

再生混凝土装配式节点剪切性能仿真分析

王超维¹, 杨毅超¹, 陈亚冰², 顾征宇¹, 任鑫森¹, 陆正卿¹

¹上海烟草集团有限责任公司, 上海

²上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年10月20日; 录用日期: 2025年11月11日; 发布日期: 2025年11月25日

摘要

为探究再生混凝土(RAC)与超高性能混凝土(UHPC)组合结构在装配式建筑中的界面剪切性能, 本文基于ABAQUS建立含不同数量三角形剪切键的S1k-S6k试件三维有限元模型, 模拟界面剪切加载过程, 分析荷载-位移曲线及损伤分布特征。模型采用C3D8R单元、T3D2单元, 界面采用考虑粘结与损伤的接触-分离模型, 通过加载获取力学响应与损伤规律。结果表明: 各组试件荷载-位移曲线形态一致; 剪切键个数不超过3个时, 试件抗剪性能接近, 位移约0.38 mm达极限荷载(约44 kN), 个数大于3时, 极限承载能力与最大位移显著提升; 压缩损伤集中于RAC与UHPC上下表面接触棱边并向内扩散, 拉伸损伤位于上下粘结平面及RAC外侧中间部位, 且损伤范围与程度随剪切键个数增加而扩大; 峰值荷载下应力沿试件中对称扩散, 剪切键数量增加可提升最大应力值、扩大应力分布范围并使其贴合UHPC外轮廓, 优化剪力传递。研究为RAC-UHPC组合结构设计与绿色建筑发展提供参考。

关键词

再生混凝土, 界面剪切性能, 仿真分析

Simulation Analysis on Shear Performance of Prefabricated Joints in Recycled Concrete

Chaowei Wang¹, Yichao Yang¹, Yabing Chen², Zhengyu Gu¹, Xinsen Ren¹, Zhengqing Lu¹

¹Shanghai Tobacco Group Co., Ltd., Shanghai

²School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: October 20, 2025; accepted: November 11, 2025; published: November 25, 2025

Abstract

To investigate the interfacial shear performance of the composite structure of recycled aggregate concrete (RAC) and ultra-high performance concrete (UHPC) in prefabricated buildings, this study

文章引用: 王超维, 杨毅超, 陈亚冰, 顾征宇, 任鑫森, 陆正卿. 再生混凝土装配式节点剪切性能仿真分析[J]. 土木工程, 2025, 14(11): 2713-2721. DOI: 10.12677/hjce.2025.1411290

established three-dimensional finite element models of S1k-S6k specimens with different numbers of triangular shear keys based on ABAQUS. The interfacial shear loading process was simulated, and the load-displacement curves as well as the damage distribution characteristics were analyzed. The model adopts C3D8R elements and T3D2 elements, and the interface uses a cohesive-separation model that accounts for bonding and damage. Mechanical responses and damage patterns are obtained through loading. The results show that: the load-displacement curves of all groups of specimens have the same shape; when the number of shear keys is no more than 3, the shear resistance of the specimens is similar, and the ultimate load (approximately 44 kN) is reached at a displacement of about 0.38 mm; when the number exceeds 3, the ultimate bearing capacity and maximum displacement are significantly improved; the compressive damage is concentrated on the contact edges of the upper and lower surfaces of RAC and UHPC and spreads inward, while the tensile damage is located on the upper and lower bonding planes and the middle part of the outer side of RAC, and the damage range and degree expand with the increase in the number of shear keys; Under peak load, the stress spreads symmetrically along the midline of the specimen. An increase in the number of shear keys can improve the maximum stress value, expand the stress distribution range, make it fit the outer contour of UHPC, and optimize shear transfer. This study provides a reference for the design of RAC-UHPC composite structures and the development of green buildings.

