

ECC-RC组合柱轴压性能研究

李佳敏¹, 袁家权², 江维洪², 段文红², 熊力², 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

收稿日期: 2024年5月30日; 录用日期: 2024年6月19日; 发布日期: 2024年6月27日

摘要

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, 然而, ECC材料现场施工难度大、质量难以保证、且工程应用成本较高, 使得其应用推广受限。有鉴于此, 本文提出了一种ECC-RC (Engineered Cementitious Composites-Reinforced Concrete, ECC-RC)组合柱, 基于ABAQUS平台通过数值仿真分析的方法, 探究了ECC强度、箍筋间距、箍筋直径对ECC-RC组合柱轴压力学性能的影响规律。结果表明, ECC强度越大, ECC-RC组合柱的峰值承载能力越好, 但延性越差; 减小箍筋间距, 组合柱的峰值承载力、延性提高幅度较大, 试件的轴压力学性能较好; 增大箍筋直径时, 试件的峰值承载力、延性均可得到一定程度的提高。

关键词

ECC, 组合柱, 轴压, 数值模拟

Study on the Axial Compressive Properties of the ECC-RC Composite Column

Jiamin Li¹, Jiaquan Yuan², Weihong Jiang², Wenhong Duan², Li Xiong², Weibing Xu¹

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

²Dali Danan Highway Company Limited, Dali Yunnan

Received: May 30th, 2024; accepted: Jun. 19th, 2024; published: Jun. 27th, 2024

Abstract

Engineered cementitious composites (ECC) have the characteristics of high ductility, strong energy consumption ability, and excellent crack control ability. However, the on-site construction difficulty, quality assurance, and high engineering application cost of ECC materials limit their application and promotion. In view of this, this article proposes an ECC-RC (Engineered Cementi-

tious Composites-Reinforced Concrete, ECC-RC) composite column, and explores the effects of ECC strength, stirrup spacing and stirrup diameter on the axial compressive properties of the ECC-RC composite column based on the method of numerical simulation analysis on the ABAQUS platform. The results show that the higher the ECC strength, the better the peak bearing capacity of the ECC-RC composite column, but the worse the ductility; reducing the spacing between stirrups results in a significant increase in the peak bearing capacity and ductility of the composite column, and the axial compressive mechanical properties of the specimens are good; when the diameter of the hoop reinforcement is increased, the peak bearing capacity and ductility of the specimen can be improved to a certain extent.

Keywords

ECC, Composite Column, Axial Compression, Numerical 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

工程水泥基复合材料(Engineered Cementitious Composites, ECC)以其多微缝开裂、应变硬化等较为优异的力学性能,受到国内外学者的广泛关注[1] [2] [3],并被广泛应用到各类构件中。

现阶段 ECC-RC 组合构件的静力性能[4] [5]、抗震性能[6]等研究成果丰富。比较典型的有,单奇峰[7]等人将 RC 柱底部分混凝土替换成 ECC 材料,研究构件压弯性能,结果表明增大 ECC 层高度、箍筋体积配箍率, ECC/RC 组合柱的承载能力、延性、耗能能力均随之提高。褚颜贵[8]等人设计了箍筋约束 ECC 方形柱的轴压试验,并改变 ECC 强度、箍筋间距、箍筋形式等参变量,结果表明箍筋约束对构件的变形性能的影响大于改变 ECC 强度产生的影响。Ali A. M. [9]等在梁柱节点区域用 ECC 代替混凝土,并且不配置箍筋,结果表明 ECC 节点的延性、承载力等均优于对照件。需要指出的是 ECC 材料价格昂贵且由于掺入纤维,现场浇筑构件质量难以保证,制约了其在工程中的推广应用。

为降低 ECC 材料的现场应用限制, Xu [10]等人提出将 ECC 应用于预制柱的塑性铰区,通过试验得出预制的组合柱比预制 RC 柱和现浇 RC 柱耗能能力更强、抗损伤能力更好。Pan [11]等人设计了一种预制的型钢增强 ECC 永久模版,与普通 RC 柱对比构件具备更好地抗剪、抗震性能和更高的延性。顾雯[12]设计了 ECC 增强装配式剪力墙结构低周往复加载试验,结果表明 ECC 应用于高强混凝土结构中,组合结构的承载力、延性和抗震性能得到有效提高。利用预制 ECC 改善 RC 构件的力学性能成为现阶段研究的热点之一[13]。

