FRP–箍筋双重约束下橡胶混凝土(CRC)与钢筋的粘结性能：破坏机理与建模

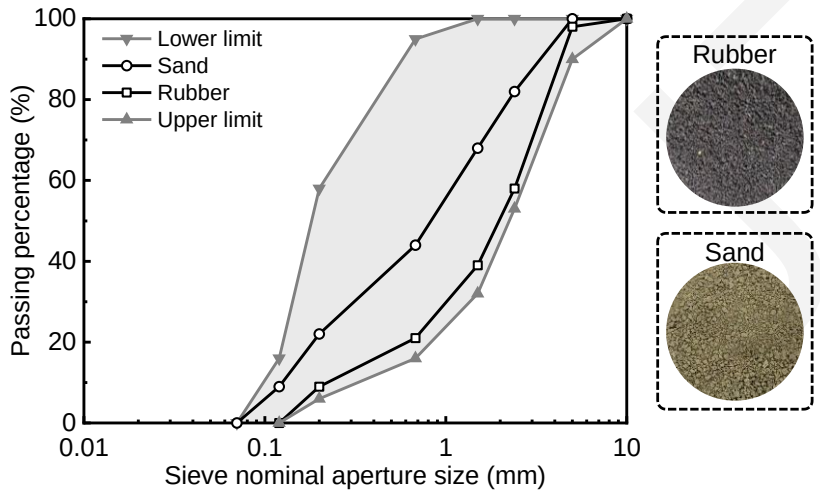
Bond of rebar to crumb rubber concrete (CRC) under fiber-reinforced polymer (FRP)–stirrup dual confinement: failure mechanism and behavior modeling

李强[1] 肖方铎[2] 卢世伟[3] 王吉忠[4] 陈士堃[2] 闫东明[2]
[1]浙江水利水电学院 [2]浙江大学 [3]烟台大学 [4]大连理工大学

Cite this as: Qiang LI, Fangduo XIAO, Shiwei LU, Jizhong WANG, Shikun CHEN, Dongming YAN, 2026. Bond of rebar to crumb rubber concrete (CRC) under fiber-reinforced polymer (FRP)–stirrup dual confinement: failure mechanism and behavior modeling. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 27(7):730-745. https://doi.org/10.1631/jzus.A2500674

研究背景与动机

- 废旧轮胎年产量巨大 → 填埋占用土地并释放有毒物质- 橡胶混凝土（CRC）：橡胶颗粒替代细骨料 → 可持续利用 + 缓解河砂消耗
  - ✓ 提升延性、耐磨性、抗冲击韧性
  - ✓ 增强结构耗能能力 → 适用于抗震基础设施
- 核心挑战：橡胶的疏水性导致多孔界面过渡区（ITZ）
  - ✗ 粘结强度较普通混凝土（NC）下降高达 40%
- 解决方案：FRP–箍筋双重约束补偿粘结退化
- 研究空白：橡胶置换率与约束水平的耦合效应尚不明确



