FRP约束ECC核心轴压力学 性能数值仿真分析

刘诗雨1,陈作银2,刘少华2,彭光达2,张玉彬3,田 纲4,张瑞朋4,许维炳1

¹北京工业大学建筑工程学院,北京 ²北京国道通公路设计研究院股份有限公司,北京 ³中国铁路北京局集团有限公司北京工务段,北京 ⁴中铁一局集团第二工程有限公司,河北 唐山

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

本文提出了一种由FRP管、中心筋和ECC材料组合形成的纵向受力组件(FRP约束ECC核心,FCEC),通过数值模拟研究了其轴压力学性能。数值模拟结果显示:以D50T3-R10为基准试件,在中心筋倾斜角度处于5°至8°范围时,对结构承载力的影响较为有限,承载力降低幅度在1.8%至4.47%之间;当中心筋直径从10mm增大至14mm~18mm时,结构承载力可提高13.5%;而将FRP管厚度由2mm增大至3mm~5mm,承载力提升幅度可达23.6%至63.2%。

关键词

FRP约束ECC,数值模拟,轴压力学性能

Research on Numerical Simulation Analysis of the Axial Compression Mechanical Properties of the FRP-Confined ECC Core

Shiyu Liu¹, Zuoyin Chen², Shaohua Liu², Guangda Peng², Yubin Zhang³, Gang Tian⁴, Ruipeng Zhang⁴, Weibing Xu¹

¹College of Architecture and Civil Engineering of Beijing University of Technology, Beijing ²Beijing National Highway Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing ³Beijing Construction Section of China Railway Beijing Bureau Group Co., Ltd., Beijing ⁴China Railway First Bureau Group No. 2 Engineering Co., Ltd., Tangshan Hebei Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

This thesis proposes a longitudinal load-bearing component (FRP-confined ECC core, FCEC) formed by the combination of FRP pipes, central reinforcement, and ECC materials, and studies its axial compression mechanical properties through numerical simulation. The numerical simulation results show that: taking the D50T3-R10 as the reference specimen, when the inclination angle of the central reinforcement is in the range of 5° to 8° , the influence on the structural bearing capacity is relatively limited, and the reduction range of the bearing capacity is between 1.8% and 4.47%. When the diameter of the central reinforcement is increased from 10 mm to 14 mm~18 mm, the structural bearing capacity can be increased by 13.5%. Moreover, when the thickness of the FRP pipe is increased from 2 mm to 3 mm~5 mm, the increase range of the bearing capacity can reach 23.6% to 63.2%.

Keywords

FRP-Confined ECC, Numerical Simulation, Axial Compression Mechanical Properties

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/

CC O Open Access

1. 引言

钢筋混凝土结构因成本低、承载力高等优势,在土木等工程领域广泛应用。但在沿海、近海及岛礁 环境下,其面临海水氯离子侵蚀与地震作用的双重挑战:氯离子腐蚀致使钢筋锈蚀、混凝土开裂,地震 作用下混凝土保护层剥落、钢筋屈曲,严重降低结构耐久性与承载力。

纤维增强复合材料(FRP)具有轻质、高强、耐腐蚀等特性,是替代传统钢筋的理想材料[1],但其受压性能不足限制了在混凝土柱中的应用[2]-[4]。工程水泥基复合材料(ECC)具备超高延性与强耗能特性,能抑制钢筋锈蚀,提升结构耐久性[5],然而造价较高阻碍其推广[6]。近年来,部分学者提出 FRP-混凝土组合筋[7] [8]及 FRP 约束混凝土包芯筋[9]概念,但相关力学性能与损伤失效机理尚不明晰,限制了实际应用。

鉴于此,本文提出 FRP 约束 ECC 核心(FRP Confined ECC Core,简记为 FCEC)纵向受力组件,基于 ABAQUS 平台建立了其数值模型,进而探究了中心筋倾斜角度及直径、FRP 管厚度对其轴压力学性能的 影响。

2. FRP 约束 ECC 核心系列组件构成

FRP 约束 ECC 核心(FCEC)包括无内嵌筋的 FRP 约束 ECC 核心(FCEC-O)、内嵌钢筋的 FRP 约束 ECC 核心(FCEC-R)和内嵌 FRP 筋的 FRP 约束 ECC 核心(FCEC-FR)三种组件形式。所有试件直径分别为 40 mm 或者 50 mm,高度均为对应直径的 2 倍,填充灌浆料均为 ECC 材料,见图 1。

