

P-ECC-RC组合柱偏心受压力学性能 仿真分析

齐勇强¹, 袁家权², 江维洪², 段文红², 熊力², 黄晓敏³, 许维炳¹

¹北京工业大学城市建设学部, 北京

²大理大南高速公路有限公司, 云南 大理

³昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2024年5月1日; 录用日期: 2024年5月21日; 发布日期: 2024年5月29日

摘要

工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composite, ECC)具有卓越的韧性和抗裂性能, 然而其存在现场浇筑困难、造价高等问题。鉴于此, 本文提出了一种带ECC壳的装配式混凝土组合柱(P-ECC-RC)。首先建立了其数值仿真分析模型, 并通过既有试验验证; 进而开展了参数影响分析, 探究了ECC强度和纵筋配筋率对P-ECC-RC的偏压力学性能的影响。研究表明: 对于组合柱, 峰值荷载随着偏心距的增加而显著降低, 但延性提升; ECC强度增加对组合柱的承载能力有正向影响, 但延性会有所降低; 增加纵向钢筋配筋率可有效增加组合柱的承载能力以及延性。

关键词

ECC, 偏心受压, 有限元模拟

Simulation Analysis of the Mechanical Properties of P-ECC-RC Composite Columns under Eccentric Compression

Yongqiang Qi¹, Jiaquan Yuan², Weihong Jiang², Wenhong Duan², Li Xiong², Xiaomin Huang³, Weibing Xu¹

¹Department of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing

²Dali-Danan Expressway Co., Ltd., Dali Yunnan

³School of Architecture and Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Received: May 1st, 2024; accepted: May 21st, 2024; published: May 29th, 2024

文章引用: 齐勇强, 袁家权, 江维洪, 段文红, 熊力, 黄晓敏, 许维炳. P-ECC-RC 组合柱偏心受压力学性能仿真分析[J]. 土木工程, 2024, 13(5): 710-720. DOI: 10.12677/hjce.2024.135077

Abstract

Engineered Cementitious Composite (ECC) has excellent toughness and crack resistance, but it has problems such as difficulty in on-site casting and high cost. In view of this, this paper proposes a Prefabricated-Engineered Cementitious Composites-Reinforced Concrete (P-ECC-RC). Firstly, a numerical simulation analysis model is established and verified by existing experiments. Then, parameter influence analysis is carried out to explore the influence of ECC strength and longitudinal reinforcement ratio on the bias mechanical properties of P-ECC-RC. The research results show that for composite columns, the peak load significantly decreases with the increase of eccentricity, but the ductility increases. The increase of ECC strength has a positive impact on the bearing capacity of composite columns, but the ductility may decrease. Increasing the longitudinal reinforcement ratio can effectively increase the bearing capacity and ductility of composite columns.

Keywords

ECC, Eccentric Compression, Finite Element Simulation

Copyright © 2024 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

ECC 具有高延性、高韧性和细密裂缝特征等优点[1]。现阶段研究成果表明, 2%的 PVA 纤维(聚乙烯醇纤维)体积掺量下[2], ECC 在拉伸过程中呈现出多缝开裂的应变硬化状态[3], 且其极限应变约为混凝土的两倍[4]。此外, ECC 与钢筋变形协调, 二者之间粘结应力降低, 减少混凝土剥落, 维持混凝土构件的整体性[5]。

然而, ECC 价格约为普通混凝土的 4 倍, 在结构或构件中使用全 ECC 显然是不经济的。因此, 在普通混凝土柱、梁[6]等结构的塑性铰等关键区域使用 ECC 材料是 ECC 推广应用的有效途径。Maalej 等[7]提出, 在受拉区钢筋两侧各一倍保护层厚度范围内使用 ECC 替换混凝土, 试验结果证明, ECC 可以有效地控制构件的裂缝宽度, 提升组合梁的耐久性。Billington 等[8]提出, 将 ECC 应用于无粘结预应力连接预制柱的塑性铰区域, 并通过试验验证了 ECC-混凝土装配式组合柱能够耗散更多的能量。袁方等[9]提出, 在塑性铰区域采用 ECC 替代混凝土来改善 FRP 筋(纤维增强复合材料筋)-钢筋增强混凝土柱的抗震性能, 低周往复试验研究结果表明, 将 ECC 替代塑性铰区域的混凝土可以有效避免 FRP 筋的受压屈曲, 进而提高组合柱的抗震性能。现阶段研究成果表明, 将 ECC 引入塑性铰等区域不仅可以提升普通混凝土构件的力学性能, 同时可以有效发挥 ECC 材料的力学性能并降低其用量, 但 ECC 现场浇筑难度大、现场施工质量不易保证等问题仍严重制约了其在实际工程结构中的推广应用。

