

# 底板厚度对U型预制ECC-RAC组合梁抗弯性能影响分析

晁梓轩<sup>1</sup>, 陈翼军<sup>2</sup>, 郑永星<sup>2</sup>, 陈作银<sup>3</sup>, 刘少华<sup>3</sup>, 彭光达<sup>3</sup>, 张玉彬<sup>4</sup>, 江维洪<sup>5</sup>, 段文红<sup>5</sup>, 陈彦江<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学建筑工程学院, 北京

<sup>2</sup>北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京

<sup>3</sup>北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京

<sup>4</sup>中国铁路北京局集团有限公司北京工务段, 北京

<sup>5</sup>大理大南高速公路有限公司, 云南 大理

收稿日期: 2025年4月29日; 录用日期: 2025年5月21日; 发布日期: 2025年5月31日

## 摘要

为了改善再生混凝土构件在延性和能量耗散方面的不足, 本文引入U型预制ECC-RAC组合梁作为优化方案, 并借助ABAQUS有限元平台建立数值仿真分析模型并基于已有试验结果验证。在此基础上, 探究了底板厚度对组合梁峰值荷载、延性表现和耗能能力的影响规律。结果显示, 底板适当加厚有助于提高承载性能、延性性能和能量耗散能力。此外, 与同等条件下的纯RAC梁及纯ECC梁相比, 组合梁在整体性能上展现出更优的综合表现。相关分析为该类型新型组合构件的低碳化设计及工程推广提供了参考依据。

## 关键词

U型预制组合梁, ECC, 再生混凝土, 抗弯性能, 有限元分析

# Effect of Base Plate Thickness on Flexural Performance of U-Shaped Prefabricated ECC-RAC Composite Beams

Zixuan Chao<sup>1</sup>, Yijun Chen<sup>2</sup>, Yongxing Zheng<sup>2</sup>, Zuoyin Chen<sup>3</sup>, Shaohua Liu<sup>3</sup>, Guangda Peng<sup>3</sup>, Yubin Zhang<sup>4</sup>, Weihong Jiang<sup>5</sup>, Wenhong Duan<sup>5</sup>, Yanjiang Chen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

<sup>2</sup>Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing

<sup>3</sup>Beijing National Highway Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing

<sup>4</sup>Beijing Construction Section of China Railway Beijing Bureau Group Co., Ltd., Beijing

**文章引用:** 晁梓轩, 陈翼军, 郑永星, 陈作银, 刘少华, 彭光达, 张玉彬, 江维洪, 段文红, 陈彦江. 底板厚度对 U 型预制 ECC-RAC 组合梁抗弯性能影响分析[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1277-1284. DOI: 10.12677/hjce.2025.145137

## Abstract

To mitigate the ductility limitations and energy dissipation deficiencies in recycled aggregate concrete (RAC) structural systems, this research introduces a novel U-shaped prefabricated composite beam configuration integrating engineered cementitious composites (ECC) with RAC. A finite element model was developed and validated through the ABAQUS platform, benchmarked against experimental datasets. Parametric analysis was conducted to evaluate the effects of base plate thickness variations on three critical mechanical properties: ultimate load capacity, deformation ductility, and energy absorption efficiency. The findings demonstrate that strategic dimensional optimization of the base plate significantly improves structural bearing capacity while concurrently enhancing both ductility indices and energy dissipation performance. Comparative assessments against conventional RAC monolithic beams and ECC-only specimens under identical loading regimes confirm the hybrid system's enhanced multifunctional performance. This work establishes technical guidelines for sustainable engineering practices and supports the development of low-carbon composite structures in civil infrastructure applications.

