

采用ECC湿接缝的装配式钢 - 混组合梁 负弯矩区抗弯性能分析

毕玉冬¹, 陈翼军², 郑永星², 陈作银³, 刘少华³, 彭光达³, 张玉彬⁴, 许维炳¹, 陈彦江¹

¹北京工业大学建筑工程学院, 北京

²北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京

³北京国道通公路设计研究院股份有限公司, 北京

⁴中国铁路北京局集团有限公司北京工务段, 北京

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月31日

摘 要

为探究并优化装配式钢 - 混组合梁负弯矩区的ECC湿接缝构造, 开展负弯矩作用下的装配式钢 - 混组合梁ECC湿接缝抗弯性能分析。建立基于ECC湿接缝的钢 - 混组合梁有限元模型并验证模型, 进而探究了湿接缝宽度、湿接缝截面形式等参数对组合梁抗弯力学性能影响, 结果表明: 组合梁的各阶段荷载与ECC湿接缝的宽度成正比, 且在ECC湿接缝的宽度超过50 mm后增幅提高; 相对于T形湿接缝截面形式, 采用菱形和燕尾形的湿接缝截面形式可以提高组合梁的开裂荷载和峰值荷载。

关键词

钢 - 混组合梁, ECC湿接缝, 负弯矩区, 抗弯性能

Flexural Performance of Prefabricated Steel-Concrete Composite Beams with ECC Wet Joints in the Negative Moment Region

Yudong Bi¹, Yijun Chen², Yongxing Zheng², Zuoyin Chen³, Shaohua Liu³, Guangda Peng³,
Yubin Zhang⁴, Weibing Xu², Yanjiang Chen¹

¹College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

²Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing

³Beijing National Highway Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing

⁴Beijing Construction Section, China Railway Beijing Group Co., Ltd., Beijing

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 31st, 2025

文章引用: 毕玉冬, 陈翼军, 郑永星, 陈作银, 刘少华, 彭光达, 张玉彬, 许维炳, 陈彦江. 采用 ECC 湿接缝的装配式钢-混组合梁负弯矩区抗弯性能分析[J]. 土木工程, 2025, 14(5): 1206-1213. DOI: 10.12677/hjce.2025.145129

Abstract

To investigate and optimize the ECC wet joint configuration in the negative moment region of pre-fabricated steel-concrete composite beams, a flexural performance analysis was conducted under negative bending. A finite element model of the composite beam incorporating ECC wet joints was established and validated. Based on the validated model, the effects of wet joint width and cross-sectional shape on the flexural behavior of the composite beam were studied. The results indicate that the characteristic loads at various stages are positively correlated with the wet joint width, and the rate of increase becomes more pronounced when the width exceeds 50 mm. Compared with the T-shaped joint, the use of diamond-shaped and dovetail-shaped wet joint sections can significantly enhance both the cracking load and the peak load of the composite beam.

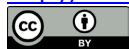
Keywords

Steel-Concrete Composite Beam, ECC Wet Joint, Negative Moment Region, Flexural Performance

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

钢-混组合梁能够充分发挥钢材的抗拉性能和混凝土的抗压性能,具备自重轻、跨越能力强、受力机制良好的特性,因而在桥梁工程建设中得到了推广[1]。但钢-混组合梁在桥墩支座附近的负弯矩区,无法发挥组合结构的优势,反而使得混凝土部分承受拉应力[2]。实际桥梁运维期间,在往复荷载及复杂环境因素等影响下,混凝土桥面板易出现裂缝,尤其在桥墩支座附近的负弯矩区,组合梁无法发挥组合结构的优势,反而使混凝土部分处于受拉状态,更加剧了桥面板的裂缝发展[3]。而湿接缝作为预制桥面板之间联系的关键节点,其更易出现应力集中现象,进而降低结构的刚度及承载力,同时也会对桥面板的耐久性产生不利影响[4]。