鉴于此, 本文提出了一种带 ECC 壳的混凝土装配式组合柱结构(Prefabricated-Engineered Cementitious Composites-Reinforced Concrete, P-ECC-RC), 提出了 P-ECC-RC 组合柱构造形式, 建立了 P-ECC-RC 组合柱的三维仿真分析模型并基于既有试验结果验证; 在此基础上, 开展了偏压荷载作用下 P-ECC-RC 偏压力学性能参数的影响分析, 重点探讨了偏心率、ECC 强度、纵筋直径配筋率等参数对其偏压力学性能的影响, 相关研究成果可为 P-ECC-RC 在实际工程中的应用提供参考。

2. P-ECC-RC 组合柱构造

本文所述的 P-ECC-RC 组合柱构造如图 1 所示。P-ECC-RC 组合柱的主要组成部分有外部钢筋增强 ECC 壳和内部的核心混凝土，其中 ECC 壳和混凝土之间用高强灌浆料连接。通常本文所述的组合柱制作方法为预制加工，主要流程为先绑扎钢筋，然后制作模板并分别浇筑 ECC 壳和核心混凝土，待养护好后将 ECC 壳和核心混凝土组装起来，并在中间浇入超强灌浆料连接两部分构件，形成的组合柱既可以发挥 ECC 的力学性能，也可以提升该型墩柱的经济适用性。

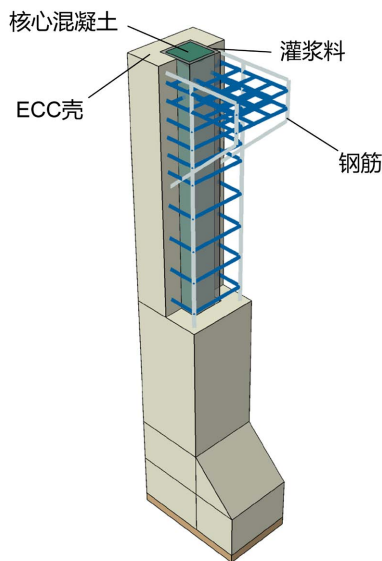


Figure 1. Structure diagram of P-ECC-RC composite column
图 1. P-ECC-RC 组合柱构造图

3. 有限元模型的建立

3.1. 材料本构关系

3.1.1. 钢筋本构关系

钢筋采用的是具有拉伸硬化段的弹塑性双折线模型，如图 2 所示，应力 - 应变关系可表示为：

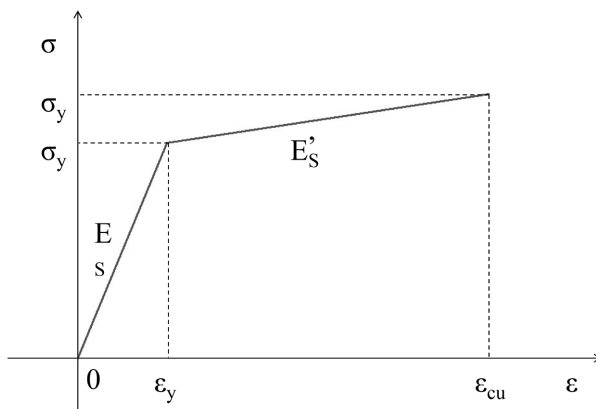


Figure 2. Stress-strain relationship of reinforcement
图 2. 钢筋应力 - 应变关系

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_y & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_y \\ \sigma_y + (\sigma_{cu} - \sigma_y) \frac{\varepsilon - \varepsilon_y}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_y} & \varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

式中, E_s 为钢筋的弹性模量; ε_y 为钢筋的屈服应变; σ_y 为钢筋的屈服强度; ε_{cu} 为钢筋的极限应变; σ_{cu} 为钢筋的极限强度。

3.1.2. 混凝土本构关系

本文采用 ABAQUS 损伤塑性模型来模拟混凝土的受力行为, 混凝土本构模型采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010-2002) [10]提供的混凝土单轴应力 - 应变曲线, 如图 3 所示, 其中混凝土受拉、受压的应力 - 应变曲线示意图绘于同一坐标系中, 但取不同的比例。符号取“受拉为负、受压为正”。

