

基于铁基形状记忆合金的钢桥U肋对接焊缝疲劳裂纹加固数值分析

张 伟, 王行宇, 姚 艳, 彭建新

长沙理工大学土木与环境工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年6月30日

摘 要

为研究铁基形状记忆合金(Fe-SMA)贴片加固对含气孔缺陷钢桥U肋对接焊缝疲劳裂纹的抑制效果, 本文采用ABAQUS有限元软件建立了考虑粘结层损伤的三维数值分析模型。基于内聚力理论模拟粘结界面力学行为, 采用扩展有限元法(XFEM)模拟裂纹扩展过程, 通过等效温度载荷法施加Fe-SMA激活预应力。系统分析了气孔缺陷对应力分布及裂纹前缘应力强度因子幅值的影响规律, 验证了Fe-SMA加固的有效性。结果表明: 气孔缺陷处产生显著应力集中, 裂纹周边应力较无缺陷试件增大33.64%, 裂纹前缘应力强度因子升高56.89%; 粘贴Fe-SMA加固后, 裂缝尖端应力降低53.55%, I型应力强度因子幅值降幅达81.77%, 有效抑制了疲劳裂纹扩展; U肋对接焊缝疲劳裂纹扩展主要由I型开裂主导, Fe-SMA加固显著改善了I型开裂模式且未引入新的疲劳损伤模式; 粘结层厚度的不均匀性不改变应力传递方向, 但会导致应力分布的不对称性。本研究为Fe-SMA加固技术在钢桥疲劳裂纹修复中的工程应用提供了数值分析依据。

关键词

钢桥面板, Fe-SMA加固, 数值模拟, 疲劳裂纹, 应力强度因子, 粘结层损伤

Numerical Analysis of Fatigue Crack for Strengthening of Weld Joints of U-Rib of Steel Bridge Based on Fe-SMA

Wei Zhang, Xingyu Wang, Yan Yao, Jianxin Peng

School of Civil and Environmental Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan

Received: May 26, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 30, 2026

文章引用: 张伟, 王行宇, 姚艳, 彭建新. 基于铁基形状记忆合金的钢桥 U 肋对接焊缝疲劳裂纹加固数值分析[J]. 土木工程, 2026, 15(6): 151-164. DOI: 10.12677/hjce.2026.156165

Abstract

To investigate the effectiveness of iron-based shape memory alloy (Fe-SMA) patch reinforcement in suppressing fatigue cracks in butt welds of U-ribs on steel bridges with porosity defects, a three-dimensional numerical analysis model that accounts for damage in the bond layer was established using ABAQUS finite element software. The mechanical behavior at the bonded interface was simulated based on cohesive force theory, the crack propagation process was modeled using the Extended Finite Element Method (XFEM), and Fe-SMA activation prestress was applied via the equivalent temperature load method. The influence of porosity defects on stress distribution and the amplitude of the stress intensity factor at the crack tip was systematically analyzed, verifying the effectiveness of Fe-SMA reinforcement. The results indicate that significant stress concentration occurs at the porosity defects, with the stress around the crack increasing by 33.64% compared to defect-free specimens, and the stress intensity factor at the crack tip rising by 56.89%. After reinforcement with Fe-SMA, the stress at the crack tip decreased by 53.55%, and the amplitude of the Type I stress intensity factor decreased by 81.77%, effectively suppressing fatigue crack propagation; fatigue crack propagation in U-rib butt welds is primarily dominated by Type I cracking. Fe-SMA reinforcement significantly improved the Type I cracking mode without introducing new fatigue damage modes; unevenness in the adhesive layer thickness does not alter the direction of stress transfer but leads to asymmetry in stress distribution. This study provides a numerical analysis basis for the engineering application of Fe-SMA reinforcement technology in the repair of fatigue cracks in steel bridges.

Keywords

Steel Bridge Deck, Fe-SMA Reinforcement, Numerical Simulation, Fatigue Cracks, Stress Intensity Factor, Damage to the Bond Layer

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钢桥作为现代交通基础设施的关键枢纽，其服役安全直接关系到人民生命安全与交通网络畅通[1]。正交异性钢桥面板构造复杂，在长期车辆交变荷载作用下，U肋对接焊缝易成为疲劳易损细节，裂纹一旦形成将严重威胁结构安全[2][3]。焊接过程中难以避免的气孔、夹渣等初始缺陷，会削弱焊缝有效承载面积，引起局部应力集中，显著加速疲劳裂纹的萌生与扩展，进一步加剧该细节的失效风险[4]-[6]。

针对钢桥疲劳裂纹，传统热加固方法可直接消除裂纹，但施工需中断交通，且热输入会引入残余拉应力，易诱发新生裂纹甚至脆性断裂[7][8]。冷加固技术如止裂孔法、装配式钢板及纤维增强复合材料加固避免了热影响，但止裂孔仅为过渡性延缓措施，装配式加固对施工空间与质量控制要求较高[9]-[11]。因此，开发兼具高效止裂能力与便捷施工性的新型加固技术，成为该领域的重要发展方向。

铁基形状记忆合金(Fe-SMA)作为一种新型智能材料，凭借独特的形状记忆效应，可通过加热激活在室温下产生 300 MPa 以上的稳定恢复应力，以预压应力的方式主动约束裂纹扩展，为结构修复提供了变革性思路[12]-[14]。近年来，围绕 Fe-SMA 加固钢结构，国内外学者开展了系统研究：Izadi 等[15]首创了 Fe-SMA 条带加固裂纹钢板的方法；Qiang 等[16]采用粘结 Fe-SMA 板加固含裂纹钢桥横隔板，实验与数值模拟表明激活后裂纹尖端应力强度因子显著降低；针对不同锚固机制，Qiang 等[17]进一步验证了 Fe-SMA 与钢板的螺栓连接可靠性，而 Wang 等[18][19]则深入探究了 Fe-SMA-钢板粘结界面的力学性能，

开发了纯粘结锚固体系,并实现了金属结构中的完全止裂,裂纹扩展寿命延长至未加固状态的6.9倍[20]。上述成果充分展示了 Fe-SMA 在钢桥疲劳修复领域的巨大潜力。