鉴于此,本文提出了一种 ECC-RC 组合柱(Engineered Cementitious Composites-Reinforced Concrete, ECC-RC),并基于 ABAQUS 平台建立其数值仿真模型,进而探究了 ECC 强度、箍筋间距、箍筋直径对 ECC-RC 组合柱轴压力学性能的影响规律。

2. 材料本构模型

2.1. ECC、灌浆料、RC

(1) 核心约束区

ECC-RC 组合柱核心约束区包括 RC、ECC、灌浆料,三种材料的应力-应变关系曲线的上升段采用

过镇海[14]约束混凝土本构模型, 下降段采用钱稼茹[15]提出的本构模型, 本构模型为:

$$y = \begin{cases} \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3, 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x}{(1 - 0.87\lambda_v^{0.2})T(x-1)^2 + x}, x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\alpha_a = (1 + 1.8\lambda_v)a$ 为本构模型的上升段参数; $T = 0.132f_{c0}^{0.785} - 0.905$ 为本构模型的下降段参数。

(2) RC 保护层

保护层材料的本构模型上升段、下降段均采用过镇海无约束混凝土本构模型:

$$y = \begin{cases} ax + (3 - 2a)x^2 + (a - 2)x^3, 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x}, x > 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\alpha_d = 0.157f_{c0}^{0.785} - 0.905$ 。

2.2. ECC 保护层

现浇 ECC 试件、ECC-RC 组合柱的保护层采用无约束本构模型, 受拉本构模型采用三线性模型, 受压本构模型采用袁方[16]等提出本构模型, 见式(3), 应力 - 应变关系中相关参数见表 1。

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

Table 1. ECC constitutive relationship model parameters

表 1. ECC 本构关系模型参数

$E_{t0}/10^{-5}$	σ_{t0}/MPa	σ_{t0}/MPa	$\varepsilon_{tu}/10^{-3}$	$\varepsilon_{ec0}/10^{-3}$	$\varepsilon_{ecu}^*/10^{-3}$
21	2.0	3.1	20	4	12

2.3. 钢筋

钢筋本构模型采用弹塑性双折线模型, 其应力 - 应变关系表达式为:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y + E'_s (\varepsilon_s - \varepsilon_y), \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{s,u} \end{cases} \quad (4)$$

其中, E_s 为钢筋硬化段斜率, E_s 为钢筋的弹性模量, f_y 为钢筋的屈服强度, ε_y 为相应于 f_y 钢筋的屈服应变。

3. 数值模型建立及验证

3.1. ECC-RC 构造

本文 ECC-RC 组合柱的数值模型三维示意图如图 1 所示, 主要包括三部分, 组合柱由外到内分别为,

外围预制钢筋增强 ECC 壳、灌浆料和普通混凝土。灌浆料与 ECC 和普通混凝土 RC 之间均具有良好的粘结性能[17] [18]，由此建模时三种材料之间的约束方式采用 Tie，钢筋笼采用 Embedded 的方式嵌入整个模型。

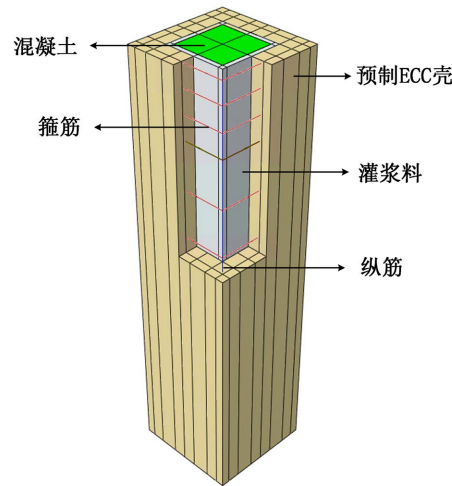


Figure 1. ECC-RC construction diagram
图 1. ECC-RC 构造示意图

3.2. 相互作用、边界条件及加载方式

为了最大程度还原轴压试验环境，在组合柱顶及柱底设置钢垫板，与柱顶、柱底的相互作用方式采用 Tie 约束；在柱顶、柱底的两块钢垫板加载面上分别设置参考点 RP-1、RP-2，参考点与加载面相互作用方式选择 Coupling 约束，使得施加荷载时，柱顶部加载面在六个自由度方向上能与参考点共同运动。设置边界条件时，底部参考点 RP-2 的边界条件为完全固接，对于柱顶部，约束参考点 RP-1 的 xz 两个方向的位移和 URY 方向的转角位移，并沿 y 方向(试件轴向)施加 12 mm 的竖向位移来模拟轴向加载。