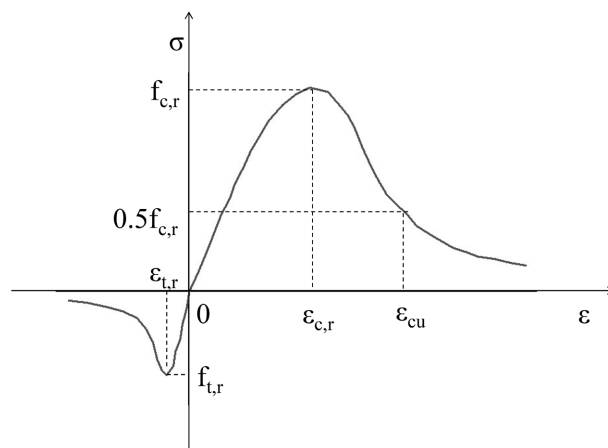


Figure 3. Uniaxial stress-strain curve of concrete
图 3. 混凝土单轴应力 - 应变曲线

规范给出的混凝土单轴受压应力 - 应变曲线表达式如下:

$$\sigma = (1 - d_c) \varepsilon E_c \quad (2)$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{n\rho_c}{n-1+x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r}} \quad (4)$$

$$n = \frac{E_c \varepsilon_{c,r}}{E_c \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}} \quad (5)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}} \quad (6)$$

式中, α_c 为混凝土单轴受压应力 - 应变曲线下降段参数值; $f_{c,r}$ 为混凝土单轴抗压强度代表值; $\varepsilon_{c,r}$ 为混凝土单轴抗压强度代表值对应峰值拉应变; d_c 为混凝土单轴受压损伤演化参数。

规范给出的混凝土单轴受拉应力 - 应变曲线表达式如下:

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon \tag{7}$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t [1.2 - 0.2x^5] & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \tag{8}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}} \tag{9}$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}} \tag{10}$$

式中， α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段参数值； $f_{t,r}$ 为混凝土单轴抗拉强度代表值； $\varepsilon_{t,r}$ 为混凝土单轴抗拉强度代表值； d_t 为混凝土单轴受拉损伤演化参数。

3.1.3. ECC 本构关系

ECC 的拉伸应变能力强于普通混凝土，本文受拉 ECC 本构采用李艳等[11]的双线性模型，如图 4 所示。

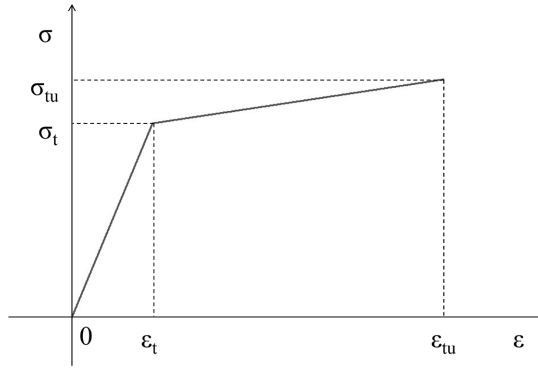


Figure 4. Uniaxial tensile stress-strain curve of ECC

图 4. ECC 单轴受拉应力 - 应变曲线

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E_t \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_t \\ \sigma_t + E_{tu} (\varepsilon - \varepsilon_t) & \varepsilon_t < \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \end{cases} \tag{11}$$

式中， E_t 为初始弹性模量(GPa)， $E_t = \sigma_t / \varepsilon_t$ ； σ_t 为名义初裂强度(MPa)； ε_t 为名义初裂应变； E_{tu} 为应变-硬化阶段弹性模量(GPa)， $E_{tu} = (f_{tu} - \sigma_{tu}) / (\varepsilon_{tu} - \varepsilon_t)$ ； f_{tu} 为极限抗拉强度(MPa)； ε_{tu} 为极限拉应变。

ECC 的单轴受压应力应变全曲线与普通混凝土类似，但在相同压应力下，ECC 的压应变大于普通混凝土材料的压应变。本文采用 Yuan 等[12]提出的单轴压缩荷载下 ECC 材料的本构模型，如图 5 所示，本构关系如下：

$$\sigma_{ec}(\varepsilon_c) = \begin{cases} \varepsilon_c \frac{2\sigma_{ec0}}{\varepsilon_{ec0}} & \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ec0}/3 \\ \frac{2\sigma_{ec0}}{3} + \left(\sigma_{ec0} - \frac{2\sigma_{ec0}}{3} \right) \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{ec0}/3}{\varepsilon_{ec0} - \varepsilon_{ec0}/3} & \varepsilon_{ec0}/3 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ec0} \\ \sigma_{ec0} + \left(\frac{\sigma_{ec0}}{2} - \sigma_{ec0} \right) \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{ec0}}{1.5\varepsilon_{ec0} - \varepsilon_{ec0}} & \varepsilon_{ec0} < \varepsilon_c \leq 1.5\varepsilon_{ec0} \\ \frac{\sigma_{ec0}}{2} - \frac{\sigma_{ec0}}{2} \frac{\varepsilon_c - 1.5\varepsilon_{ec0}}{\varepsilon_{ec0}^* - 1.5\varepsilon_{ec0}} & 1.5\varepsilon_{ec0} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ec0}^* \end{cases} \tag{12}$$