随着高性能水泥基材料的出现,为改善桥梁负弯矩区抗弯性能提供新思路。其中,工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)由 Li 教授等人于 20 世纪 90 年代提出的[5],其显著特点是拉伸应变硬化和多裂缝开裂行为,一般极限拉应变可达 3%以上,是普通混凝土的 100~300 倍[6][7]。国内外多名学者开展了关于 ECC 力学性能的研究,通过材料性能试验证明了其具备优异的裂缝控制能力[8],并将其作为桥面连接板及桥面铺装等构造应用于实桥建设工程中,进而验证 ECC 材料对于桥梁抗弯性能的改善作用。因此,将 ECC 应用于组合梁负弯矩区的湿接缝中能够发挥其优异的抗拉性能,达到改善受拉区桥面板的裂缝发展及延缓桥面板刚度退化的效果,进而改善负弯矩区组合梁的抗弯性能。

基于此,本文将建立采用 ECC 湿接缝的钢-混组合梁有限元模型,与设计中性轴位置进行对比验证,并开展参数分析,以探究 ECC 湿接缝的宽度及截面形式对钢-混组合梁在负弯矩作用下抗弯性能的影响规律。

2. 有限元模拟

2.1. 模型建立

通过 ABAQUS 软件建立了钢-混组合梁的有限元模型,整体模型如图 1 所示。其中工字钢梁、桥面板、支座梁、栓钉与加载梁均采用八节点减缩积分单元(C3D8R)模拟,钢筋网采用三维两节点线性杆单元

(T3D2)模拟[9]。湿接缝与预制桥面板通过绑定约束(tie),而桥面板的钢筋网与预制桥面板之间采用嵌入(Embedded)约束,桥面板与工字钢梁之间的连接方式选定为通过栓钉连接,栓钉底部与工字钢顶板建立绑定约束(tie),其余部分则整体嵌入(Embedded)混凝土桥面板中,而工字钢梁顶部其余表面与桥面板底面之间设置库伦摩擦接触,切向采用“罚”,摩擦系数取 0.3 [10],法向设置为“硬接触”。加载垫块、支座梁分别与钢梁之间通过绑定(tie)约束,并在支座梁处设置简支边界条件,在跨中加载垫块处施加 y 向位移。

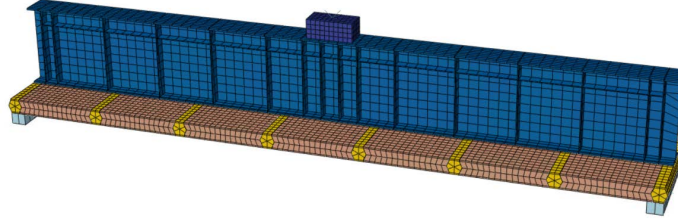


Figure 1. Finite element model of composite beam
图 1. 组合梁有限元模型

2.2. 材料本构

本模型中的预制桥面板采用 C55 级别的普通混凝土,湿接缝采用 C60 级别的 PE-ECC,钢梁采用 Q420 级别的钢板焊接而成,钢筋采用 HRB400 级别钢筋,为双层双向配筋,栓钉为 ML13AL 级别。

普通混凝土在 ABAQUS 模拟中采用混凝土损伤塑性模型(Concrete Damaged Plasticity Model, CDP)以模拟混凝土在加载过程中的非线性行为,其拉压本构采用混凝土结构设计规范[11]中提供的计算模型。

而 ECC 的单轴拉伸特性与普通混凝土存在差异,考虑其存在拉伸硬化的特性,如图 2(a)所示,本章采用三折线性应力 - 应变曲线来描述 ECC 的受拉性能,如下所示:

$$(\varepsilon_t) = \begin{cases} E_0 \cdot \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_{t0} \\ \sigma_{t0} + \frac{(\sigma_{tp} - \sigma_{t0})(\varepsilon - \varepsilon_{t0})}{\varepsilon_{tp} - \varepsilon_{t0}} & \varepsilon_{t0} < \varepsilon \leq \varepsilon_{tp} \\ \sigma_{tp} \left(1 - \frac{\varepsilon - \varepsilon_{tp}}{\varepsilon_{tu} - \varepsilon_{tp}} \right) & \varepsilon_{tp} < \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \\ 0 & \varepsilon_{tu} < \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