总之,当前研究多聚焦于 Fe-SMA 对理想预制裂纹的加固效果,忽视了实际焊缝中固有气孔等制造缺陷的影响。本文在前期试验基础上,建立考虑气孔缺陷和粘结层损伤演化的 U 肋对接焊缝三维有限元模型,系统分析气孔缺陷对焊缝应力场及裂纹前缘应力强度因子的影响机制,对比验证 Fe-SMA 粘贴加固的裂纹抑制效果,为工程应用提供准确的数值分析依据。

2. 粘结层损伤模型

2.1. 粘结分离模型

粘结分离模型是一种在材料力学和结构分析中广泛使用的模型,用于描述两种或多种材料界面间的相互作用和分离行为。假设材料界面间存在一种粘结力,这种粘结力可以抵抗界面间的相对运动,当粘结力达到某个临界值时,材料之间会发生分离。在受力过程中,界面上的粘结力会随着相对位移的增加而增加,直到达到最大值,当粘结力达到最大值后,随着相对位移的继续增加,粘结力会逐渐减小,直至为零,此时材料之间发生完全分离。

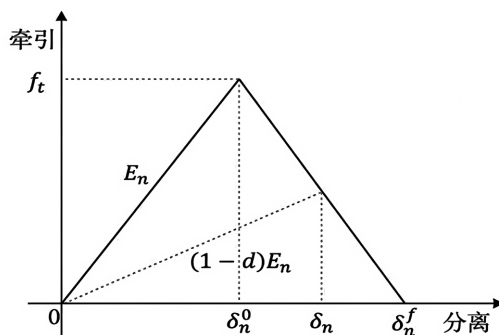


Figure 1. Adhesion-separation model
图 1. 粘结分离模型

该模型反映了内聚力区域假想面上的内聚牵引力与界面张开位移之间的关系,如图 1 所示。当粘结层牵引力小于 f_t 时,粘结层处于弹性阶段,不发生破坏;当粘结层牵引力大于 f_t 时,粘结层开始破坏,直到粘结层牵引力为 0,粘结层脱落。

设张开位移 δ_n 对应的裂纹面牵引力 t_n , 则: 当 $\delta_n \leq \delta_n^0$ 时:

$$t_n = E_n \delta_n \quad (1)$$

式中, E_n 为粘结层开裂前的材料刚度,可由弹性模量 E_a 得到:

$$E_n = \frac{E_a}{t_a} \quad (2)$$

式中, t_a 为粘结层的厚度。另外, δ_n^0 可由下式得到:

$$\delta_n^0 = \frac{t_a f_t}{E_a} \quad (3)$$

当 $\delta_n^0 < \delta_n < \delta_n^f$ 时:

$$t_n = E_n \delta_n (1-d) \quad (4)$$

式中, d 为损伤因子,可由下式得到:

$$d = \frac{\delta_n^f (\delta_n - \delta_n^0)}{\delta_n (\delta_n^f - \delta_n^0)} \quad (5)$$

损伤因子 d 反映了粘结层的损伤程度，其取值范围为 0 到 1。当 $\delta_n \geq \delta_n^f$ 时：

$$t_n = 0 \quad (6)$$

Teng 等[21]的研究结果表明， δ_n^f 可由粘结层的厚度和拉伸极限应变确定，即：

$$\delta_n^f = \varepsilon_f t_a \quad (7)$$

式中， ε_f 为粘结层的拉伸极限应变，粘结 - 分离曲线与坐标轴围成的面积即为单位面积产生界面分离的断裂能 G_I ，可由下式计算获得：

$$G_I = \frac{1}{2} f_t \delta_n^f \quad (8)$$

2.2. 粘结滑移模型

粘结滑移模型是一种描述材料内部粘结行为的数学模型，粘结滑移模型基于材料中存在的粘结力和滑移位移之间的关系。在材料中，粘结力会随着滑移位移的增加而增加，这种关系可以通过建立数学方程来描述。该模型反映了内聚力区域假想面上的内聚牵引力与界面张开位移之间的关系，如图 2 所示。

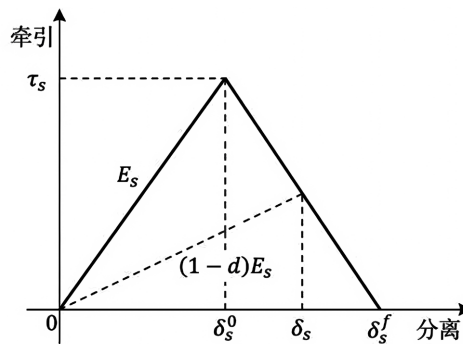


Figure 2. Adhesive-slip model
图 2. 粘结滑移模型

设张开位移 δ_s 对应的裂纹面牵引力 t_s ，则：当 $\delta_s \leq \delta_s^0$ 时：

$$t_s = E_s \delta_s \quad (9)$$

式中， E_n 为粘结层开裂前的材料刚度，可由弹性模量 G_a 得到：

$$E_s = \frac{G_a}{t_a} \quad (10)$$

式中， t_a 为粘结层的厚度。另外， δ_s^0 可由下式得到：

$$\delta_s^0 = \frac{t_a f_t}{E_a} \quad (11)$$

当 $\delta_s^0 < \delta_s < \delta_s^f$ 时：

$$t_s = E_s \delta_s (1-d) \quad (12)$$

式中， d 为损伤因子，可由下式得到：

$$d = \frac{\delta_s^f (\delta_s - \delta_s^0)}{\delta_s (\delta_s^f - \delta_s^0)} \quad (13)$$

当 $\delta_s \geq \delta_s^f$ 时:

$$t_s = 0 \quad (14)$$

δ_s^f 可由下式得到:

$$\delta_s^f = \frac{2G_{II}}{\tau_s} \quad (15)$$

式中, G_{II} 为单位面积产生界面分离的断裂能, 可由下式得到:

$$G_{II} = 31 \left(\frac{f_t}{G_a} \right)^{0.56} t_a^{0.27} \quad (16)$$

将式(15)代入式(13), 有

$$\delta_s^f = 62 \left(\frac{f_t}{G_a} \right)^{0.56} \frac{t_a^{0.27}}{\tau_s} \quad (17)$$