## Keywords

U-Shaped Prefabricated Composite Beam, ECC, Recycled Aggregate Concrete, Flexural Performance, Finite Element 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

再生混凝土(Recycled Aggregate Concrete, RAC)的推广应用是回收利用建筑废弃物、降低天然资源消耗与碳排放的重要方式之一,但其抗压强度低、脆性显著等特征严重制约了工程实践。相比之下,工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)具有延性高、耗能能力强、裂缝控制能力优异等特点,可用于提升传统混凝土构件的力学性能。但 ECC 的成本约为普通混凝土的 4~8 倍,同时现场施工难度大、施工质量难以保证等问题也限制了其推广应用。基于材料特性,各团队针对再生混凝土(RAC)与工程水泥基复合材料(ECC)复合构件及其节点的静动力响应特性展开系统性研究,重点关注其力学行为与损伤演化规律。

ECC 组合梁方面, Maalej 与 Li 等人[1]率先将 ECC 应用于组合梁结构,并证实其可显著提升承载力与变形能力; Zhang J 等[2]指出 ECC 含量的增加有助于显著增强梁的延性。徐世烺团队[3][4]通过试验与理论模型,系统揭示了 UHTCC 与 ECC 组合梁在抗弯刚度、控裂能力和变形协调性方面的作用机制,并提出纤维桥接效应是提升性能的核心因素。研究还表明, ECC 底板厚度和替代高度等参数对抗弯性能具有显著影响。

RAC 组合梁方面, Domingo 等[5]通过长期试验证实取代率对收缩徐变具有显著调控作用;肖建庄[6]从材料再生原理角度提出 RAC 技术优化路径;陈宗平等[7]通过本构模型研究,验证了合理设计下 RAC

梁可达到与普通混凝土相当的受力水平。此外，Pani 等[8]基于可持续性视角，建立了 RAC 性能评价体系，为其工程适应性提供理论支撑。

有鉴于此，本文提出了一种 U 型预制 ECC-RAC 组合梁，通过数值仿真探究底板厚度对 U 型预制 ECC-RAC 组合梁抗弯性能的影响。

2. U 型预制 ECC-RAC 组合梁构造及数值模型建立

2.1. 基本构造

如图 1 所示，U 型预制 ECC-RAC 组合梁通常由两部分构成：外部的预制 U 型 ECC 壳体与内部的现浇再生混凝土填充层。该组合梁整体长度为 4100 mm，有效跨距为 3900 mm，截面总高度为 400 mm，宽度为 200 mm。其中，叠合部分高度为 160 mm；预制 U 型部分高度为 240 mm，底板厚度设为 60、80、100 mm，腹板宽度为 50 mm；ECC、RAC 均采用 42.5 MPa 基底水泥，试件设计如表 1 所示。

Table 1. Specimens list  
表 1. 各试件一览

编号	预制 ECC 壳	RAC 内芯	钢筋强度等级及配置
	底板厚度	取代率	
E-b60-3d18	60	50%	HRB400, 3d18
E-b80-3d18	80	50%	HRB400, 3d18
E-b100-3d18	100	50%	HRB400, 3d18
RAC-P	0	50%	HRB400, 3d18
ECC-P	400	0	HRB400, 3d18