式中, E_0 是初始弹性模量(MPa), σ_{t0} 和 ε_{t0} 分别为名义初裂强度(MPa)和所对应的名义初裂应变; σ_{tp} 和 ε_{tp} 分别为抗拉强度(MPa)和所对应的拉应变; ε_{tu} 为应力下降为 0 MPa 时对应的拉应变。

ECC 的单轴受压应力 - 应变全曲线与普通混凝土类似,但 ECC 的受压应变均高于普通混凝土。如图 2(b)所示,本文采用 Yuan [12]提出的多折线 ECC 受压本构模型,如式(2)所示:

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

式中, σ_{ec0} 和 ε_{ec0} 分别为峰值强度(MPa)和所对应的峰值应变; ε_{ecu}^* 为应力下降为 0 MPa 时所对应的压应变。

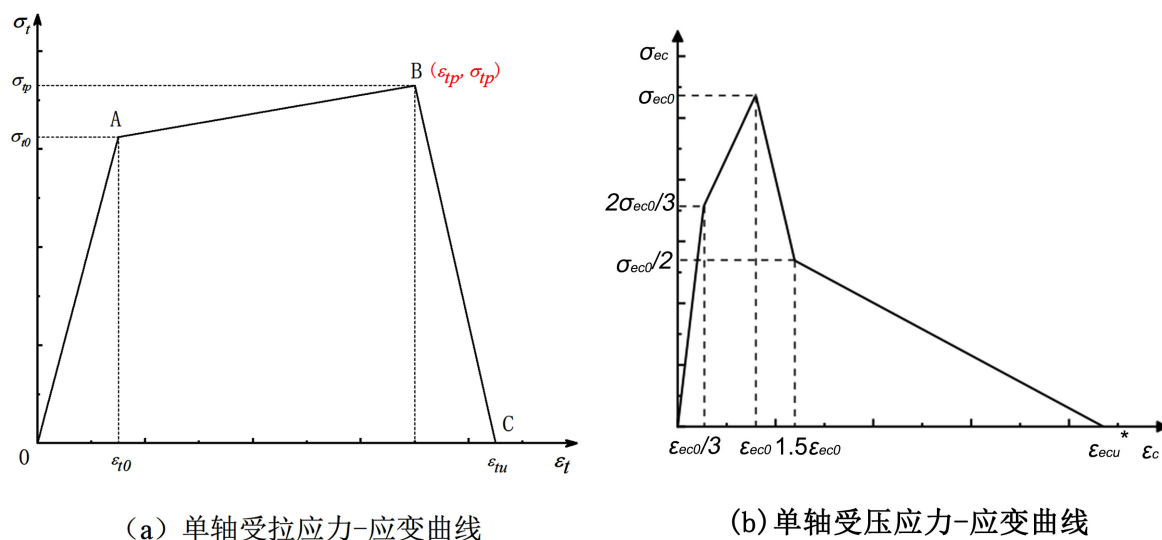


Figure 2. The constitutive relationship curve of ECC material
图 2. ECC 材料的本构关系曲线

ECC 材料与普通混凝土同为非匀质材料,在 ABAQUS 中同样采用 CDP 模型来描述 ECC 材料的非线性特征,并依据能量等效原理建立 ECC 材料的塑性损伤本构关系。

$$\sigma = (1-d)^2 E_0 \varepsilon \quad (3)$$

式中, σ 和 ε 分别是材料的应力和对应的应变; d 为损伤因子。将材料的本构模型代入式(3),得到 ECC 材料对应的损伤因子,结合 ECC 的力学性能试验结果,在 ABAQUS 中定义的其他损伤参数如表 1 所示。

Table 1. Parameter table of ECC constitutive relationship model
表 1. ECC 本构关系模型参数表