Keywords

Recycled Aggregate Concrete, Interfacial Shear Performance, Simulation Analysis

Copyright © 2025 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

随着全球工业化进程的加速,建筑与拆除废弃物(CDW)已成为全球最大的固体废弃物类型之一[1][2]。研究发现,可以将 CDW 重新制成再生骨料(RCA),从而代替天然骨料制作出再生混凝土(RAC)[3]。在建筑工程中使用再生混凝土,能够减少对天然骨料的开采,有效缓解自然资源紧张的问题[4]。超高性能混凝土(UHPC)与普通混凝土相比,其具有较高抗压强度和抗拉强度,弹性模量约为 40 Gpa~70 Gpa,自身延展性、韧性、流动性和耐久性较好,在结构关键节点与连接部位展现出独特优势[5][6]。在建筑工业化与可持续发展的双重驱动下,装配式建筑因具备施工效率高、资源消耗低等优势,已成为现代建筑结构的重要发展方向。装配式建筑中,预制构件与后浇混凝土的连接界面易成为结构薄弱环节,其剪切承载能力与变形性能直接影响结构的整体性与安全性。机械咬合作用和销栓作用是影响混凝土界面抗剪性能的关键因素, Yang [7]等人探究了多种机械咬合界面,研究发现机械咬合作用与销栓作用的协同作用可有效抑制界面过渡区的裂缝扩展,其中含齿形剪切键界面显著提升 UHPC-NC 界面的抗剪性能。Jang [8]等人考虑了不同的施工缝接触面形式,探究 UHPC 与普通混凝土界面抗剪性能,研究发现接触面剪切键几何形状对施工缝抗剪性能影响显著。将再生混凝土与 UHPC 组合形成的复合结构,既能发挥再生材料的环保效益,又能利用 UHPC 提升结构性能,成为装配式建筑领域的研究热点。而现有基于普通混凝土的研究结论,显然无法直接套用于再生混凝土后浇节点,导致该类节点的抗剪性能设计缺乏针对性理论依据。因此,基于 ABAQUS 深入研究再生混凝土后浇节点剪切性能,通过设计含不同数量三角形剪切键的界面形式,探究其对试件抗剪性能的影响机制,从而为推动绿色建筑技术革新提供工程价值。

2. 有限元模型建立

试件由再生混凝土预制部分与 UHPC 后浇部分组成，模拟装配式建筑，试件尺寸为 $100 \times 200 \times 350$ mm，UHPC 部分尺寸设计图如下图 1 所示。在 Abaqus 中，采用三维实体建模的方法，分别建立 UHPC、再生混凝土的几何模型，将各部分模型进行装配，形成完整的界面剪切性能分析模型，其中 S1k 件如图 2 所示(字母“S”表示两种不同形状的剪切键；数字“1”表示试件含 1 个剪切键)。

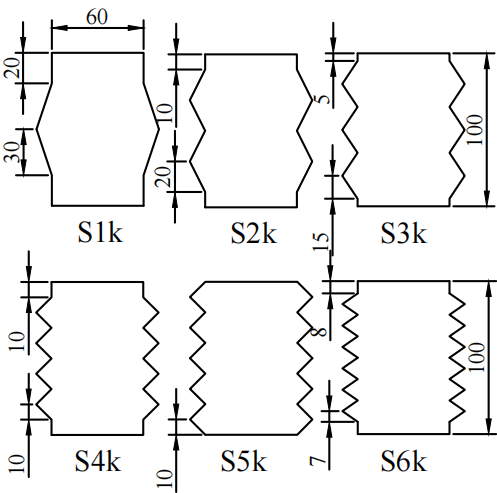


Figure 1. Dimension design drawing of UHPC
图 1. UHPC 尺寸设计图

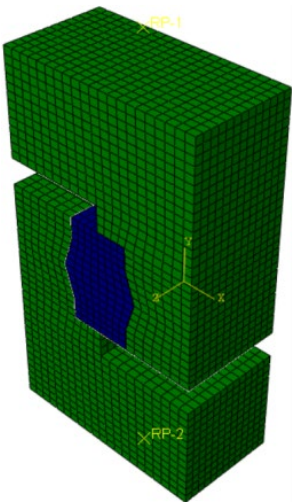


Figure 2. Schematic diagram of the S1k model
图 2. S1k 模型示意图

根据材料的实际性能，在 Abaqus 中定义 UHPC 和再生混凝土的材料属性。UHPC 采用 Wu [9]提出的单轴受压应力 - 应变关系曲线，以及 Shi [10]等提出的 UHPC 受拉本构模型。在力学行为上再生混凝土与普通混凝土相似，故采用 Xiao [11]提出的考虑再生骨料取代率的应力 - 应变本构模型以及受拉应力 - 应变关系模型。UHPC、再生混凝土材料参数如下表 1 所示。再生混凝土中内置的钢筋采用双折线本构模型，其质量密度为 7.8 t/m^3 ，杨氏模量为 200000 MPa ，泊松比为 0.3 。