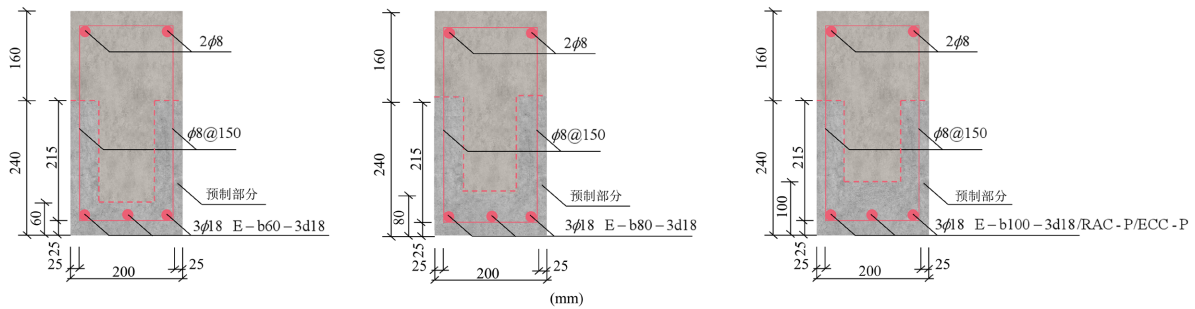


Figure 1. Beam cross-section diagram  
图 1. 梁断面图

2.2. 模型建立

模型中，再生混凝土内芯、预制 U 型 ECC 壳体与加载垫板均采用八节点三维实体单元(C3D8R)进行离散建模，钢筋则采用两节点桁架单元(T3D2)模拟。以 E-b60-3d18 为例，模型共分 U 型 ECC 壳、再生混凝土内芯、钢筋骨架、垫块四部分，钢筋骨架由主筋、箍筋以及架立筋组成，主筋长 4034 mm，箍筋尺寸为 134 mm × 334 mm，架立筋长 4034 mm，各材料截面面积分别为 254 mm<sup>2</sup>、50.3 mm<sup>2</sup>、50.3 mm<sup>2</sup>。ECC 壳、再生混凝土内芯、钢筋骨架以及垫块单元尺寸均取 50 mm。加载垫块分别布置于加载位置及两端支撑位置，通过 Tie 命令将其与 U 型组合梁整体绑定，实现构件整体协调变形。钢筋骨架通过 Embedded Region 嵌入混凝土体内，确保其节点与混凝土单元协同工作。在加载区域，垫块上表面采用全自由度耦

合方式与加载点建立约束关系；支座位置处的垫块下表面则通过相同耦合机制与支撑基准点进行连接。考虑到 ECC 模板与再生混凝土之间界面连接的实际表现，根据前人试验与相关文献表明，在组合梁发生弯曲破坏后，两者间并未出现界面剥离或滑移。因此，有限元模型中采用 Tie 约束将 ECC 壳与混凝土内芯直接绑定处理。分析步骤采用静力通用分析模块(Static, General)。在边界条件设定中，左侧支承节点配置 UX、UY、UZ 三向移动自由度约束及 RX、RY 转动自由度限制；右侧对应支点设置 UY、UZ 位移约束与 RX、RY 转动约束，以此构建符合工程实际的简支边界模拟条件。

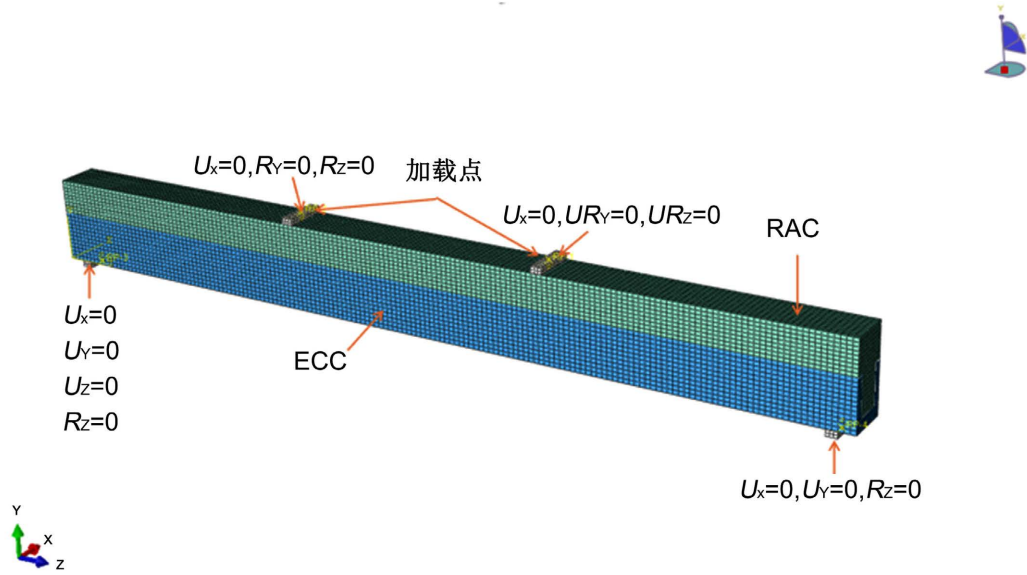


Figure 2. Finite element model and loading method  
图 2. 有限元模型及加载方式

1) 在本文中，ECC 受拉本构模型采用双线性本构模型，本构关系可由以下公式表示

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E_t \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_{t0} \\ \sigma_{t0} + E_w (\varepsilon - \varepsilon_{t0}) & \varepsilon_{t0} < \varepsilon \leq \varepsilon_w \end{cases} \quad (1)$$