3.3. 数值模型验证

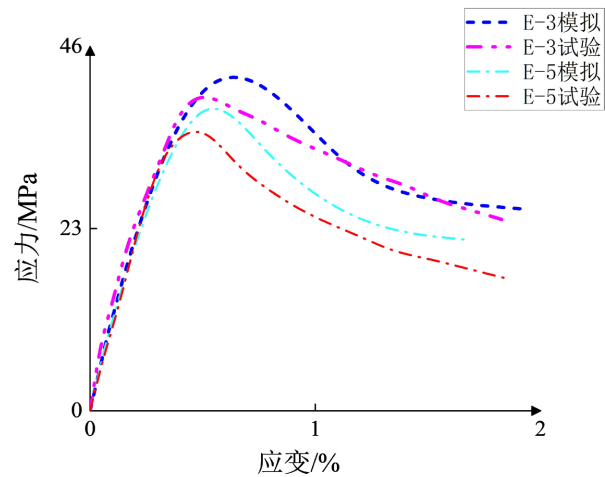


Figure 2. Literature [19] simulation verification
图 2. 文献[19]模拟验证

表中, f_c : 混凝土强度, f_E : ECC 材料的强度, f_G : 灌浆料材料的强度, t_u : ECC 壳的厚度, t_G : 灌浆料的厚度, t_R : 混凝土的厚度, s : 箍筋间距, d_s : 箍筋的直径, h : 组合柱高度。

4.2. 破坏模式

通过数值仿真分析, 可得到 ECC-RC 组合柱的破坏模式图, 如图 4 所示, 轴压作用下核心区、ECC 壳的破坏状态呈现中间鼓曲的破坏模式, 纵筋屈曲; 构件沿试件高度方向中部位置损伤最多。