2.3. 粘聚力理论本构模型及损伤法则

传统的粘结分离模型和粘结滑移模型仅考虑粘结层在单一方向上的牵引分离行为, 而 Fe 基形状记忆合金与钢板间的粘结界面受力状态具有显著复杂性, 需采用混合模式内聚力模型进行全面分析。该模型能够同时考量界面法向及两个剪切方向的牵引分离行为, 更准确地反映实际受力状态。为简化分析过程, 将粘结材料视为线性弹性体, 并假定在界面损伤发生前, 粘结层始终处于线弹性变形阶段。在该阶段, 假设粘聚力本构关系中法向应力分量与切向应力分量相互独立, 两者之间不存在耦合作用。

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \delta \quad (18)$$

式中, t 为粘聚应力向量, t_n 、 t_s 、 t_t 为法向和两个切向应力分量; K 为界面刚度, K_{nn} 、 K_{ss} 、 K_{tt} 为对应的刚度分量; δ 为界面张开位移, δ_n 、 δ_s 、 δ_t 为对应的位移分量。

为准确表征多向应力状态下粘结层损伤的起始行为, 需考虑应力分量的耦合作用, 采用二次名义应力准则作为内聚力单元的初始损伤判定依据。当材料各向名义应力比值的平方和等于 1 时, 材料刚度矩阵开始退化, 标志着界面损伤的发生, 具体为:

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (19)$$

式中, t_n 、 t_s 、和 t_t 分别为粘结层三个方向上的应力; t_n^0 、 t_s^0 和 t_t^0 分别为对应的破坏最大名义应力; n 、 s 和 t 分别为垂直和平行粘结面的三个方向。

粘结层开始破坏后:

$$t_n = (1-d) E_{nn} \delta_n \quad (\text{当粘贴材料受拉时}) \quad (20)$$

$$t_n = E_{nn} \delta_n \quad (\text{当粘贴材料受压时}) \quad (21)$$

$$t_s = (1-d) E_{ss} \delta_s \quad (22)$$

$$t_n = (1-d)E_u\delta_t \tag{23}$$

引入有效位移 δ_m :

$$\delta_m = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2} \tag{24}$$

则 d 由下式可得:

$$d = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \tag{25}$$

式中, δ_m^f 为界面裂纹最终破坏的有效位移, δ_m^{\max} 为加载历史的最大有效位移, δ_m^0 为损伤初始状态的有效位移。

3. 数值模型建立

本文采用 ABAQUS 有限元分析软件建立正交异形板 U 肋对接焊缝处裂缝的修复模型。有限元模型由正交异形板结构胶以及 Fe-SMA 条四个组件组成。Fe-SMA 条在试件 Fe-H 表面通过结构胶粘贴, 相应有限元模型中试件、结构胶、Fe-SMA 条从内向外排列 3 层, 粘结层采用基于连续体的 cohesive 单元模拟, 各相邻部分的接触方式采用“Tie 约束”, Fe-SMA 带厚 3 mm, 结构胶厚 2 mm。

ABAQUS 软件集成了 Part、Property、Assembly 等多个功能模块, 通过模块化操作可实现结构应力状态的高效求解。具体建模分析流程如下:

- 1) Part: 在 Part 模块中分别创建钢板、Fe-SMA 及结构粘结层等几何部件。
- 2) Property: 分别为钢板、加固材料及粘结层赋予相应的力学参数。
- 3) Assembly: 对各部件进行实例化, 并按照实际修复方案完成几何装配, 确保各部件相对位置与试验状态一致。
- 4) Step: 针对 SMA 加固模型需明确区分预紧力施加阶段与疲劳荷载作用阶段。分析过程遵循的加载顺序: 首先施加 SMA 预应力, 随后引入疲劳荷载。需额外输出 SDEG (刚度退化因子)和 STATUS (单元状态)等场变量。
- 5) Interaction: 采用扩展有限元法(XFEM)模拟裂纹扩展。依据图 3 设置初始裂纹参数, 裂纹长度 20 mm, 深度 1 mm。使用 Tie 约束绑定钢板 - 粘结层界面及粘结层 - 加固材料界面, 并定义裂纹区域及尖端位置, 具体设置参见图 3。

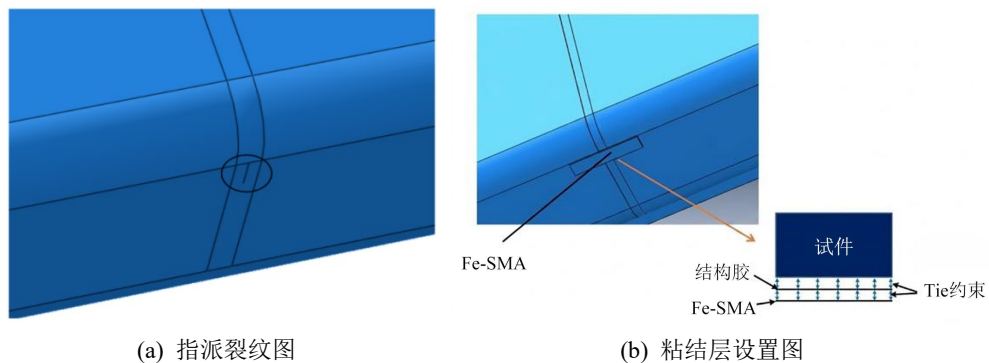


Figure 3. Numerical model of the test specimen
图 3. 试件数值模型

- 6) Load: 对于激活 Fe-SMA 所产生预应力采用等效温度载荷法模拟 Fe-SMA 激活区域内的预应力。

通过施加温度梯度(ΔT)和特定热膨胀系数(α)来实现的。具体来说, 等效温度梯度 ΔT 根据下式:

$$\Delta T = \frac{\sigma_{pre}}{E_{SMA} \alpha_{SMA}} \quad (26)$$

式中, E_{SMA} 和 α_{SMA} 分别为 Fe-SMA 的弹性模量和热膨胀系数。 σ_{pre} 为 Fe-SMA 的预应力水平。采用均布荷载单次施加方式, 确保加载位置与试验条件一致。荷载作用区域设定为顶板上表面中心 $70 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 区域, 如图 4 所示。