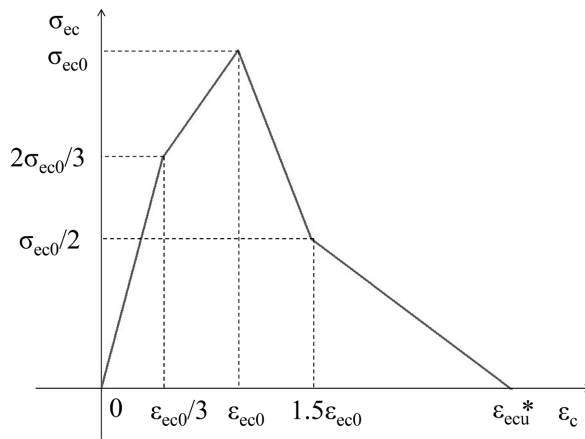


Figure 5. Uniaxial compression stress-strain curve of ECC
图 5. ECC 单轴受压应力 - 应变曲线

3.2. 基准模型参数

P-ECC-RC 组合柱基准模型布置图如图 6 所示。柱高度为 1500 mm，试件截面宽度为 225 mm × 225 mm。其中，核心为 C40 混凝土，尺寸截面尺寸为 85 mm × 85 mm，ECC 壳与核心混凝土直接设 10 mm 的高强灌浆料层，ECC 壳厚度为 60 mm。纵筋采用 HRB400 级，箍筋采用 HPB300 级。

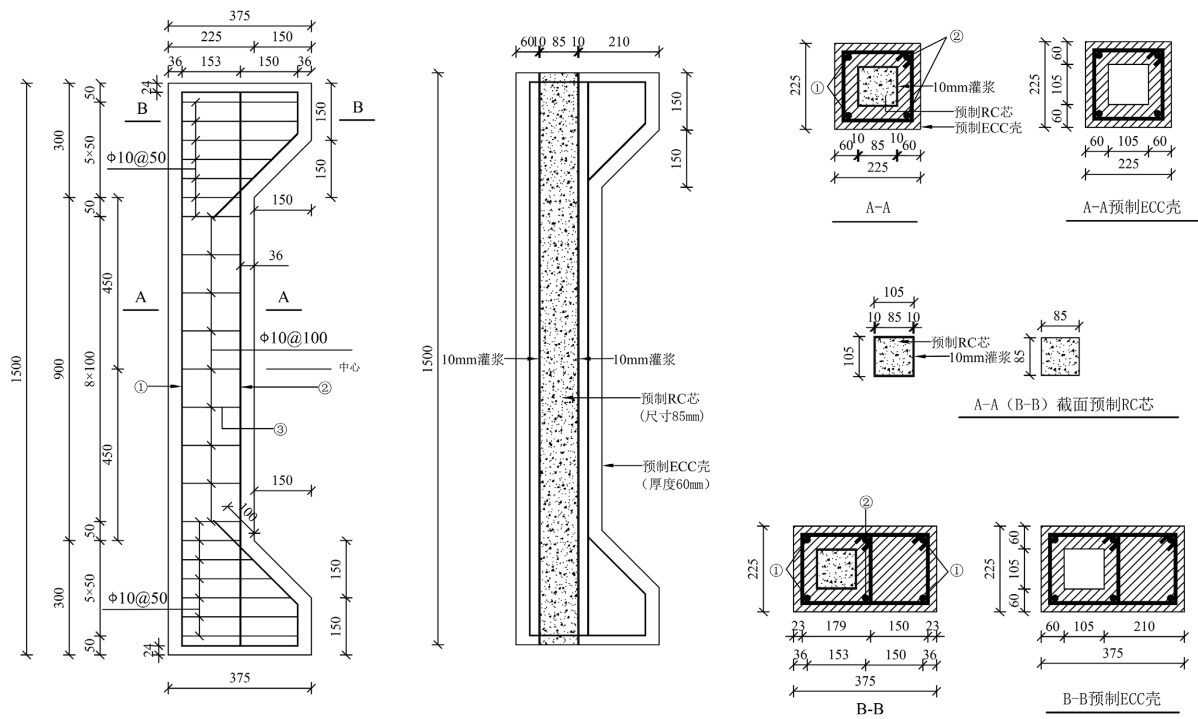


Figure 6. Overall layout of composite column
图 6. 组合柱整体布置图

3.3. 网格划分与材料相互作用

利用 ABAQUS 建立有限元计算分析模型，其中普通混凝土、ECC 壳、垫板和刀铰口分别采用八节

点实体单元(C3D8R)，钢筋采用两节点桁架单元(T3D2)。有限元模型网格划分尺寸如下：核心混凝土、灌浆料和 ECC 壳尺寸均为 30 mm；钢筋网格尺寸均为 30 mm；钢板尺寸均为 40 mm。图 7 为组合柱参考点设置和网格划分。

