

# 基于能量法的超高韧性纤维混凝土 疲劳损伤特性

顾章义, 张治成, 李 辉

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310012)

**摘 要:**为探究超高韧性纤维混凝土材料(UHTCC)在交通荷载下的疲劳损伤性能,通过不同应力水平、频率下的单轴压缩试验得到了应力-应变曲线,结果表明:随着循环次数的增加,疲劳曲线呈疏-密-疏的 3 阶段规律,同时应变增长非线性程度逐渐增大。加载频率和应力水平的增加均会降低试件的疲劳寿命。在单轴压缩循环试验基础上建立本构模型,模型预测应力路径与试验结果吻合良好,验证了模型的正确性和适用性。以能量法为基础,采用耗散能指标评价 UHTCC 疲劳损伤程度,得到了初始损伤(2%左右)和疲劳损伤因子发展规律。此外,研究还发现在高应力比条件下疲劳开裂具有突然性。

**关键词:**超高韧性纤维混凝土材料;能量法;本构模型;疲劳;耗散能

**中图分类号:**U414 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2022)07-1598-09

**DOI:**10. 13229/j. cnki. jdxbgxb20210129

## Fatigue damage characteristics of ultra high toughness cementitious composite based on energy method

GU Zhang-yi, ZHANG Zhi-cheng, LI Hui

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** Experimental study of cylindrical samples under uniaxial cyclic compression was conducted to explore the effect of loading frequency and stress level on fatigue performance of ultra high toughness cementitious composite (UHTCC) under traffic loading. The results show that accumulation rate of stress-cycle curves could be disassembled into three stage with increase in number of cycles. Meanwhile, nonlinearity of strain increases gradually. The increase of loading frequency and stress level would reduce the fatigue life of specimens. The constitutive model for UHTCC was proposed based on the basis of uniaxial compression cyclic tests. Moreover, the stress path predicted by the model is in good agreement with the experimental results, which verifies the correctness and applicability of this model. Fatigue damage propagation is characterized by dissipated strain energy (DSE) based on energy-based mechanistic approach (EBM). The initial damage (about 2%) is obtained and the development law of fatigue damage factor is revealed. Additionally, the fatigue cracking is fast at high stress ratio.

收稿日期:2021-02-18.

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LZ21E080002).

作者简介:顾章义(1991-),男,博士研究生.研究方向:半刚性基层增韧抗裂.E-mail: zhangyigu@zju.edu.cn

通信作者:张治成(1977-),男,副教授,博士.研究方向:桥梁结构监控与检测技术.E-mail: jszcc@zju.edu.cn

**Key words:** ultra high toughness cementitious composite; energy-based mechanistic approach; constitutive model; fatigue; dissipated strain energy

## 0 引言

素水泥混凝土在养护及服役等过程中易开裂,而掺入纤维后其桥连作用能有效抑制其表面和内部裂缝的产生和发展,提高早期抗裂性和耐久性<sup>[1,2]</sup>。虽然常见的钢纤维<sup>[3]</sup>和碳纤维<sup>[4]</sup>都可以有效地提高混凝土韧性,但前期搅拌时碳纤维极易发生折断,而钢纤维在后期又易腐蚀<sup>[5]</sup>,因此目前应用范围有限。相对而言聚乙烯醇(PVA)纤维具有优异的拉伸<sup>[6]</sup>以及耐疲劳等性能,因此Li<sup>[7]</sup>和Xu等<sup>[8]</sup>采用在道路交通等领域积极推广。

广泛应用的正交异性钢桥因其结构特点容易在车辆荷载作用下引起桥面铺装结构疲劳破坏<sup>[9]</sup>。超高韧性纤维混凝土(UHTCC)作为优异的桥面铺装材料,其开裂行为引发了很多学者研究,如Xu等<sup>[8]</sup>基于双K理论研究了UHTCC的开裂过程,但该方法前提是单调静态加载,并不适用于疲劳破坏。

准确描述混凝土开裂需要找到合适的模型并选定合理的评价指标。在混凝土本构模型发展过程中,很多研究方法都是经验或唯象的。例如,Huang等<sup>[10]</sup>在 $P-S-N$ 模型中建立了循环次数与疲劳寿命的关系。为了合理描述UHTCC疲劳损伤行为,应准确描述疲劳荷载作用下应力-应变曲线。在疲劳荷载作用下,Fardis等<sup>[11]</sup>通过加载和卸载曲线表达纤维增强复合材料(FRP)的本构关系,其本构模型日趋完善<sup>[12,13]</sup>。王震宇等<sup>[14]</sup>以碳纤维棱柱体为研究对象分析了重复荷载下的卸载应力以及残余应变等参数关系提出了该材料的本构模型,但由于卸载应变的非线性其加卸载准则仅适用于棱柱体同时也没有考虑部分卸载对应力路径的影响。之后,Lam等<sup>[12]</sup>通过圆柱形FPR疲劳试验给出了部分卸载情况下残余应变的计算方法并建立了广泛适用的本构模型。然而,在该领域内普遍认为单调加载曲线可以作为疲劳加载模型的外包线,而UHTCC在压缩疲劳试验中变形超出静载包络线,呈现更显著的延性特征。因此,UHTCC疲劳本构模型需进一步探究。

