

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.03.012

界面黏结性能影响下 FRP 加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳寿命的数值模拟

张智梅,严一铭

(上海大学力学与工程科学学院,上海 200444)

摘要: 基于混凝土和钢筋的疲劳本构模型及疲劳荷载下 FRP-混凝土界面的黏结-滑移本构模型,采用 ABAQUS 构建了疲劳荷载下外贴 FRP 板加固钢筋混凝土梁的有限元模型,模拟分析了界面黏结性能影响下 FRP 加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳寿命的特征,并提出了一种可以同时考虑钢筋应力幅和 FRP 轴向刚度影响的 FRP 加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳寿命预测公式。结果表明:考虑界面黏结性能影响的有限元模型能更准确地模拟出 FRP 加固钢筋混凝土梁的疲劳破坏模式;减小应力幅和增大 FRP 轴向刚度均能在不同程度上提高 FRP 加固钢筋混凝土梁的抗弯疲劳寿命;预测公式计算结果与试验数据吻合较好,验证了公式的准确性,可为 FRP 加固钢筋混凝土梁工程应用提供一定的参考。

关键词: 钢筋混凝土梁;疲劳寿命;界面黏结-滑移;纤维增强复合材料;有限元分析

中图分类号: TU375.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)03-0094-07

Numerical simulation of flexural fatigue life of FRP-strengthened reinforced concrete beams affected by interfacial bond performance

ZHANG Zhimei, YAN Yiming

(School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Based on the fatigue constitutive models of concrete and steel reinforcement, as well as the bond-slip constitutive model of the FRP-concrete interface under fatigue loading, a finite element model of reinforced concrete (RC) beams strengthened with externally bonded fiber reinforced polymer (FRP) under fatigue loading was established using ABAQUS. The model simulated the characteristics of the flexural fatigue life of FRP-strengthened RC beams influenced by the interfacial bond performance. A fatigue life prediction formula for FRP-strengthened RC beams that simultaneously considered the effects of steel reinforcement stress amplitude and FRP axial stiffness was proposed. The results indicate that the finite element model considering the interfacial bond performance can more accurately simulate the fatigue failure modes of FRP-strengthened RC beams. Reducing the stress amplitude and increasing the FRP axial stiffness can both enhance the flexural fatigue life of FRP-strengthened RC beams to varying extents. The results of the prediction formula are in good agreement with the experimental data, thereby verifying the accuracy of the formula and providing a valuable reference for practical engineering applications of FRP-strengthened RC beams.

Key words: reinforced concrete beam; fatigue life; interface bond-slip; fiber reinforced polymer; finite element analysis

采用外贴纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer,FRP)加固是目前常用的结构加固方法之一,针对静载及疲劳荷载下的外贴 FRP 加固钢筋混凝土梁(以下简称“FRP 加固梁”)已有大量的试验研究^[1-6]。由于疲劳试验周期长,试验条件易受限制,有必要采用有限元软件对 FRP 加固梁的抗弯疲劳性能进行进一步研究。近年来一些学者利用有限元软件分析了荷载幅^[7]、FRP 加固层数^[8]、混凝土强度等级^[9]等因素对 FRP 加固梁抗弯疲劳性能的影响。这些研究在有限元模拟时大多不考虑 FRP-混凝土界面的黏结性能,然而大量的试验研究表明:受拉钢筋断裂^[3]和 FRP-混凝土界面剥离^[4]是 FRP 加固梁两种主要的疲劳破坏模式。

作者简介: 张智梅(1972—),女,副教授,博士,主要从事结构抗火与加固研究。E-mail:zhangzhimei@staff.shu.edu.cn

通信作者: 严一铭(1999—),女,硕士研究生,主要从事桥梁工程加固研究。E-mail:yymella@163.com

引用本文: 张智梅,严一铭. 界面黏结性能影响下 FRP 加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳寿命的数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025,53(3):94-100.

ZHANG Zhimei, YAN Yiming. Numerical simulation of flexural fatigue life of FRP-strengthened reinforced concrete beams affected by interfacial bond performance[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025,53(3):94-100.