边界条件设置考虑到实际实验条件, 所以在数值模拟过程中对其底座采用全固定的形式进行模拟, 以此达到试验过程中的边界条件。如图 4 所示。

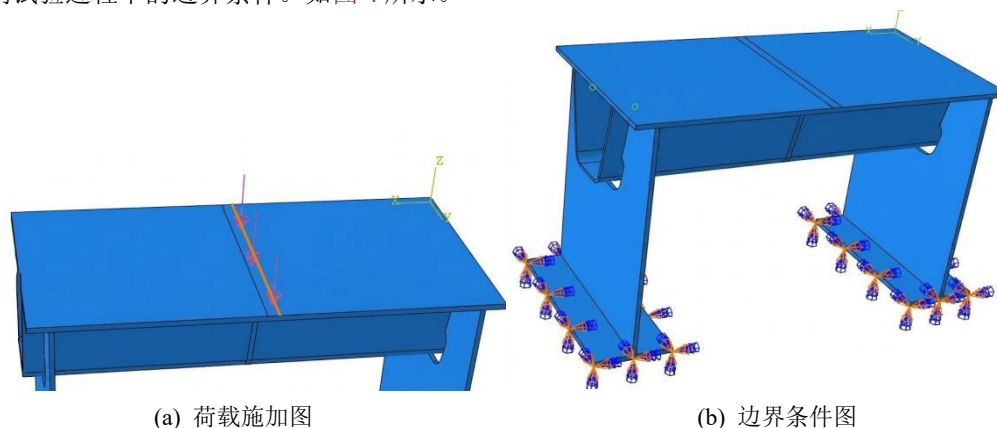


Figure 4. Model boundary conditions

图 4. 模型边界条件

7) Mesh: 钢结构部分采用 C3D8R 单元, 环氧树脂胶层采用 COH3D8 单元, GFRP 与 CFRP 复合材料采用 C3D20R 单元。全局网格尺寸设定为 10 mm , 焊缝区域局部加密至 2 mm , 裂纹尖端及止裂孔周边区域进行网格细化处理, 裂纹尖端附近采用 0.5 mm 的精细网格, 最终网格划分效果参见图 5。

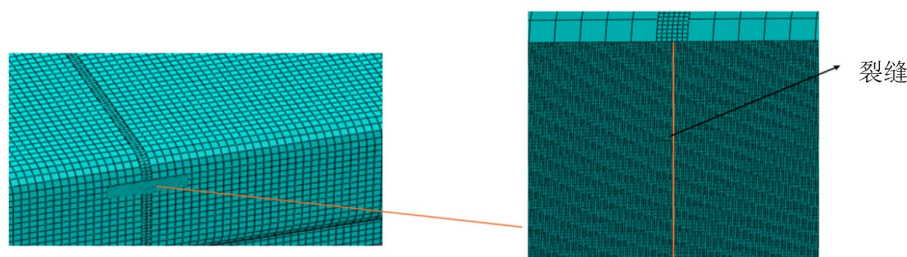


Figure 5. Mesh partitioning results

图 5. 网格划分结果

8) Job: 提交作业, 得到结构应力状态。

4. 模型验证

取 σ_2 在各荷载作用下应力大小进行对比数值模拟结果与试验结果的对比如图 6 所示, 可知: 数值模拟结果与试验结果在多个荷载工况下的对比显示, 两者在测点处的应力水平表现出良好的一致性。虽然数值模拟与试验结果在整体趋势上高度一致, 但仍存在一些细微的数值差异。有限元模型中的加载和边界条件往往是基于理想化假设建立的, 这些理想状态在实际操作中难以实现。其次, 加固方法虽然在模

型中得到了精确模拟，但实际操作中的加固效果可能受到施工精度、材料性能变异等因素的影响，导致与模型预测存在偏差。实验过程中的一些不可控因素也是造成误差的重要原因。

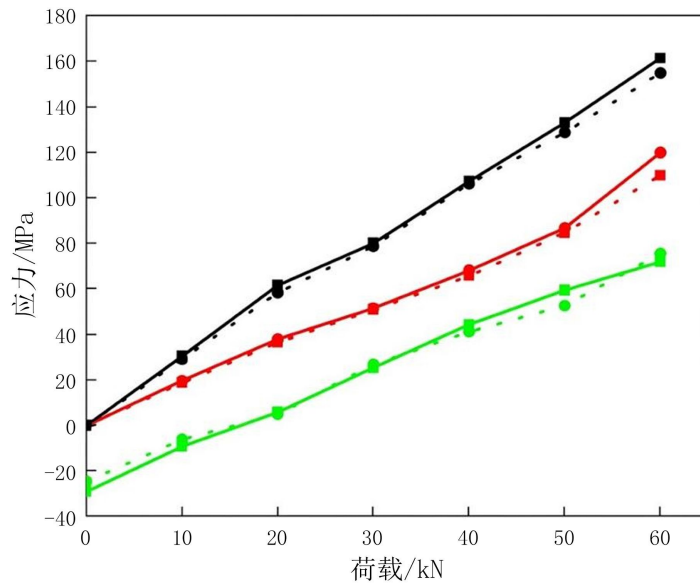
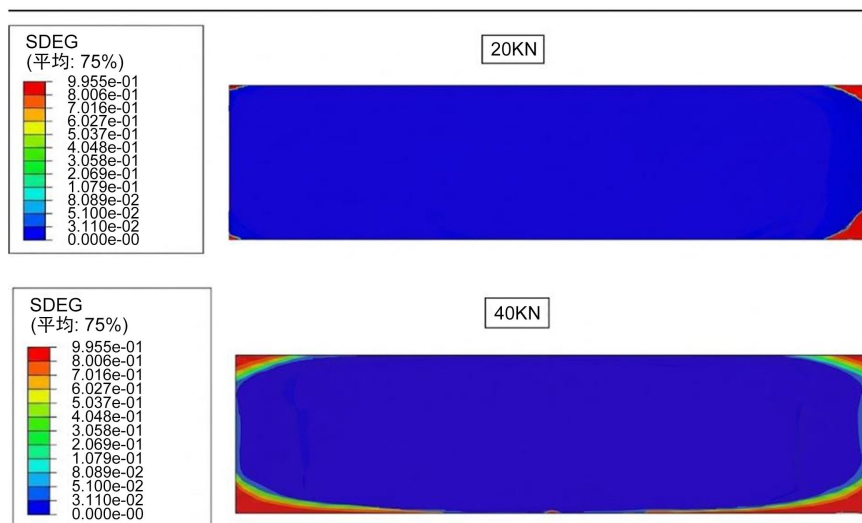