另一方面,应力或模量的衰减常常用来表示混凝土的疲劳损伤,但其背后的本质是部分能量

被储存在混凝土内部而另一部分能量在塑性变形或裂纹扩展过程中被耗散,即耗散应变能(DSE)。耗散能为标量而应力为矢量无法通过数值运算直接加和。同时,应力和模量往往代表材料某个时刻的状态,而累加的耗散能是应力、应变以及损伤发展过程的综合反映,不仅物理意义明确,而且含义更加丰富。在这方面,李辉等<sup>[15]</sup>建立了一种基于能量的力学方法(EBM)来描述沥青的疲劳开裂。因此,本文选取DSE作为疲劳损伤评价指标。

车辆错峰管理使得交通荷载呈现部分卸载的特点,因此采用部分卸载循环单轴压缩加载试验来研究UHTCC的疲劳性能,同时以不同加载频率和幅值来探究车辆速度和重量对其疲劳性能的影响。此外,在疲劳试验的基础上提出了UHTCC的加卸载路径本构模型,并通过耗散能发展规律来描述UHTCC的疲劳损伤程度,可为桥面铺装材料的长期服役性能研究和设计提供参考。

## 1 单轴抗压强度试验

### 1.1 材料特性

制备UHTCC的材料包括水泥、细砂、粉煤灰、聚乙烯醇(PVA)纤维、水、聚羧酸系减水剂等。研究表明<sup>[10]</sup>:UHTCC的最佳配合比为:水:细砂:水泥基胶凝材料=0.24:0.6:1。其中,普通硅酸盐水泥、I级粉煤灰以及聚羧酸盐高效减水剂的型号分别为P.O42.5R、920U和sika3301。为了提高材料性能,细砂最大粒径控制在300  $\mu\text{m}$ 以内,采用进口的KURALON K-II REC15型纤维,体积掺量为2%,纤维参数见参考文献[16]。

经搅拌、浇注振捣后,试件在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 下养护28天,并将其顶部和底部磨平备用。圆柱体试样直径70 mm,高度140 mm。单轴无侧限抗压强度试验中,加载速率为0.3 mm/min,试样单轴平均抗压强度为43.30 MPa,由于加载速度大于0.2 mm/min,因此比以往试验结果(43.08 MPa)<sup>[17]</sup>稍大,模量有所提高。

## 1.2 单轴加载疲劳试验

### 1.2.1 试验方案

Arthur 等<sup>[18]</sup>在纤维混凝土压缩疲劳试验中发现,低频下可以更好地发挥纤维桥连作用,使得混凝土压缩疲劳性能更好,但加载频率过低导致疲劳加载过程中的徐变累计过大。当应力水平  $S$  (循环加载峰值荷载与静载强度之比) 小于 0.75 时,刘问<sup>[19]</sup>综合考虑应力水平和加载频率的影响,建议最大值取 8 Hz,因此本文选择加载频率为 1、4、8 Hz。疲劳加载试验谷值为 20 kN,在不同频率条件下分别进行不同应力条件的单轴疲劳加载试验并设置平行试验,每组试验试件为 2 个,结果取平均值。若差异性超过 15%,测试第 3 个试件并取差距较小值的平均值,具体加载方案见表 1。

表 1 单轴压缩疲劳试验方案

Table 1 Scheme of uniaxial compression fatigue test

试件编组	频率/Hz	幅值/kN
1	1	30
2		40
3		60
4	4	30
5		40
6		60
7	8	30
8		40
9		50

### 1.2.2 破坏形态

疲劳加载后,试件的破坏情况不同。UHTCC 试件的单轴压缩疲劳破坏模式可分为剪切破坏、楔形破坏和混合破坏 3 种类型<sup>[16]</sup>,此次试验破坏类型为楔形破坏(见图 1)。其中,当幅值为 60 kN(频率为 4 Hz)时,试件在第 80 次加载时就出现了应力破坏,而幅值保持不变时,将频率降低为 1 Hz,疲劳破坏的循环次数达到了 258 次;此外,当加载幅值低于 50 kN 后,虽然加载频率提高到了 8 Hz,但试件却没有出现疲劳破坏。因此,加载频率和应力水平的增加都会显著降低试件的疲劳寿命。

此外,与普通混凝土相比,UHTCC 材料在疲劳损伤后仍具有较好的完整性,未出现局部剥落或爆裂现象。在裂纹处可见大量纤维,纤维的拔出和断裂有效地延缓了基体的裂纹扩展,有效提高了抗裂性和变形能力,试件耗散的能量也显著



图 1 试件破坏

Fig. 1 Failure of specimen

提高。

### 1.2.3 应力-应变曲线分析

随着循环次数的增加,UHTCC 累积应变逐渐增大,并明显表现为稀疏-密实-稀疏三阶段特征,如图 2 所示。在低频(1 Hz)下,随着疲劳荷载幅值的增加,应力-应变曲线斜率增大,即压缩模量也有所提高。与此同时,循环曲线由密到疏,且面积逐渐增加,即 UHTCC 耗能逐渐增加。在高频疲劳加载时(4 Hz, 8 Hz)呈现相似的规律。