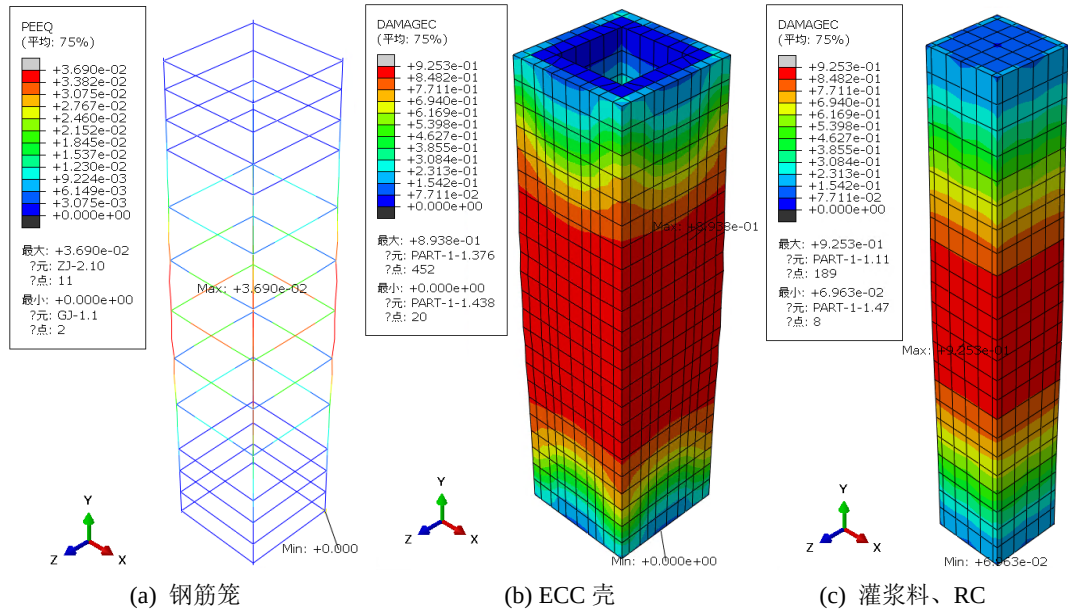


Figure 4. ECC-RC composite column failure mode diagram

图 4. ECC-RC 组合柱破坏模式图

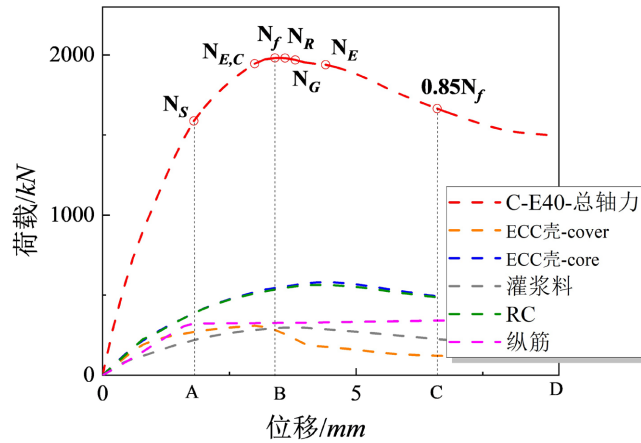


Figure 5. The full load-displacement curve of each part of the specimen C-E40

图 5. 试件 C-E40 各部分荷载 - 位移全曲线

图 5 给出了 ECC-RC 组合柱各部分材料的荷载 - 位移全曲线, 由曲线可知, 试件破坏分为三个过程: 即 OA 段为弹性阶段, AB 段为屈服阶段, BC 段为下降段, CD 段为破坏段。纵筋屈服时, ECC 保护层尚未剥落, 且当试件达到峰值承载力 N_f 时, 核心区各材料尚未达到其峰值荷载, 随后, RC、灌浆料先达到峰值荷载 N_R 、 N_G , ECC 后达到峰值荷载 N_E ; 试件的承载力由于纵筋先屈服、ECC 保护层先达到峰值

荷载 N_s 、 N_{EC} ，而使得试件先于核心区各材料达到峰值承载力。核心区三种材料先后达到峰值承载力，三者对组合柱的峰值承载力贡献率存在相位差，从而使得组合柱获得更优异的承载力、变形能力和延性。

由试件荷载 - 位移关系曲线计算得到的各试件轴压力力学性能指标如表 3 所示。表 3 中延性系数的计算方法有 R.Park 法、等能量法、作图法、最远点法；本文采用等能量法[21]，如图 6 所示，该方法通过数值积分来计算，采用曲线包络面积相等的理念：过曲线峰值点 D 做一条直线，令曲线 $0.75 F_U$ 处为 C 点，连接 OC 并延长与直线 BD 交于 B 点，做出一条二折线 OBD，代替原有曲线，二折线拐点 B 对应的广义位移为屈服点对应的位移[22]。