式中， $E_t$  为初始弹性模量(GPa)； $\sigma_{t0}$  为名义初裂强度(MPa)； $\varepsilon_{t0}$  为名义初裂应变； $E_w$  为应变硬化阶段弹性模量(GPa)； $\sigma_w$  为极限抗拉强度(MPa)； $\varepsilon_w$  为 ECC 极限拉应变。对于立方体抗压强度标准值为 40 MPa 的 ECC， $\sigma_{t0}$  取 4.0 MPa； $\varepsilon_{t0}$  为 0.00021， $\sigma_w$  取 5.0 MPa， $\varepsilon_w$  取 0.03。

ECC 受压本构模型采用袁方课题组[9]提出的单轴压缩荷载下 ECC 材料的本构模型，应力 - 应变曲线为多线性曲线，如图 2 所示，本构关系可用式(2)表示

$$\sigma_{ec}(\varepsilon_c) = \begin{cases} \varepsilon_c \frac{2\sigma_{ec0}}{\varepsilon_{ec0}}, & \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ec0}/3 \\ \frac{2\sigma_{ec0}}{3} + \left( \sigma_{ec0} - \frac{2\sigma_{ec0}}{3} \right) \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{ec0}/3}{\varepsilon_{ec0} - \varepsilon_{ec0}/3} \right), & \varepsilon_{ec0}/3 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ec0} \\ \sigma_{ec0} + \left( \frac{\sigma_{ec0}}{2} - \sigma_{ec0} \right) \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{ec0}}{1.5\varepsilon_{ec0} - \varepsilon_{ec0}} \right), & \varepsilon_{ec0} < \varepsilon_c \leq 1.5\varepsilon_{ec0} \\ \frac{\sigma_{ec0}}{2} - \frac{\sigma_{ec0}}{2} \left( \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{ec0}}{\varepsilon_{ecu}^* - 1.5\varepsilon_{ec0}} \right), & 1.5\varepsilon_{ec0} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ecu}^* \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\sigma_{ec0}$  为峰值压应力(MPa)； $\varepsilon_c$  为 ECC 压应变； $\varepsilon_{ec0}$  为峰值压应力对应的压应变； $\varepsilon_{ecu}^*$  为极限受压应变。对于立方体抗压强度标准值为 40 MPa 的 ECC， $\sigma_{ec0}$  取 26.8 MPa， $\varepsilon_{ec0}$  取 0.005， $\varepsilon_{ecu}^*$  取 0.012。

根据 Sidoroff [10] 基于能量等价原理提出的观点，ECC 材料的塑性损伤因子可通过等效弹性模量或等效应力的引入进行计算。该原理认为，受损材料的弹性储能在形式上应与理想无损状态下保持一致，通过将真实应力替换为等效应力，或将原始弹性模量替换为受损条件下的等效模量，可实现对损伤行为的合理表征。其表达式如下：

$$d_c = 1 - \sqrt{\sigma_c / E_c / \varepsilon_c} \quad (3)$$

$$d_t = 1 - \sqrt{\sigma_t / E_c / \varepsilon_t} \quad (4)$$

其中， $\sigma_c$  和  $\sigma_t$  分别为 ECC 真实压应力和真实拉应力； $\varepsilon_c$  和  $\varepsilon_t$  为相应的真实压应变和真实拉应变。

2) RAC 受拉本构模型采用双线性本构模型，本构关系可由以下式表示：

$$y_c = \begin{cases} ax_c + (3-2a)x_c^2 + (a-2)x_c^3 & (0 \leq x_c < 1) \\ \frac{x_c}{b(x_c-1)^2 + x_c} & (x_c \geq 1) \end{cases} \quad (5)$$