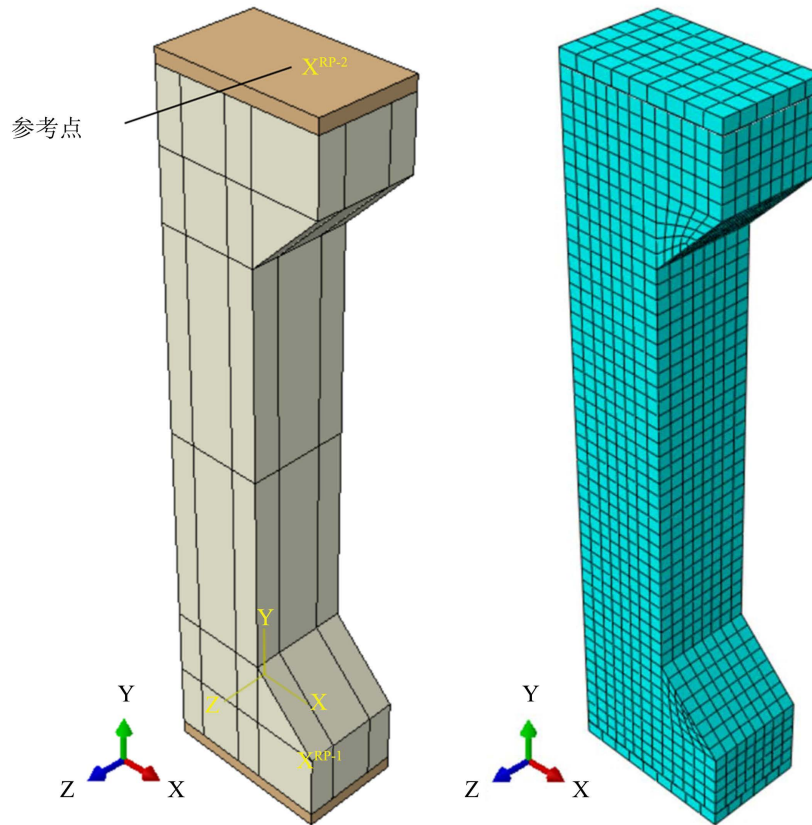


Figure 7. Composite column finite element model

图 7. 组合柱有限元模型

钢筋骨架采用“内置(Embedded)”的方法嵌入到 ECC 壳中共同工作，不考虑彼此间粘结滑移。考虑到高强灌浆料与 ECC 和普通混凝土 RC 之间均有良好的粘结性能，组合柱内部三种材料之间采用 Tie 约束方式。为了防止混凝土柱加载端和约束端产生局部效应，在柱两端头分别设置了刚性垫板，并与试验柱通过“绑定(Tie)”形成整体。在有限元模型的上端部创建参考点，并与柱顶面建立耦合约束，在耦合点处向下施加位移荷载，根据试验加载方式确定其边界条件及位移值。

4. 有限元计算结果与验证

4.1. 模型合理性验证

为验证本文建模参数和方法的正确性，参考课题组对 P-ECC-RC 组合柱偏心受压试验研究，分别取偏心距为 50 mm 和 125 mm 的小偏心和大偏心受压试验，将试验测得曲线与本文有限元模拟曲线进行对比，对比结果如图 8 所示。由图 8 可知，P-ECC-RC 组合柱偏心受压性能的试验值与模拟值吻合较好，两者变化趋势相同，验证了有限元模型的有效性。需要指出的是，由于试验过程中难以保证施加荷载时加载面与试件均匀接触，达到模拟时理想的边界条件，且模拟的材料本构关系不能完全准确地描述各材料在加载过程中的力学特性。