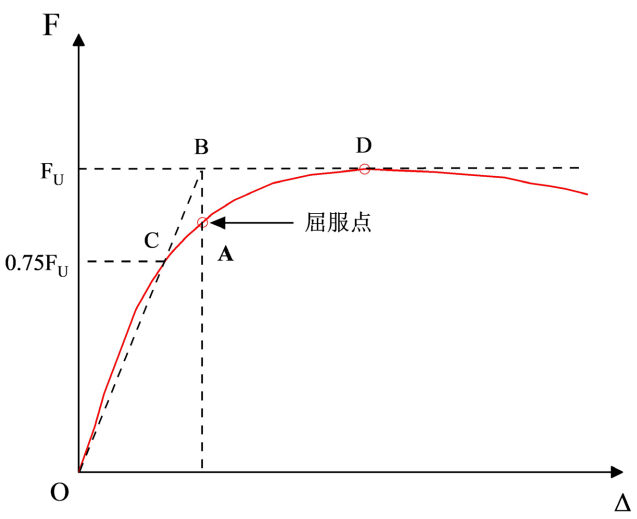


Figure 6. Isoenergetic method
图 6. 等能量法

4.3. 参数影响分析

4.3.1. ECC 强度

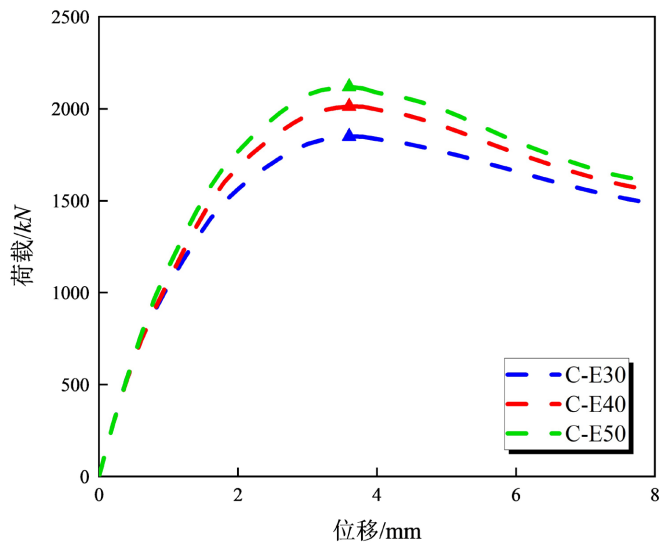


Figure 7. ECC strength
图 7. ECC 强度

通过后处理输出试件的荷载 - 位移曲线, 对比曲线上特殊点值, 从而分析改变 ECC 强度对试件轴压力学性能的影响规律。由图 7 和表 3 可知, 当改变 ECC 材料的强度时, 试件峰值荷载随强度的提高而增大, 依次提高 8.8%、5.1%; 随 ECC 强度越高, 试件的峰后延性越差, 降低幅度依次为 11.5%、3%, 这是由于提高 ECC 材料的强度, 轴压作用下材料的横向变形越小, 从而使得箍筋产生被动约束的作用延缓, 且试件 C-2-E30 的延性系数相对于 C-2-E40 的延性系数大得多。改变 ECC 强度对组合柱的初始刚度无影响, 但组合柱的极限位移逐渐略有减小, 减小幅度依次为 7.2%、3.3%。因此, 实际应用时, ECC 强度宜合理选择。

4.3.2. 箍筋间距

通过后处理输出试件的荷载 - 位移曲线, 对比曲线上的特殊点值, 从而分析改变组合柱内箍筋间距对试件轴压力学性能的影响规律, 由图 8 和表 3 可知, 改变箍筋间距, 对试件的轴压性能影响较大。其中试件的初始刚度增大较少, 在 0.2% 以内; 试件 C-s150、C-E40、C-s50 的峰值荷载增大幅度较大, 依次提高 8%、28%; 试件 C-s150、C-E40、C-s50 的塑性变形能力有所增大, 增大幅度依次为 9%、28%, 这是因为减小箍筋间距, 箍筋间有效约束的面积增大, 即箍筋对核心区的约束效果增大, 因此试件到达峰值承载力之前曲线的上升段斜率和试件的峰值荷载、峰后延性逐渐增大。此外, 箍筋间距增大幅度相同, 但对于组合柱的轴压提高效果不同, 箍筋间距从 100 mm 减小至 50 mm 时, 组合柱的轴压性能提高幅度明显比箍筋间距从 150 mm 减小至 100 mm 时组合柱轴压性能的提高幅度大, 可见箍筋间距对于组合柱的轴压性能影响之大, 设计时应合理控制箍筋间距, 从而获得最优的轴压力学性能。