式中： $x_c$  表示混凝土的相对压应变， $x_c = \varepsilon_c / \varepsilon_{c0}$ ； $\varepsilon_c$  代表混凝土在压缩状态下的应变值， $\varepsilon_{c0}$  即其峰值压应变； $y_c$  为混凝土的相对压强度， $y_c = \sigma_c / f_{cm}$ ； $\sigma_c$  为实际受压应力， $f_{cm}$  为轴心抗压强度；参数  $a$  与  $b$  为考虑再生粗骨料取代率影响的修正系数。可按下式计算：

$$b = 0.8(7.664r + 1.142) \quad (6)$$

再生混凝土在受拉状态下的应力应变关系与普通混凝土基本一致，本文采用 Xiao 等人[11]提出的受拉本构模型具体如下：

$$y_t = cx_t - (c-1)x_t^6 \quad (7)$$

式中： $x_t$  表示混凝土的相对拉应变， $x_t = \varepsilon_t / \varepsilon_{t0}$ ； $\varepsilon_t$  为实际拉应变值， $\varepsilon_{t0}$  即混凝土达到拉伸极限时的峰值应变； $y_t$  为混凝土的相对拉强度， $y_t = \sigma_t / f_t$ ； $\sigma_t$  为拉应力， $f_t$  为其抗拉强度；参数  $c$  为参考点处正切模量与割线模量的比值，其计算方式如下：

$$c = 0.007r + 1.190 \quad (8)$$

3) 钢筋本构采用的理想弹塑性模型为：

$$\begin{cases} \sigma_s = \varepsilon_s E_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ \sigma_s = f_y, & \varepsilon_y < \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (9)$$

## 2.3. 模型验证

为验证本文建模参数及分析方法的适用性，参考肖建庄等人[12]开展的再生混凝土叠合梁四点弯曲试验，进行了数值模拟，力 - 位移曲线如图 3 所示。对比分析结果表明，数值模拟结果与现场实测数据在整体变化趋势上呈现高度吻合，其中峰值承载力偏差幅度不超过 10%，有效验证了该有限元模型具备可靠的计算精度和工程适用性。由此可推断，本文采用的材料参数设定及模拟流程可有效用于后续 U 型预制 ECC-RAC 组合梁抗弯性能的数值分析。

## 3. U 型预制 ECC-RAC 组合梁数值分析

### 3.1. 新型材料的引入

在原有普通混凝土与再生混凝土组合基础上，引入工程水泥基复合材料(ECC)作为外壳构造材料。相

比传统混凝土, ECC 具备优异的应变硬化与裂缝自控能力, 能有效提升结构延性与耗能性能。而再生混凝土(RAC)作为绿色低碳材料, 在保障基本承载力的同时具备良好的资源化潜力。本文将 ECC 与 RAC 复合应用于 U 型预制组合梁结构中, 构建 ECC 壳体-RAC 核心的组合体系, 旨在兼顾结构性能与绿色环保需求, 为新型组合梁构件提供理论依据与设计参考。