材料等级	ε_{t0}	σ_{t0} (MPa)	σ_{tp} (MPa)	ε_{tu}	ε_{ec0}	ε_{ecu}^*
ECC-C60	0.00021	3.2	5.2	0.03	0.005	0.012

本模型中的钢材、钢筋和栓钉均采用简化双折线模型,其中钢材的屈服强度取 420 MPa,钢筋的屈服强度取 400 MPa,栓钉的屈服强度取 415 MPa。

2.3. 模型验证

根据有限元模型的计算结果,绘制了在不同加载阶段下,组合梁跨中截面上纵向应变沿梁高的分布图,如图 3 所示。其中梁高 431 mm 处为钢梁与桥面板的交界面,在加载初期,应变沿梁高的分布近乎呈线性,因此,说明该组合梁满足“平截面假定”。而试件在初始加载时期的中性轴高度为 339.3 mm,模型设计的中性轴位置为 373.2 mm,两者的差距为 9.08% (<10%),同时考虑到初始加载会使试件的中性轴位置较初始位置偏下,因此可知,该有限元模型的初始中性轴位置与设计中性轴位置满足相似关系,进而验证本文有限元模型的有限性。

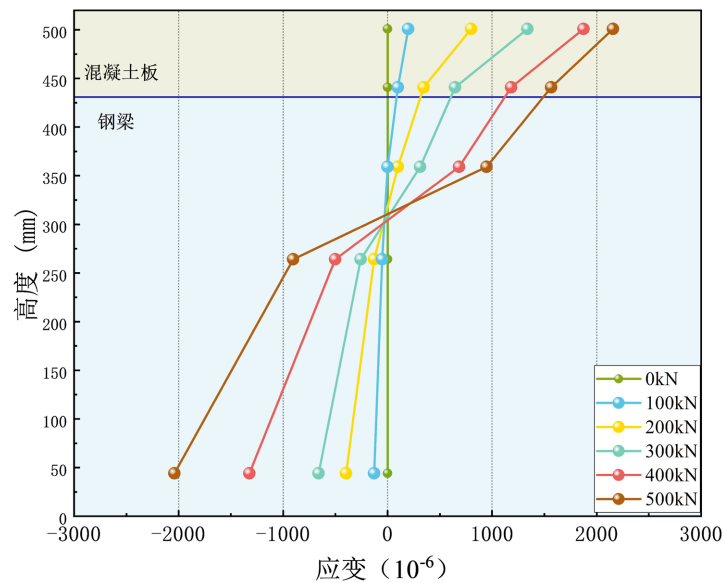


Figure 3. Midspan strain distribution of the finite element model
图 3. 有限元模型跨中应变分布图

3. 参数分析

3.1. 湿接缝宽度

湿接缝的宽度会直接影响组合梁负弯矩区预制桥面板的连接性能及施工效率[13]，为探究组合梁中 ECC 湿接缝的宽度变化对结构整体抗弯性能的影响，在保证湿接缝处钢筋搭接有效的基础上，本文设置了 ECC 湿接缝宽度分别为 30 mm、50 mm、70 mm 三种工况，并建立相应的有限元模型，得到其荷载 - 位移曲线如图 4 所示。