为方便参考,每个试件用 3 组代码作标记,每组代码之间用字符"-"连接,第一个代码表示 GFRP 管外径以及壁厚;第二个代码表示中心钢筋或 FRP 筋的直径(其中 O 表示无中心筋)。例如 D50T3-R10 是 指 GFRP 管外径为 50 mm、管厚度为 3 mm 以及中心钢筋的直径为 10 mm 的试件。



Figure 1. Parameters of specimens 图 1. 试件参数

3. FRP 约束 ECC 核心轴压力学性能仿真分析

3.1. 材料本构选取

3.1.1. ECC 本构

通常用的 ECC 单轴受拉本构模型有不包含软化段的三折线模型和双折线模型,但是这些模型忽略了 软化段,即 ECC 材料的非线性特性,无法描述 ECC 材料微观的损伤状态。本文 ECC 材料的单轴受拉本 构模型采用包含软化段的三折线模型[10][11],该模型包含弹性段(OA),此阶段为从零点到开裂之前,应 力应变曲线为线弹性;硬化段(AB),此阶段为开裂后的应力应变曲线,为直线;和软化段(BC),此阶段 本构曲线开始下降直至断裂。ECC 单轴受压本构模型参考袁方[12]课题组提出的单轴压缩荷载下 ECC 材 料的本构模型定义材料特性,应力 - 应变曲线为多段线性曲线,如图 2 所示,本构关系可用式(1)表示。



Figure 2. Unconfined ECC constitutive relationship curve 图 2. 无约束 ECC 本构关系曲线

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

$$(1)$$

3.1.2. 钢筋本构

钢筋模型采用弹塑性双折线模型,其应力-应变曲线分为两段斜线,分别表示钢筋的弹性段和硬化段,其应力-应变关系表达式为:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon & \varepsilon \le \varepsilon_y \\ f_y + 0.01 E_s \left(\varepsilon - \varepsilon_y\right) & \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases}$$
(2)

式中, E_s 为钢筋弹性模量; ε_y 为钢筋屈服应变; f_y 为钢筋屈服强度; $\varepsilon_{s,u}$ 为钢筋极限应变; $f_{s,u}$ 为钢筋 极限强度。

3.1.3. GFRP 筋本构

GFRP 筋采用双折线模型,应力-应变关系为:

$$\sigma_{f=} \begin{cases} \varepsilon_f E_{frp} & \varepsilon_f \leq \varepsilon_u \\ \sigma_u & \varepsilon_f > \varepsilon_u \end{cases}$$
(3)

式中, σ_f 为 GFRP 筋应力; E_{fp} 为 GFRP 筋弹性模量; ε_f 为 GFRP 筋应变; ε_u 为 GFRP 筋极限应变。

3.1.4. GFRP 管本构

GFRP 管考虑为双折线模型,在其应变值达到极限应变 ε_f 时,纤维断裂而不再承受荷载,其应力 – 应变关系为:

$$\sigma_{f} = \begin{cases} E_{fp} \varepsilon & \varepsilon \leq \varepsilon_{f} \\ \sigma_{f} & \varepsilon > \varepsilon_{f} \end{cases}$$
(4)

式中, σ_f : GFRP 管应力; ε : GFRP 管应变; E_{fre} : GFRP 管弹性模量; ε_f : GFRP 管极限应变。

3.2. 几何模型单元类型及网格划分

本节采用有限元软件 ABAQUS 建立了 FRP 约束 ECC 核心的有限元模型,如图 3 所示。试件模型共包括三个不同部分,GFRP 管、ECC、内嵌筋。模型中,对 GFRP 管和 ECC 均采用 C3D8R 八结点线性六面体单元;钢筋和 GFRP 筋均采用 T3D2 两结点线性三维桁架单元。钢筋和 GFRP 筋均采用内置的方式嵌入到 ECC 中。所有模型的几何参数均参照试验试件尺寸建立。

在 ABAQUS 中模型网格的精细度对模型结果的敛散性和计算速度影响巨大。通常而言,单元网格形状越规则、尺寸越小,计算结果越精准。然而,网格划分得过密,不仅会大幅延长计算时间,还会导致结果难以收敛。所以,为兼顾结果准确性与计算收敛性,ECC 单元长度统一设定为 5 mm,内嵌筋(包括钢筋和 FRP 筋)的单元长度统一设置为 20 mm。