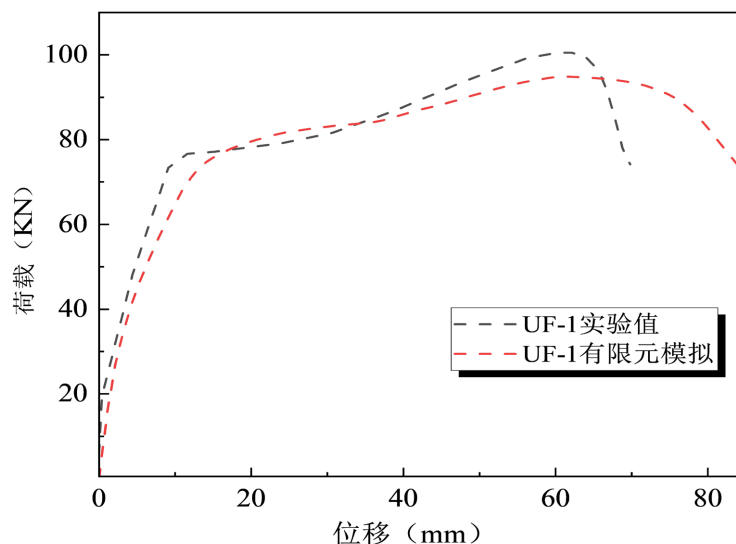


Figure 3. Validation of model rationality  
图 3. 模型合理性验证

### 3.2. 组合梁数值分析结果

Abaqus 分析的 U 型预制 ECC-RAC 组合梁试件曲线如图 4 所示。

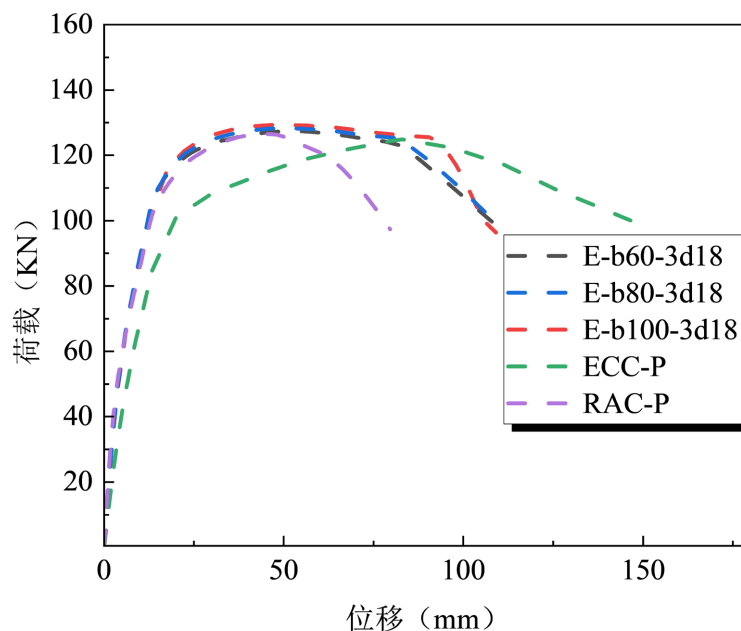


Figure 4. Comparison of force and displacement curves of each specimen  
图 4. 各试件力位移曲线对比



计算的各试件峰值荷载、延性、能量吸收对比见表 2:

Table 2. Calculation results of performance of each specimen  
表 2. 各试件性能计算结果

试件	仿真计算承载力(F) (KN)	理论承载力(Fc) (KN)	Fc/F	延性系数(D)	能量吸收(J)
E-b60-3d18	127.384	123.562	0.97	6.0909	11253.38
E-b80-3d18	128.376	127.092	0.99	6.0962	11365.88
E-b100-3d18	129.368	131.955	1.02	6.1014	11478.37
RAC-P	126.55	120.223	0.95	4.4174	6184.64
ECC-P	124.93	119.933	0.96	4.6075	13651.34

从对比结果来看,当底板厚度由 60 mm 增至 100 mm 时,承载力由 127.38 kN 线性增长至 129.37 kN,增幅约 1.56% (每 20 mm 厚度增加约 0.78%); 延性系数由 6.0909 提高至 6.1014, 增幅为 0.17%, 表明底板厚度与延性指标的相关性较弱; 能量吸收值随厚度增加呈现阶段性变化: 60~80 mm 时总耗能从 11,253J 增至 11,366J, 增幅为 1.0%, 80~100 mm 阶段仅增加 0.98%, 同时单位厚度能效从 187.56 J/mm 显著下降至 114.78 J/mm, 表明厚度超过 80 mm 后材料利用效率降低 38.8%, 虽然提升幅度有限, 但说明适度加厚底板有助于改善构件的延性与耗能表现。

进一步对比全材料构件可发现, ECC-P 在延性系数和能量吸收方面虽优于 RAC-P, 但均未达到组合梁的表现水平。相较于单一材料构件, ECC-RAC 组合梁展现出独特的性能平衡优势。尽管全 ECC 构件(ECC-P)的能量吸收能力达到 13,651J (较 E-b100-3d18 高 18.9%), 但其延性系数(4.6075)仅为组合梁的 75.5%, 而全 RAC 构件(RAC-P)在延性(4.4174)与耗能(6,185J)方面均显著落后, 其承载力(126.55 kN)亦低于组合梁 2.2%。这种差异源于材料协同机制: 底板 ECC 通过纤维桥接效应有效抑制裂缝扩展, 而 RAC 核心区则承担主要压应力, 二者协同形成“抗拉-承压”功能分区。