实验方案

试件数量：42个中心拉拔试件

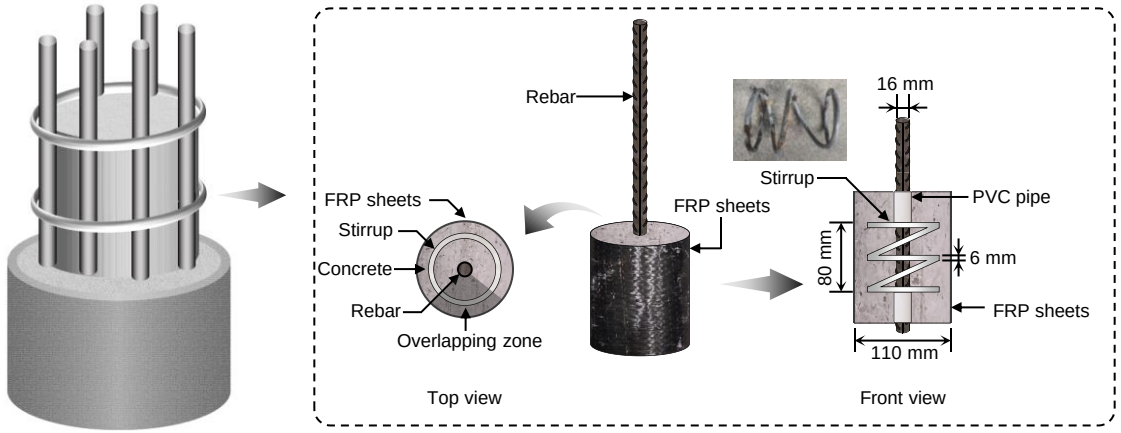
粘结长度：80 mm（5d）

钢筋：16 mm 变形钢筋

试验变量：

- 橡胶置换率 (rv)：0%, 10%, 20%, 30%, 40%
- 箍筋间距：80 mm (S2) / 40 mm (S3)
- FRP层数：1层 (F1) / 2层 (F2)
- 双重约束：FRP + 箍筋组合

