

高强不锈钢绞线网增强ECC板受弯性能数值分析

李 浩¹, 刘倚天¹, 车佳玲², 薛学涛³, 李 可⁴

¹西安诺博尔稀贵金属股份有限公司, 陕西 西安

²宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

³河南省建筑科学研究院有限公司, 河南 郑州

⁴郑州大学土木工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年2月28日; 录用日期: 2025年3月20日; 发布日期: 2025年3月31日

摘 要

为有效提升工程水泥基复合材料(engineered cementitious composite, ECC)强度的同时, 充分发挥其优异的控裂和变形能力, 本文采用极限拉应变与ECC接近且粘结性能优良的高强不锈钢绞线网(high-strength stainless steel strand mesh, HSSM)增强ECC, 并进行HSSM增强ECC板受弯性能的数值分析。采用ABAQUS软件, 考虑钢绞线与ECC之间的粘结-滑移作用, 建立有限元模型模拟ECC在弯曲过程中的非线性行为。此外, 通过参数分析探明了钢绞线配筋率、板尺寸和ECC材料参数等变量对板抗弯性能的影响。结果表明: 增加配筋率、板的截面高度、ECC的开裂强度和极限抗拉强度, 可显著提高了板的抗弯刚度和承载能力, 但延性有所降低; 提高ECC的抗压强度, 可有效提高板的延性, 同时板的承载力和刚度也有小幅提升。

关键词

工程水泥基复合材料(ECC), 高强不锈钢绞线网(HSSM), 受弯性能, 数值模拟

Numerical Analysis of Flexural Performance of High-Strength Stainless Steel Strand Mesh Reinforced ECC Slabs

Hao Li¹, Yitian Liu¹, Jialing Che², Xuetao Xue³, Ke Li⁴

¹Xi'an Noble Metal Material Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

²School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

³Henan Provincial Academy of Building Research Co., Ltd., Zhengzhou Henan

⁴School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan

Received: Feb. 28th, 2025; accepted: Mar. 20th, 2025; published: Mar. 31st, 2025

文章引用: 李浩, 刘倚天, 车佳玲, 薛学涛, 李可. 高强不锈钢绞线网增强 ECC 板受弯性能数值分析[J]. 土木工程, 2025, 14(3): 543-553. DOI: 10.12677/hjce.2025.143060

Abstract

In order to effectively improve the strength of engineered cementitious composite (ECC) while giving full play to its good crack control and deformation capabilities, this paper uses high-strength stainless steel strand mesh (HSSM) with ultimate tensile strain close to that of ECC and good bond performance to reinforce ECC, and conducts numerical analysis on the flexural performance of HSSM-reinforced ECC slabs. Using the ABAQUS software, a finite element model was established to simulate the nonlinear behavior of ECC under bending, considering the bond-slip interactions between the steel strands and ECC. Additionally, parametric analysis was carried out to investigate the influence of variables such as steel strand reinforcement ratio, slab dimensions, and material properties of ECC on the flexural performance of the slabs. The results indicate that increasing the reinforcement ratio, the cross-sectional height of the slab, the cracking strength and ultimate tensile strength of ECC can significantly enhance the flexural stiffness and load-bearing capacity of the slab, but its ductility is reduced. Increasing the compressive strength of ECC can effectively improve the ductility of the slab, while also slightly enhancing its load-bearing capacity and stiffness.

Keywords

Engineered Cementitious Composites (ECC), High-Strength Steel Strand Mesh (HSSM), Flexural Performance, Numerical Simulation

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

随着土木工程和材料科学的不断进步,对建筑材料的要求也日益提高。传统钢筋混凝土材料在抗弯和抗拉方面存在显著局限性,表现出易开裂和较低的拉伸应变能力,这难以满足现代高性能和高耐久性基础设施的功能需求。为解决这些问题,工程水泥基复合材料(ECC)作为一种高性能纤维增强复合材料应运而生,其在破坏前表现出显著的拉伸应变硬化特性,具有优异的延性、韧性和控裂能力,从而显著提升结构耐久性和变形能力[1][2]。

尽管 ECC 具备诸多优点,但其单独抗拉强度较低,用于土木工程新建结构或结构加固时,难以同时满足某些建筑或桥梁等结构的高承载力和大变形需求。为进一步提高 ECC 的力学性能,研究人员探讨了多种增强方法,其中高强不锈钢绞线网(HSSM)具有高强、耐腐蚀、与 ECC 黏结性能好、与 ECC 的极限拉应变接近等优点,采用 HSSM 增强 ECC,在提高 ECC 受拉强度和充分发挥 ECC 变形能力方面,相比于普通钢筋、FRP 网格,表现出更为显著的效果[3]-[6]。HSSM 增强 ECC 能充分发挥 ECC 的延性和钢筋的高强度特性,是一种具有良好抗弯性能的复合材料[7]-[9]。