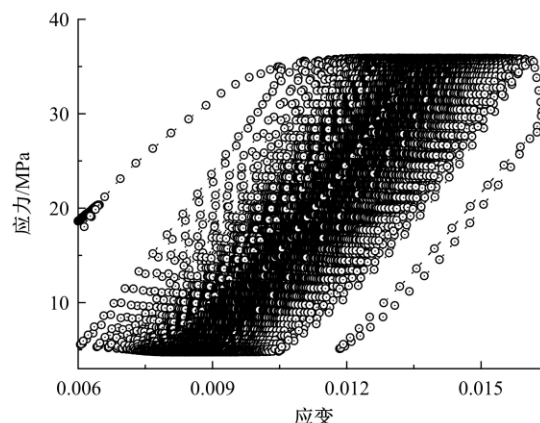


图 2 循环荷载作用下应力-应变曲线(60 kN)

Fig. 2 Stress-strain curve under fatigue loading (60 kN)

为了更加方便横向比较,将加载循环次数进行归一化处理,得到应变随循环比( $n/N$ )的变化曲线,如图 3 所示( $n$ 为循环次数, $N$ 为疲劳破坏寿命)。该曲线也呈现三阶段特征,各阶段所占疲劳寿命比例分别为 5%~10%, 75%~85% 以及 10%~15%。在第一阶段,试件变形迅速增加,材料薄弱部位萌生裂纹,内部空隙在疲劳载荷的作用下开始扩展;第二阶段,产生新的裂纹,新旧裂纹共同发展,试件变形呈线性增长;第三阶段,主裂纹逐渐形成和发展,试件变形迅速增加,直至疲劳破坏。

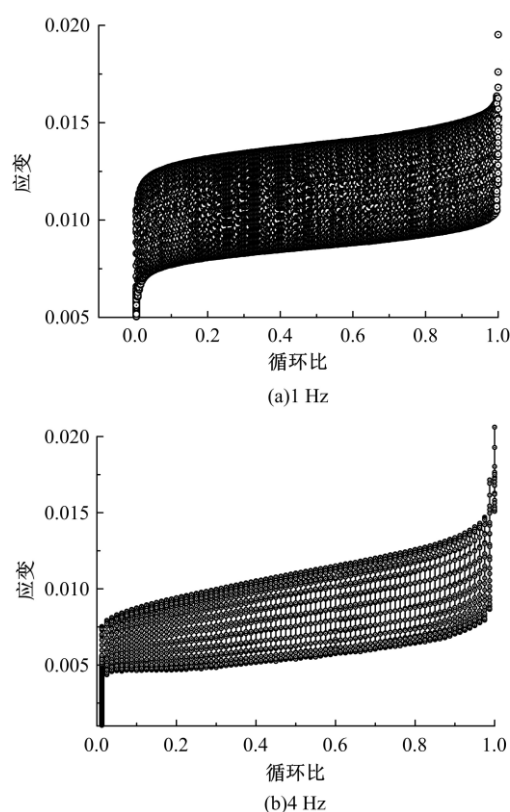


图3 循环荷载作用下应变曲线(60 kN)

Fig. 3 Strain curve under fatigue loading (60 kN)

## 2 UHTCC本构模型

在FRP领域普遍认为单调荷载和循环加载条件下的外轮廓一致,而从图4中(频率1 Hz,幅值60 kN)可以发现,UHTCC压缩疲劳变形超出静载包络线,由于PVA纤维和基体的桥连作用使其具有更优异的延性。因此,在钢桥铺装路面中,通过静载变形评价破坏偏于保守,而应以疲劳变形作为评估依据。为了合理描述UHTCC疲劳损伤行为,应建立合理的本构模型来准确表达其加载和卸载路径。

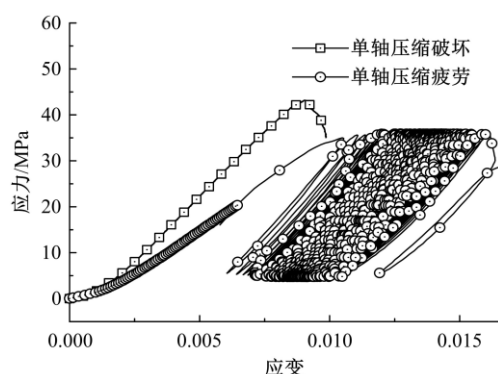


图4 疲劳与单轴压缩对比

Fig. 4 Comparison of fatigue and uniaxial compression

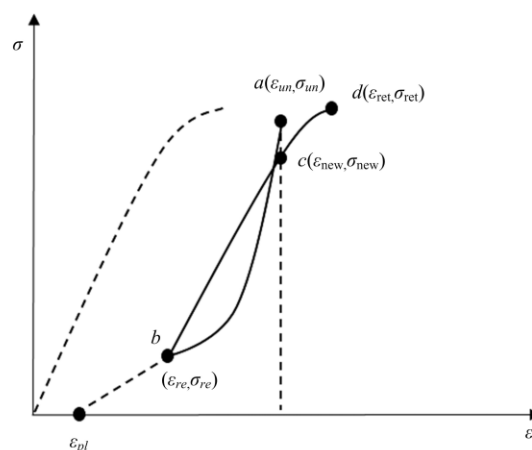


图5 加载和卸载路径图

Fig. 5 Schematic diagram of loading and unloading path

### 2.1 卸载路径

如图5所示,卸载路径是一条凹曲线。需要3个元素来描述:卸载路径、卸载起点 $a(\epsilon_{un}, \sigma_{un})$ 和卸载终点 $b(\epsilon_{re}, \sigma_{re})$ ,这也是重新加载的起点。纤维混凝土的卸载路径具有明显的非线性特征,王震宇等<sup>[14]</sup>利用卸载应力、残余应变等参数找到卸载曲线模型如下:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{un}} = \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_{pl}}{\epsilon_{un} - \epsilon_{pl}} \right)^n \quad (1)$$