Figure 3. Schematic diagram of FRP confined ECC core modeling 图 3. FRP 约束 ECC 核心建模示意图

3.3. 边界条件及加载制度

为实现对 FRP 约束 ECC 核心轴压模拟试件的精准加载与分析,需对试件两端采取特定设置。首先,将试件一端平面,涵盖 FRP 管、ECC 材料以及内嵌筋的所有自由度进行完全约束,以此为整个模拟体系提供稳定的基础支撑。另一端则设立参考点 RP-1,通过耦合,使参考点 RP-1 与 FRP 管、ECC 和内嵌筋紧密关联,确保在参考点 RP-1 施加的荷载能够均匀且同步地传递至试件各组成部分,为后续准确模拟轴压工况创造有利条件。

加载方式采用位移加载的方式来施加荷载,通过仔细参考试验所获得的应变数据,在参考点 RP-1 处精确设置大小为 2 mm 的轴向压缩位移。

3.4. 破坏现象分析

有限元模拟中 FCEC 短柱轴压破坏过程如图 4 所示。加载伊始, FCEC 短柱处于弹性阶段, FRP 管、 ECC 以及中心筋共同承受轴向力, 三者应力均随荷载线性攀升。随着荷载逐步增加, 中心筋率先屈服, 其应力随之降低, 而应变则持续增大, 直至中心筋发生屈曲现象。随后, FRP 管也达到屈服状态, 进而 宣告破坏。失去 FRP 管约束和中心筋支撑的 ECC, 在剩余荷载的作用下, 内部结构迅速被破坏, 导致 FCEC 短柱彻底丧失承载能力, 整个短柱破坏过程完成。

3.5. 研究工况

在研究 FRP 约束 ECC 核心的轴压力学性能时,以 D50T3-R10 为基准试件,着重分析中心筋倾斜角度、中心筋直径以及 FRP 管厚度这三个关键参数对其轴压力学性能产生的影响。具体的工况设置如下表 1 所示。

议 1. 岁奴天王			
参数类型		具体数值	
中心筋倾斜角度	0°	5°	8°
中心筋直径	10 mm	14 mm	18 mm
FRP 管厚度	2 mm	3 mm	5 mm

Table 1. Types of parameters 表 1. 参数类型



Figure 4. FRP confined ECC core shaft compression failure process 图 4. FRP 约束 ECC 核心轴压破坏过程



Figure 5. The influence of inclination angle of central reinforcement on peak bearing capacity 图 5. 中心筋倾斜角度对峰值承载力的影响

3.6. 参数影响分析

3.6.1. 中心筋倾斜角度

从图 5 可知,中心筋的倾斜程度对构件的承载力有着显著影响。其中,中心筋未倾斜时,构件的峰 值承载力最高;倾斜 5°时,峰值承载力次之;倾斜 8°时,峰值承载力最低。未倾斜状态下的承载力比倾 斜 5°、8°时分别高出 1.8%、4.47%。这一结果表明,在 FRP 约束 ECC 核心构件中,中心筋的倾斜会降低 构件的承载能力。这可能是因为中心筋倾斜改变了力的传递路径,导致构件内部应力分布不均匀,从而 削弱了整体的承载性能,在实际工程中应尽量保证中心筋处于未倾斜的理想状态。

3.6.2. 中心筋直径

从图 6 可以看出,在一定范围内调整中心筋直径,对提升构件的峰值承载力具有积极作用。具体而 言,中心筋直径为 14 mm 和 18 mm 的试件,其峰值承载力相较于直径为 10 mm 的试件,分别提高了 13.5% 和 13.95%。这表明适度增加中心筋直径,能够有效增强构件在承受轴向荷载时的承载能力。

对比 14 mm 和 18 mm 中心筋试件发现,二者峰值承载力差距不大,这可能是因为 18 mm 中心筋使 构件内力重分布更复杂,存在应力集中与不足的情况,无法显著提升整体承载力;而在峰值应变上,18 mm 试件比 14 mm 试件低一倍,原因在于 18 mm 中心筋使混凝土应力分布不均,导致构件提前破坏,进 而降低峰值应变。总体而言,虽然较大的中心筋直径在一定程度上有助于提升峰值承载力,但从上述分 析可知,它可能会对构件达到峰值承载力时的变形能力产生不利影响。