因此,为准确再现疲劳荷载下 FRP 加固梁的破坏模式,提高有限元模拟的精度,在建模时应考虑 FRP-混凝土界面黏结性能的退化特性。

当前,针对静载及疲劳荷载下 FRP-混凝土界面黏结性能的研究已取得了一些成果^[10-15],黏结-滑移本构模型主要有单线性模型^[10]、双曲线模型^[11]和双线性模型^[12]等。Loo^[14]以双线性模型为基础,建立了疲劳荷载下 FRP-混凝土界面黏结-滑移本构模型,本文基于该模型,在考虑 FRP-混凝土界面黏结性能的影响下,利用 ABAQUS 对疲劳荷载下 FRP 加固梁进行数值模拟,并在此基础上分析钢筋应力幅和 FRP 轴向刚度对 FRP 加固梁抗弯疲劳寿命的影响规律,以为 FRP 加固梁工程应用提供一定的参考。

1 疲劳本构模型与失效准则

1.1 FRP-混凝土界面黏结-滑移本构关系

Loo^[14]以单调荷载下常用的双线性界面黏结-滑移曲线为包络线,假设不同荷载循环次数下界面黏结-滑移曲线的下降段斜率和界面极限滑移值 S_u 均不变,构建了疲劳荷载下的界面黏结-滑移简化模型(图 1),并用来计算 FRP-混凝土界面的参数。图 1 中, $N=1$ 为单调荷载下 FRP-混凝土界面黏结-滑移曲线,即疲劳荷载下界面黏结-滑移简化模型的外包络线。

研究^[15]发现,对于不同形状的黏结-滑移本构模型,只要界面最大剪应力 $\tau_{\max}$ 、初始界面刚度 K_0 、界面断裂能 G_f 相同,模型的曲线形状对界面黏结性能就没有显著影响。而在双线性模型中陆新征等^[12]的研究成果得到广泛认同^[16],因此对模型中主要参数本文采用陆新征的研究成果。

1.2 材料和界面的疲劳失效准则

因 FRP 加固梁的疲劳失效可能由钢筋、混凝土或 FRP 材料的失效导致^[3],也可能由于 FRP-混凝土界面的失效引起^[4],故须分别给出判断各材料和界面的疲劳失效准则,在有限元分析时只要达到其中任意一个失效准则,则可判断 FRP 加固梁失效。在考虑混凝土、钢筋、FRP 材料的本构模型和疲劳性能时,采用张智梅等^[8-9]的成果。

a. 混凝土疲劳失效准则。混凝土残余应变累积至静载极限压应变的 40% 时,不适合继续承载^[8],认为其发生破坏。

b. 钢筋疲劳失效准则。疲劳荷载上限对应的钢筋应力达到疲劳剩余屈服强度时,认为钢筋发生疲劳破坏。

c. FRP 疲劳失效准则。FRP 抗疲劳性能良好,假定其强度不发生退化,当 FRP 应力达到其静载抗拉强度的 80% 时,认为其发生破坏^[17-18]。

d. FRP-混凝土界面失效准则。当 FRP-混凝土界面滑移值达到界面极限滑移量时,界面发生剥离破坏,此时损伤因子为 1,表示界面完全失效。在 ABAQUS 中,当内聚力模型的计算结果参数 CSDMG(缝合面的刚度下降率)的值达到 1 时,标志着 FRP 板与混凝土完全剥离。

2 有限元模型的构建与验证

为了探究 FRP-混凝土界面黏结性能对 FRP 加固梁抗弯疲劳性能的影响,本文利用 ABAQUS 对文献[19]中的试验梁进行有限元建模分析。

2.1 试验简介

选取文献[19]中 4 根采用外贴 FRP 加固的试验梁 B1-EE1-F、B2-EE1-S、B5-EE2-S、B6-EE2-F 进行建模分析,试验梁的尺寸、加载位置及配筋情况如图 2 所示。B2-EE1-S 和 B5-EE2-S 为静载梁,B1-EE1-F 和 B6-EE2-F 为承受疲劳荷载的梁,荷载下限为 4 kN,上限为 64 kN。4 根试验梁均采用一层截面尺寸为 143 mm×1.4 mm、长度为 3 200 mm 的 FRP 板进行加固,材料性能如表 1 所示。