目前,尽管试验研究验证了 HSSM 增强 ECC 的优异性能[6][7],但由于试验数量有限,仍缺乏对 HSSM 增强 ECC 受弯性能影响因素的深入系统分析,钢绞线的配筋率、截面几何尺寸、材料性能参数等关键因素的影响尚未充分探明。因此,本文通过有限元分析对 HSSM 增强 ECC 板的抗弯性能进行了深入研究,分析了不同参数(如配筋率、板几何尺寸和材料性能)对其整体性能的影响。为实际应用中 HSSM 增强 ECC 板的设计优化提供指导。

2. 有限元模拟分析

2.1. 材料及其本构模型

利用 ABAQUS 有限元软件对 HSSM 增强 ECC 板的受弯性能进行分析。采用混凝土损伤塑性(CDP)模型[10], 该模型结合了拉压状态下的弹性损伤理论和塑性原理, 用于模拟 ECC 的非线性行为, 其模型参数如表 1 所示。为确保数值分析的准确性, 模型中采用了 ECC 的实际应力 - 应变关系。根据试验数据提供的名义应力和应变值, 利用以下公式 1 将其转化为真实应力和应变。

$$\begin{cases} \sigma_{\text{true}} = \frac{P}{A} = \frac{Pl}{l_0 A_0} = \sigma_{\text{nom}} (1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \\ \varepsilon_{\text{true}} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: P 表示施加在材料上的荷载, A_0 为材料的初始横截面积, l 为材料的当前长度, l_0 表示材料的初始长度。

ECC 的拉伸本构采用双线性模型进行建模, 其表达式见方程(2)。ECC 受压本构基于文献[11]中提出的模型, 其相应表达式见方程(3)。

$$\sigma_{e,t} = \begin{cases} \frac{\sigma_{e,t}}{\varepsilon_{e,tc}} \varepsilon_{e,t} & (\varepsilon_{e,t} \leq \varepsilon_{e,tc}) \\ \left(0.31 \frac{\varepsilon_{e,t}}{\varepsilon_{e,tp}} + 0.69 \right) \sigma_{e,tp} & (\varepsilon_{e,tc} \leq \varepsilon_{e,t} \leq \varepsilon_{e,tp}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_{e,c} = \begin{cases} \left(1.1 \frac{\varepsilon_{e,c}}{\varepsilon_{e,cl}} + 0.5 \left(\frac{\varepsilon_{e,c}}{\varepsilon_{e,cl}} \right)^2 - 0.6 \left(\frac{\varepsilon_{e,c}}{\varepsilon_{e,cl}} \right)^6 \right) \sigma_{e,cp} & \left(0 \leq \frac{\varepsilon_{e,c}}{\varepsilon_{e,cl}} \leq 1 \right) \\ \left(\frac{0.15 \left(\frac{\varepsilon_{e,c}}{\varepsilon_{e,cl}} \right)^2}{1 - 2 \frac{\varepsilon_{e,c}}{\varepsilon_{e,cl}} + 1.15 \left(\frac{\varepsilon_{e,c}}{\varepsilon_{e,cl}} \right)^2} \right) \sigma_{e,cp} & \left(1 \leq \frac{\varepsilon_{e,c}}{\varepsilon_{e,cl}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\sigma_{e,t}$ 、 $\sigma_{e,tc}$ 和 $\sigma_{e,tp}$ 分别表示 ECC 的拉伸应力、开裂应力和极限拉伸应力; 相应地, ε_e 、 $\varepsilon_{e,tc}$ 和 $\varepsilon_{e,tp}$ 分别表示 ECC 的拉伸应变、开裂应变以及对应于极限拉伸应力的应变。此外, $\sigma_{e,cp}$ 表示 ECC 的极限压缩应力, 而 $\varepsilon_{e,cl}$ 表示对应于极限压缩应力的应变。为了实现精确建模, 这些应力均基于试验数据转换为真实应力。

Table 1. ECC plastic parameter

表 1. ECC 塑性参数

膨胀角	偏心率	双轴应力下拉压强度比	塑性势偏心率	粘性参数
30	0.1	1.16	0.6667	0.0005

2.2. 模型建立及参数设计

ECC 板采用 C3D8R 实体单元进行建模, 而高强度绞线则使用 T3D2 桁架单元进行建模。在支撑和加载点处设置了垫块, 并通过绑定界面将其连接至 ECC 板。ECC 与钢绞线之间的粘结 - 滑移行为通过两节