Figure 6. Comparison of numerical simulation and experimental results
图 6. 数值模拟与试验结果对比

5. 数值结果分析

5.1. 粘结层分析

当满足损伤起始判据后，粘结层即进入损伤演化阶段。在该阶段，采用标量刚度退化因子 SDEG 来量化内聚力单元的性能状态及界面损伤水平，其取值范围为 0 到 1，表征材料当前刚度相对于初始刚度的保留比例。随着 SDEG 从 0 逐步递增至 1，界面将经历从初始损伤萌生到完全失效的演变过程。材料损伤后假设刚度呈线性衰减趋势，采用基于界面断裂能的 BK 失效准则控制刚度退化过程。通过该模型可准确描述粘结层的渐进损伤行为，刚度退化过程见图 7。



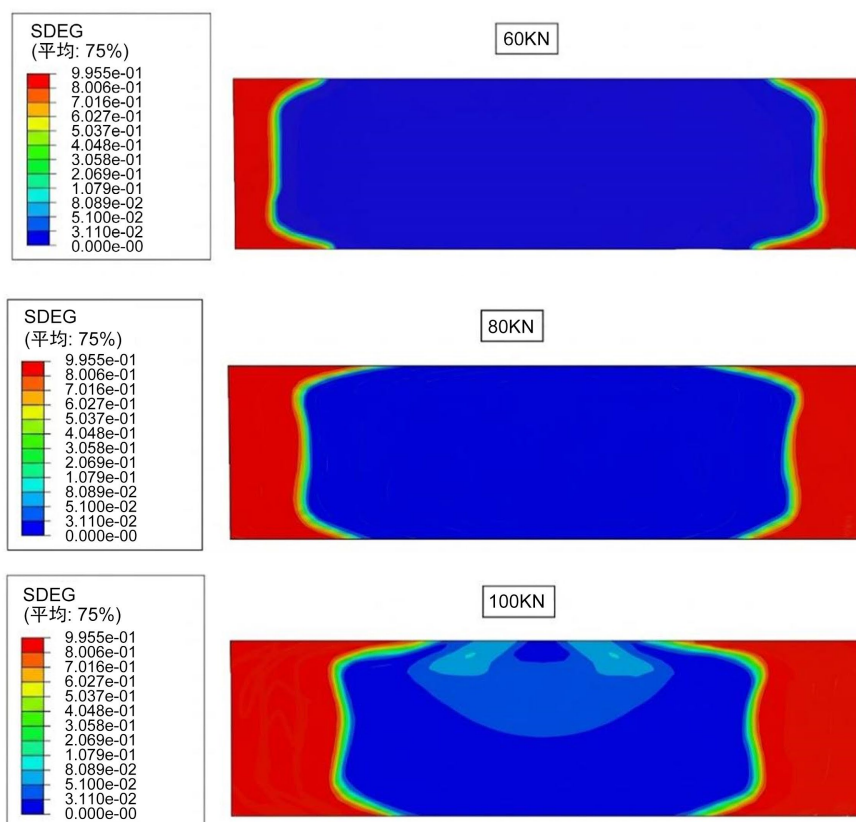
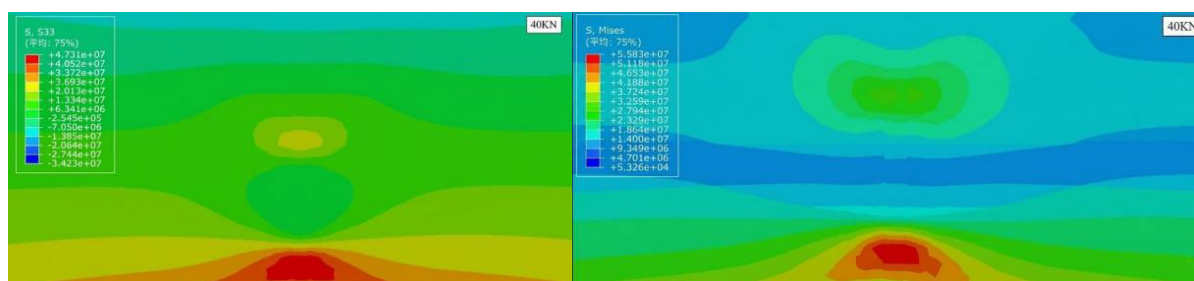


Figure 7. Stiffness degradation process of the bond layer
图 7. 粘结层刚度退化过程

如图 8 所示, 图(a)为粘结层厚度均匀试件的 S33 应力云图, 图(b)为粘结层厚度沿 Fe-SMA 长边方向逐渐变厚试件的 S33 应力云图。(a)组试件的应力关于裂缝呈对称分布, 而(b)组试件的应力关于裂缝呈不对称分布, 在纵向上应力有梯度变化。粘结层厚度的非均匀性不会改变试件中应力的传递方向。然而, 它会影响应力在传递过程中的分布状况, 造成应力分布的不均匀性。



(a) 粘结层厚度均匀试件应力分布

(b) 粘结层厚度不均匀试件应力分布

Figure 8. Stress distribution near the crack
图 8. 裂缝附近区域应力图

5.2. 应力结果分析

本文将距裂缝尖端 0 mm、2 mm、5 mm、10 mm、15 mm 以及 20 mm 的应力进行整理, 将 σ_0 表示为距离裂缝尖端 0 cm 处的应力, 可得到不同荷载下各试件应力分布图, 见图 9。

由图 9(a)可知,随着荷载的逐步增加,无气孔缺陷的试件 A 在距离裂缝不同位置处的应力呈现出显著的上升趋势。对于未经特殊处理的试件 H,荷载的增加导致了应力在局部区域的急剧累积,对试件的结构完整性和耐久性构成威胁。