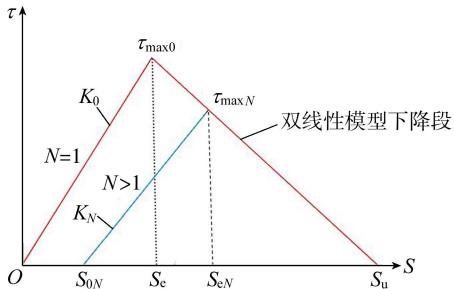


图 1 基于双线性模型的疲劳荷载下界面黏结-滑移简化模型

Fig. 1 A simplified interfacial bond-slip model under fatigue loading based on bilinear model

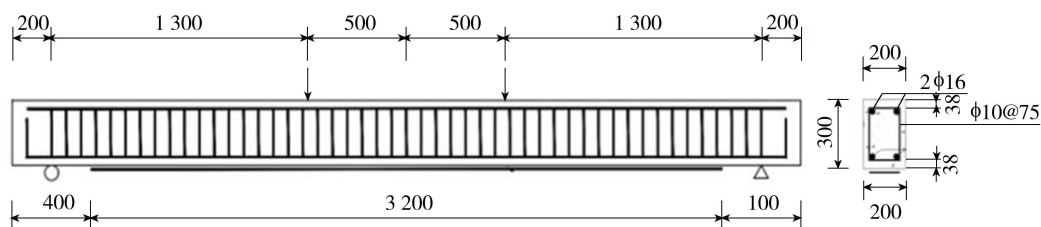


图 2 试验梁尺寸、加载位置及配筋示意图(单位:mm)

Fig. 2 Test beam size, loading position, and reinforcement (unit: mm)

2.2 FRP-混凝土界面黏结性能的模拟方法

选用内聚力模型来模拟 FRP-混凝土界面黏结性能。在 ABAQUS 中可以通过使用内聚力单元或设置内聚力接触的方法来构建此模型。肖云逸等^[20]通过对比发现,内聚力接触不仅能保证计算准确性,且计算效率高。因此,本文采用设置内聚力接触的方法来定义 FRP-混凝土界面之间的黏结性能。在 ABAQUS 的相互作用模块中将 FRP 与混凝土之间设为表面-表面接触,再分别定义界面的法向行为、黏结行为以及损伤。黄凯楠^[21]指出,反映界面黏结性能的双线性模型通常是基于单剪或双剪试验结果建立的,双线性模型用于受弯构件的界面时,黏结性能往往被高估。为此,本文结合有限元试算,对陆新征等^[12]的公式进行适当调整,得到 B2-EE1-S 梁和 B5-EE2-S 梁的界面参数如表 2 所示。由于该试验疲劳加载次数达几十万次,数值模拟很难逐一计算。因此,采用朱劲松等^[22]提出的疲劳累积损伤失效全过程数值分析方法,在模拟疲劳荷载下的 FRP-混凝土界面黏结-滑移时,根据谢超^[15]的公式求得对应的疲劳荷载次数下的界面参数,限于篇幅不在此逐一列出。

2.3 有限元模型的构建

采用 ABAQUS 对试验梁进行模拟,在加载点及支座处设置刚性垫块以防止发生应力集中。混凝土、FRP 板以及垫块均采用 C3D8R 单元模拟,钢筋采用 T3D2 单元模拟。钢筋和混凝土间采用嵌入约束,混凝土与 FRP 板间采用内聚力接触,垫块与加载点间采用耦合约束。由于试验梁尺寸较大,经分析比较,将模型网格长度设置为 50 mm,有限元模型见图 3。

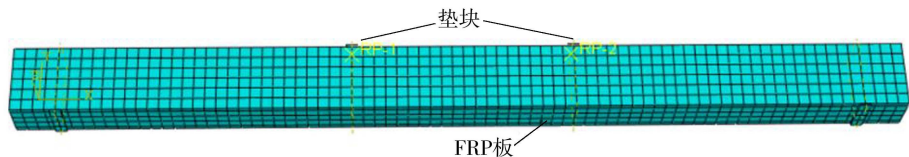


图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

2.4 模型验证

提取静载下有限元模型的荷载-跨中挠度曲线与试验曲线进行对比,以验证建模方法与参数计算结果的正确性,结果如图 4 所示。为方便对比,在建模时同时构建 FRP 与混凝土之间使用 tie 连接的模拟梁(即不考虑 FRP-混凝土界面黏结性能),并根据混凝土是否被压碎判断该梁的破坏情况。由图 4 可知,FRP-混凝土界面采用内聚力接触的有限元模型模拟得到的曲线和试验曲线在各阶段均吻合良好,模拟梁和试验梁的破坏模式均为突然的 FRP 板剥离破坏,如图 5 所示。达到极限荷载时,B2-EE1-S 试验梁跨中挠度为 40 mm,模拟梁挠度为 42 mm,B5-EE2-S 试验梁和模拟梁挠度均为 42 mm。而使用 tie 连接的模拟梁无法模拟出 FRP 剥离破坏,且会使模拟梁的刚度较试验梁大,误差明显大于使用内聚力接触的模拟梁,具体见表 3。