点弹簧单元进行建模，并简化为切向和法向应力。由于粘结 - 滑移主要表现为沿钢绞线长度方向的剪应力，故其法向方向被视为弹性，并施加高刚度以防止滑移。描述钢绞线纵向切向方向粘结 - 滑移行为的 F (荷载)- D (非线性弹簧单元位移) 曲线[8]如图 1(b)和图 1(c)所示。HSSM/ECC 板弯曲试件的尺寸和配筋细节见图 1(a)，试件的设计参数列于表 2 中。

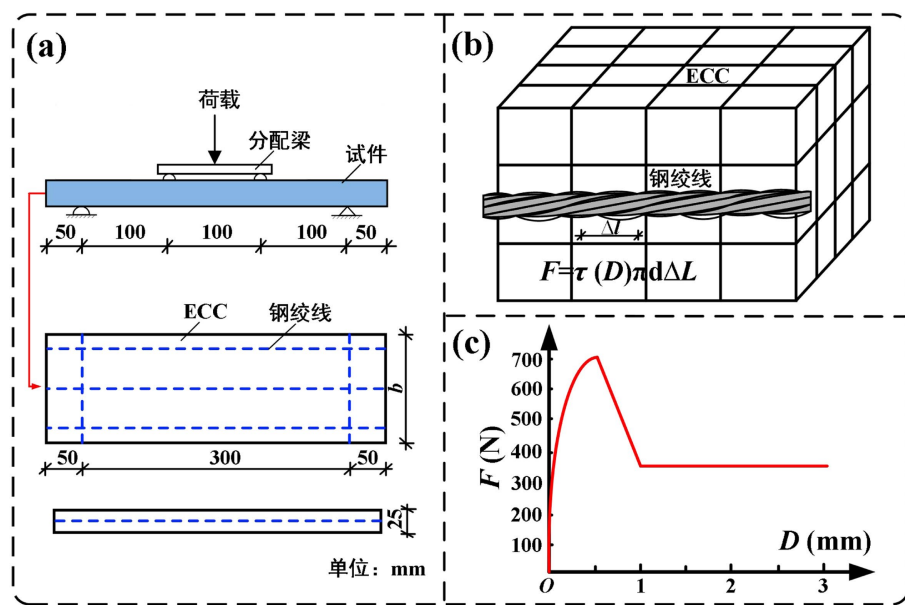


Figure 1. (a) Specimen size; (b) Definition of spring unit F-D; (c) F-D curve
图 1. (a) 试件尺寸; (b) 弹簧单元 F-D 定义; (c) F-D 曲线

Table 2. Specimen design parameters
表 2. 试件设计参数

编号	宽度 b /mm	钢绞线间距/mm	钢绞线直径/mm	钢绞线根数/ n	钢绞线配筋率	ECC 抗压强度
WC12	130	50	2.4	3	0.0026	44.65
WC22	110	40	2.4	3	0.0031	44.65
WC32	90	30	2.4	3	0.0037	44.65
WC42	70	20	2.4	3	0.0048	44.65
WD12	130	50	2.4	3	0.0026	36.05
WD12	110	40	2.4	3	0.0031	36.05
WD12	90	30	2.4	3	0.0037	36.05

2.3. 模型验证

为验证所建立有限元模型的准确性，将数值模拟结果与 HSSM 增强 ECC 板试件的受弯性能试验结果[7]进行了对比。

图 2 展示了各试件的模拟结果与试验荷载 - 跨中位移曲线的对比，可以看出，有限元模拟曲线与试验曲线的整体趋势吻合良好。此外，表 3 列出了单位宽度极限荷载(F/b ，极限荷载 F 与截面宽度 b 比值)及其对应的误差值，可以看出，模拟的极限荷载与试验值保持一致，平均误差为 4.60%。以上对比验证了所建立模型的准确性。

Table 3. Relative ultimate load (ultimate load/plate width) comparison
表 3. 相对极限荷载(极限荷载/截面宽度)对比

编号	极限荷载 F/b (N/mm)		标准差
	试验值	模拟值	
WC12	45.99	45.12	1.89%
WC22	49.45	50.25	-1.61%
WC32	56.46	52.23	7.49%
WC42	58.62	54.01	7.86%
WD12	43.81	44.75	-2.15%
WD22	50.00	45.68	8.64%
WD32	49.79	46.95	5.70%
WD42	52.46	47.74	8.99%
平均标准差		4.60%	

