

# 压剪复合作用下UHPC节段梁接缝疲劳性能

程子豪 郑辉

湖南工业大学 土木工程学院

DOI:10.12238/btr.v3i9.3385

**[摘要]** 超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete,UHPC)节段预制拼装技术充分利用了UHPC材料的良好性能及装配简单化的优点,让桥梁结构向更加轻质、更大跨径及快速施工等方向发展提供强有力的方式,但其拼接缝是使用过程中的脆弱一环。普通混凝土桥梁的尺寸和自重较大,使得活载应力低,疲劳问题不太明显,而超高性能混凝土公路桥梁和跨海大桥等充分利用优异的材料性能,使其更加轻薄化,在长期处于高应力的环境下,UHPC结构中的动力荷载所占比例越来越大,疲劳问题更加明显。为了进一步研究压剪复合作用下试件的疲劳性能,采用有限元软件针对不同压剪比,应力幅的条件下计算出其疲劳寿命,并提出预估其疲劳寿命方程定义出疲劳极限。

**[关键词]** 超高性能混凝土; 有限元; 压剪比; 应力幅; 疲劳寿命

**中图分类号:** TU74 **文献标识码:** A

## 引言

超高性能混凝土(Ultra High Performance Concrete, UHPC)是一种高强水泥复合机材料,抗压强度通常可以达到150MPa以上,抗拉强度大多超过10MPa,掺入其中的钢纤维大大提高了UHPC的延展性。为解决超高性能混凝土疲劳开裂等相关问题,国内外学者就疲劳问题展开了大量研究。余自若等<sup>[1,2]</sup>研究了活性粉末混凝土RPC的疲劳性能和剩余强度,结果显示RPC的疲劳性能优于普通混凝土,RPC疲劳后的剩余强度衰减率随循环寿命比的增大而减小,衰减率随着循环寿命比的增大而增大。方志等<sup>[3-4]</sup>研究了不同钢纤维掺量下RPC的疲劳性能以及碳纤维预应力筋的RPC无腹筋梁的疲劳试验,研究表明不掺钢纤维的素RPC在疲劳荷载的作用下表现为劈裂破坏而掺入钢纤维的RPC表现为剪切破坏,并且随着钢纤维掺量的提高,试件的疲劳寿命表现为相应的提高。Fergestad等对高强度混凝土进行研究,结果表明高强度的混凝土疲劳极限低于普通混凝土。Naaman等对在压缩循环荷载作用下的钢纤维混凝土的性能进行相关研究,钢纤维混凝土适合在承受动荷载即使带裂缝工作的条件下,疲劳极限达到0.65。当前节段预制拼装技术主要使用的

接缝形式为干接缝、湿接缝以及胶接缝,其中胶接缝因其环保美观且具有较好的整体性更加符合现代工艺的需求,相对于另外两者而言,更具发展前景。作为节段梁受力脆弱一环,接缝处的疲劳状态体现出节段梁整体结构力学性能的优异性,因此研究接缝处的疲劳性能有重要的理论和实践意义。

## 1 有限元分析

1.1 塑性损伤模型。超高性能混凝土是一种典型的弹塑性损伤模型材料,在发生塑性变形卸载后有明显的不可恢复变形,卸载后再加载时存在刚度的退化下图1-1和图1-2是能正确反映混凝土塑性损伤发展的常用的本构关系。

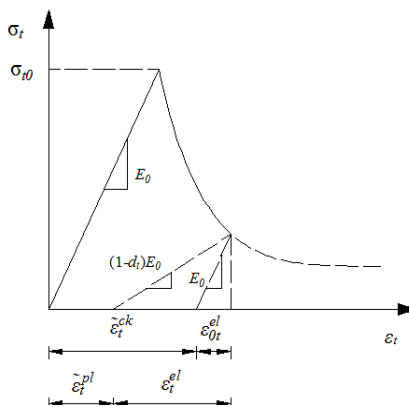


图1-1单轴受拉本构

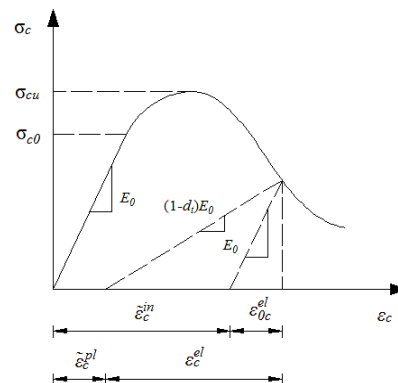


图1-2单轴受拉本构

## 1.2 材料的本构方程

分析数据主要来源于湖南大学刘明和安明喆提出的本构模型与实际情况进行调整。

UHPC受压应力-应变关系计算式:

$$y = \begin{cases} 1.55x - 1.2x^4 + 0.65x^5, & (0 \leq x < 1) \\ \frac{x}{6(x-1)^2 + x}, & (x \geq 1) \end{cases} \quad (1-1)$$