约束条件覆盖：无约束、单一箍筋、单一FRP、FRP-箍筋双重约束



关键结果 ：约束效应与临界阈值

✓ 约束（箍筋/FRP/双重）显著提升粘结强度

NC: +23% | CRC: +34% （相对于无约束试件）

✗ CRC试件：增加约束水平边际效益极低

例：30-F2 vs 30-F1 仅提升 4.78%（NC 0-F2 vs 0-F1: +34.24%）

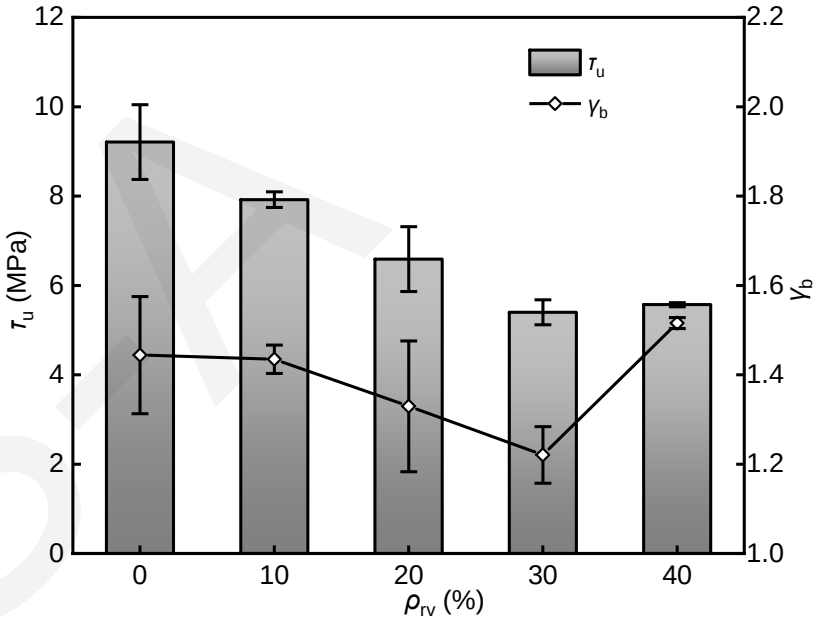
核心发现：CRC的粘结强度由界面特性主导，

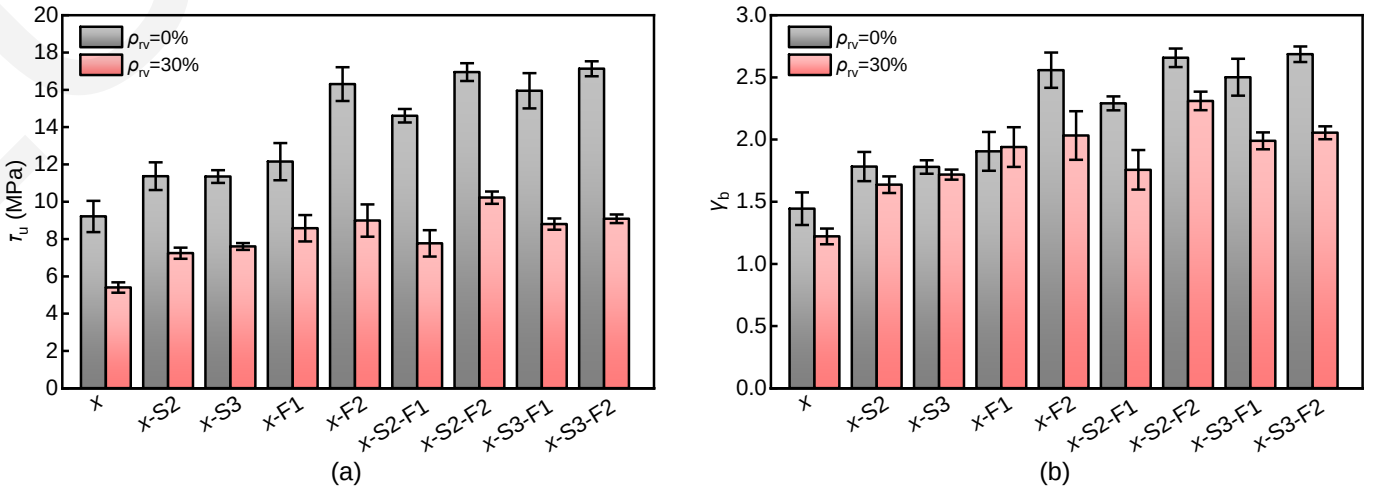