Table 1. Material parameters of UHPC and recycled aggregate concrete
表 1. UHPC、再生混凝土材料参数

材料	密度(t/m ³)	杨氏模量(MPa)	泊松比	膨胀角	偏心率	$\frac{f_{b0}}{f_{c0}}$	K	粘性参数
UHPC	2.4×10^{-9}	45000	0.2	40°	0.1	1.16	0.6667	0.01
再生混凝土	2.2×10^{-9}	19020	0.2	36°	0.1	1.16	0.6667	0.05

UHPC、再生混凝土以及加载垫块均采用六面体线性缩减积分单元(C3D8R)，钢筋采用两结点线性三维桁架单元(T3D2)。UHPC、再生混凝土以及加载垫块全局种子设置为 8，并按边调整部分 UHPC 与再生混凝土接触面种子个数，在满足计算精度的前提下，提高计算速度。模型上方约束 U2，对模型施加 0.5 mm 或 1 mm 位移，模型下方约束为 U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0。

UHPC 与再生混凝土粘结界面是复杂的非线性接触问题，UHPC 与再生混凝土相接触的三角形剪切键上倾斜面仅考虑切向行为以及几何属性，设置摩擦系数为 0.05，试件与加载垫块之间接触属性的设置与之相同。而对于 UHPC 与再生混凝土相接触的垂直面以及三角形剪切键下倾斜面，需考虑粘结行为、损伤以及几何属性。本文采用的接触 - 分离模型如下图 3 所示，其中 $\sigma_{\max}$ 、 $\tau_{\max}$ 表示最大分离应力， δ_n^0 、 δ_s^0 、 δ_t^0 则为对应的位移， $\delta_n^{\max}$ 、 $\delta_s^{\max}$ 、 $\delta_t^{\max}$ 表示最大分离位移。

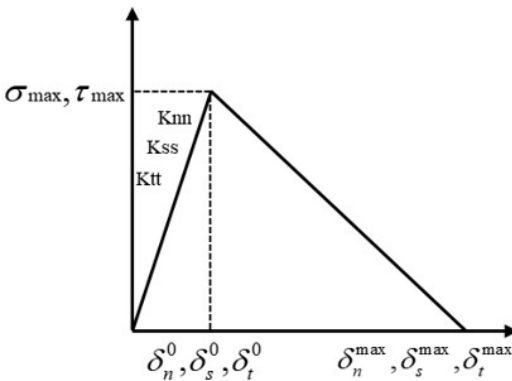


Figure 3. Contact-separation model
图 3. 接触 - 分离模型

接触 - 分离模型的弹性阶段可用公式(1)表示：

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (1)$$

损伤则由公式(2)定义：

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

其中 K_{nn} 、 K_{ss} 、 K_{tt} 分别为法向、第一、第二剪切方向刚度分量， t_n 、 t_s 、 t_t 分别为法向、第一和第二剪切方向的接触应力； t_n^0 、 t_s^0 、 t_t^0 分别为接触面的法向、第一和第二剪切方向最大接触应力，各参数设置如下表 2 所示。

Table 2. Parameter table of Cohesive elements
表 2. Cohesive 单元参数表

参数	K_{nn} 、 K_{ss} 、 K_{tt} /(N·mm ²)	t_n^0 、 t_s^0 、 t_t^0 /MPa	$\sigma_m^{\max}$ /mm
数值	1.36	1.2	0.5

3. 有限元结果分析

3.1. 荷载位移曲线

下图 4 所示为含三角形剪切键的 S1k 至 S3k 试件有限元模拟结果与 Sun [12]等人研究的含齿形剪切键的试件试验及模拟结果对比图，两组试件有限元模拟参数设置相同。从图中我们可以看出，Sun 等人试验值与模拟值吻合度较高，说明该有限元模拟参数适用于 UHPC 与再生混凝土界面抗剪性能研究。且在剪切键个数相同的情况下，两组试件模拟结果相差不大，S1k 至 S3k 试件与对照组相差分别为 6.33 kN、6.71 kN、11.02 kN，含三角形剪切键的试件极限承载能力均能达到含齿形剪切键试件极限承载能力的 80% 以上。