表 1 试验梁材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of test beam materials

编号	混凝土			FRP	
	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
B1-EE1-F	71	4.2	37	2900	200
B2-EE1-S	71	4.2	37	2900	200
B5-EE2-S	72	3.9	37	1800	150
B6-EE2-F	72	3.9	37	1800	150

表 2 试验梁的界面参数

Table 2 Interface parameters of test beams

编号	K_0 /MPa	τ_{max0} /MPa	$G_f/(N/mm)$
B2-EE1-S	75	2.4	0.50
B5-EE2-S	70	2.1	0.46

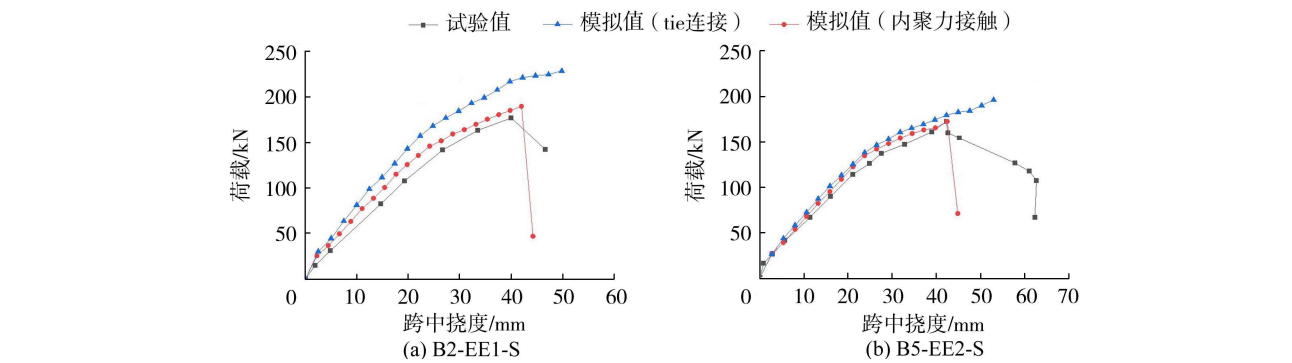


图 4 试验梁荷载-跨中挠度曲线

Fig. 4 Load-midspan deflection curves of test beams

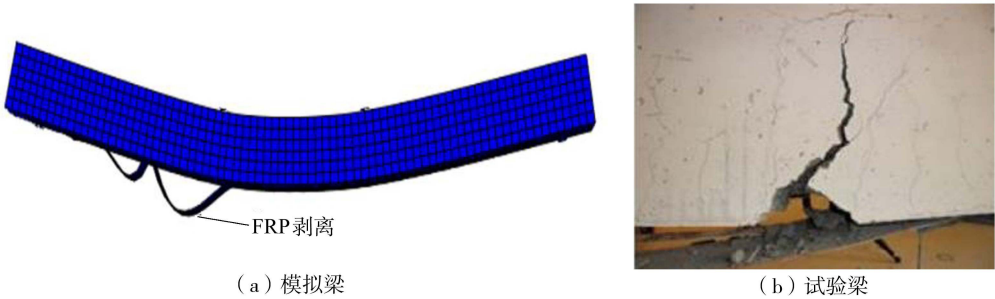


图 5 B2-EE1-S 试验梁的剥离破坏

Fig. 5 Peeling failure of B2-EE1-S test beam

编号	屈服荷载/kN			极限荷载/kN			破坏模式 (内聚力接触)
	试验值	模拟值(tie 连接)	模拟值(内聚力接触)	试验值	模拟值(tie 连接)	模拟值(内聚力接触)	
B2-EE1-S	150.0	168.3	145.9	177.0	228.8	189.7	FRP 剥离
B5-EE2-S	137.9	142.5	135.2	173.0	197.3	173.3	FRP 剥离