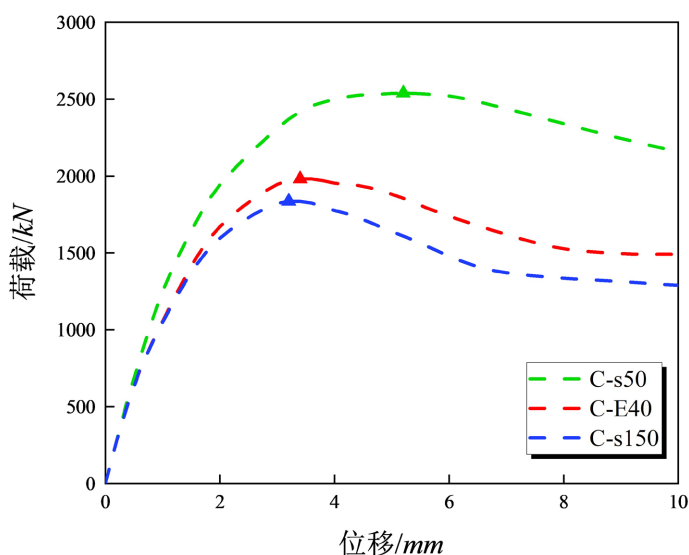


Figure 8. Stirrup spacing
图 8. 箍筋间距

4.3.3. 箍筋直径

通过后处理输出试件的荷载 - 位移曲线, 对比曲线上的特殊点值, 从而分析改变组合柱内箍筋直径对试件轴压力学性能的影响规律, 由图 9 和表 3 可知, 改变箍筋直径, 试件的初始刚度几乎无变化; 极限位移随箍筋直径增大而逐渐增大, 峰值荷载有所增大, 提高幅度较小, 均提高 4%, 试件峰后延性提高幅度较大, 变形能力依次提高 12%、20%, 这是由于箍筋直径增大, 单位体积的配箍量增大, 对构件核心区的约束效果增强, 因此增大箍筋直径可以提高组合柱轴压力学性能, 设计时应兼顾经济性合理选择

箍筋直径，从而获得最优的轴压力学性能。

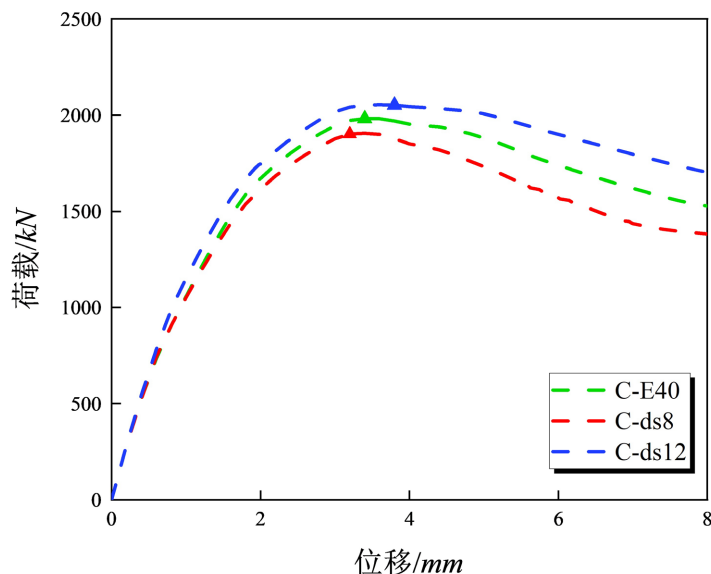


Figure 9. Stirrup diameter

图 9. 箍筋直径

Table 3. Axial pressure performance index of each specimens

表 3. 各试件轴压力学性能指标

试件编号	初始刚度/GPa	峰值荷载/kN	屈服位移/mm	极限位移/mm	延性指数 I
C-E30	1418.1	1820.91	2.05	6.94	3.38
C-E40	1418.1	1981.58	2.16	6.44	2.99
C-E50	1418.1	2082.44	2.15	6.23	2.90
C-s50	1420.6	2539.33	2.62	10.01	3.83
C-s150	1417.4	1836.27	2.01	5.51	2.74
C-ds8	1416.9	1905.62	2.11	5.61	2.66
C-ds12	1419.4	2054.19	2.10	7.52	3.59

5. 结束语

本文基于有限元数值模拟，研究了改变 ECC 强度、箍筋间距、箍筋直径对 ECC-RC 组合柱轴压力学性能的影响规律，主要研究结论如下：

(1) 轴压荷载下 ECC-RC 组合柱的破坏过程分为三个阶段：弹性阶段、弹塑性阶段、破坏阶段。ECC-RC 组合柱各组成部分之间粘结性能良好，具有较好的组合效应。

(2) 增大 ECC 强度可一定程度上提高 ECC-RC 组合柱的承载力，但会削弱试件的延性；增大箍筋直径，试件的初始刚度略有增大，峰值承载力有所提高，屈服位移、极限位移均随之变化，试件的延性随之变好。