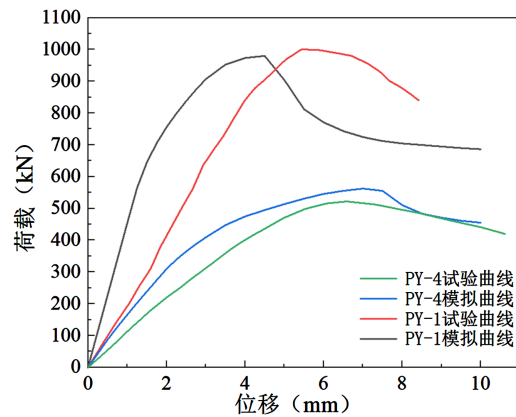


Figure 8. Model validation diagram
图 8. 模型验证图

4.2. 荷载 - 位移曲线

为研究 P-ECC-RC 组合柱大小偏心受压力学性能破坏模式, 对本文所述基准模型进行偏心受压有限元分析, 设偏心距为 50 mm 和 75 mm (小偏心受压)、100 mm 和 125 mm (大偏心受压), 得到其荷载位移曲线如图 9 所示, 从图中可以看出, 随着偏心率的增大, 构件的极限荷载下降幅度十分明显, 由偏心距为 50 mm 的 832.91 kN 分别下降了 19.23% (75 mm)、30.88% (100 mm)、42.61% (125 mm), 构件的极限位移也随之减小, 由 5.39 mm (50 mm) 下降了 23.93% (75 mm)、28.94% (100 mm)、61.78% (125 mm), 说明随着偏心率的增大, 构件的极限承载力产生了明显下降。究其原因, 是因为较大的偏心率会引入更大的弯矩, 因此偏心率增加时组合柱截面上会产生更大的弯曲应力, 这会导致在组合柱截面的受压区域和受拉区域之间产生较大的应变差异, 从而降低了柱的极限承载力。

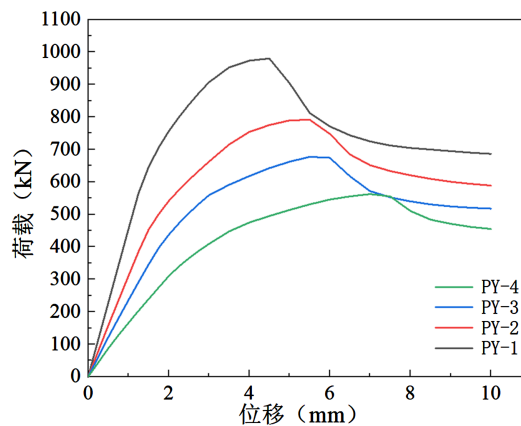


Figure 9. Model load-displacement curve
图 9. 模型荷载 - 位移曲线

4.3. ECC 损伤图

如图 10(a)所示为试件 PY-1 的受压损伤、受拉损伤图, 由图可以看出试件 PY-1 的受压区损伤区域明显大于受拉区的损伤区域, 且受压区的最大损伤因子大于受拉区, 说明试件发生了小偏心破坏; 图 10(b)为试件 PY-4 的受压损伤、受拉损伤图, 由图可以发现试件 PY-4 的受压区域损伤范围显著大于受拉区域, 同时受拉区的最大损伤因子超过了受压区, 表明试件发生了大偏心破坏。