超出临界阈值后，额外约束不再提供增益。

→ 工程意义：CRC锚固设计可节省约束材料成本

□ 归一化粘结系数 (αb)：NC > CRC（与约束条件无关）

→ CRC设计需附加安全系数





JZUST

创新点 1：基于力学的粘结强度分析模型

方法：虚拟裂缝理论 → 双圆柱分析框架

核心改进：

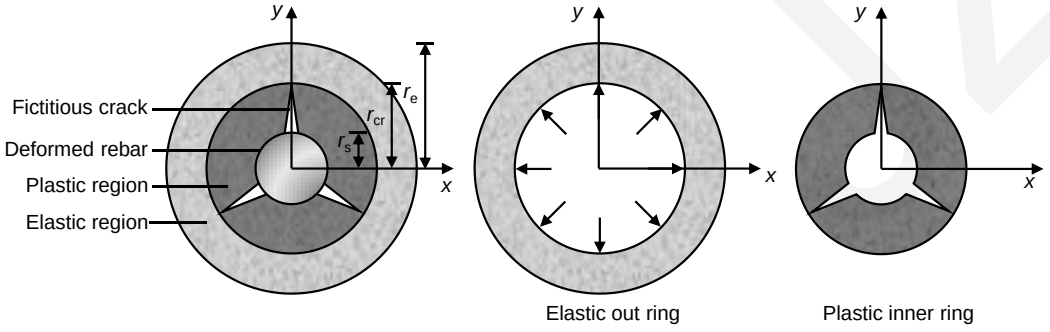
① 橡胶退化系数 γr（ρ_v相关）— 量化橡胶对宏观粘结的影响

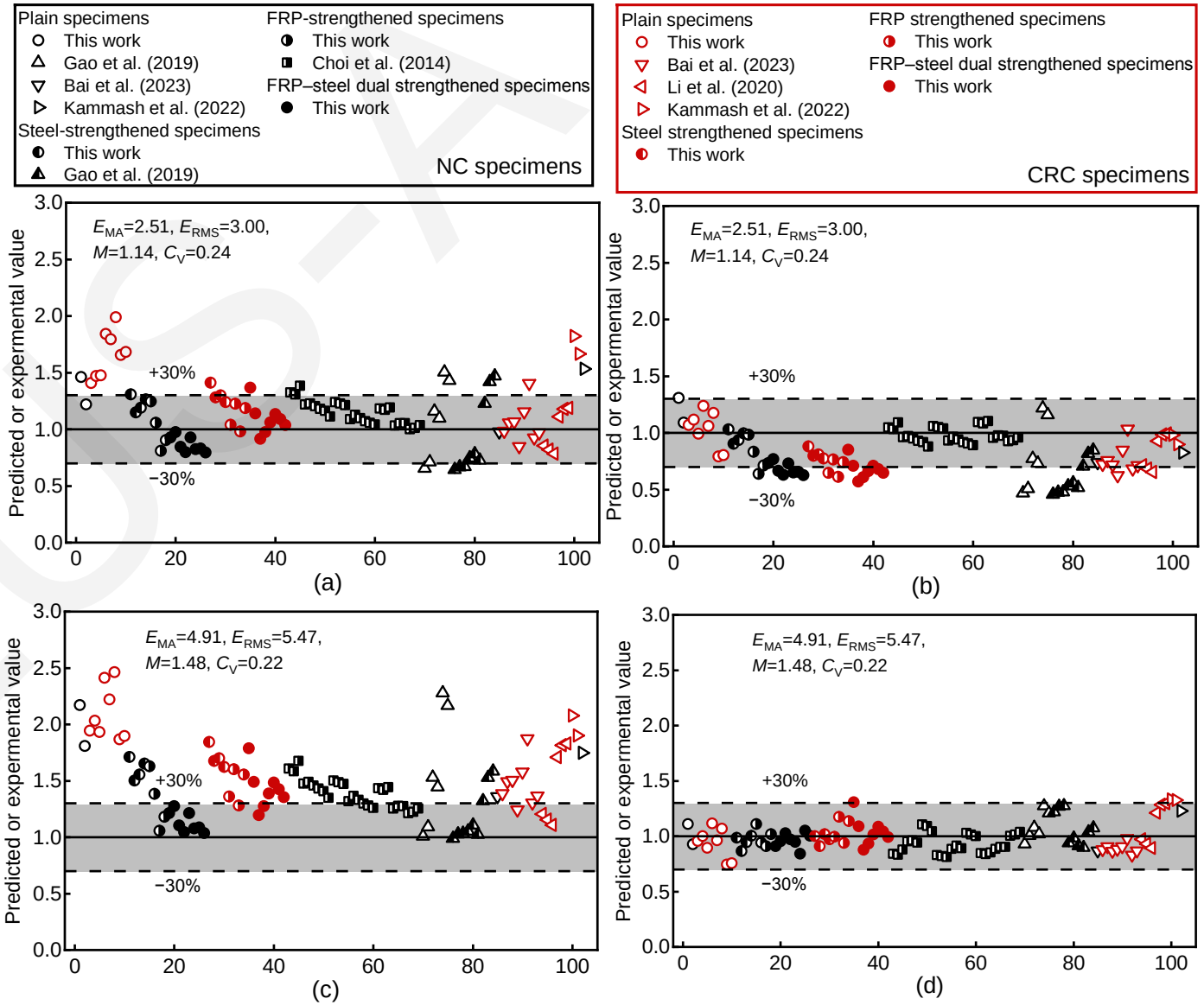