式中: $\sigma_c$ 为压缩应力; $\sigma_{un}$ 为卸载应力; $\epsilon_c$ 为压缩应变; $\epsilon_{pl}$ 为塑性应变; $\epsilon_{un}$ 为卸载应变; $n$ 由试验参数可得,详见文献[14]。

然而,试验采用部分卸载模式,卸载终点 $b(\epsilon_{re}, \sigma_{re})$ 并非 $(\epsilon_{pl}, 0)$ ,即 $\epsilon_{re} \neq \epsilon_{pl}$ ,而Lam等<sup>[12]</sup>针对部分卸载情况给出了相应的残余应变的计算方法并建立了如下卸载模型:

$$\sigma_c = a\epsilon_c^\eta + b\epsilon_c + c \quad (2)$$

式中: $a, b, c, \eta$ 由试验参数确定,详见文献[12]。

通过与试验结果对比,发现文献[14]在卸载末段偏差较大,这是因为其采用完全卸载,导致模型非线性过大。Lam等<sup>[12]</sup>提出的模型可以较好地适用于UHTCC,但其计算过程需要确定多个参数,较为复杂。鉴于此,本文在前人研究的基础上提出部分卸载疲劳荷载作用下卸载准则,其塑性应变计算规则符合文献[12]中的假定,卸载路径如下:

$$\sigma_c = \sigma_{un} \left[ 1 - 0.01 \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_{un}}{\epsilon_{pl} - \epsilon_{un}} \right)^2 \right] \quad (3)$$



## 2.2 加载路径

加载路径也由3部分控制,即起始点 $b(\epsilon_{re}, \sigma_{re})$ ,参考点 $c(\epsilon_{new}, \sigma_{new})$ ,即加载路径上卸载应变对应的点。此外,第三个点为加载终点 $d(\epsilon_{ret}, \sigma_{ret})$ 。王震宇同样采用指数形式给出了加载路径的表达式:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{un}} = \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_{pl}}{\epsilon_{re} - \epsilon_{pl}} \right)^n \quad (4)$$

式中: $\epsilon_{re}$ 为加载起点应变。

该模型具有较强的非线性,但加载段末预测精度较差。

在部分卸载荷载作用下,加载路径并非圆滑的曲线,而是前段大部分近似为直线段,后期呈现上凸形。恰好Lam等<sup>[12]</sup>将加载曲线分为直线部分和抛物线部分,见式(5)(6)。

直线部分:

$$\sigma_c = \sigma_{re} + E_{re}(\epsilon_c - \epsilon_{re}) \quad (5)$$

式中: $E_{re}$ 为加载时弹性模量。

抛物线部分:

$$\sigma_c = A\epsilon_c^2 + B\epsilon_c + C \quad (6)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为描述包络线的待定常数。

该模型采用分段预测,优势是精度较高,尤其非线性阶段优势明显,同时计算复杂的缺点也更加明显。

为找到预测准确、形式更加简单的模型,本文在此基础上同时借鉴Teng等<sup>[20]</sup>提出的指数模型提出新的加载路径模型:

$$\sigma_c = \sigma_{ret} + (\sigma_{re} - \sigma_{ret}) \cdot \left( \frac{\epsilon_{new} - \epsilon_c}{\epsilon_{new} - \epsilon_{re}} \right)^p \quad (7)$$

而 $\sigma_{un} = 0.98\sigma_{ret}$ ,因而将两者视为相等,即 $\sigma_{un} = \sigma_{ret}$ 。

$$\sigma_c = \sigma_{un} + (\sigma_{re} - \sigma_{un}) \cdot \left( \frac{\epsilon_{new} - \epsilon_c}{\epsilon_{new} - \epsilon_{re}} \right)^p \quad (8)$$

其中:

$$p = \log \left( \frac{\sigma_{un} - \sigma_{re}}{\sigma_{un} - \sigma_c} \right) \cdot \left[ \log \left( \frac{\epsilon_{un} - \epsilon_{re}}{\epsilon_{un} - \epsilon_c} \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

根据式(3)(7)分别计算卸载和加载路径的数据,预测结果与试验结果对比如图6所示。

由图6可知,该模型卸载路径与试验结果整体吻合良好,但在加载路径中,接近直线段拟合效果较好,而加载路径末段非线性较大,虽然相较于文献[12]误差偏大,但以第24次循环加载工况