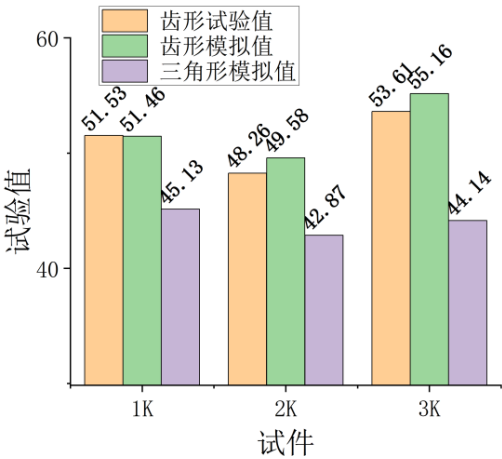


Figure 4. Comparison of experimental and simulation results of specimens with 1~3k toothed and triangular shear keys
图 4. 含 1~3k 齿形、三角形剪切键试件试验、模拟结果对比图

下图 5 展示了试件 S1k 至 S6k 在加载过程中的荷载-位移曲线，各组试件的曲线形态整体变化趋势表现出高度的一致性，这一现象清晰地表明，在相同的加载条件下，不同试件展现出相似的力学响应行为。深入分析荷载 - 位移关系，可以将其大概分为三个阶段：弹性阶段、弹塑性阶段以及破坏阶段。初始阶段试件处于弹性变形状态，荷载与位移近似呈线性关系，这是由于材料内部的微观结构尚未发生不可逆的损伤，应力和应变仍能较好地遵循胡可定律。随着位移不断地增大，材料内部开始出现塑性变形的迹象，试件逐渐进入弹塑性阶段，曲线随之偏离线性关系，这意味着材料的变形不再完全是弹性的，部分变形在卸载后无法恢复。当荷载达到峰值后，曲线出现明显的下降段，这一特征明确地表明试件发生了破坏，其承载能力急剧下降。

进一步分析可知，当剪切键个数 ≤ 3 时，试件抗剪性能相差不大，当位移达到 0.38 mm 左右时，试件达到极限荷载，约为 44 kN。值得注意的是，当三角形剪切键个数 > 3 时，试件的极限承载能力与最大位移均会随着剪切键个数的增加而显著增加。S4k 试件极限荷载为 63.10 kN，最大位移为 0.54 mm，相较于 S1k 试件的极限荷载(45.13 kN)和最大位移(0.38 mm)分别增长了 39.82%和 42.11%。S5k 试件极限荷载

为 60.65 kN, 最大位移为 0.53 mm, 相较于 S1k 试件, 极限荷载增长了 34.39%, 最大位移增长了 39.47%。S6k 试件表现出更为优异的力学性能, S6k 试件的极限荷载为 71.08 kN, 最大位移为 0.70 mm, 相较于 S1k 的极限荷载和最大位移分别增长了 57.50%、84.21%。从这些数据可以清晰地看出, 随着三角形剪切键个数的增加, 试件的极限承载能力和最大位移呈现出较为明显的提升趋势, 这进一步验证了剪切键个数对试件抗剪性能具有重要的增强作用。更多的剪切键为试件提供了更充足的受力路径, 试件能够更有效地传递和分散荷载, 延缓了应力集中现象的出现, 从而提升了其抵抗破坏的能力, 推迟了试件破坏的进程, 最终使得极限承载能力和最大位移均得到明显提高。