由图 9(b)看出,在相同荷载作用下,含气孔缺陷的试件 B 整体应力水平显著高于无缺陷试件 A,且在焊缝气孔位置附近出现明显的应力跃升现象。这一结果表明,焊接气孔作为典型的内部体积型缺陷,会破坏钢材基体的连续性,减小焊缝有效受力面积,迫使应力在缺陷边缘高度集中,进而使相同荷载下结构局部应力大幅升高,直接降低构件的静载与疲劳承载能力。

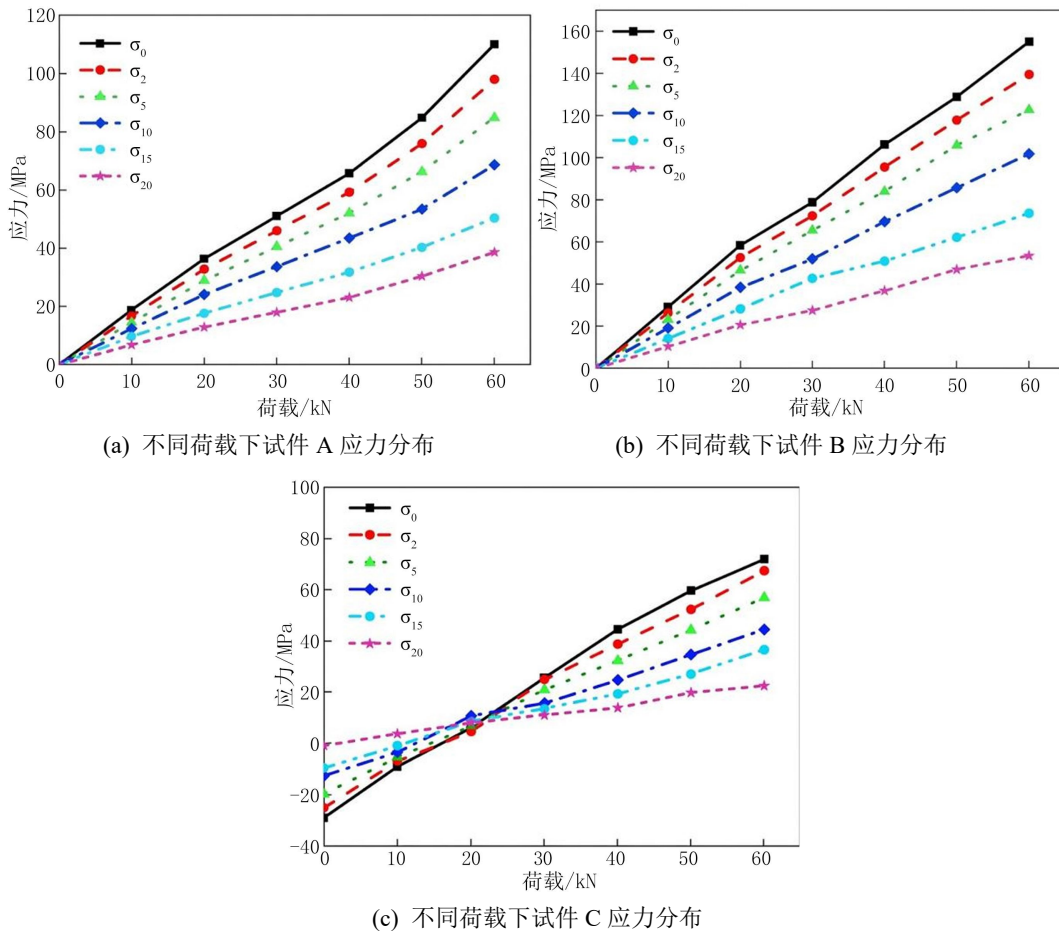


Figure 9. Stress distribution diagrams for each test specimen under different loads
图 9. 不同荷载下各试件应力分布图

由图 9(c)可知,对比未加固试件 B,加固试件 C 在裂缝附近的应力水平显著降低,这一现象在高荷载作用下尤为明显。这一变化归因于加固试件 C 中加热激活的 SMA 所产生的预应力效应。Fe-SMA 在约束状态下经加热产生稳定且持续的预压应力,并通过粘结界面有效传递至钢板基体,对裂缝区域形成主动约束。

由表 1 可见,在 60 kN 荷载作用下,含缺陷未加固试件 B 的气孔尖端应力集中系数高达 1.34。经 Fe-SMA 加固后,试件 C 裂缝尖端应力较试件 B 大幅下降 53.55%,应力集中系数同步降至 0.65,应力集中现象得到根本性缓解。SMA 的激活不仅改变了试件内部的应力状态,还通过预应力的重新分布有效缓解了裂缝附近的应力集中现象。即使在较高的荷载作用下,Fe-H 组试件也能展现出更优异的力学性能和抗

疲劳能力。

Table 1. Stress changes in the test specimen under a 60 kN load
表 1. 60 kN 荷载作用下试件应力变化

试件编号	试件描述	裂缝尖端最大主应力/MPa	应力集中系数	应力变化率	焊缝整体最大应力/MPa
A	无气孔未加固	110	1.00	—	185.6
B	有气孔未加固	147	1.34	+33.64%	210.3
C	有气孔 + Fe-SMA 加固	72	0.65	-53.55%	160.1

图 10 为不同荷载水平下各组的加固效果对比,可以看出在荷载逐渐增大的过程中,各试件的应力也随之增加。对于无气孔缺陷未加固的试件 A,其应力增长相对平稳,表明其在承受荷载时具有较好的整体性和稳定性。然而,对于有气孔缺陷未加固的试件 B,其应力增长曲线在荷载达到一定程度后开始呈现非线性增长,这可能是由于试件内部的缺陷导致其在承受较大荷载时出现了应力集中现象。相比之下,经过 Fe-SMA 贴片粘贴加固的试件 C 在应力表现上更加优异。这表明 Fe-SMA 在激活后产生的主动预应力效应可有效抵消焊缝局部拉应力、削弱应力集中程度,使应力场重新分布并趋于均匀。这表明 Fe-SMA 贴片粘贴加固方法有效地提高了试件的承载能力和抗裂性能。