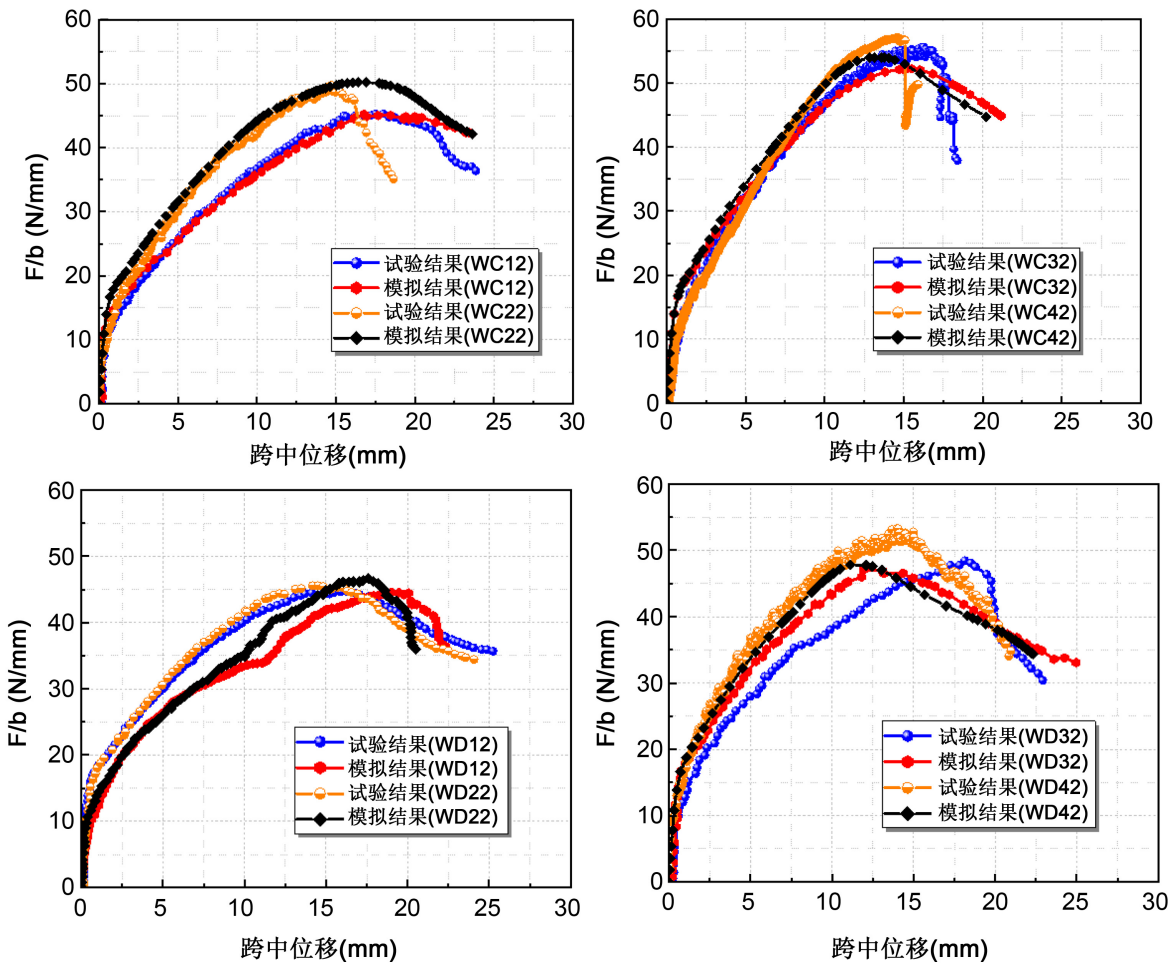


Figure 2. The comparison of load-mid-span displacement curve of the test results and the simulated results
图 2. 试验结果与模拟结果的荷载 - 跨中位移曲线对比

图3展示了试件WC32的有限元模拟过程。模拟结果表明,在达到开裂荷载之前,ECC的应变始终低于开裂应变,板的拉伸区未检测到损伤。当荷载达到0.85 kN时,板底部纯弯区首先出现拉伸损伤,表明开裂开始。随着荷载继续增加但未达到极限荷载时,纯弯区的拉伸损伤开始从拉伸区底部垂直扩展,损伤值不断升高。损伤逐渐集中在板的中心,弯剪区也出现对角损伤并逐步向外延伸。当荷载达到4.70 kN时,板进入极限荷载状态,此时损伤区域不再扩展,损伤值达到最大损伤系数,表明损伤已达到极限。