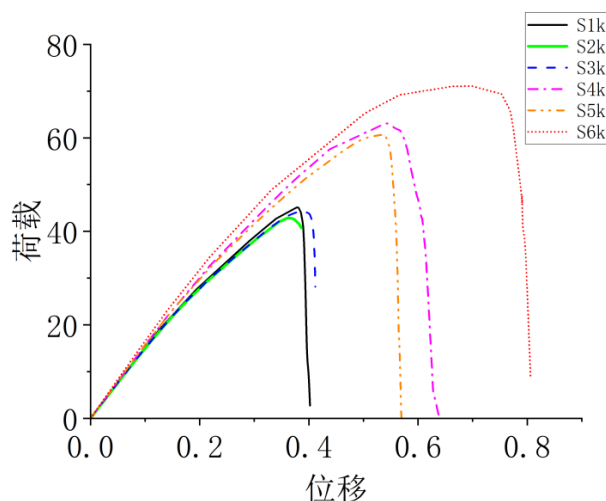


Figure 5. Load-displacement diagram of specimens S1k-S6k
图 5. S1-6k 试件荷载 - 位移图

3.2. 损伤变量

加载完成后, 对试件损伤情况进行观察, 发现试件的损伤呈现出显著的区域差异性。通过分析可知损伤主要集中于再生混凝土与 UHPC 上下表面的粘结区域, 而 UHPC 本体几乎无明显损伤, 这一现象充分体现了 UHPC 优异的力学性能与抗损伤能力, 表明 UHPC 在荷载作用下能较好地保持自身结构完整性, 从而发挥出自身承受剪力的作用。

下图 6 所示为试件下半部分 RAC 损伤变量云图, S1-6k 试件压缩损伤分布规律具有较高的一致性。试件破坏主要集中在 RAC 与 UHPC 下表面相接触的棱边区域, 并且从棱边向 RAC 内部表现出逐渐扩散与延伸的演化趋势。进一步研究发现, 试件压缩损伤破坏范围随着剪切键数量的增加而增大, 但未出现跨区域的突发破坏。这是由于 UHPC 的存在, 荷载通过剪切键的作用, 得以更有序地向再生混凝土内部传递, 使得损伤能够在试件中逐步扩散。

S1-6k 试件拉伸损伤云图也呈现出较为一致的特征, 拉伸损伤主要出现在 RAC 与 UHPC 上下表面粘结的平面上, 以及试件下半部分 RAC 外侧中间部位。通过对比分析六个试件拉伸损伤云图可知, 随着 UHPC 剪切键数量的增加, 试件极限承载能力有所增加, 同时试件拉伸损伤破坏范围逐渐扩大, 损伤程度亦随之加剧。这是由于剪切键数量的增加改变了 RAC 内部的应力传递路径, 更多的剪切键会为拉应力的传递提供了更多的路径, 使得拉应力不再局限于局部区域。原本相对集中的拉应力在剪切键的作用下, 在更大范围内重新分布, 进而诱发更广泛的拉伸损伤。这种损伤随剪切键数量增加而变化的规律, 也从损伤力学角度反映了剪切键对试件力学性能的影响机制。