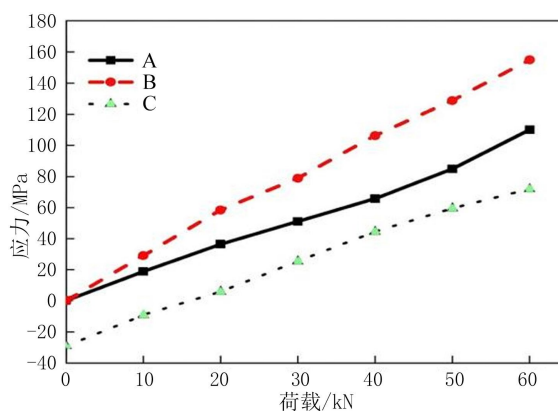


Figure 10. Comparison of stress at the crack edges of various test specimens
图 10. 各试件裂缝边缘应力对比

5.3. 应力强度因子分析

在钢桥面板 U 肋对接焊缝构造细节的疲劳裂纹扩展分析过程中,采用有限元分析与相互作用积分法相结合的方法,计算得到 40 kN 荷载条件下疲劳裂纹前缘的 I 型、II 型、III 型应力强度因子幅值 ΔK_I 、 ΔK_{II} 、 ΔK_{III} ,以及等效应力强度因子幅值 ΔK_{eff} 的对比结果,如表 2 所示。

Table 2. Comparison of stress intensity factors at crack tips under a 40 kN fatigue load
表 2. 40 kN 疲劳荷载作用下裂缝尖端应力强度因子对比

试件编号	I 型应力强度因子 /(MPa·mm ^{1/2})	II 型应力强度因子 /(MPa·mm ^{1/2})	等效应力强度因子 /(MPa·mm ^{1/2})	与疲劳扩展阈值 ΔK_{th} 的关系	主导开裂模式
A	68.5	3.2	66.7	略高于疲劳扩展阈值	I 型开裂主导
B	108.1	4.5	118.2	远高于疲劳扩展阈值	I 型开裂主导
C	17.8	2.1	18.0	低于疲劳扩展阈值	I 型开裂主导

图 11(a)数据表明,纵肋对接焊缝构造细节裂纹前缘的 I 型应力强度因子幅值 ΔK_I 与等效应力强度因子幅值 ΔK_{eff} 差异不显著, II 型、III 型应力强度因子幅值均处于较低水平,数值围绕 10 上下波动。这表明该构造细节的疲劳裂纹扩展主要由 I 型开裂主导, II 型、III 型应力强度因子对裂纹扩展的贡献可忽略不计。

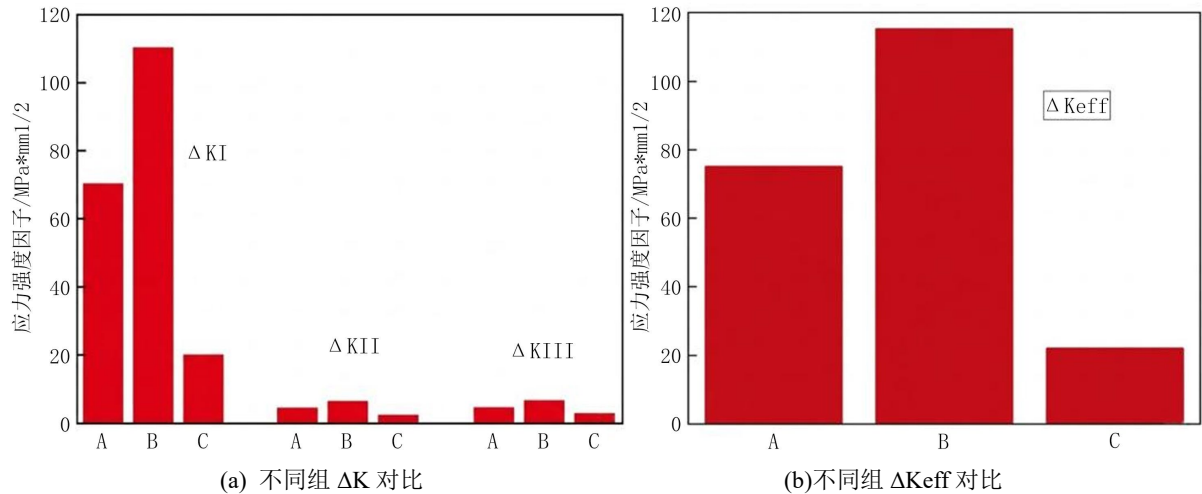


Figure 11. Amplitude of the stress-strength factor for each test specimen
图 11. 各试件应力强度因子幅值

与无气孔缺陷的试件 A 相比,含有气孔缺陷的试件 B 在 U 肋对接焊缝构造细节 I 型开裂模式下,裂纹前缘的 I 型应力强度因子幅值 ΔK_I 增幅显著,试件 B 裂纹尖端的 I 型应力强度因子幅值 ΔK_I 较试件 A 提高了 56%,这反映了气孔缺陷处的应力集中效应。采用 Fe 基形状记忆合金加固并施加预应力后,U 肋对接焊缝构造细节 I 型开裂模式下裂纹前缘的 I 型应力强度因子幅值 ΔK_I 降幅更为显著,加固后相较于未加固试件 B 的裂纹尖端 I 型应力强度因子幅值 ΔK_I 降幅达 81.73%。各试验组 II 型、III 型应力强度因子幅值 ΔK_{II} 、 ΔK_{III} 基本保持稳定,这表明 Fe-SMA 加固有效改善了纵肋对接焊缝构造细节的 I 型开裂模式,同时未引入新的疲劳损伤模式。

图 11(b)数据表明,无气孔缺陷试件 B 裂纹前缘的等效应力强度因子幅值 ΔK_{eff} 略超出裂纹扩展阈值 ΔK_{th} ,而含有气孔缺陷试件 A 裂纹前缘的等效应力强度因子幅值 ΔK_{eff} 则显著高于裂纹扩展阈值 ΔK_{th} 。该现象表明气孔缺陷的存在导致裂纹前缘产生显著的应力集中效应,使得裂纹前缘等效应力强度因子幅值急剧增大。在未采取加固措施前,裂纹前缘等效应力强度因子幅值 ΔK_{eff} 持续高于裂纹扩展阈值 ΔK_{th} ,采用 Fe 基形状记忆合金(Fe-SMA)进行粘贴加固后,加固试件 C 裂纹前缘等效应力强度因子幅值 ΔK_{eff} 降低至疲劳裂纹扩展阈值 ΔK_{th} 以下。该结果表明 Fe-SMA 加固措施能有效降低裂纹前缘的等效应力强度因子幅值,进而显著抑制纵肋对接焊缝疲劳裂纹的扩展进程。