综上,考虑 FRP-混凝土界面黏结-滑移的有限元模型不仅能反映界面剥离破坏且精度更高,模拟结果与试验结果误差在 8% 以内。因此,本文采用的建模方法可行,可进一步开展疲劳荷载下的有限元模拟。

利用疲劳累积损伤失效全过程数值分析方法,对疲劳荷载试验梁施加荷载至疲劳荷载上限,根据疲劳失效准则,判断试验梁是否发生疲劳破坏。图 6 为疲劳荷载下试验梁 B1-EE1-F 和 B6-EE2-F 的跨中挠度与荷载循环次数的关系曲线。综合来看,曲线趋势基本一致,且模拟梁的破坏模式与试验结果相同,均为受拉钢筋断裂后 FRP 剥离,受拉钢筋断裂及 FRP 剥离对应的荷载循环次数和 FRP 剥离破坏时试验梁跨中挠度见表 4,误差均在 6% 以内。故本文采用的建模方法、材料疲劳本构模型的计算方法及循环荷载下界面参数的设置是可行的,可进一步开展抗弯疲劳寿命分析。

3 FRP 加固梁抗弯疲劳寿命分析

FRP 加固梁抗弯疲劳性能的主要影响因素有应力幅、FRP 材料用量和 FRP 种类等^[16],而 FRP 种类与

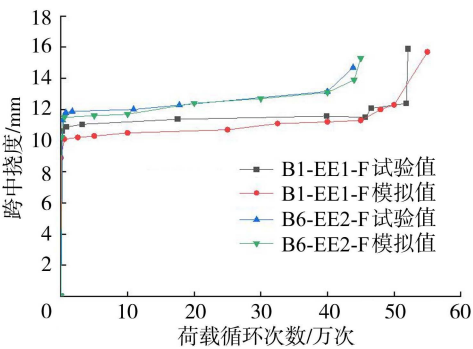


图 6 疲劳荷载下跨中挠度与荷载循环次数的关系曲线

Fig. 6 Relationship between midspan deflection and number of loading cycles under fatigue loading

编号	荷载循环次数				挠度(FRP 剥离)/mm	
	钢筋断裂		FRP 剥离		试验值	模拟值
	试验值	模拟值	试验值	模拟值		
B1-EE1-F	456 213	480 000	520 733	550 000	15.9	15.7
B6-EE2-F	416 866	440 000	438 593	450 000	14.7	15.3

材料用量的不同均可以反映到 FRP 的轴向刚度上,因此,本文以钢筋应力幅和 FRP 的轴向刚度为主要研究变量,分析它们对 FRP 加固梁抗弯疲劳寿命的影响规律。

试验中为避免荷载循环期间的冲击载荷导致梁在支座上移动,试验梁的最小荷载取为 6 kN^[19]。但本文以应力幅为研究变量时,若仅对荷载上限进行调整,会出现应力比($P_{\min}/P_{\max}$)不符合工程实际(通常为 0.1~0.3)或钢筋应力幅过小的问题。因此,以验证过的 B6-EE2-F 梁为基础,荷载范围改为 12~76 kN,其余参数不变,将此梁作为基准梁。

3.1 应力幅的影响

在基准梁的基础上,仅对荷载上限进行改变。为了拟合得到钢筋应力幅与试验梁抗弯疲劳寿命之间的关系式,在 ABAQUS 中提取了不同荷载范围对应的钢筋应力幅,并利用 ABAQUS 试算得到试验梁的抗弯疲劳寿命,结果如表 5 所示。钢筋应力幅为 342 MPa 和 248 MPa 的梁较应力幅为 301 MPa 的梁,抗弯疲劳寿命分别降低 41.9%和提高 90.7%。可见荷载下限一定的情况下,荷载上限越大,钢筋应力幅越大,抗弯疲劳寿命越短。对 $\Delta\sigma$ 与 $\lg N_f$ 进行拟合,结果如图 7 所示。根据图 7 可以得到应力幅的影响公式:

$\lg N_f = 7.24832 - 0.0054\Delta\sigma \quad (R^2 = 0.99793) \quad (1)$
式中: $\Delta\sigma$ 为试验梁内受拉钢筋的应力幅; N_f 为试验梁的抗弯疲劳寿命。

