铺装中的长期耐久性分析提供了基础的材料性能数据。

参考文献:

- [1] GAO H S, SUN Q S. Study on fatigue test and life prediction of polyurethane cement composite (PUC) under high or low temperature conditions [J]. Advances in materials science and engineering, 2020, 2020(1): 2398064.
- [2] LIU Y J, SHEN Z L, LIU J, et al. Advances in the application and research of steel bridge deck pavement [J]. Structures, 2022, 45: 1156-1174.
- [3] 王民, 万国琪, 胡德勇, 等. 钢桥面浇注式沥青+改性沥青 SMA 铺装结构疲劳抗裂性能评估 [J]. 城市道桥与防洪, 2022(5): 172-175, 21-22.
WANG M, WAN G Q, HU D Y, et al. Evaluation on fatigue cracking resistance of gussasphalt + modified asphalt SMA pavement structure of steel bridge deck [J]. Urban roads bridges & flood control, 2022(5): 172-175, 21-22.
- [4] 徐斌, 牛石磊, 王仁贵, 等. 钢桥面聚酯型聚氨酯混凝土路用性能试验 [J]. 土木工程与管理学报, 2023, 40(6): 9-14.
XU B, NIU S L, WANG R G, et al. Experiment on road performance of polyester polyurethane concrete for steel bridge deck [J]. Journal of civil engineering and management, 2023, 40(6): 9-14.
- [5] 仓定仲, 仓定稳. 聚合物水泥混凝土研究现状 [J]. 科技经济

市场, 2020(4): 5-6.

CANG D Z, CANG D W. Research status of polymer cement concrete [J]. Science & technology econy market, 2020(4): 5-6.

- [6] NELSEN T. Performance of concrete bridge deck surface treatments [D]. Provo: Brigham Young University, 2005.
- [7] HUSSAIN H K, LIU G W. Experimental study to investigate mechanical properties of new material polyurethane-cement composite (PUC) [J]. Construction and building materials, 2014, 50: 200-208.
- [8] 陈李峰, 李款, 潘友强, 等. RBPC 钢箱梁桥面铺装结构及工程应用 [J]. 施工技术 (中英文), 2025, 54(8): 131-137.
CHEN L F, LI K, PAN Y Q, et al. Structure and engineering application of RBPC steel box girder deck pavement [J]. Construction technology, 2025, 54(8): 131-137.
- [9] NIU S, WANG Z. Experimental investigation on flexural performance of polyester polyurethane concrete steel bridge deck composite structure [J]. Case studies in construction materials, 2023, 18.
- [10] 徐斌, 徐速, 吕建华, 等. 聚合物混凝土发展及桥梁工程应用研究 [J]. 混凝土世界, 2021(10): 89-92.
XU B, XU S, LÜ J H, et al. Research on the development and application of polymer concrete in bridge engineering [J]. China concrete, 2021(10): 89-92.
- [11] 雷建华, 徐斌, 何旭辉. 改性聚氨酯混凝土受压性能及本构关系研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(1): 278-288.
LEI J H, XU B, HE X H. Research on compressive properties and constitutive relation of modified polyurethane concrete [J]. Journal of railway science and engineering, 2023, 20(1): 278-288.
- [12] 赵玺, 王佐才, 王均义, 等. 钢桥面铺装 ECO 改性聚氨酯混凝土耐久性能研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 726-731.
ZHAO X, WANG Z C, WANG J Y, et al. Research on the durability of ECO modified polyurethane concrete on steel bridge deck pavement [J]. Industrial construction, 2023, 53(S2): 726-731.
- [13] HUANG H, AN M, WANG Y, et al. Effect of environmental thermal fatigue on concrete performance based on mesostructural and microstructural analyses [J]. Construction and building materials, 2019, 207: 450-462.
- [14] SUN X, TIAN Y, YIN W, et al. Effect of free water on fatigue performance of concrete subjected to compressive cyclic load [J]. Construction and building materials, 2022, 318: 125995.
- [15] LUO S, SU Y, ZHANG Q, et al. Effects of steel fibers on the flexural fatigue performance of recycled aggregate concrete [J]. Construction and building materials, 2024, 412: 134709.
- [16] 杜仕朝, 康春霞, 郭晓光, 等. 3D 打印混凝土弯曲疲劳性能研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(8): 3237-3247.
DU S C, KANG C X, WU X G, et al. Research on bending fatigue performance of 3D printed concrete [J]. Journal of railway science and engineering, 2024, 21(8): 3237-3247.
- [17] SINGH S P, KAUSHIK S K. Fatigue strength of steel fibre reinforced concrete in flexure [J]. Cement and concrete composites, 2003, 25(7): 779-786.
- [18] JIA H Q. Applied Statistics [M]. Beijing: University of International Business and Economics Press, 2006.