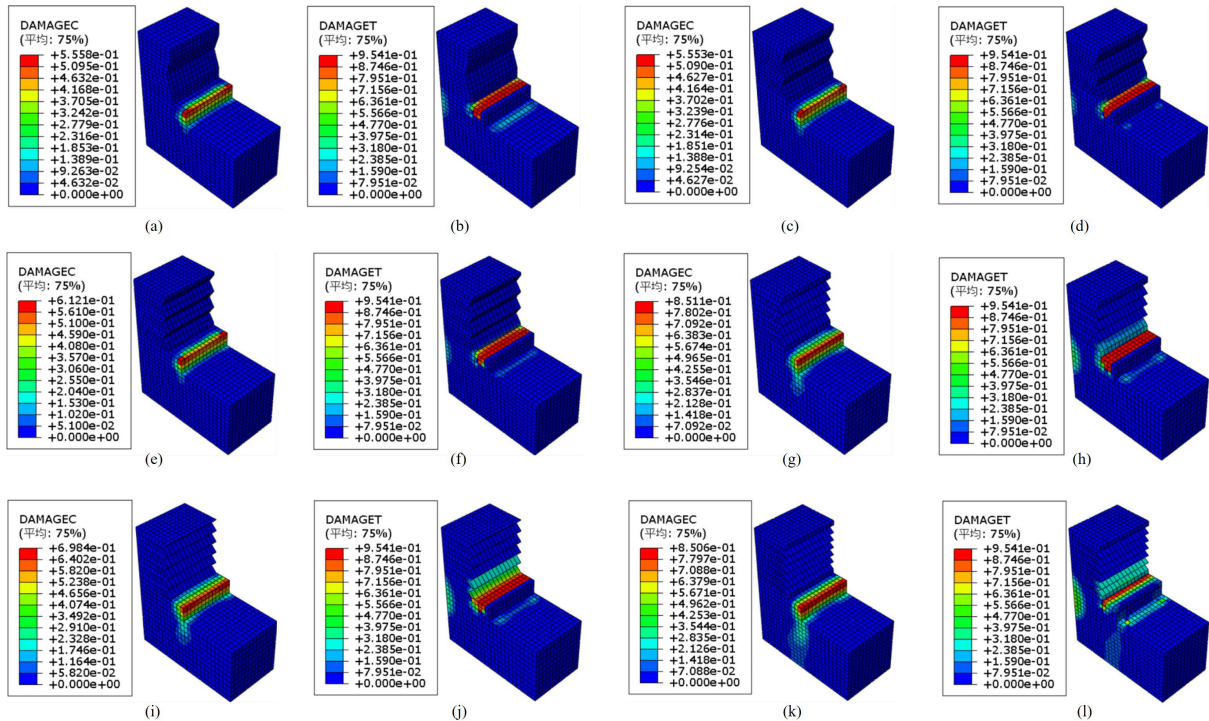


Figure 6. Compressive damage contour and Tensile damage contour, (a) Compressive damage contour of S1k; (b) Tensile damage contour of S1k; (c) Compressive damage contour of S2k; (d) Tensile damage contour of S2k; (e) Compressive damage contour of S3k; (f) Tensile damage contour of S3k; (g) Compressive damage contour of S4k; (h) Tensile damage contour of S4k; (i) Compressive damage contour of S5k; (j) Tensile damage contour of S5k; (k) Compressive damage contour of S6k; (l) Tensile damage contour of S6k

图 6. 压缩损伤云图和拉伸损伤云图, (a) S1k 压缩损伤图; (b) S1k 拉伸损伤图; (c) S2k 压缩损伤图; (d) S2k 拉伸损伤图; (e) S3k 压缩损伤图; (f) S3k 拉伸损伤图; (g) S4k 压缩损伤图; (h) S4k 拉伸损伤图; (i) S5k 压缩损伤图; (j) S5k 拉伸损伤图; (k) S6k 压缩损伤图; (l) S6k 拉伸损伤图

3.3. 应力分析

下图 7 所示为 S1k-S6k 试件在达到峰值荷载时的应力云图, 从图中我们能够清晰地看到, 应力在试件中间部位沿竖直方向呈现出均匀扩散的态势, 且应力的分布情况基本沿水平中心线对称。在达到峰值荷载时, 应力主要集中在再生混凝土区域, 其中再生混凝土与 UHPC 上下两顶面相连接的部位表现得较为明显, 尤其是再生混凝土和 UHPC 下顶面相连接的部位, 呈现出部分红色, 该表明部位的应力最大。通过对比六个试件的对比分析可知, 随着试件所含三角形剪切键的数量的增加, 试件达到峰值荷载时的最大应力值也会有所增加。S1k 试件的最大应力数值相对较低, 而 S6k 试件的最大应力数值明显更高, 直观体现出剪切键数量对峰值应力的提升作用。除此之外, 当剪切键数量增加后, 试件达到极限荷载时的应力分布范围也会随之扩大, 且分布范围逐渐与 UHPC 外边缘轮廓相贴合。如 S1k 试件应力云图所示, 其应力分布范围较小, 且较窄, 中间 UHPC 剪切键发挥作用极其有限, 高应力区域仅集中在再生混凝土与 UHPC 下顶面连接的小范围区域, 远离 UHPC 外边缘。而 S6k 试件达到极限荷载时, 其应力分布更加均匀, 且 UHPC 上的应力分布范围几乎与 UHPC 外轮廓相一致, 这表明 S6k 试件的 UHPC 剪力键能够更加有效地发挥作用, 承受剪力以抵抗试件的变形。这一现象说明更多的剪切键使得剪力在试件内部的传递和分布更为合理, 使得剪力能够更均匀、更广泛地分散到 UHPC 以及再生混凝土的相关区域, 从而能够提升试件的整体力学性能, 让试件在承受更大荷载的同时, 也能更有效地抵抗变形。