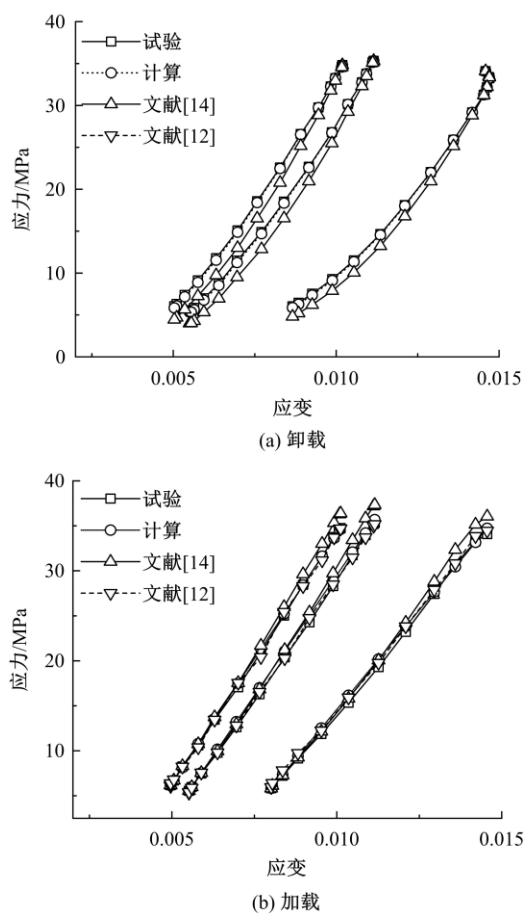


图6 应力路径试验与计算结果对比

Fig. 6 Comparison of test and prediction of stress path (频率为4 Hz,幅值为60 kN)为例,试验数据和预测计算的能量耗散相差不超过12%,说明理论分析已基本满足要求,也验证了本构模型的正确性和适用性,为进一步探究疲劳损伤奠定了基础。

## 3 能量分析

### 3.1 耗散能发展规律

混凝土在外力作用下内部单元体发生变形和错动,进而形成损伤,从宏观上表现为外力做功 $W$ (总能量)转化为内部弹性能 $W_e$ (可恢复)和耗散能 $W_d$ (不可恢复)。耗散能由加卸载曲线和横向坐标轴组成环形面积表示,可通过图解法进行计算<sup>[21]</sup>。

当加载频率为1 Hz时,能量耗散在初始阶段有减小趋势<sup>[21]</sup>,然后保持在一个相对稳定的状态,这是因为初始阶段混凝土内部空隙被压缩,然后混凝土进入相对均匀密实的阶段,直到内部损伤积累到一定程度,形成宏观裂纹,能量耗散迅速增加。在这种情况下,混凝土中纤维的随机分布有足够的时间进行调整。当内部应力重分布逐渐

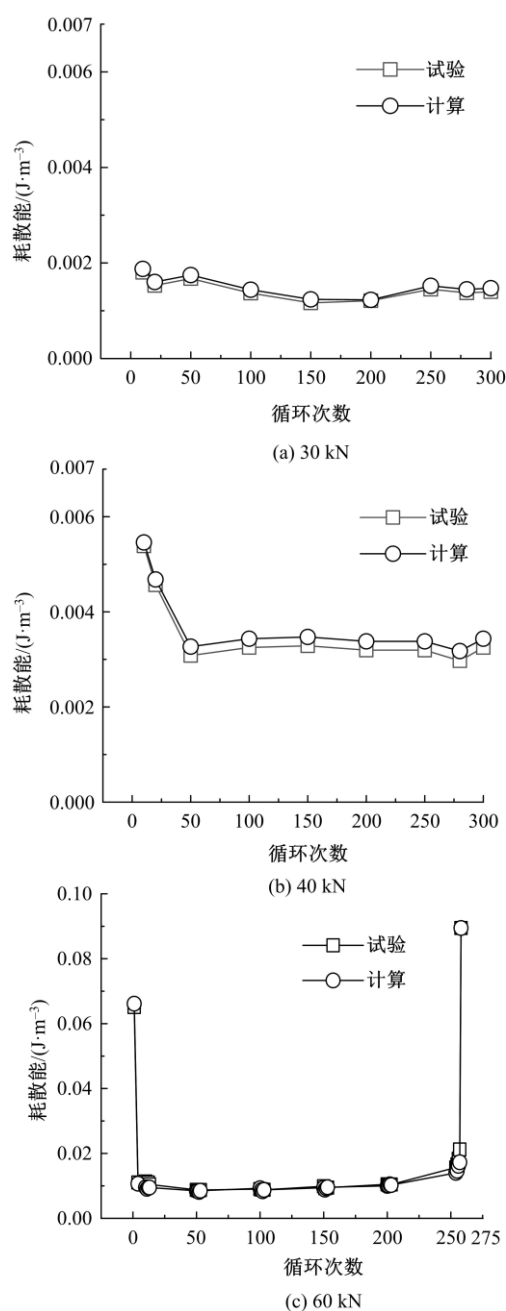


图7 各循环加载阶段的能量比较(1 Hz)

Fig. 7 Energy comparison of each cycle loading stage (1 Hz)

趋于平衡时,每个循环的能量耗散较小且相对稳定。

从图7~图9可以看出,损伤发展有3个阶段,能量预测结果与实验结果较为接近(误差在15%以内),但在疲劳荷载作用下存在小范围波动。在同一频率下,随着应力幅值的增大,耗散能量增大且发展较为稳定。然而,在高应力(幅值60 kN)疲劳荷载的持续作用下,能量耗散在经过平稳上升后突然急剧上升,纤维混凝土内部出现