3.2 FRP 轴向刚度的影响

在基准梁的基础上,分别改变基准梁 FRP 板的弹性模量和厚度来为分析 FRP 种类与材料用量对试验梁抗弯疲劳寿命的影响,结果如表 6 所示。由表 6 可知,FRP 轴向刚度为 21.0 kN 和 63.0 kN 的试验梁较 FRP 轴向刚度为 31.5 kN 的梁,抗弯疲劳寿命分别降低 11.6%和提高 53.5%。FRP 厚度的增加和弹性模量的提升均能一定程度上延长试验梁的抗弯疲劳寿命。在式(1)的基础上,为进一步考虑 FRP 轴向刚度对试验梁抗弯疲劳寿命的影响,将 FRP 轴向刚度记为 K ,与 FRP 轴向刚度相关的影响公式记为 $\beta(K)$,即 $\beta(K) = \lg N_f / (7.24832 - 0.0054\Delta\sigma)$,拟合结果如图 8 所示,拟合公式为

$\beta(K) = 0.96967 + 0.00101K \quad (R^2 = 0.99717) \quad (2)$
由式(1)(2)得到抗弯疲劳寿命计算公式为
 $\lg N_f = (7.24832 - 0.0054\Delta\sigma)(0.96967 + 0.00101K) \quad (3)$

3.3 抗弯疲劳寿命计算公式验证

为验证式(3)的正确性,收集了有关 FRP 加固梁抗弯疲劳寿命的试验结果并与式(3)计算结果进行比较,结果见表 7,抗弯疲劳寿命的试验值与计算值之比的平均值、标准差、变异系数分别为 1.00、0.07、0.07。可见,式(3)计算得出的抗弯疲劳寿命与试验值总体吻合较好。个别数据差距较大,可能是式(3)仅考虑了应力幅和 FRP 轴向刚度的影响,未考虑加载频率、配筋率等因素。可见,本文拟合得出的计算公式(式(3))能够较为准确地预测试验梁抗弯疲劳寿命,可为实际工程提供一定的参考。

表 5 不同应力幅下试验梁的抗弯疲劳寿命
Table 5 Flexural fatigue life of test beams under different stress amplitudes

荷载范围/kN	应力幅/MPa	抗弯疲劳寿命/万次
12~64	248	82
12~70	277	55
12~76	301	43
12~82	319	34
12~88	342	25

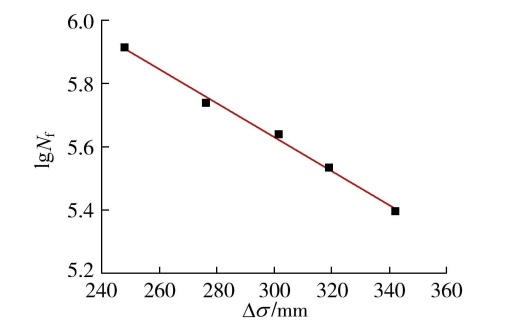


图 7 $\Delta\sigma$ 与 $\lg N_f$ 的关系曲线
Fig. 7 Relationship between $\Delta\sigma$ and $\lg N_f$

表 6 不同 FRP 轴向刚度下试验梁的抗弯疲劳寿命
Table 6 Flexural fatigue life of test beams under different FRP axial stiffness

厚度/mm	弹性模量/GPa	轴向刚度/kN	抗弯疲劳寿命/万次
1.4	100	21.00	38
1.4	150	31.50	43
1.4	200	42.00	51
0.7	150	15.75	36
2.8	150	63.00	66

注:本文轴向刚度以轴向刚度参数 EA 表征,其中 E 为弹性模量, A 为截面积。

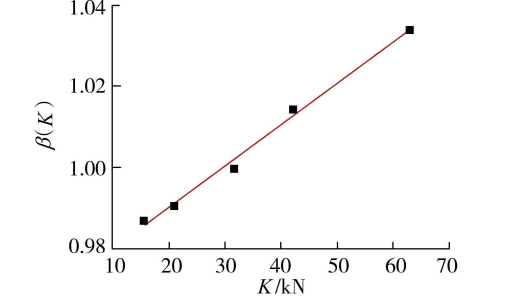


图 8 $\beta(K)$ 与 K 的关系曲线
Fig. 8 Relationship between $\beta(K)$ and K

表 7 试验梁抗弯疲劳寿命试验值与计算值比较

Table 7 Comparison between test values and calculated values of flexural fatigue life of test beams