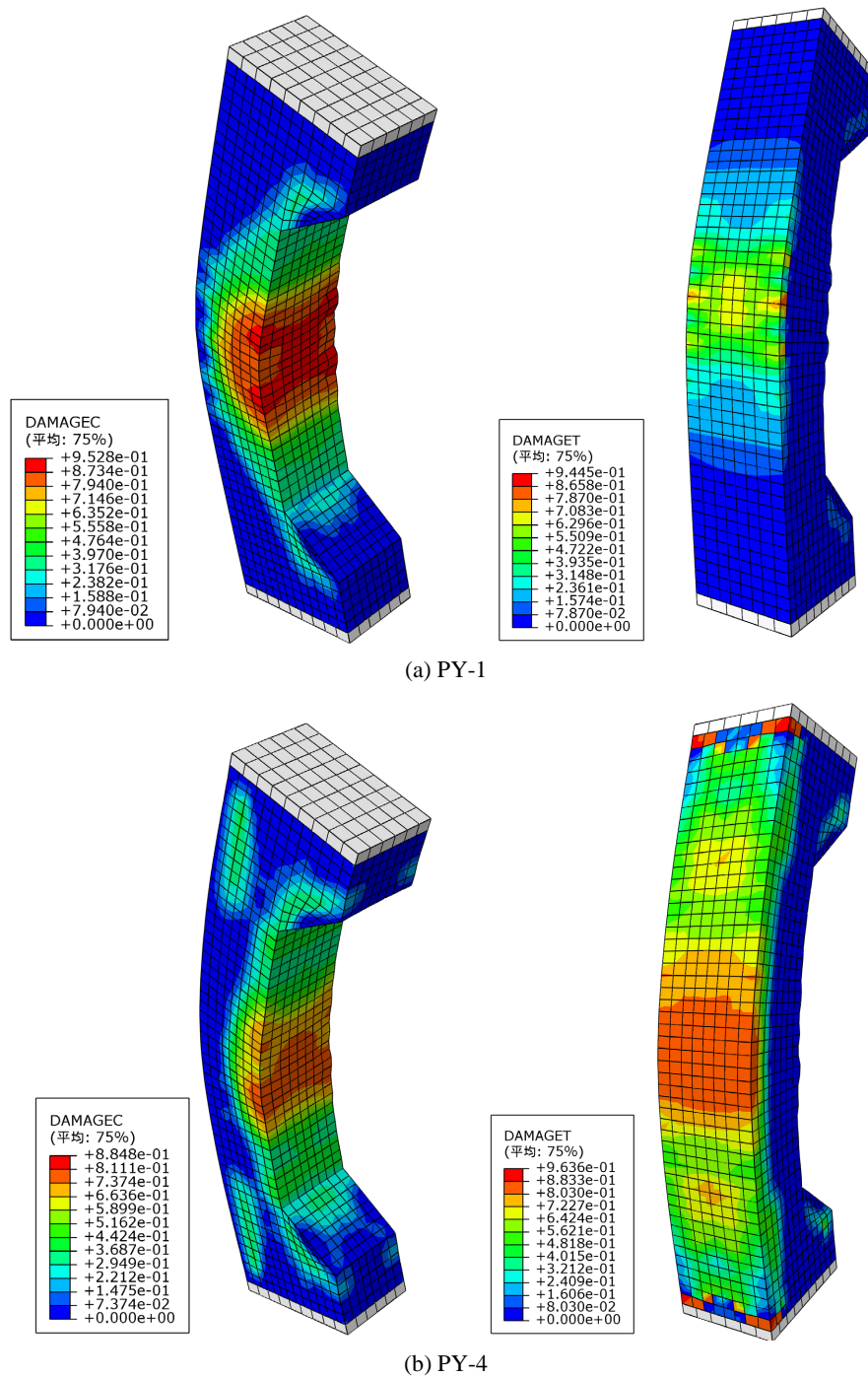


Figure 10. Specimen damage diagram
图 10. 试件破坏损伤图

5. 参数影响分析

5.1. 分析工况设计

为进一步探究组合柱偏心受压力学性能的影响因素，本文设计了 6 个偏压组合柱模型(见表 1)，试件参数主要包括 ECC 强度和纵筋配筋率。组合柱均为 ECC 外壳，核心混凝土柱，柱高 1500 mm。

Table 1. Parameter analysis condition
表 1. 参数分析工况

试件编号	偏心距/mm	混凝土强度	ECC 强度	纵筋强度	纵筋配筋率
PY-4	125	C40	40	HRB400	1.59%
PY-4-E30	125	C40	30	HRB400	1.59%
PY-4-E45	125	C40	45	HRB400	1.59%
PY-4-d14	125	C40	40	HRB400	1.22%
PY-4-d18	125	C40	40	HRB400	2.01%
PY-4-d20	125	C40	40	HRB400	2.48%

5.2. ECC 强度

不同 ECC 抗压强度试件的荷载 - 位移曲线如图 11(a)所示。由曲线可知, 不同 ECC 抗压强度的试件曲线形式基本相似, 各试件的峰值荷载随 ECC 抗压强度的增大而增大, 相对于 ECC 抗压强度为 30 MPa 的试件, 分别增加了 6.85% (40 MPa)和 16.07% (45 MPa), 说明增加 ECC 抗压强度可以在一定程度上提高装配式 ECC-RC 组合柱的偏心受压承载能力, 这主要是因为在大偏心荷载作用下, 组合柱的破坏模式为受拉区破坏, 提高 ECC 抗压强度对于大偏心破坏模式的组合柱效果有限。

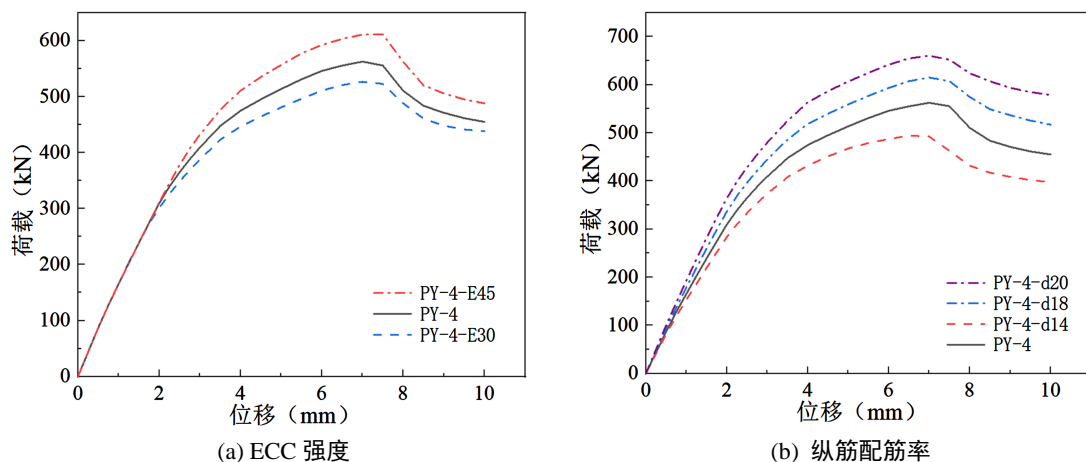


Figure 11. Load displacement curves of P-ECC-RC composite columns of different forms
图 11. 不同形式 P-ECC-RC 组合柱荷载 - 位移曲线图