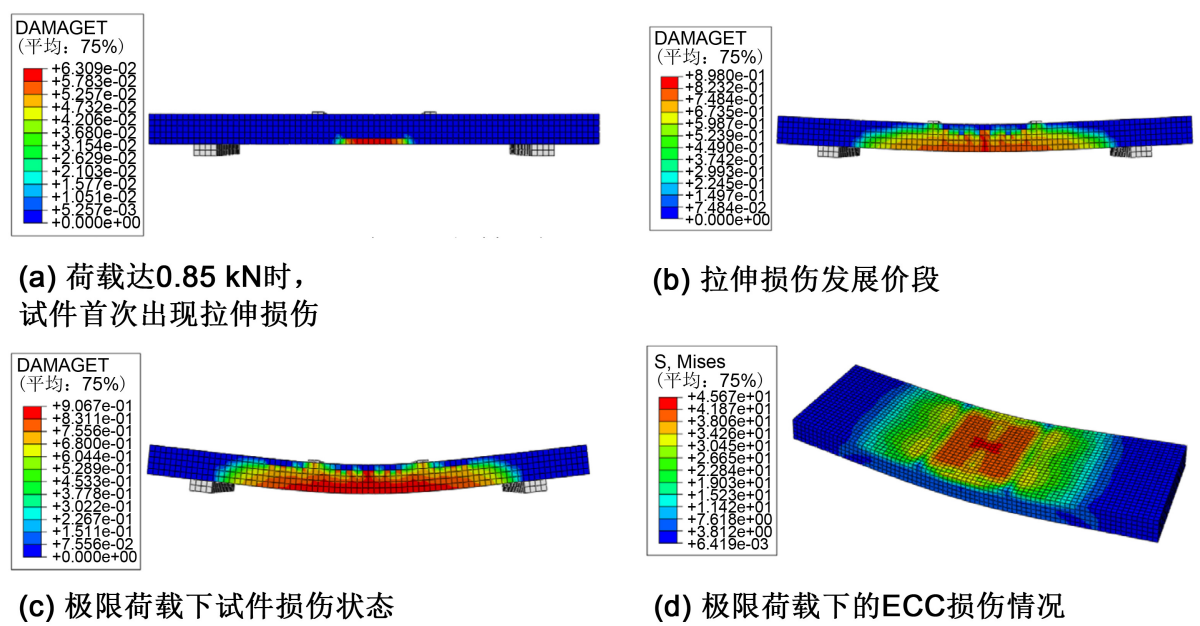


Figure 3. Finite element simulation of specimen WC32
图3. WC32 试件有限元模拟过程

3. HSSM/ECC 板受弯性能参数化分析

3.1. 纵向钢绞线配筋率

基于建立的模型,设计了6组试件研究纵向钢绞线配筋率对板受弯性能的影响。试件的参数详见表4。所有试件的截面高度均为80 mm,ECC立方体的抗压强度为44.65 MPa。

Table 4. Change the sample parameters of steel strand reinforcement ratio
表4. 改变钢绞线配筋率的试件参数

编号	截面尺寸		钢绞线直径 (根数)	配筋率
	宽度 b/mm	高度 h/mm		
A1	45.99	45.12	4.5mm (7)	0.42%
A2	49.45	50.25	4.5mm (7)	0.47%
A3	56.46	52.23	4.5mm (7)	0.52%
A4	58.62	54.01	4.5mm (7)	0.54%
A5	43.81	44.75	4.5mm (7)	0.56%
A6	52.46	47.74	4.5mm (7)	0.57%

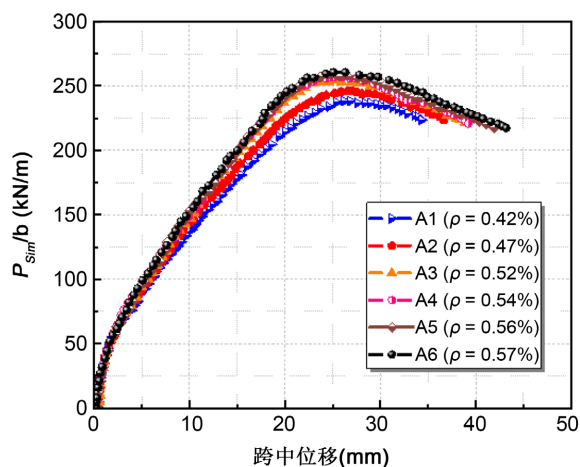


Figure 4. The simulation results of the longitudinal steel strand reinforcement ratio specimen were changed