参考文献	试验梁编号	应力幅/MPa	FRP 轴向刚度/kN	抗弯疲劳寿命		
				试验值/次	计算值/次	计算值与试验的比值
[23]	F4-26B	366	22. 28	168 012	170 105	1. 01
[23]	F4-28	400	22. 28	98 853	111 829	1. 13
[23]	F4-32	466	22. 28	43 254	49 538	1. 15
[24]	S-2	233	18. 462	880 000	831 985	0. 95
[24]	S-5	239	18. 462	800 000	772 848	0. 97
[24]	S-10	246	18. 462	685 000	709 146	1. 04
[24]	S-7	264	18. 462	570 000	568 422	1. 00
[24]	S-6	384	18. 462	126 000	130 089	1. 03
[24]	S-9	326	18. 462	235 000	215 306	0. 92
[25]	G-1-10	208	1. 488 62	885 000	888 249	1. 00
[25]	C-2-4	278	1. 151 5	378 499	379 730	1. 00
[25]	C-1-2	338	0. 366	208 928	182 232	0. 87

4 结 论

- a. 基于疲劳荷载下 FRP-混凝土界面黏结-滑移本构模型,在 ABAQUS 中使用内聚力接触模拟界面行为,采用疲劳累积损伤失效全过程数值分析方法,在考虑界面黏结性能的情况下,构建了疲劳荷载下 FRP 加固梁的有限元模型。通过分析验证,证明相较于不考虑界面黏结性能影响的有限元模型,构建的模型模拟精度更高且能准确模拟出试验梁的疲劳破坏模式。
- b. 利用有限元软件试算得到试验梁抗弯疲劳寿命,进而研究钢筋应力幅和 FRP 轴向刚度对 FRP 加固梁抗弯疲劳寿命的影响规律,结果表明:应力幅的增大会明显降低试验梁的抗弯疲劳寿命,而 FRP 轴向刚度的增大能在一定程度上提高试验梁抗弯疲劳寿命。
- c. 分析了应力幅、FRP 材料用量和 FRP 种类对 FRP 加固梁抗弯疲劳寿命的影响规律,拟合得到了同时考虑应力幅和 FRP 轴向刚度的试验梁抗弯疲劳寿命计算公式。拟合公式的验证结果表明,计算得到的试验梁抗弯疲劳寿命与试验结果接近,可为 FRP 加固梁的抗弯疲劳寿命预测提供一定的参考。

参考文献:

[1] MANDOR A, EL REFAI E. Theoretical investigation of the structural performance of multi-span reinforced concrete beams strengthened with FRCM systems[J]. Engineering Structures, 2024, 308: 117994.

[2] GONG Shuang, SU Miao, ZHANG Jianren, et al. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with gradually prestressed near surface mounted carbon fiber-reinforced polymer strips under static and fatigue loading [J]. Advances in Structural Engineering, 2024, 27(7): 1234-1250.

[3] CHARALAMBIDI B G, ROUSAKIS T C, KARABINIS A I. Fatigue behavior of large-scale reinforced concrete beams strengthened in flexure with fiber-reinforced polymer laminates [J]. Journal of Composites for Construction, 2016, 20(5): 04016035.

[4] WANG Y C, LEE M G, CHEN B C. Experimental study of FRP-strengthened RC bridge girders subjected to fatigue loading[J]. Composite Structures, 2007, 81(4): 491-498.

[5] 王海涛,马明磊,许国文,等. 预应力 CFRP 绞线和钢筋混合配筋混凝土梁的抗弯性能[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 58-63. (WANG Haitao, MA Minglei, XU Guowen, et al. Flexural behavior of concrete beams reinforced by hybrid prestressed CFRP strands and steel rebars [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (3): 58-63. (in Chinese))

[6] 王海涛,朱长玉,熊浩,等. 锚固方法和预应力水平对 CFRP 板加固钢筋混凝土梁抗弯性能的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(5): 104-110. (WANG Haitao, ZHU Changyu, XIONG Hao, et al. Effects of anchorage method and prestressing level on flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with CFRP plates [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(5): 104-110. (in Chinese))

[7] 张智梅,杨旸. 外贴预应力 CFRP 布加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳性能有限元分析[J]. 复合材料科学与工程, 2023(2): 44-53. (ZHANG Zhimei, YANG Yang. Finite element analysis of the flexural fatigue performance of reinforced concrete beams

reinforced with externally bonded prestressed CFRP sheets[J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(2): 44-53. (in Chinese))

[8] ZHANG Zhimei, LI Tao. Deformation performance of CFRP-strengthened corroded reinforced concrete beams after fatigue loading [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(10): 6198.