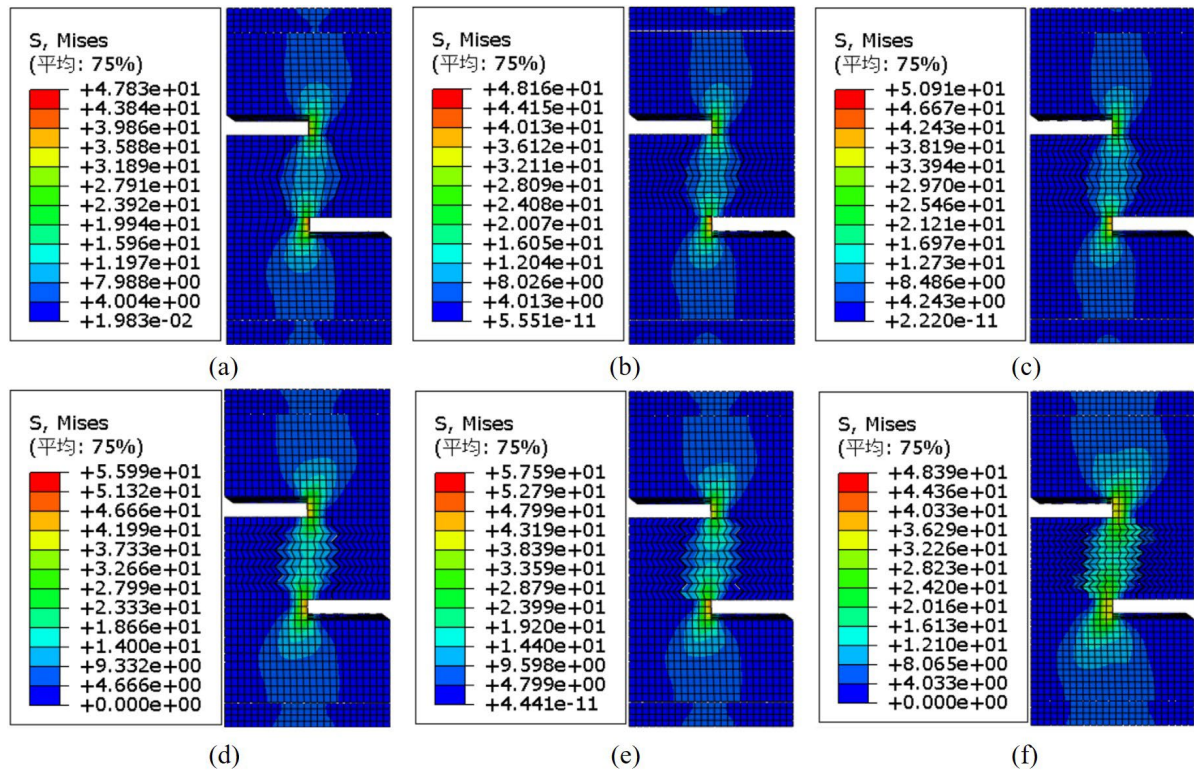


Figure 7. Stress nephogram at peak load, (a) Stress nephogram at peak load of S1k; (b) Stress nephogram at peak load of S2k; (c) Stress nephogram at peak load of S3k; (d) Stress nephogram at peak load of S4k; (e) Stress nephogram at peak load of S5k; (f) Stress nephogram at peak load of S6k

图 7. 峰值荷载时应力云图, (a) S1k 峰值荷载时应力云图; (b) S2k 峰值荷载时应力云图; (c) S3k 峰值荷载时应力云图; (d) S4k 峰值荷载时应力云图; (e) S5k 峰值荷载时应力云图; (f) S6k 峰值荷载时应力云图

4. 结论

(1) S1k-S6k 试件在加载过程中荷载 - 位移曲线形态一致, 当剪切键个数不超过 3 个时, 试件抗剪性能差异较小, 均在位移约 0.38 mm 时达到极限荷载(约 44 kN); 当剪切键个数大于 3 时, 试件极限承载能力与最大位移随剪切键个数增加显著提升;