② 临界约束效应 — 避免冗余约束导致的过高估计

③ 基于物理机制 → 外推泛化能力优于纯经验公式

精度对比：优于 规范fib以及现有研究中的模型

- 更低的 MAE、RMSE
- 更优的 CoV 和相关系数R^2





创新点 2：随机连续粘结-滑移本构模型

核心思想：n个弹簧-摩擦单元随机断裂 → 模拟粘结界面行为

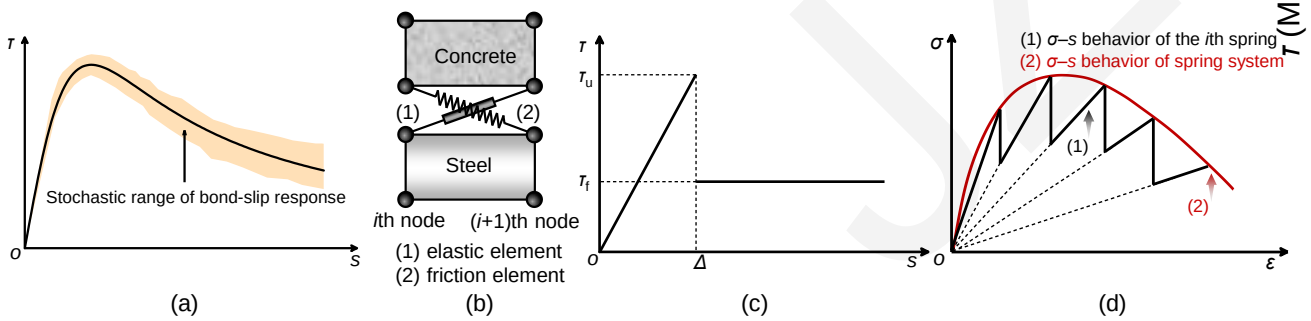
- 弹簧单元 → 传递粘结应力（线弹性至断裂）
- 摩擦单元 → 弹簧断裂后提供残余粘结力
- Weibull 分布 → 损伤演化 D(s) — 连续可导，无接缝不连续