(3) 改变箍筋间距对组合柱的轴压力学性能影响较大。随箍筋间距减小组合柱的初始刚度略有增大，承载力、延性均得到有效提高；但减小箍筋间距，组合柱的峰值承载力、延性的提高幅度增大。

参考文献

- [1] Li, V.C. (2004) High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites as Durable Material for Concrete Structure Repair/Faser verstärkte, Zement gebundene, zusammen gesetzte Hochleistungswerkstoffe für das dauerhafte Instandsetzen von Betontragwerken. *Restoration of Buildings and Monuments*, **10**, 163-180. <https://doi.org/10.1515/rbm-2004-5844>
- [2] Li, C.V., Wang, S., et al. (2001) Tensile Strain-Hardening Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite (PVA-ECC). *Materials Journal*, **98**, 483-492. <https://doi.org/10.14359/10851>
- [3] Kanda, T. and Li, V.C. (2006) Practical Design Criteria for Saturated Pseudo Strain Hardening Behavior in ECC. *Journal of Advanced Concrete Technology*, **4**, 59-72. <https://doi.org/10.3151/jact.4.59>
- [4] Bian, Y., Xiong, F., Liu, Y. and Ge, Q. (2023) Flexural Performance of Novel ECC-RC Composite Sandwich Panels. *Engineering Structures*, **292**, Article ID: 116547. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116547>
- [5] Gencturk, B., Elnashai, A.S., Lepech, M.D. and Billington, S. (2013) Behavior of Concrete and ECC Structures under Simulated Earthquake Motion. *Journal of Structural Engineering*, **139**, 389-399. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000667](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000667)
- [6] Hosseini, F., Gencturk, B., Aryan, H. and Cadaval, G. (2018) Seismic Behavior of 3-D ECC Beam-Column Connections Subjected to Bidirectional Bending and Torsion. *Engineering Structures*, **172**, 751-763. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.054>
- [7] 单奇峰, 潘金龙, 陈俊涵. 钢筋增强 ECC/混凝土组合柱压弯性能分析(英文) [J]. 东南大学学报(英文版), 2015(2): 259-265.
- [8] 褚颜贵, 刘泽军, 李艳, 程格格. 箍筋约束 ECC 方形截面短柱轴心受压力学性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(1): 203-211.
- [9] Gul, M.A.A., Khan, S.W., Ishaq, M., Khan, F.A., Shahzada, K. and Gul, M.S.A. (2023) Structural Behaviour of RC-ECC Beam-Column Connections under Quasi-Static Loading. *Materials Today Communications*, **35**, Article ID: 105763. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105763>
- [10] Xu, L., Pan, J. and Cai, J. (2019) Seismic Performance of Precast RC and RC/ECC Composite Columns with Grouted Sleeve Connections. *Engineering Structures*, **188**, 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.022>
- [11] Pan, Z., Zhu, Y., Qiao, Z. and Meng, S. (2020) Seismic Behavior of Composite Columns with Steel Reinforced ECC Permanent Formwork and Infilled Concrete. *Engineering Structures*, **212**, Article ID: 110541. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110541>
- [12] 顾雯. ECC 增强装配式混凝土剪力墙结构设计参数分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [13] 王景全, 王震, 高玉峰, 等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展: 新材料、新理念、新应用[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 1-23.
- [14] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [15] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(10): 1369-1373.
- [16] 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>
- [17] 李志杰, 姜瑞双, 李利, 等. 粉煤灰基灌浆材料在装配式桥墩连接部位中的应用[J]. 山东交通科技, 2022(2): 12-15.
- [18] 胡彦辉, 岳清瑞, 张耀凯. 高强灌浆料在结构加固修补技术中的应用[J]. 工业建筑, 1999, 29(6): 58-59.
- [19] 程格格. 箍筋约束 ECC 方形截面短柱力学性能试验研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南理工大学, 2016.
- [20] GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [21] 冯鹏, 强翰霖, 叶列平. 材料、构件、结构的“屈服点”定义与讨论[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 36-46.
- [22] Park, R. (1988) State of the Art Report Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, 2-9 August 1988, 605-616.