图 4. 改变纵向钢绞线配筋率试件的模拟结果

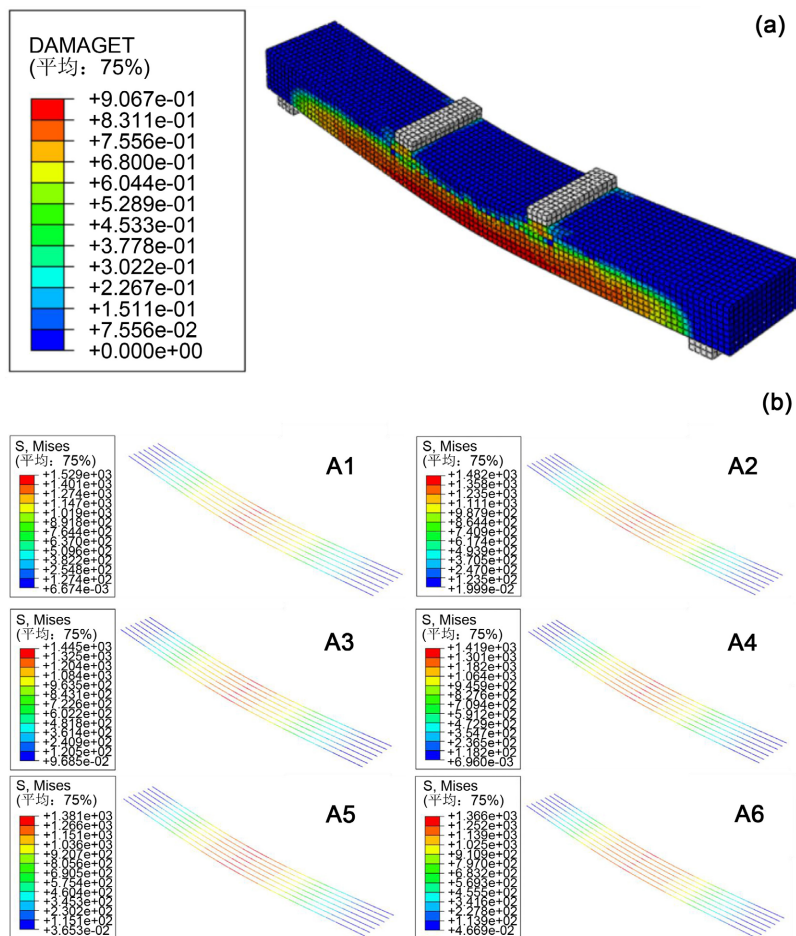


Figure 5. (a) Damage diagram of the specimen when the damage factor in the ECC pressure zone reaches the limit; (b) Stress distribution of longitudinal strand under ECC limit state

图 5. (a) ECC 压区损伤因子达到极限时试件损伤示意图；(b) ECC 极限状态下纵向钢绞线的应力分布

有限元模拟结果如图 4 所示。加载水平以荷载除以宽度(P_{sim}/b)表示。结果表明,随着纵向钢绞线配筋率的增加,板的刚度明显提升,承载能力也随之增加。同时,极限荷载对应的挠度逐渐减小,延性也相应减小。通过增加纵向钢绞线配筋率,相同的弯曲度下,板内受拉区的总拉力增大,导致截面力矩的合力点向下移动以维持平衡,而 ECC 的极限压应变保持不变,从而使极限荷载下的挠度减小。在有限元模拟中,ECC 的极限抗压强度可以通过识别 ECC 压区最大损伤因子达到其极限时确定,如图 5 所示。板的最大配筋率通过评估极限状态下纵向钢绞线的应力状态是否达到名义屈服状态来确认,则根据模拟结果分析,钢绞线的最大配筋率为 0.57%。在 ECC 达到其极限抗压强度时,A 组试件的钢绞线应力状态如图 5 所示。

3.2. 截面几何参数

针对不同几何尺寸的板进行了三种情形下的分析(见表 5): 1) 固定宽度、变化高度, 2) 固定高度、变化宽度, 3) 保持截面面积恒定, 同时调整宽度和高度。钢绞线直径分别为 3.2 mm 和 4.5 mm, 纵向配筋率在最小和最大限度之间控制。ECC 的抗压强度为 44.65 MPa。

数值模拟结果如图 6 所示。结果表明,增加截面高度显著提高了试件的抗弯刚度和承载能力,同时有效控制了极限荷载下的变形,但延性减小。截面高度是影响高强不锈钢绞线网/ECC 板延性的关键因素,而截面宽度的变化对延性影响不大。