(2) S1k-S6k 试件压缩损伤集中于 RAC 与 UHPC 下表面接触棱边, 并向 RAC 内部扩散, 无跨区域突发破坏; 拉伸损伤集中于 RAC 与 UHPC 上下表面粘结平面及 RAC 外侧中间部位, 损伤范围与程度均随剪切键数量增加而扩大, 因剪切键改变试件应力传递路径, 使应力从局部转为大范围分布;

(3) 峰值荷载下, 应力沿试件中线对称、竖直扩散, 集中于再生混凝土(尤其与 UHPC 下表面连接部位)。随剪切键数量增加, 最大应力值提升, 应力分布范围扩大并贴合 UHPC 外轮廓, 实现剪力合理传递, 提升整体力学性能;

(4) 本研究存在几何尺寸单一、未考虑材料强度变化等局限性, 后续可围绕几何尺寸效应与界面优化、材料强度匹配等因素, 进行数值模拟与智能设计研究。

参考文献

- [1] Ulugöl, H., Günel, M.F., Yaman, İ.Ö., Yıldırım, G. and Şahmaran, M. (2021) Effects of Self-Healing on the Microstructure, Transport, and Electrical Properties of 100% Construction- and Demolition-Waste-Based Geopolymer Composites. *Cement and Concrete Composites*, **121**, Article ID: 104081. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104081>

-
- [2] Frías, M., Martínez-Ramírez, S., de la Villa, R.V., Fernández-Carrasco, L. and García, R. (2021) Reactivity in Cement Pastes Bearing Fine Fraction Concrete and Glass from Construction and Demolition Waste: Microstructural Analysis of Viability. *Cement and Concrete Research*, **148**, Article ID: 106531. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106531>
- [3] Tefa, L., Bassani, M., Coppola, B. and Palmero, P. (2021) Strength Development and Environmental Assessment of Alkali-Activated Construction and Demolition Waste Fines as Stabilizer for Recycled Road Materials. *Construction and Building Materials*, **289**, Article ID: 123017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123017>
- [4] Ho, H., Iizuka, A. and Shibata, E. (2021) Chemical Recycling and Use of Various Types of Concrete Waste: A Review. *Journal of Cleaner Production*, **284**, Article ID: 124785. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124785>
- [5] Wang, D., Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Huang, Z. and Fang, Z. (2015) A Review on Ultra High Performance Concrete: Part II. Hydration, Microstructure and Properties. *Construction and Building Materials*, **96**, 368-377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.095>
- [6] Buck, J.J., McDowell, D.L. and Zhou, M. (2013) Microstructure-performance Relations of Ultra-High-Performance Concrete Accounting for Effect of Alpha-Quartz-To-Coesite Silica Phase Transformation. *International Journal of Solids and Structures*, **50**, 1879-1896. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2013.01.042>
- [7] Yang, J., Xia, J., Zhang, Z., Zhou, J., Zou, Y., Wang, Y., et al. (2024) Mesoscopic Shear Behavior and Strength Characteristic of UHPC-NC Interface Considering the Combined Effect of Mechanical Interlocking and Dowel Action. *Engineering Fracture Mechanics*, **307**, Article ID: 110306. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.110306>
- [8] Jang, H., Lee, H., Cho, K. and Kim, J. (2017) Experimental Study on Shear Performance of Plain Construction Joints Integrated with Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, **152**, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.156>
- [9] Wu, Z., Shi, C., He, W. and Wang, D. (2016) Uniaxial Compression Behavior of Ultra-High Performance Concrete with Hybrid Steel Fiber. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **28**, Article ID: 06016017. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001684](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001684)
- [10] Shi, Z., Su, Q., Kavoura, F. and Veljkovic, M. (2023) Uniaxial Tensile Response and Tensile Constitutive Model of Ultra-High Performance Concrete Containing Coarse Aggregate (CA-UHPC). *Cement and Concrete Composites*, **136**, Article ID: 104878. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104878>
- [11] 肖建庄, 李坛, 马志鸣. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 58-61.
- [12] Sun, C., Zhao, H., Wu, X., Liu, Q. and Pan, F. (2025) Study on the Shear Failure Characteristics of RAC Push-Off Specimens with UHPC Shear Keys. *Low-Carbon Materials and Green Construction*, **3**, Article No. 15. <https://doi.org/10.1007/s44242-025-00075-9>