Figure 6. The influence of central reinforcement diameter on peak bearing capacity 图 6. 中心筋直径对峰值承载力的影响

3.6.3. FRP 管厚度

分别对 FRP 管厚度分别为 2 mm、3 mm、5 mm 的试件峰值承载力展开了对比。如图 7 所示,随着 FRP 管厚度的增加,试件的峰值承载力呈现出显著的递增趋势。FRP 管厚度为 3 mm、5 mm 时,其峰值 承载力相较于 FRP 管厚度为 2 mm 的试件分别提高了 23.6%、63.2%。更厚的 FRP 管能够在试件受压过 程中,更有效地抑制内部材料的变形发展,延缓材料的破坏进程。



Figure 7. The influence of FRP pipe thickness on peak bearing capacity 图 7. FRP 管厚度对峰值承载力的影响

4. 结论

本文提出并建立了 FRP 约束 ECC 核心组件 ABAQUS 数值模型,进而探究了中心筋参数、FRP 厚度 对组件轴压力学性能的影响,得出如下结论:

1) 中心筋参数影响显著:中心筋倾斜程度和直径对组件轴压力学性能有影响。在 5°~8°倾斜角度范围内,倾斜对承载力影响较小,未倾斜组件承载力比倾斜组件高 1.8%~4.47%;增加中心筋直径可提升承载力,但对延性不利,相较于 10 mm 直径,14 mm 和 18 mm 直径的中心筋,承载力分别提高 13.5%和 13.95%。

2) FRP 管参数影响显著: 增大 FRP 管厚度可显著提升试件承载力。FRP 管厚度从 2 mm 增至 3 mm、 5 mm 时,承载力分别提高 23.6% 和 63.2%。

基金项目

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] 黄泽华,朱尚清,荚瑞馨,等.纤维增强复合材料(FRP)配筋混凝土结构研究综述[J]. 市政技术, 2024, 42(6): 160-173.
- [2] Ali, M.A. and El-Salakawy, E. (2016) Seismic Performance of GFRP-Reinforced Concrete Rectangular Columns. *Journal of Composites for Construction*, 20, 667-680. <u>https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000637</u>
- [3] Zadeh, H.J. and Nanni, A. (2013) Design of RC Columns Using Glass FRP Reinforcement. Journal of Composites for Construction, 17, 294-304. <u>https://doi.org/10.1061/(asce)cc.1943-5614.0000354</u>
- [4] de Luca, A., Matta, F. and Nanni, A. (2010) Behavior of Full-Scale Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Concrete Columns under Axial Load. *ACI Structural Journal*, **107**, 589-596.
- [5] Maruta, M., Kanda, T., Nagai, S. and Yamamoto, Y. (2005) New High-Rise RC Structure Using Pre-Cast ECC Coupling Beam. Concrete Journal, 43, 18-26. <u>https://doi.org/10.3151/coj1975.43.11_18</u>
- [6] Ding, M., Xu, W., Wang, J., Chen, Y. and Fang, R. (2023) Analytical Study on Seismic Performance of ECC Shell-RC

Column and Its Plastic Hinge Forming Mechanism. *Structures*, **58**, Article 105489. <u>https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105489</u>

- [7] 王立群. CFRP-PCPs 复合筋加固钢与混凝土连续组合梁抗弯性能静力试验研究[D]: [硕士学位论文]. 柳州: 广西 科技大学, 2022.
- [8] 罗云标, 吴刚, 吴智深, 等. 钢-连续纤维复合筋(SFCB)力学性能试验方法研究[C]//中国土木工程学会 FRP 及工 程应用专业委员会. 第五届全国 FRP 学术交流会论文汇编. 2007: 106-109.
- [9] 叶玉仪. 新型 FRP-UHPC 组合筋增强混凝土柱轴压性能研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2022.
- [10] Kabir, M.I., Lee, C.K., Rana, M.M. and Zhang, Y.X. (2019) Flexural and Bond-Slip Behaviours of Engineered Cementitious Composites Encased Steel Composite Beams. *Journal of Constructional Steel Research*, 15, 157-168. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.02.032
- [11] Deng, M. and Yang, S. (2020) Experimental and Numerical Evaluation of Confined Masonry Walls Retrofitted with Engineered Cementitious Composites. *Engineering Structures*, 207, Article 110249. <u>https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110249</u>
- [12] 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.