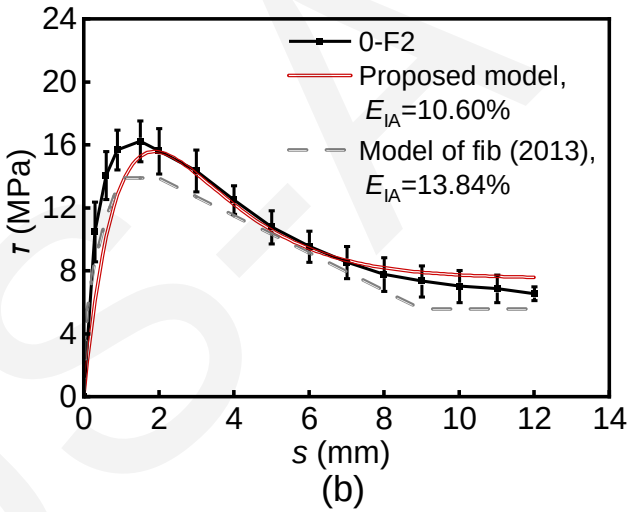
相较于 fib (2013) 分段模型的优势：

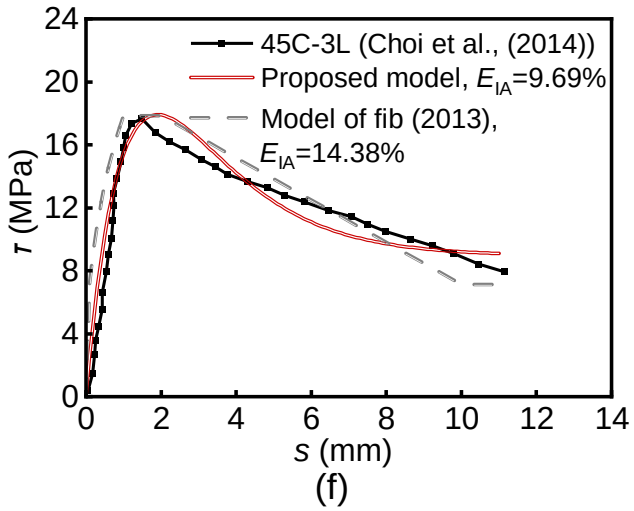
✓ 全程连续可导 — 有限元分析中无接缝不一致性问题

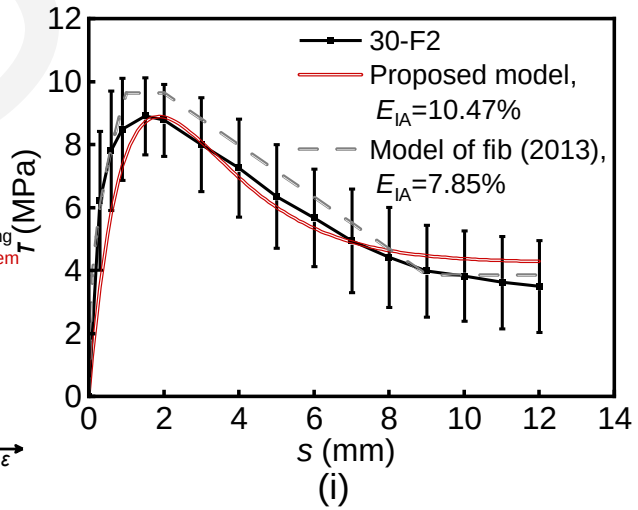
✓ 成功捕捉粘结-滑移响应的随机性（材料固有非均质性）

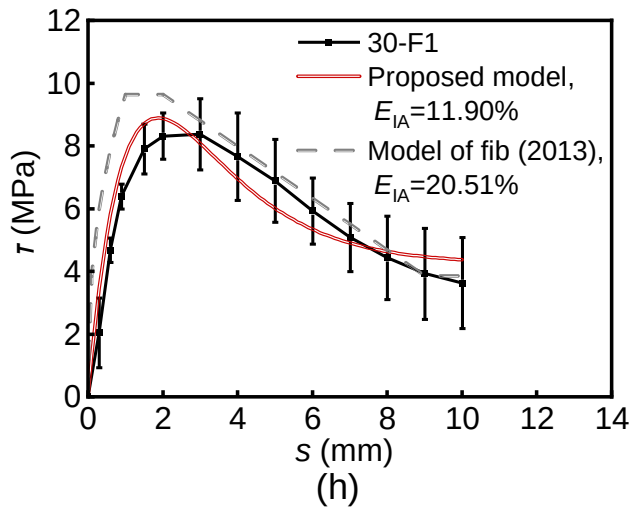
✓ 高精度：积分绝对误差 (IAE) < 10.47%











与本项目相关的其他论文

[1] Xiao F, Chen K, Yan D, Li Q, Yang J, Yan D. A multi-mechanical bond-slip model for bar-concrete interface under confinement-corrosion coupling conditions [J]. ***Engineering Structures***, 2025, 342: 120871.

[2] Xiao F, Chen Y, Yang J, Chen S, Li Q, Lu S, Yan D. An improved mechanics-based model for steel bar-concrete interfacial bond with coupled corrosion-confinement [J]. ***Structures***, 2025, 79: 109622.

[3] Xiao F, Li Q, Lu S, Liu P, Yang J, Xue Z, Chen S, Yan D. Bond failure of corroded rebar embedded in rubberized geopolymer concrete: Experimental evaluation [J]. ***Construction and Building Materials***, 2026, 519: 145922.

[4] Xiao F, Wang J, Peng P, Li Q, Yan D, Chen S, Lu S, Yang J. Effect of long-term wet-dry cycling and confinement condition on durability of steel bar-seawater sea-sand concrete (SSC) interface [J]. ***Engineering Structures***, 2025, 343: 121024.

[5] Xiao F, Chen S, Wang J, Yan D, Yang J. Analytical bond-slip model of steel bar to concrete under confinement [J]. ***ACI Structural Journal*****,** 2026, 123(1): 105-118.

结论与设计启示

1. 橡胶增加降低粘结强度但延缓开裂；ρ_v = 40% 时破坏模式从脆性劈裂转变为延性拔出破坏 — 存在最优平衡点

2. FRP/箍筋约束改善 NC 和 CRC 的粘结行为，但 CRC 更早达到临界约束阈值 → 配合比设计比过度约束更为关键

3. 基于力学的粘结强度模型引入 γr 退化和临界约束效应，预测精度显著优于现有经验公式

4. 基于 Weibull 损伤理论的连续随机粘结-滑移模型