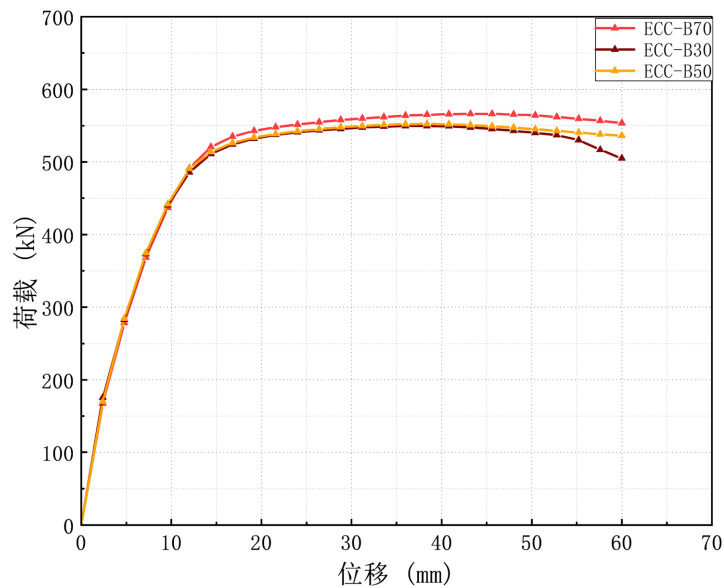


Figure 4. Comparison of load-displacement curves of composite beams with different wet joint widths
图 4. 不同湿接缝宽度下组合梁荷载 - 位移曲线对比图

当组合梁的湿接缝宽度分别为 30 mm、50 mm、70 mm 时，组合梁各阶段的荷载特征值如表 2 所示，对比可知，随着湿接缝宽度的增加，组合梁的开裂荷载不断提高，当湿接缝宽度达到 70 mm 时，组合梁的开裂荷载提高了近 10.21%，说明 ECC 在湿接缝处的应用能够发挥其拉伸硬化特性及裂缝控制能力以实现延缓桥面板开裂的效果。对比三种工况下的组合梁屈服荷载和峰值荷载可知，增加湿接缝宽度会使组合梁的屈服荷载和峰值荷载均随之提高，当湿接缝宽度超过 50 mm 后，增加同样的湿接缝宽度时，组合梁的承载力增幅相对提高，开裂荷载、屈服荷载、峰值荷载的对应增幅分别由 1.99%、1.75%、0.45% 提高至 6.84%、2.47%、2.56%。

Table 2. Characteristic load values of composite beams with different wet joint widths

表 2. 不同湿接缝宽度下组合梁荷载特征值

工况	开裂荷载(kN)	屈服荷载(kN)	屈服位移(mm)	峰值荷载(kN)	峰值位移(mm)
ECC-B30	107.23	483.59	12.02	549.66	38.12
ECC-B50	109.37	492.03	12.12	552.15	38.47
ECC-B70	116.85	504.18	13.06	566.29	43.23

如图 5 所示，为各工况下钢梁跨中区域的应力变形云图，由图可知，钢 - 混组合梁在负弯矩作用下钢梁跨中区域的下翼缘板和腹板发生明显的屈曲变形，使其逐渐失去承载能力。因此，仅改变组合梁桥面板中湿接缝的宽度对钢梁的破坏模式无明显影响。