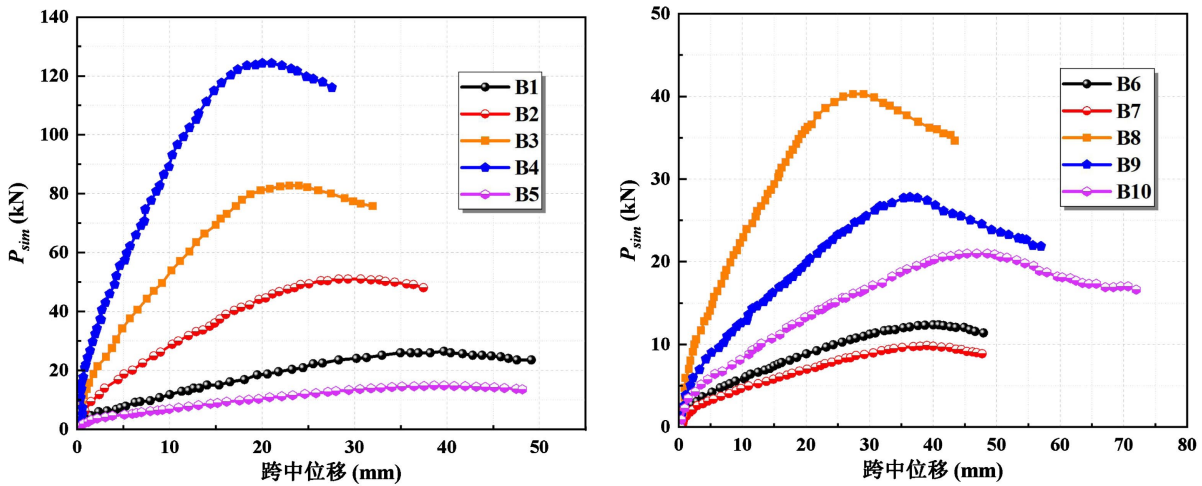


Figure 6. The simulation results of specimen with changed section size
图 6. 改变截面尺寸试件模拟结果

Table 5. Change the section size of the specimen parameters
表 5. 改变截面尺寸的试件参数

编号	截面尺寸		钢绞线直径 (根数)	配筋率
	宽度 b/mm	高度 h/mm		
B1	200	60	4.5 mm (6)	0.48%
B2	200	80	4.5 mm (8)	0.48%
B3	200	100	4.5 mm (10)	0.48%
B4	200	120	4.5 mm (12)	0.48%
B5	80	60	3.2 mm (4)	0.41%

续表

B6	100	60	3.2 mm (5)	0.41%
B7	120	60	3.2 mm (6)	0.41%
B8	150	80	4.5 mm (7)	0.56%
B9	200	60	4.5 mm (7)	0.56%
B10	240	50	4.5 mm (7)	0.56%

3.3. ECC 参数

假设 ECC 的材料性能可以独立变化而不影响其它性能参数，并确保试件在合适的配筋率下，考虑了以下几个因素：1) 拉伸应力指数(ECC 极限拉伸应力和开裂应力之比)固定为 1.5，同时增加 ECC 的开裂强度和极限抗拉强度；2) 保持开裂强度不变，但通过调整拉伸应力指数(方程(4))在 1.3 到 1.6 之间变化极限抗拉强度；3) 修改 ECC 的抗压强度及其他相关参数。试件的截面尺寸统一设定为 120 mm × 100 mm。试件参数列于表 6。

Table 6. Change the design parameters of ECC parameters
表 6. 改变 ECC 参数的试件设计参数

编号	ECC 参数				钢绞线直径 (根数)	配筋率
	开裂强度/MPa	极限强度/MPa	拉伸应变/%	抗压强度/MPa		
C1	2.0	3.0	0.0279	44.65	4.5 mm (5)	0.40%
C2	3.0	4.5	0.0279	44.65	4.5 mm (5)	0.40%
C3	4.0	6.0	0.0279	44.65	4.5 mm (5)	0.40%
C4	2.45	3.18	0.0279	44.65	4.5 mm (5)	0.40%
C5	2.45	3.43	0.0279	44.65	4.5 mm (5)	0.40%
C6	2.45	3.68	0.0279	44.65	4.5 mm (5)	0.40%
C7	2.45	3.92	0.0279	44.65	4.5 mm (5)	0.40%
C8	2.45	3.53	0.0279	35.00	4.5 mm (5)	0.40%
C9	2.45	3.53	0.0279	40.00	4.5 mm (5)	0.40%
C10	2.45	3.53	0.0279	45.00	4.5 mm (5)	0.40%

$$\sigma_{e,tp}/\sigma_{e,tc} \geq 1.3 \tag{4}$$

其中， $\sigma_{e,tp}$ 表示极限抗拉强度， $\sigma_{e,tc}$ 表示材料的开裂强度。

图 7 展示了不同 ECC 参数设置下试件的模拟结果。图中可以看出，增加 ECC 的开裂强度和极限抗拉强度显著提高了板的承载能力。然而，这一提高伴随着在极限荷载下跨中挠度的减小，同时延性也有所下降。当 ECC 的开裂强度保持不变，且抗拉应力指数在 1.3 至 1.6 之间变化时，极限抗拉强度的变化仅对板的承载能力产生轻微影响，变化幅度较小，荷载 - 跨中位移曲线大体重叠。提高 ECC 的抗压强度可明显提高板的延性，同时板的承载能力和刚度也有所提升，但提升幅度较小。