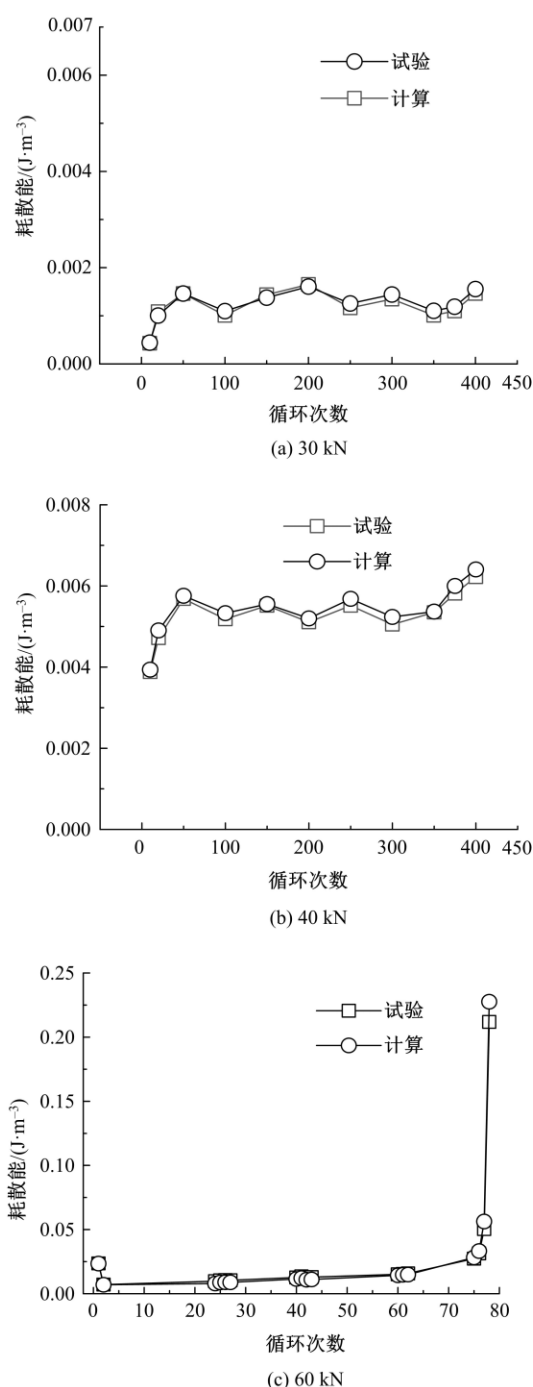


图8 各循环加载阶段的能量比较(4 Hz)

Fig. 8 Energy comparison of each cycle loading stage (4 Hz)

脱粘、滑移,最终断裂,微观裂隙聚集为宏观裂纹,能量耗散也急剧增加。同时,预测值的偏差也会增大,主要原因是,随着加载循环次数的增加,试件塑性应变增加,而加载路径模型对此具有较高的敏感性,预测偏差逐渐增大。

为方便横向对比,取稳定阶段的能量耗散值进行分析。由图7~图9可知,当幅值为30 kN

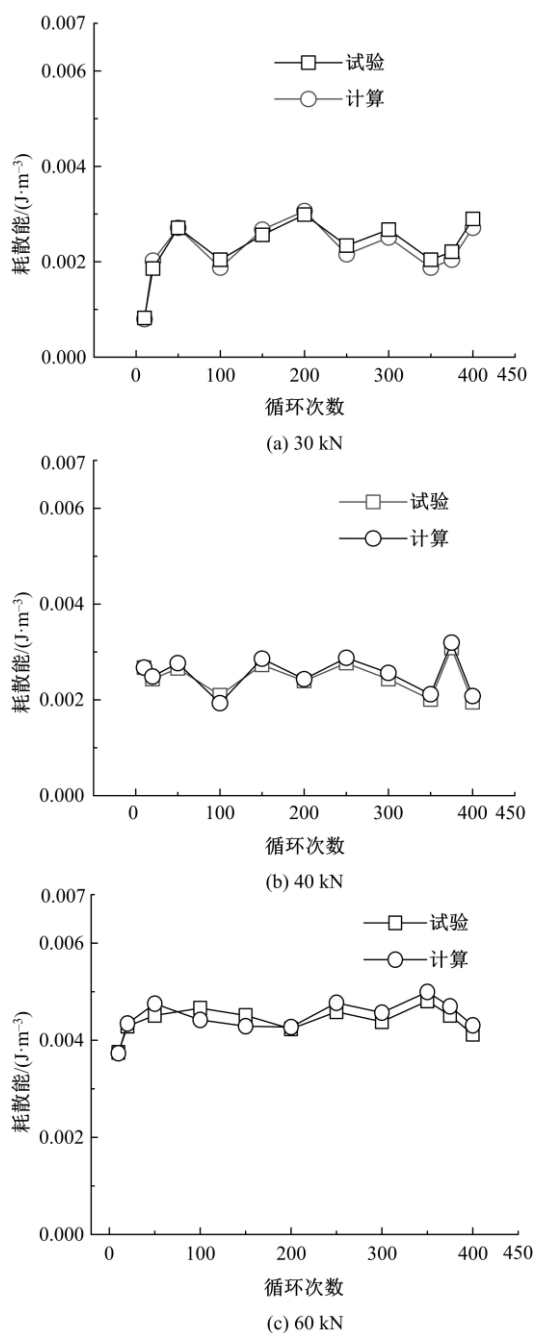


图9 各循环加载阶段的能量比较(8 Hz)