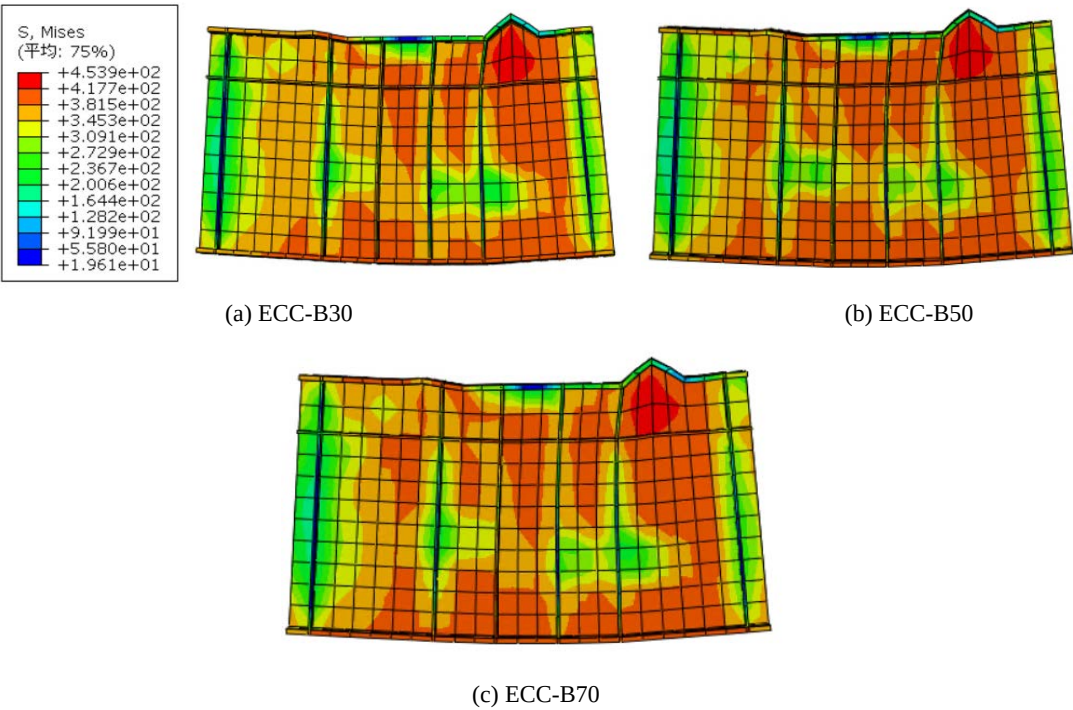


Figure 5. Stress contours of the steel beam midspan under different wet joint widths

图 5. 不同湿接缝宽度下钢梁跨中区域应力云图

3.2. 湿接缝截面形式

湿接缝截面形式直接影响湿接缝与预制板之间的粘结效果，进而影响桥面板应力在湿接缝与预制板

之间的传递过程[14],为探究不同湿接缝截面形式对组合梁负弯矩区抗弯性能的影响,本文分别建立了湿接缝截面形式为菱形、燕尾形、T形的组合梁数值仿真模型,绘制并对比了三种工况下组合梁的荷载-位移曲线,如图6所示。

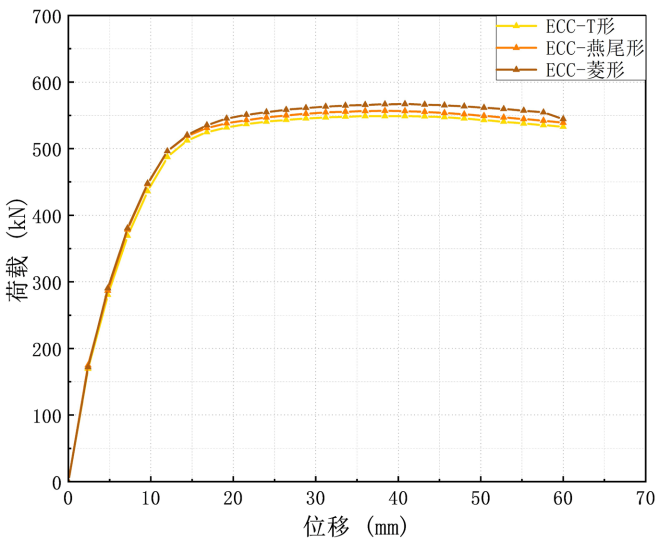


Figure 6. Comparison of load-displacement curves of composite beams with different wet joint cross-sectional shapes
图 6. 不同湿接缝截面形式下组合梁荷载 - 位移曲线对比图

由图6可知,采用菱形、燕尾形、T形的组合梁的初始抗弯刚度分别为70.81 kN/mm、72.69 kN/mm、70.56 kN/mm,其中采用燕尾形的ECC湿接缝的组合梁初始抗弯刚度最大;计算并对比三种工况下组合梁的荷载特征值如表3所示,组合梁的开裂荷载分别为109.37 kN、105.94 kN、82.34 kN,其中菱形及燕尾形湿接缝组合梁的开裂荷载相近,而T形湿接缝组合梁的开裂荷载则明显较低,尤其较菱形湿接缝组合梁下降了24.71%;峰值荷载分别为552.15 kN、556.54 kN、548.92 kN,其中燕尾型湿接缝组合梁的峰值荷载最高,T形湿接缝组合梁的峰值荷载最低。由此可知,仅改变ECC湿接缝的截面形式对组合梁的初始抗弯刚度影响较小,但T形的湿接缝截面形式会明显降低组合梁开裂荷载和峰值荷载,菱形湿接缝组合梁的开裂荷载最高,燕尾形湿接缝组合梁的峰值荷载则最高。