注:  $y = \frac{f}{f_c}$ ,  $x = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$ ,  $f_c$  和  $\epsilon_0$  表示UHPC试件的最大压应力和对应的压应变。

UHPC单轴受拉本构模型计算式如下所示:

$$y = \begin{cases} 1.17x + 0.65x^2 - 0.82x^3, & (0 \leq x < 1) \\ \frac{x}{5.5(x-1)^{2.2} + x}, & (x \geq 1) \end{cases} \quad (1-2)$$

注:  $y = \frac{f}{f_t}$ ,  $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}$ ,  $f_t$ 和  $\varepsilon_t$  为

UHPC的轴心抗拉强度和其拉应变。

在此本构关系中用到的参数如下表 1-1所示:

### 1.3有限元建模

模拟的试件采用100mm×60mm×200mm的立方体试件,为考虑到不同压剪比荷载作用下试件的破坏形态,本次试验以最小接缝角度30°处的面积设定为有效剪切面,即斜接缝长度保持在115.5mm。最终模型如图1-3,1-4,1-5。因此在建立其他不同角度的模型时,在接缝处设置缺口以保证受力面积相等。模型是由两块相匹配的凹齿和凸齿组成,在相互作用中将凸齿接缝处的接触面设置为主表面,凹齿接缝处的接触面设置为从表面,考虑到计算的收敛性,最后将主表面和从表面进行绑定来模拟环氧树脂胶。模型中的立方体试件只受到竖向荷载作用,为了能更加直观的反映出其破坏形态,从而选择了位移荷载的加载方式,在凸齿的最顶面的中心点设置参考点P-1,在将参考点P-1与其所在的平面进行耦合。最后设定P-1线性位移荷载的最大位移为0.005m。

表 1-1 基本参数

弹性模量(MPa)	泊松比	膨胀角	偏心率	$f_{0.05}/f_{0.2}$	K	粘性参数
42050	0.2	30	0.1	1.14	0.6667	0.005

### 1.4静力加载结果

在进行静力加载时可将试件的竖向承载力分解为平行于接缝的剪切力和垂直于接缝的正压力,加载方式如图1-6所示。试件的极限承载力为 $F_u$ ,将竖向荷载沿着斜接缝进行分解可得到剪力 $V$ 和正压力 $F_n$ ,通过计算得出,  $F_n = F_u \cos \theta$ ,  $V = F_u \sin \theta$ 。而我们设定的倾斜角度

$\theta$  是固定的,因此我们只需得到竖向承载力 $F_u$ 的大小即可计算出试件的压剪比。实验结果表明,试件发生健齿处的剪切破坏,而30°接缝模型中则表现为健齿被压碎。由图1-7可知,试件首先发生开裂破坏均在与健齿根部,在定义剪切损坏时,试件的破坏准则为主拉应力破坏准则,因此需关注试件破坏时的主拉应力。在进行静力加载的过程中,由图1-8可知加载第一阶段试件表现为较好线弹性阶段,在第二阶段加载至极限荷载的80%时,试件接缝处区域进入弹塑性阶段,表现为刚度逐渐降低,继续加载混凝土进一步损伤,在荷载位移曲线上体现了非常明显的非线性。