Fig. 9 Energy comparison of each cycle loading stage (8 Hz)

时,当加载频率提高到8 Hz时,能量耗散增加了60%;当幅值为40 kN和60 kN时,加载频率提升为4 Hz时能量耗散提升了40%左右。在同一加载频率下,幅值仅增加20 kN时能量耗散就增加近90%,而幅值增加30 kN能量耗散增加高达10倍。值得注意的是,在幅值为60 kN时,试件最终发生疲劳开裂,呈现完整的三阶段曲线,且相应的疲劳加载次数随着加载频率的增加而减少。当加载幅值小于50 kN时,加载频率的改变均未引起

疲劳开裂,疲劳曲线仅出现前两个阶段,可见应力是决定损伤的决定性因素,而加载频率对疲劳损伤影响相对较小。

### 3.2 UHTCC疲劳损伤

由于UHTCC试件在制备过程中存在气泡以及初始裂纹等瑕疵,与理想无损UHTCC相比,这些瑕疵被视为初始损伤。这些瑕疵对UHTCC的极限强度以及初始阶段变形有较为直接的影响。

由图10可知,UHTCC在进入弹性阶段之前曲线呈上凹状(阴影部分下边界),这是因为该阶段试件内部缺陷在荷载作用下逐渐闭合。从能量角度分析,UHTCC初始损伤所需能量可以用初始阶段为线弹性的无损状态与含初始损伤状态下的能量差值 $w_0$ 表示,如图10中阴影所示。

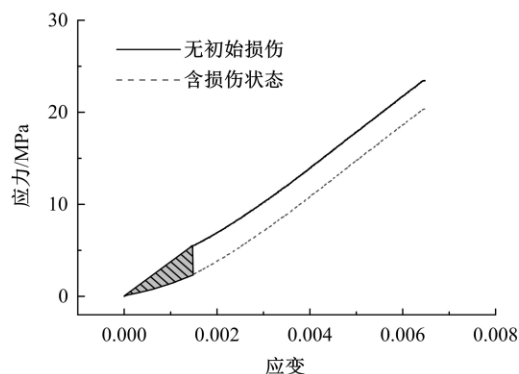


图10 基于能量的初始损伤表示

Fig. 10 Initial damage based on energy

单轴压缩强度试验和疲劳试验初始加载阶段都有上凹状曲线,阴影部分耗散能也基本相同(0.0019~0.0023) J/m³,该数据也从侧面说明试样质量较为均匀。

初始瑕疵在疲劳荷载作用下逐渐发展,导致损伤逐渐增加。现将疲劳损伤因子定义如下:

$$D = \frac{w_0 + w_d}{w_f} \quad (10)$$

式中: $0 \leq D \leq 1$ ;  $w_d$ 代表UHTCC在疲劳荷载作用下损伤发展耗散能量; $w_f$ 代表疲劳破坏总能量,计算结果如图11所示。

UHTCC初始损伤基本在2%左右,随着耗散能的累计损伤逐渐发展直至试件破坏。在损伤稳定发展阶段,耗散能保持相对稳定,因此损伤因子近似呈线性增长,该阶段弹性能占比高达85%以上。在临近开裂的阶段,UHTCC基体发生软化同时伴随纤维的开裂和拔出,耗散能占据主要地位,损伤因子快速增长,试件也发生开裂破坏。

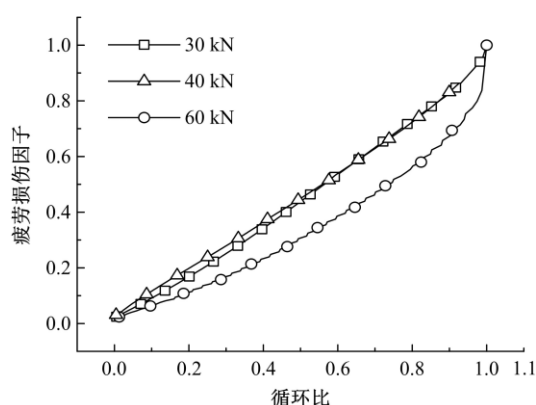


图11 疲劳损伤发展

Fig. 11 Development of fatigue damage

其中,低应力时疲劳损伤因子发展比较接近且较为均匀,疲劳因子快速增长阶段不明显,而当应力比较大时临近破坏时损伤因子较低(0.8),随后在末段快速增长直至破坏,损伤因子的突然增加与试验现象吻合,说明高应力比下材料开裂具有突然性。因此,在道路工程中为延长UHTCC的服役寿命应严格控制超载车辆上路。

## 4 结 论

(1)在单轴压缩疲劳试验中,UHTCC材料的应力-变形曲线总体特征呈疏-密-疏的3阶段特征。与此同时,曲线非线性及能量耗散都随循环次数的增加逐渐增大。加载频率增加以及应力水平提高均会降低试件的疲劳寿命。