6. 结论

通过对钢桥面 U 肋对接焊缝疲劳性能模拟分析,得到如下结论:

- 1) 建立了气孔缺陷数值模型,通过有限元分析,可以模拟不同加固材料在抑制裂纹扩展方面的效果,并探讨加固工艺对结构性能的影响。通过对比数值模拟结果与试验结果,验证了有限元模型的准确性和可靠性。
- 2) 采用 SDEG 反映粘结层退化过程,并且指出粘结层厚度不均匀会影响加固效果。对不同荷载作用

所产生的应力进行对比,得出气孔缺陷处裂缝附近应力增大,加速裂纹的扩展;而 Fe-SMA 贴片加固后,裂缝附近应力大幅减小,有效抑制裂纹的扩展。

3) U 肋对接焊缝构造细节的疲劳裂纹扩展主要由 I 型开裂主导,II 型、III 型应力强度因子对裂纹扩展的贡献可忽略不计。气孔缺陷的存在试件疲劳裂纹前缘的应力强度因子幅值大幅增加,这说明气孔缺陷会降低焊缝构造细节的抗疲劳性能。

参考文献

- [1] 杨仕力,施洲.我国大跨径钢箱梁桥正交异性板疲劳损伤研究现状[J].桥梁建设,2017,47(4):60-65.
- [2] 朱清华,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+39.
- [3] 强旭红,武亚鹏,姜旭,等.基于 CFRP 布和 SMA/CFRP 组合贴片的桥梁横隔板疲劳裂纹修复方法[J].交通运输工程学报,2024,24(1):171-184.
- [4] 姜旭,吕志林,强旭红,等.Fe-SMA 主动加固钢桥面横隔板弧形切口疲劳裂纹实桥应用研究[J].桥梁建设,2024,54(3):54-60.
- [5] 黄鹤,秦攀.正交异性板钢桁结合梁焊接细节疲劳性能分析[J].中外公路,2022,42(3):109-114.
- [6] 周细辉,黄坤.钢桥面板纵肋对接焊缝疲劳裂纹扩展特性及加固方法研究[J].中外公路,2019,39(3):138-142.
- [7] 王元清,宗亮,石永久,等.钢结构加固技术研究进展与标准编制[J].建筑结构学报,2022,43(10):29-40.
- [8] Rodriguez-Sanchez, J.E., Perez-Guerrero, F., Liu, S., Rodriguez-Castellanos, A. and Albiter-Hernandez, A. (2014) Underwater Repair of Fatigue Cracks by Gas Tungsten Arc Welding Process. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **37**, 637-644. <https://doi.org/10.1111/ffe.12146>
- [9] Yao, Y., Ji, B.H., Fu, Z.Q., et al. (2019) Optimization of Stop-Hole Parameters for Cracks at Diaphragm-to-Rib Weld in Steel Bridges. *Journal of Constructional Steel Research*, **162**, Article 105747. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105747>
- [10] 王春生,翟慕赛, Houankpo T N O, 等.正交异性钢桥面板冷维护技术及评价方法[J].中国公路学报,2016,29(8):50-58.
- [11] 岳清瑞,杨勇新.纤维增强复合材料加固结构耐久性研究综述[J].建筑结构学报,2009,30(6):8-15.
- [12] 张哲熹,方成,王伟,等.Fe-SMA 的材料特性及在土木工程中的应用进展[J].防灾减灾工程学报,2022,42(2):411-424.
- [13] Shahverdi, M., Michels, J., Czaderski, C. and Motavalli, M. (2018) Iron-Based Shape Memory Alloy Strips for Strengthening RC Members: Material Behavior and Characterization. *Construction and Building Materials*, **173**, 586-599. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.057>
- [14] 朱虹,刘子卿,董志强,等.基于铁基形状记忆合金的新型预应力技术及其工程应用[J].东南大学学报(自然科学版),2022,52(2):402-416.
- [15] Izadi, M.R., Ghafoori, E., Motavalli, M. and Maalek, S. (2018) Iron-Based Shape Memory Alloy for the Fatigue Strengthening of Cracked Steel Plates: Effects of Re-Activations and Loading Frequencies. *Engineering Structures*, **176**, 953-967. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.021>
- [16] Qiang, X.H., Wang, Y.H., Wu, Y.P., et al. (2023) Experimental and Numerical Study on Cracked Steel Bridge Diaphragm Reinforced with Bonding Fe-SMA Plate. *Thin-Walled Structures*, **191**, Article 111075. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111075>
- [17] Qiang, X.H., Duan, X.R., Jiang, X., et al. (2023) Experimental Study on Mechanical Properties of Bolted Joints between Fe-SMA and Steel Plates. *Engineering Structures*, **297**, Article 116980. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116980>
- [18] Wang, W.D., Hosseini, A. and Ghafoori, E. (2021) Experimental Study on Fe-SMA-to-Steel Adhesively Bonded Interfaces Using DIC. *Engineering Fracture Mechanics*, **244**, Article 107553. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2021.107553>
- [19] Wang, W.D., Li, L.Z., Hosseini, A., et al. (2021) Novel Fatigue Strengthening Solution for Metallic Structures Using Adhesively Bonded Fe-SMA Strips: A Proof of Concept Study. *International Journal of Fatigue*, **148**, Article 106237. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106237>
- [20] Wang, W.D. (2024) Complete Fatigue Crack Arrest in Metallic Structures Using Bonded Prestressed Iron-Based Shape Memory Alloy Repairs. *International Journal of Fatigue*, **180**, Article 108104. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2023.108104>

- [21] Teng, J.G., Fernando, D. and Yu, T. (2015) Finite Element Modelling of Debonding Failures in Steel Beams Flexurally Strengthened with CFRP Laminates. *Engineering Structures*, **86**, 213-224.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.01.003>