[9] 张智梅, 杨铭. 外贴 FRP 加固钢筋混凝土梁抗弯疲劳性能研究进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(7): 121-128. (ZHANG Zhimei, YANG Ming. Research progress of fatigue performance of RC beams strengthened with externally bonded FRP [J]. *Composites Science and Engineering*, 2021(7): 121-128. (in Chinese))

[10] NEUBAUER U, ROSTASY F S. Bond failure of concrete fiber reinforced polymer plates at inclined cracks experiments and fracture mechanics model [C]//*Proceedings of 4th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures* ACI. Michigan: Farmington Hills, 1999: 369-382.

[11] DAI Jianguo, UEDA T, SATO Y. Development of the nonlinear bond stress-slip model of fiber reinforced plastics sheet-concrete interfaces with a simple method[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2005, 9(1): 52-62.

[12] 陆新征, 叶列平, 滕锦光, 等. FRP-混凝土界面黏结滑移本构模型[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(4): 10-18. (LU Xinzheng, YE Lieping, TENG Jinguang, et al. Bond-slip model for FRP-to-concrete interface[J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(4): 10-18. (in Chinese))

[13] 陈雨唐, 缪凡璠, 唐晨, 等. 冻融循环与持续荷载共同作用下 FRP 片材-混凝土界面黏结性能的退化行为[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5): 468-476. (CHEN Yutang, LIAO Fanfan, TANG Chen, et al. Bond performance degradation behavior of FRP laminate-to-concrete interface under combined effects of freeze-thaw cycling and sustained loading[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(5): 468-476. (in Chinese))

[14] LOO Y M K. Fatigue behaviour of CFRP-repaired corroded RC beams[D]. Sydney: University of New South Wales, 2010.

[15] 谢超. CFRP-混凝土界面的黏结滑移本构关系及影响因素研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.

[16] WANG Xin, SAYED A M, WU Zhishen, et al. Modeling of the flexural fatigue capacity of RC beams strengthened with FRP sheets based on finite-element simulation[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(8): 04014189.

[17] 李天庆. CFRP 加固钢筋混凝土结构疲劳性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[18] 陈永秀. 碳纤维布加固钢筋混凝土梁动静载性能试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.

[19] MAHAL M, TÄLJSTEN B, BLÄNKSVD T. Experimental performance of RC beams strengthened with FRP materials under monotonic and fatigue loads[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 122: 126-139.

[20] 肖云逸, 章子华. 基于内聚力模型的快速荷载下 CFRP-混凝土界面剪切剥离模拟[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2020, 33(4): 82-88. (XIAO Yunyi, ZHANG Zihua. Numerical simulation of interfacial debonding between CFRP and concrete under rapid loading[J]. *Journal of Ningbo University (NSEE)*, 2020, 33(4): 82-88. (in Chinese))

[21] 黄凯楠. 湿热环境下预应力 CFRP 加固 RC 梁疲劳性能的数值模拟研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

[22] 朱劲松, 朱先存. 钢筋混凝土桥梁疲劳累积损伤失效过程简化分析方法[J]. *工程力学*, 2012, 29(5): 107-114. (ZHU Jinsong, ZHU Xiancun. Study on simplified method for the analysis of fatigue failure process of RC bridges[J]. *Engineering Mechanics*, 2012, 29(5): 107-114. (in Chinese))

[23] DONG Yongtao, ANSARI F, KARBHARI V M. Fatigue performance of reinforced concrete beams with externally bonded CFRP reinforcement[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2011, 7(3): 229-241.

[24] PPAKONSTANTINO C G, PETROU F M, HARRIES K A. Fatigue behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets[J]. *Journal of Composites for Construction*, 2001, 5(4): 246-255.

[25] MENEGHETTI C L, GARCEZ R M, FILHO S D P C L, et al. Fatigue life regression model of reinforced concrete beams strengthened with FRP[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2011, 63(7): 539-549.

(收稿日期: 2024 - 05 - 05 编辑: 熊水斌)