综上, 底板厚度的增加虽对性能提升作用有限, 但在稳定结构刚度方面有积极影响。ECC 与 RAC 材料的组合构件兼具性能优势与环境友好性, 在结构优化设计中具有良好的应用前景。

4. 结论

本文研究一种新型预制 U 型 ECC-RAC 组合梁结构, 基于 Abaqus 有限元模拟方法, 获得以下关键结论:

- 1) 底板厚度的增加(从 E-b60-3d18 到 E-b100-3d18)对承载力、延性和能量吸收能力有轻微提升, E-b100-3d18 的峰值荷载比 E-b60-3d18 提高了 1.6%, 延性系数和能量吸收也有所增加, 表明较厚的底板能提高结构的承载能力、延性和能量吸收能力。
- 2) ECC 材料在提升结构延性和耗能方面表现出明显优势, 而 RAC 则在降低成本和实现绿色建材应用方面有优势。U 型预制 ECC-RAC 组合梁在延性、能量吸收和承载力方面优于纯 RAC 梁和纯 ECC 梁。
- 3) U 型预制 ECC-RAC 组合梁具备较高的工程应用潜力, 适用于绿色建筑和抗震工程领域。

基金项目

基于新材料应用的钢混组合梁预制桥面板抗裂性能研究(2023-KYQL-033)、北京建工集团有限责任公司科技计划项目(RZCA500620220001)、云教科教便〔2021〕91 号、中铁一局集团第二工程有限公司科技项目(2022A-041)。

## 参考文献

- [1] Maalej, M. and Li, V.C. (1994) Flexural/Tensile-Strength Ratio in Engineered Cementitious Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **6**, 513-528. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(1994\)6:4\(513\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(1994)6:4(513))
- [2] Zhang, J., Leung, C. and Cheung, Y. (2006) Flexural Performance of Layered ECC-Concrete Composite Beam. *Composites Science and Technology*, **66**, 1501-1512. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.11.024>
- [3] 徐世烺, 李庆华. 超高韧性复合材料控裂功能梯度复合梁弯曲性能理论研究[J]. 中国科学: E 辑, 2009, 39(6): 1081-1094.
- [4] 张秀芳, 徐世烺. 采用超高韧性水泥基复合材料提高钢筋混凝土梁弯曲抗裂性能研究(I): 基本理论[J]. 土木工程学报, 2008, 41(12): 48-54.
- [5] Domingo, A., Lázaro, C., Gayarre, F.L., Serrano, M.A. and López-Colina, C. (2009) Long Term Deformations by Creep and Shrinkage in Recycled Aggregate Concrete. *Materials and Structures*, **43**, 1147-1160. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9573-0>
- [6] 肖建庄, 张航华, 唐宇翔. 废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题[J]. 科学通报, 2023, 68(5): 510-523.
- [7] 陈宗平, 徐金俊, 郑华海, 等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力应变本构关系[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 24-32.
- [8] Pani, L., Francesconi, L., Rombi, J., Mistretta, F., Sassu, M. and Stochino, F. (2020) Effect of Parent Concrete on the Performance of Recycled Aggregate Concrete. *Sustainability*, **12**, Article 9399. <https://doi.org/10.3390/su12229399>
- [9] Yuan, F., Pan, J., Dong, L. and Leung, C.K.Y. (2014) Mechanical Behaviors of Steel Reinforced ECC or ECC/Concrete Composite Beams under Reversed Cyclic Loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **26**, Article ID: 04014047. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0000935](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000935)
- [10] Shafieifar, M., Farzad, M. and Azizinamini, A. (2017) Experimental and Numerical Study on Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, **156**, 402-411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.170>
- [11] 肖建庄, 唐宇翔, 张凯建, 等. 再生粗骨料混凝土应力-应变关系[J]. 工程力学, 2024, 41(2): 43-55.
- [12] 肖建庄, 高歌, 徐亚玲, 等. 再生混凝土叠合梁受弯力学性能试验研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(2): 122-126.