Table 3. Characteristic load values of composite beams with different wet joint widths
表 3. 不同湿接缝宽度下组合梁荷载特征值

工况	开裂荷载(kN)	屈服荷载(kN)	屈服位移(mm)	峰值荷载(kN)	峰值位移(mm)
ECC-菱形	109.37	492.03	12.12	552.15	38.47
ECC-燕尾形	105.94	496.82	12.06	556.54	38.64
ECC-T形	82.34	488.94	12.14	548.92	38.23

4. 结论

本文建立了基于ECC湿接缝的钢-混组合梁有限元模型,并通过与设计中性轴位置和试验荷载-位移曲线相对照进而完成模型有效性验证,后续开展了关于ECC湿接缝宽度、湿接缝截面形式等参数的影响分析,得到以下结论:

- (1) ECC湿接缝的宽度越大,组合梁的开裂荷载、屈服荷载及峰值荷载均有提升效果,ECC湿接缝

的宽度超过 50 mm 后, 提升幅度相对提高。

(2) 相对于 T 形湿接缝截面形式, 采用菱形和燕尾形的湿接缝截面形式可以提高组合梁的开裂荷载和峰值荷载。

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] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97.
- [2] 郭瑞, 苏庆田, 李晨翔, 等. 后结合预应力组合梁负弯矩区混凝土开裂性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 352-356.
- [3] 宋爱明. 钢-混凝土组合梁负弯矩区静力与疲劳性能研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2020.
- [4] 翁雅谷, 秦肖, 赵长军, 等. 钢-混凝土组合梁负弯矩区锈蚀规律试验研究[J]. 钢结构, 2016, 31(11): 108-113.
- [5] Li, V.C. and Leung, C.K.Y. (1992) Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites. *Journal of Engineering Mechanics*, **118**, 2246-2264. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9399(1992)118:11(2246))
- [6] Li, V.C. (1998) Engineered Cementitious Composites (ECC)—Tailored Composites through Micromechanical Modeling. In: Banthia, N., Bentur, A. and Mufti, A., Eds., *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*, Canadian Society for Civil Engineering, 64-97.
- [7] 徐世烺, 蔡向荣. 超高韧性纤维增强水泥基复合材料基本力学性能[J]. 水利学报, 2009, 40(9): 1055-1063.
- [8] Zhang, J., Leung, C.K.Y. and Gao, Y. (2011) Simulation of Crack Propagation of Fiber Reinforced Cementitious Composite under Direct Tension. *Engineering Fracture Mechanics*, **78**, 2439-2454. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2011.06.003>
- [9] 刘新华, 周聪, 张建仁, 等. 钢-UHPC 组合梁负弯矩区受力性能试验[J]. 中国公路学报, 2020, 33(5): 110-121.
- [10] Baltay, P. and Gjelsvik, A. (1990) Coefficient of Friction for Steel on Concrete at High Normal Stress. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **2**, 46-49. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0899-1561\(1990\)2:1\(46\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0899-1561(1990)2:1(46))
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] Yuan, F., Pan, J. and Wu, Y. (2014) Numerical Study on Flexural Behaviors of Steel Reinforced Engineered Cementitious Composite (ECC) and ECC/Concrete Composite Beams. *Science China Technological Sciences*, **57**, 637-645. <https://doi.org/10.1007/s11431-014-5478-4>
- [13] 鲁伟. 国产 PVA 纤维——尾矿砂 ECC 在桥梁拼接中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.
- [14] 胡志坚, 尹炳森, 俞文生. 预制拼装桥面板 UHPC 湿接缝抗弯性能分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(6): 29-35.