(2)基于部分卸载疲劳试验建立了加卸载本构模型,其预测加卸载路径与试验结果偏差较小(15%以内),验证了模型的正确性和适用性,为进一步探究疲劳损伤奠定了基础。

(3)能量耗散发展分为3个阶段且以第二阶段为主。在高应力(幅值60 kN)疲劳荷载作用下,疲劳曲线呈现完整三阶段特征且在第三阶段能量耗散急剧增加并伴随纤维脱粘、滑移以及混凝土开裂现象。通过对稳定阶段的能量耗散分析并结合试验现象可知,应力是决定损伤的决定性因素,而加载频率对疲劳损伤影响相对较小。

(4)以能量法为基础,采用耗散能指标评价UHTCC疲劳损伤程度,定义了疲劳损伤因子,得到初始损伤(2%左右)和疲劳损伤因子发展规律。在高应力比下临界损伤变量也较低(0.8),说明高应力比下材料开裂具有突然性。因此,在道路工程中为延长UHTCC的服役寿命应严格控制超载车辆上路。

## 参考文献:

- [1] Wang L, Zhou S H, Shi Y, et al. Effect of silica fume and PVA fiber on the abrasion resistance and volume stability of concrete[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 130: 28-37.
- [2] Yao L, Sun Y, Guo L. Fibre bridging effect on the Paris relation of mode I fatigue delamination in composite laminates with different thicknesses[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 196-206.
- [3] Dieng L, Marchand P, Gomes F, et al. Use of UHP-FRC overlay to reduce stresses in orthotropic steel decks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89(10): 30-41.
- [4] Liu G J, Bai E L, Xu J Y, et al. Mechanical properties of carbon fiber-reinforced polymer concrete with different polymer-cement ratios[J]. Materials, 2019, 12(21): No. 3530.
- [5] López Deulofeu A. Study of UHPC reinforced by graphene oxide & carbon nanotubes composites and steel fibers[D]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [6] Li V C, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)[J]. ACI Materials Journal-American Concrete Institute, 2001, 98(6): 483-492.
- [7] Li V C, Leung C K Y. Steady state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [8] Xu S, Reinhardt H W. Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture, Part II: analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams [J]. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 151-177.
- [9] 张清华, 卜一之, 李乔. 正交异性钢桥面板疲劳问题的研究进展[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 14-30. Zhang Qing-hua, Bu Yi-zhi, Li Qiao. Review on fatigue problems of orthotropic steel bridge deck[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 14-30.
- [10] Huang B T, Li Q H, Xu S L, et al. Tensile fatigue behavior of fiber-reinforced cementitious material with high ductility: experimental study and novel P-S-N model[J]. Construction and Building Materials, 2018, 178(7): 349-359.
- [11] Fardis M N, Khalili H H. FRP-encased concrete as



- a structural material[J]. Magazine of Concrete Research, 1982, 34(121): 191-202.
- [12] Lam L, Teng J G. Stress-strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression[J]. Engineering Structures, 2009, 31(2): 308-321.
- [13] Hany N F, Hantouche E G, Harajli M H. Axial stress-strain model of CFRP-confined concrete under monotonic and cyclic loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2015, 19(6): 1-16.
- [14] 王震宇,李洪鹏. 重复荷载作用下碳纤维约束混凝土加卸载准则[J]. 建筑结构, 2009, 39(7): 100-103,70.  
Wang Zhen-yu, Li Hong-peng. Loading and unloading criteria of FRP-confined concrete under cyclic compression[J]. Building Structure, 2009, 39(7): 100-103,70.
- [15] 李辉,罗雪,张裕卿. 基于耗散伪应变能的沥青疲劳动力学表征[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 115-124.  
Li Hui, Luo Xue, Zhang Yu-qing. Pseudo energy-based kinetic characterization of fatigue in asphalt binders[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 115-124.
- [16] Li Q, Huang B, Xu S, et al. Compressive fatigue damage and failure mechanism of fiber reinforced cementitious material with high ductility[J]. Cement and Concrete Research, 2016, 90: 174-183.
- [17] 黄博滔. 超高韧性纤维混凝土材料及其功能梯度结构疲劳性能研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2018.  
Huang Bo-tao. Fatigue performance of strain-hardening fiber-reinforced cementitious composite and its functionally-graded structures[D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2018.
- [18] Arthur M, Gonzalo R. Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70: 342-350.
- [19] 刘问. 超高韧性水泥基复合材料动态力学性能的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学土木工程学院, 2012.  
Liu Wen. Experimental study on dynamic mechanical properties of ultra-high toughness cementitious composites[D]. Dalian: School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, 2012.
- [20] Teng J G, Lam L, Lin G, et al. Numerical simulation of FRP-Jacketed RC columns subjected to cyclic and seismic loading[J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(1): 1-13.
- [21] 李天涛. 基于能量耗散的强震岩体震裂损伤特性及其孕灾机理研究[D]. 成都: 成都理工大学环境与土木工程学院, 2017.  
Li Tian-tao. Seismic damage characteristics of rock based on energy dissipation and disaster-pregnant mechanism of strong earthquake[D]. Chengdu: College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, 2017.