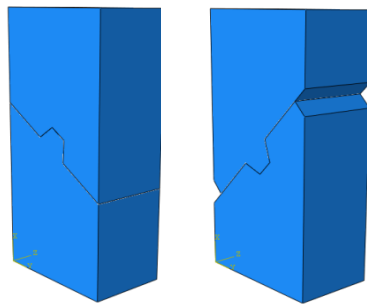


图1-3 30° 接缝试件 图1-3 45° 接缝试件

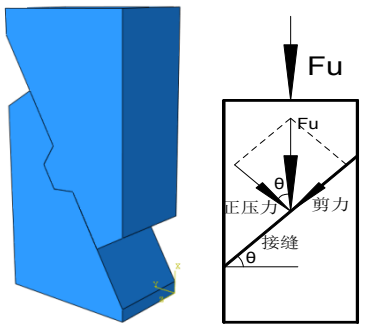
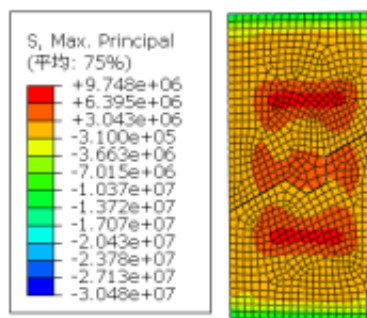
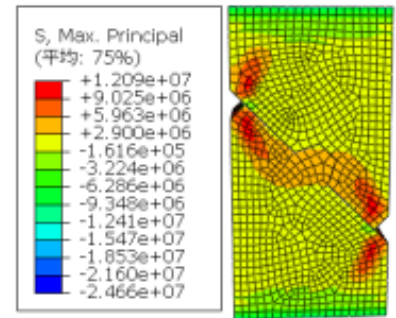


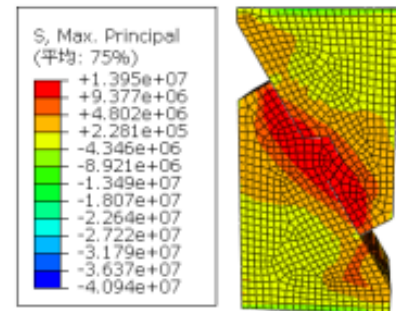
图1-4 60° 接缝试件 图1-6静载受力示意图



(a) 30° 应力云图



(b) 45° 应力云图



(c) 60° 应力云图

1-7 应力云图

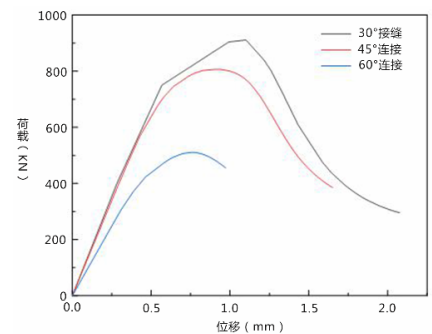


图1-8 荷载位移

## 2 疲劳分析

### 2.1疲劳分析方法及结果

疲劳分析是将静力的有限元分析结果和模型导入到软件FE-SAFE中,对此我们只需要定义出时间历程曲线,以及疲劳极限寿命的次数即可。疲劳荷载将与时间历程曲线进行线性的叠加从而得到疲劳分析的一个完整疲劳荷载。时间历程以正弦波的形式呈现,在定义正弦波时只需考虑到最大值和最小值,最大值和最小值再与静力分析中结构的极限承载力进行线性叠加,这样就得到了一个周期下的疲劳荷载。由于本模型中只考虑到接缝的压剪疲劳性能,所以取值均为正值不考虑拉力作用下的疲劳性能。疲劳的极限寿命定义为一千万次。

疲劳分析中定义应力水平,为最大疲劳荷载的最大应力值,为UHPC构件静力极限荷载。在绘制S-N图时,分别控制最小的应力水=0.3、0.4、0.5,改变疲劳荷载的上限值来获取不同的应力幅和其对应的疲劳寿命。从实验结果总结规律可得,实验模拟的UHPC试件容量较小,寿命分布的离散型较大,只有采取科学合理的方法进行分析,才能正确的获取小样本的可靠结果,其中最常用的是威布尔(Weibull)分布。图2-1、2-2、2-3分别绘制出了30°、45°和60°接缝在不同应力水平下的S-N图,并对收集的数据进行线性回归得出了给定条件下的疲劳寿命预估方程式。

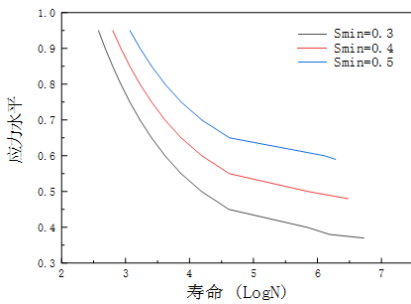


图2-1 30° 接缝S-N曲线(2-1)