5.3. 纵筋配筋率

纵筋配筋率组试件的荷载 - 位移曲线如图 11(b)所示, 随着纵筋配筋率的增大, 各试件峰值荷载逐渐增加。与纵筋配筋率(1.22%)相比, 各试件的峰值荷载分别增加 13.83% (1.59%)、24.45% (2.01%)、33.64% (2.48%); 达到峰值荷载之后, 所有试件均有不同幅度的下降, 且试件的下降段较为平缓, 反映出加载后期试件仍具有较好的延性。这是由于钢筋具有各向同性, 因此无论承受拉应力或压应力, 均表现出较高的强度及延性, 增加纵筋配筋率相当于提高了组合柱的刚度及强度。

6. 结论

本文采用数值仿真的方法对 P-ECC-RC 混凝土组合柱在偏心受压荷载下的力学性能进行了研究, 并

通过参数分析对比了组合柱极限荷载等相关性能。主要结论如下:

1) P-ECC-RC 混凝土组合偏压柱有限元计算结果与试验结果较为接近, 柱中峰值荷载及侧向位移、各部件的应力与试验值符合较好, 验证了采用 ABAQUS 有限元模型能对 P-ECC-RC 混凝土组合柱偏心受压极限荷载等力学性能作出准确的预测。

2) 对于装配式 P-ECC-RC 组合柱而言, 随着偏心率的增大, 其构件的极限承载力逐渐下降, 且变化较为明显, 且无论是大偏心还是小偏心, 组合柱均展现出良好的延性。

3) ECC 强度增加对组合柱的承载能力有正向影响, 但组合柱的延性会随着 ECC 强度的增加而降低; 增加纵向钢筋配筋率可有效增加组合柱的整体强度以及延性。

参考文献

- [1] 康迎杰, 郭自利, 叶斌斌. ECC 全包裹普通混凝土复合试件的力学性能[J]. 材料导报, 2024, 38(3): 108-113.
- [2] 何渐渐, 郑学成, 林社勇. 粉煤灰混凝土强度统计特性的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(S1): 59-65.
- [3] Bennett, J.A. and Young, R.J. (1998) The Effect of Fibre-Matrix Adhesion upon Crack Bridging in Fibre Reinforced Composites. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, **29**, 1071-1081. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00045-1)
- [4] Chung, K.L., Ghannam, M. and Zhang, C. (2018) Effect of Specimen Shapes on Compressive Strength of Engineered Cementitious Composites (ECCs) with Different Values of Water-to-Binder Ratio and PVA Fiber. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **43**, 1825-1837. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2776-8>
- [5] Victor C. Li. 高性能多功能水泥基复合材料[J]. 工程(英文), 2019, 5(2): 250-260+279-290.
- [6] 陈全胜, 侯圣均, 蒋晨晨. 钢-混凝土-ECC 组合梁受弯性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报. 2022, 43(S1): 136-146.
- [7] Maalej, M., Hashida, T. and Li, V.C. (1995) Effect of Fiber Volume Fraction on the Off-Crack-Plane Fracture Energy in Strain-Hardening Engineered Cementitious Composites. *Journal of the American Ceramic Society*, **78**, 3369-3375. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1995.tb07979.x>
- [8] Billington, S.L. and Yoon, J.K. (2004) Cyclic Response of Unbonded Posttensioned Precast Columns with Ductile Fiber-Reinforced Concrete. *Journal of Bridge Engineering*, **9**, 353-363. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2004\)9:4\(353\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2004)9:4(353))
- [9] 袁方, 赵修远. FRP 筋-钢筋增强 ECC-混凝土组合柱抗震性能研究[J]. 工程力学, 2021, 38(8): 55-65+144.
- [10] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范(GB 50010-2002) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [11] 李艳, 温丛格. 工程纤维增强水泥基复合材料 PVA-ECC 单轴受拉性能研究[J]. 混凝土. 2015(9): 31-35.
- [12] Yuan, F., Pan, J.L. and Wu, Y.F. (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>