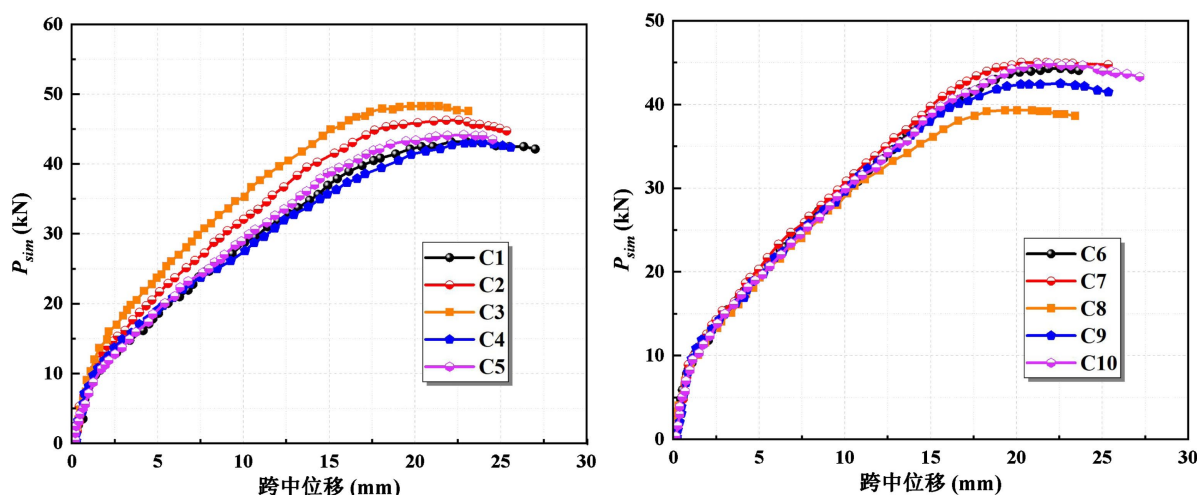


Figure 7. The simulation results of specimens under different ECC parameter settings

图 7. 不同 ECC 参数设置下试件的模拟结果

4. 结论

本研究采用有限元分析模拟了高强不锈钢绞线网增强 ECC 板的抗弯性能, 主要得出以下结论:

1) 随着钢绞线纵向配筋率的增加, 板的抗弯刚度显著提高, 承载力增加, 极限荷载下的挠度减小, 延性也相应减小, 但极限荷载后的荷载 - 挠度下降段延长, 表明板在达到极限荷载后的变形能力得到增强。

2) 板截面高度的增加显著提高了其抗弯刚度和承载力, 并有效控制了极限荷载下的变形, 但延性有所降低, 而截面宽度对板延性影响较小。

3) 提高 ECC 的开裂强度和极限抗拉强度显著提高了高强不锈钢绞线网/ECC 板的承载力和刚度。然而, 这些提高伴随着延性的降低, 极限荷载下的挠度也降低。提高 ECC 的抗压强度时, 可明显提高板的延性, 同时板的刚度和延性都有小幅提升。

参考文献

- [1] 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))
- [2] 徐世烺, 李贺东. 超高韧性水泥基复合材料研究进展及其工程应用[J]. 土木工程学报, 2008(6): 45-60.
- [3] 薛会青, 邓宗才. HRECC 梁弯曲性能的试验研究与理论分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(4): 10-17.
- [4] 徐世烺, 李庆华, 李贺东. 碳纤维编织网增强超高韧性水泥基复合材料弯曲性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007(12): 69-76.
- [5] Li, B., Xiong, H., Jiang, J. and Dou, X. (2019) Tensile Behavior of Basalt Textile Grid Reinforced Engineering Cementitious Composite. *Composites Part B: Engineering*, **156**, 185-200. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.059>
- [6] Wang, X., Yang, G., Qian, W., Li, K. and Zhu, J. (2021) Tensile Behavior of High-Strength Stainless Steel Wire Rope (HSSWR)-Reinforced ECC. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **15**, Article No. 43. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00480-x>
- [7] 王新玲, 陈永杰, 钱文文, 等. 高强不锈钢绞线网增强工程水泥基复合材料弯曲性能试验[J]. 复合材料学报, 2021, 38(4): 1292-1301.
- [8] Zhu, J., Liu, Y., Li, Z., Zou, X., Li, K. and Fan, J. (2023) Bond Behavior between High-Strength Steel Wire Meshes and ECC: Experimental Study and Analytical Modelling. *Engineering Structures*, **287**, Article 116115. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116115>

-
- [9] Wei, Y., Li, K., Xu, C., Wang, L., Fan, J. and Zhu, J. (2024) The Effect of Strain Lag for the Flexural Enhancement of RC Beams Strengthened by HMRE under Secondary Load. *Engineering Structures*, **316**, Article 118612. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118612>
- [10] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 59-67+82.
- [11] 刘伟康. ECC 受压和受拉性能及本构模型研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2018.