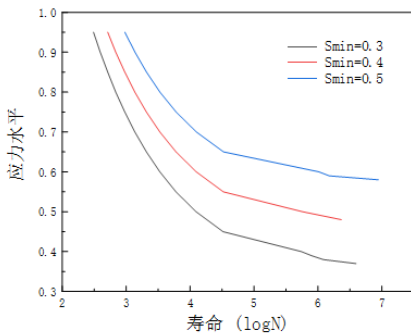
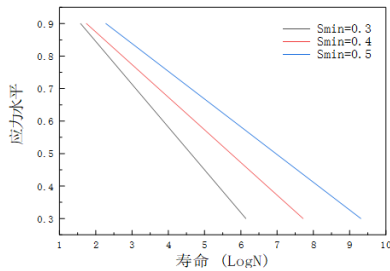


图2-2 (5° 接缝S-N曲线(2-2)



图(-3 6° 接缝S-N曲线(2-3)

最后(试件(用威布尔(Weibull)双

表 2-1 RPC 的基本力学性能

立方体抗压强度/MPa	棱柱体抗压强度/MPa	受压弹性模量/Gpa
156	120	49

表 2-2 不同应力水平下 RPC 的疲劳寿命结果

S <sub>max</sub> = 0.9	平均		S <sub>max</sub> = 0.85	平均		S <sub>max</sub> = 0.75	平均		S <sub>max</sub> = 0.65	平均	
	值	模拟		值	模拟		值	模拟		值	模拟
120	380	331	880	3863	3113	5000	2430	28864	38300	13520	15351
180			1300			8500			73900		
260			2200			17500			107100		
370			3500			19600			160400		
540			6100			37800			200200		
810			9200			57400			231300		

对数进行线性的统计分析见图2-4,得到回归方):

$$\text{Log}N = -13.7556 \text{Log}S_{max} + 2.4417 \quad (2-4)$$

由方程2-4可知,当应力水平  $S_{max} \leq 0.5241$ 时,UHPC构件的疲劳寿命大于200万次,故可将疲劳应力幅值  $\sigma_{max} = 0.52 F_u$  定义为UHPC的疲劳极限,即当疲劳荷载  $\sigma \leq \sigma_{max} = 0.52 F_u$ 时,UHPC不发生疲劳破坏。

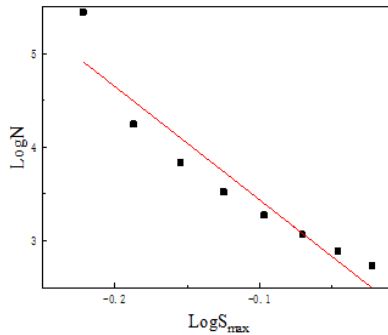


图2-4 最大应力水平与平均疲劳寿命曲线

### 2.2模型的应用

为了进一步验证模型和计算方法的适用性,利用以上的设计方法和模拟计算,基于对一组70mm×70mm×210mm的RPC棱柱体试件疲劳实验的结果,进行上述的有限元模拟方法和采用相同参数的疲劳分析计算,试件的基本参数见表2-1。

试件的疲劳试验采用等幅均匀的脉动荷载最大应力水平  $S_{max}$  选取0.9,0.85,0.75,0.65。最小的应力水平  $S_{min}$  选取0.05,得到的疲劳寿命试验结果如表2-2所示:

由于实际试验采用的试件容量较小离散型较大,为了得到更加准确的对比

结果,采用平均值与模拟值进行比对。从结果上看,当最大应力水平较高时模拟值与实际得到的疲劳寿命相比较小,偏差值约在12.89%-19.41%之间。当应力水平较小时得到的模拟寿命值较平均寿命值偏大,差值在13.55%-18.78%。总体来看,模拟值与试验值的拟合性较好,此模拟计算方法较为合理,对此类UHPC的构件疲劳寿命的预估有较为正确的引导。

### 3 结论

(1)UHPC接缝静载受力时,压剪比越大极限承载能力越好,压剪比越大更可能发生劈裂破坏,压剪比越小更趋向于健齿被剪切破坏。(2)分别给出了不同压剪比  $\sigma_n / \tau$  条件下,不同应力水平疲劳寿命的预估方程式。(3)UHPC的抗压疲劳极限强度可取其构件静载极限抗压能力的52.41%。

### [参考文献]

- [1]余自若,安明喆,郑帅泉.活性粉末混凝土疲劳后剩余抗压强度实验研究[J].建筑结构学报,2011,32(01):82-87.
- [2]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,(04):35-40.
- [3]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(06):6-12.
- [4]方志,向宇,刘传乐.配置碳纤维预应力筋的钢纤维活性粉末混凝土无腹筋梁疲劳性能试验研究[J].建筑结构学报,2013,34(01):101-107+116.